

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GEOLOGIE



*Polytechnique,
Premier Partenaire
Des Professionnels*

**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du
Diplôme d'Ingénieur Géologue**

**CARACTERISTIQUES
GEOTECHNIQUE ET CHIMIQUE
DES POZZOLANES DANS LA
REGION DE BETAFO**

Présenté par : RASAMOELA Mamitiana Felaniaina

Soutenu publiquement le Vendredi 10 Juin 2011 devant la commission de Jury composée de :

Président : Monsieur RASAMIMANANA Georges

Examineurs : Madame RAHARIJAONA RAHARISON Léa Jacqueline

Monsieur RAKOTONDRAIBE Nicolas Jacques

Monsieur ZOKIMILA Niainarivony Pierre

Rapporteur : Mr MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques

Promotion 2009



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
.....
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
.....



Polytechnique,
Premier Partenaire
Des Professionnels

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Géologue



Soutenu le Vendredi 10 Juin 2011 à 14h devant la commission de jury composée de :

Président : Monsieur RASAMIMANANA Georges
Rapporteurs : Monsieur MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques
 Monsieur FRANCHI Michel
Examineurs : Madame RAHARIJAONA RAHARISON Léa Jacqueline
 Monsieur RAKOTONDRAIBE Nicolas Jacques
 Monsieur ZOKIMILA Niainarivony Pierre
Présenté par : RASAMOELA Felaniaina Mamitiana

Promotion 2009

« Ma grâce te suffit »

II Cor 12⁹

« Ne crains rien, car Je suis avec toi »

Esaïe 41¹⁰

REMERCIEMENTS

En premier lieu, permettez-moi d'exprimer ma gratitude à Dieu tout puissant pour sa bénédiction, et pour m'avoir donné force, santé, et courage pour que j'aie pu terminer ce mémoire.

Je tiens aussi à exprimer mes vifs remerciements :

- au Professeur ANDRIANARY Philippe Antoine, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo qui m'a bien permis d'être parmi les étudiants bénéficiant des formations d'ingénieurs dans son établissement et pour m'avoir permis de soutenir ce mémoire ;
- à Monsieur RAKOTONDRAINIBE Simon Richard, Chef de Département de la Géologie ;
- à Monsieur RASAMIMANANA Georges, Président de Jury de ce mémoire
- à Monsieur FRANCHI Michel, Directeur de la société GEO-ECO Consult, mon encadreur professionnel ;
- à Monsieur MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques, mon encadreur, pour l'efficiences de son encadrement, pour son bienveillance au bon déroulement de ce travail, et qui n'avait aménagé ni son temps, ni ses expériences pratiques pour m'apporter ses précieux conseils, afin de mener à terme ce mémoire,

Je tiens à témoigner toute ma gratitude à :

- Madame RAHARIJAONA RAHARISON Léa Jacqueline, Géologue, Maître de conférence à l'ESPA ;
- Monsieur RAKOTONDRAIBE Nicolas Jacques, enseignant à l'ESPA,
- Monsieur ZOKIMILA Niainarivony Pierre, enseignant à l'ESPA,

pour leur amabilité de bien vouloir être les membres de jury de ce mémoire ;

Je tiens à remercier également,

- Mes parents, toute ma famille, pour m'avoir soutenue moralement, matériellement et financièrement tout au long de mes études et qui m'ont encouragée durant ce travail.
- Monsieur RAPHANOEL ANDRIAMANANTSALAMA Herizo, pour son aide durant la réalisation des essais au laboratoire de l'HOLCIM Ibity
- Les personnels de laboratoire de la société GEO-ECO
- Tous mes amis et mes collègues pour leur précieux aide
- Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cet ouvrage

Merci à tous

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	I
SOMMAIRE	II
LISTE DES ABREVIATIONS.....	III
LISTE DES TABLEAUX	IV
LISTE DES FIGURES.....	V
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PARTIE I : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE ET SUR LA POZZOLANE.....	2
CHAPITRE I : Généralités sur la zone d'étude : zone de Betafo	3
CHAPITRE II : Généralités sur les pouzzolanes	13
PARTIE II : TRAVAUX REALISES ET RESULTATS.....	23
CHAPITRE III : Observation morphologique et géologique de la zone.....	25
CHAPITRE IV : Essais géotechniques.....	32
CHAPITRE V : Analyses chimiques	57
PARTIE III : INTERPRETATIONS, RECOMMANDATIONS ET ETUDE ENVIRONNEMENTALE	62
CHAPITRE VI : Interprétation des essais géomécaniques.....	63
CHAPITRE VII : Interprétation des analyses chimiques	66
CHAPITRE VIII : Interprétation comparative	74
CHAPITRE IX : Etude environnementale	76
CONCLUSION.....	82
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	83
REFERENCES WEBGRAPHIQUES.....	85
ANNEXES I: POIDS SPECIFIQUE	i
ANNEXE II: ESSAI CBR.....	ii
ANNEXE III: MODE OPERATOIRE DES ANALYSES CHIMIQUES	xii
ANNEXE IV: SPECTRE DES ECHANTILLONS DE POZZOLANES	xiv
TABLES DES MATIERES	xvii

LISTE DES ABREVIATIONS

γ_d : poids volumique sec

γ_s : poids spécifique

°C : degré Celsius

μ : micron

AFNOR : Association Française de Normalisation

CBR : Californian Bearing Ratio

C_c : Coefficient de Courbure

C_u : Coefficient d'Uniformité

EIE : Etude d'Impacts Environnementaux

FD : Fragmentation Dynamique

FRX : fluorescence X

g : gramme

I_p : indice de plasticité

kg : kilogramme

kN/m^3 : kilonewton par mètre cube

l : litre

MDE : Micro – Deval en présence d'Eau

MECIE : Mise en Compatibilité des Investissements avec l'Environnement

mm : millimètre

MS : matériau sélectionné

RN : Route Nationale

W : teneur en eau

W_L : limite de liquidité

W_P : limite de plasticité

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Composition chimique moyenne de la pouzzolane	19
Tableau 2 : Description des points d'échantillonnage.....	30
Tableau 3 : teneur en eau des pouzzolanes.....	41
Tableau 4 : tableau des poids spécifiques.....	41
Tableau 5 : Tableau des indices de plasticité	42
Tableau 6 : Résultats des analyses granulométriques de l'échantillon 1.....	42
Tableau 7 : Résultats des analyses granulométriques de l'échantillon 2.....	43
Tableau 8 : résultats des analyses granulométriques de l'échantillon 3.....	44
Tableau 9 : Résultats des analyses granulométriques de l'échantillon 4.....	45
Tableau 10 : Résultats des analyses granulométriques de l'échantillon 5.....	46
Tableau 11 : Résultat d'essai Proctor pour l'échantillon 1.....	50
Tableau 12 : Résultat de l'essai Proctor de l'échantillon 2	51
Tableau 13 : Résultat de l'essai Proctor de l'échantillon 3	52
Tableau 14 : Résultat de l'essai Proctor de l'échantillon 4	53
Tableau 15 : Résultat de l'essai Proctor de l'échantillon 5	53
Tableau 16 : Tableau récapitulatif des résultats des courbes Proctor.....	54
Tableau 17 : Indice CBR avant imbibition.....	55
Tableau 18 : Indice CBR après imbibition.....	55
Tableau 19 : Indice CBR finale	55
Tableau 20 : Résultat des essais de fragmentation dynamique	56
Tableau 21 : Résultat des essais de MDE.....	56
Tableau 22 : Tableau récapitulatif de tous les résultats des essais géomécaniques.....	56
Tableau 23 : caractéristiques des couches dans les chaussées revêtues et non revêtues	57
Tableau 24 : classification LPC des échantillons de pouzzolanes.....	64
Tableau 25 : Dépouillement du spectre 1	66
Tableau 26 : Dépouillement du spectre 2	67
Tableau 27 : Dépouillement du spectre 3.....	67
Tableau 28 : Dépouillement du spectre 4	68
Tableau 29 : Dépouillement du spectre 5.....	69
Tableau 30 : Pourcentage des éléments majeurs des 5 échantillons.....	69
Tableau 31 : Composition chimique du ciment.....	70
Tableau 32 : résultats des analyses chimiques des pouzzolanes utilisés par Holcim	71
Tableau 33 : valeurs moyennes des éléments majeurs des pouzzolanes utilisées par HOLCIM	71
Tableau 34 : résultats des analyses chimiques des pouzzolanes aux alentours de Betafo.....	72
Tableau 35 : Tableau comparatif des différents résultats	73
Tableau 36 : résultats de MDE et de Fe	74
Tableau 37 : résultats de FD et de Fe	75
Tableau 38 : Tableau de comparaison entre les résultats de FD, MDE, et des éléments chimiques majeurs	75
Tableau 39 : Résumé des impacts négatifs lors des phases préparatoires et de construction.....	81
Tableau 40 : Résumé des impacts négatifs lors de la phase d'exploitation.....	81

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Localisation de Betafo.....</i>	<i>3</i>
<i>Figure 2 : Carrière de pouzzolane (Eric Faritiet - octobre 2004).....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 3 : Les centres d'émission volcaniques de Betafo (RASAMOELA M F – 2010).....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 4 : Volcan de type strombolien (klouky.free.fr/Histoire/les volcans).....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 5 : Formation des Pouzzolanes (klouky.free.fr/Histoire/les volcans)</i>	<i>15</i>
<i>Figure 6 : Les gisements de pouzzolanes à Madagascar (Moussa A.K ; 2007).....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 7 : Organigramme constituant la démarche du travail.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 8: Collines infectées par des lavakas (RASAMOELA M. F- 2010).....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 9: les plaines de Betafo (RASAMOELA M.F- 2010)</i>	<i>25</i>
<i>Figure 10: carte d'occupation de sol de Betafo.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 11: Observation morphologique de la zone d'étude (RASAMOELA M.F-2010)</i>	<i>27</i>
<i>Figure 12: les différentes couleurs de pouzzolanes</i>	<i>28</i>
<i>Figure 13: Carte géologique de Betafo (J.G.RAKOTOARIMANANA 1951 ; C ALSAC 1962).....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 14: carte d'échantillonnage (Geo&Eco, 2009)</i>	<i>31</i>
<i>Figure 15 : Composition du sol.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 16 : Représentation des limites d'Atterberg</i>	<i>34</i>
<i>Figure 17 : les étapes d'une analyse granulométrique</i>	<i>37</i>
<i>Figure 18 : Courbe granulométrique de l'échantillon 1</i>	<i>47</i>
<i>Figure 19 : Courbe granulométrique de l'échantillon 2</i>	<i>47</i>
<i>Figure 20 : Courbe granulométrique de l'échantillon 3.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure 21 : Courbe granulométrique de l'échantillon 4.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure 22 : Courbe granulométrique de l'échantillon 5.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 23 : Courbe Proctor de l'échantillon 1.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 24 : Courbe Proctor de l'échantillon 2.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 25 : Courbe Proctor de l'échantillon 3.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 26 : Courbe Proctor de l'échantillon 4.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 27 : Courbe Proctor de l'échantillon 5.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 28 : Organigramme de la mode opératoire de l'analyse chimique</i>	<i>59</i>
<i>Figure 29 : organigramme de l'analyse aux X-ray</i>	<i>61</i>
<i>Figure 30 : Courbe granulométrique pour la classification LPC</i>	<i>64</i>
<i>Figure 31 : Profil de chaussée.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure 32 : Migration du fer vers la surface, oxydation.....</i>	<i>74</i>

INTRODUCTION GENERALE

Il est connu depuis longtemps que certains matériaux possèdent la propriété de réagir à température ordinaire avec la chaux hydratée pour former des composés à caractère hydraulique. Ils sont appelés pouzzolanes et sont constitués principalement par de la silice, de l'aluminium et de fer.

A toute sorte de construction (routes, bâtiments, ponts, barrage....), l'utilisation du ciment est incontournable, voire obligatoire ; compte tenu du développement du secteur bâtiment et travaux publics, le besoin en ciment (430 000T/an) est notamment supérieur à la production locale (190 000 à 270 000T/an). (Ranaivoniarivo V. G. 2005).

La fabrication d'une certaine classe de ciment (CPJ) nécessite l'utilisation des pouzzolanes, roches qui n'existent que dans les régions volcaniques. Les pouzzolanes naturelles sont encore utiles en remplacement du laitier de haut fourneau des grandes usines.

A Madagascar, ces régions volcaniques sont très nombreuses et les plus réputées sont celles de Vakinankaratra plus particulièrement à Antsirabe et Betafo.

Les questions que nous nous posons sont :

- Quel type de pouzzolane est qualifié pour la fabrication de ciment ?
- Est-ce que les pouzzolanes de Betafo seraient classées parmi les matériaux nécessaires pour la construction ou la réhabilitation des routes à Madagascar ?

Pour répondre à ces questions nous avons fait le travail qui s'intitule ; « Les caractéristiques géotechniques et chimiques des pouzzolanes dans la zone de Betafo. »

Notre ouvrage est divisé en trois grandes parties où nous verrons en premier lieu les généralités sur la zone d'étude et sur les pouzzolanes, en second lieu, nous détaillerons les travaux réalisés et les résultats obtenus et enfin nous terminerons par les interprétations respectives, les recommandations et aussi une étude environnementale de la zone d'étude proprement dite.

PARTIE I : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE ET SUR LA POZZOLANE

CHAPITRE I : Généralités sur la zone d'étude : zone de Betafo

1.1.Localisation :

Notre zone d'étude se trouve à Betafo, dans le District de Betafo, Région de Vakinankaratra. Elle se trouve à 22km de la ville d'Antsirabe dans la partie Sud-Ouest de l'ex-province d'Antananarivo. Betafo fait partie des Hautes Terres Centrales de Madagascar.

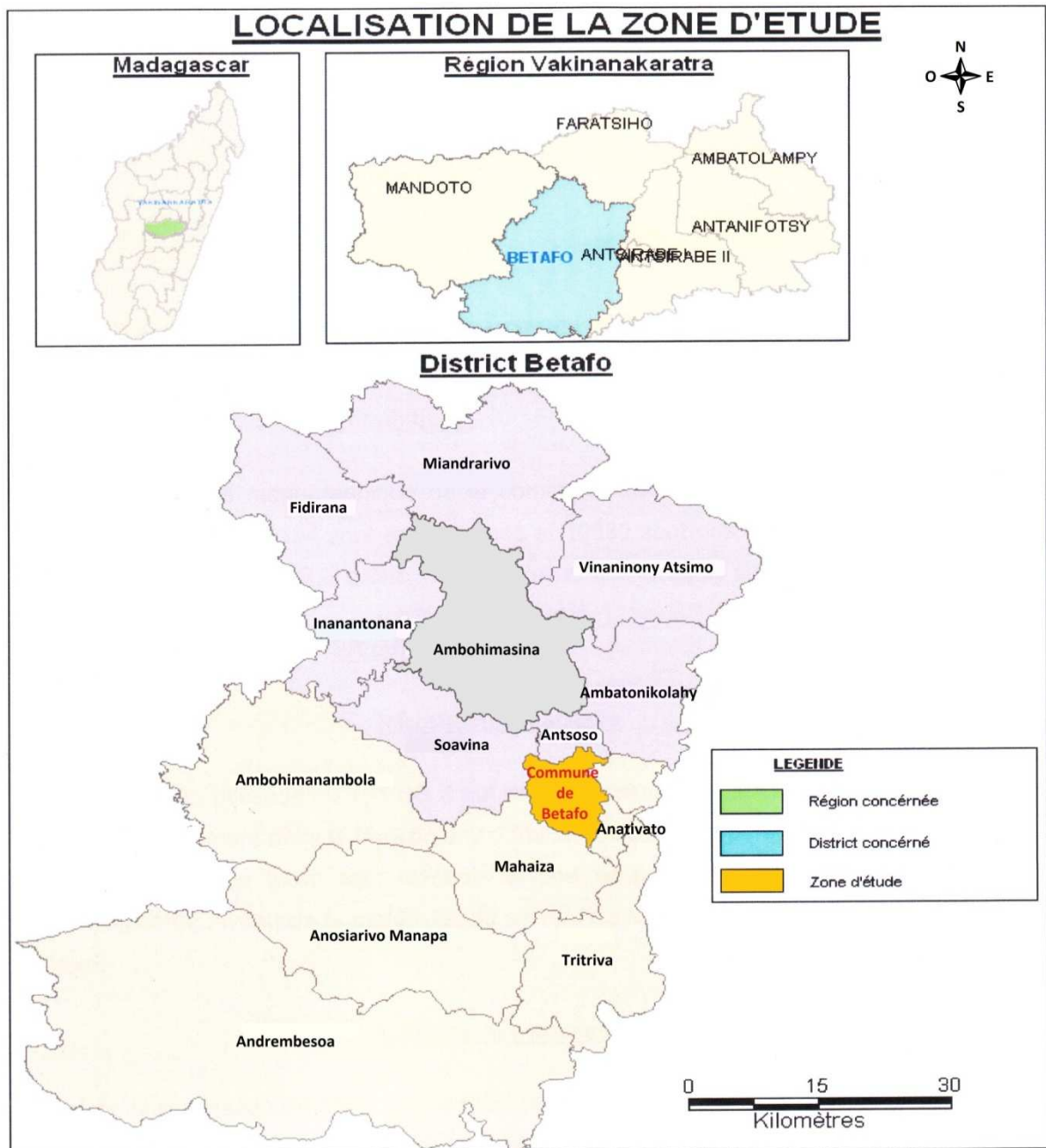


Figure 1 : Localisation de Betafo

1.2.Contexte géographique

1.2.1. Géographie physique

- Climat et végétation

Le climat de la région de Betafo est de type tropical d'altitude, avec deux saisons très marquées : un hiver austral, avec peu de pluie, et un été pluvieux. Les températures moyennes mensuelles varient entre 11° et 20°C. La pluviosité moyenne annuelle est de 1400 mm à 1500, répartie en 110 jours de pluies, dont 85 % de novembre à mars. La petite cuvette de Betafo, située entre 1 300 et 1 600 m, et enserrée dans des montagnes dépassant l'altitude de 1800 m, jouit d'un climat beaucoup plus doux que les environs. Les conditions écologiques ont entraîné en particulier des sols très favorables, riches en matières organiques. Une grande partie des besoins en eau est satisfaite. La baisse de température en altitude entraîne des différences dans les types de cultures. Le calendrier des cultures des parties basses de la cuvette est très flou, les époques de semis ou plantation s'étalent largement dans le temps.

- Reliefs et réseaux hydrographiques

La région de Betafo est marquée par l'existence des montagnes volcaniques les plus connues à Madagascar. Y compris le lac artificiel Tatamarina.

Le réseau hydrographique de la zone de Betafo est dichotomique ceci s'explique par la division du réseau en deux parties. (figure 10)

Comme cette région est volcanique, les éruptions sont précédées par des tremblements de terre aux environs du lieu d'émission volcanique. Ces tremblements peuvent provoquer des fissures ou même des failles ce qui explique les linéaments de certains réseaux hydrographiques. (par exemple dans la partie Sud-Ouest de la figure 10)

- Pédologie

Les sols dans la partie de Betafo sont considérés comme les sols les plus fertiles à Madagascar. Les projections volcaniques sont basiques ce qui explique cette fertilité. Les sols jeunes développés sur cendres et scories mélangées ou alternées sont de couleurs sombres dans leur partie supérieure. Cet horizon humifère a une épaisseur de 20 à 60 cm.

Cette épaisseur dépend du profil topographique : faible dans les parties hautes, importante dans les bas des pentes.

En dessous du sol organique se trouve le sol andique proprement dit. On passe assez rapidement au matériau volcanique peu altéré formé par des scories plus ou moins fines et litées. Mais avant cela, on trouve d'abord la zone de transition (ou horizon B) de 20 à 40cm d'épaisseur, de couleur brune à brun-jaune, de texture limono-sableuse et de consistance friable.

Puis on passe vers 1m de profondeur aux scories altérées de couleur jaunâtre, d'aspect sablo-gravillonnaire, avant d'arriver aux scories litées non altérées de couleur plutôt noirâtre souvent assez compactes et peu pénétrables par les racines.

1.2.2. Géographie économique

Betafo est une région à vocation agricole et élevage. Ces secteurs occupent l'essentiel de la population active. L'artisanat est un troisième secteur qui se favorise de plus en plus.

- Agriculture

L'agriculture est la principale activité de la commune de Betafo avec la prédominance de la culture vivrière : riz, manioc, maïs, pomme de terre, carotte et fruits et des cultures industrielles telles que l'orge et le tabac.

- Elevage

L'élevage des volailles est le plus dominant par rapport à l'élevage bovin et porcin. Peu de gens élèvent des moutons et des chèvres.

1.2.3. Géographie humaine

Betafo compte actuellement 27974 habitants. On peut dire que la population de Betafo est relativement jeune avec 50,36% des gens qui ont l'âge entre 0 et 17 ans. C'est aussi une population active car le nombre des individus d'âge de 10 à 60 ans est plus de 54 %.

L'effectif des femmes est supérieur à celui des hommes et cette population féminine représente les 51 % de la population totale de Betafo.

1.3.Approche géologique [15]

1.3.1. Aux alentours d'Antsirabe

A Antsirabe se termine la haute chaîne volcanique de l'Ankaratra avec un cortège de volcans récents aux formes bien conservées, soit perchés sur les massifs granitiques dominant Betafo, soit bordant la grande plaine du bassin lacustre. Les abondantes projections de cendres volcaniques ont donné des sols riches, très cultivés, qui contrastent heureusement avec la maigre prairie des collines latéritisées du socle cristallin. Le bassin d'Antsirabe est limité au Sud par les hauts sommets déchiquetés des quartzites du Mont Ibity.

La région d'Antsirabe comporte les formations suivantes :

- **Un vieux socle migmatisé** avec des intercalations granitiques. La monazite alluviale du Sud-Est d'Antsirabe, par datation aux isotopes du plomb, fixe à près de 2600 millions d'années l'orogénèse majeure ayant affecté et migmatisé ces vieux terrains.

Le vieux socle est très latéritisé. Il est constitué de migmatite lit-par-lit renfermant par endroit des bancs graphiteux avec des bancs de granite stratoïde.

- **Les granites des Vavavato** résultant en partie de la granitisation d'une ancienne formation basique et renfermant des zircons.

Le gros massif de Vavavato au Nord de Betafo, constitue une énorme masse granitique bordée de migmatites qui se sépare nettement du vieux socle. Le granite présente des caractères particuliers avec des enclaves de roches basiques plus ou moins transformées et par son association avec des migmatites riches en intercalations et intrusions et basiques (amphibolites, pyroxénites, diorites, gabbros, norites). La bordure des massifs renferme des pegmatites uranifères (samirésite)

- **Les pegmatites uranifères à béryl**

Ces pegmatites offrent tout un cortège de minéraux rares avec des niobotantalates d'urane (bétafite, auxénite, ampingabéite, etc.) et du béryl gomme. Elles sont surtout fréquentes en bordure des granites des Vavavato. Les seules pegmatites aisément accessibles à pied, mais à peu de distance des routes, sont celles de Samiresy (Sud Tritriva) et de Tomboarivo (route du Sud).

- **Les granites intrusifs de l'Ibity** datés de 550 millions d'années par leurs zircons

Ce sont ces pegmatites qui ont fait la réputation de Madagascar, pays des béryls. De petite dimension, elles renfermaient des cryptes à cristaux qui ont fourni des gemmes magnifiques, béryls bleus et roses, tourmalines de diverses couleurs, grenat spessartite, triphane, etc...

- **Les pegmatites sodolithiques à gemmes** dont l'âge s'échelonne entre 650 et 500 millions d'années.

- **Le système lacustro-volcanique** néogène et quaternaire

Les importantes manifestations volcaniques qui constituent, sur 100 km de longueur, la chaîne de l'Ankaratra se terminent au Sud dans la région d'Antsirabe. Elles ont débuté au Néogène pour se terminer au Quaternaire très récent. Accompagnées de mouvements verticaux (failles), elles sont déterminées par la formation de lacs tectoniques ou de barrages, en particulier le grand lac Sambaina-Antsirabe, dans lesquels se sont sédimentés des dépôts lacustres et des projections volcaniques avec parfois intercalations de coulées. Le lac Sambaina-Antsirabe résulte d'un effondrement limité à l'Est par la grande faille Sambaina-Haute Manandona, en partie relayée par la faille du Mandray. Dans la plaine d'Antsirabe, l'épaisseur des sédiments lacustres atteint 80 mètres en certains points. Lacustre et volcanisme sont étroitement imbriqués surtout dans le Néogène et au début des émissions.

- **Le complexe schisto-quartzo-calcaire**

Ce complexe, formé de micaschistes, de schistes, de quartzites et de cipolins, constitue un ensemble très distinct dont on pourra toucher la base sur la route au Sud du lac Tritriva et qui est bien mieux exposé dans la région de l'Ibity.

En nous référant aux données actuelles, ce complexe comprend à la base, des micaschistes ou des schistes dans lesquels se développent irrégulièrement et avec un développement variable, des bancs de cipolins et de quartzites et, au sommet, une puissante série quartzitique constituant le sommet de l'Ibity.

1.3.2. Le système volcanique

Le système volcanique de l'Ankaratra comprend les phases principales suivantes :

- **Premières éruptions trachytiques et phonolitiques**

Les trachytes et les phonolites sont facilement accessibles à l'Est d'Antsirabe, le long de la route de Soanindrariny. A 24 km d'Antsirabe se dresse le beau piton trachyphonolitique du Vontovorona avec des affleurements déroctés au bord de la route. Il est entouré de coulées basaltiques. Entre le Vontovorona et Soanindrariny la route contourne un petit dôme trachytique. C'est surtout à l'Est de Soanindrariny que les trachytes prennent de l'extension avec plusieurs petits pitons phonolitiques émergeant des coulées basaltiques.

- **Eruptions basaltiques**

Une coulée de basalte traverse la route Tananarive-Antsirabe au K. 157. D'anciens centres d'émission très démantelés se trouvent en bordure Est de la faille du Mandray. Une belle cheminée basaltique avec des prismes, exploitée en carrière se trouve sur le plateau à quelques centaine de mètres du sommet de la côte de la route du Vontovorona (7 kilomètres Est Antsirabe).

Des basaltes doléritiques affleurent sur les collines encadrant la Manandona immédiatement à l'Est du pont du K. 190 de la route du Sud. La route de l'Ibity partant de Vinaninkarena montre au premier pont un beau basalte à augite.

- **Eruptions d'ankaratrites**

Les Ankaratrites localisées au sommet de l'Ankaratra n'atteignent pas la région d'Antsirabe.

- **Eruptions finales de basanitoïdes et basanites avec volcans à formes bien conservées**

Les basanites et basanitoïdes se sont épanchées à partir des nombreux volcans récents, formes bien conservées, situés entre Antsirabe et Betafo. Les chaines des puys d'Iavoko, à 4 kilomètres à l'Est de Betafo qui traversent la route d'Antsirabe sont constituées par des basanitoïdes à olivines et augite.

Les environs d'Antsirabe-Betafo montrent de beaux types volcaniques avec puys stromboliens intacts ou légèrement égueulés. Il faut citer les cônes du Vohitra, ceux d'Amboniloha et d'Ambohitsitorika bordant le lac Andranobe, le beau complexe de l'Iavoko à l'Est de Betafo au pied duquel partent des coulées d'une fraîcheur parfaite. Le lac de cratère de Tritriva correspond à une cheminée traversant à l'emporte-pièce les migmatites du socle et le

cône de projection. Le lac Andraikiba remplit un vaste cratère vulcanien sur les bords duquel affleurent des basanitoïdes.

Les dernières éruptions ont été accompagnées d'importantes projections de lapillis aux abords des puits et de cendres abondantes qui ont recouvert toute la zone Antsirabe-Betafo. L'altération de ces dernières a donné des sols riches qui tranchent nettement sur la médiocrité des sols d'argiles latéritiques recouvrant le socle.

De beaux affleurements de lapillis (pouzzolanes) sont visibles en bordure du Iavoko sur la route de Betafo (figure 2) et aux environs de Tritriva.



Figure 2 : Carrière de pouzzolane (Eric Faritiet - octobre 2004)

- **Les sédiments lacustres**

Ils sont essentiellement argileux, avec des sables et des produits de projections cendreux. Ils montrent une histoire complexe avec des sédimentations perturbées par des discordances, des conglomérats, des grès entrecroisés, des failles.

Les sédiments les plus récents ont fourni, à Antsirabe même, de nombreux restes de la faune subfossile (Hippopotames, Aepyornis, Lémuriens).

- **Sources thermales et mofettes de gaz carbonique**

Les sources les plus abondantes se trouvent dans la ville d'Antsirabe dans la dépression entaillant les sédiments lacustres actuellement occupée par le lac et le parc de Ranovisy. Les eaux sont bicarbonatées sodiques, légèrement chlorurées, analogues à celles de Vichy. Ces eaux, amenées par des fractures du socle et accompagnées de gaz carbonique sont emprisonnées dans les zones perméables des sédiments lacustres. Elles arrivent à la surface déposent des travertins. Le lac artificiel d'Antsirabe a été créé pour régulariser la pression gazeuse. Les eaux sont captées par sondages dans des lentilles sableuses. Les flancs faillés de la colline d'Ampataka présentent plusieurs sources dont l'une a été captée près du pont de Sahatsiho. L'eau est bicarbonatée sodique et légèrement ferrugineuse. Un autre groupe de sources constitue groupe de Vinaninkarena sur les bords de la Sahatsiho et de la Manandona. Elles sont très riches en gaz carbonique ; la source dite Visikely y est exploitée.

Le gaz carbonique est exploité à Antsirabe (sondage source Crystal) et à l'Ouest de la ville par captage des venues naturelles à la surface (Brasserie d'Antsirabe).

1.3.3. Les environs de Betafo

Les environs de Betafo renferment de nombreux centres d'émissions volcaniques (basanites ou basanitoïdes) d'âge quaternaire. Les uns correspondent à des cônes très conservés, les autres à des dômes plus ou moins aplatis. (figure 3)



Figure 3 : Les centres d'émission volcaniques de Betafo (RASAMOELA M F – 2010)

La partie volcanique de Betafo est recouverte de cinérites, plus ou moins remaniés qui forment un épais manteau superficiel. Les dernières éruptions de cette région datent du Pléistocène et certains appareils sont remarquablement conservés, qu'il s'agisse de centres éruptifs ou de coulées.

Le plus souvent, on retrouve des cônes stromboliens (c'est-à-dire les volcans sont de type stromboliens) égueulés.

La force de la lave est peu forte que les lapillis et les cendres volcaniques se répandent juste au pied des centres d'émission. Les cônes de projection sont en scorie et les coulées sont longues et étroites.

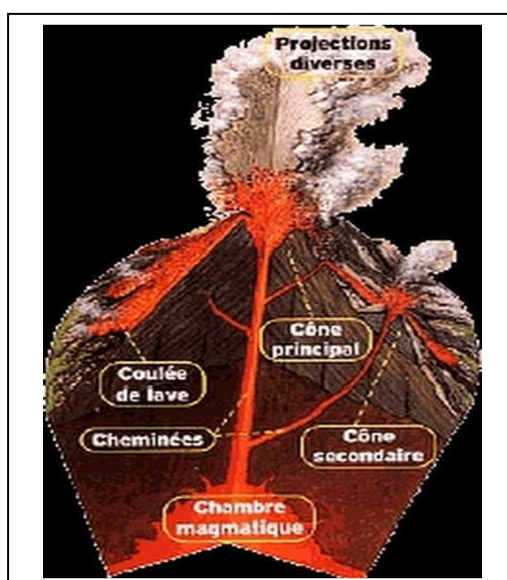


Figure 4 : Volcan de type strombolien (klouky.free.fr/Histoire/les volcans)

Les pouzzolanes sont extrêmement abondantes, localisées au pied des centres d'émission, mais elles n'affleurent que rarement : à la faveur des érosions naturelles, des tranchées ou de fossés de routes.

La zone qui paraît la plus intéressante pour le gisement de pouzzolane se trouve à l'Est de Betafo (entre le PK17 et 19).

Les abondantes projections de cendres volcaniques ont donné des sols riches et très cultivés.

En dehors de ces manifestations quaternaires, se trouve le socle constitué au Nord-Est par le massif granitique de Vavavato et dans les bordures Sud et Est par les massifs des roches métamorphiques avec quelques affleurements de gabbros de migmatites . Des fragments de socle apparaissent au milieu des coulées volcaniques, à l'est et au nord-est de Betafo. Le Sud de Betafo est formé uniquement par le socle, au milieu duquel pointe un neck, le Vohimalaza, ancien site historique, puissamment fortifié.

Les roches volcaniques rencontrées dans la région Antsirabe-Betafo sont les suivantes

- basaltes : coulées de laves ;
- matériels volcano-clastiques grossiers (bombes, éjecta de laves) généralement soudés qui sont localisés proche des cheminées volcaniques ;
- lapillis de 1 à 3 cm de diamètre, poreux, généralement meuble ou faiblement cimentés distribués à une certaine distance du cône volcanique.

L'altération des roches volcaniques a produit des argiles et des minéraux d'altération de couleur généralement jaunâtre à rougeâtre.

La zone de Betafo consiste en plusieurs cônes volcaniques séparés par un large plateau formé par les éjectas volcaniques des diverses cheminées.

CHAPITRE II : Généralités sur les pouzzolanes

2.1. Quelques définitions de pouzzolanes

1- Le terme pouzzolane désigne tout matériau tant naturel qu'artificiel riche en silice et alumine apte à réagir en température ambiante avec la chaux en solution aqueuse afin de donner naissance à des produits ayant de propriétés liantes, principalement des silicates et aluminates de calcium. (RAJAONARISON Eddy Frank)

2- C'est aussi une roche naturelle constituée par des scories (projections) volcaniques basaltiques ou de composition proche. Elle possède une structure alvéolaire. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise. Ce sont des matériaux légers de densité inférieure à 1, poreux, abrasifs, réfractaires et isolants. ([www.auvergne.volcan.com:liens.htm](http://www.auvergne.volcan.com/liens.htm))

3- Le terme « pouzzolane » vient du latin *pelvis puteolana*, désignant les sables de Pouzzoles ancienne Dikearchie (Cité de la Justice), port italien riche en sable volcanique, situé au pied du Vésuve au nord du golfe de Naples. Les pouzzolanes ainsi nommés d'après la région de Pouzzuoli en Italie sont des cendres riches en silice et alumine, pauvres en chaux, claires et friables.

4- Par analogie lointaine aux sables de pouzzoles, on baptise pouzzolane le débris de feu ou pyroclastites provenant des éruptions volcaniques, les pouzzolanes sont donc des fragments de magma projeté dans l'atmosphère. (RAZAFINDRATSIMBA Onisoa et RAMARIMANANA Niçaisse)

5- Les pouzzolanes sont des cendres trachytiques, rhyolitiques, leucitiques, ou rarement basaltiques, claires et friables, représentant l'élément fin de certaines projections volcaniques riches en silice et aluminés et donnant des propriétés hydrauliques mélangé avec de la chaux, formant alors une masse.

6- Les pouzzolanes, en général, sont des produits riches en éléments colloïdaux (silice, alumine...) aptes à donner soit des composés hydrauliques avec la chaux, soit des gels, suivant de processus d'ailleurs souvent indirect.

7- La présence de la chaux libre apparaît nécessaire qu'il s'agisse d'une union directe de cette base avec les éléments acides de la pouzzolane, ou qu'il s'agisse d'un intermédiaire permettant l'hydratation et la précipitation des gels hydratés. (M.DURIEZ et J.ARRAMBIDE).

8- D'après H. BESAIRIE, le qualificatif de pouzzolane n'est pas un terme pétrographique défini. Le nom de pouzzolane est une dénomination technique qui se rapporte à des roches diverses et aussi à des produits artificiels de nature silico-alumineuse caractérisée par une très grande affinité pour la chaux.

9- Les pouzzolanes sont des roches incohérentes formées par des granules qui sont les lapillis et aussi des projections fines qui sont les cinérites.

10- La pouzzolane peut aussi se définir comme une roche siliceuse, faiblement agglomérée.

2.2.Mode de formation des pouzzolanes

La pouzzolane appartient à la famille des roches éruptives. C'est-à-dire que c'est une roche provenant de la consolidation du magma émanant des profondeurs de l'écorce terrestre.

Dans la pouzzolane on trouve des scories qui indiquent la profondeur du magma qui l'a créé.

- Magma de surface : Grès carbonifère... autres roches de surface ;
- Magma intermédiaire : Roches métamorphiques ;
- Magma profond : Péridotite.

En général, on distingue deux types de roches éruptives : les roches plutoniques et les roches volcaniques.

Les roches volcaniques se divisent en deux groupes tels que les laves et les projections, et les pouzzolanes appartiennent à ce dernier groupe. Les volcans caractérisés par des explosions violentes projettent des débris de tout calibre. Les matériaux les plus fins, constitués de cendres, peuvent être transportés par le vent et tomber en pluie loin du centre d'émission, c'est le cas des pouzzolanes.

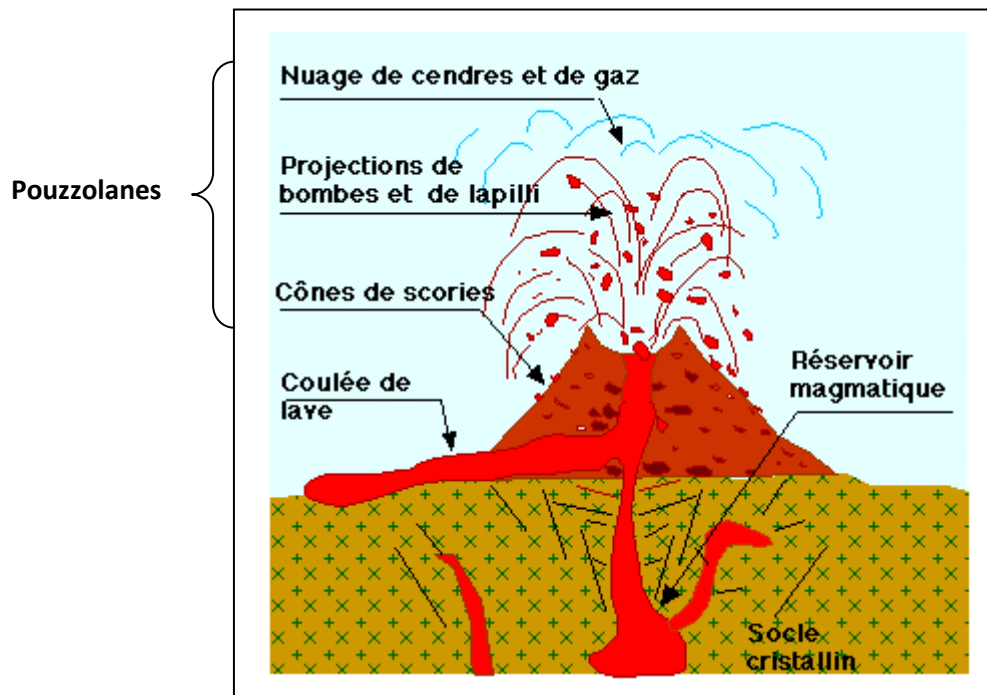


Figure 5 : Formation des Pouzzolanes ([klouky.free.fr/Histoire/les volcans](http://klouky.free.fr/Histoire/les_volcans))

La figure 5 montre les différents matériaux projetés lors d'une éruption volcanique. Et pour ces projections, on distingue les bombes et les blocs, les lapillis et les cendres. Au dessous de 32mm de diamètre, les projections sont dites lapillis, ce sont des fragments irréguliers, souvent bulleux et vésiculeux, constitués par une assez forte proportion de verre. Ceux des volcans d'Auvergne sont exploités sous le nom de Pouzzolanes.

2.3. Les différents types de pouzzolanes [7]

Les pouzzolanes sont classées en deux groupes : les pouzzolanes naturelles et les pouzzolanes artificielles.

2.3.1. Les pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes naturelles sont constituées par des matériaux possédant des propriétés pouzzolaniques à l'état naturel qui peuvent être améliorées par un traitement approprié d'activation. Dans ces roches volcaniques, le constituant amorphe est le verre produit lors de la fusion.

Exemples de pouzzolanes naturelles : les tufs volcaniques, les roches sédimentaires siliceuses, lapillis, ponces, scories et bombes...

2.3.2. Les pouzzolanes artificielles

Ce sont des matériaux dont l'activité pouzzolanique apparaît seulement après un traitement approprié en particulier thermique.

Exemples de pouzzolanes artificielles : les argiles et les schistes argileux calcinés, les cendres volantes de centrales thermiques, les cendres de balles de riz, les laitiers de haut fourneau, la bauxite calcinée...

2.4. Activités pouzzolaniques

Un matériau possède une propriété pouzzolanique s'il a la faculté de former, à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés, analogues à ceux formés par les constituants hydrauliques au cours de leur hydratation.

L'activité pouzzolanique est un phénomène très complexe, elle est due à une réaction de la chaux avec les produits de l'attaque alcaline, des silicates acides.

Cette activité est aussi l'aptitude de la pouzzolane naturelle par mélange avec la chaux à la température ambiante, pour former des composés ayant des propriétés hydrauliques, elle joue un rôle sur les propriétés des liants pouzzolaniques. Elle conduit à la formation des composés hydratés dont la nature est définie par les règles générales qui gouvernent l'hydratation des liants silico-alumino-calciques.

2.4.1. Réaction pouzzolanique

Les matériaux pouzzolaniques présentent la caractéristique de pouvoir réagir plus ou moins rapidement avec la chaux. Il en résulte essentiellement des silicates de calcium hydratés et/ou des aluminates de calcium hydratés.

Cette réaction est telle que :

Pouzzolanes + chaux + eau → *silicate de calcium hydraté +*
Aluminate de calcium hydraté

La réaction pouzzolanique est aussi définie par les réactions suivantes :



Notamment, les réactions pouzzolaniques exigent une certaine mobilité ionique des constituants acides tels que la silice et l'alumine présents dans les réseaux superficiels de la pouzzolane. C'est pourquoi, les matériaux qui contiennent de la silice ou de l'alumine ne présentent pas toujours des propriétés pouzzolaniques.

La réaction pouzzolanique est très lente, elle peut se poursuivre jusqu'à un âge avancé mais avec des degrés différents. Alors il se peut qu'il existe un mélange optimal dont les résistances peuvent devenir à plus long terme, plus élevées que celles du Ciment Portland Artificiel utilisé.

2.4.2. Constituants actifs des pouzzolanes naturelles [10, 13,14]

En général, la portion active des pouzzolanes est constituée par les phases amorphes ou vitreuses. L'activité pouzzolanique des phases amorphes ou vitreuses ne résulte pas directement de leur composition chimique, elle provient d'une altération des minéraux originaux subséquente à une exposition prolongée à l'eau contenant du CO₂ et à la vapeur d'eau surchauffée.

L'activité pouzzolanique des pouzzolanes naturelles peut être aussi due au caractère zéolithique de leurs constituants tels que l'analcime Na₂O · Al₂O₃ · 4SiO₂ · 2H₂O. Pour les tufs volcaniques dont la teneur en eau est élevée, l'activité pouzzolanique provient des composés zéolithiques, tandis que pour ceux dont la teneur en eau d'hydratation est faible et dont la solubilité dans les acides et bases est plus élevée, la phase vitreuse jouerait le rôle prédominant.

a) Constituants actifs des pouzzolanes artificielles

Les argiles ne manifestent une activité pouzzolanique qu'après un traitement thermique dans un domaine de température déterminé. Ce domaine de température correspond à une dégradation partielle ou complète de leur structure. L'activité pouzzolanique diminue à nouveau si l'on dépasse ce domaine de température. Au point de vue chimique, la silice, l'alumine et l'oxyde de fer peuvent devenir actifs par le traitement thermique. Il faut

remarquer que ces oxydes à l'état actif ne se trouvent pas nécessairement séparés, mais peuvent se trouver sous forme de combinaison.

Pour les cendres volantes c'est plutôt la finesse de la poudre qui détermine l'activité pouzzolanique et que la finesse est en relation avec la teneur en charbon du combustible de départ.

b) Effet de la température sur les pouzzolanes naturelles et artificielles

Par chauffage, il se produit d'abord un changement de la stabilité, par perte des constituants volatiles et formation d'une masse poreuse, puis un affaissement de la structure à plus haute température. La formation de la masse poreuse se produit dans le domaine de température compris entre 550°C et 980°C. L'activité pouzzolanique maximale est acquise entre 550°C et 870°C.

➤ Pour les pouzzolanes naturelles :

La calcination entre 600 et 900°C de tufs volcaniques a pour effet en particulier de déshydrater les phases argileuses et zéolithiques.

L'activité pouzzolanique maximale est atteinte par calcination entre 750 et 980°C des roches sédimentaires.

➤ Pour les pouzzolanes artificielles :

Les argiles de types montmorillonites se déshydratent entre 150 et 300°C et l'activité pouzzolanique de ce groupe est maximale entre 650 et 900°C.

Les argiles de type kaolinite perdent leur eau adsorbée entre 300 et 500°C, et entre 550 et 900°C, la formation de composés pouzzolaniquement actifs est favorable.

Pour l'argile de type illite, la perte de l'eau d'adsorption a lieu entre 100 et 300°C et l'activité pouzzolanique maximale est atteinte par calcination entre 750 et 1000°C.

L'effet de la température sur la pouzzolane dépend non seulement de la composition minéralogique ou chimique mais encore de la durée de traitement.

2.5.Caractéristiques des pouzzolanes [4,14]

2.5.1. La couleur

La pouzzolane a une couleur qui varie généralement du noir au rouge, marron à gris, exceptionnellement jaune.

Cette couleur est liée au rapport des pourcentages pondéraux des oxydes ferreux et ferriques, soit : $f = \text{FeO} / \text{Fe}_2\text{O}_3$

- si $f < 0,02$: la coloration est uniformément rouge pour les matériaux réduits à l'état des fines ;
- si f est voisine de 0,10 : la coloration vire au brun
- si f atteint 0,27 : les produits sont uniformément noirs.

2.5.2. Composition chimique

Les compositions chimiques des pouzzolanes peuvent être variées selon le gisement mais leur caractère inerte fait que ce n'est pas un problème.

Tableau 1: Composition chimique moyenne de la pouzzolane

Eléments majeurs	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Teneurs maximales	40-42%	15-30%	10-15%

Le tableau 1 montre que les éléments majeurs constituant les pouzzolanes sont le Silice, l'Aluminium et le Fer. La silice est en plus grande quantité par rapport aux autres éléments comme le fer et l'aluminium.

Les pouzzolanes sont des substances incapables de faire prise par elle-même. L'addition de 1% d'alcalis améliore la capacité de fixation de la chaux par les pouzzolanes. Les pouzzolanes additionnées au ciment Portland avant broyage améliorent les résistances à long terme, la résistance chimique et diminuent le retrait.

La présence synchronique de chaux et d'une base alcaline est susceptible d'activer le durcissement du produit gâché surtout si le mélange contient outre la pouzzolane, du laitier granulé.

La pouzzolane qui a un pouvoir pouzzolanique très faible en présence de la chaux, peut acquérir un pouvoir pouzzolanique élevé dès qu'elle est mise en présence de solution de soude ou de potasse.

2.5.3. Structure et texture des pouzzolanes

Les caractéristiques structurales des pouzzolanes peuvent être résumées par leur morphologie vacuolaire, et leur forme déchiquetée. Les vésicules de dimensions variables sont dues aux gaz emprisonnés dans la lave : plus celle-ci est fluide, moins elle est vacuolaire.

Les pouzzolanes peuvent présenter une structure intacte, ou plus ou moins modifiée chimiquement, selon l'âge du volcanisme auquel elles appartiennent et selon leurs conditions de conservation.

Les explosions volcaniques façonnent la forme extérieure des grains provoquant des éjections des lambeaux des laves constitutifs des pouzzolanes naturelles à la suite du refroidissement. Cette structure donne aux granulats une porosité distincte, et un haut pouvoir d'isolation thermique.

2.6. Utilisations des pouzzolanes [11,20]

Les pouzzolanes ont des domaines d'utilisation tels que :

2.6.1. Utilisation pour la cimenterie :

La pouzzolane est à la base de la fabrication de certains ciments. Elle est l'un des principaux constituants de la fabrication. Son pouvoir pouzzolanique permet de fixer d'une part la chaux libre insoluble et de l'empêcher de se dissoudre et de réagir après la prise du ciment et d'autre part de fixer la portlandite (Ca(OH)_2) produite lors de l'hydratation du ciment.

2.6.2. Utilisation pour les bétons légers :

La pouzzolane est définie par le centre scientifique et technique du bâtiment. Ce matériau est considéré comme un agrégat répondant à la définition suivante : la pouzzolane est une roche naturelle constituée par des scories volcaniques, elle possède une structure scoriacée ou alvéolaire, elle est essentiellement composée de silice, d'alumine, et d'oxyde de fer. Elle doit renfermer de 0,5% de soufre et de moins de 1% de SO_3 .

Les pouzzolanes qui sont des granulats légers se prêtent bien à la confection de bétons légers.

2.6.3. Utilisation pour les travaux publics :

Les pouzzolanes sont utilisées comme matériaux de remblais légers pour la réalisation de terrains de sport : piste d'athlétisme, amendement des terrains gazonnés (pouzzolane, très poreuse, permet à l'eau de s'écouler et d'évacuer très rapidement la pelouse), carrière à chevaux... D'une manière générale, ce matériau est plus léger que d'autres, type silico-calcaire, ce qui permet de mettre en œuvre certains remblais allégés : terrain trop faible pour recevoir une route, remblaiement sur ouvrage souterrains. La densité moyenne de la pouzzolane une fois en place tourne autour de 1,5 T/m³ au lieu de 1,9 T/m³ pour les matériaux classiques.

2.6.4. Utilisation dans l'industrie :

Additionnées de ciment, les pouzzolanes permettent la confection des matériaux réfractaires comme les boisseaux de cheminées, de parpaings, de bétons légers pour la construction des bâtiments. Elles interviennent aussi dans la fabrication d'argiles à tuiles. Entre autre, elles ont des propriétés intéressantes pour l'isolation thermique et phonique.

2.6.5. Utilisation dans l'agriculture :

Les pouzzolanes servent pour le drainage des sols argileux, et elles sont des constituants pour l'amendement de ces derniers. Elles sont utilisées dans la fabrication des terreaux, dans la fixation des plantes en conteneurs et les cultures en hors sol.

En outre, les pouzzolanes sont utilisées comme filtres d'eau potable pour les stations d'épuration.

2.7. Gisements des pouzzolanes [8]

2.7.1. Pays producteurs de pouzzolanes

Ce sont les Etats-Unis, la Grèce, l'Italie, l'Allemagne, le Japon, les Iles du cap Vert, la France, Madagascar.

2.7.2. Les pouzzolanes de Madagascar

Les pouzzolanes naturelles se trouvent dans les régions suivantes :

- Massif d'Ambre ;
- Ile de Nosy-Be ;
- Massif de l'Itasy ;

- Massif de l'Ankaratra ;
- Massif de l'Ankaizina.

Nous allons nous intéresser plus précisément sur les pouzzolanes du Massif d'Ankaratra surtout la zone volcanique d'Antsirabe- Betafo.

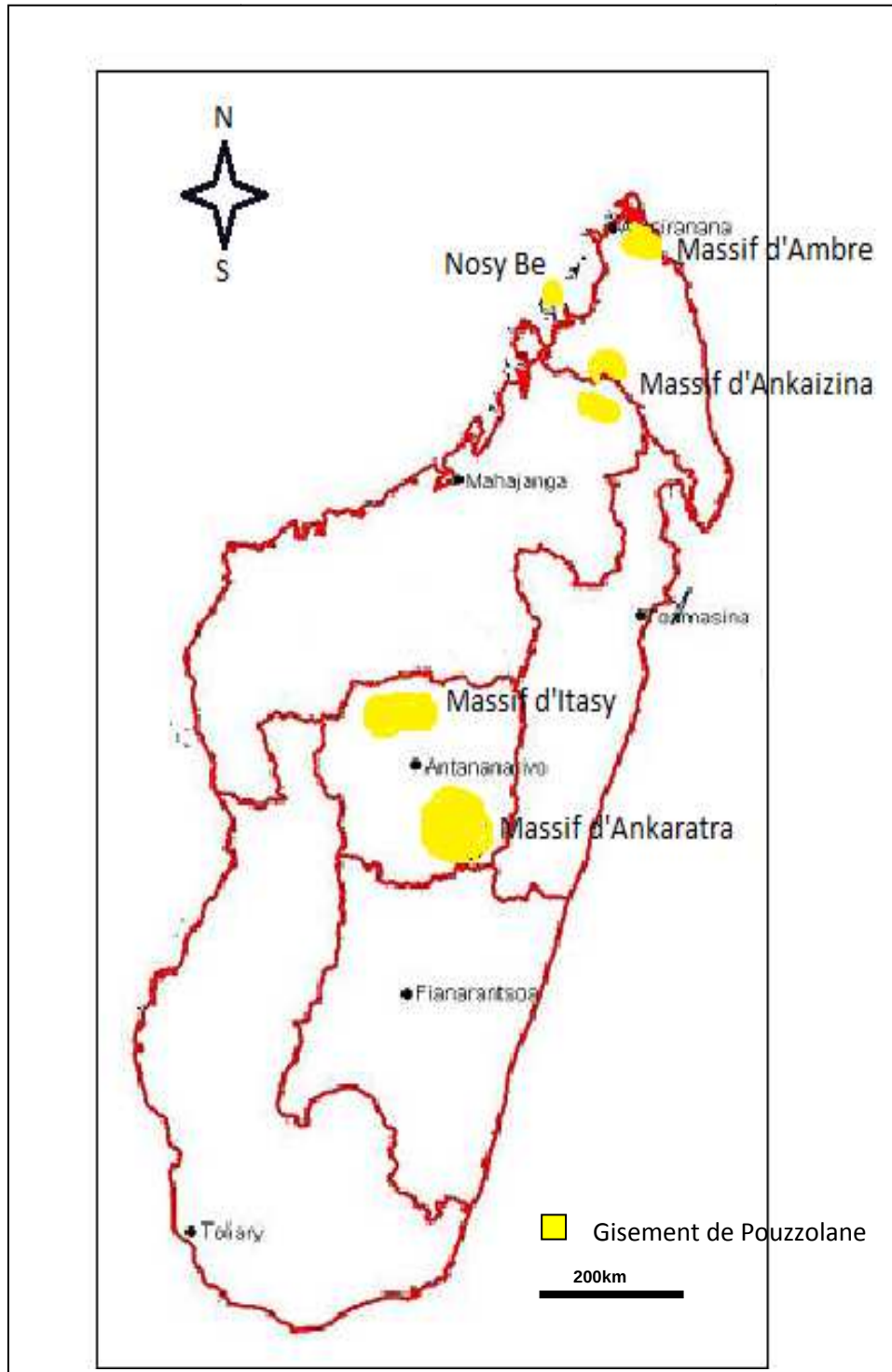


Figure 6 : Les gisements de pouzzolanes à Madagascar (Moussa A.K ; 2007)

PARTIE II : TRAVAUX REALISES ET RESULTATS

La démarche adoptée pour mener à bien cette étude est représentée par la figure 7 :

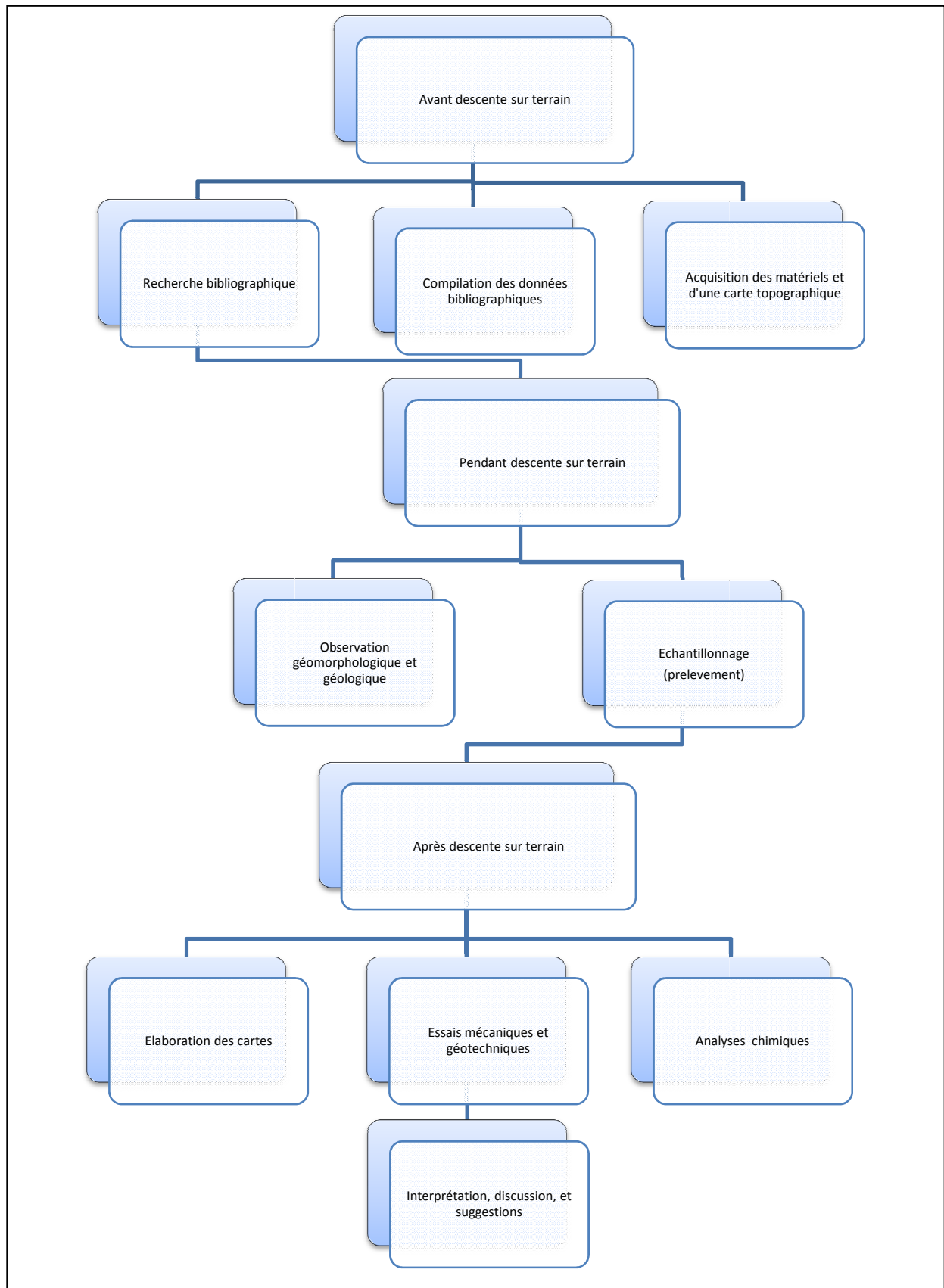


Figure 7 : Organigramme constituant la démarche du travail

CHAPITRE III : Observation morphologique et géologique de la zone

3.1. Observation morphologique

La zone de Betafo est caractérisée par la présence des types de relief tels que les collines, les plaines. Les collines sont infectées par des lavakas (figure 8) dus aux feux de brousse excessifs qui ont causé toutes les érosions. D'altitude comprise entre 1400 et 1500m, elles sont toutes des centres d'émission volcaniques. L'existence des trois collines de formes coniques, l'abondance des cendres volcaniques témoignent la manifestation volcanique dans la zone de Betafo.



Figure 8: Collines infectées par des lavakas (RASAMOELA M. F- 2010)

Les plaines que l'on voit sur la figure 9, de la petite région de Betafo sont occupées par les cultures telles que les riz, les arachides, les maïs, les manioc....



Figure 9: Les plaines de Betafo (RASAMOELA M.F- 2010)

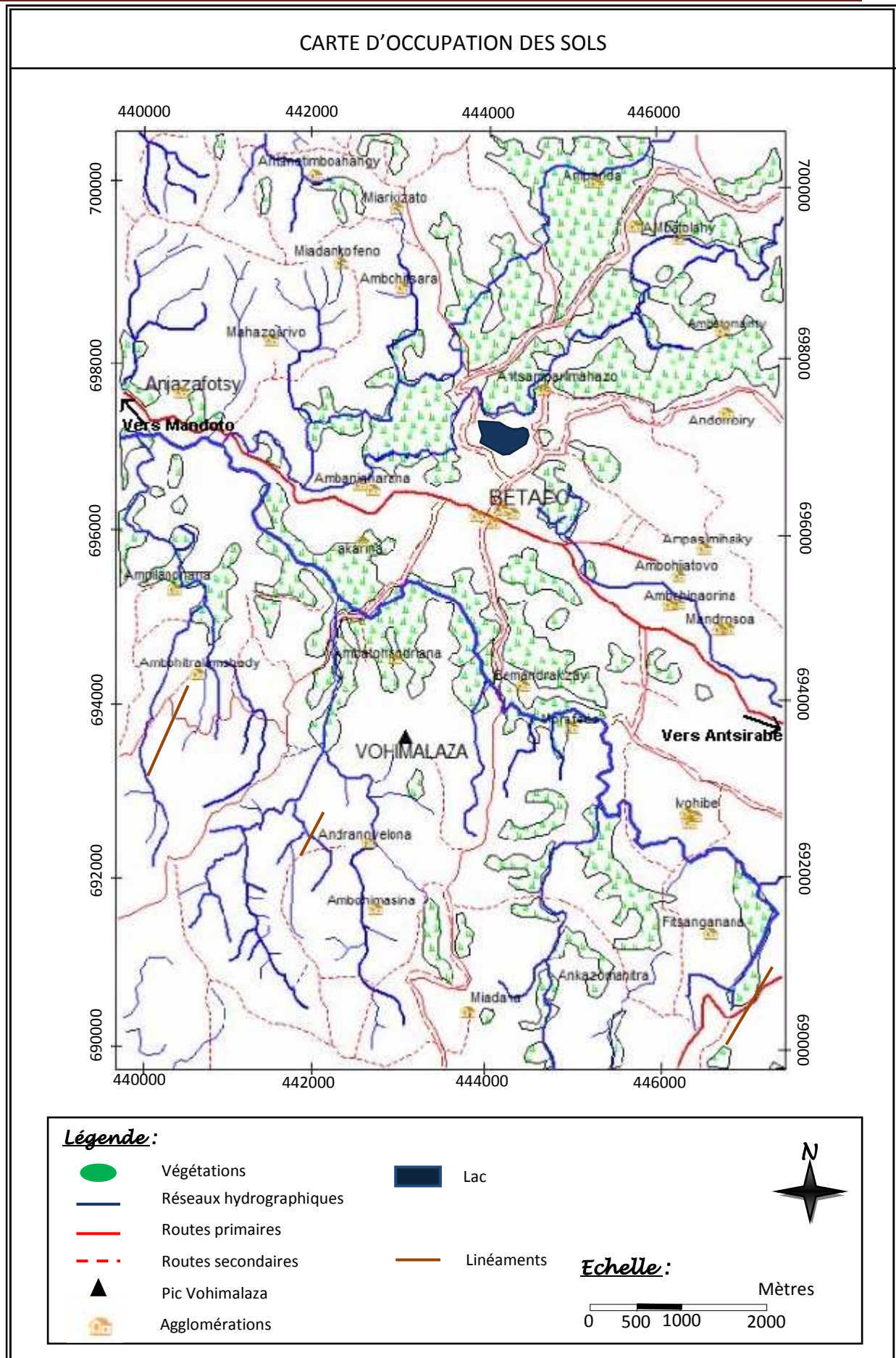


Figure 10: Carte d'occupation de sol de Betafo

Particulièrement, notre zone d'étude est constituée par les deux des trois collines (figure 11) formant le complexe Iavoko, le renommé de Betafo, avec ses formes coniques typiques des zones volcaniques. Au pieds de ces deux collines se trouvent des cultures et des forêts qui sont des propriétés privées.



Figure 11: Observation morphologique de la zone d'étude (RASAMOELA M.F-2010)

3.2.Observation géologique

Notre zone d'étude est constituée en plus grande partie de pouzzolanes. D'après les études géologiques faites (par BESAIRIE en 1965), la partie où se trouve notre zone d'étude est composée de basanites et de basanitoïdes (figure 13). Les deux collines constituant la zone d'étude datent du Quaternaire, plus précisément du Pléistocène.

Betafo est constitué géologiquement par des basanites et basanitoïdes ; des migmatites ; le granite des Vavavato ; des gneiss et des micaschistes. (figure 13)

Ces collines sont recouvertes de sols (latérites) et de végétation (des herbes sèches).

Concernant les types de pouzzolanes, il existe en fonction de la couleur 3 types de pouzzolanes (figure 12) :

- les pouzzolanes qui ont des couleurs gris violacé
- les pouzzolanes de couleurs noires alternées avec des jaunes
- les pouzzolanes de couleurs rouges alternées avec des noires.

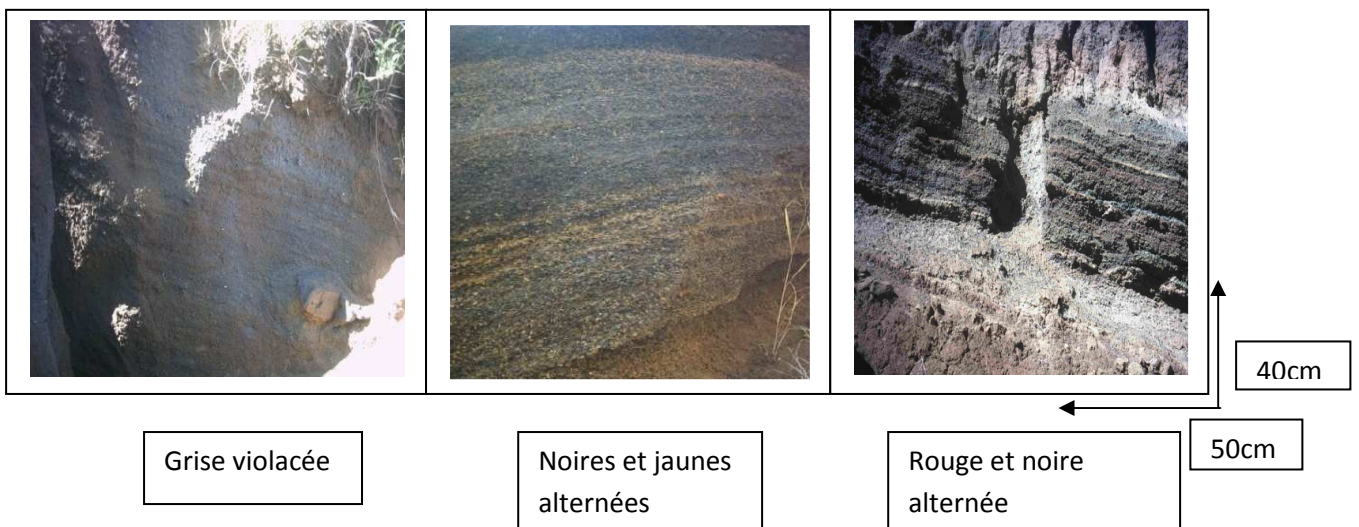


Figure 12: Les différentes couleurs de pouzzolanes

Les diamètres des grains de pouzzolanes varient en général de 0,5mm à 20mm. Elles consistent en grains anguleux, fortement poreux. Une grande partie des pouzzolanes est sous forme vitreuse. Les couleurs jaunes et rouges proviennent de l'altération du verre volcanique en minéraux argileux.

L'épaisseur du gisement de lapillis peut atteindre jusqu'à 10m.

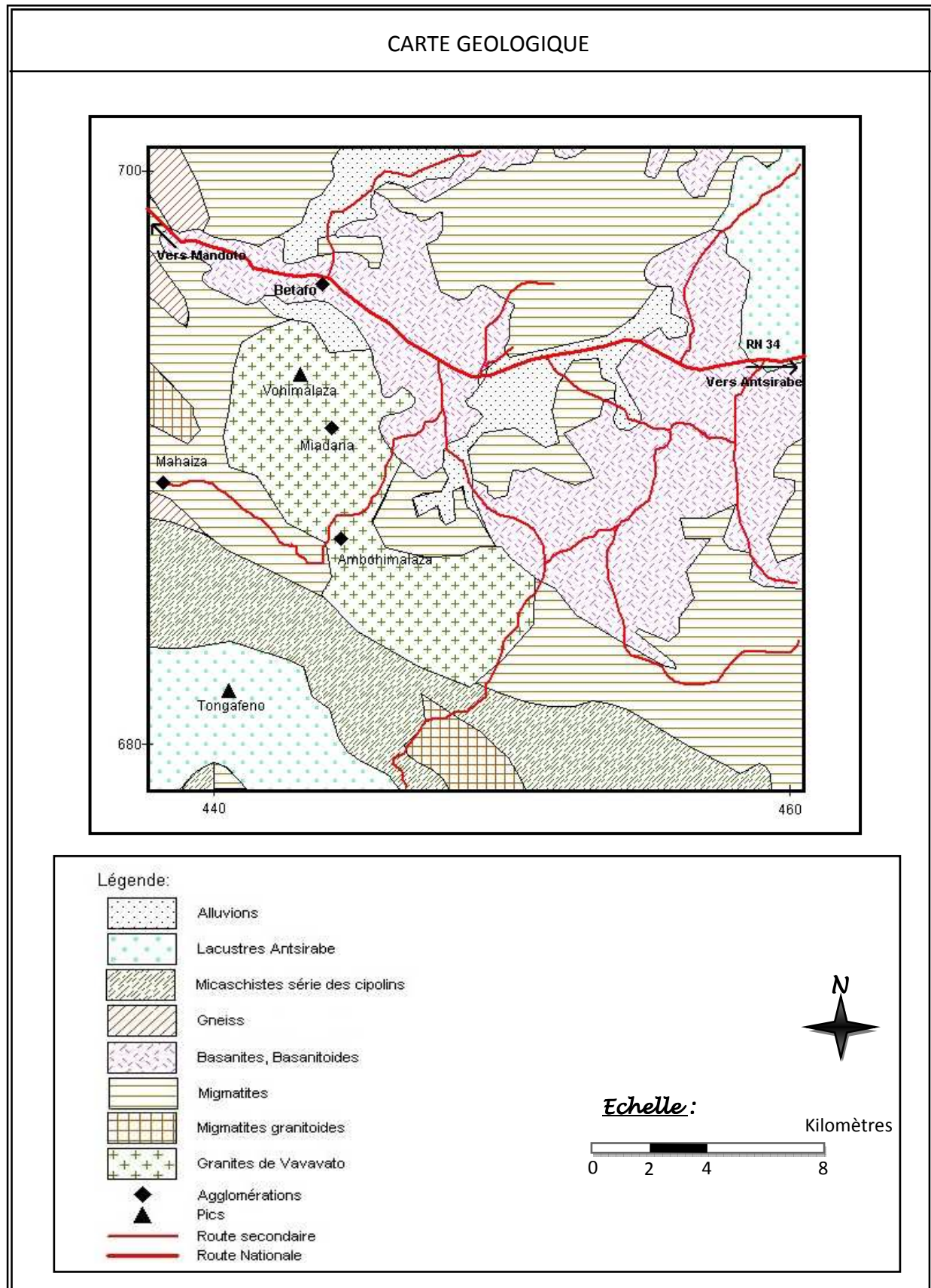


Figure 13: Carte géologique de Betafo (J.G.RAKOTOARIMANANA 1951 ; C ALSAC 1962)

3.3.Echantillonnage

L'échantillonnage dans notre cas est fait dans un but plus qualitatif que quantitatif, c'est-à-dire que les résultats des analyses des échantillons permettront de savoir le type de pouzzolane qualifié pour la cimenterie, ainsi que pour la construction routière.

Alors pour se faire, l'échantillonnage s'est déroulé comme suit :

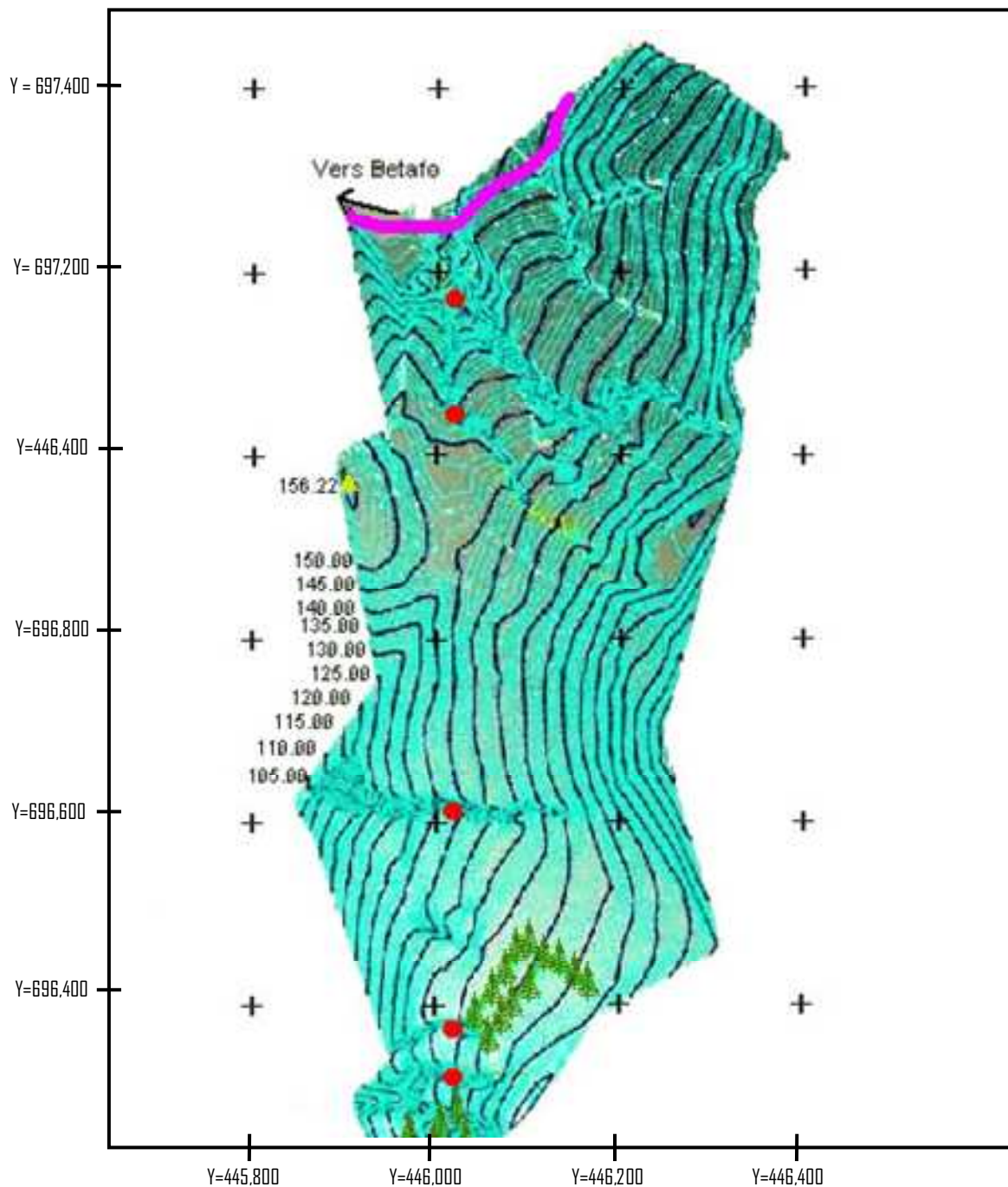
- la prise des échantillons se fait dans les lavakas : c'est le seul moyen pour éviter les incidents
- ensuite, on fait le rainurage le long du profil
- le nombre des échantillons est de 5. Ceci est en raison de l'existence des lavakas (c'est à partir de ces lavaka qu'on peut prendre des échantillons).
- les points de prélèvement forment une ligne que nous verrons bien dans la figure 14.

Les caractéristiques de ces points d'échantillonnage sont représentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Description des points d'échantillonnage

N° échantillon	Localisation coordonnées Laborde (m)	Poids (kg)	Couleur
1	X : 446 020 Y : 696 322	48	Grise
2	X : 446 020 Y : 696 372	47	Grise claire
3	X : 446 020 Y : 696 614	39	Rougeâtre
4	X : 446 020 Y : 697 042	51	Grise violacée
5	X : 446 020 Y : 697 172	54	Noire jaunâtre

CARTE D'ECHANTILLONNAGE



Légende:

- Point d'échantillonnages
- Arbres
- ▲ Point géodésique
- Route Nationale N°34
- Courbe de niveau maitresse tous les 5 Mètres



Echelle:

0 50 100 200 Mètres

Figure 14: Carte d'échantillonnage (Geo&Eco. 2009)

CHAPITRE IV : Essais géotechniques

Après avoir élaboré les cartes, on a prévu de faire des essais au laboratoire des échantillons de pouzzolanes. Ces essais vont permettre de savoir les utilisations des pouzzolanes dans les travaux publics. Pour ce, nous avons décidé de faire des essais géotechniques.

4.1. Analyses d'identification

Ces analyses concernent l'étude de la teneur en eau des échantillons ainsi que de leur poids spécifiques.

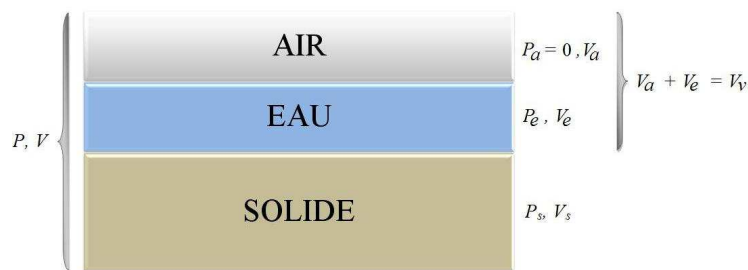


Figure 15 : Composition du sol

Avec :

- V_v : volume du vide
- P_e : poids de l'eau
- V_e : volume de l'eau
- P_s : poids du particule solide
- V_s : volume du particule solide

4.1.1. Teneur en eau (w)

La teneur en eau c'est le rapport du poids d'eau qu'un matériau contient, (dans notre cas c'est le poids d'eau de la pouzzolane), au poids de ses éléments secs, après une dessiccation à 105°C jusqu'à poids constant. Cette teneur est exprimée en pourcentage.

La formule de la teneur en eau est telle que :

$$w = P_e / P_s [\%]$$

Le principe consiste à la détermination du poids d'eau contenu dans un échantillon de pouzzolane et la méthode utilisée est la pesée avant et après dessiccation à l'étuve.

Les appareils utilisés sont : une balance adaptée au poids de l'échantillon, étuve réglable de 50 à 105°C, des pinceaux, un récipient.

Exécution de l'essai :

Un prélèvement d'échantillon est la première chose à faire, ensuite on le met dans le récipient qui est préalablement taré. Après on pèse l'ensemble avant de le mettre à l'étuve réglée à 105°C. 24 heures est la durée nécessaire pour la pouzzolane d'obtenir le poids constant, et c'est après ce délai que l'on pèse pour la dernière fois l'ensemble.

4.1.2. Poids volumique spécifique (γ_s)

C'est le rapport du poids de particules solides P_s au volume V_s occupé par ces particules.

Il est donné par la formule

$$\gamma_s = P_s / V_s \text{ [kN/m}^3\text{]}$$

Avec P_s en kN et V_s en m^3

4.1.3. Limite d'Atterberg

Le but de cet essai est de connaître l'indice de plasticité de sol contenu dans la pouzzolane. Et cet indice est obtenu à l'aide de la limite de liquidité et de la limite de plasticité.

Le principe de l'essai consiste à rechercher en premier lieu la limite de liquidité W_L définie comme la teneur en eau qui marque le seuil de passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique. Ensuite, rechercher la limite de plasticité W_P définie comme la teneur en eau qui marque le seuil de passage d'un sol à l'état plastique à l'état solide. Et l'indice de plasticité est la différence entre les limites de liquidité et de plasticité.

Les appareils utilisés sont les suivants : appareil de Casagrande, un outil à rainurer, un tamis à maille carrée de 0,40mm, un récipient de trempage, un récipient de lavage et de décantation, des spatules à malaxer, des boîtes de pétri, une balance, une étuve permettant de régler à 105°C...

a) Limite de liquidité (W_L) :

La pâte doit être malaxée soigneusement pour la rendre homogène. Et la consistance ne doit pas être ni trop forte, ni trop faible.

L'exécution de l'essai est comme suit : placer dans la coupelle environ 70g de pâte, partager la pâte en deux parties à l'aide de l'outil à rainurer, tourner la manivelle avec une cadence de chocs par seconde, jusqu'à ce que les lèvres de la rainure se rejoignent à la base, sur une longueur de 10mm.

Et après, on note le nombre de chocs, prélever à l'aide de la spatule un échantillon de chaque côté des lèvres et les placer dans deux boîtes de pétri, peser les boîtes et les sécher dans l'étuve, répéter les opérations avec trois teneur en eau décroissantes, les nombres de chocs devront être compris entre 19 et 31.

b) Limite de plasticité (W_p) :

Cet essai se fait après la limite de liquidité, avec le même échantillon qui sera séché à l'air à l'air en étalant sur un marbre ou de verre.

La réalisation est telle qu'on forme une boulette que l'on roule sur le marbre, de façon à former un rouleau de 3mm de diamètre (ayant une longueur entre 10 et 15cm).

La limite de plasticité est atteinte lorsque le rouleau se fissure en le soulevant. Ensuite on prend les extrémités des rouleaux qu'on va peser et sécher dans l'étuve.

La connaissance des limites d'Atterberg permet de déterminer les teneurs en eau pondérales correspondant à des états particuliers d'un sol.

Enfin quand les résultats des deux limites sont obtenus, on fait la différence et on obtient l'indice de plasticité.

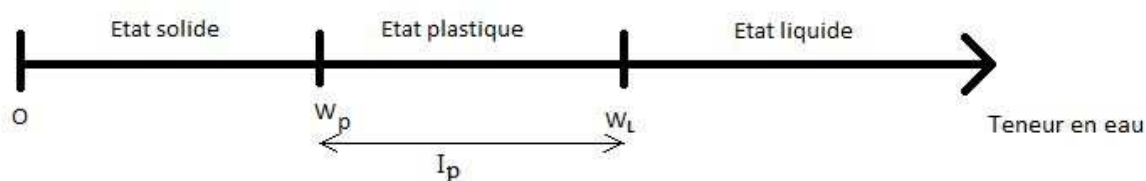


Figure 16 : Représentation des limites d'Atterberg

Et la formule est comme suit :

$$I_p = W_L - W_p$$

Avec l'indice de plasticité, on peut classer un sol selon son degré de plasticité d'après le tableau suivant :

Tableau 3 : classification du sol selon la plasticité

Indice de plasticité I_p	Nature du sol
0 – 5	Sol non plastique
5 – 10	Sol peu plastique
10 – 20	Sol plastique
>20	Sol très plastique

4.2. Analyses géotechniques

Les analyses géotechniques effectuées sont : analyse granulométrique, essais Proctor et CBR.

4.2.1. Analyse granulométrique

La granulométrie c'est l'étude des dimensions des granulats de diverses compositions. Le but de cet essai est de connaître la granularité de la pouzzolane dont les dimensions sont comprises entre 0,08mm et 40mm. Et elle permet au final de fournir des fréquences statistiques des différentes tailles d'un échantillon de pouzzolane.

Le principe de l'essai consiste à diviser un échantillon de pouzzolane en plusieurs classes granulométriques de tailles décroissantes, à l'aide d'une série de tamis à mailles carrées. Les ouvertures et les mailles des tamis sont choisies selon la dimension des grains de l'échantillon.

Préparation de l'échantillon :

Le poids d'échantillon nécessaire pour l'essai doit être compris entre 200D et 600D, où D exprime la dimension maximum (en mm) des plus gros éléments. L'échantillon pris doit représenter le plus possible la composition moyenne du matériau.

Exécution de l'essai :

Dans notre cas, pour trouver la masse sèche de l'échantillon, nous avons effectué un prélèvement représentatif pour en déterminer la teneur en eau. Comme cela, on pèse un échantillon de pouzzolane (et on passe directement au trempage (pendant 12h), et au lavage ensuite. La masse sèche de l'échantillon est alors $M_s = M \cdot 100 / w + 100$. Le lavage de l'échantillon se fait comme suit : on verse l'échantillon et l'eau de trempage dans un tamis à

maille correspondant à la plus petite des séries utilisées pour le tamisage. Le lavage est fini lorsque l'eau sortant du tamis est propre. L'échantillon lavé est ensuite séché jusqu'à sa masse constante.

Concernant le tamisage et la pesée du refus : on verse l'échantillon séché dans la colonne de tamis. Après, on agite la colonne puis on prend un à un les tamis en commençant avec celui qui a la plus grande ouverture.

Le refus du premier tamis qui est le tamis à plus grande maille va être pesé (ainsi on obtient R_1). Cette opération se refait avec le deuxième tamis immédiatement inférieur au premier, où on ajoute le refus du tamis inférieur à celui du premier pour donner R_2 . Ce même travail se poursuivra avec tous les autres tamis de la série jusqu'à obtenir les masses des différents refus.

Les résultats obtenus seront établis dans un tableau constitué par les numéros de séries des tamis, le refus cumulé, le tamisat cumulé.

Après avoir fait toutes les granulométries de tous les différents échantillons de pouzzolanes, on rapporte les résultats sur un diagramme appelé « courbe granulométrique » qui sera ensuite interprétée.

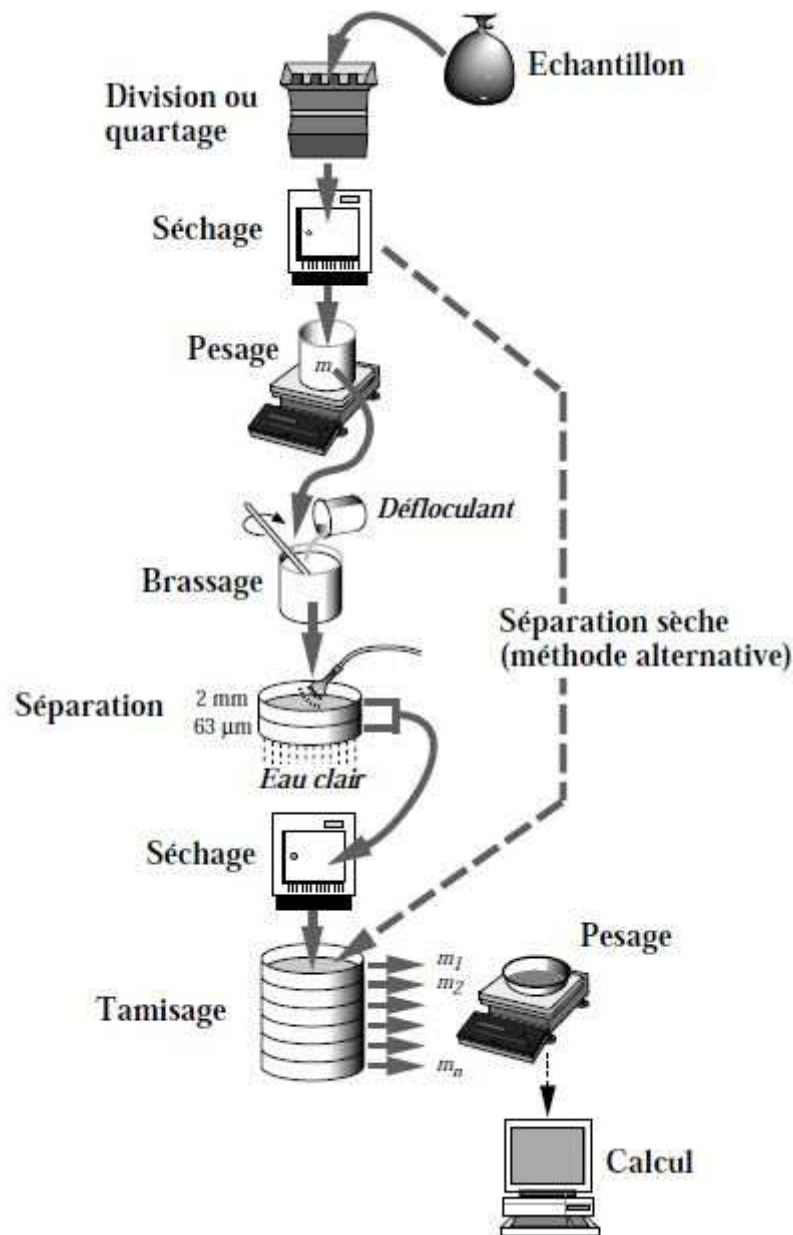


Figure 17 : Les étapes d'une analyse granulométrique

4.2.2. Essai PROCTOR

Le but de cet essai c'est de pouvoir trouver le poids volumique sec maximal et la teneur en eau optimum correspondante pour pouvoir faire ensuite l'essai de portance du matériau.

Cette opération n'est autre que le compactage du matériau (la pouzzolane) dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, suivant un processus bien défini. L'essai

est répété plusieurs fois de suite, à teneur en eau croissante. Ensuite, on trace sur un graphique une courbe représentative de tous les résultats du poids volumique en fonction de la teneur en eau.

Dans notre cas, l'essai Proctor est modifié, car nous nous intéressons sur les travaux de type routier. Les matériaux utilisés pour l'essai Proctor doivent être des matériaux passant au tamis à mailles carrées de 20mm.

Les appareils utilisés sont : un moule et une dame, une truelle, des éprouvettes graduées, une balance capable de peser 800g à une précision de 0,1g près, une autre balance capable de peser 10 000g à une précision de 5g de près, une étuve permettant le séchage à 105°C, des récipients pour les teneurs en eau...

Préparation et exécution de l'essai

Pour le Proctor modifié, il faudra au moins 18kg d'échantillon de pouzzolane. Ainsi, on pourra faire 3 essais de 6kg chacun pour un échantillon.

Pour ce, on a trouvé pour chaque échantillon la teneur en eau optimale ainsi que le poids volumique sec maximal. Ceux-ci sont obtenus après avoir établi une courbe sur un diagramme d'essai Proctor (où on a le poids volumique de sol sec sur les coordonnées et la teneur en eau sur les abscisses). Tout cela pour pouvoir faire ensuite l'essai de portance ou l'essai CBR. Le poids volumique sec est représenté par la formule :

$$\gamma_d = P_s / V \text{ [KN/m}^3\text{]}$$

4.2.3. Essai Californian Bearing Ratio (CBR)

Cet essai a pour but de connaître la résistance des matériaux au poinçonnement. Plus précisément, connaître les caractéristiques physiques et l'indice portant du matériau. Ces matériaux seront destinés pour les plateformes, les corps de chaussée (dans notre cas). C'est cet essai qui permettra de savoir si la pouzzolane de Betafo est utilisable pour les constructions routières.

Le principe du CBR est de réaliser un essai de poinçonnement dans des conditions bien définies. C'est-à-dire que les échantillons sont moulés, avec des teneurs en eau bien déterminées. Ainsi, la vitesse de poinçonnement et le diamètre du piston de poinçonnement sont imposés.

Les appareils utilisés sont : un tamis à maille carrées de 20mm, des éprouvettes graduées, une balance d'une portée de 10kg, une moule CBR, une dame Proctor, des anneaux de surcharge de 2,25Kg, un comparateur, une presse hydraulique, un bac d'imbibition.

Le processus de l'essai est comme suit :

- peser 6kg pour chaque échantillon de pouzzolane ;
- compacter l'échantillon dans un moule à CBR avec une dame à Proctor modifié. (l'échantillon est amené à la teneur en eau optimale de Proctor et est bien malaxé avant d'être compacté.) ;
- compacter l'échantillon en cinq couches successives d'égale épaisseur recevant chacune 25 coups de dame ;
- poinçonner l'échantillon sur la presse hydraulique ;
- déterminer la teneur en eau après compactage et poinçonnement ;
- imbiber l'échantillon avec les anneaux de surcharges pendant 4 jours en fixant le comparateur sur un trépied posé sur le moule
- poinçonner l'échantillon après 4 jours ;
- déterminer la teneur en eau de compactage (après 4 jours) ;
- déterminer le poids volumique sec ;
- déterminer l'indice de compacité ;
- mesurer le gonflement absolu et relatif ;
- et enfin calculer l'indice portant.

L'indice portant est calculé aux enfoncements (après 4 jours d'imbibition) 2.5mm et 5mm et est donné par les formules :

$$I.CBR \text{ à } 2,5\text{mm} = P(2,5) \times 100 / 70 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$I.CBR \text{ à } 5,0\text{mm} = P(5,0) \times 100 / 105 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Avec $P(2,5)$ = Effort d'enfoncement en kg à 2,5mm / section du piston (19,3cm²)

et $P(5,0)$ = Effort d'enfoncement en kg à 5,0mm / section du piston (19,3cm²)

Soit :

$$\text{Indice Portant CBR à } 2,5\text{mm} = \text{Effort } F(2,5) \times 100 / 1351$$

$$\text{Indice Portant CBR à } 5\text{mm} = \text{Effort } F(5) \times 100 / 2026,5$$

L'indice portant CBR à prendre en compte est la plus grande de ces deux valeurs.

4.2.4. Fragmentation dynamique (FD)

Le but c'est de mesurer la résistance à la fragmentation dynamique des éléments des échantillons de pouzzolanes.

Le principe consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6mm produits en soumettant le matériau aux chocs d'une masse normalisée. La granularité de pouzzolane utilisée dans notre cas est de 10/14 (c'est-à-dire de dimension de 10mm à 14mm).

Cette résistance à la fragmentation est donnée par la formule :

$$FD = (100 \times m) / M$$

Avec m : masse des éléments inférieurs à 1,6mm (en g)

M : masse du matériau soumis à l'essai qui s'avère être constante (en g)

Les matériels utilisés sont les suivants : des tamis de 1,6 – 4 – 6,3 – 10 (module AFNOR), un appareil spécifié pour la fragmentation dynamique, une balance d'une portée de 10kg.

4.2.5. Essai d'usure Micro-Deval en présence d'Eau (MDE)

Cet essai a pour but de mesurer la résistance à l'usure par frottement d'un échantillon des granulats et leur sensibilité à l'eau.

Le principe de l'essai consiste à mesurer la résistance à l'usure par frottement, entre les granulats et une charge abrasive dans un cylindre en rotation dans des conditions bien définies.

Soit m la masse sèche de la fraction de matériaux passant après essai au tamis de 1,6mm, alors le coefficient est :

$$MDE = (m / 500) \times 100$$

Lorsque $m = 500 - m'$ où m' est le tamisât du tamis 1,6mm, le coefficient devient

$$MDE = [(500 - m') / 500] \times 100$$

Les appareils utilisés dans cet essai sont : un appareil micro-Déval (qui est un broyeur à billes), une balance capable de peser 5000g, un dispositif de lavage, des récipients de séchage, une étuve permettant le séchage à 105°C.

4.3. Les résultats des différents essais

4.3.1. Teneur en eau

Pour la teneur en eau (en %), les résultats des 5 échantillons analysés sont représentés sous forme de tableau ci après :

Tableau 4 : teneur en eau des pouzzolanes

N° échantillon	Poids sec P_s (en g)	Poids d'eau P_e (en g)	Teneur en eau $(P_e/P_s) \times 100$ en %
1	90,89	10,36	11,39
2	83,76	7,26	8,66
3	32,24	3,93	12,18
4	73,45	14,29	19,45
5	71,38	5,47	7,60

La teneur en eau des pouzzolanes varie de 8 à 20% dont la moyenne est de 11,85%.

4.3.2. Poids spécifiques

Le tableau 4 résume les poids spécifiques des échantillons

Tableau 5 : tableau des poids spécifiques

N° échantillon	1	2	3	4	5
Volume échantillon [cm ³]	334,03	151,7	161,43	231,98	225,82
Poids échantillon [g]	726,55	328,78	314,06	387,62	471,4
Poids spécifique [g/cm ³]	2,17	2,16	1,94	1,67	2,08

Ces poids spécifiques sont compris entre 1,7 à 2,2 [g/cm³] avec une moyenne de 2 [g/cm³].

Ou encore 17 à 22 KN/m³

4.3.3. Indice de plasticité

Les fines obtenues pour les échantillons 3 et 5 sont insuffisantes pour faire l'essai ainsi seuls les échantillons 1, 2 et 4 ont été traités.

Le résultat des indices de plasticité des échantillons analysés sont représentés par le tableau 6.

Tableau 6 : Tableau des indices de plasticité

N° échantillon	1	2	4
Limite de liquidité W_L	50,80	32,70	32,00
Limite de plasticité W_P	36,85	25,20	24,35
Indice de plasticité ($W_L - W_P$)	13,95	7,50	7,65

L'indice de plasticité I_p est compris entre 7,5 et 13,95 % d'après ce tableau, ces matériaux sont classés parmi les sols peu plastiques.

Analyse granulométrique

Les résultats obtenus sont : les refus cumulés, le tamisât cumulé, et ils seront représentés par les tableaux 7 à 11 :

Tableau 7 : Résultats des analyses granulométriques de l'échantillon 1

Tamis [mm]	Refus cumulés [g]	Refus cumulés [%]	Tamisât cumulé [%]
12,50	14,63	3,46	96,54
8,00	86,40	20,45	79,55
5,00	201,27	47,66	52,34
3,15	278,69	65,99	34,01
2,00	314,23	74,40	25,60
1,00	330,11	78,16	21,84
0,40	339,70	80,44	19,56
0,20	363,63	86,10	13,90
0,08	391,64	92,73	7,27

Dans cet échantillon, les fines ($\phi < 0,08\text{mm}$) constituent 7,27%.

Tableau 8 : Résultats des analyses granulométriques de l'échantillon 2

Tamis [mm]	Refus cumulés [g]	Refus cumulés [%]	Tamisât cumulé [%]
31,50	37,88	13,24	86,76
20,00	133,04	46,51	53,49
12,50	169,25	59,18	40,82
8,00	198,00	69,23	30,77
5,00	209,87	73,68	26,62
3,15	219,38	76,70	23,30
2,00	224,80	78,60	21,40
1,00	229,45	80,23	19,77
0,40	234,34	81,93	18,07
0,20	249,39	87,20	12,80
0,08	268,75	93,97	6,03

Pour cet échantillon 2, les fines constituent 6,03%.

Tableau 9 : résultats des analyses granulométriques de l'échantillon 3

Tamis [mm]	Refus cumulés [g]	Refus cumulés [%]	Tamisât cumulé [%]
12,50	0,92	0,37	99,63
8,00	22,77	9,33	90,67
5,00	79,81	32,70	67,30
3,15	132,06	54,11	45,89
2,00	169,30	69,37	30,63
1,00	200,16	82,02	17,98
0,40	212,57	87,11	12,89
0,20	221,76	90,87	9,13
0,08	242,80	99,50	0,50

Les fines de cet échantillon représentent 0,50%.

Tableau 10 : Résultats des analyses granulométriques de l'échantillon 4

Tamis [mm]	Refus cumulés [g]	Refus cumulés [%]	Tamisât cumulé [%]
12,50	7,04	2,93	97,07
8,00	44,35	18,48	81,52
5,00	91,05	37,94	62,06
3,15	129,33	53,90	46,10
2,00	161,08	61,13	38,87
1,00	190,30	79,31	20,69
0,40	204,57	85,25	14,75
0,20	216,02	90,03	9,97
0,08	223,43	93,11	6,89

Les fines de cet échantillon constituent 6,89%.

Tableau 11 : Résultats des analyses granulométriques de l'échantillon 5

Tamis [mm]	Refus cumulés [g]	Refus cumulés [%]	Tamisât cumulé [%]
12,50	17,59	4,18	95,82
8,00	78,96	18,78	81,22
5,00	144,29	34,33	65,67
3,15	206,15	49,05	50,95
2,00	261,05	62,11	37,89
1,00	316,80	75,38	24,62
0,40	345,42	81,19	18,81
0,20	370,15	88,07	11,93
0,08	391,09	93,05	2,95

Dans cet échantillon 5, les fines représentent 2,95%.

Tous ces résultats seront représentés sous forme de courbe granulométrique où seront définis les coefficients suivants :

- C_u : coefficient d'uniformité avec $C_u = D_{60} / D_{10}$
- C_c : coefficient de courbure avec $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$

D_{60} , D_{30} , D_{10} désignent respectivement les diamètres des tamis correspondant à 60, 30, 10% de tamisat (figure 15).

Ces coefficients C_u et C_c permettent la classification et la connaissance de la qualité du matériau.

Si on a : $C_u \geq 2$ alors la granulométrie est uniforme c'est-à-dire étalée

Et si $1 \leq C_c \leq 3$ alors l'échantillon est bien gradué

- Echantillon 1

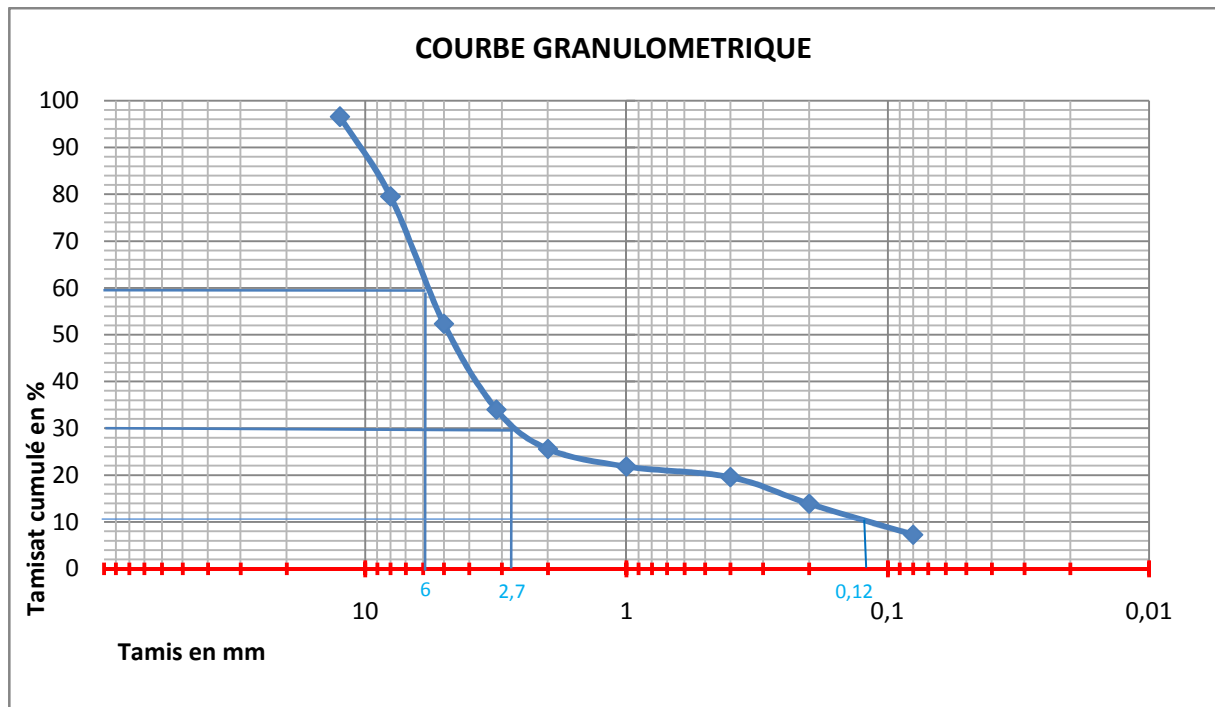


Figure 18 : Courbe granulométrique de l'échantillon 1

$C_u = 6/0,12 = 50$ □ 2 d'où granulométrie étalée

$C_c = 2,7^2 / (6 \times 0,12) = 10,12$ □ 3 d'où échantillon non gradué

- Echantillon n°2

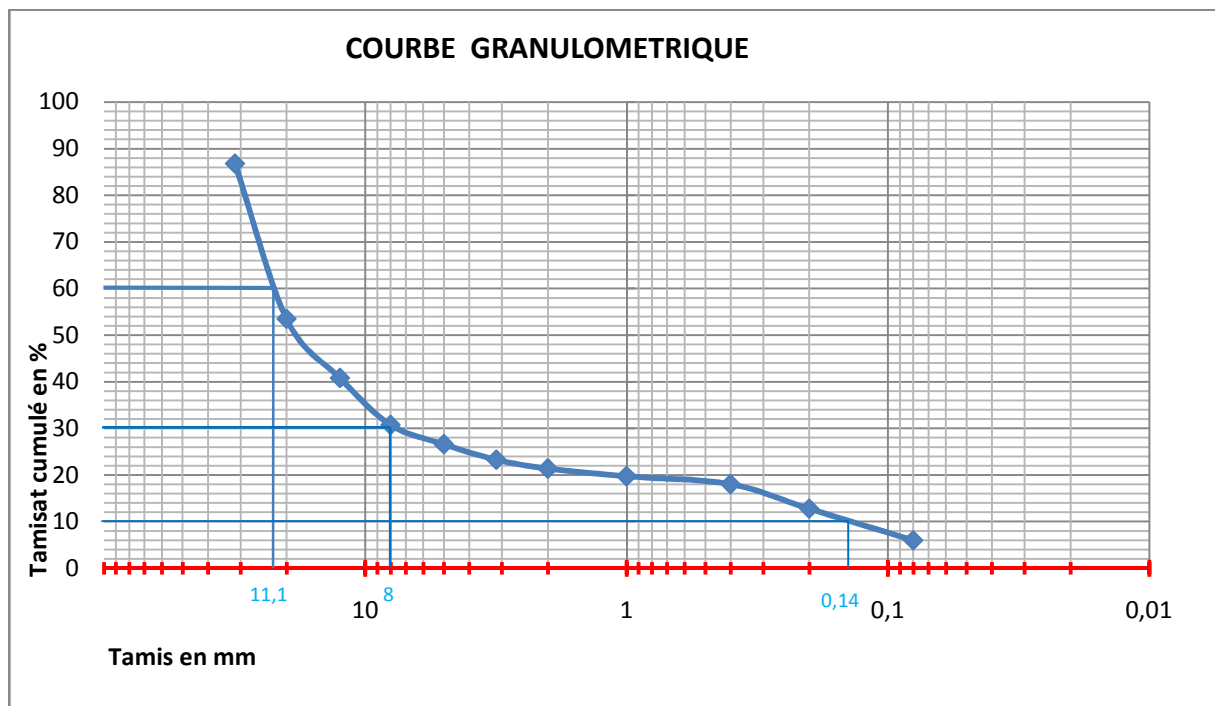


Figure 19 : Courbe granulométrique de l'échantillon 2

$C_u = 11,1 / 0,14 = 79,28 \square$ d'où granulométrie étalée

$C_c = 8^2 / (11,1 \times 0,14) = 41,18 \square 3$ d'où échantillon non gradué

- Echantillon n°3

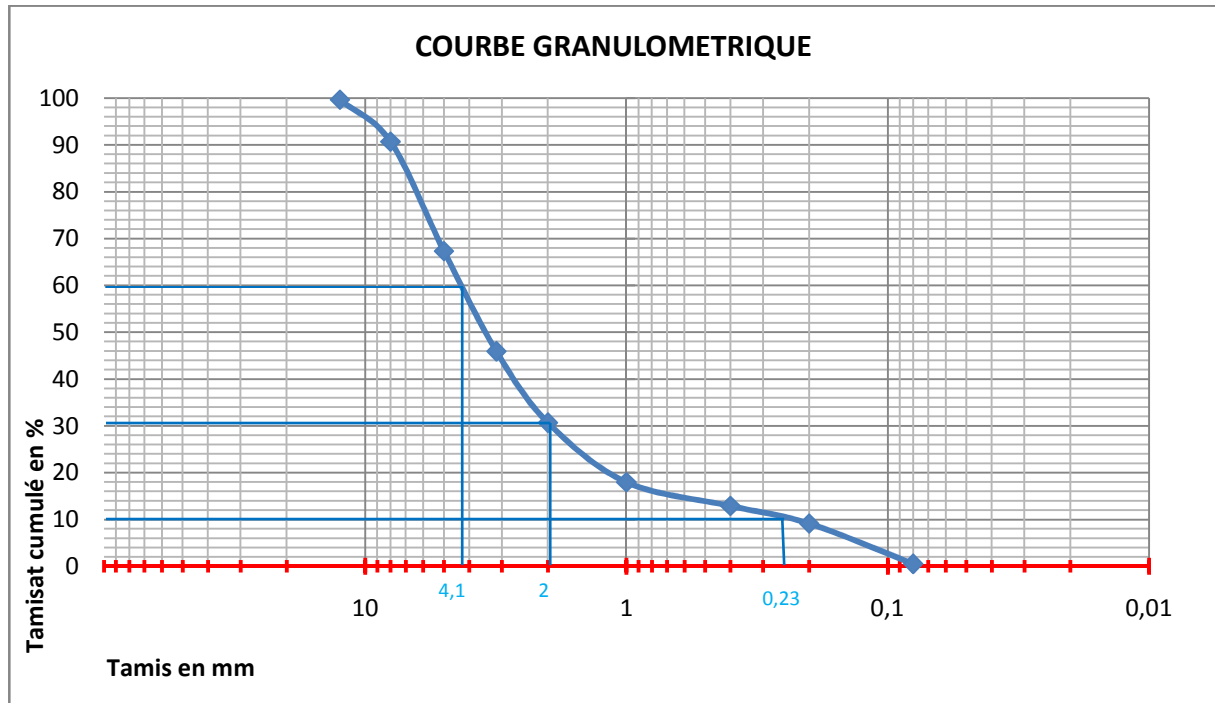


Figure 20 : Courbe granulométrique de l'échantillon 3

$C_u = 4,1 / 0,23 = 17,82 \square 2$ d'où granulométrie uniforme

$C_c = 2^2 / (4,1 \times 0,23) = 4,24 \square 3$ d'où échantillon non gradué

- Echantillon n°4

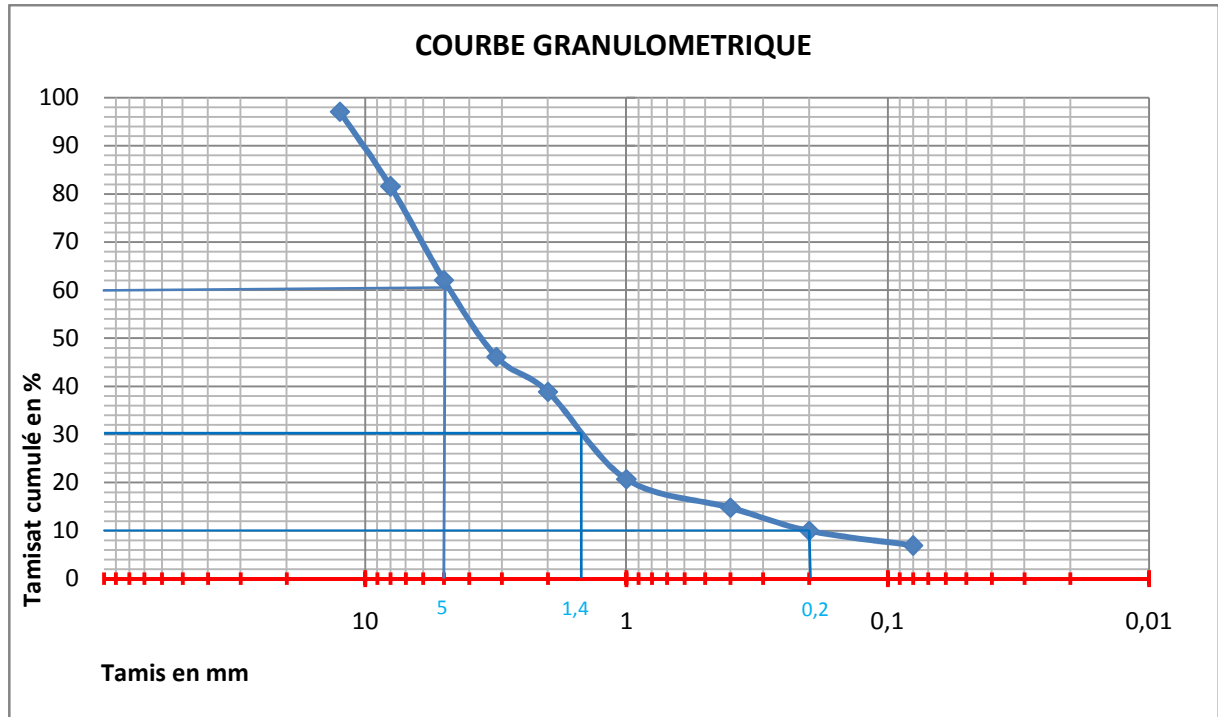


Figure 21 : Courbe granulométrique de l'échantillon 4

$C_u = 5 / 0,2 = 25 \geq 2$ d'où granulométrie uniforme

$C_c = 1,4^2 / (5 \times 0,2) = 1,96$ compris entre 1 et 3, soit échantillon bien gradué

- Echantillon n°5

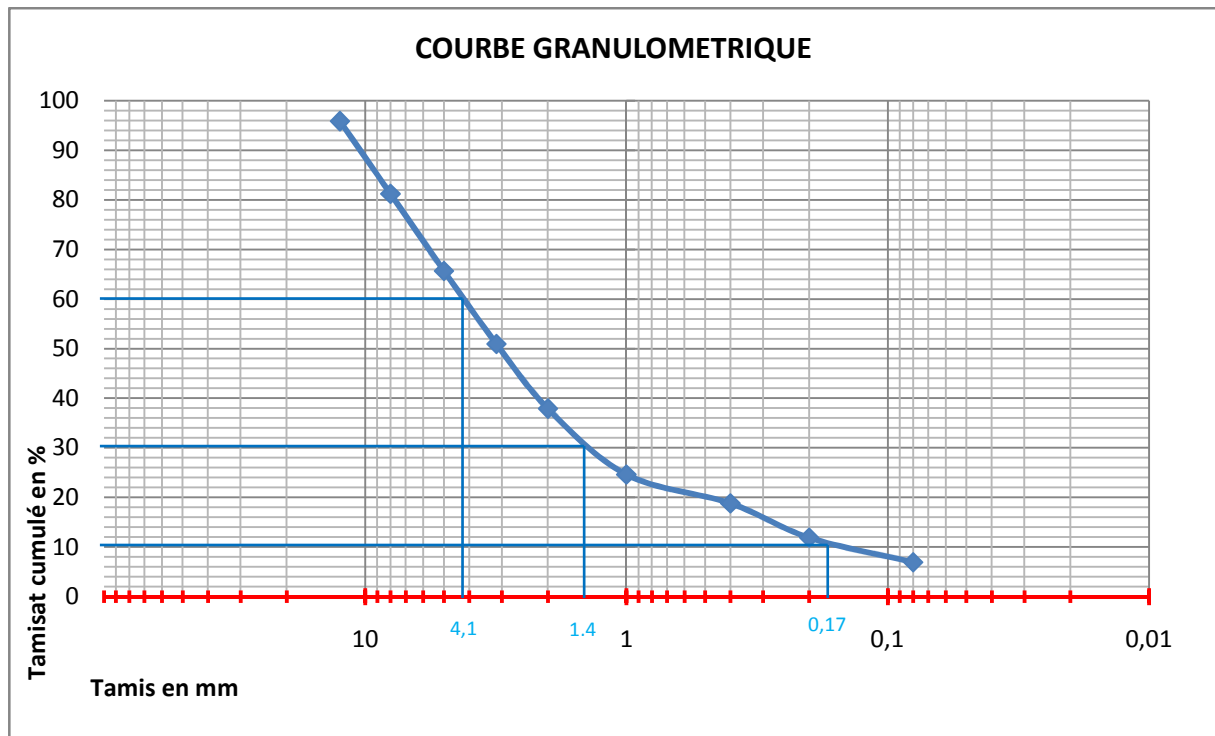


Figure 22 : Courbe granulométrique de l'échantillon 5

$C_u = 4,1 / 0,17 = 24,11 \geq 2$ d'où granulométrie étalée

$C_c = 1,4^2 / (4,1 \times 0,17) = 2,81$ compris entre 1 et 3, soit échantillon bien gradué

Pour tous les échantillons, $C_u \geq 2$ donc la granulométrie est étalée c'est qui veut dire que les matériaux (pouzzolanes) contiennent des grains de toutes dimensions.

4.3.4. Proctor

Les résultats des essais Proctor sont résumés sous forme de tableaux 12 à 17.

Tableau 12 : Résultat d'essai Proctor pour l'échantillon 1

Points	Point 1	Point 2	Point 3
Teneur en eau [%]	17,83	20,57	22,90
Poids d'eau ajoutée [ml]	380	500	620
Poids volumique humide [KN/m ³]	15,71	16,26	16,13
Poids volumique sec [KN/m ³]	13,33	13,49	13,12

Ces résultats seront ensuite représentés sous forme de courbe « Proctor » pour mieux définir les valeurs de $\gamma_d \text{ max}$ [KN/m³] et la teneur en eau optimum [%].

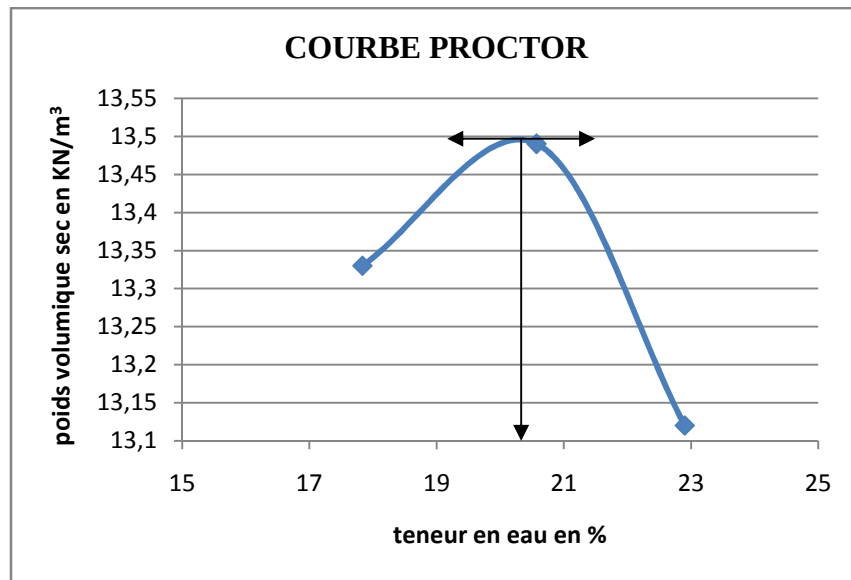


Figure 23 : Courbe Proctor de l'échantillon 1

Cette figure 23 permet de définir le poids volumique maximal $\gamma_{d(max)}$ et la teneur en eau optimum $W_{(opt)}$. Et ainsi de suite pour les figures 21, 22, 23, 24.

$$\gamma_{d(max)} = 13,5 \text{ [KN/m}^3\text{]}$$

$$W_{(opt)} = 20,45 \text{ [%]}$$

Tableau 13 : Résultat de l'essai Proctor de l'échantillon 2

Points	Point 1	Point 2	Point 3
Teneur en eau [%]	17,99	19,14	21,20
Poids d'eau ajoutée [ml]	500	620	740
Poids volumique humide [KN/m ³]	18,35	19,00	18,65
Poids volumique sec [KN/m ³]	15,55	15,95	15,39

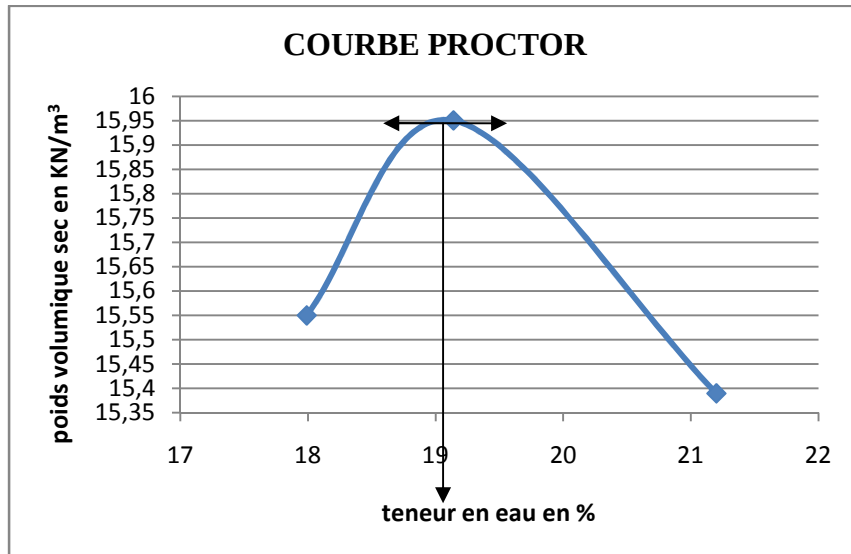


Figure 24 : Courbe Proctor de l'échantillon 2

$$\gamma_{d(\text{opt})} = 15,96 \text{ [KN/m}^3\text{]}$$

$$W_{(\text{opt})} = 19,1 \text{ [%]}$$

Tableau 14 : Résultat de l'essai Proctor de l'échantillon 3

Points	Point 1	Point 2	Point 3
Teneur en eau [%]	23,21	25,31	27,95
Poids d'eau ajoutée [ml]	660	780	900
Poids volumique humide [KN/m^3]	14,51	15,85	15,55
Poids volumique sec [KN/m^3]	11,77	12,64	12,15

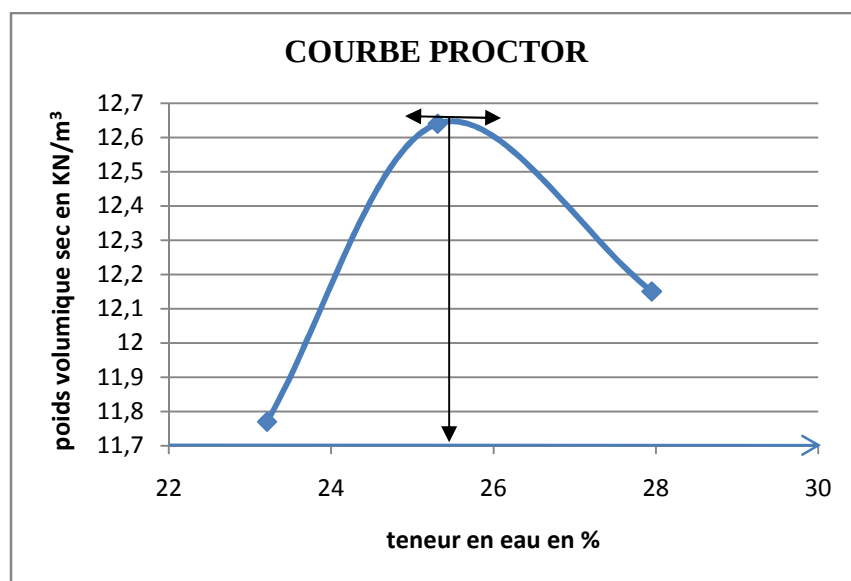


Figure 25 : Courbe Proctor de l'échantillon 3

$$\gamma_{d(opt)} = 12,66 \text{ [KN/m}^3\text{]}$$

$$W_{(opt)} = 25,5 \text{ [%]}$$

Tableau 15 : Résultat de l'essai Proctor de l'échantillon 4

Points	Point 1	Point 2	Point 3
Teneur en eau [%]	11,36	13,33	15,98
Poids d'eau ajoutée [ml]	450	570	690
Poids volumique humide [KN/m ³]	18,03	19,62	18,63
Poids volumique sec [KN/m ³]	16,19	17,31	16,06

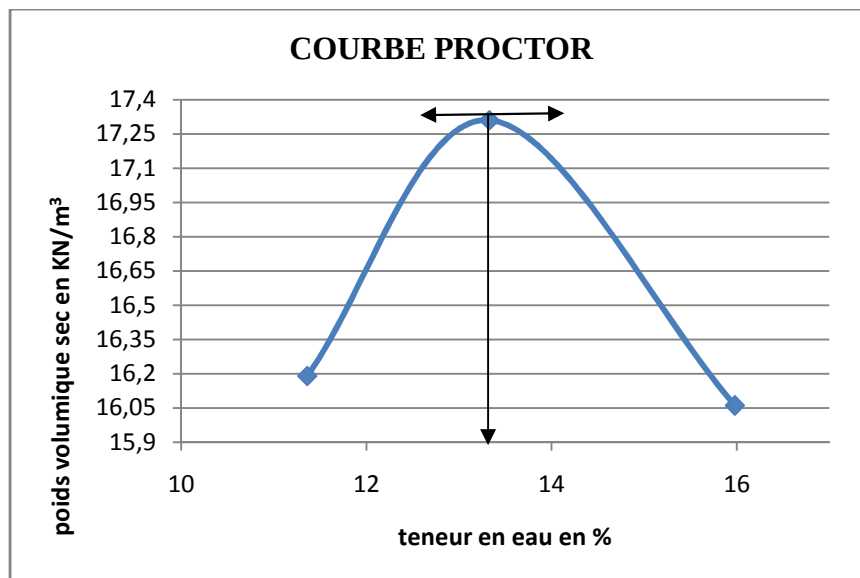


Figure 26 : Courbe Proctor de l'échantillon 4

$$\gamma_{d(opt)} = 17,32 \text{ [KN/m}^3\text{]}$$

$$W_{(opt)} = 13,4 \text{ [%]}$$

Tableau 16 : Résultat de l'essai Proctor de l'échantillon 5

Points	Point 1	Point 2	Point 3
Teneur en eau [%]	10,36	12,64	14,41
Poids d'eau ajoutée [ml]	450	570	690
Poids volumique humide [KN/m ³]	16,06	17,06	17,01
Poids volumique sec [KN/m ³]	14,11	14,73	14,31

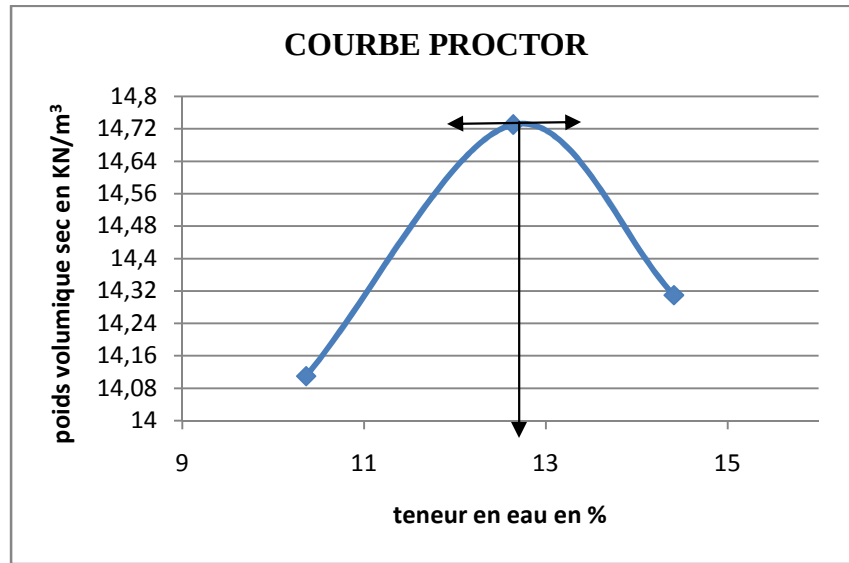


Figure 27 : Courbe Proctor de l'échantillon 5

$$\gamma_{d(max)} = 14,74 \text{ [KN/m}^3\text{]}$$

$$W_{(opt)} = 12,6 \text{ [%]}$$

Nous allons récapituler tous les résultats obtenus après les courbes dans le tableau 17.

Tableau 17 : Tableau récapitulatif des résultats des courbes Proctor

Echantillon	1	2	3	4	5
$\gamma_{d(max)} \text{ [KN/m}^3\text{]}$	13,5	15,96	12,66	17,32	14,74
$W_{(opt)} \text{ [%]}$	20,45	19,1	25,5	13,4	12,6

Les poids volumiques sec des échantillons varient de 12,6 à 17,4 dont la moyenne est de 14,8. Et pour la teneur en eau, elle varie de 12,6 à 20,5 avec une moyenne de 18,21.

4.3.5. Essai Californian Bearing Ratio (CBR)

D'après ces courbes de tendances de Proctor, nous pouvons déduire les poids volumiques sec maximal et la teneur en eau optimum de chaque échantillon. Ceci va nous permettre de faire les essais de portance. Les résultats de ces essais CBR sont donnés par les tableaux suivants :

Tableau 18 : Indice CBR avant imbibition

N° de l'échantillon	Indice portant au 2,5mm	Indice portant au 5mm
1	22,45	24,12
2	23,68	26,64
3	24,16	25,66
4	34,04	34,54
5	22,20	24,67

Seul l'échantillon 4 a un CBR >30.

Tableau 19 : Indice CBR après imbibition

N° de l'échantillon	Indice portant au 2,5mm	Indice portant au 5mm
1	20,14	21,41
2	20,72	21,71
3	19,24	20,72
4	26,64	28,62
5	20,72	20,72

En prenant les valeurs élevées de ces indices après imbibition, l'indice CBR des échantillons sera représenté dans le tableau 20 :

Tableau 20 : Indice CBR finale

Echantillon	1	2	3	4	5
I_{CBR}	21,41	21,71	20,72	28,62	20,72

L'indice CBR de ces 5 échantillons est compris entre 20 à 30 ($20 < I_{CBR} < 30$). On peut donc classer ces matériaux (pouzzolanes) parmi les sols de bonne portance et peuvent être utilisés comme couche de roulement (pour les chaussées non revêtues).

4.3.6. Fragmentation dynamique (FD)

Les essais de Fragmentation Dynamique des échantillons sont récapitulés dans le tableau 20 :

Tableau 21 : Résultat des essais de fragmentation dynamique

Echantillon	1	2	3	5
FD	45,4	38,6	64,3	37,1

Plus FD est petit, plus le sol résiste à la fragmentation dynamique. Le tableau 21 nous montre que les FD des échantillons de pouzzolanes sont compris entre 38 et 65.

4.3.7. Micro Deval en présence d'Eau (MDE)

Tableau 22 : Résultat des essais de MDE

Echantillon	1	2	4	5
MDE	83,52	64,12	90,84	66,96

On remarque que plus le coefficient MDE est faible, plus la dureté est élevée. Pour les bétons routiers par exemple, le coefficient est compris entre 15 et 20. Dans notre cas, le coefficient MDE est très élevé, ce qui signifie que la dureté des pouzzolanes est faible.

Tous les résultats des essais géotechniques sont résumés dans le tableau ci après :

Tableau 23 : Tableau récapitulatif de tous les résultats des essais géotechniques

Echantillon	1	2	3	4	5
Teneur en eau [%]	11,39	8,66	12,18	19,45	7,60
Poids spécifique [KN/ m ³]	2,17	2,16	1,94	1,67	2,08
IP	13,95	7,5		7,65	
% fines [%]	7,27	6,03	0,50	6,89	2,95
γ_d (max) [KN/m ³]	13,5	15,96	12,66	17,32	14,74
W (opt) [%]	20,45	19 ,1	25,5	13,4	12,6
I _{CBR}	21,41	21,71	20,72	28,62	20,72
FD	45,4	38,6	64,3		37,1
MDE	83,52	64,12		90,84	66,96
Couleur	Grise	Grise claire	Rougeâtre	Grise violacée	Noire jaunâtre

Echantillon	1	2	3	4	5
C_u	50	79,28	17,82	25	24,11
C_c	10,1	41,18	4,24	1,96	2,81

Se référant aux caractéristiques des couches dans les chaussées revêtues et non revêtues dans le tableau ci après :

Tableau 24 : caractéristiques des couches dans les chaussées revêtues et non revêtues

Type de chaussée	Chaussée revêtue	Chaussée non revêtue
Conditions	$I_p \leq 6$ $MDE \leq 20$ $Fine \leq 10\%$ $\gamma_s \leq 20 \text{ kN/m}^3$	$I_p \leq 20$ $CBR \geq 15$
Nature des couches	Couche de base	Couche de roulement

D'après le tableau 24, nous avons $7,5 \leq I_p \leq 19,5$, $MDE \leq 60$, $fines \leq 10\%$, $17 \leq \gamma_s \leq 22$: ces matériaux (pouzzolanes) ne remplissent pas les conditions nécessaires pour être utilisés comme couche de base dans une chaussée revêtue. Par contre, ils remplissent bien les conditions telles que $I_p \leq 20$ et $CBR \geq 15$, donc on peut les utiliser comme couche de roulement dans une chaussée non revêtue.

CHAPITRE V : Analyses chimiques

Des analyses chimiques ont été faites pour déterminer les caractéristiques chimiques des pouzzolanes nécessaires pour la cimenterie.

L'analyse chimique effectuée s'appelle la caractérisation par spectrométrie de fluorescence X ou FRX.

Ces analyses consistent à déterminer les éléments constituants majeurs et mineurs des pouzzolanes de Betafo.

5.1.Objectif

La caractérisation par spectrométrie de fluorescence X a comme but de déterminer à partir de l'interprétation des spectres obtenus, la composition centésimale des éléments présents dans les échantillons de pouzzolanes.

D'une autre manière, la spectrométrie de fluorescence des Rayonnements X est une spectroscopie de raie qui permet de caractériser la composition chimique d'un matériau (dans notre cas : c'est la pouzzolane).

Chaque raie de FRX est caractérisée :

- d'une part, par son énergie $W=h\gamma$ en KeV où sa fréquence γ est caractéristique de l'atome Z
- d'autre part, par son intensité caractéristique de sa concentration C de l'atome

5.2.Principe de la FRX

La spectrométrie de fluorescence X est une spectrométrie de l'atome basée sur l'émission de photon X de fluorescence d'énergie $h\gamma$.

La fréquence γ du photon X est donnée par :

$$\gamma^{1/2} = a (z - b)$$

Avec : a et b sont des constantes caractéristiques de raie X de fluorescence (raie x de fluorescence K, L.....) ;

z : numéro atomique.

Et l'intensité est donnée par :

$$I_i = S_i \times A_i \times C_i$$

Avec : C_i concentration de l'élément dans l'échantillon ;
 S_i sensibilité de la chaîne de comptage ;
 A_i facteur d'absorption du rayonnement X.

Les modes d'opération durant l'analyse sont résumés dans l'organigramme ci-dessous :

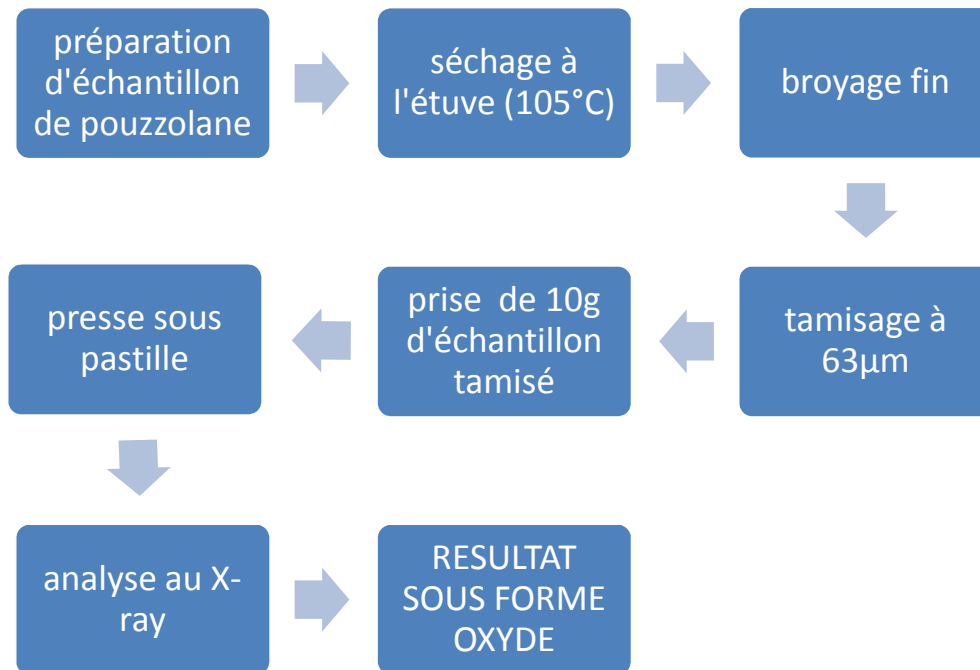


Figure 28 : Organigramme de la mode opératoire de l'analyse chimique

5.2.1. Préparation d'échantillon

Cette préparation n'est autre que le quartage : on prend l'échantillon, on le divise en 4 portions égales et on prend les deux portions opposées.

Il faut 200g d'échantillon pour faire l'analyse. Dans notre cas, on a donc au total 1kg d'échantillon.

5.2.2. Séchage

Cette opération consiste à introduire l'échantillon dans une étuve à 105°C. On y laisse l'échantillon jusqu'à ce qu'il arrive à son poids constant.

5.2.3. Broyage

L'échantillon séché va être broyé jusqu'à ce qu'on obtienne un échantillon de 63 μ de diamètre. 10g de cet échantillon tamisé sera confectionné en pastille puis analysé aux rayons X.

L'organigramme (figure 28) décrit les étapes pour l'analyse aux rayons X.

Les résultats sont sous forme de spectre (annexe IV) puis, on les transforme en teneurs à concentration selon la raie de fluorescence.

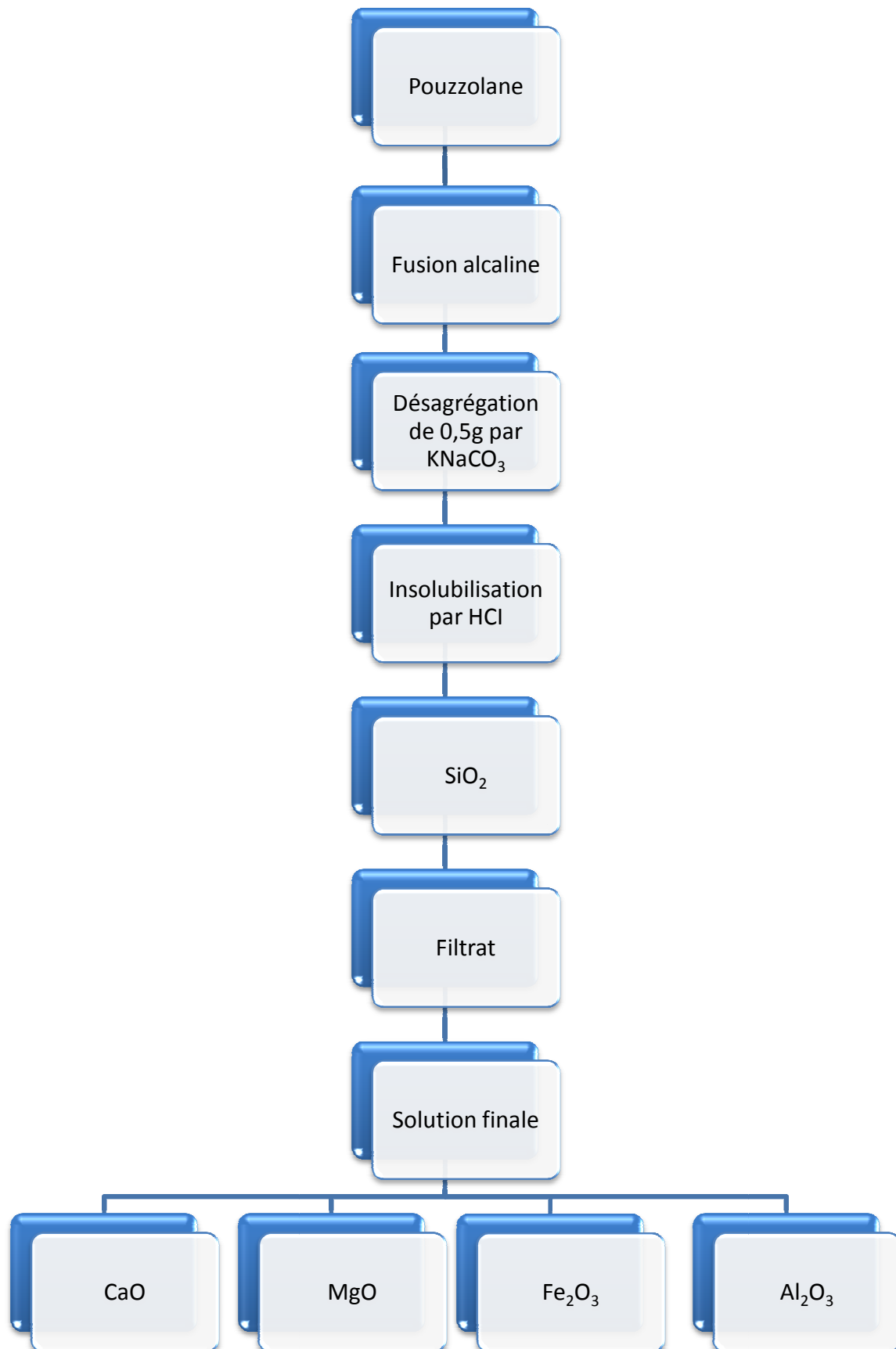


Figure 29 : Organigramme de l'analyse aux X-ray

PARTIE III : INTERPRETATIONS, RECOMMANDATIONS ET ETUDE ENVIRONNEMENTALE

CHAPITRE VI : Interprétation des essais géotechniques

Commençons par les résultats des teneurs en eau : le tableau 3 (p 40) montre que les pouzzolanes contiennent de l'eau dont le pourcentage varie de 8 à 20%. Ce qui caractérise les différentes densités de porosité de chaque échantillon. Ceci aussi peut se déduire comme la différence de granulats de chaque échantillon.

On peut définir le type de sol en fonction de l'indice de plasticité I_p . Cette norme est telle que :

$I_p \geq 20$: sol très argileux (très plastique),

$10 \leq I_p \leq 20$: sol argileux (plastique),

$5 \leq I_p \leq 10$: sol peu plastique,

$I_p \leq 5$: sol non plastique.

L'échantillon n°1 (dont $10 \leq I_p=13,95 \leq 20$) est donc classé parmi les sols plastiques (argileux). Quant aux échantillons n°2 et n°4 (dont les résultats de la limite respectifs sont $5 \leq I_p = 7,50 \leq 10$, et $5 \leq I_p=7,65 \leq 10$), ce sont des sols peu plastiques.

Dans le domaine du Génie civil, les travaux routiers par exemple peuvent utiliser ces types de matériaux car la pouzzolane n'est pas très sensible à l'eau.

Les résultats granulométriques peuvent être interprétés à l'aide de la classification LPC (tableau 25).

Cette classification LPC permettra de décrire les caractéristiques générales des pouzzolanes. Elle est liée sur les essais d'identification tels que la granulométrie et la plasticité du sol.

La classification LPC englobe les trois conditions suivantes :

- Condition 1 : $x \geq 50\%$: fins
 $x \leq 50\%$: grenus
- Condition 2 : $y \geq (100 - x) / 2$: grave
 $y \leq (100 - x) / 2$: sable
- Condition 3 : $x \geq 12\%$: limoneux
 $x \leq 5\%$: propre

x et y sont définis d'après la figure ci après :

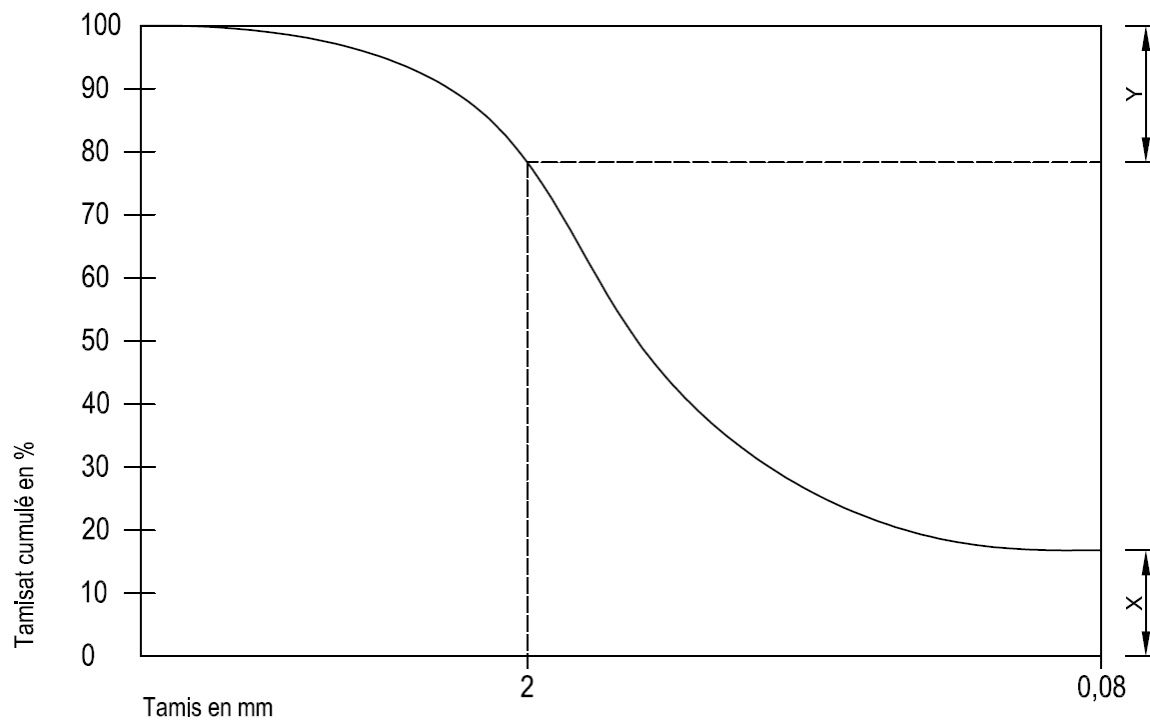


Figure 30 : Courbe granulométrique pour la classification LPC

Tableau 25 : Classification LPC des échantillons de pouzzolanes

Echantillon	Condition 1	Condition 2	Condition 3
n°1	$x=24\% \square 50\%$: grenu	$y=72\% \square 38\%$: grave	$x=24\% \square 12\%$: limoneux
n°2	$x=20\% \square 50\%$: grenu	$y=68\% \square 40\%$: grave	$x=20\% \square 12\%$: limoneux
n°3	$x=30\% \square 50\%$: grenu	$y=68\% \square 35\%$: grave	$x=30\% \square 12\%$: limoneux
n°4	$x=38\% \square 50\%$: grenu	$y=58\% \square 31\%$: grave	$x=38\% \square 12\%$: limoneux
n°5	$x=38\% \square 50\%$: grenu	$y=57\% \square 31\%$: grave	$x=38\% \square 12\%$: limoneux

Ce tableau 25 nous démontre que tous les échantillons sont classés dans une même catégorie : matériaux grenus, qui sont des graves et présentent une plasticité élevée. Ceci peut

en déduire donc que les pouzzolanes dans notre zone d'étude peuvent provenir d'une seule émission volcanique.

Les résultats granulométriques complètent aussi les conditions nécessaires telles que les pouzzolanes peuvent être utilisées dans la construction routière. Mais pour savoir quel type de route pourrions-nous faire avec les pouzzolanes, nous devons encore justifier cette utilisation en étudiant les résultats de compactage et de portance.

Les normes liées aux compactages et portance des sols appliquent les conditions suivantes :

- Indice $CBR \geq 15$: remblais de terrassement,
- Indice $CBR \geq 20$: couche de fondation, couche de roulement en MS

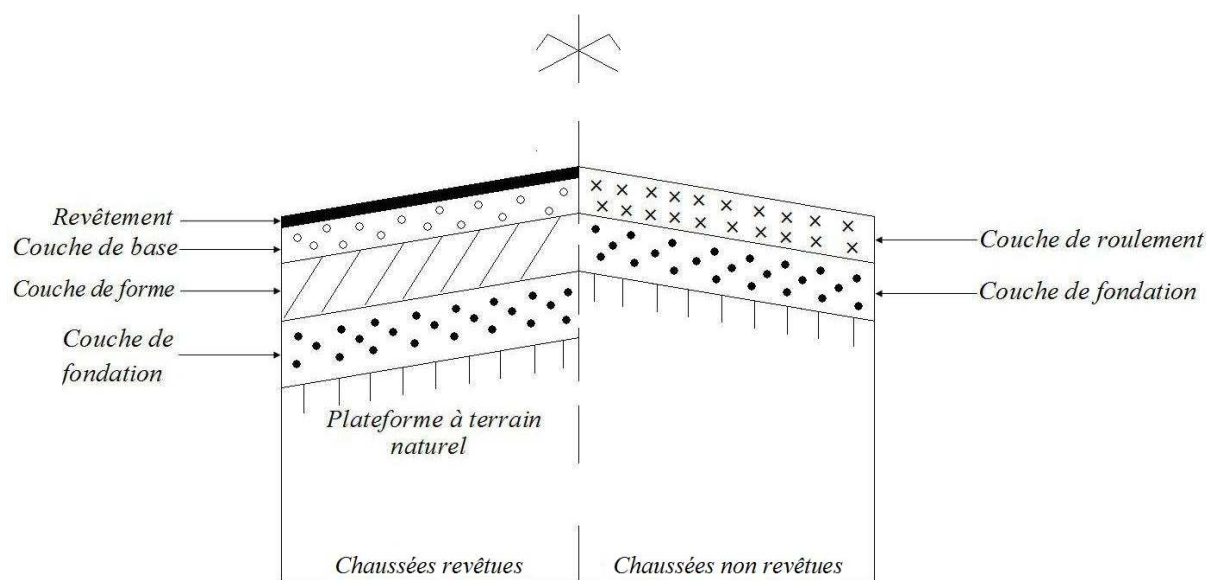


Figure 31 : Profil de chaussée

Les deux types de couches de roulement les plus utilisés sont :

- Couche en graveleux d'une épaisseur entre 10 à 20cm
 - Couche en empierrement d'une épaisseur de 15 à 20cm
- ✚ Pour les couches en graveleux, il existe dans la nature un grand nombre de matériau naturel pouvant être utilisé en couche de roulement.
- ✚ Sue des routes en terre , parmi les plus importants, nous pouvons citer : le graves, les latérites, les sables argileux, els scories volcaniques ou pouzzolanes, les matériaux coquilliers, les matériaux corraliens.

D'après nos résultats, nous pouvons en déduire que les échantillons n°1,2,3,5 peuvent être utilisés comme remblais de terrassement, et l'échantillon n°4 peut être utilisé comme couche de fondation ou couche de roulement. En plus, cet échantillon n°4 a un Indice de Plasticité inférieure à 20 ce qui est recommandé pour les couche de forme et les couches de fondation.

Donc les pouzzolanes de Betafo remplissent toutes les conditions pour être utilisées comme couche de roulement (pour une route à terre à chaussée non revêtue).

CHAPITRE VII : Interprétation des analyses chimiques

Les interprétations sont faites à partir des spectres (annexe IV) des résultats des analyses chimiques.

On peut dire aussi dépouillement pour ces analyses :

Tableau 26 : Dépouillement du spectre 1

ELEMENTS		Raie de fluorescence	Intensité	Concentration (%)
Eléments	Oxyde			
Al	Al ₂ O ₃	Kα	tf	24
Si	SiO ₂	Kα	tf	33
Fe	Fe ₂ O ₃	K (Kα, Kβ)	tF	27,40
Ca	CaO	K (Kα, Kβ)	f	10
Ti	TiO ₂	K (Kα, Kβ)	f	5,3
V	V ₂ O ₅	K (Kα, Kβ)	f	0,1
Cr	Cr ₂ O ₃	K (Kα, Kβ)	tf	0,18
Mn	MnO	K (Kα, Kβ)	F	0,33
Cu	CuO	K (Kα, Kβ)	tf	0,13
Sr	SrO	K (Kα, Kβ)	tf	0,13
Zr	ZrO ₂	K (Kα, Kβ)	tf	0,10
I		L (Lα, Lβ)	f	0,1
Ba	BaO	L (Lα, Lβ)	f	0,1

L'intensité est interprétée à l'aide des diagrammes dans l'annexe IV

tf : très faible

f : faible

F : forte

tF : très forte

La somme en pourcentage des éléments majeurs de l'échantillon 1 est de 94,4.

Tableau 27 : Dépouillement du spectre 2

ELEMENTS		Raie de fluorescence	Intensité	Concentration (%)
Eléments	Oxyde			
Al	Al ₂ O ₃	Kα	tf	29
Si	SiO ₂	Kα	tf	36
Fe	Fe ₂ O ₃	K (Kα, Kβ)	tF	21,4
Ca	CaO	K (Kα, Kβ)	f	6,4
Ti	TiO ₂	K (Kα, Kβ)	F	4,7
V	V ₂ O ₅	K (Kα, Kβ)	tf	0,1
Cr	Cr ₂ O ₃	K (Kα, Kβ)	tf	0,11
Mn	MnO	K (Kα, Kβ)	F	0,32
Cu	CuO	K (Kα, Kβ)	tf	0,056
Sr	SrO	K (Kα, Kβ)	tf	0,039
Ag	Ag ₂ O	L (Lα, Lβ _{1,2})	tf	0,83
Zr	ZrO ₂	K (Kα, Kβ)	tf	0,074
I		L (Lα, Lβ)	f	0,1
Ba	BaO	L (Lα, Lβ)	f	0,1

La somme en pourcentage des éléments majeurs pour l'échantillon 2 est de 92,8

Tableau 28 : Dépouillement du spectre 3

ELEMENTS		Raie de fluorescence	Intensité	Concentration (%)
Eléments	Oxyde			
Al	Al ₂ O ₃	Kα	tf	35
Si	SiO ₂	Kα	tf	32
Fe	Fe ₂ O ₃	K (Kα, Kβ)	tF	21,9

Ca	CaO	K (K α , K β)	f	4,3
Ti	TiO ₂	K (K α , K β)	F	4,1
V	V ₂ O ₅	K (K α , K β)	tf	0,16
Mn	MnO	K (K α , K β)	F	0,27
Cu	CuO	K (K α , K β)	tf	0,03
Pd	PdO		tf	1,8

La somme en pourcentage des éléments majeurs de l'échantillon 3 est de 93,2.

Tableau 29 : Dépouillement du spectre 4

ELEMENTS		Raie de fluorescence	Intensité	Concentration (%)
Eléments	Oxyde			
Al	Al ₂ O ₃	K α	tf	31
Si	SiO ₂	K α	tf	31
Fe	Fe ₂ O ₃	K (K α , K β)	tF	28,9
Ca	CaO	K (K α , K β)	f	3,2
Ti	TiO ₂	K (K α , K β)	F	4,6
V	V ₂ O ₅	K (K α , K β)	tf	0,1
Cr	Cr ₂ O ₃	K (K α , K β)	tf	0,1
Mn	MnO	K (K α , K β)	F	0,37
Cu	CuO	K (K α , K β)	tf	0,081
Br		K (K α , K β)	tf	0,004
Rb	Rb ₂ O	K (K α , K β)	tf	0,03
Ba	BaO	L (L α , L β)	f	0,1

La somme en pourcentage des éléments majeurs de l'échantillon 4 est de 94,1

Tableau 30 : Dépouillement du spectre 5

ELEMENTS		Raie de fluorescence	Intensité	Concentration (%)
Eléments	Oxyde			
Al	Al ₂ O ₃	K α	tf	26
Si	SiO ₂	K α	tf	42
Fe	Fe ₂ O ₃	K (K α , K β)	tF	16,2
Ca	CaO	K (K α , K β)	F	10,48
Ti	TiO ₂	K (K α , K β)	F	2,7
V	V ₂ O ₅	K (K α , K β)	tf	0,1
Mn	MnO	K (K α , K β)	F	0,24
Cu	CuO	K (K α , K β)	tf	0,059
Sr	SrO	K (K α , K β)	tf	0,12
Rb	Rb ₂ O	K (K α , K β)	tf	1,9
Ba	BaO	L (L α , L β)	f	0,1

La somme en pourcentage des éléments majeurs de l'échantillon 5 est de 94,68.

Résumons dans un seul tableau les résultats des éléments majeurs des échantillons.

Tableau 31 : Pourcentage des éléments majeurs des 5 échantillons

Echantillon	1	2	3	4	5	Moyenne
Fe ₂ O ₃	27,40	21,4	21,9	28,9	16,2	23,16
Al ₂ O ₃	24	29	35	31	26	29
SiO ₂	33	36	32	31	42	34,8
CaO	10	6,4	4,3	3,2	10,48	6,87
TiO ₂	5,3	4,7	4, 1	4,6	2,7	4,28

Couleur	grise	Gris clair	Rougeâtre	Gris violacé	Noire jaunâtre	
---------	-------	------------	-----------	--------------	----------------	--

D'après ce tableau 31, le SiO_2 est l'élément le plus élevé constituant les pouzzolanes.

Ainsi, nous en déduisons que les pouzzolanes de Betafo sont riches en Al_2O_3 , Fe_2O_3 , mais surtout en SiO_2 . Le CaO est plutôt en petite quantité par rapport aux trois autres éléments majeurs.

Comme les pouzzolanes sont des roches issues du refroidissement rapide du magma, les cristaux dans ces roches ne sont pas bien développés.

Ceci s'explique par la teneur en SiO_2 dans les pouzzolanes qui est inférieure à 50%. Dans ce cas, le magma est hyposiliceux et ce dernier est fluide et traverse rapidement l'écorce.

Cette composition chimique des pouzzolanes se complétera avec la composition chimique du ciment.

La composition chimique du ciment est comme suit (tableau 32) :

Tableau 32 : Composition chimique du ciment

Principaux constituants (%)	Valeurs usuelles	Valeurs limites
Al_2O_3	37,5 – 41	□ 37,0
CaO	35,5 – 39	□ 41
SiO_2	3,5 – 5,5	□ 6,0
Fe_2O_3	13,0 – 17,5	□ 18,5

D'après ces compositions chimiques de ciment, nous pouvons voir que ce sont les Al_2O_3 , CaO et les Fe_2O_3 qui sont les constituants principaux. Comme la pouzzolane est utilisée comme ajout (car on a déjà le calcaire pour avoir le CaO) dans la fabrication du ciment, nos résultats pourront bien satisfaire aux besoins des cimenteries, à part la teneur en silice très élevée.

A part les éléments majeurs (Al, Si, Fe) qui constituent les pouzzolanes, les autres éléments sont en trace dans chaque échantillon.

Le tableau 32 présente les résultats des analyses des pouzzolanes utilisées par Holcim. Et si on ne tient compte que des éléments majeurs tels que SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et CaO , le tableau 33 résume les teneurs en ces éléments.

Tableau 33 : résultats des analyses chimiques des pouzzolanes utilisés par Holcim (rapport de HOLCIM fait par Jean Bernard Joye)

Echn n°	1	2	3	4	5	6	7	8
PaF	2,9	9,1	6,4	3,4	9,5	3,2	1,1	11,5
SiO ₂	46,7	41,7	41,9	45,6	36,1	44,7	42,5	34,0
Al ₂ O ₃	15,5	18,7	18,0	15,2	18,8	15,4	14,8	20,8
Fe ₂ O ₃	12,8	15,7	15,1	13,0	16,5	13,3	13,4	17,9
CaO	8,1	4,1	5,8	8,8	5,9	9,4	11,1	3,7
MgO	6,8	6,1	7,5	7,6	8,4	7,9	8,8	7,3
SO ₃	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,05	0,03
K ₂ O	1,1	0,22	0,45	0,89	0,08	0,69	1,5	0,05
Na ₂ O	2,5	0,68	1,2	2,1	0,46	1,9	2,4	0,14
TiO ₂	2,3	2,8	2,7	2,3	2,9	2,4	2,8	3,2
Mn ₂ O ₃	0,22	0,26	0,24	0,22	0,27	0,23	0,23	0,30
P ₂ O ₃	0,49	0,30	0,38	0,49	0,80	0,53	0,66	0,59
CI	0,03	<0,01	0,01	0,03	< 0,01	0,02	0,05	□0,01
Total	99,46	99,68	99,69	99,66	99,72	99,68	99,39	99,51

Tableau 34 : valeurs moyennes des éléments majeurs des pouzzolanes utilisées par HOLCIM

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
Moyenne	41,65	17,15	14,71	7,11

En comparant les tableaux 30 et 33, nous avons constaté que les pouzzolanes de notre zone d'étude sont beaucoup plus riches en Fe₂O₃ et Al₂O₃ et moins riches en SiO₂. Ceci est en raison de la composition du magma où les pouzzolanes dans notre zone d'étude sont issues.

Le problème qui pourrait se présenter dans ce cas c'est l'oxydation du fer, ce qui va rendre les pouzzolanes plus vulnérables à l'usure et à la fragmentation. Mais ceci n'influence en aucun cas son utilisation dans la cimenterie car la pouzzolane n'est utilisée que comme adjuvant.

Et si on se réfère à la composition chimique du ciment (tableau 32), on constate que la valeur utilisée pour l' Al_2O_3 est supérieure à celle de la moyenne de notre pouzzolane.

Les résultats chimiques (obtenus en laboratoire) des échantillons de pouzzolanes de la zone d'étude sont complétés par des analyses chimiques effectués sur des échantillons aux alentours de Betafo : (tableau 35)

Tableau 35 : résultats des analyses chimiques des pouzzolanes aux alentours de Betafo

N°	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Perte au feu
1	41,38	29,18	10,07				14,01
2	38,00	30,70	12,60	2,40	9,80	5,40	6,00
3	30,60	26,70	14,15	1,80	3,40	5,40	17,90
4	34,60	24,00	13,70	2,25	5,70	4,80	15,00
5	26,40	28,50	15,10	2,30	3,00	5,10	20,60
6	28,60	23,30	15,25	3,10	3,65	6,20	19,90
moyenne(2à6)	31,64	26,64	14,16	2,37	5,11	5,38	15,88
7	38,80	19,90	12,30	3,00	7,80	8,55	9,5
8	46,35	19,15	12,55	3,40	8,80	8,90	1,15
moyenne	42,57	19,52	12,42	3,20	8,3	8,72	5,15
9	29,00	34,05	8,85	3,45	4,25	7,70	11,80
10	39,90	17,00	10,50	3,10	5,10	9,15	17,05

1 : volcan de Vohitra (Antsirabe)

Betafo

2 : pouzzolane noire sans argile. Talus route Betafo (km 16,7)

3 : pouzzolane un peu argileuse. Route Betafo (km 17)

4 : pouzzolane non souillée, affleurement en tranchée sur 50m. Route Betafo (km 18,9)

5 : pouzzolane noire. Route Betafo (km 19), piste à l'est de Betafo

6 : pouzzolane un peu argileuse. Erosion naturelle au Nord (km 19,2)

Tritriva

7 : pouzzolane entaillées par les fossés de la route. Iavomalaza, canton au pied est de Tritriva

8 : pouzzolane grossière, lapillis et cinérites. Sommet Est du cratère de Tritriva

Autres lieux

9 : alternances de pouzzolanes et de cinérites. Aux pieds du volcan d'Amboniloha

10 : projection d'un basalte très vacuolaire. Flanc du volcan d'Ambohitsokina

Tableau 36 : Tableau comparatif des différents résultats

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
Tableau 30	34,8	29	23,16	6,87
Tableau 33	41,65	17,15	14,75	7,11
Tableau 34	35,36	25,24	12,57	5,15

Dans ce tableau 35 ressortent les faits et observations suivantes :

- La teneur en SiO₂ dans les 3 cas est supérieure à 30%
- Dans les environs de Betafo, la teneur en Al₂O₃ est supérieure à 20%
- La teneur en Fe₂O₃ est élevée dans la zone d'étude par rapport aux deux autres résultats

D'après tous ces résultats, nous pouvons constater que les pouzzolanes de Betafo sont des pouzzolanes riches en silice, en fer ainsi qu'en alumine. Par rapport aux pouzzolanes utilisées par HOLCIM, les pouzzolanes de Betafo sont plutôt riches en alumine et en fer. Leur utilisation nécessite beaucoup plus d'attention surtout au niveau de pourcentage pondérale.

Et d'après les valeurs trouvées pour le Fe₂O₃, on peut en déduire que la pouzzolane dans notre zone d'étude peut présenter une charge magnétique (car il existe aussi du MgO dans la pouzzolane mais en très petite quantité).

CHAPITRE VIII : Interprétation comparative

Existe-t-il des relations entre les résultats des analyses chimiques avec ceux des essais géotechniques ?

Prenons les résultats des essais MDE et les taux de fer de chaque échantillon dans les résultats gravimétriques :

Tableau 37 : résultats de MDE et de Fe

Echantillon	1	2	4	5
MDE	83,52	64,12	90,84	66,96
Fe	16,48	13,85	16,00	11,46

Pour la couche de base d'une chaussée revêtue, les matériaux doivent avoir les caractéristiques suivantes : $I_p \leq 5$, $MDE \leq 35$. Dans notre cas (tableau 22), les valeurs des MDE sont supérieures à 35 donc ces matériaux ne peuvent pas être utilisés comme couche de base.

Ce tableau 37 nous montre que l'abondance de fer dans un échantillon augmente le coefficient de MDE. Ceci veut dire que l'abondance de fer provoque l'usure des pouzzolanes.

Les altérations des pouzzolanes sont causées par le fer qu'elles contiennent et provoque une destruction rapide de la roche par oxydation.

Cette oxydation de fer est rendue possible par l'existence des lacunes dans le fer. Cette lacune est provoquée par la migration du fer dans la surface et causant ensuite la formation des oxydes. (figure 31)

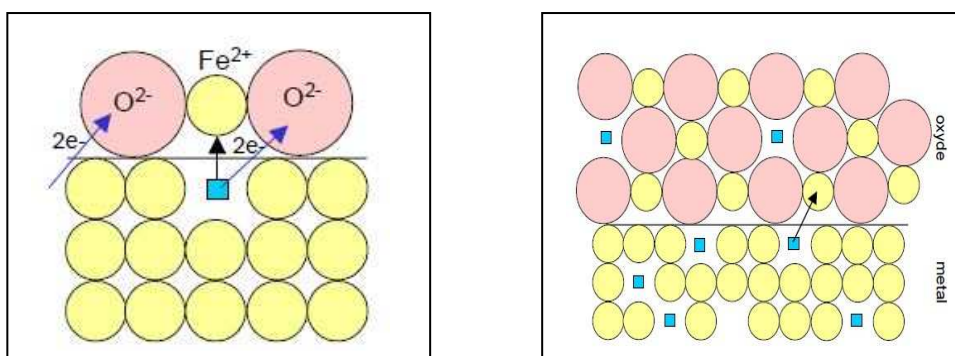


Figure 32 : Migration du fer vers la surface, oxydation (<http://fr.wikipedia>)

Les fragmentations des pouzzolanes qui sont très remarquables, sont facilitées par l'hétérogénéité de ces roches ainsi que leur porosité.

De même pour les résultats des fragmentations dynamiques des échantillons :

Tableau 38 : résultats de FD et de Fe

Echantillon	1	2	3	5
FD	45,4	38,6	64,3	37,1
Fe	16,48	13,85	16,95	11,46

Le coefficient de la fragmentation dynamique est petit lorsque le taux de fer dans l'échantillon l'est aussi.

On peut en déduire donc que le fer est l'un des facteurs causant l'altération des pouzzolanes les rendant plus vulnérables au choc et à l'usure.

D'après les résultats de FD, les échantillons 2 et 5 peuvent être utilisés dans les couches de fondation des routes.

Essayons de faire une comparaison entre les résultats des analyses chimiques et des résultats de FD et de MDE :

Tableau 39 : Tableau de comparaison entre les résultats de FD, MDE, et des éléments chimiques majeurs

Echantillon	1	2	3	4	5
MDE	83,52	64,12		90,84	66,96
FD	45,4	38,6	64,3		37,1
Fe	16,48	13,85	19,65	16,00	11,46
Si	33	36	32	31	42
Al	24	29	35	31	26
Couleurs	Gris	Gris clair	Rougeâtre	Gris violacé	Noir jaunâtre

D'après le tableau 39, on peut tirer les tendances suivantes :

- Plus la teneur en Fe est plus élevée, plus FD est grande et la couleur est rougeâtre. Il y a donc un phénomène d'oxydation qui s'est passé
- Plus la teneur en Si est élevée, moins grandes sont les valeurs en FD
- La teneur en Al est renversement proportionnelle en la teneur en Si

CHAPITRE IX : Etude environnementale

Cette étude concernera surtout les environs de la zone d'étude. Pour ce, il faut tout d'abord remarquer qu'aux alentours de la zone d'étude se trouvent des végétations telles que les forêts et les cultures. C'est pour cela que nous devons faire une étude environnementale, pour savoir les impacts positifs et négatifs de l'exploitation des pouzzolanes dans cette zone.

A Madagascar, les projets miniers sont assujettis à la procédure d'Etudes d'Impacts Environnementaux ou E.I.E selon la directive du Ministère de l'Environnement prévue à l'article 8 du décret 99-954 du 15 Décembre 1999 sur la Mise En Compatibilité des Investissements avec l'Environnement ou décret MECIE. Il s'adresse aux entreprises, organismes ou personnes détenteurs de permis minier, ou tout autre projet de grande envergure susceptible de porter atteinte à l'environnement.

9.1. Les législations minières

9.1.1. Code de l'eau

La loi n°98-029 du 19 Décembre 1998 porte le code de l'eau. Nous savons que l'eau est l'un des principaux besoins humains. Pour cela, il nous faut protéger, conserver et bien faire une gestion si on veut satisfaire tous les besoins en eaux des gens. Car si l'eau est malmenée, réduite par les diverses activités, ceci peut causer une grande réduction du potentiel utilisable à la survie des hommes, des espèces animales et végétales.

Ce code de l'eau prévoit alors dans ses dispositions les différentes causes de pollutions possibles, surtout au sein des activités industrielles et des exploitations minières. Ainsi, ce code favorise

- L'articulation des règles de protection et de mise en valeur des ressources en eau avec des normes environnementales ;
- Le renforcement de la lutte contre la pollution des eaux ;
- Le principe de non gratuité de l'eau.

9.1.2. Code forestier

C'est la loi n°97-017 du 08 Août 1997 qui porte le code forestier. Ce code apporte les différentes définitions sur les classifications des forêts. Ces forêts peuvent être des propriétés privées, des collectivités territoriales décentralisées, ou encore des propriétés publiques.

Cette loi stipule les circonstances et conditions selon lesquelles les forêts sont mises en régime spécial comme aires protégées ou réserves spéciales.

9.1.3 Code minier

Le code minier est un ensemble de textes législatifs régissant les activités minières. Ce code s'applique à toutes les substances minérales d'intérêt économique à Madagascar. Le code minier définit les conditions d'octroi des droits et autorisations minières, les droits et obligations des titulaires de permis, la fiscalité spécifique au secteur minier ainsi que les entités et organismes responsables dans ce secteur.

La loi n°99-022 du 19 Août 1999, modifiée par la loi n°2005-021 du 19 Octobre 2005 porte le code minier. Et ce code minier décrète toutes les démarches administratives concernant l'acquisition des permis miniers et des dispositions qui en découlent. Il décrète également toutes les obligations auxquelles tout détenteur de permis doit se soumettre pour ses activités minières.

9.2. Les impacts négatifs avant, pendant et après l'exploitation

2. Impacts sur le sol

- Phase préparatoire :

La construction des routes menant aux points de sondage et forage du gisement va accentuer l'érosion des sols dans cette zone et c'est la source potentielle d'impacts. Ceci en raison des creusements des voies d'accès dans les zones difficilement accessibles aux voitures. Il y aura donc destruction des profils topographiques, impliquant érosion des sols.

- Phase de construction

Durant cette phase s'aggrave encore l'érosion des sols à cause des décapages, du terrassement, de l'ouverture des voies d'accès, aménagement des lieux d'exploitation. Toutes

ces activités vont contribuer à détruire et enlever la partie ferrallitique dure du sol et le rend plus vulnérable à l'érosion et aux éboulements...

- Phase d'exploitation

La phase d'exploitation incluant les abattages du chantier, les transports des produits de pouzzolanes, vont causer des impacts sur le sol tels que : l'érosion par ruissellement, les excavations, la destruction des profils lithologiques, la modification des profils topographiques.

Le relief sera aussi modifié par l'abondance des terrils et des amas.

9.2.1. Impacts sur la faune et la flore

- Phase préparatoire

Les points de sondage et forage nécessitent un défrichage de la végétation existante dans la zone d'étude. Ceci réduira les végétations et détruira la faune environnante.

- Phase de construction et d'exploitation

Le défrichage est obligatoirement nécessaire dans ces deux phases. Mais les impacts de cette opération entraînent la destruction des plantes endémiques, des forêts environnantes. Sans oublier aussi les disparitions, la migration des faunes vivant dans ces forêts.

9.2.2. Impacts sur l'air

- Phase de construction

Les activités de défrichage, de déblaiement et de terrassement, la construction de la cité d'aménagement pour l'usine, le transport des matériels sur le chantier font propager dans l'atmosphère les particules poussiéreuses.

- Phase d'exploitation

Durant l'exploitation, les abattages, dynamitages, les transports des produits fournissent une très grande quantité de poussière sur l'air. En plus, les pouzzolanes contiennent une quantité favorable de fines qui vont polluer l'air.

9.2.3. Impacts sur l'eau

- Phase préparatoire

Dans notre cas, nous nous intéressons surtout au lac de Tatamarina. Les ressources en eau seront polluées par les activités de sondage et de forage. Les nappes vont être contaminées par les impuretés causées par les sondages et forages.

- Phase de construction

Les facteurs d'impacts sur l'eau sont les activités de décapage, de piétinement par les engins miniers et de transport de matériels qui affaiblissent les structures des sols. Les impuretés des sols seront transportés jusqu'aux points d'eau durant les périodes de pluies.

- Phase d'exploitation

Les impacts durant cette phases sont : la pollution des nappes phréatiques par les particules radioactifs, la contamination des eaux de surface ou souterraine par les particules emportés par les eaux de ruissellements durant les périodes de pluie, par l'eau d'exhaure des usines de traitement.

9.3. Les mesures d'atténuation de ces impacts négatifs

9.3.1. Mesure d'impacts sur la faune et la flore

- Limiter les défrichements, juste dans le lieu d'exploitation
- Etudier les comportements des animaux et de leurs habitats
- Bien connaître les différentes espèces de faune et flore existantes dans la zone d'exploitation
- Replanter les végétations dans un endroit favorable

9.3.2. Mesure d'impacts sur l'air

- Phase de construction

Les mesures d'atténuation proposées sont :

- Entretenir les engins utilisés périodiquement pour éviter la pollution de l'air

- Essayer d'humidifier les zones exploitées pour restreindre les suspensions des poussières dans l'air
- Phase d'exploitation

Pour minimiser les impacts, il faut :

- Utiliser des engins munis du système d'antipollution
- Entretenir périodiquement les véhicules de transport de produits pour éviter les pollutions de l'air
- Humidifier les routes servant aux transports de matériaux

9.3.3. Mesure d'impacts sur l'eau

- Phase de construction

Pour protéger les ressources en eau, le promoteur doit :

- Mettre en place un bassin de rétention d'eau et une station d'épuration qui sert à purifier les rejets liquides avant renvoi aux réseaux de surface
- Protéger les eaux contre les déblais
- Construire les bâtiments et creuser les excavations au de-là de 80m à partir d'un point d'eau
- Stocker et utiliser rationnellement l'eau

- Phase d'exploitation

- Eviter les eaux d'exutoire de rejoindre les eaux courantes utilisées par les habitants locaux
- Les terrils décapés doivent être conservés dans des endroits, à l'abri des ruissellements d'eau durant les pluies

Résumons dans les tableaux suivants les impacts négatifs avant, pendant et après l'exploitation des pouzzolanes dans la région de Betafo :

Tableau 40 : Résumé des impacts négatifs lors des phases préparatoires et de construction

Eléments récepteurs	Impacts négatifs	Effets
Paysage	Modification du paysage	Direct
Sol	Erosion du sol	Indirect
Air	Altération de la qualité de l'air et nuisance sonore	Direct
Flore et faune	Destruction de la végétation environnante et fuite des animaux	Direct
Socio-économique	Perturbation des activités rurales habituelles	Direct
	Perte de terrain de culture de la population locale	Direct

Tableau 41 : Résumé des impacts négatifs lors de la phase d'exploitation

Eléments récepteurs	Impacts probables	Effets
Paysage	Modification de l'intégrité du paysage physique naturel par les aménagements réalisés	Direct
Sol	Augmentation des risques d'érosion	Indirect
Air	Dégradation de la qualité de l'air et nuisance sonore	Direct
Eau	Pollution de l'eau de surface et des nappes par l'érosion des sols, des matériaux stockés et les terrils	Indirect
Faune et flore	Disparition de la végétation et de la forêt ainsi que disparition de certains animaux	Direct
Sécurité	Augmentation du risque d'accident lié au passage fréquent des engins transporteurs de produits	Indirect
Santé	Apparition et transmission de maladies	Indirect
Social	Rapport conflictuel avec la population locale	Direct

CONCLUSION

Nous pouvons en conclure que les pouzzolanes sont des roches volcaniques qui sont nécessaire tant dans les constructions routières que dans la fabrication des ciments.

Comme Madagascar est un pays en voie de développement, les constructions des nouveaux bâtiments sont nombreuses impliquant le besoin de bétons, et encore une importante quantité de ciment.

La pouzzolane est l'un des éléments constituant la fabrication des ciments (utilisée comme ajout), ce qui veut dire que la pouzzolane est importante dans les constructions des bâtiments à Madagascar.

Nous avons pu déduire de notre ouvrage que les pouzzolanes de Betafo peuvent être utilisées comme matériaux de constructions routières à Madagascar à cause de leur indice CBR qui sont plutôt bons pour les couches de fondation ou de roulement.

Et d'après les résultats des analyses chimiques, ces pouzzolanes répondent bien aux conditions de fabrication de ciments.

Mais nous avons quand même quelques recommandations telles que :

- Bien étudier les impacts environnementaux avant de faire une exploitation car il existe des forêts, des végétations, des animaux aux alentours du gisement de pouzzolanes
- Pour les pouzzolanes contenant une quantité importante de fer, essayer de les traiter avant de les utiliser pour éviter les terrassements des routes.....

L'évaluation du gisement reste à vérifier si on peut s'investir à long terme pour son exploitation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Alsac C., (1963). « *Contribution à l'étude de pouzzolane, comité national Malgache de géologie* ».
- [2] Behier J., (1963). « *Carte minéralogique de Madagascar. Archive Service Géologique Madagascar. A 1871* ».
- [3] Comité National Malgache de Géologie, (1965). « *Comptes rendus de la semaine géologique* », Semaine géologique de Madagascar.
- [4] Frachebourg J., (1965). « *Contribution à l'étude de quelques pouzzolanes naturelles et artificielles en vue de la fabrication des ciments de pouzzolane* », Thèse de Doctorat ès-sciences Techniques, Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne.
- [5] Jean Claude B., (1963). « *La fabrication de ciment* », Edition EYROLLES.
- [6] Lacroix A., (1935). « *Sur quelques minéraux des pegmatites du Vakinankaratra (Madagascar)* », Bulletin de la Société française de Minéralogie, Paris, p 76-84.
- [7] Mottet G., (1974). « *Contribution à l'étude géomorphologique des hautes Terres volcaniques du Centre de Madagascar (Vakinankaratra)* », Thèse d'Etat, Laboratoire de l'Université de Géographie d'Antananarivo.
- [8] Moussa A. K., (2007). « *Contribution à l'étude de valorisation de la pouzzolane – Quelques applications* ».
- [9] Petit M., (1970). « *Contribution à l'étude morphologique des reliefs granitiques à Madagascar* », Thèse d'Etat.
- [10] Pezzotta F. et Franchi M., (1997). « *Miarolitic shallow depth pegmatites of the Betafo and Antsirabe areas, central Madagascar: genetic inferences* ».
- [11] Radoelizo S. A., (2010). (« *Contribution à l'étude de bétons : influence des fines d'ajout sur le comportement des bétons* », Mémoire de fins d'études, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.

- [12] Raherinjatovo N. N., (2008). « *Prologue à une étude d'impacts environnementaux et sociaux : application au cas d'une exploitation d'uranium dans le plateau de l'Horombe* », Mémoire de fins d'études, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.
- [13] Rajaonarison E. F., (2002). « *Proposition de formulation des bétons légers de pouzzolanes naturelles* ».
- [14] Ranaivoniarivo V. G., (1992). « *Contribution à l'étude de liants pouzzolaniques de synthèse à base de matériaux thermiquement activés à moyennes températures, principalement les latérites calcinées* ».
- [15] Ranaivoniarivo V. G., (2005). « *Contribution à l'étude d'élaboration de ciments à haute résistance à Madagascar. Action sur le mélange cru* ».
- [16] Rauney M., (1981). « *Le milieu physique de la région volcanique Ankaratra – Vakinankaratra – Itasy Madagascar* », IRAT-MDDRA.
- [17] Razafindrantsimba O. et Ramarimanana N., (1993). « *Performance des matériaux à base des pouzzolanes naturelles Malgaches* ».
- [18] Segalen P., (1957). « *Etude des sols dérivés des roches volcaniques basiques à Madagascar* », Mémoires IRSM, série D, tome VIII.

REFERENCES WEBOGRAPHIQUES

www.cimentfondu.com, Decembre 2009

www.auvergne.volcan.com/liens.htm, « *La pouzzolane* », Janvier 2010

[http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Betafo&action=edit&redlink=1,
District_de_Betafo.htm](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Betafo&action=edit&redlink=1,District_de_Betafo.htm).

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Pouzzolane>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Ciment>

« *Ensembles_morphopedologiques_Madagascar.pdf* », chap 5, 6 et 7, 1997

ANNEXES

ANNEXES I: POIDS SPECIFIQUE

	POIDS SPECIFIQUE	FICHE N° :
		NORMES : NF EN 1097 - 7
		Date :
		Localisation :
		Opérateur :
Sondage :		Client :

POIDS SPECIFIQUE	1° ESSAI	2° ESSAI	3° ESSAI	4° ESSAI	5° ESSAI
Référence Picnomètre					
Poids du Picnomètre : P_1 (g)	432,33	825,63	260,10	257,92	232
Poids du Picnomètre + Eau : P_2 (g)	1626,37	2475,10	954	952,21	803
Volume du Picnomètre : $V_1 = P_2 - P_1$ (cm ³)	1194,04	1649,47	693,9	694,29	571
Poids Picnomètre + Echantillon : P_3 (g)	1158,88	1154,41	574,16	645,54	703,4
Poids Picnomètre + Echantillon + Eau : P_4 (g)	2018,89	2652,18	1106,63	1107,85	1048,58
Poids Eau : $P_4 - P_3 = V_2$ (cm ³)	860,01	1497,77	532,47	462,31	345,18
Volume Echantillon : $V_1 - V_2 = V$ (cm ³)	334,03	151,7	161,43	231,98	225,82
Poids Echantillon : $P_4 - P_3 = E_5$ (g)	726,55	328,78	314,06	387,62	471,4
Poids Spécifique : $\gamma_s = E_5/V$ (T/m ³)	2,17	2,16	1,94	1,67	2,08
γ_s MOYENNE (T/m ³)					

ANNEXE II: ESSAI CBR

	ESSAI CBR FICHE D'ESSAI A 0 H		FICHE N° : Echantillon n°1		
	LOCALISATION :		NORMES :		
	OPERATEUR :		DATE :		
CLIENT :					
Proctor de référence		$\gamma_{d_{opt}} : 13,49 \text{ KN/m}^3$		$W_{opt} : 20,57 \%$	
Teneur en eau avant compactage	Numéro des échantillons				
	Numéro de la tare				
	Poids de la tare : (1)				
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)				
	Poids total (tare + échant sec) : (3)				
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)				
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)				
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)				
Teneur en eau moyenne $W_i \%$					
Poids d'eau à ajouter	ENERGIE		10 Coups	25 Coups	50 Coups
	$\Delta W = W_{opt} - W_i$				
	Poids Humide de l'échantillon : P_h				
	Poids sec : $P_s = P_h / (1 + W_i)$				
	Poids d'eau ajouté : $P_e = P_s \times \Delta W$				
Teneur en eau de compactage	Numéro de la tare			G17	G11
	Poids de la tare : (1)			39,26	38,51
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)			142,53	151,10
	Poids total (tare + échant sec) : (3)			125,21	132,09
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)			17,32	19,01
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)			85,95	93,58
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)			20,15	20,31
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$			20,23	
Caractéristiques pondérales	N° du moule / hauteur h		n°1 / 12,6		
	Poids du moule : (7)		4426		
	Poids total humide (moule + échant.) : (8)		7743		
	Poids humide de l'échant. : (8) - (7) = (9)		3317		
	Volume : $f = Vol. 1 \times (1 + \Delta h/h)$: (10)		2137,35		
	Poids volumique humide: (9) / (10) = (11)		1,55		
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$		20,23		
	Poids volumsec ((11) * 100)/(100 + W_i)(12)		12,90		
Indice de compacité % $I.C. = (12) / \gamma_{d_{opt}}$		95,62			

	ESSAI CBR FICHE D'ESSAI A 0 H				FICHE N° : Echantillon n°2	
	LOCALISATION :				NORMES :	
	OPERATEUR :				DATE :	
OPERATEUR :				CLIENT :		
Proctor de référence		$\gamma_{d_{opt}} : 15,95 \text{ KN/m}^3$		$W_{opt} : 19,30 \%$		
Teneur en eau avant compactage	Numéro des échantillons					
	Numéro de la tare					
	Poids de la tare : (1)					
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)					
	Poids total (tare + échant sec) : (3)					
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)					
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)					
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)					
Teneur en eau moyenne $W_i \%$						
Poids d'eau à ajouter	ENERGIE		10 Coups	25 Coups	50 Coups	
	$\Delta W = W_{opt} - W_i$			620		
	Poids Humide de l'échantillon : P_h					
	Poids sec : $P_s = P_h / (1 + W_i)$					
	Poids d'eau ajouté : $P_e = P_s \times \Delta W$					
Teneur en eau de compactage	Numéro de la tare				G4	G10
	Poids de la tare : (1)				36,80	40,32
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)				191,01	180,69
	Poids total (tare + échant sec) : (3)				165,63	158,89
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)				25,38	21,89
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)				128,83	118,57
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)				19,70	18,47
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$				19,08	
Caractéristiques pondérales	N° du moule / hauteur h				n°2 / 12,5	
	Poids du moule : (7)				4857	
	Poids total humide (moule + échant.) : (8)				8719	
	Poids humide de l'échant. : (8) - (7) = (9)				3862	
	Volume : $f = Vol. 1 \times (1 + \Delta h/h)$: (10)				2171,58	
	Poids volumique humide: (9) / (10) = (11)				1,77	
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$				19,08	
	Poids volumsec ((11) * 100)/(100 + W_i) (12)				15,06	
Indice de compacité % I.C. = (12) / $\gamma_{d_{opt}}$				94,42		

	ESSAI CBR FICHE D'ESSAI A 0 H				FICHE N° : Echantillon n°3	
	LOCALISATION :				NORMES :	
	OPERATEUR :				DATE :	
Proctor de référence		$\gamma_{d_{opt}} : 12,64 \text{ KN/m}^3$		$W_{opt} : 25,31 \%$		
Teneur en eau avant compactage	Numéro des échantillons					
	Numéro de la tare					
	Poids de la tare : (1)					
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)					
	Poids total (tare + échant sec) : (3)					
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)					
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)					
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)					
Teneur en eau moyenne $W_i \%$						
Poids d'eau à ajouter	ENERGIE		10 Coups	25 Coups	50 Coups	
	$\Delta W = W_{opt} - W_i$			780		
	Poids Humide de l'échantillon : P_h					
	Poids sec : $P_s = P_h / (1 + W_i)$					
Teneur en eau de compactage	Numéro de la tare				G14	G23
	Poids de la tare : (1)				38,51	39,21
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)				156,74	169,59
	Poids total (tare + échant sec) : (3)				132,76	143,59
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)				23,98	26,00
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)				94,25	104,38
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)				25,44	24,90
Teneur en eau moyenne $W_i \%$				25,17		
Caractéristiques pondérales	N° du moule / hauteur h				n°3 / 12,6	
	Poids du moule : (7)				4473	
	Poids total humide (moule + échant.) : (8)				7759	
	Poids humide de l'échant. : (8) - (7) = (9)				3286	
	Volume : $f = Vol. 1 \times (1 + \Delta h/h)$: (10)				2172,32	
	Poids volumique humide: (9) / (10) = (11)				1,51	
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$				25,17	
	Poids volumsec ((11) * 100)/(100 + W_i) (12)				12,08	
Indice de compacité % I.C. = (12) / $\gamma_{d_{opt}}$				95,56		

	ESSAI CBR FICHE D'ESSAI A 0 H				FICHE N° : Echantillon n°4	
	LOCALISATION :				NORMES :	
	OPERATEUR :				DATE :	
CLIENT :						
Proctor de référence		$\gamma_{d_{opt}} : 17,31 \text{ KN/m}^3$		$W_{opt} : 13,33 \%$		
Teneur en eau avant compactage	Numéro des échantillons					
	Numéro de la tare					
	Poids de la tare : (1)					
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)					
	Poids total (tare + échant sec) : (3)					
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)					
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)					
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)					
Teneur en eau moyenne $W_i \%$						
Poids d'eau à ajouter	ENERGIE		10 Coups		25 Coups	
	$\Delta W = W_{opt} - W_i$					
	Poids Humide de l'échantillon : P_h					
	Poids sec : $P_s = P_h / (1 + W_i)$					
Teneur en eau de compactage	Numéro de la tare				35	12
	Poids de la tare : (1)				39,70	46,98
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)				221,54	201,37
	Poids total (tare + échant sec) : (3)				200,30	182,53
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)				21,24	18,84
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)				160,60	135,55
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)				13,22	13,89
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$				13,55	
Caractéristiques pondérales	N° du moule / hauteur h				n°4 / 12,5	
	Poids du moule : (7)				4894	
	Poids total humide (moule + échant.) : (8)				8974	
	Poids humide de l'échant. : (8) - (7) = (9)				4080	
	Volume : $f = Vol. 1 \times (1 + \Delta h/h)$: (10)				2190,09	
	Poids volumique humide: (9) / (10) = (11)				1,86	
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$				13,55	
	Poids volumsec ((11) * 100)/(100 + W_i) (12)				16,40	
Indice de compacité % I.C. = (12) / $\gamma_{d_{opt}}$				94,70		

	ESSAI CBR FICHE D'ESSAI A 0 H				FICHE N° : Echantillon n°5	
	LOCALISATION :				NORMES :	
	OPERATEUR :				DATE :	
Proctor de référence		$\gamma_{d_{opt}} : 15,15 \text{ KN/m}^3$		$W_{opt} : 12,64 \%$		
Teneur en eau avant compactage	Numéro des échantillons					
	Numéro de la tare					
	Poids de la tare : (1)					
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)					
	Poids total (tare + échant sec) : (3)					
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)					
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)					
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)					
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$					
Poids d'eau à ajouter	ENERGIE		10 Coups	25 Coups	50 Coups	
	$\Delta W = W_{opt} - W_i$			570		
	Poids Humide de l'échantillon : P_h					
	Poids sec : $P_s = P_h / (1 + W_i)$					
	Poids d'eau ajouté : $P_e = P_s \times \Delta W$					
Teneur en eau de compactage	Numéro de la tare				G38	G28
	Poids de la tare : (1)				40,13	37,86
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)				159,29	182,63
	Poids total (tare + échant sec) : (3)				147,61	166,30
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)				11,68	16,33
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)				107,48	128,44
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)				10,86	12,71
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$				11,78	
Caractéristiques pondérales	N° du moule / hauteur h				n°5 / 12,7	
	Poids du moule : (7)				4481	
	Poids total humide (moule + échant.) : (8)				8021	
	Poids humide de l'échant. : (8) - (7) = (9)				3540	
	Volume : $f = Vol. 1 \times (1 + \Delta h/h)$: (10)				2189,51	
	Poids volumique humide: (9) / (10) = (11)				1,61	
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$				11,78	
	Poids volumsec ((11) * 100)/(100 + W_i)(12)				14,44	
Indice de compacité % $I.C. = (12) / \gamma_{d_{opt}}$				95,47		

	ESSAI CBR FICHE D'ESSAI A 96H				FICHE N° : Echantillon n°1						
	LOCALISATION :				NORMES :						
	OPERATEUR :				DATE :						
Proctor de référence				$\gamma_{d_{opt}} : 13,49 \text{ KN/m}^3$				$W_{opt} : 20,57 \%$			
Teneur en eau avant compactage	Numéro des échantillons										
	Numéro de la tare										
	Poids de la tare : (1)										
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)										
	Poids total (tare + échant sec) : (3)										
	Poids d'eau : (2) – (3) = (4)										
	Poids de l'échantillon sec : (3) – (1) = (5)										
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)										
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$										
Poids d'eau à ajouter	ENERGIE				10 Coups		25 Coups		50 Coups		
	$\Delta W = W_{opt} - W_i$										
	Poids Humide de l'échantillon : P_h										
	Poids sec : $P_s = P_h / (1 + W_i)$										
	Poids d'eau ajouté : $P_e = P_s \times \Delta W$										
Teneur en eau de compactage	Numéro de la tare						G17		G11		
	Poids de la tare : (1)						39,26		38,51		
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)						142,53		151,10		
	Poids total (tare + échant sec) : (3)						125,21		132,09		
	Poids d'eau : (2) – (3) = (4)						17,32		19,01		
	Poids de l'échantillon sec : (3) – (1) = (5)						85,95		93,58		
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)						20,15		20,31		
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$						20,23				
Teneur en eau après imbibition	Numéro de la tare						G11		G17		
	Poids de la tare : (1)						38,51		39,26		
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)						154,32		153,22		
	Poids total (tare + échant sec) : (3)						131,90		131,08		
	Poids d'eau : (2) – (3) = (4)						22,42		22,14		
	Poids de l'échantillon sec : (3) – (1) = (5)						93,39		91,82		
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)						24,00		24,11		
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$						24,05				
Caractéristiques pondérales	N° du moule / hauteur h						n°1 / 12,6				
	Poids du moule : (7)						4426				
	Poids total humide (moule + échant.) : (8)						8130				
	Poids humide de l'échant. : (8) – (7) = (9)						3704				
	Volume : $f = Vol. 1 \times (1 + \Delta h/h)$: (10)						2168,13				
	Poids volumique humide: (9) / (10) = (11)						1,70				
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$										
	Poids volumsec ((11) * 100)/(100 + W_i) (12)										
MESURE DE GONFLEMENT											
DATE	10 Coups	25 Coups	50 Coups		DATE	10 Coups	25 Coups	50 Coups			
Gonflement absolu : $\Delta h \text{ (mm)}$		0,18			Gonflement relatif : $(\Delta h)/h \times 100 \text{ (%)}$		1,42				

	ESSAI CBR FICHE D'ESSAI A 96H				FICHE N° : Echantillon n°2						
	LOCALISATION :				NORMES :						
	OPERATEUR :				DATE :						
Proctor de référence				$\gamma_{d_{opt}} : 15,95 \text{ KN/m}^3$				$W_{opt} : 19,30 \%$			
Teneur en eau avant compactage	Numéro des échantillons										
	Numéro de la tare										
	Poids de la tare : (1)										
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)										
	Poids total (tare + échant sec) : (3)										
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)										
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)										
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)										
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$										
Poids d'eau à ajouter	ENERGIE				10 Coups		25 Coups		50 Coups		
	$\Delta W = W_{opt} - W_i$										
	Poids Humide de l'échantillon : P_h										
	Poids sec : $P_s = P_h / (1 + W_i)$										
	Poids d'eau ajouté : $P_e = P_s \times \Delta W$										
Teneur en eau de compactage	Numéro de la tare						G4		G10		
	Poids de la tare : (1)						36,80		40,32		
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)						191,01		180,69		
	Poids total (tare + échant sec) : (3)						165,63		158,89		
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)						25,38		21,89		
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)						128,83		118,57		
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)						19,70		18,47		
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$						19,08				
Teneur en eau après imbibition	Numéro de la tare						G4		G10		
	Poids de la tare : (1)						36,80		40,32		
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)						178,29		183,12		
	Poids total (tare + échant sec) : (3)						153,17		157,34		
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)						25,12		25,78		
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)						114,66		117,02		
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)						21,90		22,03		
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$						21,96				
Caractéristiques pondérales	N° du moule / hauteur h						n°2 / 12,5				
	Poids du moule : (7)						4857				
	Poids total humide (moule + échant.) : (8)						8895				
	Poids humide de l'échant. : (8) - (7) = (9)						4038				
	Volume : $f = Vol. 1 \times (1 + \Delta h/h)$: (10)						2179,55				
	Poids volumique humide: (9) / (10) = (11)						1,87				
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$						21,96				
	Poids volumsec ((11) * 100)/(100 + W_i) (12)						15,19				
MESURE DE GONFLEMENT											
DATE	10 Coups	25 Coups	50 Coups		DATE	10 Coups	25 Coups	50 Coups			
Gonflement absolu : $\Delta h \text{ (mm)}$		0,04			Gonflement relatif : $(\Delta h)/h \times 100 \text{ (%)}$		1,32				

	ESSAI CBR FICHE D'ESSAI A 96H				FICHE N° : Echantillon n°3						
	LOCALISATION :				NORMES :						
	OPERATEUR :				DATE :						
Proctor de référence				$\gamma_{d_{opt}} : 12,64 \text{ KN/m}^3$				$W_{opt} : 25,31 \%$			
Teneur en eau avant compactage	Numéro des échantillons										
	Numéro de la tare										
	Poids de la tare : (1)										
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)										
	Poids total (tare + échant sec) : (3)										
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)										
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)										
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)										
Teneur en eau moyenne $W_i \%$											
Poids d'eau à ajouter	ENERGIE				10 Coups		25 Coups		50 Coups		
	$\Delta W = W_{opt} - W_i$						780				
	Poids Humide de l'échantillon : P_h										
	Poids sec : $P_s = P_h / (1 + W_i)$										
Teneur en eau de compactage	Numéro de la tare						G14		G23		
	Poids de la tare : (1)						38,51		39,21		
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)						156,74		169,59		
	Poids total (tare + échant sec) : (3)						132,76		143,59		
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)						23,98		26,00		
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)						94,25		104,38		
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)						25,44		24,90		
Teneur en eau moyenne $W_i \%$						25,17					
Teneur en eau après imbibition	Numéro de la tare						G14		G23		
	Poids de la tare : (1)						38,51		39,21		
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)						148,03		159,11		
	Poids total (tare + échant sec) : (3)						123,93		132,66		
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)						24,10		26,45		
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)						85,42		93,45		
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)						28,21		28,30		
Teneur en eau moyenne $W_i \%$						28,25					
Caractéristiques pondérales	N° du moule / hauteur h						n°3 / 12,6				
	Poids du moule : (7)						4473				
	Poids total humide (moule + échant.) : (8)						7837				
	Poids humide de l'échant. : (8) - (7) = (9)						3364				
	Volume : $f = Vol. 1 \times (1 + \Delta h/h)$: (10)						2179,29				
	Poids volumique humide: (9) / (10) = (11)						1,54				
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$						28,25				
	Poids volumsec ((11) * 100)/(100 + W_i) (12)						12,03				
MESURE DE GONFLEMENT											
DATE	10 Coups	25 Coups	50 Coups		DATE	10 Coups	25 Coups	50 Coups			
Gonflement absolu : $\Delta h \text{ (mm)}$		0,04			Gonflement relatif : $(\Delta h)/h \times 100 \text{ (%)}$		0,31				

	ESSAI CBR FICHE D'ESSAI A 96H				FICHE N° : Echantillon n°4						
	LOCALISATION :				NORMES :						
	OPERATEUR :				DATE :						
Proctor de référence				$\gamma_{dopt} : 17,31 \text{ KN/m}^3$				$W_{opt} : 13,33 \%$			
Teneur en eau avant compactage	Numéro des échantillons										
	Numéro de la tare										
	Poids de la tare : (1)										
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)										
	Poids total (tare + échant sec) : (3)										
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)										
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)										
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)										
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$										
Poids d'eau à ajouter	ENERGIE				10 Coups		25 Coups		50 Coups		
	$\Delta W = W_{opt} - W_i$						570				
	Poids Humide de l'échantillon : P_h										
	Poids sec : $P_s = P_h / (1 + W_i)$										
	Poids d'eau ajouté : $P_e = P_s \times \Delta W$										
Teneur en eau de compactage	Numéro de la tare						35		12		
	Poids de la tare : (1)						39,70		46,98		
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)						221,54		201,37		
	Poids total (tare + échant sec) : (3)						200,30		182,53		
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)						21,24		18,84		
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)						160,60		135,55		
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)						13,22		13,89		
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$						13,55				
Teneur en eau après imbibition	Numéro de la tare						35		12		
	Poids de la tare : (1)						39,70		46,98		
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)						168,32		176,28		
	Poids total (tare + échant sec) : (3)						150,38		158,05		
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)						17,94		18,23		
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)						110,68		111,07		
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)						16,20		16,41		
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$						16,30				
Caractéristiques pondérales	N° du moule / hauteur h						n°4 / 12,5				
	Poids du moule : (7)						4894				
	Poids total humide (moule + échant.) : (8)						9057,4				
	Poids humide de l'échant. : (8) - (7) = (9)						4163				
	Volume : $f = Vol. 1 \times (1 + \Delta h/h)$: (10)						2193,59				
	Poids volumique humide: (9) / (10) = (11)						1,89				
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$						16,30				
	Poids volumsec ((11) * 100) / (100 + W_i) (12)						16,32				
MESURE DE GONFLEMENT											
DATE	10 Coups	25 Coups	50 Coups		DATE	10 Coups	25 Coups	50 Coups			
Gonflement absolu : $\Delta h \text{ (mm)}$		0,02			Gonflement relatif : $(\Delta h)/h \times 100 \text{ (%)}$		0,16				

	ESSAI CBR FICHE D'ESSAI A 96H				FICHE N° : Echantillon n°5						
	LOCALISATION :				NORMES :						
	OPERATEUR :				DATE :						
Proctor de référence				$\gamma_{d_{opt}} : 15,15 \text{ KN/m}^3$				$W_{opt} : 12,64 \%$			
Teneur en eau avant compactage	Numéro des échantillons										
	Numéro de la tare										
	Poids de la tare : (1)										
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)										
	Poids total (tare + échant sec) : (3)										
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)										
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)										
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)										
Teneur en eau moyenne $W_i \%$											
Poids d'eau à ajouter	ENERGIE				10 Coups		25 Coups		50 Coups		
	$\Delta W = W_{opt} - W_i$						570				
	Poids Humide de l'échantillon : P_h										
	Poids sec : $P_s = P_h / (1 + W_i)$										
Teneur en eau de compactage	Numéro de la tare						G38		G28		
	Poids de la tare : (1)						40,13		37,86		
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)						159,29		182,63		
	Poids total (tare + échant sec) : (3)						147,61		166,30		
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)						11,68		16,33		
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)						107,48		128,44		
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)						10,86		12,71		
Teneur en eau moyenne $W_i \%$						11,78					
Teneur en eau après imbibition	Numéro de la tare						G38		G28		
	Poids de la tare : (1)						40,13		37,86		
	Poids total humide (tare + échant.) : (2)						171,07		186,31		
	Poids total (tare + échant sec) : (3)						154,78		167,63		
	Poids d'eau : (2) - (3) = (4)						16,29		18,68		
	Poids de l'échantillon sec : (3) - (1) = (5)						114,65		129,77		
	Teneur en eau : (4) / (5) = (6)						14,20		14,39		
Teneur en eau moyenne $W_i \%$						14,29					
Caractéristiques pondérales	N° du moule / hauteur h						n°5 / 12,7				
	Poids du moule : (7)						4481				
	Poids total humide (moule + échant.) : (8)						8110				
	Poids humide de l'échant. : (8) - (7) = (9)						3629				
	Volume : $f = Vol. 1 \times (1 + \Delta h/h)$: (10)						2194,55				
	Poids volumique humide: (9) / (10) = (11)						1,65				
	Teneur en eau moyenne $W_i \%$						14,29				
	Poids volumsec ((11) * 100) / (100 + W_i) (12)						14,46				
MESURE DE GONFLEMENT											
DATE	10 Coups	25 Coups	50 Coups		DATE	10 Coups	25 Coups	50 Coups			
Gonflement absolu : $\Delta h \text{ (mm)}$		0,03			Gonflement relatif : $(\Delta h)/h \times 100 \text{ (%)}$		0,23				

ANNEXE III: MODE OPERATOIRE DES ANALYSES CHIMIQUES

DETERMINATION DES ELEMENTS MAJEURS

• PRERATION DU FILTRAT

- Peser 1g d'échantillon en poudre (<90 μ m).
- Mettre celui-ci dans une capsule de porcelaine de 120ml.
- Ajouter quelques gouttes d'eau distillée et agiter avec une baguette de verre.
- Additionner 5ml de HClO₄ puis agiter de nouveau.
- Mettre la capsule et son contenu sur bain de sable jusqu'à évaporation totale de l'acide ;
- Enlever et laisser refroidir ;
- Verser 50ml de HCl 10% dans la capsule, et agiter lentement pour mélanger.
- Remettre au bain de sable pendant 12 min.
- Filtrer le contenu de la capsule avec du papier filtre moyen.
- Recueillir le filtrat dans une fiole jaugée de 500ml.
- Nettoyer la capsule avec ¼ de papier filtre pour rattraper le dépôt de silice.
- Laver respectivement, la capsule et le filtre avec de l'eau distillée bouillante jusqu'à la disparition de la réaction avec AgNO₃, tout en filtrant jusqu'à la dernière goutte.
- Laisser refroidir le filtrat puis ajuster au trait de jauge avec de l'eau distillée.
- Homogénéiser bien en agitant.

Filtrat teneur en Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO et MgO (voir mode opératoire teneur en Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO et MgO)

Papier filtre teneur en SiO₂ (voir mode opératoire détermination de la silice)

• DETERMINATION DE LA SILICE

- Peser le creuset en platine, soit M
- Mettre le papier filtre et son contenu dans ce creuset
- Laisser sécher graduellement (sur plaque chauffante).
- Calciner à 1000 +/- 25°C dans un four pendant 45 min.
- Laisser refroidir dans un dessiccateur.
- Peser et vérifier la constance de la masse, soit M'

Expression des résultats

$$\% \text{ SiO}_2 = (M' - M) \times 100$$

M : masse du creuset vide

M' : masse du creuset et son contenu après calcination.

• DETERMINATION EN OXYDE DE FER

- Pipetter 100ml de filtrat et verser dans un bécher de 600ml, puis ajouter 200ml d'eau distillée
- Agiter avec un agitateur magnétique.
- Additionner 6 gouttes de bleu de bromophénol (jaune).
- Ajouter quelques gouttes de NH_4OH 50% jusqu'au virage bleu foncé.
- Verser rapidement, 20ml de HCl 0.1N + 15ml de solution tampon.
- Ajouter 15 à 20 gouttes d'acide salicylique (violet-noir).
- Chauffer à 40-50°C pendant 1mn 30s (ne pas dépasser 50°C).
- Titrer avec EDTA jusqu'au virage jaune-paille.
- Faire la lecture du volume de l'EDTA versé, sur la burette graduée.

N.B : Réserver cette solution notée **A** pour la détermination de la teneur en Al_2O_3

Expression des résultats

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = V \times f_{\text{EDTA/Fe}_2\text{O}_3}$$

V : volume d'EDTA versé pour le dosage de Fe_2O_3

f EDTA/ Fe_2O_3 : facteur de l'EDTA pour Fe_2O_3

• ANALYSE DE LA TENEUR EN ALUMINE

A la solution **A**,

- - Ajouter quelques gouttes de $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{NH}_4$ (coloration bleue), 5ml de $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$, 3 gouttes de complexonate de cuivre, 10 gouttes de P.A.N (rose violacée)
- Porter à ébullition la solution, tout en agitant.
- Titrer avec de l'EDTA jusqu'à la coloration jaune paille.

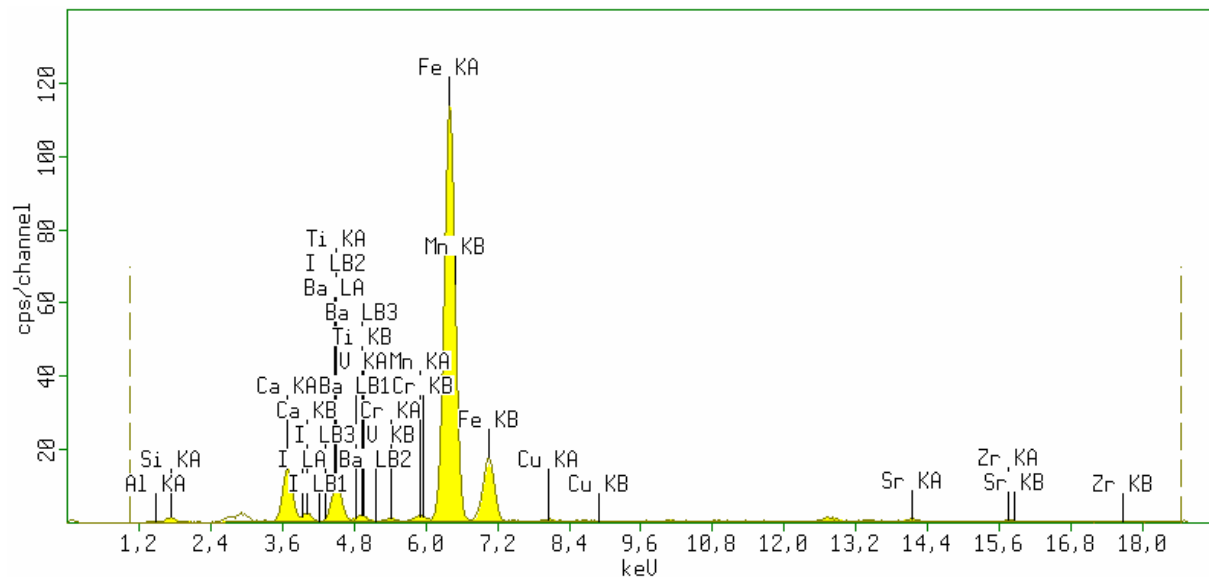
• ANALYSE DE LA TENEUR EN OXYDE DE CALCIUM

- Pipetter 50ml de filtrat puis le verser dans un bécher de 600ml, et ajouter 200ml d'eau distillée.
- Agiter avec un agitateur magnétique puis ajouter 2 gouttes d'hélianthine (coloration rose).
- Additionner quelques gouttes de NH_4OH 50% jusqu'à obtention de coloration jaune.
- Verser rapidement 20ml de triéthanolamine (T.E.A) 33% puis 40ml de NaOH 2N.
- Ajouter du réactif de PATON ET REEDER (rouge violet)
- Titrer avec EDTA jusqu'à l'obtention de couleur bleue
- Relever la valeur du volume de l'EDTA versé

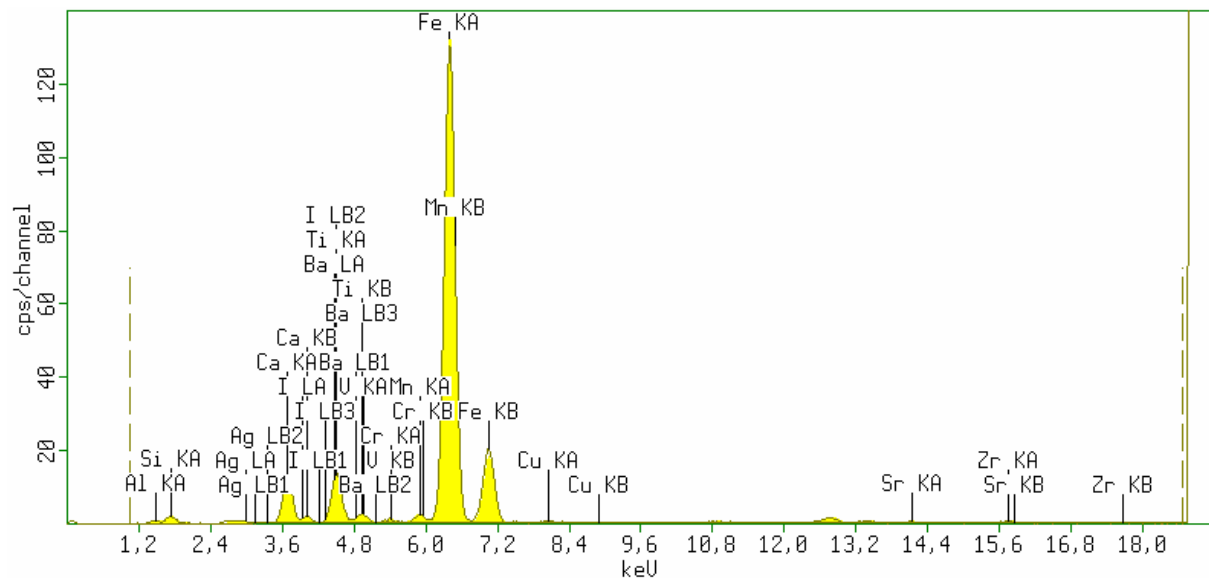
$$\% \text{CaO} = V \times f_{\text{EDTA/CaO}}$$

ANNEXE IV: SPECTRE DES ECHANTILLONS DE POZZOLANES

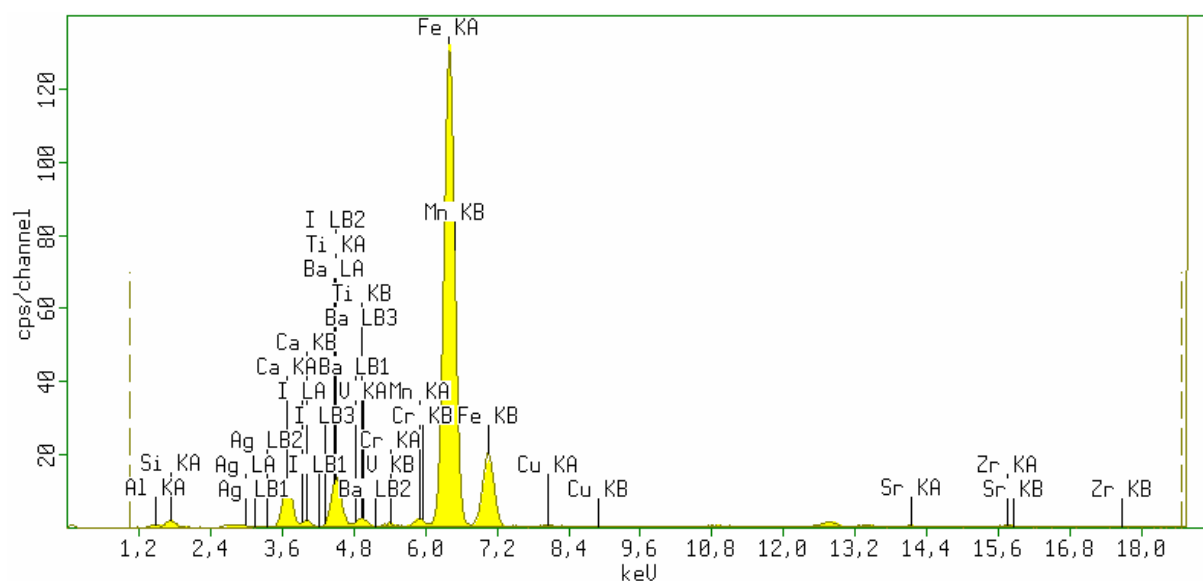
Spectre de l'échantillon 1



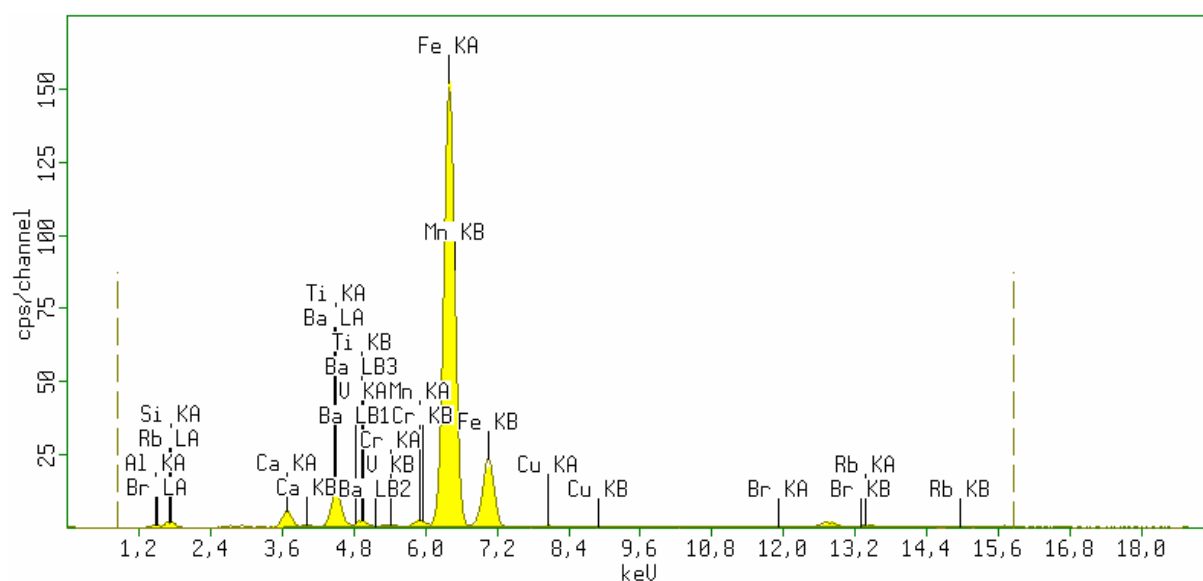
Spectre de l'échantillon 2



Spectre de l'échantillon 3



Spectre de l'échantillon 4



Spectre de l'échantillon 5

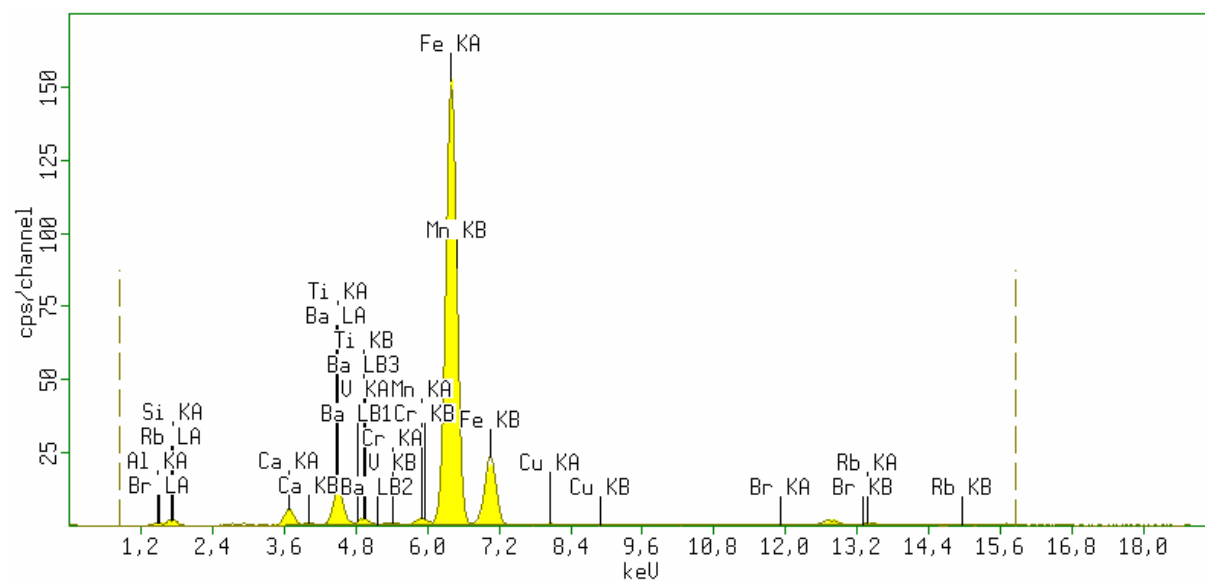


TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	I
SOMMAIRE.....	II
LISTE DES ABREVIATIONS.....	III
LISTE DES TABLEAUX	IV
LISTE DES FIGURES.....	V
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PARTIE I : GENERALITES SUR LA ZONE D’ETUDE ET SUR LA POZZOLANE.....	2
CHAPITRE I : Généralités sur la zone d’étude : zone de Betafo	3
1.1. Localisation :.....	3
1.2. Contexte géographique	4
1.2.1. Géographie physique	4
1.2.2. Géographie économique	5
1.2.3. Géographie humaine.....	5
1.3. Approche géologique [15].....	6
1.3.1. Aux alentours d’Antsirabe	6
1.3.2. Le système volcanique.....	8
1.3.3. Les environs de Betafo.....	10
CHAPITRE II : Généralités sur les pouzzolanes	13
2.1. Quelques définitions de pouzzolanes.....	13
2.2. Mode de formation des pouzzolanes.....	14
2.3. Les différents types de pouzzolanes [7]	15
2.3.1. Les pouzzolanes naturelles	15
2.3.2. Les pouzzolanes artificielles	16
2.4. Activités pouzzolaniques	16
2.4.1. Réaction pouzzolanique	16
2.4.2. Constituants actifs des pouzzolanes naturelles [10, 13,14]	17
2.5. Caractéristiques des pouzzolanes [4,14].....	19
2.5.1. La couleur.....	19
2.5.2. Composition chimique	19
2.5.3. Structure et texture des pouzzolanes.....	20
2.6. Utilisations des pouzzolanes [11,20].....	20
2.6.1. Utilisation pour la cimenterie :.....	20
2.6.2. Utilisation pour les bétons légers :	20

2.6.3.	Utilisation pour les travaux publics :	21
2.6.4.	Utilisation dans l'industrie :	21
2.6.5.	Utilisation dans l'agriculture :	21
2.7.	Gisements des pouzzolanes [8]	21
2.7.1.	Pays producteurs de pouzzolanes	21
2.7.2.	Les pouzzolanes de Madagascar	21
PARTIE II : TRAVAUX REALISES ET RESULTATS.....		23
CHAPITRE III : Observation morphologique et géologique de la zone.....		25
3.1.	Observation morphologique	25
3.2.	Observation géologique.....	27
3.3.	Echantillonnage	30
CHAPITRE IV : Essais géotechniques.....		32
4.1.	Analyses d'identification.....	32
4.1.1.	Teneur en eau (w)	32
4.1.2.	Poids volumique spécifique (γ)	33
4.1.3.	Limite d'Atterberg.....	33
4.2.	Analyses géotechniques	35
4.2.1.	Analyse granulométrique	35
4.2.2.	Essai PROCTOR.....	37
4.2.3.	Essai Californian Bearing Ratio (CBR).....	38
4.2.4.	Fragmentation dynamique (FD)	40
4.2.5.	Essai d'usure Micro-Deval en présence d'Eau (MDE).....	40
4.3.	Les résultats des différents essais	41
4.3.1.	Teneur en eau.....	41
4.3.2.	Poids spécifiques.....	41
Le tableau 4 résume les poids spécifiques des échantillons.....		41
4.3.3.	Indice de plasticité	41
4.3.4.	Proctor	50
4.3.5.	Essai Californian Bearing Ratio (CBR).....	54
4.3.6.	Fragmentation dynamique (FD)	56
4.3.7.	Micro Deval en présence d'Eau (MDE)	56

CHAPITRE V : Analyses chimiques	58
5.1. <i>Objectif</i>	58
5.2. <i>Principe de la FRX.....</i>	58
5.2.1. <i>Préparation d'échantillon.....</i>	59
5.2.2. <i>Séchage</i>	59
5.2.3. <i>Broyage</i>	60
PARTIE III : INTERPRETATIONS, RECOMMANDATIONS ET ETUDE ENVIRONNEMENTALE	62
CHAPITRE VI : Interprétation des essais géotechniques.....	63
CHAPITRE VII : Interprétation des analyses chimiques	66
CHAPITRE VIII : Interprétation comparative	74
CHAPITRE IX : Etude environnementale	76
9.1. <i>Les législations minières.....</i>	76
9.1.1. <i>Code de l'eau</i>	76
9.1.2. <i>Code forestier.....</i>	77
9.1.3 <i>Code minier.....</i>	77
9.2. <i>Les impacts négatifs avant, pendant et après l'exploitation.....</i>	77
2. <i>Impacts sur le sol</i>	77
9.2.1. <i>Impacts sur la faune et la flore</i>	78
9.2.2. <i>Impacts sur l'air.....</i>	78
9.2.3. <i>Impacts sur l'eau.....</i>	79
9.3. <i>Les mesures d'atténuation de ces impacts négatifs.....</i>	79
9.3.1. <i>Mesure d'impacts sur la faune et la flore</i>	79
9.3.2. <i>Mesure d'impacts sur l'air.....</i>	79
9.3.3. <i>Mesure d'impacts sur l'eau</i>	80
CONCLUSION.....	82
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	83
REFERENCES WEBOGRAPHIQUES.....	85
ANNEXES I: POIDS SPECIFIQUE	i
ANNEXE II: ESSAI CBR.....	ii
ANNEXE III: MODE OPERATOIRE DES ANALYSES CHIMIQUES	xii
ANNEXE IV: SPECTRE DES ECHANTILLONS DE POUZZOLANES	xiv
TABLE DES MATIERES	xvii

« CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUE ET CHIMIQUE DES POUZZOLANES DANS LA REGION DE BETAFO »

Nombres de pages : 84

Nombres de tableaux : 40

Nombres de figures : 32

Nombres d'annexes : 4

Résumé

Les pouzzolanes sont des roches volcaniques riches en Silice, en Alumine et en Fer. Elles possèdent une propriété pouvant réagir plus ou moins rapidement avec la chaux. Dans le domaine routier, les pouzzolanes peuvent être utilisées pour les couches de roulement ou couches de fondation (chaussée non revêtue). Ceci est en raison de son portance ($CBR > 15$) qui répond bien aux conditions de la construction routière. Une étude chimique s'avère nécessaire pour savoir que les pouzzolanes présentent une teneur en éléments majeurs tels que le $SiO_2 (> 30\%)$, l' $Al_2O_3 (> 20\%)$, le $Fe_2O_3 (> 20\%)$ élevée qui est favorable pour la fabrication du ciment. Cependant, l'abondance de Fer dans les pouzzolanes provoque l'usure de cette roche, ce qui nécessite une très grande attention. Il est aussi nécessaire de faire une étude environnementale de la zone d'exploitation.

Abstract

The pozzolanas are volcanic rocks rich in Silica, in Alumina and in Iron. They have a property being able to react more or less quickly with lime. In the road field, the pozzolanas can be used for wearing or the sub-base courses (fitted not covered). This is because of its bearing pressure ($CBR > 15$) which answers the conditions of road construction well. A chemical study proves to be necessary to know that the pozzolana present a content in major elements such as $SiO_2 (> 30\%)$, $Al_2O_3 (> 20\%)$, $Fe_2O_3 (> 20\%)$ high which is favorable for the manufacture of cement. However, the Iron abundance in pozzolanas causes the wear of this rock, which requires a very great attention. It is also necessary to make an environmental study of the zone of exploitation.

Mots clés : pouzzolane, géotechnique, chimie, oxydation, environnement

Auteur : RASAMOELA Mamitiana Felaniaina

Adresse : Lot 0910 B 162 Mahafaly Antsirabe

Contact : 0330945506