

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
Faculté des Sciences
Département de Physique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

en vue de l'obtention

du Diplôme de Maîtrise des Sciences et Techniques
en Géophysique Appliquée

Intitulé

ETUDE GEOTECHNIQUE EN LABORATOIRE : ANALYSE, INTERPRETATION, ET UTILISATIONS DES RESULTATS

Présenté par :

Mr ANDRIANASOLOMAHEFA Rovatiana Salema

le : 23 Décembre 2005

devant le jury composé de :

Pr. RANAIVO - NOMENJANAHARY Flavien
Pr. RASOLOMANANA Eddy
Dr. RAKOTO Heritiana

Président
Rapporteur
Examineur

Année 2005

REMERCIEMENTS

Ce présent mémoire n'a pu être réalisé que grâce à l'aide et à la collaboration de nombreuses personnes. Je tiens à présenter l'assurance de ma profonde gratitude extrême aux :

Professeur RATSIMBAZAFY Jean Bruno Auguste, Directeur de l'I.O.G.A., pour les conseils irremplaçables et pour sa générosité.

Professeur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien, Enseignant chercheur à l'I.O.G.A et Responsable de la formation MSTGA, qui n'a cessé de nous diriger durant ces deux années et qui a encore eu l'amabilité de présider ce mémoire.

Docteur RAKOTO Heritiana, Enseignant chercheur à l'I.O.G.A qui a voulu, avec tant de volonté, nous aider et nous former pendant ces années d'études et qui a encore accepté d'être notre examinateur.

Professeur RASOLOMANANA Eddy, Enseignant chercheur à l'I.O.G.A, et à l'ESPA qui a proposé ce mémoire et qui nous a encadré jusqu'à la fin de ce travail, en dépit de toutes ses responsabilités.

Monsieur RANDRIANARISATA Louis de Gonzague, Directeur Général et Directeur Technique du Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment (LNTPB) Alarobia Antananarivo Madagascar, de nous accepter parmi les stagiaires au sein de son laboratoire.

Monsieur RAZAFIMAHATRATRA Raymond, Chef département Commercial et Qualité du Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment et les deux chefs labo siège ainsi que les techniciens et opérateurs qui nous ont encadrés.

Chers amis, famille bien aimée pour leurs encouragement et soutien tout au long de la réalisation de ce travail.

Enfin, Je remercie ceux qui, de près ou de loin, m'ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Qu'il trouve tous, ici, l'expression de ma profonde reconnaissance.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ACRONYMES

<i>Faculté des Sciences.....</i>	<i>1</i>
<i>MEMOIRE DE FIN D'ETUDES.....</i>	<i>1</i>
Intitulé	1
Mr ANDRIANASOLOMAHEFA Rovatiana Salema.....	1
le : 23 Décembre 2005.....	1
<i>REMERCIEMENTS.....</i>	<i>2</i>
<i>Chapitre I Généralités.....</i>	<i>2</i>
<i>I. Le Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment (LNTPB).....</i>	<i>2</i>
I.1 Organigramme du LNTPB.....	2
I.2 Personnel du Laboratoire mécanique des sols.....	3
I.3 Appareillages	3
<i>II. IMPORTANCE DE LA GEOTECHNIQUE.....</i>	<i>4</i>
II.1 Phase d'étude.....	4
II.2 Phase de contrôle.....	4
<i>Chapitre II. LES ESSAIS AU LABORATOIRE.....</i>	<i>5</i>
<i>I. CLASSIFICATION DES SOLS.....</i>	<i>5</i>
I.1 Classification USCS (Unified Soil Classification System).....	5
I.2 Autres classifications.....	5
I.2.1 Classification du Laboratoire des Ponts et Chaussées (LPC).....	5
I.2.1.1 Pour les sols fins	5
I.2.1.2 Pour les sols grenus :.....	5
I.2.2 Classification HBR (Highway Research Board).....	6
<i>II ANALYSE GRANULOMETRIQUE.....</i>	<i>7</i>
II.1 But et principe de l'essai.....	7
II.2 Appareillages.....	7
II.3 Principe de la méthode.....	7
<i>III EQUIVALENT DE SABLES.....</i>	<i>8</i>
III.1 Appareillages.....	9
III.2 Calcul et résultats.....	9
<i>IV LIMITES D'ATTERBERG.....</i>	<i>10</i>
IV.1 But et principe.....	10

IV.2 Appareillages.....	11
IV.3 Calcul et résultats.....	11
IV.4 Limite de plasticité (WP).....	12
IV.4.1 But et principe.....	12
IV.4.2 Appareillages.....	12
IV.4.3 Précautions à prendre.....	12
IV.4.4 Exploitation des essais.....	12
<i>V ESSAI PROCTOR</i>	<i>13</i>
V.1 Essai Proctor.....	13
V.2 But et principe.....	13
V.3 Appareillages.....	13
V.4 Préparation de l'échantillon.....	14
V.5 Exécution de l'essai.....	14
.....	15
V.7 Calcul et exploitation.....	15
<i>VI ESSAI CBR (Californian Bearing Ratio)</i>	<i>15</i>
VI.1 But.....	15
VI.2 Appareillages.....	16
VI.3 Préparation de l'échantillon.....	16
VI.4 Mode opératoire.....	16
VI.4.1 Compactage :	16
VI.4.2 Poinçonnement.....	17
<i>VII. ESSAI LOS ANGELES.....</i>	<i>18</i>
VII.1 But et définition de l'essai	18
VII.2 Principe de l'essai.....	18
VII.3 Appareillages.....	18
VII.4 Prise de l'échantillon et exécution de l'essai.....	19
VII.5 Expression des résultats.....	20
VII.6 Commentaires.....	20
<i>VIII. ESSAI D'USURE MICRO – DEVAL.....</i>	<i>21</i>
VIII.1 But et principe de l'essai.....	21
VIII.2 Appareillages.....	21
VIII.4 Expression des résultats.....	23
VIII.5 Commentaires.....	23
<i>Chapitre III. RESULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE, INTERPRETATION ET UTILISATIONS.....</i>	<i>24</i>
<i>I. Localisation du site.....</i>	<i>24</i>

<i>II. Sol de plate-forme.....</i>	<i>24</i>
II.1 Sable limoneux rouge localisé dans la zone 2.....	25
II.2 Dans la zone 1, 3, 4, 5 on a le limon sableux.....	25
II.3 Sur grave concassée 0,60 (couche de fondation).....	25
II.4 Sur grave concassée 0,40 (Couche de base).....	26
II.5 Matériau d'enrobés.....	26
<i>III Synthèse des résultats.....</i>	<i>26</i>
<i>IV DIMENSIONNEMENT DE LA PISTE.....</i>	<i>27</i>
IV.1 Méthode CBR.....	27
IV.2 Formule.....	28
IV.3 Hypothèse de calcul.....	28
<i>V DIMENSIONNEMENT</i>	<i>28</i>
V.1 Détermination de la charge par roue simple équivalente.....	28
V.2 Détermination de l'épaisseur équivalente nécessaire.....	29
V.3 Correction de la charge en fonction des nombres de mouvement.....	30
V.4 Epaisseur équivalente.....	30
V.5 Récapitulation.....	33
<i>VI CONCEPTION ET COUPE DE LA CHAUSSEE.....</i>	<i>33</i>
VI.1 Commentaires et conclusion.....	37
<i>VII VERIFICATION DES CONTRAINTES.....</i>	<i>37</i>
VII.1 Introduction.....	37
VII.2 Méthode de JONES et PEATES.....	37
VII.3 Hypothèse de base.....	37
VII.4 Fonctionnement et application de la méthode.....	38
VII.4.1 Contraintes.....	38
VII.4.2 Paramètre de calcul.....	38
VII.5 Remarque.....	40
I.1 Généralités et principe de l'essai	43
<i>Un densimètre gradué.....</i>	<i>43</i>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Série de tamis.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 2 : Courbe granulométrique (Cas de l'Aérodrome d'Ivato).....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 3 : les appareillages de l'ES.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 4: Une éprouvette cylindrique.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 5 : Figure d'explication de l'ES.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 6 : Appareil de Casagrande.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 7: limite de plasticité.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 8 : Les appareils pour l'essai de compactage.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 9 : Machine de presse CBR.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 10 : Machine L A.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 11 : Machine Micro-Deval.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 12 : Abaque B 747 200 B, C, F et dimensionnement des chaussées souples.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 13 : Abaque de calcul d'une chaussée souple.....</i>	<i>30</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Tableau de classification des sols LCPC (source : LNTPB).....</i>	<i>6</i>
<i>Tableau 2 : Tableau de classification des sols H.R.B (source : LNTPB).....</i>	<i>6</i>
<i>Tableau 3 : Tableau des appareillages de l'essai Proctor.....</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 4 : Tableau de compactage (source : LNTPB).....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 5 : Tableau des classes granulaires L A (source : GMRE).....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 6 : Tableau des classes granulaire avec le nombre de boulets (source : GEMRE) 20</i>	
<i>Tableau 7 : Tableau des classes granulaire avec charge abrasive (source : GEMRE).....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 8 : Tableau des résultats des essais au laboratoire de la mécanique des sols.....</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 9 : Tableau des résultats de matériau d'enrobé.....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 10 : Tableau de CBR suivant l'épaisseur.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 11 : Tableau de CBR suivant l'épaisseur e.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 12 : Tableau de coefficient d'équivalence.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 13 : Valeur des contraintes suivant les épaisseurs.....</i>	<i>39</i>

LISTE DES ACRONYMES

a :	Aire d'un cercle
CBR :	Californian Bearing Ratio
D :	Dimension maximum des plus gros éléments en mm
e :	Epaisseur de la chaussée
E :	Epaisseur des couches
ES :	Equivalent de Sable
GEMRE	Groupe d'étude de la méthodologie de reconnaissance et des essais
GCNT:	Grave concassé non Traité
HBR :	Highway Reacherch Board
IP :	Indice de Plasticité
LNTPB :	Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment
LPC :	Laboratoire des Ponts et Chaussées
LA:	Los Angeles
MD :	Micro – Deval
MDS :	Micro – Deval à Sec
MDE :	Micro – Deval en présence d'eau
p :	Poids de l'échantillon
Pc :	Charge corrigée
Ps :	Poids sec
PK :	Point Kilométrique
P(2.5) :	Pression à 2,5mm
P(5) :	Pression à 5mm
PASI :	Poids Approximatif du sol imbibé
Pwabs :	Poids d'eau absorbé
PCI :	Profondeur Conventionnel d'Imbibition
q :	Pression du pneu
RES :	Roue Simple Equivalent
USCS :	Unified Soil Classification System
V :	Vitesse de poinçonnement
W :	Teneur en eau du mortier
Wopm :	Teneur en eau optimum du Proctor modifié
WI :	Limite de liquidité
Wp :	Limite de plasticité
Ys :	Poids spécifique
Yd opt :	Teneur en eau optimum
ΔW :	Différence de teneur en eau
σ_z:	Contrainte verticale

INTRODUCTION

D'après la définition du petit Larousse, « la géotechnique est la partie de la géologie qui étudie les propriétés des sols et des roches en fonction des projets de construction d'ouvrage d'arts ». Autrement dit une étude "in situ" et en laboratoire qui permet de définir l'ensemble des caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques des terrains en place. Son but est de donner les éléments nécessaires pour les études et les travaux de fondations.

Le stage effectué au sein du Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment d'Antananarivo (LNTPB) nous a permis de se familiariser aux différents essais concernant une étude géotechnique. Elle offre des réponses adaptées au niveau d'exigence structurelle et fonctionnelle des ouvrages. La réalisation d'un ouvrage tant soit peu important ne se fait pas sans étudier le sous-sol. Il est indispensable de connaître les caractéristiques géotechniques en vue de savoir faire, en terme plus clair il faut procéder à une reconnaissance du sol qui doit donner la nature des différentes couches (sables, argile, roches ...etc.) ainsi que des prélèvements d'échantillons pour la caractérisation en laboratoire.

Ce mémoire contient trois parties : dans la première partie, nous abordons les généralités. Dans la deuxième partie, nous montrons les essais au Laboratoire, enfin la troisième et dernière partie est consacrée à l'analyse des résultats, interprétation et les utilisations conséquentes.

L'étude s'achève sur une conclusion générale.

Chapitre I Généralités

I. Le Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment (LNTPB)

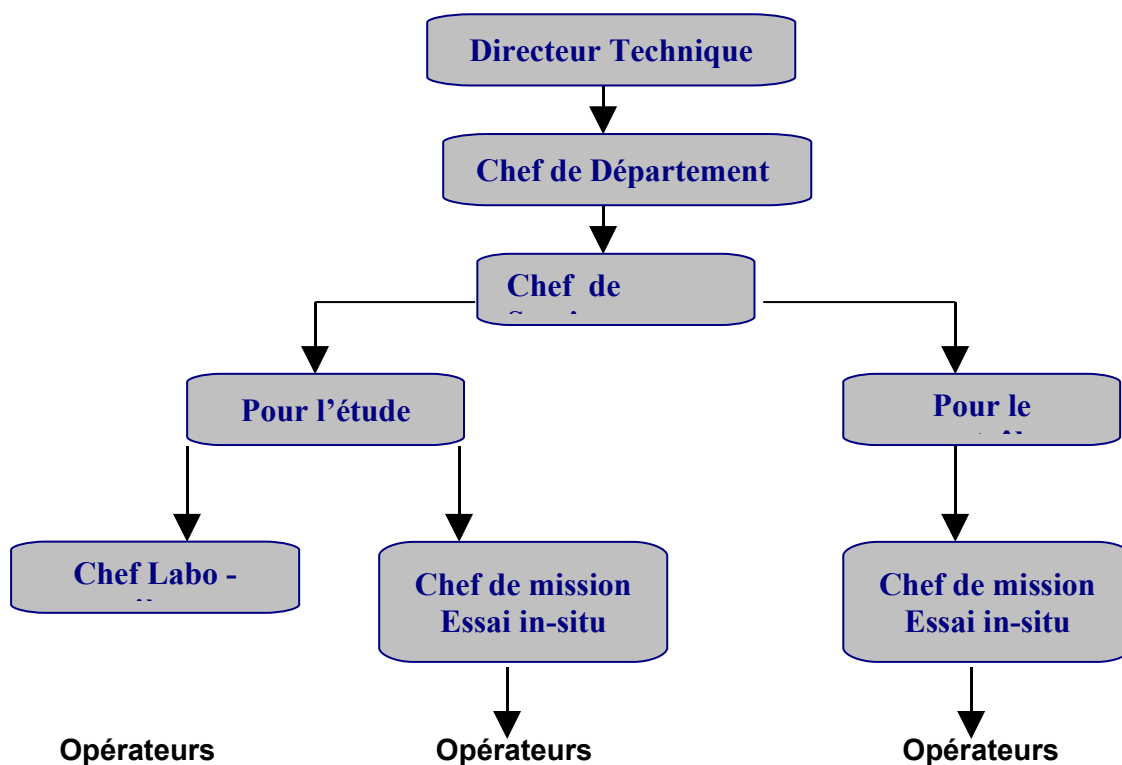
Le LNTPB est un Laboratoire de géotechnique fondé en 1954 à Alarobia Antananarivo Madagascar. Dès le début, il a été considéré comme une société créatrice d'emplois. En général, le département de production se divise en deux services bien distincts :

- Service matériau
- Service mécanique des sols

Chaque service a une hiérarchie bien définie :

- Chef de service
- Chef Laboratoire
- Chef de mission
- Opérateurs

I.1 Organigramme du LNTPB



I.2 Personnel du Laboratoire mécanique des sols

En général, tous les travaux d'études et exécutions des essais dans ce Laboratoire sont assurés par un groupe de personnes dont la distribution des postes est la suivante :

- chef Laboratoire
- adjoint au Chef Laboratoire
- opérateur analyse granulométrique par tamisage
- opérateur sédimentométrie
- opérateur essai Triaxial
- opérateur Limites d'Atterberg et Equivalent de sable (**ES**)
- opérateur Oedomètre et perméabilité
- opérateur Etudes géotechnique et routière : **CBR** et Proctor

L'expérience et le savoir-faire de son personnel ont fait que le Laboratoire des sols a un très bon rendement de production. On pourra dire que les essais nécessitent beaucoup de savoir-faire et d'expériences en manipulations pour ne pas perdre du temps. Un fait, la moyenne d'âge, un peu élevé, reste le seul handicap de ce Laboratoire.

I.3 Appareillages

On sait que les essais se basent sur la détermination de la teneur en eau, donc, le Laboratoire des sols et fondation a besoin d'un certain nombre d'étuves appropriées. Les étuves permettent d'atteindre des températures d'environ 105°C et des godets sont utilisés pour les prélèvements. Pour le tamisage, on utilise des séries de tamis de module AFNOR, des cuvettes et des balances pour le pesage dont :

- une balance de précision à 10^{-3} près ;
- une balance de précision à 10^{-2} près et assurant les pesées hydrostatiques
- une balance de précision à 10^{-1} près et ayant une portée de 15kg.

Pour les Limites d'Atterberg, le Laboratoire dispose de trois appareils de Casagrande avec les accessoires nécessaires, deux tamis de maille 0,40mm.

Pour l'essai triaxial, on utilise un appareil d'écrasement et trois cellules triaxiales, ajoutés à cela, un appareil de carottage et d'autres matériels utiles pour les travaux.

Pour l'oedométrie, on dispose de sept bâtis identiques avec les moules correspondants, des comparateurs et des plaques de surfaçage.

Enfin, pour les essais de géotechnique routière, le Laboratoire dispose de dames Proctor modifiées, des moules de type CBR ($k=15,2\text{cm}$; $\varnothing= 15,2$); des godets pour la prise

de teneur en eau, des comparateurs pour mesurer le gonflement dans le cas de CBR à 96h d'imbibition.

II. IMPORTANCE DE LA GEOTECHNIQUE

Dans le cadre de la construction des infrastructures (ouvrage, routes, etc..), la géotechnique tient une place importante dans la phase de conception jusqu'à la phase de réalisation pour assurer la qualité et le rendement de l'ouvrage à construire.

II.1 Phase d'étude

Le prélèvement d'échantillons devra être fait soigneusement pour que le (ou les) échantillon(s) représente au mieux la carrière proprement dite car ils seront analysés au laboratoire pour définir les caractéristiques géotechniques (dureté, etc.) et leur possibilité d'utilisation (béton, enrobé, couche de forme, remblai, couche de fondation ou couche de roulement, etc.).

Les échantillons des matériaux meubles devront être prélevés d'un puits à l'aide d'une tarière pour être correctement représentatifs du gisement. Il est important de connaître la puissance du gisement et le volume nécessaire pour pouvoir s'organiser dans l'exploitation des matériaux (sondeuse, explosifs, camions, chargeurs, pelles, etc....).

II.2 Phase de contrôle

La planche d'essai est utilisée pour étalonner l'atelier de compactage de l'entreprise et déterminer son rendement pour obtenir les spécifications exigées par les calculs de charge. Elle indiquera la méthodologie de mise en œuvre, en vraie grandeur, et les recommandations qu'il faut suivre pour atteindre les spécifications exigées par le marché.

Des contrôles seront effectués, notamment sur l'épaisseur (compacité si les résultats réalisés lors de la planche d'essai ont été suivis correctement), la teneur en eau, le nombre de passes, l'épaisseur de mise en œuvre compacité.

Chapitre II. LES ESSAIS AU LABORATOIRE

L'objectif essentiel des essais est de déterminer les caractéristiques géotechniques des matériaux non mesurables sur place. Ces essais de laboratoire ont été réalisés sur les échantillons prélevés dans les puits suivant les différentes zones homogènes dont la profondeur varie de 0,10 à 0,75m.

Les différents essais qui ont été réalisés sur les échantillons prélevés sont les suivants :

I. CLASSIFICATION DES SOLS

En mécanique des sols, il existe diverses classifications des sols et le LNTPB utilise la classification suivante :

- la classification selon la nature visuelle, les sols sont désignés par : sable, limon, argiles, sable limoneux ou limon argilo sableux ;
- la classification selon les caractéristiques géotechniques des sols :

I.1 Classification USCS (Unified Soil Classification System)

Actuellement le LNTPB utilise la classification **USCS** dans le domaine routier :

- pour le sol fin, elle est basée sur les Limites d'Atterberg ;
- pour le sol grenu, elle est basée essentiellement sur la granulométrie.

La classification **USCS** permet de déterminer le symbole de groupe (**GM**, **SC**, **ML**), la dénomination, et les caractéristiques telles que densité, **CBR** que l'on peut attendre de ces matériaux et l'engin de compactage le mieux adapté.

I.2 Autres classifications

I.2.1 Classification du Laboratoire des Ponts et Chaussées (LPC)

I.2.1.1 Pour les sols fins

Plus de 50% des éléments ont un diamètre inférieur à 0,08mm.

Méthode basée sur **W_L** et **IP**

L'abaque comportant la ligne A permet de dénommer le sol par **Lp**, **Ap**, **Ac**

I.2.1.2 Pour les sols grenus :

Plus de 50% des éléments ont un diamètre supérieur à 0,08mm

Méthode basée sur les caractéristiques de la granulométrie et Limites d'Atterberg

Un tableau permet de caractériser ce matériau (Tableau I)

I.2.2 Classification HBR (Highway Research Board)

I.2.2.1 Pour les sols fins et sols graveleux:

Méthode basée sur les caractéristiques granulométrie et les Limites d'Atterberg

Un tableau permet de déterminer ce matériau (Tableau II)

CLASIFICACION LCPC					
CLASSIFICATION DES SOLS GRENUS (plus de 50% d'éléments >0,08mm)					
Définition			Symboles	Conditions	Appellations
GRAVES	Plus de 50% des éléments>0,08mm ont un diamètre de >2mm	moins de 5% d'éléments <0,08mm	Gb (GW)	$\frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ et $\frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien gradué
			Gm (GP)	Une des condition Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		Plus de 12% d'éléments <0,08mm	GL (GM)	Limite d'Atterberg au-dessous de A	grave limoneuse
			GA (GC)	Limite d'Atterberg au-dessus de A	grave argileuse
SABLES	Plus de 50% des éléments>0,08mm ont un diamètre de <2mm	moins de 5% d'éléments <0,08mm	Sb (SW)	$\frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $\frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Sm (SP)	Une des condition Sb non satisfaite	sable propre mal graduée
		Plus de 12% d'éléments <0,08mm	SL (SM)	Limite d'Atterberg au-dessous de A	sable limoneuse
			SA (SC)	Limite d'Atterberg au-dessus de A	sable argileuse
Lorsque 5% < % inférieur à 0,08mm < 12% : on utilise un double symbole					

Tableau 1 : Tableau de classification des sols LCPC (source : LNTPB)

Classification des sols (H,R,B)												
Classification générale	Au plus 35% de grains plus petits que 80μ							Au plus 35% de grains plus petits que 80μ				
Pourcentage passant :	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7	
	A1a	A1b		A2 - 4	A2 - 5	A2 - 6	A2 - 7				A7 - 5	A7 - 6
	au tamis de 2 mm	≤ 50										
	au tamis de 0,40 mm	≤ 30	≤ 50									
	au tamis de 80μ	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥36	≥36	≥36	≥36
Caractéristiques de la fraction passant au tamis de 2 mm :												
Indice de plasticité	<6	Impossible à mesurer	≤ 10	≤ 10	≥11	≥11	≤ 10	≤ 10	≥11	≥11	≥11	
										Ip<	Ip>	
										WI - 30	WI - 30	
Limite de liquidité	Impossible à déterminer		≤ 40	≥41	≤ 40	≥41	≤ 40	≥41	≤ 40	≥41	≥41	
Indice de groupe	0	0	0		≤ 4		≤ 8	≤ 12	≤ 16	≤ 20	≤ 20	
Appellation générale	Cailloux Graviers Sables	Sable fin	Mélange de graviers limoneux ou argileux avec des sables limoneux ou argileux					Sols limoneux		Sols argileux		

Tableau 2 : Tableau de classification des sols H.R.B (source : LNTPB)

II ANALYSE GRANULOMETRIQUE

L'analyse se fait sur des échantillons remaniés.

II.1 But et principe de l'essai

L'analyse granulométrique consiste à classer en classes granulaires un échantillon d'essai ou une masse de concassé roulé. Elle permet d'étudier la taille des particules du sol et de mesurer l'importance relative de chacune des fractions du sol de dimensions bien définies : gros éléments (cailloux), graviers, sables, limon, argile.

L'essai permet de déterminer, en poids, la distribution des grains des matériaux. On sépare par tamisage les plus gros éléments jusqu'à $d=0,80\text{mm}$ puis par sédimentation (Annexe I) les éléments à $d < 0,08\text{mm}$.

II.2 Appareillages

- passoire et tamis de contrôle
- balance de 15kg au gramme près
- étuve de séchage avec thermostat
- des plateaux de 50 x 50 x 10cm



Figure 1 : Série de tamis

II.3 Principe de la méthode

L'essai consiste à fractionner, au moyen d'une série de tamis ou passoires un matériau en plusieurs grains décroissants. L'échantillon doit être représentatif et la technique de prise repose sur la condition suivante :

où **p** : le poids de l'échantillon exprimé en gramme

$$200 D < p < 600 D$$

D : la dimension maximum exprimée en millimètre des plus gros éléments.

Les poids des différents refus¹ sont rapportés au poids initial de matériau, les pourcentages ainsi obtenus servent à l'établissement de la courbe granulométrique. Cette courbe granulométrique est établie en portant sur un graphique semi-logarithmique, en ordonnée (Echelle arithmétique) les pourcentages des refus cumulés, en abscisse (Echelle logarithmique) les dimensions des tamis et passoires et le module correspondant.

¹ Refus sur un tamis : le matériau qui est retenu.

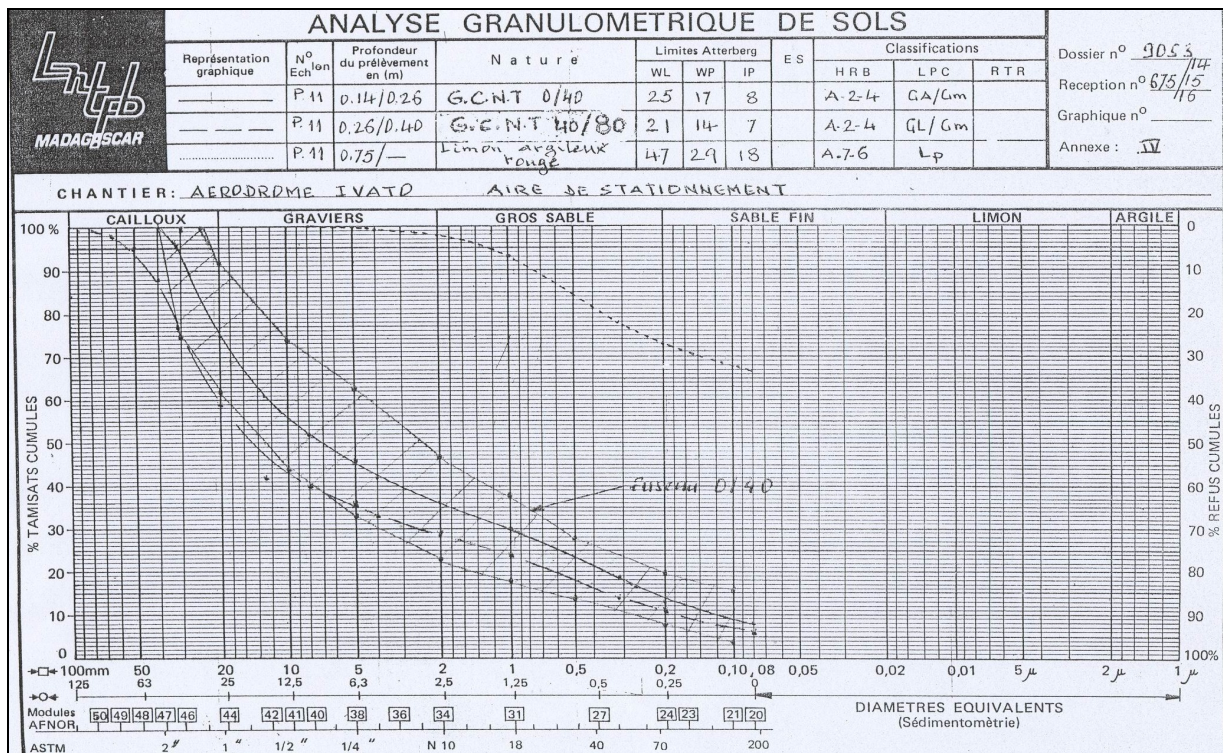


Figure 2 : Courbe granulométrique (Cas de l'Aérodrome d'Ivato)

III EQUIVALENT DE SABLES

L'équivalent de sable que l'on désigne par **ES** est déterminé par une méthode simple basée sur le repérage de la quantité des sables vrais contenus dans un sable plus ou moins souillé de matières argileuses ou colloïdales.

Son intérêt réside dans le fait qu'il constitue pratiquement le seul essai qui permet actuellement de contrôler la consistance de certaines qualités de matériaux mis en œuvre sur le chantier.

L'**ES** s'effectue sur la fraction des sols passant² au tamis de 5mm et lavée énergiquement avec une solution lavant normalisée. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments les plus fins contenus dans cette fraction en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments plus fins.

Son domaine d'application s'étend, en général, aux sols faiblement plastiques, alors que la mesure d'indice de plasticité perd toute précision lorsque celui-ci est inférieur à 4 environ. La mesure de l'**ES** a sa précision maximum pour les très faibles plasticités.

² Tamisât ou passant : le matériau qui passe

L'**ES** peut servir dans de nombreux domaines :

- choix de contrôle des sols utilisables en stabilisation mécanique
- contrôle des sols utilisés en stabilisation chimique
- choix et contrôle des sables à bétons
- choix et contrôle des granulats pour enrobés hydrocarbonés.

III.1 Appareillages

- trois éprouvettes cylindriques
- un bouchon à caoutchouc
- un cube laveur
- un piston taré
- un échantillonneur à 5 mm



Figure 3 : les appareillages de l'**ES**

- un agitateur manuel
- une entonnoir
- un récipient 88cc
- une balance de portée égale à 5kg au g près
- un chronomètre
- bacs pour tamisage
- un goupillon à poil doux pour le nettoyage
- solution concentrée (chlorure de calcium)



Figure 4: Une éprouvette cylindrique

III.2 Calcul et résultats

L'essai d'**ES** comporte la détermination de trois prises d'essais par l'échantillon. L'**ES** d'une prise d'essai d'un échantillon est, par définition, mesuré au piston et donné par les formules :

$$ES(Piston) = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

$$ES(Visuel) = \frac{h'_2}{h_1} \times 100$$

La mesure se fait à l'aide d'une règle graduée avec laquelle on prélève les différentes hauteurs : hauteur sur sable propre, hauteur du floculat, hauteur totale.

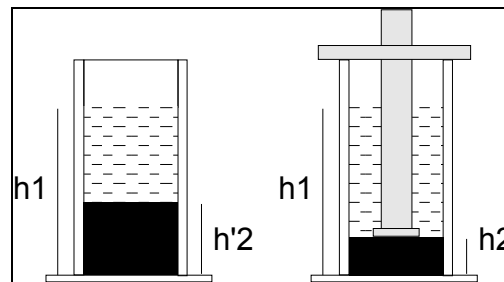


Figure 5 : Figure d'explication de l'ES

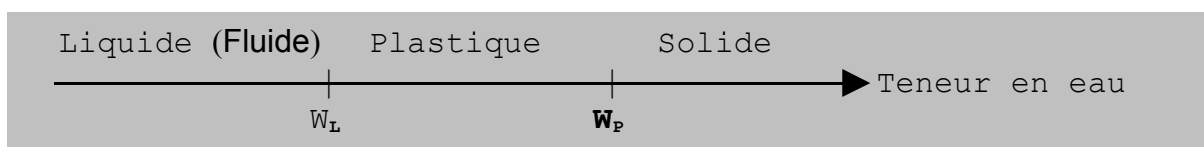
La mesure au piston se fait de façon à ce que l'extrémité inférieure du piston touche l'extrémité du sable propre. Après la mesure au piston, on prend la température. Ces valeurs sont données avec une décimale, la valeur de la moyenne à l'entier le plus voisin

IV LIMITES D'ATTERBERG

IV.1 But et principe

Les limites d'**Atterberg** sont réalisées sur les sols cohérents. Elles permettent de déterminer la consistance d'un sol et de marquer le seuil entre : le passage d'un sol de l'état liquide (fluide³) à l'état plastique⁴ qui est la limite de liquidité (W_L) et le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide qui est la limite de plasticité (W_P).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau à l'état de transition considéré et sont exprimées en pourcentage du poids du matériau sec.



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

$$IP = W_L - W_P$$

³ *Fluide* : le sol se comporte comme un liquide poreux

⁴ *Plastique* : le sol garde sa forme, mais se déforme aisément sous de faible charge

Les limites d'**Atterberg** sont mesurées sur le mortier, c'est-à-dire sur la fraction du matériau qui passe au tamis de 0,400mm (module Afnor 27). Cette façon de procéder est justifiée, car ce sont les éléments fixes du sol qui sont sensibles à l'action de l'eau.

IV.2 Appareillages

- étuve
- balance électrique précision 1/1000^e de gramm
- appareil de **Casagrande**
- outils à rainurer
- spatules
- godets
- marbre
- bac de lavage et pinceaux



Figure 6 : Appareil de Casagrande

L'appareil de **Casagrande** comporte essentiellement :

- un support en bakélite ou en tout autre matière de même dureté.
- un arbre à caisse munie d'une manivelle
- une coupelle en laiton en forme de calotte sphérique munie d'un ergot qui vient s'articuler sur une tige métallique qui constitue de rotation de la coupelle.

IV.3 Calcul et résultats

Il existe une relation permettant de trouver **W_L** :

$$W_L = W \left(\frac{N}{25} \right)^{0,121}$$

W_L : la limite de liquidité

W : la teneur en eau de mortier au moment de l'essai

N : le nombre de coups correspondant à la fermeture du mortier sur 10mm dans la coupelle

IV.4 Limite de plasticité (W_p)

IV.4.1 But et principe

Pour mesurer la limite de plasticité, on roule l'échantillon en forme de fuseau qu'on inscrit progressivement. La limite de plasticité d'un mortier est la teneur en eau (Annexe II) exprimée en % des poids du matériau sec du fuseau de sol qui se brise en petits morceaux toujours au moment où son diamètre atteint 3mm.

IV.4.2 Appareillages

- plaque de bois ou plexiglas 6 x 10cm
- marbre
- spatules
- une barrette étalon de 3mm de diamètre
- une balance de précision et une étuve



Figure 7: limite de plasticité

Généralement W_p se fait après W_L . On a donc souvent un échantillon trop humide. On le déchesse donc en le malaxant et en le roulant sur le marbre. S'il n'est pas assez humide, on peut toujours lui ajouter quelques gouttes d'eau, à condition de bien malaxer.

Si on mesure W_p à partir de la poudre séchée à l'étuve, l'humidification du matériau, Sauf pour les sols sableux doit être faite à l'avance.

IV.4.3 Précautions à prendre

Il faut opérer assez lentement de façon que l'amincissement soit bien régulier et surtout de façon à éviter la formation de petits cylindres creux. Il faut aussi que les fuseaux que l'on roule aient une certaine longueur à peu près 5 à 6cm.

Les petits tronçons recueillis, lorsque le fuseau de 3cm de diamètre se brise doivent être pleins.

IV.4.4 Exploitation des essais

On calcule pour chaque échantillon le poids d'eau et le poids du sol et l'on déduit la teneur en eau. La limite de plasticité W_p est la moyenne des teneurs en eau trouvées dans les trois essais, c'est-à-dire la moyenne des teneurs en eau des six échantillons prélevés. Les résultats des trois essais ne doivent pas présenter des écarts supérieurs à 2% de la teneur en eau, sinon on refait un quatrième essai.

V ESSAI PROCTOR

V.1 Essai Proctor

Un sol compacté avec la même énergie de compactage mais de différente teneur en eau présente une augmentation ou diminution de densité. L'eau absorbe l'énergie et fait diminuer la densité

V.2 But et principe

L'essai a pour but de déterminer, pour un compactage d'identité donnée, la teneur en eau optimum correspondant à la densité sèche maximum. On compacte avec une dame standard dans une moule l'échantillon de sol recueilli, ainsi on calcule la teneur en eau et la densité sèche après compactage. Le sol est porté à une teneur en eau croissante et la courbe Proctor représentée par la densité en fonction de la teneur en eau donnera la teneur en eau optimum et Y_d optimum.

L'essai se fait à deux énergies différentes selon qu'il s'agit d'essai Proctor normal ou d'essai Proctor modifié. Les grains passant sur le tamis inférieur à 5mm seront compactés dans le moule Proctor tandis que les passants sur le tamis inférieur à 20mm dans le moule CBR.

V.3 Appareillages

On a illustré sous forme de tableau ci-dessous les appareillages de l'essai :



APPAREILLAGES									
Dame de compactage			Moule Proctor				Moule CBR		
Masse tombante	Hauteur de la chute		Hausse de compactage	Diamètre intérieur du cylindre	10,16 cm		Disque d'espacement	épaisseur du disque	2,54 cm
4,5 kg	45,72 cm		Cylindre de moule	Hauteur du cylindre	11,68 cm		Hauteur du cylindre	Volume du moule	2316,67 cm ³
2,5 kg	30,5 cm		Embase	Volume du moule	947 cm ³		Hausse		
							Embase		

Tableau 3 : Tableau des appareillages de l'essai Proctor



Figure 8 : Les appareils pour l'essai de compactage

V.4 Préparation de l'échantillon

Pour les sols contenant des matières organiques, la température de séchage est de 60°C et pour les autres, une température de 105°C pendant 24 à 48h.

Pour les matériaux

- inférieur à 5mm : 5 parties x 2500g
- inférieur à 20mm : 5 parties x 5500g

Le matériau contient de gros blocs de refus à 20, on le pèse et on le remplace par le poids équivalent.

V.5 Exécution de l'essai

On fera cinq compactages espacés de 2% de teneur en eau. Le poids d'eau pour humidifier l'échantillon étant calculé et pesé. On mouille chaque partie par sa teneur en eau, malaxer, le compacter immédiatement après pour le sable tandis que pour l'argile, on attend à ce que l'eau pénètre dans les mottes avant de compacter.

On apprécie la teneur en eau optimum qui devait se trouver entre :

$6 < W < 8\%$ pour les sables propres, 14 et plus pour les argiles.

L'épaisseur des couches est de 4cm pour l'essai Proctor, normal et 2,5cm pour l'essai Proctor modifié. On fera quatre coups de dame autour par point et le 25^{ième} au centre pour le moule Proctor et de six coups sur la circonférence, le 7^{ième} au centre pour celui de CBR.

Dimension des gros éléments	Proctor normal petit dame 3 couches	Proctor modifié grande dame 5 couches
< 5mm moule Proctor 25 coups par couche	3 couches, 25 coups par couche	5 couches, 25 coups par couche
< 20mm moule CBR 55 coups par couche	3 couches, 55 coups par couche	5 couches, 55 coups par couche

Tableau 4 : *Tableau de compactage (source : LNTPB)*

La dernière couche affleurera la moule supérieure et à la fin du compactage, on enlève la hausse et l'on arase puis on pèse l'ensemble moule + échantillon. Prélever une partie dans deux godets tarés pour avoir la teneur en eau de l'essai en passant par étuvage.

V.7 Calcul et exploitation

La teneur en eau est celle du compactage

On déterminera Y_d théorique en passant par Y_h par la formule :

$$Y_d = \left(\frac{Y_h}{W\% + 100} \right) \times 100$$

Le poids sec :

$$P_s = \frac{Ph \times 100}{100 + W\%}$$

Tracer en suite la courbe Y_d en fonction de la teneur en eau.

Déterminer en suite graphiquement Y_d et $W\%$ optimum (Annexe III).

VI ESSAI CBR (Californian Bearing Ratio)

VI.1 But

Détermination de l'indice de portance pour dimensionner les chaussées souples à revêtement béton bitumineux. C'est un nombre sans dimension exprimant en pourcentage le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau type Californian qui représente un enfoncement de 2,5mm pour une pression de 70kg/cm² et de 5mm pour 105kg/cm² pour stimuler l'effort de poinçonnement des routes. L'essai se fait sur échantillon remanié ou intact.

VI.2 Appareillages

Mesure de gonflement :

- Moule **CBR**
- Disque plat à tige centrale réglable
- Trépied porte comparateur
- Disque annulaire 2,265kg par poids

Presse **CBR** :

- Anneau dynamométrique : mesure de la force
- Piston poinçonnement : section 19,3cm²
- Comparateur : enfoncement
- Presse



Figure 9 : *Machine de presse CBR*

VI.3 Préparation de l'échantillon

Même principe que l'essai Proctor modifié

VI.4 Mode opératoire

VI.4.1 Compactage :

Peser le moule au début de l'essai, mouiller l'échantillon à teneur en eau optimum du Proctor modifié, compacter en cinq couches à teneur en eau **W**% optimum.

- | | | |
|----|-------|------------------|
| 1° | moule | 55 coups/couches |
| 2° | moule | 25 coups/couches |
| 3° | moule | 10 coups/couches |

Prélever le poids du moule + échantillon, la teneur en eau de compactage pour le calcul. Retourner le moule et enlever le disque d'espacement du sommet de l'échantillon imbibé pendant 4 jours après mise en place du disque de gonflement.

Deux poids annulaires qui représentent le poids du corps de chaussée à réaliser et le trépied porte le comparateur réglé à mi-courbe de façon à mesurer le tassement au gonflement autour de 4 jours. Peser le moule + échantillon après imbibition.

L'essai est exécuté sans imbibition dans les zones sèches sans remontée capillaire et pendant 4 jours pour les zones humides.

VI.4.2 Poinçonnement

Poser le moule sur le plateau de poinçonnement, tangeantier le piston et l'échantillon, remettre les 2 anneaux à leur place, placer le comparateur sur le bord de la moule. Poinçonner à une vitesse $V = 1,27$ t/mn, lire les pressions correspondant aux enfoncements prédéterminés, mesurer la teneur en eau de part et d'autre de la partie poinçonnée.

VI.5 Calcul

Calculer la teneur en eau, le poids sec ainsi que la densité sèche. L'indice de portance **CBR** est déterminé par le maximum entre les deux valeurs **A** et **B**.

$$A = \frac{P(2,5)}{0,70} \qquad B = \frac{P(5)}{1,05}$$

P (2,5) pression à 2,5mm ; **P (5)** pression à 5mm

Par la suite, on calculera le poids approximatif du sol imbibé.

$$PASI = \frac{PW_{abs}}{\Delta W\%} \times 100$$

PWabs : poids d'eau absorbé ; **ΔW** : différence teneur en eau qui va déterminer la profondeur conventionnelle d'imbibition.

$$PCI = \frac{PASI \times 63}{P_s} \qquad \text{avec} \qquad P_s = \frac{P_h}{W\% + 100} \times 100$$

Tandis que 63 est la moitié de la hauteur du moule. Si **PCI** est supérieur à 63 l'échantillon est alors saturé et la condition défavorable est atteinte.

VII. ESSAI LOS ANGELES

VII.1 But et définition de l'essai

L'essai Los Angeles a pour but de décrire les différentes phases de l'essai pour la détermination de la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulat.

Il est défini comme la mesure de la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon granulaire (carrière, etc.). Elle s'applique aux granulats d'origines naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

VII.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité d'élément inférieur à 1,6mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angeles. Le matériau soumis à l'essai est choisi parmi les classes granulaires suivantes

Tamis à mailles carrées	Module Afnor n°
4 / 6,3	37 / 39
6,3 / 10	39 / 41
10 / 14	41 / Y*
10 / 25	Y / 45
16 / 31,5	43 46
25 / 50	45 / 48

Tableau 5 : Tableau des classes granulaires L A (source : GMRE)

Avec Y : tamis de module Afnor inexistant. Il s'agit du tamis à mailles carrées de 14mm.

- La classe granulaire 10/25 doit contenir 60% de 10/16
- La classe granulaire 16/31,5 doit contenir 40% de 16/25
- La classe granulaire 25/50 doit contenir 60% de 25/40

VII.3 Appareillages

Une Machine Los Angeles comportant :

- un cylindre creux en acier, fermé ses deux extrémités..
- une charge de 12 boulettes : cette charge est constituée par des boulets sphériques de 47mm±1mm de diamètre et pesant entre 420g et 445g.
- un moteur électrique ayant une puissance minimum de 0,75 kW, avec une vitesse de rotation régulière comprise entre 30 et 33tours/mn.

- un bac destiné à recueillir les matériaux après essai.
- un compte tour de type rotatif arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulu.
- un jeu de tamis à mailles carrées de : 1,6 – 4 – 6,3 – 10 – 14 – 16 – 25 – 31,5 – 40 – et 50 mm (module Afnor n° 33 – 37 – 39 – 41 -...- 43 – 45 – 46 – 47 – 48)
- une balance capable de peser 10 000 grammes



Figure 10 : Machine L A

- une étuve permettant de sécher à 105°C
- des bacs et des truelles
- une brosse souple
- un dispositif de lavage

VII.4 Prise de l'échantillon et exécution de l'essai

La quantité de matériau remise au laboratoire pour effectuer l'essai doit avoir au moins une masse de 15.000g environ (si l'échantillon reçu est en bloc brut, il sera concassé au laboratoire). La préparation de la prise d'essai à partir de l'échantillon à étudier s'effectue de la façon suivante :

- Tamiser la prise d'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie.
- Laver la fraction recueillie sous un jet d'eau jusqu'à ce que l'eau qui coule soit claire, ensuite sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à l'obtention de la masse constante.
- La masse M de l'échantillon pour essai est de 5000g.
- Introduire avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie puis la prise d'essai. Le nombre de boulets est fixé conformément aux indications du tableau ci-après :

Classe granulaire en cm	Nombre de boulets	Masse totale de la charge
4 – 6,3	7	2930 à 3100
6,3 – 10	9	3810 à 3980
10 – 14	11	4690 à 4860
10 – 25	11	4690 à 4860
16 – 31,5	12	5130 à 5300
25 – 50	12	5130 à 5300

Tableau 6 : *Tableau des classes granulaire avec le nombre de boulets (source : GEMRE)*

- Fermer le couvercle et bien serrer avec les boulons de fixation
- Faire effectuer à la machine 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 et 33 tr/mn (pour la classe 25 – 50, on effectuera 1000 rotations).

Après l'essai, enlever le matériau de la machine et le recueillir dans un bac et éviter les pertes.

- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis à mailles carrées de 1,6mm (module Afnor n° 33).

- Laver le refus au tamis de 1,6mm et sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constant. En fin, peser le refus, soit m' sa masse.

VII.5 Expression des résultats

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1,6mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité. Cette valeur sans dimension est appelée : coefficient Los Angeles.

$$\text{Coefficient } L.A = 100 \times \frac{m}{M}$$

VII.6 Commentaires

La résistance à la fragmentation et aux chocs mesurée par l'essai Los Angeles entre dans les caractéristiques de choix de l'origine des granulats et la conception du corps de chaussée.

VIII. ESSAI D'USURE MICRO – DEVAL

VIII.1 But et principe de l'essai

L'essai d'usure Micro-Deval a pour but de définir la mesure de la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats. Il s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle, utilisée en particulier dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

L'essai consiste à mesurer la résistance à l'usure par frottement, entre les granulats et une charge abrasive dans des conditions bien définies.

La prise d'essai constituée par des granulats de l'une des classes granulaires suivantes 4 – 6,3 – 10, ou 10 – 14mm, est placée avec une charge constituée de billes d'acier de 10mm de diamètre qui entraîne une usure par le frottement des granulats et des billes, et la formation d'une certaine quantité d'éléments fins de dimension inférieure à 1,6mm.

Le pourcentage en poids de ces éléments fins produits au cours de l'essai représente le coefficient d'usure Micro-Deval. Cette quantité, sans dimension, est appelée, suivant la méthode employée :

- Coefficient Micro-Deval à sec (MDS)
- Coefficient Micro-Deval en présence d'eau (MDE)

VIII.2 Appareillages

Un appareillage Micro-Deval, qui est un broyeur à billes comportant un à quatre cylindres d'essai en acier fermé par un couvercle étanche. Ces cylindres sont entraînés en rotation pendant deux heures de rotations à 12 000trs (Chaque cylindre permet d'effectuer un essai)

Un moteur de 1kW entraînant l'arbre permet aux cylindres d'acquérir une Machine Micro-Deval une vitesse régulière de 100trs par minute.

- La charge abrasive est constituée par des billes sphériques de 10mm de diamètre
- Un jeu de tamis à mailles carrées de 1,6/4 /6,3/10/14 mm
- Une balance capable de peser 5 000 g à 2 g près
- Une étuve permettant le séchage à 105°C
- Des bancs
- Un dispositif de lavage
- Des récipients de séchage



Figure 11 : *Machine Micro-Deval*

VIII.3 Matériau soumis à l'essai

L'échantillon reçu au laboratoire en blocs brute ou en granulats devra avoir une lasse d'au moins de 2 000g. Pour effectuer un essai à sec ou en présence d'eau, l'échantillon sera tamisé suivant la classe granulaire choisie, lavé et séché à l'étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

En fonction de la classe granulaire choisie, la charge abrasive est fixée comme ci-après :

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
4,0 - 6,0	2000
6,3 - 10,0	4000 ± 5
10,0-14,0	5000

Tableau 7 : *Tableau des classes granulaire avec charge abrasive (source : GEMRE)*

Introduire dans le cylindre d'essai la charge abrasive fixée conformément aux indications du tableau précédent, puis les 500g de matériau préparé. Si l'essai doit être effectué en présence d'eau, ajouter 2,50 litres 0,05 litre d'eau. Fermer le couvercle. Poser les deux cylindres sur les deux barres parallèles et faire fonctionner l'appareil pendant 2h soit 12 000trs.

Recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac. Le contenu du bac sera tamisé sous l'eau sur le tamis à mailles carrées de 1,6mm et les billes seront retirées à l'aide d'un aimant. Porter le refus à 1,6mm à l'étuve pour séchage à 105°C jusqu'à masse constante, le peser, soit m' sa masse.

VIII.4 Expression des résultats

Par définition, le coefficient Micro-Deval (MD) est :

$$MD = 100 \times \frac{m}{500}$$

avec, m masse sèche de la fraction de matériaux passant après essai au tamis de 1,6mm,

VIII.5 Commentaires

L'essai Micro-Deval présente l'avantage de s'effectuer sur des classes granulaires effectivement réalisées par les installations de concassage ce qui permet de suivre l'évolution de la résistance en fonction de la granularité.

L'essai devra être effectué sur l'échantillon tel qu'il sort des installations de traitement. Lorsque l'échantillon reçu au laboratoire est en bloc brut, la classe granulaire est choisie en fonction de l'utilisation prévue.

Les granulats sont sensibles à l'eau. L'usure des roches en présence d'eau est souvent plus importante qu'à sec, surtout si elles contiennent des minéraux tendres.

Chapitre III. RESULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE, INTERPRETATION ET UTILISATIONS

Comme on n'a pas pu accéder aux résultats du client, le LNTPB en l'occurrence, pour cause de confidentialité du Laboratoire, on a choisit alors de prendre les résultats de la réhabilitation de la piste d'aérodrome d'Ivato en 1990. Les essais de laboratoire donnent les résultats suivants sous forme de tableau pour les échantillons remaniés⁵

I. Localisation du site

La région d'Antananarivo, contenant la piste de l'aérodrome d'Ivato se situe au centre de Madagascar approximativement entre les parallèles 17,5° et 20° Sud et les méridiens 46° et 48.5°. La piste de l'aérodrome d'Ivato est une piste utilisable durant toute l'année.

En voici ses principales caractéristiques, d'après les renseignements communiqués par le Service de l'Information Aéronautique :

- Point de référence : latitude : 18° 47' 43" Sud
- Distance et direction par rapport à la ville : 7.6 NM NNW de Tananarive.
- Altitude : 1279 m
- Température de référence : 23°4
- Déclinaison magnétique : 13° W

II. Sol de plate-forme

On illustre sous forme de tableau les résultats :

SITUATION		LIMITE d'ATTERBERG		GRANULOMETRIE (éléments)			PROCTOR MODIFIE		CBR 4J à L'OPM	
ZONE	N°	WL	WP	< 2mm	<0,40mm	<0,08mm	Yd max T/m	WOPI %	95% OPM	Yd in-situ
1	1	44	19	98	70	46	1,82	14,2	9	4
	9	44	19	98	77	57	1,75	17,3	23	7
2	4	31	14	98	73	38	1,77	18,2	23	6
	3	38	14	93	71	48	1,9	13,6	31	26
	6	32	10	92	66	27	1,86	13,6	27	11
3	7	46	22	98	75	51	1,89	11,6	21	10
	2	45	19	97	73	55	1,84	14,8	23	6
	8	44	19	95	61	41	1,9	12,5	13	9
	5	43	16	98	70	44	1,94	11,3	17	5
4	10	56	24	98	76	57	1,7	15,6	26	5
5	11	47	18	98	82	62	1,93	12,4	24	6

Tableau 8 : Tableau des résultats des essais au laboratoire de la mécanique des sols

⁵ Echantillons remaniés : les prélèvements se font sur les parois de puits ou de la tranchée en faisant une saignée verticale de section constante et en récupérant le sol sur une bêche disposée en fond de tranchée.

On constate donc que les sols de plate-forme sont caractérisés par deux matériaux, à savoir :

II.1 Sable limoneux rouge localisé dans la zone 2

$$\begin{aligned}
 10 < IP < 14 \\
 27 < \% \text{ fine} < 48 \\
 1,77 < Y_d \text{ max OPM} < 1,90 \\
 13,6 < W \text{ OPM} < 18,2 \\
 23 < \text{CBR 4 jours à 95\% OPM} < 31
 \end{aligned}$$

II.2 Dans la zone 1, 3, 4, 5 on a le limon sableux

$$\begin{aligned}
 16 < IP < 24 \\
 41 < \% \text{ fine} < 62 \\
 1,84 < Y_d \text{ max OPM} < 1,94 \\
 11,3 < W \text{ OPM} < 14,8 \\
 13 < \text{CBR 4 jours à 95\% OPM} < 23
 \end{aligned}$$

II.3 Sur grave concassée 0,60 (couche de fondation)

Sur 7 sondages effectués, la courbe de fondation est constituée par **GCNT 0/60** possédant les caractéristiques suivantes :

- %fines : 4 à 6m = 5
- Limite de liquidité (W_L) : 17 à 24m = 19
- Indice de plasticité (IP) : 3 à 8 m = 6
- Poids spécifique grains solides (Y_s) 2.64
- Equivalent de sable : 24 à 32 m = 26

On constate ainsi que :

- La plasticité du mortier est admissible en moyenne ($IP = 6$)
- L'équivalent de sable est admissible $ES = 26$
- Les courbes granulométriques restent dans le fuseau 0/60 sauf dans le sondage P8 où elles sortent légèrement du fait de la contamination de la couche.

II.4 Sur grave concassée 0,40 (Couche de base)

En général, la couche de base est constituée par GCNT 0/40 dans tous les puits. Les caractéristiques géotechniques de ces matériaux sont les suivantes :

- % fines : 2 à 4m = 3
- Limite de liquidité (W_L) : 15 à 20m = 19
- Indice de plasticité (IP) : 4 à 8m = 6
- Poids spécifique grains solides (Y_s) 2.61
- Equivalent de sable : 7 à 44m = 31

Les mesures d'équivalent de sable donnent des valeurs acceptables, sauf dans les sondages P1 et P4 où les valeurs sont inférieures. La valeur moyenne d'indice de plasticité confirme les valeurs trop faibles de l'ES (en principe IP non mesurable)

Les courbes granulométriques restent dans le fuseau 0/40 sauf dans quelques endroits où elles sortent du fuseau par défaut d'homogénéité.

II.5 Matériau d'enrobés

Les échantillons de plaque d'enrobés ont été soumis à des essais de laboratoire afin de déterminer les hauteurs moyennes de l'enrobé en place et leur caractéristiques.

Le tableau suivant nous donne les résultats :

SITUATION	EPAISSEUR	Yd (T/m3)	Ys (T/m3)	IC%	OBSERVATIONS
P,11	6,4	2,54	2,58	98,2	1ere couche
P,11	6,8	2,43	2,49	97,5	2ième couche
P,2	8,6	2,35	2,51	93,8	

Tableau 9 : Tableau des résultats de matériau d'enrobé

Les caractéristiques géotechniques des enrobés sont acceptables d'après ces résultats, mais en quelques endroits ils présentent des dégradations dues à la fatigue de la chaussée.

III Synthèse des résultats

D'après les résultats des essais effectués, on peut constater que la plate-forme présente un décompactage. La couche de base de l'aire de stationnement présente aussi le même problème.

Compte tenu de l'hétérogénéité des sols de site, la diminution de la compacité des sols en place, on retiendra les valeurs de CBR, ci-après, pour les calculs de renforcement de la piste.

ZONE	SITUATION	VALEUR CBR
1	0 à 700m	5
2	700 à 1430m	6
3	1430 à 3100m	5
4	Bretelle centrale	5
5	Aire de stationnement	6

Les caractéristiques géotechniques de la carrière de découverte sont récapitulées dans le tableau ci-après :

- Désignation	Carrière
- Situation	Ambohidratrimo
- Nature	Granite
- Volume exploitable	200.000m ³
- Masse volumique apparente	2,61 T/m ³
- Accès	facile
- Los Angeles	40 < LA < 41

IV DIMENSIONNEMENT DE LA PISTE

IV.1 Méthode CBR

Le complexe formé par le sol support et la chaussée est assimilé à un massif semi infini, homogène, isotrope. Le critère retenu pour le dimensionnement des chaussées souples est celui de la contrainte verticale σ_z au niveau du sol support.

La formule CBR permet de calculer l'épaisseur « e » de la chaussée pour laquelle est admissible la contrainte verticale produite par une charge **P** appliquée 10.000 fois avec une pression **q** uniforme répartie sur l'aire « a » d'un cercle. En toute rigueur, la méthode CBR ne se refait pas à la contrainte vertical σ_z mais au cisaillement maximal que peut subir le sol, l'essai CBR étant un essai de poinçonnement simple mais empirique du sol.

IV.2 Formule

La formule CBR utilisée pour l'établissement des abaques a été établie expérimentalement par BOYD et FOSTER du corps of Engineers américain. Elle est la suivante :

$$e = \sqrt{\frac{P}{10,29}} \times \left[4,231 - 5,013 \log \frac{CBR}{q} + 2,426 \left(\log \frac{CBR}{q} \right)^2 - 0,473 \left(\log \frac{CBR}{q} \right)^3 \right]$$

avec :

e en cm : épaisseur de la chaussée

P en kg : charge par roue simple équivalent (RES)

q en mPa : pression des pneus

Pour les calculs manuels, la formule simplifiée ci-dessous peut être utilisée sans inconvénient lorsque le rapport CBR/q est inférieur ou égale à 20.

$$e = \sqrt{P \left(\frac{1}{0,57 CBR} - \frac{1}{329} \right)}$$

IV.3 Hypothèse de calcul

D'après les données communiquées par le Service de la Navigation Aérienne suivant la lettre N ° 1888 SNA / DJ du 14-06-76, on a adopté les hypothèses suivantes : l'avion le plus contraignant empruntant la piste est le Boeing 747, ayant un poids total en charge de 351 tonnes, la pression de gonflage des pneus est de 13,01 kg/cm² soit 1,301MPa.

V DIMENSIONNEMENT

V.1 Détermination de la charge par roue simple équivalente

En supposant que la roulette avant supporter 10% de la charge totale de l'avion soit 351 x 0,10 = 35,1 tonnes ; la charge supportée par les atterrisseurs principaux est donc égale à 351 x 0,9 = 315,9 tonnes. Soit une charge de 315,9/4 = 78,975 tonnes par atterrisseurs principal.

Pour une masse d'atterrisseur principal égale à 78,975t, la charge par roue simple équivalente donnée par l'abaque de dimensionnement du service technique des bases aériennes est de RES = 19,800 tonnes.

V.2 Détermination de l'épaisseur équivalente nécessaire

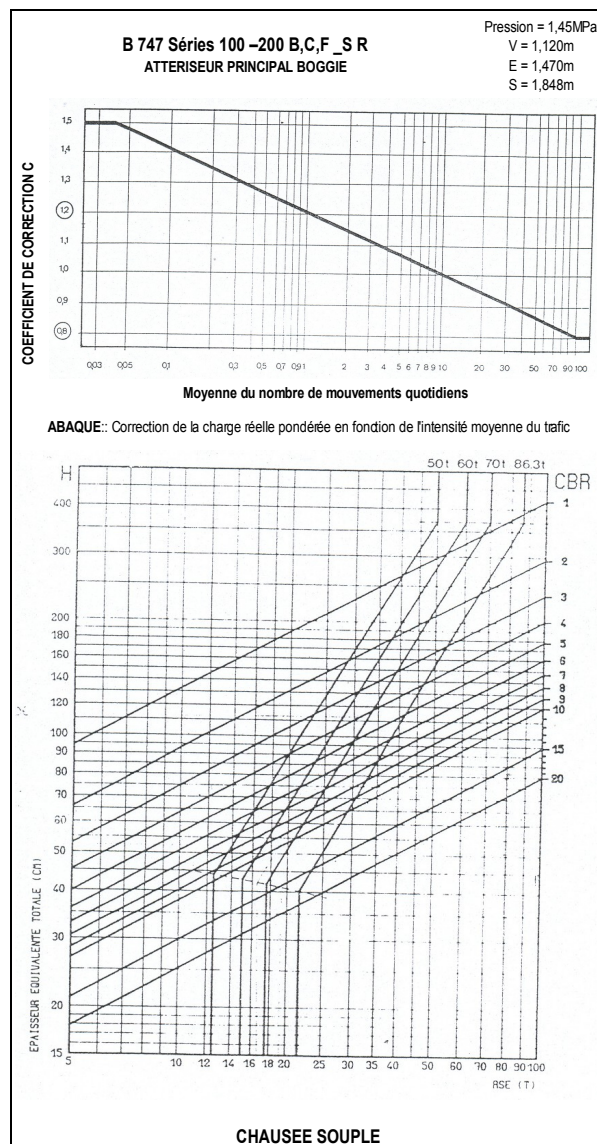
En prenant des valeurs de CBR allant de 4 à 10 la condition $CBR/q < 20$ est toujours satisfaite, donc on peut utiliser la formule simplifiée de BOYD et FOSTER.

$$e = \sqrt{P \left(\frac{1}{0,57 CBR} - \frac{1}{32q} \right)} \quad CBR = 4$$

Suivant la portance du sol de plate forme caractérisée par son indice CBR, les épaisseurs équivalentes e nécessaires sont récapitulées dans le tableau ci joint :

CBR	4	5	6	7	8	9	10
e en cm	91	81	73	67	62	58	54

Tableau 10 : Tableau de CBR suivant l'épaisseur



On pourrait de même retrouver la valeur de l'épaisseur équivalente de la chaussée en utilisant l'abaque de dimensionnement de service technique des bases aériennes.

Notons que l'abaque utilisé est celui conçu pour le Boeing 747 200 B, C, F pour le dimensionnement des chaussées souples.

Figure 12 : Abaque B 747 200 B, C, F et dimensionnement des chaussées souples

V.3 Correction de la charge en fonction des nombres de mouvement

D'après le service de la Navigation Aérienne, le nombre de mouvement effectué par le Boeing 747 est de 42 par mois, soit en moyenne 1,4 mouvements par jour (en 1990).

L'abaque ci-dessous nous donne le coefficient de correction a adopté en fonction de la moyenne du nombre de mouvements quotidiens.

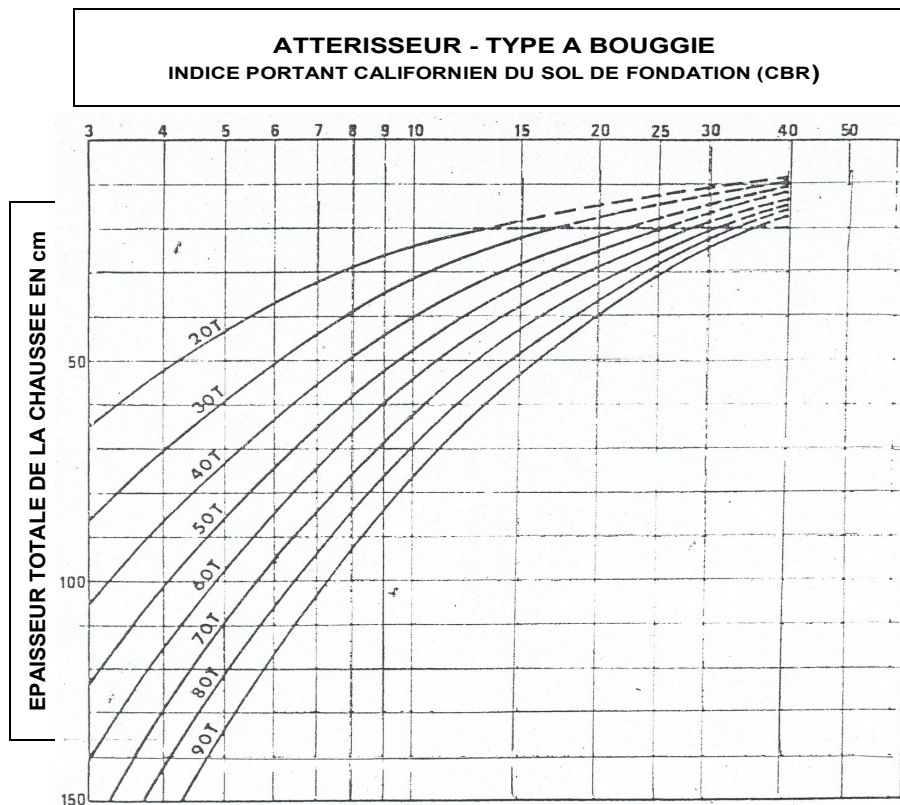


Figure 13 : Abaque de calcul d'une chaussée souple

Le nombre de mouvements est égal à $n = 1,4$ par jour, $n < 10$, dans le sens de la sécurité, nous pourrions prendre $n = 9$ ce qui donne $C = 1,02$.

D'où la charge corrigée

$$P_c = \frac{P}{C} = \frac{78975}{1,02} = 77426 \text{ kg}$$

V.4 Epaisseur équivalente

Pour une charge de calcul $P = 77,42 \text{ t}$ avec une pression de pneus $Q = 13,01 \text{ kg/cm}^2$. En utilisant l'abaque de dimensionnement pour le Boeing 747 série 200BCP pour les chaussées souples, les différentes épaisseurs sont données en fonction de la valeur de l'indice CBR dans le tableau ci-dessous.

CBR	4	5	6	7	8	9	10
e en cm	107	95	83	74	66	58	54

Tableau 11 : Tableau de CBR suivant l'épaisseur e

En tenant compte des états et des caractéristiques des couches constituant la chaussée, on peut adopter les coefficients d'équivalence suivants :

Béton Bitumineux	2 en bon état
Binder	2
GCNT 0/40	0,9
GCNT 0/60	0,8
Sable de rivière	0,5

Tableau 12 : Tableau de coefficient d'équivalence

Suivant la coupe de la chaussée de chaque zone homogène, on aura les épaisseurs équivalentes en tenant compte des coefficients d'équivalence.

Pour la zone 1 : PK 0 à 700m

Différentes couches	Epaisseur existante	Coefficient d'équivalence	Epaisseur équivalente
Béton bitumineux	15	2	30
Binder	0	2	0
GNCT 0/40	50	0,9	45
GNCT 0/60	0	0,8	0
Blocage	0	0,7	0
Sable	10	0,5	5
Epaisseur totale			80cm

Pour la zone 2 : PK 700 à 1430m

Différentes couches	Epaisseur existante	Coefficient d'équivalence	Epaisseur équivalente
Béton bitumineux	14,2	1	14,2
Binder	8,4	2	16,8
GNCT 0/40	12	0,9	10,8
GNCT 0/60	22	0,8	17,6
Blocage	0	0,7	0
Sable	13,3	0,5	6,65
Epaisseur totale			66,05cm

Pour la zone 3 : PK 1430 à 3100m

Différentes couches	Epaisseur existante	Coefficient d'équivalence	Epaisseur équivalente
Béton bitumineux	11,7	2	23,4
Binder	11	2	22
GNCT 0/40	15,3	0,9	13,77
GNCT 0/60	18,3	0,8	14,64
Blocage	0	0,7	0
Sable	6	0,5	3
Epaisseur totale			76,81cm

Pour la zone 4 : Bretelle principale

Différentes couches	Epaisseur existante	Coefficient d'équivalence	Epaisseur équivalente
Béton bitumineux	10	2	20
Binder	10	2	20
GNCT 0/40	35	0,9	31,5
GNCT 0/60	20	0,8	0
Blocage	10	0,7	14
Sable	10	0,5	5
Epaisseur totale			80,3cm

Pour la zone 5 : Aire de stationnement

Différentes couches	Epaisseur existante	Coefficient d'équivalence	Epaisseur équivalente
Béton bitumineux	14	2	28
Binder	0	2	0
GNCT 0/40	12	0,9	10,8
GNCT 0/60	14	0,8	11,2
Blocage	20	0,7	14
Sable	10	0,5	5
Epaisseur totale			60cm

V.5 Récapitulation

Pour chaque zone homogène, l'indice CBR retenu est l'indice CBR le plus défavorable, l'épaisseur équivalente nécessaire ainsi que l'épaisseur de renforcement sont données dans le tableau ci-après :

Zone homogène N°	CBR	Epaisseur équivalente nécessaire (cm)	Epaisseur équivalente existante (cm)	Epaisseur du renforcement (cm)
1	5	95	80	15
2	6	83	66	17
3	5	95	77	18
4	5	95	80	15
5	6	83	69	14

L'épaisseur de renforcement est comprise entre 14 et 18cm

VI CONCEPTION ET COUPE DE LA CHAUSSEE

En tenant compte de l'état de revêtement actuel, des matériaux disponibles et des épaisseurs de renforcement à prévoir, après avoir colmatée les fissures et les dégradations existants, le renforcement à prévoir sera constitué par un tapis de béton bitumineux

Ainsi la conception de la chaussée sera comme suit :

Zone 1 : PK.0 à 700m

Unité en cm

TYPE	Nature	Epaisseur Equivalente	Epaisseur réelle théorique	Epaisseur pratique mise à 0
Renforcement	Béton dense	15	7,5	7,5
Ancienne Chaussée existante	Enrobé	30	15	15
	GCNT	45	50	50
	Sable	5	10	10
	TOTAL	95	82,5	82,5

Coupe type de la zone 1

Unité en cm

Renforcement		7,5 Beton bitumineux
		15 Beton bitumineux
Ancienne chaussée existante		50 GCNT
		10 Sable de rivière
		Limon argileux
Total 82,5 cm		

Zone 2 : PK.700 à 1400m

Unité en cm

TYPE	Nature	Epaisseur Equivalente	Coefficient équivalent	Epaisseur réelle théorique	Epaisseur pratique mise à 0
Renforcement	Béton Bitumineux	17	2	8,5	8,5
Ancienne Chaussée existante	Enrobé	14,2	1	14,2	14
	Binder	16	2	8	8
	GCNT 0/40	10,8	0,9	12	12
	GCNT 0/60	17,6	0,8	22	22
	Sable	6,5	0,5	11	13
	TOTAL	82,1		77,7	77,7

Coupe type de la zone 2

Unité en cm

Renforcement		8,5 Beton bitumineux
		14,2 Enrobé dense
		8 Binder
Ancienne chaussée existante		12 GCNT0/40
		22 GCNT0/60
		13 Sable
		Limon argileux
Total 77,7 cm		

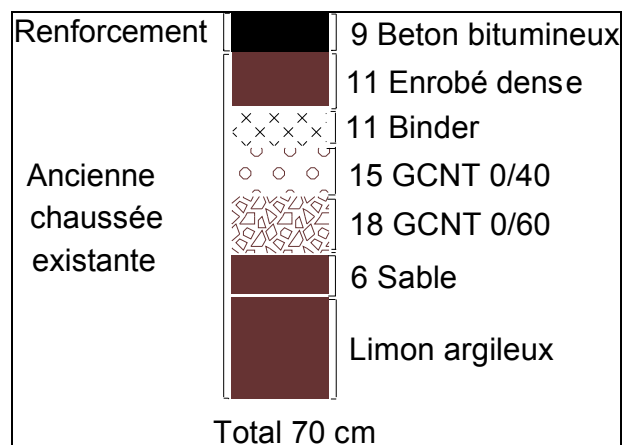
Zone 3 : PK.700 à 1400m

Unité en cm

TYPE	Nature	Epaisseur Equivalente	Coefficient équivalent	Epaisseur réelle théorique	Epaisseur pratique mise à 0
Renforcement	Béton Bitumineux	18	2	9	9
Ancienne Chaussée existante	Enrobé	23	2	11	11
	Binder	22	2	11	11
	GCNT 0/40	13,7	0,9	15	15
	GCNT 0/60	14,6	0,8	18	18
	Sable	3,5	0,5	6	6
	TOTAL	84,3		70	70

Coupe type de la zone 3

Unité en cm

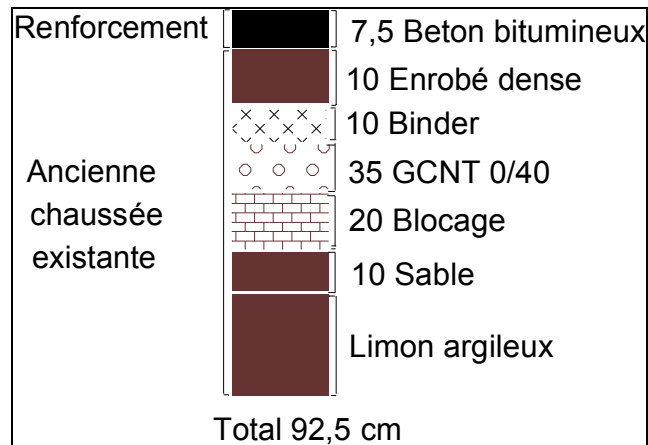
**Zone 4 : Bretelle principale**

Unité en cm

TYPE	Nature	Epaisseur Equivalente	Coefficient équivalent	Epaisseur réelle théorique	Epaisseur pratique mise à 0
Renforcement	Béton Bitumineux	15	2	7,5	7,5
Ancienne Chaussée existante	Enrobé	20	2	10	10
	Binder	20	0,9	10	10
	GCNT 0/40	31,5	0,7	35	35
	Blocage	14	0,5	20	20
	Sable	5	0,5	10	10
	TOTAL	105,5		92,5	92,5

Coupe type de la zone 4

Unité en cm



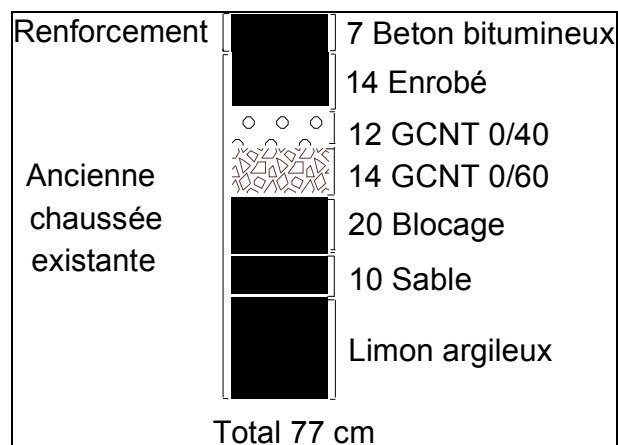
Zone 5: Aire de stationnement

Unité en cm

TYPE	Nature	Epaisseur Equivalente	Coefficient équivalent	Epaisseur réelle théorique	Epaisseur pratique mise à 0
Renforcement	Béton Bitumineux	14	2	7	7
Ancienne Chaussée existante	Enrobé	28	2	14	14
	Binder	10,8	2	12	12
	GCNT 0/40	11,2	0,9	14	14
	GCNT 0/60	14	0,7	20	20
	Sable	5	0,5	10	10
	TOTAL	83		77	77

Coupe type de la zone 5

Unité en cm



VI.1 Commentaires et conclusion

Les épaisseurs du renforcement sont pour la piste

Zone 1 PK 0 à 700m	$e1 = 7,5 \text{ cm}$
Zone 2 PK 700 à 1430m	$e2 = 8,5 \text{ cm}$
Zone 3 PK 1430 à 3100m	$e3 = 9,0 \text{ cm}$
Zone 4 bretelle principale	$e4 = 7,5 \text{ cm}$
Zone 5 aire de stationnement	$e5 = 7,0 \text{ cm}$

Ainsi, pour tenir compte de la sécurité et dans le but de faciliter la réalisation et les contrôles, nous adoptons pour toutes les aires de mouvements, une épaisseur de renforcement $e = 9 \text{ cm}$

VII VERIFICATION DES CONTRAINTES

VII.1 Introduction

Le dimensionnement d'une chaussée revêtue ne s'achève pas à la seule détermination de son épaisseur totale ou équivalente ; elle doit se poursuivre par une vérification de contrainte à l'aide des méthodes rationnelles de calcul.

Ces méthodes basées sur le comportement élastique des chaussées donnent en fonction de l'empreinte du pneumatique, de l'épaisseur et des rapports de moule des différentes couches de la chaussée, la valeur des contraintes, soit de compression, soit de traction sur les différents interfaces.

VII.2 Méthode de JONES et PEATES

La méthode considère un système tri couche élastique et assimile le revêtement à « une couche élastique » et non à une plaque. De plus cette méthode fournit un plus grand nombre de contraintes qui sont maximales est données dans l'axe de la charge appliquée sauf en ce qui concerne les contraintes de cisaillement qui atteignent leur valeur maximale au droit du plan vertical passant par les bords de la charge.

VII.3 Hypothèse de base

L'épaisseur et le module d'élasticité des différentes couches entrant dans la constitution de la chaussée, sont préalablement choisis. Toutes les couches y comprise la plate forme, sont supposées parfaitement « élastiques » c'est à dire qu'elles obéissent à la loi de proportionnalité entre σ et E .

Les contacts aux interfaces sont rugueux. Le poids des couches constituant la chaussée est supposé égal à 0. La pression des couches est supposée répartie sur une aire de contact circulaire de rayon « a ».

VII.4 Fonctionnement et application de la méthode

Les principales contraintes fournies et les paramètres de calcul considérés par la méthode sont illustrés ci-après.

VII.4.1 Contraintes

σ_{r1} = Contraintes de traction à la base du revêtement

σ_z = Contrainte verticale de compression au niveau supérieur de la couche intermédiaire.

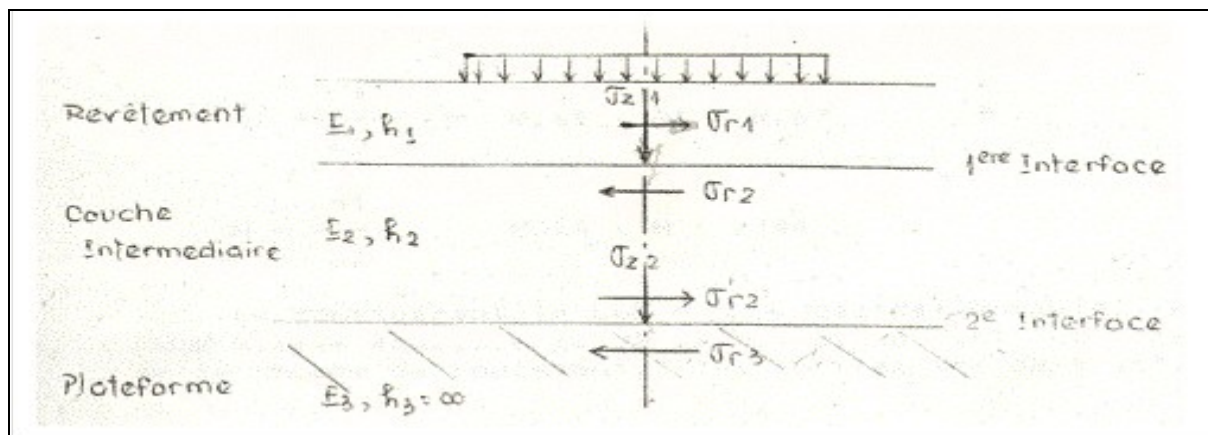
σ'_{r2} = Contrainte de traction à la base de la couche intermédiaire

σ_{r2} = Contrainte radiale au niveau supérieur de la couche intermédiaire

σ_{z2} = Contrainte verticale de compression au niveau supérieur de la plate forme

E_1 = Déformation à la base du revêtement.

σ_{r3} = Contrainte radiale au niveau supérieure de la plate forme



VII.4.2 Paramètre de calcul

$$K_1 = \frac{E_1}{E_2} \quad K_2 = \frac{E_2}{E_3} \quad A_1 = \frac{a}{h_2} \quad H = \frac{h_1}{h_2}$$

($h_1 - h_2$) épaisseurs respectives du revêtement et de la couche intermédiaire (E_1, E_2, E_3) leurs modules respectifs.

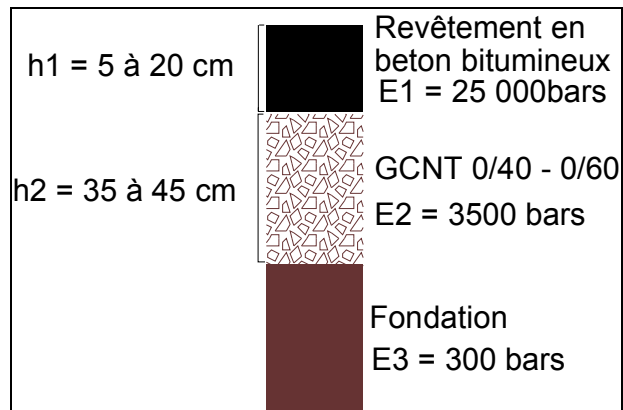
En considérant les hypothèses suivantes :

Avion type Boeing 747

Pression des pneus $q = 13,1$ bars

Rayon d'impact $a = 21,28$ cm

Roue simple équivalente 18,57



En considérant ces données nous avons :

$$K1 = \frac{25000}{3500} = 7,14 \quad K2 = \frac{3500}{300} = 11,67$$

$$A1 = \frac{a}{h2} = 0,6 > A1 > 0,47 \quad H = \frac{h1}{h2} = 0,14 < H < 0,44$$

En considérant le CBR = 5, cas défavorable, pour une roue simple équivalente de 18,5t et suivant les épaisseurs de la couche de roulement, les contraintes de traction et développés à la base du revêtement sont données par l'abaque de JONES et PEATES. Nous donnons dans le tableau ci-après la valeur de ces contraintes suivant les épaisseurs

h1 (cm)	σ (bars)
5	23
7	19,5
10	15,5
15	11
20	8

Tableau 13 : Valeur des contraintes suivant les épaisseurs

La contrainte admissible σ_{adm} est de 25 bars en général, donc on peut fixer à priori l'épaisseur du revêtement en béton bitumineux de façon que la valeur de la couche de revêtement et de la couche de base soit inférieure ou égale à la contrainte admissible.

VII.5 Remarque

Le fait de supposer le revêtement comme une couche élastique et le contact aux interfaces rugueux est plus conforme à la réalité.

Rappelons que la méthode de Jones ne s'applique qu'au cas d'une roue simple, ainsi pour le cas de roues jumelées, des facteurs de correction devront être appliqués aux solutions de JONES.

CONCLUSION

Pour conclure, ce mémoire a pour objectif de décrire les différentes étapes et les modes opératoires respectifs, du Laboratoire de Mécanique des sols, à suivre pour la réalisation d'un essai donné. On rappelle encore que la plupart des essais qu'on a effectués sont seulement des essais de compréhension mais non pas des essais d'étude pour les clients du laboratoire.

En bref, même si le LNTPB ne dispose pas, momentanément, d'appareils modernes, le savoir-faire et l'expérience du personnel ont toujours joué en sa faveur. On peut dire que LNTPB reste encore à la tête des laboratoires prestataires de services géotechniques ici à Madagascar.

Quelque soit l'essai effectué, la base des calculs est la teneur en eau, cela veut dire que c'est l'une des caractéristiques très importantes des sols que l'on doit savoir le client pour mieux effectuer le mode d'échantillonnage et les préconscients à suivre. La finalité est d'avoir un bon ouvrage, c'est à dire un ouvrage bien conçu, bien exécuté et bien contrôlé. Le contrôle qui moralise l'exécution, dont pour le laboratoire doit être constructif et non être comme un moyen de rétorsion. Ce laboratoire doit être efficace et rapide dans ces interventions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. I. RAZANAMAMPANDRY et G. E. RAKOTOMALALA, (1990), *Réhabilitation de la piste d'Aérodrome d'Ivato*, p 96 - 119
- [2] E. RAVELOMANANJARA et al, (1982) : *Stage interne au Lntpb de Tananarive sols et fondations Formation des techniciens* 218p
- [3] GEMRE du Lntpb, (1982)
- [4] H. T. A. RAZAFIMAHEFA, (1998) : *Rapport de stage au sein du LNTPB, Université d'Antananarivo E.S.P.A département MINES*,
- [5] LNTPB, Classification des sols, Juin 2004 : *Formation BCEOM / AFER, population cible : Conducteurs et Techniciens des PME*
- [6] Les chroniques du LNTPB, 1973 : *Dimensionnement des chaussées neuves à Madagascar - Numéro spécial « A »*,
- [7] Ministère des transports / DGAC / SBA / STBA : *Dimensionnement des chaussées - Instruction sur le dimensionnement des chaussées d'aérodromes et la détermination des charges admissibles - volume 1 et 2, première édition 1983*
- [8] S. AMAR & J. P. MAGNAN, Juillet 1980 : *Essais de mécanique des sols en laboratoire et en place ; Aide mémoire, note d'information technique*

REFERENCES SITES WEB

[http://www.Mécanique du sols/Laboratoire_Jacques_Verdeyen/\(LJV\).htm](http://www.Mécanique%20du%20sols/Laboratoire_Jacques_Verdeyen/(LJV).htm)

[http://www.Presses scientifiques du CNRC/Revue canadienne de géotechnique.htm](http://www.Presses_scientifiques_du_CNRC/Revue_canadienne_de_géotechnique.htm)

http://www.LCPC_Produits/Matériels/MLPC_PDF.htm

http://www.Géotechnique/essais_d'identification/Geotechnics_identification_tests.htm

ANNEXE I

LA GRANULOMETRIE PAR SEDIMENTATION (Sédimentometrie)

I.1 Généralités et principe de l'essai

La sédimentometrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage des sols. Elle s'applique aux éléments de diamètre inférieur à 0,100mm (Module **Afnor** 21). Les grains de diamètre différent dans un milieu liquide au repos à vitesses différentes.

La sédimentometrie est basée sur la loi de **Stokes** qui exprime la relation entre la vitesse de décantation d'une particule solide sphérique dans un liquide et le diamètre de cette particule (diamètres équivalents). Nous savons que la densité de l'eau varie avec la température et que cette densité ait des valeurs différentes suivant sa propreté.

Exemple : à 20°C on a une densité de 0,9982 et à 22°C on a une densité de 0,9978

Des matières en suspension dans l'eau nous donnent une densité de cette eau supérieure à l'unité. On remarque que si cette densité tend vers l'unité, on a une décantation. Le densimètre permet donc de mesurer à une profondeur **d** déterminée et à un instant **t** après le début de la décantation, la densité variable d'une suspension initialement uniforme.

I.2 Appareillages :



Un densimètre gradué

- ✓ Un densimètre gradué de 995 à 1030
- ✓ Une éprouvette de 1 litre gradué
- ✓ Un thermomètre à mercure 0 à 50°C
- ✓ Un chronomètre
- ✓ Un agitateur mécanique à grande vitesse 10000tr/mn
- ✓ Un agitateur manuel
- ✓ Eau distillée
- ✓ Balance d'un porté de 100 g
- ✓ Spatules – cuillères
- ✓ Etuve pour dessiccation
- ✓ Bacs ou cuvettes
- ✓ Défloculants divers comme l'Hexametaphosphate de Sodium, Ammoniaque, Carbonate de Soude, acide Phosphorique.

I.3 Mode opératoire :

L'échantillon du sol est tamisé par voie humide au tamis de 0,100mm et recueilli dans un bac. Laisser décanter puis siphonner sans entraîner les fins. Porter dans l'étuve pour dessiccation. Lorsque le sol est sec, bien homogénéiser l'ensemble. Prélever 80g de matériau sec pour une éprouvette de 2l. Imbiber les 80g de matériau dans un des récipients de l'agitateur mécanique pendant 15h minimum. Dispersion à l'agitateur mécanique en utilisant environ 500cm³ d'eau distillée. Additionnée de défloculant prescrite : 60cm³ d'une solution à 5% d'Hexametaphosphate de sodium. Agiter mécaniquement l'ensemble pendant 3mn à 10000 à 12 000trs/mn. Verser la suspension dispersée dans l'éprouvette graduée de 2l et bien rincer le récipient de l'agitateur. Compléter la quantité avec de l'eau distillée à 2l exactement.

I.4 Exécution de l'essai :

L'eau forme un mécanisme sur les bords des récipients qui la contiennent, ce ménisque varie suivant le diamètre du récipient. Il faudrait donc s'assurer la bonne propreté de la tige du densimètre pour la formation correcte du ménisque lors de la lecture. Avant de plonger le densimètre, agiter vigoureusement la suspension pour obtenir une concentration uniforme. Retirer l'agitateur et déclencher immédiatement le chronomètre puis plonger lentement le densimètre.

Les lectures devraient être faites au sommet du ménisque et noter 18,5 pour la lecture 1018,5. C'est une lecture brute. Laisser le densimètre dans l'éprouvette jusqu'à 1mn sans toucher afin de ne pas perturber la solution. Les temps de mesure se font à 30s, 1-2 – 5 – 10 – 20 – 70 – 80mn, 4h et 24 heures. La température de la suspension est relevée après les lectures à 2mn, alors que pour les autres lectures plonger le densimètre 15 à 20s avant chaque lecture.

I.5 Calcul et présentation des résultats :

On emploie généralement cette formule pour le calcul des pourcentages **P%** des grains Pour se ramener aux pourcentage de l'échantillon complet (fraction supérieure à 0,1mm éliminée par tamisage) il suffit de multiplier le pourcentage **P** obtenu dans la sédimentometrie. Le pourcentage de la fraction inférieure à 0,100mm. Cette formule se simplifie lorsqu'on prend : **V** = 2000cm³ ; **W** = 80g sol sec ; **γ_s** = 2,65g / cm³

$$P\% = \frac{V}{W} x \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} x \frac{\gamma_{w.Rt}}{10} \quad \text{D'où } P\% = 4Rt$$

ANNEXE II

TENEUR EN EAU

1 Les différents états de l'eau dans le sol :

Dans le sol on distingue :

- L'**eau de constitution** qui entre dans la composition chimique des grains, c'est l'eau de cristallisation.

- L'**eau liée** ou eau absorbée qui est l'eau de mouillage des grains solides. Elle est fixée à la surface de ceux-ci en formant un film mince.

- L'**eau interstitielle** :

L'**eau capillaire** qui est au dessus de la nappe. Elle est en équilibre sous l'action de la gravité d'une part, et celles des forces de tension qui se développent à l'interface eau/air d'autre part.

L'**eau libre**, lorsque le sol est saturé et baigne dans une nappe phréatique, cette eau est soumise aux lois des écoulements hydrauliques.

Dans l'essai de teneur en eau ce sont les eaux libres et les eaux liées ou absorbées qui nous intéressent.

2 Définition :

La teneur en eau d'un sol est le rapport du poids d'eau (**P_w**) contenu dans le sol par son poids sec (**P_s**). On la désigne par **W** (Waters) et l'exprime en pourcentage.

En mécanique des sols, la teneur en eau est l'un des essais le plus important au laboratoire, car c'est l'eau qui conditionne la stabilité d'un sol.

$$W\% = \frac{P_w}{P_s} \times 100$$

3 Matériels :

- Récipient
- Balance de **Melter** (balance de précision)
- Etuve

4 Mode opératoire :

Bien homogénéiser une quantité suffisante de matériau. Mettre dans le récipient taré (**C**), puis peser. Soit (**A**) le poids du volume humide taré. L'introduire dans l'étuve, à 105°C (température normale pour éviter la calcination du matériau); à 60°C pour les sols organiques. Sortir de l'étuve l'échantillon après 24h. Peser et on obtient le poids du sol sec avec le récipient. A partir des résultats obtenus au cours de l'essai on déduit :

Le poids d'eau dans le sol : **D = A – B**

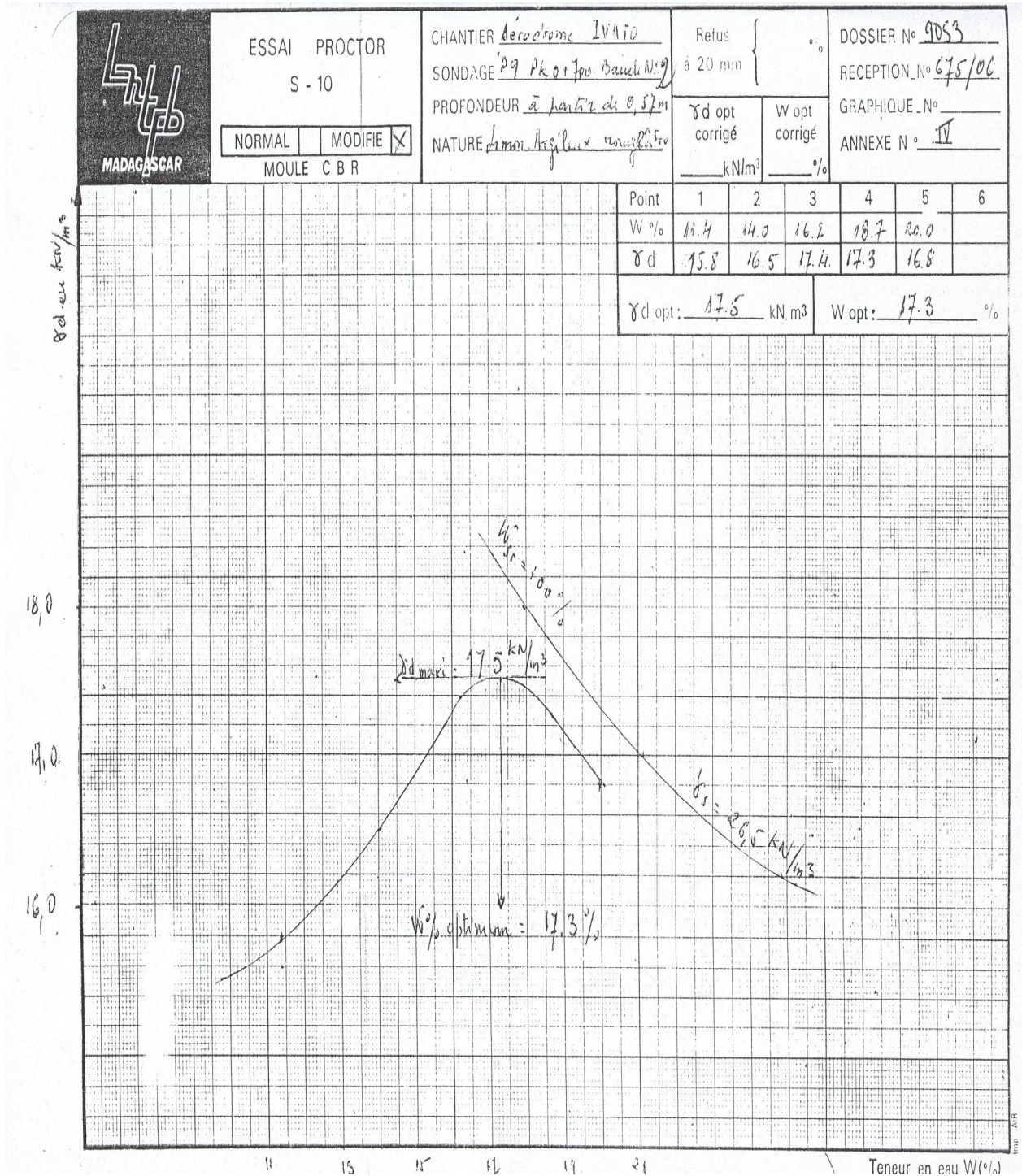
Le poids du sol sec : **E = B – C**

Alors la teneur en eau du matériau a pour expression :

$$W(\%) = \frac{D}{B - C} \times 100$$

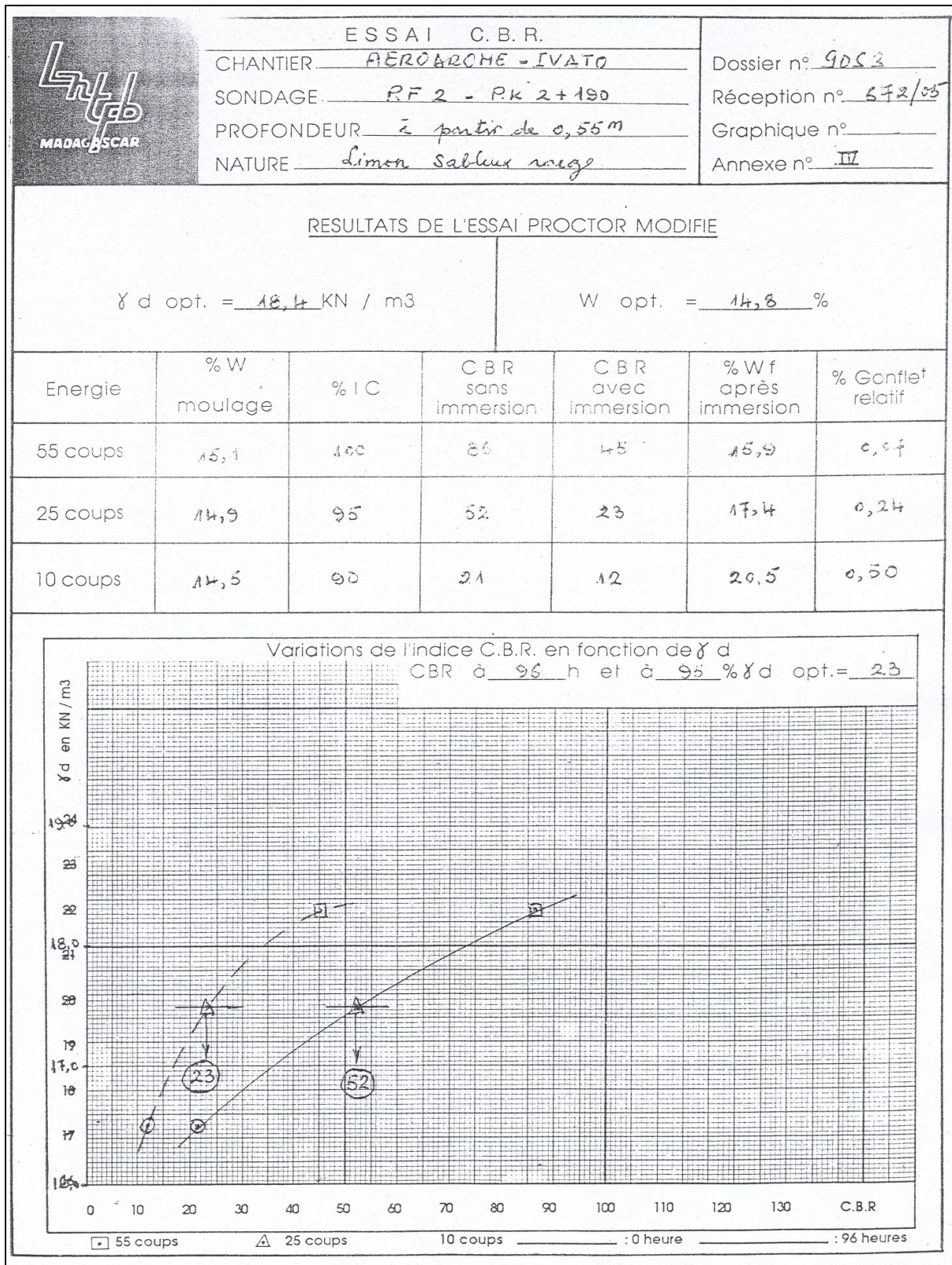
La teneur en eau de 12h n'a pas de différence à celle de 24h, donc il ne faut pas craindre du résultat mais il faut tout simplement mentionner au rapport la durée de prise.

ANNEXE III



Détermination γ_d en fonction de W (%)

ANNEXE IV



Variation de l'indice CBR en fonction de γ_d

RESUME

Ces essais en laboratoire sont importants car ses valeurs entrent dans la classification américaine HBR. Le type de sol efficace pour une couche de roulement, une couche de fondation, un remblai est le sol graveleuse ayant une courbe granulométrique continue et étalé comme le quartzite, le "karaoky", le pousolane, les graves naturels, le limon argileux sableux de $IP < 20$; $CBR < 15$ et de $\gamma_d > 17 \text{ kN/m}^3$.

D'autres essais sont également effectués sur le sol et les matériaux pendant le stage au sein du LNTPB mais nous ne pouvons pas les citer tous pour une cause de confidentialité du Laboratoire, de ce fait on a bien maîtrisé les essais cités ci-après :

Essai de résistance : le Triaxial ; essai de compressibilité : Oedométrie, détermination de la teneur en bitume d'un enrobé, essai Marshall et essai Duriez ; essai sur la chimie de matériaux : essai colorimétrie à la soude, teneur en CaCO_3 ; recherche du dosage en ciment utilisé sur béton durci, analyse de béton frais et béton durci,...

Après une validation complète des procédures de laboratoire, le retour nécessaire sur ouvrage passe par l'identification des propriétés physiques in situ, et en particulier de leur variabilité. Le comportement du sol et du matériau dépendant fortement de sa teneur en eau, les plages de variation de celle-ci doivent être évaluées sur les ouvrages réels [que la variation soit spatiale, ou temporelle, due aux interactions avec le climat] et leurs effets simulés

ABSTRACTS

These tests in laboratory are important because its value in the American classification HBR. The type of efficient soil for a layer of rolling, a layer of foundation, an embankment is the gritty soil having a curve continuous granulometric and spread as the quartzite, the " karaoky ", the pousolane, engrave them natural, the sandy clayey silt of $IP < 20$; $CBR < 15$ and $\gamma_d > 17 \text{ kN/m}^3$.

Other tests are also done on soil and the materials during the practicum at the LNTPB but we are not able to the cities all for a reason of confidentiality of the Laboratory, of this fact one mastered the quoted tests well below:

test of resistance: the Triaxial ; test of compressibility: Oedometrie, determination of the content made of asphalt of a coated, Marshall test and test Lasted ; test on the chemistry of materials: test colorimétrie to sodium carbonate, content in CaCO_3 , research of dosage made of cement used on hardened concrete, analysis of concrete spawn and concrete hardened,

After a complete validation of the laboratory procedures, the necessary return on work passes by the identification of the properties physical in situ, and in particular of their variability. The behavior of soil and the dependent material strongly of its content in water, the beaches of variation of this one must be valued on the real works [that the variation is spatial, or temporal, due to the interactions with the climate] and their simulated effects

KEYWORDS / Mots-cles :

CBR, Dimensionnement, Géotechnique, LNTPB, Mécanique des sols et fondations, Proctor

Nom et prénom(s) : ANDRIANASOLOMAHEFA Rovatiana Salema

Adresse : lot VS99DDE Andranovory Ambolokandrina (101) ANTANANARIVO

Tél. : +(261) 3311 733 18 / 3207 711 21

e_mail : ben.2@caramail.com

Pagination : 42 Tableaux : 13 Figures : 13