

REPUBLIQUE DU SENEGAL

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



GC.0095

ECOLE SUPÉRIEURE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

NUM

## PROJET DE FIN D'ÉTUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION

***TITRE :*** CONCEPTION DE STRUCTURES ROUTIÈRES  
SUR MARNES ET ARGILES GONFLANTES  
Etude de cas : BARGNY-DIAMNIADIO

Auteur : Modou DIOP

Directeur : M. Ismaïla GUÈYE

Directeur externe : M. Abdoulaye MBODJI

Année académique : 2001/2002

4

## *Dédicaces*

*Par la grâce de DIEU le tout puissant,  
et de son illustre prophète Mohamed (PSL),  
à mon très cher père,  
à ma chère mère,  
à mes frères et sœurs,  
et à tous ceux qui me sont chers.*

*"Via Vita est"*

*pour reprendre une belle formule des Romains de  
l'antiquité*

*"La route est la vie", ou plutôt  
"est source de vie"*

## Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude à :

- Monsieur ISMAÏLA GUEYE, professeur à l'ESP pour avoir bien voulu nous encadrer dans ce projet, pour ses conseils, son soutien constant et sa disponibilité tout au long de ce travail ;
- Monsieur BABACAR NDIAYE, chef du département de Génie Civil, pour son engagement et son soutien ;
- Monsieur IBRAHIMA K. CISSE, professeur à l'ESP, pour ses conseils ;
- Monsieur ABDOULAYE MBODJI, Entreprise JEAN LEFEBVRE SENEGAL, pour ses conseils, son soutien matériel, et son engagement pour la bonne réussite de ce projet.
- Monsieur SARIFOU BARRY, Entreprise JEAN LEFEBVRE SENEGAL ;
- Monsieur MADIOR NIANG, Entreprise JEAN LEFEBVRE SENEGAL ;
- Monsieur IDY AMINE DIALLO, Institut des Sciences de la Terre IST;
- Tout ceux qui nous ont aidé de prêt ou de loin à la réussite de ce projet.

## Sommaire

L'objectif principal de cette étude est de concevoir des structures routières adaptées à des sols constitués par des marnes ou des argiles gonflantes, afin de trouver une solution au problème de la dégradation prématurée qui depuis longtemps, caractérise les routes construites sur de telles zones. Ainsi, nous étudions le cas de l'autoroute BARGNY –DIAMNIADIO qui traverse une zone de marnes et argiles gonflantes.

Dans cette présente étude, nous avons commencé par effectuer une synthèse bibliographique sur les caractéristiques des structures routières et des sols gonflants de manière générale. Cette synthèse a notamment comporté une analyse des résultats de planches d'essai expérimentales qui ont été réalisées par l'ISTED (regroupant le LCPC, le CEBTP et le SETRA ) au niveau des sols argileux gonflants présents dans le Nord du CAMEROUN. Ces planches d'essai ont comportées d'une part une utilisation de la géomembrane et d'autre part la mise en place d'un remblai. L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus, a permis non seulement de noter les différentes phases du processus de dégradation des routes construites sur sols gonflants, mais aussi de dégager un certain nombre d'orientations sur les solutions techniques.

La partie expérimentale sera constituée par l'étude du projet de l'autoroute BARGNY-DIAMNIADIO. Ainsi, une identification géotechnique de l'ensemble des matériaux prélevés dans les différents sondages effectués le long de l'emprise du projet a montré que ces matériaux sont des marnes et des argiles. A la suite de cette identification, il est apparu également que ces matériaux ne sont pas aptes à constituer le sol de plate forme sans dispositions particulières.

Pour des raisons liées à la trop faible portance de ces sols, l'utilisation de la géomembrane étanche n'est pas envisageable dans le cadre de ce projet.

C'est ainsi qu'il a été effectué une étude géotechnique du traitement de ces matériaux avec du ciment, de la chaux, et enfin avec du sable de dune. Les traitements avec la chaux et le ciment ont donné des résultats satisfaisants pour les caractéristiques CBR et gonflement à partir de 3% ; mais après la prise en compte d'autres considérations, le traitement à la chaux a été retenu comme étant le mieux adapté.

Le dimensionnement de la structure a été effectué avec l'outil de calcul nommé ECOROUTE. Il faudra noter que, ce calcul de dimension a été effectué aussi bien pour le cas de structures de type 1, avec l'option de la purge sur 1m des matériaux argileux instables, que pour celles de type 2, avec lesquelles, c'est plutôt le traitement à la chaux sur 50 cm de l'arase supérieur de la plate-forme qui a été considéré.

Pour ces deux types de structures, il a ainsi été déterminé les épaisseurs minimales prescrites par le CEBTP pour les différentes composantes du corps de chaussée et qui permettent d'après la simulation avec le calcul ECOROUTE, d'assurer une transmission convenable des contraintes de chargement exercées sur la chaussée.

Pour terminer cette étude, nous avons fait une évaluation financière relative à chacune des solutions techniques retenues afin de pouvoir proposer, après prise en compte de plusieurs considérations, quelle structure routière est la plus adaptée au projet de route BARGNY-DIAMNIADIO.

## TABLE DES MATIERES

Dédicaces .....	p.I
Remerciements.....	p.II
Sommaire .....	p.III
Table des matières.....	p.IV
Liste des tableaux.....	p.V
Liste des figures.....	p.VI

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>p.1</b>
--------------------------	------------

<b>PREMIERE PARTIE : synthèse bibliographique..</b>	<b>p.2</b>
---	------------

<b>Chapitre 1 : Caractéristiques d'une structure routière..</b>	<b>p.2</b>
---	------------

1.1 : Rôle des composantes d'une structure routière.....	p.2
1.1.1 : la couche de revêtement.....	p.2
1.1.2 : la couche de fondation et la couche de base.....	p.3
1.1.3: la couche de forme.....	p.3
1.2 : Eléments de dimensionnement d'une structure routière....	p.5
1.2 .1 : Principes de base de la méthode du C.E.B.T.P.....	p.6
1.2.2 : Directives techniques .....	p.6
1.2 .3 : Epaisseur et constitution des chaussées .....	p.7
1.3 : Dispositions constructives.....	p.10

**Chapitre 2 : Caractéristiques des sols gonflants .....p.11**

2.1 : Minéralogie et gonflement des argiles et des marnes.....p.11

2.2 : Les mouvements d'eau dans les argiles et les marnes.....p.14

2.3 : Caractéristiques des sols de BARGNI DIAMNIADIO.....p16

**Chapitre 3 : Comportement des structures routières sur****sols gonflants .....p.18**

3.1 : Effets du gonflement- retrait .....p.18

3.2 : Procédés de traitement des sols gonflants .....p.20

3.2.1: Traitement aux liants hydrauliques .....p.20

3.2.2: Traitement aux hydrophobants .....p.22

3.2.3: Traitement avec un matériau non argileux .....p.23

3.3 : Utilisation de la géomembrane.....p.23

3.4 : Planches d'essai expérimentales.....p.24

3.4.1 : description des planches .....p.25

3.4.2 : analyse et interprétation des résultats.....p.26

**DEUXIEME PARTIE :ETUDE EXPERIMENTALE****PROJET DE L'autoroute BARGNI -DIANIADIO**

<b>Chapitre 4 : Etudes géotechniques</b> .....	<b>p.30</b>
<b>4 .1 : Sols de plate forme à l'état naturel</b> .....	<b>p.30</b>
<b>4.1.1 : Identification des matériaux</b> .....	<b>p.31</b>
<b>4 .1.1 .1 : Coupe de sondage</b> .....	<b>p.34</b>
<b>4 .1.1 .2 :Essais géotechniques sur</b> <b>matériaux naturels</b> .....	<b>p.34</b>
<b>4 .1.1 .2 .1 : Présentation des résultats</b> .....	<b>p.34</b>
<b>4 .1.1 .2.2 :Analyse des résultats</b> .....	<b>p.35</b>
<b>4.1 .2. :Classification des sols par le système</b> <b>LCPC –SETRA</b> .....	<b>p.37</b>
<b>4 .1 .2 .1 : Présentation des résultats</b> .....	<b>p.39</b>
<b>4 .1 .2.2 :Analyse des résultats</b> .....	<b>p.40</b>
<b>4.2 :Traitement des sols de plate- forme</b> .....	<b>p.42</b>
<b>4 .2.1 :Traitement au ciment</b> .....	<b>p.44</b>
<b>4 .2.2 :Traitement à la chaux</b> .....	<b>p.48</b>
<b>4 .2.3 :Amélioration avec le sable</b> .....	<b>p.49</b>
<b>4. 2.3 : Analyses comparatives et interprétations des</b> <b>résultats</b> .....	<b>p.51</b>

<b>Chapitre 5: Proposition de conception</b> .....	p.55
5 .1 :Types de structures .....	p.55
5 .2 :dimensionnement .....	p.57
5 .3 :dispositions constructives .....	p.70
<b>Chapitre 6 : Analyses économiques</b> .....	p.72
<b>Conclusions et recommandations</b> .....	p.77
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	p.79
<b>ANNEXES</b> .....	p.80

# Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> :Epaisseurs de couche de superstructure proposées par le CEBTP (pour pays tropicaux) .....	p.8
<b>Tableau 2</b> :Spécifications sur les matériaux pour couche de fondation et couche de base dans les pays tropicaux (d'après CEBTP).....	p.9
<b>Tableau 3</b> :Résultats des essais d'identification sur matériaux naturels .....	p.34
<b>Tableau 4</b> : Définition des classes de plate-forme Pfi .....	p.42
<b>Tableau 5</b> :Résultats géotechniques sur le sable argileux noir clair + concrétions calcaireuses traité au ciment.....	p.44
<b>Tableau 6</b> :Résultats géotechniques sur le sable argileux noir foncé traité au ciment.....	p.45
<b>Tableau 7</b> :Résultats géotechniques sur la marne calcaire altérée traitée au ciment.....	p.46
<b>Tableau 8</b> :Résultats géotechniques sur le sable argileux noir clair avec cailloux de calcaire traité au ciment.....	p.47
<b>Tableau 9</b> :Résultats géotechniques du traitement à la chaux.....	p.48
<b>Tableau 10</b> :Résultats géotechniques de l'amélioration avec un sable.....	p.50
<b>Tableau 11</b> :limites admissibles pour sols supports et matériaux naturels non traités.....	p.60
<b>Tableau 12</b> :limites admissibles pour matériaux traités aux liants hydrauliques ...	p.62

<b>Tableau 13</b> :limites admissibles pour matériaux traités aux liants hydrocarbonés.p.63	
<b>Tableau 14</b> :Structures de types 1.....p.64	
<b>Tableau 15</b> :Récapitulatif des Résultats du calcul avec Ecoroute pour ST1, ST2, ST3 .....p.65	
<b>Tableau 16</b> :Récapitulatif des Résultats du calcul avec Ecoroute pour les nouvelles structures de type 1.....p.66	
<b>Tableau 17</b> :Structures de types 2.....p.67	
<b>Tableau 18</b> :Récapitulatif des Résultats du calcul avec Ecoroute pour ST1', ST2', ST3' .....p.68	
<b>Tableau 19</b> :Récapitulatif des Résultats du calcul avec Ecoroute pour les nouvelles structures de type 2 .....p.69	
<b>Tableau 20</b> :Evaluation du coût de la variante 1 (ST33).....p.73	
<b>Tableau 21</b> : Evaluation du coût de la variante 2 (ST33') .....p.74	
<b>Tableau 22</b> : Structure adoptée.....p.76	

# Liste des figures

- Fig.1** : différentes composantes d'une structure routière.....p.5
- Fig.2** : Relation entre la particule d'argile et la molécule d'eau .....p.12
- Fig. 3**: hydratation de  $\text{Na}^+$  .....p.13
- Fig.4**: Courbes caractéristiques de succion-teneur en eau des sables et des argiles .....p.15
- Fig.5** : schéma d'une chaussée sur sols gonflants en fin de saison sèche (après une première saison de pluie).....p.19
- Fig.6** : schéma d'une chaussée sur sols gonflants en début de saison pluvieuse (après la saison sèche).....p.19
- Fig.7** : schéma d'une chaussée sur sols gonflants à la saison sèche (de l'année suivante) .....p.20
- Fig.8** : Planche n°1 témoin .....p.25
- Fig.9** : Planche n°2.....p.25
- Fig.10** : Planche n°3.....p.26
- Fig.11** : Coupe de sondage.....p.32

**Fig .12:** Tableau de classification des sols d'après le LCPC-SETRA .....p.38

**Fig.13 :**Evolution du CBR de l'argile noire foncée en fonction du type  
traitement.....p.53

**Fig.14:** Evolution du CBR de la marne calcaire altérée  
en fonction du type de traitement.....p.54

**Fig.15 :** Axe d'un jumelage .....p.57

## INTRODUCTION

Le SENEGAL, dans sa politique d'ajustement structurel, fait de la construction routière, une de ses principales priorités puisqu'elle constitue, de par son rôle économique et social, un important facteur de développement.

C'est ainsi que sera élaboré en 1991, le programme d'ajustement sectoriel des transports (PAST) qui a permis de reformer l'administration en matière de planification et de programmation des projets routiers.

Par la suite, le deuxième programme sectoriel des transports (PST 2) a été mis en place en 1999, pour venir en appoint au PAST et permettre un développement durable, harmonieux, et cohérent du réseau routier. Il englobe entre autres éléments dans son programme, la construction de l'autoroute DAKAR-THIES.

Pour la réalisation de la tranche BARGNY-DIAMNIADIO de cette autoroute, les études ont montré la présence dans la zone de sols argileux gonflants, qui de par leur instabilité constituent un sérieux danger à la bonne tenue des structures routières.

Cela a conduit à la proposition de procéder soit à la purge du matériau argileux gonflant ou soit à son traitement afin de le rendre suffisamment stable pour pouvoir constituer la plate-forme support d'une chaussée à grand trafic.

**PREMIERE PARTIE :**  
**Synthèse bibliographique**

# Chapitre 1 :

*Caractéristiques d'une structure  
routière.*

## PREMIERE PARTIE : synthèse bibliographique

### *Chapitre 1 : Caractéristiques d'une structure routière :*

#### *1.1 : Rôle des composantes d'une structure routière :*

Une structure routière est constituée d'un certain nombre d'assises superposées qui ont pour rôle essentiel de supporter les charges de trafic et d'assurer leur diffusion selon des niveaux de contraintes supportables par le sol d'infrastructure [4].

Par ailleurs, cette diffusion des contraintes issues du trafic doit se faire de façon parfaitement élastique au niveau des différentes couches composant la superstructure.

En effet, lorsque la contrainte de chargement transmise à travers une couche de chaussée devient supérieure à la charge admissible que celle-ci peut supporter, il s'amorce un processus de dégradation qui conduit inévitablement à la ruine de la structure.

Une structure routière se compose en générale des couches suivantes :

##### *1.1.1 : la couche de revêtement :*

La couche de revêtement doit être conçue de telle sorte qu'elle puisse résister sans déformation ni usure trop rapide aux efforts transmis par les roues des véhicules.

Elle doit assurer un minimum de confort de roulement aux véhicules, une bonne évacuation des eaux de ruissellement de surface. Elle doit également avoir une bonne étanchéité pour préserver les couches inférieures de l'infiltration des eaux superficielles qui pourrait leur être néfaste.

On distingue principalement deux types de revêtements : les revêtements souples ou flexibles, les revêtements rigides. Un revêtement est dit souple lorsqu'il est constitué d'une ou plusieurs couches constituées de produits à base de liants

hydrocarbonés ou d'un tapis plus ou moins épais de béton bitumineux. Il est dit rigide, s'il est plutôt constitué par une dalle en béton hydraulique [4].

### *1.1.2 : la couche de base et la couche de fondation :*

Les couches de base et de fondation constituent essentiellement le support de la superstructure routière.

Ainsi, elles doivent pouvoir supporter convenablement les charges de trafic transmises à travers la couche de revêtement et assurer leur répartition sur le sol support.

Toutefois, la couche de base qui reçoit directement les contraintes transmises par la couche de revêtement, devra être plus résistante que la couche de fondation.

Pour assurer une durabilité de la structure routière soumise dans le temps aux agressions atmosphériques, une attention particulière sera portée sur le choix des matériaux utilisés au niveau de ces différentes couches de la superstructure routière.

En effet, la nature d'un matériau définit plus ou moins le comportement à long terme de celui-ci lorsqu'on le soumet à l'action des agents atmosphériques.

Cette crainte se justifie encore plus lorsqu'on effectue des améliorations par traitement chimique des matériaux. En effet, un matériau peut donner par exemple une bonne performance mécanique juste après traitement alors qu'il sera sujet à une altération trop rapide sous l'effet des agents atmosphériques. Cette altération précipitée, étant à l'origine due à l'apparition éventuelle avec le traitement chimique du matériau, de composantes spécifiques qui sous certaines conditions atmosphériques favorise un processus d'altération conduisant à la ruine de la structure [7].

### *1.1.3: la couche de forme :*

La couche de forme est une structure plus ou moins complexe permettant d'adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place, aux caractéristiques mécaniques, géométriques,

hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception de la chaussée. [3]

La partie supérieure de cette structure d'adaptation constitue la plate-forme support de chaussée.

Selon la nature des sols en place, le climat et l'environnement hydrologique, la couche de forme peut se présenter sous différentes formes. En effet, elle peut être :

-inexistante lorsque les matériaux constituant le sol en place présentent les qualités requises,

-limitée à l'apport d'une seule couche d'un matériau ayant les caractéristiques requises ; ceci est d'ailleurs le concept traditionnel de la couche de forme.

Les critères à prendre en considération pour étudier l'aptitude d'un matériau à être utilisé en couche de forme sans traitement préalable se présentent comme suit :

- **L'insensibilité à l'eau** : En effet, un matériau de couche de forme doit avoir des caractéristiques mécaniques qui restent presque constantes quelque soit son état hydrique ; ceci lorsqu'il est à l'état naturel ou lorsqu'il finit de subir un traitement aux liants hydrauliques ou une élimination de sa fraction argileuse. Ce traitement est un procédé consistant à mélanger le matériau de base avec des liants hydrauliques ou avec des correcteurs granulométriques afin de lui conférer des performances mécaniques meilleures et qui puissent rester durable tout au long de la durée de vie de l'ouvrage.

Suivant la nature et l'état des matériaux, le traitement à préconiser peut être :

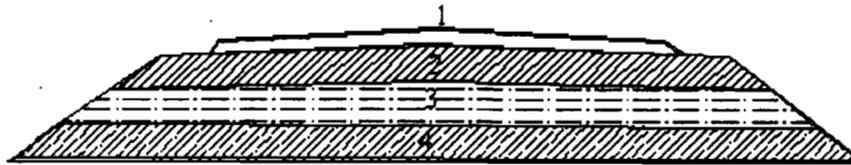
-un traitement aux liants hydrauliques. Ce traitement est principalement adapté aux matériaux peu ou pas argileux. L'adjonction de chaux pourra être retenue selon l'état hydrique,

-un traitement mixte chaux-ciment dans le cas des sols moyennement argileux,

-un traitement à la chaux seule. Ce traitement est plus spécialement adapté aux sols argileux et très argileux,

-un traitement associant liant hydraulique et correcteur granulométrique dans le cas de sols granulaires moues,

- un traitement par apport d'un correcteur granulométrique dans le cas des sols fins.
- **La dimension des plus gros granulats** : elle doit permettre d'assurer un nivellement de la plate-forme dans les tolérances requises.
- **La résistance au trafic de chantier** : un matériau de couche de forme, utilisé sans traitement avec un liant hydraulique, doit être suffisamment résistant à la fragmentation et à l'attrition pour ne pas donner lieu, sous l'effet du compactage et du trafic des engins de chantier, à la formation d'éléments fins en surface qui augmenteraient sa sensibilité à l'eau. Cette résistance peut être appréciée à partir des résultats d'essais mécaniques (Los Angeles, mesure de la friabilité).



**fig.1 : différentes composantes d'une structure routière :**

- 1 - couche de revêtement
- 2- couche de base
- 3- couche de fondation
- 4- couche de plate-forme

### *1.2 : Eléments de dimensionnement d'une structure routière :*

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement des structures routières mais la plupart d'entre elles sont constituées à partir de résultats expérimentaux obtenus dans des conditions climatiques qui diffèrent de celles caractéristiques des

pays tropicaux comme le SENEGAL. Ainsi, l'application directe de ces méthodes dans nos pays n'est pas souvent chose pertinente.

Cependant, le C.E.B.T.P a proposé une méthode pour le dimensionnement des structures routières en zone tropicale.

### 1.2.1 : *Principes de base de la méthode du C.E.B.T.P :*

La méthode proposée s'appuie sur les principes de base suivants [4]:

- Dans le cas des chaussées souples n'admettant aucune couche tant soit peu rigidifiée, la méthode admet que l'indice portant de la plate-forme d'une part et l'intensité du trafic d'autre part, détermine l'épaisseur totale de la chaussée.
- Dans le cas de chaussée comportant une ou plusieurs couches susceptibles, par leur raideur, d'une rupture en traction, le dimensionnement précédent qui vise uniquement à éviter le poinçonnement de la forme, doit être complété par une analyse théorique dont l'objet est de vérifier que les contraintes de traction développées à la base des couches rigidifiées sont compatibles avec les performances probables de ces matériaux.

### 1.2.2 : *Directives techniques :*

En vue de réduire les risques de rupture de nature particulière et assez fréquemment rencontrés, une série de directives techniques relatives au choix ou à la mise en œuvre des matériaux est proposée, notamment [4]:

-un minimum de compacité au niveau supérieur des terrassements et l'élimination sur les trente derniers centimètres (30 cm) de matériaux instables ou gonflants ; ceci en vue de diminuer l'importance des tassements sous trafic ou les déformations dues aux variations dimensionnelles du sol de plate-forme.

-un minimum de compacité et une portance ou stabilité adéquate au niveau des couches de base et de fondation ; ceci pour réduire les risques de rupture par fluage de ces matériaux sous l'effet des contraintes de compression et de cisaillement imposées par le trafic.

-Une dureté satisfaisante des agrégats destinés à constituer les couches de base ou de surface ; ceci permettra de réduire les phénomènes d'attrition ou de fatigue sous trafic.

-Enfin, la réalisation de revêtements minces et déformables en vue de constituer des structures souples, susceptibles de satisfaire aux impératifs économiques en même temps qu'à la nécessité de l'aménagement progressif.

### **1.2 .3 : *Épaisseur et constitution des chaussées :***

Cette méthode de dimensionnement comporte deux tableaux [4]:

- Le tableau n°1 qui donne en fonction du trafic et de la portance de la forme, les épaisseurs totales requises en couche de fondation, de base et de surface.
- Le tableau n°2 qui indique en fonction de l'intensité du trafic, la nature de différents matériaux dont l'utilisation en couche de chaussée peut être envisagée.

CBR (plate-forme)	Trafic cumulé des poids lourds dans les deux sens et correspondant à la durée de vie choisie							
	<sup>5</sup> < 5 . 10		<sup>5</sup> 5 . 10 à 1,5 . 10 <sup>6</sup>		<sup>6</sup> 1,5 . 10 <sup>6</sup> à 4 . 10 <sup>6</sup>		<sup>6</sup> 4 . 10 <sup>6</sup> à 10 <sup>7</sup>	
	fonda- tion (cm)	base (cm)	fonda- tion (cm)	base (cm)	fonda- tion (cm)	base (cm)	fonda- tion (cm)	base (cm)
5-10	20	15	25	15	25	20	30	20
10-15	15	15	20	15	20	20	25	20
15-30	10	15	15	15	15	20	20	20
30-80	0	15	0	15	0	20	0	20
80	0	0	0	0	0	0	0	0
Revêtement	Type 1		Type 2		Type 3		Type 4	

Type 1 : Bicouche, puis ultérieurement Mono couche d'entretien	3 cm de Sand asphalt ou 2,5 cm enrobés denses
Type 2 : Bicouche, puis ultérieurement monocouche d'entretien	3,5 cm de Sand asphalt ou 3 cm enrobés denses
Type 3 : Bicouche, puis ultérieurement 2,5 cm d'enrobés d'entretien	enrobés denses 4 cm
Type 4 : Bicouche, puis ultérieurement 3 cm d'enrobés d'entretien	enrobés denses 5 cm

**Tableau 1 : Epaisseurs de couche de superstructure proposées par le CEBTP (pour pays tropicaux) :**

Trafic cumulé	couche de fondation	couche de base
5. 10 <sup>5</sup> Poids lourds	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sables cohésifs</li> <li>-graveleux latéritiques naturels</li> <li>-sable argileux amélioré in situ granulométriquement</li> <li>-grave sableuse</li> <li>-tout-venant de concassage 0 / 60</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-graveleux latéritiques ou non latéritiques, naturels ou améliorés (au ciment, au concassé ou à la chaux)</li> <li>-sols-chaux, sols-ciment</li> <li>-banco-coquillage amélioré au bitume</li> <li>-tout-venant de concassage 0 / 40</li> </ul>
5. 10 <sup>5</sup> à 1.5. 10 <sup>5</sup> poids lourds	<ul style="list-style-type: none"> <li>-graveleux latéritiques naturels (amélioré au besoin )</li> <li>-sol- bitume</li> <li>-sols-chaux ,sols-ciment</li> <li>-tout-venant de concassage 0 / 60</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-graveleux latéritiques de très bonne qualité amélioré au besoin )</li> <li>-sol bitume (mélangé en centrale)</li> <li>-tout venant de concassage 0 / 40</li> <li>-sols-chaux ,sols-ciment</li> </ul>
1.5. 10 <sup>6</sup> à 4. 10 <sup>6</sup> poids lourds	<ul style="list-style-type: none"> <li>- graveleux latéritiques de bonne qualité (amélioré au besoin)</li> <li>-sol- bitume mélangé en centrale</li> <li>-tout venant de concassage 0 / 60</li> <li>-sols-chaux ,sols-ciment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- graveleux latéritiques d'excellentes qualité (préférentiellement amélioré)</li> <li>-tout venant de concassage 0 / 40</li> <li>-sols fins améliorés en centrale</li> </ul>
4. 10 <sup>6</sup> à 10 <sup>7</sup> poids lourds	<ul style="list-style-type: none"> <li>- graveleux latéritiques d'excellente qualité (de préférence améliorés)</li> <li>-sol bitume (mélangé en centrale)</li> <li>-sols-chaux ou sols-ciment en centrale</li> <li>-tout venant de concassage 0 / 60</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- graveleux latéritiques amélioré en centrale</li> <li>-tout venant de concassage 0 / 40 (de préférence amélioré au ciment et au bitume)</li> <li>-graves bitume ou graves ciment</li> </ul>

**Tableau 2 : Spécifications sur les matériaux pour couche de fondation et couche de base dans les pays tropicaux (d'après le CEBTP)**

### *1.3 : Dispositions constructives :*

La route constitue un ouvrage complexe, de par la diversité des matériaux qui y sont utilisés, que par les méthodes de mise en œuvre appliquées. Ainsi, il est important de prendre en compte un certain nombre de dispositions lors de sa construction.

On doit par exemple veiller à ce qu'il y ait une progression convenable de la rigidité des couches du corps de chaussée; cela constitue une précaution particulière à prendre pour éviter les effets de dalles.

Lorsque le sol de plate-forme comporte des sols gonflants ou s'il y a présence de remontées capillaires, il est recommandé de mettre en place une sous-couche drainante ou anti-contaminant[4]. Le rôle de cette sous-couche serait de permettre le drainage des eaux s'infiltrant soit aux travers de la chaussée (eaux de ruissellement), soit à partir du sol de plate-forme (remontées capillaires) afin qu'elles n'atteignent pas la superstructure. De ce fait, le matériau constitutif doit présenter des caractéristiques géotechniques adéquates.

Aussi, lorsque le sol de plate-forme est constitué par des matériaux réputés être très mauvais (sols gonflant, sols trop fins argileux), cette sous-couche constituée souvent en matériaux sableux devra également permettre d'éviter la contamination de la superstructure.

## Chapitre 2 :

*Caractéristiques des sols gonflants .*

## Chapitre 2 : Caractéristiques des sols gonflants :

Les sols argileux gonflants occupent de larges étendus dans le monde et constituent environ 10 % des sols africains. Ils sont beaucoup plus abondants en régions tropicales. Cette abondance n'est toutefois pas le fruit du hasard. En effet, la genèse de ces argiles réside souvent dans **l'altération des roches basiques sous des conditions climatiques alternant saison sèche, saison humide ou dans des conditions de dépôt particulières**[1].

Ces sols sont à l'origine de beaucoup de désordres observés dans les structures routières. Il faut noter qu'ils sont plus préoccupants au niveau des régions où le climat présente des alternances saisonnières très contrastées comme c'est le cas dans les zones tropicales telles que le Sénégal, le Cameroun où le climat favorise de fortes variations de teneur en eau dans les sols[1]. En effet, ces climats se caractérisent principalement par deux grandes saisons : humide et sèche. Ainsi durant la saison pluvieuse, les sols accumulent d'importantes quantités d'eau qui, par la suite s'évapore progressivement durant saison sèche. A cela s'ajoute que dans les régions comme le Sénégal, la saison humide se caractérise par des pluies souvent espacées ; cela entraîne qu'il se produit d'importantes variations de teneur en eau dans ces sols durant l'intervalle de deux pluies successives.

Dans le cas donc des sols gonflants qui se caractérisent par une augmentation considérable de leur volume en présence d'eau et d'un retrait à la suite de l'évaporation de cette eau, les phénomènes de variation de l'état hydrique du milieu environnant s'avèrent être très préoccupants. En effet, les constructions sur ces types de sols sont soumises à des mouvements entraînant des désordres structurels lorsque celles-ci n'ont pas été dimensionnées en conséquence ; ce qui réduit ainsi considérablement leur durée de vie.

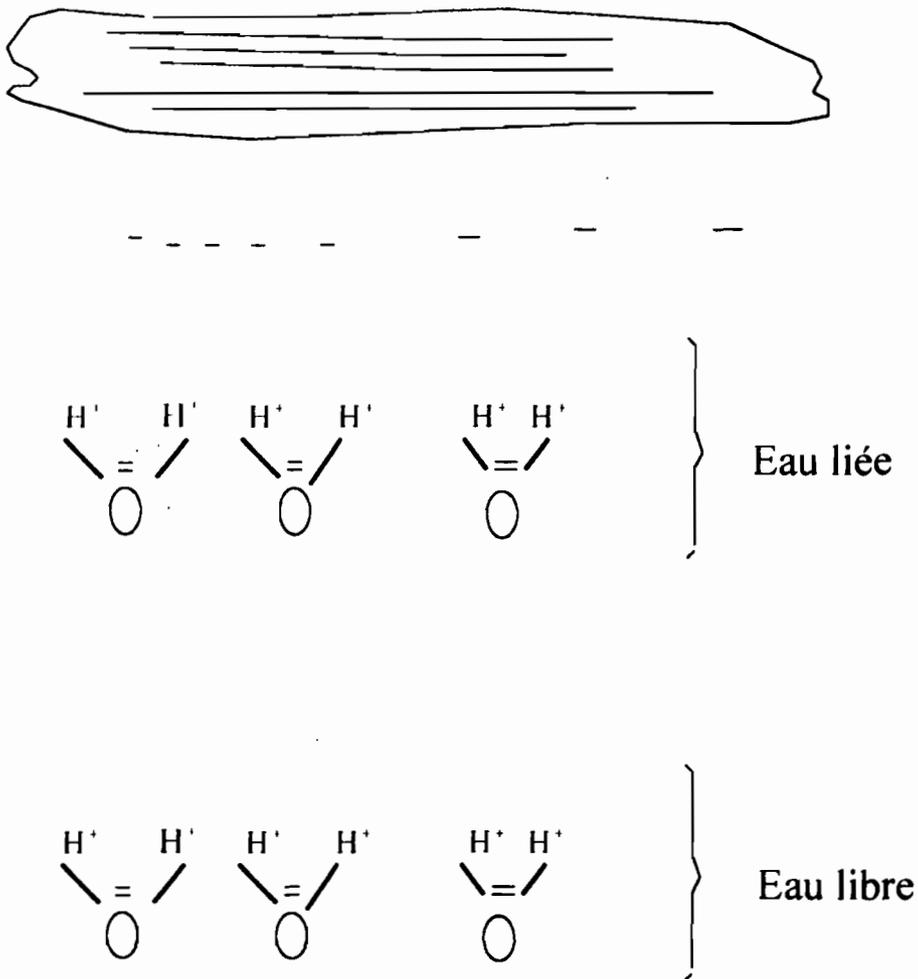
### *2.1 : Minéralogie et gonflement des argiles et des marnes :*

Les argiles sont des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés, micro cristallin à structure en feuillet (phyllosilicates ). Les silicates sont composés d'un assemblage de tétraèdres et d'octaèdres formant des feuillets. C'est de la disposition

de ces feuillets que découleront leurs propriétés. Ainsi, la relation entre la particule d'argile et la molécule d'eau est très complexe.

Schématiquement, les faces négatives des particules attirent les molécules d'eau par leurs extrémités positives : il en résulte une première couche d'eau liée. Plus on s'éloigne de la particule argileuse, moins les molécules d'eau seront orientées et on aura donc de l'eau libre.

Les marnes sont des mélanges d'argile et de calcaire. Suivant la proportion de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), qu'elles contiennent, on parlera de marne argileuse (de 5% à 35% de carbonate de calcium), de marnes (35% à 65%), de calcaires marneux (65% à 95%).



**Fig.2 : Relation entre la particule d'argile et la molécule d'eau**

L'expérience a montré que, ce sont les argiles dont la structure fait intervenir les cations saturateurs de type,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$  qui sont souvent les plus susceptibles au gonflement.

En effet, en milieu hydraté ces cations s'entourent de dipôles d'eau, il en résulte une augmentation de l'espace inter foliaire.

Cela correspond à une augmentation de volume du matériau ou en d'autre terme un gonflement.

Du point de vu chimique, cet agrandissement de l'espace inter foliaire s'explique par l'augmentation très considérable du rayon ionique des cations saturateurs lorsqu'ils sont hydratés par les molécules d'eau. Cependant, chacun de ces cations se caractérise par son rayon ionique avant hydratation. Par exemple, ceux de type  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Na}^+$  ont les plus grands rayons ioniques.

Ainsi, en fonction de leur composition cationique, les argiles seront plus ou moins gonflantes. [1]

On distingue par ordre décroissant de gonflement, les montmorillonites sodiques puis les montmorillonites calciques, les illites et enfin les halloysites qui ne sont rien d'autre que des kaolinites hydratées. Toutefois, les paramètres de gonflement d'un sol ne sont quantifiables qu'à l'échelle de l'éprouvette de sols. Pour cela, plusieurs types d'essais sont possibles mais leur représentativité du comportement du sol après mise en place est quelquefois discutable.

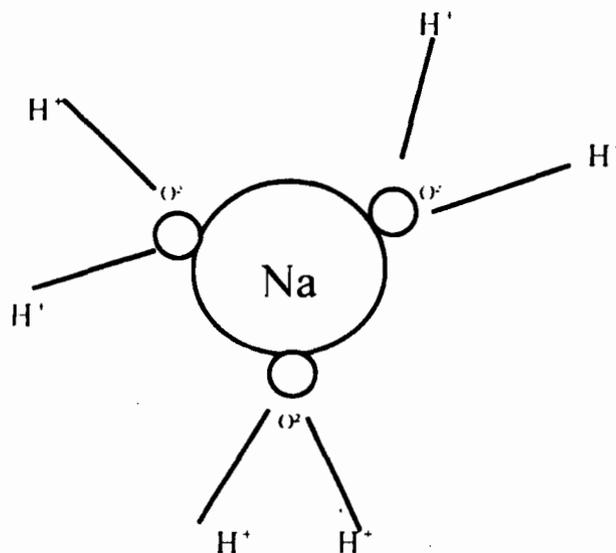


Fig. 3: hydratation de  $\text{Na}^+$ .

## 2.2 : Les mouvements d'eau dans les argiles et les marnes:

Il est important d'étudier ces mouvements parce qu'ils définissent les limites naturelles du sol argileux qui sont sujettes aux phénomènes d'imbibition et d'assèchements successifs.

Aussi, les conditions hydrologiques, hydrogéologiques et topographiques du milieu influent sur les mouvements d'eau dans les argiles. Ainsi dans la phase étude technique des projets de route dans des zones présentant des formations argileuses susceptibles au gonflement, il est impératif de connaître la position de la nappe, de même que les différentes fluctuations de celle-ci au cours des saisons. On doit également connaître l'intensité moyenne des eaux de pluie ainsi que la nature de leur l'écoulement en surface. Ceci permet d'être édifier sur les risques d'érosion de la route après sa mise en place ainsi que sur la quantité d'eau susceptible de s'infiltrer par les talus et les accotements ou même la chaussée lorsque celle-ci n'est pas bien imperméabilisée. Il faut noter que l'infiltration des eaux dans les sols argileux peut également être d'origine interne. En effet, elle peut provenir aussi des remontées capillaires à partir d'une nappe à faible profondeur par rapport au niveau des terrassements.

A l'intérieur du sol saturé ou non, l'écoulement de l'eau se fait suivant la loi de DARCY.

$$V = k (\times) \text{grad } \Phi$$

Avec  $v$  = vitesse d'écoulement

$K$  = perméabilité non saturée, dépendant de la teneur en eau

$\Phi$  = Potentiel ou charge hydraulique

$$\Phi = \Phi(P / \gamma_w) \pm Z = \Psi \pm Z$$

$P$  = pression de l'eau

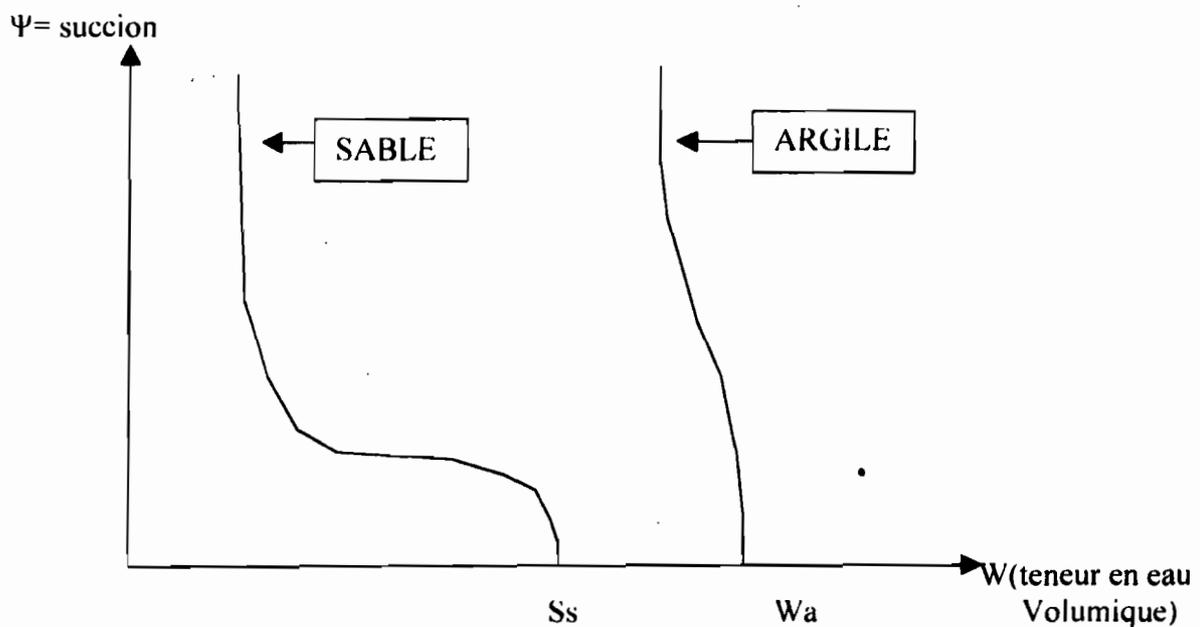
$\Psi$  = succion

$\gamma_w$  = densité de l'eau

$Z$  = cote par rapport à un référentiel

Il faut noter que dans cette écriture du potentiel, on ne tient compte que de la gravité, on néglige les potentiels osmiques et thermiques.

Les sols argileux se caractérisent par une forte capacité de rétention en eau. Cela peut être illustré à travers la courbe caractéristique de leur succion par rapport à celle caractéristique des sables.



**Fig.4: Courbes caractéristiques de succion-teneur en eau des sables et des argiles :**

La courbe de succion représente la teneur en eau d'équilibre au-dessus d'une nappe. Contrairement au sable, elle se caractérise au niveau des argiles par une forme très raide, ce qui traduit le caractère peu drainant de ces matériaux.

Cette courbe présente des teneurs en eau bien supérieures à celle d'un sable.

En conséquence, l'eau libre qui participe à l'écoulement ne représente qu'une infime fraction de l'eau contenue dans une argile. [1]

### *2.3 Caractéristiques des sols de BARGNI- DIAMNIADIO :*

Les sols présents au niveau de cette zone sont issus d'un processus de formation qui diffère de celui de la plupart des sols gonflants que l'on peut rencontrer à l'intérieur du continent.

En effet, une étude géologique réalisée par le laboratoire de géologie de la faculté des sciences de DAKAR a révélé que la zone de BARGNI- DIAMNIADIO fait partie d'un grand ensemble surnommé « le PLATEAU DE BARGNI [9]».

Cet ensemble se trouve dans la zone délimitée par les méridiens  $17^{\circ} 10' 00''$  -  $17^{\circ} 15' 00''$  Ouest et les parallèles  $14^{\circ} 40' 00''$ -  $14^{\circ} 45' 00''$  Nord. Le PLATEAU DE BARGNI forme un plan incliné vers le Sud, où il se termine par un talus d'une dizaine de mètres de dénivellation, érodé par les rivières et les avancées de la mer. Ce talus délimite des zones basses, plates dans les qu'elles se déversent les eaux de ruissellement à la saison des pluies.

Ces zones s'assèchent progressivement en cours d'année donnant des terrains plats argileux, salés, appelés « **tan** ». Ces tans sont séparés de la mer par un cordon littoral sableux par-dessus lequel la mer peut se déverser, les envahir pour former des lagunes. Ces lagunes une fois asséchées redonneront des « **tan** » [9].

Notons que cette région se caractérisait par une présence importante de marne feuilletée à attapulgite qui au fur du temps et en période humide, s'est transformé progressivement en un matériau d'abord à grumeleux, granuleux, poreux, puis friable. Ce type de transformation s'accompagne souvent d'une individualisation de la montmorillonite avec la calcite d'où le caractère gonflant des sols rencontrés dans cette zone. Au niveau des pentes c'est à dire en milieu drainé, il s'est développé des sols souvent caillouteux, très riche en **Ca** et **Mg** [9].

L'étude hydrologique effectuée dans le même cadre a montré la présence dans cette région d'un réseau hydrographique extrêmement dense et ramifié avec plusieurs marigots qui vont jusqu'à la mer. C'est donc le cas typique d'un ruissellement sur terrain imperméable.

*Chapitre 3 :*  
*Comportement des structures routières*  
*sur sols gonflants.*

## *Chapitre 3 : Comportement des structures routières sur sols gonflants:*

### *3.1 : Effets du gonflement- retrait :*

Il a été constaté que les évaporations de l'eau contenue dans le sol d'assise gonflant sont beaucoup plus importantes au niveau des pieds ou bords de talus et des accotements qu'au niveau de la partie centrale de la chaussée[1].

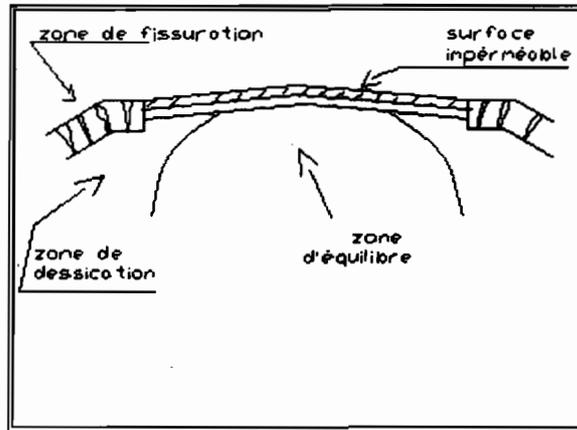
En effet, le revêtement constitue un obstacle à l'évaporation de cette eau et cela entraîne que le sol support dans l'axe de la chaussée ne subit que de très faibles variations de teneurs en eau alors que latéralement les fluctuations sont d'amplitude beaucoup plus fortes.

Devant cette situation, des processus différentiels de gonflement entre l'axe central et les accotements sont inévitables et des désordres prévisibles.

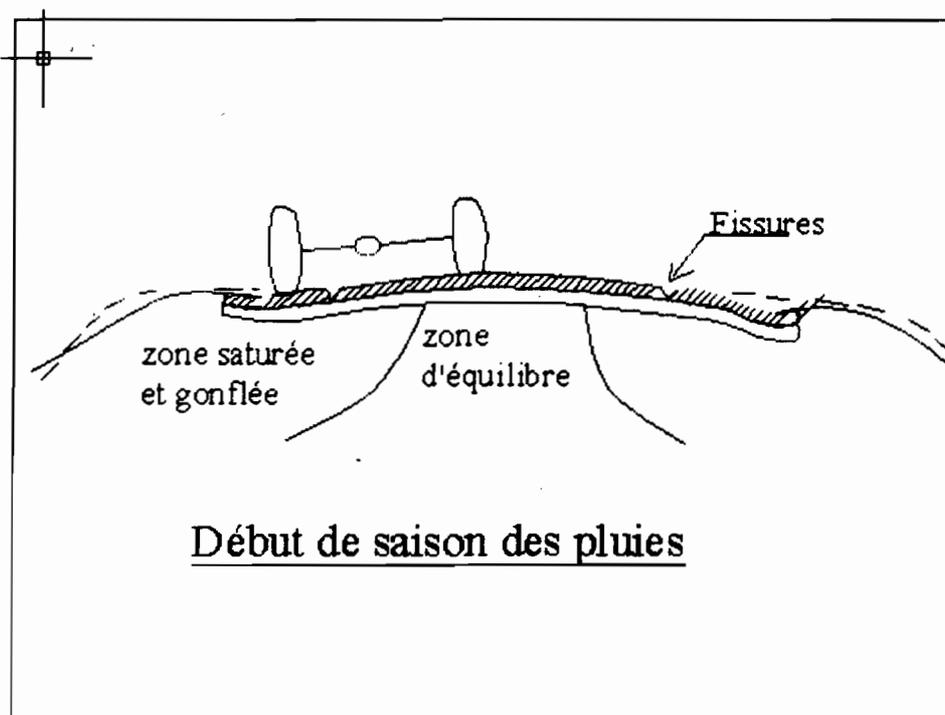
Ces désordres commencent souvent à se manifester par des fissurations longitudinales et des orniérages qui s'accroissent vers le bord de chaussée et qui correspondent à un étirement latéral du corps de chaussée, depuis l'axe vers les accotements.

Maintenant, sous l'effet du trafic, ces fissurations vont se généraliser sur l'ensemble de la chaussée. En effet, les premières fissurations qui s'observent sur le bord de chaussée vont constituer des voies d'infiltration de l'eau de pluie. Il s'ensuit une réduction progressive de la zone d'équilibre. En période de sécheresse, les retraits latéraux font que les butées latérales se dérobent gravement bien que le terrain durcisse et lorsque arrive la saison pluvieuse, ces mêmes bandes s'abreuvent d'eau et perdent de leur portance par ramollissement[1].

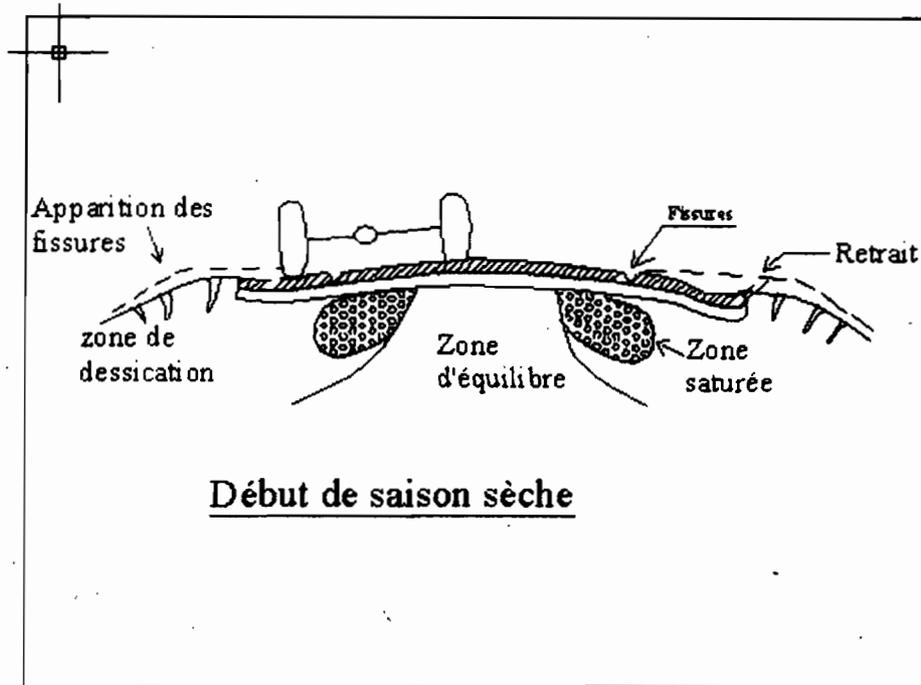
Ainsi, par le phénomène de retrait-gonflement qui se propage de plus en plus vers l'axe de la chaussée, la dégradation finit par affecter l'ensemble de la chaussée sous l'effet du trafic des poids lourds. Il faut toutefois noter que, les chaussées construites sur sols gonflants sont beaucoup plus fragiles durant les saisons humides. Par conséquent, une réglementation de la circulation routière qui mettrait hors d'usage ces types de chaussées durant les saisons pluvieuses pourrait allonger considérablement la durée de vie de celles-ci.



**fig.5 : schéma d'une chaussée sur sols gonflants en fin de saison sèche (après une première saison de pluie) [1]**



**fig.6 : schéma d'une chaussée sur sols gonflants en début de saison pluvieuse (après la saison sèche) [1]**



**fig.7 : schéma d'une chaussée sur sols gonflants à la saison sèche (de l'année suivante) [1]**

### *3.2 : Procédés de traitement des sols gonflants :*

Il existe différents types de traitement des marnes et argiles gonflantes. Ces traitements, de manière générale, permettent de lier et de cémenter les particules entre elles, afin d'augmenter la résistance du matériau et de réduire sa sensibilité à l'eau.

#### *3.2.1 : Traitement aux liants hydrauliques :*

Les liants hydrauliques sont des produits d'origine minérale qui par réaction avec l'eau donnent des réseaux cristallins enchevêtrés ayant une bonne cohésion et pouvant aboutir à des jonctions avec le squelette minéral (contrairement aux produits de type colle qui eux ne peuvent qu'adhérer au squelette minéral) [1].

Ils sont tous à base de chaux qui au contact de l'argile réagit par échange cationique, par floculation et agglomération, par carbonatation et par réaction pouzzolanique.

Ces réactions vont se traduire dans le temps par :

- une amélioration immédiate des propriétés mécaniques et de la sensibilité à l'eau par floculation et échange cationique et donc une réduction considérable du phénomène de gonflement ;
- une réaction lente produisant les matériaux cimentant, c'est la réaction pouzzolanique. Elle se produit entre la chaux et les minéraux argileux présents dans le sol. Le principe de l'action pouzzolanique repose sur la possibilité en milieu pH élevé (supérieur à 12), de mise en solution de la silice, de l'alumine et des oxydes de fer présents dans les minéraux argileux sous des formes cristallisées plus ou moins altérées. Ces éléments en solution réagissent ensuite avec la chaux pour former des ferro-silico-aluminates de chaux insolubles qui précipitent et cristallisent en présence d'eau.

Il existe deux types de chaux : la chaux vive et la chaux éteinte.

L'expérience a montré qu'il est préférable d'utiliser la chaux vive pour traiter un matériau lorsque le passant au tamis 80µm est supérieure à 90%.

De manière générale, l'adjonction de chaux se traduit par les phénomènes suivants :

- Augmentation de la limite de liquidité,
- Augmentation encore plus rapide de la limite de plasticité, d'où cependant diminution de l'indice de plasticité,
- Augmentation de la densité maximale Proctor.
- Augmentation de la teneur en eau optimale de compactage (la courbe Proctor s'aplatit). [2]

Par ailleurs, il faudra noter que la chaux vive est encore plus particulièrement recommandée pour le traitement des sols argileux instables situés dans des zones à très forte teneur en eau. En effet, elle s'hydrate lorsqu'elle est mélangée à un sol humide et il se produit alors la réaction exothermique qui participe à abaisser la teneur en eau :



Il faudra noter que ce type de traitement va dépendre de la nature du sol, des types de chaux ou de ciment disponibles ainsi que des conditions de traitement.

L'utilisation du traitement à la chaux dans les pays tropicaux n'est pas chose aisée car en effet, il faudrait pouvoir disposer d'une chaux d'excellente qualité. De plus la mise en œuvre de la chaux, et plus particulièrement de la chaux vive, est dangereuse pour le personnel. Enfin, l'action à long terme de la chaux est mal connue car il semblerait qu'il se produise, sous certaines conditions climatiques, une migration de la chaux vers le haut de la couche de structure traitée .[4]

### *3.2.2: Traitement aux hydrophobants:*

Les caractéristiques des hydrophobants sont d'empêcher les variations de teneur en eau dans le sol. En effet, ils rendent le sol insensible à l'eau quelque soit le degré d'imbibition.

La teneur en eau imposée par l'hydrophobant est choisie légèrement inférieure ou égale à celle de l'optimum proctor de manière à assurer une portance maximale.

L'absorption d'un hydrophobant se traduit particulièrement par deux effets :

- diminution momentanée ou définitive de l'affinité du sol pour l'eau; d'où un important accroissement de la résistance mécanique du sol et une réduction des gonflements ;

- modification de la structure microscopique du sol.

Il faudra toutefois signaler que, parmi les produits hydrophobants, les dérivés aminés donnant des composés cationiques (ex : amines aromatiques ou aliphatiques ) sont les plus efficaces pour réduire la sensibilité à l'eau des argiles.

Donc, par leurs caractéristiques, les produits hydrophobants peuvent être très efficaces pour le traitement des sols de plate forme constitués essentiellement par des matériaux sensibles à l'eau. Cependant, leur utilisation n'est pas encore bien maîtrisée. [1]

### *3.2.3 : Traitement avec un matériau non argileux (sable) :*

Il s'agit de mélanger le matériau argileux gonflant avec un autre d'argilosité presque nulle afin de ramener son degré de gonflement à un niveau acceptable qui le rendrait apte à être utilisé comme sol de plate forme de structure routière.

Ce procédé présente d'autres avantages. En effet, l'adjonction d'un matériau non argileux peut permettre d'améliorer la résistance du matériau naturel instable. Ce type de traitement favorise d'avantage l'utilisation des matériaux locaux parce que le matériau traitant non argileux pourrait être constituée essentiellement par du sable trouvé sur place.

Toutefois, il est nécessaire d'effectuer des études géotechniques sérieuses avant de juger de l'aptitude ou non d'un matériau traitant à être utilisé car en dehors du critère de non argilosité à vérifier, il faut que matériau traitant soit compatible au sol gonflant à traiter.

En effet, le contact entre deux matériaux de nature différente peut donner naissance à des réactions chimiques qui pourrait même à long terme accroître la sensibilité à l'eau du sol.

### *3.3 : Utilisation de la géomembrane :*

Elle est utilisée souvent pour recouvrir le matériau argileux gonflant du sol de plate forme afin de le protéger des infiltrations d'eau superficielle. Donc son utilisation ne se justifie plus dans le cas où le terrain serait sujet à des remontées capillaires.

Toutefois, une attention particulière devra être portée à sa mise en place. Ainsi, elle doit être ancrée jusqu'au-delà des accotements.

Pour protéger la géomembrane des éléments tranchants, on préconise de mettre un petit lit de sable avant et après la pose.

Par ailleurs, l'utilisation de la géomembrane ne pourrait être efficace que si les conditions topographiques aux abords de la chaussée et les infrastructures d'évacuation des eaux de ruissellement sont telles qu'il ne se produise pas de stagnation importante d'eau au bord de l'emprise. En effet, l'eau stagnante à ces abords pourrait s'infiltrer dans le sol de plate forme et ceci quelle que soit la profondeur et l'étendu de l'ancrage de la géomembrane.

### *3.4 : Planches d'essai expérimentales :*

Dans cette partie, nous allons faire référence aux résultats obtenus avec le programme expérimental qui a été réalisé au CAMEROUN par le CEBTP ( Centre d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics), le LCPC ( Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et le SETRA (Service d'Etudes des Routes et Autoroutes). En effet, c'est un programme de recherche qui a été consacré aux sols argileux instables présents dans les pays tropicaux. C'est ainsi, que ce vaste programme expérimental avait été mis au point en 1990 pour étudier l'utilisation en couche de forme pour la construction routière des matériaux argileux instables présents dans le nord du CAMEROUN et qui avaient été la cause de nombreux désordres sur la route nationale NORD de ce pays.

Il faut dire que cette étude présente une bonne fiabilité au regard des procédés expérimentaux qui y ont été utilisés. En effet, elle s'est effectuée à travers trois planches d'essai expérimentales de 70 mètres de longueur chacune et qui ont été suivies pendant une période de 4 ans. Il faut dire que l'exécution de planches d'essais constitue la méthode la plus appropriée de mise à l'épreuve d'une technique routière.

### 3.4.1 : description des planches [1] :

On avait :

- Une **planche n°1 témoin** constituée par le matériau gonflant en remblai comme couche de forme, avec au-dessus une couche de fondation de 30 cm de sable et une couche de base en 0-40 de 30 cm également ;

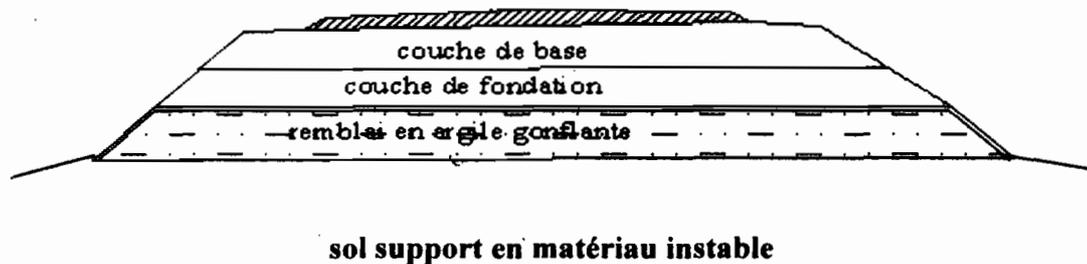
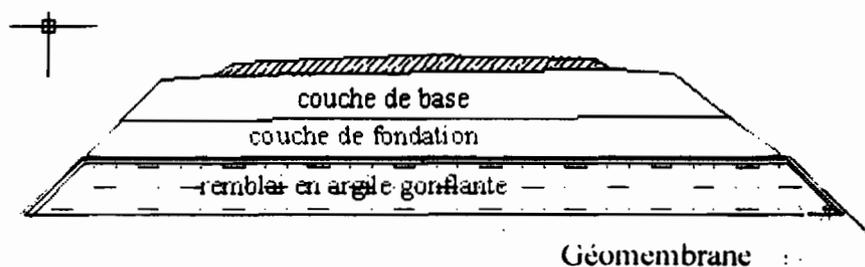


fig.8 : Planche n°1 témoin :

- Une **planche n°2** similaire mais cette fois-ci avec une géomembrane étanche mise en œuvre entre le matériau gonflant et le sable. Celle-ci est ancrée latéralement dans le terrain naturel. Le rôle de la géomembrane est essentiellement d'arrêter les infiltrations superficielles d'eau afin qu'elles ne puissent atteindre le matériau gonflant très sensible à l'eau ;



Sol support en matériau instable

fig.9 : Planche n°2

- Enfin, une **planche n°3** avec un remblai en argile sableuse ancrée latéralement dans le sol support, une couche de fondation en sable blanc de 60 cm d'épaisseur et une couche de base en 0-40 de 30 cm.

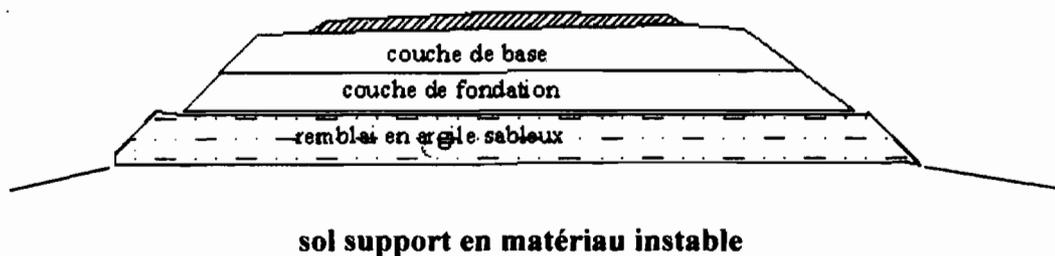


fig.10 : Planche n°3

### 3.4.2 : analyse et interprétation des résultats [1] :

En première analyse, il a été souligné l'exceptionnelle stabilité au gonflement de la planche n°2 qui a été imperméabilisée avec un géomembrane. En effet, l'amplitude des mouvements qui y ont été observés est très faible voir insignifiante.

Cela veut dire que le terrain naturel en dessous de la planche d'essai est resté stable, ceci s'explique aisément par l'encastrement du film dans le terrain naturel de part et d'autre du remblai.

Pendant cette même période, les tassomètres des planches n°1 et n°3 traduisent des phénomènes de tassement ou de gonflement assez importants.

L'examen détaillé des résultats obtenus avec ces derniers, a montré que seuls les tassomètres à 0,6-0,9m de profondeurs sont sujets à de forts mouvements, les tassomètres à 2m et 3m étant presque stables. Ceci s'explique par le fait qu'à grande profondeur les fluctuations de teneur en eau sont faibles voir inexistantes. Ainsi, seule la partie superficielle qui est facilement atteinte par la chaleur issue du rayonnement solaire, subit des fluctuations importantes de teneur en eau et sera donc par conséquent sujette à des phénomènes de gonflement et de retrait.

L'analyse des mesures de teneur en eau obtenues permet d'affirmer que les eaux météoriques pénètrent dans les planches expérimentales : la bicouche utilisée comme revêtement n'est donc pas imperméable.

Durant les saisons pluvieuses, il a été constaté que :

Sur la planche témoin n°1, il est flagrant que le front d'infiltration ne pénètre que superficiellement dans le remblai en matériau gonflant après avoir réhumidifier la structure de chaussée. Donc, on peut en déduire qu'apparemment la perméabilité et le gonflement bloque le processus d'infiltration ;

Sur la planche 2, le front d'infiltration se bloque sur la feuille de géomembrane. Donc le film protège bien le matériau instable de l'infiltration des eaux superficielles ;

Sur la planche n°3, le front d'infiltration alimente, outre la structure de chaussée, l'ensemble du remblai constitué en argile sableux avant d'atteindre le sol support constitué par le matériau instable. C'est ainsi qu'il a été enregistré sur cette planche les plus grandes amplitudes de mouvements (4cm) alors qu'au niveau de la planche témoin n°1 où le processus d'infiltration se bloque en sommet du remblai, le gonflement maximum est de deux centimètres.

En outre, le processus de drainage qui suit l'humidification s'est surtout manifestée au niveau des structures de chaussée et très peu au niveau des accotements. Cela pourrait s'expliquer aisément par le fait qu'au niveau de la partie centrale, le profil topographique de la section transversale favorise le drainage des structures de chaussée par les couches de sable sous-jacentes. L'eau issue de ce drainage de la partie centrale s'accumule au niveau des accotements qui eux sont directement en contact avec le matériau instable qui devient peu perméable une fois imbibé. Par conséquent, il se produit une accumulation d'eau au niveau de ces accotements entraînant un abaissement localisé de la résistance de la structure. Ainsi, sous l'agression du trafic, il se produit une dégradation prématurée des accotements qui deviennent par la suite des lieux privilégiés d'infiltration des eaux superficielles. Et, si l'on ne procède pas à un entretien rapide, il se produit une dégradation prématurée

des accotements et qui va se propager progressivement vers l'axe central de la chaussée.

L'importance du gonflement observé dans la planche n° 3 se justifie par la présence au-dessus du matériau instable, de couche en matériau sableux très perméable et qui constituent des zones d'accumulation de l'eau issue de l'infiltration superficielle (si le drainage n'est pas bien exécuté : les remblais sableux ne sont pas prolongés au-delà des accotements).

Par conséquent, sous l'effet du temps, cette eau s'infiltrant à vitesse très lente à cause de la faible perméabilité du matériau argileux ou marneux, finit par imbiber une épaisseur très importante de cette couche; ce qui explique le gonflement très important noté au niveau de la planche n° 3.

DEUXIEME PARTIE :  
ETUDE EXPERIMENTALE  
*PROJET DE L'autoroute*  
*BARGNY -DIAMNIADIO*

## DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

### **PROJET DE L'autoroute BARGNY -DIAMNIADIO**

Dans cette seconde partie du projet, il est envisagé d'effectuer une étude des sols présents dans la zone de BARGNY –DIAMNIADIO en vue de connaître leur aptitude ou non à être utilisés comme sol de plate-forme et d'analyser les résultats obtenus après différents types de traitements effectués sur ces matériaux, si toutefois cela s'avérait nécessaire.

Il faut dire que ce projet de fin d'études coïncide avec la construction de l'autoroute devant traverser cette zone, qui est réputée être à problème.

En effet, il a été constaté une dégradation prématurée de l'ancienne chaussée qui suivait le même itinéraire.

Ainsi, l'étude comportera les étapes suivantes :

- *Etude géologique, hydrologique et hydro géologique du milieu*
- *Etude des sols de plate forme à l'état naturel*
- *Traitement au ciment des sols de plate-forme*
- *Traitement à la chaux des sols de plate-forme*
- *Amélioration avec un sable*
- *Proposition de conception de structures*
- *Analyses économiques*

# Chapitre 4 :

*Etudes géotechniques .*

## Chapitre 4 : Etudes géotechniques

Les méthodes géotechniques restent encore aujourd'hui les plus utilisées pour la caractérisation des sols. Ainsi, elles ont été utilisées pour étudier les sols présents dans la zone BARGNY-DIAMNIADIO. Toutefois une attention particulière sera portée sur l'interprétation des résultats obtenus.

### *4.1 : Sols de plate forme à l'état naturel :*

L'étude de la carte géologique de RUFISQUE-BARGNY-DIAMNIADIO a révélé la présence dans cette zone de formations appelées « tan » et dont les mauvaises caractéristiques sont suspectées être la cause principale de la dégradation prématurée dont a fait l'objet l'ancienne route qui suivait le même itinéraire.

Ainsi, il a été procédé à une identification des sols présents dans cette zone, particulièrement le long de l'emprise du projet.

### *4.1.1 : Identification des matériaux :*

Il a été effectué une série d'essais d'identification des caractéristiques géotechniques sur les différents matériaux rencontrés dans la zone.

Ces essais ont porté sur :

- l'analyse granulométrique ,
- l'essai Proctor ,
- les limites d'Atterberg,
- la détermination du VBS
- l'essai CBR ,
- la mesure du gonflement libre.

#### 4.1.1.1 : Coupe de sondage :

Plusieurs sondages ont été effectués sur l'emprise de la route BARGNI-DIAMNIADIO .

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux suivants [5]:

Pk: 5,5

h(cm)	e (cm)	coupe	désignation	w %
0	100		Sable argileux noir clair avec concrétions calcaires	10,9
100				

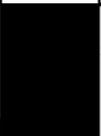
Pk: 5

h(cm)	e (cm)	coupe	désignation	w %
0	70		Sable argileux noir foncé	11,4
70				
	30		sable argileux noir clair avec cailloux de calcaire	12,8
100				

Pk: 3,5

h(cm)	e (cm)	coupe	désignation	w %
0 75 100	75		Sable argileux noir clair avec concrétions calcaires	14,1
	25		sable argileux noir clair avec concrétions calcaires et cailloux de calcaires	18

Pk: 2,5

h(cm)	e (cm)	coupe	désignation	w %
0 50 100	50		Sable argileux noir foncé	20,5
	50		sable argileux beige avec concrétions calcaires	24,3

Pk: 1

h(cm)	e (cm)	coupe	désignation	w %
0 100	100		marne calcaire altérée	21,4

fig.11 : Coupe de sondage

Les sondages effectués révèlent la présence en général de quatre types de matériaux . Il s'agit essentiellement :

- **d'un sable argileux noir clair avec des concrétions de calcaire (sol I ),**
- **d'un sable argileux noir foncé ( sol II ),**
- **d'une marne calcaire altérée ( sol III ),**
- **d'un sable argileux noir clair avec des cailloux de calcaire ( sol VI ).**

Notons que, le sable argileux beige avec des concrétions de calcaires est présent au niveau de quelques portions mais avec des quantités assez faibles.

Ainsi, les études géotechniques vont porter sur les quatre principaux types de matériaux cités précédemment.

## 4.1.1.2 : Essais géotechniques sur matériaux naturels :

## 4.1.1.2.1 : Présentation des résultats :

Nature du sol		sol I	sol II	sol III	sol IV
LIMITES D'ATTERBERG	$W_L$	58	43	112	38
	$W_p$	30	20	47	18
	$I_p$	28	23	65	20
ESSAI PROCTOR	$W_{opt}$	13,7	13	22,2	9
	$\gamma_{dmax}$	1,842	1,750	1,615	2
	$\gamma_{II}$	2,094	1,978	1,974	2,182
CBR immédiat		13	15	14	17
CBR (après 96 heures d'imbibition)		3	3	2	4
Teneur en eau	avant CBR	12,8	12,0	22,6	8,5
	après CBR	20,7	21,2	37,9	15,7
% < 0.080 mm		57	56	67	45
Gonflement libre (%) (après 96 heures d'imbibition)		2,23	4,34	9,61	3,43
VBS		5	4,5	5,3	3,1

Tableau 3 : Résultats des essais d'identification sur matériaux naturels :

#### 4.1.1.2.2 : Analyse des résultats :

**L'essai CBR** : Il caractérise la portance ou la résistance au poinçonnement du sol. D'après les règles de classement des sols (en  $S_k$ ) [7] en fonction de leur portance, il est recommandé d'avoir au minimum un sol de classe  $S_3$  ( $CBR > 10$ ). On estime en effet que, la portance d'un sol de classe  $S_1$  ( $CBR < 5$ ) qui est quasiment nulle, ne permet la construction d'une chaussée à caractère d'autoroute [3].

Cela voudrait dire qu'aucun des sols prélevés dans les différents sondages n'est apte à constituer un bon sol de plate-forme pour le tronçon de route qui fait l'objet de cette présente étude. En effet, ces sols ont des CBR après 96 heures d'imbibition qui sont tous inférieurs à 5.

Dés lors, pour améliorer le CBR, on ne peut faire recours que soient à des opérations de terrassement telles que la purge suivie de l'apport de matériaux de qualité meilleure, ou soit au traitement de l'arase supérieur de la plate-forme.

**Le gonflement** : les valeurs de gonflement libre obtenues avec les différents matériaux sont assez inquiétantes. En effet, elles dépassent la valeur maximale tolérée qui est de 1% pour les matériaux de sol de plate-forme. Cela signifie que même si ces sols avaient des portances acceptables, on ne pourrait les utiliser sans traitement préalable pour constituer la plate-forme en raison de leur fort taux de gonflement.

**L'indice de plasticité** : il reste le caractère le plus couramment utilisé pour la caractérisation de l'argilosité des sols. Il présente quelques avantages par rapport au VBS dans le cas des sols moyennement à très argileux. En effet, c'est un paramètre pour lequel on dispose une longue expérience dans l'interprétation et dont la valeur permet de définir en réalité l'intervalle de teneur en eau dans lequel, le sol reste souple et déformable tout en conservant une certaine résistance au cisaillement.

Par rapport à l'argilosité des sols, les seuils proposés par le LCPC-SETRA [2] se présentent comme suit :

- 12 : limite supérieure des sols faiblement argileux,
- 25 : limite supérieure des sols moyennement argileux,

- 40 : limite entre les sols argileux et très argileux.

D'après les valeurs d' $I_p$  obtenues, il apparaît que le sable argileux noir clair avec des concrétions de calcaire et la marne calcaire altérée avec son fort pourcentage de fines présentent une forte argilosité par rapport au sable argileux noir foncé et au sable argileux noir clair avec cailloux de calcaire qui eux, seraient faiblement argileux. Pour avoir une confirmation de ces hypothèses, il a été procédé à la détermination de la valeur du VBS.

#### **La valeur du bleu de méthylène VBS :**

Le VBS (Valeur de Bleu du Sol) est un autre paramètre utilisé pour caractériser l'argilosité des sols.

Il est représentatif de la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules du sol. Autrement dit, c'est une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

Etant donné que, pour un sol donné, c'est la surface des particules contenues dans la fraction argileuse ( $\leq 2\mu m$ ) qui détermine la surface spécifique, la valeur de bleu de méthylène VBS pourrait signifier en fin de compte la quantité et la qualité (ou activité) de l'argile contenue dans le sol.

Expérimentalement, le VBS est déterminé à partir de l'essai au bleu de méthylène à la tache sur la fraction 0 / 2mm. Notons que la valeur trouvée est ensuite rapportée par règle de proportionnalité sur la fraction 0 / 50mm. En pratique, la VBS est exprimé en grammes de bleu pour 100grammes de sol.

Le LCPC et le SETRA [2] ont établi une classification des sols sur la base du VBS.

Ainsi, les seuils retenus sont :

- 0.1 : seuil en dessous duquel, on peut considérer que le sol est insensible à l'eau. Toutefois, pour ce cas particulier, il faut compléter l'essai par une vérification du tamisât à  $80\mu m$  qui doit être inférieur à 12 %.
- 0.2 : seuil au-dessus duquel apparaît à coup sûr la sensibilité à l'eau.
- 1.5 : seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux.
- 2.5 : seuil distinguant les sols limoneux peu plastique des sols limoneux de plasticité moyenne.

- 6 : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux
- 8 : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

Il faut toutefois noter que, la notion de sensibilité à l'eau est assez restrictive puisqu'il n'existe pas de sols complètement insensibles à l'eau. Donc, cette notion est surtout relative à la variation de la portance du sol qui fait suite à une variation de la teneur en eau de celui-ci (du fait notamment de l'exposition aux agents atmosphériques). Ainsi, un sol est dit d'autant plus sensible à l'eau que la chute de portance entraînée pour une faible augmentation de sa teneur en eau, est importante.

L'essai VBS réalisé sur les quatre principaux types de matériaux présents sur l'emprise de la route BARGNI –DIAMNIADIO, a donné les résultats présentés dans le tableau 3 [5]:

Au regard de ces résultats, on constate une confirmation des hypothèses émises précédemment après l'analyse de l'argilosité des sols. En effet, les plus grandes valeurs de VBS ont été obtenues sur les sols I et III.

Ainsi l'examen des résultats de VBS nous amène à confirmer que nous sommes bien ici en présence de sols limoneux très plastiques et de sols argileux, qui présentent également une forte sensibilité à l'eau. Cela veut dire qu'en faisant référence à la sensibilité à l'eau, ces matériaux ne seraient pas aptes à être utilisés sans traitement comme sol de plate-forme d'une structure routière. Les résultats de la classification vont certainement permettre d'avoir une nouvelle confirmation de ces hypothèses.

#### *4.1.2 : Classification des sols par le système LCPC –SETRA :*

De manière générale, les structures de chaussée sont construites sur un ensemble appelé plate-forme support de chaussée constituée :

- du sol support désigné dans sa partie supérieure (sur 1m d'épaisseur environ), par le terme « partie supérieure des terrassements (PST) », et dont la surface constitue l'arase supérieur des terrassements ;

- d'une couche de forme éventuelle lorsqu'il est procédé par exemple à un traitement de cet arase supérieur.

La nature du sol de plate-forme est utilisée comme élément de base dans la caractérisation de leur comportement à long terme.

C'est ainsi que, le LCPC-SETRA [2] a établi une classification des sols plate-forme en fonction des paramètres que sont :

- la dimension maximale du plus gros granulat  $D_{max}$ ,
- la granularité, notamment le pourcentage de passant à  $80 \mu m$ ,
- l'indice de plasticité  $IP$ ,
- le VBS.

Le tableau utilisé pour la classification des sols dont le  $D_{max}$  est inférieur à  $50 \text{ mm}$  est la suivante :

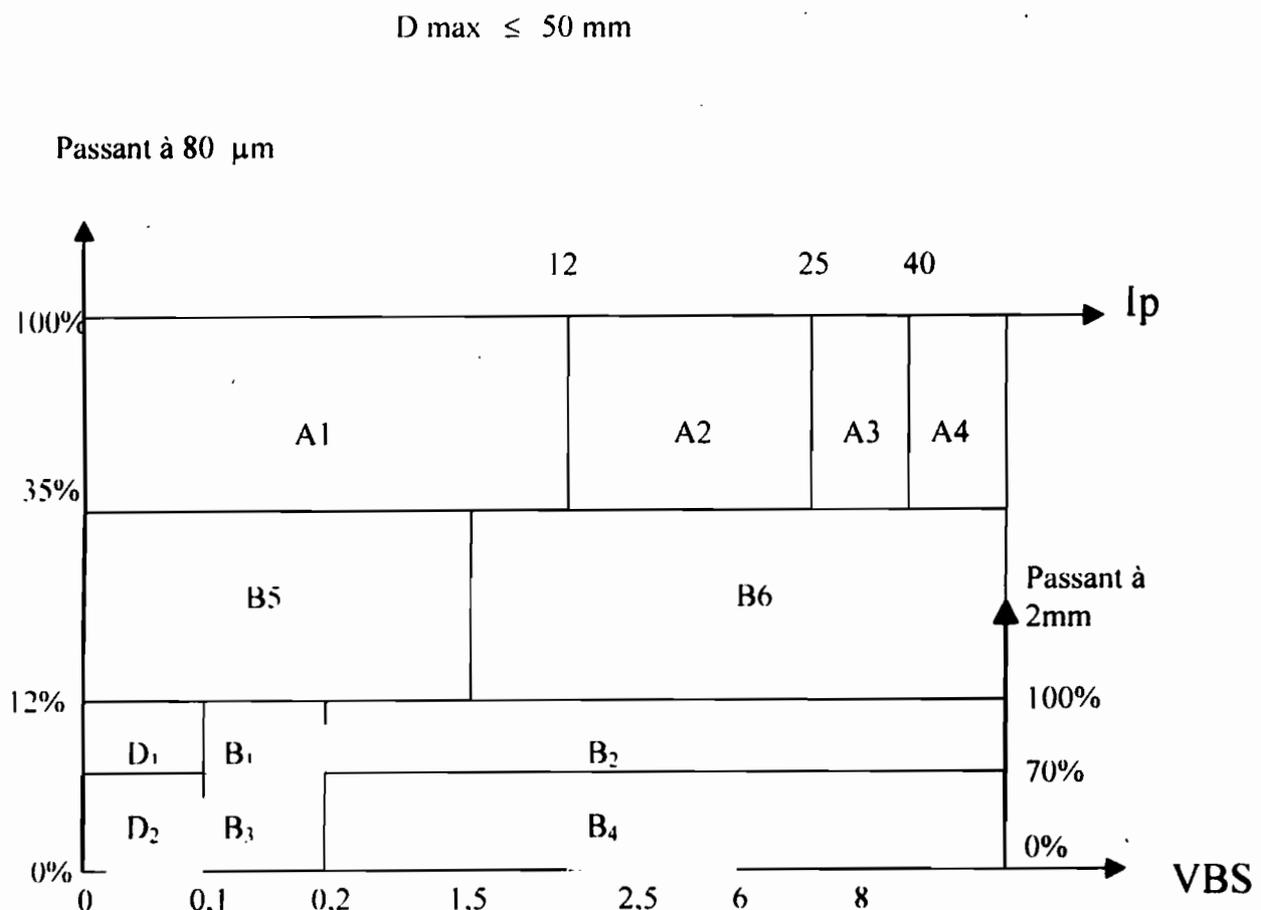


Fig .12: Tableau de classification des sols d'après le LCPC-SETRA :

La description des classes de sols obtenues avec cette classification est faite dans le tableau (**Classification des sols fins**) présenté en **annexe 1**.

#### 4.1.2.1 : Présentation des résultats :

□ Pour le **sol argileux noir clair + concrétions calcaireuses**, on a les résultats suivants :

- $D_{max} \leq 50$  mm
- le pourcentage de passant au tamis  $80 \mu\text{m} = 57 \%$ ,
- $IP = 28$
- $VBS = 4,5$

D'après la figure.12 (**Tableau de classification des sols**) proposée par le LCPC-SETRA, il s'agit d'un sol fin de classe **A<sub>3</sub>**

□ Pour le **sol argileux noir foncé**, on a les résultats suivants :

- $D_{max} \leq 50$  mm
- le pourcentage de passant au tamis  $80 \mu\text{m} = 40 \%$ ,
- $IP = 23$
- $VBS = 5$

D'après la figure.12 (**Tableau de classification des sols**) proposée par le LCPC-SETRA, nous sommes ici en présence d'un sol fin de classe **A<sub>2</sub>**

□ Pour le **sol argileux noir clair + cailloux de calcaire**, on a les résultats suivants :

- $D_{max} \leq 50$  mm
- le pourcentage de passant au tamis  $80 \mu\text{m} = 45 \%$ ,
- $IP = 20$
- $VBS = 3,1$

D'après la figure.12 (**Tableau de classification des sols**) proposée par le LCPC-SETRA, il s'agit d'un sol fin de classe **A<sub>2</sub>**

□ Pour la **marne calcaire altérée**, on a les résultats suivants :

- $D_{max} \leq 50$  mm
- le pourcentage de passant au tamis  $80 \mu m = 67$  %,
- $IP = 66$
- $VBS = 5,3$

D'après la fig.12 (**Tableau de classification des sols**) proposée par le LCPC-SETRA, la marne calcaire altérée est un sol fin de classe **A<sub>4</sub>**

#### *IV.1.2.2 : Analyse des résultats :*

Le LCPC-SETRA a donné une caractérisation des sols de plate-forme suivant la classe et la teneur en eau naturelle (cf. annexe 3)

C'est ainsi que, les sols de classe **A<sub>2</sub>** (le **sol argileux noir foncé** et le **sol argileux noir clair + cailloux de calcaire**) sont réputés être normalement inutilisables sans traitement préalable lorsqu'ils sont fortement imbibés d'eau ( $w_n \geq 1,3 w_{optN}$ ).

De manière générale ce sont des sables fins argileux, des limons, des argiles et des marnes peu plastiques.

Par rapport à cela, il serait bon également de noter que lorsque la teneur en eau naturelle de ces sols n'est pas trop élevée, ils devraient pouvoir se prêter à l'emploi en sol plate forme sans aucun traitement préalable.

Mais, toutefois la prudence voudrait que l'on prévoie de se mettre dans les conditions les plus défavorables, plus précisément dans le cas éventuel où il se produirait une forte pluie à la suite de laquelle, la route sera fortement inondée. La teneur en eau naturelle de ces sols de classe **A<sub>2</sub>** pourrait se voir alors augmenter jusqu'à atteindre une valeur critique à savoir  $w_n$  ( $w_n \geq 1,3 w_{optN}$ ) ; ce qui rendrait ainsi ce sol inapte à constituer la plate forme support d'une chaussée à grand trafic, à l'image celle qui fait l'objet de cette présente étude.

En outre, les valeurs de gonflement libre mesurées après 96 heures d'imbibition sur ces sols (respectivement **4,34** et **3,43**) sont trop fortes pour permettre leur utilisation sans traitement préalable.

Les matériaux de classe A<sub>3</sub> tels que le **sol argileux noir clair + concrétions calcaireuses** sont classés d'après le LCPC-SETRA comme étant des sols difficiles à mettre en œuvre en raison de leur caractère collant ou glissant dû à leur grande plasticité et à leur faible perméabilité et aussi parce qu'ils ont des portances faibles.

Ces types de sols sont également reconnus être instables lorsqu'ils sont fortement imbibés d'eau. Toutefois, il faudrait ajouter à cela, qu'à faible teneur en eau, ces sols pourraient devenir très cohérents. Cependant, il a été noté que l'emprise de la route traverse le bassin versant qui draine l'ensemble des averses en amont (sur la partie EST en quittant DAKAR) avant de les conduire vers la mer.

Par conséquent, la couche de forme serait supposée être fortement imbibée d'eau éventuellement après une longue ( avec la faible perméabilité du sol) et forte pluie ; et donc, dans ces conditions hydrologiques, ces sols deviendraient inaptes à constituer la plate-forme support d'une chaussée à trafic lourd.

Enfin, les sols de classe A<sub>4</sub> sont reconnus d'après la classification LCPC –SETRA être des matériaux dont l'utilisation en couche de forme n'est normalement pas envisageable en raison de leur très fort taux de gonflement. Cela est justifié par le gonflement libre mesuré au niveau de la **marne calcaire altérée** recueillie au Pk1 du tronçon BARGNI –DIAMNIADIO, qui atteint une valeur de 9,61%, après une imbibition de 96 heures.

Au terme de l'analyse des résultats de la classification des sols qui ont été prélevés au niveau des différents sondages réalisés le long de l'emprise du projet, il a été constaté que la presque totalité des sols rencontrés dans la zone ont des caractéristiques impropres à une bonne utilisation en couche d'assise.

Cependant, tout laisse à croire que les caractéristiques ou performances de ces sols pourraient être fortement améliorées si on les soumettait à un traitement.

#### 4.2 : Traitement des sols de plate-forme :

De manière générale, les couches de forme sont classées suivant leur portance

Ainsi, en fonction de la portance du sol de plate-forme, on parlera de classe de plate-forme PF1, PF2, PF3 ou PF4. Il est important de noter que ces classes de sol ont été définies par rapport au module  $E$  ( Mpa ) des matériaux de plate-forme dont dépend la résistance à la traction  $R_t$  (Mpa) après 90 jours. L'expérience a montré que, dans les couches de plate-forme traitées, le processus de dégradation s'amorçait presque toujours par des fissurations à la base. En effet, il a été noté qu'il y'a apparition sous l'action de chargements induites par le trafic, de contraintes de traction à la base des couches rigidifiées telle que la couche de forme (obtenue après traitement au liant hydraulique du matériau naturel ) et qui lorsqu'elles dépassent la résistance à la traction admissible du matériau constitutif, donnent naissance à des fissurations.

C'est ainsi que, compte tenues des exigences particulières sur la qualité des plates-formes est recommandé dans le cas de chantier autoroutier d'avoir au minimum une plate-forme de classe PF2 ( $50 \text{ MPa} < E < 120 \text{ MPa}$  ). Cependant, il se trouve que d'après les études géotechniques effectuées sur les matériaux de sol prélevés le long de l'emprise du projet, ceux-ci ne peuvent effectivement constituer à l'état naturel que des sols de plate-forme de classe PF1 (  $\text{CBR} < 5 \longrightarrow E < 50 \text{ Mpa}$  ).

Module (MPa)	20	50	120	200
Classe de plate-forme	PF1	PF2	PF3	PF4

**Tableau 4 : Définition des classes de plate-forme PF<sub>i</sub>**

Par conséquent, il est impératif dans le cadre de ce projet de construction de l'autoroute BARGNY-DIAMNIADIO, à défaut de substituer les matériaux trouvés sur place, de procéder à un traitement de l'arase supérieur de la plate-forme afin d'aboutir à un surclassement de celle-ci.

Dans cette optique, il a été effectué différents types de traitements :

- traitement au ciment,
- traitement à la chaux,
- amélioration avec un sable.

### 4.2.1 : Traitement au ciment :

Il a été expérimenté sur chacun des quatre principaux types de matériaux rencontrés dans la zone. Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux suivants :

Nature échantillon : sable argileux noir clair + concrétions calcaireuses (sol I)					
% de ciment		0 %	3 %	3,5 %	4 %
LIMITES D'ATTERBERG	$W_L$	58	36	38	38
	$W_p$	30	21	24	24
	$I_p$	28	15	14	14
ESSAI PROCTOR	$W_{opm}$	13,7	12,7	13,2	13,7
	$\gamma_{dmax}$	1,842	1,857	1,839	1,835
	$\gamma_H$	2,094	2,092	2,080	2,086
CBR immédiat		13	43	47	43
CBR (après 96 heures d'imbibition)		3	22	32	55
Teneur en eau	avant CBR	12,8	12,6	13	13,6
	après CBR	20,7	18,0	16,6	15,2
Gonflement (après 96 heures d'imbibition)		2,23	0,12	0,09	0,06

**Tableau 5 : Résultats géotechniques sur le sable argileux noir clair + concrétions calcaireuses traité au ciment**

<u>Nature échantillon : sable argileux noir foncé (sol II)</u>					
% de ciment		0 %	3 %	3,5 %	4 %
LIMITES D'ATTERBERG	$W_L$	43	31	31	31
	$W_p$	20	16	17	19
	$I_p$	23	15	14	12
ESSAI PROCTOR	$W_{opt}$	13,0	8,7	10,3	8,5
	$\gamma_{dmax}$	1,750	2,017	1,971	1,980
	$\gamma_{II}$	1,978	2,192	2,174	2,148
CBR immédiat		15	58	47	39
CBR (après 96 heures d'imbibition)		2	109	153	111
Teneur en eau	avant CBR	12	8,7	10,3	8,6
	après CBR	21,2	13,2	11,3	12,4
Gonflement (après 96 heures d'imbibition)		4,26	0,087	0,039	0,039

**Tableau 6 : Résultats géotechniques sur le sable argileux noir foncé traité au ciment**

Nature échantillon : <b>marne calcaire altérée</b> (sol III)					
% de ciment		0 %	3 %	3,5 %	4 %
LIMITES D'ATTERBERG	$W_L$	112	200	201,1	181
	$W_p$	47	73	73	96
	$I_p$	65	127	128	86
ESSAI PROCTOR	$W_{opt}$	22,2	25,5	21,9	29,7
	$\gamma_{dmax}$	1,615	1,477	1,470	1,410
	$\gamma_{II}$	1,974	1,854	1,792	1,827 e
CBR immédiat		14	45	37	36
CBR (après 96 heures d'imbibition)		2	41	47	61
Teneur en eau	avant CBR	22,6	25,5	21,4	29,5
	après CBR	37,9	34,8	34,5	33,1
Gonflement (après 96 heures d'imbibition)		9,61	0,559	0,5	0,5

**Tableau 7 : Résultats géotechniques sur la marne calcaire altérée traitée au ciment**

<b>Nature échantillon : sable argileux noir clair avec cailloux de calcaire (sol IV)</b>					
<b>% de ciment</b>		<b>0 %</b>	<b>3 %</b>	<b>3.5 %</b>	<b>4 %</b>
<b>LIMITES D'ATTERBERG</b>	$W_L$	38	35	35	34
	$W_p$	18	22	22	22
	$I_p$	20	13	13	12
<b>ESSAI PROCTOR</b>	$W_{opm}$	9.0	11.2	10.9	11.4
	$\gamma_{dmax}$	2,002	1,910	1,903	1,920
	$\gamma_{II}$	2,182	2,124	2,109	2,139
<b>CBR immédiat</b>		17	41	45	71
<b>CBR (après 96 heures d'imbibition)</b>		4	18	32	80
<b>Teneur en eau</b>	<b>avant CBR</b>	8,5	11,3	11,1	11,2
	<b>après CBR</b>	15,7	14,2	14,4	13,6
<b>Gonflement (après 96 heures d'imbibition)</b>		3,43	0,071	0,071	0,031

**Tableau 8 : Résultats géotechniques sur le sable argileux noir clair avec cailloux de calcaire traité au ciment**

Il apparaît d'après les résultats obtenus que le traitement au ciment donne des résultats très satisfaisants sur l'ensemble des quatre principales types de matériaux. En effet, avec 3% de ciment, les valeurs de CBR obtenues, dépassent le minimum requis (CBR= 10) pour un matériau de plate-forme de chaussées à caractère d'autoroute.

Egalement, le gonflement libre devient presque inexistant avec ce traitement.

#### 4.2.2 : Traitement à la chaux :

Ce traitement a été appliqué sur le sable argileux noir et sur la marne calcaire, qui de tous les matériaux rencontrés dans la zone d'emprise, ont les comportements les plus inquiétants.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Nature du sol	sable argileux noir foncé			marne calcaire altérée		
	0%	3 %	4%	0%	3 %	4%
Ip	23,3	10.02	10.00	65	23.6	22.36
$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1.887	1.990	1.948	1.439	1.668	1.672
W (%) optimale	12	9.1	9.3	24.6	17.5	17.5
W(%) après 96 h d'imbibition	22,5	15.02	15,26	30.3	24.7	20.76
CBR	2	86	104	2	63.2	100
Gonflement	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

**Tableau 9 : Résultats géotechniques du traitement à la chaux**

Il est constaté que, pour le sable argileux noir foncé et la marne calcaire altérée qui sont les deux matériaux les plus suspectés vis à vis de la sensibilité à l'eau et du gonflement, on a une forte amélioration du CBR après l'adjonction de 3 % de chaux.

En outre, le gonflement libre mesuré devient quasiment nul.

Donc, on peut dire à priori que le traitement à la chaux donne des résultats très satisfaisants sur l'ensemble des quatre principaux types de matériaux prélevés dans la zone du projet.

### 4.2.3 : Amélioration avec un sable :

Il a été procédé aux mélanges suivant :

**mélange I** : sable argileux noir foncé + 15 % de sable de dune

**mélange II** : sable argileux noir foncé + 30 % de sable de dune

**mélange III** : marne calcaire altérée + 15 % de sable de dune

**mélange IV** : marne calcaire altérée + 30 % de sable de dune

L'étude géotechnique effectuée sur ces mélanges a donné les résultats présentés dans le tableau ci-dessous

Nature échantillon :		mélange I	mélange II	mélange III	mélange IV
LIMITES D'ATTERBERG	$W_L$	23,4	22,0	101,1	77,6
	$W_p$	10,0	10,7	54,0	46,7
	$I_p$	13,4	11,3	47,1	30,9
ESSAI PROCTOR	$W_{opt}$	9,9	9,5	22,4	19,5
	$\gamma_{d_{max}}$	1,98	1,965	1,58	1,68
	$\gamma_H$	2,17	2,15	1,93	2,01
CBR (après 96 heures d'imbibition) à 95 % l'OPM		17	15,4	0,9	1,4
Gonflement (après 96 heures d'imbibition)		0,18	0,10	3,15	2,4

**Tableau 10 : Résultats géotechniques de l'amélioration avec un sable :**

Il apparaît d'après les résultats obtenus que, le gonflement de la marne calcaire mélangée avec le sable de dune, même s'il est quelque peu réduit, demeure encore élevé.

Egalement surtout au niveau de la marne calcaire, le mélange avec le sable n'améliore pas le CBR.

#### 4. 2.4 : *Analyses comparatives et interprétations des résultats :*

- On commencera par noter les valeurs de CBR des matériaux naturels prélevés le long de l'emprise du projet, qui sont toutes inférieures à 5. Cela signifie que leur portance est très faible et correspond à celles des sols de plate-forme de classe PF1. Par conséquent, il sera nécessaire de les traiter à défaut de les purger complètement.
- L'utilisation de la géomembrane étanche comme telle a été décrite dans la partie « Synthèse Bibliographique : Expérience réalisée au CAMEROUN », ne se justifie pas dans le cadre de ce projet car même si elle pourrait permettre de réduire fortement les mouvements qui devraient être dus à des phénomènes de gonflement-retrait du matériau argileux, la portance du sol sur lequel elle sera étalée ne s'en trouverait pas améliorée. Par conséquent, la capacité portante du matériau argileux resterait encore trop faible pour permettre son utilisation sans traitement préalable lors la constitution de la plate-forme support de la chaussée.
- Il est constaté par ailleurs que, les valeurs de CBR sont fortement améliorées après un traitement au ciment ou à la chaux ; elles dépassent ainsi largement le CBR minimum requis pour une couche de plate-forme d'autoroute (CBR > 10).
- On notera qu'avec l'argile noir foncé, le traitement à la chaux donne de meilleurs résultats de CBR à court terme que celui au ciment. C'est le contraire qui est observé avec la marne calcaire altérée (cf. fig. 13 et fig.14). Cela se justifie par la spécificité des réactions chimiques qui se produisent dans ces différents types de traitement et qui sont fonction non seulement de la nature du traitement ( au ciment ou à la chaux )

mais aussi de celle des composantes minéralogiques du matériau traité.

- Les valeurs de gonflement libre mesurées sur les matériaux naturels sont trop élevées (2,23% à 9,61%). Ces matériaux supportent donc très mal la présence d'eau. Toutefois il est constaté que ces gonflements deviennent quasiment inexistantes après un traitement au ciment ou à la chaux.
- Cependant, il se trouve que même si le traitement au ciment des matériaux argileux gonflants donne de bons résultats à court terme vis à vis du CBR et du gonflement, beaucoup de méfiances ont été notées par rapport au comportement à long terme. En effet, l'expérience a montré que le traitement au ciment n'est pas adapté aux sols de forte argilosité. Cela s'est justifié à travers plusieurs constats de fissurations excessives qui sont très vite apparues au niveau de couches de superstructures routières faites en matériaux latéritiques de forte argilosité ayant subis un traitement au ciment. Tout laisse croire que, cette incompatibilité entre le ciment et les matériaux argileux, serait due à la présence de la montmorillonite dans les minéraux de ces argiles gonflants. ([4],[2])

C'est pour cette raison d'ailleurs que pour le traitement des sols argileux (limon du Nord de la France), on s'était orienté vers un traitement mixte :

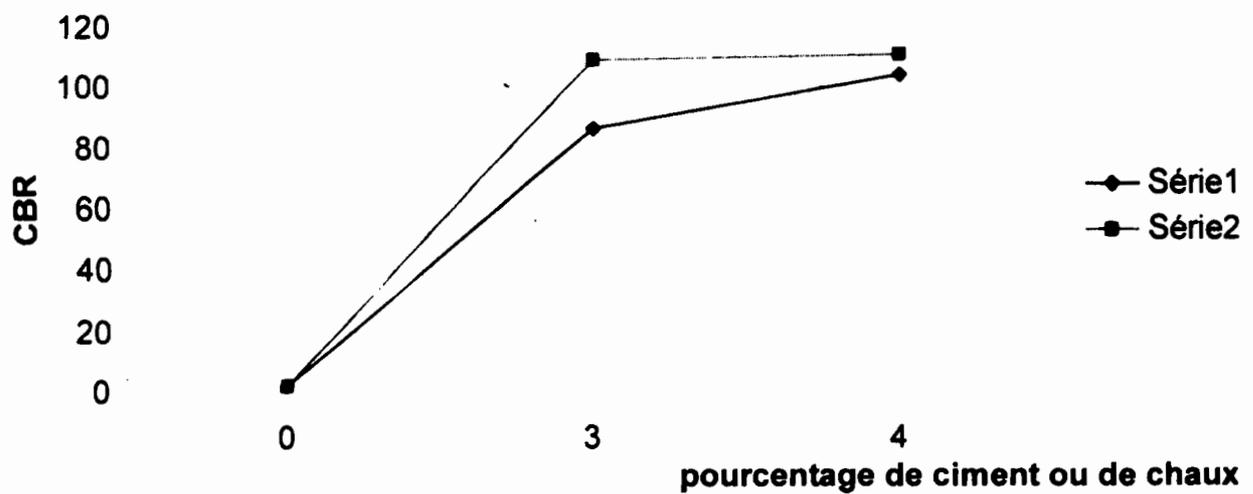
- d'abord, un traitement à faible dose de chaux pour « détruire l'argile »,
- ensuite, un traitement au ciment, après une période de repos suffisante, pour donner aux sols une très forte cohésion et des caractéristiques mécaniques élevées. [4]

- En outre, le traitement avec le sable de dune ne donne pas des résultats satisfaisants. Il est apparu en effet que, même si elle pouvait permettre de réduire fortement le gonflement, la résistance au

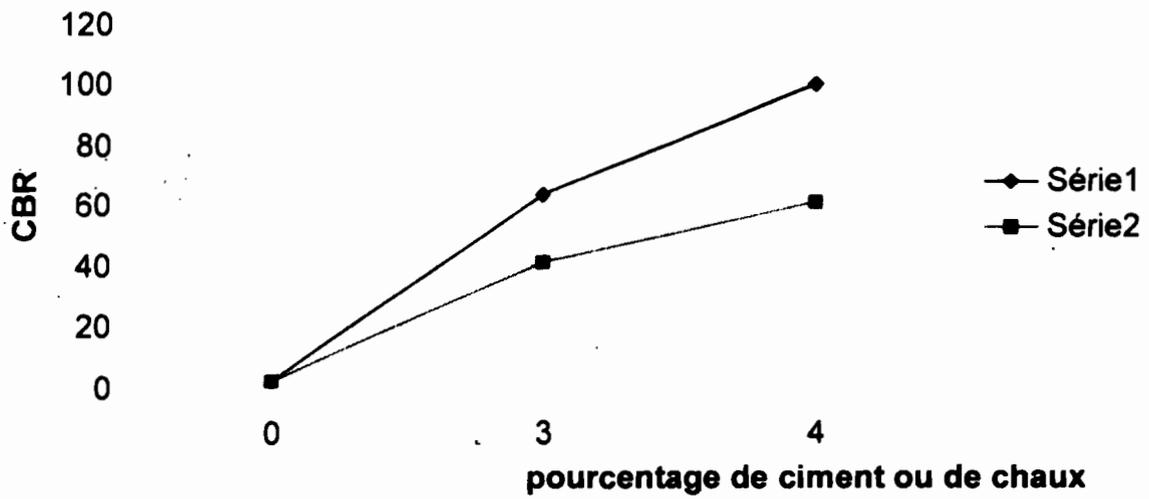
poinçonnement (CBR) du matériau ne s'en trouve pas améliorer. Ce procédé de traitement ne serait donc pas à retenir.

Au terme de l'analyse, il apparaît donc que le traitement à la chaux reste le plus adapté pour le surclassement des sols de plate-forme prélevés dans les différents sondages effectués sur l'emprise du projet de route BARGNY-DIAMNIADIO.

**fig.13 : Evolution du CBR de l'argile noire foncée en fonction du type traitement**



**fig.14: Evolution du CBR de la marne calcaire altérée en fonction du type de traitement**



**Série 1 :** Traitement à la chaux

**Série 2 :** Traitement au ciment

# Chapitre 5:

*Proposition de conception .*

## Chapitre 5: *Proposition de conception :*

Sur la base de l'analyse faite sur le comportement des sols argileux gonflants, nous proposons deux types de structures routières souples qui prennent compte d'un certain nombre de dispositions constructives.

### *5.1 : Types de structures :*

#### *Structures de type 1 :*

Avant de constituer ces structures, on devra procéder à une purge sur au moins un mètre de profondeur des matériaux argileux gonflants trouvés sur place. Le choix d'une profondeur d'un mètre se justifie par le fait que l'on considère en général qu'au-delà d'un mètre de profondeur, les variations de teneur en eau naturelle du sol restent très minimes voir insignifiantes, et par conséquent il n'y a presque plus de phénomènes de retrait-gonflement (cf. : III.4.2 : analyse et interprétation des résultats observés sur les planches d'essai expérimentales).

Après la purge, on mettra :

- une couche de sable de 30cm d'épaisseur. Elle devra permettre d'éviter la contamination de la couche de remblai .

Par ailleurs, ce sable devra avoir un CBR supérieur ou égale à 10, pour 95 % de compacité rapporté à l'Optimum Proctor Modifié et après 96 heures d'imbibition,

- une couche de remblai bien compacté de 70 cm en matériau de CBR supérieur ou égal à 60, ce qui permet de surclasser la plate-forme de PF1 à PF3 .

- une couche de fondation en latérite crue de CBR >40 après 96 heures d'imbibition.

Ces latérites devraient pouvoir être prélevées dans les carrières de DOUGAR et de SINDIA. Elles devront par ailleurs, avoir une limite de liquidité et un indice de plasticité inférieure ou égale respectivement à 30 et 15,

- une couche de base en grave basaltique reconstituée 0 / 31.5 avec un IP nul,
- une couche d'imprégnation et d'accrochage en bitume fluidifié ou cut-back 0 / 1 avec un dosage de 1,0 à 1,5 kg /m<sup>2</sup> ,

-une couche de revêtement qui sera constituée par un enrobé dense (béton bitumineux).

La couche d'imprégnation et d'accrochage devrait permettre de réaliser une bonne adhérence entre la couche de base et le revêtement en béton bitumineux. Elle pourrait constituer également une protection contre l'infiltration des eaux superficielles.

Pour l'enrobé dense ou béton bitumineux, on utilisera de la grave reconstituée 0/12 auquel on adjoindra du bitume pur 40/50 qui est plus adapté aux régions tropicales. Notons qu'un bitume pur à caractère semi-dur est dit de type 40/50 si l'enfoncement mesuré lors de l'essai de pénétration se trouve dans l'intervalle (4mm, 5mm) .

En raison de l'importance du trafic, les granulats utilisés dans le revêtement devront avoir une dureté correspondant à un LA < 22. Ils devront par ailleurs être exemptes de toute pellicule d'éléments fins (limons ou argiles ) susceptible de supprimer leur adhérence au liant hydrocarboné.

Les épaisseurs de ses différentes couches seront déterminées après dimensionnement.

### *Structures de type 2 :*

Elles comportent :

- un traitement à la chaux de l'arase supérieur de la plate-forme sur une épaisseur de 50 cm pour permettre un surclassement de cette plate-forme de PF1 à PF2 , ceci en faisant référence aux recommandations de SCETAUROUTE dans (Manuel de conception des chaussées d'autoroutes),
- une couche de fondation, une couche de base et une couche de revêtement de même caractéristiques que celles des structures de type 1 et dont les épaisseurs seront définies après dimensionnement.

### 5.2 : dimensionnement :

Il s'agira de déterminer les épaisseurs minimales des différentes couches de chaussée de sorte que la structure de chaussée puisse assurer une transmission convenable des charges de trafic. Pour cela nous allons utiliser le logiciel ECOROUTE avec le module CALCO:[8]

Ce module à travers le programme « option scientifique », permet d'effectuer le calcul des contraintes et déformations dans les différentes couches de la structure de chaussée, et qui sont issues d'un chargement à l'essieu. La seule restriction dans ce programme concerne l'entraxe des roues du jumelage qui est ici égal à trois fois le rayon de l'aire de contact d'un pneumatique avec la chaussée.

Il s'agira donc à chaque fois, après avoir effectué un choix d'épaisseurs des différentes de couches de chaussée, ceci en fonction des prescriptions du CEBTP (cf. Tableau 1 et 2), de procéder au calcul avec ECOROUTE de l'ensemble des contraintes résultantes de la transmission des charges de trafic à travers ces couches afin de vérifier si elles restent inférieures aux limites admissibles. Comme tel est l'objet de tout dimensionnement, on cherchera à trouver les épaisseurs minimales des différentes couches de chaussée et qui répondraient à l'ensemble des critères définis.

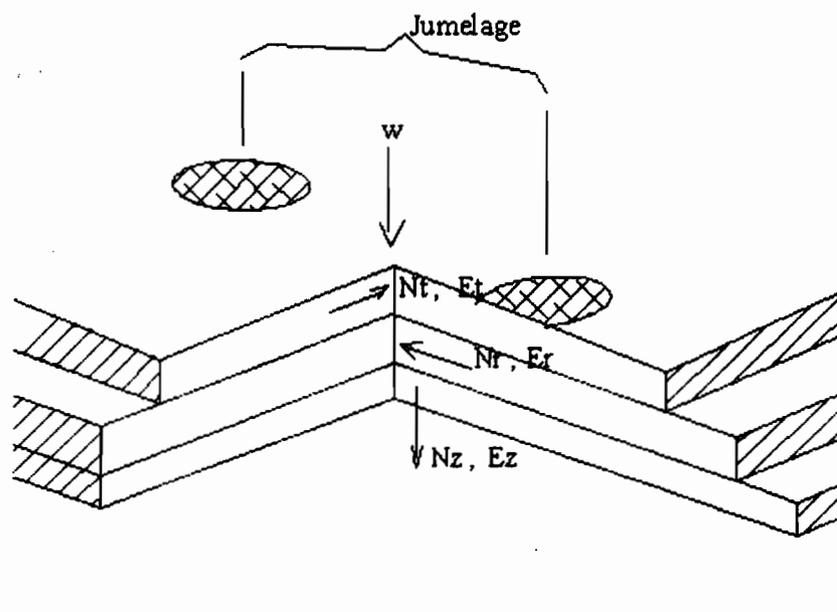


fig.15 : Axe d'un jumelage

Nr , Er : contraintes et déformations radiales

Nt, Et : contraintes et déformations transversales

Nz, Ez : contraintes et déformations verticales

W : déflexion

### Hypothèses de calcul

Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

❖ Trafic : T5 avec  $N=1,5 \cdot 10^7$

Pour une durée de vie de 15 ans, le classe de trafic T5 exprime un nombre cumulé en essieux équivalents de poids lourds dont la charge maximale est de 13 tonnes et qui varie de  $10^7$  à  $2 \cdot 10^7$ , avec un taux de surchargement inférieur à 10 %.

❖ Charge à l'essieu : 13 tonnes (Roue jumelée de rayon d'empreint 12.5cm)

soit une pression de  $\frac{130000N}{4 * \pi * 0,125^2} = 6.62$   
bars

- ❖ Coefficient de poisson :
  - 0,40 pour le revêtement
  - 0,35 pour le basalte
  - 0,25 pour toutes les autres couches
  
- ❖ Module de Young :
  - E = 50 \* CBR pour la latérite crue
  - E = 30 \* CBR pour le sable et les sols fins
  - E = 6000 bars pour le basalte
  - E = 13000 bars pour le béton bitumineux
  
- ❖ Il n'y a pas de glissement entre les différentes couches
  
- ❖ Pour les matériaux traités à la chaux, on prendra un CBR de 60
  
- ❖ Pour les matériaux de substitution notamment le sable fin et la latérite crue de second choix, on prendra respectivement comme valeurs de CBR 10 et 60 .
  
- ❖ Pour la couche de fondation en latérite, on prendra un CBR de 80

### Détermination des limites admissibles

#### -sols supports et matériaux naturels non traités :

Les limites admissibles sur les sols supports et les matériaux naturels non traités sont caractérisées par la déformation verticale admissible ( $\epsilon_z \text{ adm}$ ) et la contrainte verticale admissible ( $\sigma_z \text{ adm}$ ) à la surface de ces couches.

La déformation verticale admissible, donnée par la loi de tassement de SHELL [3], s'exprime par la formule suivante :

$$\epsilon_z \text{ adm} = 2,8 * 10^{-2} * N^{-0,25}$$

Avec

**N** : trafic cumulé exprimé en nombre d'essieux équivalents de 13 tonnes  
(dans le cadre de ce projet, on prendra  $N = 1,5 \cdot 10^7$  (T5 CEBTP))

La contrainte verticale admissible ( $\sigma_{z \text{ adm}}$ ) est donnée par la formule suivante

$$\sigma_{z \text{ adm}} = \frac{0,3 * \text{CBR}}{1 + 0,7 * \log N} \quad (\text{en bars})$$

**CBR** : Indice portant du matériau constitutif de la couche  
de structure de chaussée

### APPLICATION :

Pour  $N = 1,5 \cdot 10^7$  on a

CBR	$\epsilon_{z \text{ adm}}$ (m)	$\sigma_{z \text{ adm}}$ (bars)
80	$450 \cdot 10^{-6}$	3,98
60	$450 \cdot 10^{-6}$	2,99
10	$450 \cdot 10^{-6}$	0,5
2	$450 \cdot 10^{-6}$	0,1

**Tableau 11 : limites admissibles pour sols supports et matériaux naturels non traités .:**

**-matériaux traités aux liants hydrauliques (traitement à la chaux) :**

Dans ce cas, le critère déterminant reste la contrainte de traction par flexion à la base de la couche traitée.

Cette contrainte de traction admissible est calculée par la formule suivante [3] :

$$\sigma_{t \text{ adm}} = 0,70 * \sigma_6 * (N/10^6)^{-b} * K_r * K_c * K_s$$

Avec  $\sigma_6$  : la résistance à la rupture pour un cycle (trafic) de  $10^6$

N : trafic de dimensionnement,

b: pente de la loi de fatigue des matériaux,

$\delta$ : écart-type de la dispersion de Log N à la rupture

Kr : coefficient ajustant la valeur de la déformation admissible au risque de calcul retenue en fonction de la dispersion sur l'épaisseur et sur les essais de fatigue,

$K_r = 10^{-\mu \delta^2}$  avec  $\mu$  la fractile de la loi normale centrée réduite. Il est directement liée au niveau de risque choisi en fonction du trafic et à la catégorie de route.

Pour des raisons sécuritaires en vue d'une bonne rentabilité de l'investissement, et du fait de l'importance de l'axe BARGNI-DIAMNIADO dans le trafic routier national du SENEGAL, on a considéré un taux de risque assez sécuritaire de 12% pour le béton bitumineux qui est directement en contact avec les pneumatiques, ce qui correspond à une valeur de  $\mu = 1,17$ .

Pour l'utilisation éventuelle d'une couche de grave bitume, on se contentera d'un taux de risque de 50 % correspondant à une valeur de  $\mu = 1$

Kc : facteur de calage pour ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement

réel observé des chaussées.

$K_s$  : facteur de stabilité tenant compte des hétérogénéités locales de portance d'une couche de faible rigidité supportant les couches liées.

### APPLICATION :

Nature Matériau	$\sigma_6$ (bars)	b	$\delta$	$\mu$	Kr	Kc	Ks	$\sigma_{t adm}$ (bars)
Sol argileux + Chaux	2,0	1/10	0,8	1,17	0,806	1,5	1/1,1	<b>1,17</b>

**Tableau 12 : limites admissibles pour matériaux traités aux liants hydrauliques .**

$$\sigma_{t adm} = 0,70 * 2 * (1,5 \cdot 10^7 / 10^6)^{-1/10} * 0,806 * 1,5 * 1,17 = 1,17 \text{ bars}$$

#### -matériaux traités aux liants hydrocarbonés :

Le critère fondamental de vérification pour les couches de chaussée en matériaux bitumineux est l'élongation par traction ( $\epsilon_t$ ) qui est donné par la formule suivante [3]

$$\epsilon_t = \epsilon_6 \times (E1/E2)^{0,5} \times (N / 10^6)^{-b} * Kr * Kc * Ks$$

E1 = module du matériau à la température équivalente 10° c

E2 = module du matériau à la température équivalente du milieu d'utilisation (soit à 30° c)

$\epsilon_6$  = élongation admissible pour une fréquence de 25 Hz et une température de 10° c

**APPLICATION :**

	$\epsilon_6 (10^{-6})$	E1(bars)	E2(bars)	$\delta$	b	$\mu$	Kr	Ks	Kc	$\epsilon_{t_{adm}} (m)$
BBSG (0/14)	100	72.000	13.000	0,478	0,2	1,17	0,77	1	1,10	$11,6 \cdot 10^{-5} m$
GB (0/20)	90	90000	20000	0,478	0,2	1	1	1	1,3	$14,5 \cdot 10^{-5} m$

**Tableau 13 : limites admissibles pour matériaux traités aux liants hydrocarbonés .**

Pour le béton bitumineux BBSG (0/14), on a :

$$\epsilon_{t_{adm}} = 100 \cdot 10^{-6} * \left( \frac{72000}{13000} \right)^{0,5} * \left( \frac{1,5 \cdot 10^7}{10^6} \right)^{-0,2} * 0,77 * 1,10 * 1 = 11,6 \cdot 10^{-5} m$$

Du fait de l'importance du trafic T5 et dans le souci de rester conforme aux recommandations du SETRA (dans le guide technique « Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée. édition 1994 »), la couche de revêtement en béton bitumineux de type BBSG une épaisseur minimale technologique de 7 cm.

Pour les couches de base et de fondation le choix des épaisseurs au niveau des différentes structures de type 1 et 2 (ST1, ST2, ST3, ST1', ST2', ST3' ) s'est fait en faisant référence à celles proposées par le C.E.B.T.P dans « Manuel sur les routes dans les zones tropicales et désertiques » (cf.fig.2 ).

**STRUCTURES DE TYPES 1 :**

TYPE DE COUCHE	Matériaux	STRUCTURES DE TYPES 1 Valeurs en cm		
		ST1	ST2	ST3
Revêtement	Béton bitumineux 0 / 12	7	7	7
Couche de base	Grave reconstituée 0/31.5	20	20	25
Couche de fondation	Latérite crue CBR $\geq$ 80	30	35	35
Partie supérieure des terrassements PST (matériaux de substitution)	latérite crue CBR $\geq$ 60	70	70	70
	Sable fin anti-contaminant	30	30	30
classe plate-forme module du sol (bars)		PF3 2000	PF3 2000	PF3 2000

**Tableau 14 : Structures de types 1 :**

La simulation avec ECOROUTE du trafic sur les différentes structures de type 1 a donné les résultats présentés à l'annexe 2.

La récapitulation de ces résultats se présente comme suit (tableau 15) :

		Limites admissibles	Structures de Types 1		
			ST1	ST2	ST3
Sol de plate-forme	Contraintes Verticales NZ (bars)	0,5	0.49	0.43	0.38
	Déformations Verticales EZ (E-6 m)	450	258.4	227.8	201.0
Béton bitumineux	Déformations Transversales ET (E-5 m)	-11,6	-17,42	-17,5	-17,65
Déflexions (1/100)		40	28,8	28,3	27,2

**Tableau 15 : Récapitulatif des Résultats du calcul avec Ecoroute pour ST1, ST2, ST3 :**

Il apparaît d'après les résultats obtenus qu'aucune des structures de Type 1 (ST1, ST2 ou ST3) n'est conforme au projet, parce que même si le sol de plate-forme n'est pas poinçonné, il y'a de forts risques d'apparition de fissurations par traction à la base au niveau de la couche de revêtement en béton bitumineux du fait que la limite de traction admissible est dépassée.

Pour parier à cela, il est envisagé de renforcer le revêtement par une couche de grave bitume de 8cm (épaisseur minimale technologique). Bien entendu, on essaiera d'augmenter l'épaisseur de cette couche de renforcement du revêtement en grave bitume si toutefois, les risques de fissurations par traction déjà présentis, demeurent.

On obtient ainsi de nouvelles structures de Type 1, soient :

- ST11 (avec 8cm de grave bitume),
- ST22 (avec 10 cm de grave bitume),

- ST33 (avec 12cm de grave bitume).

La simulation avec ECOROUTE du trafic sur ces structures a donné les résultats du tableau 16 .

		Limites admissibles	Nouvelles structures de Types 1		
			ST11	ST22	ST33
Sol de Plate-forme	Contraintes Verticales NZ (bars)	0,5	0.37	0.35	0.33
	Déformations verticales EZ (E-6 m)	450	198.7	186.2	174.6
Béton bitumineux	Déformations Transversales ET (E-5 m)	-11,6	-1.6	-1,41	-1,48
Grave bitume	Déformations Transversales ET (E-5 m)	-14,5	-16.16	-14.83	-13.54
Déflexions (1/100)		40	24,7	23,6	22,7

**Tableau 16 : Récapitulatif des Résultats du calcul avec Ecoroute pour les nouvelles structures de type 1 :**

Il est constaté qu'aucune des contraintes limites admissibles n'est atteinte lorsqu'on soumet la structure ST33 au chargement issu du trafic .Donc du point de vu technique, cette structure est parfaitement convenable dans le cadre ce projet.

### **STRUCTURES DE TYPES 2 :**

TYPE DE COUCHE	Matériaux	STRUCTURES DE TYPES 2 Valeurs en cm		
		ST1'	ST2'	ST3'
Revêtement	Béton bitumineux 0 / 12	7	7	7
Couche de base	Grave reconstituée 0/31.5	20	20	25
Couche de fondation	Latérite crue CBR >= 80	30	35	35
Partie supérieure des terrassements PST	Traitement à la chaux de l'arase supérieur de la plate-forme	50	50	50
classe Plate-forme PF module du sol (bars)		PF2 1200	PF2 1200	PF2 1200

**Tableau 17 : Structures de types 2 :**

La simulation avec ECOROUTE du trafic sur les différentes structures de type 2 a donné les résultats présentés à l'annexe 2.

La récapitulation de ces résultats se présente comme suit (tableau 18) :

		Limites admissibles	Structures de Types 2		
			ST1'	ST2'	ST3'
Sol de plate-forme	Contraintes verticales (bars)	0,5	0,4	0,35	0,31
	Déformations verticales (E-6 m)	450	355,5	312,9	275,4
Béton bitumineux	Déformations transversales (E-5 m)	-11,6	-16,49	-16,66	-16,86
Déflexions (1/100)		40	37,7	36,5	34,8

**Tableau 18 : Récapitulatif des Résultats du calcul avec Ecoroute pour ST1', ST2', ST3'**

Il apparaît d'après les résultats obtenus qu'aucune des structures de Type 2 (ST1', ST2' ou ST3' ) n'est conforme au projet, parce que même si le sol de plate-forme n'est pas poinçonné, il y'a de forts risques d'apparition de fissurations par traction à la base au niveau de la couche de revêtement en béton bitumineux où la limite de traction admissible est dépassée. Pour parier à ce problème, il est envisagé de renforcer le revêtement par une couche de grave bitume de 8cm (épaisseur minimale technologique), soit ST11' la structure obtenue.

On essaiera bien entendu d'augmenter l'épaisseur de cette couche de renforcement du revêtement en grave bitume si toutefois, il est noté encore la présence de risques de fissurations par traction avec l'épaisseur 8cm.

On aura ainsi obtenu de nouvelles structures de Type 2, soient :

-ST11'(avec 8cm de grave bitume),

- ST22' (avec 10 cm de grave bitume) ,
- ST33'(avec 12cm de grave bitume).

La simulation avec ECOROUTE du trafic sur ces structures a donné les résultats du tableau 19 .

		Limites admissibles	Nouvelles structures de Types 2		
			ST11'	ST22'	ST33'
Sol de plate-forme	Contraintes Verticales NZ (bars)	0,5	0.3	0.28	0.26
	Déformations verticales EZ (E-6 m)	450	271.0	253.6	237.6
Béton bitumineux	Déformations Transversales ET (E-5 m)	-11,6	-0.94	-0.78	-0.88
Grave bitume	Déformations Transversales ET (E-5 m)	-14,5	-15.96	-14.72	-13.49
Déflexions (1/100)		40	32,2	30,9	29,7

**Tableau 19 : Récapitulatif des Résultats du calcul avec Ecoroute pour les nouvelles structures de type 2**

Les contraintes limites admissibles sont globalement respectées au niveau de la structure ST33' et donc, par rapport au critère technique, elle serait adaptée au projet.

Au terme de l'étude de dimensionnement, il a ainsi été retenu l'adoption des deux structures que sont ST33 et ST 33'.

Toutefois, ce ne sera qu'à la fin de l'analyse économique que l'on pourra dire le choix de laquelle de ces deux structures présenterait le plus d'avantage.

### 5.3 : dispositions constructives :

La construction de chaussée sur sols argileux gonflants nécessite le respect d'un certain nombre de dispositions spéciales de construction. En effet, il est apparu qu'une structure de chaussée conçue sur de tels sols, aussi élaborée soit-elle, ne pourrait être durable si certaines dispositions constructives ne sont pas prises en compte lors de sa mise en œuvre.

C'est ainsi qu'il est recommandé de veiller à l'application des dispositions suivantes :

- Durant la phase de terrassement, on devra veiller à mettre hors de l'emprise de la route toutes les racines d'arbre enterrées. En effet, ces racines d'arbre une fois altérées, pourraient constituer des voies d'infiltration superficielle d'eau.
  
- Une attention particulière devra être portée sur la qualité du bitume fluidifié utilisé pour la couche d'imprégnation et d'accrochage. En effet, cette couche doit participer autant que possible à rendre étanche la surface de la structure afin de minimiser les infiltrations d'eau superficielles.
  
- Etant donné que c'est souvent à travers les accotements que se produit l'essentiel des infiltrations d'eau superficielles, il est recommandé d'y augmenter l'épaisseur de la couche d'imprégnation afin de les rendre plus étanches.
  
- Dans le cas des structures de type 2, la couche anti-contaminant doit être constituée par du sable très fin afin que celle-ci ne puisse constituer une zone d'accumulation d'eau, ce qui contribuerait à ramollir la structure. Le choix d'un sable fin se justifie également par la nécessité d'avoir à ce niveau un

matériau inerte pour palier à toutes réactions d'altération qui pourraient être issues du contact entre l'argile gonflant et le matériau de remblai.

- Enfin, on devra porter une attention particulière à la mise en œuvre de chacune des différentes couches de la structure notamment au niveau de la mise en place des matériaux. On veillera également à ce qu'il y ait une bonne adhérence entre les couches afin qu'il ne puisse se produire de phénomènes de glissement.

Chapitre 6 :  
*Analyses économiques.*

## Chapitre 6 : *Analyses économiques*

Elles portent sur l'évaluation sur **un kilomètre** du coût de chacune des variantes ST 33 et ST33' qui ont été retenues suivant leurs performances.

Les éléments de bases utilisés dans les calculs se présentent comme suit :

- béton bitumineux de type BBSG avec une densité égale à 2,51 pour le revêtement ;
- grave bitume avec une densité de 2,53 pour le revêtement ;
- grave reconstituée 0 / 31,5 de basalte évaluée au m<sup>3</sup> mise en œuvre pour la couche de base ;
- latérite crue de CBR 80 pour la couche de fondation ;
- latérite crue de CBR 60 pour le remblai ;
- sable fin de remblai pour la couche anti-contaminant, évalué toujours au m<sup>3</sup> mise en œuvre;
- Purge sur un mètre de profondeur des matériaux argileux gonflants.

L'évaluation du coût de cette purge s'est fait au m<sup>3</sup> de terre décaissée.

Il faudrait ajouter à cela que la largeur de voie considérée dans cette estimation est de **12m** et que l'évaluation du coût unitaire des différents matériaux s'est fait en fonction du coût de leur production, des distances de transports et du coût de leur mise en œuvre au niveau du chantier.

Les résultats sont consignés dans les tableaux récapitulatifs suivants :

VARIANTE 1 (ST 33)

DESIGNATION	QUANTITE	UNITE	PRIX UNITAIRE	PRIX TOTAL
béton bitumineux (BBSG)	2108,4	Tonne	44381	93572900,4
grave bitume	3643	Tonne	37845	137869335
basalte 0 / 31.5 pour couche de base	2400	m3	45538	109291200
latérite crue CBR 80	3600	m3	9178	33040800
latérite crue CBR 60	8400	m3	9000	75600000
Sable fin de remblais	3600	m3	10036	36129600
purge du matériau argileux en place	12000	m3	3076	36912000
			Prix total	= <b>522415835</b>

**Tableau 20 : Evaluation du coût de la variante 1 (ST33)**

VARIANTE 2 (ST 33')

DESIGNATION	QUANTITE	UNITE	PRIX UNITAIRE	PRIX TOTAL
béton bitumineux (BBSG)	2108,4	tonne	44381	93572900,4
grave bitume	3643	tonne	37845	137869335
basalte 0 / 31.5 pour couche de base	2400	m3	45538	109291200
latérite crue CBR 80	3600	m3	9178	33040800
Chaux	351	tonne	525000	184275000
			Prix total =	<b>558049235,4</b>

**Tableau 21 : Evaluation du coût de la variante 2 (ST33')**

Au terme de cette analyse économique, il est constaté que la **variante 1 (ST 33)** présente un léger avantage économique de 6,8 % en valeur relative par rapport à la **variante 2 (ST33')**.

L'observation dans l'immédiat de ce fait nous amène certes à avoir un penchant pour le choix de cette **variante 1(ST 33)**, mais toutefois, toujours dans la recherche de variante à adopter pour un projet de si grande envergure, une plus grande part de pondération devrait être attribuée au critère « **viabilité et rentabilité de l'investissement** ».

Ainsi, même s'il s'était trouvé par exemple que le choix la **variante 1 (ST33)** devait revenir légèrement plus chère par rapport au choix de l'autre variante, il faut dire qu'il présente toutefois plus de sécurité vis à vis de la durabilité de l'infrastructure et donc de la rentabilité de l'investissement.

En effet, hormis les difficultés liées à la mise en œuvre du traitement à la chaux des matériaux argileux trouvés sur place et les dangers encourus par le personnel exécutant ce type d'opération, il se trouve que le comportement à long terme de la couche traitée n'est pas encore parfaitement maîtrisé. De ce fait, une petite erreur d'exécution lors de la mise en œuvre d'un tel traitement peut s'avérer être très néfaste pour la structure.

C'est donc après prise en compte de toutes ces considérations et de l'avantage économique, qu'il est fortement conseillé de militer en faveur du choix de la **variante 1 (ST 33)**.

TYPE DE COUCHE	Matériaux	STRUCTURE ST33 Valeur en cm
Revêtement	Béton bitumineux 0 / 12	7
	Grave bitume 0/25	12
Couche d'imprégnation et d'accrochage	Bitume fluidifié ou cut-back 0 / 1 (1,0 à 1,5 kg /m <sup>2</sup> )	" "
Couche de base	Grave reconstituée 0/31.5	20
Couche de fondation	Latérite crue CBR >= 80	30
Partie supérieure des terrassements PST (matériaux de substitution)	latérite crue CBR>=60	70
	Sable fin anti-contaminant	30
Classe plate-forme  module du sol (bars)		PF3  2000

**Tableau 22 : Structure adoptée.**

## *Conclusions et recommandations*

### *Conclusions et recommandations*

Au terme de cette étude, il a été retenu l'adoption de la structure ST33 qui, de par ses caractéristiques, permet une diffusion des contraintes de chargement selon des niveaux supportables aussi bien par le sol d'infrastructure que par les différentes couches de la superstructure routière.

Cette structure ST33 serait parfaitement identique à celle qui est actuellement mise en exécution sur le tronçon BARGNY-DIANIADIO, autant par rapport aux différentes épaisseurs de couches choisies que par la nature des matériaux utilisés, si ce n'était l'omission de la couche de grave bitume constatée sur cette dernière. En effet sur cette structure en exécution, le revêtement est uniquement constitué par une couche de béton bitumineux de 7cm d'épaisseur et qui vient après la couche d'accrochage. Ainsi, d'après notre étude, cette couche de revêtement devrait être renforcée par une couche de grave bitume de 12 cm. Ceci permettrait non seulement d'augmenter l'épaisseur de la couche de revêtement afin qu'elle puisse supporter sans dommages les contraintes de traction issues du trafic, mais aussi d'éviter le poinçonnement du revêtement mince en béton bitumineux par les graves concassées de la couche de base.

Enfin, l'environnement hydrologique caractérisant le plateau de BARGNY associé à l'instabilité des sols présents dans cette zone, nous amène à faire les recommandations suivantes :

- Une attention particulière devrait être portée sur la qualité du liant hydrocarboné qui sera utilisé pour la couche d'imprégnation et d'accrochage. En effet, cette couche doit non seulement assurer l'adhérence entre la couche de base et le revêtement mais aussi protéger contre l'infiltration des eaux

superficielles. Ainsi, elle devra être appliquée sur les accotements à défaut de pouvoir être substituée à ce niveau par un autre produit qui permettrait de les rendre étanches .

- La question du drainage et de l'évacuation des eaux superficielles doit être prise comme partie intégrante de ce projet de construction. Ainsi, les fossés devront être bien dimensionnés et leurs surfaces imperméabilisées.
- Pour les ouvrages d'art aménagés au niveau des points bas pour l'évacuation des eaux, il faudrait veiller à mettre une bonne protection de talus surtout sur la partie amont.
- Il faudrait éviter toute stagnation d'eau aux abords de l'emprise de la route. On devra procéder donc au remblais de toutes les cuvettes naturelles ou artificielles situées à proximité de la route.
- Egalement, par rapport à la structure qui a été exécutée au niveau du tronçon de route BARGNY-DIAMNIADIO ,la couche de sable de remblai ne pourrait en aucun cas jouer un rôle de drainage puisque l'évacuation des eaux d'infiltration récupérées au niveau cette dite couche se trouverait bloquer par le front imperméable que constitue le matériau argileux entourant la zone de purge. Ainsi, cette couche devrait plutôt être faite avec du sable fin afin qu'elle ne puisse constituer une zone d'accumulation de ces eaux d'infiltration.
- Pour l'enrobé dense ou béton bitumineux, on utilisera de préférence du bitume pur 40/50 qui est plus adapté aux régions tropicales.
- Il faudra veiller à la bonne mise en œuvre de l'ensemble des couches de la structure notamment de la couche de sable fin de 30 cm qui a pour rôle essentiel d'éviter la contamination de la couche de remblai.

Enfin, chacune des étapes de la construction d'une route est essentielle et des précautions particulières devront être prises au moment de sa mise en œuvre parce qu'une méthode de conception aussi élaborée soit-elle, ne pourrait donner de bons résultats après exécution que si la mise en place s'est faite de manière adéquate dans le respect des normes et de certaines dispositions constructives.

Nous ne saurions terminer la rédaction de ce rapport sans pour autant souligner que ce document pourrait également constituer une base de données inestimable dans l'étude du tronçon BARGNY-DIAMNIADIO pour le nouveau projet d'autoroute Aéroport de DIASS-DAKAR.

## *REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES*

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] I.S.T.E.D (Institut des Sciences et des Techniques de l'Environnement pour le Développement (1988)) –Etudes :SOLS ARGILEUX GONFLANTS-Site expérimental de Waza-Maltam .Rapport de synthèse.
- [2] LCPC-SETRA .Fascicule I. Principes généraux (1992)-Réalisation des remblais et des couches de forme.
- [3] LCPC-SETRA .Conception et Dimensionnement des structures de chaussée (1994).
- [4] B.C.E.O.M.-C.E.B.T.P.(Tome 2) Etudes et Construction. Manuel sur les routes dans les routes en zones tropicales et désertiques .
- [5] R.L'HERMINIER (1967)-Centre des Hautes Etudes de la Construction .Mécanique des sols et des chaussées.
- [6] SYLLA I. (1984)-« Argiles gonflantes » de Rufisque .Projet de fin d'études E.P.T.
- [7] GAROFF.G et LEYCURE.P -SCETAUTOROUTE. Manuel de Conception des Chaussées d'Autoroutes .
- [8] Service d'études techniques des routes et Autoroutes (1994). Ecoroute 4-Logiciel de dimensionnement des chaussées .

# *ANNEXES*

## **LISTE DES ANNEXES**

**Annexe 1 : Sols fins .Classe A**

**Annexe 2 : Résultats calcul ECOROUTE**

**Annexe 3 : Spécifications sur les matériaux pour la couche de revêtement**

**Annexe 4 : Résultats des essais géotechniques**

**Annexe 4 a : Résultats des essais géotechniques sur matériaux naturels et traités au ciment**

**Annexe 4 b : Résultats des essais géotechniques sur matériaux traités à la chaux**

**Annexe 4 a : Résultats des essais géotechniques sur matériaux améliorés avec du sable de dune.**

**Annexe 1 :**

**Sols fins .Classe A**

# Classe A

# SOLS FINS

Classement selon la nature					Classement selon l'état hydrique	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe
D <sub>max</sub> ≤ 50mm et tamisat à 80µm > 35 %	A  sols fins	VBS ≤ 2,5 ou I <sub>p</sub> ≤ 12	A <sub>1</sub>  Limon peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	Ces sols changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau, en particulier lorsque leur w <sub>n</sub> est proche de w <sub>OPN</sub> . Le temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est relativement court, mais la perméabilité pouvant varier dans de larges limites selon la granulométrie, la plasticité et la compacité, le temps de réaction peut tout de même varier assez largement. Dans le cas de ces sols fins peu plastiques, il est souvent préférable de les identifier par la valeur de bleu de méthylène VBS, compte tenu de l'imprécision attachée à la mesure de l'Ip.	IPI ≤ 3 ou w <sub>n</sub> ≥ 1,25 w <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> th
					3 < IPI ≤ 8 ou 1,10 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,25 w <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> h
					8 < IPI ≤ 25 ou 0,9 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,10 w <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> m
					0,7 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 0,9 w <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> s
					w <sub>n</sub> < 0,7 w <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> ts
		12 < I <sub>p</sub> ≤ 25 ou 2,5 < VBS ≤ 6	A <sub>2</sub>  Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...	Le caractère moyen des sols de cette sous-classe fait qu'ils se prêtent à l'emploi de la plus large gamme d'outils de terrassement (si la teneur en eau n'est pas trop élevée). Dès que l'Ip atteint des valeurs ≥ 12, il constitue le critère d'identification le mieux adapté.	IPI ≤ 2 ou Ic ≤ 0,9 ou w <sub>n</sub> ≥ 1,3 w <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> th
					2 < IPI ≤ 5 ou 0,9 < Ic ≤ 1,05 ou 1,1 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,3 w <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> h
					5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < Ic ≤ 1,2 ou 0,9 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,1 w <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> m
					1,2 < Ic ≤ 1,4 ou 0,7 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 0,9 w <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> s
					Ic > 1,4 ou w <sub>n</sub> < 0,7 w <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> ts
		25 < I <sub>p</sub> ≤ 40 ou 6 < VBS ≤ 8	A <sub>3</sub>  Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...	Ces sols sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible, et collants ou glissants à l'état humide, d'où difficulté de mise en œuvre sur chantier (et de manipulation en laboratoire). Leur perméabilité très réduite rend leurs variations de teneur en eau très lentes, en place. Une augmentation de teneur en eau assez importante est nécessaire pour changer notablement leur consistance.	IPI ≤ 10 ou Ic ≤ 0,8 ou w <sub>n</sub> ≥ 1,4 w <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> th
					1 < IPI ≤ 3 ou 0,8 < Ic ≤ 1,05 ou 1,2 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,4 w <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> h
3 < IPI ≤ 10 ou 1 < Ic ≤ 1,15 ou 0,9 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,2 w <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> m					
1,15 < Ic ≤ 1,3 ou 0,7 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 0,9 w <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> s					
Ic > 1,3 ou w <sub>n</sub> < 0,7 w <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> ts					
I <sub>p</sub> > 40 ou VBS > 8	A <sub>4</sub>  Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	Ces sols sont très cohérents et presque imperméables : s'ils changent de teneur en eau, c'est extrêmement lentement et avec d'importants retraits ou gonflements. Leur emploi en remblai ou en couche de forme n'est normalement pas envisagé mais il peut éventuellement être décidé à l'appui d'une étude spécifique s'appuyant notamment sur des essais en vraie grandeur.	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique.			
			A <sub>4</sub> th			
			A <sub>4</sub> h			
			A <sub>4</sub> s			

12

**Annexe 2 :**

**Résultats calcul ECOROUTE**

```

COLLE *****
H =35.00 * 1.35 * 34.13 E-5 * 0.16 * -3.11 E-5
E = 4.0E+03 * * * * *
EE = 0.25 * 0.43 * 13.86 E-5 * -0.22 * -6.51 E-5
COLLE *****
H ∞ * 0.43 * 22.78 E-5 * -0.04 * -6.51 E-5
E = 2.0E+03 * * * * *
EE = 0.25 * * * * *
*****

```

```

*****
* CHAUSSEE * NT ROUE * ET ROUE * NT axe * ET axe
* * * * *
* H = 7.00 * 9.69 * 25.86 E-5 * 2.61 * 21.33 E-5
* E = 1.3E+04 * * * * *
* EE = 0.40 * -0.11 * -17.51 E-5 * 0.71 * -10.72 E-5
* COLLE *****
* H =20.00 * 1.31 * -17.51 E-5 * 0.52 * -10.72 E-5
* E = 6.0E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * -0.38 * -14.32 E-5 * -0.37 * -14.93 E-5
** COLLE *****
* H =35.00 * -0.21 * -14.32 E-5 * -0.22 * -14.93 E-5
* E = 4.0E+03 * * * * *
* EE = 0.25 * -0.26 * -7.71 E-5 * -0.28 * -8.28 E-5
* COLLE *****
* H = ∞ * -0.06 * -7.71 E-5 * -0.07 * -8.28 E-5
* E = 2.0E+03 * * * * *
* EE = 0.25 * * * * *
*****

```

ST3

```

*****
* CHAUSSEE * NZ ROUE * EZ ROUE * NR ROUE * ER ROUE
* * * * *
* H = 7.00 * 6.62 * -6.40 E-5 * 9.08 * 20.13 E-5
* E = 1.3E+04 * * * * *
* EE = 0.40 * 5.36 * 41.44 E-5 * 0.06 * -15.63 E-5
* COLLE *****
* H =25.00 * 5.36 * 73.62 E-5 * 1.40 * -15.63 E-5
* E = 6.0E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * 1.17 * 22.22 E-5 * -0.12 * -6.80 E-5
* COLLE *****
* H =35.00 * 1.17 * 30.66 E-5 * -0.03 * -6.80 E-5
* E = 4.0E+03 * * * * *
* EE = 0.25 * 0.35 * 11.17 E-5 * -0.17 * -5.03 E-5
* COLLE *****
* H = ∞ * 0.35 * 18.40 E-5 * -0.03 * -5.03 E-5
* E = 2.0E+03 * * * * *
* EE = 0.25 * * * * *
*****
* * * * *
* CHARGE * JUMELAGE * R = 12.50 * P = 6.62 *
* DEFLEXION * * W = 27.2 mm/100 *
*****

```

```

EE = 0.35 * 0.93 * 18.15 E-5 * -0.15 * -5.94 E-5
COLLE *****
* H =30.00 * 0.93 * 24.57 E-5 * -0.05 * -5.94 E-5
E = 4.0E+03 * * * * *
EE = 0.25 * 0.34 * 11.09 E-5 * -0.18 * -5.10 E-5
** COLLE *****
H = oo * 0.34 * 18.20 E-5 * -0.03 * -5.10 E-5
E = 2.0E+03 * * * * *
EE = 0.25 * * * * *
*****
CHARGE * JUMELAGE * R = 12.50 * P = 6.62 *
DEFLEXION * * W = 24.7 mm/100 *
*****

```

```

*****
CHAUSSEE * NZ axe * EZ axe * NR axe * ER axe
*****
* H = 7.00 * -0.00 * -11.69 E-5 * 1.17 * 0.92 E-5
E = 1.3E+04 * * * * *
EE = 0.40 * 0.79 * -3.90 E-5 * 2.06 * 9.73 E-5
** COLLE *****
H = 8.00 * 0.79 * -4.89 E-5 * 2.88 * 9.73 E-5
E = 2.0E+04 * * * * *
* EE = 0.40 * 1.67 * 9.55 E-5 * 1.11 * 5.64 E-5
** COLLE *****
H =20.00 * 1.67 * 21.88 E-5 * 0.95 * 5.64 E-5
E = 6.0E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * 0.97 * 18.76 E-5 * -0.11 * -5.44 E-5
COLLE *****
H =30.00 * 0.97 * 25.56 E-5 * -0.02 * -5.44 E-5
* E = 4.0E+03 * * * * *
EE = 0.25 * 0.37 * 12.14 E-5 * -0.21 * -5.97 E-5
COLLE *****
* H oo * 0.37 * 19.87 E-5 * -0.04 * -5.97 E-5
E = 2.0E+03 * * * * *
EE = 0.25 * * * * *
*****

```

```

*****
CHAUSSEE * NT ROUE * ET ROUE * NT axe * ET axe
*****
* H = 7.00 * 7.67 * 16.58 E-5 * 2.62 * 16.59 E-5
* E = 1.3E+04 * * * * *
EE = 0.40 * 3.30 * -1.60 E-5 * 1.19 * 0.38 E-5
* COLLE *****
* H = 8.00 * 3.10 * -1.60 E-5 * 1.54 * 0.38 E-5
E = 2.0E+04 * * * * *
EE = 0.40 * -3.09 * -16.16 E-5 * -1.71 * -14.12 E-5
** COLLE *****
H =20.00 * 0.11 * -16.16 E-5 * 0.07 * -14.12 E-5
E = 6.0E+03 * * * * *
EE = 0.35 * -0.32 * -9.91 E-5 * -0.34 * -10.73 E-5
** COLLE *****
H =30.00 * -0.18 * -9.91 E-5 * -0.19 * -10.73 E-5
E = 4.0E+03 * * * * *
* EE = 0.25 * -0.23 * -6.84 E-5 * -0.25 * -7.29 E-5
COLLE *****
H = oo * -0.06 * -6.84 E-5 * -0.06 * -7.29 E-5
* E = 2.0E+03 * * * * *
EE = 0.25 * * * * *

```

```

*****
CHAUSSÉE * NZ axe * EZ axe * NR axe * ER axe
* * * * *
H = 7.00 * -0.00 * -5.99 E-5 * -0.52 * -11.53 E-5
E = 1.3E+04 * * * * *
EE = 0.40 * 1.23 * -5.08 E-5 * 4.03 * 25.08 E-5
COLLE *****
H = 25.00 * 1.23 * 5.08 E-5 * 2.12 * 25.08 E-5
E = 6.0E+03 * * * * *
EE = 0.35 * 1.17 * 21.42 E-5 * 0.01 * -4.60 E-5
COLLE *****
H = 35.00 * 1.17 * 30.06 E-5 * 0.06 * -4.60 E-5
E = 4.0E+03 * * * * *
EE = 0.25 * 0.38 * 12.25 E-5 * -0.20 * -5.90 E-5
COLLE *****
H = ∞ * 0.38 * 20.10 E-5 * -0.04 * -5.90 E-5
E = 2.0E+03 * * * * *
EE = 0.25 * * * * *
*****

```

```

*****
CHAUSSÉE * NT ROUE * ET ROUE * NT axe * ET axe
* * * * *
H = 7.00 * 9.54 * 25.10 E-5 * 2.46 * 20.50 E-5
E = 1.3E+04 * * * * *
EE = 0.40 * -0.12 * -17.65 E-5 * 0.69 * -10.87 E-5
COLLE *****
H = 25.00 * 1.31 * -17.65 E-5 * 0.52 * -10.87 E-5
E = 6.0E+03 * * * * *
EE = 0.35 * -0.34 * -11.83 E-5 * -0.35 * -12.69 E-5
COLLE *****
H = 35.00 * -0.19 * -11.83 E-5 * -0.20 * -12.69 E-5
E = 4.0E+03 * * * * *
EE = 0.25 * -0.23 * -6.81 E-5 * -0.25 * -7.27 E-5
COLLE *****
H = ∞ * -0.06 * -6.81 E-5 * -0.06 * -7.27 E-5
E = 2.0E+03 * * * * *
EE = 0.25 * * * * *
*****

```

ST11

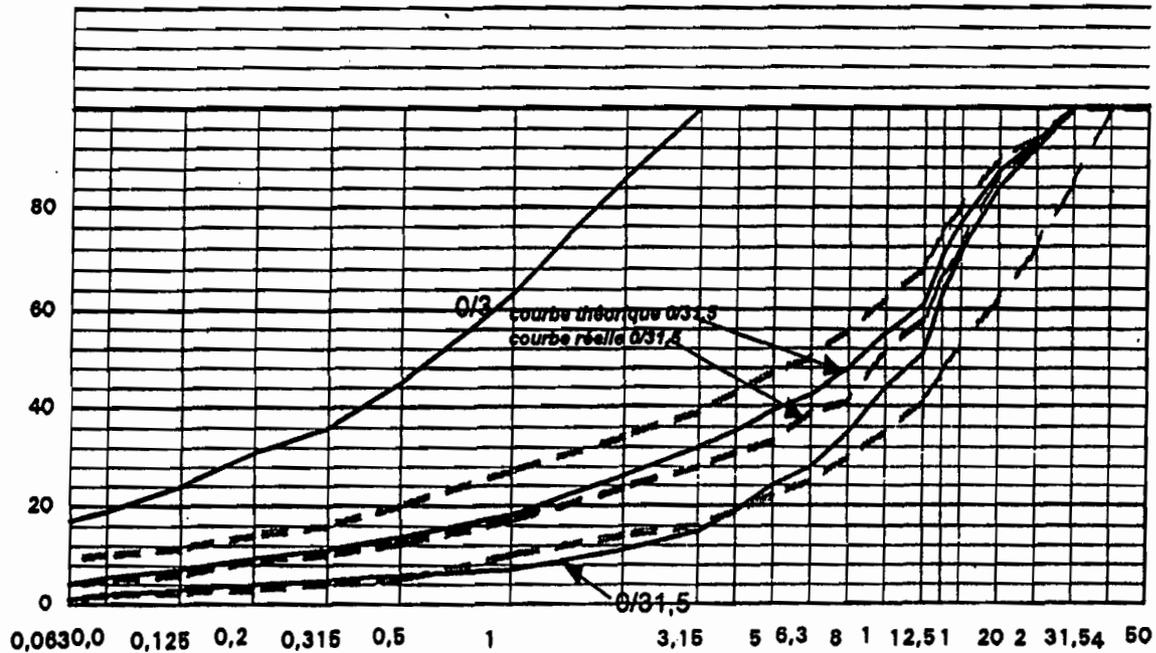
```

*****
CHAUSSÉE * NZ ROUE * EZ ROUE * NR ROUE * ER ROUE
* * * * *
H = 7.00 * 6.62 * 5.30 E-5 * 7.16 * 11.10 E-5
E = 1.3E+04 * * * * *
EE = 0.40 * 5.52 * 22.23 E-5 * 3.26 * -2.04 E-5
COLLE *****
H = 8.00 * 5.52 * 15.30 E-5 * 3.04 * -2.04 E-5
E = 2.0E+04 * * * * *
EE = 0.40 * 2.76 * 24.75 E-5 * -2.40 * -11.32 E-5
COLLE *****
H = 20.00 * 2.76 * 43.44 E-5 * 0.32 * -11.32 E-5
E = 6.0E+03 * * * * *

```

TAMIS mm	0/31,5	0/3	fuseau 0/31,5		courbe réelle	courbe mélange
			min	max.		
50						100,0
40						100,0
31,5	100,0		85,0	100,0	100,0	100,0
25	92,0		72,0	94,0	92,0	93,6
20	84,0		62,0	90,0	87,0	87,2
16	71,0		53,0	80,0	72,0	76,8
14	63,0		47,0	75,0	66,0	70,4
12,5	51,0		41,0	68,0	58,0	60,8
10	44,0		35,0	62,0	52,0	55,2
8	35,0		30,0	56,0	41,0	48,0
6,3	28,0		25,0	50,0	39,0	42,4
5	24,0		22,0	47,0	33,0	39,2
4	19,0	100,0	19,0	43,0	31,0	35,2
3,15	15,0	100,0	16,0	39,0	28,0	32,0
2	11,0	86,0	14,0	34,0	23,5	26,0
1	7,0	63,0	10,0	27,0	17,0	18,2
0,500	6,0	45,0	5,0	20,0	12,5	13,8
0,315	5,0	36,0	4,0	16,0	10,0	11,2
0,200	4,0	31,0	3,0	14,0	9,0	9,4
0,125	3,0	24,0	2,5	11,5	6,0	7,2
0,080	2,0	19,0	2,0	10,0	5,0	5,4
0,063	1,0	17,0	1,0	9,5	4,0	4,2
%	80	20				100
MVR	2,800	2,894				2,818

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE



**Annexe 4 :**  
**Résultats des essais géotechniques**

## **Annexe 4 a :**

**Résultats des essais géotechniques sur  
matériaux naturels et traités au ciment**

JLS-GEOT.

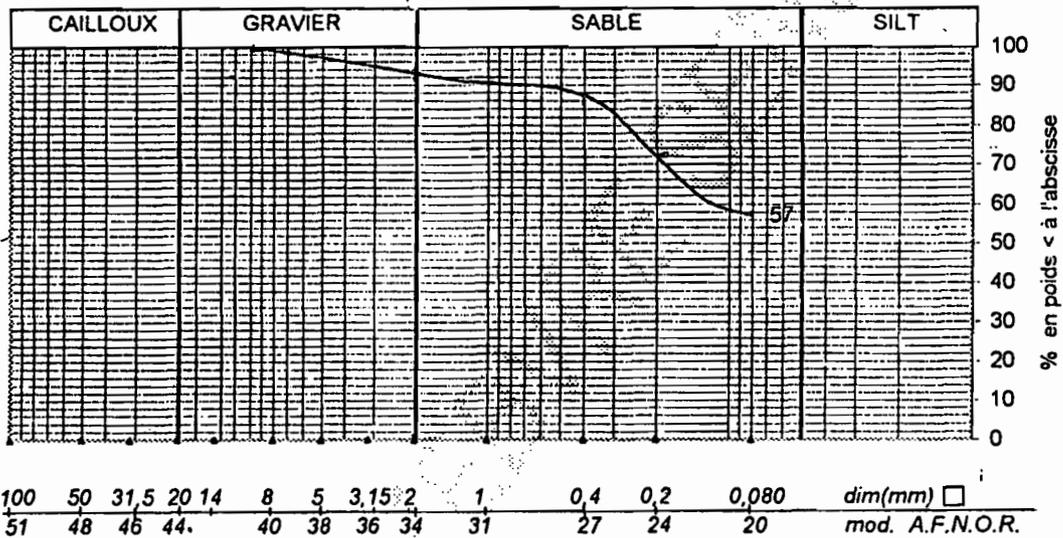
# ESSAI D'IDENTIFICATION N°

MELANGE N°1

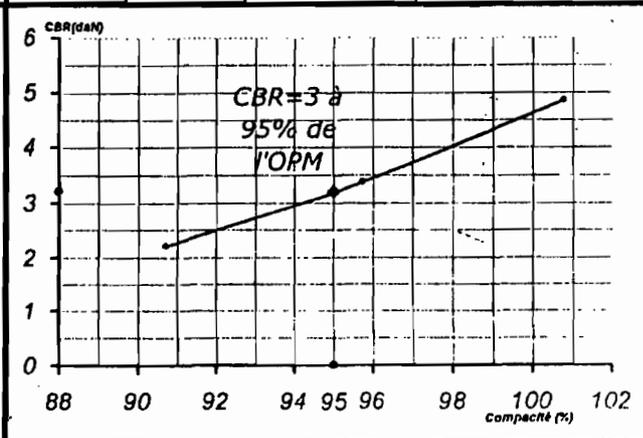
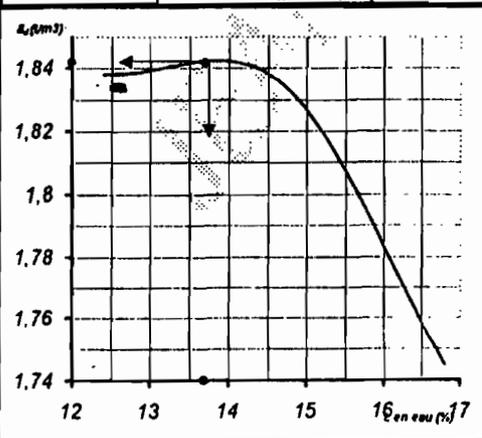
ROUTE : ..... Ch167 ..... DATE : ..... 20/11/00 .....  
 TRONÇON : .... Bargny-Diam Niadio .....  
 LIEU : ... 5,5... 3,5 .....  
 NATURE : sable argileux noir clair + concrétions calcaireuses + 0% de ciment

Echantillon	Couche étudiée	LIMITES D'ATTERBERG			VBS	Classification
		$W_L$	$W_P$	$I_P$		
1	Avant CBR	58	30	28		
2	Après CBR					

## ANALYSE GRANULOMETRIQUE



ESSAI PROCTOR			ESSAI CBR (après 96 heures d'imbibition)			
$W_{opm}$	$\delta_{dmax}$	$\delta_H$	N. cps.	$\delta_d$	$W_{sat}$	Gonflement
13,7	1,842	2,094	55	1,857	16,3	
			25	1,764	21,8	2,23
			10	1,671	23,8	



JLS-GEOT.

# ESSAI D'IDENTIFICATION N°

MELANGE N°1

ROUTE : ..... Ch167..... DATE : ..... 27/11/00.....

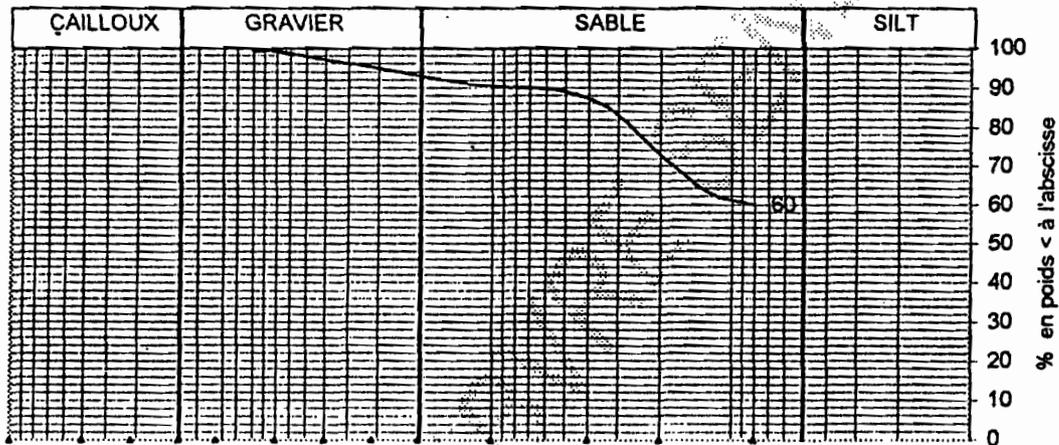
TRONÇON : ... Bargny-Diam Niadio.....

LIÉU : ..... 5,5...et...3,5.....

NATURE : sable argileux noir clair avec concrétions calcaires + 3% de ciment

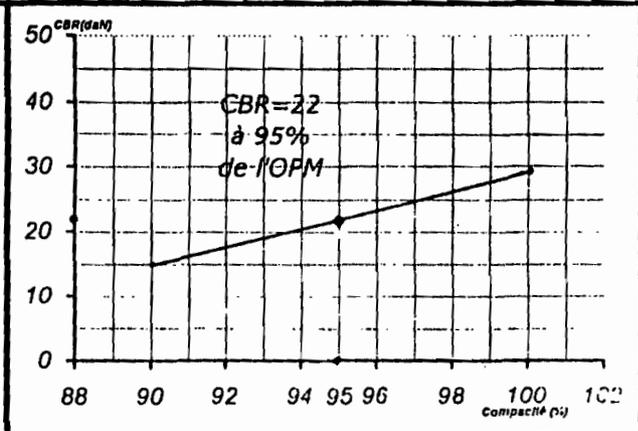
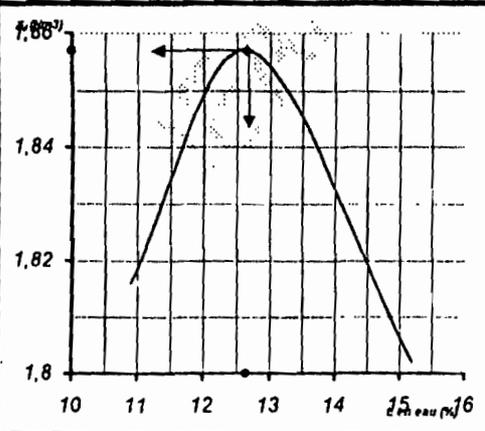
Echantillon	Couche étudiée	LIMITES D'ATTERBERG			ES	Classification
		$W_L$	$W_P$	$I_P$		
1	Avant CBR	36	21	15		
2	Après CBR					

## ANALYSE GRANULOMETRIQUE



100 50 31,5 20 14 8 5 3,15 2 1 0,4 0,2 0,080 dim(mm)   
 51 48 46 44 40 38 36 34 31 27 24 20 mod. A.F.N.O.R.

ESSAI PROCTOR			ESSAI CBR (après 96 heures d'imbibition)			
$W_{opt}$	$\delta_{dmax}$	$\delta_H$	N. cps.	$\delta_d$	$W_{sat}$	Gonflement
12,7	1,857	2,092	55	1,858	13,9	
			25	1,765	18,4	0,12
			10	1,673	21,6	



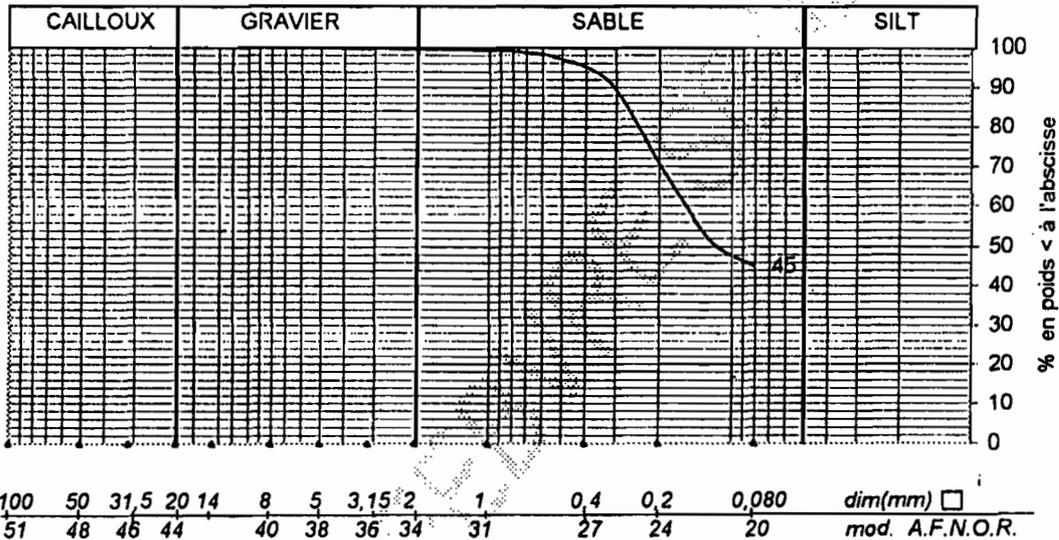
JLS-GEOT.

## ESSAI D'IDENTIFICATION N° MELANGE N°3

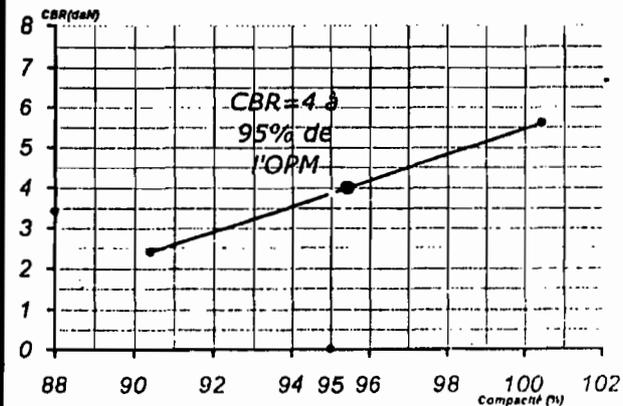
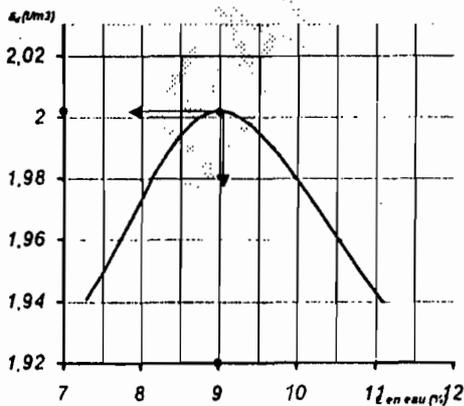
ROUTE : ..... Ch167 ..... DATE : ..... 20/11/00 .....  
 TRONÇON : ... Bargny-Diam Niadio .....  
 LIEU : ... pk. 4,5 .....  
 NATURE : sable argileux noir clair avec cailloux de calcaire + 0% de ciment

Echantillon	Couche étudiée	LIMITES D'ATTERBERG			VBS	Classification
		$W_L$	$W_P$	$I_P$		
1	Avant CBR	38	18	20		
2	Après CBR					

### ANALYSE GRANULOMETRIQUE



ESSAI PROCTOR			ESSAI CBR (après 96 heures d'imbibition)			
$W_{opt}$	$\delta_{dmax}$	$\delta_H$	N. cps.	$\delta_d$	$W_{sat}$	Gonflement
9,0	2,002	2,182	55	2,011	13,1	
			25	1,911	14,8	3,43
			10	1,810	19,3	



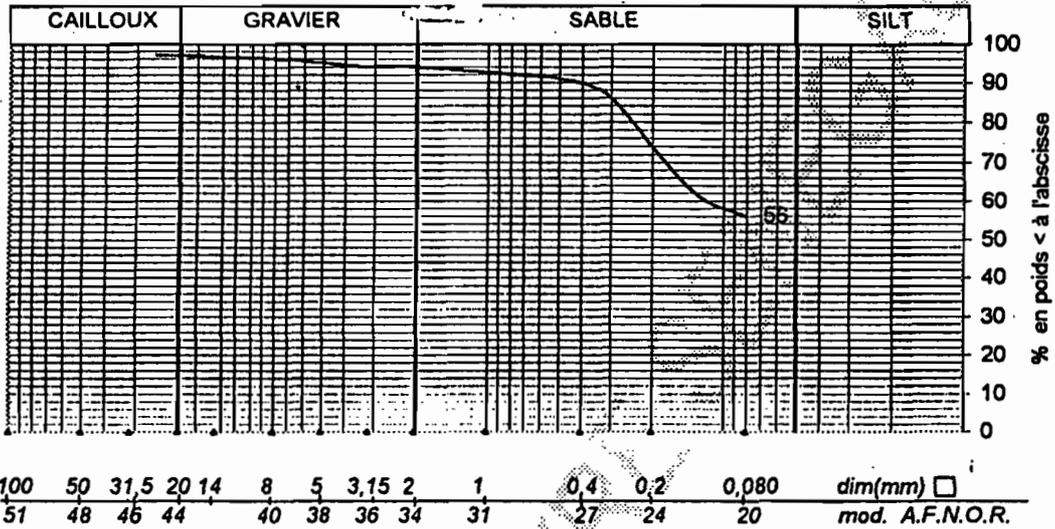
JLS-GEOT.

## ESSAI D'IDENTIFICATION N° MELANGE N°7

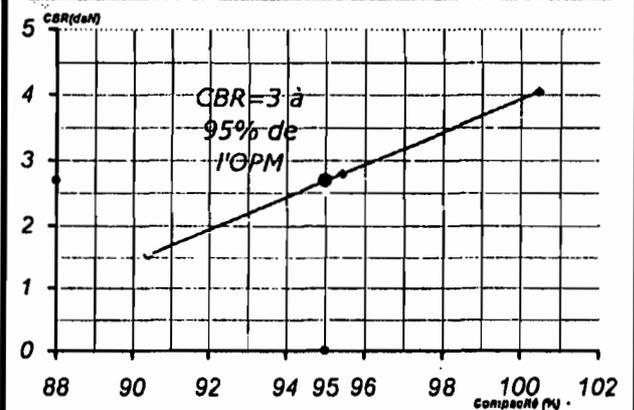
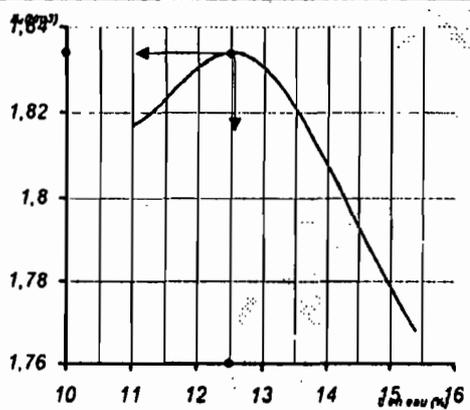
ROUTE : ..... Ch167..... DATE : ..... 25/11/00.....  
 TRONÇON : ... Bargny-Diam Niadio.....  
 LIEU : ... pk..2.....  
 NATURE : sable argileux noir foncé avec cailloux de calcaire + 0% de ciment

Echantillon	Couche étudiée	LIMITES D'ATTERBERG			VBS	Classification
		W <sub>L</sub>	W <sub>P</sub>	I <sub>P</sub>		
1	Avant CBR	51	24	27		
2	Après CBR					

### ANALYSE GRANULOMETRIQUE



ESSAI PROCTOR			ESSAI CBR (après 96 heures d'imbibition)			
W <sub>opm</sub>	δ <sub>dmax</sub>	δ <sub>H</sub>	N. cps.	δ <sub>d</sub>	W <sub>sal</sub>	Gonflement
12,5	1,834	2,063	55	1,843	18,7	
			25	1,750	19,0	4,34
			10	1,658	24,3	



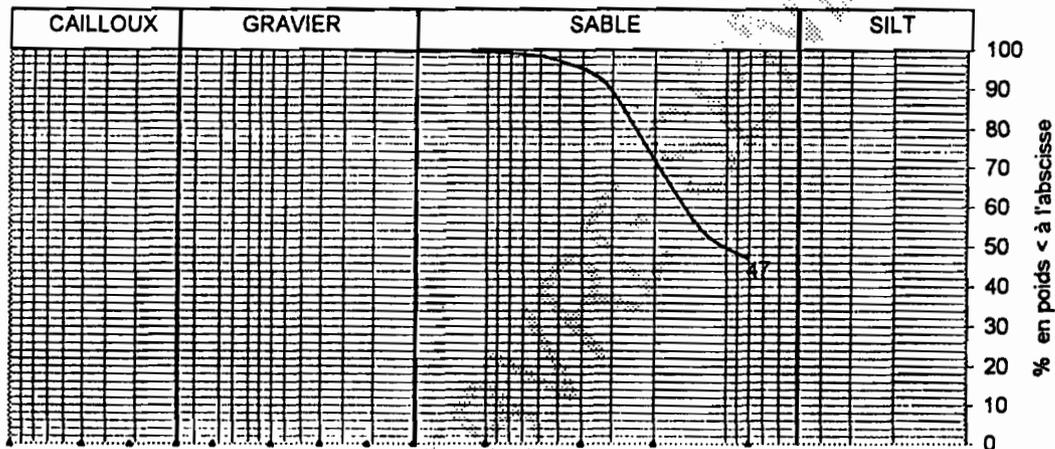
JLS-GEOT.

## ESSAI D'IDENTIFICATION MELANGE N°3

ROUTE : .....Ch167..... DATE:..... 02/04/01.....  
 TRONÇON : ...Bargny-Niadio.....  
 PK : .....5,0.....  
 NATURE : sable argileux noir clair + cailloux de calcaire+ 3% ciment

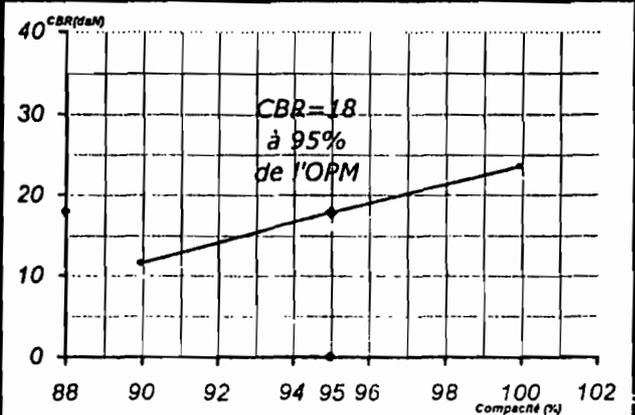
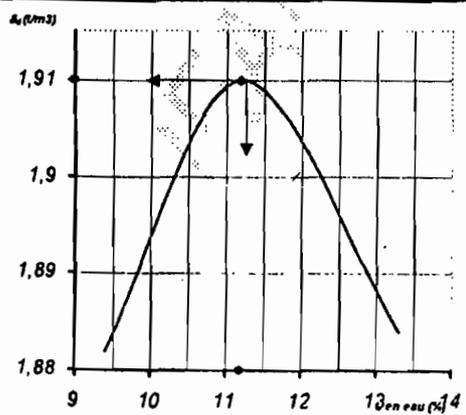
Echantillon	Couche étudiée	LIMITES D'ATTERBERG			E.S.	Classification
		$W_L$	$W_P$	$I_P$		
1	Avant CBR	35	22	13		
2	Après CBR					

### ANALYSE GRANULOMETRIQUE



100 50 31,5 20 14 8 5 3,15 2 1 0,4 0,2 0,080 dim(mm)   
 51 48 46 44 40 38 36 34 31 27 24 20 mod. A.F.N.O.R.

ESSAI PROCTOR			ESSAI CBR (après 96 heures d'imbibition)			
$W_{opm}$	$\delta_{dmax}$	$\delta_H$	N. cps.	$\delta_d$	$W_{sat}$	Gonflement
11,2	1,910	2,124	55	1,909	11,9	
			25	1,813	14,3	0,071
			10	1,718	16,5	



JLS-GEOT.

## ESSAI D'IDENTIFICATION N°

MELANGE N°9

ROUTE : ..... Ch167.....

DATE : ..... 27/11/00.....

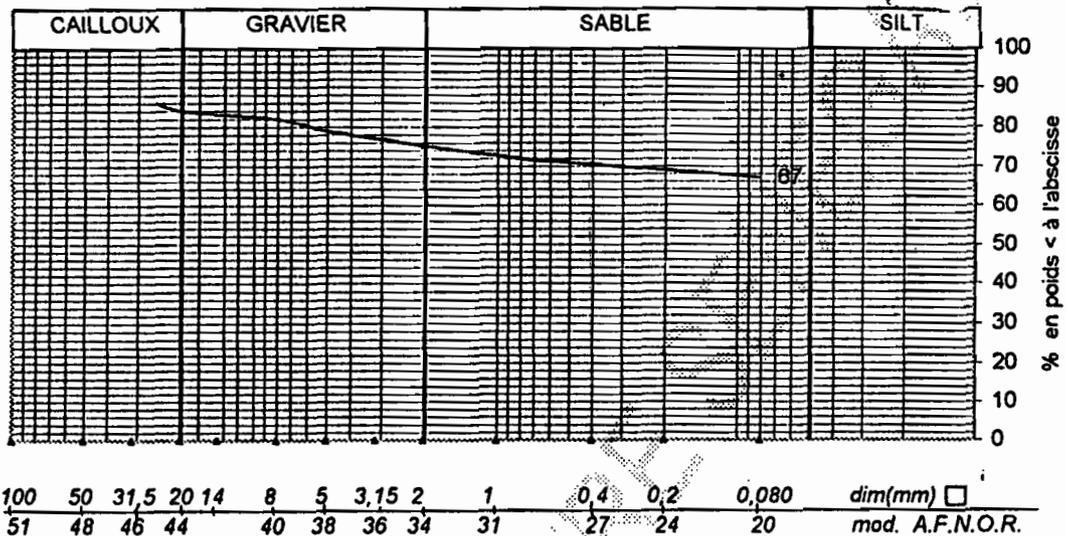
TRONÇON : ... Bargny-Diam Niadio.....

LIEU : ... pk..1.....

NATURE : marne calcaire altérée+ 0% de ciment

Echantillon	Couche étudiée	LIMITES D'ATTERBERG			VBS	Classification
		$W_L$	$W_P$	$I_P$		
1	Avant CBR	112	47	65		
2	Après CBR					

### ANALYSE GRANULOMETRIQUE

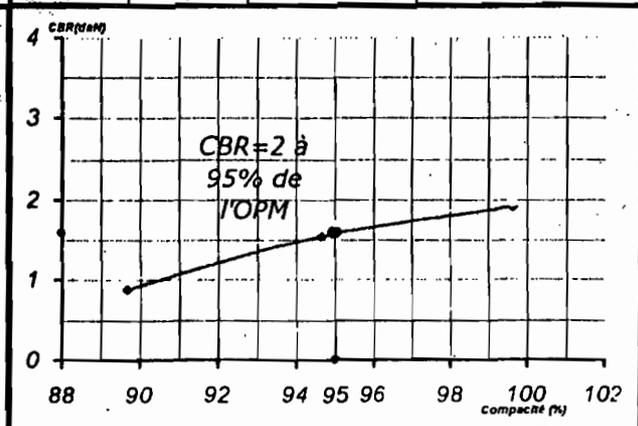
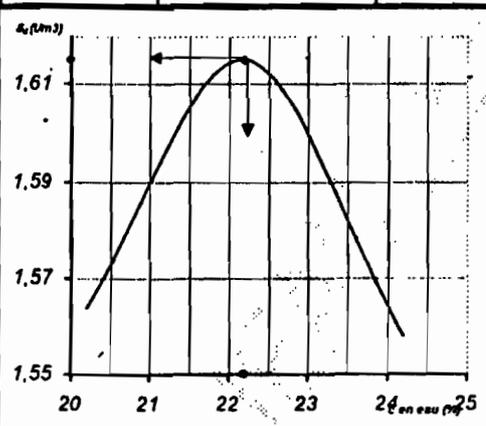


#### ESSAI PROCTOR

$W_{opm}$	$\delta_{dmax}$	$\delta_H$
22,2	1,615	1,974

#### ESSAI CBR (après 96 heures d'imbibition)

N. cps.	$\delta_d$	$W_{sat}$	Gonflement
55	1,609	30,9	
25	1,529	37,0	9,61
10	1,448	45,8	



JLS-GEOT.

## ESSAI D'IDENTIFICATION MELANGE N° 9

ROUTE : .....Ch167.....

DATE : ..... 03/04/01.....

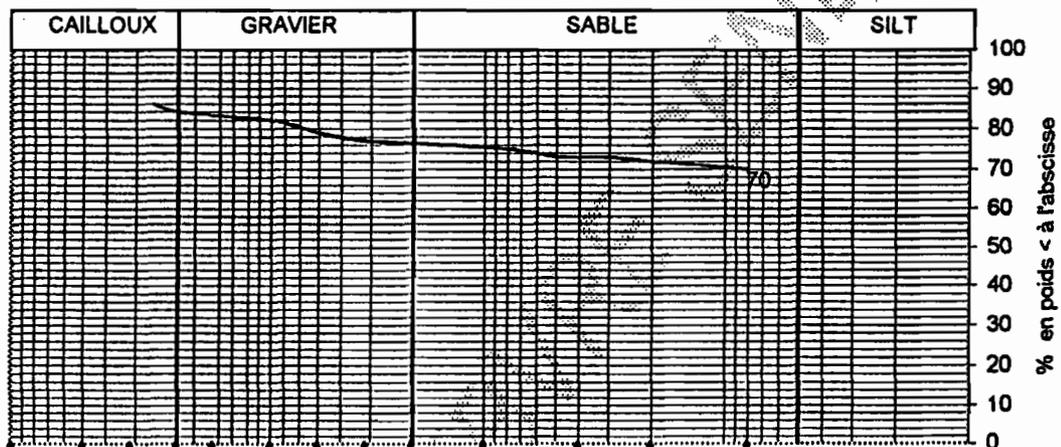
TRONÇON : ...Bargny-Niadio.....

PK : .....1,0.....

NATURE : marne calcaire altérée+ 3% ciment

Echantillon	Couche étudiée	LIMITES D'ATTERBERG			E.S.	Classification
		$W_L$	$W_P$	$I_P$		
1	Avant CBR	200	73	127		
2	Après CBR					

### ANALYSE GRANULOMETRIQUE

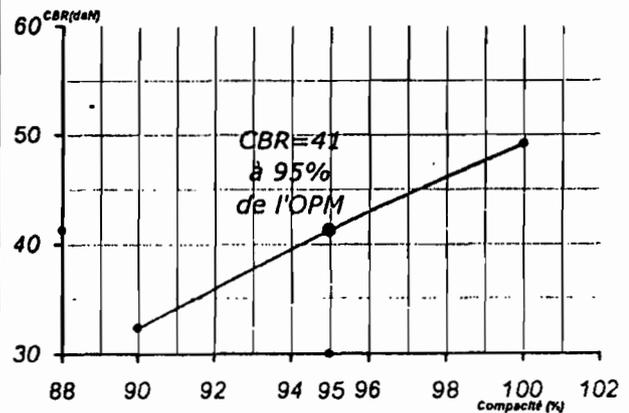


100 50 31,5 20 14 8 5 3,15 2 1 0,4 0,2 0,080 dim(mm)   
 51 48 46 44 40 38 36 34 31 27 24 20 mod. A.F.N.O.R.

#### ESSAI PROCTOR

#### ESSAI CBR (après 96 heures d'imbibition)

$W_{opm}$	$\delta_{dmax}$	$\delta_H$	N. cps.	$\delta_d$	$W_{sal}$	Gonflement
25,5	1,477	1,854	55	1,477	32,5	
			25	1,403	34,6	0,559
			10	1,329	37,2	



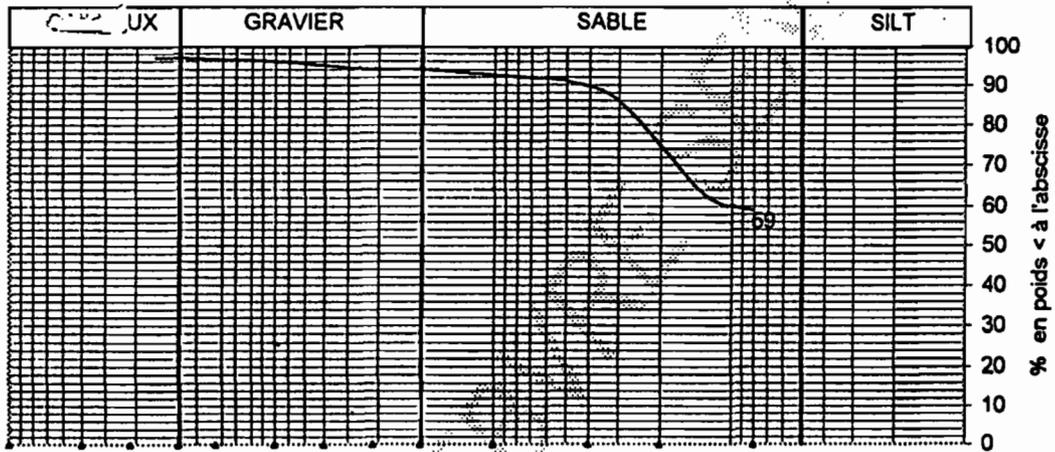
JLS-GEOT.

## ESSAI D'IDENTIFICATION MELANGE N°7

ROUTE : ..... Ch167 ..... DATE : ..... 31/03/01 .....  
 TRONÇON : ... Bargny-Niadio .....  
 PK : ..... 2,0 .....  
 NATURE : sable argileux noir foncé + cailloux de calcaire + 3% ciment

Echantillon	Couche étudiée	LIMITES D'ATTERBERG			E.S.	Classification
		$W_L$	$W_P$	$I_P$		
1	Avant CBR	46	31	15		
2	Après CBR					

### ANALYSE GRANULOMETRIQUE

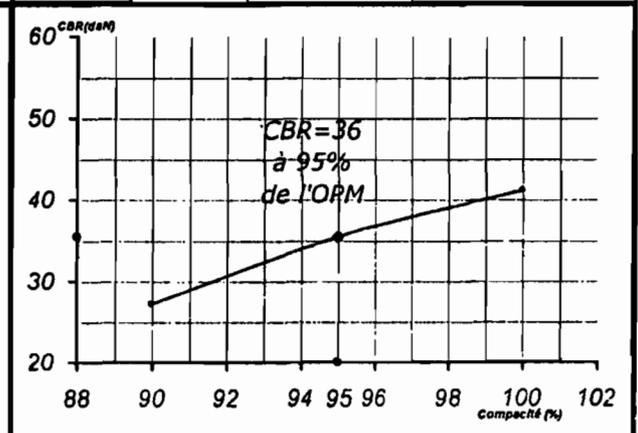
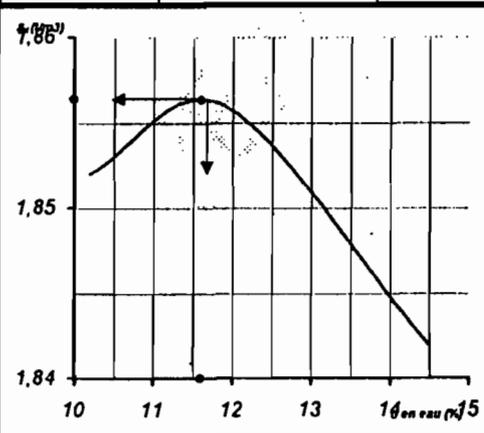


100	50	31,5	20	14	8	5	3,15	2	1	0,4	0,2	0,080	dim(mm)	<input type="checkbox"/>
51	48	46	44		40	38	36	34	31	27	24	20	mod. A.F.N.O.R.	

#### ESSAI PROCTOR

#### ESSAI CBR (après 96 heures d'imbibition)

$W_{opm}$	$\delta_{dmax}$	$\delta_H$	N. cps.	$\delta_d$	$W_{sat}$	Gonflement
11,6	1,856	2,072	55	1,856	14,9	
			25	1,763	17,1	0,063
			10	1,671	19,4	



**Annexe 4 b :**  
**Résultats des essais géotechniques sur**  
**matériaux traités à la chaux**

## ESSAI PROCTOR

chantier: BARGNY-DIAMNIADIO  
 Date de prélèvement: 20/03/02  
 Nature: Sable argileux+3% de chaux  
 Lieu:

Date de l'essai:  
 Echantillon:  
 Opérateur:

### MOULAGE

p. tage d'eau ajoutée	4%	6%	8%	10%	
Poids de mat. humide	1863	1953	1991	1979	
volume du moule	948	948	948	948	
Densité humide	1.96	2.06	2.1	2.087	
Densité sèche	1.85	1.91	1.91	1.866	
Teneur en eau					
n tare	61	12	173	203	
P. total humide	649.9	667.0	697.1	750.1	
P. total sec	623.9	631.5	652.4	692.7	
Poids de l'eau	25.6	35.5	44.7	57.4	
Poids de la tare	188.5	181.9	203.6	206.6	
Poids de mat. sec	435.4	449.6	448.8	486.1	
Teneur en eau	5.9	7.8	9.9	11.8	
Teneur en eau OPT.	8.7%				
Densité humide OPT	2.087				
Densité sèche OPT	1.92				

# ESSAI PROCTOR

chantier: BARGNY-DIAMNIADIO Date de l'essai:  
 Date de prélèvement: 20/03/02 Echantillon:  
 Nature: Marne calcaire+3% de chaux Opérateur:  
 Lieu:

## MOULAGE

p. tagé d'eau ajoutée	12%	14%	16%	18%	
Poids de mat. humide	1.62	1.68	1.727	1.735	
volume du moule	948	948	948	948	
Densité humide	1.7	1.77	1.82	1.83	
Densité sèche	1.45	1.477	1.48	1.46	
<b>Teneur en eau</b>					
n tare	200	318	9	88	
P. total humide	530.6	646.2	538.5	553.8	
P. total sec	478.3	573.7	471.6	479.5	
Poids de l'eau	52.3	72.5	66.9	74.3	
Poids de la tare	180	210.4	181.2	179.5	
Poids de mat. sec	297	363.3	290.4	299.7	
Teneur en eau	17.5	19.9	23	24.7	
Teneur en eau OPT.	21.3%				
Densité humide OPT	1.8				
Densité sèche OPT	1.49				

# C.B.R

Date de prélèvement: 20-03-02

Date: 23/04/02

Echantillon

nature: Sable argileux+3% de chaux

Teneur en eau										
				AVANT			APRES			
Moule n°	9		D3							
à réaliser	8.7	12	13							
Grande dame	OUI	OUI	OUI	N° de la tare	318			9		
Petite dame	/			Ph +Tare	518.8			633.4	/	
nbre de couches	5			Ps +Tare	494.2			583.9		
nbre de coups	25			Tare	207.5			181.2		
Poids total humide	10.112			Poids eau	24.6			49.5		
Tare du moule	5600			Poids mat. sec	286.7			402.7		
Poids mat. Humide	4512			w	8.5			12.2		
volume du moule	2276			moyenne		8.5		12.2		
DH	1.982									
DS	1.826									
C %	95.1									
<b>ANNEAU 50 KN</b>				<b>3 jours à l'air libre et 4 jours d'imbition dans l'eau</b>						
Profondeur(m)	Lecture (1/100mm)			Heure	Comparateur			Gonflement		
0.25	35			Date	55	25	10	55	25	10
0.5	71			06/04/02						
0.75	105									
1	148									
1.5	235									
2	305									
2.5	362			10/06/02		5000			0.02%	
3	395			Poids Final moulage						
4	448									
5	475									
6										
					55	25	10			
					10.400					
<b>CBR à 95% de l'OPM = 86</b>										

# C.B.R

Date de prélèvement: 20-03-02

Date: 23/04/02  
 Echantillon:  
 nature: Marnes calcaires+3% de chaux

				Teneur en eau							
Moule n°	10	9	D3	AVANT			APRES				
à réaliser	21 3	12	13	N° de la tare	200			200			
Grande dame	OUI	OUI	OUI	Ph +Tare	499.1			600			
Petite dame	/			Ps +Tare	443.7			502.8			
nbre de couches	5			Tare	181.0			181.0			
nbre de coups	25			Poids eau	55.4			97.7			
Poids total humide	8.88			Poids mat. sec	262.7			321.8			
Tare du moule	5.00			w	21.0			30.3			
Poids mat. Humide	3.88			moyenne		21.0			30.3		
volume du moule	2.261										
DH	1.716										
DS	1.418										
C %	95.1										
<b>ANNEAU 50 KN</b>				<b>3 jours à l'air libre et 4 jours d'imbition dans l'eau</b>							
Enfoncement(m)	Lecture (1/100mm)			Heure	Comparateur			Gonflement			
0.25	30			Date	55	25	10	55	25	10	
0.5	70			06/04/02							
0.75	95										
1	110										
1.5	125										
2	180										
2.5	215			10/06/02		5000			0.02%		
3	249										
4	290										
5	330										
6											
				Poids Final moulage							
				55		25		10			
						9.25					
<b>CBR à 95% de l'OPM = 63.2</b>											

## **Annexe 4 c :**

**Résultats des essais géotechniques sur  
matériaux améliorés avec du sable de  
dune.**

## LIMITES D'ATTERBERG

**chantier:** BARGNY-DIAMNIADIO  
**Date de prélèvement** 20/03/02  
**Nature:** Sable argileux noir foncé+30% de sable de dune  
**Lieu:**

**Date de l'essai:**  
**Echantillon:**  
**Opérateur:**

LL=22.0	LP=10.7				IP=LL-LP=11.3	
Désignation	LIMITE DE LIQUIDITE				LIMITE DE PLASTICITE	
Nombre de coups	16	20	24	28	1er essai	2ème essai
Numéro tare	E22	E100	E83	E9	2	1
Poids total humide P1	36.17	35.39	37.62	63.32	63.92	60.70
Poids total sec P2	32.13	31.56	33.48	59.28	62.10	59.26
Poids de l'eau P3=P1-P2	4.04	3.83	4.14	4.04	1.82	1.44
Poids de la tare P4	14.68	14.68	14.73	40.71	46.92	44.39
Poids matériau sec P5=P2-P4	17.45	16.88	18.75	18.57	15.18	14.87
Teneur en eau (%)=(P3/P5)*100	23.1	22.6	22.0	21.7	11.9	9.6
Teneur en eau moyenne (%)					10.75	

# ESSAI PROCTOR

chantier: BARGNY-DIAMNIADIO  
 Date de prélèvement: 20/03/02  
 Nature: Marne calcaire+30% de  
 Lieu: sable de dune

Date de l'essai:  
 Echantillon:  
 Opérateur:

## MOULAGE

p. tagé d'eau ajoutée	10%	12%	14%	16%	
Poids de mat. humide	1756	1886	1910	1875	
volume du moule	948	948	948	948	
Densité humide	1.85	1.989	1.977	1.977	
Densité sèche	1.59	1.678	1.677	1.615	
Teneur en eau					
W tare	18	203	173	61	
P. total humide	594.5	624.3	653.3	600.2	
P. total sec	540.4	558.9	577.2	526.2	
Poids de l'eau	54.1	65.4	76.1	74	
Poids de la tare	212	206.3	204.4	196.2	
Poids de mat. sec	328.4	352.6	372.8	330.0	
Teneur en eau	16.4	18.5	20.4	22.4	
Teneur en eau OPT.	19.5				
Densité humide OPT	2.017				
Densité sèche OPT	1.688				

## LIMITES D'ATTERBERG

chantier: BARGNY-DIAMNIADIO  
 Date de prélèvement: 20/03/02  
 Nature: Marne calcaire+30% de sable de dune  
 Lieu:

Date de l'essai:  
 Echantillon:  
 Opérateur:

LL=77.6	LP=46.7				IP=LL-LP=30.9	
Désignation	LIMITE DE LIQUIDITE				LIMITE DE PLASTICITE	
Nombre de coups	15	19	23	27	1er essai	2ème essai
Numéro tare	E22	E83	E100	E9	2	1
Poids total humide P1	24.92	29.19	32.82	56.39	49.4	51.46
Poids total sec P2	20.33	22.79	24.90	49.6	47.82	50.00
Poids de l'eau P3=P1-P2	4.59	6.4	7.92	6.79	1.58	1.46
Poids de la tare P4	14.68	14.73	14.68	40.71	44.39	46.92
Poids matériau sec P5=P2-P4	5.65	8.06	10.22	8.89	3.43	3.08
Teneur en eau (%)=(P3/P5)*100	81.2	79.4	77.4	76.3	46.0	47.4
Teneur en eau moyenne (%)					46.7	

# C.B.R

Date de prélèvement: 20-03-02

Date: 23/04/02

Echantillon: **Sable argileux noir foncé+30% de sable de dune**  
nature:

				Teneur en eau						
Moule n°	9	20	D3	AVANT			APRES			
a réaliser	10	12	13	N° de la tare	15		12	61		9
Grande dame	OUI	OUI	OUI		Ph +Tare	672.2		570.9	757.9	
Petite dame	/	/	/	Ps +Tare	633		538.4	690.1		620
nbre de couches	5	5	5	Tare	203		181	190		181.2
nbre de coups	10	25	55	Poids eau	39.2		32.5	67.8		45.8
Poids total humide	9.37	9.34	9.55	Poids mat.sec	430		356.6	500.1		438.8
Tare du moule	5.0	4.8	4.7	w	9.1		9.1	13.5		10.4
Poids mat. Humide	4.37	4.54	4.85	moyenne		9.1			11.95	
volume du moule	2.26	2.225	2.225							
DH	1.93	2.2043	2.15							
DS	1.77	1.87	1.97							
C %	90.2	95.2	100.2							
ANNEAU 30 KN				SATURATION (4 JOURS D'imbibition)						
Enfoncement(mm)	Lecture (1/100mm)			Heure	Comparateur			Gonflement		
0.25	20	20	40	Date	55	25	10	55	25	10
0.5	30	45	50	23/04/02						
0.75	40	60	70							
1	50	80	100							
1.5	55	110	160							
2	70	160	240							
2.5	90	210	370	27/04/02					0.1%	
3	110	270	510							
4	150	400	810							
5	180	510	1120							
6										
				Poids Final moulage						
				55	25	10				
				9.7	9.550	9.55				
CBR à 95% de l'OPM = 15.5										

# C.B.R

Date de prélèvement 20-03-02

Date 23/04/02

Echantillon:  
nature: Marne calcaire+30% de  
sable de dune

				Teneur en eau						
Moule n°	13	9	D3	AVANT			APRES			
à réaliser	10	12	13	N° de la tare	61		12	12		173
Grande dame	OUI	OUI	OUI	Ph +Tare	580.1		634.2	531.3		620
Petite dame	/	/	/	Ps +Tare	520.4		564.6	450.2		544.0
nbre de couches	5	5	5	Tare	188.2		181.9	181.9		203.5
nbre de coups	10	25	55	Poids eau	59.7		69.6	81.1		76.3
Poids total humide	8.79	9.96	9.92	Poids mat.sec	332.2		382.7	268.3		340.5
Tare du moule	4.7	5.6	5.4	w	17.9		18.1	30.2		22.4
Poids mat. Humide	4.093	4.36	4.52	moyenne		18.0			26.3	
volume du moule	2255	2276	2243							
DH	1.815	1.916	2.016							
DS	1.538	1.62	1.7							
C %	91.1	96.1	101.1							
ANNEAU 30 KN				SATURATION (4 JOURS D'imbibition)						
Enfoncement(mm)	Lecture (1/100mm)			Heure	Comparateur			Gonflement		
0.25	8	8	10	Date	55	25	10	55	25	10
0.5	10	11	14	23/04/02						
0.75	11	12	18							
1	12	14	22							
1.5	14	16	31							
2	16	20	39							
2.5	18	25	50	27/04/02					2.4%	
3	20	29	57							
4	21	37	78							
5	23	45	98							
6										
				Poids Final moulage						
				55			25		10	
				10.05			10.15		9.100	
CBR à 95% de l'OPM = 1.4										