

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

CENTRE DE THIES
Département de Génie Civil



GC.0106

PROJET DE FIN D'ETUDES

**En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur
de Conception en Génie Civil**

**TRAITEMENT DES MATERIAUX DE FAIBLES
PERFORMANCES A L'AIDE DU LAITIER FILLERISE**

Auteur : M. Mor NIANG

Directeur interne : M. Ibrahima Khalil CISSE (ESP)

Directeur externe : M. Babacar NIANG (SOSETRA)

Juillet 2000

DEDICACES

Par le Tout Puissant,

Je dédie ce travail ,

A mon défunt père, Massayar NIANG

A mon défunt frère, Mamadou NGUER

A ma très chère mère :Ceci est le fruit de son affection.

A mon frère Cheikh NGUER

A mes Frères et sœurs .

A tous mes amis (es) et tous ceux qui me sont chers.

A tous mes professeurs,

ainsi qu'à l'ensemble des élèves de l'école.

REMERCIEMENTS

La rédaction d'un document tel que celui que nous osons présenter aujourd'hui est certes un travail personnel, mais il est évident que ce n'est pas un travail de solitaire, accompli sans conseil, sans aide.

Nous avons donc le devoir de remercier tous ceux qui nous ont aidé de diverses manières :

Nous tenons à remercier particulièrement notre directeur interne, M. Ibrahima Khalil CISSE qui a été toujours présent pour nous apporter des suggestions et des conseils aussi bien pour l'étude expérimentale que lors de la rédaction du document.

Nos remerciements vont aussi à l'endroit de M. Babacar NIANG, notre directeur externe, et M. Alioune NIANG tous deux Ingénieurs à la SOSETRA, pour toutes leurs explications en vue de nous faciliter une bonne maîtrise de notre matériau d'expérimentation, le laitier ; Mais aussi pour la constance de leurs appuis.

Nous tenons aussi à remercier tout le personnel du laboratoire de l'Ecole Supérieure Polytechnique de Thiés, pour leur assistance lors de l'exécution des essais Proctor, CBR.... Je veux nommer MM. Djiby SOW, Madiaw GUEUYE, Cheikh SARR, Tapha, Ibou.

Nos vives remerciements aussi à M. Aliou BADIANE, ingénieur à FOUGEROLLE, à M. Lamine N'diaye et M. Raoul ainsi que tout le personnel du laboratoire de FOUGEROLLE. Mais aussi à M. N'diaye Diouf N'DIAYE pour ses précieuses explications.

A M. Malick AMAR qui a rendu possible la réalisation des analyses chimiques au niveau des laboratoires de la SOCOCIM.

Last but not least, nous terminerons nos remerciements par M^{me} Rose N'DIEME et M^{me} Astou CISSE née Seck respectivement secrétaires aux départements de Génie mécanique et de Génie civil, M^{lles} Henriette, Bintou, Rose, Awa N'DIAYE, et Khoudia, stagiaires dans ces dits départements, pour leur aide à la saisie de ce document.

SOMMAIRE

En termes de production, le ciment Portland est le liant le plus important. Quant au laitier, il a une composition similaire au ciment Portland, et pourrait avoir les potentialités d'être recyclé pour être utilisé comme matériau routier dans les couches de base.

Cependant , ceci va dépendre de l'apport en terme de propriétés du sable laitier en tant que liant et de sa composition chimique qui est un facteur déterminant dans l'évaluation des propriétés hydrauliques du laitier.

Le présent travail allie composition minéralogique et analyse du comportement hydraulique, dans le but de déterminer le rôle de la phase amorphe dans le processus d'hydratation.

Dans un premier temps nous allons essayer de faire une synthèse de toute la recherche bibliographique sur notre sujet d'étude. En deuxième lieu, nous allons mener une étude expérimentale en vue de déterminer les caractéristiques chimique, minéralogique et géomécanique de notre matériau.

En troisième phase nous ferons une étude économique pour connaître le coût que va induire l'utilisation du laitier dans le domaine routier. Nous terminerons par les recommandations quant à la mise en œuvre de notre matériau élaboré.

ABSTRACT

In production terms, Portland cement is the most important and widely used binder. As for Steel slag, its composition is similar to that of Portland, and it has the great potential for being recycled and used as road construction material at base layer level.

However, this will depend on the improving factor of slag sand as a binder and the chemical composition which constitutes an important slag hydraulic properties evaluation factor.

The present work combines mineralogical observations and behaviour analysis aimed at determining the role played by the amorphous phase in the hydration process.

Firstly, the study makes a synthesis of the whole bibliographic research on the field. Secondly, it focuses on the experiments carried out to determine the chemical, mineralogical and geomechanical characteristics of our material.

Thirdly, it deals with the economical analysis of the project in order to calculate the cost of the utilization of the slag in road construction. Finally, this research considers the recommendations needed to implement the project.

Table des matières

Dédicaces

Remerciements

Abstract

Sommaire

Glossaire des mots et abréviations utilisés

Table des matières

Liste des annexes

Liste des tableaux

Liste des figures

INTRODUCTION.....1

Chapitre I: PROBLEMATIQUE DES MATERIAUX ROUTIERS AU SENEGAL

- 1-1. Contexte industriel, administratif et réglementaire.....2
- 1-2. Ressource en matériaux au Sénégal.....3
 - 1-2-1. Les matériaux autres que les latérites.....3
 - 1-2-2. Utilisation des latérites.....4

Chapitre II : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

- 2-1. Identification géotechnique des graveleux latéritiques.....5
 - 2-1-1. Définitions.....5
 - 2-1-2. Caractéristiques géomécaniques des graveleux naturels.....6
 - 2-1-2-1. Caractéristiques de compactage.....6
 - 2-1-2-2. Portance.....7
 - 2-1-3. Classification géotechnique des graveleux latéritiques.....8
 - 2-1-3-1. Position des graveleux latéritiques dans la classification9

a- Classification HRB.....	9
b- Classification USCS.....	9
2-1-3-2. Proposition de Classification géotechnique des graveleux latéritiques.....	9
2-2. Le résidu laitier.....	11
2-2-1. Obtention.....	11
2-2-2. Caractéristiques.....	12
2-2-3. Problématiques.....	12
2-2-4. Le laitier utilisé ailleurs comme stabilisant routier.....	13
2-2-4-1. Les principales formes de laitiers.....	13
a- le laitier cristallisé.....	13
b- Le laitier vitrifié par trempe.....	14
2-2-4-2. Hydratation et prise du laitier.....	16
a- Réactivité et hydraulicité du laitier.....	17
a-1. La réactivité routière du laitier vitrifié.....	18
a-2. L'hydraulicité du laitier vitrifié.....	18
b-Utilisation routière du laitier concassé.....	20
b-1. Les enrobés de laitier.....	20
b-2. Le laitier concassé dans les graves hydrauliques..	21
2-3. traitement des matériaux routiers.....	23
2-3-1.Présentation et terminologie.....	23
2-3-2. Les techniques de traitement.....	24
2-3-2-1. L'amélioration	24
2-3-2-2. La stabilisation.....	25
a- Couche de fondation.....	25
b- Couche de base.....	26
b-1.Graveleux naturels traités au ciment ou à la chaux.....	27
b-2. Graveleux latéritiques améliorés au ciment.....	27

Chapitre III : ETUDE EXPERIMENTALE

3-1. Identification géotechnique du matériau.....	28
3-1-1. Procédure.....	28
3-1-2. Caractérisation du matériau.....	29
3-1-2-a. Caractéristiques chimiques du matériau.....	29
3-1-2-b. Caractéristiques géomécaniques des graveleux crus.....	30
3-1-3. Classification des latérites.....	31
3-1-3-a. Latérite de Lam-Lam.....	31
3-1-3-b. Latérite de Sindia.....	31
3-1-4. Analyse et interprétation des résultats.....	32
3-1-4-a. Essai Proctor.....	32
3-1-4-b. Essai CBR.....	33
3-1-4-c. Interprétation des résultats.....	33
3-2. Identification du laitier de la SOSETRA.....	36
3-2-1. Composition chimique du laitier.....	36
3-2-2. Amélioration suggérée.....	37
3-3. Etude des mélanges.....	38
3-3-1. Latérite de Lam-lam + passant 2mm laitier.....	38
3-3-2. Latérite de Sindia + passant 2mm laitier.....	39
3-3-3. Latérite de Lam-Lam + passant 0.5mm laitier.....	42
3-3-4. Latérite de Lam-Lam + passant 0.5mm laitier vitrifié.....	44
3-4. Analyse et interprétation des résultats.....	46

Chapitre IV : DIMENSIONNEMENT

4-1. Principes directeurs.....	50
4-2. Principes d'ordre théorique liés à la bonne conception des structures.....	50
4-3. Les matériaux.....	51
4-4. Classes de portances des sols.....	52
4-5. Trafic.....	53
4-5-1. Durée de vie.....	53

4-5-3-1. Trafic en nombre de véhicules par jour.....	55
4-5-3-2. Trafic en nombre cumulé de poids lourds.....	55
4-5-3-3. Trafic en nombre de passages d'un essieu standard.....	56
4-6. Hypothèses et paramètres d'entrée pour le dimensionnement.....	58
4-6-1. Couche de base.....	58
4-6-1-a. Latérite crue.....	58
4-6-1-b. Les formulations.....	59
4-6-2. Charges sur le corps de chaussée.....	59
4-6-2-a. Rupture par poinçonnement du sol.....	60
4-6-2-b. Paramètres d'entrée.....	61
4-7. Les résultats du programme ECOROUTE.....	61

Chapitre V : ANALYSE ECONOMIQUE

5-1. Hypothèses de calcul.....	63
5-2. Etude du coût de fabrication du laitier vitrifié.....	64
5-2-1. Refroidissement du laitier.....	64
5-2-2. Broyage du laitier.....	65
5-3. Estimation du coût du laitier bouleté et broyé.....	66
5-4. Devis estimatif des différentes formulations retenues.....	67
5-4-1. Formulation 100LA0LT.....	67
5-4-2. Formulation 94LA5LT.....	68
5-4-3. Formulation 91LA8LT.....	68
5-4-4. Comparaison avec le traitement au ciment.....	69

Chapitre VI : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Conclusion et recommandations

Annexes

Références bibliographiques

Glossaire des mots et abréviations utilisés

- CEREEQ** : Centre Expérimental de Recherche et d'Etude pour
L'Equipement
- SOSETRA**: Société Sénégalaise de Transformation.
- LCPC** : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- SETRA** : Service d'Etudes Techniques des Routes et Aérodrômes.
- CEBTP** : Centre Expérimental de recherche et d'étude du Bâtiment et. des
Travaux Publics
- Layousse** : Société de concassage.
- SDE** : Société des Eaux.
- AFNOR** : Association Française de Normalisation.
- CBR** : Californian Bearing Ratio
- IP** : Indice de Plasticité.
- OPM** : Optimum Proctor Modifié.
- f* : pourcentage de fines.
- WL** : Limite de liquidité.
- Wp** : Limite de plasticité.
- w_{opt} : Teneur en eau optimale (%)
- γ_d : Densité sèche (t/m³).
- γ_s : poids spécifique (t/m³).
- α : Réactivité du laitier.
- GLTL** : Grave-Laitier-Tout-Laitier
- Cu** : Coefficient d'uniformité.
- Edyn** : Module dynamique.
- Nzroue** : Contrainte maximale exercée par la roue sur la chaussée.
- Nzaxe** : Contrainte maximale au niveau de l'axe des deux roues jumelées.
- Ezroue** : Déformation verticale (roue)
- Ezaxe** : Déformation verticale (axe).

Liste des tableaux

- Tableau III-1. Composition chimique des différentes latérites – page 29-
- Tableau III-2. Résultats des essais sur la latérite de Lam-lam – page 30-
- Tableau III-3. Résultats des essais sur la latérite de Sindia – page 30-
- Tableau III-4. Résultats des essais Proctor Modifiés – page 32-
- Tableau III-5. Résultats des essais CBR sur la latérite crue – page 33-
- Tableau III-6. Fuseau granulométrique recommandé – page 34-
- Tableau III-7. Résultats des analyses chimiques sur le laitier – page 36-
- Tableau III-8. Résultats des essais sur le mélange latérite de Lam-lam-laitier
2 mm – page 39-
- Tableau III-9. Résultats des essais sur le mélange latérite de Sindia-laitier
2 mm – page 41-
- Tableau III-10. Résultats des essais sur le mélange latérite de Lam-lam-laitier
0.5 mm – page 43-
- Tableau III-11. Résultats des essais sur le mélange latérite de Lam-lam-laitier
Vitriifié 0.5 mm – page 45-
- Tableau IV-1. Classes de portance des sols – page 52-
- Tableau IV-2. Trafic en nombre cumulé de poids lourds – page 55-
- Tableau IV-3. Trafic en nombre de passages d'un essieu standard – page 56-
- Tableau IV-4. Tableau des modules dynamiques des latérites crues – page 58-
- Tableau IV-5. Tableau des modules dynamiques des latérites améliorées
- page 60 -
- Tableau IV-6. Répartition des charges dans les structures – page 61-
- Tableau V-1. Tableau estimatif du laitier bouleté et broyé – page 66-
- Tableau V-2. Devis estimatif de la formulation 100LA0LT – page 67-
- Tableau V-3. Devis estimatif de la formulation 94LA5LT – page 67-
- Tableau V-4. Devis estimatif de la formulation 91LA8LT – page 68-
- Tableau V-5. Composition du coût du matériau traité – page 68-
- Tableau V-6. Devis estimatif de la latérite-ciment– page 69-.

Liste des figures

- Figure III-1. Blocs de laitiers cristallisé et vitrifié – page 15-
- Figure III-2. Laitier fillérisé de la SOSETRA – page 15-
- Figure III-3. Courbe granulométrique du laitier 2 mm – page 41-
- Figure III-4. Courbe granulométrique du laitier 0.5 mm – page 42-
- Figure III-5. Courbe granulométrique du laitier vitrifié 0.5 mm – page 44-
- Figure IV-1. Schéma de fabrication du laitier bouleté – page 64-.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

En rapport avec l'accroissement démographique et économique, le réseau routier sénégalais a connu un essor considérable qui se traduit par la construction de nouvelles chaussées et de plusieurs kilomètres d'autoroute .

La réalisation de tous ces travaux a engendré une recherche inlassable de matériaux de construction routière dont les caractéristiques répondent aux normes prescrites. Ainsi, au Sénégal le matériau le plus utilisé dans ce domaine reste la latérite en raison de sa disponibilité dans la quasi totalité du territoire national.

L'augmentation du trafic, notamment à proximité des capitales, a motivé la recherche de meilleures conditions d'utilisation des matériaux locaux de faibles performances par l'amélioration de leurs caractéristiques géomécaniques, souvent insuffisantes.

C'est dans cette optique que nous nous sommes proposé d'étudier dans quel mesure le laitier produit par la SOSETRA pouvait être utilisé comme matériau de substitution dans la mise en œuvre des couches de base en construction routière.

Ainsi, dans ce qui suit nous allons essayer de dégager un programme d'essais pour déterminer notamment les caractéristiques physico-chimique et mécanique des graveleux latéritiques traités au laitier. Ensuite, nous essayerons d'examiner dans quelle mesure l'utilisation du laitier pourrait aboutir à un matériau de substitution géotechniquement performant et économiquement rentable.

CHAPITRE I

**PROBLEMATIQUE DES MATERIAUX ROUTIERS
AU SENEGAL**

Chapitre I : **PROBLEMATIQUE DES MATERIAUX ROUTIERS AU SENEGAL**

1- 1. Contexte industriel, administratif et réglementaire

Au Sénégal, les coûts de la main d'œuvre et de l'énergie sont de plus en plus élevés. Les méthodes et techniques de construction routière doivent donc s'adapter à ce niveau de coût, et rechercher les solutions les plus économiques sous divers aspects.

Les entreprises routières disposent d'un personnel compétent et d'un équipement moderne et performant.

Par ailleurs, il existe une industrie d'extraction et de production des granulats régulièrement répartie sur une bonne partie du territoire et qui exploite les ressources existantes à l'aide d'installations le plus souvent fixes. Pour ne pas transporter les granulats élaborés, des prospections sont faites aux environs les plus immédiats du chantier, les granulats disponibles alors n'offrent pas toujours les caractéristiques désirées.

Sur le plan administratif, l'état sénégalais représenté à l'échelle nationale, régionale, par des services tels que les services des Travaux Publics dispose aussi de centres de recherches tels que le CEREEQ.

Sur le plan réglementaire, l'exploitation des carrières est sous la supervision du service des mines, qui donne l'autorisation d'exploiter à l'entreprise. Aussi veille à ce que l'entreprise prélève exactement la quantité de matériaux qui lui a été cédée.

1-2. Ressources en matériaux routiers au Sénégal

Au Sénégal, il existe plusieurs ressources en matériaux routiers de diverses qualités. Cependant, le choix de tel ou tel matériau se fera toujours suivant deux critères en général :

- 1- Répondre aux nécessités techniques ;
- 2- Se plier aux contraintes économiques.

Ainsi, l'ingénieur routier est souvent amené à utiliser des matériaux qui, s'ils ne présentent pas des qualités respectant les normes requises seront alors caractérisés par une certaine particularité.

Dans le contexte géologique du Sénégal, on rencontre plusieurs catégories de ressource de matériaux.

1-2-1. Les matériaux autres que les latérites.

L'importance des sollicitations que supporte la chaussée fait que des efforts considérables ont été consentis dans la recherche de bons matériaux routiers. En effet selon la localité et les ressources disponibles, des stratégies ont été menées dans le but de promouvoir ces dernières.

Au niveau des ressources particulières, il existe le coquillage plus présent dans la région du sud, dans le nord et dans la région de Thiès. On rencontre le banco-coquillage en bordure de mer ou plus généralement dans les lagunes ; La réalisation de la couche de base en banco-coquillage est une technique originaire du Sénégal et de la Mauritanie.

Dans certaines localités où le sable est très disponible, des expériences d'utilisation du sable amélioré soit au ciment soit aux liants hydrocarbonés ont été menées.

1-2-2. Utilisation de la latérite

Les latérites représentent la source de matériaux la plus abondante et la plus disponible en Afrique tropicale en général et au Sénégal en particulier.

Le graveleux latéritique est de loin, le matériau le plus utilisé pour la construction des couches de base des chaussées au Sénégal.

Il n'est pas surprenant de constater que, dès les premières phases d'étude d'un projet routier, la technique à priori retenue pour la construction soit les graveleux latéritiques ; cela s'explique par le fait qu'en matière de travaux routiers, c'est le matériau le plus répandu dans le pays. Seulement la question qui se pose toujours est de savoir si dans la localité considérée, les graveleux latéritiques présentent des caractéristiques incluses dans les fourchettes définies par les normes. Les critères habituels retenus au Sénégal pour l'utilisation d'un graveleux latéritique crû en couche de base sont les suivants :

- 1- Indice de plasticité IP inférieur à 15 ;
- 2- Pourcentage d'éléments inférieurs à 80μ , inférieur à 20 ;
- 3- CBR (Californian Bearing Ratio) supérieur ou égal à 80 à 95% de l'OPM après 96 heures d'imbibition.

Les caractéristiques générales des latérites sont les suivantes :

- Elles présentent une certaine cohésion naturelle lorsqu'elles sont séchées, il y a une liaison entre les différentes particules. Mais en présence d'eau, cette cohésion est brisée ; la latérite se délite.
- Le taux d'absorption de ce matériau est élevé
- Les granulats sont friables , ceci est déterminé par l'essai Los Angeles.

CHAPITRE II :

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre II : **SYNTEHSE BIBLIOGRAPHIQUE**

2-1. Identification géotechnique des graveleux latéritiques

2-1-1. définition

Les latérites sont formées par lessivage de roches dans des conditions particulières et rigoureuses qui règnent sous les tropiques :abondance de précipitations, température ambiante élevée....Le lessivage conduit à un appauvrissement en silice et bases solubles et un enrichissement relatif en oxyde et hydrates plus ou moins solubles, en particulier d'alumine de fer.. Elles peuvent être formées à partir de n'importe quelle roche-mère : granit ou gneiss, roche éruptive, schistes, voire même calcaire.

Le graveleux latéritique tel qu'il a été défini, est géotechniquement un sol meuble de granulométrie 0/20 à 0/40mm comportant de 10 à 35% de fines passant au tamis de 80 μm (tamis n°20 AFNOR) et un « squelette » (refus sur le tamis de 2mm – AFNOR n°34) de 20 à 60%.

Le mortier passant au tamis de 0,4mm (AFNOR n°27) a une plasticité telle que l'indice de plasticité varierait de 10 à 35. La courbe granulométrie montre très généralement un pallier entre 0,080 et 2mm qui traduit bien la dualité d'origine des composants du mélange naturel qu'est ce matériau.

On considère ainsi qu'un sol latéritique contenant plus de 35% de passant à 80 μm n'est plus un graveleux latéritique ; il entre alors dans la catégorie des sol fins, l'influence de la matrice fine devenant très prépondérante sur celle du squelette.

Les paramètres d'identification sont classiques. On procède toujours, en vue de situer les matériaux dans les classifications géotechniques, aux essais de granulométrie, de limites d'Atterberg.

- Une «grave» est un mélange, naturel ou non de cailloux, de gravier ou de sable, avec parfois addition de particules plus fines.

Si la proportion des particules fines dans la grave est insuffisante pour donner de la plasticité à son mortier, la grave est dite maigre.

Sinon, elle est dite limoneuse ou argileuse, selon sa teneur en fines actives

2-1-2. Caractéristiques géomécaniques des graveleux latéritiques naturels

2-1-2-1. Caractéristiques de Compactage

La densité sèche maximale γ_d OPM et la teneur en eau optimale de compactage de l'OPM des graveleux latéritiques continuent d'être déterminées classiquement par l'essai Proctor Modifié ; Il y a aussi la méthode de Harward dont le principe est le même mais la différence réside au niveau de la taille des moules utilisées et du mode opératoire.

L'essai Proctor peut être utilisé aussi pour tester la fragilité de graveleux latéritiques ; si le pourcentage de fines produit est trop important, le matériau doit être rejeté. Les spécifications préconisent généralement que les pourcentages de fines ne dépassent pas 8%.

Des essais de compactage réalisés à des énergies supérieures à celle du Proctor Modifié montrent une évolution très sensible des matériaux. Par exemple, une teneur en fines initiale de 27% passe à 39% à 55 coups et à 59% à 80 coups. On confirme bien ainsi au laboratoire la nocivité du surcompactage des graveleux latéritiques. La densité sèche maximale, elle, augmente jusqu'à 55 coups puis n'évolue plus au-delà. Par contre, la teneur en eau optimale augmente ce qui est normal puisque le pourcentage de fines s'est accru.

chaussée considérée. Mais on devra aussi prendre en compte le CBR au moment de la mise en service.

Il est possible, dans les pays arides et à chaussées bien drainées, de prendre en compte un CBR obtenu après une imbibition du matériau d'une durée inférieure à 4 jours.

Le rapport CBR après imbibition de 4 jours sur CBR immédiat varie de 0,3 à 0,9, Il est souvent voisin de 0,7.

2-1-3. Classification géotechnique des graveleux latéritiques

Le but d'une classification géotechnique est de regrouper les sols en familles à caractéristiques géomécaniques voisines ayant un comportement similaire en réaction aux sollicitations extérieures.

Les paramètres permettant de classer les graveleux latéritiques sont bien connus :

- Granulométrie, notamment pourcentage de passant à 80 μm .
- Limites d'Atterberg,
- Capacité portante (CBR),
- Caractéristiques de compactage (Proctor).

Les classifications tentées par divers pays permettent d'établir de meilleures distinctions dans les possibilités l'utilisation des matériaux disponibles :elles simplifient l'approche des études mais ne suppriment pas les essais plus spécifiques nécessaires pour bien appréhender les possibilités réelles des matériaux en vue des usages qu'on a à en faire.

On rappelle ci-après la position des graveleux latéritiques dans les classifications internationales des sols.

2-1-3-1. Position des graveleux latéritiques dans les classifications internationales

a - Classification HRB

Les graveleux latéritiques couvrent plusieurs classes.

Les plus graveleuses sont des A 24 à A 27, tandis que les plus argileuses (passant à $80 \mu\text{m} > 35$) sont des A75 et A 76. On note quelques A 5 et A 6. Les indices de groupe sont un moyen complémentaire de caractériser ces matériaux.

b- Classification USCS

La plupart des graveleux entrent ici dans la catégorie des sols grenus. Ils se répartissent entre les GC (gravier argileux) et les SC (sable argileux) lorsque leur granulométrie maximale est réduite.

c- Proposition d'une classification géotechnique des graveleux latéritiques

Une classification géotechnique des graveleux latéritiques doit aboutir à les différencier en vue de leur utilisation en technique routière ; elle concerne essentiellement les matériaux prospectés dans les emprunts ou à l'occasion des études de plate-forme effectuées pour le dimensionnement de chaussées. La classification proposée retient 3 types de graveleux latéritiques et est essentiellement basée sur :

- le pourcentage de fines (passant au tamis de $80 \mu\text{m}$ AFNOR n° 20), noté *f*,
- l'IP (Indice de Plasticité).
- Le produit *f. IP*.

Les 3 types retenus G11, G12, G13 sont caractérisés ainsi :

G11 : limité par $f = 15$ et $f. IP < 250$ (quand $IP > 16$) ce sont les meilleurs graveleux dont :

- le CBR est généralement supérieur à 30,
- la densité sèche de l'OPM supérieure à 2,1,
- la teneur en eau optimale de compactage comprise entre 5 et 8%.

G12 : limité par les courbes ($f. IP$) 250 et 600 (quand $IP > 24$) et dont f est compris entre 15 et 25

- le CBR est la plupart du temps compris entre 15 et 40,
- la densité sèche maximale OPM est comprise entre 2 et 2,25 t/m³,
- la teneur en eau optimale de compactage est comprise entre 7 et 10%.

G13 : limité par les courbes ($f. IP$) 600 et 1 000 (quand $IP > 28$) et dont f est compris entre 25 et 35 :

- le CBR est systématiquement inférieur à 30,
- la densité sèche OPM compris entre 1,9 et 2,2t/m³,
- la teneur en eau optimale de compactage varie de 8 à 12%.

Les matériaux contenant des pourcentages de fines supérieures à 35% ne sont pas considérés comme étant des graveleux latéritiques ; il s'agit de sols fins qui peuvent être latéritiques (ferralitiques selon l'appellation moderne) mais dont l'influence de la matrice est prépondérante sur celle du squelette.

En règle générale, les matériaux G13 conviennent comme matériaux de remblai ou de couche de forme ; les graveleux latéritiques G11 seront de bons matériaux de couche de fondation et pourront parfois être utilisés à l'état naturel en couche de base mais devront le plus souvent être traités car des $CBR > 80$ ne sont pas fréquents dans cette catégorie. Quant aux graveleux latéritiques G12, ce sont des matériaux aux propriétés intermédiaires qui ne pourront que rarement être utilisés en couche de fondation.

Les 3 classes de ces matériaux conviennent pour les routes non revêtues ; on réserve quand on le peut les G11 à la couche de roulement.

2-2. Le résidu laitier

2-2-1. Obtention

Le Sénégal par souci de recycler les déchets de la ferraille dispose désormais d'une usine dont la vocation est la récupération et la refonte de celle-ci.

Cette ferraille est d'origine diverse : carcasses de voitures usées, fer totalement corrodé, aluminium etc., provenant tous de la récupération. La ferraille récupérée subit d'abord une préparation par traitements mécaniques de conditionnement (concassage, broyage...) avant d'être introduit dans le four par intervalles réguliers. Cette fusion est effectuée au niveau d'un four à induction qui permet d'obtenir une température très élevée d'environ 1450 C°. Cette température assure le chauffage de la charge jusqu'à la fusion.

Le produit de la fonte dans les fours est nécessairement accompagné d'une évacuation sous forme liquide de la quasi totalité des oxydes de la charge non transformés à l'état métallique. Ce sous produit appelé **laitier** (ou scorie) de couleur foncée représente les produits des réactions qui ont lieu dans le four entre le fondant et la gangue de la charge et présente un aspect caillouteux.

Du produit résiduel inutile et encombrant qu'il était il y a soixante dix ans (70 ans), le laitier est devenu aujourd'hui un produit rémunérateur susceptible de nombreuses utilisations particulièrement dans le domaine du Génie civil et cela suppose que ses propriétés et caractéristiques technologiques remplissent un certain nombre de spécifications.

2-2-2. Caractéristiques du laitier

Après fonte, le laitier se présente sous la forme d'un bloc dont les caractéristiques dépendent essentiellement du procédé de fonte. Il y a une grande variation dans les caractéristiques physique, chimique et minéralogique. Cette différence dépend du processus de fabrication, du four lui-même des ajouts durant la fonte, du procédé de refroidissement du laitier et du stockage même du laitier.

Par exemple, les ajouts durant la fonte sont faits pour corriger la teneur en fer fondu. On procède à un ajout de ferro-alliage dans le mélange :

ferro-manganèse environ 0,2 %, les ferro-silicium 0,3 %, la silice, le manganèse...etc. Pour cette raison l'utilisation du laitier en tant qu'agrégat doit être étudiée de manière spécifique.

En effet dépendant du procédé, les réactions chimiques qui se produisent différent. Cependant le laitier qui est essentiellement composé (à 95 % environ) de chaux (CaO), d'oxyde de magnésium (MgO), d'alumine (Al₂O₃) et de silicate (SiO₂) est très similaire au ciment en terme de composition chimique.

2-2-3. Problématique

La production de douze (12) tonnes d'acier entraîne ipsofacto cinq cent kilogrammes (500 kg) de laitier. Mais cette production dépend de la qualité de la ferraille mise dans le four. Au regard des grandes quantités de laitier produites à travers le monde, on peut d'ores et déjà dire que le problème du laitier ne se pose pas seulement au niveau la SOSETRA. En effet selon les études statistiques de l'American Iron and Steel Institute (AISI), rien qu'en 1997 la production de laitier aux Etats Unis était de 13 millions de tonnes et de 597 millions de tonnes dans le monde. Evidemment le problème de stockage du laitier ne s'est pas encore posé de manière aiguë au niveau de la SOSETRA,

simplement parce que c'est une jeune usine qui vient de démarrer sa production. Mais vu le rythme de production au niveau de l'usine, le problème de stockage de ce résidu qui est le laitier ne tardera pas à se poser avec acuité dans un proche avenir (la production actuelle de la SOSERA est d'environ 4 tonnes par jour, soit 1440 tonnes par an).

C'est la raison pour laquelle, la SOSETRA, visionnaire, a voulu prendre le devant et mener des études quant à une éventuelle utilisation de celui-ci dans le domaine de Génie civil, comme *grave* dans le domaine des routes et aussi dans le domaine du bâtiment comme agrégat à béton de structure.

2-2-4. Le laitier utilisé comme matériau routier

2-2-4-1. Les principales formes de laitier

L'élaboration du laitier peut conduire, selon qu'il y avait ou non trempé du laitier liquide, à deux formes minéralogiques différentes :

- le laitier cristallisé obtenu par refroidissement lent,
- le laitier vitrifié obtenu par refroidissement rapide, par trempé.

Il importe d'explicitier cette différence, fondamentale du point de vue cristallographique et chimique, et qui conditionne les propriétés des matériaux obtenus, donc leur utilisation.

a - Le laitier cristallisé

Le laitier cristallisé correspond à une forme minéralogique stable. Il est chimiquement stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, ne peut être que modeste.

Ses constituants sont essentiellement des silicates et des silico-aluminates de calcium.

Son utilisation découle de ces propriétés : c'est un granulat.

b- Le laitier vitrifié par trempe

Le laitier vitrifié, au contraire, qui a subi une trempe (granulation ou bouletage) présente une structure vitreuse, désordonnée et par conséquent riche en énergie.

La forme vitreuse est une forme instable et le laitier vitrifié est doué d'une hydraucilité latente, c'est-à-dire qu'il est susceptible, sous certaines conditions, d'évoluer vers une forme cristallisée stable, en développant des résistances mécaniques comme le ferait un ciment.

Le laitier vitrifié, granulé ou bouleté, est donc un liant hydraulique. C'est à cette hydraucilité, à ce pouvoir liant que l'on fait appel lorsqu'on l'utilise comme liant dans les graves-laitier et dans le sables-laitier en technique routière, ou, dans l'industrie cimentière, comme constituant de ciments composés.

Dans tous les cas, le laitier contient essentiellement quatre oxydes de la charge: chaux (CaO), magnésie (MgO), silice (SiO_2), alumine (Al_2O_3) qui représentent en tout de 95 à 97 % des constituants du laitier.

Les propriétés du produit peuvent donc être très largement appréhendées à partir du système quaternaire $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$; mais une connaissance approfondie passe par celle des oxydes secondaires (FeO , MnO , TiO_2 , BaO , P_2O_5 , Na_2O , K_2O) et des composés sulfurés.

Lorsque les températures d'élaboration sont élevées, le laitier peut également contenir quelques carbures et nitrures.

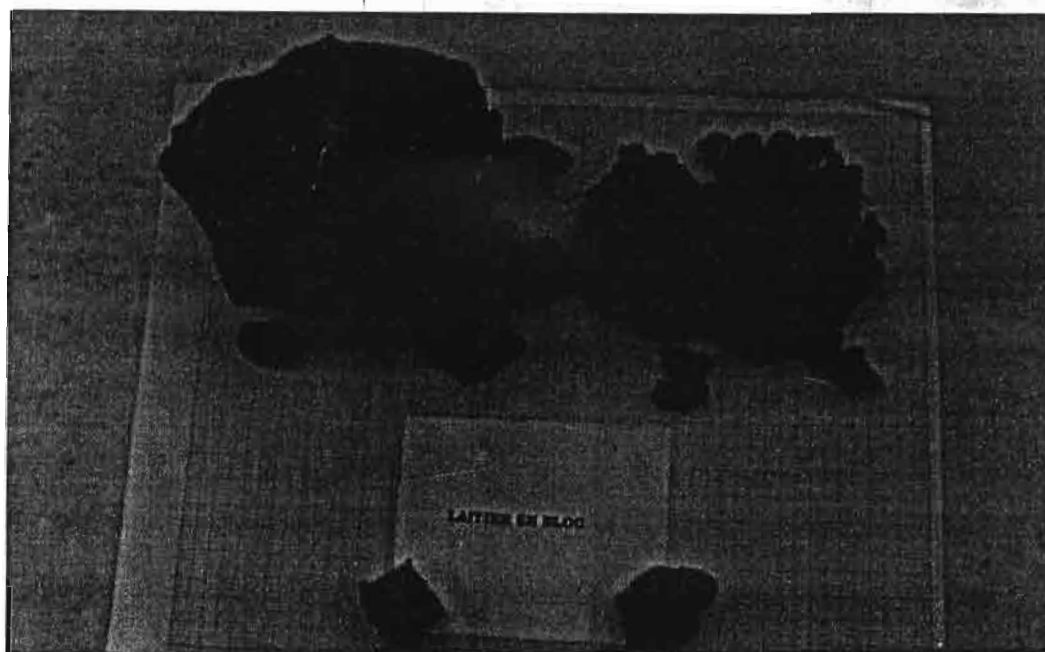


Figure III – 1 : Bloc de laitier cristallisé (à droite) et vitrifié (à gauche) de la SOSETRA

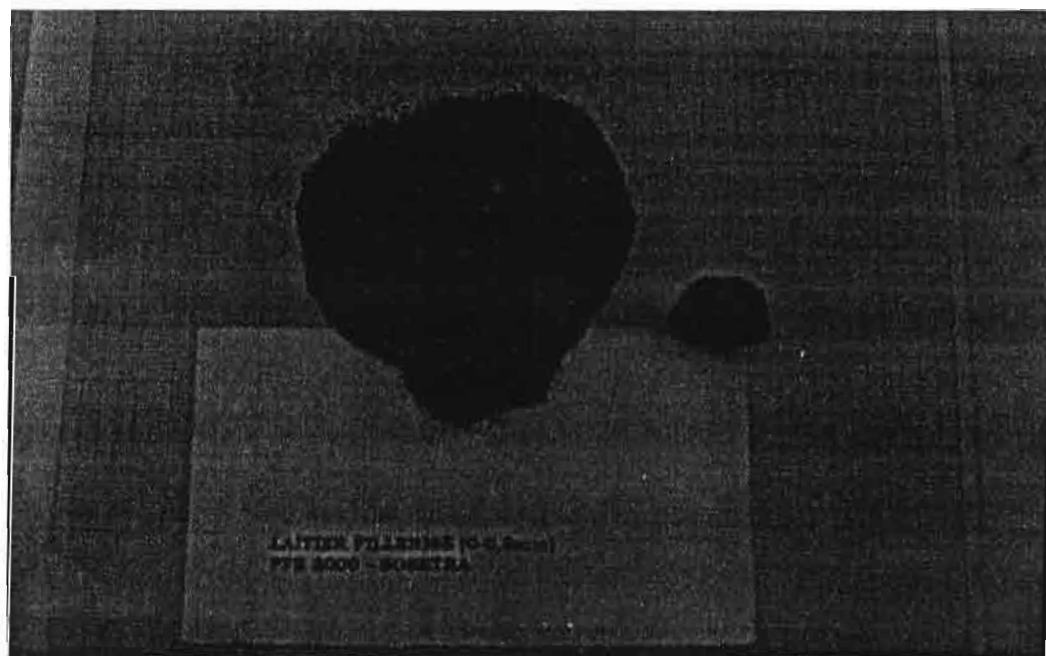


Figure III – 2 : Laitier fillérisé de la SOSETRA – passant tamis 0.5 mm.

2-2-4-2. Hydratation et prise du laitier

Contrairement au ciment qui est soluble dans l'eau et s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier vitrifié n'est soluble que dans une eau alcalinisée et a donc besoin, pour faire prise, d'un agent d'addition appelé activant.

Il n'est pas nécessaire d'entrer dans le détail du phénomène de la prise qui est extrêmement complexe et fait appel à des notions de chimie minérale d'intérêt relativement second pour le praticien.

Il nous paraît cependant utile d'en donner un schéma simplifié.

L'hydratation intervient d'abord par dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution aboutit à une solution concentrée, d'où résulte une précipitation de composés hydratés. Cette précipitation des éléments dans la solution, ce qui permet la solubilisation d'une nouvelle quantité de produit jusqu'à une concentration entraînant une nouvelle précipitation de composés hydratés.

C'est cette répétition du cycle dissolution-concentration-précipitation, se prolongeant très longtemps (plusieurs années), qui constitue la prise et le durcissement du laitier vitrifié.

Les cristaux formés peuvent apparaître sur les grains de laitier ou sur ceux du granulat. Il y a d'abord augmentation du frottement interne du squelette, puis formation de ponts cristallins qui se rejoignent en formant un maillage qui entoure les granulats et réalise un ensemble cohérent. La fixation du maillage sur les granulats, qui dépend de leur état de surface, est facilitée sur les surfaces rugueuses .

La précipitation des hydrates formés et leur arrangement cristallin conduisent à des résistances mécaniques se développant progressivement dans le temps, au fur et à mesure que se poursuit le phénomène.

Il est à noter que la partie active des grains n'est mobilisée que partiellement, ce qui rend possible toute nouvelle attaque des grains, ultérieurement.

a. Réactivité et hydraulité du laitier

Les principales utilisations du laitier vitrifié (granulé ou bouleté) sont la route (traitement des assises de chaussées : graves-laitiers, sables-laitier) et la cimenterie (le laitier est un constituant de certains ciments).

Les exigences des utilisateurs ne sont pas les mêmes dans les domaines et les terminologies sont un peu différentes.

Dans les techniques routières où le laitier est utilisé sous forme d'un sable plus ou moins fin, avec un activant de prise basique, on parle surtout de **réactivité**, souvent repérée par le coefficient α du laitier (explicité ci -après).

Dans les techniques cimentières où le laitier est utilisé moulu (le plus souvent avec du clinker), on parle plutôt d'hydraulicité (ou de réactivité hydraulique). L'industrie cimentière ne s'intéresse pas au coefficient α .

Les notions de réactivité et d'hydraulicité sont souvent étroitement interdépendantes, quand elles ne sont pas confondues ; toutes deux font implicitement référence au niveau de résistance obtenu sur le matériau final : grave-laitier, sable-laitier ou béton, donc au pouvoir hydraulique du laitier qui n'est cependant pas sollicité de la même manière.

a-1. La réactivité routière du laitier vitrifié

La réactivité du laitier vitrifié, telle que l'entendent les ingénieurs routiers, caractérise sa faculté d'attrition, c'est-à-dire son aptitude à produire des fines d'attrition sous l'effet des différentes manutentions, du malaxage de la grave-laitier (ou de sable-laitier) en centrale, du transport, du répandage et surtout du compactage par des engins lourds.

Elle est définie par le coefficient alpha (α), produit de la surface spécifique S des fines naturellement présentes dans le laitier par le pourcentage de fines f produites par un broyage normalisé.

$$\alpha = s \cdot f / 1000$$

classe 1	$\alpha < 20$
classe 2	$20 < \alpha < 40$
classe 3	$40 < \alpha < 60$
classe 4	$\alpha > 60$

a-2. L'hydraulicité du laitier vitrifié

L'hydraulicité du laitier utilisé après mouture dans la fabrication du ciment (on parle souvent de réactivité hydraulique) est essentiellement appréciée à partir de critères chimiques (indices de « basicité »), de critères minéralogiques (taux de vitrification), mais surtout par des essais de résistance mécanique.

Le laitier utilisé à des fins cimentières sera jugé d'autant plus hydraulique que les résistances d'un ciment l'utilisant comme constituant seront plus élevées.

On conçoit cependant qu'il est nécessaire d'estimer d'hydraulicité du laitier bien avant cette étape ultime.

L'hydraulicité du laitier (ou sa réactivité hydraulique) est d'abord liée à son taux de vitrification, c'est-à-dire à l'importance de la partie vitreuse par rapport à la partie cristallisée. Ce taux est d'autant plus élevé que la trempe aura été plus efficace.

Cependant, s'il est important que le taux de vitrification soit très élevé (un laitier entièrement cristallisé ne serait pas du tout hydraulique), il est admis qu'une petite quantité de matériaux cristallins est favorable à l'hydraulicité, peut-être parce qu'ils constituent dans la masse vitreuse des zones de très grande hétérogénéité, voire des « germes de cristallisation ».

L'hydraulicité du laitier dépend également de sa composition chimique.

La composition chimique joue d'abord un rôle sur la structure du laitier (le degré de polymérisation de la silice dépend de l'état de liaison des composés majeurs – ions calcium, magnésium – qui peuvent intervenir comme formateurs ou modificateurs du réseau vitreux, ainsi que des éléments mineurs tels que manganèse, titane, soufre) donc sur sa plus ou moins grande stabilité et sa plus ou moins grande réactivité.

Mais l'influence de la composition chimique sur les propriétés hydrauliques du laitier apparaît plus clairement que celle de la structure.

b. Utilisation routière du laitier concassé

Le laitier cristallisé concassé occupe également une place de choix en techniques routières où on l'utilise en association avec des liants hydrauliques ou hydrocarbonés dans toutes les couches de chaussée, de la couche de fondation à la couche de roulement incluse.

Il sert ainsi de granulats dans les enrobés des couches de roulement, et de grave dans les graves hydrauliques utilisées en assises de chaussées (couches de base et de fondation).

b-1- Les enrobés de laitier

Les granulats de laitier concassé, par leur angularité et leur rugosité naturelles, conviennent pour la fabrication d'enrobés bitumineux. En effet, ces caractéristiques se conservent bien avec l'usure, puisque dues à la microporosité du laitier cristallisé.

Dans cette utilisation, sa texture rugueuse se conserve très longtemps malgré l'usure, et constitue un important facteur de sécurité. Cette rugosité procure un excellent accrochage du granulats au liant bitumineux (bonne adhésivité) en empêchant le déchaussement des granulats.

Les enrobés de laitier gardent un domaine d'utilisation assez large. On résume ainsi les caractéristiques des enrobés de laitier cristallisé :

- **Excellente stabilité due à la texture des grains de laitier et à leur frottement interne élevé.** Il en découle que ces enrobés :
- sont difficiles à bien densifier par compactage, d'où l'utilité de définir l'atelier de compactage le plus efficace ;

- ne donnent pas lieu à des ornières, même sur bande de circulation canalisée, exception faite de l'action des pneus à crampons, qui est valable pour tous les types d'enrobés ;
- présentent une rugosité qui semble assez peu évoluer avec l'âge, voire s'améliorer avec l'usure ;
- ont un excellent rapport traction/compression, dû probablement à la cohésion du mortier.

Pour des raisons évidentes de coût de transport, on conçoit que l'utilisation d'enrobés de laitier concassé, en dépit de leurs qualités, n'ait pu s'étendre loin des sites sidérurgiques.

b-2. Le laitier concassé dans les graves hydrauliques

Le laitier concassé peut être utilisé comme granulat dans les graves hydrauliques, quel que soit le liant utilisé (laitier granulé ou bouleté, ciment, pouzzolanes, cendres volantes).

Dans la pratique, l'élaboration simultanée de laitier cristallisé concassé et de laitier granulé (ou bouleté) conduit presque toujours à traiter le laitier concassé par du laitier granulé ou bouleté, prébroyé ou non.

Lorsqu'il en est ainsi, on désigne le mélange sous le nom de grave-laitier-tout-laitier (ou GLTL). La GLTL est donc un mélange de laitier cristallisé concassé, de laitier vitrifié (granulé ou bouleté) et d'un activant de prise.

Le laitier utilisé comme matériau de base dans les GLTL est toujours intégralement concassé. Il répond aux spécifications des Directives LCPC / SETRA pour la réalisation des assises de chaussées en graves hydrauliques, spécifications concernant essentiellement la résistance, la dureté, l'angularité et la propreté du granulat, ainsi que le fuseau granulométrique de recomposition du mélange.

Indépendamment des avantages propres à la technique grave-laitier (grande souplesse de mise en œuvre, très long délai de maniabilité, tolérance élevée aux conditions météorologiques défavorables), les GLTL présentent des propriétés spécifiques.

- Réactivité caractéristique due à plusieurs causes :
 - Activité particulière des fines de concassage qui ont des propriétés hydrauliques sensibles par suite de leur vitrification plus ou moins complète, et qui peuvent être considérées, à ce titre, comme des « germes de cristallisation ».
 - Présence de sulfates dans le laitier cristallisé, qui contribuent à une prise partiellement sulfato-calcaïque (le soufre s'oxyde en sulfate).
 - Liaisons spéciales entre le laitier granulé et le laitier concassé, dues en particulier à la similitude de leurs compositions chimiques.
- Stabilité mécanique remarquable après compactage du fait du frottement interne élevé, et de la parfaite insensibilité à l'eau des fines du laitier concassé.

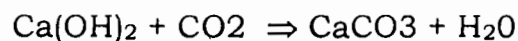
L'affinité entre laitier cristallisé concassé et laitier vitrifié (granulé ou bouleté) est telle que l'on peut utiliser le mélange sans aucun activant. Il est alors appelé grave de laitier. L'alcalinité de l'eau de compactage percolant à travers le laitier concassé et véhiculant des sulfates dissous, suffit à déclencher le processus de dévitrification du laitier vitrifié dès que le pH devient supérieur à 11,6. La cinétique d'hydratation et de durcissement est très ralentie à court et à moyen terme, mais les résistances finales sont analogues à celles des graves-laitier-tout-laitier activés à la chaux.

2-3. Traitement des matériaux routiers

2-3-1. Présentation et terminologie

On distingue généralement des liants : aériens, Hydrauliques, pouzzolaniques ou nécessitant une activation.

- Un liant aérien est un produit susceptible de faire une prise en présence d'air. Le phénomène est très lent. La chaux est un liant aérien. Le processus correspond à une carbonatation à partir du gaz carbonique de l'air.



- Un liant hydraulique est un produit susceptible de faire une prise en présence d'eau. Le phénomène démarre rapidement et se poursuit dans le temps. Les ciments sont des liants hydrauliques. Leur prise est liée au passage en solution, à l'hydratation et à la cristallisation d'un certain nombre de minéraux composés pour l'essentiel de silice, d'alumine et de chaux.
- Certains produits comme les laitiers granulés de hauts fourneaux, les cendres volantes ou les pouzzolanes ne sont pas des liants hydrauliques. Toutefois, associés à de la chaux en quantité variable selon leur nature, ils deviennent et peuvent être employés comme liants hydrauliques. De même, la chaux en s'associant à la silice et à l'alumine d'un argileux peut conduire à un phénomène de prise hydraulique (ce processus est cependant beaucoup plus lent qu'avec l'emploi d'un ciment).

2-3-2. Les techniques de traitement

Une description préalable des techniques ainsi que de leurs traits les plus spécifiques semble indispensable si l'on veut éviter la confusion et lever l'imprécision de certains textes voire leurs contradictions au niveau des spécifications.

On peut vouloir en premier lieu :

- soit améliorer un matériau,
- soit le stabiliser.

Dans les deux cas, il s'agira d'un traitement du matériau par un liant.

2-3-2-1. L'amélioration

Elle concernera les matériaux les plus riches en fines (supérieur à 25%) et pour lesquels l'indice de plasticité est supérieur à 12. il s'agira d'améliorer la tenue à l'immersion. On utilise pour cela la chaux (sol-chaux) ou le ciment (sol-ciment). On ne modifie pas par un tel traitement le comportement mécanique du matériau qui reste celui du matériau naturel. Ce comportement sera caractérisé par mesure de portance avec ou sans immersion (essai CBR).

La chaux est plus efficace que le ciment pour ce type d'amélioration et les cas les plus difficiles lui seront réservés ; toute fois, ce produit n'est pas disponible partout et c'est l'emploi du ciment - à un dosage supérieur - qui dans de nombreux cas sera adopté.

A titre indicatif, pour améliorer le comportement d'un matériau, il faut souvent trois à quatre fois plus de ciment que de chaux. Cependant, le ciment a également une action liant qui augmente très rapidement la cohésion du matériau et l'insensibilité en partie à l'eau.

Dans les deux cas toutefois, les dosages en liant restent faibles (inférieurs à 4%). Le traitement s'effectue généralement en place.

2-3-2-2. La stabilisation

Au contraire, stabiliser un matériau par un liant hydraulique modifie son comportement. Il ne sera plus celui d'un matériau naturel, mais celui d'un matériau semi-rigide. Il sera caractérisé par sa résistance en traction et son module élastique.

On parlera alors selon le cas de sable-ciment, de sable-laitier, de sable-cendres volantes, de sable-pouzzolane (selon le liant employé)

Pour que l'action du liant soit efficace à des dosages qui ne soient pas prohibitifs sur le plan économique, le matériau ne sera pas ou peu plastique ($IP < 12$). La teneur en fines sera également limitée (inférieur à 25 %).

a- Couche de fondation

Quelle que soit la structure dans laquelle ils sont inclus, les matériaux pour couche de fondation doivent avoir un CBR au moins égal à 30 obtenu pour une densité sèche correspondant à 95 % de l'OPM. On sera cependant un peu moins exigeant sur la portance pour les faibles trafics (25 pourra être admis pour T1) et plus sévère pour les trafics T4 et T5 (on exigera 35).

La dimension maximale des éléments n'excédera pas 60 mm. Il est recommandé d'utiliser des matériaux de moindre granulométrie maximale pour éviter la ségrégation.

b- Couche de base

La couche de base étant soumise à des sollicitations importantes, les matériaux qui la constituent doivent avoir des qualités suffisantes. Plusieurs critères conditionnent leur choix :

- leur indice portant ;
- leur stabilité ;
- la dureté de leur squelette ;
- la résistance à la traction des couches liées ou rigidifiées.

L'indice portant CBR sera au moins égal à 80 pour une densité sèche correspondant à 95 % de l'OPM. Si le matériau naturel n'atteint pas cette portance, il devra être amélioré ou traité. Un indice CBR de 60 peut être admis pour le trafic T1.

Les matériaux de la couche de base peuvent subir une forte attrition sous le trafic, spécialement lorsque celle-ci n'a pas été rigidifiée, car la résistance au cisaillement est alors entièrement reprise par le frottement des grains entre eux.

Les graveleux naturels peuvent être rendus aptes à être utilisés en couche de base par un traitement à la chaux ou au ciment.

Ils sont dits améliorés si, en leur ajoutant un faible pourcentage de chaux ou de ciment, ils ont un comportement qui reste souple. Ils sont, par contre, dits stabilisés quand ils acquièrent, par incorporation d'un pourcentage un peu plus élevé de ciment, une rigidité appréciable et une faible déformabilité.

Il est généralement nécessaire pour que les matériaux puissent, après traitement, satisfaire aux spécifications requises en matière de résistance et de portance, qu'ils aient, avant traitement, un CBR de l'ordre de 60.

b-1 Graveleux améliorés au ciment ou à la chaux

On les utilise en couche de base pour les trafics T1 et T2

Les caractéristiques des matériaux susceptibles d'être traités sont les suivantes :

Dimension maximale.....	de 10 à 50 mm
Pourcentage de passant à 80 µm.....	inférieur à 35
Indice de plasticité.....	inférieur à 25
Module de plasticité.....	inférieur à 2 000
Teneur en matières organiques.....	inférieur à 1 %.

Les exigences complémentaires, dans le cas de traitement à la chaux, se rapportent à l'indice de plasticité qui doit être supérieur à 10 et au passant à 0,425 mm dont le pourcentage doit être supérieur à 15.

Le matériau amélioré sera considéré comme satisfaisant si le CBR, à 95 % OPM, après 3 jours de cure à l'air et 4 jours d'immersion, est supérieur à 160.

b-2. Graveleux traités au ciment

Ils conviennent pour tous les trafics, mais des raisons économiques évidentes les feront réserver aux trafics T4 et T5.

Les graveleux aptes à être stabilisés doivent avoir :

- une dimension maximale de 10 à 50 mm ;
- un pourcentage de passant à 80 µm inférieur à 35 % ;
- un indice de plasticité inférieur à 25 ;
- un coefficient d'uniformité $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ supérieur à 10 ;
- un module de plasticité :
 - inférieur à 1 500 dans le cas d'un traitement en place,
 - inférieur à 700 dans le cas d'un traitement en centrale

CHAPITRE III :

ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre III : **Etude expérimentale**

La construction routière en pays tropicaux reste largement tributaire de la présence des graveleux latéritiques qui offrent un compromis providentiel aux conditions climatiques des pays tropicaux à saisons bien marquées : leur plasticité assure une certaine cohésion en saison sèche et leur squelette permet qu'une portance suffisante reste disponible en saison des pluies.

Dans le cadre de ce projet, deux types de latérite ont été étudiés :

- 1 – Latérite de Lam-Lam
- 2 – Latérite de Sindia

Nous proposons de présenter leurs caractéristiques géotechniques en vue de leur classification.

3.1 – Identification géotechnique du matériau

3-1-1. Procédure

Dans un premier temps nous allons essayer de caractériser entièrement notre matériau d'étude ; et ce n'est qu'après avoir bien maîtrisé notre matériau cru que nous allons passer à la formulation des différents mélanges à réaliser.

En effet une bonne maîtrise du matériau d'emprunt semble indispensable car, on note à ce niveau un problème important qui est celui de l'hétérogénéité des graveleux latéritiques dont la nature peut être relativement variable même dans un même emprunt.

3-1-2-b. Caractéristiques géomécaniques des graveleux latéritiques crus

Afin de mieux cerner nos deux emprunts latéritiques, nous avons fait des essais qui ont porté sur :

- l'analyse granulométrique,
- le poids spécifique,
- les limites d'atterberg,
- l'essai Proctor modifié,
- l'essai CBR.

Pour l'analyse granulométrique nous avons procédé par lavage. Pour les essais CBR, on a procédé au poinçonnement après 4 jours d'imbibition à l'eau à une énergie de compactage correspondant à 55 coups.

Les résultats de tous ces essais, et pour chacun des graveleux étudiés sont présentés dans le tableau III-2 suivant :

L.L	L.P	I.P	γ_h [t/m ³]	$\gamma_{d,opt}$ [t/m ³]	ω_{opt} (%)	CBR	G (%)	γ_s
35.26	19.06	16.20	2.32	2.105	10.3	45	0.211	2.6

Tableau III-2 :Résultats des essais sur la latérite de Lam-Lam

L.L	L.P	I.P	γ_h [t/m ³]	$\gamma_{d,opt}$ [t/m ³]	ω_{opt} (%)	CBR	G (%)	γ_s
33.2	17.8	15.4	2.16	1.96	10.8	47	0.142	2.67

Tableau III-3 :Résultats des essais sur la latérite de Sindia

Le CBR a été déterminé après quatre (04) jours d'imbibition de l'échantillon et à 95% OPM.

G= gonflement

3-1-3. Classification des latérites

3-1-3-a. Latérite de Lam-Lam

l'indice de plasticité ,IP= 16.20

Le pourcentage de fines, f=11.4

donc $f \cdot IP = 184.4$

La latérite de Lam-Lam est de la classe de G11

3-1-3-b. Latérite de Sindia

l'indice de plasticité , IP= 15.9

Le pourcentage de fines, f=15.2

donc $f \cdot IP = 244.9$

La latérite de Sindia est de la classe de G11.

3-1-4. Analyse et interprétation des résultats

L'analyse sera axée essentiellement sur les résultats de laboratoire à savoir les essais Proctor, CBR , les limites d'Atterberg, et les granulométrie avant et après compactage.

3-1-4-a. Essai Proctor

Le tableau IV-4 donne les résultats des essais effectués sur nos matériaux :

Emprunt	wopt(%)	Densité sèche
Lam-Lam	10,3	2,105
Sindia	10,8	1,96

Tableau III-4 :Résultats des essais Proctor Modifiés

3-1-4-b. Essai CBR

Avec la teneur en eau obtenue lors de l'essai Proctor ,on a effectué les essai CBR ,et les résultats obtenus sont consignés dans le tableau III-5 suivant :

Emprunt	CBR imméd,	CBR après 96 h d'imbibition			
		IP avant CBR	CBR 95%OPM	CBR 100%OPM	IP après CBR
Lam-Lam	89	15,95	45	88	15,12
Sindia	,	15,4	47	73	14,87

Tableau III-5 : Résultat des essais CBR sur les latérites crues

3-1-4-c. Interprétation des résultats

Les résultats des essais Proctor donnent pour la latérite de Lam-Lam une densité de 2.015 g/cm³, ce qui est légèrement supérieur au minimum requis par le CEBTP, qui est de 2 g/cm³. Par contre celle de Sindia donne une densité de 1.96 g/cm³ qui est en deçà de celle requise.

Les critères de convenance des matériaux routiers dépendent spécifiquement des pays. On admet que c'est le CBR mesuré dans le cas général, après quatre (04) jours d'imbibition et pour une densité de 95% OPM qui est fondamental.

Les valeurs de CBR trouvées pour les deux graveleux latéritiques, à 95% OPM et après quatre jours d'imbibition (45 pour Lam-Lam et 47 pour Sindia) sont bien en deçà du minimum requis ,qui est de 80.

Ainsi ces deux latérites ne peuvent être utilisées en couche de base sans être améliorées.

Les courbes granulométriques avant compactage donnent un pourcentage de fines de 11.4% pour Lam-Lam et 15.9 pour Sindia.

La latérite développe souvent une bonne cohésion qui résiste aux effets des pneus sans être très argileux ,c'est à dire sans se ramollir considérablement à l'humidification ou à l'imbibition.

Pour nos deux emprunts, on a eu des Indices de Plasticité de 16.20 et 15.4 respectivement pour Lam-Lam et Sindia. Ce qui fait que ceux ci présenteront les caractéristiques suivantes :

- Ils ne seront pas trop argileux ,car les IP sont dans les deux cas inférieurs à 35.

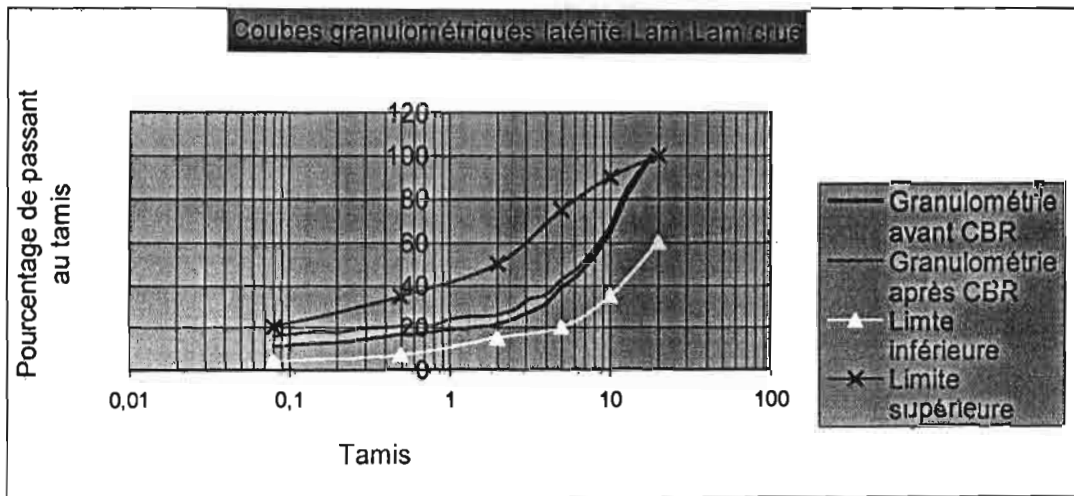
- L'emprunt de Lam-Lam comme celui de Sindia est suffisamment graveleux ,car possède plus de 45% d'éléments supérieurs à 2 mm (squelette).

- Nos latérites s'insèrent parfaitement dans le fuseau granulométrique définissant les courbes granulométriques acceptables qui est le suivant :Tableau III-6

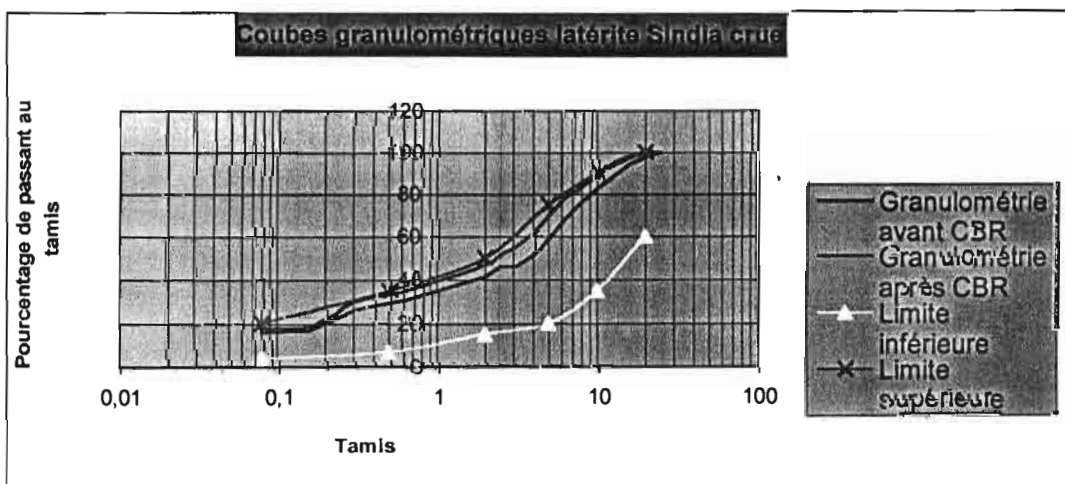
Diamètre	Norme	Lam-Lam	Sindia
40 mm	100%	100	100
20 mm	60%-100%	100	97,5
10 mm	35%-90%	64	76
5 mm	20%-75%	39	58,4
2 mm	20% - 50%	24,1	41,2
0,5 mm	7% - 35%	17	29
0,08 mm	4% - 20%	11,4	15,9

tableau III-6 :Fuseau granulométrique recommandé

Ceci se voit mieux au regard des graphes III-1 et III-2 suivantes, où on a mis en évidence les courbes de compactage de nos emprunts, avant et après compactage.



Graph III-1 : Courbe granulométrique avant et après compactage de la latérite de Lam-Lam et les fuseaux recommandés par le CEBTP.



Graph III-2 : Courbe granulométrique avant et après compactage de la latérite de Sindia et les fuseaux recommandés par le CEBTP.

3-2. Identification du laitier de la SOSETRA

3-2-1. Composition chimique du laitier

On peut considérer les laitiers comme des silicates complexes d'alumine et de chaux, contenant de plus, en faible proportion, de l'oxyde de magnésium et de l'oxyde de manganèse, ainsi que des oxydes de fer et des sulfures.

Spécifiquement, pour notre cas, l'analyse chimique du laitier de la SOSETRA, effectuée dans les laboratoires de la SOCOCIM, donne les résultats suivants :tableau III-7

échantillon	date	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	IH	Total
B1	19/01	47.96%	3.88%	46.78%	0.00%	1.08%	0.08%	99.70
B2	19/01	43.78%	3.39%	27.65%	0.70%	1.51%	0.11%	77.03
B3	19/01	65.43%	3.53%	24.28%	2.44%	1.69%	0.10%	97.37
B4	19/01	68.68%	2.67%	23.53%	0.41%	1.74%	0.06%	97.03
moyenne	19/01	64.02%	2.38%	28.98%	0.66%	1.50%	0.06%	97.03

Tableau III-7 :Résultats des analyses chimiques sur le laitier

γs: SiO₂ : 2.2 - 2.6 g/cm³
 Al₂O₃: 4 g/cm³
 Fe₂O₃:5. 1 - 5.2 g/cm³
 MgO : 3.5 - 3.7 g/cm³

3-2-2. Amélioration suggérée

A la lumière des résultats sur les matériaux crûs, nos emprunts présentent des caractéristiques susceptibles d'être améliorées. Ainsi pour être utilisées en couche de base, les latérites de Sindia comme de Lam-Lam devraient avoir un CBR d'au moins de 80 (au lieu de 47 et 45 respectivement pour Sindia et Lam-Lam). Nous allons ajouter à nos matériaux du laitier fillerisé et nous essayerons de mettre à profit l'affinité chimique de ses fines pour le liant.

Pour ce faire, nous allons broyer notre laitier granulé et le passant au tamis 2 mm sera utilisé comme ajout à la latérite.

Compte tenu de la faiblesse de la production à l'état actuel, on va dans un premier temps essayer d'améliorer en utilisant les pourcentages d'ajout suivants, pour chaque mélange :

- 5% de laitier,
- 8% de laitier,
- 10% de laitier.

Les graveleux latéritiques que nous envisageons de placer en couche de base après traitement au laitier doivent avoir des caractéristiques suffisantes pour que les performances que nous attendons du mélange ne soient pas obtenues au prix d'un pourcentage de laitier trop élevé.

3 4-. Etude des mélanges

Pour cette étude, un certain nombre de mélanges seront réalisés pour chaque type de latérite.

Pour la latérite de Lam-Lam deux (02) variantes ont été proposées pour différents pourcentages de laitier (5%, 8%, 10%) .

- poinçonnement après trois jours à l'air.
- poinçonnement après quatre jours d'imbibition.

Pour la latérite de Sindia aussi, deux (02) variantes ont été proposées pour les mêmes pourcentages de laitier :

- poinçonnement après trois jours à l'air puis quatre jours d'imbibition.
- poinçonnement après quatre jours d'imbibition.

3-4-1. Latérite de Lam-Lam + passant 2 mm laitier

- Première variante : Mélanges latérites-laitier : Trois (03) jours à l'air libre
- Deuxième variante : Mélanges latérites-laitier : Quatre (04) jours d'imbibition.

Pour chaque variante, on a procédé à ces trois types de mélanges :

- 1-94% de latérite + 5% de laitier + 1% de chaux
- 2-91% de latérite + 8% de laitier + 1% de chaux
- 3-89% de latérite + 10% de laitier + 1% de chaux

On a ensuite poinçonné après avoir laissé les échantillons trois jours à l'air libre ; Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau III-8 suivant :

	5% Laitier		8% Laitier		10% Laitier	
	3 jours à l'air	4 jours d'imbibition	3 jours à l'air	4 jours d'imbibition	3 jours à l'air	4 jours d'imbibition
$\gamma_d, \max(t/m^3)$	2,105	2,1	2,108	2,094	2,12	2,1
wopt(%)	10,7	12,16	11	11,54	11,1	12,1
WL	38,15	38,15	37,94	37,94	38,26	38,26
WP	23,98	23,98	23,38	23,38	23,37	23,37
IP	14,17	14,17	14,56	14,56	14,89	14,89
CBR	30	62,2	46	35	41	49
WL ,après CBR	38,12	37,87	,	37,49	38,75	38,1
WP ,après CBR	22,25	22,08	,	20,93	23,18	22,7
IP ,après CBR	15,87	15,79	,	16,56	15,57	15,4
f ,av,CBR	,	10,82	,	11,28	,	11,79
f ,ap,CBR	,	15,44	,	17,44	,	18,3
gonflement	,	,	,	,	,	,

Tableau III-8 : Résultats des essais sur le mélange latérite de Lam-Lam _ laitier

3-4-2. Latérite de Sindia + passant 2 mm laitier :

- Première variante : Mélanges latérites-laitier : Trois (03) jours à l'air libre puis quatre (04) jours d'imbibition

- Deuxième variante : Mélanges latérites-laitier : Quatre (04) jours d'imbibition.

Pour chaque variante, on a procédé aux mêmes mélanges que précédemment.

On a ensuite poinçonné après avoir laissé les échantillons d'une part 4 jours d'imbibition, d'autre part 3 à l'air libre puis 4 jours d'imbibition ; Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau III-9 suivant :

	5 % de Laitier		8 % de Laitier		10 % de Laitier	
	3 jrs à l'air et 4 jrs imb,	4 jours d'imbib,	3 jrs à l'air et 4 jrs imb,	4 jours d'imbibi,	3 jrs à l'air et 4 jrs imb,	4 jours d'imbib,
$\gamma_d, \text{max (t/m}^3\text{)}$	1,95	1,96	2,04	2,03	2,035	2,035
$w_{opt} (\%)$	13	12,4	9,75	10,9	11,3	13,3
WL	37,43	37,43	34,52	34,52	38,71	38,71
Wp	23,02	23,02	18,31	18,31	24,84	24,84
IP	14,41	14,41	16,21	16,21	13,87	13,87
CBR à 95% OPM	50	53	39	48	42	51
CBR à 100% OPM	,	,	,	,	,	,
WL, après CBR	,	38,46	37,24	38,17	38,1	37,59
Wp, après CBR	,	23,07	21,64	23,07	23,21	22,23
IP, après CBR	,	15,39	15,6	15,1	14,89	15,36
f, ap, CBR	17,8	17,92	16,25	20,15	20,6	19,74

Tableau III-9 : Résultats des essais sur le mélange latérite de Sindia _ laitier

Le laitier utilisé présente la courbe granulométrique figure III-3 suivante:

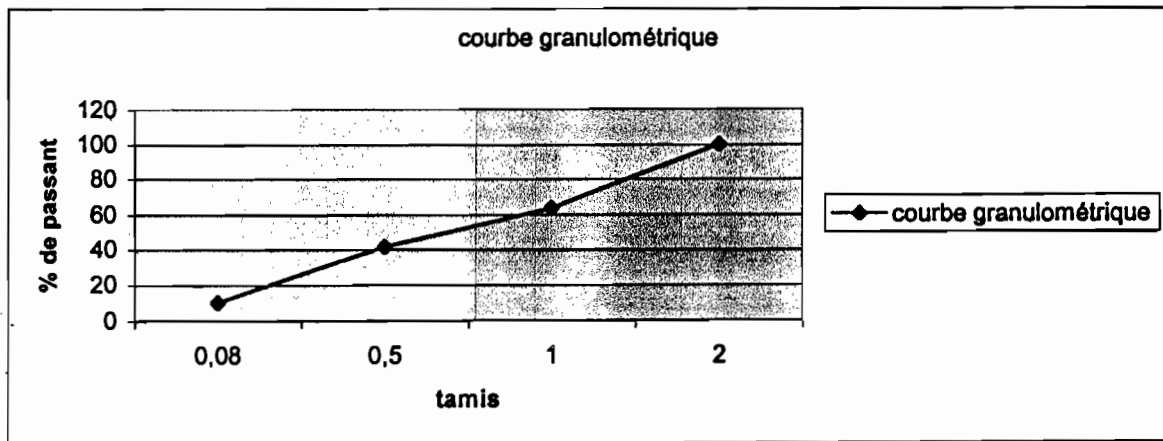


Fig III-3: courbe granulométrique du laitier passant 2 mm

3-4-3. Latérite de Lam-Lam + Laitier passant 0.5mm

Pour ce cas, nous avons voulu jouer sur le degré de finesse du laitier utilisé. Ainsi nous avons utilisé du laitier finement broyé dont voici la courbe granulométrique :

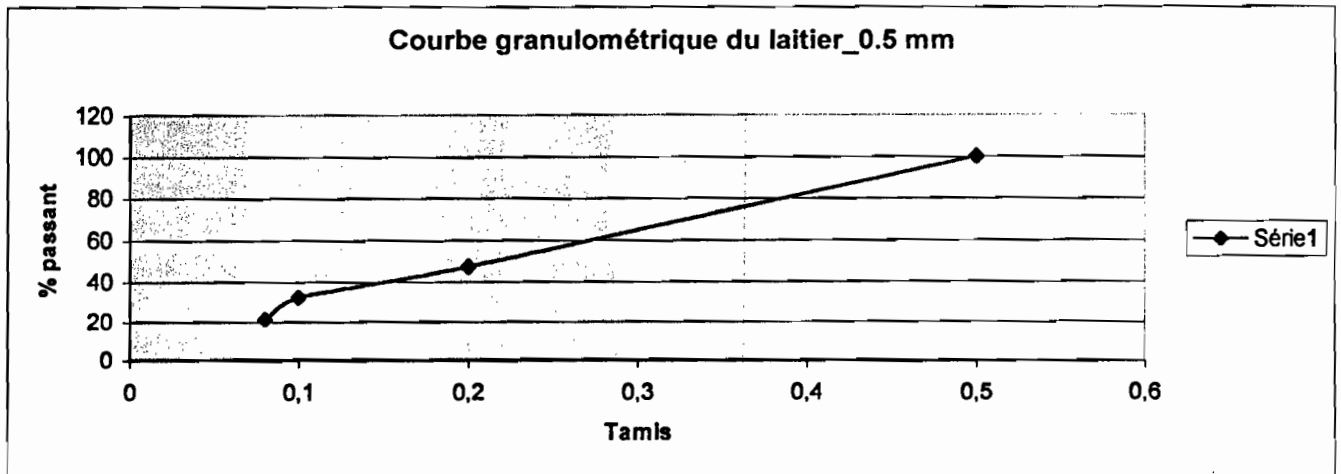


Fig III-4 : courbe granulométrique du laitier passant 0.5 mm

le pourcentage de fines (passant 80 μ m) du laitier est de 21.13 %

❖ Mélanges latérites-laitier : Trois (03) jours d'imbibition :

- puis poïçonnement au troisième jour,
- puis un (01) jour à l'air libre,
- puis trois (03) jours à l'air libre.

Pour ces variantes, on a procédé toujours aux trois types de mélanges :

Les résultats de tous ces essais sont résumés dans le tableau III-10 suivant :

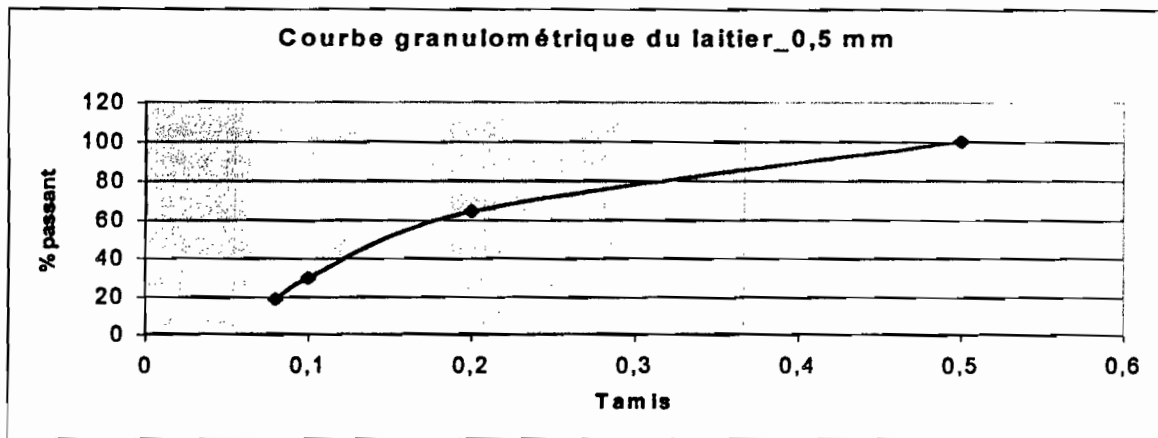
N	5% de laitier			8% de laitier			10% de laitier		
	0	1	3	0	1	3	0	1	3
$\gamma_d, \max (t/m^3)$	2,085	2,1	2,09	2,11	2,105	2,07	2,12	2,1	2,1
$w_{opt} (\%)$	12	11,87	12,2	13,2	12,35	12,4	12,7	13,1	12,54
W_L	37,1	,	37,1	38,2	,	,	37,9	,	,
W_p	22,4	,	22,4	24	,	,	23,6	,	,
IP	14,7	,	14,7	14,2	,	,	14,3	,	,
CBR à 95% OPM	81	,	,	52	,	,	,	,	,
CBR à 100% OPM	120	101	96	127	89	81	41	,	,
$W_L, \text{après CBR}$	39,74	38,52	,	38,6	,	37,6	38,7	37,9	38,2
$W_p, \text{après CBR}$	24,51	23,78	,	23	,	22,2	23,5	22,1	22,33
IP, après CBR	15,23	14,74	,	15,6	,	15,3	15,2	15,8	15,87
f, av, CBR	10,83	,	,	11,2	,	,	12,5	,	,
f, ap, CBR	15,46	,	,	17	,	,	18	,	,

Tableau III-10 : Résultats des essais sur le mélange
latérite de Lam-Lam _ laitier(0.5 mm.)

N représente le nombre de jours que l'on a laissé l'échantillon à l'air après les trois jours d'imbibition.

3-4-3. Latérite de Lam-Lam+Laitier vitrifié passant 0.5 mm

Pour ce cas nous avons aussi utilisé du laitier finement broyé dont voici la courbe granulométrique :



le pourcentage de fines (passant 80µm) du laitier est de 18.54 %

❖ Mélanges latérites-laitier : Trois (03) jours d'imbibition :

-puis poiçonnement au troisième jour,

Pour ces variantes, on a procédé à ces deux types de mélanges :

1-94% de latérite + 5% de laitier + 1% de chaux

2-91% de latérite + 8% de laitier + 1% de chaux

	5 % de Laitier	8 % de Laitier
$\gamma_d, \text{max (t/m}^3\text{)}$	2,1	2,097
$w_{opt} (\%)$	13%	13,1
W_L	38,41	37,15
W_P	24,21	22,2
IP	14,2	14,95
CBR à 95% OPM	93	89
CBR à 100% OPM	134	130
$W_L, \text{après CBR}$	37,8	38,4
$W_P, \text{après CBR}$	22,7	23,24
$IP, \text{,après CBR}$	15,1	15,16
$f, \text{av, CBR}$	10,82	,
$f, \text{ap, CBR}$	15,46	16,24

Tableau III-11 : Résultats des essais sur le mélange
latérite de Lam-Lam _ laitier vitrifié (0.5 mm.)

3-5. Analyse et interprétation des résultats :

La mauvaise stabilité des matériaux est en partie liée à un mauvais équilibre entre les différentes fractions granulométriques qui les composent ; ceci a pour conséquence des densités faibles compte tenu de la valeur de la dimension maximale (D) du matériau entraînant un manque de cohésion doublé souvent d'un frottement interne peu important.. Différentes méthodes sont envisageables pour améliorer la stabilité.

C'est ainsi que dans un premier temps nous avons essayé d'utiliser le passant du laitier 2 mm. Dans ce cas de figure on n'influe pas sur le squelette de nos emprunts et les résultats obtenus ne sont pas du tout satisfaisants, car partant de CBR crus de 88 et 73 à 100%, respectivement pour Lam-Lam et Sindia, l'ajout de laitier granulé, au lieu d'augmenter l'indice de portance, le fait chuter considérablement.

On constate en plus que cette chute s'accroît au fur et à mesure qu'on accroît les pourcentages d'ajout de laitier.

Ces effets pourraient être imputés à la cristallinité du laitier utilisé. En effet, il ne faut pas occulter le fait que notre laitier est un laitier bien cristallisé, donc a priori n'a pas de propriétés hydrauliques intéressantes.

L'ajout de laitier agit aussi d'une manière globale vers l'augmentation de l'indice de plasticité (IP).

Le traitement réalisé avec le laitier passant le tamis 0.5 mm donne par contre des résultats assez encourageant, car en partant toujours des CBR crus de 88 à 100% OPM pour Lam -Lam , on aboutit à un indice de portance de plus de 120 à 5% et à 8% de laitier fillerisé (respectivement 120 et 127) avec des valeurs d'indices de plasticité de 15.95 et 15.83 respectivement. Mais néanmoins il chute à 10% de laitier jusqu'à 50 correspondant à un augmentation relative de

l'indice de plasticité (IP) ; ceci confirme que c'est la finesse du laitier ajouté qui est à l'origine de la chute de CBR.

Ainsi, il semble se dégager que la finesse du laitier agit d'une manière positive sur les caractéristiques géotechniques de notre matériau d'emprunt, tant sur le plan chimique que sur le plan de la correction granulométrique juste pour une certaine plage granulométrique (5% - 8%).

La notion de correction granulométrique, se substitue plutôt celle de remplissage des vides, surtout en ce qui concerne les latérites. En effet un produit encore plus fin vient combler les vides de la grave latéritique en réalisant un certain calage des grains .

Pour la résistance l'aspect essentiel, la stabilité initiale acquise, est le potentiel de prise hydraulique libérable par le liant..

Cependant, le comportement du matériau amélioré avec le passant 0.5 mm voit ses caractéristiques de résistance baisser après une cure de trois jours à l'air.

Ainsi le laitier améliore le caractère frottant. Ce rôle est cependant souvent insuffisant tant au niveau de la stabilité que de la portance. En ce qui concerne la portance, le potentiel de prise des laitiers est lié à la quantité de fines présente ou libérable par attribution ; augmenter l'indice de portance reviendra à augmenter ces fines.

* en jouant sur le dosage en laitier

* en utilisant du laitier fillerisé.

L'utilisation du laitier vitrifié fillérisé donne de meilleurs résultats. Ainsi partant des indices de portance CBR à 95% OPM de 45 pour Lam-Lam crue on aboutit à 93 et 89 respectivement pour 5% et 8% d'ajout de laitier.

Au vu de ces résultats, on peut affirmer effectivement que le laitier vitrifié contrairement à celui cristallisé agit chimiquement sur le mélange, mais aussi joue en même temps un rôle de correcteur granulaire.

En effet, autant les particules de laitier sont fines, autant elles sont à même de réagir chimiquement. Ainsi les ions Ca^{2+} issus de la chaux se combinent aux ions Si provenant aussi bien de la latérite que du laitier.

L'indice de plasticité (IP) augmente avec la finesse des grains, car elle exprime en % la capacité d'absorption d'eau du mortier et par voie de conséquence sa capacité de gonflement.

Les indices de plasticité (IP) des mortiers issus des différents types de mélanges montrent une diminution relative de celle ci. Cette diminution doit être mise en rapport avec l'action de la chaux.

L'analyse globale des résultats obtenus montre que la chaux agit sur le matériau traité de la manière suivante :

- elle provoque une réduction de la densité sèche et une augmentation de la teneur en eau.
- Elle augmente l'aptitude du mélange à n'absorber que la stricte quantité d'eau nécessaire au développement du processus chimique.

C'est la raison pour laquelle on note une diminution des valeurs d'indices de plasticité obtenus avec les différents matériaux améliorés.

En résumé, on peut dire que le traitement des graves laitiers à la chaux vive obéit au mécanisme suivant :

- la chaux s'hydrate aux dépens du sol dont la teneur en eau diminue ;
- Cette hydratation s'accompagne d'un important dégagement de chaleur lequel vaporise l'eau, ce qui diminue encore la teneur en eau du sol ;

- Les ions Ca^{2+} de la chaux s'échangent avec les ions Si, cette transformation se traduit par les évolutions géotechniques suivantes :
- Les limites de plasticité et de liquidité augmentent sans qu'il y'ait modification notable de l'indice de plasticité (plutôt elle diminue).
- Les teneurs en eau optimum Proctor augmentent en même temps que les limites d'Atterberg ;
- Le poids spécifique obtenu γ_d par l'essai Proctor diminue.

De ce mécanisme, on tire les conclusions suivantes :

La forte diminution de la teneur en eau due à l'hydratation de la chaux et à la vaporisation agit sur l'indice de consistance dans le même sens que les augmentations des limites d'Atterberg ; cependant, l'indice de plasticité diminue légèrement. D'où l'action de la chaux est prépondérante sur celle de la finesse des particule vis à vis de l'indice de plasticité.

Chapitre IV : Proposition de dimensionnement

4-1. Principes directeurs

L'approche du dimensionnement des structures de chaussées induit trois sortes de considérations :

- des considérations relatives à l'épaisseur totale des chaussées ;
- des considérations relatives à l'épaisseur partielle de chacune des couches constitutives de la chaussée ;
- des considérations portant sur la nature et la qualité des matériaux constituant le corps de chaussée en vue d'assurer une compatibilité satisfaisante entre les différentes couches voisines.

4-2. Principes d'ordre théorique liés à la bonne conception des structures.

- 1- Obtenir en tête de plate-forme des contraintes de compression admissibles : cet objectif détermine et conditionne largement l'épaisseur totale de la chaussée.
- 2- Obtenir à la base des couches traitées, susceptible de travailler en flexion, des contraintes de traction admissibles et pour les couches non traitées des déformations verticales admissibles. Ces objectifs conditionnent dans une large mesure l'épaisseur individuelle des couches.

4-3. Les matériaux

La portance CBR sera déterminée en fonction des conditions de densité et de teneur en eau les plus défavorables subies à long terme par la plate-forme.

Il a lieu de distinguer, de ce point de vue, pour ce qui concerne les pays dits "tropicaux", trois grandes unités climatiques majeures et trois grands types de sols :

1° *Zone désertique et sahélienne à pluviométrie très faible (< 300 mm par an).*

Les sols y sont rarement saturés : la teneur en eau naturelle y est le plus souvent inférieure à celle de l'OPM : c'est le cas du Sénégal ;

2° *Zone tropicale à saison sèche bien marquée.*

C'est la zone des savanes dans laquelle la teneur en eau naturelle excède de quelques points, en saison humide, l'OPM .

3° *Zone équatoriale à très forte pluviométrie*

C'est la zone forestière dans laquelle les précipitations annuelles excèdent 1,2 m. Les sols restent imbibés une grande partie de l'année à une teneur en eau très nettement supérieure à l'OPM.

Selon que les sols de ces trois zones climatiques seront :

- *pulvérulents et perméables ;*
- *moyens ;*
- *fins et très peu perméables,*

et compte tenu de la topographie, de l'efficacité et de la fiabilité du drainage prévu, les conditions d'exécution de l'essai CBR pourront être différentes ; la

portance sera alors donnée en référence à des durées d'imbibition qui pourront varier de 0 heure à 7 jours.

En règle générale, la durée d'immersion des éprouvettes soumises au poinçonnement CBR sera de 4 jours ;

4-4. Classes de portance des sols

Cinq classes de sols ont été retenues, qui correspondent à une répartition assez constante des divers types de sols rencontrés en pays tropicaux : Tableau V-1

S1	CBR < 5
S2	5 < CBR < 10
S3	10 < CBR < 15
S4	15 < CBR < 30
S5	CBR > 30

Tableau IV-1

C'est, bien entendu, la réalisation des chaussées sur des sols de faible portance qui pose les problèmes majeurs. Il faut, dans la classe des sols S1 de CBR < 5, dissocier les sols gonflants des autres sols peu porteurs.

Il faut, de toute façon, chercher à disposer du meilleur sol de plate-forme possible.

On aura toujours intérêt à sélectionner le matériau, de façon à avoir en tête de remblai des sols de bonne portance sur au moins 30 cm d'épaisseur.

Dans toute la mesure du possible, on substituera, sur environ 50 cm, aux sols en déblais de CBR < 5, des matériaux de meilleure portance ou on traitera le sol-support.

La faible portance des sols est généralement due à une teneur en eau excessive. Il est possible de limiter les effets de ce paramètre, quand on ne dispose pas de matériaux de substitution, en surélevant au maximum la plateforme, ce qui permet un meilleur essorage et une consolidation des sols dont la portance s'améliore dans les couches supérieures. Le drainage de ces sections doit être très efficace et profond.

Le choix de CBR se fera d'après les résultats des campagnes de reconnaissance et des essais de laboratoire. On ne prendra pas systématiquement en compte pour le dimensionnement la plus faible valeur obtenue sur une section considérée comme homogène, mais celle se rapprochant le plus de la valeur la plus fréquente.

4-5. Trafic

4-5-1. Durée de vie

Bien que fondamentale, l'importance du trafic qu'aura à supporter les routes durant la période pour laquelle on la dimensionne est toujours difficile à appréhender. Il arrive que les conditions économiques locales se modifient rapidement entraînant des trafics dont l'accroissement avait été sous-estimé ; un renforcement est alors à envisager.

Dans le cas général, on admettra que la chaussée devra être conçue pour une période de quinze ans avant que ses caractéristiques progressivement altérées ne rendent nécessaire son renforcement mais, par le biais du calcul du trafic équivalent en nombre de passages d'un essieu standard, il est possible de dimensionner une chaussée pour une durée quelconque.

4-5-2. Répartition du trafic sur l'itinéraire

Si la route a *moins de 7 m* de largeur, on prendra en compte l'ensemble du trafic dans les deux sens de circulation. Si la route a *plus de 7 m* ou si les voies sont à circulation *unidirectionnelle*, le trafic dans *le sens le plus chargé* sera considéré.

Les structures proposées sont prévues pour supporter des essieux simples dont la charge maximale est de 13 t et un pourcentage de surcharge n'excédant pas 10 %.

4-5-3. Classes de trafic

Les classes de trafic retenues sont définies de plusieurs façons en fonction du degré de précision des données disponibles :

- trafic journalier toutes catégories de véhicules confondues ;
- trafic cumulé de poids lourds (véhicules définis comme ayant un poids total, en charge, supérieur à 3 t) ;

4-5-3-1. Trafic en nombre de véhicules par jour

Il est défini par son intensité journalière moyenne sur une durée de vie de l'ordre de quinze ans, toutes classes de véhicules incluses. Le pourcentage moyen de poids lourds est supposé de l'ordre de 30 % du trafic total. Cinq classes de trafic sont distinguées :

T1		<300
T2	de 300	à 1000
T3	de 1000	à 3000
T4	de 3000	à 6000
T5	de 6000	à 12000

T1 inclut des routes à très faible trafic pour lesquelles le bitumage a cependant été décidé pour des raisons qui peuvent être indépendantes de critères purement économique.

4-5-3-2. Trafic en nombre cumulé de poids lourds.

Si l'estimation du trafic cumulé en nombre de poids lourds - véhicules de charges totale supérieure à 3 t - est possible, l'appréciation de ce paramètre sera meilleure que dans le premier cas.

Les classes retenues correspondent approximativement à celles définies par la méthode précédente, si la durée de vie de la chaussée est prise égale à quinze ans et si le pourcentage de poids lourds est voisin de 30 %. Ces classes sont les suivantes (Tableau V-2)

$T_1 < 5.10^5$
$5.10^5 < T_2 < 1,5.10^6$
$1,5.10^6 < T_3 < 4.10^6$
$4.10^6 < T_4 < 10^7$
$10^7 < T_5 < 2.10^7$

Tableau IV-2

Les formules à appliquer pour les calculs de trafic sont les suivantes :

Cas de croissance exponentielle :

$$t_n = t_1 (1+i)^{n-1}$$

$$365 \sum_{1}^n t_n = 365 t_1 \frac{(1+i)^n - 1}{i}$$

Cas de croissance linéaire :

$$t_n = t_1 [1 + (n-1)i]$$

$$365 \sum_{1}^n t_n = 365 n t_1 \left[\frac{2 + (n-1)i}{2} \right]$$

t_1 = trafic moyen journalier de la première année

t_2 = trafic moyen journalier de l'année n

n = nombre d'années (durée de vie) ;

i = taux d'accroissement annuel du trafic ;

$$365 \sum_{1}^n t_n = \text{trafic cumulé pendant la durée de vie } n.$$

4-5-3-3. Trafic en nombre de passages d'un essieu standard.

A défaut de disposer d'une formule d'équivalence qui aurait été définie à partir d'essais réalisés en pays tropicaux, il est proposé d'adopter l'équivalence donnée par Liddle et définie par rapport à un essieu standard de 8,2 t :

$$c = \left[\frac{P}{8,2} \right]^\alpha$$

P : est le poids de l'essieu simple exprimé en t.

On prendra, pour les chaussées souples, $x = 4$

Dans le cas des chaussées rigides, on devra adopter : $4 < x < 8$.

(8 correspond aux chaussées en béton).

Les classes de trafic exprimées en nombre cumulé de passages d'un essieu équivalent sont les suivantes : Tableau V-3

Essieu équivalent de 13 t	Essieu équivalent de 8,2 t
$T1 < 5.10^5$	$T1 < 3.10^6$
$5,10^5 < T2 < 1,5 10^6$	$3.10^6 < T2 < 10^7$
$1,5 10^6 < T3 < 4,10^6$	$10^7 < T3 < 2,5 10^7$
$4,10^6 < T4 < 10^7$	$2,5 10^7 < T4 < 6.10^7$
$10^7 < T5 < 2.10^7$	$6.10^7 < T5 < 10^8$

Tableau IV-3

Le calcul du trafic cumulé en essieux équivalents pendant la durée de vie choisie se fera à partir du trafic initial en utilisant les mêmes formules de sommation que précédemment.

Dans le calcul du trafic équivalent, on pourra souvent négliger la prise en compte des véhicules légers dont l'influence est faible. Connaissant les types de véhicules composant le parc automobile d'un pays et leur charge par essieu, on pourra affecter chacun des types d'un facteur d'équivalence global par véhicule et effectuer la sommation à partir des données des campagnes de comptage de la circulation et des estimation de projection de trafic.

4-6. Hypothèses et paramètres d'entrée pour le dimensionnement

4-6-1. Couche de base

La couche de base sera réalisée avec chacune des formulations retenue. Pour chaque formulation on calculera le module élastique.

On précisera que le module est donnée par la corrélation proposée par SHELL qui est la suivante :

$$E_{dyn} = 100 * CBR$$

Les différentes valeurs de modules dynamiques fonctions des valeurs de CBR, pour les différents cas sont consignées dans les tableaux IV-5 et IV-6 suivants :

a- Latérite crue

	Latérite de Lam-Lam	Latérite de Sindia
CBR	43	47
Edyn(bars)	4300	4700

tableau IV-4

b- Formulations

Pour la formulation, nous nous proposons d'utiliser pour le dimensionnement que les améliorations faites avec le laitier vitrifié car elles donnent les meilleurs résultats. Ainsi, pour simplifier, nous allons par la suite adopter les notations suivantes :

- 94% latérite Lam-Lam + 5% laitier vitrifié + 1% chaux = 94LA5LT
- 91% latérite Lam-Lam + 8% laitier vitrifié + 1% chaux = 91LA8LT

Les différentes valeurs ,pour chaque formulation sont consignées dans le tableau IV-6 suivant :

	94LA5LT	91LA8LT
CBR	91	87
Edyn(bars)	9100	8700

tableau IV-6

4-6-2. Charges sur le corps de chaussée

4-6-2-a. Rupture par poinçonnement du sol

Le CEBTP propose pour le calcul du nombre de cycles admissibles avant poinçonnement de la plate-forme, la formule semi-empirique de Kerkhover et Dormon suivante :

$$\sigma_{adm} = \frac{0.3 \times CBR}{1 + 0.7 \text{Log}N}$$

Pour le nombre de cycle

$$N_{sol} = 10 \frac{\left(\frac{0.3CBR}{\sigma_z} - 1\right)}{0.7}$$

4-6-2-b. Paramètres d'entrée

Comme choix pour le calcul nous adopterons des roues jumelées dont les rayons d'empreinte sont de 12.5 cm. La pression exercée par celle ci est la pression standard, égale à 6.62 bars.

L'entraxe de jumelage = 37.5 cm.

Le coefficient de poisson sera pris égal à 0.25.

On considérera qu'il n'y a pas de glissement entre les couches.

Après avoir défini nos paramètres d'entrée, nous allons utiliser le programme de calcul ECOROUTE pour dimensionner notre structure.

4-7. Les résultats du programme ECOROUTE

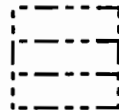
Pour le dimensionnement fait avec Ecoroute, nous avons fixé l'épaisseur de la couche de fondation à 25 cm, celle de la base à 15 cm, considérant que toute notre structure est faite avec la latérite crue . Nous obtenons ainsi contraintes admises dans les différentes composantes de la structure. Par la suite, nous avons conservé l'épaisseur de la couche de fondation qui sera toujours mise en œuvre avec la latérite crue, seulement notre couche de base sera faite de notre matériau amélioré au laitier. Dans ce cas, on essaiera d'approcher au maximum les valeurs des contraintes trouvées dans le premier cas, tout en prenant soin de ne pas les dépasser.

Pour les paramètres d'entrée, nous avons, pour le CBR considéré la moyenne des deux (43 et 47), soit 45 à 95% OPM. Les résultats sont en partie résumés

dans le tableau IV-7 qui suit. La totalité des résultats fournis par Ecoroute seront mis en annexe du document.

	Nzroue(bars)	Nzaxe(bars)	Ezroue(bars)	Ezaxe(bars)
Fond, : crue 25 cm	6,62	0	51,43	-9,12
Base : crue 15 cm	3,58	1,68	71,47	23,91
	0,78	0,82	54	57,29
Fond, : crue 25 cm	6,62	0	13	-12,62
Base : améliorée 13 cm	3,49	1,65	71,3	24,99
	0,75	0,8	52,81	55,97
Fond, : crue 25 cm	6,62	0	12,39	-12,62
Base : améliorée 12,5 cm	3,62	1,64	73,49	24,02
	0,77	0,82	53,95	56,99
Fond, : crue 25 cm	6,62	0	11,74	-12,6
Base : améliorée 12 cm	3,75	1,63	75,7	22,92
	0,79	0,83	55,12	58,04

Légende :



Couche de base
Couche de fondation
Sol support

Tableau IV-7 : Répartition des charges dans les structures

A la base de la couche de la première couche, pour la latérite crue, sur les 6.62 bars exercés seul 3.58 bars sont transmis. La solution économique pour la latérite améliorée est celle pour laquelle la contrainte va se rapprocher le plus de cette valeur, mais tout en restant inférieure à 3.58 bars.

Ainsi nous allons comparer les valeurs des contraintes trouvées pour la latérite crue et celles pour l'amélioration. Soit le tableau IV-8 suivant :

	Nz,roue(bars)	Nz,axe(bars)	Ez,roue(bars)	Ez,axe(bars)
Fond, : crue	6,62	0	51,43	-9,12
25 cm	3,58	1,68	71,47	23,91
Base : crue	0,78	0,82	54	57,29
15 cm				
Fond, : crue	6,62	0	13	-12,62
25 cm	3,49<3,58	1,65<1,68	71,3<71,47	24,99>23,91
Base :	0,75<0,78	0,8<0,82	52,81<54	55,97<57,29
améliorée	oui	oui	oui	non
13 cm				oui
Fond, : crue	6,62	0	12,39	-12,62
25 cm	3,62>3,68	1,64<1,68	73,49>71,47	24,02>23,91
Base :	0,77<0,78	0,82=0,82	53,95<54	56,99<57,29
améliorée	non	oui	non	non
12,5 cm				
Fond, : crue	6,62	0	11,74	-12,6
25 cm	3,75>3,58	1,63<1,68	75,7>71,47	22,92<23,91
Base :	0,79>0,78	0,83>0,82	55,12>54	58,04>57,29
améliorée	non	non	non	oui
12 cm				non

Tableau IV-8

A la lumière de ce tableau, il ressort que pour le matériau amélioré , si on applique une couche d'épaisseur de 13 cm, celle ci a les même performances que les 15 cm d'épaisseur du matériau cru. Ainsi on réalise une économie de 2 cm d'épaisseur de latérite. Cette économie de matériau n'est pas négligeable quand on connaît le coût élevé de la latérite.

CHAPITRE V :

ETUDE ECONOMIQUE

Chapitre V : **Analyse économique**

Une étude économique complète supposerait une bonne connaissance du coût du laitier que produit la SOSETRA. Cet élément nous est d'autant plus difficile à maîtriser qu'il s'agit d'un matériau qui n'a jamais été utilisé auparavant, et que des données comme son prix d'achat, le coût de son transport restent pour nous des inconnues.

Nous nous attacherons à faire une étude comparative de la latérite améliorée au laitier et la latérite crue d'une part et celle améliorée au ciment d'autre part.

5.1 Hypothèses de calculs

Les calculs seront faits sur la base des formulations retenues lors de l'étude de dimensionnement pour la couche de base en latérite-laitier avec les hypothèses suivantes :

1. la largeur de la chaussée sera supposée égale à 7 m, plus 2 accotements de 1 m.
2. le coefficient de foisonnement sera considéré égal à 0.3 pour le calcul du volume des matériaux.
3. Les épaisseurs seront celles trouvées lors du dimensionnement.
4. L'estimation sera faite pour un kilomètre de route.
5. Les carrières seront supposées à 10 km du chantier

5.2 Etude du coût de fabrication du laitier vitrifié :

5.2.1 Refroidissement

Compte tenu du fait que c'est le laitier vitrifié qui donne les meilleurs résultats en rapport avec ces propriétés hydrauliques, il s'avère nécessaire de voir dans quelles conditions la SOSETRA pourrait, dans son processus, produire du laitier vitrifié à la place du laitier cristallisé.

En effet, différentes méthodes de refroidissement rapide peuvent être proposées, mais parmi celles ci, on retiendra surtout le bouletage. En effet, le bouletage est un procédé de traitement du laitier d'origine canadienne couvert par brevets. Seul SOLLAC l'utilise en France dans son usine de FOS -SUR-MER.

Dans ce procédé, la fragmentation du laitier ne résulte pas seulement de l'jection de jets d'eau, mais aussi d'une action mécanique, le refroidissement rapide du laitier se fait simultanément à l'eau et à l'air.

Pour ce but, le laitier liquide se déverse sur un tambour tournant cannelé à axe horizontal, qui comporte des trous en périphérie, alimentés en eau sous pression. Des rampes d'arrosage extérieures complètent ce dispositif qui est représenté schématiquement à la figure V.1 suivante :

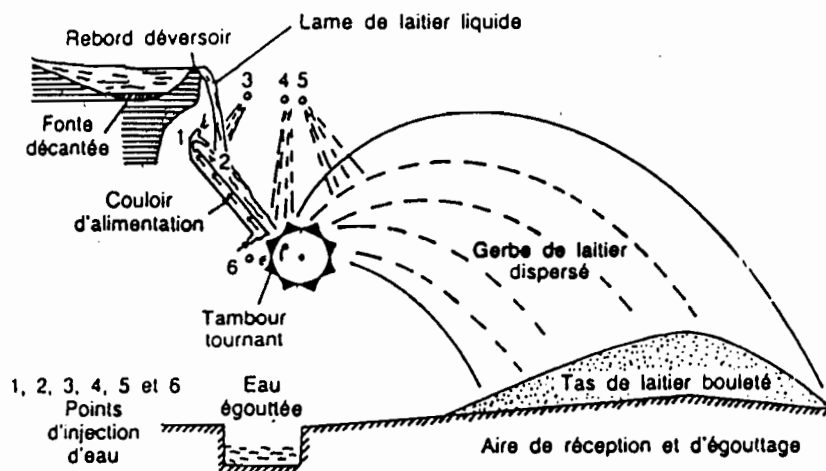


Figure V - 1 : Schéma de fabrication du laitier bouleté

Les particules sont projetées à plusieurs mètres du tambour, et d'autant plus loin qu'elles sont grosses. C'est pendant cette trajectoire aérienne que la trempe à l'eau est complétée par une trempe à l'air.

Cependant il faut signaler que le refroidissement du laitier fraîchement sorti du four nécessite une quantité importante d'eau. Pour nos essais, rien que les 4 à 5 kg que nous devons refroidir subitement à l'eau ont nécessité une à deux minutes d'arrosage avec un tuyau d'arrosage.

On va considérer que la granulation utilise $10 \text{ m}^3/\text{t}$ de laitier.

L'intérêt de la granulation réside aussi dans la facilité de manutention, car il est plus facile de déplacer le laitier granulé qu'en bloc.

5.2.2 Broyage du laitier

S'il y a une question qui a surtout retenu notre attention, c'est bien le broyage du laitier. Vu la granulométrie demandée qui va de 0 mm à 1 mm il est important de disposer de broyeurs giratoires dont le mode particulier d'utilisation permet d'obtenir la granulométrie spécifiée.

A défaut de pouvoir se les approprier, la SOSETRA devra solliciter les services des entreprises de la place telles que Layousse pour le broyage du laitier.

5-3. Estimation du coût du laitier bouleté et broyé

Les différentes estimations du coût des intrants pour le processus de fabrication du laitier bouleté puis broyé sont résumées dans le tableau V-1 suivant:

N°	Intrant	Prix unitaire	Coût d'une t de laitier	Source
1	Eau	586,37 FCFA/m ³	5863,7 FCFA	SDE
2	Transport	50/m ³	2500 FCFA	
3	Broyage	5000/m ³ €	16500 FCFA	Layousse
	Total		24518 FCFA	

Tableau V-1

5-4. Devis estimatif de différentes formulations**5-4-1. Formulation Latérite de Lam-Lam 100% + 0% Laitier + 0% chaux :
100LAOLT**

N°	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Montant
1	Latérite	m ³	2100	13800	28980000
2	eau	m ³	189	586,37	110823,93
3	Transport	m ³	1 Km	52 F/Km/m ³	74100
	Total				29 164 924 FCFA

Tableau V-2

**5-4-2. Formulation Latérite de Lam-Lam 94% + 5% Laitier + 1% chaux :
94LA5LT**

N°	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Montant
1	Latérite	m ³	1910	13800	26358000
2	Laitier	m ³	37	7700	284900
3	Chaux	t	40	25000	1000000
4	Eau	m ³	300	586,37	175911
5	Transport	Km	1	75 f/Km/ m ³	138750
					27 957 561 FCFA

Tableau V-3

5-4-3. Formulation Latérite de Lam-Lam 91% + 8% Laitier + 1% chaux :
91LASLT

N°	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Montant
1	Latérite	m ³	1857	13800	25626600
2	Laitier	m ³	68	7700	523600
3	Chaux	t	40	25000	1000000
4	Eau	m ³	305	586,37	178842,85
5	Transport	Km	1	75 F/Km/ m ³	138750
					27 467 792 FCFA

Tableau V-3

On peut émettre à l'encontre de ce procédé d'amélioration que :

L'addition de quelques pour-cent de laitier et de chaux vive induit une importante augmentation apparente du prix du remblai. Le m³ de remblai reviendrait sans traitement à 13800 FCFA francs, va passer à 21700 francs suivant la décomposition suivante : (voir tableau v-1)

Prix non traité	13800
Fourniture de la chaux	1000
Laitier	7700
total	22500

tableau V-4

Cependant, l'économie va se réaliser si on prend en compte la réduction de la couche de base. En effet, la couche de base non traitée qui était de 15 cm passe à 13 cm pour le cas traité, et ceci occasionne un gain considérable en rapport

avec le coût relativement élevé de la latérite. Ainsi, nous passons de 29 164 124 FCFA pour le premier cas à 26 182 192 FCFA pour le deuxième soit un gain de 2 981 932 FCFA par Km de route.

Comparaison avec un traitement au ciment

Nous supposons pour l'amélioration au ciment un pourcentage de 3% de ciment.

Le volume de latérite est :

$$V_1 = 1000\text{m} \times 10\text{m} \times \text{Epaisseur couche} \times 1.4$$

Le volume de ciment est :

$$M_c = 0.03 \times V_c \times \gamma_t = 0.03 \times 1000\text{m} \times 10\text{m} \times E_p \times 2.5 \text{ t/m}^3$$

Soit le tableau suivant :

N°	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Montant
1	Latérite	m ³	1827	13800	25212600
2	Ciment	t	110	49200	5412000
3	Eau	m ³	290	586,37	170047,3
4	Transport	Km	1	70 F/m ³ /Km	2620
	Total				30 797267 FCFA

Tableau V-5

A travers les différents tableaux estimatifs, nous constatons que le traitement avec le laitier induit le moins de coût, cependant les valeurs de CBR que fournissent les traitements au ciment sont de loin les plus importantes.

Nous pensons que si les performances techniques de l'amélioration apportée par les différentes formulations sont confirmées, le laitier pourrait être utilisé de manière bénéfique en construction routière. Son utilisation se justifie davantage par la réduction du coût qu'il induit, réduction qui va de 1 207 363 FCFA / Km par rapport à la latérite crue 2 839 706 FCFA / Km par rapport au latérite-ciment. Ceci constitue une économie considérable en rapport avec un projet de route de grande envergure.

CHAPITRE VI :

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Chapitre VI : **Conclusion et recommandations**

Cette étude que nous avons menée n'est que l'ébauche d'un travail de recherche en vue de mieux connaître l'influence d'un matériau jusqu'ici non utilisé et méconnu au Sénégal : le laitier. Il est manifeste que pour confirmer la possibilité de son utilisation dans le domaine des routes, des recherches plus approfondies devront être entreprises en tenant en compte de beaucoup de paramètres spécifiques telles que la composition chimique, la réactivité (α), la composition minéralogique, paramètres sur lesquels nous ne nous sommes pas tellement appesantis. En effet en rapport avec ces différentes propriétés qui peuvent varier d'un échantillon de laitier à un autre l'influence du laitier peut différer.

Il ressort de l'étude que c'est le laitier vitrifié par trempe qui donne de meilleurs résultats, par conséquent la SOSETRA devrait envisager, en collaboration avec le département de génie mécanique de l'ESP, la conception d'un dispositif de refroidissement du laitier comme celui présenté à la figure III-1.

La forme fillérisée doit avoir une forte stabilité, car si les éléments sont concassés, l'angle de frottement interne est alors fort et le matériau est alors stable. Le compactage d'un sable de concassage comme celui de laitier se conserve mieux que celui d'un sable de dune ou de plage (de forme arrondie).

L'idéal pour nous serait de réaliser une ou plusieurs planches expérimentales pour étudier le comportement du matériau. On pourra alors tirer de la planche expérimentale des renseignements très précieux et on sera dès lors capable de prévoir les modalités d'utilisation de notre matériau afin d'aboutir à un résultat convenable.

Des précautions particulières devront être prises quant à la mise en œuvre du matériau amélioré. En effet, l'emploi de la chaux vive est dangereux

pour le personnel. En pratique la chaux est répandue sur le sol que l'on vient régaler, et elle est mélangée avec celui ci avec un pulvimixer. Pendant la phase de répannage et surtout s'il y a du vent, la chaux est transportée par celui ci. Or on sait que la chaux vive provoque des brûlures. Il faut donc nécessairement observer un certain nombre de règles de sécurité sur le chantier, à savoir le port de masques et de gants. Cependant il sera difficile à priori de faire respecter ces consignes au personnel.

Il faut donc mettre au point un matériel qui permet le répannage sans risque pour le personnel.

Aucun délai n'est imposé entre le malaxage et le compactage. Ce n'est pas comme dans le cas de la grave ciment qui doit être compactée à une teneur en eau bien précise et dans un délai maximal après le malaxage pour éviter la prise du ciment.

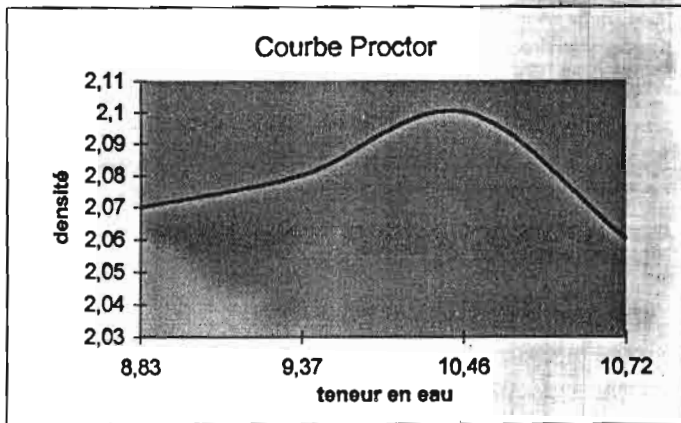
Planche N° 1:

LATERITE DE LAM-LAM CRUE

Avant compactage :

WL	=	35,26
WP	=	19,06
IP	=	16,2

Courbe Proctor

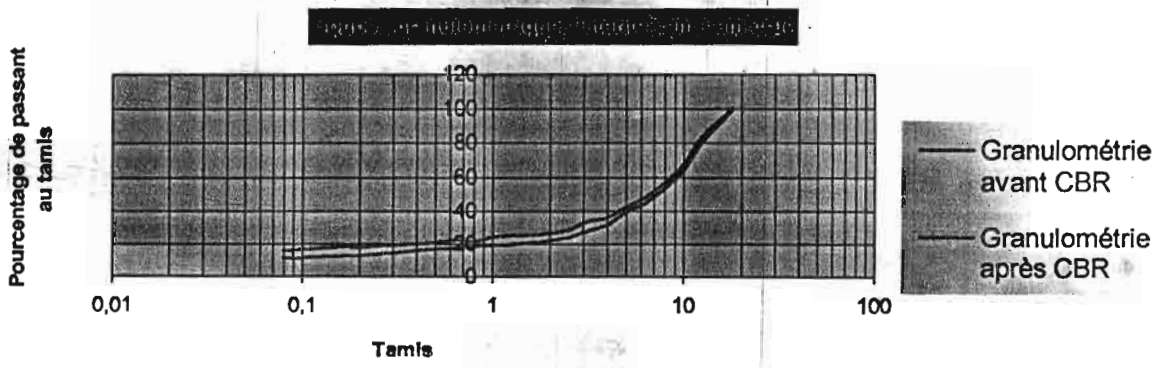


γ_h (t/m ³)	=	2,32
$\gamma_{d,max}$ (t/m ³)	=	2,105
ω_{opt} (%)	=	10,3

Après compactage :

WL	=	36,21
WP	=	19,89
IP	=	16,32

COURBE GRANULOMETRIQUE



CBR à 95% OPM	=	45
CBR à 100% OPM	=	88

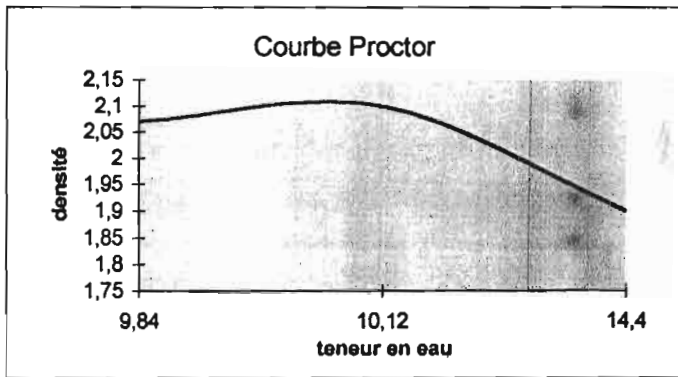
Planche N° 2:

LATERITE LAM-LAM+ 5% LAITIER 2mm

Avant compactage :

WL	=	38,15
WP	=	23,98
IP	=	14,17

Courbe Proctor

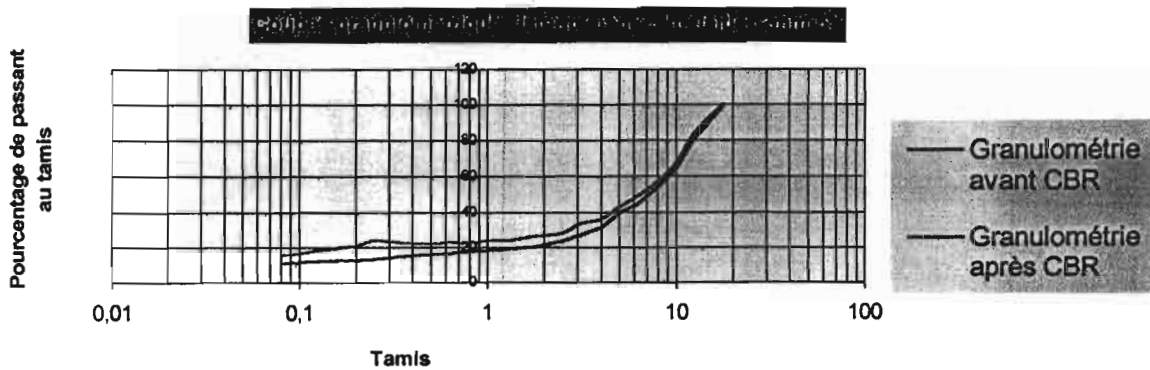


$\gamma_{d,max}(t/m^3)$	=	2,1
$\omega_{opt}(\%)$	=	12,16

Après compactage :

WL	=	37,87
WP	=	22,08
IP	=	15,79

COURBE GRANULOMETRIQUE



CBR à 95% OPM	=	62,2
CBR à 100% OPM	=	*

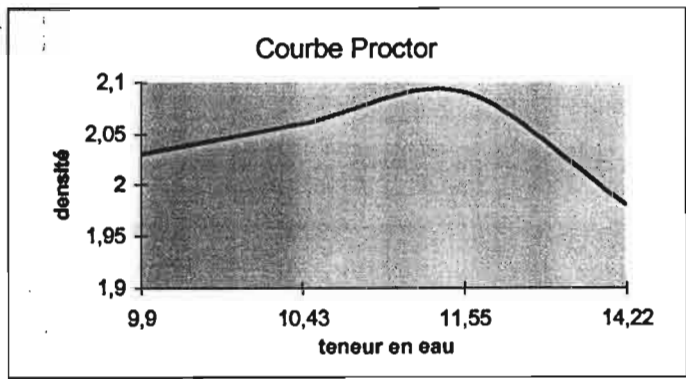
Planche N° 3:

LATERITE LAM-LAM+ 8% LAITIER 2mm

Avant compactage :

WL =	37,94
WP =	23,38
IP =	14,56

Courbe Proctor

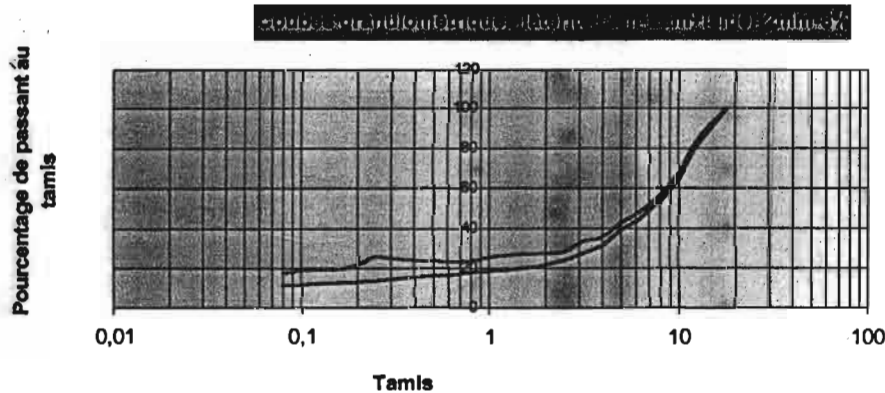


$\gamma_{d,max}(t/m^3) =$	2,09
$\omega_{opt}(\%) =$	11,54

Après compactage :

WL =	37,49
WP =	20,91
IP =	16,58

COURBE GRANULOMETRIQUE



CBR à 95% OPM =	35
CBR à 100% OPM =	*

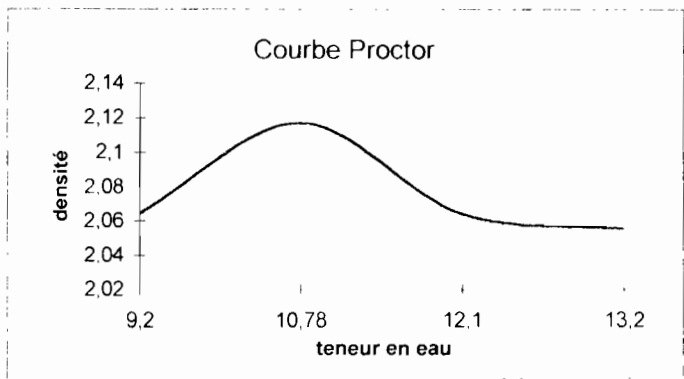
Planche N° 4:

LATERITE LAM-LAM+10% LAITIER 2mm

Avant compactage :

WL	=	38,26
WP	=	23,14
IP	=	15,12

Courbe Proctor



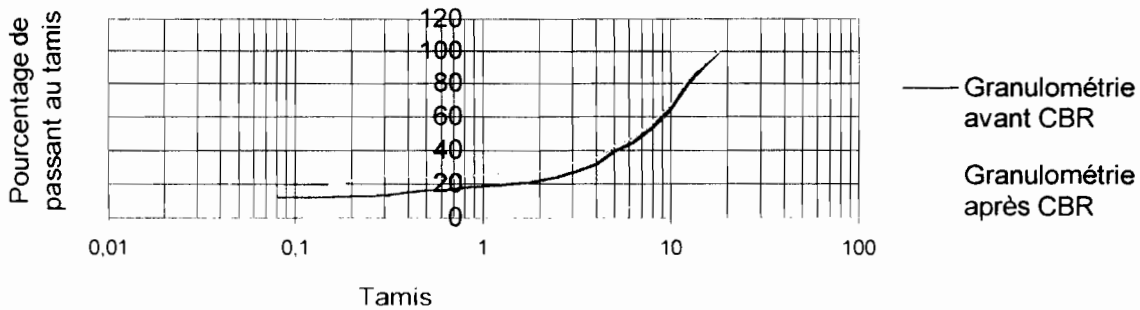
$\gamma_{d,max}(t/m^3)$	=	2,1
$w_{opt}(\%)$	=	12,1

Après compactage :

WL	=	38,1
WP	=	22,7
IP	=	15,4

COURBE GRANULOMETRIQUE

Coubes granulométriques latérite Lam-Lam+laitier 2mm-10%



CBR à 95% OPM	=	49
CBR à 100% OPM	=	*

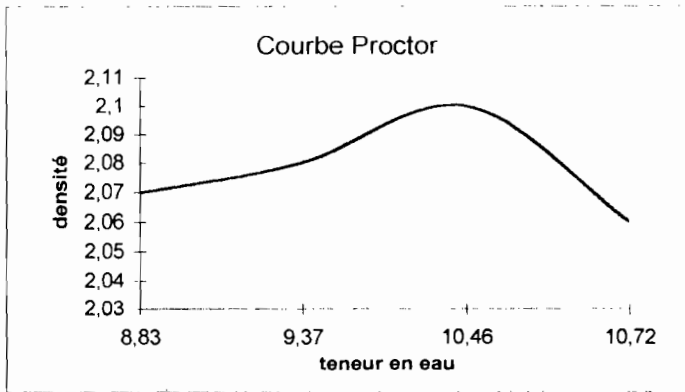
Planche N° 5:

LATERITE SINDIA CRUE

Avant compactage :

WL	=	38,12
WP	=	17,8
IP	=	15,4

Courbe Proctor



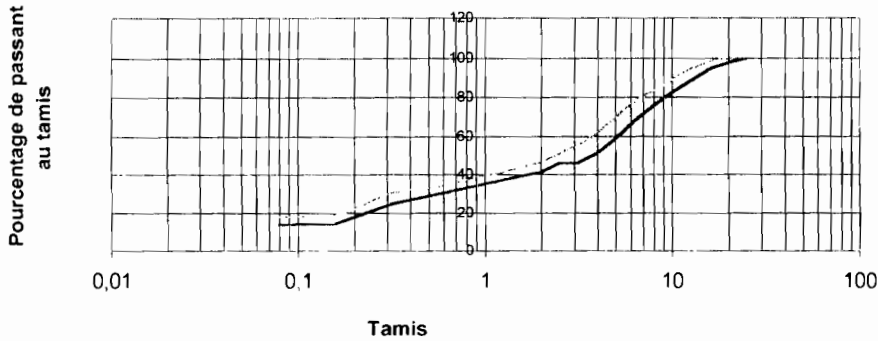
γ_h (t/m ³)	=	2,16
$\gamma_{d,max}$ (t/m ³)	=	1,96
w_{opt} (%)	=	10,8

Après compactage :

WL	=	34,56
WP	=	18,43
IP	=	16,13

COURBE GRANULOMETRIQUE

Courbes granulométriques laterite Sindia crue



— Granulométrie avant CBR
 - - - Granulométrie après CBR

CBR à 95% OPM	=	47
CBR à 100% OPM	=	73

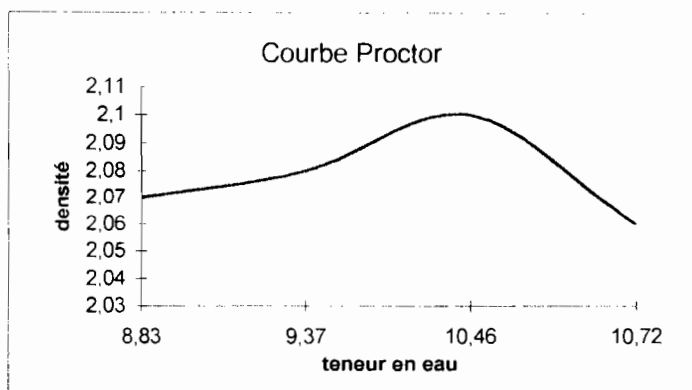
Planche N° 6:

LATERITE SINDIA + 5% LAITIER 2 mm

Avant compactage :

WL	=	37,43
WP	=	23,02
IP	=	14,41

Courbe Proctor



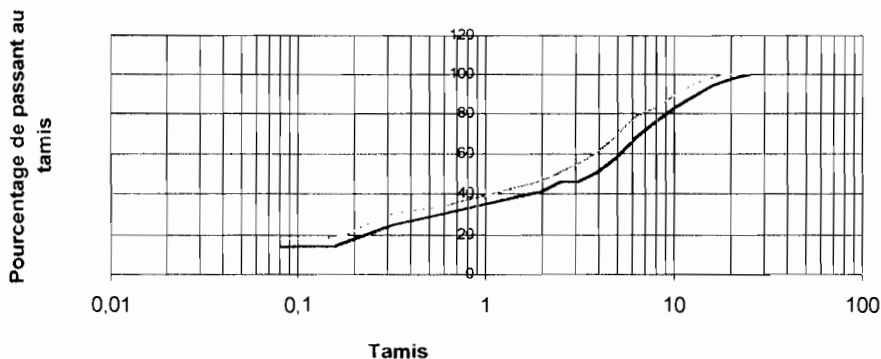
$\gamma_{d,max}(t/m^3)$	=	1,96
$w_{opt}(\%)$	=	12,4

Après compactage :

WL	=	38,46
WP	=	23,07
IP	=	15,39

COURBE GRANULOMETRIQUE

Coubes granulométriques latérite Sindia+laitier 2mm-5%



— Granulométrie avant CBR
 - - - Granulométrie après CBR

CBR à 95% OPM	=	53
CBR à 100% OPM	=	*

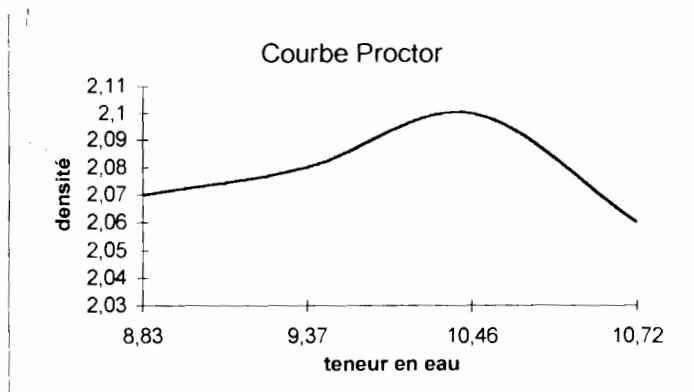
Planche N° 7:

LATERITE SINDIA + 8% LAITIER 2 mm

Avant compactage :

WL	=	38,17
WP	=	23,99
IP	=	14,18

Courbe Proctor



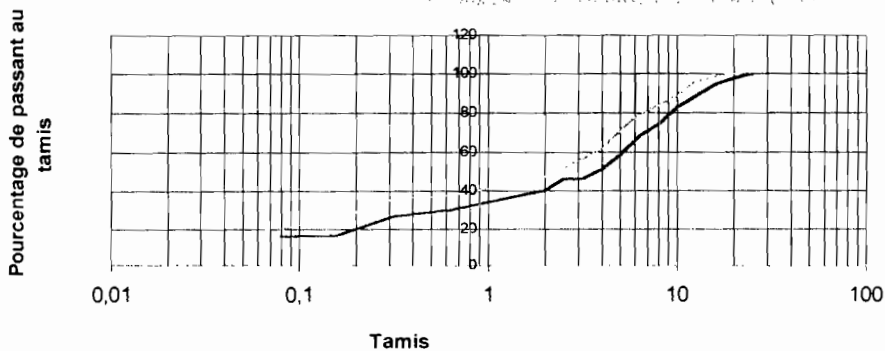
$\gamma_{d,max}(t/m^3)$	=	2,04
$w_{opt}(\%)$	=	10,9

Après compactage :

WL	=	38,57
WP	=	22,52
IP	=	16,05

COURBE GRANULOMETRIQUE

Courbes granulométriques latérite Sindia+laitier 2mm-8%



— Granulométrie avant CBR
 - - - Granulométrie après CBR

CBR à 95% OPM	=	48
CBR à 100% OPM	=	*

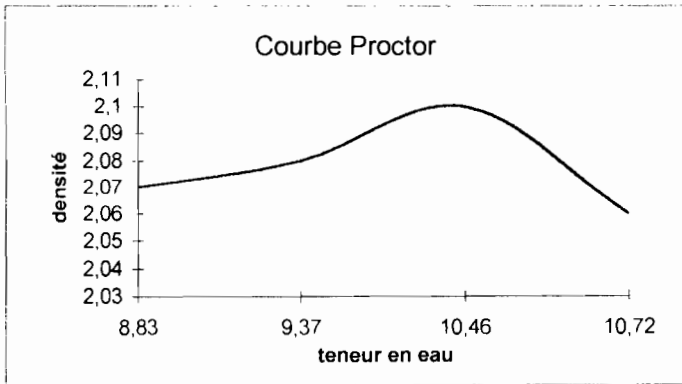
Planche N° 8:

LATERITE SINDIA + 10% LAITIER 2 mm

Avant compactage :

WL =	38,71
WP =	24,84
IP =	13,87

Courbe Proctor



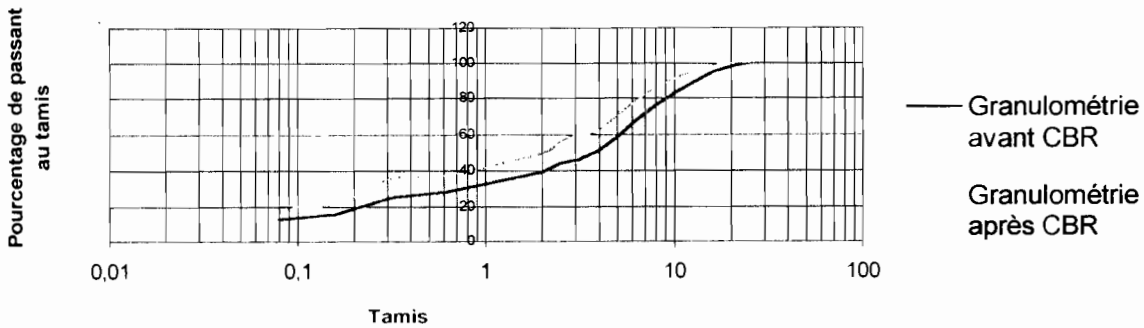
$\gamma_{d,max}(t/m^3)$ =	2,035
$\omega_{opt} (%)$ =	13,3

Après compactage :

WL =	37,59
WP =	22,23
IP =	15,36

COURBE GRANULOMETRIQUE

Coubes granulométriques latérite Lam-Lam+laitier 2mm-10%



CBR à 95% OPM =	51
CBR à 100% OPM =	*

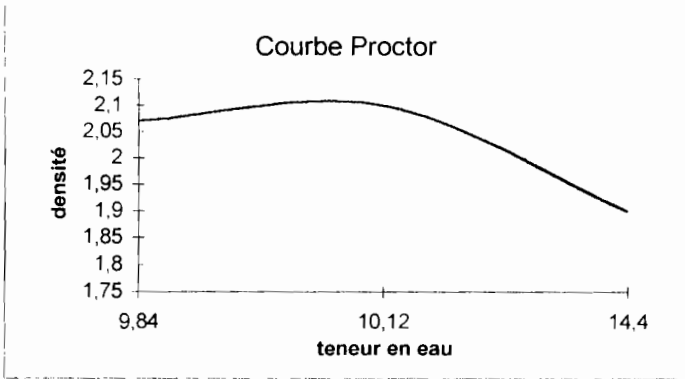
Planche N° 9:

LATERITE LAM-LAM + 5% LAITIER 0,5 mm

Avant compactage :

WL	=	37,1
WP	=	22,4
IP	=	14,7

Courbe Proctor



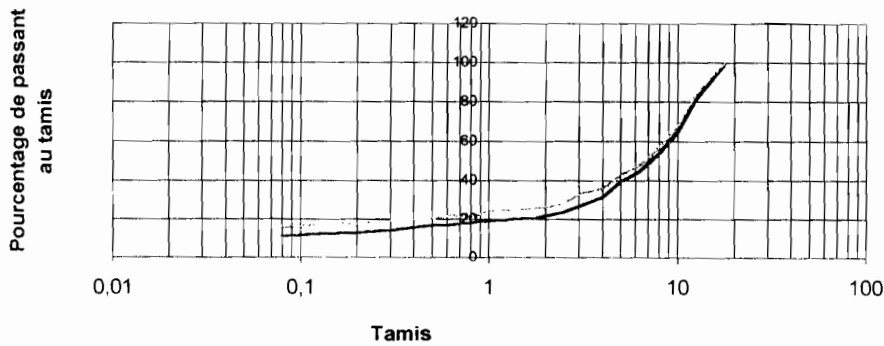
$\gamma_{d,max}(t/m^3)$	=	2,085
$w_{opt}(\%)$	=	12

Après compactage :

WL	=	39,74
WP	=	24,51
IP	=	15,23

COURBE GRANULOMETRIQUE

Coubes granulométriques latérite Lam-Lam+laitier 0,5mm-5%



— Granulométrie avant CBR
 - - - Granulométrie après CBR

CBR à 95% OPM	=	81
CBR à 100% OPM	=	120

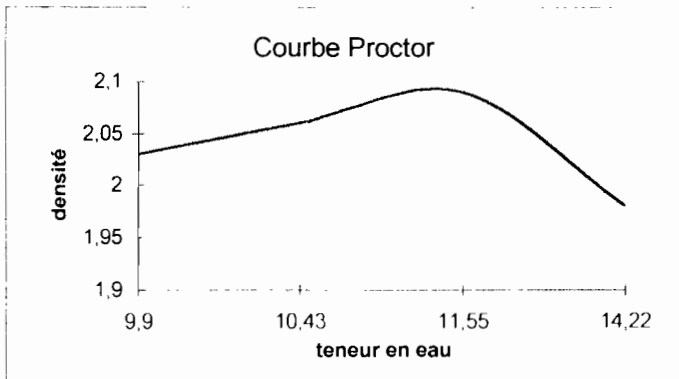
Planche N° 10:

LATERITE LAM-LAM + 8% LAITIER 0,5 mm

Avant compactage :

WL	=	38,16
WP	=	23,96
IP	=	14,2

Courbe Proctor



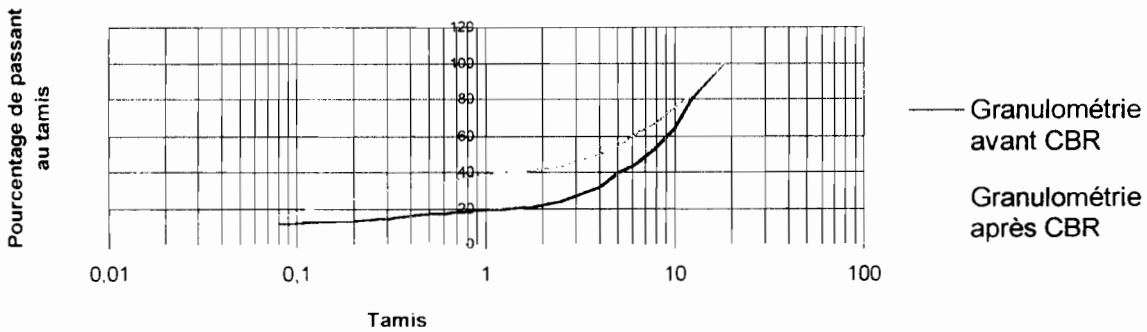
$\gamma_{d,max}(t/m^3)$	=	2,11
$\omega_{opt}(\%)$	=	13,2

Après compactage :

WL	=	38,6
WP	=	22,99
IP	=	15,61

COURBE GRANULOMETRIQUE

Coubes granulométriques latérite Lam-Lam+laitier 0,5mm-8%



CBR à 95% OPM	=	52
CBR à 100% OPM	=	127

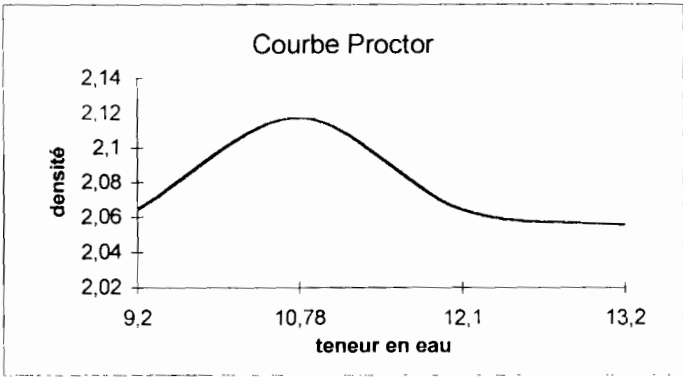
Planche N° 11:

LATERITE LAM-LAM+10% LAITIER 0,5 mm

Avant compactage :

WL	=	37,89
WP	=	23,62
IP	=	14,27

Courbe Proctor



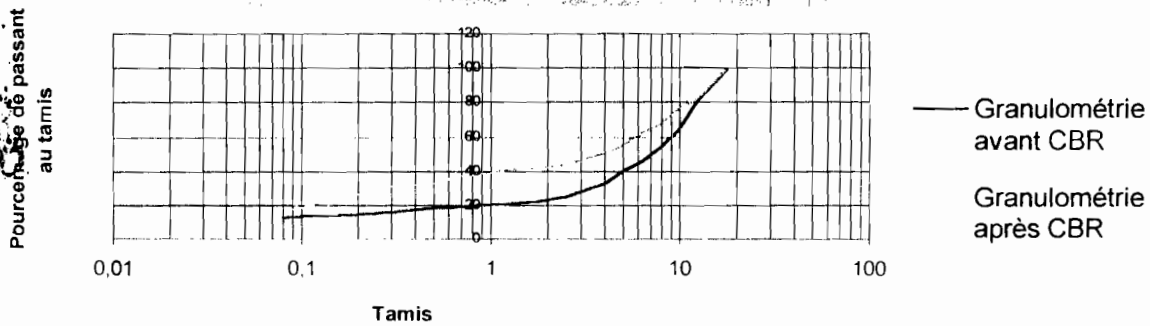
$\gamma_{d,max}(t/m^3)$	=	2,12
$\omega_{opt}(\%)$	=	12,7

Après compactage :

WL	=	38,7
WP	=	23,54
IP	=	15,16

COURBE GRANULOMETRIQUE

Courbes granulométriques latérite Lam-Lam+laitier 0,5mm-10%



CBR à 95% OPM	=	*
CBR à 100% OPM	=	41

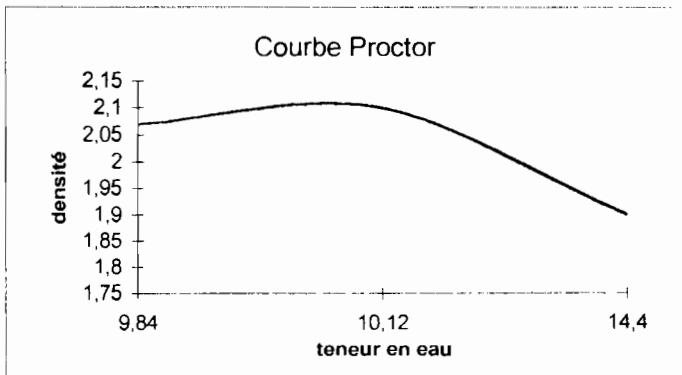
Planche N° 12:

LATERITE LAM-LAM + 5% LAITIER VITRIFIE - 1mm

Avant compactage :

WL =	38,41
WP =	24,21
IP =	14,2

Courbe Proctor



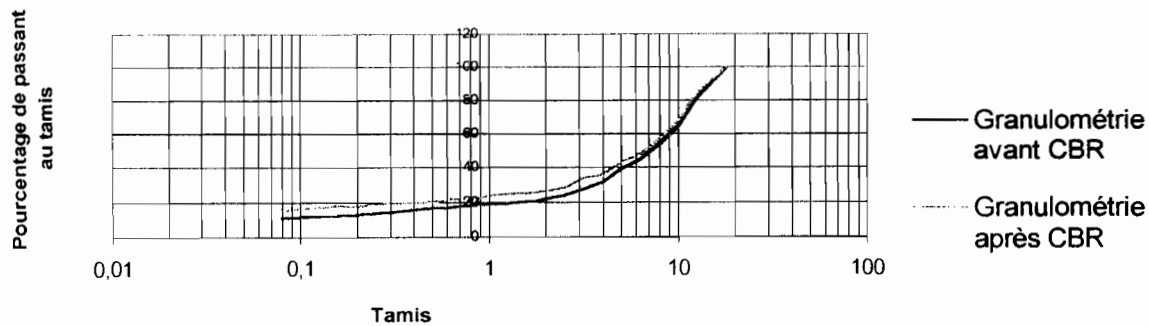
$\gamma_{d,max}(t/m^3) =$	2,1
$\omega_{opt} (%) =$	13

Après compactage :

WL =	37,8
WP =	22,7
IP =	15,1

COURBE GRANULOMETRIQUE

Coubes granulométriques latérite Lam-Lam+laitier vitrifié 1mm-5%



CBR à 95% OPM =	93
CBR à 100% OPM =	134

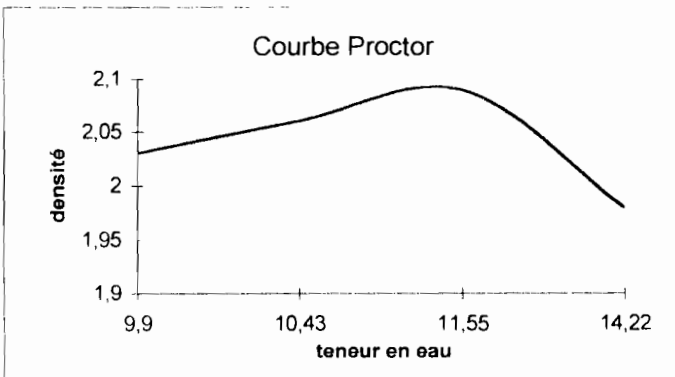
Planche N° 13:

LATERITE LAM-LAM + 8% LAITIER VITRIFIE - 1mm

Avant compactage :

WL =	37,15
WP =	22,2
IP =	14,95

Courbe Proctor



$\gamma_{d,max}(t/m^3) = 2,097$

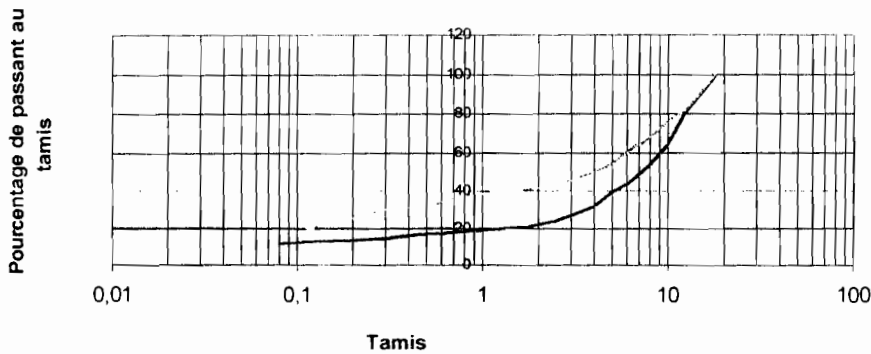
$w_{opt}(\%) = 13,1$

Après compactage :

WL =	38,4
WP =	23,24
IP =	15,16

COURBE GRANULOMETRIQUE

Coubes granulométriques latérite Lam-Lam+laitier vitrifié 1mm-8%



— Granulométrie avant CBR

- - - Granulométrie après CBR

CBR à 95% OPM = 89

CBR à 100% OPM = 130

ANNEXE B

```

*****
* CHAUSSEE * NZ ROUE * EZ ROUE * NR ROUE * ER ROUE
* * * * *
*****
* H =12.00 * 6.62 * 11.74 E-5 * 7.64 * 27.03 E-5
* E = 9.0E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * 3.76 * 49.67 E-5 * -0.83 * -19.18 E-5
** COLLE *****
* H =25.00 * 3.76 * 75.70 E-5 * 0.60 * -19.18 E-5
* E = 4.5E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * 0.79 * 29.25 E-5 * -0.62 * -12.88 E-5
** COLLE *****
* H = 00 * 0.79 * 55.12 E-5 * -0.03 * -12.88 E-5
* E = 1.5E+03 * * * * *
* EE = 0.25 * * * * *
*****
* CHARGE * JUMELAGE * R = 12.50 * P = 6.62 *
* DEFLEXION * * W = 40.7 mm/100 *
*****

```

```

*****
* CHAUSSEE * NZ axe * EZ axe * NR axe * ER axe
* * * * *
*****
* H =12.00 * -0.00 * -12.60 E-5 * 0.23 * -9.16 E-5
* E = 9.0E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * 1.63 * 11.67 E-5 * 2.06 * 18.14 E-5
** COLLE *****
* H =25.00 * 1.63 * 22.92 E-5 * 1.47 * 18.14 E-5
* E = 4.5E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * 0.83 * 30.60 E-5 * -0.60 * -12.43 E-5
** COLLE *****
* H 00 * 0.83 * 58.04 E-5 * -0.01 * -12.43 E-5
* E = 1.5E+03 * * * * *
* EE = 0.25 * * * * *
*****

```

```

*****
* CHAUSSEE * NT ROUE * ET ROUE * NT axe * ET axe
* * * * *
*****
* H =12.00 * 8.25 * 36.25 E-5 * 3.00 * 32.51 E-5
* E = 9.0E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * -1.20 * -24.71 E-5 * -0.41 * -18.91 E-5
** COLLE *****
* H =25.00 * 0.41 * -24.71 E-5 * 0.23 * -18.91 E-5
* E = 4.5E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * -0.89 * -21.19 E-5 * -0.95 * -22.99 E-5
** COLLE *****
* H = 00 * -0.13 * -21.19 E-5 * -0.14 * -22.99 E-5
* E = 1.5E+03 * * * * *
* EE = 0.25 * * * * *
*****

```

```

*****
* CHAUSSEE * NZ ROUE * EZ ROUE * NR ROUE * ER ROUE
* * * * *
*****

```

```

* H =11.50      *      6.62      *      11.07 E-5      *      7.72      *      27.63 E-5
* E = 9.0E+03  *
* EE = 0.35    *      3.90      *      50.91 E-5      *      0.79      *      19.53 E-5
** COLLE *****
* H =25.00      *      3.90      *      77.94 E-5      *      0.65      *      -19.53 E-5
* E = 4.5E+03  *
* EE = 0.35    *      0.81      *      29.87 E-5      *      -0.63      *      -13.11 E-5
** COLLE *****
* H = 00        *      0.81      *      56.33 E-5      *      -0.03      *      -13.11 E-5
* E = 1.5E+03  *
* EE = 0.25    *
*****
* CHARGE      * JUMELAGE      * R = 12.50      * P = 6.62      *
* DEFLEXION   *                * W = 41.0      * mm/100      *
*****

```

```

*****
* CHAUSSEE    * NZ axe        * EZ axe        * NR axe        * ER axe
*
*****
* H =11.50      *      -0.00      *      -12.55 E-5      *      0.19      *      -9.69 E-5
* E = 9.0E+03  *
* EE = 0.35    *      1.61      *      10.56 E-5      *      2.22      *      19.67 E-5
** COLLE *****
* H =25.00      *      1.61      *      21.69 E-5      *      1.54      *      19.67 E-5
* E = 4.5E+03  *
* EE = 0.35    *      0.85      *      31.09 E-5      *      -0.60      *      -12.46 E-5
** COLLE *****
* H 00          *      0.85      *      59.10 E-5      *      -0.01      *      -12.46 E-5
* E = 1.5E+03  *
* EE = 0.25    *
*****

```

```

*****
* CHAUSSEE    * NT ROUE      * ET ROUE      * NT axe        * ET axe
*
*****
* H =11.50      *      8.34      *      36.91 E-5      *      3.03      *      32.94 E-5
* E = 9.0E+03  *
* EE = 0.35    *      -1.15      *      -24.82 E-5      *      -0.34      *      -18.61 E-5
** COLLE *****
* H =25.00      *      0.48      *      -24.82 E-5      *      0.26      *      -18.61 E-5
* E = 4.5E+03  *
* EE = 0.35    *      -0.91      *      -21.65 E-5      *      -0.97      *      -23.48 E-5
** COLLE *****
* H = 00        *      -0.13      *      -21.65 E-5      *      -0.14      *      -23.48 E-5
* E = 1.5E+03  *
* EE = 0.25    *
*****

```

```

*****
* CHAUSSEE    * NZ ROUE      * EZ ROUE      * NR ROUE      * ER ROUE
*
*****
* H =12.50      *      6.62      *      12.39 E-5      *      7.56      *      26.47 E-5
* E = 9.0E+03  *
* EE = 0.35    *      3.62      *      48.41 E-5      *      -0.86      *      -18.79 E-5
** COLLE *****
* H =25.00      *      3.62      *      73.49 E-5      *      0.55      *      -18.79 E-5
* E = 4.5E+03  *

```



```

* EE = 0.35      *      0.77      *      28.65 E-5      *      -0.61      *      -12.65 E-5
** COLLE
* H = 00         *      0.77      *      53.95 E-5      *      -0.03      *      -12.65 E-5
* E = 1.5E+03   *
* EE = 0.25     *
*****
* CHARGE        * JUMELAGE      * R = 12.50      * P = 6.62      *
* DEFLEXION     *              * W = 40.3      * mm/100      *
*****

```

```

*****
* CHAUSSEE     * NZ axe       * EZ axe       * NR axe       * ER axe
*
*****
* H =12.50     * -0.00       * -12.62 E-5   * 0.26        * -8.69 E-5
* E = 9.0E+03  *
* EE = 0.35    * 1.64        * 12.68 E-5    * 1.90        * 16.66 E-5
** COLLE
* H =25.00     * 1.64        * 24.02 E-5    * 1.39        * 16.66 E-5
* E = 4.5E+03  *
* EE = 0.35    * 0.82        * 30.10 E-5    * -0.60       * -12.40 E-5
** COLLE
* H 00         * 0.82        * 56.99 E-5    * -0.02       * -12.40 E-5
* E = 1.5E+03  *
* EE = 0.25    *
*****

```

```

*****
* CHAUSSEE     * NT ROUE     * ET ROUE     * NT axe      * ET axe
*
*****
* H =12.50     * 8.17        * 35.61 E-5    * 2.98        * 32.07 E-5
* E = 9.0E+03  *
* EE = 0.35    * -1.24       * -24.54 E-5   * -0.48       * -19.14 E-5
** COLLE
* H =25.00     * 0.36        * -24.54 E-5   * 0.20        * -19.14 E-5
* E = 4.5E+03  *
* EE = 0.35    * -0.88       * -20.75 E-5   * -0.94       * -22.52 E-5
** COLLE
* H = 00       * -0.13       * -20.75 E-5   * -0.14       * -22.52 E-5
* E = 1.5E+03  *
* EE = 0.25    *
*****

```

```

*****
* CHAUSSEE     * NZ ROUE     * EZ ROUE     * NR ROUE     * ER ROUE
*
*****
* H =13.00     * 6.62        * 13.00 E-5    * 7.48        * 25.94 E-5
* E = 9.0E+03  *
* EE = 0.35    * 3.49        * 47.14 E-5    * -0.88       * -18.37 E-5
** COLLE
* H =25.00     * 3.49        * 71.30 E-5    * 0.50        * -18.37 E-5
* E = 4.5E+03  *
* EE = 0.35    * 0.75        * 28.08 E-5    * -0.60       * -12.44 E-5
** COLLE
* H = 00       * 0.75        * 52.81 E-5    * -0.03       * -12.44 E-5
* E = 1.5E+03  *
* EE = 0.25    *
*****

```

```

* EE = 0.25 * * * * *
*****
* CHARGE * JUMELAGE * R = 12.50 * P = 6.62 *
* DEFLEXION * * W = 39.9 mm/100 *
*****

```

```

*****
* CHAUSSEE * NZ axe * EZ axe * NR axe * ER axe
* * * * *
* H =13.00 * -0.00 * -12.62 E-5 * 0.29 * -8.26 E-5
* E = 9.0E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * 1.65 * 13.59 E-5 * 1.76 * 15.25 E-5
** COLLE *****
* H =25.00 * 1.65 * 24.99 E-5 * 1.32 * 15.25 E-5
* E = 4.5E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * 0.80 * 29.62 E-5 * -0.60 * -12.35 E-5
** COLLE *****
* H = 00 * 0.80 * 55.97 E-5 * -0.02 * -12.35 E-5
* E = 1.5E+03 * * * * *
* EE = 0.25 * * * * *
*****

```

```

*****
* CHAUSSEE * NT ROUE * ET ROUE * NT axe * ET axe
* * * * *
* H =13.00 * 8.08 * 35.00 E-5 * 2.95 * 31.64 E-5
* E = 9.0E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * -1.27 * -24.31 E-5 * -0.55 * -19.31 E-5
** COLLE *****
* H =25.00 * 0.30 * -24.31 E-5 * 0.17 * -19.31 E-5
* E = 4.5E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * -0.86 * -20.31 E-5 * -0.92 * -22.06 E-5
** COLLE *****
* H = 00 * -0.12 * -20.31 E-5 * -0.14 * -22.06 E-5
* E = 1.5E+03 * * * * *
* EE = 0.25 * * * * *
*****

```

```

***** ETUDE ECONOMIQUE *****
* CARACTERISTIQUES *
* des *
* SOLUTIONS *
*****
* * BASE * SOLUTION *
* * * * *
* H 0 * 10.0 * EXCESSIVE *
*****
* NH. 0 * 0.90 * 6.00 *
*****

```

GLOSSAIRE

NH.j est la contrainte horizontale

amélioration

```

*
* CHARGE * JUMELAGE * R = 12.50 * P = 6.62 *
* DEFLEXION * W = 39.9 mm/100 *
*****

```

```

*****
* CHAUSSEE * NZ axe * EZ axe * NR axe * ER axe
* * * * *
* H =13.00 * -0.00 * -12.62 E-5 * 0.29 * -8.26 E-5
* E = 9.0E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * 1.65 * 13.59 E-5 * 1.76 * 15.25 E-5
** COLLE *****
* H =25.00 * 1.65 * 24.99 E-5 * 1.32 * 15.25 E-5
* E = 4.5E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * 0.80 * 29.62 E-5 * -0.60 * -12.35 E-5
** COLLE *****
* H oo * 0.80 * 55.97 E-5 * -0.02 * -12.35 E-5
* E = 1.5E+03 * * * * *
* EE = 0.25 * * * * *
*****

```

```

*****
* CHAUSSEE * NT ROUE * ET ROUE * NT axe * ET axe
* * * * *
* H =13.00 * 8.08 * 35.00 E-5 * 2.95 * 31.64 E-5
* E = 9.0E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * -1.27 * -24.31 E-5 * -0.55 * -19.31 E-5
** COLLE *****
* H =25.00 * 0.30 * -24.31 E-5 * 0.17 * -19.31 E-5
* E = 4.5E+03 * * * * *
* EE = 0.35 * -0.86 * -20.31 E-5 * -0.92 * -22.06 E-5
** COLLE *****
* H = oo * -0.12 * -20.31 E-5 * -0.14 * -22.06 E-5
* E = 1.5E+03 * * * * *
* EE = 0.25 * * * * *
*****

```

```

***** ETUDE ECONOMIQUE *****
* CARACTERISTIQUES
* des
* SOLUTIONS
*****
* BASE * SOLUTION *
* * *
* H 0 * 12.0 * EXCESSIVE *
*****
* NH. 0 * 1.20 * 7.00 *
*****

```

GLOSSAIRE

NH.j est la contrainte horizontale

ANNEXE C

DETAILS DU CALCUL ECONOMIQUE POUR LE CAS AMELIORE

$$V_{tot} = 1000 * 0.14 * 10 = 1400 \text{ m}^3$$

$$\frac{m_{Lat}}{m_{Lat} + m_{lait} + m_{ch}} = 0.96$$

approximons

$$\frac{m_{Lat}}{m_{Lat} + m_{lait}} = 0.96$$

soit $0.04 m_{Lat} = 0.96 m_{lait}$.

$$M_{Lat} = 24 m_{lait}$$

$$M_{tot} = 25 m_{lait}$$

$$V_1 = V_{lat}$$

$$V_2 = V_{lait}$$

$$V_T = V_1 + V_2$$

$$\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 = 25 \rho_2 V_2$$

$$V_1 + V_2 = 1400$$

$$\rho_1 V_1 = 24 \rho_2 V_2$$

$$2.1 V_1 = 24 * 3.3 V_2$$

$$V_1 + V_2 = 1400$$

$$2.1 V_1 = 79.2 V_2$$

$$V_1 + V_2 = 1400$$

$$V_2 = \frac{1400}{38.71} = 36.16 m^3$$

$$V_1 = 37.71 V_2$$

$$V_1 = 1910 m^3$$

$$V_2 = 37 m^3$$

Références bibliographiques

➤ Généralités

Bibliothèque ESP ; Manuel sur les routes dans les zones tropicales et désertiques, Secrétariat d'état aux affaires étrangères chargé de la coopération française, tome 3, BCEOM / CEBTP.

Ibrahima k. CISSE ; Le laitier de haut fourneau, Jacques Alexandre, Jean-Louis Sebileau, 1988

Projet de fin d'étude EPT; Traitement des matériaux de faibles performances à l'aide de sable fillérisé de calcaire et de grès, Abdoulaye DIARRA, 1999.

Elève ing. Assane N'diaye, Les sables : Emploi des sables traités aux liant hydrauliques en assises de chaussées, J. J. CHAUVIN, mai 1974

➤ Etude expérimentale

Bibliothèque ESP ; Le compactage ,routes et pistes, Georges ARQUIE, éditions Eyrolles, 1970

➤ Dimensionnement

Elève ing. Assane N'diaye ; Conception et dimensionnement des structures de chaussée, guide technique, LCPC / SETRA , 1994

Elève ing. Assane N'diaye, ECOROUTE 4 :logiciel de dimensionnement des chaussées, LCPC / SETRA.