



HAL
open science

Contribution à l'étude de sols latéritiques du Sénégal et du Brésil

Massamba Ndiaye

► **To cite this version:**

Massamba Ndiaye. Contribution à l'étude de sols latéritiques du Sénégal et du Brésil. Autre. Université Paris-Est; Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2013. Français. NNT : 2013PEST1133 . tel-00977354

HAL Id: tel-00977354

<https://theses.hal.science/tel-00977354>

Submitted on 5 May 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**THÈSE DE DOCTORAT EN COTUTELLE ENTRE L'UNIVERSITÉ PARIS EST ET
L'UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR**

Spécialité

Géotechnique

présentée par

M. Massamba NDIAYE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PARIS EST

ET DE L'UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE SOLS LATÉRITIQUES DU
SÉNÉGAL ET DU BRÉSIL**

soutenue le 9 septembre 2013

devant le jury composé de :

Daniel Levacher	Rapporteur, Président du jury
Philippe Delmas	Rapporteur
Jean-Pierre Magnan	Directeur de thèse
Ibrahima Khalil Cissé	Co-directeur de thèse
Lamine Cissé	Examineur
Emmanuel Lavallée	Examineur

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	5
RÉSUMÉ.....	7
ABSTRACT	9
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	11
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES	13
Chapitre 1 DÉFINITIONS ET CARACTÉRISATION DES SOLS LATÉRIQUES.....	15
1.1 Introduction	15
1.2. Définition des sols latéritiques	15
1.3. Processus de latérisation.....	17
1.3.1. Le climat.....	18
1.3.2. La topographie.....	18
1.3.3. La végétation	18
1.3.4. La roche mère.....	19
1.4. Les différents types de latérites	19
1.5. Caractéristiques morphologiques des sols latéritiques	19
1.5.1. L'induration.....	19
1.5.2. La structure.....	20
1.5.3. La couleur.....	20
1.5.4. La densité	20
1.6. Caractéristiques chimiques et minéralogiques des sols latéritiques	20
1.7. Identification des graveleux latéritiques pour la construction routière	21
1.7.1. Granulométrie.....	21
1.7.2. Plasticité	22
1.7.3. Activité au bleu de méthylène	22
1.7.4. Dureté des nodules	23
1.7.5. Caractéristiques de portance (au sens routier).....	23
1.8. Systèmes de classification des sols latéritiques utilisés au Sénégal	25

1.8.1. Classification HRB.....	25
1.8.2. Classification USCS.....	25
1.8.3. Classification GTR.....	25
1.9. Spécifications du Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) pour les sols latéritiques.....	25
1.9.1. Spécifications du CEBTP de 1972.....	26
1.9.2. Spécifications du CEBTP de 1980 (révisées en 1984).....	27
1.10. Conclusions.....	29
Chapitre 2 CONTRIBUTION À LA VALIDATION DE LA CLASSIFICATION DES SOLS LATÉRIQUES DE RODRIGUES ET AL. (2010).....	31
2.1. Introduction.....	31
2.2. La classification des sols latéritiques de Rodrigues et al. (2010).....	31
2.3. Étude de tronçons routiers en service.....	36
2.3.1. Caractéristiques des matériaux mis en œuvre en couche de base.....	36
2.3.2. Caractéristiques des matériaux testés.....	37
2.3.3. Étude de la durabilité des matériaux prélevés.....	40
2.4. Commentaires généraux sur la classification proposée par Rodrigues et al. (2010).....	43
2.5. Conclusions.....	43
Chapitre 3 ÉVOLUTION SOUS COMPACTAGE CBR DE LA GRANULOMÉTRIE DE LATÉRITES DU SÉNÉGAL ET DU BRÉSIL.....	45
3.1. Introduction.....	45
3.2. Évolution de la granulométrie des latérites sous compactage CBR.....	45
3.2.1. Latérites des carrières de Sindia et de Lam-Lam (Sénégal).....	45
3.2.2. Latérites de Picos et de Natal (Brésil).....	53
3.3. Conclusions.....	56
Chapitre 4 COMPARAISON DES PROCÉDURES FRANÇAISES ET BRÉSILIENNES POUR LA CARACTÉRISATION GÉOTECHNIQUE D'UNE LATÉRITE EN PROVENANCE DE PICOS (BRÉSIL).....	57
4.1. Introduction.....	57
4.2. Étude comparative des normes françaises et brésiliennes.....	57
4.2.1. Analyse granulométrique.....	57

4.2.2. Limites d'Atterberg	58
4.2.3. Essais de compactage Proctor et CBR.....	60
4.3. Conclusions	61
Chapitre 5 ÉTUDE PAR RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE DES RELATIONS ENTRE L'INDICE CBR ET LES PARAMÈTRES DE CARACTÉRISATION GÉOTECHNIQUE DE LATÉRITES DU SÉNÉGAL.....	63
5.1. Introduction	63
5.2. Rappels théoriques sur la méthode de la régression linéaire multiple.....	63
5.2.1. Aspect mathématique	63
5.2.2. Détermination de la qualité de l'ajustement.....	64
5.2.3. Détection des points atypiques	65
5.3. Estimation de la valeur de l'indice CBR à partir des résultats d'analyse granulométrique de la fraction 0/20mm	65
5.3.1. Études des données relatives à la latérite de Sindia.....	65
5.3.2. Études des données relatives à la latérite de Dougar.....	72
5.3.3. Application de la relation (5.8) aux données de Dougar	75
5.3.4. Application de la relation (5.9) aux données de Sindia.....	76
5.3.5. Analyse de l'ensemble des données de Sindia et de Dougar.....	78
5.3.6. Comparaison des valeurs de l'indice CBR calculé par les relations (5.8), (5.9) et (5.10)...	86
5.4. Estimation de la valeur de l'indice CBR à partir des caractéristiques d'analyse granulométrique, de limites d'Atterberg et de compactage Proctor	89
5.4.1. Études des données relatives à la latérite de Sindia.....	90
5.4.2. Études des données relatives à la latérite de Dougar.....	98
5.4.3. Analyse de l'ensemble des données de Sindia et de Dougar.....	102
5.4.4. Application de la relation (5.12) aux données de Dougar	107
5.4.5. Application de la relation (5.13) aux données de Sindia.....	109
5.4.6. Comparaison des valeurs de l'indice CBR calculé par les relations (5.12), (5.13) et (5.14)	110
5.5. Comparaison des résultats obtenus sur les latérites du Sénégal (Sindia et Dougar)	112
5.5.1. Comparaison entre les relations (5.8) et (5.12)	113
5.5.2. Comparaison entre les relations (5.9) et (5.13)	116

5.5.3. Comparaison entre les relations (5.10) et (5.14)	118
5.6. Évaluation des méthodes d'estimation de la valeur de l'indice CBR.....	122
5.7. Conclusion.....	123
Chapitre 6 ÉTUDE DE L'AMÉLIORATION DE LATÉRITES DU SÉNÉGAL PAR AJOUT DE SABLE	125
6.1. Introduction	125
6.2. Étude de la lithostabilisation de la latérite de Lam-Lam	125
6.2.1. Caractérisation de la latérite d'origine	125
6.2.2. Propriétés du sable de Keur Massar utilisé pour la lithostabilisation.....	128
6.2.3. Lithostabilisation de la latérite de Lam-Lam avec le sable de Keur Massar	129
6.3. Étude de la lithostabilisation de la latérite de Sindia.....	131
6.3.1. Caractéristiques de la latérite de Sindia.....	131
6.3.2. Lithostabilisation de la latérite de Sindia	133
6.4. Réflexions sur la lithostabilisation	134
6.4.1. Lithostabilisation d'un graveleux latéritique avec du granite concassé (Toe, 2007)	135
6.4.2. Lithostabilisation d'une latérite du Cameroun (Madjadoumbaye et al., 2012)	137
6.4.3. Fuseaux granulométriques du CEBTP (1972) et du CEBTP (1984).....	141
6.5. Conclusions	143
CONCLUSION GÉNÉRALE	145
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	147
ANNEXES	150

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé grâce à l'aide de différents organismes. Leur soutien continu a permis son aboutissement et je tiens à adresser mes vifs remerciements à :

- Monsieur Jean-Pierre MAGNAN, mon directeur de thèse pour tout l'intérêt qu'il n'a jamais cessé de m'accorder depuis mon master à l'École Centrale de Paris et son grand apport quand j'ai été à la recherche d'un financement pour la thèse. Un grand merci pour toutes les faveurs que vous m'avez accordées.
- Monsieur Ibrahima Khalil CISSÉ, mon co-directeur de thèse pour ses conseils et tout l'intérêt qu'il n'a jamais cessé de m'accorder. Un grand merci à vous.
- Messieurs Patrice CHARDARD, Frédéric BOURGAULT, Guy RAOUL, Emmanuel LAVALLEE et Claude AIMÉ, pour le financement de mes séjours en France et pour la confiance qu'ils m'ont donnée.
- Monsieur Lamine CISSÉ, mon très cher parrain pour l'intérêt qu'il n'a jamais cessé de m'accorder depuis ma deuxième année du cycle d'ingénieur et tout le soutien qu'il m'a apporté quand j'étais à la recherche du financement de la thèse pour les séjours du Sénégal. Je ne saurai trouver les mots pour vous remercier. Un grand merci également à vous et à Monsieur Ibrahima NDIAYE (ancien directeur de l'AGEROUTE – Sénégal) pour tout l'intérêt que vous avez accordé au bon déroulement de mes séjours au Sénégal.
- Monsieur Omar SY pour son accueil à l'AGEROUTE durant mon troisième séjour au Sénégal.
- Monsieur Thierry DUBREUCQ pour l'aide apportée.
- Messieurs Philippe REIFFSTECK et Jean Claude AURIOL pour leurs conseils et l'aide qu'ils m'ont apportée depuis mon master à l'École Centrale de Paris.
- Monsieur John Kennedy Guedes RODRIGUES, pour son accueil à l'Université Fédérale de Campina Grande (Brésil) et l'organisation et le financement de mon séjour de six mois dans cette université.
- Messieurs Philippe DELMAS et Daniel LEVACHER pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.
- Monsieur Cyrille KOPP, pour sa grande contribution au bon déroulement des travaux au Sénégal.

- Messieurs Moustapha DIOP, Mamadou SOUGOUFARA et Mor THIAW pour leurs conseils et tout l'intérêt qu'ils ont porté au bon déroulement de mes travaux au Sénégal. Un grand merci également à tous les laborantins d'Eiffage Sénégal pour leur grande contribution à la réalisation des essais.
- Madame Yasmina BOUSSAFIR pour l'aide apportée durant toute la durée de ma thèse.
- Monsieur Van Chamroeun PAK et Madame Mariam COULIBALY ainsi que toute l'équipe du département Géotechnique, Environnement, Risques naturels et Sciences de la terre (GERS) de l'IFSTTAR pour l'aide apportée.
- Messieurs Jean-Pierre DAVID, Andry RAZAKAMANANTSOA et Erwann RAYSSAC pour leur soutien durant mon séjour à Nantes.
- Monsieur Toyi Hézouwé BAFEI pour son soutien, ainsi que tout le personnel de l'AGEROUTE / Sénégal.
- Monsieur Malal Diallo KANE, pour son grand apport à la réalisation des essais de laboratoire durant mon premier séjour au Sénégal.
- Monsieur Serigne Sam SAMB et à Madame Aissatou NDOYE pour l'aide apportée ainsi que tous les laborantins ayant participé à la réalisation des essais.

Enfin, mes vifs remerciements à ma famille pour son soutien et ses encouragements durant toute la durée de la thèse. Un grand merci à vous.

RÉSUMÉ

Contribution à l'étude de sols latéritiques du Sénégal et du Brésil

Cette étude porte sur les matériaux graveleux latéritiques utilisés dans de nombreux pays pour la construction des couches de fondation et de base des chaussées routières. Au Sénégal, les matériaux sont sélectionnés par référence aux règles du CEBTP de 1972, révisées en 1980. Les graveleux latéritiques doivent respecter des fuseaux granulométriques avant ou après compactage. Des conditions sont aussi imposées à l'indice CBR, à l'indice de plasticité et à l'optimum Proctor.

Les recherches présentées dans ce rapport concernent différentes questions :

- quel est l'effet du compactage à différentes énergies sur la fragmentation des particules solides et la modification de la courbe granulométrique ? Comment en tenir compte dans la sélection des matériaux et donc leur classification ? Comment se comportent ces matériaux dans les chaussées sous l'effet du compactage à la mise en œuvre puis de la circulation ?
- peut-on trouver une corrélation entre l'indice CBR et les paramètres granulométriques ou géotechniques du sol ? Les corrélations sont-elles valables pour tous les sites ou seulement à l'échelle d'une carrière ?
- comment réagit le sol graveleux latéritique lorsqu'on le mélange avec un autre matériau dépourvu de particules fines pour améliorer sa plasticité et sa résistance ?
- comme une partie des recherches a eu lieu au Brésil, le rapport compare les procédures expérimentales utilisées au Brésil et au Sénégal.

La pertinence de l'utilisation des coefficients de fragmentabilité et dégradabilité, introduits dans la classification des sols latéritiques de Rodrigues et al. (2010) pour caractériser l'évolution des graveleux latéritiques, a été évaluée par des essais de laboratoire sur le matériau de la carrière de Lam-Lam et le même matériau mis en œuvre en couche de base sur deux routes du Sénégal. Le coefficient de dégradabilité ne différencie pas les matériaux et le coefficient de fragmentabilité semble être un meilleur paramètre.

L'étude de l'évolution des classes granulaires des latérites de deux carrières du Sénégal et deux carrières du Brésil sous compactage CBR confirme l'importance de la fragmentation des particules les plus grandes et le décalage des courbes granulométriques vers les sols plus fins, mais ces changements dépendent de la nature des latérites testées. Il en résulte que l'étude des matériaux graveleux latéritiques doit continuer de se faire à l'échelle de la carrière.

La méthode de régression linéaire multiple a été appliquée à la prévision de l'indice CBR des matériaux prélevés dans deux carrières sénégalaises (40 prélèvements à Sindia et 46 à Dougar). Cette étude a montré que l'on peut trouver des approximations acceptables à l'échelle de chaque carrière

pour calculer l'indice CBR à partir des courbes granulométriques et à partir de six paramètres choisis pour leur influence potentielle sur cet indice : le passant au tamis 80 μ m, les caractéristiques de courbure et d'étendue de la courbe granulométrique, l'indice de plasticité et les caractéristiques Proctor. Mais les formules établies sur un site sont inadaptées à la prévision de l'indice CBR sur d'autres sites, ce qui confirme que les analyses doivent se faire à l'échelle de la carrière.

La lithostabilisation des latérites de Lam-Lam et de Sindia par mélange avec 30% et 10% de sable de Keur Massar pour abaisser leur indice de plasticité naturel a eu l'effet attendu sur la plasticité, tout en respectant les critères granulométriques. Mais l'effet de l'ajout du sable sur l'indice CBR est inattendu et devra être étudié : diminution pour la latérite de Lam-Lam et augmentation pour la latérite de Sindia.

La comparaison des normes françaises et brésiliennes a montré que, malgré de légères différences, les résultats sont globalement équivalents. La plus grande différence concerne l'indice CBR, qui est déterminé avec des énergies de compactage différentes et donne des résultats plus faibles au Brésil. Mais les conditions imposées aux matériaux sont adaptées à ces valeurs.

ABSTRACT

A contribution to the study of lateritic soils from Senegal and Brazil

This study is devoted to the gravelly lateritic soils used in many countries as foundation and base layers of road structures. In Senegal, road materials are selected according to the CEBTP 1972 rules, which were revised in 1980. Lateritic gravel grain size curves must lie between lower and upper limit curves before or after compaction. Additional conditions are put on CBR index, plasticity index and modified Proctor optimum.

The researches presented in this report concern various aspects of the use of lateritic soils:

- what is the influence of compaction at different energy levels on the fragmentation of solid particles and the changes in the grain-size curve? How can particle fragmentation be taken into account in the selection and classification of materials? What is the behaviour of lateritic gravels in road pavements once they have been compacted then submitted to traffic?
- can a relation be found between CBR index and grain size curve and other geotechnical properties of the soil? Are correlations valid for all sites or only for a particular quarry?
- what is the evolution of a gravelly lateritic soil when it is mixed with another material without fines to improve its plasticity and resistance?
- since part of the research was made in Brazil, experimental procedures used in Brazil and Senegal, where French standards are used, are compared.

The relevance of fragmentability and degradability coefficients, which are used in the classification for lateritic soils proposed by Rodriguez et al. (2010), to characterize the evolution of lateritic gravels was assessed by means of laboratory tests on samples from Lam-Lam quarry and samples of the same material taken from the base layer of two roads sections in Senegal. The degradability coefficient does not differentiate the materials and the coefficient of fragmentability seems to be a better parameter.

The evolution of granular classes of laterites taken from two quarries in Senegal and two quarries in Brazil, which were submitted to CBR compaction, confirms the importance of the fragmentation of the bigger particles and the shift of grain size curves towards finer soils, but these changes depend on the nature of the tested laterites. As a consequence, the study of gravelly lateritic materials must still be done at the scale of a quarry.

Multilinear regression techniques were applied to the prediction of CBR index of materials taken from two Senegalese quarries (40 samples from Sindia quarry and 46 from Dougar quarry). It was shown that acceptable approximations can be found for each quarry to calculate CBR index from grain size curves, on one side, and from the values of six parameters, which were deemed to influence the CBR index value: mass percentage of particles finer than 80 μ m, curvature and extension coefficients of the

grain size curve, plasticity index and Proctor characteristics. Nevertheless, the formula established for a given site cannot be used for predicting CBR index on another site. This confirms that analyses should be made at the scale of a quarry.

Lithostabilisation of Lam-Lam and Sindia laterites by adding 30% and 10% of sand from Keur Massar quarry, which aimed at reducing the plasticity index of these laterites, had the expected effect on plasticity, while conforming to granularity criteria. But the addition of sand had contradicting effects on CBR index, which should be further studied: decrease of CBR index for Lam-Lam laterite and increase of CBR index for Sindia laterite.

The comparison of French and Brazilian standards showed that, despite slightly differing procedures, the results are globally equivalent. The biggest difference concerns CBR index, which is determined using different compaction energies and yields smaller values in Brazil. But the conditions put on materials are adapted to these values.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les sols latéritiques, très abondants en Afrique tropicale et équatoriale, sont largement utilisés en construction routière. Les règles applicables sont déjà anciennes et différents écarts sont autorisés au niveau des chantiers pour tenir compte de l'expérience accumulée au fil des années. Le travail présenté dans ce mémoire porte sur les évolutions possibles de ces règles, mais il n'est que très partiel parce que la modification de pratiques du domaine de la construction ne peut se faire sans une part importante de validation expérimentale sur des chantiers et des routes existantes, observées pendant des années, voire des dizaines d'années, ce qui est impossible à l'échelle d'une thèse. Le projet de la thèse s'appuyait sur l'idée d'observer le comportement de sections de routes existantes, pour voir comment les latérites évoluent sous circulation, et sur un projet de classification des sols latéritiques, qui inclut un indicateur de fragilité des nodules latéritiques.

Le travail a été réalisé en France (IFSTTAR), au Sénégal (AGEROUTE) et au Brésil (Université Fédérale de Campina Grande). Les carrières de sols graveleux latéritiques étudiées se trouvent au Sénégal, dans la région de Thiès, et au Brésil, dans les états du Piauí et de Rio Grande do Norte. Les sections de routes analysées sont situées au Sénégal, dans les régions de Thiès et de Louga.

Le rapport comporte six chapitres et une conclusion générale :

- le premier chapitre est consacré à la définition et à la caractérisation des sols latéritiques ;
- le deuxième chapitre utilise des mesures faites en laboratoire sur des matériaux prélevés sur deux routes existantes pour évaluer la pertinence de l'utilisation des coefficients de fragmentabilité (I_{FR}) et de dégradabilité (I_{DG}) introduits dans la nouvelle classification pour distinguer le comportement des sols latéritiques dans les routes à trafic faible ;
- le troisième chapitre, qui concerne également la fragmentabilité des matériaux, est consacré à l'évolution de la granulométrie de sols latéritiques du Sénégal et du Brésil sous compactage CBR ;
- le quatrième chapitre compare les procédures d'essais des normes françaises et brésiliennes dans le cas d'une latérite en provenance de Picos au Brésil ;
- le cinquième chapitre traite de la prévision de la valeur de l'indice CBR par régression linéaire multiple, dans le cas de carrières sénégalaises ;
- le sixième chapitre analyse la lithostabilisation de latérites du Sénégal au moyen d'un sable dunaire.

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

CEBTP :	Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux publics.
CBR :	Californian Bearing Ratio.
C_{UL} :	Coefficient d'étendue des tailles des particules.
C_{CL} :	Coefficient de forme de la courbe granulométrique.
C_{LA} :	Coefficient Los Angeles.
C_{MDE} :	Coefficient Micro Deval.
$C_{0,08mm}$:	Passant au tamis de 80 μ m.
C_{2mm} :	Passant au tamis de 2mm.
C_{10mm} :	Passant au tamis de 10mm.
D_{10} :	Diamètre des particules correspondant à 10% de passant.
D_{90} :	Diamètre des particules correspondant à 90% de passant.
f :	Pourcentage de fines.
G_{dmax} :	Densité sèche maximale.
G_{dOPM} :	Densité sèche maximale.
GTR :	Guide des Terrassements Routiers.
HRB :	Highway Research Board.
I_{DG} :	Coefficient de dégradabilité.
I_{FR} :	Coefficient de fragmentabilité.
I_{FS} :	Coefficient de friabilité des sables.
I_{CBR} :	Indice CBR.
I_{HC} :	Indice de dureté des concrétions.
I_p :	Indice de plasticité.
ISTED :	Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et l'Environnement pour le Développement.
Mg :	Module granulométrique.
N :	Nombre de cycles de chargement.
n :	Nombre d'observations.
p :	Nombre de variables.
$P_{0,08mm}$:	Passant au tamis de 80 μ m.
$P_{0,2mm}$:	Passant au tamis de 0,2mm.
$P_{0,5mm}$:	Passant au tamis de 0,5mm.
P_{1mm} :	Passant au tamis de 1mm.
P_{2mm} :	Passant au tamis de 2mm.
P_{4mm} :	Passant au tamis de 4mm.

P_{5mm} :	Passant au tamis de 5mm.
P_{10mm} :	Passant au tamis de 10mm.
R^2 :	Coefficient de détermination.
r :	Coefficient de corrélation.
R_{2mm} :	Refus au tamis de 2mm.
S/R :	Degré de latérisation.
t :	Coefficient de Student théorique.
t' :	Coefficient de Student empirique.
USCS :	Unified Soil Classification System.
V_{BS} :	Valeur de bleu de méthylène.
w_L :	Limite de liquidité.
w_{OPM} :	Teneur en eau à l'optimum Proctor modifié.
w_P :	Limite de plasticité.
w_S :	Limite de retrait.
X^t :	Transposée de la matrice X.
$[X^t X]^{-1}$:	Inverse de la matrice $X^t X$.
y_i :	Valeur de la $i^{ème}$ observation du paramètre y.
\hat{y}_i :	Valeur de la $i^{ème}$ estimation du paramètre y.
\bar{y} :	Moyenne des échantillons y_i .
ρ_{dOPM} :	Masse volumique sèche à l'optimum Proctor modifié.
$ \hat{\varepsilon}_i $:	Valeur absolue du résidu de l'observation i.
$\hat{\sigma}_i$:	Écart-type de l'observation i.
α :	Intervalle de confiance.

Chapitre 1

DÉFINITIONS ET CARACTÉRISATION DES SOLS LATÉRIQUES

1.1 Introduction

Les sols latéritiques, localisés en général dans les zones tropicales et subtropicales, ont fait l'objet de nombreuses études, comme sols au sens pédologique, comme catégorie minéralogique et comme matériaux de construction. Toutefois, malgré l'intérêt qu'ils suscitent, il n'y a pas d'unanimité sur leur définition.

Les sols latéritiques sont largement employés en construction routière dans le monde, en Afrique en général et au Sénégal, en particulier. Dans ce pays, les recommandations du « guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux » du Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) sont utilisées comme critère de sélection de ces matériaux. Ces recommandations utilisent la courbe granulométrique, l'indice de plasticité (I_p), le pourcentage de fines (passant au tamis de $80\mu\text{m}$) et l'indice CBR comme paramètres de choix. Cependant, compte tenu de l'expérience locale, certaines dérogations sont apportées à ces règles en fonction des projets routiers.

Dans ce chapitre, nous nous pencherons d'abord sur la définition et la caractérisation des sols latéritiques, avant d'aborder les critères de sélection en construction routière et de classification des matériaux utilisés au Sénégal.

1.2. Définition des sols latéritiques

Le terme « latérite », qui provient du mot latin « later » (brique), a été employé pour la première fois par Buchanan en 1807 pour désigner les dépôts ferrugineux recouvrant de vastes surfaces dans les régions montagneuses de Malabar en Inde. Buchanan (1807), cité par Bohi (2008), indique que « c'est l'un des meilleurs matériaux de construction, rempli de cavités et de pores, possédant de grandes quantités de fer de coloration rouge et jaune. L'intérieur du matériau, s'il est à l'abri de l'air, est si tendre que tout instrument métallique le coupe. Aussitôt taillée de la forme voulue, la masse devient aussi dure qu'une brique, et résiste à l'eau et à l'air bien mieux que tout autre brique que j'ai vue aux Indes ».

Toutefois, cette définition cache bien les caractères particuliers de la formation de ces matériaux. Florentin et L'Héritau (1952) recensaient déjà, dans leur étude bibliographique sur les latérites, plus d'une trentaine de définitions proposées par des spécialistes des différentes disciplines intéressées (pédologie, géologie minière et géomécanique).

Pour sa part, Autret (1983) a analysé un nombre important d'ouvrages traitant des sols latéritiques et il suggère de distinguer :

- les sols fins latéritiques (ou latérite) ;
- les graveleux latéritiques (matériau 0/D), utilisés en construction routière comme couche de forme, couche de fondation ou de base ;
- la carapace latéritique ou horizon latéritique, couche très dure mais pouvant être détruite par un engin de terrassement, à la pioche, etc. ;
- la cuirasse latéritique, couche très dure de matériau aggloméré ressemblant à des scories, difficilement destructible par des engins à lame, parfois naturellement fragmenté.

La figure 1.1 montre quatre photos de matériaux latéritiques :

- matériaux graveleux de la carrière de Ngathie Naoudé (Sénégal),
- vue de la carrière de Sindia (Sénégal),
- vue de la carrière de l'aéroport de Natal (État de Rio Grande do Norte, Brésil),
- vue de la carrière de Recife (État de Pernambuco, Brésil).

Toutes les définitions des latérites traduisent l'idée selon laquelle elles proviennent d'une altération chimique et physique du sol en place, provoquée par l'alternance de pluies intenses et de périodes sèches, dans les conditions imposées par le milieu ambiant (topographie, végétation). On peut retenir la définition suivante : un « matériau de structure vacuolaire, souvent bariolé, avec des teintes allant du jaune au rouge, plus ou moins foncé, tirant même au noir, constitué par une croûte continue d'épaisseur et de dureté variables et ayant souvent l'aspect d'une scorie, ou encore contenant des concrétions isolées oolithiques ou pisolithiques de plus ou moins grande résistance et mélangées à une partie argileuse. En dessous de la croûte ou des concrétions, on trouve un sol également bariolé et à structure vacuolaire, mais moins riche en éléments durs et de teintes plus claires ».



a. Latérite de Ngathie Naoudé (Sénégal)



b. Carrière latéritique de Sindia (Sénégal)



c. Carrière latéritique de l'aéroport de Natal (Brésil)



d. Carrière latéritique de Recife (Brésil)

Figure 1.1. Photos de sols latéritiques

1.3. Processus de latérisation

Le processus de latérisation, propre aux sols se trouvant dans des zones où règne un climat chaud et humide, résulte d'une altération chimique qui se traduit par la mise en solution de certains éléments de la roche mère, le départ de la silice par lessivage et l'enrichissement du matériau en fer et en alumine, sous forme d'oxydes.

Le rapport S/R défini en fonction des teneurs en SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 a été pendant de longues années utilisé pour apprécier le degré de latérisation des sols latéritiques (Autret, 1983). Ce rapport est défini par la relation suivante :

$$\frac{S}{R} = \frac{\frac{SiO_2}{60}}{\frac{Al_2O_3}{102} + \frac{Fe_2O_3}{160}} \quad (1.1)$$

Les définitions associées sont les suivantes :

- $S/R < 1,33$: latérites vraies ;
- $1,33 < S/R < 2$: roches latéritiques ;
- $S/R > 2$: matériaux non latéritiques.

Autret (1983) note que ces définitions ne font pas l'unanimité car, si le rapport S/R a le mérite de séparer les latérites des argiles telles les kaolinites, en revanche il classe parmi les latérites le minerai de fer, la bauxite et de nombreux grès ferrugineux.

Les facteurs qui exercent une influence prépondérante sur le processus de latérisation sont :

- le climat (pluviométrie, température, bilan hydrique) ;
- la topographie (érosion et drainage) ;
- la végétation (matières organiques, bactéries, acides humiques) et
- la roche mère.

1.3.1. Le climat

Le climat a une action combinée par la température et le bilan hydrique. Une pluviométrie importante est nécessaire pour provoquer l'altération des roches, mais le mouvement de l'eau dans le sol (bilan hydrique) exerce une influence déterminante sur la nature du produit final. La température catalyse les réactions chimiques et joue sur l'altération en favorisant la formation ou la destruction de l'humus (Bagarre, 1990).

Enfin un climat chaud et pluvieux à deux saisons alternées bien marquées est nécessaire pour la formation des sols latéritiques.

1.3.2. La topographie

La topographie influe sur le processus de latérisation dans la mesure où elle favorise ou défavorise l'accumulation d'eau (Autret, 1983). Par ailleurs, Enanga (1984), cité par Lyon Associates (1971), souligne que l'érosion produite par les eaux de ruissellement dépend de leur importance et de la raideur de la pente.

Les cuirasses ou carapaces latéritiques se trouvent généralement dans les zones plates et rarement sur des pentes (dans le cas où la formation de la pente est postérieure au phénomène de latérisation), où l'on trouve le plus souvent des fragments de carapace dans les éboulis (Autret, 1983).

1.3.3. La végétation

La végétation joue, selon Tockol (1993), sur le ruissellement et le bilan hydrique et favorise la formation d'un type de latérites spécifiques selon qu'on se trouve en zone de forêt ou de savane. Il

semble, cependant, que la latérite sous forme de carapace soit plus fréquente en zone de savane qu'en zone de forêt, que le graveleux à pisolite est plus fréquent en forêt qu'en savane tandis que c'est l'inverse pour les brèches latéritiques (Autret, 1983).

1.3.4. La roche mère

La nature de la roche mère ne semble pas avoir d'incidence sur l'existence du phénomène de latérisation, puisque celui-ci concerne autant des roches basiques ignées de type « basalte » que des roches acides de type « granite » ou « gneiss » ou d'autres roches sédimentaires de type « grès », « schistes » et « calcaires ».

Par contre, elle exerce une influence sur le type de réaction et la nature du constituant argileux ; les roches cristallines basiques comme les basaltes sont peu riches en silice et composées en partie d'olivine, qui s'altère en montmorillonite ; les roches cristallines acides, telles que les granites et les gneiss, s'altèrent principalement en kaolinite ou halloysite, les roches sédimentaires argileuses, tels les schistes et les grès, s'altèrent en illite (Autret, 1983).

1.4. Les différents types de latérites

Il s'agit essentiellement, selon que l'on se trouve en zone tropicale sèche ou humide, des sols latéritiques ferrugineux, des sols latéritiques ferralitiques et des ferrisols (Tockol, 1993).

Lyon Associates (1971) rapportent que les sols ferrugineux se trouvent dans des régions arides où la saison sèche est marquée tandis que les sols ferralitiques sont généralement rencontrés dans des parties plus humides et dans des zones couvertes d'une végétation dense. Les ferrisols sont, pour leur part, rencontrés dans des zones de pluviométrie moyenne à forte.

1.5. Caractéristiques morphologiques des sols latéritiques

Les sols latéritiques présentent une grande variabilité de caractéristiques morphologiques liée en général aux conditions dans lesquelles ils se sont formés et à la nature de la roche mère. Les caractéristiques morphologiques des sols latéritiques sont :

- l'induration ;
- la structure ;
- la couleur ;
- la densité.

1.5.1. L'induration

L'induration des sols latéritiques dépend de plusieurs facteurs :

- la composition et le degré de cristallisation des composants : les latérites moins hydratées sont les plus dures et la dureté croît avec les teneurs en fer (plus la teneur en sesquioxydes est élevée plus l'induration est forte) ;
- de l'assemblage des différents constituants ;
- du degré de vieillissement : les latérites les plus âgées sont plus dures que celles issues de formations récentes.

Lyon Associates (1971) précisent que la résistance et la dureté des latérites durcies est fonction de leur composition chimique, de leur âge et de leur homogénéité. Nascimento et al. (1959), cités par Lyon Associates (1971), notent que les latérites durcies riches en fer sont plus dures que celles qui sont riches en alumine.

1.5.2. La structure

La structure des latérites est extrêmement variée mais les modes d'assemblage peuvent se réduire à trois éléments :

- les éléments indurés forment un squelette cohérent et continu ;
- les éléments indurés sont des concrétions ou des nodules libres au milieu d'un matériau terreux ;
- les éléments indurés cimentent les matériaux préexistants.

1.5.3. La couleur

La couleur des sols latéritiques est variée mais généralement d'intensité vive. Les teintes les plus courantes sont le rose, l'ocre, le rouge, le jaune et le brun. Il est généralement admis que la couleur du sol est due, dans une large mesure, à la présence de fer, comme c'est le cas pour certains sédiments. Les couleurs vives, rouges ou jaunes, sont dues aux oxydes ou hydroxydes ferriques. La couleur rouge est provoquée par la présence d'hématite et la couleur jaune par la goethite (Segalen, 1964, cité par Lyon Associates, 1971).

1.5.4. La densité

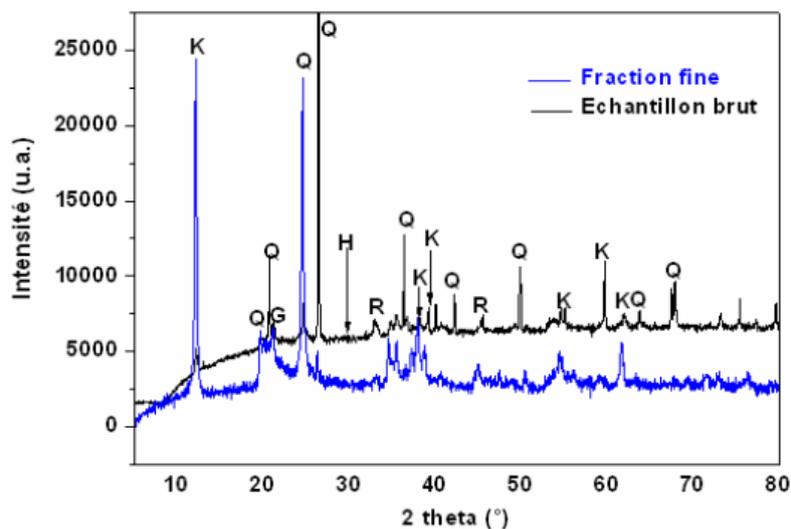
La densité des particules des sols latéritiques, qui varie dans d'assez grandes proportions (2,5 à 3,6), dépend de leur composition chimique. Elle augmente avec les teneurs en fer et diminue avec les teneurs en alumine. Les formes oxydées sont plus denses que les formes hydratées (Lyon Associates, 1971).

1.6. Caractéristiques chimiques et minéralogiques des sols latéritiques

Magnein (1966), cité par Lyon Associates (1971), mentionne que des latérites physiquement semblables peuvent avoir des compositions chimiques différentes et inversement des latérites chimiquement semblables peuvent posséder des propriétés physiques très distinctes.

De nombreux chercheurs ont tenté de compléter les déterminations chimiques par des études minéralogiques. Magnein (1966), cité par Lyon Associates (1971), a divisé les constituants minéralogiques en éléments principaux, essentiels à la latérisation, et en éléments secondaires qui n'affectent pas le processus de latérisation. Les éléments principaux sont les oxydes et hydroxydes d'alumine et de fer des minéraux argileux et, à un degré moins important, ceux de manganèse et de titane, et la silice. Les constituants secondaires sont des restes résiduels ou matériaux clastiques.

Le pourcentage d'oxydes et d'hydroxydes d'alumine et de fer (sesquioxydes) peuvent atteindre pour certains sols latéritiques près de 80% du produit de la latérisation. Lyon Associates (1971) ajoutent que la kaolinite est le plus répandu des minéraux argileux dans les sols latéritiques (Figure 1.2). L'halloysite y est également trouvée. L'illite et la montmorillonite y sont rares.



K : Kaolinite Q : Quartz G : Goethite H : Hématite R : Rankinite

Figure 1.2. Composition chimique de la latérite de Sapouy du Burkina Faso (Millogo, 2008)

1.7. Identification des graveleux latéritiques pour la construction routière

La granulométrie, les limites d'Atterberg (limite de liquidité et plasticité), la valeur de bleu de méthylène (V_{BS}), les essais de compactage (Proctor et CBR) sont les principaux moyens de caractérisation des sols latéritiques en construction routière.

1.7.1. Granulométrie

Les graveleux latéritiques sont définis, du point de vue géotechnique, comme des sols meubles de granularité 0/20 à 0/40 mm, comportant de 10 à 35% de fines (passant au tamis de 80 μ m) et de 20 à 60% de particules plus grossières (refus au tamis de 2mm) formant un « squelette ». Les courbes

granulométriques de ces sols présentent généralement un palier entre 0,08mm et 2mm, qui traduit la dualité d'origine des composants du mélange naturel qu'est ce matériau (Bagarre, 1990).

1.7.2. Plasticité

L'indice de plasticité (I_p) des sols latéritiques varie en général entre 10 à 35 (Bagarre, 1990). Lyon Associates (1971) précisent que l'influence du prétraitement et des processus de détermination des limites d'Atterberg sur les caractéristiques de plasticité a été souvent étudiée et discutée (Figure 1.3).



a)

b)

Figure 1.3. Détermination des limites d'Atterberg a) limite de liquidité b) limite de plasticité

Les variations des résultats, dues au prétraitement et au processus d'essai, ont rendu leur interprétation très difficile. Newill, cité par Lyon Associates (1971) écrit que, lorsque les essais de détermination de la limite de liquidité ont été effectués, les agrégats de particules d'argiles furent cassés par les manipulations nécessitées par l'essai, ce qui rendit difficile l'obtention de valeurs reproductibles de la limite de liquidité. Le traitement appliqué au sol crée aussi des problèmes lorsqu'il s'agit de relier entre eux les résultats de laboratoire et le comportement du sol sur le chantier, où il ne reçoit pas un traitement équivalent.

1.7.3. Activité au bleu de méthylène

Les études de Fabbri (1994), cité par Rodrigues et al. (2010), ont montré que le test d'absorption au bleu de méthylène par la méthode de la tache est capable d'identifier le type de minéral argileux présent dans la fraction fine des sols latéritiques.

Cet auteur conclut également, sur l'influence du pH sur la valeur de bleu de méthylène, qu'« il semble clair que les tests d'absorption de bleu de méthylène doivent être exécutés avec le pH naturel de la suspension sol/eau, étant donné que sa variation n'introduit pas de changement significatif dans les

résultats des essais. C'est encore la condition la plus favorable à sa réalisation, puisqu'il n'est pas nécessaire d'ajouter un autre produit à la suspension, de même qu'il n'est nul besoin de mesurer ni de contrôler le pH, ce qui, dans ce cas, augmenterait le temps d'exécution du test ».

1.7.4. Dureté des nodules

La dureté des nodules des sols latéritiques est un paramètre mal précisé (Bagarre, 1990). Les résultats des essais de résistance effectués sur les sols latéritiques varient surtout en fonction de la texture (Lyon Associates, 1971). La résistance et la dureté des latérites est fonction de leur composition chimique, de leur âge et de leur homogénéité. Les latérites durcies riches en fer sont plus dures que celles qui sont riches en alumines (Nascimento et al., 1959, cité par Lyon Associates, 1971).

Novais-Ferreira et Correira (1965) ont mis au point une méthode pour évaluer la dureté des concrétions latéritiques. Ils proposent de prendre en compte un indice de dureté (Hardness index) qui est le rapport de la somme des refus sur les tamis de 1" (25mm) - 3/4" (20mm) - 1/2" (12,5mm) - 3/8" (10mm) - N°4 (5mm) - N°10 (2mm) - N°40 (0,4mm) et N°200 (0,08mm), appelée module granulométrique (Mg), avant et après un essai Los Angeles modifié :

$$I_{HC} = \frac{Mg \text{ (avant compactage)}}{Mg \text{ (après compactage)}} \quad (1.2)$$

L'essai consiste à faire subir à l'échantillon 200 rotations sans charge abrasive (ISTED, 1990). Une valeur limite de 80 a été proposée par les auteurs comme permettant d'exclure toutes les concrétions tendres présentant de faibles résistances.

Tockol (1993) indique que, dans le but de se rapprocher du traitement subi par l'échantillon en place, d'autres chercheurs ont essayé de déterminer l'indice de dureté à partir de l'essai de compactage en laboratoire.

Rodrigues et al. (2010), pour leur part, ont proposé de prendre en compte le coefficient de fragmentabilité pour évaluer la dureté des concrétions latéritiques.

Par ailleurs, les résultats de diverses études ont montré que les essais effectués sur les concrétions pouvaient guider très utilement la sélection de ces matériaux en couche de base de construction routière. Cependant, l'essai le plus répandu pour apprécier la résistance des concrétions latéritiques reste l'essai CBR (Rémillon, 1967 ; Ackroyd, 1969 ; Meireles, 1967, cités par Lyon Associates, 1971).

1.7.5. Caractéristiques de portance (au sens routier)

Les caractéristiques de portance des sols latéritiques sont généralement déterminées par les essais Proctor et CBR (Californian Bearing Ratio). Rémillon (1967), cité par Lyon Associates (1971), note que le compactage des sols latéritiques concrétionnés affecte les caractéristiques du matériau. Ainsi, le

degré d'effritement (transformation du matériau lors du compactage) dépend du degré de latérisation et des caractéristiques physiques des particules. Au Sénégal, les essais Proctor et CBR sont généralement réalisés suivant les normes françaises NF P 94-093 et NF P 94-078, respectivement.

La valeur de l'indice CBR, qui est le paramètre le plus utilisé pour le dimensionnement des structures de chaussées en Afrique, est déterminée sur des éprouvettes compactées à 95% de l'optimum Proctor modifié après 4 jours d'imbibition. Plusieurs études ont été consacrées à sa prévision à partir de paramètres d'identification simples (granulométrie, limites d'Atterberg,...). De Graft-Johnson et al. (1969), après une étude des sols latéritiques du Ghana, ont proposé de calculer l'indice I_{CBR} en utilisant la relation suivante :

$$I_{CBR} = 35 \left(\frac{R_{2mm}}{w_L \log I_p} \right) - 8 \quad (1.3)$$

où R_{2mm} est le refus au tamis 2mm, w_L la limite de liquidité et I_p l'indice de plasticité.

De même, l'étude de Lyon Associates (Bagarre, 1990), qui couvrait plusieurs pays d'Afrique, a proposé la relation suivante :

$$I_{CBR} = 72,5 \log \left(\frac{G_{dmax}}{I_p} \right) - 7,5 \quad \text{avec } r = 0,68 \quad (1.4)$$

dans laquelle G_{dmax} est la densité sèche à l'optimum Proctor modifié, I_p est l'indice de plasticité et r le coefficient de corrélation.

Un autre programme concernant le Cameroun, la Centrafrique, le Congo (Brazzaville), le Burkina Faso, le Togo et le Zaïre (Congo Kinshasa) fut initié par le CEBTP pour établir des relations entre l'indice CBR et les paramètres usuels d'identification (Bagarre, 1990). De fortes dispersions des résultats furent constatées lors de l'analyse d'une formule de corrélation intuitive entre plusieurs paramètres :

$$I_{CBR} = \frac{R_{2mm} G_{dOPM}}{f^2 I_p} \quad (1.5)$$

où R_{2mm} est le refus au tamis de 2mm, G_{dOPM} est la densité sèche à l'optimum Proctor modifié, f est le pourcentage de fines et I_p l'indice de plasticité.

Fall (1993) a noté dans ses travaux que les diverses tentatives de corrélation se sont toujours heurtées à la méconnaissance du paramètre de portance (I_{CBR}) qui semble généralement indépendant des caractéristiques d'identification. Il note de plus que ces études intègrent une quantité de données de provenance très diverses, ce qui peut sembler hasardeux du fait que les différents sols peuvent être de natures très différentes.

1.8. Systèmes de classification des sols latéritiques utilisés au Sénégal

Les systèmes de classification du Highway Research Board (HRB), de l'Unified Soil Classification System (USCS) et du Guide des Terrassements Routiers français (GTR) sont les plus couramment utilisés au Sénégal pour classer les sols latéritiques.

1.8.1. Classification HRB

Les graveleux latéritiques couvrent plusieurs classes. Les matériaux les plus graveleux sont des A2-4 à A2-7, tandis que les plus argileux (passant à $0,08\text{mm} > 35$) sont des A7-5 et A7-6. On note quelques A5 et A6 (Bagarre, 1990).

1.8.2. Classification USCS

Les sols latéritiques sont généralement situés dans la catégorie des sols grenus. Ils se répartissent entre les GC (gravier argileux) et les SC (sable argileux) lorsque la dimension maximale de leurs particules est réduite (Bagarre, 1990).

1.8.3. Classification GTR

La presque totalité des graveleux latéritiques se situe dans la classe B6 ($D < 50\text{mm}$; f compris entre 12 et 35% ; $I_p > 10$) (Bagarre, 1990).

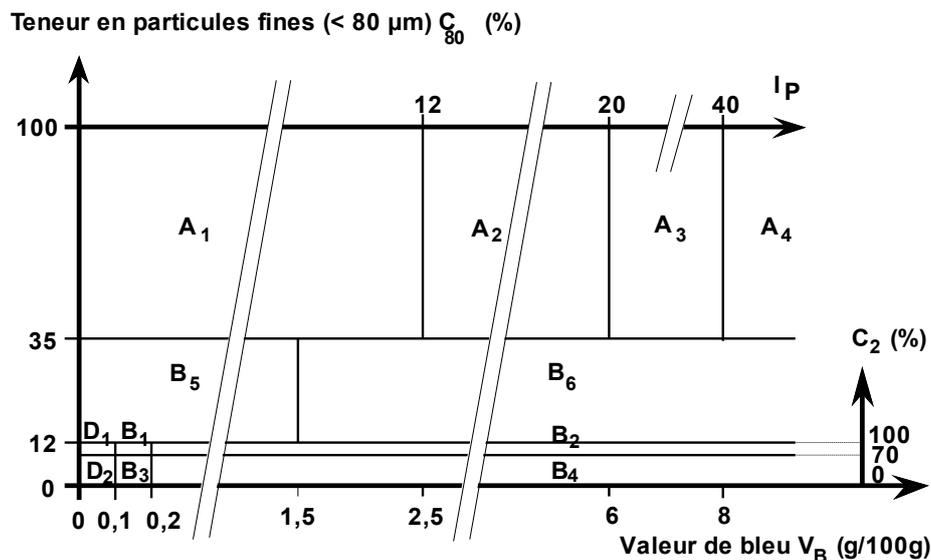


Figure 1.4. Classification des sols du guide des terrassements routiers (GTR, 1992)

1.9. Spécifications du Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) pour les sols latéritiques

Au Sénégal, comme dans beaucoup de pays africains, les critères de sélection des matériaux en construction routière reposent sur les recommandations du « guide de dimensionnement des chaussées

pour les pays tropicaux » du Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) de 1972 et de 1980 (révisées en 1984). Ce guide reste le plus utilisé actuellement. Ces recommandations sont fondées sur l'indice de plasticité (I_p), des fuseaux granulométriques et l'indice CBR. Cependant, compte tenu de l'expérience locale, certaines dérogations sont apportées à ces règles en fonction des projets routiers.

1.9.1. Spécifications du CEBTP de 1972

Les critères de sélection des matériaux sont définis dans le tableau 1.1 et sur les figures 1.5 et 1.6.

Tableau 1.1. Spécifications du CEBTP (1972) pour une utilisation

a) en couche de fondation

Tamis	Passants	
	Minimal	Maximal
38,0	80,0	100,0
19,0	65,0	100,0
10,0	50,0	100,0
5,0	35,0	100,0
2,5	25,0	80,0
0,7	15,0	55,0
0,08	5,0	35,0
$\rho_{dOPM} \geq 1,9 \text{ g/cm}^3$		
Limite de liquidité $w_L \leq 50$		
Indice de plasticité $I_p \leq 25$		
% gonflement $\leq 1\%$		

b) en couche de base

Tamis	Passants	
	Minimal	Maximal
38,0	85,0	100,0
19,0	70,0	100,0
10,0	50,0	95,0
5,0	40,0	90,0
2,5	30,0	80,0
0,7	15,0	45,0
0,08	5,0	20,0
$\rho_{dOPM} \geq 2 \text{ g/cm}^3$		
Limite de liquidité $w_L \leq 35$		
Indice de plasticité $I_p \leq 15$		
% gonflement $\leq 0,3\%$		

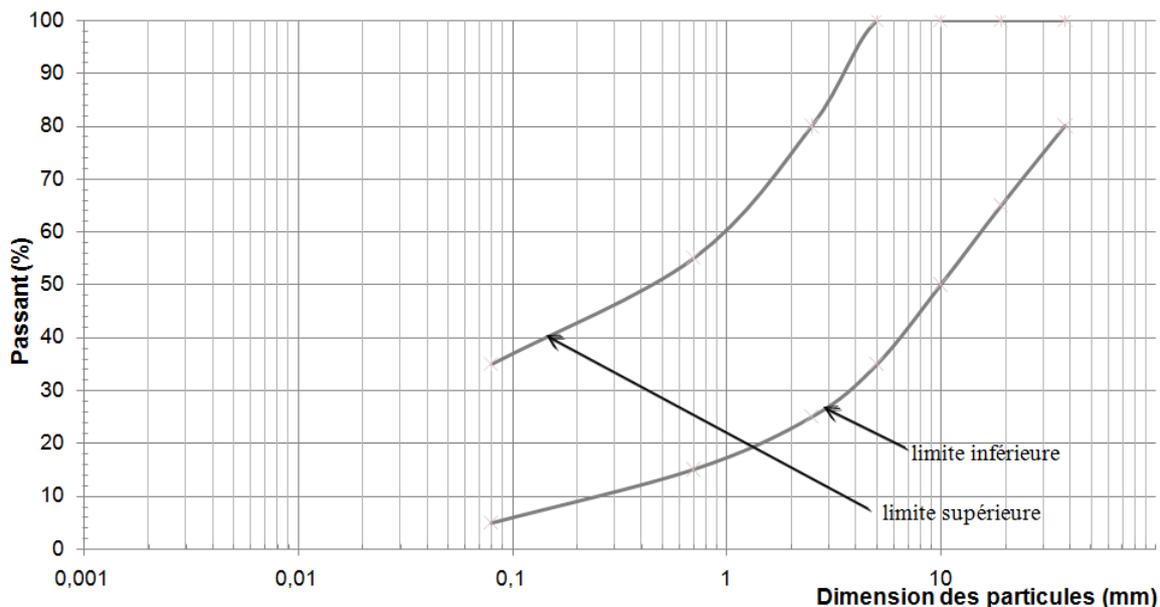


Figure 1.5. Représentation du fuseau granulométrique du CEBTP de 1972 pour l'utilisation des sols latéritiques en couche de fondation

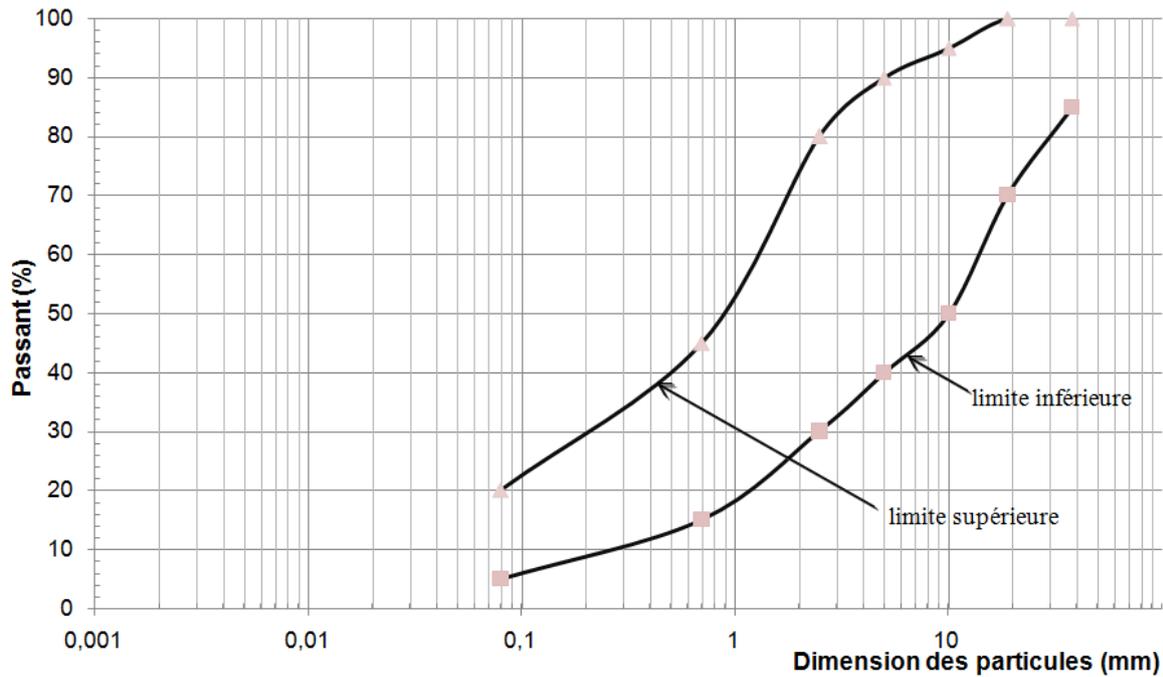


Figure 1.6. Représentation du fuseau granulométrique du CEBTP de 1972 pour l'utilisation des sols latéritiques en couche de base

1.9.2. Spécifications du CEBTP de 1980 (révisées en 1984)

Les critères de sélection des matériaux sont définis dans les tableaux 1.2 et 1.3 et sur les figures 1.7 et 1.8. Ces spécifications font également l'objet de dérogations en fonction des projets routiers.

Tableau 1.2. Spécifications du CEBTP 1980 – Classes de trafic

Trafic en nombre de passages d'un essieu standard	
Essieu équivalent de 13t	Essieu équivalent de 8,2t
$T1 < 5.10^5$	$T1 < 3.10^6$
$5.10^5 < T2 < 1,5.10^6$	$3.10^6 < T2 < 10^7$
$1,5.10^6 < T3 < 4.10^6$	$10^7 < T3 < 2,5.10^7$
$4.10^6 < T4 < 10^7$	$2,5.10^7 < T4 < 6.10^7$
$10^7 < T5 < 2.10^7$	$6.10^7 < T5 < 10^8$

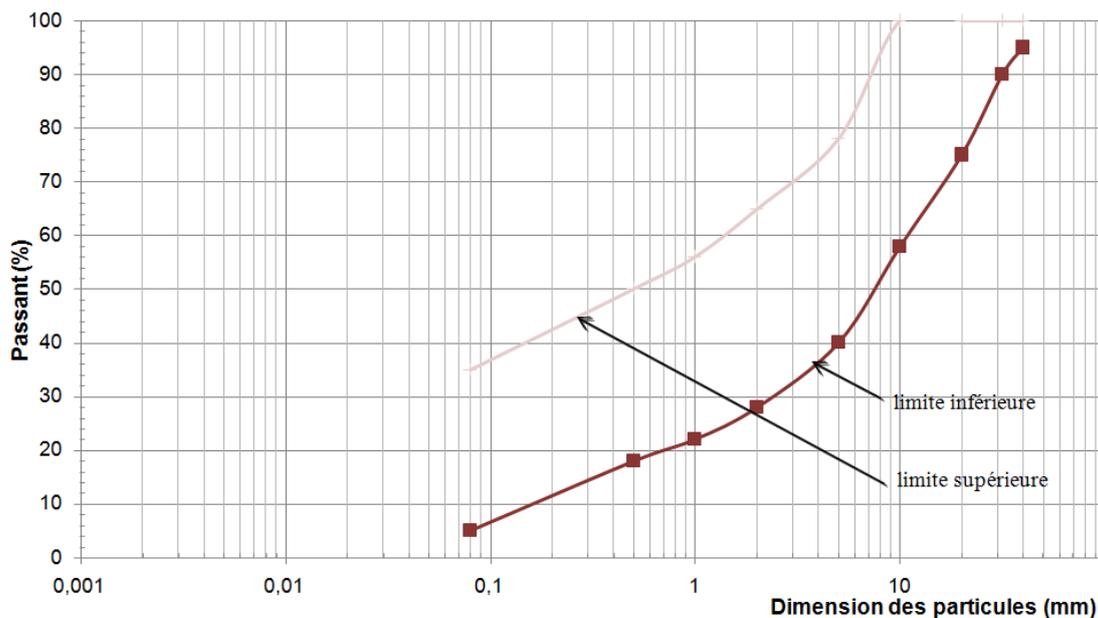
Tableau 1.3. Spécifications du CEBTP 1980 pour une utilisation

a) en couche de fondation			b) en couche de base		
Tamis	Passants après compactage in situ		Tamis	Passants après compactage in situ	
	Minimal	Maximal		Minimal	Maximal
40,0	95,0	100,0	50,0	100,0	100,0
31,5	90,0	100,0	40,0	95,0	100,0
20,0	75,0	100,0	31,5	85,0	100,0
10,0	58,0	100,0	20,0	60,0	100,0
5,0	40,0	78,0	10,0	35,0	90,0
2,0	28,0	65,0	5,0	20,0	75,0
1,0	22,0	56,0	2,0	12,0	50,0
0,5	18,0	50,0	1,0	10,0	40,0
0,08	5,0	35,0	0,5	7,0	35,0
			0,08	4,0	20,0
			$\rho_{dOPM} \geq 2 \text{ g/cm}^3$		
			Indice de plasticité $I_p \leq 15$		
			% gonflement $\leq 1\%$		

En couche de fondation, la masse volumique sèche minimale requise est de 1,8 à 2 t/m³ selon l'importance du trafic (CEBTP, 1980). Le pourcentage de fines et l'indice de plasticité (I_p) varient également selon l'importance du trafic (Tableau 1.4).

Tableau 1.4. Spécifications du CEBTP (1980) : tolérances sur le pourcentage fines et l'indice de plasticité (I_p) en fonction du trafic

	T1-T2	T3-T4	T5
Maximum de passants à 80 μm	35	30	30
Indice de plasticité (I_p) maximal	30	20	20


Figure 1.7. Représentation du fuseau granulométrique du CEBTP de 1980 pour l'utilisation des sols latéritiques en couche de fondation

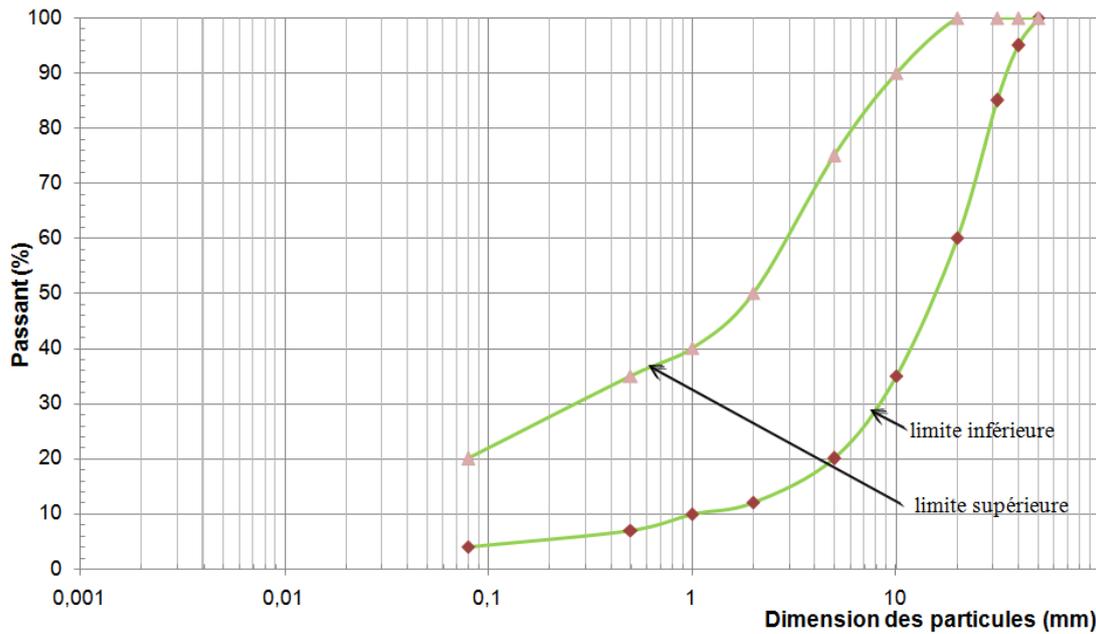


Figure 1.8. Représentation du fuseau granulométrique du CEBTP de 1980 pour l'utilisation des sols latéritiques en couche de base

1.10. Conclusions

Ce chapitre bibliographique a permis de voir la complexité de l'étude des sols latéritiques. On peut noter que les recherches sur la caractérisation de ces sols pour leur utilisation en construction routière restent très timides et que les spécifications du Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) font souvent l'objet de modifications en fonction des projets routiers. De même, la recherche de corrélations entre l'indice CBR (Californian Bearing Ratio), qui est le paramètre utilisé pour le dimensionnement des chaussées, et les paramètres d'identification plus simples (granulométrie, limites d'Atterberg,...) s'est toujours heurtée à la mauvaise connaissance de ces sols, dont les caractéristiques varient beaucoup en fonction de leur origine et de leur localisation. Les recherches consacrées aux sols latéritiques doivent toutefois être encouragées pour que les routes soient plus durables.

Chapitre 2

CONTRIBUTION À LA VALIDATION DE LA CLASSIFICATION DES SOLS LATÉRIQUES DE RODRIGUES ET AL. (2010)

2.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la validation d'une partie de la classification des sols latéritiques proposée par Rodrigues et al. (2010). Il porte sur la pertinence des coefficients de fragmentabilité (I_{FR}) et de dégradabilité (I_{DG}) comme facteurs de classification des sols latéritiques. Dans le cadre de cette étude, les couches de base de deux tronçons de routes en service au Sénégal ont été analysées, avec pour objectif de rattacher le comportement de ces couches aux caractéristiques des matériaux avant et après leur mise en œuvre.

La classification proposée par Rodrigues et al. (2010) pour les sols latéritiques est d'abord exposée, puis les résultats des essais réalisés en laboratoire sur les matériaux testés sont analysés.

2.2. La classification des sols latéritiques de Rodrigues et al. (2010)

La figure 2.1 présente la structure de la classification et les critères de classification retenus.

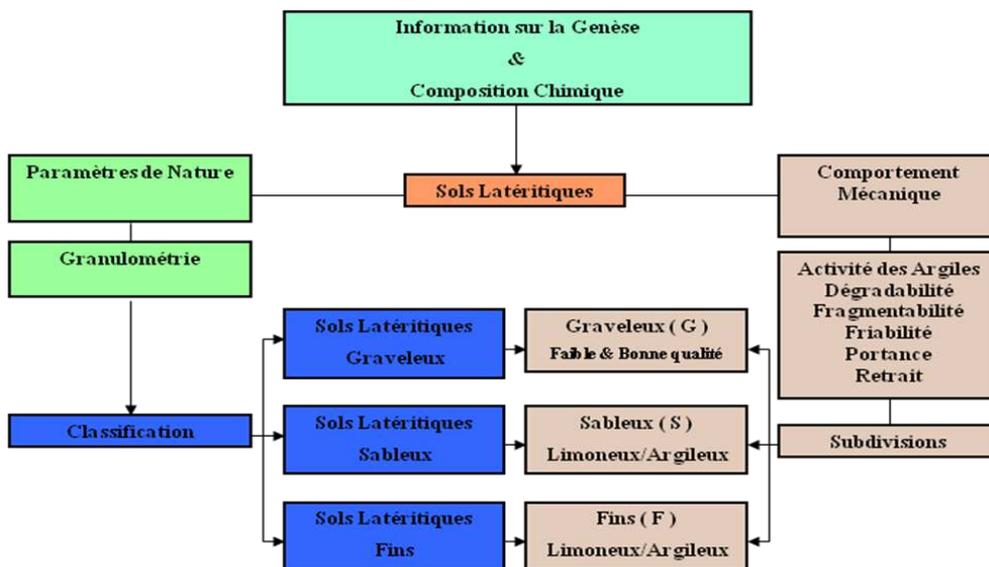


Figure 2.1. Structure de la classification des sols latéritiques (Rodrigues et al., 2010)

Une présentation plus détaillée de la classification est faite sur la figure 2.2. Une fois que les informations sur la genèse et la composition chimique ont permis de décider que le sol étudié est un sol latéritique, une première subdivision est réalisée sur une base granulométrique (passants aux tamis de 80 μm et de 2 mm). On distingue les sols latéritiques fins dont la teneur en particules fines $C_{80\mu\text{m}}$ est

supérieure à 30% et les sols latéritiques grenus ($C_{80\mu\text{m}} \leq 30\%$) qui sont divisés en sols latéritiques graveleux (plus de 70% de particules de dimensions supérieures à 2mm, $C_{2\text{mm}} \leq 30\%$) et en sols latéritiques sableux ($C_{2\text{mm}} > 30\%$).

Le classement est poursuivi de façon différente pour les trois groupes définis ci-dessus.

Pour les sols latéritiques graveleux (SLG), on se préoccupe de la résistance des particules (concrétions latéritiques) qui est caractérisée par le coefficient de fragmentabilité I_{FR} et par le coefficient de dégradabilité I_{DG} . Ces valeurs sont comparées à 7 :

- si les deux coefficients sont inférieurs à 7, on dit que les sols latéritiques graveleux sont de bonne qualité (SLGB). La valeur de l'indice CBR permet de distinguer deux sous-classes : SLGB1 si $I_{CBR} \geq 60$ et SLGB2 si $60 > I_{CBR} \geq 30$;
- si l'un ou l'autre des coefficients est supérieur à 7, on dit que les sols latéritiques graveleux sont de faible qualité (SLGF). La valeur de l'indice CBR permet de distinguer deux sous-classes : SLGF1 si $I_{CBR} \geq 30$ et SLGF2 si $30 > I_{CBR} \geq 10$;
- si les deux coefficients sont supérieurs à 7, on dit que les sols latéritiques graveleux sont de faible qualité et de sous-classe 3 (SLGF3).

Pour les sols latéritiques sableux (SLS), on se préoccupe d'abord de l'activité de la fraction fine (argileuse) en distinguant les sols latéritiques sableux limoneux (SLSL) pour lesquels la valeur de bleu V_{BS} est inférieure ou égale à 1,5 et les sols latéritiques sableux argileux (SLSA) pour lesquels la valeur de bleu V_{BS} est supérieure à 1,5.

Le coefficient de friabilité des sables I_{FS} permet de distinguer les sols latéritiques sableux limoneux très friables (SLSL5) pour lesquels $I_{FS} > 60$.

Lorsque le coefficient de friabilité des sables I_{FS} est inférieur à 60, on continue de caractériser la partie fine par la limite de retrait w_s , qui est comparée à la valeur 15 :

- si la limite de retrait est supérieure ou égale à 15, on distingue deux sous-classes d'après la valeur de l'indice CBR : SLSL1 si $I_{CBR} \geq 30$ et SLSL2 si $I_{CBR} < 30$;
- si la limite de retrait est inférieure à 15, on distingue deux sous-classes d'après la valeur de l'indice CBR : SLSL3 si $I_{CBR} \geq 30$ et SLSL4 si $I_{CBR} < 30$.

Pour les sols latéritiques fins (SLF), la valeur de bleu permet de distinguer les sols latéritiques fins limoneux (SLFL), pour lesquels $V_{BS} \leq 3$, et les sols latéritiques fins argileux (SLFA), pour lesquels $V_{BS} > 3$.

Pour les sols latéritiques fins limoneux, on continue de caractériser la partie fine par la limite de retrait w_s , qui est comparée à la valeur 20 :

- si la limite de retrait est supérieure ou égale à 20, on distingue deux sous-classes d'après la valeur de l'indice CBR : SLFL1 si $I_{CBR} \geq 10$ et SLFL2 si $I_{CBR} < 10$;
- si la limite de retrait est inférieure à 20, on distingue deux sous-classes d'après la valeur de l'indice CBR : SLFL3 si $I_{CBR} \geq 10$ et SLFL4 si $I_{CBR} < 10$.

La classification définit ensuite les domaines d'utilisation des différentes sous-classes.

L'utilisation des sols latéritiques en couche de base, pour laquelle on exige $I_{CBR} \geq 60$, est possible par les sous-classes SLGB1 sans traitement et SLGB2 avec traitement.

L'utilisation des sols latéritiques en couche de fondation, pour laquelle on exige $I_{CBR} \geq 30$, est possible pour les sous-classes :

- SLGB1, SLGB2, SLGF1 et SLSL1 sans traitement,
- SLGF2, SLGF3, SLSL2, SLSL3, SLSL4, SLSL5 et SLSA avec traitement.

L'utilisation des sols latéritiques en couche de forme, pour laquelle on exige $I_{CBR} \geq 10$, est possible pour les sous-classes :

- SLGB1, SLGB2, SLGF1, SLGF2, SLGF3, SLSL1, SLSL2 et SLFL1 sans traitement,
- SLSL3, SLSL4, SLSL5, SLSA, SLFL2, SLFL3, SLFL4 et SLFA avec traitement.

Les paramètres utilisés pour la classification sont définis de façon classique en mécanique des sols :

- la valeur de bleu de méthylène (V_{BS}) caractérise l'argilosité. Elle représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules du sol, qui est directement liée à la surface spécifique du sol. La valeur de bleu de méthylène (V_{BS}) est déterminée à partir de l'essai à la tache sur la fraction 0/5 mm. Pour les applications routières, la valeur trouvée est rapportée à la fraction 0/50 par une règle de proportionnalité. C'est cette dernière valeur qui est appelée valeur de bleu de méthylène du sol. La valeur du bleu (V_{BS}) s'exprime en grammes (de bleu) pour 100 g de sol ;
- la limite de retrait (w_s) est la teneur en eau pondérale conventionnelle de dessiccation d'un échantillon de sol remanié en-dessous de laquelle le volume de l'échantillon ne varie plus. L'essai est réalisé sur le tamisât au tamis de 400 μm . Il peut être réalisé de deux façons :
 - o en mesurant la variation de volume au cours du séchage à l'étuve. La limite de retrait est la teneur en eau à partir de laquelle on n'observe plus de variation de volume ;

- en mesurant la déformation axiale et la teneur en eau d'une éprouvette de matériau à différents stades de sa dessiccation sous atmosphère. La limite de retrait correspond à la fin des déformations axiales ;
- le coefficient de dégradabilité (I_{DG}) est un paramètre représentatif du comportement de certains matériaux rocheux, dont les caractéristiques géotechniques (granularité, argilosité, plasticité...) évoluent par rapport à celles observées immédiatement après leur extraction. Cette évolution est imputable à l'action combinée des agents climatiques ou hydrogéologiques (cycles de gel et dégel, cycles d'imbibition et séchage) et des contraintes mécaniques subies. Elle conduit dans le cas des matériaux rocheux considérés comme dégradables à une réduction plus ou moins importante et ininterrompue des caractéristiques mécaniques et géométriques des ouvrages dans lesquels ils sont utilisés. L'essai consiste à déterminer la réduction des dimensions des particules de la fraction 10/20 d'un matériau soumis à quatre cycles d'imbibition-séchage conventionnels. La prise d'essai est de 2 kg de la fraction 10/20 du matériau. La réduction s'exprime par le rapport :

$$I_{DG} = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant le premier cycle}}{D_{10} \text{ du matériau après le quatrième cycle}}$$

- le coefficient de fragmentabilité (I_{FR}) est un des paramètres représentatifs du comportement de certains matériaux rocheux, dont la granularité évolue continûment depuis leur extraction jusqu'au terme de leur mise en œuvre et qui, pour quelques-uns d'entre eux, se poursuit encore durant la vie des ouvrages. Cette évolution est imputable à une résistance structurelle de la roche insuffisante vis-à-vis des sollicitations mécaniques appliquées lors de la mise en œuvre et dans l'ouvrage en service. L'essai consiste à déterminer la réduction des dimensions des particules de la fraction 10/20 d'un matériau soumis à un pilonnage conventionnel (100 coups de dame Proctor normal) dans un moule CBR. La prise d'essai est de 2 kg de la fraction 10/20 du matériau. La réduction s'exprime par le rapport :

$$I_{FR} = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant pilonnage}}{D_{10} \text{ du matériau après pilonnage}}$$

- le coefficient de friabilité des sables (I_{FS}) est un des paramètres représentatifs de la résistance à la fragmentation des sables. L'essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique des sables produite par fragmentation dans un cylindre en rotation à l'aide d'une charge en présence d'eau ;

SOLS LATÉRIQUES [SL] [Composition Chimique et Génèse]															
Passant tamis 80 µm ≤ 30%										Passant tamis 80 µm > 30%					
Passant tamis 2 mm ≤ 30%					Passant tamis 2 mm > 30%										
Sols Latéritiques Graveleux [SLG]					Sols Latéritiques Sableux [SLS]					Sols Latéritiques Fins [SLF]					
$I_{FR} \leq 7$ & $I_{DG} \leq 7$		$I_{FR} > 7$ ou $I_{DG} > 7$			$I_{FR} > 7$ & $I_{DG} > 7$	$V_{BS} \leq 1,5$				$V_{BS} > 1,5$	$V_{BS} \leq 3$				$V_{BS} > 3$
						$I_{FS} \leq 60$					$w_s \geq 20\%$		$w_s < 20\%$		
$I_{CBR} \geq 60\%$	$30\% \leq I_{CBR} < 60\%$	$I_{CBR} \geq 30\%$	$10\% \leq I_{CBR} < 30\%$	$w_s \geq 15\%$		$w_s < 15\%$		$I_{FS} > 60$	$I_{CBR} \geq 10\%$		$I_{CBR} < 10\%$	$I_{CBR} \geq 10\%$	$I_{CBR} < 10\%$		
SLGB1	SLGB2	SLGF1	SLGF2	SLGF3	SLSL1	SLSL2	SLSL3	SLSL4	SLSL5	SLSA	SLFL1	SLFL2	SLFL3	SLFL4	SLFA
COUCHE DE BASE [$I_{CBR} \geq 60\%$]															
Sans traitement	Avec traitement														
COUCHE DE FONDATION [$I_{CBR} \geq 30\%$]															
Sans Traitement		Avec traitement		Sans traitement	Avec traitement										
COUCHE DE FORME [$I_{CBR} \geq 10\%$]															
Sans traitement				Sans traitement		Avec traitement				Sans traitement	Avec traitement				
Observations:															
Trafic faible ($N < 10^6$)															
Charge à l'essieu < 13 tonnes															
F = Faible qualité; B = Bonne qualité; L = Limoneux; A = Argileux.															
I_{FR} = Coefficient de fragmentabilité; I_{DG} = Coefficient de dégradabilité; I_{FS} = Coefficient de friabilité des sables; w_s = Limite de retrait; V_{BS} = Valeur de bleu de méthylène.															

Figure 2.2. Classification des sols latéritiques pour une utilisation en couche de chaussée de faibles coûts dans les pays à climat tropical et subtropical (Rodrigues et al., 2010)

- l'indice CBR est déduit d'un essai qui consiste à mesurer la force appliquée sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs des forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportées aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements.

2.3. Étude de tronçons routiers en service

Cette étude a pour objectif de déterminer sur des sections de route en exploitation si les coefficients de fragmentabilité (I_{FR}) et de dégradabilité (I_{DG}) permettent de caractériser l'évolution observée de la granularité de matériaux graveleux latéritiques lors de leur mise en œuvre en couche de base. Il s'agit de travailler sur des chaussées souples dimensionnées avec un trafic faible et ayant moins de 15 ans de durée de vie.

La méthode d'étude comporte deux étapes :

- recueil de données géotechniques sur les matériaux (latérite crue) mis en œuvre en couche de base sur ces chaussées et,
- détermination des caractéristiques des matériaux après la mise en service.

2.3.1. Caractéristiques des matériaux mis en œuvre en couche de base

Les matériaux mis en œuvre en couche de base sur les tronçons retenus, dimensionnés avec un trafic faible ($N < 5.10^5$), proviennent de la carrière de Lam-Lam (Tableau 2.1 et figure 2.3).

Tableau 2.1. Présentation des tronçons étudiés

Tronçons	Nature de la structure	Âge	État	Carrière utilisée
Mboro - Diogo	Souple	1 - 2 ans	Bon	Lam-Lam (en couche de base)
Darou Marnane – Mbacké Cadior	Souple	7 - 8 ans	Moyen	Lam-Lam (en couche de base)

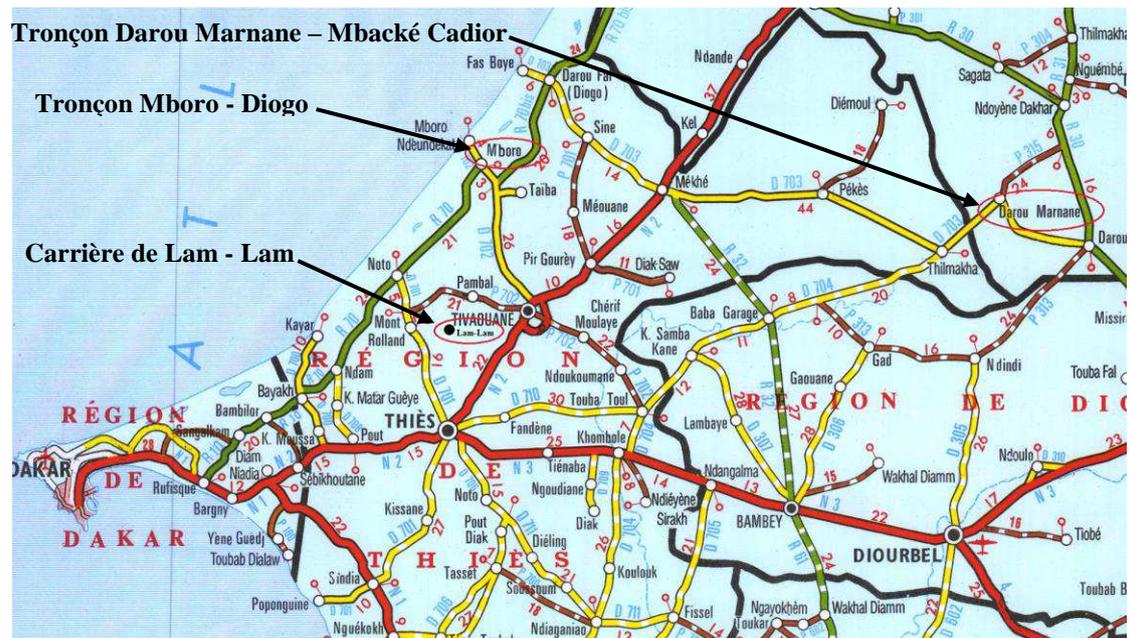


Figure 2.3. Localisation de la carrière de Lam-Lam et des tronçons de route Mboro-Diogo et Darou Marnane-Mbacké Cadior

Les caractéristiques géotechniques des matériaux avant leur mise en œuvre sont présentées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2. Caractéristiques géotechniques des matériaux mis en œuvre en couche de base (latérite de Lam – Lam)

Tronçons	Analyse granulométrique (%)			Limites d'Atterberg			Proctor modifié		I _{CBR} à 95% OPM
	0,075mm	0,08mm	10mm	w _L	w _P	I _P	w _{OPM} (%)	ρ _{dOPM} (g/cm ³)	
Mboro - Diogo	-	14,5	61,8	44,5	23,6	20,9	12,3	2,03	76
Darou Marnane - Mbacké Cadior	12,2	-	49,9	35,9	18,2	17,7	8,8	2,21	72

2.3.2. Caractéristiques des matériaux testés

Les couches de base des tronçons Mboro-Diogo et Darou Marnane-Mbacké Cadior ont été l'objet de prélèvements (Figures 2.4 et 2.5). Les chaussées sont globalement en bon état, bien que des phénomènes de peignage aient été notés sur le revêtement (en enrobé dense) du tronçon Darou Marnane – Mbacké Cadior.

Les caractéristiques géotechniques des matériaux prélevés dans les couches de base de ces deux tronçons, de 15 cm d'épaisseur chacune, sont présentées dans le tableau 2.3.



Figure 2.4. Prélèvement sur le tronçon Mboro – Diogo



Figure 2.5. Prélèvement sur le tronçon Darou Marnane – Mbacké Cadior

Tableau 2.3. Caractéristiques géotechniques des matériaux prélevés dans les couches de base

Tronçons	Analyse granulométrique (%)			Limites d'Atterberg			V_{BS}	Proctor modifié		I_{CBR} à 95% OPM
	0,08mm	10mm	20mm	w_L	w_P	I_P		w_{OPM} (%)	ρ_{dOPM} (g/cm ³)	
Mboro - Diogo	14,8	72	93,5	37,7	19,1	18,6	0,38	9,4	2,10	75
Darou Marnane – Mbacké Cadior	10,4	58,1	84,2	39,7	20,6	19,2	0,31	11,9	2,07	70

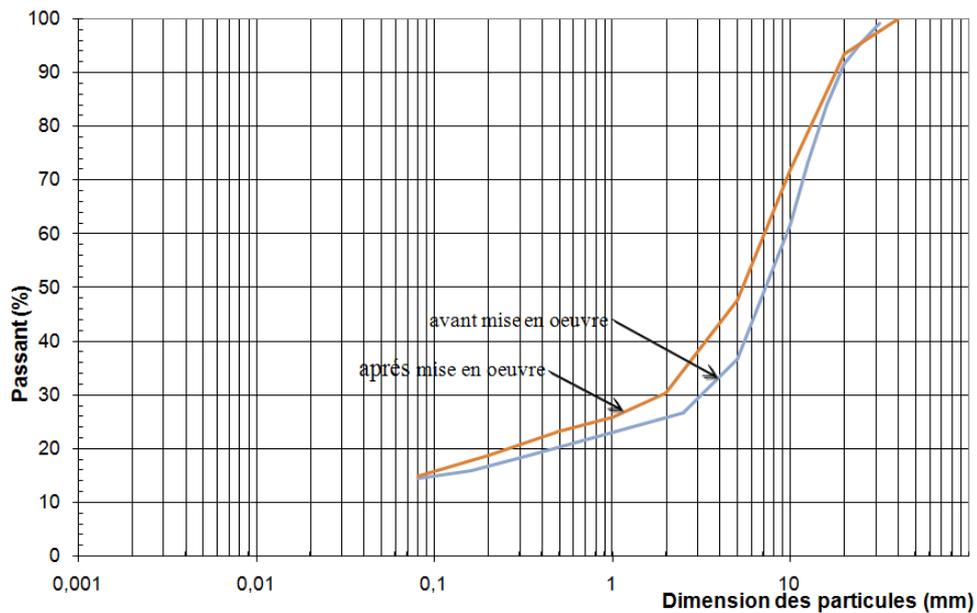
À la suite des prélèvements, les teneurs en eau des matériaux prélevés ont été déterminées. Elles valent respectivement 6,7 % pour le tronçon Mboro-Diogo et 5,7 % pour le tronçon Darou Marnane-Mbacké Cadior. Ces teneurs en eau sont inférieures à celles de l'optimum Proctor (cas très fréquents en Afrique sub-saharienne).

Les valeurs de l'indice de plasticité (I_P) et de l'indice CBR (I_{CBR}) semblent avoir légèrement évolué au cours du temps (Tableau 2.4).

Tableau 2.4. Évolution des caractéristiques de consistance et de compactage au cours du temps

Tronçons	Matériau	Limites d'Atterberg			Proctor modifié		I _{CBR} à 95% OPM
		w _L	w _P	I _P	w _{OPM} (%)	ρ _{dOPM} (g/cm ³)	
Mboro - Diogo	mis en œuvre	44,5	23,6	20,9	12,3	2,0	76
	prélevé	37,7	19,1	18,6	9,4	2,1	75
Darou Marnane - Mbacké Cadior	mis en œuvre	35,9	18,2	17,7	8,8	2,2	72
	prélevé	39,7	20,6	19,1	11,9	2,1	70

Malgré l'absence de résultats d'analyse granulométrique après compactage in situ lors de la construction des chaussées et de données de trafic, la comparaison des courbes granulométrique initiale avant travaux et actuelle montre une évolution des matériaux mis en œuvre en couche de base sur le tronçon Mboro-Diogo et sur le tronçon Darou Marnane-Mbacké Cadior, qui ont respectivement de 1 à 2 ans d'âge et de 7 à 8 ans d'âge (Figures 2.6 et 2.7).


Figure 2.6. Comparaison des courbes granulométriques avant construction et après mise en service du tronçon Mboro – Diogo

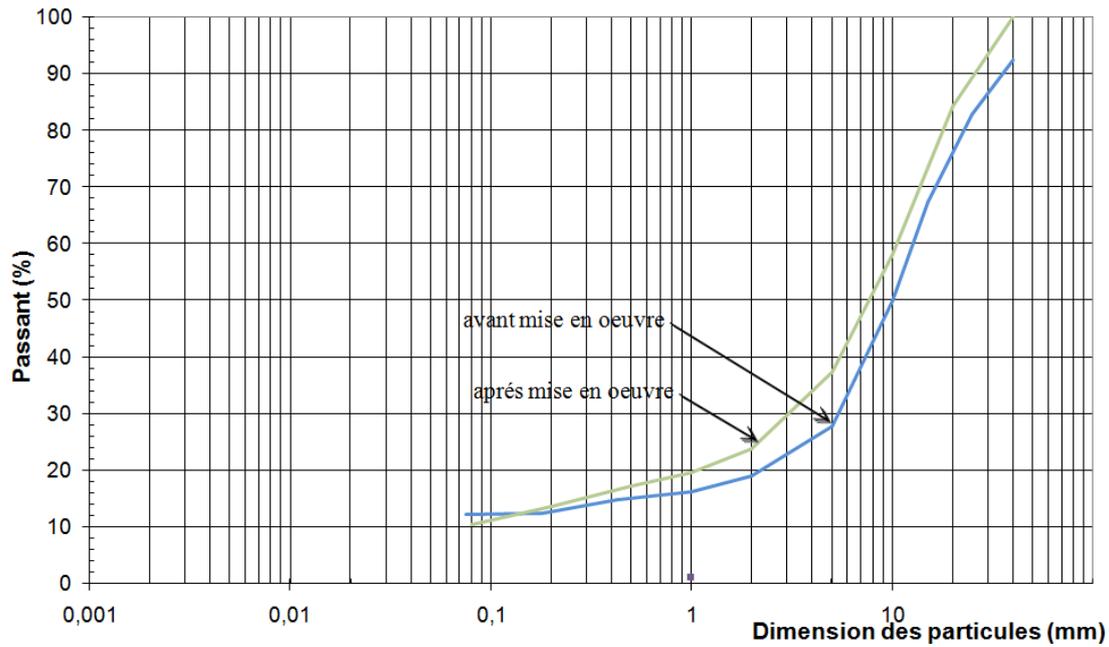


Figure 2.7. Comparaison des courbes granulométriques avant construction et après mise en service du tronçon Darou Marnane-Mbacké Cadior

2.3.3. Étude de la durabilité des matériaux prélevés

Les essais de fragmentabilité et de dégradabilité ont été effectués sur les fractions 10/20 mm des prélèvements issus des couches de base des deux tronçons (Figures 2.8 et 2.9 et tableau 2.5).



Figure 2.8. Étude de la durabilité de la fraction 10/20 mm de la latérite de Lam-Lam : essai de fragmentabilité



Figure 2.9. Étude de la durabilité de la fraction 10/20 mm de la latérite de Lam-Lam : essai de dégradabilité

Les résultats obtenus montrent que les matériaux prélevés ont les mêmes valeurs des coefficients de fragmentabilité (I_{FR}) et de dégradabilité (I_{DG}).

Tableau 2.5. Résultats des essais de fragmentabilité et de dégradabilité

Tronçons	Coefficient de fragmentabilité (I_{FR})	Coefficient de dégradabilité (I_{DG})
Mboro - Diogo	1,7	1,0
Darou Marnane - Mbacké Cadior	1,7	1,0

Il semble que la fraction 10/20 mm de la latérite de Lam-Lam soit insensible aux cycles d'imbibition – séchage auxquels elle est soumise au cours de l'essai de dégradabilité. On peut en déduire que le coefficient de dégradabilité (I_{DG}) ne constitue pas un bon facteur de classification pour distinguer le comportement des sols latéritiques.

D'autre part, les valeurs des coefficients de fragmentabilité (I_{FR}) obtenues sur les prélèvements issus des couches de base des deux tronçons de route, qui présentent un bon comportement dans le temps, sont toutes proches de 2.

Pour tenir compte de ces résultats et du bon comportement au cours du temps des couches de base sondées, nous pensons souhaitable de modifier la définition de la classe des sols latéritiques graveleux (SLG), avec un nombre de chargement N de 5.10^5 (Figure 2.10). Il s'agit de remplacer la valeur limite du coefficient de fragmentabilité fixée à 7 par la valeur 2 et de supprimer le coefficient de dégradabilité.

Cependant, ce premier travail n'a pas porté sur le calage des valeurs seuils des passants au tamis $80\mu\text{m}$ et 2mm. Les valeurs retenues sont celles initialement proposées dans la classification.

SOLS LATÉRITIQUES [SL] [Composition Chimique et Genèse]														
Passant tamis 80 μm \leq 30%										Passant tamis 80 μm $>$ 30%				
Passant tamis 2 mm \leq 30%					Passant tamis 2 mm $>$ 30%									
Sols Latéritiques Graveleux [SLG]					Sols Latéritiques Sableux [SLS]					Sols Latéritiques Fins [SLF]				
$I_{FR} \leq 2$		$I_{FR} > 2$			$V_{BS} \leq 1,5$				$V_{BS} > 1,5$	$V_{BS} \leq 3$				$V_{BS} > 3$
					$I_{FS} \leq 60$					$w_s \geq 20\%$		$w_s < 20\%$		
$I_{CBR} \geq 60\%$	$30\% \leq I_{CBR} < 60\%$	$I_{CBR} \geq 30\%$	$10\% \leq I_{CBR} < 30\%$		$w_s \geq 15\%$		$w_s < 15\%$		$I_{FS} > 60$	$I_{CBR} \geq 10\%$	$I_{CBR} < 10\%$	$I_{CBR} \geq 10\%$	$I_{CBR} < 10\%$	
					$I_{CBR} \geq 30\%$	$I_{CBR} < 30\%$	$I_{CBR} \geq 30\%$	$I_{CBR} < 30\%$						
SLGB1	SLGB2	SLGF1	SLGF2	SLSL1	SLSL2	SLSL3	SLSL4	SLSL5	SLSA	SLFL1	SLFL2	SLFL3	SLFL4	SLFA
COUCHE DE BASE [$I_{CBR} \geq 60\%$]														
Sans traitement	Avec traitement													
COUCHE DE FONDATION [$I_{CBR} \geq 30\%$]														
Sans Traitement		Avec traitement	Sans traitement	Avec traitement										
COUCHE DE FORME [$I_{CBR} \geq 10\%$]														
Sans traitement			Sans traitement		Avec traitement				Sans traitement	Avec traitement				
Observations: Trafic faible ($N < 5.10^5$) Charge à l'essieu $<$ 13 tonnes F = Faible qualité; B = Bonne qualité; L = Limoneux; A = Argileux. I_{FR} = Coefficient de fragmentabilité; I_{DG} = Coefficient de dégradabilité; I_{FS} = Coefficient de friabilité des sables; w_s = Limite de retrait; V_{BS} = Valeur de bleu de méthylène.														

Figure 2.10. Classification des sols latéritiques modifiée pour trafic faible ($N < 5.10^5$)

2.4. Commentaires généraux sur la classification proposée par Rodrigues et al. (2010)

La relation entre les classes de sols définies dans la classification et le comportement des couches de chaussées en sols latéritiques est encore hypothétique et doit être confirmée par des observations sur des routes dimensionnées pour des trafics contrôlés pendant la période de durée de vie attendue. Ce travail ne peut être réalisé que par les administrations ou agences responsables des routes dans les pays où l'on utilise des sols latéritiques. Sans ces vérifications, la classification ne peut être utilisée à la place des règles actuelles.

Quelques remarques peuvent être faites sur les différences entre cette classification et les règles en vigueur depuis 1972 : tout d'abord, les valeurs seuils des passants au tamis de 80 μ m et 2mm définies par les spécifications de 1972 et 1984 sont différentes de celles proposées dans la classification (tableau 2.6).

Tableau 2.6. Comparaison des valeurs seuils des passants aux tamis de 80 μ m et 2mm

% Passants aux tamis	Classification de Rodrigues et al.		Spécifications CEBTP 1972		Spécifications CEBTP 1984 (*)	
	Couches de fondation	Couches de base	Couches de fondation	Couches de base	Couches de fondation	Couches de base
80 μ m	$\leq 30\%$	$\leq 30\%$	entre 5% et 35%	entre 5% et 20%	entre 5% et 35%	entre 4% et 20%
2mm	-	$\leq 30\%$	entre 24% et 74%	entre 27% et 74%	entre 28% et 65%	entre 12% et 50%

(*) : valeurs après compactage in situ

Ensuite, il pourrait être intéressant de réfléchir à l'utilisation de l'indice de plasticité (I_P) pour distinguer le comportement des matériaux, notamment pour ceux destinés à une couche de base, comme c'est fait dans les spécifications de 1972 et 1984.

Enfin, l'utilisation de la valeur de bleu de méthylène (V_{BS}), du coefficient de friabilité des sables (I_{FS}) et de la limite de retrait (w_S) pour distinguer le comportement des sols latéritiques devrait être validée par des expérimentations sur chantier. La prise en compte de ces paramètres devrait permettre de mieux comprendre le comportement de ces matériaux.

2.5. Conclusions

L'élaboration d'une classification des sols latéritiques pour trafic faible est un projet ambitieux. Une telle classification n'est pas nécessairement utile dans des pays comme le Sénégal où la plupart des routes sont dimensionnées avec un trafic lourd, mais elle peut être utile pour les routes à trafic faible.

Ces premiers travaux constituent une contribution à la validation de la classification des sols latéritiques développée par Rodrigues et al. (2010). Les études effectuées sur les couches de base de deux tronçons routiers au Sénégal montrent que le coefficient de dégradabilité (I_{DG}) ne constitue pas un bon paramètre pour distinguer le comportement des sols latéritiques. Compte tenu du bon

comportement au cours du temps des couches de base étudiées, une valeur de 2 est proposée comme valeur seuil du coefficient de fragmentabilité (I_{FR}) mais elle nécessitera des études complémentaires sur d'autres cas.

Ces études, effectuées sur des tronçons de route globalement en bon état, devraient être complétées par d'autres études portant sur des chaussées souples en moyen et mauvais états. Des études similaires devraient aussi être effectuées sur des tronçons considérés comme expérimentaux, pour lesquels on pourrait assurer un bon suivi dans le temps et disposer d'un grand nombre de données.

Chapitre 3

ÉVOLUTION SOUS COMPACTAGE CBR DE LA GRANULOMÉTRIE DE LATÉRITES DU SÉNÉGAL ET DU BRÉSIL

3.1. Introduction

La granulométrie des sols latéritiques évolue dans les corps de chaussée, à la mise en œuvre et sous l'effet du trafic. Mais, malgré de nombreuses recherches, cette évolution reste mal connue, notamment la transformation de leur fraction grossière. Comme indiqué dans le chapitre 1, pour Lyon Associates (1971) la résistance des sols latéritiques varie surtout en fonction de leur texture mais Bagarre (1990) note que la dureté des nodules des sols latéritiques reste un paramètre mal précisé. Pour se rapprocher du traitement subi par l'échantillon en place, quelques chercheurs ont essayé de déterminer l'indice de dureté des concrétions latéritiques à partir de l'essai de compactage en laboratoire (Tockol, 1993). Novais-Ferreira et Correira (1965) ont défini cet indice I_{HC} comme le rapport des modules granulométriques avant et après compactage. Pour leur part, Rodrigues et al. (2010) ont proposé de prendre en compte le coefficient de fragmentabilité pour évaluer la dureté des concrétions latéritiques. Cependant, l'essai le plus répandu pour apprécier la résistance des concrétions latéritiques reste l'essai CBR (Rémillon, 1967 ; Ackroyd, 1969 ; Meireles, 1967, cités par Lyon Associates, 1971).

Ce chapitre présente l'étude de l'évolution des dimensions des particules des sols latéritiques lors du compactage, réalisée sur des latérites du Sénégal et du Brésil.

3.2. Évolution de la granulométrie des latérites sous compactage CBR

Les latérites étudiées proviennent du Sénégal (carrières de Sindia et de Lam-Lam) et du Brésil (carrières de l'aéroport de Natal et de Picos, situées respectivement dans les États de Rio Grande Do Norte et de Piauí).

3.2.1. Latérites des carrières de Sindia et de Lam-Lam (Sénégal)

Les latérites étudiées ont été prélevées dans les carrières de Lam-Lam et de Sindia, dont les coordonnées approximatives sont respectivement (14°54'N et 16°53'W) et (14°35'01''N et 17°02'08''W) dans l'ouest du Sénégal (Figure 3.1).

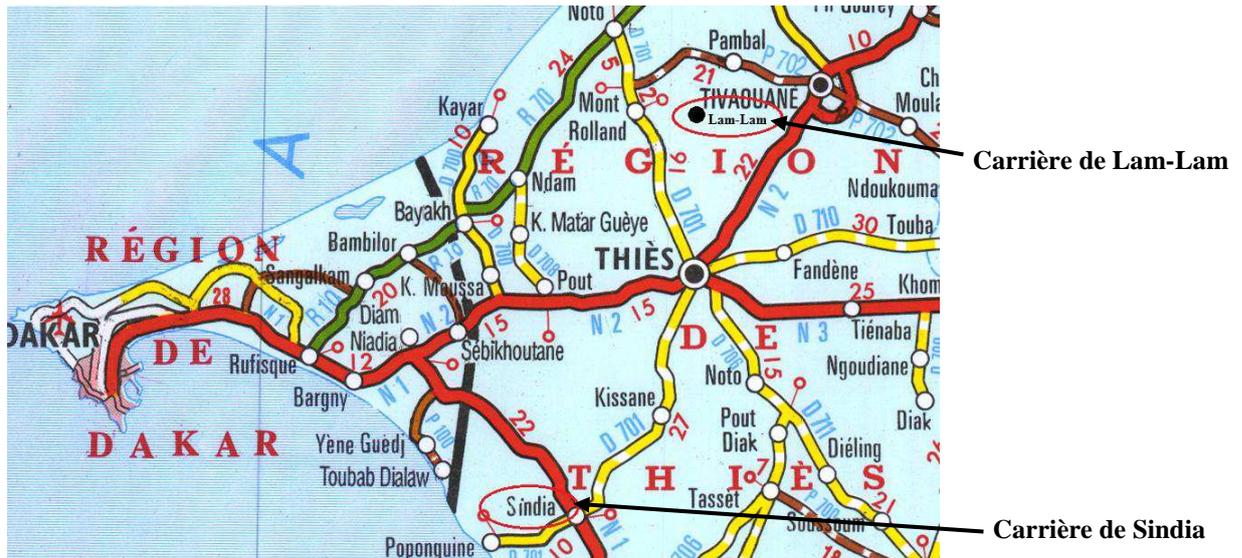


Figure 3.1. Localisation des carrières de Sindia et de Lam-Lam au Sénégal

3.2.1.1. Caractéristiques géotechniques des latérites prélevées

Les essais ont été réalisés sur quatorze prélèvements dans la carrière de Sindia (Figure 3.2) et sur dix prélèvements dans la carrière de Lam-Lam.



Figure 3.2. Prélèvement sur la carrière de Sindia

Les courbes granulométriques des différents prélèvements de Sindia et de Lam-Lam sont représentées sur les figures 3.3 à 3.6.

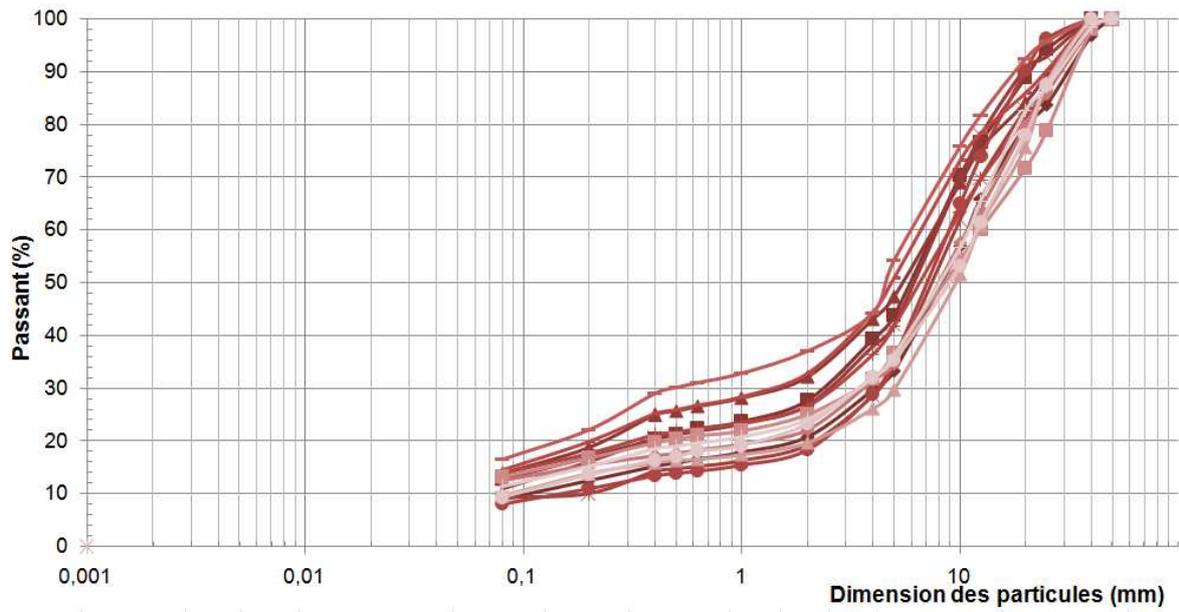


Figure 3.3. Courbes granulométriques des prélèvements de la carrière de Sindia

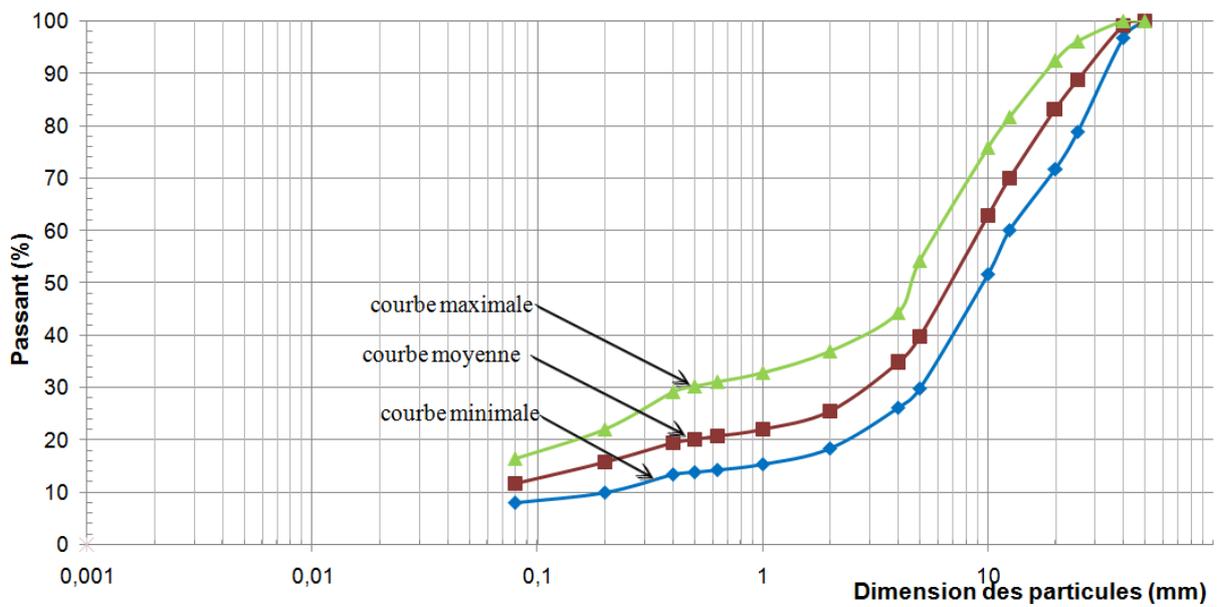


Figure 3.4. Fuseaux granulométriques des échantillons de Sindia

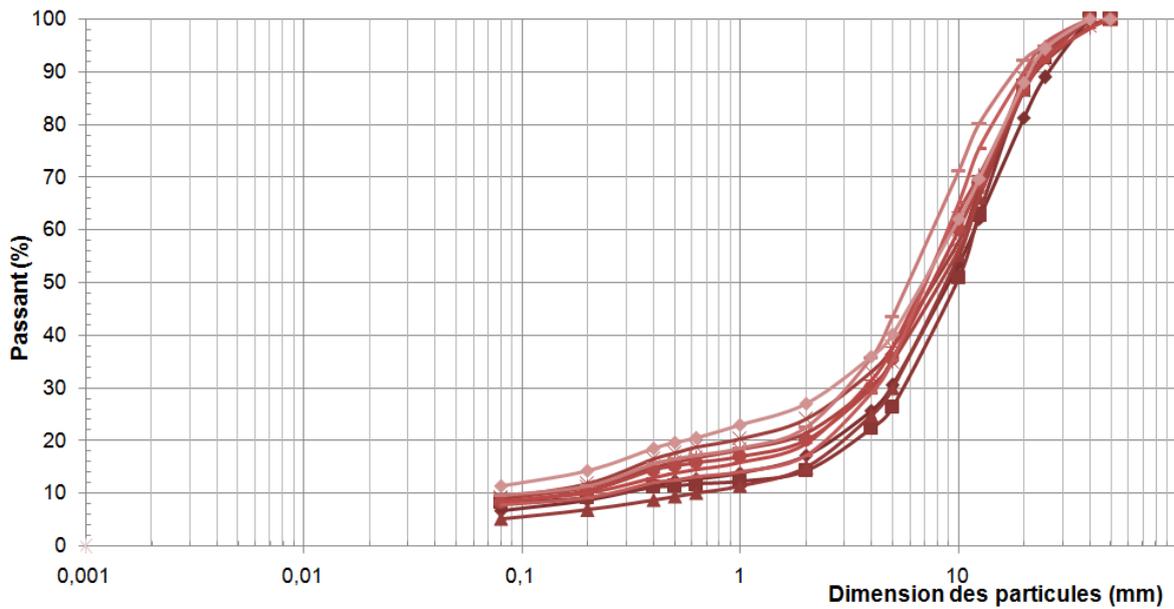


Figure 3.5. Courbes granulométriques des prélèvements de la carrière de Lam-Lam

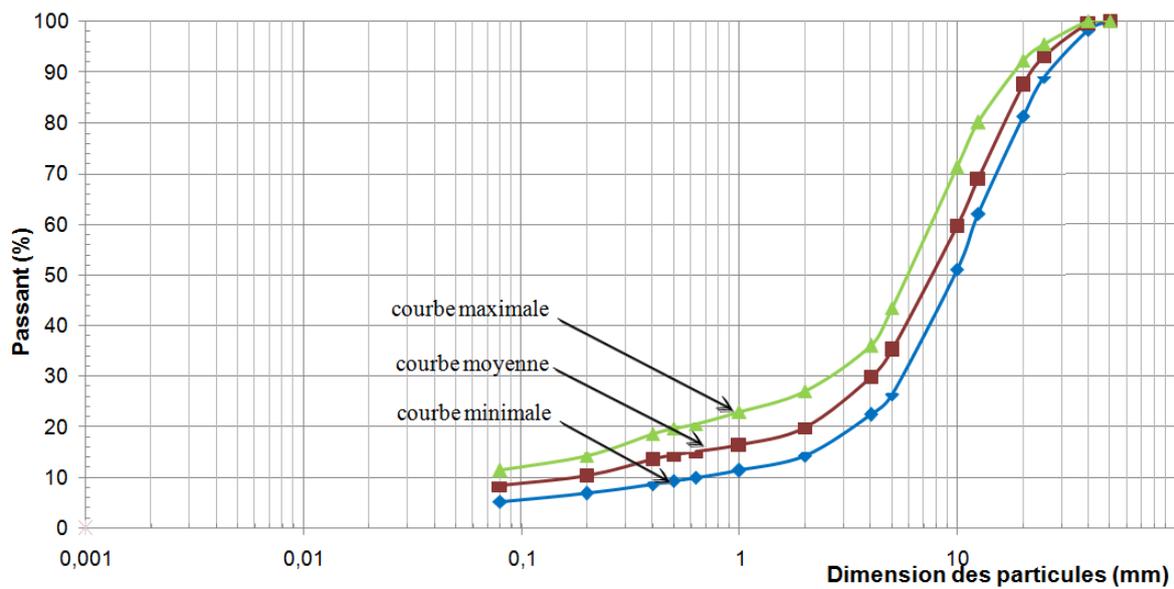


Figure 3.6. Fuseaux granulométriques des échantillons de Lam-Lam

De même, les essais de limites d'Atterberg révèlent que les latérites prélevées se situent en général dans le diagramme de Casagrande dans le domaine des moyennes plasticités (Figures 3.7 et 3.8).

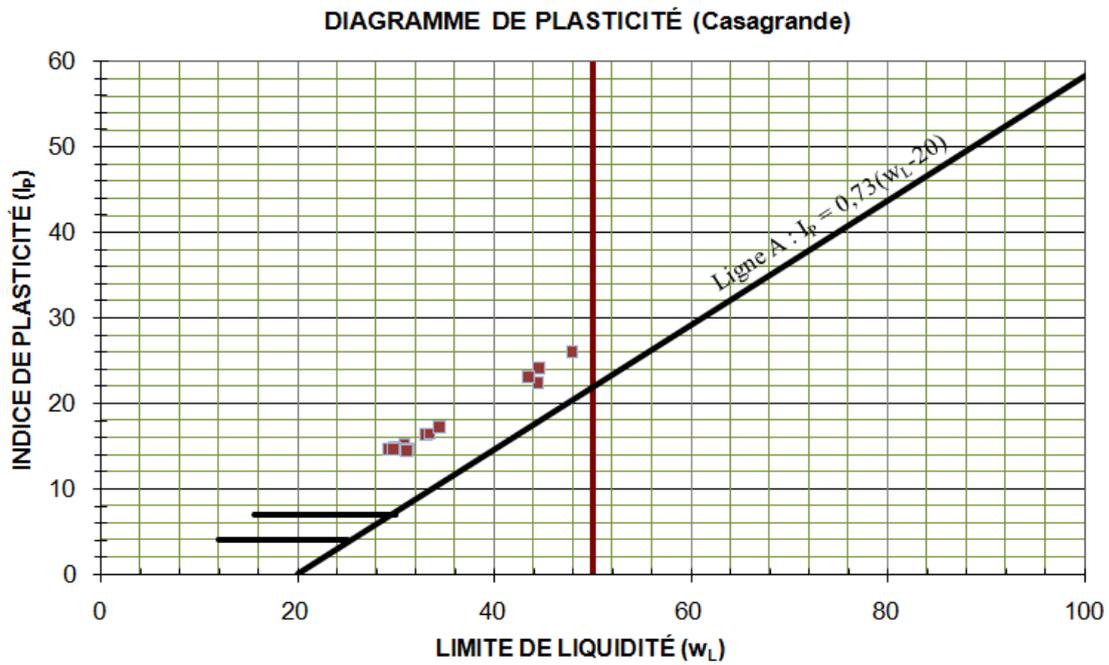


Figure 3.7. Position des latérites de Sindia dans le diagramme de plasticité de Casagrande

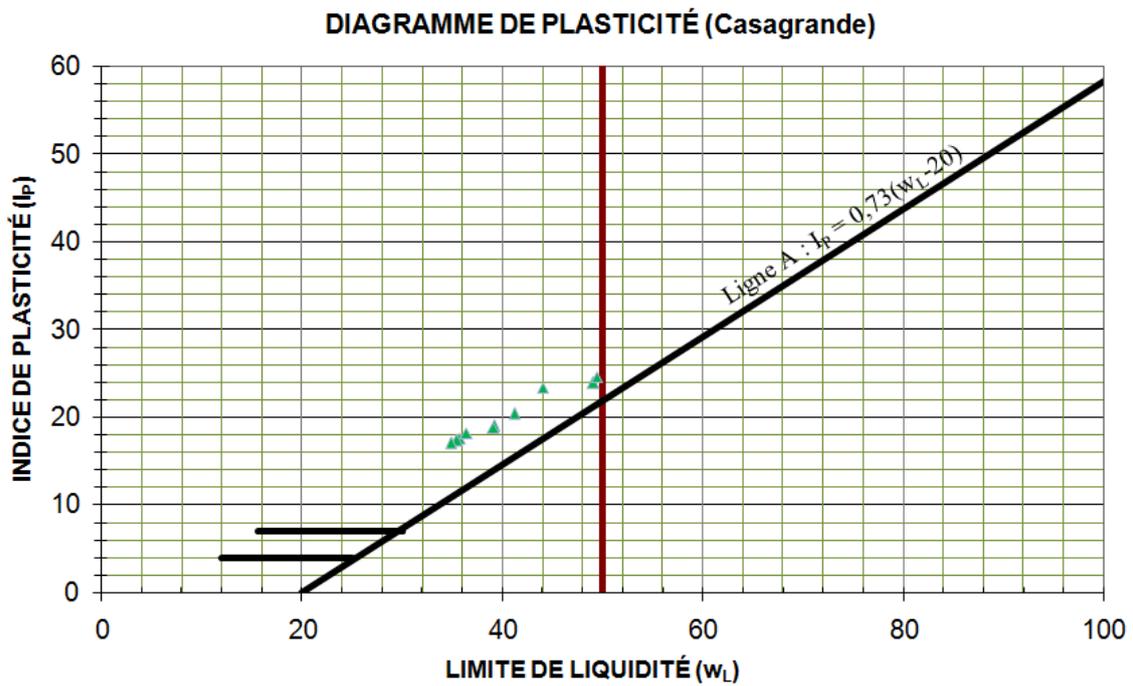


Figure 3.8. Position des latérites de Lam-Lam dans le diagramme de plasticité de Casagrande

Les latérites en provenance de la carrière de Sindia ($I_{p\text{moy}}=17,6$) sont en moyenne moins plastiques que celles issues de Lam-Lam ($I_{p\text{moy}}= 20,1$). Par ailleurs, elles dépassent toutes la valeur seuil de 15 recommandée par les spécifications du CEBTP pour une utilisation en couche de base (Tableau 3.1).

Tableau 3.1. Comparaison des indices de plasticité et de CBR avec les valeurs seuils des spécifications du CEBTP (1972)

Carrières et spécifications CEBTP	Indice de plasticité (I_p)	I_{CBR} à 95% OPM
Sindia	17,6	60,71
Lam-Lam	20,1	51,00
Couche de fondation	< 25	> 30
Couche de base	< 15	> 60

L'indice CBR de la latérite de Sindia dépasse légèrement la valeur limite de 60 pour son utilisation en couche de base à trafic faible ($N < 5.10^5$). Par ailleurs, l'indice CBR de la latérite de Sindia est supérieur à la valeur limite de 30 imposée pour l'utilisation en couche de fondation à trafic faible.

Les essais de dureté ont été réalisés sur la fraction 10/14mm des matériaux pour les essais Los Angeles (LA) et Micro Deval (MDE) et sur la fraction 10/20mm pour les essais de dégradabilité (DG) et de fragmentabilité (FR).

Les résultats des essais de dégradabilité montrent que les latérites prélevées sont peu dégradables (Tableau 3.2). Mais le coefficient de dégradabilité (I_{DG}) ne permet pas de distinguer le comportement des sols latéritiques étudiés.

Par contre, les essais de résistance comme l'essai Los Angeles (LA) et l'essai de fragmentabilité (FR) montrent que les concrétions de la latérite de Lam-Lam sont plus résistantes ($C_{LA moy} = 45,5$; $I_{FR moy} = 3,6$) que celles de la latérite de Sindia ($C_{LA moy} = 56,8$; $I_{FR moy} = 6,7$). Ces observations sont confirmées par les résultats des essais Micro Deval (MDE). De même, les latérites de Sindia sont plus fragmentables ($I_{FR moy} = 6,7$) et présentent un indice CBR moyen ($I_{CBR moy} = 60,7$) supérieur aux valeurs des latérites de Lam-Lam ($I_{FR moy} = 3,6$ et $I_{CBR moy} = 51$).

Tableau 3.2. Résultats des essais de dureté des nodules

Carrières	Coefficient de dégradabilité (I_{DG})	Coefficient de fragmentabilité (I_{FR})	Los Angeles (C_{LA})	Micro Deval (C_{MDE})
Sindia	1,09	6,71	56,78	67,82
Lam-Lam	1,10	3,57	45,52	66,72

Enfin, compte tenu de la valeur seuil 2 retenue pour le coefficient de fragmentabilité (I_{FR}) au chapitre précédent, ces sols seront considérés comme évolutifs et seront classés dans la classe des sols latéritiques graveleux (SLG).

3.2.1.2. Évolution de la granulométrie des latérites de Sindia et de Lam-Lam sous compactage CBR

Pour suivre l'évolution de la granularité, des analyses granulométriques ont été effectuées sur l'ensemble des prélèvements en provenance de Sindia et de Lam-Lam, avant et après compactage CBR. L'analyse des variations des fractions granulaires entre 0 et 20 mm avant et après compactage CBR montre :

- pour la latérite de Sindia : une forte transformation des particules de taille supérieure à 5 mm pour un compactage à 10, 25 coups et 55 coups (Tableau 3.3 et figure 3.8) et ;
- pour la latérite de Lam-Lam : une forte transformation des particules de taille supérieure à 10 mm pour un compactage à 10 et 25 coups et une transformation des particules de taille supérieure à 5mm pour un compactage à 55 coups (Tableau 3.4 et figure 3.9).

Ces transformations s'accompagnent d'une augmentation des particules de taille inférieure.

Par ailleurs, ces données montrent que la réduction des dimensions des particules augmente avec l'énergie de compactage appliquée (10 coups, 25 coups, 55 coups).

Tableau 3.3. Évolution moyenne des fractions granulaires 0/20 mm de la latérite de Sindia avant et après compactage CBR

Fraction granulaire (mm)	0 à 0,08	0,08 à 1	1 à 5	5 à 10	10 à 20
Granulométrie initiale (0/20 mm)	14,3	12,2	21,3	27,8	24,4
Après compactage CBR 10 coups	15,1	14	25,5	27	18,4
Après compactage CBR 25 coups	16,6	15,4	27,7	25,5	14,8
Après compactage CBR 55 coups	17,9	17,3	28,6	24,5	11,7

Tableau 3.4. Évolution moyenne des fractions granulaires 0/20 mm de la latérite de Lam-Lam avant et après compactage CBR

Fraction granulaire (mm)	0 à 0,08	0,08 à 1	1 à 5	5 à 10	10 à 20
Granulométrie initiale (0/20 mm)	10	9	21	28	32
Après compactage CBR 10 coups	14	11	24	30	21
Après compactage CBR 25 coups	15	13	26	29	17
Après compactage CBR 55 coups	17	15	28	26	14

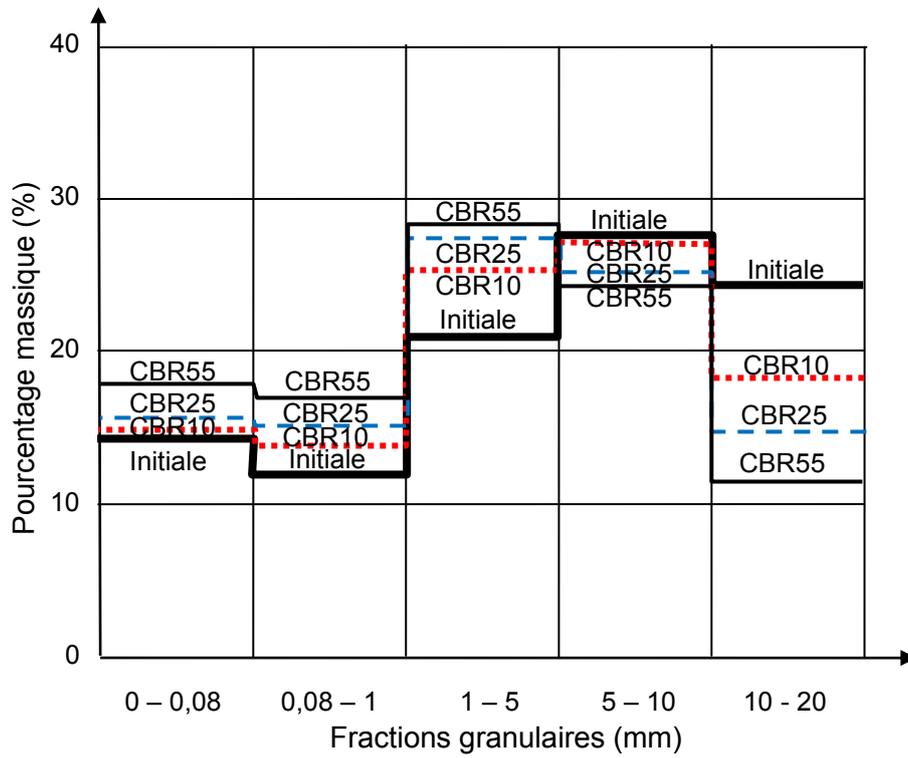


Figure 3.8. Variation moyenne des fractions granulaires 0/20 mm de la latérite de Sindia lors du compactage CBR

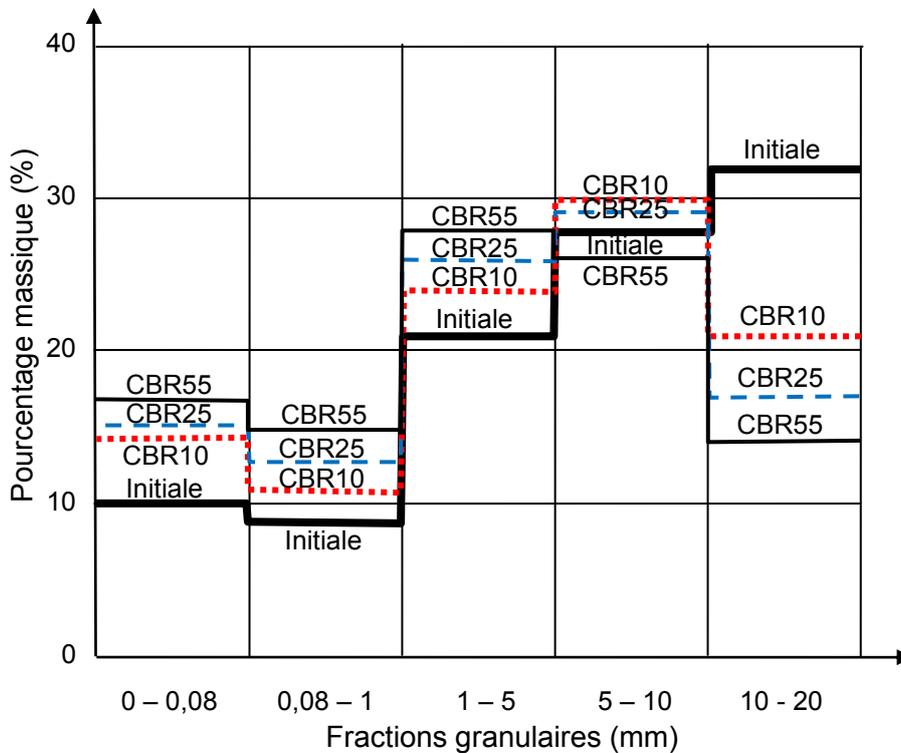


Figure 3.9. Variation moyenne des fractions granulaires 0/20 mm de la latérite de Lam-Lam lors du compactage CBR

L'indice de dureté des concrétions (I_{HC}) défini par Novais-Ferreira et Correira (1965) confirme cette observation. Pour un même prélèvement, cet indice décroît en fonction de l'énergie de compactage appliquée et a comme valeurs moyennes :

- pour la latérite de Sindia : 0,95 - 0,91 et 0,88 respectivement pour 10 coups, 25 coups et 55 coups et ;
- pour la latérite de Lam-Lam : 0,90 - 0,86 et 0,83 respectivement pour 10 coups, 25 coups et 55 coups.

Il faut toutefois relativiser ces résultats car la valeur de l'indice de dureté dépend beaucoup de l'homogénéité lors du quartage des échantillons destinés aux essais (analyse granulométrique et essai CBR), de la répartition de l'énergie lors du compactage, de la teneur en eau de mouillage et de l'analyse granulométrique.

Cependant, les résultats obtenus sur l'évolution de la granulométrie sous compactage CBR tendent à montrer qu'il est plus judicieux de prendre en compte le comportement du matériau global que celui de la seule fraction grossière (10/14 mm ou 10/20 mm).

3.2.2. Latérites de Picos et de Natal (Brésil)

Pour compléter les études faites sur les carrières de Lam-Lam et de Sindia au Sénégal, deux autres prélèvements de latérite ont été étudiés au Brésil, en provenance d'une carrière latéritique de Picos et de la carrière de l'aéroport de Natal. Ils présentent de très faibles indices de plasticité (Tableau 3.5).

Tableau 3.5. Propriétés avant compactage des latérites du Brésil

Identification des échantillons	Analyse granulométrique (%)		Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95% OPM
	0,075 mm	2 mm		w_{OPM} (%)	ρ_{dOPM} (g/cm ³)	
Carrière de l'aéroport de Natal (C)	19,2	98,5	1,3	6,9	2,12	45
Carrière de Picos (CP)	24,8	50,3	5,7	10,9	1,92	31

Les courbes granulométriques de ces prélèvements sont présentées sur la figure 3.10.

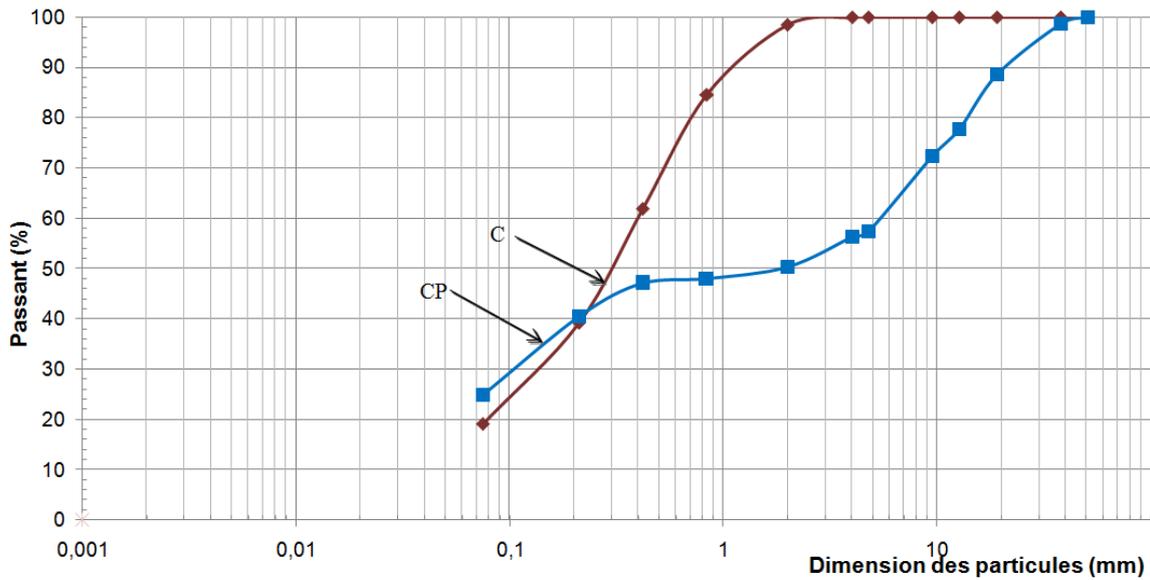


Figure 3.10. Courbes granulométriques des prélèvements de latérites C et CP

L'évolution de l'échantillon de la carrière de Picos (0/38,1 mm) est comparable à celle de la carrière de Sindia et de Lam-Lam au Sénégal : les particules de tailles supérieures à 9,5 mm ont beaucoup évolué lors du compactage CBR à 10 coups et celles supérieures à 4,76 mm à 25 et 55 coups. Ces transformations s'accompagnent d'une augmentation des particules de taille inférieure (Tableau 3.6 et figure 3.11).

Tableau 3.6. Évolution des fractions granulaires de la latérite de Picos (0/19,1 mm)
avant et après compactage

Fraction granulaire (mm)	0 à 0,075	0,075 à 0,6	0,6 à 4,76	4,76 à 9,5	9,5 à 19,1
Granulométrie initiale (0/19,1mm)	28	26	11	17	18
Après compactage CBR 10 coups	29	29	13	17	12
Après compactage CBR 25 coups	34	30	13	14	9
Après compactage CBR 55 coups	37	30	13	13	7

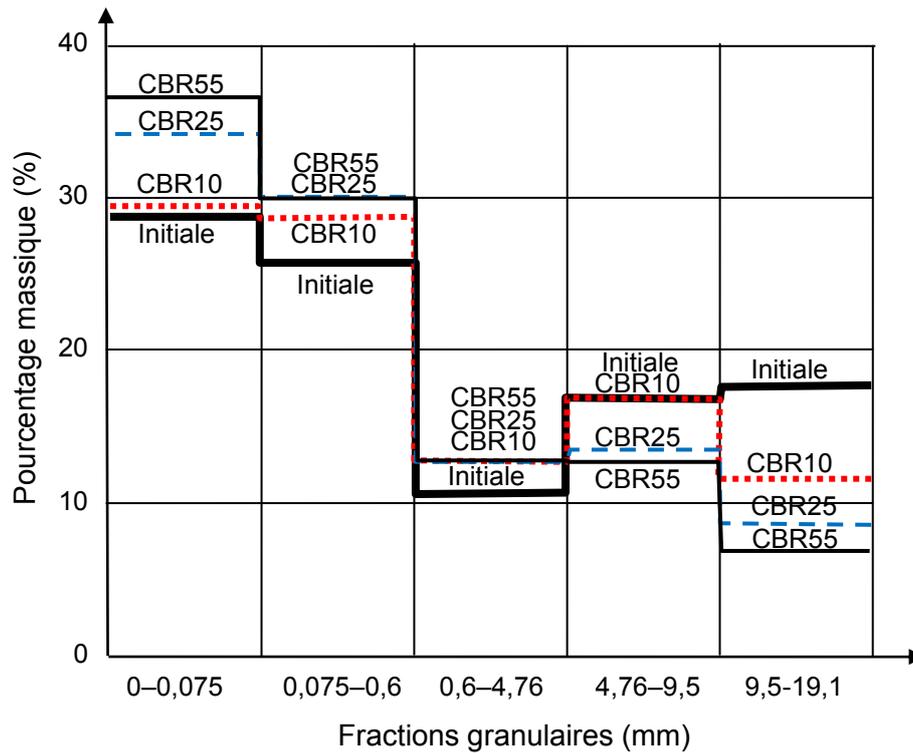


Figure 3.11. Variation des fractions granulaires de la latérite de Picos lors du compactage CBR

Les résultats obtenus sur l'échantillon provenant de la carrière de l'aéroport de Natal (fraction 0/4,76 mm) montrent une transformation des particules de tailles supérieures à 0,212 mm, qui s'accompagne d'une augmentation des particules de tailles inférieures (Tableau 3.7 et figure 3.12).

Tableau 3.7. Évolution des fractions granulaires de la latérite de Natal avant et après compactage

Fraction granulaire (mm)	0 à 0,075	0,075 à 0,212	0,212 à 0,6	0,6 à 4	4 à 9,5
Granulométrie initiale	19,24	20	35,4	25,3	0,06
Après compactage CBR 10 coups	22,66	20,4	32,3	24,6	0,04
Après compactage CBR 25 coups	22,68	20,4	32,3	24,6	0,02
Après compactage CBR 55 coups	24,29	20,5	31	24,2	0,01

La latérite de la carrière de l'aéroport de Natal (d'étendue granulaire 0/4,76 mm) présente, sous compactage CBR, une évolution plus faible que les latérites de Lam-Lam (d'étendue granulaire 0/40 mm), de Sindia (d'étendue granulaire 0/40 mm) et de Picos (d'étendue granulaire 0/38,1 mm). De même, elle présente des valeurs d'indice de dureté des concrétions (I_{HC}) sous compactage CBR plus grandes que celles de la latérite de Picos (Tableau 3.8).

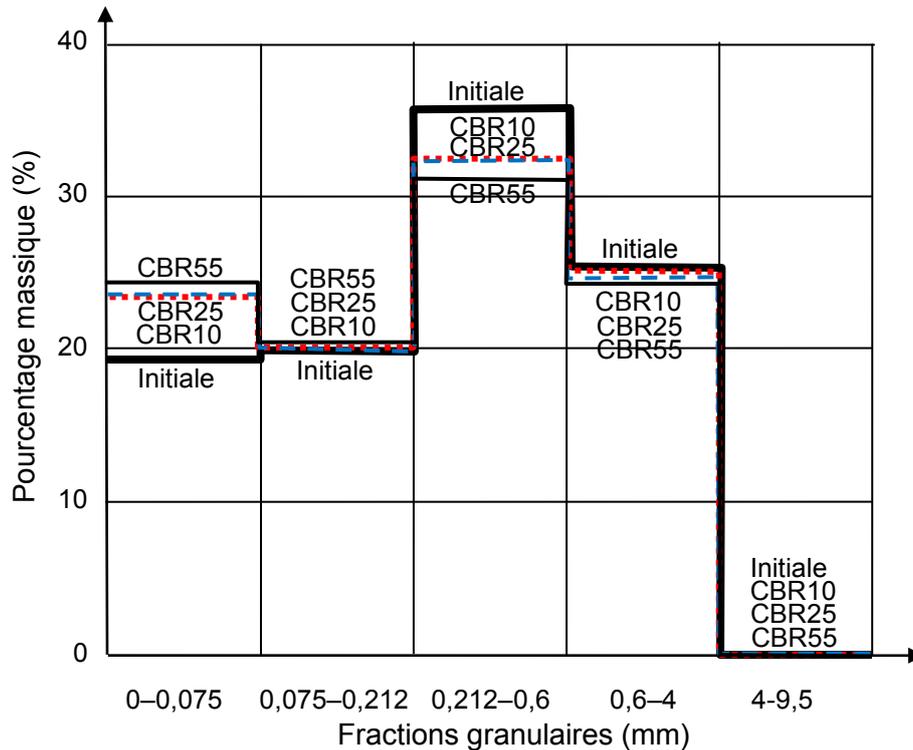


Figure 3.12. Variation des fractions granulaires de la latérite de Natal lors du compactage CBR

Tableau 3.8. Variation de l'indice de dureté des concrétions (I_{HC}) en fonction de l'énergie de compactage CBR

Identification des prélèvements	Indice de dureté des concrétions (I_{HC})		
	CBR 10 coups	CBR 25 coups	CBR 55 coups
Carrière de Picos (CP)	0,943	0,906	0,882
Carrière de l'aéroport de Natal (C)	0,993	0,992	0,986

3.3. Conclusions

Ces résultats montrent que les latérites étudiées sont sensibles à l'énergie de compactage qui leur est appliquée et que l'on comprend mieux la transformation des particules quand on analyse l'ensemble des fractions, plutôt que seulement la fraction grossière (10/14 mm ou 10/20 mm). Le caractère évolutif des sols latéritiques devrait être pris en compte lors de la sélection des matériaux mis en œuvre en couches de chaussées pour éviter la dégradation prématurée des routes observée notamment dans beaucoup de pays. Ces études devraient être étendues à d'autres sols latéritiques.

Chapitre 4

COMPARAISON DES PROCÉDURES FRANÇAISES ET BRÉSILIENNES POUR LA CARACTÉRISATION GÉOTECHNIQUE D'UNE LATÉRITE EN PROVENANCE DE PICOS (BRÉSIL)

4.1. Introduction

Les sols latéritiques, très abondants en zone tropicale et subtropicale, sont couramment utilisés en construction routière notamment en Afrique, en Australie, en Asie et en Amérique du sud. Cependant, les procédures de détermination de leurs caractéristiques géotechniques ne sont pas identiques dans tous les pays, comme nous avons pu le constater en comparant les normes françaises et brésiliennes utilisées au Sénégal et au Brésil, respectivement. L'étude présentée dans ce chapitre porte sur l'analyse des résultats obtenus en appliquant ces normes à un prélèvement effectué dans la carrière latéritique de Picos (État de Piauí au Brésil) en vue de son utilisation en couche de fondation.

4.2. Étude comparative des normes françaises et brésiliennes

L'échantillon en provenance de Picos a été soumis à des essais d'identification complète conformément aux normes françaises et brésiliennes :

- analyse granulométrique ;
- limites d'Atterberg (limites de liquidité et de plasticité) ;
- essai Proctor ;
- essai de portance CBR (Californian Bearing Ratio).

Le tableau 4.1 donne les références des normes applicables pour chaque essai.

Tableau 4.1. Liste des normes françaises et brésiliennes appliquées

Normes	Analyse granulométrique	Limites d'Atterberg		Essai Proctor	Essai CBR
		Limite de liquidité (w _L)	Limite de plasticité (w _P)		
française	NF P 94-056	NF P 94-051		NF P 94-093	NF P 94-078
brésilienne	DNER-ME051-94	DNER-ME122-94	DNER-ME082-94	NBR 7182	NBR 9895

4.2.1. Analyse granulométrique

Conformément à la norme brésilienne DNER-ME051-94, l'analyse granulométrique a été réalisée par tamisage sur une prise d'essai de 1,5 kg de matériau. L'analyse granulométrique est effectuée en deux temps :

- après lavage et séchage du refus au tamis de 2mm (N°10) et ;
- après lavage et séchage de 100g du passant au tamis de 2mm (N°10).

Conformément à la norme française NF P 94-056, l'analyse granulométrique a été effectuée par tamisage après lavage et séchage d'une prise d'essai de 5 kg de matériau.

Les résultats sont donnés dans le tableau 4.2 et sur la figure 4.1.

Tableau 4.2. Résultats des analyses granulométriques

Normes	Analyses granulométriques (dimensions en mm)									
	0,075	0,42	2	4,8	9,5	12,7	19,1	25,4	38,1	50,8
française	24,81	47,02	50,26	57,38	72,27	77,77	88,59	98,72	100,00	100,00
brésilienne	26,12	47,78	51,48	58,04	70,65	79,30	89,31	96,36	100,00	100,00

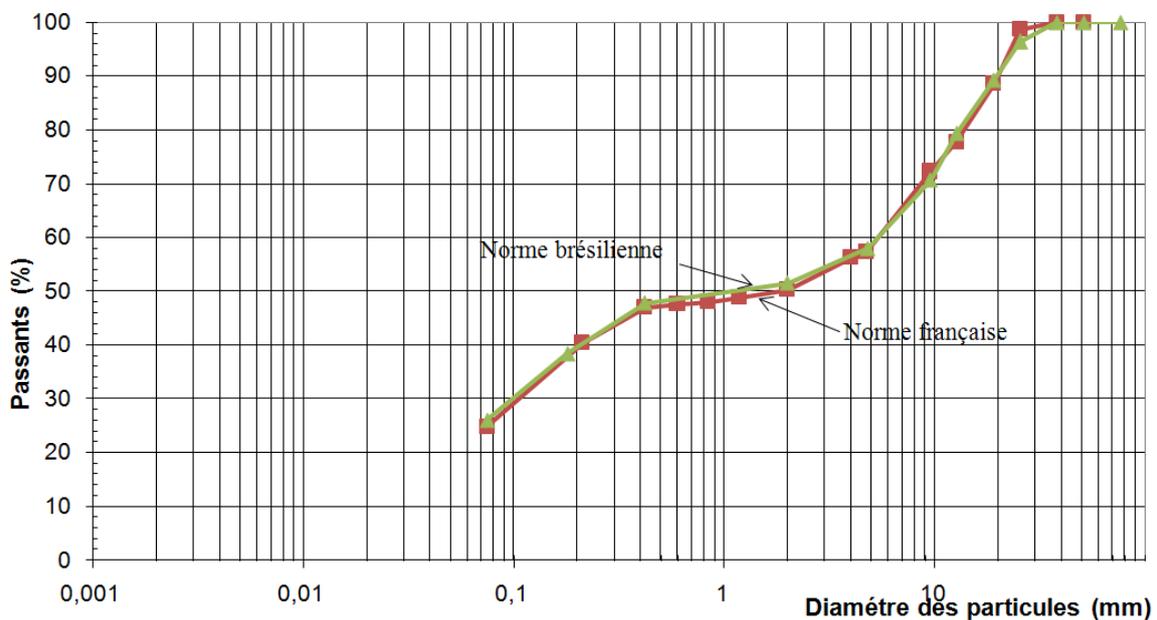


Figure 4.1. Courbes granulométriques comparées

Les résultats montrent que les deux normes donnent des courbes granulométriques très proches qu'on peut considérer comme identiques.

4.2.2. Limites d'Atterberg

Selon la norme brésilienne, l'essai est effectué sur le passant au tamis de 420 µm (N°40).

Selon la norme française, l'essai est réalisé après décantation du passant obtenu après lavage au tamis de 400µm (Figures 4.3 et 4.4).



Figure 4.3. Prétraitement de l'échantillon pour déterminer les limites d'Atterberg (norme brésilienne)



Figure 4.4. Prétraitement de l'échantillon pour déterminer les limites d'Atterberg (norme française)

Les résultats obtenus par les deux méthodes sont indiqués dans le tableau 4.3.

On ne note pas de différence significative pour les valeurs de l'indice de plasticité (I_p). Les valeurs données par la norme française semblent toutefois légèrement plus élevées que celles données par la norme brésilienne (Tableau 4.3).

Tableau 4.3. Valeurs des limites d'Atterberg obtenues (latérite de Picos)

Normes	Limites d'Atterberg		
	Limite de liquidité (w_L)	Limite de plasticité (w_P)	Indice de plasticité (I_P)
française	26,07	20,37	5,7
brésilienne	25,24	19,69	5,5

Il faut toutefois noter que les valeurs des limites d'Atterberg sont influencées par le mode de prétraitement (séchage, imbibition, etc.) ainsi que par la durée du malaxage. Ces différents facteurs rendent difficiles la reproductibilité de l'essai.

4.2.3. Essais de compactage Proctor et CBR

Les pratiques brésiliennes et sénégalaises suivantes ont été prises en compte :

- au Brésil, en fonction des projets routiers, les sols sont généralement compactés à l'énergie Proctor intermédiaire et une valeur minimale de 20 de l'indice CBR est retenue pour une utilisation en couche de fondation ;
- au Sénégal, le compactage est généralement effectué à l'énergie Proctor modifié et une valeur minimale de 30 de l'indice CBR est retenue pour une utilisation en couche de fondation.

Les caractéristiques Proctor ont donc été déterminées, selon la norme brésilienne, sur un échantillon de 6 kg compacté à l'énergie intermédiaire (26 coups par couches) et l'essai CBR a été effectué sur trois prises d'essai de 6 kg compactées également chacune à l'énergie intermédiaire.

Parallèlement, les caractéristiques Proctor ont été déterminées, conformément à la norme française (Norme NF P 94-093) sur quatre prises d'essai de 6 kg compactées chacune à l'énergie Proctor modifié (55 coups par couches) et l'essai CBR sur trois prises d'essai de 6 kg compactées respectivement à 10 coups, 25 coups et 55 coups.

Les étapes de l'essai sont représentées sur la figure 4.5.

Les valeurs des caractéristiques Proctor et CBR obtenues sont données dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4. Résultats des essais Proctor et CBR sur la latérite de Picos

Normes	Essai Proctor		I_{CBR}
	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	
française	10,90	1,92	31
brésilienne	12,44	1,92	20



Figure 4.5. Essai CBR (California bearing ratio)

Les résultats obtenus montrent qu'il n'existe pas de différence significative entre les valeurs de la masse volumique sèche optimale (ρ_d) données par les deux normes. Cependant, les teneurs en eau optimale (w) diminuent avec l'augmentation de l'énergie de compactage qui est plus faible dans la norme brésilienne.

Les indices CBR obtenus en appliquant les deux normes sont très proches de celles admises (20 et 30) pour l'étude de l'utilisation de cette latérite en couche de fondation.

4.3. Conclusions

Ainsi, malgré les différences qui existent sur les pratiques utilisées au Brésil et au Sénégal, on n'observe pas de différence significative entre les résultats obtenus avec les normes françaises et brésiennes sur le sol en provenance de Picos (Brésil). Il faut toutefois noter que les résultats des limites d'Atterberg sont influencés par le mode de prétraitement (séchage, imbibition, etc...) ainsi que la durée du malaxage : ces différents facteurs rendent difficiles la reproductibilité de l'essai.

Il nous semble que ce travail devrait être étendu aux sols latéritiques en provenance d'autres zones géographiques ayant des normes et références différentes.

Chapitre 5

ÉTUDE PAR RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE DES RELATIONS ENTRE L'INDICE CBR ET LES PARAMÈTRES DE CARACTÉRISATION GÉOTECHNIQUE DE LATÉRITES DU SÉNÉGAL

5.1. Introduction

Comme nous l'avons noté dans le chapitre 1, l'indice CBR (Californian Bearing Ratio) est le paramètre le plus utilisé pour le dimensionnement des structures de chaussées en Afrique. Cette caractéristique est déterminée sur des éprouvettes compactées à 95% de l'optimum Proctor modifié après 4 jours d'imbibition. Différentes études ont tenté de l'évaluer par corrélation avec des essais simples d'identification des matériaux (granulométrie, limites d'Atterberg,...). De fortes dispersions des résultats ont été constatées, par exemple lors des études de Lyon Associates ou du CEBTP. Selon Fall (1993) ces tentatives de corrélation se heurtent à la méconnaissance du paramètre I_{CBR} , qui semble indépendant des caractéristiques d'identification, et aussi que des données d'origine diverses ont été mélangées.

Ce chapitre est dédié à la prévision de la valeur de l'indice CBR à partir des résultats des essais de caractérisation géotechnique par la méthode de la régression linéaire multiple. Ces études ont été effectuées sur des échantillons prélevés dans les carrières latéritiques de Sindia et de Dougar au Sénégal. Les données de chacune des carrières ont été étudiées séparément, puis ensemble. L'approche retenue pour les carrières du Sénégal a été ensuite testée sur des données provenant de Côte d'Ivoire (Bohi, 2008).

5.2. Rappels théoriques sur la méthode de la régression linéaire multiple

5.2.1. Aspect mathématique

Considérons le modèle général de régression linéaire multiple suivant :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (5.1)$$

Cette relation peut également s'écrire sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = y = X * \beta + \varepsilon = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} \dots & x_{1k} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} \dots & x_{nk} \end{pmatrix} * \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Cette relation doit être inversée pour trouver les multiplicateurs β_i de l'équation (5.1). La recherche de la solution est faite par la méthode des moindres carrés.

La méthode des moindres carrés consiste à trouver les composantes du vecteur b qui minimisent la somme des erreurs au carré. Les équations normales suivantes sont ainsi obtenues :

$$\begin{aligned}
 b_0 \sum_{i=1}^n 1 + b_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{ik} &= \sum_{i=1}^n y_i \\
 b_0 \sum_{i=1}^n x_{i1} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i1} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} &= \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i \\
 &\vdots \\
 b_0 \sum_{i=1}^n x_{ik} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{ik} &= \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

La forme matricielle s'écrit donc de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix}
 \sum_{i=1}^n 1 & \sum_{i=1}^n x_{i1} \dots & \sum_{i=1}^n x_{ik} \\
 \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i1} \dots & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} \\
 \vdots & \vdots & \vdots \\
 \sum_{i=1}^n x_{ik} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{ik}
 \end{pmatrix}
 \begin{bmatrix}
 b_0 \\
 b_1 \\
 \vdots \\
 b_k
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \sum_{i=1}^n y_i \\
 \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i \\
 \vdots \\
 \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i
 \end{bmatrix}
 \text{ soit } X^t X b = X^t y \tag{5.4}$$

Ainsi $b = \hat{\beta} = [X^t X]^{-1} X^t y$ où $[X^t X]^{-1}$ est l'inverse de la matrice $X^t X$ et X^t est la transposée de la matrice X .

5.2.2. Détermination de la qualité de l'ajustement

La qualité de l'ajustement est déterminée par le coefficient de détermination (R^2). Ce dernier est obtenu par le rapport de la variation expliquée et la variation totale. Il est calculé par la relation suivante :

$$R^2 = \frac{\text{Variation expliquée}}{\text{Variation totale}} \Rightarrow R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{5.5}$$

Enfin, il est à noter que le coefficient de détermination est égal au carré du coefficient de corrélation et varie entre 0 et 1.

5.2.3. Détection des points atypiques

Les points atypiques ou points aberrants sont ceux qui s'éloignent du reste de la distribution caractéristique de la population étudiée. Ils sont mis en évidence par le test de Student fondé sur la comparaison d'un t théorique et d'un t' empirique de Student, en fonction du nombre d'observations (n), du nombre de variables (p) et de l'intervalle de confiance (α). Un point est considéré comme atypique lorsque son t théorique est supérieur à son t' empirique, donné par la table de Student. Dans le cadre de cette étude, la formule du t théorique utilisée dans la feuille excel « Regression_L3_IDS » développée au laboratoire ERIC de l'université de Lyon 2 a été retenue (Rakotomalaka, portail Lyon 2, internet). Elle est donnée pour chaque observation par la relation suivante :

$$t_i = \frac{\hat{\varepsilon}_i}{\hat{\sigma}_\varepsilon * \sqrt{1 - x_i * (X'X)^{-1} * x_i'}} * \sqrt{\frac{n - p - 2}{n - p - 1 - \left(\frac{\hat{\varepsilon}_i}{\hat{\sigma}_\varepsilon * \sqrt{1 - x_i * (X'X)^{-1} * x_i'}}\right)^2}} \quad (5.6)$$

où $|\hat{\varepsilon}_i|$ est la valeur absolue du résidu de l'observation i ;

$\hat{\sigma}_\varepsilon$ est l'écart-type de l'observation i.

5.3. Estimation de la valeur de l'indice CBR à partir des résultats d'analyse granulométrique de la fraction 0/20mm

Les données utilisées pour cette étude proviennent des essais de laboratoire réalisés sur quarante prélèvements issus de la carrière latéritique de Sindia et sur quarante-six autres prélèvements issus de la carrière latéritique de Dougar, au Sénégal.

5.3.1. Études des données relatives à la latérite de Sindia

Le tableau 5.1 et la figure 5.1 présentent les intervalles de variation des caractéristiques géotechniques de l'ensemble des quarante prélèvements en provenance de la carrière latéritique de Sindia.

Tableau 5.1. Intervalles de variation des caractéristiques géotechniques

	Analyse granulométrique (%)		Indice de plasticité (I _p)	Proctor modifié		I _{CBR} à 95% OPM
	0,08mm	10mm		w _{OPM} (%)	ρ _{dOPM} (g/cm ³)	
Valeur minimale	9,05	68,21	14,34	9,30	1,95	37,00
Valeur maximale	32,30	89,80	24,09	14,30	2,17	75,00
Valeur moyenne	18,11	80,18	18,60	11,26	2,09	58,58
Écart type	4,15	5,12	2,57	1,17	0,05	7,70
Intervalle de variation	9,05-32,30	68,21-89,80	14,34-24,09	9,30-14,30	1,95-2,17	37-75

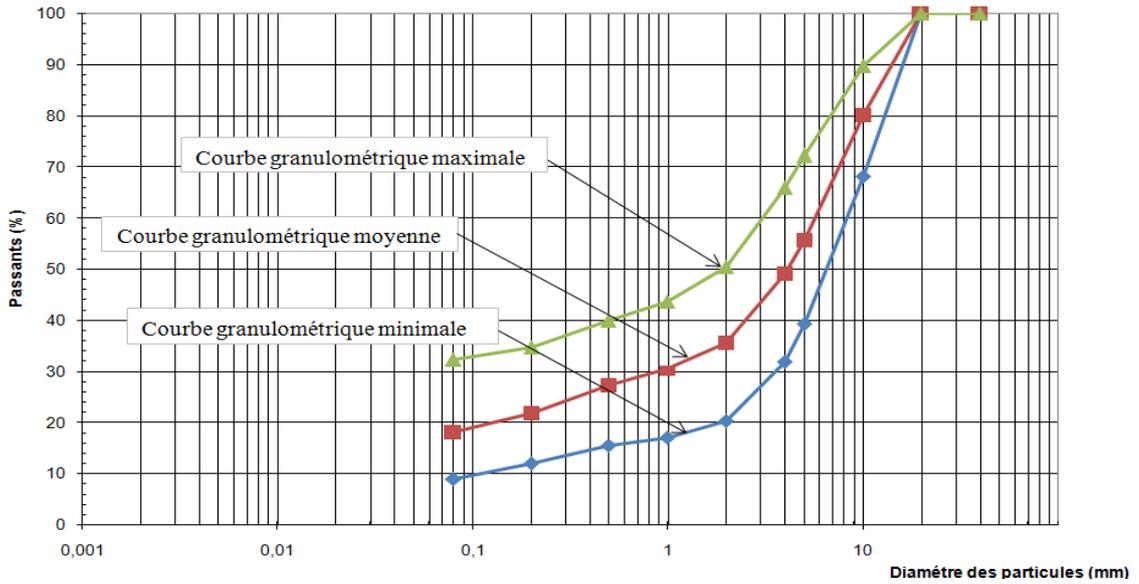


Figure 5.1. Fuseaux granulométriques des échantillons de Sindia

La figure 5.2 montre la distribution des valeurs de l'indice CBR de l'ensemble des échantillons en provenance de Sindia.

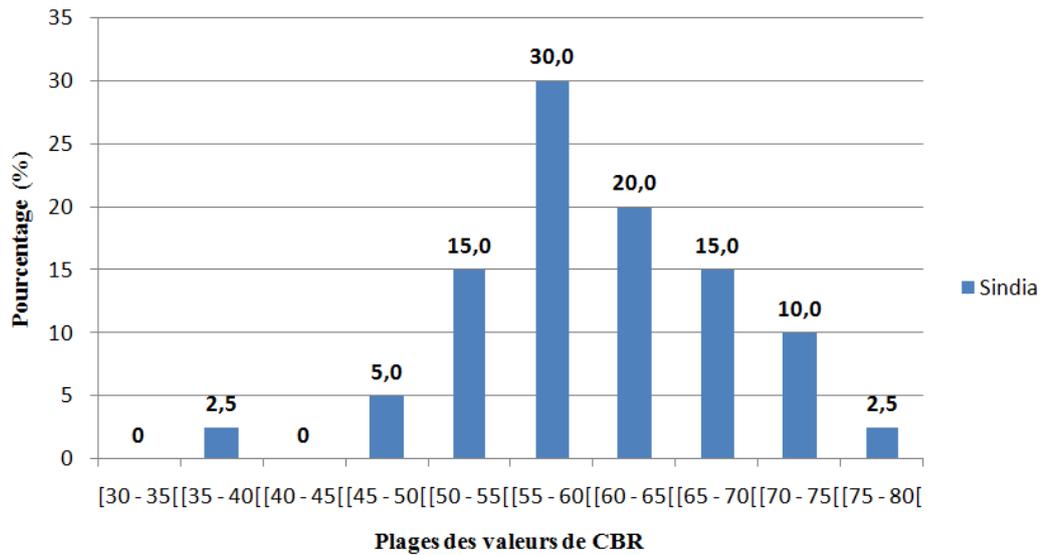


Figure 5.2. Distribution des valeurs de l'indice CBR des échantillons de Sindia

Les relations recherchées dans le cadre de cette étude s'écrivent sous la forme suivante :

$$I_{CBR} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i * P_i \tag{5.7}$$

où les P_i désignent les pourcentages de passant sur les différents tamis pour la fraction 0/20mm du matériau et les b_i ($0 \leq i \leq k$) sont les composantes du vecteur b .

a) Première résolution

Les composantes du vecteur b ont été déterminées en utilisant la feuille excel « Regression_L3_IDS» développée au laboratoire ERIC de l'université de Lyon 2.

Les figures 5.3 et 5.4 montrent la distribution des points après résolution.

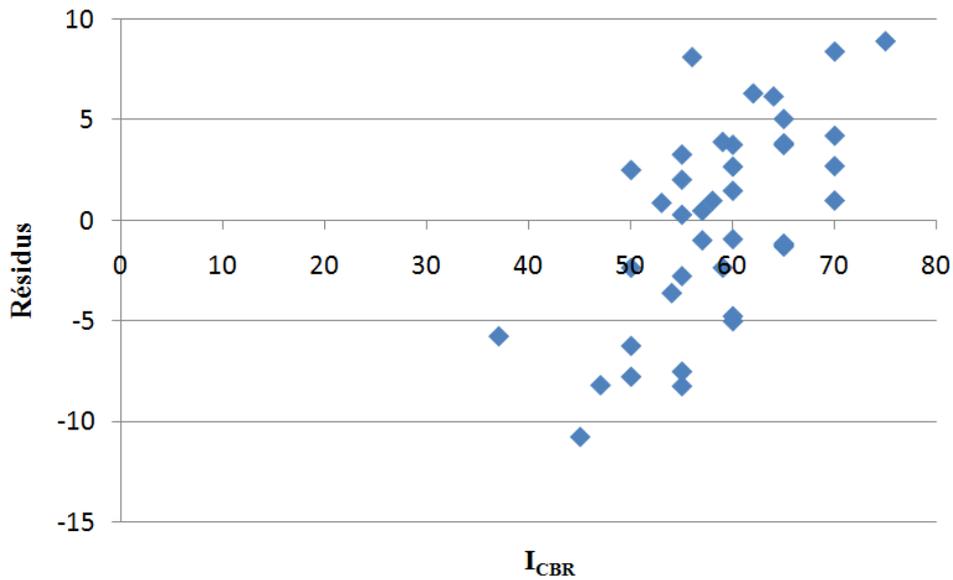


Figure 5.3. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

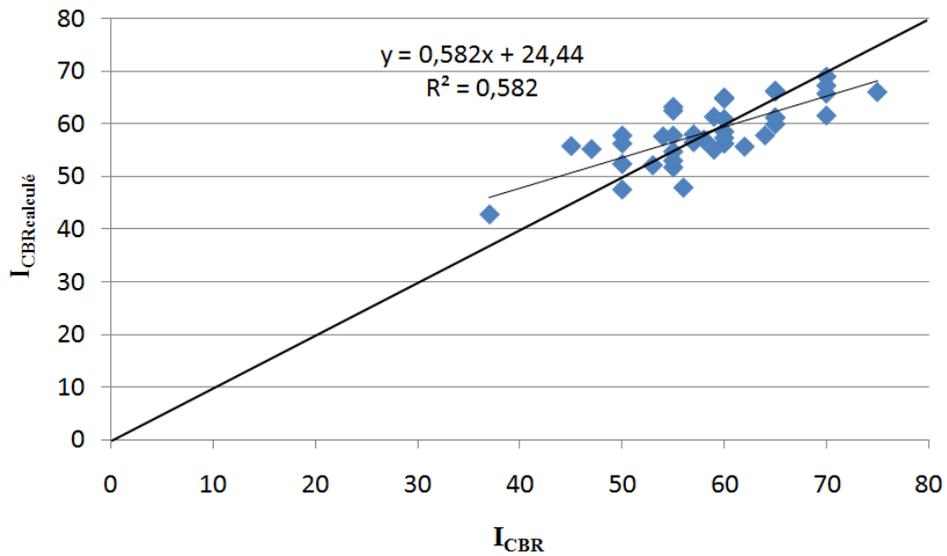


Figure 5.4. Relation entre l'indice CBR (mesuré) et l'indice CBR calculé

Après la résolution, les coefficients de Student des points S_{16} et S_{18} dépassent la valeur limite (t') de 2,042 et ces points sont donc considérés comme atypiques (Figure 5.5).

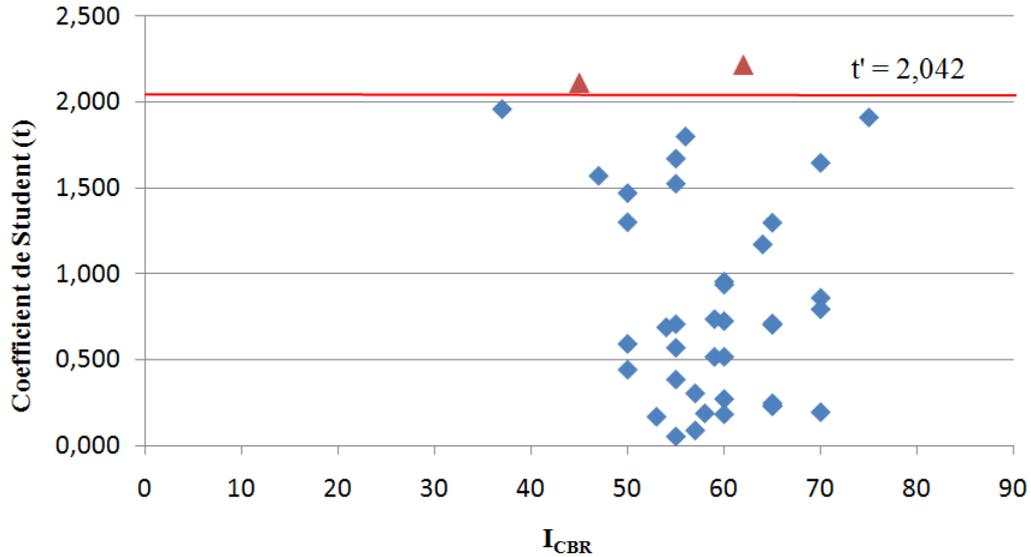


Figure 5.5. Représentation du coefficient de Student en fonction de l'indice CBR

Une deuxième résolution a été faite sans ces points.

b) Deuxième résolution

Le tableau 5.2 et la figure 5.6 résument les intervalles de variation des caractéristiques géotechniques des données.

Tableau 5.2. Intervalles de variation des caractéristiques géotechniques

	Analyse granulométrique (%)		Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95% OPM
	0,08mm	10mm		w_{OPM} (%)	ρ_{dOPM} (g/cm^3)	
Valeur minimale	9,05	68,21	14,34	9,30	1,95	37,00
Valeur maximale	32,30	89,80	24,09	13,50	2,17	75,00
Valeur moyenne	18,08	80,01	18,66	11,20	2,09	58,84
Écart type	4,23	5,17	2,58	1,09	0,05	7,56
Intervalle de variation	9,05-32,30	68,21-89,80	14,34-24,09	9,30-13,50	1,95-2,17	37-75

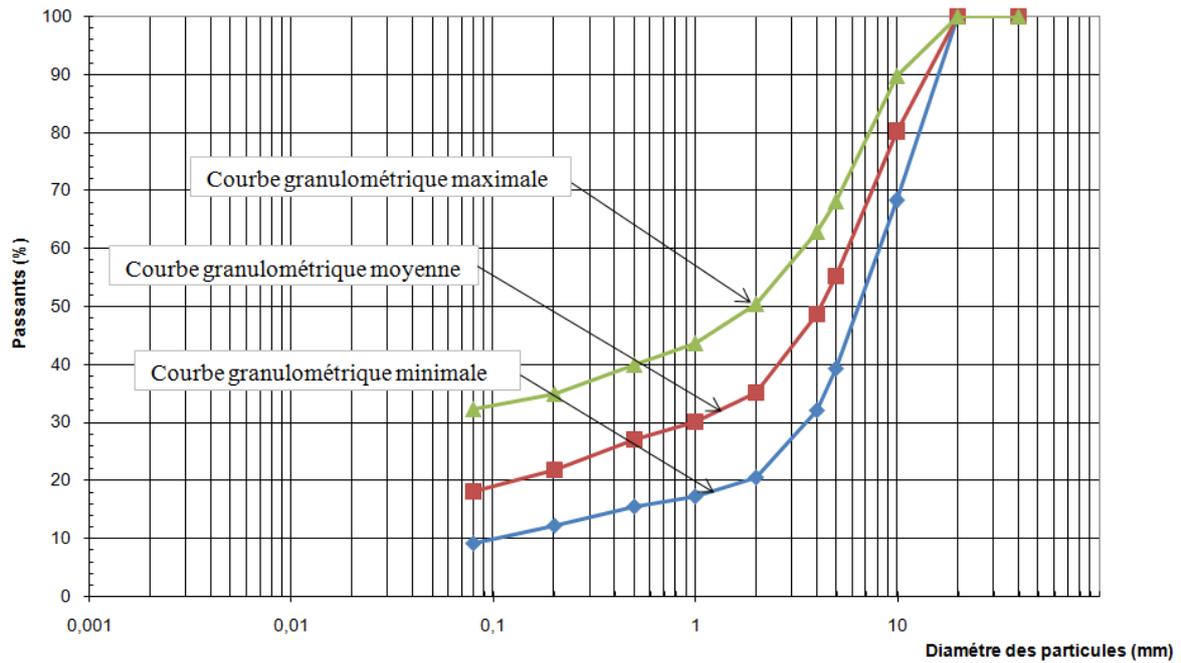


Figure 5.6. Fuseaux granulométriques des échantillons de Sindia

La figure 5.7 décrit la distribution des valeurs de l'indice CBR.

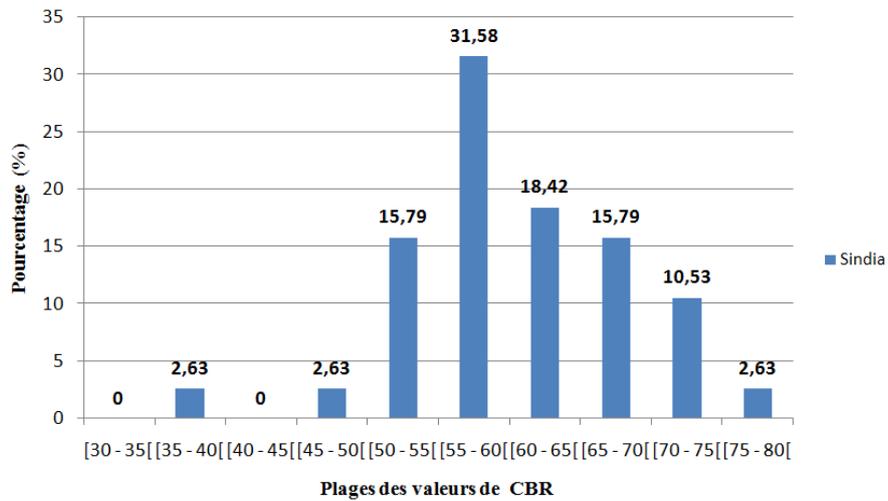


Figure 5.7. Distribution des valeurs du CBR des échantillons de Sindia

Les figures 5.8 et 5.9 montrent les résultats du calcul.

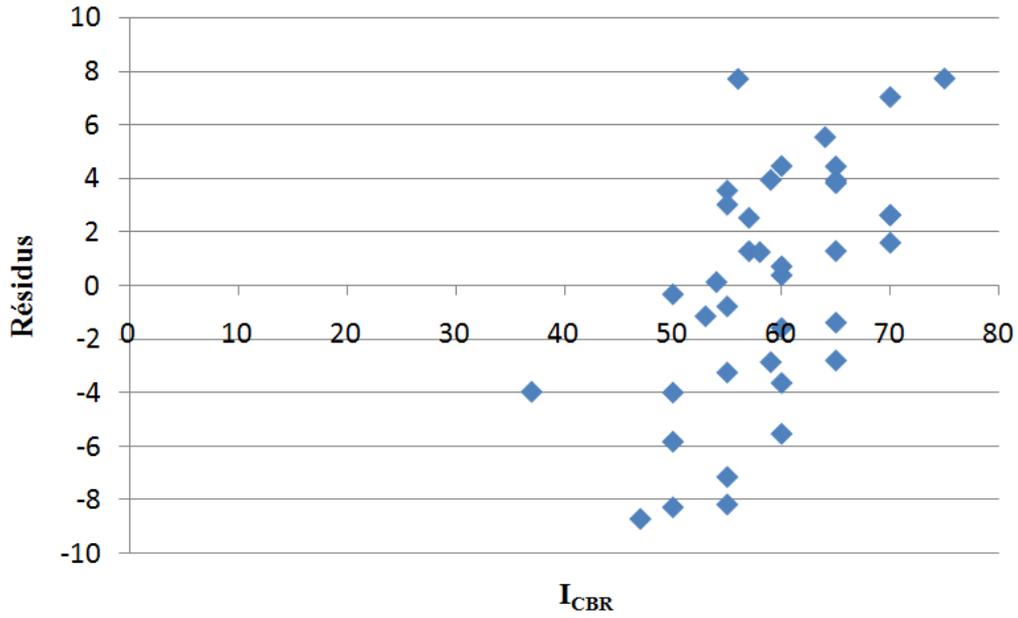


Figure 5.8. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

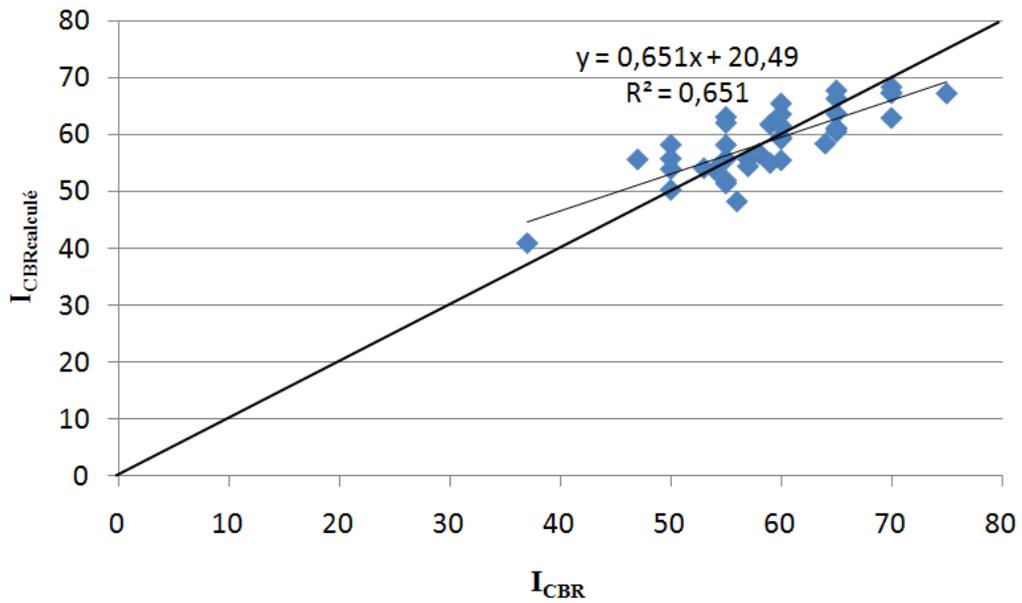


Figure 5.9. Relation entre l'indice CBR (mesuré) et l'indice CBR calculé

À la suite de cette résolution, aucun point atypique n'a été observé (Figure 5.10).

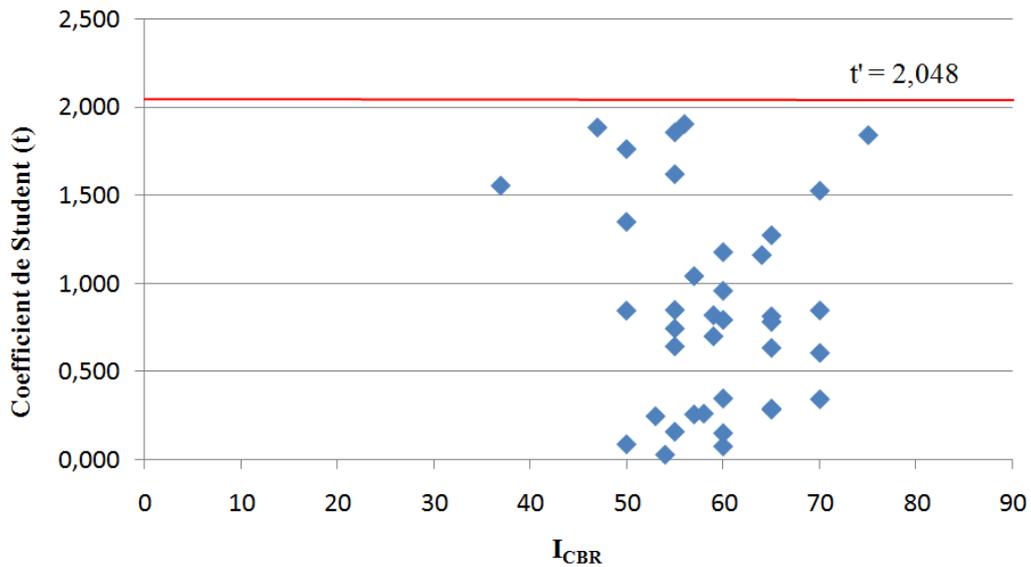


Figure 5.10. Représentation du coefficient de Student en fonction de l'indice CBR

La relation suivante a été obtenue :

$$I_{\text{CBR}} = 27,878 - 0,921P_{0,08\text{mm}} + 0,536P_{0,2\text{mm}} - 1,546P_{0,5\text{mm}} + 3,038P_{1\text{mm}} + 0,015P_{2\text{mm}} - 1,249P_{4\text{mm}} - 1,061P_{5\text{mm}} + 1,311P_{10\text{mm}} \quad (5.8)$$

avec $R^2 = 0,651$,

où R^2 désigne le coefficient de détermination et P_i les passants aux tamis de 0,08 - 0,2 - 0,5 - 1 - 2 - 4 - 5 et 10 mm.

Le coefficient de corrélation $r = 0,807$ obtenu à l'issue de cette étude montre qu'il existe une forte corrélation entre l'indice CBR (déterminé à partir des essais de laboratoire) et les paramètres granulométriques déterminés sur la fraction 0/20 mm du matériau.

Les différences minimale et maximale observées entre l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé valent respectivement 0,125 et 8,700, avec une moyenne de 3,649. Ces différences peuvent être rattachées au mode de prétraitement (défaut de quartage, répartition de l'énergie de compactage, erreur de lecture lors du poinçonnement,...).

Compte tenu de ces résultats encourageants, une étude semblable a été effectuée sur des données de la latérite de Dougar.

5.3.2. Études des données relatives à la latérite de Dougar

Le tableau 5.3 et la figure 5.11 résument les intervalles de variation des caractéristiques géotechniques de l'ensemble des quarante-six prélèvements en provenance de la carrière latéritique de Dougar.

Tableau 5.3. Intervalles de variation des caractéristiques géotechniques

	Analyse granulométrique (%)		Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95% OPM
	0,08mm	10mm		w_{OPM} (%)	ρ_{dOPM} (g/cm^3)	
Valeur minimale	14,26	61,07	9,72	7,40	1,83	40,00
Valeur maximale	47,17	91,65	18,84	12,40	2,13	55,00
Valeur moyenne	26,16	78,01	13,22	9,91	2,00	48,80
Écart type	6,49	7,35	2,26	1,22	0,05	5,08
Intervalle de variation	14,26-47,17	61,07-91,65	9,72-18,84	7,40-12,40	1,83-2,13	40-55

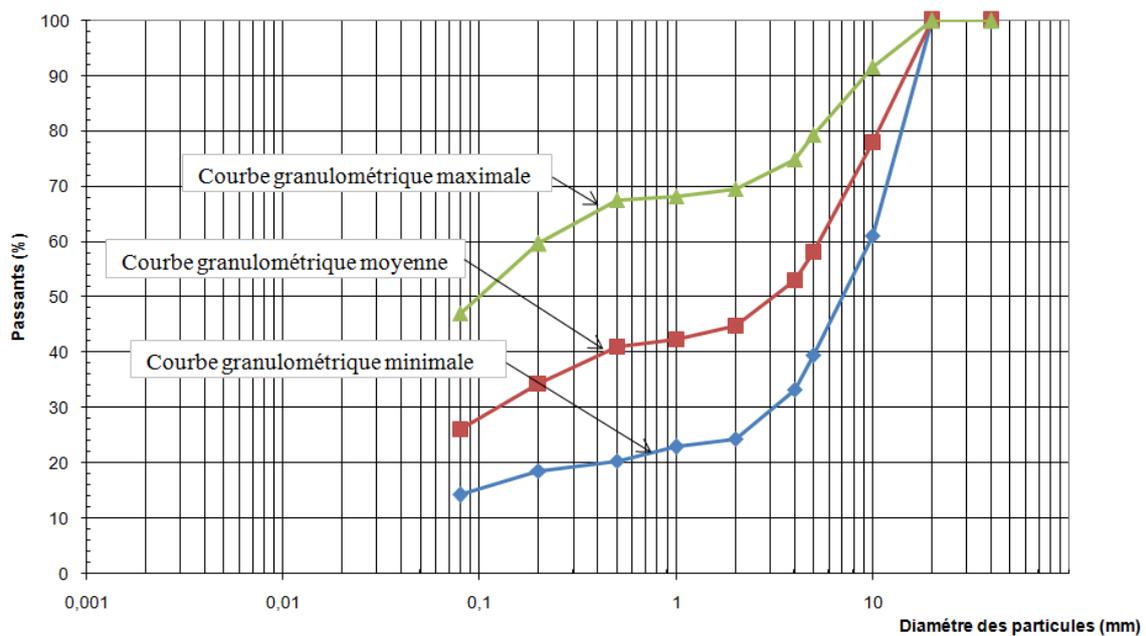


Figure 5.11. Fuseaux granulométriques des échantillons de Dougar

La figure 5.12 présente la distribution des valeurs de l'indice CBR de l'ensemble des échantillons en provenance de Dougar.

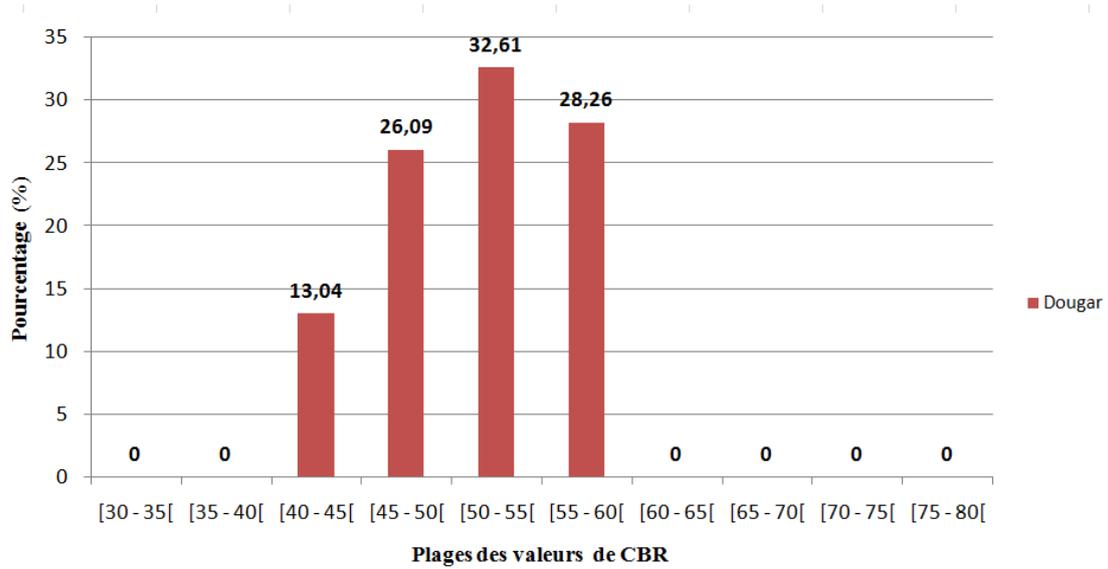


Figure 5.12. Distribution des valeurs de l'indice CBR des échantillons de Dougar

Les figures 5.13 et 5.14 montrent la distribution des points après résolution.

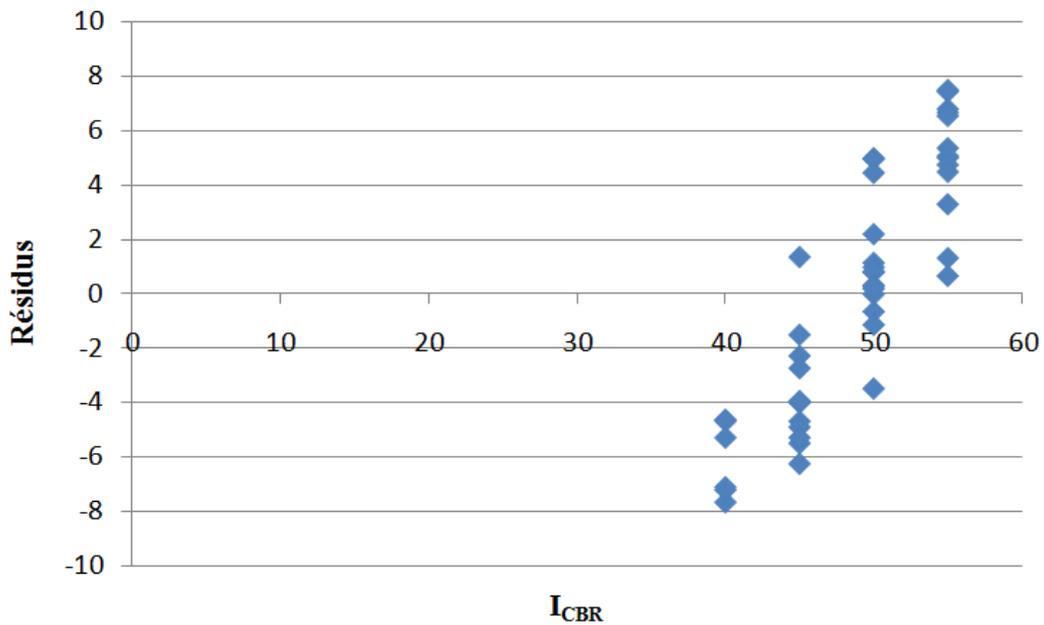


Figure 5.13. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

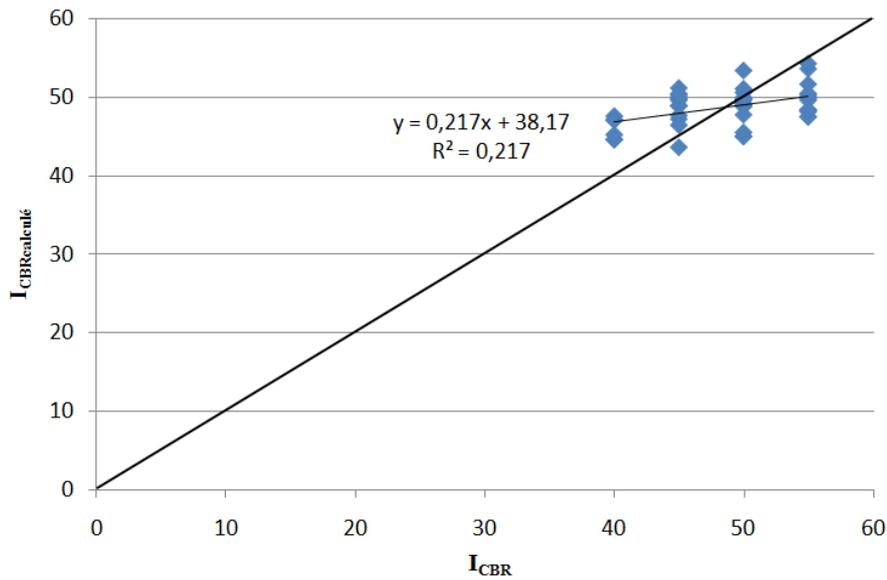


Figure 5.14. Relation entre l'indice CBR (mesuré) et l'indice CBR calculé

Après résolution, aucun point atypique n'a été observé (Figure 5.15).

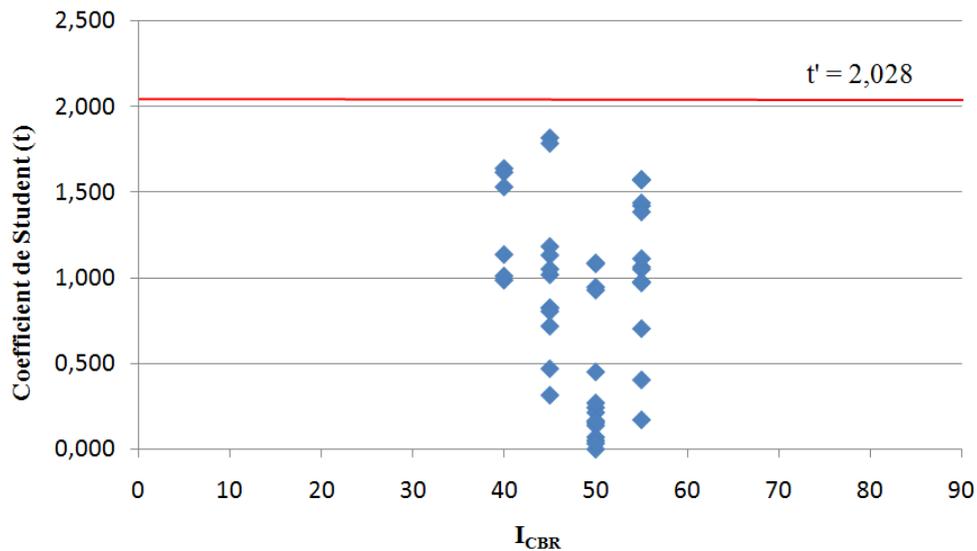


Figure 5.15. Représentation des variations du coefficient de Student en fonction de l'indice CBR

La relation suivante a été obtenue :

$$I_{\text{CBR}} = 26,270 - 0,180P_{0,08\text{mm}} + 0,332P_{0,2\text{mm}} - 1,594P_{0,5\text{mm}} + 2,203P_{1\text{mm}} - 0,792P_{2\text{mm}} + 0,260P_{4\text{mm}} - 0,226P_{5\text{mm}} + 0,294P_{10\text{mm}} \quad (5.9)$$

avec $R^2 = 0,218$,

où R^2 désigne le coefficient de détermination et P_i les passants aux tamis de 0,08 - 0,2 - 0,5 - 1 - 2 - 4 - 5 et 10 mm.

Les différences minimale et maximale observées entre l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé valent respectivement 0,019 et 7,651, avec une moyenne de 3,777.

Malgré le coefficient de corrélation inférieur à celui obtenu sur les données de Sindia, les différences minimale, maximale et moyenne obtenues sur les deux carrières restent comparables.

5.3.3. Application de la relation (5.8) aux données de Dougar

L'objectif recherché est de vérifier si la relation (5.8) établie sur les données de Sindia permet de prédire les valeurs de l'indice CBR des données de Dougar.

L'application de la relation (5.8) aux données de Dougar montre de grandes différences entre les valeurs de l'indice CBR (mesuré) et celles de l'indice CBR calculé (Figures 5.16 et 5.17).

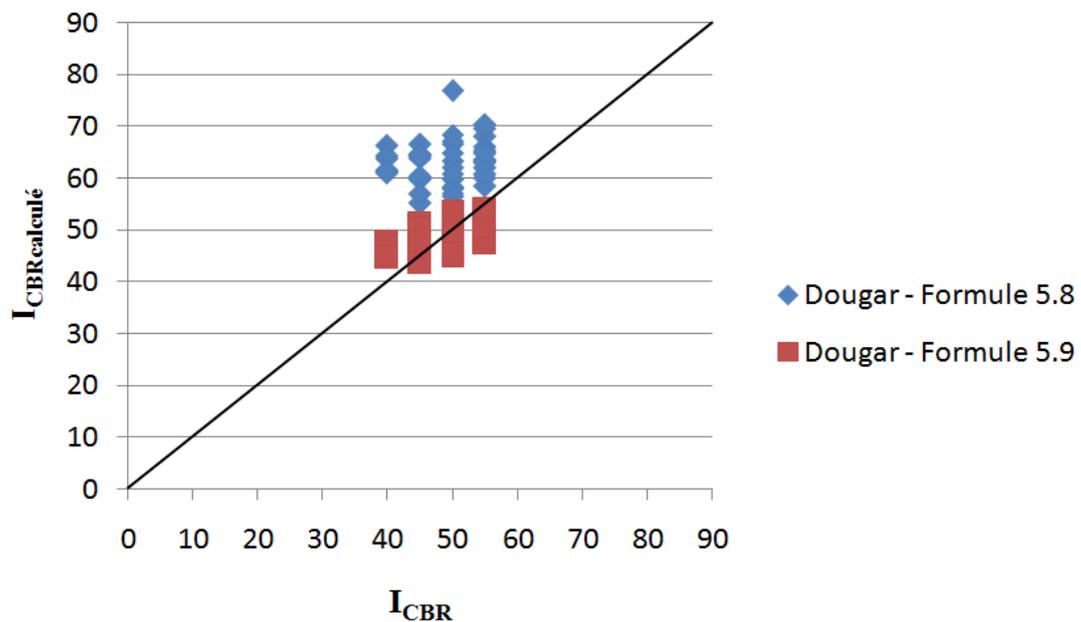


Figure 5.16. Relation entre l'indice CBR (mesuré) des données de Dougar et les indices CBR calculés par la relation (5.8) de Sindia et par la relation (5.9)

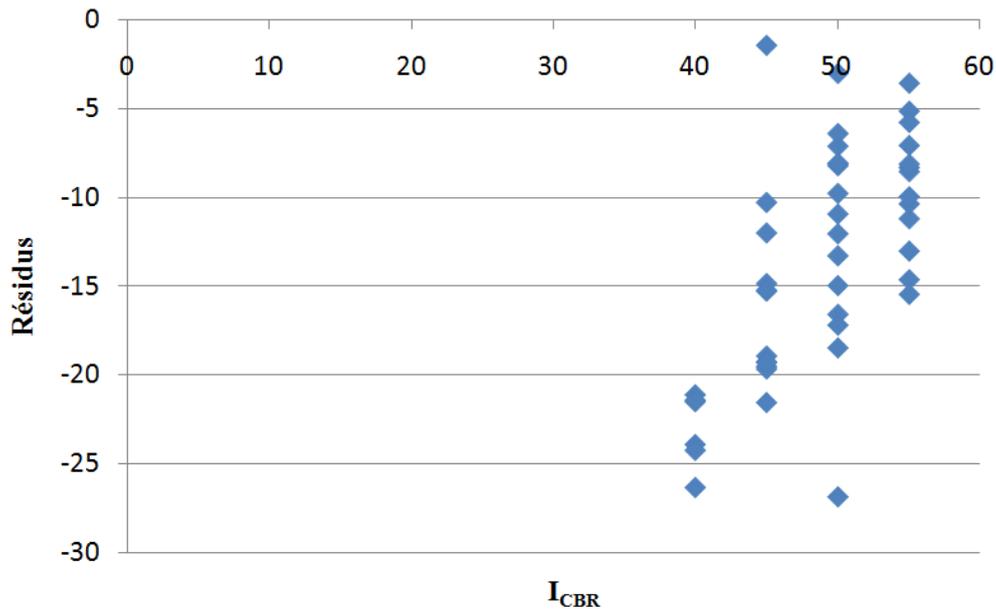


Figure 5.17. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

Les différences minimale et maximale (en valeur absolue) observées entre l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé par la relation (5.8) de Sindia valent respectivement 1,441 et 26,836, avec une moyenne de 13,642. Ces différences montrent qu'il n'est pas possible d'extrapoler les relations établies sur une carrière vers une autre carrière dans laquelle les graveleux latéritiques ont une origine différente et donc des propriétés différentes.

5.3.4. Application de la relation (5.9) aux données de Sindia

L'objectif est de vérifier si la relation (5.9) établie sur les données de Dougar permet de prévoir les valeurs de l'indice CBR des données de Sindia.

L'application de la relation (5.9) aux données de Sindia montre également de grandes différences entre les valeurs de l'indice CBR (mesuré) et celles de l'indice CBR calculé (Figures 5.18 et 5.19).

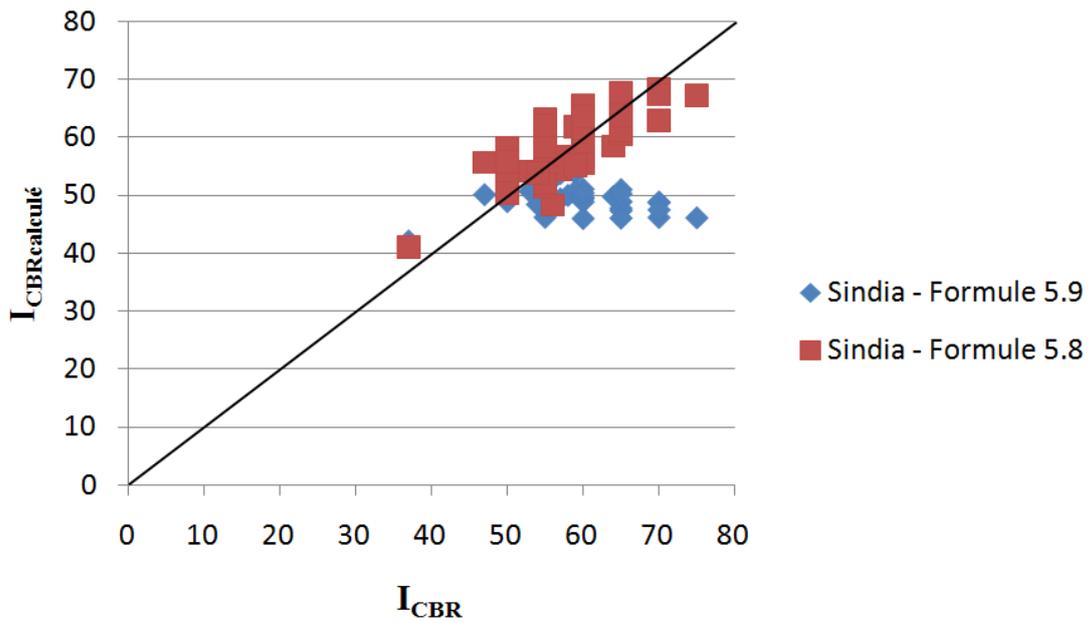


Figure 5.18. Comparaison entre l'indice CBR (mesuré) des données de Sindia et les indices CBR calculés par la relation (5.9) de Dougar et par la relation (5.8)

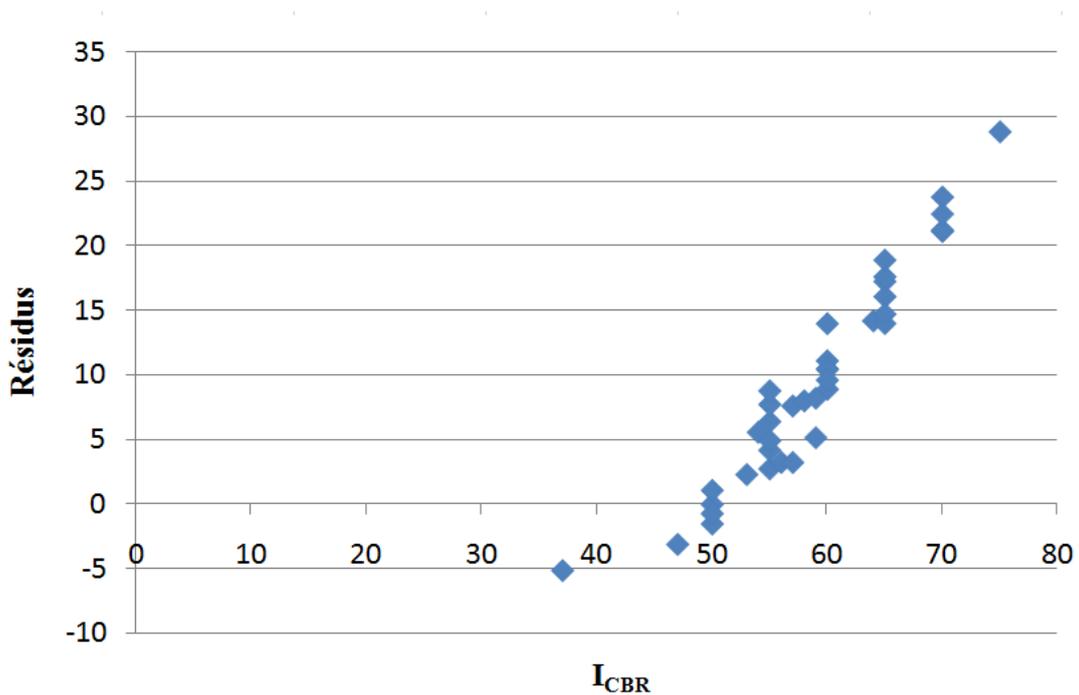


Figure 5.19. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

Les différences minimale et maximale (en valeur absolue) observées entre l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé par la relation (5.9) de Dougar valent respectivement 0,071 et 28,806, avec une moyenne de 10,078. Ces résultats confirment que l'on ne peut pas passer d'une carrière à l'autre.

5.3.5. Analyse de l'ensemble des données de Sindia et de Dougar

L'objet de cette partie de l'étude est d'établir une relation de régression sur l'ensemble des données des carrières de Sindia et de Dougar bien qu'elles aient des caractéristiques différentes. La relation établie sera ensuite comparée avec celles obtenues séparément sur la base des données de Sindia et de Dougar.

a) Première résolution

Le tableau 5.4 et la figure 5.20 indiquent les intervalles de variation des caractéristiques géotechniques des trente huit et quarante-six prélèvements en provenance respectivement des carrières latéritiques de Sindia et de Dougar.

Tableau 5.4. Intervalles de variation des caractéristiques géotechniques

	Analyse granulométrique (%)		Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95% OPM
	0,08mm	10mm		w_{OPM} (%)	ρ_{dOPM} (g/cm ³)	
Valeur minimale	9,05	61,07	9,72	7,40	1,83	37,00
Valeur maximale	47,17	91,65	24,09	13,50	2,17	75,00
Valeur moyenne	22,50	78,91	15,68	10,49	2,04	53,35
Écart type	6,87	6,50	3,63	1,32	0,07	8,04
Intervalle de variation	9,05-47,17	61,07-91,65	9,72-24,09	7,40-13,50	1,83-2,17	37-75

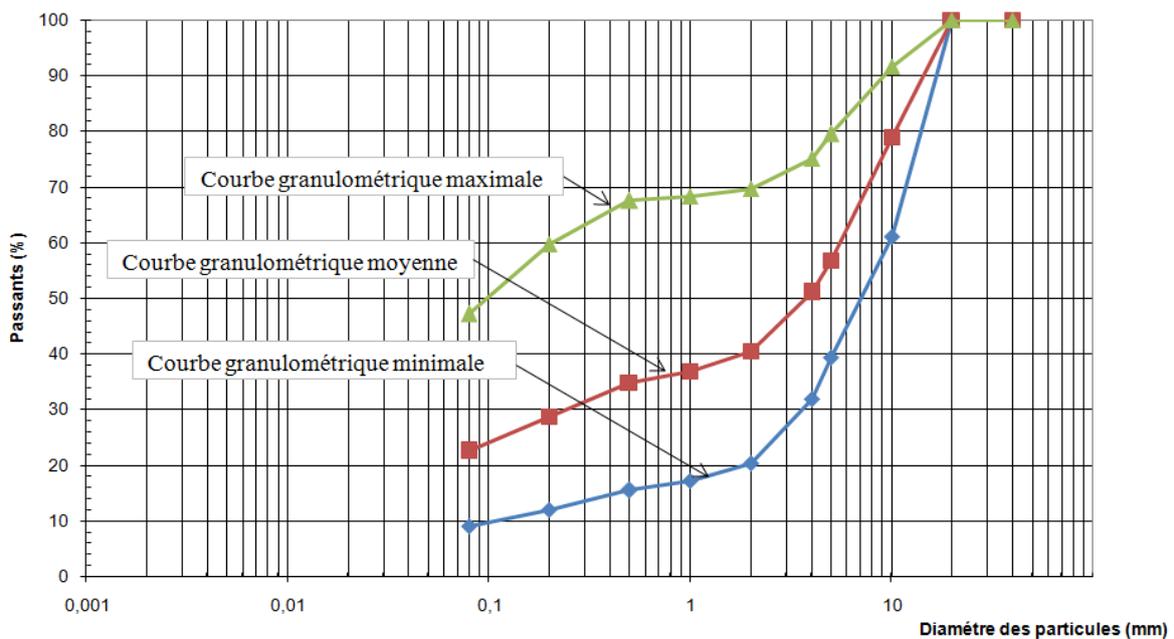


Figure 5.20. Fuseaux granulométriques des échantillons de Sindia et de Dougar

La figure 5.21 décrit la distribution des valeurs de l'indice CBR de l'ensemble des échantillons en provenance de Sindia et de Dougar.

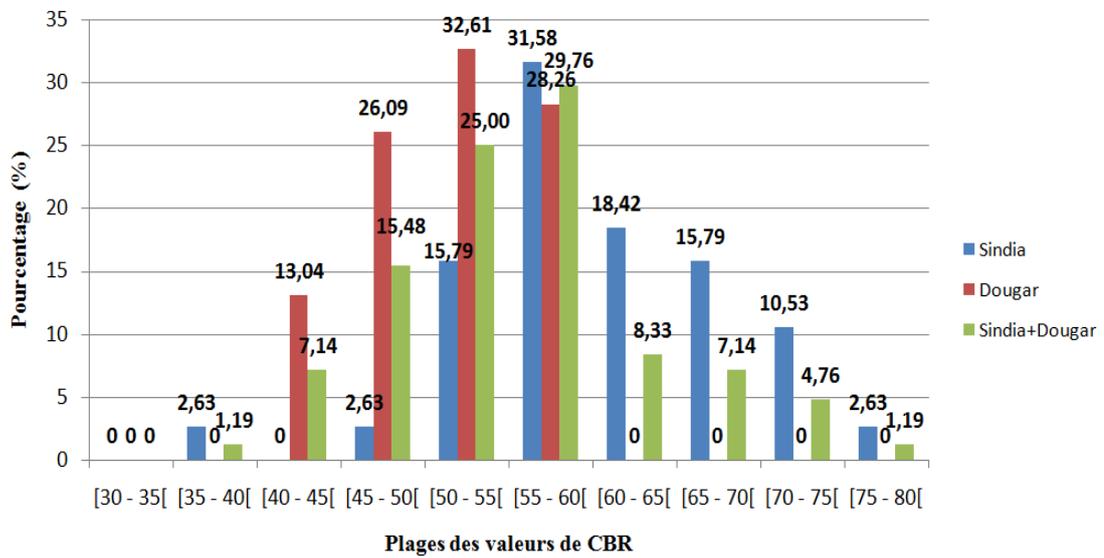


Figure 5.21. Distribution des valeurs de l'indice CBR des échantillons de Sindia et de Dougar

Les figures 5.22 et 5.23 montrent la distribution des points après résolution.

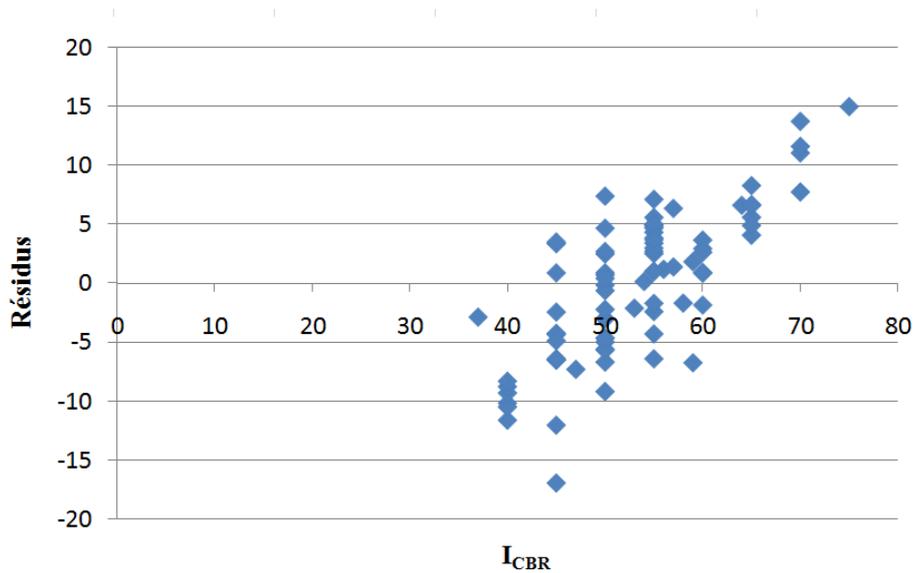


Figure 5.22. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

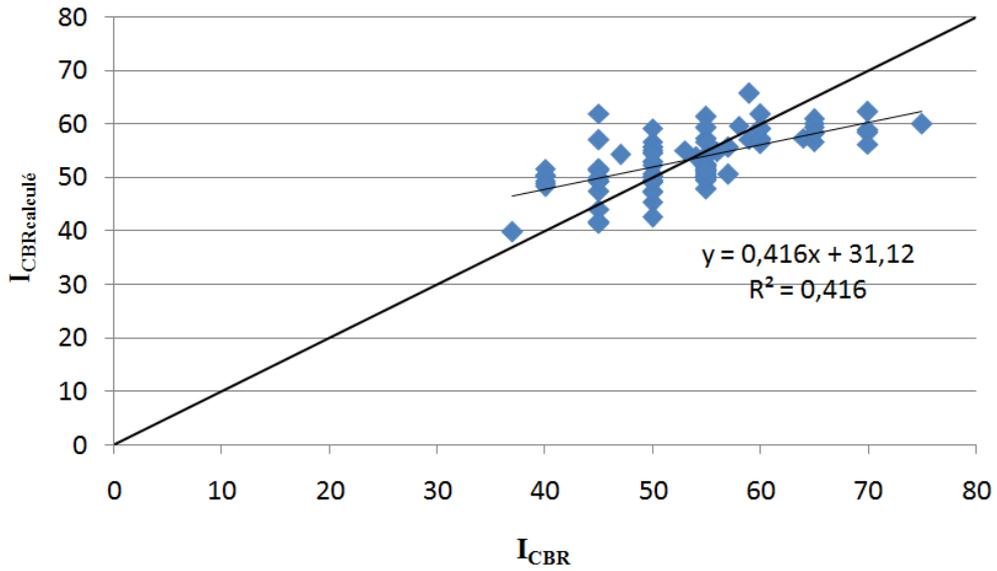


Figure 5.23. Relation entre l'indice CBR (mesuré) et l'indice CBR calculé

Après la résolution, les coefficients de Student des points S_{34} , S_{37} , S_{38} , D_3 et D_{17} dépassent la valeur limite (t') de 1,993 et ces points sont donc considérés comme atypiques (Figure 5.24).

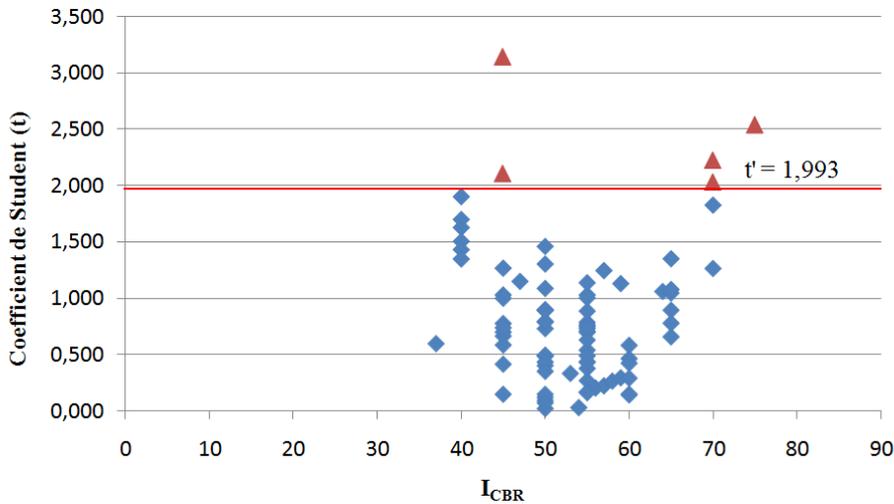


Figure 5.24. Représentation du coefficient de Student en fonction de l'indice CBR

Une deuxième résolution a été faite sans ces points.

b) Deuxième résolution

Le tableau 5.5 et les figures 5.25 et 5.26 présentent les caractéristiques des échantillons après la première résolution.

Tableau 5.5. Intervalles de variation des caractéristiques géotechniques – deuxième résolution

	Analyse granulométrique (%)		Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95% OPM
	0,08mm	10mm		W_{OPM} (%)	ρ_{dOPM} (g/cm ³)	
Valeur minimale	9,05	61,07	9,72	7,40	1,83	37,00
Valeur maximale	47,17	90,20	24,09	13,50	2,16	70,00
Valeur moyenne	22,88	78,81	15,78	10,50	2,04	52,86
Écart type	6,86	6,51	3,69	1,36	0,07	7,33
Intervalle de variation	9,05-47,17	61,07-90,20	9,72-24,09	7,40-13,50	1,83-2,16	37-70

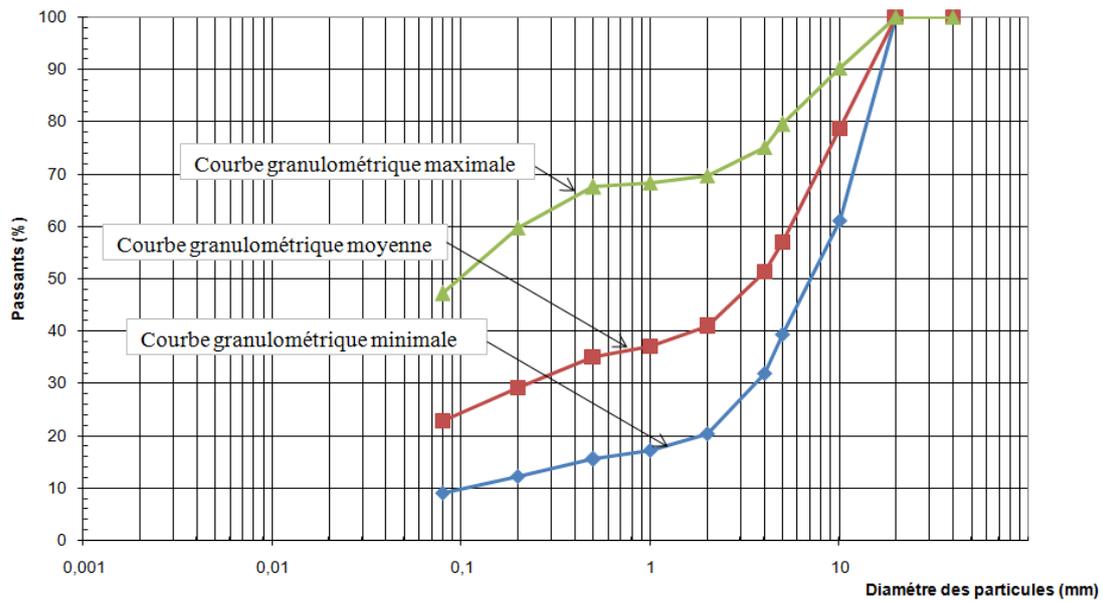


Figure 5.25. Fuseaux granulométriques des échantillons de Sindia et de Dougar (deuxième résolution)

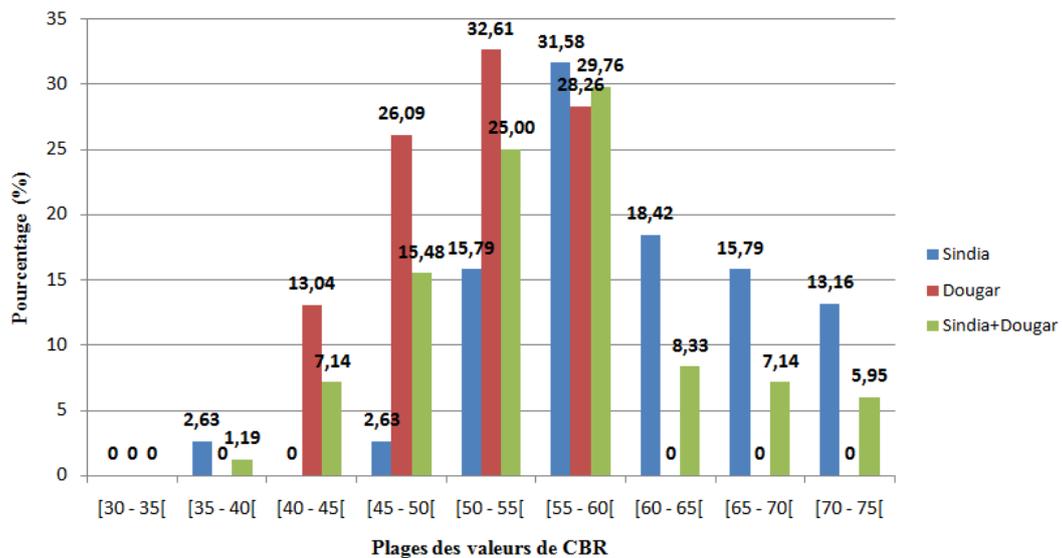


Figure 5.26. Distribution des valeurs de l'indice CBR des échantillons de Sindia et de Dougar (deuxième résolution)

Les figures 5.27 et 5.28 montrent la distribution des points après résolution.

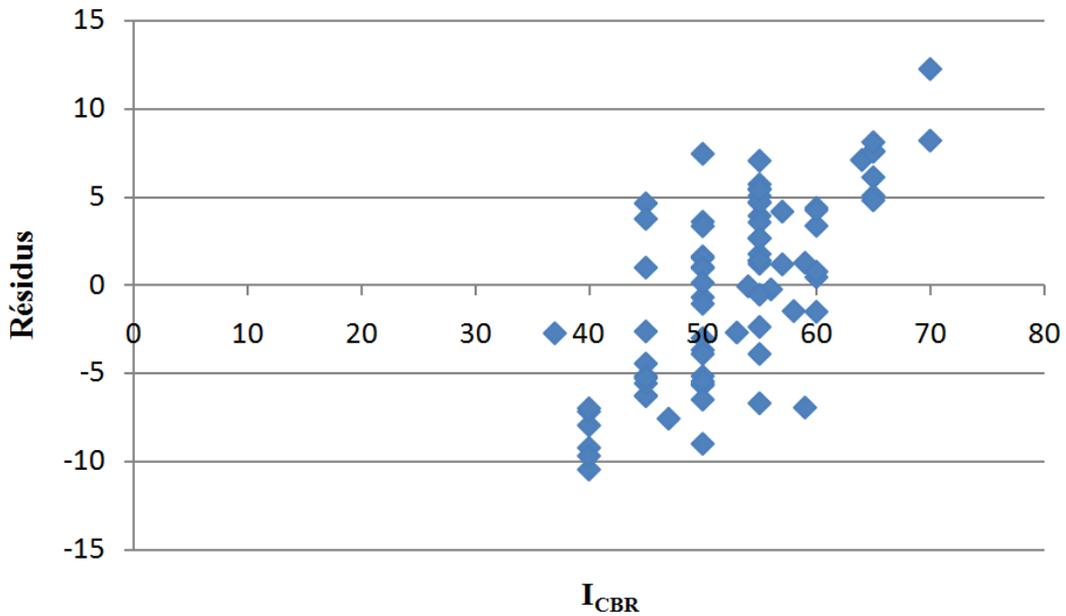


Figure 5.27. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

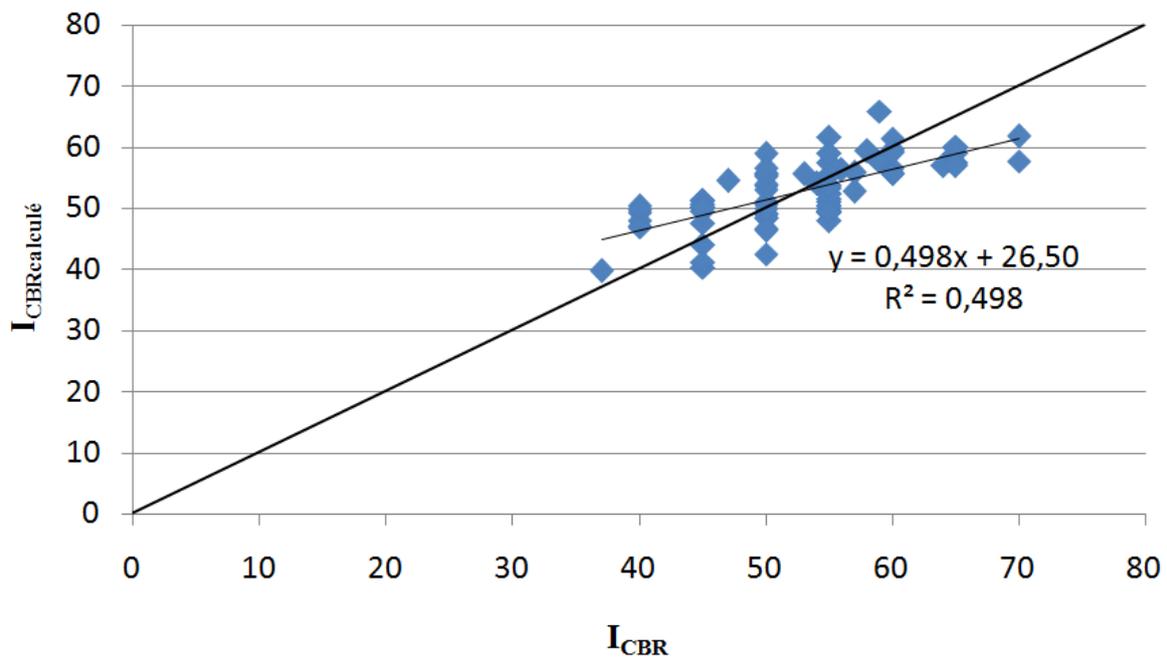


Figure 5.28. Relation entre l'indice CBR (mesuré) et l'indice CBR calculé

Après la résolution, les coefficients de Student des points S₃₅ et D₂ dépassent la valeur limite (t') de 1,995 et ces points sont donc considérés comme atypiques (Figure 5.29).

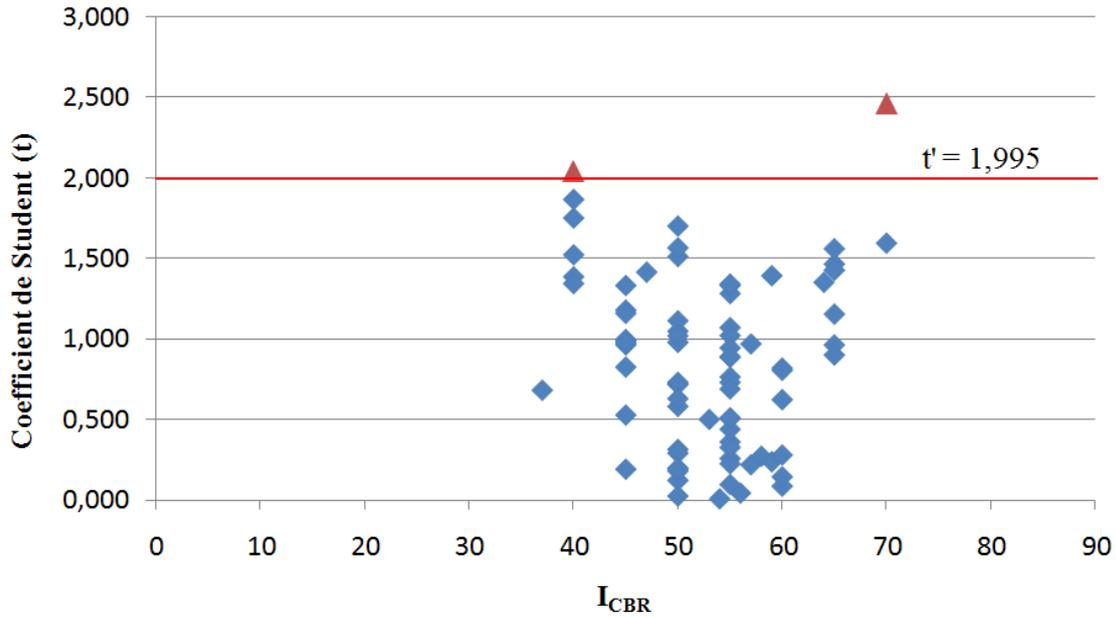


Figure 5.29. Représentation du coefficient de Student en fonction de l'indice CBR

Une troisième résolution a donc été faite sans ces points atypiques.

c) Troisième résolution

Le tableau 5.6 et les figures 5.30 et 5.31 présentent les caractéristiques des échantillons après la deuxième résolution.

Tableau 5.6. Intervalles de variation des caractéristiques géotechniques – troisième résolution

	Analyse granulométrique (%)		Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95% OPM
	0,08mm	10mm		w_{OPM} (%)	ρ_{dOPM} (g/cm ³)	
Valeur minimale	11,30	61,07	9,72	7,40	1,83	37,00
Valeur maximale	47,17	90,20	24,09	13,50	2,16	70,00
Valeur moyenne	23,04	78,97	15,82	10,50	2,04	52,81
Écart type	6,76	6,52	3,73	1,37	0,07	7,00
Intervalle de variation	11,30-47,17	61,07-90,20	9,72-24,09	7,40-13,50	1,83-2,16	37-70

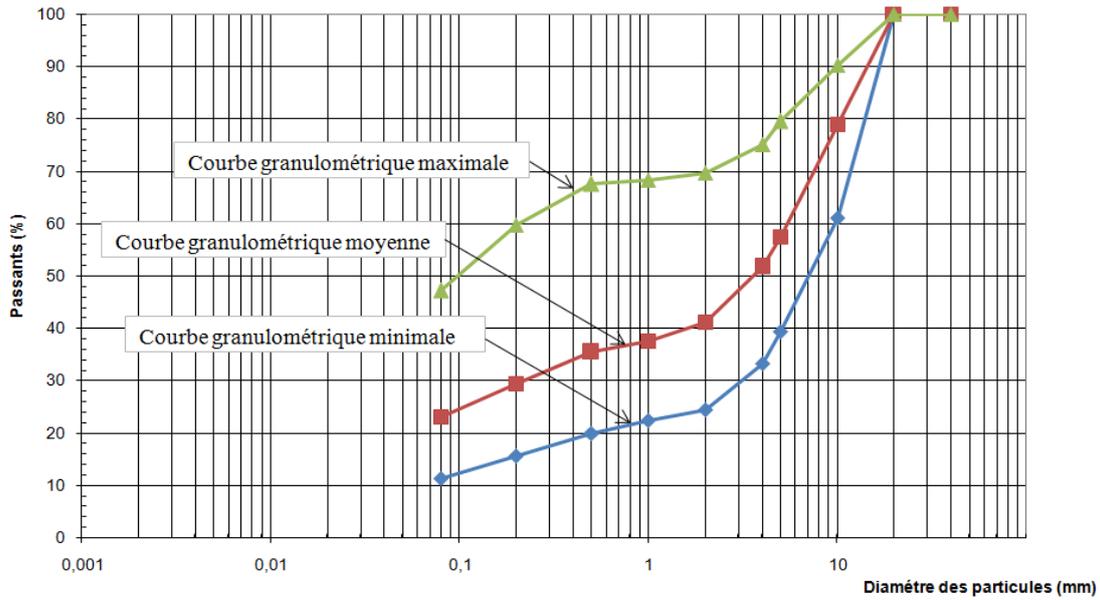


Figure 5.30. Fuseaux granulométriques des échantillons de Sindia et de Dougar (troisième résolution)

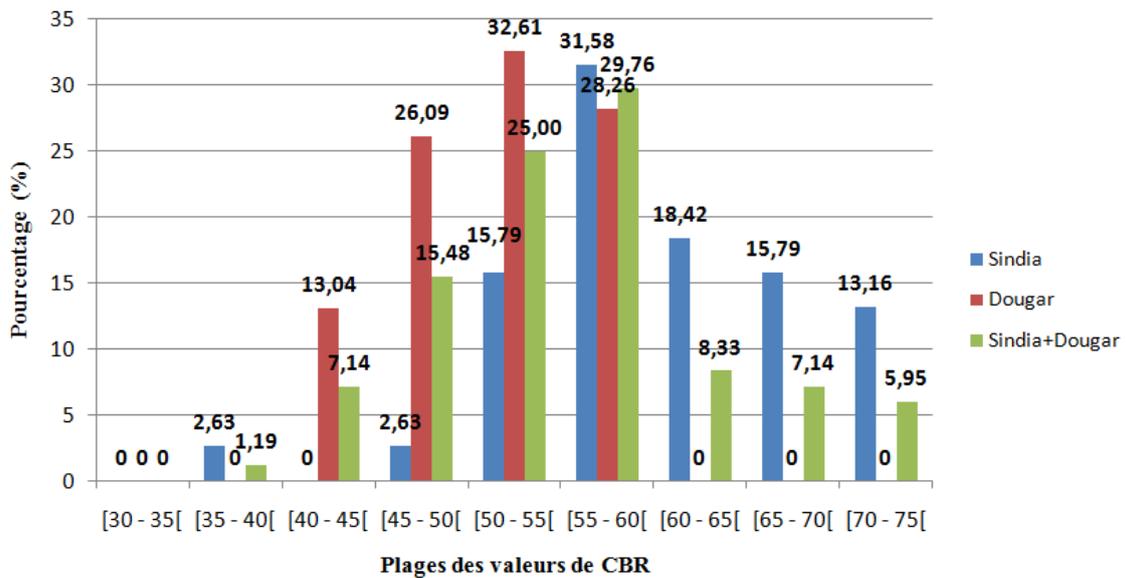


Figure 5.31. Distribution des valeurs de l'indice CBR des échantillons de Sindia et de Dougar (troisième résolution)

Les figures 5.32 et 5.33 montrent la distribution des points après résolution.

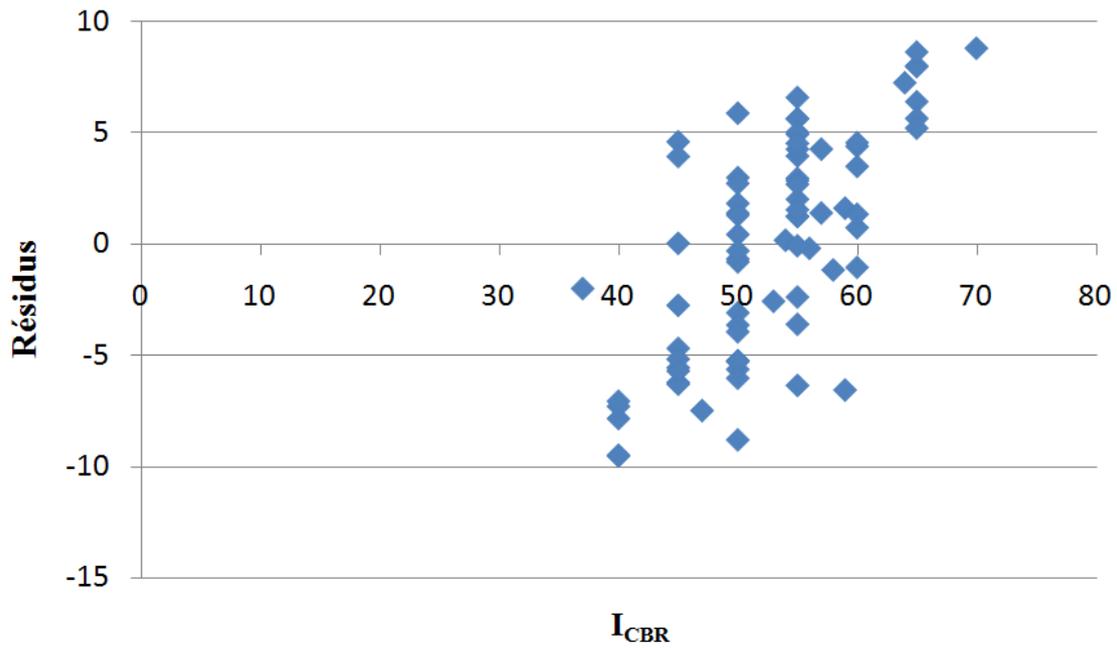


Figure 5.32. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

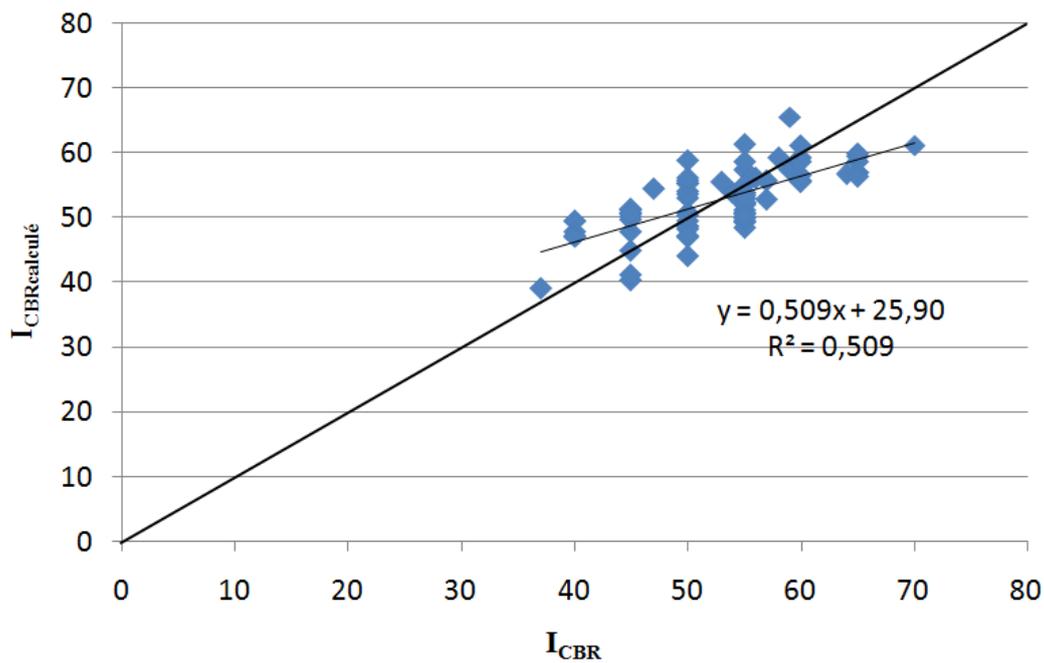


Figure 5.33. Relation entre l'indice CBR (mesuré) et l'indice CBR calculé

Après la résolution, tous les coefficients de Student sont inférieurs à la valeur limite (t') de 1,996 (Figure 5.34). Il n'y a donc plus de points atypiques.

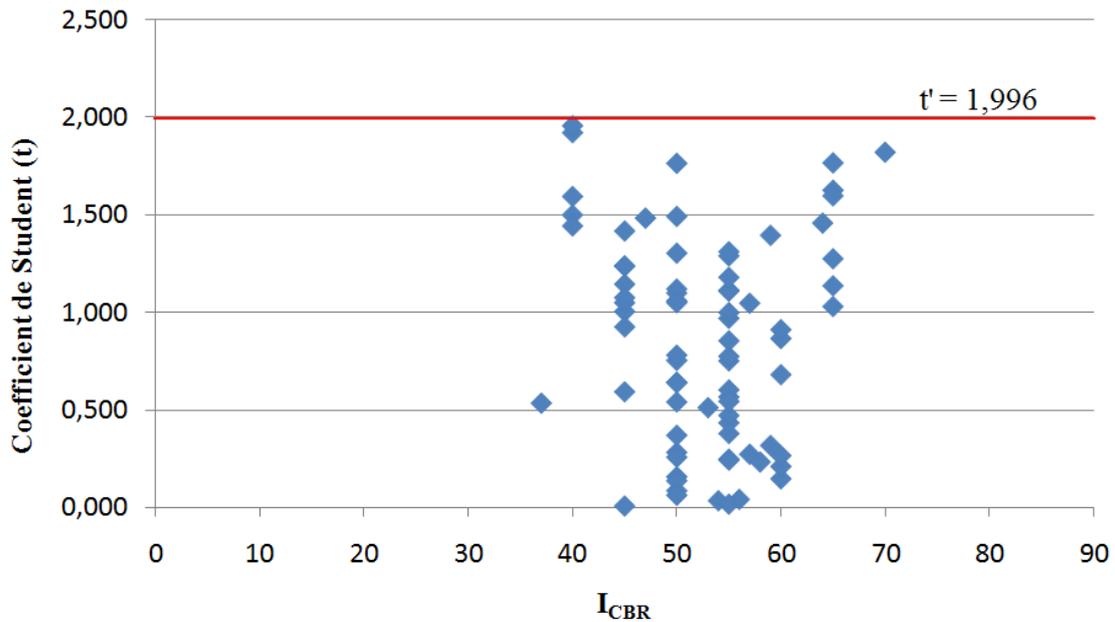


Figure 5.34. Représentation du coefficient de Student en fonction de l'indice CBR

La relation suivante a été obtenue :

$$I_{\text{CBR}} = 20,222 - 0,545P_{0,08\text{mm}} + 0,321P_{0,2\text{mm}} - 3,300P_{0,5\text{mm}} + 3,291P_{1\text{mm}} + 0,548P_{2\text{mm}} + 0,156P_{4\text{mm}} - 1,356P_{5\text{mm}} + 0,967P_{10\text{mm}} \quad (5.10)$$

avec $R^2 = 0,509$,

où R^2 désigne le coefficient de détermination et P_i les passants aux tamis de 0,08 - 0,2 - 0,5 - 1 - 2 - 4 - 5 et 10 mm.

Les différences minimale et maximale observées entre l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé valent respectivement 0,030 et 9,519, avec une moyenne de 4,150.

5.3.6. Comparaison des valeurs de l'indice CBR calculé par les relations (5.8), (5.9) et (5.10)

L'objectif est de comparer les valeurs de l'indice CBR calculé par la relation (5.10), établie avec l'ensemble des données de Sindia et de Dougar, avec celles obtenues par les relations (5.8) et (5.9) établies respectivement avec les données de Sindia et de Dougar.

Les écarts minimaux, moyens et maximaux entre la valeur de l'indice CBR mesuré et les valeurs de l'indice CBR calculées par les trois relations restent généralement faibles (Tableau 5.7. et figures 5.35 et 5.36).

Tableau 5.7. Comparaison des erreurs commises par les relations (5.8), (5.9) et (5.10)

Carrières		Erreurs		
		minimale	moyenne	maximale
Sindia	Relation (5.8)	0,125	3,649	8,700
	Relation (5.10)	0,078	4,095	8,801
Dougar	Relation (5.9)	0,019	3,777	7,651
	Relation (5.10)	0,030	4,194	9,519
Sindia + Dougar	Relation (5.10)	0,030	4,150	9,519

Les écarts minimal et maximal (en valeurs absolues) entre l'indice CBR calculé par la relation (5.8) et celui calculé par la relation (5.10) sont respectivement 0,043 et 7,499 avec une moyenne de 2,770 (Figure 5.35).

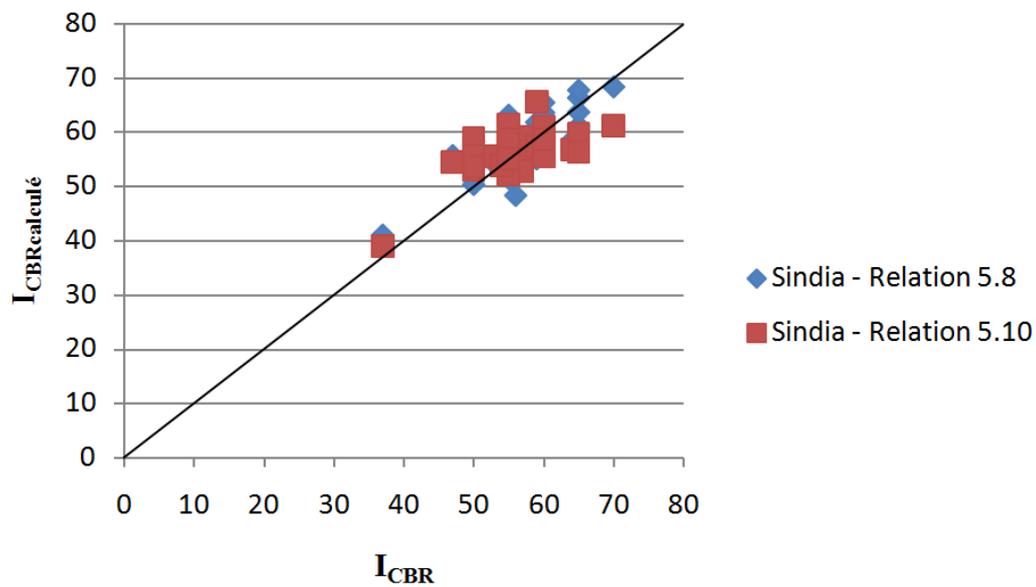


Figure 5.35a. Comparaison des valeurs de l'indice CBR calculées au moyen des relations (5.8) et (5.10) en fonction des valeurs de l'indice CBR (mesuré)

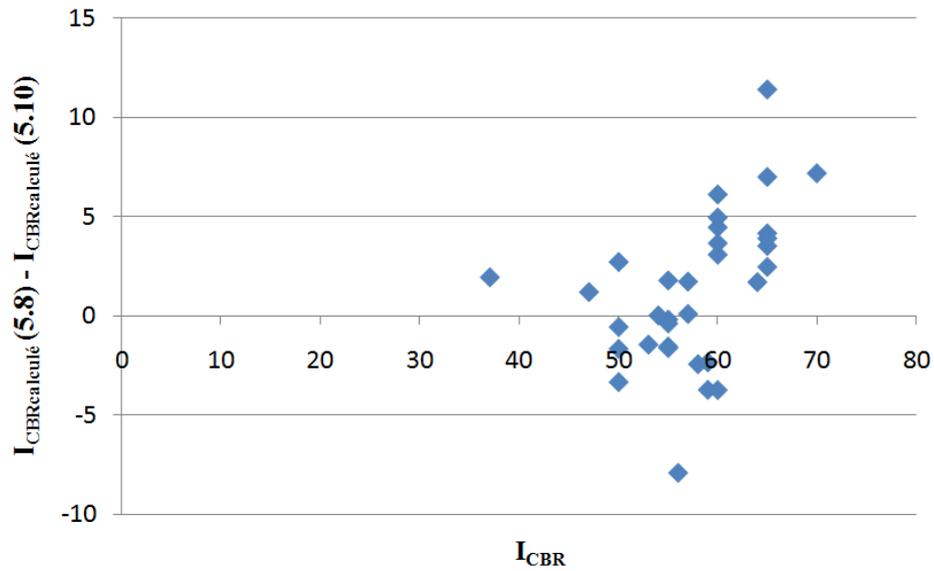


Figure 5.35b. Représentation de la différence des indices CBR calculés par les relations (5.8) et (5.10) en fonction des valeurs de l'indice CBR (mesuré)

Les écarts minimal et maximal (en valeurs absolues) entre l'indice CBR calculé par la relation (5.9) et celui calculé par la relation (5.10) valent respectivement 0,027 et 5,258, avec une moyenne de 2,228 (Figure 5.36).

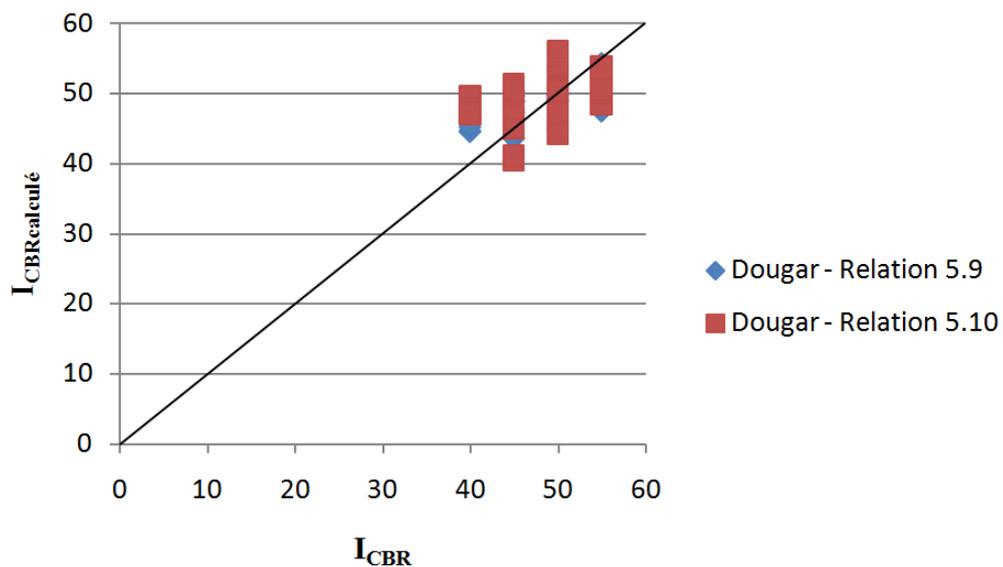


Figure 5.36a. Comparaison des valeurs de l'indice CBR calculées au moyen des relations (5.9) et (5.10) en fonction des valeurs de l'indice CBR (mesuré)

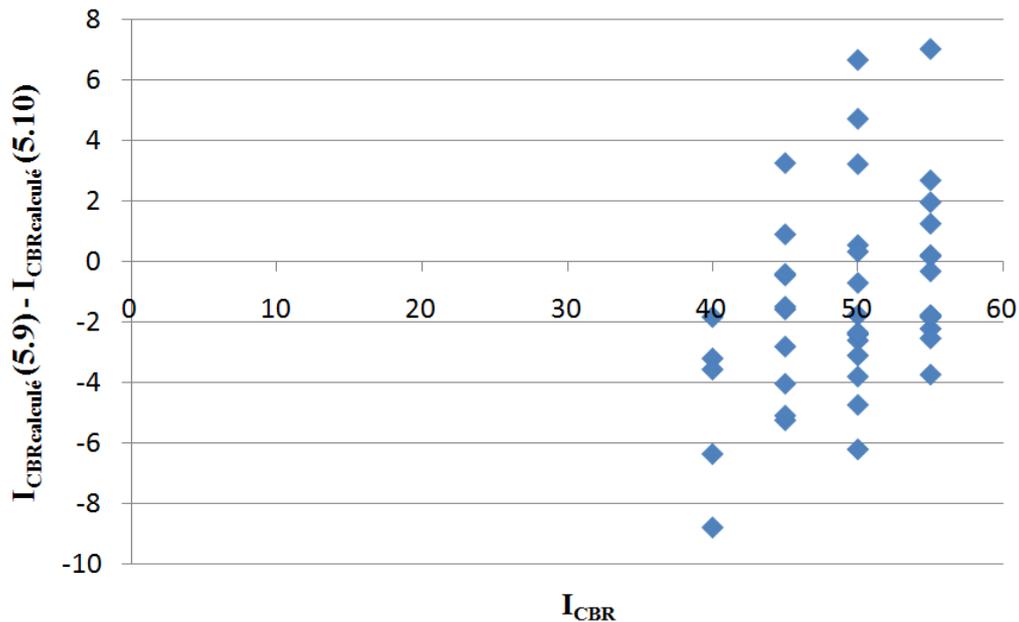


Figure 5.36b. Représentation de la différence des indices CBR calculés par les relations (5.9) et (5.10) en fonction des valeurs de l'indice CBR (mesuré)

Cette étude montre qu'on n'observe pas de grande différence entre les valeurs calculées de l'indice CBR obtenues par les relations (5.8) et (5.10), d'une part, et par les relations (5.9) et (5.10), d'autre part. Ces observations peuvent être liées au fait que, malgré les différences de nature des matériaux latéritiques de Sindia et de Dougar, ils présentent des caractéristiques granulométriques et des valeurs d'indices CBR proches.

5.4. Estimation de la valeur de l'indice CBR à partir des caractéristiques d'analyse granulométrique, de limites d'Atterberg et de compactage Proctor

Les variables utilisées pour l'analyse précédente étant les points d'une courbe, dont les valeurs ne sont pas totalement indépendantes (fonction croissante), nous avons voulu tester d'autres paramètres représentatifs de la courbe granulométrique, considérés comme plus indépendants et permettant de plus de ne pas limiter a priori les dimensions des particules.

Cette partie de l'étude vise donc à établir une relation de régression entre l'indice CBR et les paramètres suivants : le passant au tamis de $80\mu\text{m}$ ($C_{0,08\text{mm}}$), deux caractéristiques d'étendue et de courbure (C_{UL} et C_{CL}), l'indice de plasticité (I_p) et les caractéristiques de l'optimum Proctor (w_{OPM} et ρ_{dOPM}). Ce choix est dû au fait que l'on ne dispose en général pas de la valeur de D_{10} sur les courbes granulométriques.

Le coefficient d'étendue des tailles des particules (C_{UL}) et le coefficient de forme de la courbe granulométrique (C_{CL}) sont définis par les relations suivantes :

$$C_{UL} = \frac{D_{90}}{0,08} \quad \text{et} \quad C_{CL} = \frac{C_{0,08mm} * C_{10mm}}{C_{2mm}^2} \quad (5.11)$$

où D_{90} est le diamètre des particules correspondants à 90% de passant et $C_{0,08mm}$, C_{2mm} et C_{10mm} sont les passants respectifs aux tamis de 80 μ m, 2mm et 10mm.

5.4.1. Études des données relatives à la latérite de Sindia

La résolution a été faite en trois étapes afin d'éliminer les points atypiques.

a) Première résolution

La figure 5.37 montre la variation du résidu en fonction de la valeur de l'indice CBR et la figure 5.38 la relation entre l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé.

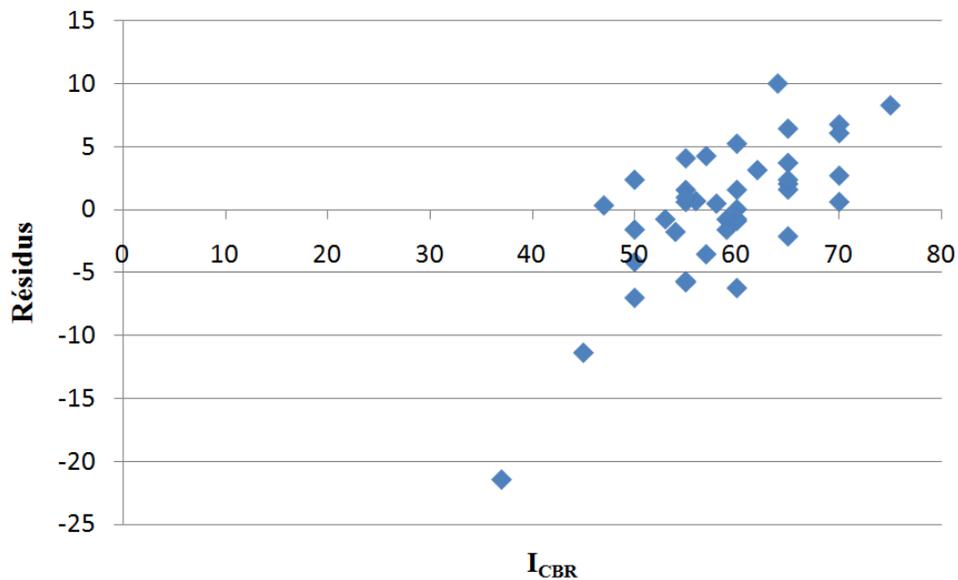


Figure 5.37. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

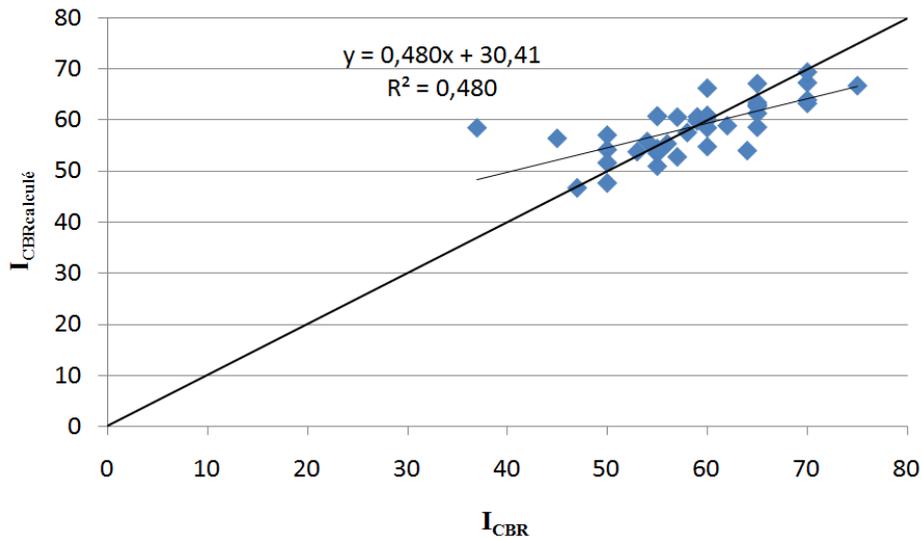


Figure 5.38. Relation entre l'indice CBR (mesuré) et l'indice CBR calculé

Le test de Student montre que les points S_{17} et S_{18} sont des points atypiques (Figure 5.39).

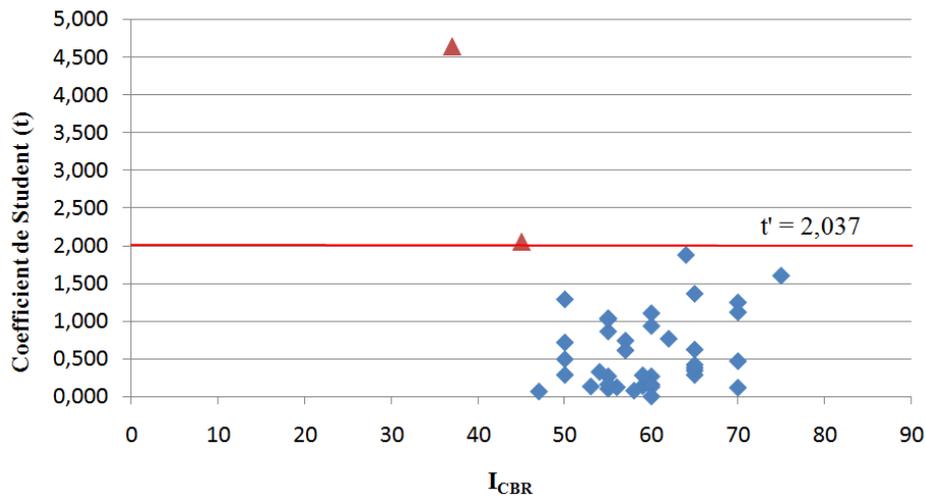


Figure 5.39. Représentation du coefficient de Student en fonction de l'indice CBR

Une deuxième résolution a été faite sans ces points atypiques.

b) Deuxième résolution

La figure 5.40 montre la variation du résidu en fonction de la valeur de l'indice CBR et la figure 5.41 la relation entre l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé.

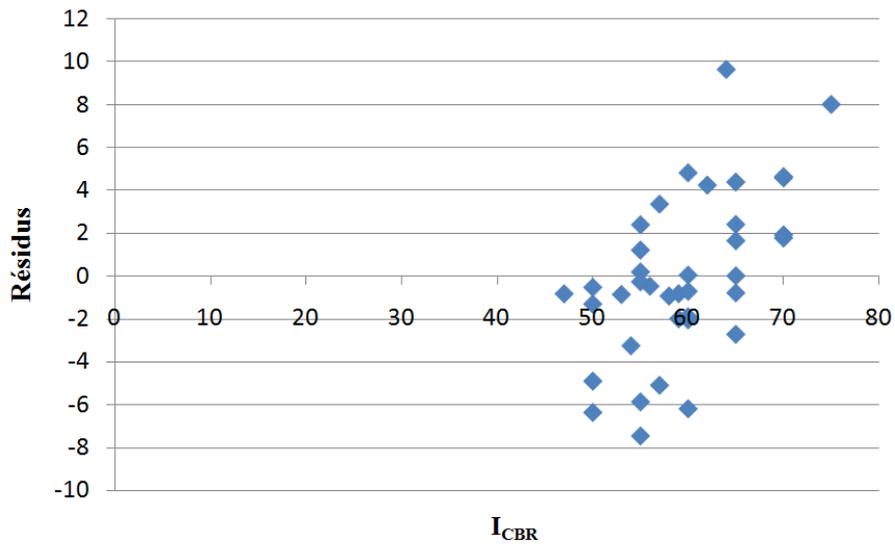


Figure 5.40. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

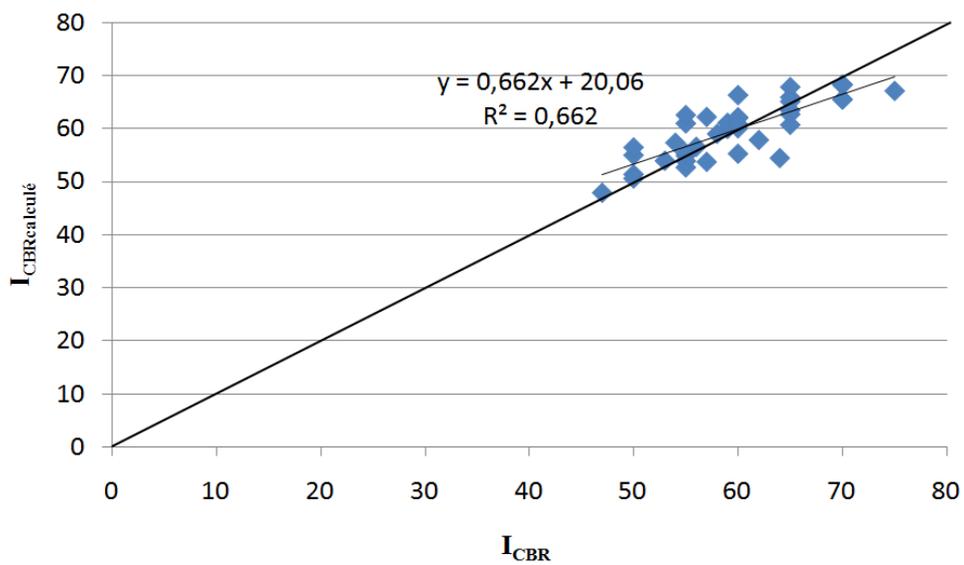


Figure 5.41. Relation entre l'indice CBR (mesuré) et l'indice CBR calculé

Après résolution, les coefficients de Student des points S_9 , S_{34} et S_{40} dépassent la valeur limite (t') de 2,042 et ces points sont donc considérés comme atypiques (Figure 5.42).

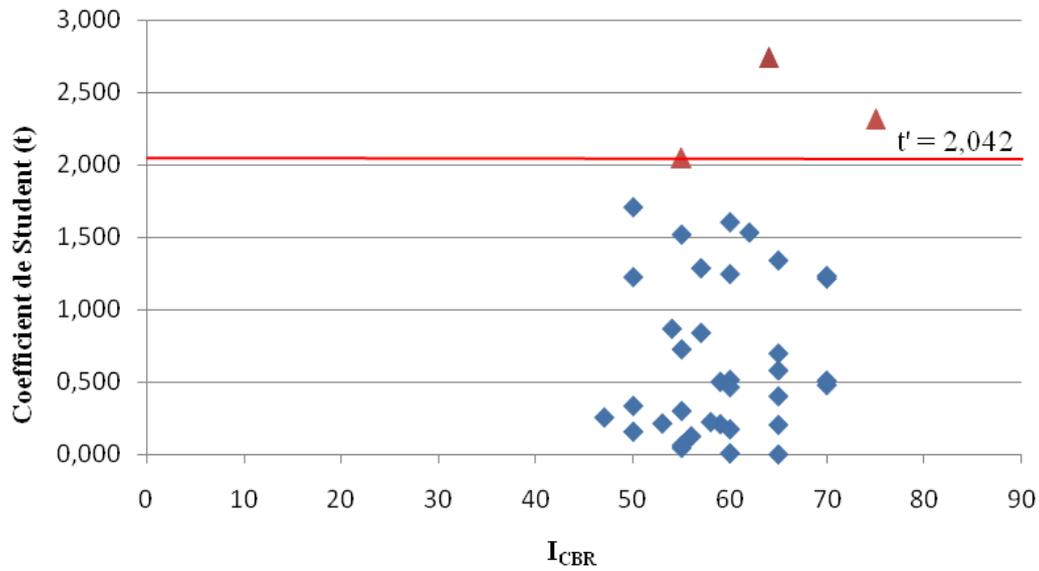


Figure 5.42. Représentation du coefficient de Student en fonction de l'indice CBR

Une troisième résolution, qui n'a plus produit de points atypiques, a été faite sans ces points.

c) Troisième résolution

Les figures 5.43 à 5.48 présentent les relations existant entre l'indice CBR et chacun des paramètres $C_{0,08mm}$, C_{UL} , C_{CL} , I_p , w_{OPM} et ρ_{dOPM} .

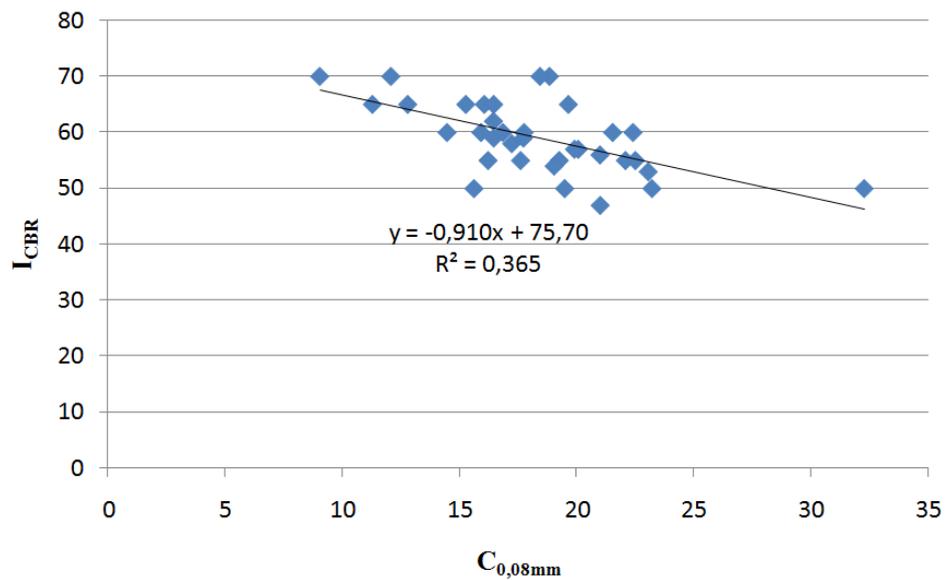


Figure 5.43. Relation entre le pourcentage de fines ($C_{0,08mm}$) et l'indice CBR

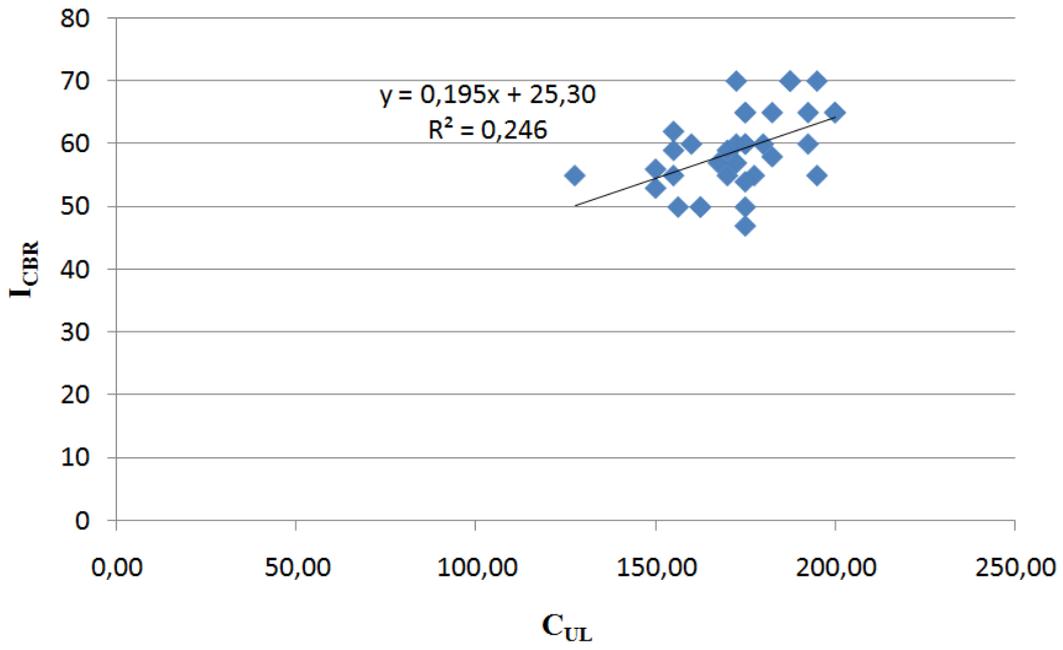


Figure 5.44. Relation entre le coefficient C_{UL} et l'indice CBR

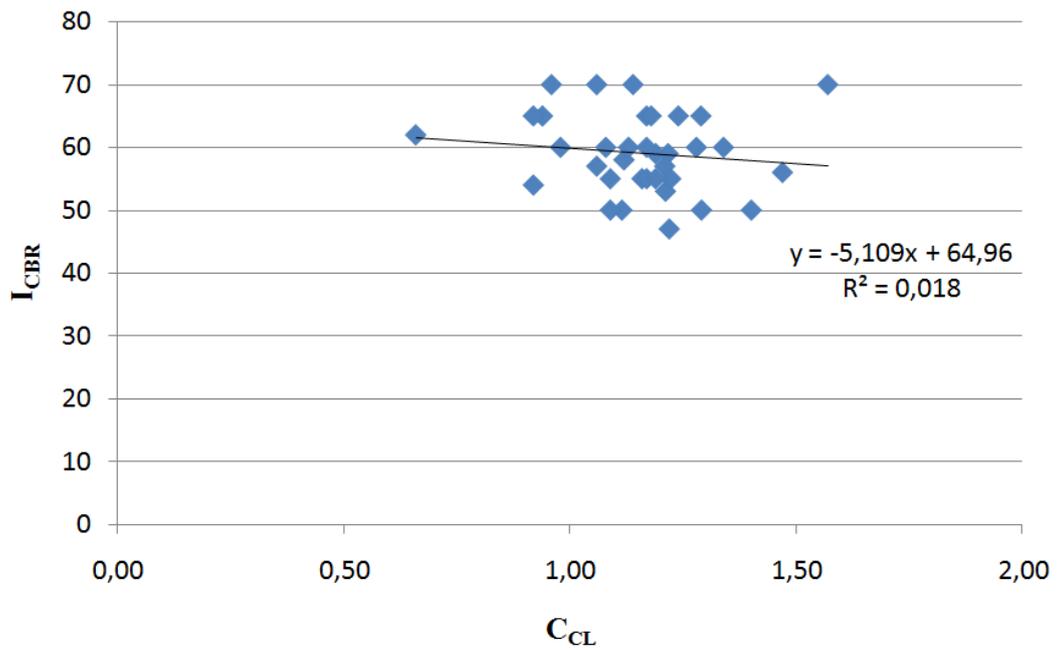


Figure 5.45. Relation entre le coefficient C_{CL} et l'indice CBR

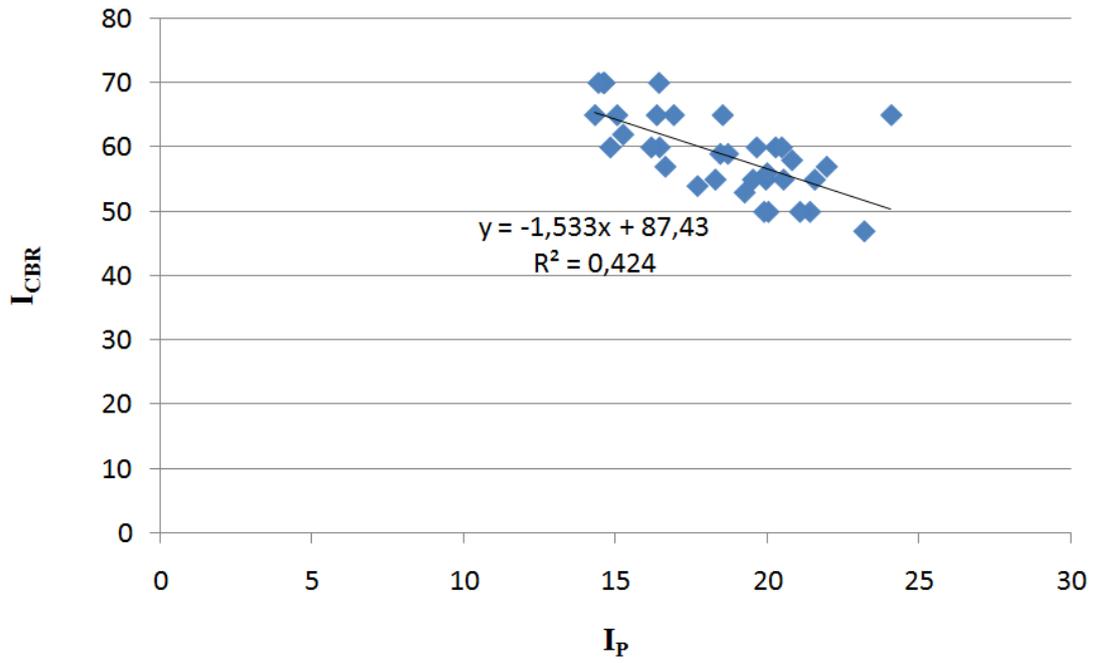


Figure 5.46. Relation entre l'indice de plasticité I_p et l'indice CBR

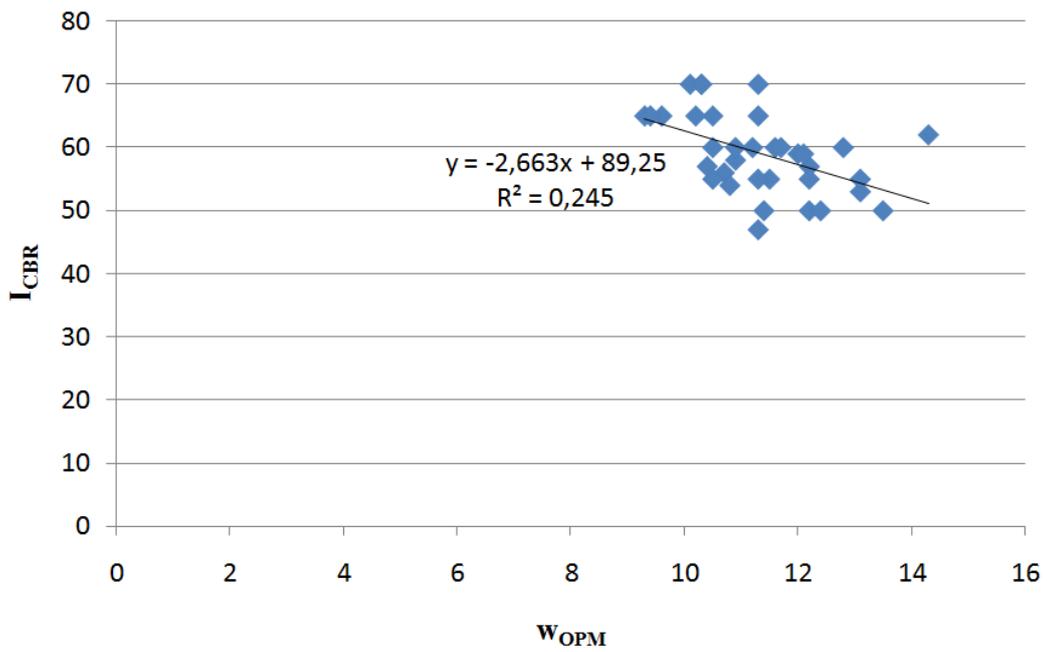


Figure 5.47. Relation entre la teneur en eau optimale w_{OPM} et l'indice CBR

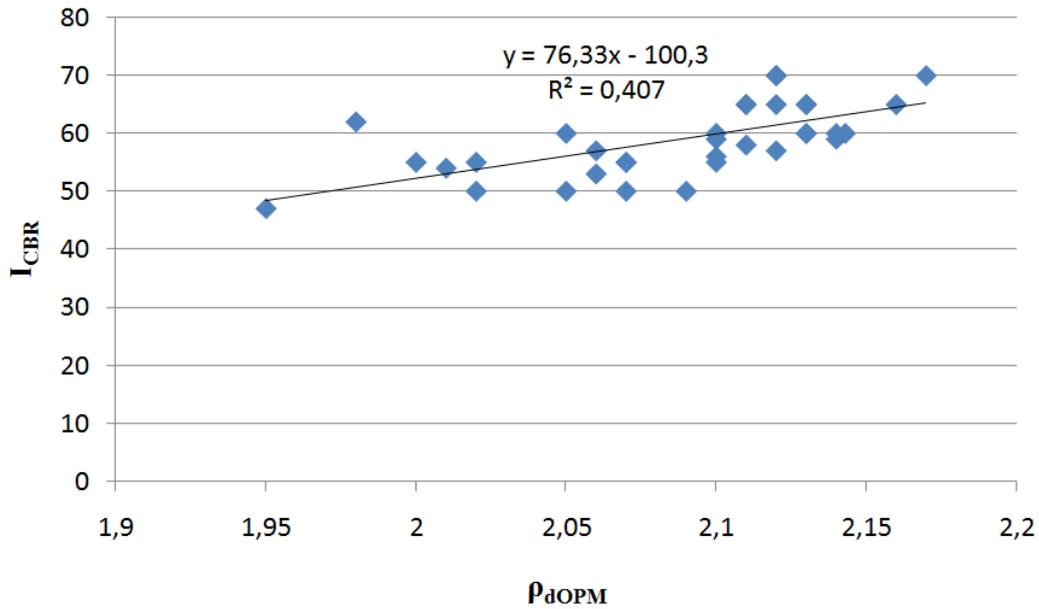


Figure 5.48. Relation entre la masse volumique sèche optimale ρ_{dOPM} et l'indice CBR

La figure 5.49 montre la variation du résidu en fonction de la valeur de l'indice CBR et la figure 5.50 la relation entre l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé.

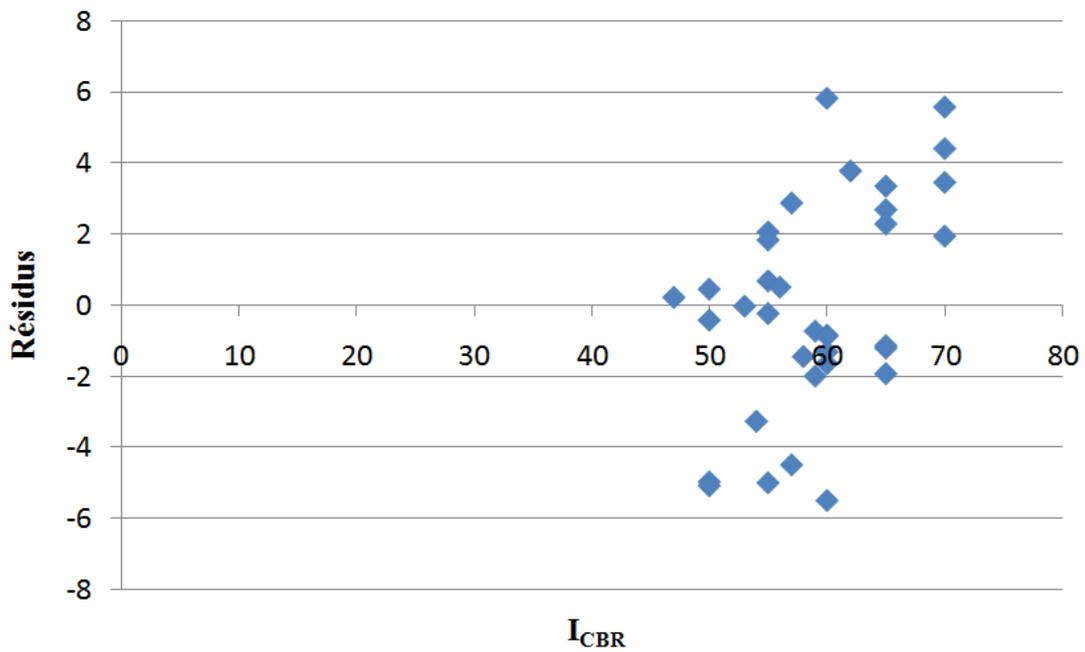


Figure 5.49. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

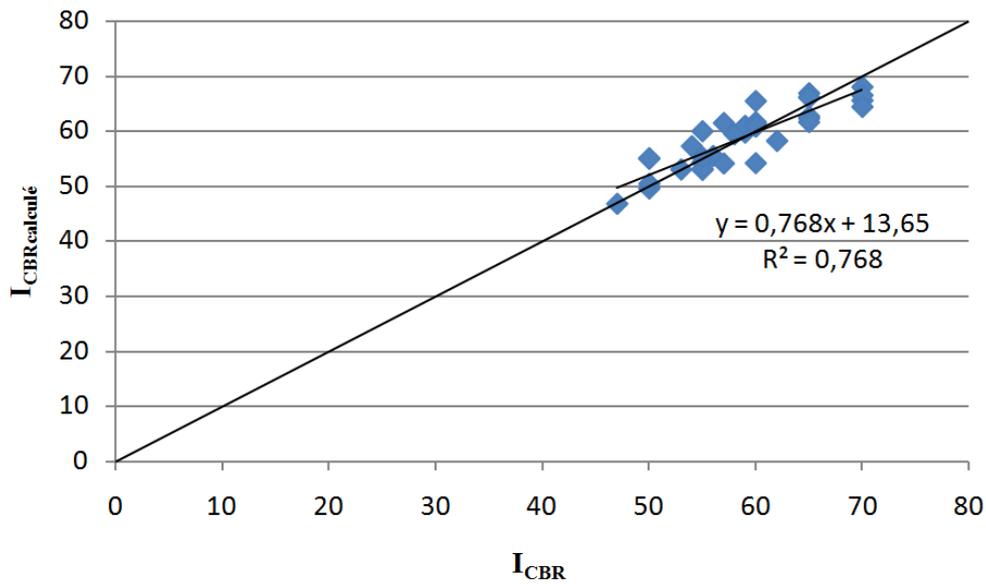


Figure 5.50. Relation entre l'indice CBR (mesuré) et l'indice CBR calculé

Après résolution, aucun point atypique n'a été observé (Figure 5.51).

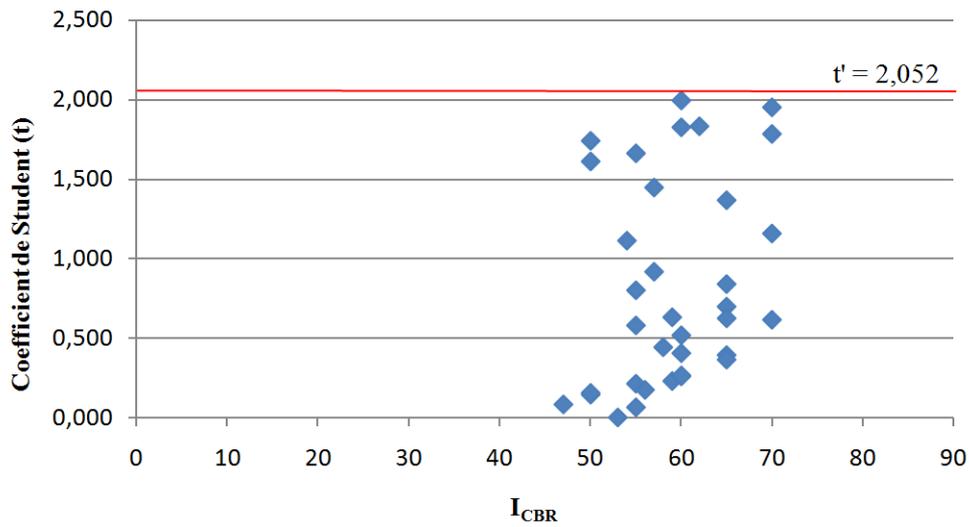


Figure 5.51. Représentation du coefficient de Student en fonction de l'indice CBR

La relation suivante a été obtenue :

$$I_{\text{CBR}} = -6,354 - 0,511C_{0,08\text{mm}} - 0,0005C_{\text{UL}} - 6,575C_{\text{CL}} - 0,757I_{\text{P}} - 0,697W_{\text{OPM}} + 49,958\rho_{\text{dOPM}} \quad (5.12)$$

avec $R^2 = 0,769$.

Les différences minimale et maximale observées entre les indices CBR mesuré et calculé valent respectivement 0,022 et 5,823, avec une moyenne de 2,399.

5.4.2. Études des données relatives à la latérite de Dougar

Les figures 5.52 à 5.57 présentent les relations existant entre l'indice CBR et chacun des paramètres $C_{0,08mm}$, C_{UL} , C_{CL} , I_p , W_{OPM} et ρ_{dOPM} .

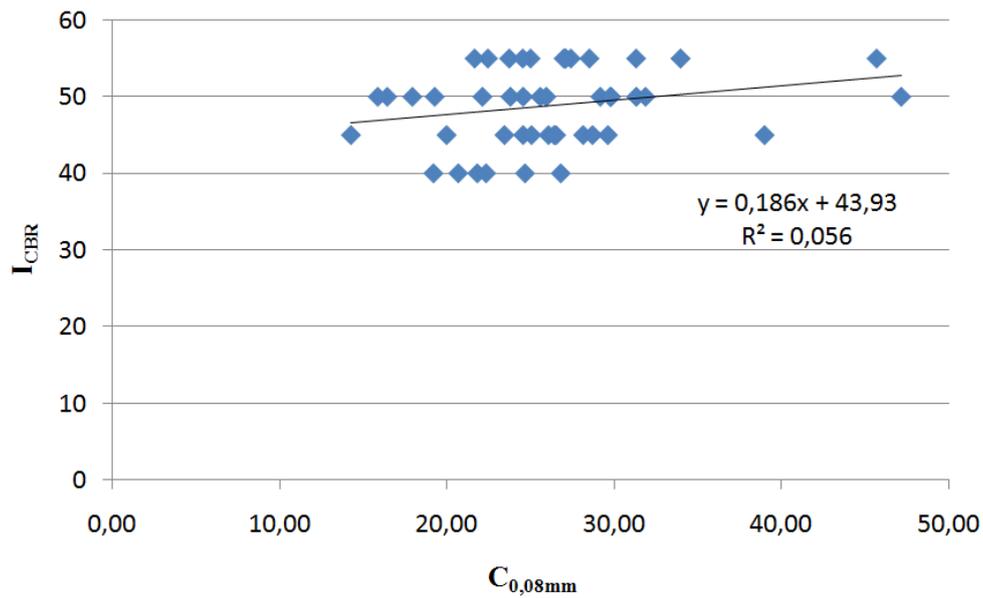


Figure 5.52. Relation entre le pourcentage de fines ($C_{0,08mm}$) et l'indice CBR

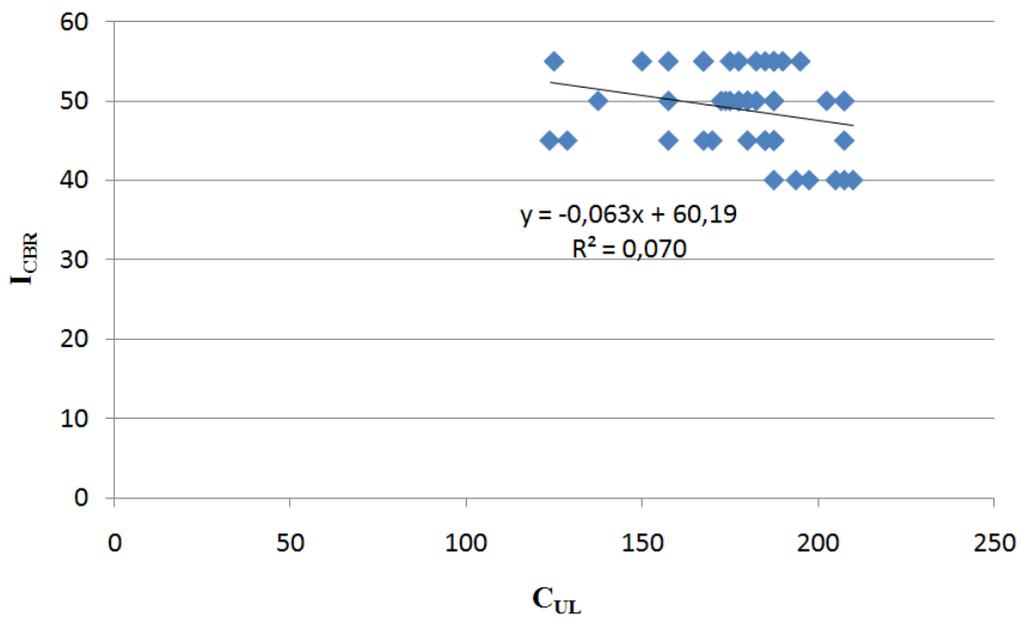


Figure 5.53. Relation entre le coefficient C_{UL} et l'indice CBR

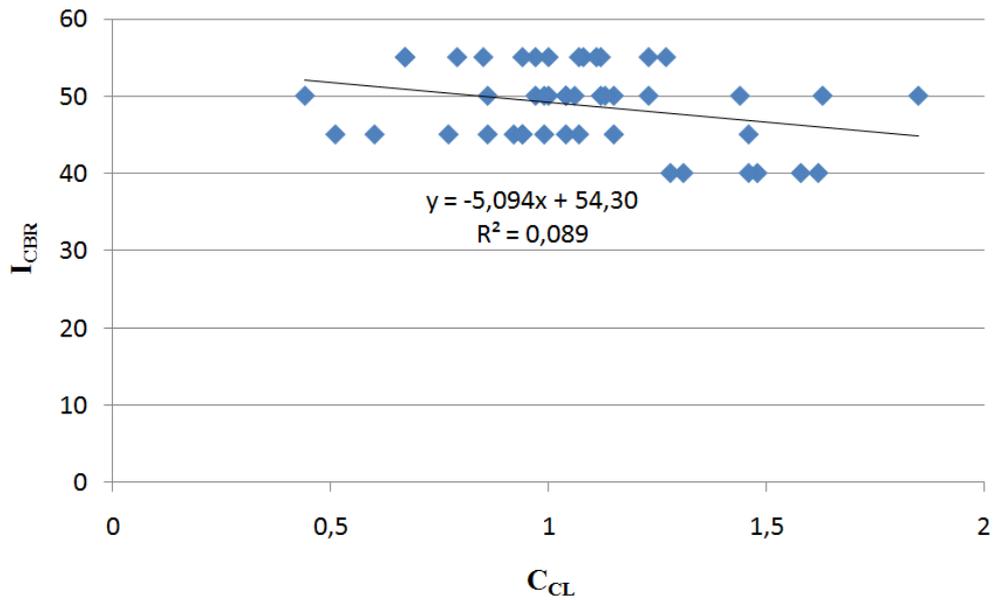


Figure 5.54. Relation entre le coefficient C_{CL} et l'indice CBR

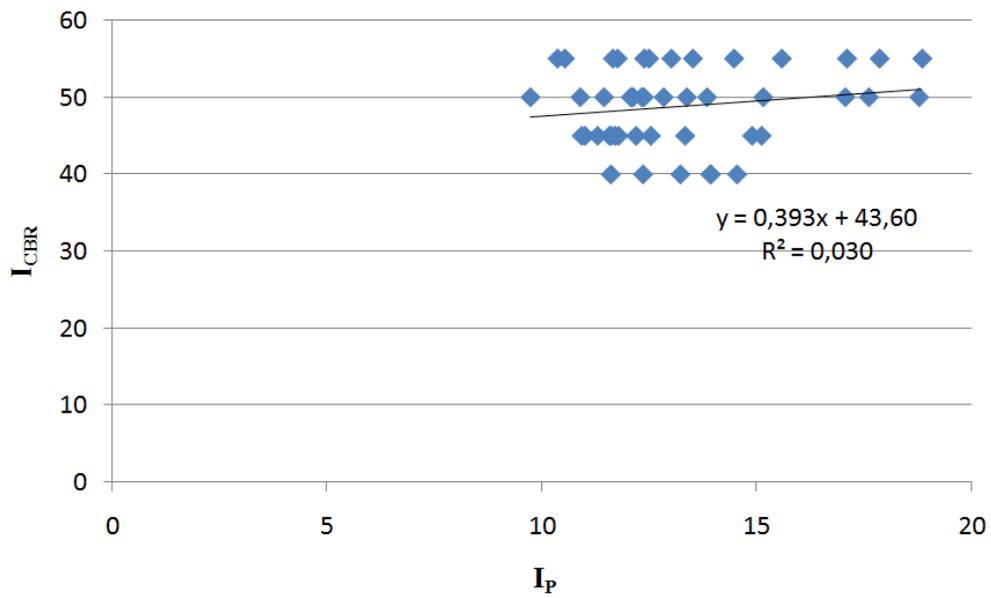


Figure 5.55. Relation entre l'indice de plasticité I_p et l'indice CBR

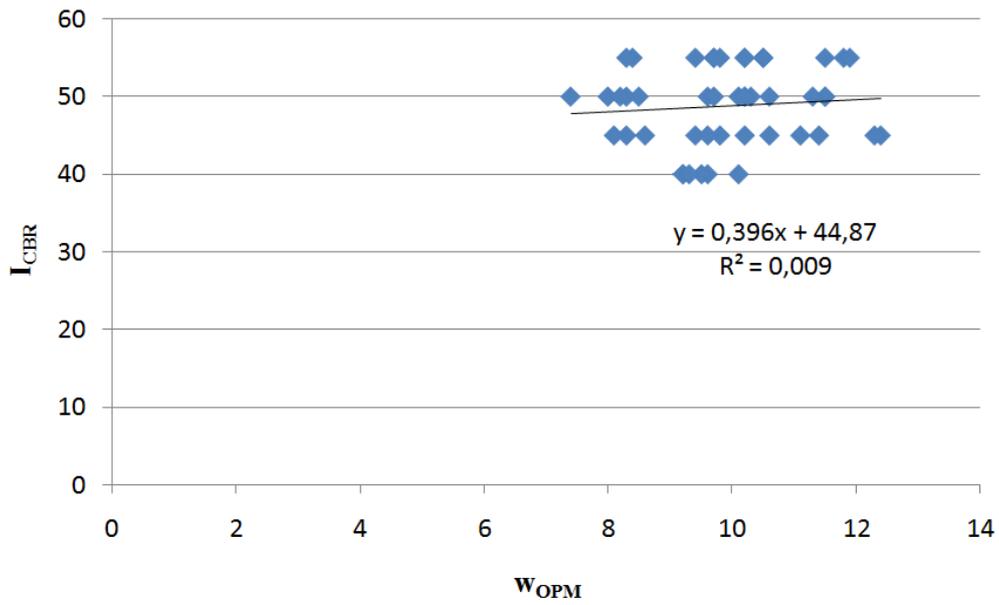


Figure 5.56. Relation entre la teneur en eau optimale w_{OPM} et l'indice CBR

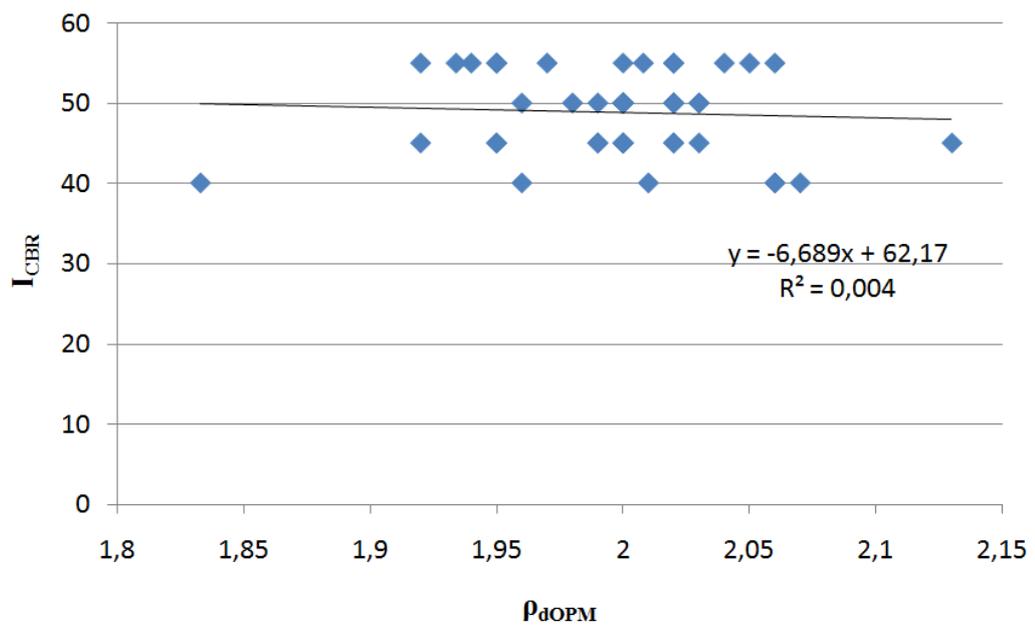


Figure 5.57. Relation entre la masse volumique sèche optimale ρ_{dOPM} et l'indice CBR

La figure 5.58 montre la variation du résidu en fonction de la valeur de l'indice CBR et la figure 5.59 la relation entre l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé.

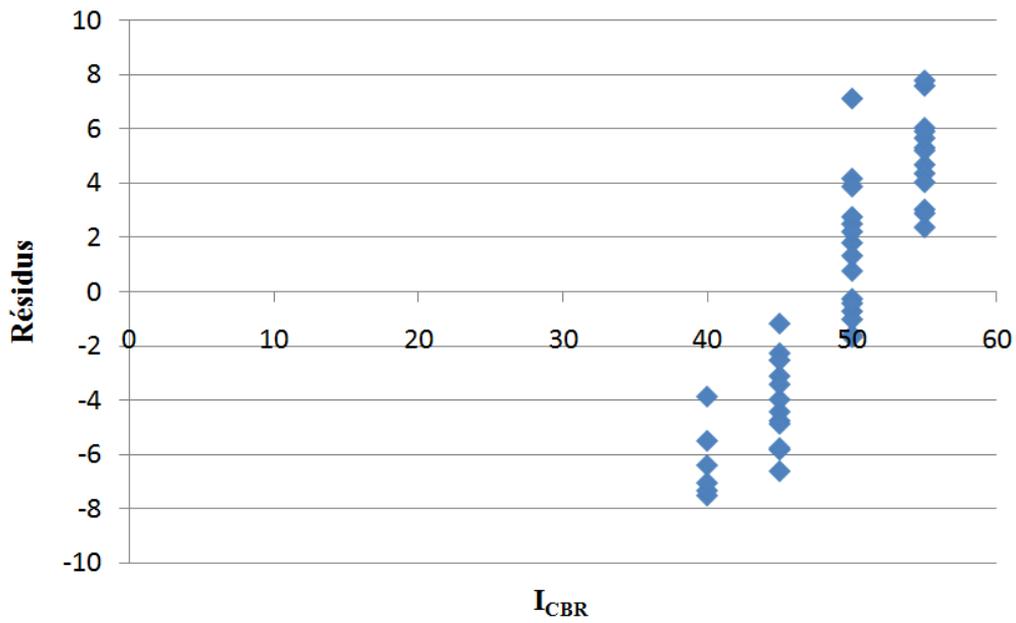


Figure 5.58. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

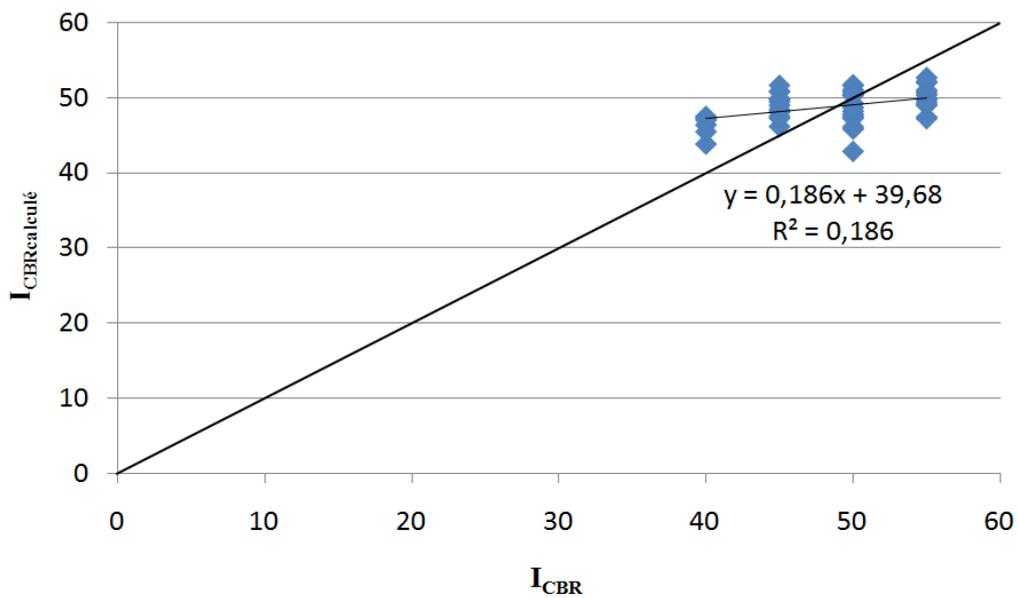


Figure 5.59. Relation entre l'indice CBR (mesuré) et l'indice CBR calculé

Après résolution, aucun point atypique n'a été observé (Figure 5.60).

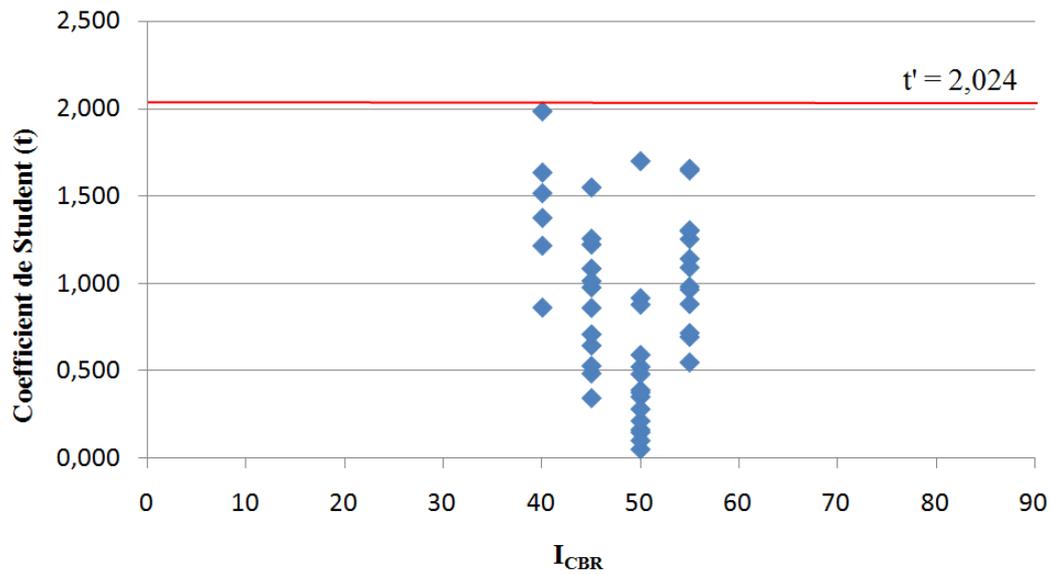


Figure 5.60. Représentation du coefficient de Student en fonction de l'indice CBR

La relation suivante a été obtenue :

$$I_{\text{CBR}} = 85,782 + 0,072C_{0,08\text{mm}} - 0,044C_{\text{UL}} - 3,878C_{\text{CL}} + 0,564I_{\text{P}} - 0,229w_{\text{OPM}} - 15,985\rho_{\text{dOPM}} \quad (5.13)$$

avec $R^2 = 0,187$

Les différences minimale et maximale observées entre l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé valent respectivement 0,247 et 7,792, avec une moyenne de 3,983.

5.4.3. Analyse de l'ensemble des données de Sindia et de Dougar

Les résultats présentés sont ceux obtenus après la sixième résolution.

Les figures 5.61 à 5.66 présentent les relations existant après la sixième résolution entre l'indice CBR et chacun des paramètres $C_{0,08\text{mm}}$, C_{UL} , C_{CL} , I_{P} , w_{OPM} et ρ_{dOPM} .

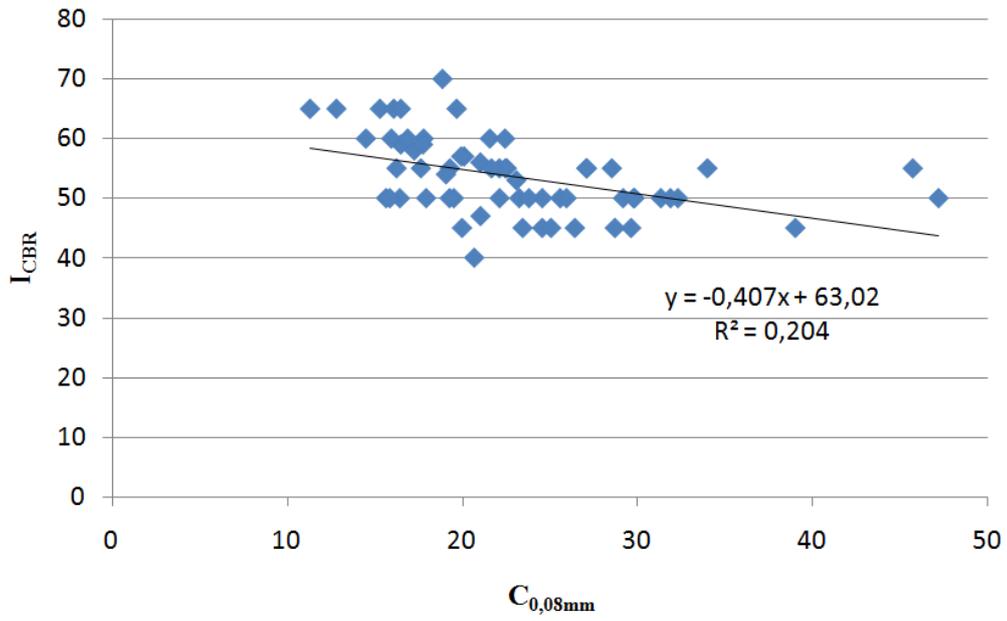


Figure 5.61. Relation entre le pourcentage de fines ($C_{0,08mm}$) et l'indice CBR

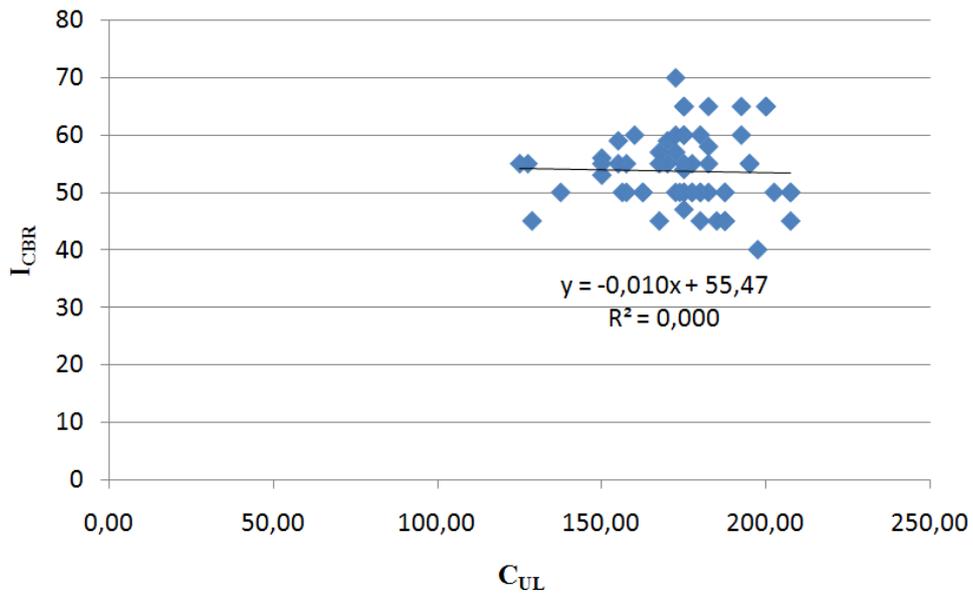


Figure 5.62. Relation entre le coefficient C_{UL} et l'indice CBR

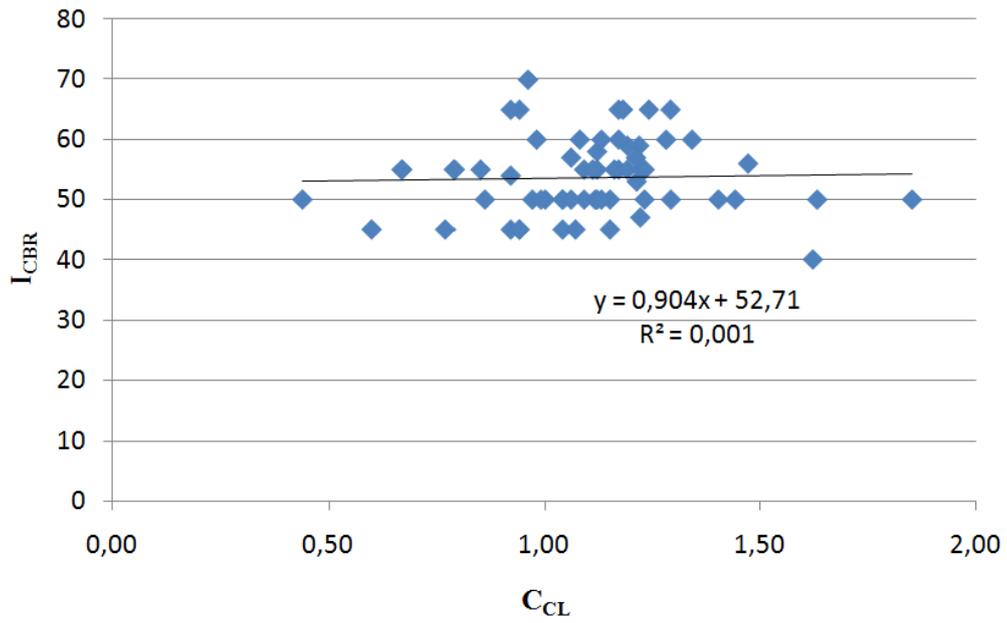


Figure 5.63. Relation entre le coefficient C_{CL} et l'indice CBR

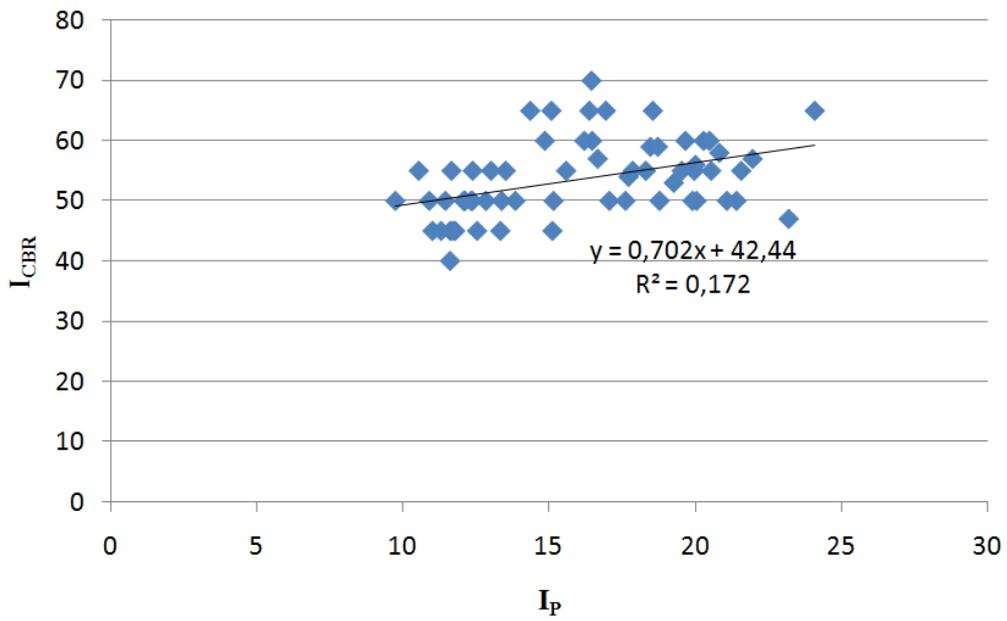


Figure 5.64. Relation entre l'indice de plasticité I_p et l'indice CBR

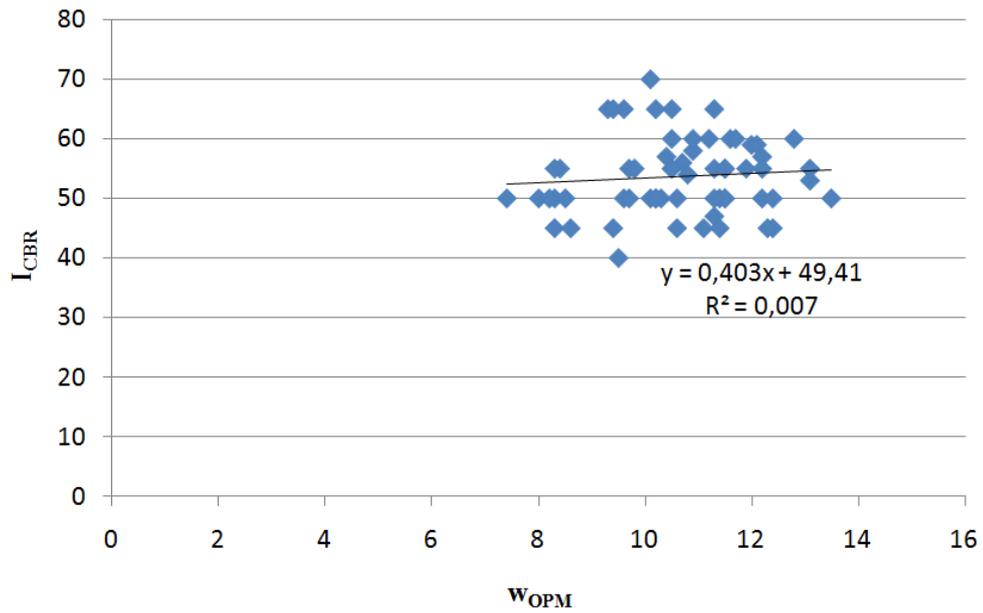


Figure 5.65. Relation entre la teneur en eau optimale w_{OPM} et l'indice CBR

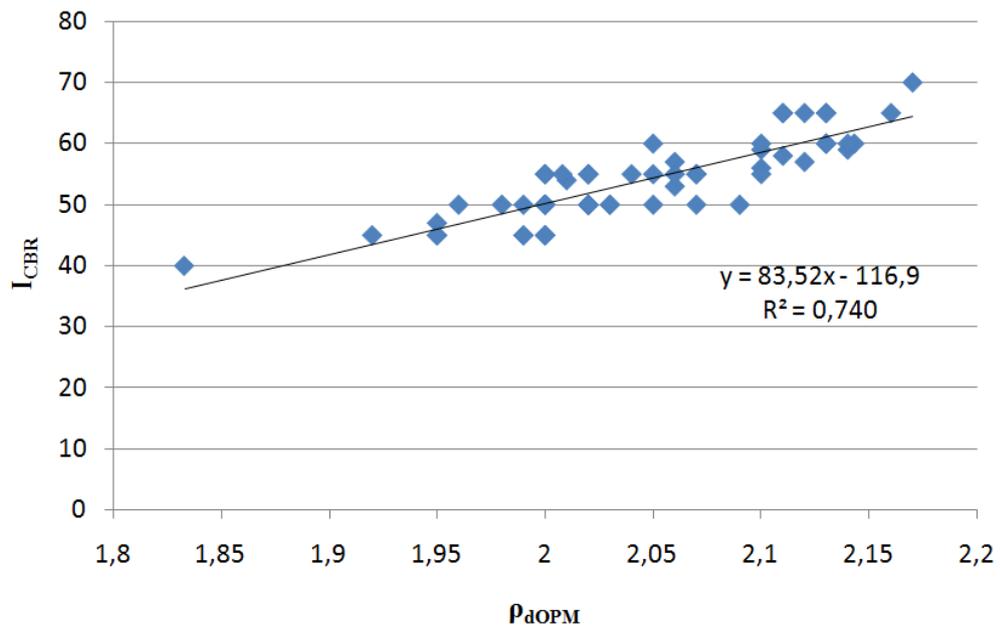


Figure 5.66. Relation entre la masse volumique sèche optimale ρ_{dOPM} et l'indice CBR

La figure 5.67 montre la variation du résidu en fonction de la valeur de l'indice CBR et la figure 5.68 la relation entre l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé.

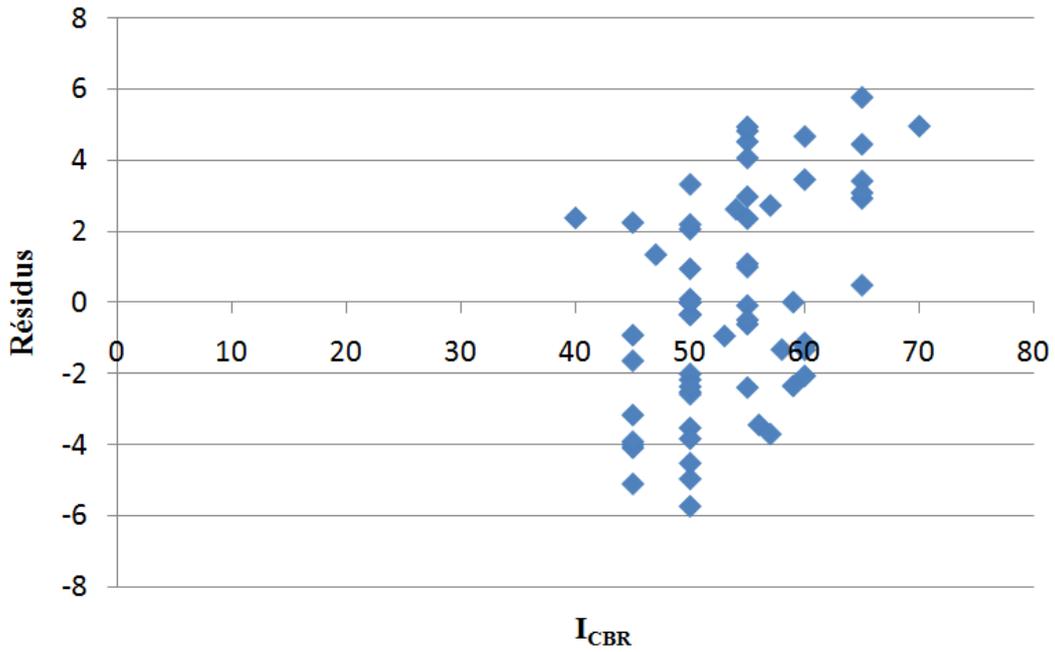


Figure 5.67. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

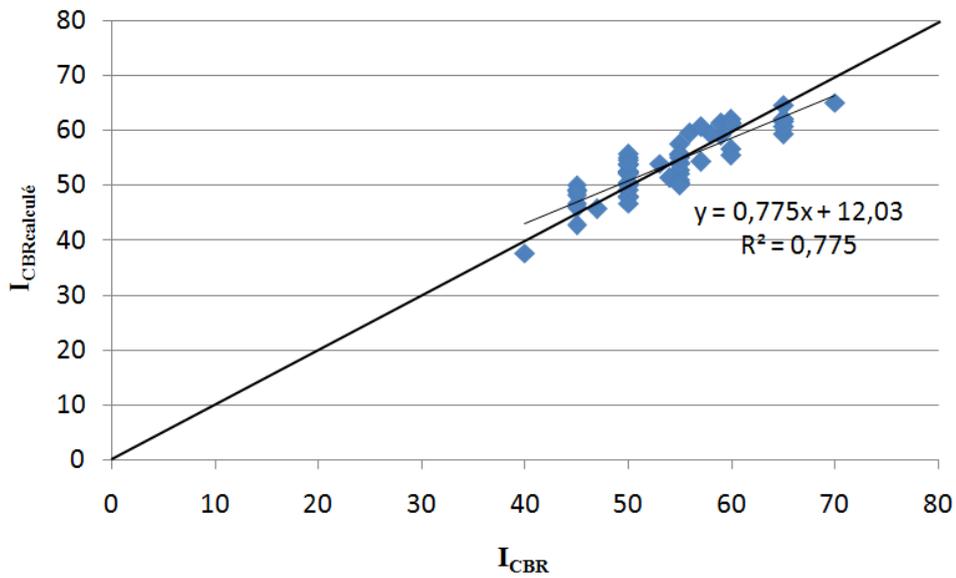


Figure 5.68. Relation entre l'indice CBR (mesuré) et l'indice CBR calculé

Après résolution, aucun point atypique n'a été observé (Figure 5.69).

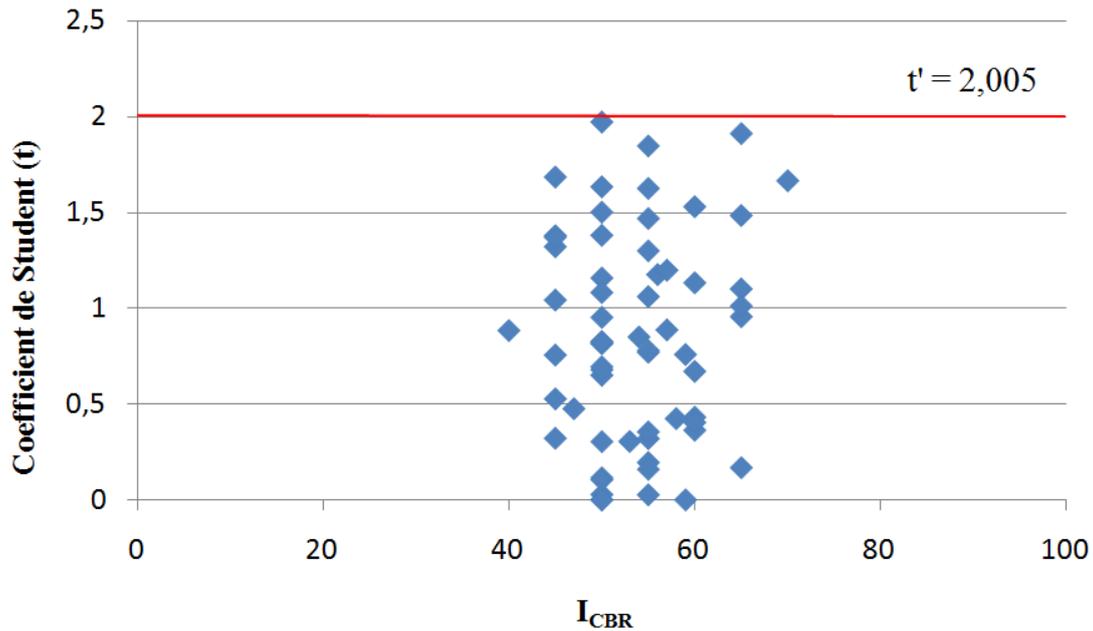


Figure 5.69. Représentation du coefficient de Student en fonction de l'indice CBR

La relation suivante a été obtenue :

$$I_{\text{CBR}} = -92,304 - 0,169C_{0,08\text{mm}} - 0,037C_{\text{UL}} + 0,443C_{\text{CL}} - 0,054I_{\text{p}} - 0,769w_{\text{OPM}} + 80,721\rho_{\text{dOPM}} \quad (5.14)$$

avec $R^2 = 0,776$

Les différences minimale et maximale observées entre l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé valent respectivement 0,005 et 5,759, avec une moyenne de 2,542.

5.4.4. Application de la relation (5.12) aux données de Dougar

L'objectif est de vérifier si la relation (5.12) établie sur les données de Sindia permet de prédire les valeurs de l'indice CBR des données de Dougar.

L'application de la relation (5.12) aux données de Dougar montre de grandes différences entre les valeurs de l'indice CBR (mesuré) et celles de l'indice CBR calculé (Figures 5.70 et 5.71).

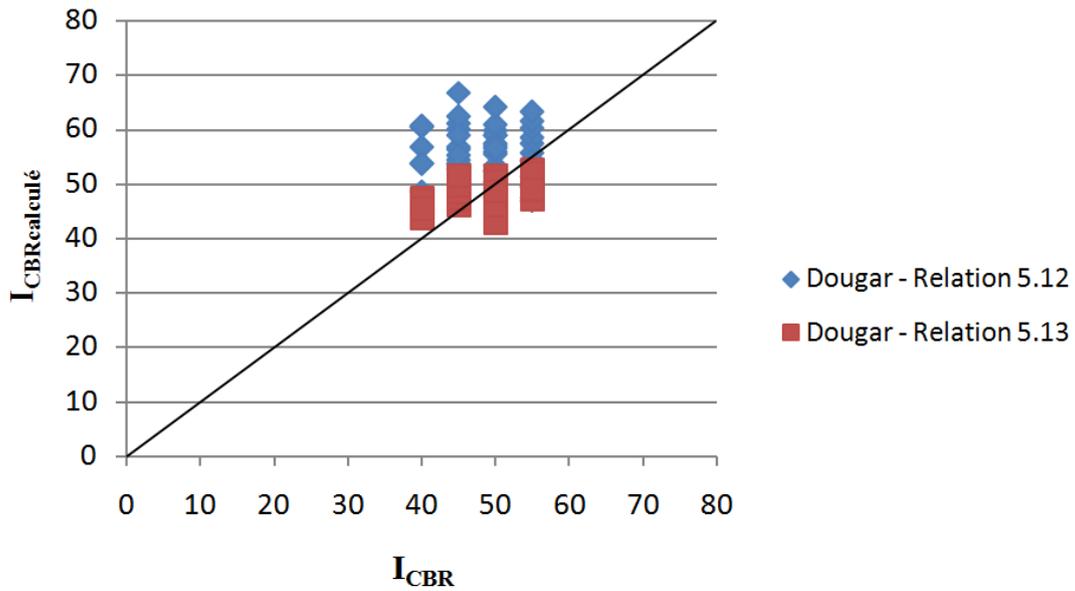


Figure 5.70. Comparaison entre l'indice CBR (mesuré) des données de Dougar et les indices CBR calculés par la relation (5.12) de Sindia et par la relation (5.13)

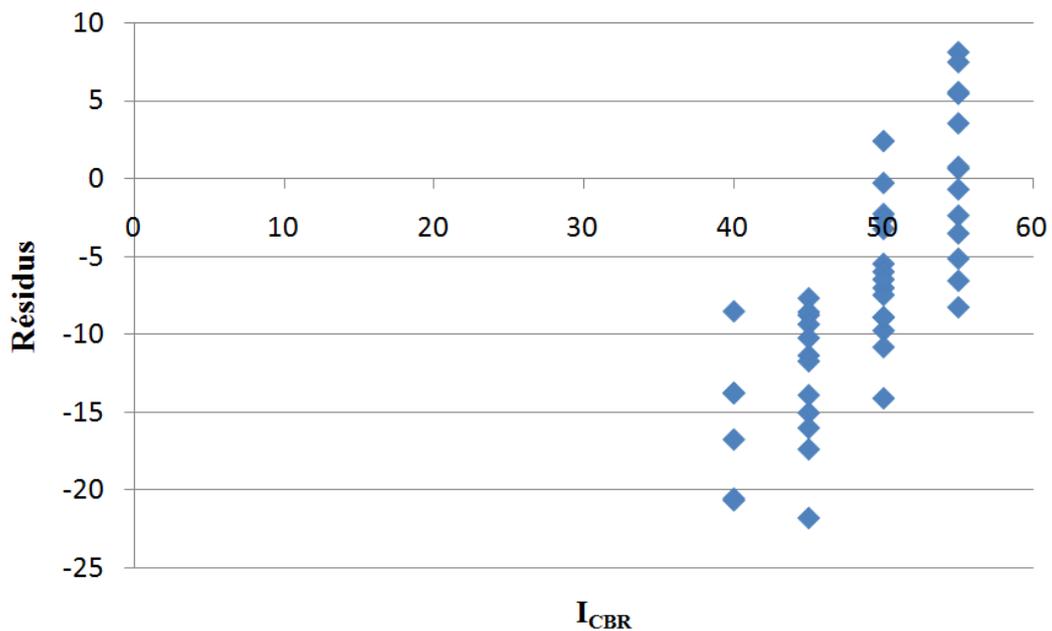


Figure 5.71. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

Les différences minimale et maximale (en valeur absolue) observées entre l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé par la relation (5.12) de Sindia valent respectivement 0,278 et 21,787, avec une moyenne de 8,684. Ces différences suggèrent qu'il n'est pas possible d'extrapoler les relations établies sur une carrière vers une autre carrière dans laquelle les graveleux latéritiques ont une origine différente et donc des propriétés différentes.

5.4.5. Application de la relation (5.13) aux données de Sindia

L'objectif recherché est de vérifier si la relation (5.13) établie sur les données de Dougar permet de prévoir les valeurs de l'indice CBR des données de Sindia.

L'application de la relation (5.13) aux données de Sindia montre également de grandes différences entre les valeurs de l'indice CBR (mesuré) et celles de l'indice CBR calculé (Figures 5.72 et 5.73).

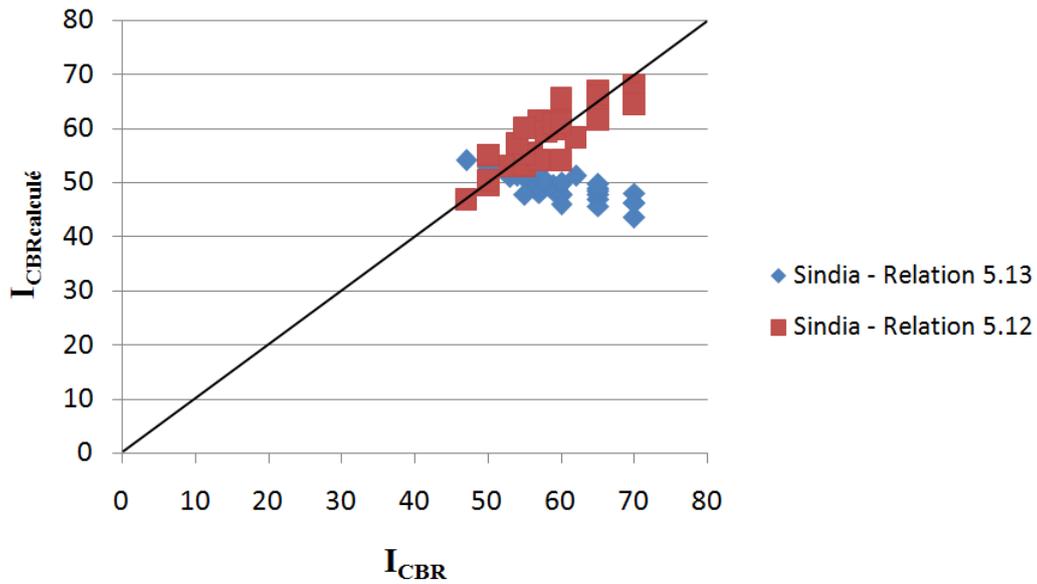


Figure 5.72. Comparaison entre l'indice CBR (mesuré) des données de Sindia et les indices CBR calculés par la relation (5.13) de Dougar et par la relation (5.12)

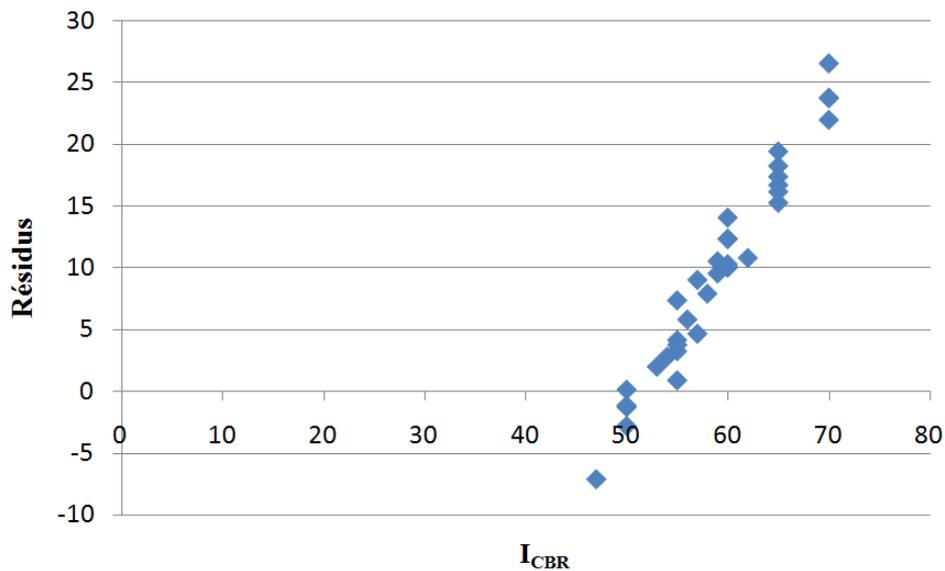


Figure 5.73. Représentation des variations du résidu en fonction de l'indice CBR

Les différences minimale et maximale (en valeur absolue) observées entre l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé par la relation (5.13) de Dougar valent respectivement 0,101 et 26,521, avec une moyenne de 10,357. Ces résultats confirment que l'on ne peut pas passer d'une carrière à l'autre.

5.4.6. Comparaison des valeurs de l'indice CBR calculé par les relations (5.12), (5.13) et (5.14)

L'objectif recherché est de comparer les valeurs de l'indice CBR calculé par la relation (5.14), établie avec l'ensemble des données de Sindia et de Dougar, avec celles obtenues par les relations (5.12) et (5.13) établies respectivement avec les données de Sindia et de Dougar.

Les écarts minimaux, moyens et maximaux entre la valeur de l'indice CBR mesuré et l'indice CBR calculé au moyen des trois relations restent généralement faibles (Tableau 5.8. et figures 5.74 et 5.75).

Tableau 5.8. Comparaison des erreurs commises par les relations (5.12), (5.13) et (5.14)

Carrières		Erreurs			
		minimale	moyenne	maximale	
Sindia	Relation (5.12)	0,022	2,399	5,823	
	Relation (5.14)	0,008	2,645	5,759	
Dougar	Relation (5.13)	0,247	3,983	7,792	
	Relation (5.14)	0,005	2,439	5,100	
Sindia + Dougar		Relation (5.14)	0,005	2,542	5,759

Les écarts minimal et maximal (en valeurs absolues) entre l'indice CBR calculé par la relation (5.12) et celui calculé par la relation (5.14) sont respectivement 0,007 et 6,362 avec une moyenne de 2,046 (Figure 5.74).

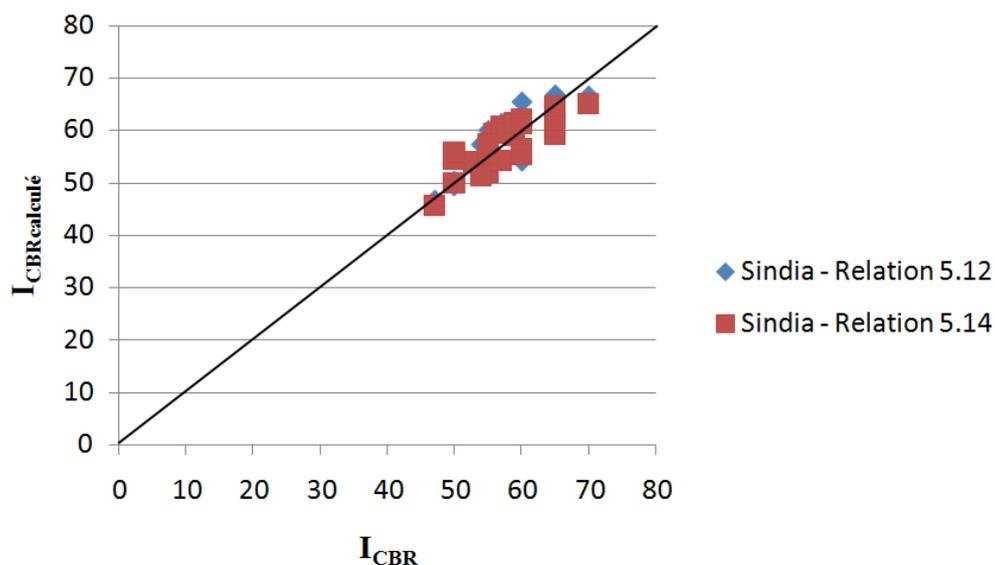


Figure 5.74a. Comparaison des valeurs de l'indice CBR calculées au moyen des relations (5.12) et (5.14) en fonction des valeurs de l'indice CBR (mesuré)

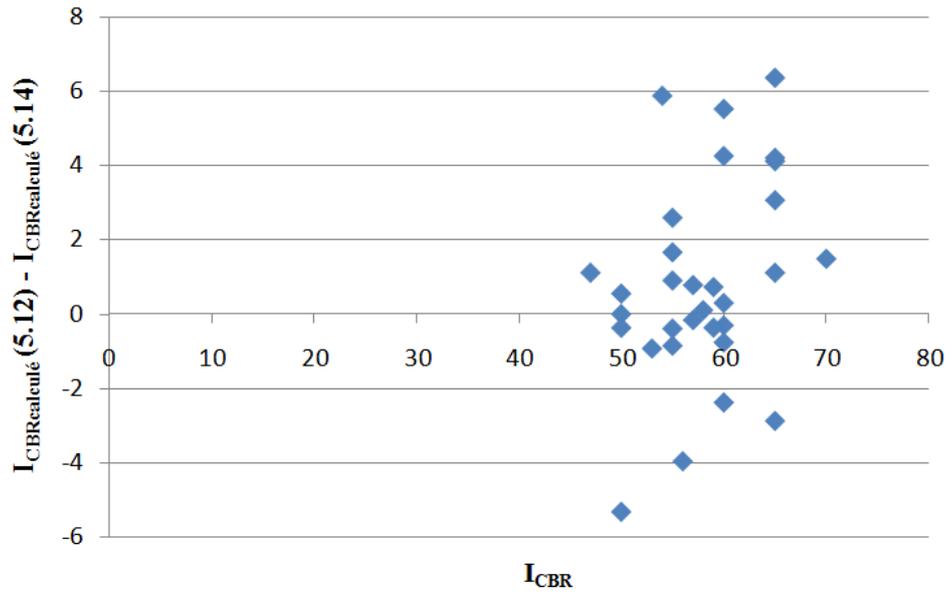


Figure 5.74b. Représentation de la différence des indices CBR calculés par les relations (5.12) et (5.14) en fonction des valeurs de l'indice CBR (mesuré)

Les écarts minimal et maximal (en valeurs absolues) entre l'indice CBR calculé par la relation (5.13) et celui calculé par la relation (5.14) valent respectivement 0,168 et 9,680, avec une moyenne de 3,168 (Figure 5.75).

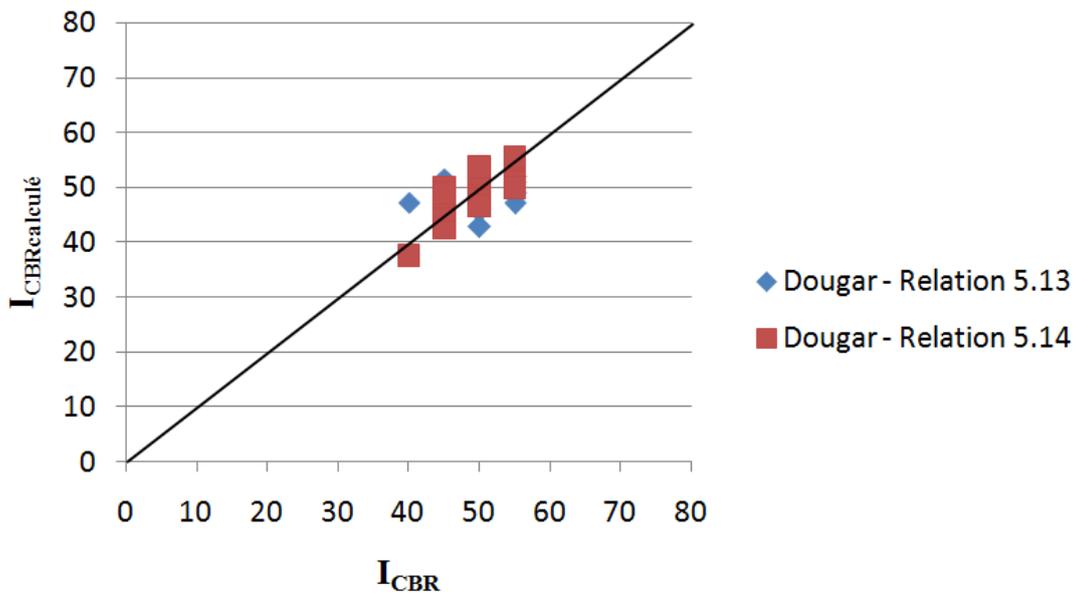


Figure 5.75a. Comparaison des valeurs de l'indice CBR calculées au moyen des relations (5.13) et (5.14) en fonction des valeurs de l'indice CBR (mesuré)

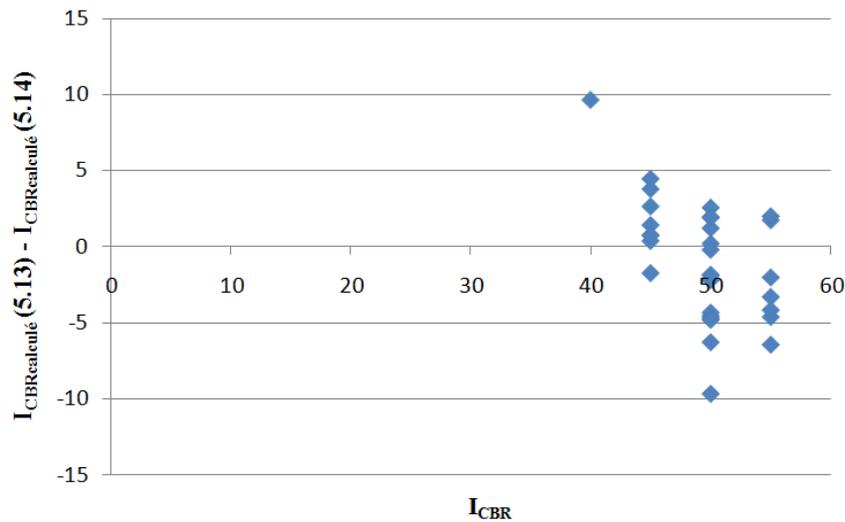


Figure 5.75b. Représentation de la différence des indices CBR calculés par les relations (5.13) et (5.14) en fonction des valeurs de l'indice CBR (mesuré)

Cette étude montre qu'il n'existe pas de grande différence entre les valeurs de l'indice CBR calculées au moyen des relations (5.12) et (5.14), d'une part, et entre les valeurs de l'indice CBR calculées en utilisant les relations (5.13) et (5.14), d'autre part.

5.5. Comparaison des résultats obtenus sur les latérites du Sénégal (Sindia et Dougar)

La comparaison porte sur les relations suivantes :

- **Relation (5.8)** établie à partir des données de Sindia sur des plages d'indice CBR variant de 37 à 75 :

$$I_{\text{CBR}} = 27,878 - 0,921P_{0,08\text{mm}} + 0,536P_{0,2\text{mm}} - 1,546P_{0,5\text{mm}} + 3,038P_{1\text{mm}} + 0,015P_{2\text{mm}} - 1,249P_{4\text{mm}} \\ - 1,061P_{5\text{mm}} + 1,311P_{10\text{mm}}$$

avec $R^2 = 0,651$.

- **Relation (5.9)** établie à partir des données de Dougar sur des plages d'indice CBR variant de 40 à 55

$$I_{\text{CBR}} = 26,270 - 0,180P_{0,08\text{mm}} + 0,332P_{0,2\text{mm}} - 1,594P_{0,5\text{mm}} + 2,203P_{1\text{mm}} - 0,792P_{2\text{mm}} + 0,260P_{4\text{mm}} \\ - 0,226P_{5\text{mm}} + 0,294P_{10\text{mm}}$$

avec $R^2 = 0,218$.

- **Relation (5.10)** établie à partir des données de Sindia et de Dougar sur des plages d'indice CBR variant de 37 à 70

$$I_{\text{CBR}} = 20,222 - 0,545P_{0,08\text{mm}} + 0,321P_{0,2\text{mm}} - 3,300P_{0,5\text{mm}} + 3,291P_{1\text{mm}} + 0,548P_{2\text{mm}} + 0,156P_{4\text{mm}} \\ - 1,356P_{5\text{mm}} + 0,967P_{10\text{mm}}$$

avec $R^2 = 0,509$.

- **Relation (5.12)** établie à partir des données de Sindia sur des plages d'indice CBR variant de 47 à 70

$$I_{\text{CBR}} = - 6,354 - 0,511C_{0,08\text{mm}} - 0,0005C_{\text{UL}} - 6,575C_{\text{CL}} - 0,757I_{\text{P}} - 0,697w_{\text{OPM}} + 49,958\rho_{\text{dOPM}}$$

avec $R^2 = 0,769$.

- **Relation (5.13)** établie à partir des données de Dougar sur des plages d'indice CBR variant de 40 à 55

$$I_{\text{CBR}} = 85,782 + 0,072C_{0,08\text{mm}} - 0,044C_{\text{UL}} - 3,878C_{\text{CL}} + 0,564I_{\text{P}} - 0,229w_{\text{OPM}} - 15,985\rho_{\text{dOPM}}$$

avec $R^2 = 0,187$.

- **Relation (5.14)** établie à partir des données de Sindia et de Dougar sur des plages d'indice CBR variant de 40 à 70

$$I_{\text{CBR}} = - 92,304 - 0,169C_{0,08\text{mm}} - 0,037C_{\text{UL}} + 0,443C_{\text{CL}} - 0,054I_{\text{P}} - 0,769w_{\text{OPM}} + 80,721\rho_{\text{dOPM}}$$

avec $R^2 = 0,776$.

Dans ces relations, R^2 désigne le coefficient de détermination, P_i les passants aux tamis de 0,08 - 0,2 - 0,5 - 1 - 2 - 4 - 5 et 10 mm, $C_{0,08\text{mm}}$ le passant au tamis de 80 μm , C_{UL} le coefficient d'étendue des tailles des particules, C_{CL} le coefficient de forme de la courbe granulométrique, I_{P} l'indice de plasticité, w_{OPM} la teneur en eau optimale et ρ_{dOPM} la masse volumique sèche optimale.

5.5.1. Comparaison entre les relations (5.8) et (5.12)

La première comparaison porte sur les deux relations établies pour les latérites de Sindia. La comparaison est limitée aux données de Sindia. Les résultats de cette analyse sont présentés sur les figures 5.76 et 5.77 et dans le tableau 5.9. On observe que les relations (5.8) et (5.12) donnent deux estimations très semblables de la valeur de l'indice CBR (I_{CBR}).

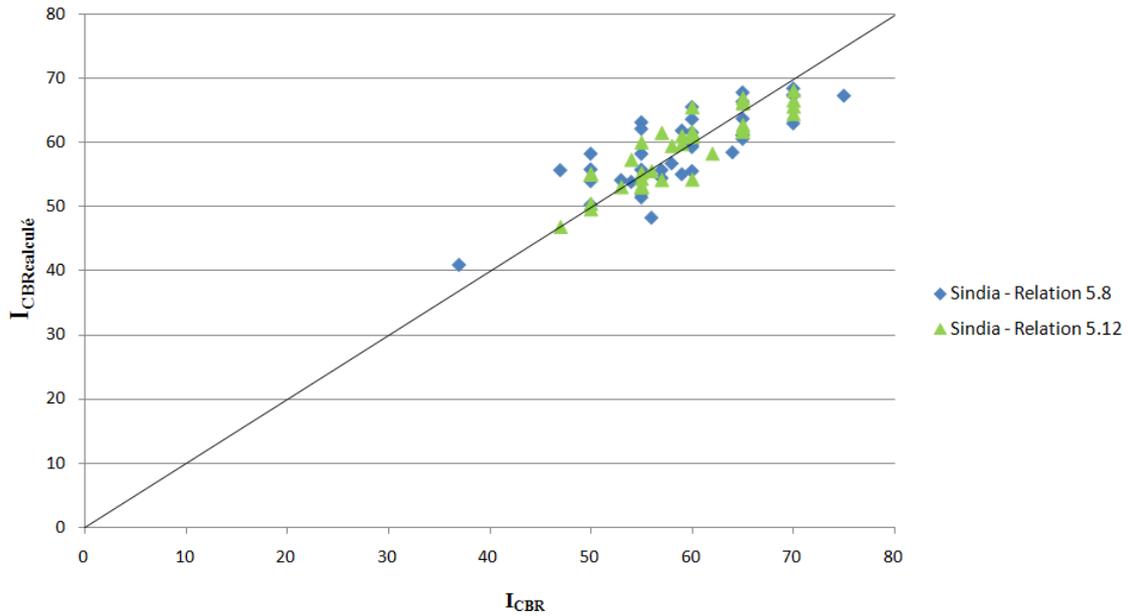


Figure 5.76. Comparaison des valeurs de l'indice CBR calculées au moyen des relations (5.8) et (5.12) en fonction des valeurs de l'indice CBR (mesuré)

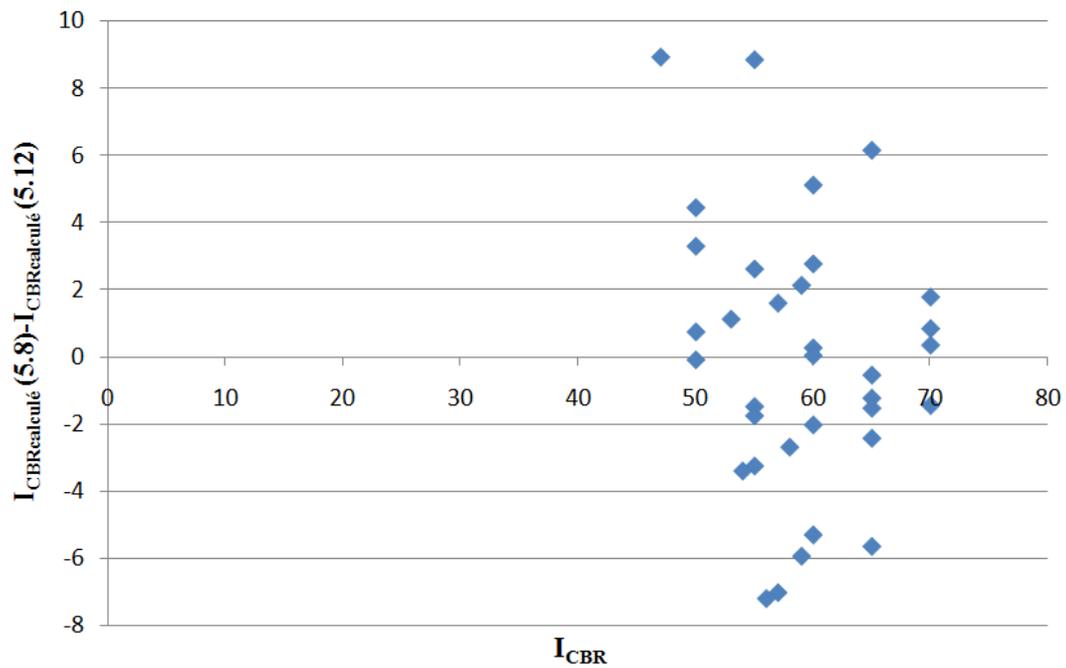


Figure 5.77. Représentation de la différence des indices CBR calculés par les relations (5.8) et (5.12) en fonction des valeurs de l'indice CBR (mesuré)

Tableau 5.9. Comparaison des relations (5.8) et (5.12) sur les données de la latérite de Sindia

Identification des prélèvements	I _{CBR}	I _{CBRcalculé} (5.8) (R ² =0,651)	I _{CBRcalculé} (5.12) (R ² =0,769)	I _{CBRcalculé} (5.8) - I _{CBRcalculé} (5.12)
S ₁	59	61,860	59,724	2,136
S ₂	53	54,151	53,022	1,129
S ₃	50	58,262	54,965	3,297
S ₄	50	53,990	49,545	4,445
S ₅	50	55,822	55,073	0,749
S ₆	55	63,159	54,314	8,845
S ₇	56	48,308	55,487	-7,179
S ₈	55	51,469	52,939	-1,470
S ₉	64	58,478	atypique	-
S ₁₀	47	55,700	46,779	8,921
S ₁₁	55	55,785	53,164	2,620
S ₁₂	50	50,333	50,415	-0,082
S ₁₃	57	55,726	54,122	1,604
S ₁₄	57	54,484	61,486	-7,002
S ₁₅	58	56,758	59,437	-2,679
S ₁₆	62	atypique	58,220	-
S ₁₇	37	40,964	atypique	-
S ₁₉	55	51,993	55,229	-3,236
S ₂₀	54	53,875	57,259	-3,385
S ₂₁	60	55,555	60,841	-5,286
S ₂₂	55	58,245	59,989	-1,744
S ₂₃	59	55,071	60,988	-5,917
S ₂₄	65	61,091	62,311	-1,219
S ₂₅	60	59,621	61,636	-2,015
S ₂₆	65	60,571	66,198	-5,627
S ₂₇	60	59,291	54,177	5,114
S ₂₈	65	61,192	62,710	-1,518
S ₂₉	60	61,585	61,310	0,274
S ₃₀	65	66,385	66,919	-0,534
S ₃₁	60	65,529	65,487	0,043
S ₃₂	65	63,720	66,132	-2,412
S ₃₃	70	68,411	68,053	0,358
S ₃₄	75	67,295	atypique	-
S ₃₅	70	67,375	65,591	1,785
S ₃₆	60	63,634	60,861	2,773
S ₃₇	70	67,391	66,542	0,849
S ₃₈	70	62,986	64,425	-1,439
S ₃₉	65	67,799	61,648	6,151
S ₄₀	55	62,135	atypique	-

Les écarts minimal et maximal (en valeur absolue) entre les valeurs des indices CBR obtenues par les relations (5.8) et (5.12) valent respectivement 0,043 et 8,921, avec une moyenne de 3,054. Ces écarts montrent que les deux relations donnent des résultats comparables.

5.5.2. Comparaison entre les relations (5.9) et (5.13)

La deuxième comparaison porte sur les deux relations établies pour les latérites de Dougar. La comparaison est limitée aux données de Dougar. Les résultats de cette analyse sont présentés sur les figures 5.78 et 5.79 et dans le tableau 5.10. On observe que les relations (5.9) et (5.13) donnent des estimations comparables de la valeur de l'indice CBR (I_{CBR}).

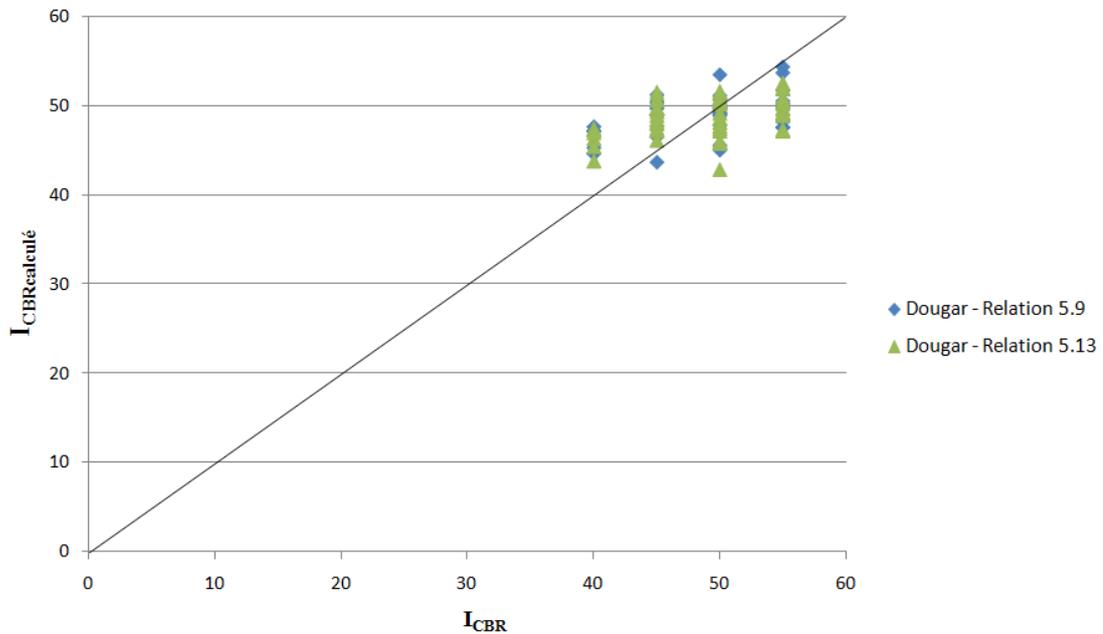


Figure 5.78. Comparaison des valeurs de l'indice CBR calculées au moyen des relations (5.9) et (5.13) en fonction des valeurs de l'indice CBR (mesuré)

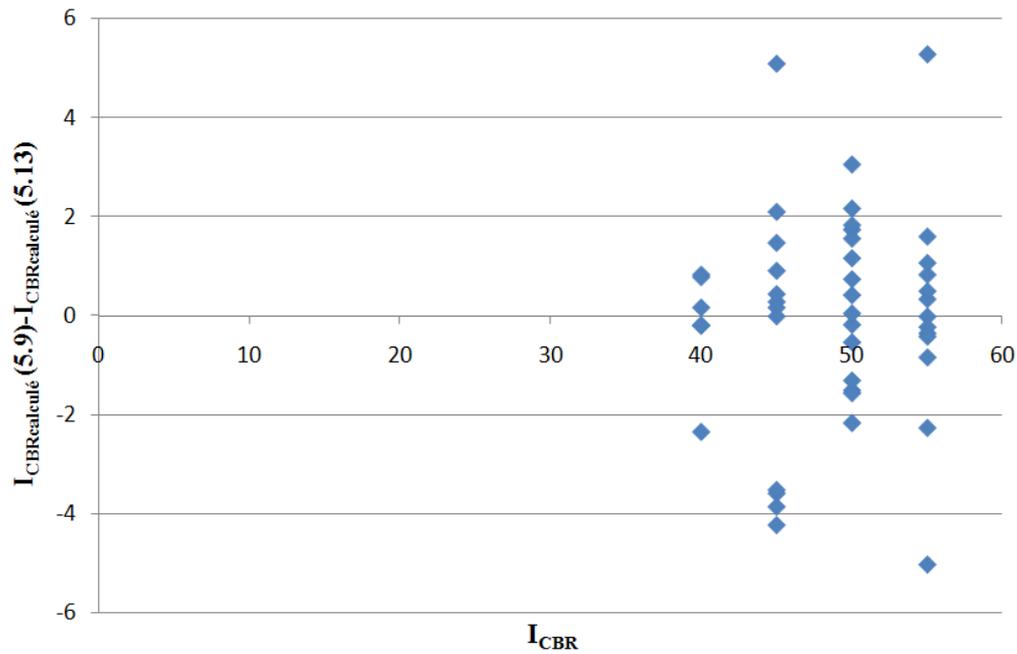


Figure 5.79. Représentation de la différence des indices CBR calculés au moyen des relations (5.9) et (5.13) en fonction des valeurs de l'indice CBR mesuré

Tableau 5.10. Comparaison des relations (5.9) et (5.13) sur les données de la latérite de Dougar

Identification des prélèvements	I_{CBR}	$I_{\text{CBRcalculé}} (5.9)$ ($R^2=0,218$)	$I_{\text{CBRcalculé}} (5.13)$ ($R^2=0,187$)	$I_{\text{CBRcalculé}} (5.9) - I_{\text{CBRcalculé}} (5.13)$
D ₁	40	47,651	47,489	0,162
D ₂	40	47,201	46,376	0,825
D ₃	45	51,239	46,156	5,083
D ₄	40	47,101	47,307	-0,206
D ₅	50	48,871	45,822	3,049
D ₆	40	44,625	43,848	0,777
D ₇	40	44,677	47,025	-2,348
D ₈	50	45,034	42,873	2,160
D ₉	40	45,280	45,474	-0,193
D ₁₀	55	48,230	47,405	0,825
D ₁₁	45	43,660	47,249	-3,589
D ₁₂	45	49,680	49,404	0,277
D ₁₃	50	49,037	49,222	-0,185
D ₁₄	50	49,219	47,487	1,732
D ₁₅	45	47,285	50,804	-3,519
D ₁₆	45	48,993	48,090	0,902
D ₁₇	45	49,898	49,739	0,160

Tableau 5.10. Comparaison des relations (5.9) et (5.13) sur les données de la latérite de Dougar (suite)

Identification des prélèvements	I _{CBR}	I _{CBRcalculé} (5.9) (R ² =0,218)	I _{CBRcalculé} (5.13) (R ² =0,187)	I _{CBRcalculé} (5.9) - I _{CBRcalculé} (5.13)
D ₁₈	55	47,588	52,615	-5,027
D ₁₉	50	45,064	47,231	-2,167
D ₂₀	50	50,659	50,247	0,413
D ₂₁	55	47,537	47,208	0,329
D ₂₂	55	50,012	48,951	1,061
D ₂₃	55	49,954	50,312	-0,358
D ₂₄	50	49,196	50,707	-1,511
D ₂₅	50	50,019	51,585	-1,566
D ₂₆	45	48,977	47,509	1,468
D ₂₇	50	49,693	51,004	-1,311
D ₂₈	55	49,664	49,685	-0,021
D ₂₉	55	50,276	49,783	0,493
D ₃₀	55	48,363	50,631	-2,268
D ₃₁	50	49,737	48,184	1,553
D ₃₂	55	51,723	51,957	-0,234
D ₃₃	55	48,483	49,328	-0,844
D ₃₄	45	48,937	48,954	-0,017
D ₃₅	50	47,818	47,776	0,042
D ₃₆	50	45,572	46,112	-0,540
D ₃₇	45	46,509	50,738	-4,230
D ₃₈	45	50,489	48,396	2,093
D ₃₉	50	53,482	51,659	1,824
D ₄₀	55	50,533	50,957	-0,424
D ₄₁	55	53,695	52,101	1,594
D ₄₂	50	51,145	50,412	0,733
D ₄₃	55	54,354	49,082	5,272
D ₄₄	45	50,284	49,852	0,433
D ₄₅	45	47,735	51,594	-3,859
D ₄₆	50	49,819	48,663	1,156

Les écarts minimal et maximal (en valeur absolue) entre les valeurs des indices CBR obtenues par les relations (5.9) et (5.13) valent respectivement 0,017 et 5,272, avec une moyenne de 1,496. Ces écarts montrent que les deux relations donnent des résultats comparables.

5.5.3. Comparaison entre les relations (5.10) et (5.14)

La troisième comparaison porte sur les deux relations établies sur l'ensemble des latérites de Sindia et de Dougar. Les résultats de cette analyse sont présentés sur les figures 5.80 et 5.81 et dans le tableau

5.11. On observe que les relations (5.10) et (5.14) donnent des estimations comparables de la valeur de l'indice CBR (I_{CBR}).

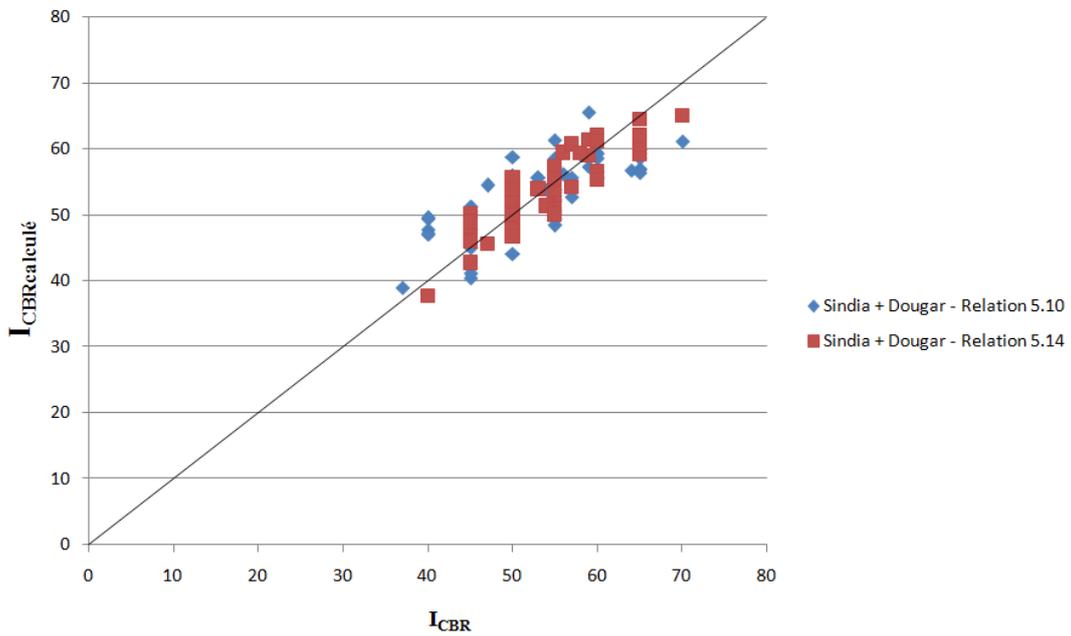


Figure 5.80. Comparaison des valeurs de l'indice CBR calculées au moyen des relations (5.10) et (5.14) en fonction des valeurs de l'indice CBR (mesuré)

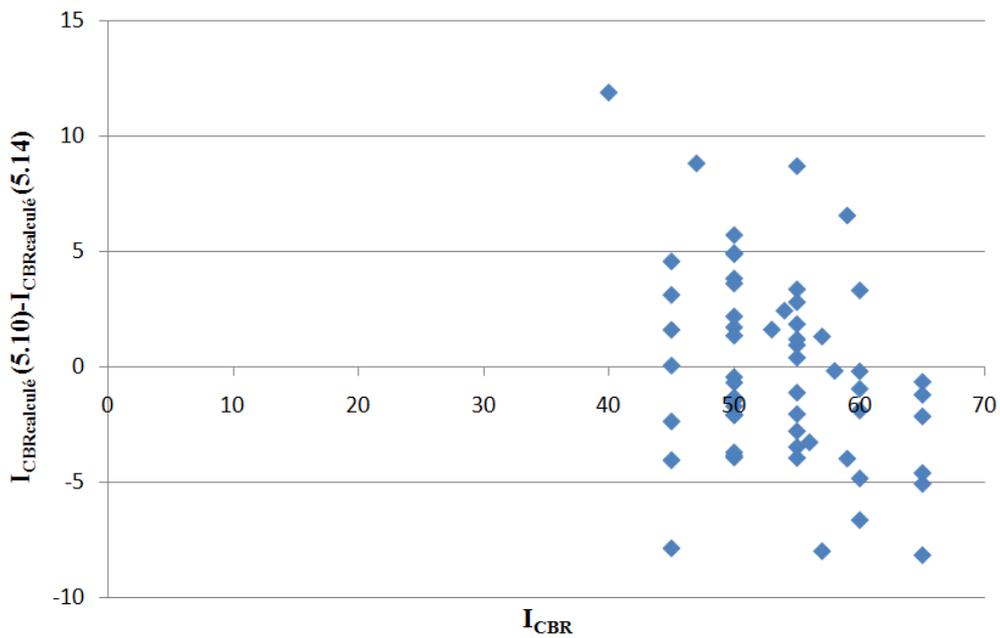


Figure 5.81. Représentation de la différence des indices CBR calculés au moyen des relations (5.10) et (5.14) en fonction des valeurs de l'indice CBR mesuré

Tableau 5.11. Comparaison des relations (5.10) et (5.14) sur les données de Sindia et de Dougar

Identification des prélèvements	I _{CBR}	I _{CBR} calculé (5.10) (R ² =0,509)	I _{CBR} calculé (5.14) (R ² =0,776)	I _{CBR} calculé (5.10) - I _{CBR} calculé (5.14)
S ₁	59	65,562	58,992	6,570
S ₂	53	55,574	53,941	1,633
S ₃	50	58,801	54,959	3,842
S ₄	50	55,630	49,907	5,722
S ₅	50	53,088	54,516	-1,428
S ₆	55	61,354	52,646	8,707
S ₇	56	56,193	59,439	-3,246
S ₈	55	52,989	52,028	0,961
S ₉	64	56,759	atypique	-
S ₁₀	47	54,483	45,658	8,825
S ₁₁	55	57,383	54,008	3,374
S ₁₂	50	53,646	55,729	-2,083
S ₁₃	57	55,608	54,278	1,331
S ₁₄	57	52,740	60,699	-7,960
S ₁₅	58	59,169	59,325	-0,157
S ₁₇	37	39,003	atypique	-
S ₁₉	55	52,160	55,613	-3,453
S ₂₀	54	53,832	51,381	2,451
S ₂₁	60	59,267	61,140	-1,872
S ₂₂	55	58,605	57,392	1,213
S ₂₃	59	57,392	61,347	-3,956
S ₂₄	65	58,607	59,241	-0,633
S ₂₅	60	56,519	61,332	-4,814
S ₂₆	65	57,027	62,078	-5,051
S ₂₇	60	55,615	56,548	-0,934
S ₂₈	65	57,012	61,590	-4,578
S ₂₉	60	55,450	62,065	-6,615
S ₃₀	65	59,366	60,557	-1,191
S ₃₁	60	61,049	61,227	-0,178
S ₃₂	65	59,799	61,923	-2,124
S ₃₃	70	61,212	atypique	-
S ₃₆	60	58,665	55,337	3,328
S ₃₇	70	atypique	65,048	-
S ₃₉	65	56,380	64,516	-8,136
S ₄₀	55	55,078	atypique	-
D ₁	40	49,492	atypique	-
D ₄	40	49,519	37,627	11,892
D ₅	50	55,245	50,350	4,895
D ₆	40	47,839	atypique	-

Tableau 5.11. Comparaison des relations (5.10) et (5.14) sur les données de Sindia et de Dougar
(suite)

Identification des prélèvements	I _{CBR}	I _{CBR} calculé (5.10) (R ² =0,509)	I _{CBR} calculé (5.14) (R ² =0,776)	I _{CBR} calculé (5.10) - I _{CBR} calculé (5.14)
D ₇	40	47,296	atypique	-
D ₈	50	48,613	52,517	-3,904
D ₉	40	47,064	atypique	-
D ₁₀	55	51,051	atypique	-
D ₁₁	45	40,410	42,756	-2,346
D ₁₂	45	44,970	48,993	-4,023
D ₁₃	50	55,257	53,526	1,731
D ₁₄	50	50,808	52,171	-1,362
D ₁₅	45	47,754	atypique	-
D ₁₆	45	51,222	46,638	4,584
D ₁₇	45	atypique	45,919	-
D ₁₈	55	49,369	atypique	-
D ₁₉	50	48,179	52,007	-3,827
D ₂₀	50	48,707	50,011	-1,304
D ₂₁	55	49,384	50,483	-1,099
D ₂₂	55	53,761	50,943	2,819
D ₂₃	55	53,766	atypique	-
D ₂₄	50	53,946	52,580	1,366
D ₂₅	50	55,277	50,335	4,942
D ₂₆	45	49,692	atypique	-
D ₂₇	50	47,017	49,057	-2,040
D ₂₈	55	48,422	atypique	-
D ₂₉	55	50,074	atypique	-
D ₃₀	55	50,745	atypique	-
D ₃₁	50	49,571	49,995	-0,425
D ₃₂	55	52,054	50,186	1,868
D ₃₃	55	49,986	53,913	-3,927
D ₃₄	45	51,296	48,166	3,130
D ₃₅	50	47,281	47,944	-0,663
D ₃₆	50	50,676	52,363	-1,687
D ₃₇	45	50,558	atypique	-
D ₃₈	45	50,173	50,100	0,073
D ₃₉	50	56,030	53,828	2,202
D ₄₀	55	52,321	55,087	-2,766
D ₄₁	55	50,482	50,067	0,414
D ₄₂	50	44,126	47,810	-3,684
D ₄₃	55	53,463	55,489	-2,026
D ₄₄	45	50,703	49,082	1,621
D ₄₅	45	41,074	48,911	-7,837
D ₄₆	50	50,310	46,684	3,626

Les écarts minimal et maximal (en valeur absolue) entre les valeurs des indices CBR obtenues par les relations (5.10) et (5.14) valent respectivement 0,073 et 11,892, avec une moyenne de 3,241. Ces écarts montrent que les deux relations donnent des résultats généralement comparables.

5.6. Évaluation des méthodes d'estimation de la valeur de l'indice CBR

Les analyses présentées dans les sections 5.3 à 5.5 sont limitées à l'échelle d'un site (d'une carrière). Elles montrent qu'il est possible de déterminer, avec une erreur inférieure à 10 (obtenue toutefois par élimination des points trop écartés, appelés « atypiques »), la valeur de l'indice CBR à partir des paramètres d'identification des graveleux latéritiques, mais que les calculs donnent des relations applicables aux seules carrières qui ont fourni les données pour les établir. Pour résumer les comparaisons effectuées :

- les relations établies sur le site de Sindia fonctionnent pour ce site, mais pas pour celui de Dougar ;
- les relations établies sur le site de Dougar fonctionnent pour ce site, mais pas pour celui de Sindia ;
- les relations établies sur les données fusionnées des sites de Sindia et Dougar fonctionnent correctement sur chacun des sites.

Il semble donc que les relations ne puissent pas être extrapolées à l'ensemble des sols latéritiques (même si les études sont restreintes aux sols graveleux latéritiques).

Pour avoir une idée des limites de l'extrapolation des formules de calcul de l'indice CBR, nous avons appliqué la méthode aux données rassemblées par Bohi (2008) sur des carrières de latérites de la région de l'Agneby en Côte d'Ivoire.

La figure 5.82 montre le résultat du calcul de l'indice CBR des latérites de la région de l'Agneby par la formule (5.14) établie sur l'ensemble des sites de Sindia et Dougar, en fonction de l'indice CBR déterminé directement. Le détail des calculs est présenté en annexe à ce rapport. La figure montre clairement que la formule (5.14) ne permet pas de reproduire les valeurs de l'indice CBR de ces sols.

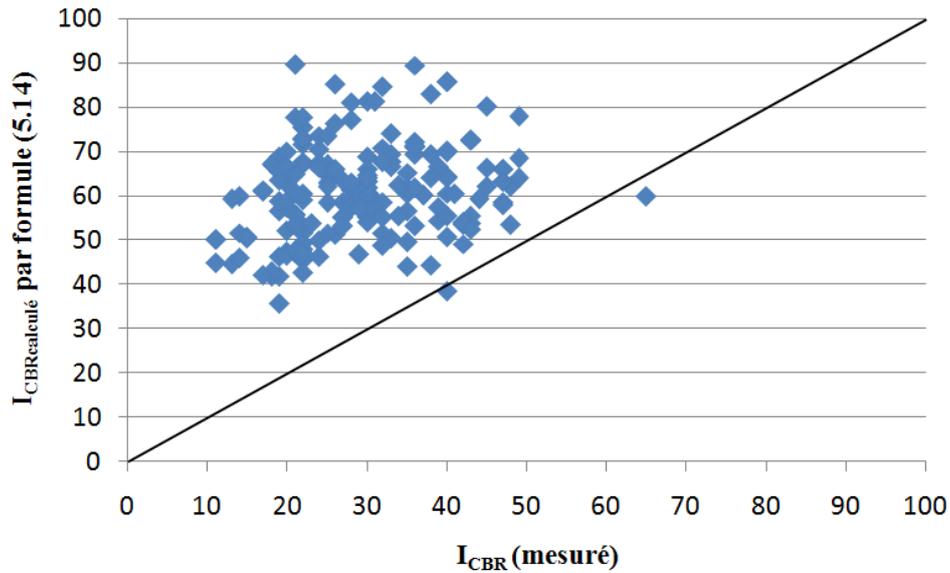


Figure 5.82. Comparaison des valeurs de l'indice CBR calculé par la formule (5.14) avec les valeurs mesurées pour les latérites de la région de l'Agneby en Côte d'Ivoire (données de Bohi, 2008)

La méthode d'analyse par régression linéaire multiple appliquée aux latérites du Sénégal a été appliquée aux données rassemblées par Bohi (2008) pour les latérites de Côte d'Ivoire. L'analyse a nécessité onze itérations, qui ont conduit à supprimer 35 points de données.

La formule de calcul finale est la suivante :

$$I_{\text{CBR}} = -48,634 - 0,117C_{0,08\text{mm}} + 0,007C_{\text{UL}} + 0,937C_{\text{CL}} + 0,225I_{\text{p}} - 0,188w_{\text{OPM}} + 33,529\rho_{\text{dOPM}} \quad (5.15)$$

avec $R^2 = 0,287$.

Le résultat est représenté sur la figure 5.83. La qualité de la prévision est moyenne (plus ou moins 50% d'écart par rapport à la valeur mesurée). Cette variabilité importante peut être due au fait que les données de la région de l'Agneby proviennent d'une dizaine de carrières dans différentes zones de la région de l'Agneby.

5.7. Conclusion

Les études statistiques menées sur les données des carrières latéritiques de Sindia et Dougar étaient orientées vers la recherche de relations linéaires entre les paramètres géotechniques des sols et l'indice CBR. La technique de régression linéaire multiple permet de rechercher de telles relations. Elle a permis de trouver des relations linéaires entre l'indice CBR et les autres paramètres à l'échelle d'un site (Sindia, Dougar, Sindia+Dougar pour le Sénégal et l'ensemble des données de Bohi, 2008, pour la région de l'Agneby en Côte d'Ivoire). Ces formules posent quelques questions, qui n'ont pas été résolues dans le cadre du présent travail : les formules ont parfois des termes constants importants,

d'autres fois non ; les signes des effets des différents paramètres peuvent varier d'une formule à l'autre alors qu'on s'attendrait à avoir toujours une augmentation de l'indice CBR avec la masse volumique sèche à l'optimum Proctor modifié et une diminution lorsque la teneur en particules fines ou l'indice de plasticité augmentent, par exemple. Mais la limitation de l'efficacité des formules issues de ces analyses statistiques est évidente quand on utilise une formule établie sur un site pour calculer les indices CBR sur un autre site. Les résultats de ces calculs divergent des données mesurées, parfois de façon très importante comme dans le cas des latérites de Côte d'Ivoire.

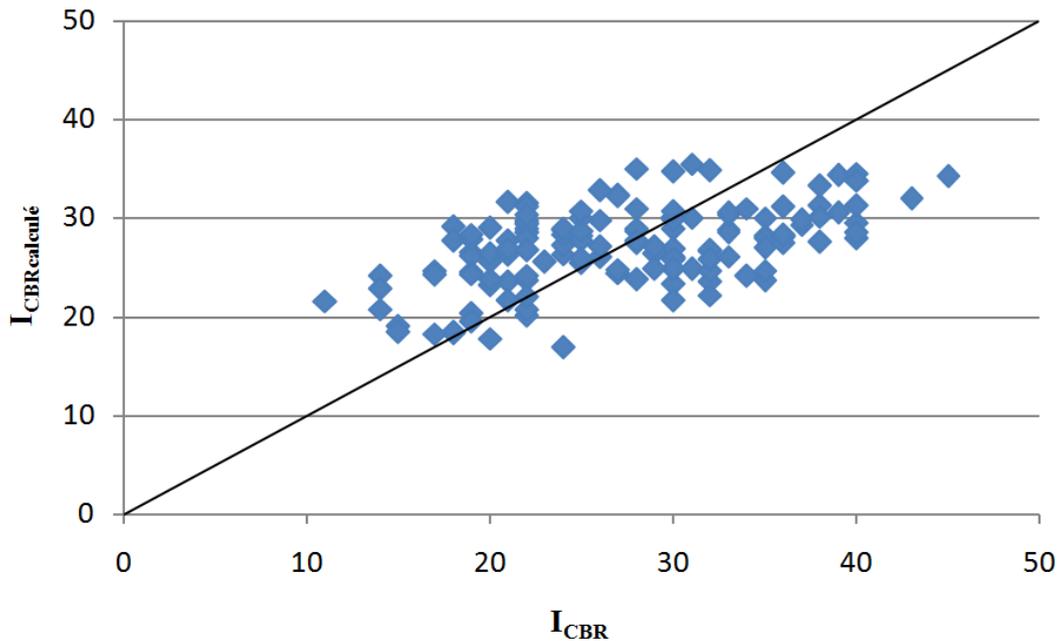


Figure 5.83. Relation entre l'indice CBR (mesuré) et l'indice CBR calculé par la formule (5.15) (données de Bohi, 2008)

L'existence de relations linéaires entre les paramètres de comportement des sols graveleux latéritiques est donc peu probable, ce qui confirme les résultats de l'analyse factorielle effectuée par Bohi (2008), montrant que l'indice CBR n'est pas lié à des paramètres particuliers, ou les affirmations des autres auteurs qui se sont penchés sur cette question.

La recherche de relations entre ces paramètres pourrait être poursuivie en abandonnant l'hypothèse de linéarité et en explorant des relations sous forme de produits de fonctions puissance (ce que l'on peut faire en recherchant les relations linéaires entre les logarithmes des paramètres) ou des fonctions polynomiales des paramètres. Cette direction n'a pas été explorée ici.

Nous resterons sur la constatation que des approximations linéaires peuvent être trouvées à l'échelle de gisements homogènes, mais pas extrapolées à d'autres sites.

Chapitre 6

ÉTUDE DE L'AMÉLIORATION DE LATÉRITES DU SÉNÉGAL PAR AJOUT DE SABLE

6.1. Introduction

Les sols latéritiques situés aux endroits les plus proches du tracé d'un projet routier sont généralement ceux que l'on utilise en couches de chaussée. Cependant, dans le cas où ces sols ne satisfont pas les spécifications d'utilisation en couches de chaussée définies dans les textes de référence (CEBTP, 1972, en général), la lithostabilisation, c'est-à-dire l'ajout d'un matériau granulaire connu, peut être une solution économique.

Ce présent chapitre présente des essais et réflexions sur la lithostabilisation de graveleux latéritiques en provenance des carrières de Lam-Lam et de Sindia au Sénégal, pour des routes à faible trafic. Il analyse aussi des données d'autres origines et suggère des travaux complémentaires, qui doivent être réalisés à l'échelle du continent, peut-être sous l'impulsion des laboratoires membres de l'ALBTP (Association Africaine des Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics).

6.2. Étude de la lithostabilisation de la latérite de Lam-Lam

6.2.1. Caractérisation de la latérite d'origine

Les latérites testées proviennent de dix prélèvements en différents endroits de la carrière de Lam-Lam (Sénégal) identifiés par les codes L₁ à L₁₀. Des essais de laboratoire ont été effectués sur ces différents prélèvements afin de déterminer leurs caractéristiques géotechniques et leurs résultats sont rassemblés dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1. Caractéristiques géotechniques des latérites de Lam-Lam

Identification des prélèvements	Analyse granulométrique (%)			Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95% OPM
	0,08 mm	2 mm	10 mm		w_{OPM} (%)	ρ_{dOPM} (g/cm ³)	
L₁	6,9	17,2	53,6	17,7	12	2,06	45
L₂	8,4	14,4	51	23,4	10,8	1,91	35
L₃	5,3	15	55,2	20,4	10	2,01	35
L₄	9,3	24,1	57,9	17,4	10,3	1,97	40
L₅	8,9	21,4	56,4	17,1	10,6	1,98	40
L₆	8,3	20,2	60,1	18,3	10,1	2,09	50
L₇	8,5	19,6	63,5	24,0	12,5	2,03	70
L₈	7,9	17,3	65,2	24,7	10,9	1,96	70
L₉	9,7	22,5	71,3	19,1	12,1	1,93	55
L₁₀	11,4	27,1	62,1	18,9	12	2,02	70

Afin de procéder aux études de lithostabilisation, deux mélanges ont été constitués à partir de ces prélèvements, de la façon suivante :

- le mélange ML_1 est constitué des prélèvements dont les indices CBR sont inférieurs à 60, à savoir $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6$ et L_9 ;
- le mélange ML_2 est constitué des prélèvements dont les indices CBR sont supérieurs à 60, à savoir L_7, L_8 et L_{10} .

Les caractéristiques géotechniques de ces mélanges sont présentées dans le tableau 6.2.

Tableau 6.2. Caractéristiques géotechniques des mélanges ML_1 et ML_2

Identification des mélanges	Analyse granulométrique (%)			Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95% OPM
	0,08 mm	2 mm	10 mm		w_{OPM} (%)	ρ_{dOPM} (g/cm ³)	
ML_1	10,7	25,7	67,1	23,2	11	2,05	51
ML_2	11	26,5	69,6	22,1	11	2,01	70

Les courbes granulométriques de ces mélanges entrent dans les fuseaux spécifiés par le CEBTP (1972) pour une utilisation en couches de fondation et de base pour routes à faible trafic (Figures 6.1 et 6.2).

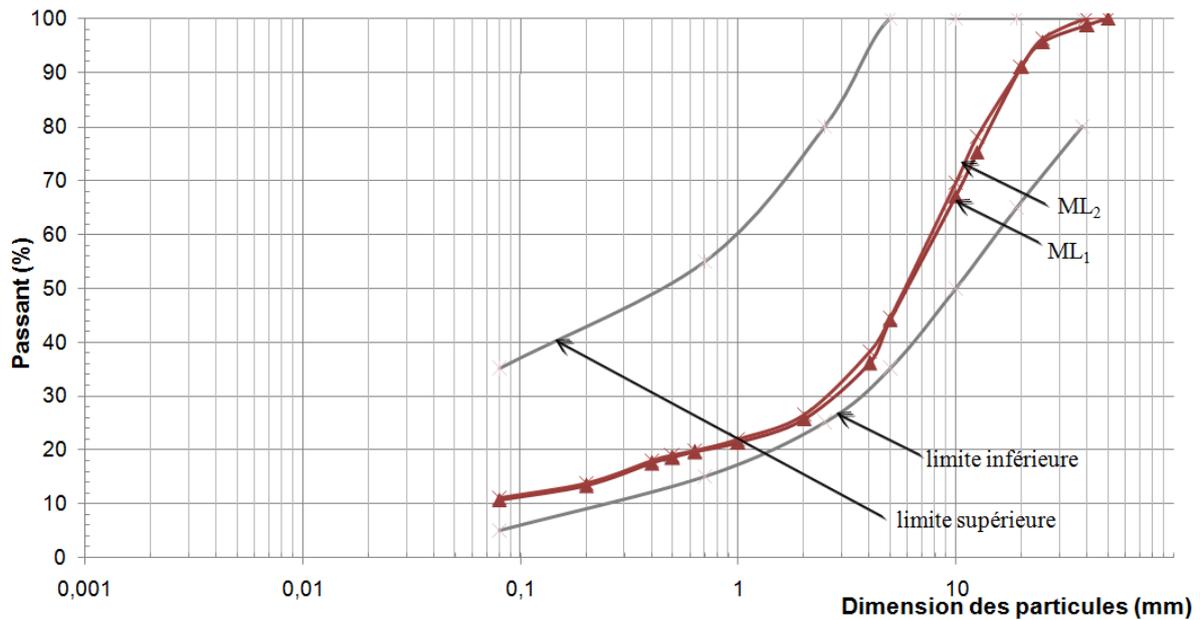


Figure 6.1. Représentation des courbes granulométriques de ML_1 et ML_2 et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de fondation de route à faible trafic

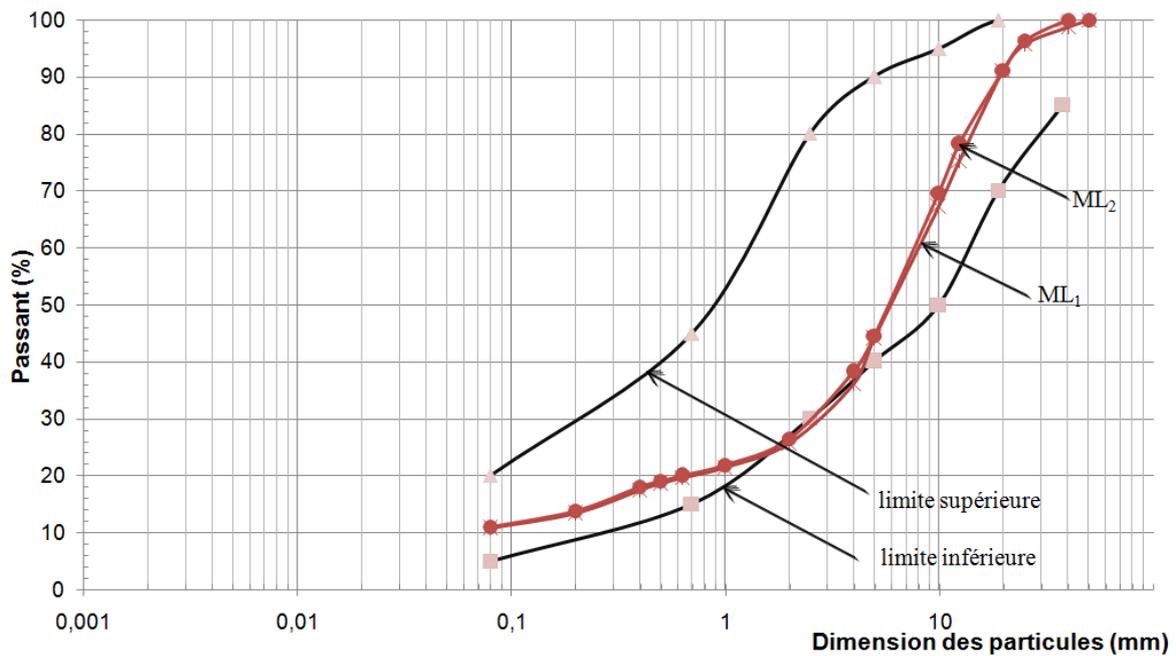


Figure 6.2. Représentation des courbes granulométriques de ML_1 et ML_2 et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de base de route à faible trafic

L'utilisation des matériaux en couche de fondation et en couche de base est également conditionnée par la valeur de l'indice de plasticité (I_p). Les valeurs correspondant à un trafic faible ($N < 5.10^5$ soit 300 véhicules par jour) sont reproduites dans le tableau 6.3 avec les valeurs mesurées sur les deux mélanges ML_1 et ML_2 .

Tableau 6.3. Comparaison des valeurs de limites d'Atterberg et d'indice CBR avec les valeurs seuils des spécifications du CEBTP (1972)

Mélanges et spécifications CEBTP (1972)	Indice de plasticité (I_p)	I_{CBR} à 95% OPM
ML ₁ : mesure	23,2	51
ML ₂ : mesure	22,1	70
Couche de fondation : spécification	< 25	> 30
Couche de base : spécification	< 15	> 60

Par conséquent, les deux mélanges peuvent être utilisés en couche de fondation mais aucun en couche de base, à cause de leur plasticité trop élevée et de la valeur trop faible de l'indice CBR du mélange ML₁.

6.2.2. Propriétés du sable de Keur Massar utilisé pour la lithostabilisation

Pour rendre les mélanges ML₁ et ML₂ conformes aux spécifications pour les couches de base de routes à faible trafic ($N < 5.10^5$), le mélange de la latérite avec différents pourcentages de sable de dune provenant de la carrière de Keur Massar a été étudié.

Le sable de Keur Massar est un sable quasi-homométrique (Figure 6.3), dont les particules ont des dimensions majoritairement comprises entre 0,4 et 0,6 mm, avec une faible valeur de bleu de 0,12 g/100g.

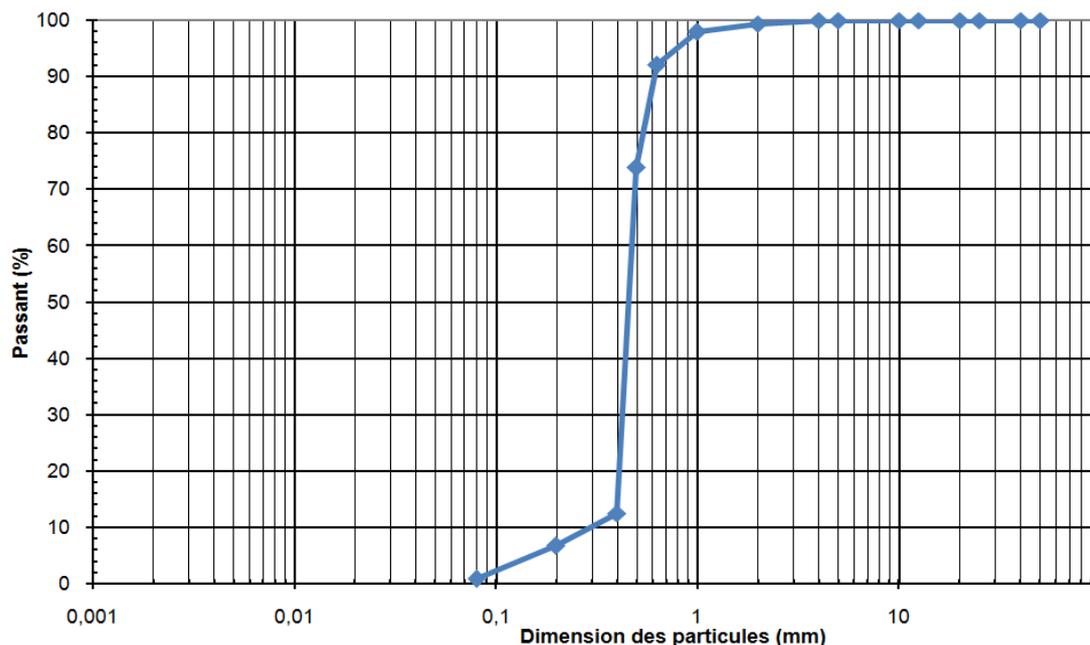


Figure 6.3. Courbe granulométrique du sable de dune de Keur Massar

6.2.3. Lithostabilisation de la latérite de Lam-Lam avec le sable de Keur Massar

Des mélanges ont été réalisés avec différents pourcentages de sable (5% à 30%) (Figure 6.4) puis caractérisés en laboratoire.

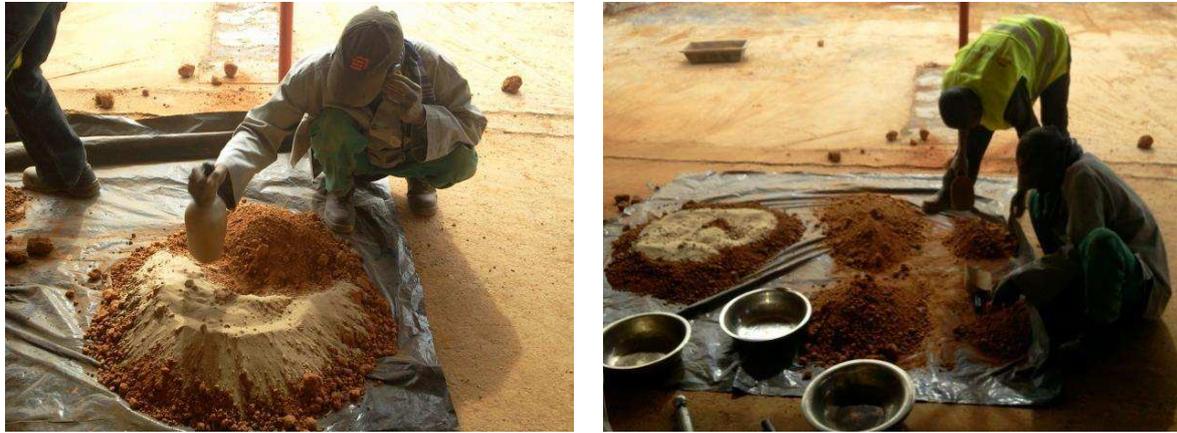


Figure 6.4. Études de lithostabilisation

La première analyse a consisté à déterminer leur indice de plasticité. L'étude a montré qu'un ajout de 30% de sable permet d'abaisser l'indice de plasticité en-dessous de la valeur de 15 recommandée par le CEBTP (1972) en couche de base pour route à faible trafic (Tableau 6.4).

Tableau 6.4. Variations de l'indice de plasticité en fonction de la quantité de sable ajoutée

Identification des mélanges	Pourcentage d'ajout de Keur Massar					
	0%	5%	10%	15%	20%	30%
ML ₁ + Sable dune	23,2	20,9	20,2	19,5	17,1	11,8
ML ₂ + Sable dune	22,1	19,1	18,1	17,7	17,5	12,9

Après ajout de 30% de sable de Keur Massar, les courbes granulométriques des mélanges ML₁ + sable et ML₂ + sable restent dans les fuseaux du CEBTP (1972) pour la couche de fondation et la couche de base (Figures 6.5 et 6.6).

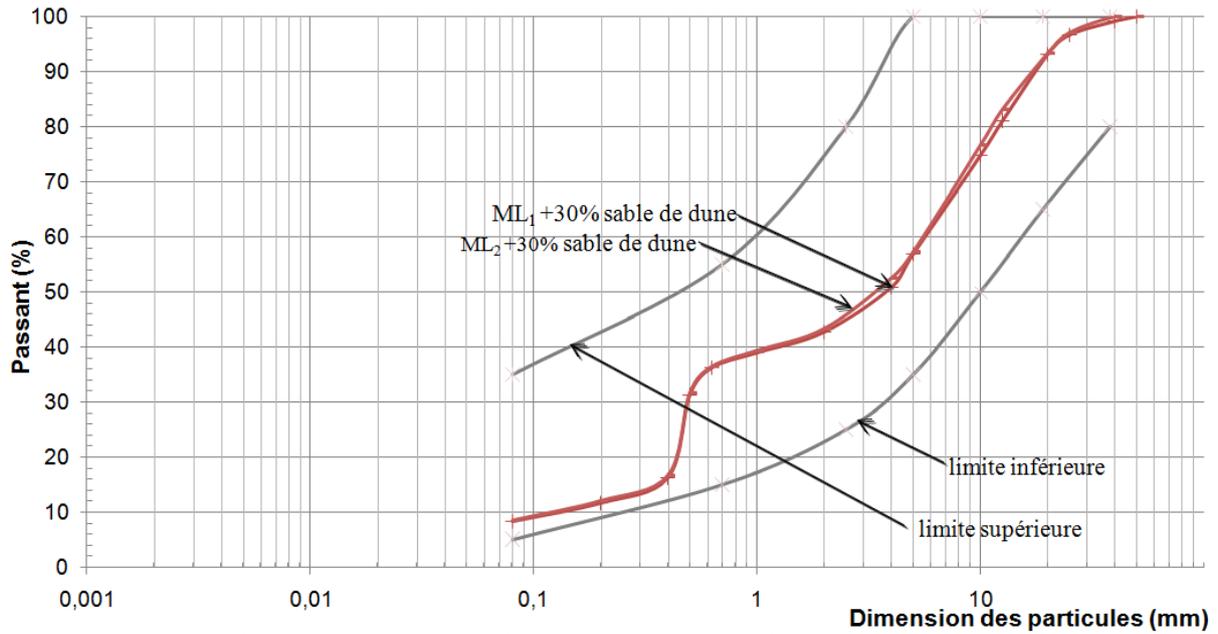


Figure 6.5. Représentation des courbes granulométriques de $ML_1 + 30\%$ de sable et $ML_2 + 30\%$ de sable et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de fondation de route à faible trafic

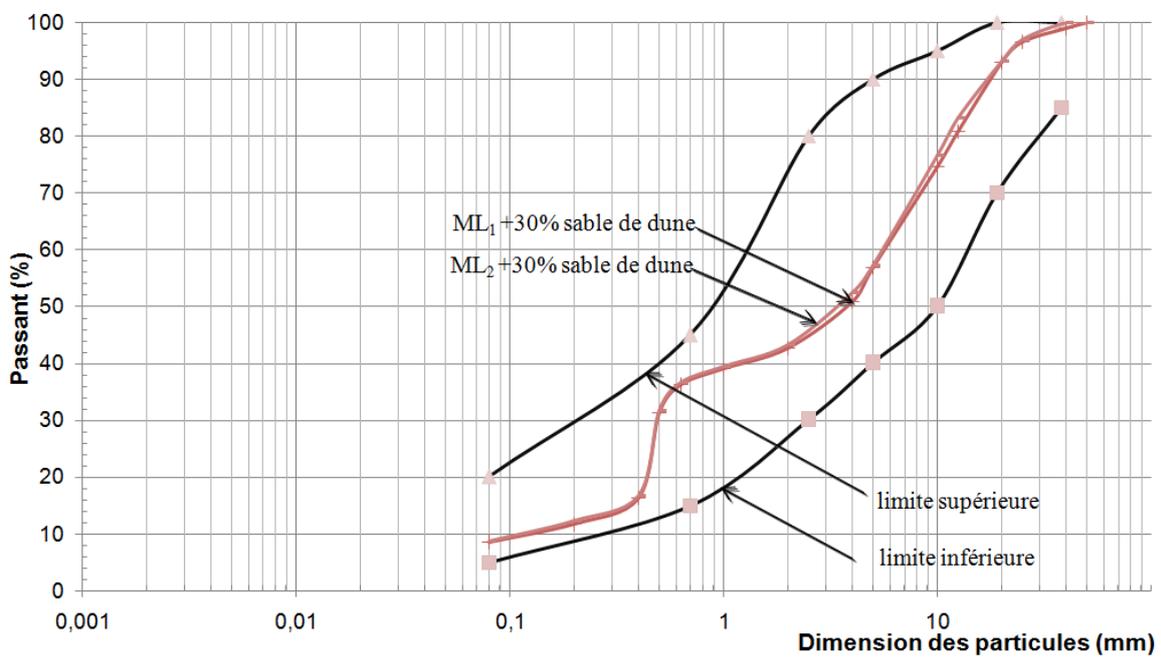


Figure 6.6. Représentation des courbes granulométriques de $ML_1 + 30\%$ de sable et $ML_2 + 30\%$ de sable et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de base de route à faible trafic

Les résultats des essais Proctor modifié et CBR réalisés sur les mélanges de latérite et de sable sont présentés dans le tableau 6.5. On observe que l'ajout de sable nécessaire pour abaisser l'indice de plasticité (I_p) en dessous de 15 entraîne une diminution de l'indice CBR pour les deux mélanges (ML_1 et ML_2) de la latérite de Lam-Lam. Seul le mélange ML_2 + sable vérifie la condition d'utilisation en couche de base.

Tableau 6.5. Synthèse des études de lithostabilisation

Identification des mélanges	Analyse granulométrique (%)		Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95% OPM
	0,08mm	2mm		w_{OPM} (%)	ρ_{dOPM} (g/cm ³)	
ML_1	10,7	25,7	23,2	11	2,05	51
ML_1 + 30% sable de dune	8,4	42,7	11,8	10,3	2,12	40
ML_2	11	26,5	22,1	11	2,01	70
ML_2 + 30% sable de dune	8,7	43,3	12,9	8,5	2,07	65

On note que l'ajout de sable à la latérite de Lam-Lam a un effet bénéfique sur l'indice de plasticité mais fait diminuer l'indice CBR.

6.3. Étude de la lithostabilisation de la latérite de Sindia

Pour compléter ces études, un autre prélèvement en provenance de la carrière de Sindia (S_9) a été lithostabilisé avec le même sable de dune de Keur Massar.

6.3.1. Caractéristiques de la latérite de Sindia

Les caractéristiques géotechniques du prélèvement S_9 sont présentées dans le tableau 6.6.

Tableau 6.6. Caractéristiques géotechniques du prélèvement de latérite de Sindia (S_9)

Identification du prélèvement	Analyse granulométrique (%)			Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95% OPM
	0,08 mm	2 mm	10 mm		w_{OPM} (%)	ρ_{dOPM} (g/cm ³)	
S_9	16,5	37,1	75,9	16,4	10,1	2,17	70

La courbe granulométrique de ce prélèvement entre dans les fuseaux spécifiés par le CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de fondation ou de base pour routes à faible trafic (Figures 6.7 et 6.8).

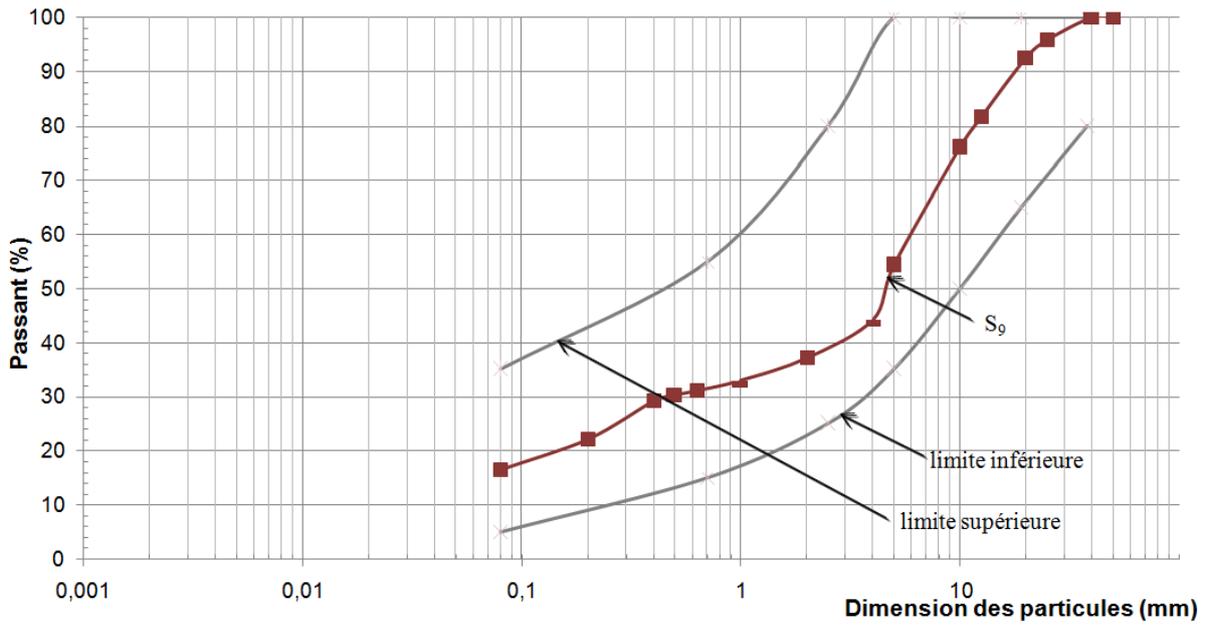


Figure 6.7. Représentation de la courbe granulométrique de S_9 et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de fondation de route à faible trafic

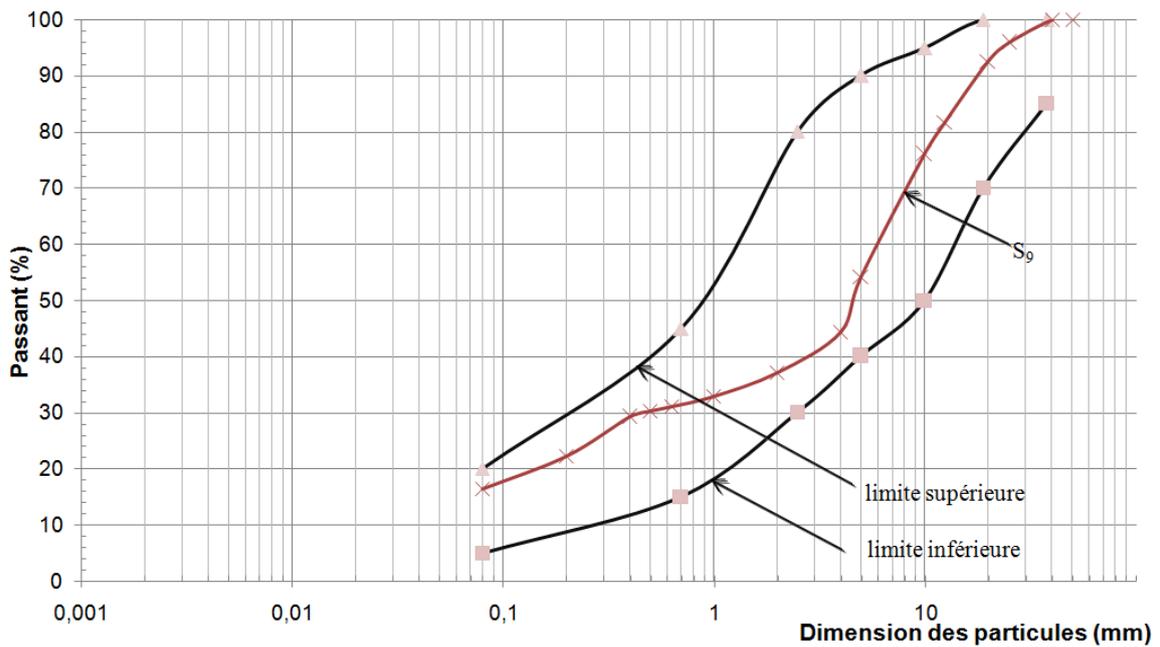


Figure 6.8. Représentation de la courbe granulométrique de S_9 et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de base de route à faible trafic

Ces résultats montrent que le prélèvement S_9 est utilisable en couche de fondation à trafic faible ($N < 5.10^5$). Par contre, il est inutilisable en couche de base à trafic faible en raison de sa forte plasticité.

6.3.2. Lithostabilisation de la latérite de Sindia

Les études de formulation réalisées (ajout de pourcentages croissants de sable et mesure de la consistance) montrent que l'ajout de 10% de sable permet d'abaisser l'indice de plasticité en dessous de 15 (Tableau 6.7).

Tableau 6.7. Influence de l'ajout de sable sur l'indice de plasticité

Identification du mélange	Pourcentage d'ajout de sable de dune		
	0%	5%	10%
S ₉ + Sable de dune	16,4	15,5	13,1

Après ajout de 10% de sable de Keur Massar, la courbe granulométrique du mélange S₉ + sable reste dans les fuseaux du CEBTP (1972) pour la couche de fondation et la couche de base pour route à faible trafic (Figures 6.9 et 6.10).

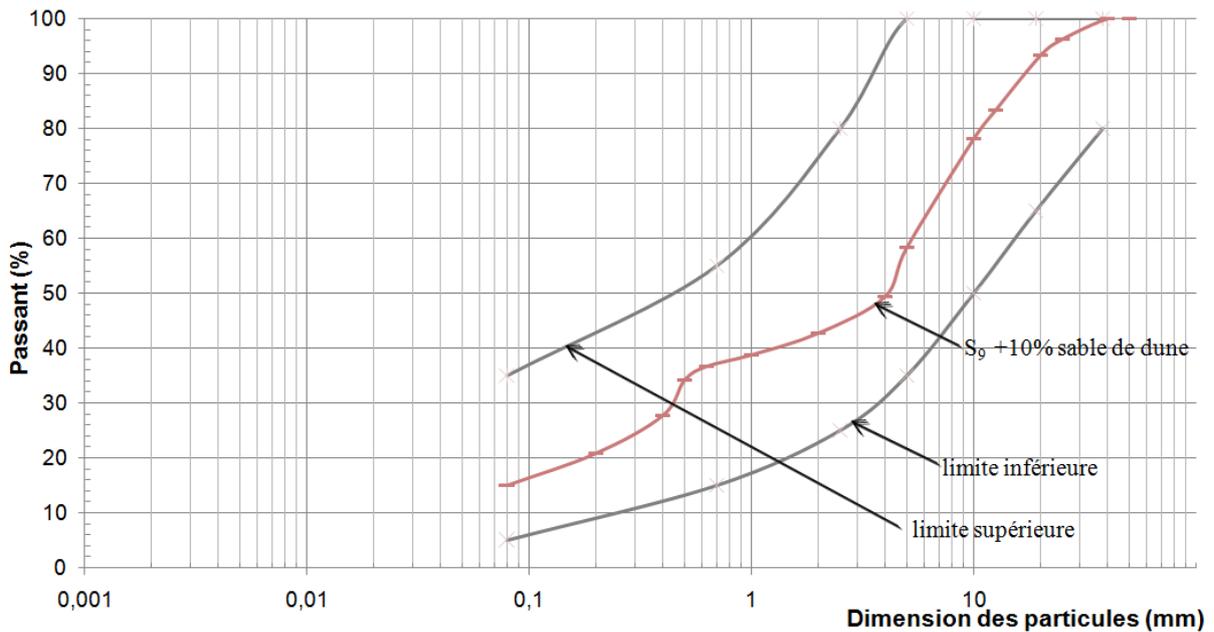


Figure 6.9. Représentation de la courbe granulométrique de S₉ + sable de dune et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de fondation de route à faible trafic

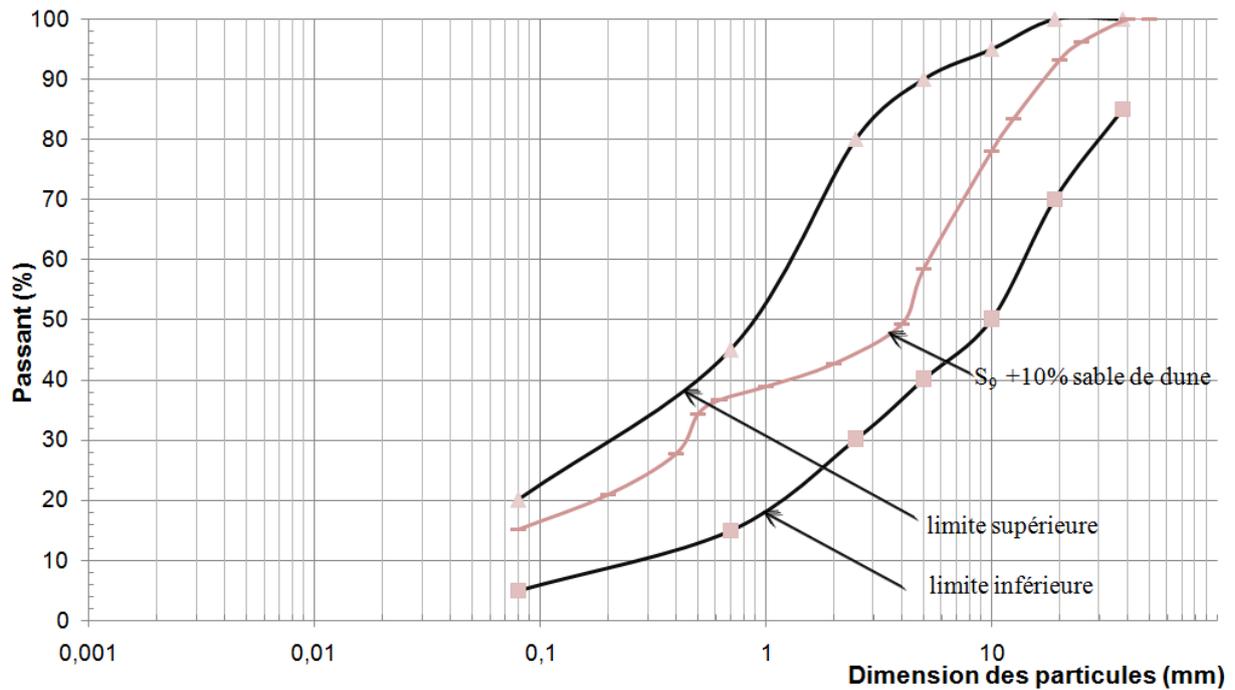


Figure 6.10. Représentation de la courbe granulométrique de S₉ + sable de dune et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de base de route à faible trafic

Les résultats des essais Proctor modifié et CBR montrent que l'apport d'environ 10% de sable pour abaisser l'indice de plasticité (I_p) en dessous de 15 entraîne une augmentation de l'indice CBR (Tableau 6.8).

Tableau 6.8. Synthèse des études de lithostabilisation

Identification des mélanges	Analyse granulométrique (%)		Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95% OPM
	0,08mm	2mm		w_{OPM} (%)	ρ_{dOPM} (g/cm ³)	
S ₉	16,5	37,1	16,4	10,1	2,17	70
S ₉ +10% Sable de dune	15,1	42,8	13,1	9,8	2,12	85

On observe cette fois que l'ajout du même sable produit une augmentation de l'indice CBR. Cette évolution différente mériterait des études complémentaires.

6.4. Réflexions sur la lithostabilisation

L'ajout de sable à un sol latéritique pour modifier ses propriétés d'usage se réfère nécessairement à des spécifications des propriétés d'usage. Ces spécifications s'appuient sur l'évaluation du comportement à long terme des matériaux vérifiant les critères dans des chaussées soumises à un trafic

connu. Comme nous l'avons noté plus haut, les critères utilisés dans les pays francophones d'Afrique tropicale et équatoriale sont assez anciens et ils n'ont probablement pas évolué faute de connaître le trafic réel sur les chaussées qui ont été observées et entretenues depuis.

L'étude des latérites de Lam-Lam et Sindia au Sénégal fait référence aux règles du CEBTP de 1972 et se limite à des objectifs limités en termes de trafic (trafic faible). L'étude du LNBTP du Burkina Faso (Toe, 2007) montre une autre application de la lithostabilisation pour le renforcement d'une latérite pour la route nationale 4 de ce pays, par mélange du sol latéritique avec un granite concassé de classe granulaire 0/31,5. Thilloux et Requirand (1983) rapportent les travaux d'exécution des chaussées de la route Tahoua-Arlit au Niger, pour lesquels la lithostabilisation avec 33% de calcaire concassé a été largement utilisée et citent des utilisations antérieures de cette technique au Burkina-Faso (alors Haute-Volta) sur la route Ouagadougou-Kedougou (30% de granite concassé) et en Guyane, entre Organabo et Saint-Laurent, avec des granulats semi-concassés, provenant de granulats dragués dans le Maroni. Ces auteurs insistent sur le fait que des années d'observations sont nécessaires avant de pouvoir confirmer les résultats des études sur le long terme. Mais il faut aussi connaître (donc mesurer) le trafic réel sur ces routes.

La présentation de Toe (2007) est résumée ci-après, parce qu'elle suggère des pistes pour comprendre et mieux concevoir la lithostabilisation.

Une autre étude publiée en 2012 sur la lithostabilisation d'une latérite du Cameroun, mais semble-t-il sans application de chantier, pose le problème de la référence pour les décisions de chantier. Elle est également résumée dans ce qui suit, avant de revenir sur le choix des références pour les matériaux des couches de base et de fondation des chaussées.

6.4.1. Lithostabilisation d'un graveleux latéritique avec du granite concassé (Toe, 2007)

Le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) du Burkina Faso (Toe, 2007) décrit la conception et la mise en œuvre d'un matériau appelé « lithostab », issu du mélange d'un graveleux latéritique et d'un granite concassé destiné à renforcer la fraction grossière du matériau. Ce matériau, d'usage ancien dans ce pays, puisqu'il est cité dans une note du LNBTP de Haute Volta de 1978 (Bibliographie des recommandations du CEBTP, 1984), a été mis en œuvre en couche de 15 à 25 cm sous une chaussée constituée à partir de la surface de 5 cm de béton bitumineux semi-granu 0/10, de 10 à 11 cm de grave bitume 0/14 et d'un enduit monocouche 6/10 de protection.

La courbe granulométrique du graveleux latéritique est représentée sur la figure 6.11, avant et après compactage. Les auteurs notent que le compactage a augmenté de 4% la teneur en fines. L'indice CBR du graveleux latéritique vaut en moyenne 65 à 95% de l'OPM et 104 à 98% de l'OPM.

Ce graveleux latéritique a été renforcé par l'ajout de granulats de granite concassé de classe granulaire 0/31,5, dont le pourcentage de fines varie entre 0 et 11% (Figure 6.12).

Les propriétés du mélange du graveleux latéritique avec des pourcentages de 20%, 25%, 30%, 35% et 40% de concassé granitique 0/31,5 sont rassemblées sur la figure 6.13. Cette figure montre que l'indice CBR à 98% de l'OPM passe par un maximum pour un ajout de 30% de concassé granitique. Ce pourcentage de 30%, qui se retrouve dans presque tous les mélanges optimaux, mériterait une étude complémentaire.

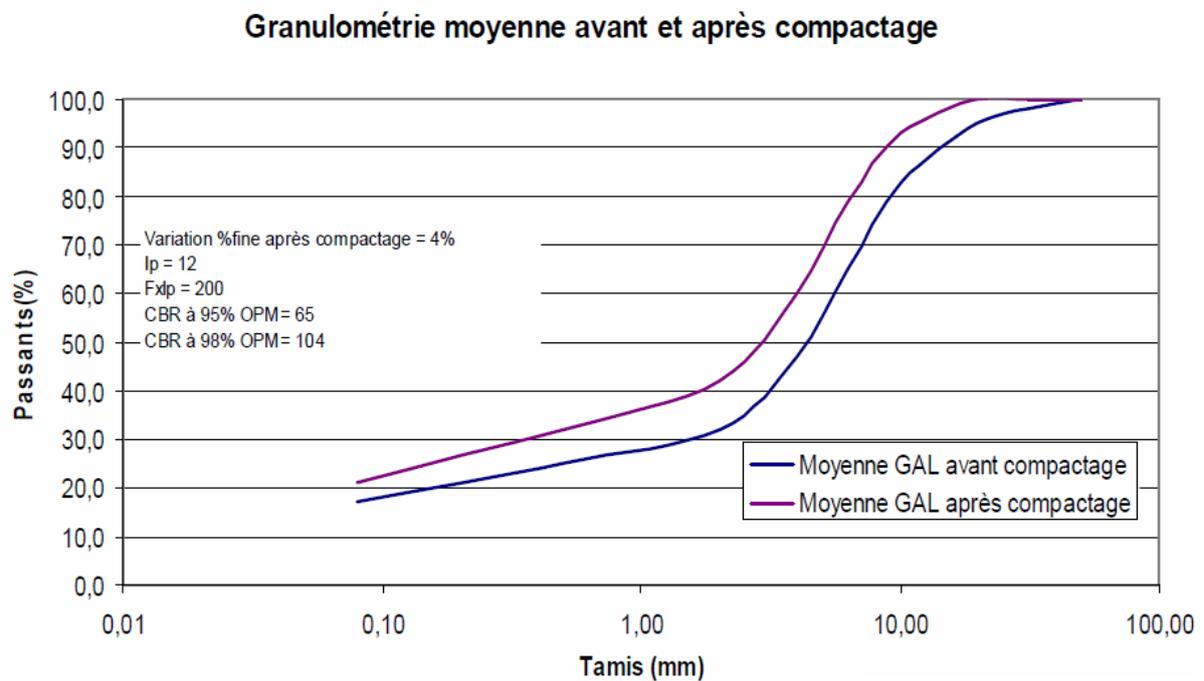


Figure 6.11. Représentation des courbes granulométriques du graveleux latéritique du Burkina Faso (Toe, 2007) avant et après compactage

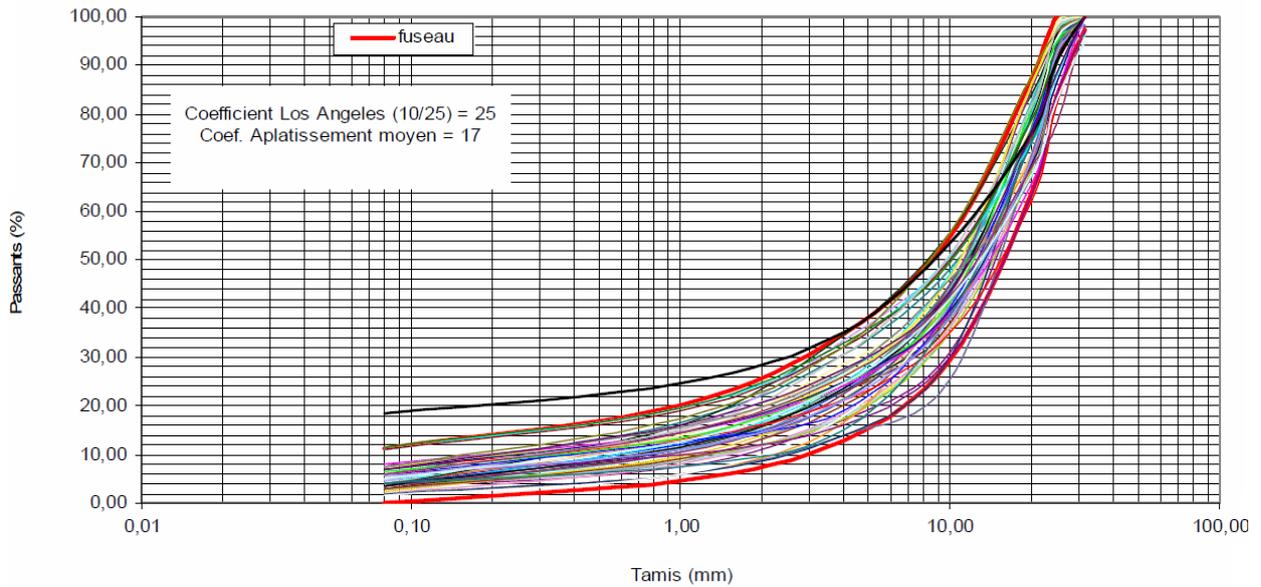


Figure 6.12. Représentation des courbes granulométriques du concassé granitique utilisé par le LNBTP (Toe, 2007)

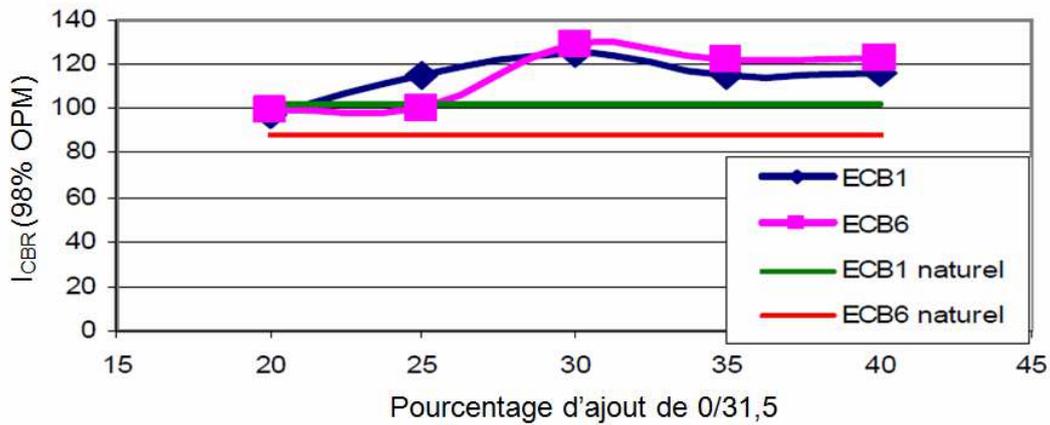


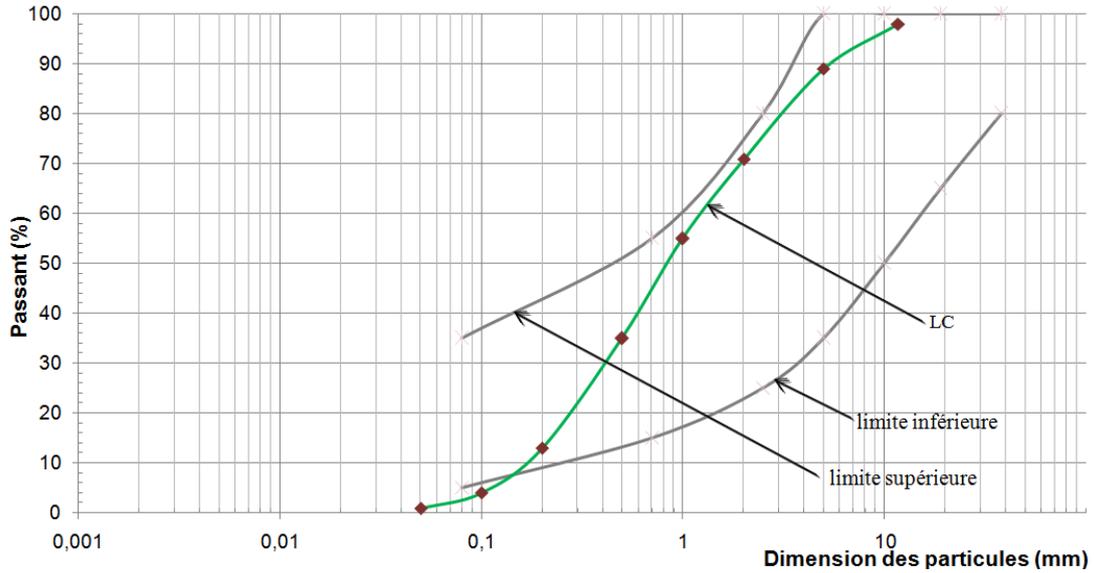
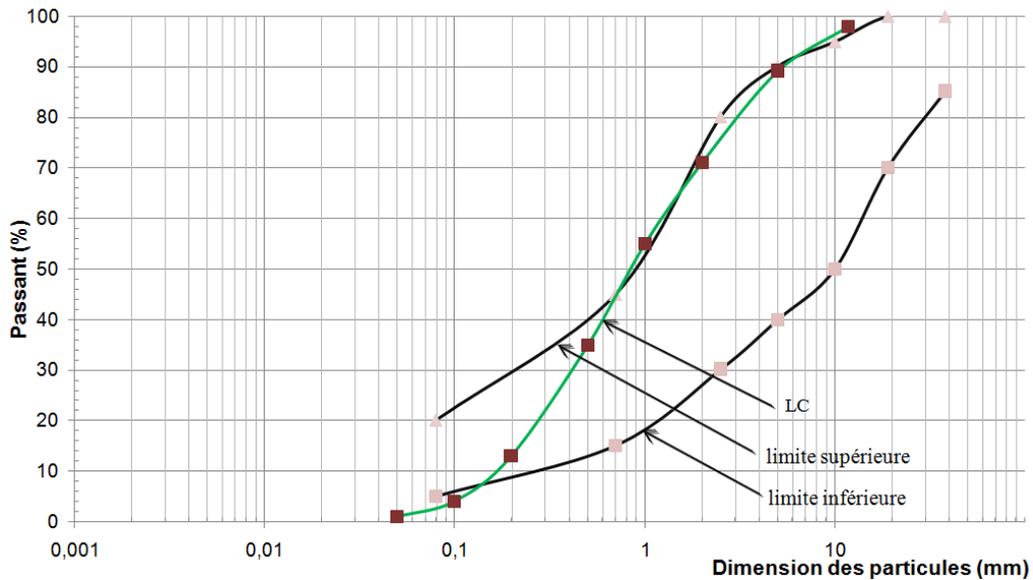
Figure 6.13. Évolution de l'indice CBR des mélanges étudiés par le LNBTP du Burkina Faso (Toe, 2007)

6.4.2. Lithostabilisation d'une latérite du Cameroun (Madjadoumbaye et al., 2012)

La latérite décrite par Madjadoumbaye et al. (2012) a été prélevée à Yaoundé (Cameroun). Pour prolonger l'étude effectuée sur les latérites du Sénégal, sa courbe granulométrique notée LC est représentée sur les figures 6.14 et 6.15 avec les fuseaux du CEBTP (1972). Ses caractéristiques à l'état « naturel » sont indiquées dans le tableau 6.9. La valeur de l'indice CBR à 95% de l'OPM a été déduite des courbes de l'article, en admettant qu'elle correspond à un compactage à 25 coups pour la préparation de l'éprouvette dans le moule CBR.

Tableau 6.9. Caractéristiques géotechniques du prélèvement en provenance de Yaoundé (LC)

Identification du prélèvement	Analyse granulométrique (%)			Indice de plasticité (I_p)	Proctor modifié		I_{CBR} à 95% OPM
	0,08 mm	2 mm	10 mm		w_{OPM} (%)	ρ_{dOPM} (g/cm ³)	
LC	2	71	95	11,1	17,5	1,71	14,6


Figure 6.14. Représentation de la courbe granulométrique de la latérite LC et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de fondation

Figure 6.15. Représentation de la courbe granulométrique de la latérite LC et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de base

Par rapport aux fuseaux du CEBTP (1972), la latérite étudiée est utilisable en couches de base et de fondation, au déficit de particules fines près.

L'étude de Madjadoumbaye et al. (2012) porte sur l'influence de l'ajout à cette latérite de différents pourcentages de sable provenant de la rivière Sanaga. Il s'agit d'un sable propre dont la courbe granulométrique est représentée sur la figure 6.16.

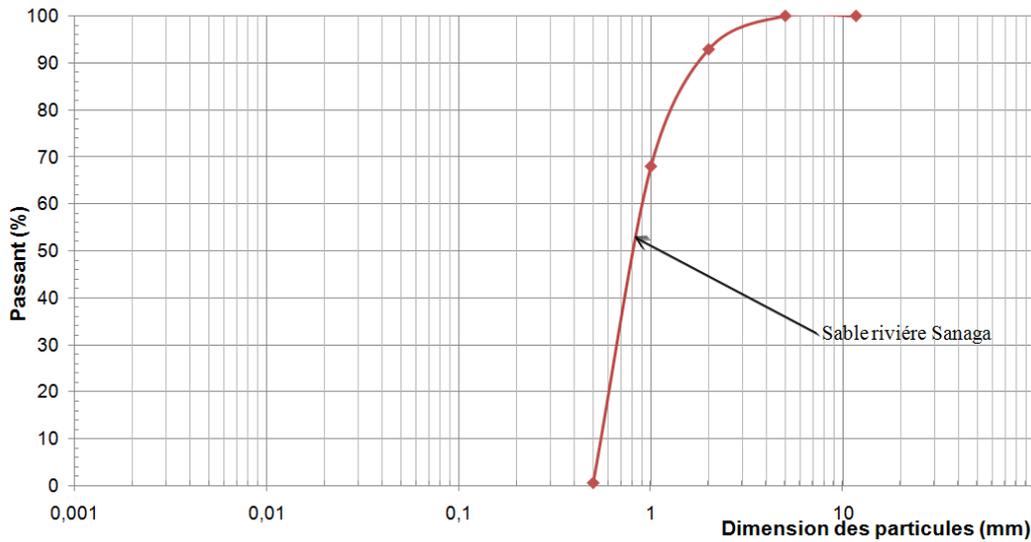


Figure 6.16. Courbe granulométrique du sable la rivière Sanaga

Après ajout de 10 à 40% de sable, les courbes granulométriques du mélange (Figures 6.17 et 6.18) sortent un peu des fuseaux du CEBTP (1972), mais sont peut-être acceptables.

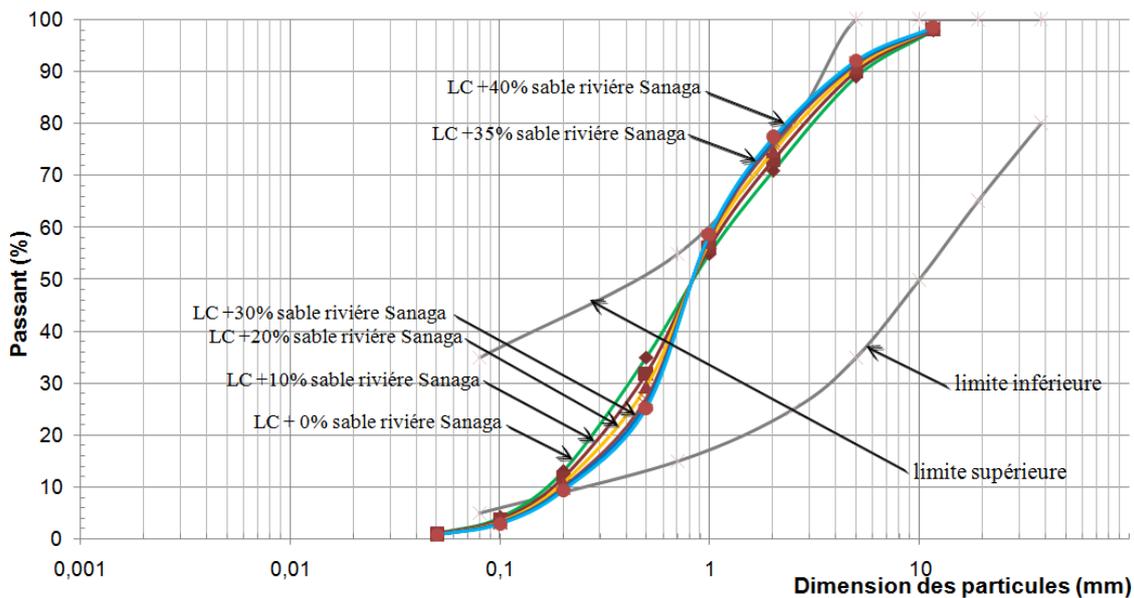


Figure 6.17. Représentation des courbes granulométriques de la latérite LC + sable de la rivière Sanaga et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de fondation

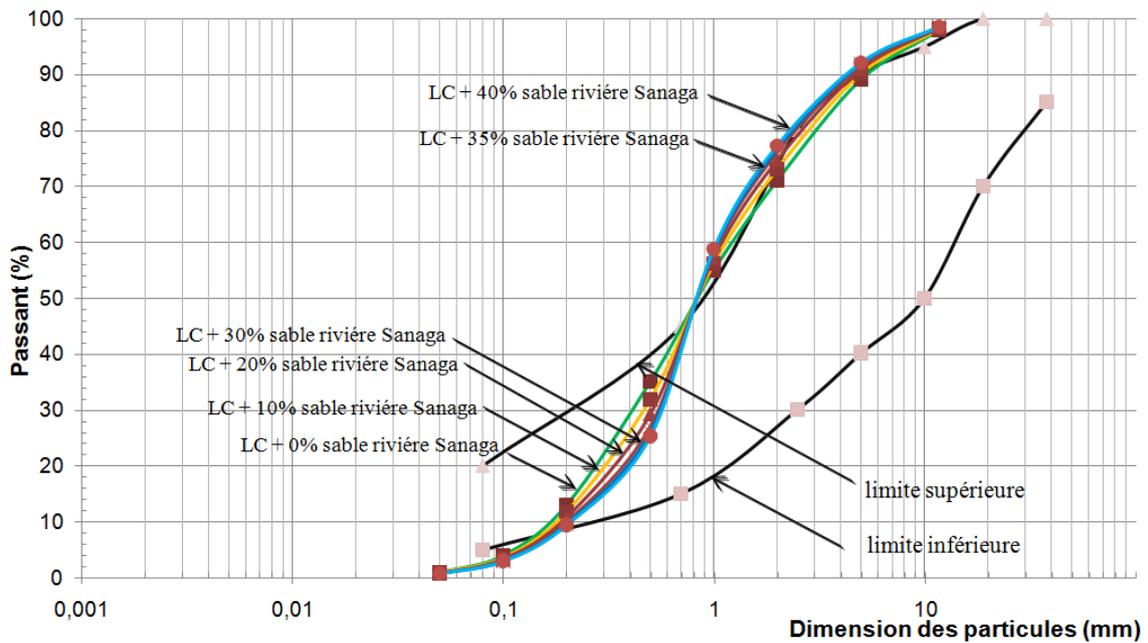


Figure 6.18. Représentation des courbes granulométriques de la latérite LC + sable de la rivière Sanaga et du fuseau granulométrique du CEBTP (1972) pour une utilisation en couche de base

Les résultats de l'étude de Madjadoumbaye et al. (2012) sont rassemblés dans le tableau 6.10.

Tableau 6.10. Variations de l'indice CBR en fonction de la quantité de sable ajoutée

Caractéristiques de compactage	Pourcentage d'ajout de sable de dune					
	0%	10%	20%	30%	35%	40%
ρ_d (g/cm ³) à 95% OPM	1,68	1,78	1,80	1,83	1,83	1,78
Indice CBR	12,6	18,7	23,2	40,4	38,6	26,5

Les valeurs de l'indice CBR pour 95% de l'optimum Proctor modifié (compactage des éprouvettes à 25 coups) permettent d'utiliser les mélanges contenant 30% et 35% de sable en couche de fondation de chaussées à faible trafic.

Les valeurs de l'indice CBR du tableau 6.10 passent par un maximum pour un ajout de sable de 30%.

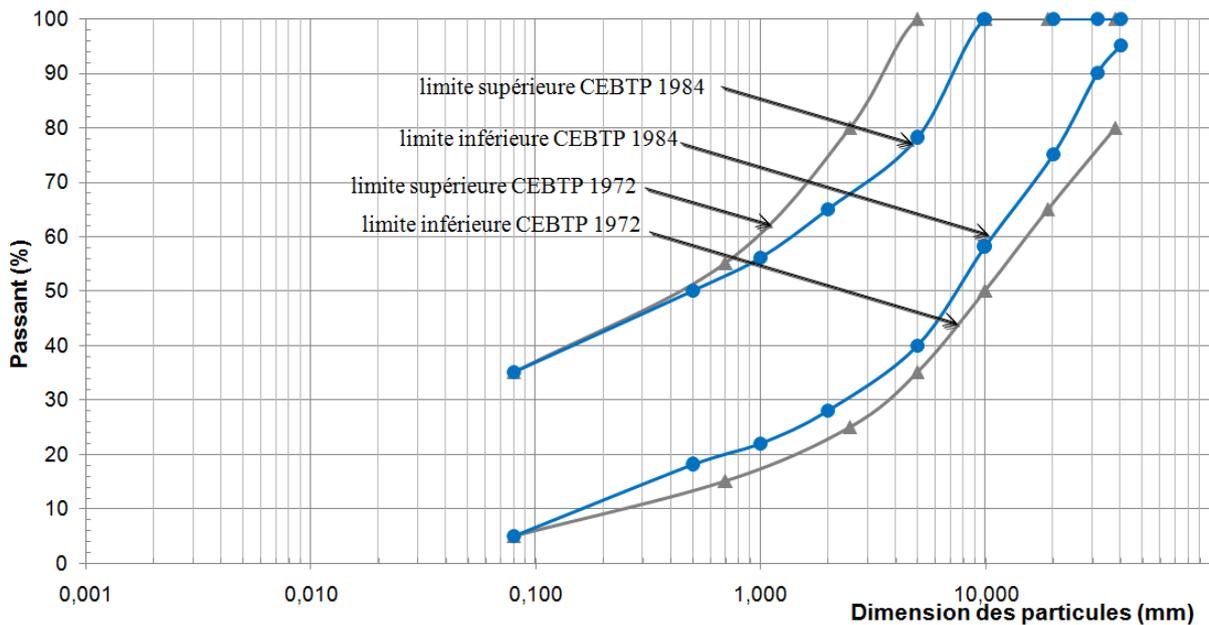
Les conclusions de Madjadoumbaye et al. (2012) sur la possibilité de mélanger leur latérite avec le sable de la rivière Sanaga font uniquement référence aux valeurs de l'indice CBR pour leurs trois niveaux de compactage (10 coups, 25 coups, que nous avons assimilé à 95% de l'OPM, et 55 coups). Cela représente une dérive par rapport aux conditions édictées par le CEBTP en 1972 (courbes granulométriques en laboratoire, avant compactage, indice de plasticité et indice CBR à 95% de l'OPM) et à celles du CEBTP dans leur version révisée de 1984 (courbes granulométriques après compactage, indice de plasticité et indice CBR à 95% de l'OPM).

Les prescriptions de 1984, rarement utilisées au Sénégal, sont discutées dans ce qui suit.

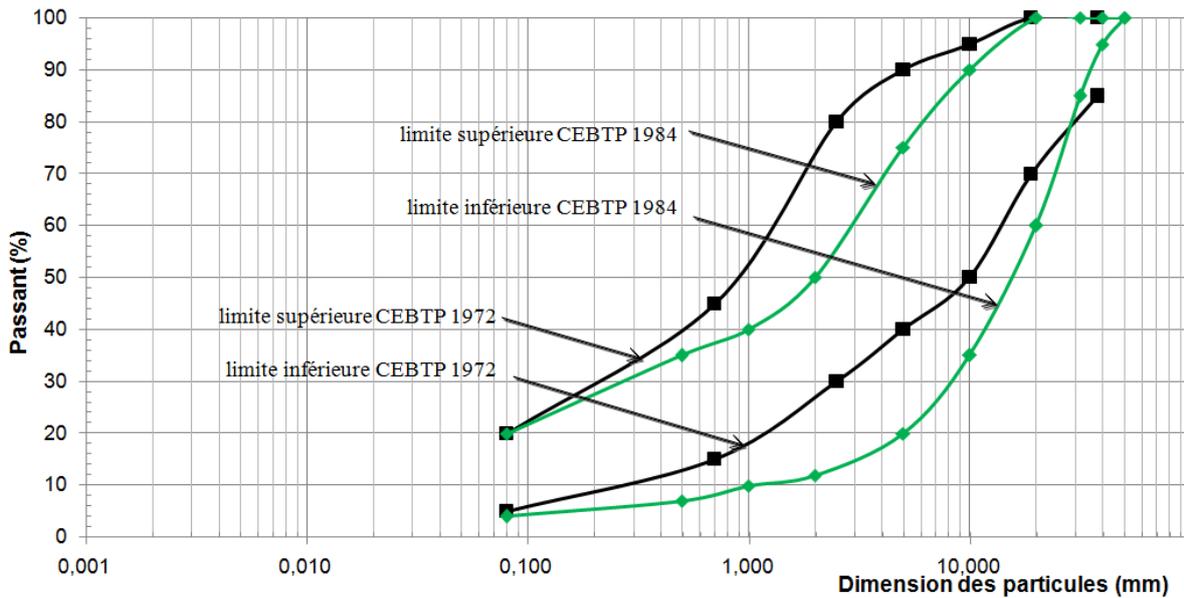
6.4.3. Fuseaux granulométriques du CEBTP (1972) et du CEBTP (1984)

La différence essentielle entre les spécifications du CEBTP de 1972 et celles de 1984 concerne les fuseaux granulométriques recommandés. Les conditions granulométriques sont plus sévères car, comme on le voit sur la figure 6.19 :

- d'une part, les courbes granulométriques concernent des matériaux compactés (les dimensions des particules sont réduites par le compactage, donc les courbes granulométriques sont plus hautes dans le diagramme que celles du matériau non compacté) et ;
- d'autre part, le fuseau spécifié pour les couches de fondation est plus étroit et celui des couches de base est décalé vers le bas et vers la droite (ce qui impose des particules globalement plus grossières).



a. Couche de fondation



b. Couche de base

Figure 6.19. Comparaison des fuseaux de référence pour les couches de base et de fondation de routes à faible trafic (CEBTP, 1972, 1984).

L'effet du compactage sur la courbe granulométrique des latérites de Lam-Lam et Sindia a été analysé dans le cadre de cette étude. La figure 6.20 montre l'évolution provoquée par la fragmentation des particules de la latérite de Lam-Lam du fait du compactage (en laboratoire). Les courbes correspondent aux moyennes obtenues sur dix prélèvements avant compactage et après compactage dans le moule CBR à trois niveaux d'énergie : 10 coups de dame, 25 coups et 55 coups. La courbe pour 25 coups correspond aux conditions usuelles de compactage (95% de l'OPM) et est a priori la plus proche des conditions de compactage sur chantier, qui correspondent au fuseau de spécification du CEBTP en 1984.

On observe que le compactage décale les courbes granulométriques de la latérite de Lam-Lam vers des granularités plus fines. Une évolution comparable est observée sur la figure 6.11, pour une latérite du Burkina Faso.

Le passage des spécifications du CEBTP de 1972 à celles de 1984 correspond donc à une plus grande exigence et impose des matériaux plus grossiers. On dispose de peu d'informations sur les conditions dans lesquelles ces spécifications sont appliquées ou partiellement appliquées ou ont été modifiées.

La révision éventuelle de ces spécifications nécessitera une collecte d'expérience à l'échelle de l'Afrique tropicale, puisque les différents pays de la zone tropicale ont suivi une évolution autonome depuis quelques décennies.

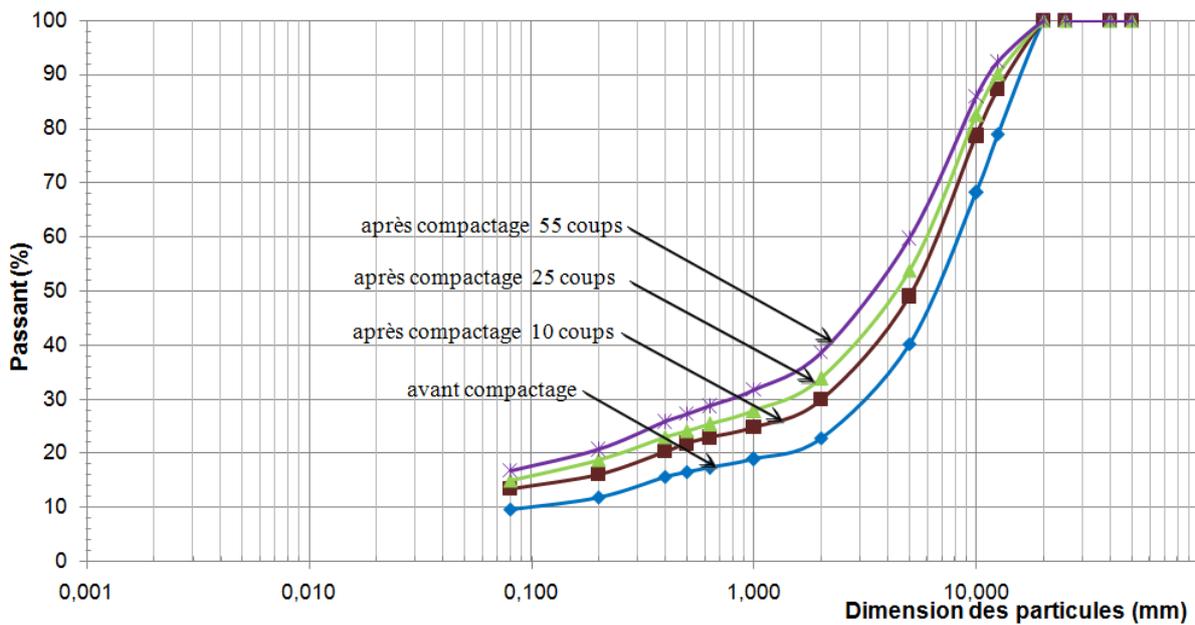


Figure 6.20. Évolution des courbes granulométriques moyennes de la latérite de Lam-Lam avant et après compactage dans le moule CBR

6.5. Conclusions

La lithostabilisation modifie les propriétés géotechniques des sols traités et les rend aptes à certaines utilisations routières. Les deux graveleux latéritiques du Sénégal étudiés réagissent à l'ajout de sable par une modification de leur courbe granulométrique, la diminution de leur indice de plasticité, la modification de leur optimum Proctor (modifié) et une évolution de sens opposé de leur indice CBR. Cette évolution conditionne leur usage en couche de fondation ou couche de base selon les critères établis par le CEBTP en 1972 et modifiés en 1984. Le réexamen de ces règles à la lumière de l'expérience des trois dernières décennies pourrait contribuer à redonner un sens aux connaissances passées et mieux comprendre le fonctionnement mécanique des latérites en construction routière.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les recherches présentées dans ce rapport sont centrées sur l'utilisation des graveleux latéritiques en construction routière. L'usage de ces sols est généralisé dans les pays tropicaux et équatoriaux et, dans certains pays, les ressources utilisables diminuent. L'intérêt pour une meilleure connaissance et utilisation de ces sols est donc largement partagé. Bien que les règles soient anciennes et qu'elles soient souvent contournées dans la pratique, notre souhait de contribuer à l'actualisation du système s'est trouvé confronté à l'immensité du travail nécessaire et nous avons orienté nos travaux vers les quatre points développés dans les chapitres 2, 3, 5 et 6 du mémoire.

L'élaboration d'une classification universelle des sols latéritiques, à laquelle nous avons voulu contribuer, est un projet ambitieux mais inachevé, compliqué par le caractère évolutif, la grande diversité et l'état actuel des connaissances sur ces sols, encore mal maîtrisés. L'étude de l'évolution de la granulométrie de sols latéritiques sous compactage CBR a montré que les sols latéritiques étudiés sont sensibles à l'énergie de compactage qui leur est appliquée. L'analyse de l'ensemble des fractions granulaires du sol, sans se limiter à la fraction grossière (10/14 mm ou 10/20 mm), met bien en évidence l'augmentation de la proportion des particules plus fines qui accompagne le compactage. De même, nos études montrent que le coefficient de dégradabilité (I_{DG}) ne constitue pas un bon facteur de classification des sols latéritiques. Par contre, il est indispensable de tenir compte du caractère évolutif des sols latéritiques lors de la sélection des matériaux mis en œuvre dans les couches de chaussées, pour éviter la dégradation prématurée des routes. C'est important dans les pays comme le Sénégal où la charge à l'essieu de 13 tonnes admise pour le dimensionnement est rarement respectée par les usagers.

En marge à ces études de compactage, les procédures de réalisation des essais géotechniques et routiers selon les normes françaises et brésiliennes ont pu être comparées, sur une latérite en provenance de la carrière de Picos au Brésil. Cette comparaison n'a montré aucune différence significative dans les résultats, même si l'étude n'a pas une ampleur suffisante pour écarter les possibles effets de dispersion des états des échantillons. L'observation la plus importante est que la réalisation de l'essai CBR diffère et donne des valeurs très différentes, mais cette différence est prise en compte dans les critères de choix des matériaux.

Les études statistiques par régression linéaire multiple ont montré qu'il existe des relations entre l'indice CBR et les résultats des analyses granulométriques effectuées sur la fraction 0/20mm du matériau ainsi qu'entre l'indice CBR et six autres paramètres : le passant au tamis de 80 μ m ($C_{0,08mm}$), les caractéristiques d'étendue et de courbure de la courbe granulométrique (C_{UL} et C_{CL}), l'indice de plasticité (I_p) et les caractéristiques du sol à l'optimum Proctor modifié (w_{OPM} et ρ_{dOPM}). Les formules correspondantes, établies séparément sur les prélèvements de la carrière de Sindia, sur ceux de la

carrière de Dougar et sur l'ensemble des données des deux sites, fournissent une approximation acceptable de la valeur de l'indice CBR. Toutefois, les formules ne sont plus applicables sur des données qui proviennent d'autres sites où l'on peut trouver d'autres types de latérites. Cet outil n'est donc pas extensible à tous les gisements de latérites d'un pays ou même d'une région.

Le dernier chapitre du mémoire analyse la lithostabilisation de latérites du Sénégal par un sable dunaire prélevé dans la carrière de Keur Massar. Les études effectuées sur les latérites de Lam-Lam et de Sindia montrent que des ajouts respectifs de 30% et de 10% de sable permettent d'abaisser l'indice de plasticité (I_p) de ces sols graveleux latéritiques en dessous de 15, seuil pour leur utilisation en couche de base. Mais ces ajouts ont entraîné une diminution de l'indice CBR de la latérite de Lam-Lam et une augmentation de l'indice CBR de la latérite de Sindia, ce qui incite à poursuivre les analyses, puisqu'en général la lithostabilisation produit une augmentation de l'indice CBR. De façon générale, la technique de lithostabilisation est une solution économique mais qui doit être étudiée avec soin.

Ainsi, les études menées au cours de cette recherche reflètent toute la complexité de la caractérisation des sols latéritiques pour leur utilisation en construction routière. Beaucoup de travail reste à faire avant de pouvoir modifier les règles utilisées au cours des quarante dernières années.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Autret P. (1983). Latérites et graveleux latéritiques. Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement (ISTED), 38 pages.

Bagarre E. (1990). Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. Synthèses. ISTED, 148 pages.

Bohi Z.P.B. (2008). Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière : le cas de la région de l'Agneby (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 142 pages.

CEBTP (1972). Manuel de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. Secrétariat d'Etat aux affaires étrangères chargé de la coopération, 51 pages.

CEBTP (1980). Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. Ministère de la coopération de la république française, 155 pages.

CEBTP (1984). Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. Ministère des relations extérieures - coopération et développement de la république française, 157 pages.

De Graft-Johnson J.W., Bhatia W.S. (1969). Engineering characteristics of the lateritic gravels of Ghana. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, pp. 13-43

Fall M. (1993). Identification et caractérisation mécanique des graveleux latéritiques du Sénégal : Application au domaine routier. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 179 pages.

Florentin J., L'Hériveau G. (1952). Étude bibliographique des latérites. Bureau Central d'Études pour les Équipements d'Outre-Mer (BCEOM).

GTR (1992). Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme.

Lyon Associates, Inc. (1971). Les sols latéritiques et d'autres sols difficiles d'Afrique. Études géotechniques pour USAID-Lyon Associates, Maryland USA-BRRI, Kumassi Ghana.

Madjadoumbaye J., Ngapgue F., Nouanga P., Abdou M.C. Tamo T.T. (2012). Improving the bearing capacity of laterite by adding sand. [Electronic Journal of Geotechnical Engineering](#) (EJGE), pp. 23-32.

Millogo Y. (2008). Étude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuses et latéritiques du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques : application au génie civil (bâtiment et route). Thèse de doctorat, Université de Ouagadougou, 144 pages.

Norme DNER-ME051-94 – Analyse granulométrique.

Norme DNER-ME122-94 – Limites de liquidité.

Norme DNER-ME082-94 – Limites de plasticité.

Norme NBR 7182 – Essai Proctor.

Norme NBR 9895 – Essai CBR.

Norme NF P 94-056 Sols – Reconnaissance et essais – Analyse granulométrique – Méthode par tamisage à sec après lavage.

Norme NF P 94-051 Sols – Reconnaissance et essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.

Norme NF P 94-093 Sols – Reconnaissance et essai de compactage Proctor – Détermination des références de compactage d'un matériau – Essai Proctor modifié – Essai Proctor normal.

Norme NF P 94-078 Sols – Reconnaissance et essais – Indice CBR après immersion – Indice CBR immédiat – Indice Portant immédiat – Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.

Novais-Ferreira H., Correira J. A. (1965). The hardness of lateritic concretions and its influence in the performance of soil mechanics tests. Laboratório de engenharia de Angola, Proceedings, International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 6, Montréal, vol. 1. pp. 82-86.

Rakotomalala. R. Portail.http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/cours_econometrie.html

Rakotomalala. R. Portail.http://eric.univlyon2.fr/~ricco/cours/cours/La_regression_dans_la_pratique.pdf

Rodrigues J.K.G., Reiffsteck P., Auriol J.C., Ndiaye M. (2010). Rationalisation de l'utilisation des sols latéritiques en corps de chaussée durable et de faible coût. XXVIII^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil. Session Ouvrages – Bitume, page 1122.

Thilloux M., Requirand R. (1983). La route Tahoua-Arlit (Niger). Les matériaux de chaussée. Études, Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement (ISTED), LCPC et BCEOM, 48 pages.

Tockol I. (1993). Contribution à l'étude des graveleux latéritiques dans les pays du Sahel : cas des routes non revêtues. Thèse M.Sc.A. (Génie civil), 209 pages.

Toe J.M. (2007). Utilisation de la technique de la lithostabilisation en assise de chaussée. Une expérience de chantier. Présentation à la Conférence des Jeunes Géotechniciens Africains, Tunis, 16-18 mars 2007. Présentation PowerPoint.

ANNEXES

Annexe 1 – Données de la carrière de Sindia

Annexe 1a. Données de Sindia – Résultats d'analyse granulométrique

Prélèvements	Analyse granulométrique (%)							
	0,08mm	0,2mm	0,5mm	1mm	2mm	4mm	5mm	10mm
S ₁	16,48	18,68	23,08	28,57	34,07	50,55	58,24	85,71
S ₂	23,08	27,47	30,77	34,07	40,66	56,04	63,74	86,81
S ₃	19,51	23,17	28,05	31,71	37,80	51,22	57,32	81,71
S ₄	23,24	26,30	30,05	33,79	38,89	54,65	61,56	84,01
S ₅	15,64	18,21	23,69	25,92	30,73	48,16	57,32	84,58
S ₆	17,63	20,40	27,16	30,93	35,25	50,89	57,98	86,25
S ₇	21,02	21,62	24,94	29,57	35,27	55,94	63,90	86,94
S ₈	22,11	26,54	32,56	34,77	42,75	58,85	66,46	89,80
S ₉	19,93	23,56	28,25	32,00	36,81	48,77	55,45	77,73
S ₁₀	21,03	24,88	29,45	32,69	37,14	51,20	57,57	79,69
S ₁₁	22,53	25,63	30,23	34,25	40,00	53,68	60,11	82,18
S ₁₂	32,30	34,80	40,00	43,70	50,40	62,80	68,10	85,80
S ₁₃	20,09	24,30	30,49	33,53	39,60	53,74	60,16	83,06
S ₁₄	19,93	24,69	32,40	35,82	36,80	55,99	62,10	82,52
S ₁₅	17,25	20,28	24,62	28,85	35,03	49,13	55,75	79,50
S ₁₆	16,47	22,12	37,41	40,24	46,12	66,00	72,24	85,76
S ₁₇	18,74	21,49	27,24	28,28	36,55	50,34	63,56	79,89
S ₁₈	21,11	24,22	30,78	34,00	39,89	53,09	59,11	81,11
S ₁₉	19,28	21,69	27,71	30,12	36,14	50,60	56,63	79,52
S ₂₀	19,06	23,27	32,16	35,09	40,94	54,62	60,23	80,58
S ₂₁	17,78	22,13	26,03	30,39	36,58	52,06	58,37	81,19
S ₂₂	16,24	20,15	22,59	26,98	31,62	44,44	50,67	73,38
S ₂₃	17,75	21,88	25,32	29,21	35,05	51,20	58,53	82,13
S ₂₄	15,29	18,16	22,99	26,21	30,34	43,22	47,93	74,60
S ₂₅	21,56	25,41	31,13	34,21	39,49	51,38	58,09	81,85
S ₂₆	19,67	30,39	32,71	35,69	41,10	53,59	59,78	81,10
S ₂₇	22,43	24,05	30,17	32,95	37,92	49,83	56,53	81,85
S ₂₈	16,08	18,56	24,71	27,58	32,81	44,44	51,63	78,04
S ₂₉	15,94	16,44	22,79	25,16	29,51	39,60	45,70	73,10
S ₃₀	11,30	15,71	20,01	22,36	26,15	37,22	41,82	71,61

Annexe 1a. Données de Sindia – Résultats d'analyse granulométrique (suite)

Prélèvements	Analyse granulométrique (%)							
	0,08mm	0,2mm	0,5mm	1mm	2mm	4mm	5mm	10mm
S ₃₁	14,49	19,20	23,93	26,69	31,33	44,32	49,40	79,20
S ₃₂	16,48	22,33	30,62	33,59	38,27	51,26	56,27	81,95
S ₃₃	12,09	17,70	23,46	25,73	29,68	41,88	46,34	77,23
S ₃₄	11,20	12,10	17,87	19,65	23,37	34,57	41,67	74,87
S ₃₅	9,05	12,31	15,50	17,14	20,40	31,95	39,40	72,06
S ₃₆	16,87	23,12	30,25	33,13	38,29	51,58	59,29	85,20
S ₃₇	18,86	23,98	32,67	35,61	40,08	47,82	58,58	82,04
S ₃₈	18,46	23,53	28,41	30,69	35,07	44,33	51,24	75,75
S ₃₉	12,81	18,25	21,52	23,11	26,06	34,51	39,35	68,21
S ₄₀	13,76	18,48	23,01	25,33	29,23	38,70	43,84	68,64

Annexe 1b. Données de Sindia – Caractéristiques de compactage et de plasticité

Prélèvements	Indice de plasticité (I _p)	Proctor		I _{CBR}
		w _{OPM} (%)	ρ _{dOPM} (g/cm ³)	
S ₁	18,46	12	2,1	59
S ₂	19,26	13,1	2,06	53
S ₃	21,41	12,2	2,07	50
S ₄	20,04	13,5	2,02	50
S ₅	19,9	12,4	2,05	50
S ₆	19,96	11,5	2,02	55
S ₇	20	10,7	2,1	56
S ₈	19,53	10,5	2	55
S ₉	20,9	12,7	2,05	64
S ₁₀	23,2	11,3	1,95	47
S ₁₁	20,54	13,1	2,07	55
S ₁₂	21,08	11,4	2,09	50
S ₁₃	21,96	12,2	2,06	57
S ₁₄	16,65	10,4	2,12	57
S ₁₅	20,82	10,9	2,11	58

Annexe 1b. Données de Sindia – Caractéristiques de compactage et de plasticité (suite)

Prélèvements	Indice de plasticité (I _p)	Proctor		I _{CBR}
		w _{OPM} (%)	ρ _{dOPM} (g/cm ³)	
S ₁₆	15,26	14,3	1,98	62
S ₁₇	18,94	10,4	2,11	37
S ₁₈	19,29	10,5	2,1	45
S ₁₉	21,57	11,3	2,07	55
S ₂₀	17,71	10,8	2,01	54
S ₂₁	20,28	10,9	2,13	60
S ₂₂	18,3	12,2	2,1	55
S ₂₃	18,71	12,1	2,14	59
S ₂₄	16,93	11,3	2,11	65
S ₂₅	16,46	11,6	2,143	60
S ₂₆	14,34	9,6	2,13	65
S ₂₇	20,48	12,8	2,1	60
S ₂₈	18,54	10,5	2,13	65
S ₂₉	19,66	10,5	2,14	60
S ₃₀	15,06	10,20	2,11	65
S ₃₁	14,84	11,70	2,13	60
S ₃₂	16,37	9,30	2,12	65
S ₃₃	14,65	10,30	2,12	70
S ₃₄	16,39	9,90	2,14	75
S ₃₅	14,60	11,30	2,12	70
S ₃₆	16,19	11,20	2,05	60
S ₃₇	16,44	10,10	2,17	70
S ₃₈	14,45	10,30	2,12	70
S ₃₉	24,09	9,40	2,16	65
S ₄₀	20,54	9,90	2,13	55

Annexe 2 – Données de la carrière de Dougar

Annexe 2a. Données de Dougar – Résultats d'analyse granulométrique

Prélèvements	Analyse granulométrique (%)							
	0,08mm	0,2mm	0,5mm	1mm	2mm	4mm	5mm	10mm
D ₁	26,81	32,33	36,66	37,45	39,03	46,12	50,99	74,24
D ₂	24,67	29,96	31,89	32,37	33,81	41,03	46,21	73,04
D ₃	14,26	18,53	20,37	23,42	29,94	46,84	58,45	91,65
D ₄	20,67	25,77	28,32	29,13	30,34	39,33	46,04	71,95
D ₅	19,26	24,34	27,91	29,76	32,53	41,87	50,87	79,12
D ₆	19,19	24,32	26,35	27,03	28,92	36,08	40,95	64,46
D ₇	21,81	26,79	28,70	29,34	30,61	36,35	40,18	62,63
D ₈	16,43	20,77	22,46	22,95	24,40	33,33	39,98	67,15
D ₉	22,34	29,06	31,22	31,98	33,38	38,96	43,15	63,71
D ₁₀	23,73	33,42	37,52	38,39	40,25	47,08	51,80	73,79
D ₁₁	23,44	30,34	33,46	33,98	35,29	40,23	46,35	61,07
D ₁₂	39,00	49,42	55,08	55,60	56,89	61,52	64,35	77,99
D ₁₃	25,58	33,01	37,76	40,19	46,16	55,30	60,05	80,88
D ₁₄	25,94	35,28	40,99	42,28	45,01	53,70	58,11	77,82
D ₁₅	28,15	34,80	41,45	43,94	52,14	63,30	69,95	83,02
D ₁₆	24,55	35,68	38,24	39,51	42,20	49,49	55,12	75,45
D ₁₇	19,97	28,49	45,39	48,46	51,40	58,10	62,99	78,77
D ₁₈	25,00	29,59	39,73	41,30	44,20	52,42	58,45	77,90
D ₁₉	17,93	23,77	29,61	30,94	33,60	41,70	46,08	65,74
D ₂₀	29,17	36,79	44,52	45,95	48,93	61,07	66,90	85,48
D ₂₁	22,45	30,24	35,35	36,42	38,58	46,24	52,82	74,19
D ₂₂	27,09	36,34	40,86	41,96	44,49	52,09	57,16	81,06
D ₂₃	24,53	31,31	39,14	40,77	43,57	53,15	59,23	82,71
D ₂₄	24,55	30,58	40,40	42,08	44,53	52,23	57,37	80,02
D ₂₅	22,12	29,18	35,88	37,53	40,24	50,24	56,35	81,88
D ₂₆	26,52	33,93	42,17	43,37	45,76	55,44	59,02	78,38
D ₂₇	29,76	35,12	42,26	43,33	45,48	58,81	61,19	80,12
D ₂₈	31,31	42,72	46,84	47,82	49,64	56,07	59,47	75,97
D ₂₉	27,41	38,97	45,05	46,13	48,15	56,73	61,26	79,62
D ₃₀	26,99	30,27	36,52	37,87	40,81	51,47	55,27	78,55
D ₃₁	31,32	37,00	40,90	42,43	45,39	55,20	60,17	80,61

Annexe 2a. Données de Dougar – Résultats d'analyse granulométrique (suite)

Prélèvements	Analyse granulométrique (%)							
	0,08mm	0,2mm	0,5mm	1mm	2mm	4mm	5mm	10mm
D ₃₂	33,97	40,13	44,36	46,03	49,23	59,87	65,26	87,44
D ₃₃	21,65	30,85	42,61	44,00	46,57	54,95	61,35	79,16
D ₃₄	25,06	34,13	39,23	40,25	42,74	51,13	56,01	77,89
D ₃₅	31,87	37,10	42,82	43,80	46,47	53,89	57,91	76,89
D ₃₆	15,86	21,74	23,02	23,79	25,45	33,76	39,51	66,37
D ₃₇	26,07	33,90	60,47	61,57	65,97	69,65	72,71	84,94
D ₃₈	26,41	41,39	44,15	45,07	47,17	55,32	59,66	77,40
D ₃₉	23,79	46,73	67,52	68,27	69,67	75,03	76,85	89,17
D ₄₀	27,07	40,37	55,78	56,59	58,58	64,53	68,38	85,06
D ₄₁	45,70	59,70	63,10	65,50	69,50	71,50	79,50	90,20
D ₄₂	47,17	56,22	57,24	58,14	59,73	64,71	67,08	79,86
D ₄₃	28,52	54,39	56,35	57,27	59,47	66,40	69,40	82,68
D ₄₄	29,62	36,61	47,27	48,70	51,18	61,14	64,45	83,18
D ₄₅	28,70	32,18	54,65	55,77	57,81	66,09	78,14	89,89
D ₄₆	29,82	39,59	48,71	50,00	52,57	60,54	62,85	79,43

Annexe 2b. Données de Dougar – Caractéristiques de compactage et de plasticité

Prélèvements	Indice de plasticité (I _p)	Proctor		I _{CBR}
		w _{OPM} (%)	ρ _{dOPM} (g/cm ³)	
D ₁	14,53	9,2	2,06	40
D ₂	13,92	9,6	2,01	40
D ₃	12,18	10,2	2,13	45
D ₄	11,59	9,5	1,833	40
D ₅	12,07	11,5	2	50
D ₆	12,34	10,1	2,06	40
D ₇	13,91	9,2	1,96	40
D ₈	10,88	8,3	2	50
D ₉	13,21	9,3	2,07	40
D ₁₀	10,35	9,4	1,95	55

Annexe 2b. Données de Dougar – Caractéristiques de compactage et de plasticité (suite)

Prélèvements	Indice de plasticité (I _p)	Proctor		I _{CBR}
		W _{OPM} (%)	ρ _{dOPM} (g/cm ³)	
D ₁₁	11,6	10,6	1,92	45
D ₁₂	11,77	8,3	2	45
D ₁₃	12,82	8	2,02	50
D ₁₄	12,06	10,2	2,03	50
D ₁₅	14,88	9,8	2,02	45
D ₁₆	10,99	9,4	1,95	45
D ₁₇	11,69	11,4	1,95	45
D ₁₈	18,84	10,5	1,94	55
D ₁₉	13,83	10,3	2,02	50
D ₂₀	12,36	8,5	1,98	50
D ₂₁	12,37	9,7	2	55
D ₂₂	13,5	9,8	2,008	55
D ₂₃	14,46	10,2	1,97	55
D ₂₄	17,05	10,1	2,03	50
D ₂₅	18,77	10,6	2	50
D ₂₆	10,91	8,1	2,03	45
D ₂₇	17,6	10,2	2	50
D ₂₈	11,75	9,7	1,92	55
D ₂₉	12,48	10,2	1,95	55
D ₃₀	17,09	11,8	1,934	55
D ₃₁	13,36	11,5	2,02	50
D ₃₂	17,85	11,5	2,02	55
D ₃₃	15,57	11,9	2,06	55
D ₃₄	15,1	12,4	2	45
D ₃₅	12,31	11,3	2	50
D ₃₆	15,14	8,2	2	50
D ₃₇	11,56	9,6	2,02	45
D ₃₈	11,28	8,6	1,99	45
D ₃₉	11,43	9,6	2,02	50
D ₄₀	13	8,4	2,04	55
D ₄₁	11,64	10,5	2,02	55
D ₄₂	12,11	7,4	1,99	50
D ₄₃	10,52	8,3	2,05	55
D ₄₄	13,32	11,1	2	45
D ₄₅	12,52	12,3	1,99	45
D ₄₆	9,72	9,7	1,96	50

Annexe 3 - Applications aux données de Bohi (2008) de la formule (5.14) du chapitre 5

Nom	C_{80μm}	C_{UL}	C_{CL}	I_p	G_{dOPM}	W_{OPM}	I_{CBR}	I_{CBR} calculé
101	18	375	1,580	20	2,17	7	37	60,2
102	17	250	2,121	26	2,09	8,3	28	57,4
103	26	437,5	0,886	21	2,04	9	35	44,1
104	19	375	2,219	32	2,18	9,6	27	58,5
105	14	500	1,556	22	2,24	6,5	48	62,1
106	14	450	1,562	21	2,16	7,8	35	56,6
107	14	462,5	1,562	18	2,11	6,3	48	53,4
108	26	350	1,105	21	2,19	6,8	28	61,3
109	17	400	1,795	19	2,18	7,3	37	60,2
110	14	362,5	1,851	19	2,2	6,8	49	64,1
111	15	175	1,607	24	2,32	6,7	45	80,2
112	31	237,5	1,012	28	1,97	12,8	19	41,8
113	27	112,5	1,373	29	2	12,1	11	50,1
114	15	175	1,607	22	2,18	8,4	33	67,7
115	27	350	1,063	23	2,1	8,8	20	52,2
116	28	106,25	1,108	35	2,04	9,2	27	55,2
117	22	112,5	1,172	28	2,08	10,1	31	59,0
118	18	125	0,711	18	2,25	7,3	22	75,4
119	41	115	0,807	33	1,95	13,9	18	41,8
120	17	112,5	1,318	21	2,2	8,7	36	71,0
121	12	200	1,421	22	2,16	9,7	25	64,6
201	31	115	1,097	28	1,97	12,8	19	46,4
202	27	112,5	1,373	29	2	12,1	11	50,1
203	15	131,25	1,607	22	2,18	8,4	33	69,3
204	27	62,5	0,673	23	2,1	8,8	20	62,6
205	28	107,5	1,108	35	2,04	9,2	27	55,2
206	22	112,5	1,172	28	2,08	10,1	31	59,0
207	18	125	1,172	18	2,25	7,3	22	75,6
208	41	87,5	1,170	33	1,95	13,9	18	43,0
209	17	112,5	1,318	21	2,2	8,7	36	71,0
210	12	132,5	1,421	22	2,16	9,7	25	67,1
211	27	62,5	0,673	25	2,36	6,6	26	85,2
212	28	106,25	1,108	23	2,24	7,1	24	73,6
213	22	112,5	1,172	23	2,08	11	32	58,5
301	23	400	1,752	28	2,27	6,3	39	66,7
302	34	250	1,262	26	2,03	8,5	42	49,2
303	31	115	1,895	15	2,35	6,5	38	82,9
304	29	500	1,320	24	2,14	8,8	35	49,6
305	17	250	2,095	19	2,27	8	43	72,6
306	10	132,5	2,095	23	2,4	6,5	21	89,5
307	11	250	0,389	21	2,35	5,2	30	81,3

308	17	250	0,810	19	2,12	9,7	25	58,6
309	27	525	0,926	21	2,01	8,9	40	38,4
310	24	112,5	0,834	23	2,18	8,8	22	67,8
311	10	118,75	0,898	18	2,25	8,3	26	76,3
312	23	130	1,136	14	1,96	13,8	24	46,3
313	17	112,5	1,009	27	2,35	6,1	32	84,7
314	24	115	1,342	25	2,29	7,4	21	77,8
315	16	112,5	1,173	22	2,07	10,2	28	59,4
401	20	625	1,249	28	2,11	7,7	13	44,6
402	24	550	1,391	26	2,11	7	20	47,4
403	13	500	1,548	15	2,2	5,8	65	60,0
404	22	562,5	1,580	24	2,15	7,2	33	50,6
405	12	475	1,551	19	2,15	5,8	31	56,8
406	22	437,5	1,239	23	2,15	6,7	43	55,5
407	16	525	1,458	21	2,28	6,3	40	64,3
408	20	500	1,315	19	2,21	8,4	39	57,3
409	18	437,5	1,199	21	2,12	7,2	42	53,5
410	20	675	1,241	23	2,14	9,2	38	44,3
411	18	337,5	1,241	18	2,16	7,2	35	60,6
412	23	250	1,241	14	2,27	6,3	43	72,7
413	21	562,5	1,241	27	2,22	7,5	21	55,9
414	22	200	1,503	25	2,22	8,2	30	68,8
415	22	300	1,270	22	2,22	8,2	25	65,1
416	19	350	1,024	18	2,22	8	40	64,1
417	18	650	0,653	20	2,11	6	22	45,5
418	22	375	0,446	25	2,09	8,2	26	51,4
419	21	425	0,605	23	2,1	9,2	24	49,9
420	18	400	0,746	23	2,1	8,8	32	51,7
421	25	375	0,504	22	2,05	9,1	21	47,1
422	22	412,5	0,777	22	2,18	8	28	57,7
423	15	275	1,099	21	2,25	8	40	69,8
424	14	225	0,919	22	2,19	8,9	30	66,2
425	22	212,5	1,100	22	2,14	8,7	29	61,5
426	23	150	1,057	23	2,18	10,6	35	65,3
427	26	118,75	0,920	22	2,17	8,7	33	66,6
428	32	105	0,712	19	2,14	9,2	47	63,4
429	20	128,75	0,986	16	2,2	7,6	32	70,9
430	21	262,5	0,986	20	2,13	8,1	30	59,5
431	22	150	1,047	20	2,12	9,3	35	61,8
432	18	412,5	0,714	18	2,22	7,8	30	61,9
433	22	118,75	1,147	19	2,2	8,2	24	70,3
434	21	121,25	0,944	19	2,19	9,3	19	68,7
435	15	412,5	1,523	26	2,19	9	22	59,0
436	19	300	0,879	17	2,29	8	22	71,6
437	24	187,5	0,709	19	2,12	9,5	14	59,8

438	16	262,5	1,175	18	2,21	7,75	18	67,3
439	24	250	1,175	23	2,23	8,4	22	67,2
440	21	187,5	1,258	21	2,21	10	24	67,3
501	22	225	1,854	26	2,08	8,3	19	56,6
502	25	137,5	1,391	19	1,97	5	22	53,1
503	21	237,5	2,089	28	2,12	7	22	60,5
504	24	137,5	1,479	21	2	10,2	14	51,7
505	13	250	2,275	11	2,16	5	18	67,2
506	11	250	3,523	17	1,96	5	22	51,6
507	14	200	2,285	21	2,15	6,4	24	66,4
508	15	350	1,890	22	2,09	6,3	21	55,7
509	33	175	1,733	24	2,06	8	30	55,2
510	20	475	1,241	23	2,14	9,2	25	51,7
511	18	337,5	1,289	18	2,16	7,2	40	60,6
512	23	250	1,069	14	2,27	6,3	22	72,7
601	24	118,75	2,298	33	2,16	9	47	65,9
602	30	122,5	1,706	28	2,15	9,8	30	63,4
603	21	337,5	1,563	26	2,14	6,7	47	58,5
604	21	212,5	1,563	20	2,11	9	44	59,3
605	11	125	0,978	19	2,35	5,9	40	85,8
606	23	87,5	0,979	23	2,01	9,8	39	54,5
607	27	100	0,923	25	2,02	10,2	43	53,7
701	17	106,25	1,426	17	2,21	7,8	22	73,0
702	11	312,5	2,316	22	2,25	8,4	38	69,3
703	19	250	1,246	23	2,11	9,7	20	57,4
704	23	375	1,029	21	2,06	9,9	22	47,9
705	17	115	2,530	21	2,13	8,4	26	66,0
706	33	250	1,225	17	2,04	10,2	22	49,3
707	17	437,5	1,496	20	2,25	8,3	27	63,5
708	10	312,5	2,105	21	2,01	10	32	48,8
709	22	250	1,350	16	2,06	9,7	36	53,3
710	36	87,5	1,256	21	2,16	8,6	19	65,5
711	22	225	1,596	25	2,09	8,8	30	56,9
712	18	212,5	1,802	21	2,25	7,8	36	72,1
713	35	102,5	1,316	21	2,01	12,1	15	50,4
714	23	125	1,597	21	2,12	11,6	17	61,0
715	24	225	1,784	22	2,15	8,3	45	62,1
801	24	118,75	2,298	33	2,16	9	47	65,9
802	30	125	1,706	28	2,15	9,8	30	63,3
803	21	350	1,563	26	2,14	6,7	47	58,1
804	21	212,5	1,682	20	2,11	9	44	59,3
805	11	125	0,978	19	2,35	5,9	40	85,8
806	23	100	0,979	23	2,01	9,8	42	54,0
807	27	100	0,923	25	2,02	10,2	42	53,7
808	26	112,5	0,940	20	2,17	7,8	32	67,6

809	9	125	1,674	13	2,39	6,5	36	89,5
810	16	137,5	1,796	27	2,14	11	19	63,5
811	16	250	1,282	29	2,19	9	30	64,6
812	11	212,5	1,455	25	2,12	8,5	36	61,9
813	35	85	0,812	21	2,01	12,1	15	50,8
814	23	108,75	1,286	21	2,12	11,6	17	61,4
815	24	100	0,843	22	2,15	8,3	45	66,3
901	21	175	2,048	18	2,27	8,9	33	74,0
902	29	106,25	1,360	23	2,21	9,6	36	69,2
903	28	106,25	1,167	21	2,13	10,3	34	62,4
904	30	162,5	1,133	28	2,03	11,3	40	50,8
905	27	512,5	1,008	23	2,12	10	29	46,8
906	39	125	1,080	25	2,07	11,1	30	54,2
907	21	122,5	1,475	23	2,2	8,4	40	70,2
908	17	106,25	0,569	11	2,26	6,5	49	78,0
909	18	525	1,240	21	2,2	8,8	34	55,5
910	20	150	1,100	20	2,2	5,7	36	71,4
911	26	325	1,223	24	2,12	10,5	21	53,6
912	22	287,5	1,085	21	2,2	9	47	63,4
913	22	125	1,238	19	2,24	7,9	25	73,6
914	44	87,5	0,896	26	1,99	13	20	46,7
915	29	275	1,396	27	2,02	11,6	14	45,9
916	29	150	0,944	25	2,12	9,3	30	60,3
917	16	225	1,491	33	2,09	6,4	13	59,3
918	15	212,5	2,448	19	2,35	7,8	28	81,1
919	24	112,5	1,579	19	2,29	8,1	22	77,8
920	14	125	3,490	25	2,31	7,8	31	81,4
921	19	500	0,548	21	2,05	7,3	11	45,0
922	15	400	0,748	21	2,21	6,5	25	63,0
923	15	412,5	0,592	18	2,16	6,3	19	58,7
924	22	412,5	0,553	16	2,12	7,1	23	53,8
925	18	250	0,732	14	2,1	7,5	20	58,7
927	18	175	0,890	27	2,13	6,6	38	64,0
928	26	150	0,915	27	2,11	8,4	41	60,6
929	37	150	0,588	30	1,94	11,7	17	42,1
930	17	125	0,781	14	2,17	6,5	20	70,0
931	19	162,5	0,853	19	2,16	7,3	20	66,6
932	29	137,5	1,000	23	2,06	10,3	32	55,3
933	20	212,5	0,879	20	2,13	7,7	30	61,8
934	27	150	1,116	25	2,06	10	40	55,3
935	24	125	0,658	21	2,14	9	30	64,0
1001	34	175	1,299	28	2,15	9,7	21	60,6
1002	31	150	1,304	25	2,18	9,5	21	64,8
1003	23	125	1,597	21	2,29	8,4	28	77,1
1004	15	250	1,046	21	2,15	7,5	28	63,0

1005	26	175	1,346	22	2,15	10	25	62,1
1006	32	137,5	1,694	28	2,1	11	29	57,5
1007	28	162,5	0,947	16	2,21	8,2	49	68,6
1008	36	250	1,210	27	2,11	11	27	53,3
1009	32	175	1,560	26	2,04	15,7	21	47,7
1010	28	400	1,648	27	2,15	11	43	52,5
1011	21	625	1,311	19	2	8,2	19	35,7
1012	15	512,5	1,367	26	2,03	8,7	22	42,6
1013	19	325	1,361	17	2	8,4	22	47,1