



**HAL**  
open science

# Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière : cas de la région de l'Agneby (Côte d'Ivoire)

Zondjé Poanguy Bernadin Bohi

► **To cite this version:**

Zondjé Poanguy Bernadin Bohi. Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière : cas de la région de l'Agneby (Côte d'Ivoire). Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Ecole des Ponts ParisTech, 2008. Français. NNT : 2008ENPC0834 . pastel-00503010

**HAL Id: pastel-00503010**

**<https://pastel.hal.science/pastel-00503010>**

Submitted on 16 Jul 2010

**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**

*présentée pour l'obtention du diplôme de*

**DOCTEUR**

de

**l'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES**

*Spécialité : Géotechnique*

*par*

**BOHI Zondjé Poanguy Bernadin**

*Sujet de thèse :*

**CARACTÉRISATION DES SOLS LATÉRITIQUES  
UTILISÉS EN CONSTRUCTION ROUTIÈRE : LE CAS DE  
LA RÉGION DE L'AGNÉBY (CÔTE D'IVOIRE)**

**présentée à Champs-sur-Marne le 24 novembre 2008**

**devant le jury composé de :**

**Daniel Levacher**

**Philippe Delmas**

**Alphonse Guei**

**Jean-Pierre Magnan**

**Philippe Mestat**

**Rapporteur,  
Président du jury**

**Rapporteur**

**Examineur**

**Examineur**

**Directeur de thèse**

# SOMMAIRE

	Page
<b>RÉSUMÉ – ABSTRACT</b>	<b>3</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>7</b>
<b>Chapitre 1. LES LATÉRITES : DÉFINITION, FORMATION, LOCALISATION</b>	<b>9</b>
1.1. Introduction	9
1.2. Définition des latérites	9
1.3. Le processus de latérisation	12
1.4. Répartition des latérites dans le monde	14
1.5. Conclusion	16
<b>Chapitre 2. LES LATÉRITES D’AFRIQUE SUB-SAHARIENNE EN CONSTRUCTION ROUTIÈRE</b>	<b>17</b>
2.1. Introduction	17
2.2. Caractéristiques morphologiques	17
2.3. Caractéristiques chimiques et minéralogiques	20
2.4. Caractéristiques physiques et mécaniques	25
2.5. Conclusion	38
<b>Chapitre 3. LES LATÉRITES DE CÔTE D’IVOIRE</b>	<b>41</b>
3.1. Introduction	41
3.2. Présentation de la Côte d’Ivoire	41
3.3. Les latérites de Côte d’Ivoire	48
3.4. Conclusion	56
<b>Chapitre 4. ÉTUDE DES LATÉRITES DE LA RÉGION DE L’AGNÉBY</b>	<b>57</b>
4.1. Introduction	57
4.2. Objectifs et méthodes	57
4.3. Analyse des propriétés des latérites des itinéraires étudiés	60
4.4. Conclusion	99
<b>Chapitre 5. ANALYSE STATISTIQUE DES PROPRIÉTÉS DES LATÉRITES DE LA RÉGION DE L’AGNEBY</b>	<b>101</b>
5.1. Introduction	101
5.2. La méthode d’analyse factorielle	101
5.3. Application à l’analyse des données de la région de l’Agnéby	105
5.4. Conclusion	116

<b>Chapitre 6. PERSPECTIVES D'ÉTUDE DES LATÉRITES À L'ÉCHELLE DU PAYS OU DU CONTINENT</b>	<b>117</b>
6.1. Introduction	117
6.2. Objectifs	118
6.3. Données disponibles ou à obtenir	118
6.4. Analyse géographique des réserves de latérites	119
6.5. Relations entre les propriétés des latérites et celles des routes	119
6.6. Conclusion	120
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>121</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>123</b>
<b>ANNEXE : Données rassemblées par itinéraire dans la région de l'Agnéby</b>	<b>126</b>

## RÉSUMÉ

L'étude des sols latéritiques de la région de l'Agnéby en Côte d'Ivoire a été effectuée sur les données géotechniques des rapports d'étude de dix sections de routes construites en utilisant des graveleux latéritiques dans la structure de chaussée. Ces données comportaient des courbes granulométriques, des limites de consistance pour la fraction fine, des résultats d'essais Proctor modifié et d'essais CBR. Ces données ont fait l'objet de traitements statistiques classiques (caractérisation de la variabilité de chaque paramètre géotechnique, recherche de corrélations entre paramètres) et d'une analyse factorielle en composantes principales de l'ensemble des données (188 prélèvements).

L'étude conclut que les échantillons de sols latéritiques analysés ont des propriétés assez voisines pour que l'on ne puisse pas les différencier clairement par analyse statistique. Elle conclut qu'il serait utile de prolonger l'étude en couvrant un territoire suffisamment grand (pays, partie du continent africain) pour qu'on y trouve les différents types de sols latéritiques décrits dans la littérature, notamment des latérites de forêt comme celles de l'Agnéby, des latérites de savane et des latérites de cuirasses anciennes. Le mémoire propose une méthodologie pour cette étude plus générale.

Le mémoire comprend six chapitres, une introduction et une conclusion générales et donne en annexe l'ensemble des valeurs des données géotechniques utilisées.

## **ABSTRACT**

The lateritic soils from the Agnéby region in Ivory Coast were studied using geotechnical data from geotechnical investigations for ten road sections built with lateritic gravelly soils in the road structure. The data consisted of particle size distributions, consistency limits of the fine particles, modified Proctor compaction tests and CBR tests. These data were analysed by classical statistical methods (characterisation of the variability of each parameter, correlation analysis of pairs of parameters) and by principal component factor analysis of all the data (188 samples).

The study concluded that the lateritic soils samples had rather similar properties and could not be clearly differentiated by statistical analysis. The author suggests that his study should be enlarged to sufficiently big territories (a country or a part of Africa), which would contain all the types of lateritic soils mentioned in the literature, including forest laterites like the ones in Agnéby region, savannah laterites and laterites from ancient cuirasses. A methodology is proposed for this study.

The thesis consists of six chapters, a general introduction and a general conclusion and an appendix with all the geotechnical data used.

## REMERCIEMENTS

C'est dans le cadre de la formation des formateurs que j'ai été autorisé par mon pays, la Côte d'Ivoire, à travers l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro, à suivre une formation doctorale comportant successivement un DEA à l'École Centrale de Paris puis une thèse à l'École Nationale des Ponts et Chaussées, préparée dans le cadre du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) à Paris.

Ce travail a pu être entrepris et mené avec l'aide de la Coopération Française et grâce à l'encadrement des professeurs qui m'ont accueilli et suivi.

J'adresse mes remerciements :

- au Gouvernement français (Ministère des affaires étrangères) à travers le service de coopération culturelle et le Centre français pour l'accueil et les échanges internationaux (EGIDE), pour la bourse d'études ;
- au Gouvernement de la Côte d'Ivoire à travers le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, et à l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP-HB), pour m'avoir permis d'obtenir cette bourse d'étude de coopération de formation des formateurs ;
- au directeur général du LCPC pour m'avoir accepté dans son établissement ;
- à Monsieur Jean-Pierre MAGNAN, directeur technique géotechnique au LCPC et professeur à l'ENPC, pour son encadrement depuis le début de mon DEA/MASTER et l'apport de sa grande expérience à la réalisation effective de cette thèse ;
- à Monsieur Philippe MESTAT, mon directeur de thèse, pour sa contribution tant technique et scientifique que logistique ;
- à Monsieur GUEI Alphonse, directeur général adjoint de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët BOIGNY (INP-HB), professeur de mécanique des sols, pour ses conseils et son soutien permanent ;
- à Monsieur KOUASSI Body Théodore, directeur général du Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP), pour son soutien à la réalisation de cette recherche ;
- à Messieurs Jean-Louis FAVRE, Philippe REIFFSTECK et GBOGA Jean Brice, pour leur disponibilité et leurs suggestions tout au long de cette étude ;

- enfin, à mon épouse Docteur BOHI Hélène et à nos enfants BOHI Mahan Antoine Jésus et BOHI Deygnantin Désiré Emmanuel, pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ces longues années d'études entrecoupées de guerre en Côte d'Ivoire...

Que tous ceux qui, de près ou de loin, ont aidé à la réalisation de ce travail trouvent ici, l'expression de mon infinie gratitude.

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les latérites ou sols latéritiques sont une grande famille de sols qui se forment dans les régions tropicales humides et qui résultent d'un processus d'altération particulier. Certaines classes de sols latéritiques sont utilisées en corps de chaussées (couches de base et couches de fondation), en appliquant des règles qui ont été définies par pays, à partir de règles générales d'aptitude des sols au compactage. En Côte d'Ivoire, par exemple, ces règles ont été établies par le Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics au cours des années 1970.

Les latérites sont plus ou moins abondantes selon les régions et leur utilisation systématique comme matériaux de construction commence à en faire une ressource rare dans certaines parties de l'Afrique. Cet état de « ressource rare » a pour conséquence qu'il devient nécessaire d'évaluer les ressources disponibles et d'étudier comment l'on pourrait étendre le domaine des propriétés acceptables pour ces sols ou utiliser des matériaux naturels de remplacement.

Cette thèse est une contribution à l'étude et à l'inventaire des ressources existantes en latérites, menée à l'échelle d'une région d'un pays, mais dont la méthodologie a vocation à être appliquée à des échelles bien plus grandes.

Le mémoire est divisé en six chapitres, dont les trois premiers ont un caractère bibliographique et les trois derniers décrivent les recherches effectuées :

- le premier chapitre est une présentation générale des sols appelés « latérites » et couvre à la fois leur formation et leur répartition dans le monde ;
- le deuxième chapitre est consacré aux utilisations routières de la latérite dans quelques pays de l'Afrique sub-saharienne ;
- le troisième chapitre présente la Côte d'Ivoire et la façon dont les latérites sont considérées dans ce pays ;
- le quatrième chapitre présente les résultats de l'étude qui constitue le cœur de ce mémoire, l'analyse des propriétés physiques et mécaniques des latérites échantillonnées et caractérisées lors des études de 10 itinéraires routiers. Les propriétés des latérites ont été déterminées sur 188 échantillons. Ces données ont été analysées d'abord par site puis par itinéraire, puis à l'échelle de la région, par analyse

statistique de données. Les propriétés des latérites ont aussi été comparées aux spécifications en vigueur en Côte d'Ivoire pour les travaux routiers ;

- le cinquième chapitre présente l'application à ces mêmes données de l'analyse en composantes principales, destinée à rechercher d'éventuelles relations entre les paramètres mesurés sur chaque prélèvement de sols latéritiques de la région de l'Agnéby ;
- le sixième chapitre décrit la méthodologie qui permettrait d'appliquer cette approche à des zones géographiques plus étendues. Il indique les données nécessaires, les procédures d'analyse des données et les conclusions qui pourraient en être attendues.

Le mémoire se termine par une conclusion générale, une liste de références bibliographiques et des annexes qui présentent le détail des données analysées dans le mémoire.

## Chapitre 1

# LES LATÉRITES : DÉFINITION, FORMATION, LOCALISATION

### 1.1. Introduction

Il y a environ deux cent ans que le terme « latérite » a fait son apparition dans la littérature scientifique. Malgré des vicissitudes diverses, ce terme est toujours largement employé. On pourrait donc penser qu'il couvre des faits parfaitement reconnus et définis. Pourtant une étude, même succincte, des ouvrages de synthèse traitant de ce problème montre que, sous la brièveté du terme, se cachent des objets parfois forts différents. Il est donc utile de se pencher d'abord sur les définitions qui ont été données à ce terme. Nous évoquerons ensuite les processus de formation des sols appelés « latérites » et leur localisation dans le monde.

### 1.2. Définition des latérites

Le mot « latérite » a été suggéré pour la première fois par Buchanan en 1807 (Bourgeon et Gunnell, 2005) pour désigner un matériau servant à la construction et exploité dans les régions montagneuses de Malabar en Inde. Buchanan (1807) indique que « ce matériau a l'aspect d'un dépôt ferrugineux à morphologie vésiculaire. Il est apparemment non stratifié et se situe à faible profondeur dans les sols. Lorsqu'il est frais, il peut être facilement découpé en blocs réguliers à l'aide d'un instrument tranchant. Exposé à l'air, il durcit rapidement et résiste alors remarquablement aux agents météorologiques ». La latérite de Buchanan a été commentée de façon très détaillée par Bourgeon et Gunnell (2005).

Ces propriétés des latérites expliquent leur emploi fréquent comme matériau de construction, emploi comparable à celui des briques. Dans les langues locales, ces formations sont dénommées « terre à brique ». Le nom « latérite » n'est donc que la traduction latine d'une terminologie vernaculaire. Latérite a pour racine later, qui signifie brique en latin, et ceci uniquement par référence à l'utilisation de ces blocs (Prescott et Pendleton, 1952).

Le dictionnaire Larousse en six volumes (édition 1975) définit la latérite de la manière suivante : « nom féminin, du latin later-eris, brique, sol rouge vif ou rouge brun, très riche en oxyde de fer et en alumine formé sous un climat chaud. Les latérites sont des sols très

lessivés, riches en fer (minerais de Guinée) et contenant de l'alumine libre. Dans la forêt équatoriale humide, ce sont des argiles. Au nord et au sud, dès qu'une saison sèche apparaît, on observe la formation de carapaces de latérites, roche très dure, affleurant dans les zones les plus arides et totalement infertiles ». On note que cette définition affirme, de façon contestable, que la carapace latéritique est une roche.



**Figure 1. Exemple de sol latéritique**

Slansky et al. (1964) emploient le mot « latérite » dans le sens très général d' « ensemble des produits d'altération de la zone intertropicale ». Pour leur part, les pédologues utilisent très souvent un autre terme pour caractériser cette évolution : la ferralitisation, qui évoque le fait que les accumulations alumineuses vont le plus souvent de pair avec des accumulations à dominante ferrique.

Seaton et al. (1938) font remarquer que le mot latérite ne décrit pas un matériau ayant des propriétés constantes mais plutôt une famille de matériaux différents, rencontrés dans diverses parties du monde.

Ce caractère de « famille » est lié à l'existence d'un certain nombre de conditions nécessaires à leur formation, qui font l'unanimité des chercheurs et ont été résumées par De Graft-Johnson et Bhatia (1969) au 7ème Congrès International de Mécanique des sols et des travaux de fondations. Ce sont des conditions liées au climat (alternance d'une saison pluvieuse et d'une saison sèche, pluviométrie, température, végétation) et à la géologie (roche mère et topographie). La combinaison de ces différents paramètres crée des matériaux à texture et à composition minéralogique et chimique variable.

La multiplication des travaux sur les latérites depuis les années 1950 a conduit à la multiplication des définitions ou conceptions de la latérite, qui coexistent encore et créent une certaine confusion sur le sens réel et la définition de ces sols : une étude bibliographique réalisée par Florentin et L'Hériteau (1952) pour le compte du BCEOM a recensé plus de trente définitions des latérites, tandis qu'Autret (1983) a recensé un nombre aussi important d'ouvrages consacré à la formation des latérites. Ce dernier distingue :

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

Le rapport technique des journées africaines de géotechnique, tenues à Yamoussoukro (Côte d'Ivoire) du 3 au 7 octobre 1988, déclare qu'il n'est pas souhaitable de distinguer les latérites et les sols résiduels car les premières font partie intégrante des seconds. Il serait préférable de parler globalement de sols résiduels d'altération pour les sols profonds et superficiels. Il a aussi été suggéré de limiter l'usage du mot latérite à son emploi comme adjectif dans des expressions sans ambiguïté telles que :

- graveleux latéritiques,

- argiles latéritiques,
- carapace ou cuirasse latéritique

Nous retenons que la latérite ou sol latéritique est un sol qui se forme dans les régions tropicales humides et qui résulte d'un processus d'altération particulier sous couvert forestier, la ferralitisation ou latérisation (sol ferralitique).

### **1.3. Le processus de latérisation**

Le phénomène de latérisation est un processus de formation des sols spécifiques aux régions tropicales chaudes et humides. Il s'agit d'une altération de la roche-mère dont la caractéristique essentielle réside dans la mise en solution puis le départ de la silice. Ce phénomène de lessivage s'accompagne d'un enrichissement en fer et en alumine sous forme d'oxydes  $Fe_2O_3$  et  $Al_2O_3$ .

Certains facteurs ont une influence prépondérante sur l'altération des roches et la formation des sols latéritiques qui en découlent, ce sont :

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

#### **a. Le climat**

L'influence du climat sur la formation des latérites est multiforme :

- la température intervient dans la réaction physique et chimique nécessaire à la formation des sols. Cependant, aucune étude n'a pu donner de température limite. Maignien (1966) remarque que la majorité des sols latéritiques contemporains se développent sous des températures moyennes annuelles qui avoisinent 25 °C, mais qu'il existe aussi des sols latéritiques profonds sur les hauts plateaux malgaches, où la température moyenne annuelle est de 18 à 20 °C. On peut en conclure que les latérites se forment dans les régions où la température est élevée, mais qu'il peut en exister dans d'autres régions où la température a été élevée lors de leur formation ;
- les précipitations nécessaires à la formation des latérites relevées dans la bibliographie sont très variables. Maignien (1966) remarque que les valeurs des précipitations

peuvent être différentes pour un sol sous climat tropical à saison peu étalée et pour un sol sous climat équatorial à précipitation étalée ;

- le rôle de l'eau étant surtout de lessiver le matériau, l'efficacité de son action dépend de la nature de la roche. Il n'existe pas de limite supérieure de précipitations : on rencontre en Basse Guinée des sols latéritiques très bien caractérisés sous une pluviométrie annuelle de 6000 mm.

## **b. La topographie**

Le relief conditionne le drainage (il détermine la quantité d'eau s'écoulant à travers la zone d'altération) et contrôle la vitesse de l'altération. De nombreux auteurs ont étudié la relation entre les différentes formes de terrain et les latérites et ils s'accordent pour affirmer que les formations latéritiques, et surtout les latérites indurées, sont associées à des topographies subhorizontales et à des plateaux élevés ou ayant des ondulations douces, mais rarement à des pentes raides.

## **c. La végétation**

Le rapport entre le climat et les latérites débouche nécessairement sur le rapport entre le type de végétation et les latérites. Gluka et Eshart, cités par Maignien (1966), soutiennent que la latérite ne peut se former que sous végétation forestière et que l'induration suivrait la disparition du couvert forestier. C'est ainsi que les latérites durcies sont plus répandues dans les régions de savane. Les formes nodulaires sont très courantes dans les régions forestières.

La végétation influe sur la teneur en éléments grossiers des horizons superficiels des sols latéritiques en limitant l'érosion (les débris de quartz et gravillons se concentrent par suite de l'entraînement des matériaux fins par les eaux de ruissellement). L'action des racines provoque aussi une certaine homogénéisation de ces matériaux.

## **d. La roche-mère**

En Afrique sub-saharienne, notamment en Afrique de l'ouest, la latérisation peut se réaliser sur des roches basiques sous une pluviométrie de 1100 mm/an alors que sur des granites riches en quartz cette limite s'élève à 1250 – 1300 mm/an.

#### 1.4. Répartition des latérites dans le monde

Les latérites sont largement répandues à travers le monde, mais plus particulièrement dans les régions intertropicales d'Afrique, d'Australie, de l'Inde, du sud-est asiatique et d'Amérique du sud (Figure 2). Toutefois la répartition de ces sols ne correspond pas nécessairement aux conditions actuelles de genèse. Beaucoup de ces formations sont sub-actuelles ou fossiles, même en régions intertropicales. Leur existence montre qu'à un moment ou un autre de l'histoire du globe, les conditions de formation ont pu se trouver réunies, conditions qui n'ont pas été nécessairement contemporaines en tous points de la terre. Sans parler des formations sédimentaires rouges très anciennes (permo-carbonifères) que l'on soupçonne d'origine tropicale, les niveaux du sidérolithique et des matériaux plus récents présentent les caractéristiques des latérites. Mückenhausen et Tavernier (1960) signalent des latosols en Allemagne méridionale. Les red yellow podzolic soils des États-Unis peuvent plus ou moins être assimilés à des oxisols. Selon certains auteurs, certains sols enterrés sous les limons du Condroz (Belgique) possèdent toutes les caractéristiques de sols ferrugineux tropicaux à concrétions. De tels exemples sont extrêmement fréquents.

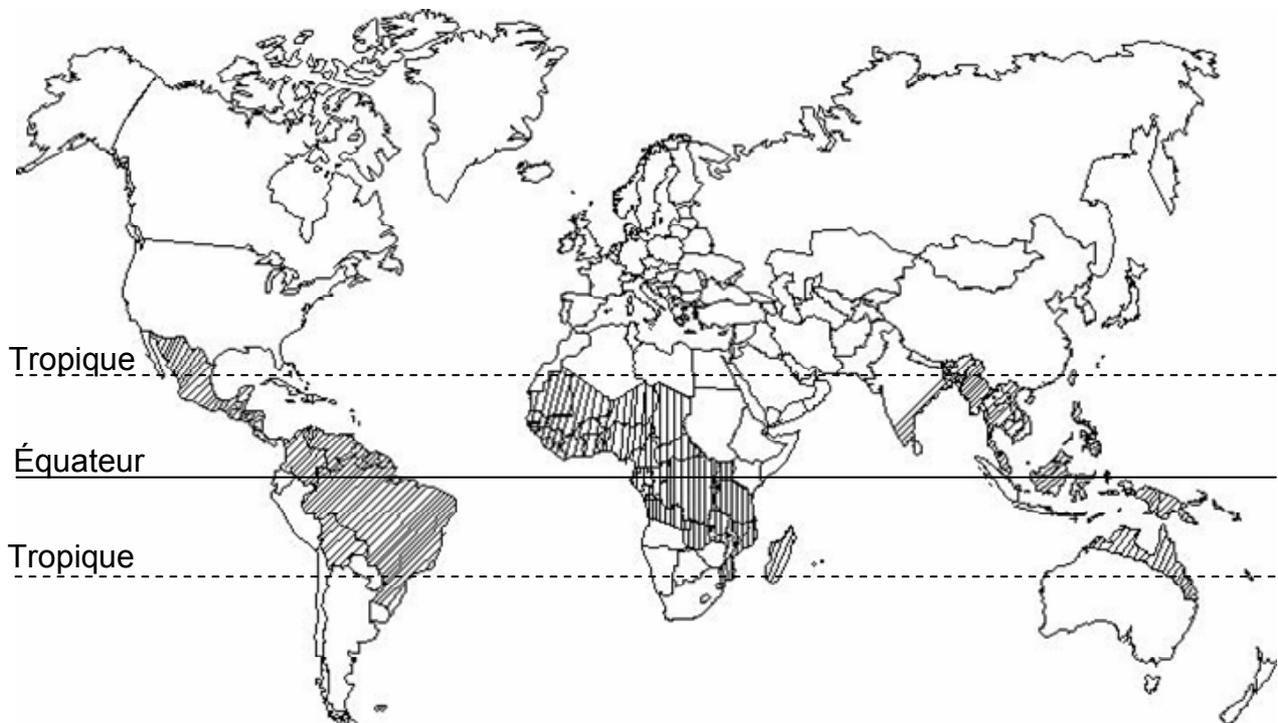


Figure 2. Répartition des latérites dans le monde

Il est maintenant universellement admis que les sols latéritiques n'ont pu s'individualiser qu'à travers des périodes d'évolution extrêmement longues (Leneuf, 1959), de l'ordre de dizaines et parfois même de centaines de milliers d'années. De nombreuses études tendent à montrer que l'ère tertiaire a présenté des conditions particulièrement favorables à la latérisation, aussi bien dans les régions intertropicales que dans le reste du monde.

Nous pouvons nous demander pourquoi ces formations sont abondantes sous les tropiques. Les conditions actuelles de formation ne sont certainement pas les seules en cause. Il est probable que ces différences soient liées à l'action des glaciers quaternaires qui, dans les régions boréales, ont arasé les croûtes d'altération, effaçant les influences anciennes. Ces glaciations n'ayant pas joué dans les régions intertropicales, les formations latéritiques tertiaires viennent s'y ajouter aux formations quaternaires.

Prescott et Pendleton (1952) ont tenté les premiers une synthèse mondiale sur la répartition des latérites. Depuis cette étude, de nombreuses prospections ont été effectuées, particulièrement en Afrique et en Amérique du Sud :

- ◆ pour l'Afrique, on peut citer la carte des sols du Service pédologique interafricain (de la commission de coopération technique en Afrique au sud du Sahara [CCTA]), dont une version a été présentée par D'Hoore en 1954. Il s'agit d'une synthèse à l'échelle d'un continent qui tient compte de l'ensemble des résultats acquis par des pédologues ayant œuvré en Afrique ;
- ◆ en Amérique du Sud, les études cartographiques sont moins poussées, mais permettent d'avoir une assez bonne idée de la répartition des formations latéritiques (Bramao et Lemos, 1960) ;
- ◆ pour l'Asie du Sud-Ouest, les études sont au même niveau qu'en Amérique du Sud ;
- ◆ en Australie, les travaux sont également fort avancés (Stephens, 1961).

Les latérites sont largement distribuées dans les régions intertropicales semi - humides et humides du globe. À l'état fossile, elles sont reconnues sous des climats plus secs, parfois même sous climat tempéré.

D'une façon générale, les travaux de cartographie intègrent latérites indurées et sols latéritiques dans le sens le plus large. Traiter ce problème reviendrait à étudier la répartition des sols intertropicaux. Aussi nous limiterons-nous aux données générales qui

précisent la distribution des « latérites » en Afrique au sud du Sahara et plus précisément aux sols latéritiques concernés par les travaux de génie civil.

## **1.5. Conclusion**

Le problème de l'utilisation des latérites et de leur définition a été souvent traité dès le début sous son aspect agronomique. Cependant, à l'origine, le développement des études chimiques et minéralogiques a été associé à des recherches minières (fer et aluminium). Ces spéculations ont pris une grande importance au cours des années 1960 pour la recherche de gisements de bauxite, de fer et de manganèse.

Les utilisations en génie civil ont aussi fait l'objet de nombreuses études, en liaison avec la construction des routes, l'aménagement des réservoirs ainsi que les études hydrologiques sous climat tropical, surtout à partir des années 1970. Ces études se poursuivent actuellement et le présent mémoire est une contribution à ce travail

## Chapitre 2

# LES LATÉRITES D'AFRIQUE SUB-SAHARIENNE EN CONSTRUCTION ROUTIÈRE

### 2.1. Introduction

Les sols les plus utilisés en construction routière en Afrique, au sud du Sahara, sont des sols latéritiques, qu'il s'agisse de graveleux latéritiques, d'argiles latéritiques, de carapaces ou de cuirasses latéritiques. Ces sols ont été utilisés pour la construction des routes dans les programmes de développement des infrastructures des pays tropicaux. Des études d'actualisation des connaissances ont été effectuées à l'échelle du monde. Nous allons les passer en revue dans ce chapitre, en tenant compte aussi des études réalisées dans les domaines de la géologie et de la pédologie.

### 2.2. Caractéristiques morphologiques

#### 2.2.1. Induration

Toutes les descriptions et définitions des latérites font mention d'une induration en place ou acquise après exposition à l'air. L'étude des échantillons montrent que tous les degrés d'induration sont observables depuis des produits presque meubles à peine cohérents, jusqu'aux blocs les plus durs qui se cassent difficilement au marteau.

L'appréciation de l'induration est empirique, car aucune caractéristique liée à la mécanique du matériau ne peut être chiffrée. On considère généralement qu'il y a induration quand le milieu a une consistance dure et fragile qui se conserve à l'humidité. On peut distinguer plusieurs degrés d'induration suivant que le matériau se casse ou non facilement à la main, se coupe ou non à la bêche, éclate ou non sous le choc du marteau (Maignien, 1958).

L'induration des échantillons dépend de plusieurs facteurs :

- de la composition et du degré de cristallisation des composants ; plus les teneurs en sesquioxydes sont élevées, plus l'induration est forte ; la dureté croît avec les teneurs en fer ; les latérites les plus dures sont aussi les moins hydratées.

- de l'assemblage des différents constituants : les cuirasses à assemblage compact sont plus indurées que les cuirasses à assemblage lâche ; les matériaux de composition homogène sont plus durs que ceux à composants ségrégués ; la présence de corps étrangers diminue la résistance de l'ensemble.
- du degré de vieillissement : pour un même type de latérite, les plus âgées sont souvent les plus dures que les formations récentes.

### **2.2.2. Structure**

La structure des latérites est extrêmement variée. Les modes d'assemblage peuvent se réduire à trois :

- 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 des matériaux préexistants.

Ces types d'assemblage présentent cependant une grande variabilité, corrélative de la forme et de la grosseur des éléments qui entrent en jeu, ainsi que des différents degrés d'induration.

On peut distinguer les formes suivantes :

- des structures homogènes ou continues. Il s'agit de roches dont les composants originels sont épigénèses par des sesquioxides de fer ou d'alumines, parfois même par du manganèse ;
- des structures hétérogènes ou discontinues, les plus communes. Elles se divisent en :
  - structures de roches meubles, généralement graveleuses ; c'est le cas fréquent des horizons concrétionnés ou gravillonnaires ;
  - structures de roches cohérentes à aspects variés (conglomératiques, poudinguiformes, volcaniques, scoriacés ou spongieux) ;
  - des structures ordonnées (lamellaires, pisolithiques et oolithiques).

Le matériau comporte donc une succession d'éléments de diverses grosseurs et de diverses formes allant de colloïdes à parfois des blocs. Clare et Beaven ont donné les caractéristiques de forme de la fraction gravier, c'est-à-dire > 2 mm de quelques sols latéritiques de l'ouest africain. La figure 2.1 représente les formes typiques des pisolithes.

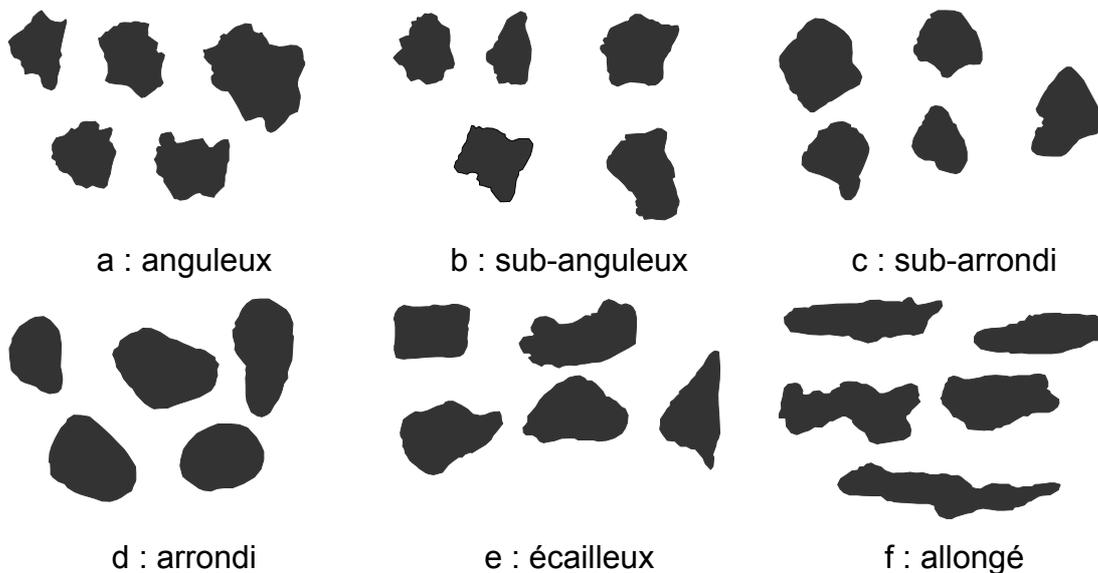


Figure 2.1. Formes typiques des grosses pisolithes dans les sols latéritiques (d'après De Graft-Johnson)

### 2.2.3. Couleurs

La couleur des latérites est variée, mais généralement d'intensité vive. Les teintes les plus courantes sont : roses, ocres, rouges, brunes. Cependant, certaines formations présentent des tâches et des trames violettes, d'autres des marbrures verdâtres. Un même échantillon peut présenter toute une gamme de couleurs, passant plus ou moins sensiblement de l'une à l'autre, suivant des dessins et des formes variés.

La pigmentation des latérites est due aux oxydes de fer plus ou moins hydratés et parfois au manganèse. À l'exception des colorations extrêmes, qui correspondent à l'hématite rouge et à la goethite ou lépidocrocite jaune, il ne semble pas exister de relation entre la coloration et l'indice d'hydratation. En milieu réducteur, les composants du fer donnent une coloration gris-noir et le manganèse une couleur noire à aspect velouté. En milieu oxydant, le fer donne une couleur ocre, rouge ou noire, le manganèse une couleur violette. L'alumine à l'état pur est de couleur blanche. Mais, dans les niveaux indurés, elle est souvent en mélange avec le fer pour donner des teintes roses caractéristiques. La silice, ordinairement blanchâtre et généralement imprégnée d'hydroxydes de fer, peut donner une couleur rouge ou rouille. Les kaolinites fixent le fer sur leur surface et prennent une couleur rouge franc. En bref, c'est le mélange de ces corps, différemment colorés qui donne la coloration extrêmement variée des latérites.

Il faut noter que l'appréciation des couleurs ne donne qu'une idée grossière de la composition des latérites. Elle permet cependant d'apprécier le degré d'évolution et le milieu de formation : les cuirasses ferrugineuses rouges ou ocre dans leurs stades juvéniles deviennent plus foncées en vieillissant. Elles sont alors brunes, parfois presque noires. Au contraire, les cuirasses alumineuses deviennent plus claires avec le temps. À un autre point de vue, en milieu mal drainé, les cuirasses ferrugineuses sont plus foncées (brunes) qu'en milieu oxydant (rouges).

#### **2.2.4. Densité**

La densité réelle varie dans de larges proportions (2,5 à 3,6) et dépend de la composition chimique. Elle augmente avec les teneurs en fer et diminue avec les teneurs en aluminés. Les formes oxydées sont plus denses que les formes hydratées.

### **2.3. Caractéristiques chimiques et minéralogiques**

Les latérites se caractérisent par des teneurs élevées en sesquioxydes de fer et / ou d'alumine par rapport aux autres composants. Ces composants essentiels sont en mélange suivant des proportions variées. Dans certaines latérites, les teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  peuvent dépasser 80 %, alors que les teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sont très faibles (quelques pour cent) ; dans d'autres au contraire, les teneurs en alumine peuvent atteindre 60 % pour quelques pour cent de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Dans la majorité des cas, les bases alcalines et alcalino-terreuses manquent presque totalement. Mais ce critère n'est pas absolu. En particulier certaines cuirasses ferrugineuses formées dans les alluvions, ou certains horizons concrétionnés se développant dans les sols dits « ferrugineux tropicaux », peuvent en contenir en quantité appréciable.

Les teneurs en silice combinée sont faibles dans les latérites riches en sesquioxydes, mais de nombreuses variétés, telle que la latérite de Buchanan, peuvent en contenir des quantités appréciables. En Guinée (Maignien, 1958), certaines cuirasses et gravillons indurés ont des teneurs en silice combinée qui s'élèvent à plus de 20 %.

Cette silice combinée se trouve essentiellement sous forme de kaolinite, argile caractéristique de la plupart des formations tropicales  $Al_2O_3$ . En partant de cette constatation, D'Hoore (1954) affirme que l'alumine se rencontre dans les latérites type Buchanan sous cette forme combinée.

Si l'alumine constitue parfois le principal composant, ce sont les sesquioxydes de fer qui sont les plus communs et les plus fréquents.

Certaines latérites contiennent des quantités parfois appréciables de manganèse et peuvent être exploitées comme minerai (Côte d'Ivoire, Gabon). Il en est de même pour le titane, fréquemment reconnu, et à un degré moindre, pour le vanadium et le chrome.

L'eau combinée, déterminée par la perte en fer, se trouve toujours en quantités appréciables (10 à 30 %). Elle est plus élevée dans les latérites alumineuses que ferrugineuses.

Si le quartz est parfois absent ou en faible quantité, il est plus généralement un composant significatif. Il s'agit surtout de quartz résiduel, en particulier sur les formations dérivées des roches éruptives acides. Mais il est fréquent aussi de rencontrer du quartz dans les latérites formées à partir de roches non quartzieuses. Il s'agit de quartz apporté par ruissellement ou par des vents, parfois aussi des quartz de néoformation (D'Hoore, 1954).

Warth et Warth (1903) signalent que des échantillons originaires de l'Inde contiennent en moyenne plus de 20 % de quartz.

La comparaison de ces différentes données permet d'explicitier certaines relations entre les composants :

- a) il y a une relation directe entre les quantités d'eau combinée et les teneurs en alumine (cette relation n'existe pas avec le fer) ;
- b) le quartz est toujours en faible quantité dans les latérites alumineuses ;
- c) les cuirasses riches en quartz sont surtout ferrugineuses.

Il ne semble pas y avoir de rapport bien défini entre les quantités relatives en silice, en fer et en alumine et le degré d'induration. À quantité égale de fer, on peut observer différents degrés d'induration, depuis les formes les plus meubles jusqu'aux plus dures. Cependant,

pour des cuirasses à induration comparable, les teneurs en  $Fe_2O_3$  sont le plus souvent inversement proportionnelles aux teneurs en insolubles.

Le tableau 2.1, établi par Maignien (1958), résume les caractéristiques des latérites alumineuses et ferrugineuses.

Tableau 2.1: Caractéristiques des latérites alumineuses et ferrugineuses (Maignien, 1958).

	Latérites alumineuses	Latérites ferrugineuses
Site	Modelés anciens	Surtout modelés inférieurs
Induration	Faible à moyenne	Moyenne à forte et même très forte
Couleur	Blanc rosé à rouge	Rouille à brun foncé
Densité	Faible	Élevée
Structure	Essentiellement scoriacée	Très variée : pisolithique, alvéolaire, feuilletée, etc.
Composition chimique,	Fortement hydratée $\geq 20$ %, peu d'insolubles	Faiblement hydratée : 10 % ; beaucoup d'insoluble
Constitution minéralogique	Gibbsite surtout ; boehmite ; goethite ; peu de kaolinite, pas ou peu de quartz et alors, clastique	Kaolinite et goethite surtout ; hématite variable ; gibbsite variable, souvent absente quartz, souvent important résiduel ou classique ou clastique ; minéraux phylliteux variables

L'Université de Kumasi (Ghana) avait participé de façon importante aux études de Lyon Associates (1971) dans ce pays. Ces études ont été continuées par Gidigasu (1976) sur des matériaux représentatifs des différents profils latéritiques représentés au Ghana. Ces études ont comporté des essais physico-chimiques : granulométrie, pH, teneur en carbonate de calcium, teneur en matière organique, capacité d'échange cationique, teneur en eau hygroscopique. Les résultats ont été ensuite interprétés au moyen de cinq facteurs (1) zone climatique et végétale, (2) roche mère, (3) type de pédogenèse, (4) degré de lessivage et latérisation, (5) teneur en argiles. Ils sont résumés dans les tableaux 2.2 et 2.3.

Tableau 2.2. Résultats des essais physico-chimiques exécutés sur les sols du Ghana

Zone de climat et végétation	Roche mère	Type génétique	pH	C <sub>CaCO3</sub> (%)	C <sub>MO</sub> (%)	CEC (meq/100g)	Teneur en eau w (%)	
Savane côtière	Gneiss	Résiduel	5-9	0-20	0-3	1 : 0-22(3)	0-3,2(0,6)	
						2 : 22-33(3)	3,2-5(0,6)	
						3 : 33-54(3)	5-11(0,6)	
		Non résiduel					1 : 0-12	0-3,4(0,6)
							2 : 12-18	3,4-4,8(0,6)
							3 : 18-28	4,8-7,4(0,6)
Savane arborée	Granite + grès	Résiduel	5-8	0-2	0-3,5	1 : 0-5(3)	0-1,3(0,5)	
						2 : 5-7(3)	1,3-1,8(0,5)	
						3 : 7-10(3)	1,8-3,0(0,5)	
Forêt	Granite	Résiduel	4,5-8	0-1	0-4,5	1 : 0-10(3)	0-2,8(0,4)	
						2 : 10-14(3)	2,8-3,4(0,4)	
						3 : 14-20(3)	3,4-3,9(0,5)	
	Phyllite	Résiduel			0-2	0-4,5	1 : 0-9(3)	0-2,8(0,4)
							2 : 9(3)	2,8-3,9(0,4)
							3 : 9(3)	3,9-5,2(0,5)
Savane arborée / forêt	Phyllite, schiste et granite	Non résiduel	4,5-8	0-2	0-4,5	1 : 0-9(4)	0-2 (0,5)	
						2 : 9-11(4)	2-2,9 (0,5)	
						3 : 11-12 (4)	2,9-5,3 (0,5)	
1 : sols sans cohésion et légèrement cohérents ; 2 : sols modérément cohérents ; 3 : sols très cohérents. (chiffres entre parenthèses) : intervalle de variation en plus et moins.								

Tableau 2.3. Caractéristiques des sols étudiés au Ghana, d'après Gidigasú (1976)

Profil n°	1	2	3
Zone climatique et de végétation	Forêt	Savane arborée	Savane côtière
Groupe de sol proposé	Ochrosols et oxysoils de forêt	Ochrosols de savane, Latérites	Argiles tropicales (A) Sables côtiers (S)
Roche-mère	Granite (G) Phyllite (P)	Grès voltaïques (GV) Granite (G) Phyllite (Ph) Schistes voltaïques (SV) Pélite (Pé)	A : gneiss S : sables côtiers
Type génétique	Résiduel	GV, SV, Pé : résiduel G, Ph : non résiduel	A : résiduel S : non résiduel
Puits n°	G : 1-3 P : 12-16	GV : 21-25 ; G : 4 Ph : 17 ; SV : 19,20 Pé : 18	A1 : 6-9,11 A2 : 5,10 S : 26
Nombre d'échantillons	G : 25 P : 39	GV : 35 ; G : 8 Ph : 7 ; SV : 15 Pé : 7	A1 : 35 A2 : 10 S : 5
Topographie locale	Plateau	GV, Pé : plateau G : vallée Ph,SV : basses terres	A1 : surtout basses terres A2 : vallée, basses terres S : dunes, vallée, basses terres
Conditions de drainage	Bonnes	GV : bonnes Autres : assez bonnes à mauvaises	A : mauvaises à très mauvaises S : bonnes
Composition minérale de la fraction argileuse/ Minéral dominant	Kaolinite	Tous : kaolinite	A : montmorillonite S : non déterminé
Minéral accessoire	Mica (muscovite)	GV : mica, muscovite G : néant Autres : montmorillonite, vermiculite, mica	A : kaolinite S : non déterminé
Degré de lessivage et de latérisation	Élevé	GV, G : Élevé Autres : Faible à élevé	Faible
<p>1. Données minéralogiques de Morin et al. (1969), Bampo Addo et al. (1969) et dossiers du BRRI.</p> <p>2. Basé sur des informations pédologiques et des études de terrain.</p> <p>3. ND = non déterminé.</p>			

## 2.4. Caractéristiques physiques et mécaniques

### 2.4.1. Généralités

Cette section rassemble les informations disponibles sur l'emploi des sols latéritiques dans les pays d'Afrique sub-saharienne en construction routière. Ces applications utilisent les latérites comme sols graveleux utilisés dans les remblais et les couches de chaussées. Le vocabulaire utilisé est spécifique à la construction routière et est rappelé ci-après. Les travaux exécutés dans différents pays sont ensuite passés en revue.

Un graveleux latéritique est un sol résiduel d'altération tropicale, constitué par un mélange de particules de dimensions généralement comprises entre 2 et 20 mm (pisolithes, concrétions ou nodules plus ou moins durs et/ ou rognons de quartz) et d'argile latéritique de couleur le plus souvent rougeâtre ou ocre (parfois grise, plus au nord). Il est utilisé pour construire la partie inférieure des corps de chaussées (couche de base et couche de fondation) dans la partie de l'Afrique située au sud du Sahara, en raison de son intérêt économique.

Définir les propriétés physiques et mécaniques d'un matériau naturel utilisé dans la construction des routes revient à déterminer, par des essais de laboratoire et des essais en place, les caractéristiques physiques d'identification (limites de plasticité  $w_P$  et de liquidité  $w_L$ , indice de plasticité  $I_P$ , courbe granulométrique, notamment les proportions de particules fines et de particules graveleuses, pourcentage de matières organiques, poids volumique des particules  $\gamma_s$ ), les caractéristiques mécaniques de compactage (densité  $G_{dOPM}$  et teneur en eau  $w_{OPM}$  à l'optimum Proctor modifié), les caractéristiques de résistance au cisaillement (angle de frottement interne  $\phi$  et cohésion  $c$ ) et les caractéristiques de consolidation et de poinçonnement (indice CBR, etc.).

Le paramètre de comportement mécanique le plus souvent corrélé au comportement des couches de base ou de fondation en graveleux latéritiques est l'indice portant CBR, parce que la résistance au poinçonnement constitue l'une des caractéristiques fondamentales des chaussées du type souple.

Des recherches ont été menées pour déceler l'existence d'autres corrélations éventuelles entre le comportement de ces chaussées et des essais d'identification plus simples

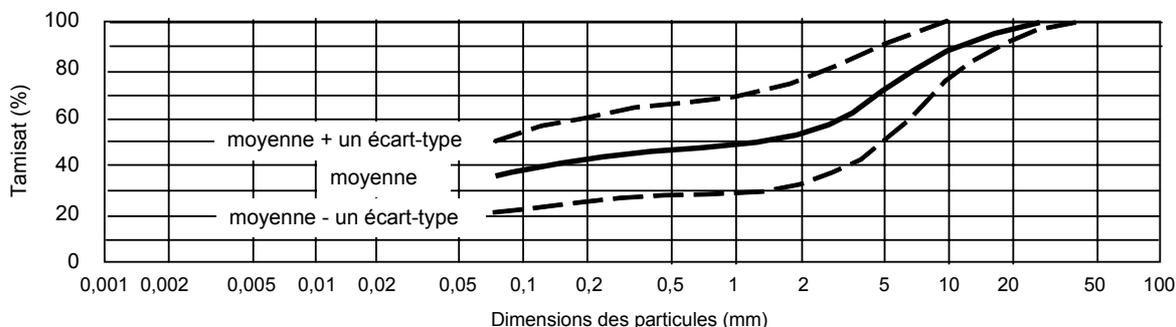
(granulométrie, plasticité, densité sèche OPM...) mais elles n'ont pas été convaincantes. Aucun de ces essais pris isolément n'a pu rendre compte de façon satisfaisante du comportement global des chaussées sous trafic. Leur représentativité n'a pu être partiellement vérifiée que par le biais de corrélations le plus souvent vagues ou dispersées avec l'indice CBR lui-même. Quant à l'indice CBR, bien qu'il soit imparfait, il a été retenu comme critère fondamental d'acceptabilité. Il y a toutefois des aspects du comportement des graveleux latéritiques avec lesquels l'indice CBR n'est pas corrélé : il s'agit de la dureté des concrétions ferrugineuses et du potentiel de gonflement des fines argileuses.

### 2.4.2. Les études du Ghana

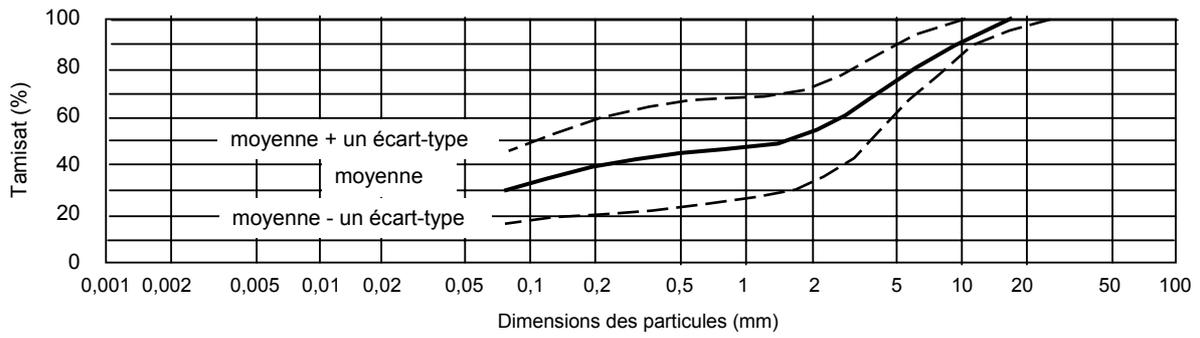
Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un contrat de l'USAID (Lyon Associates Inc., 1971). Les paramètres d'identification utilisés dans ces études sont classiques. On s'appuie toujours, pour situer les matériaux dans les classifications géotechniques, sur les essais de granulométrie, la détermination des limites d'Atterberg et, si possible, des essais complémentaires.

Les sols ont été classés d'après leurs caractéristiques pédologiques et sont divisés en sols ferrugineux, sols ferrallitiques et ferrisols. La figure 2.2 montre les courbes granulométriques de ces trois classes de sols.

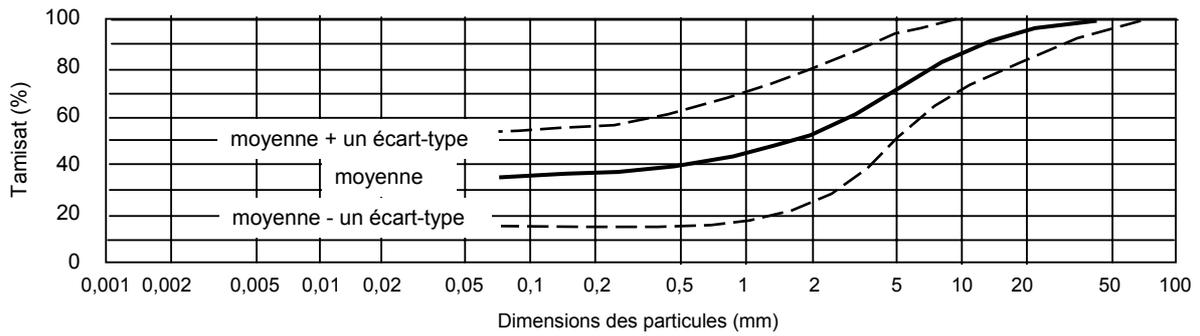
Les courbes granulométriques des différents types de sols (ferrugineux, ferrallitiques et ferrisols) sont comparées sur les figures 2.3 (courbes moyennes) et 2.4 (fuseaux).



2.2.a Sols ferrugineux



### 2.2.b Sols ferrallitiques



### 2.2.c Ferrisols

Figure 2.2. Résultats du Ghana - granulométrie et indice de plasticité des sols ferrugineux, de sols ferrallitiques et des ferrisols étudiés.

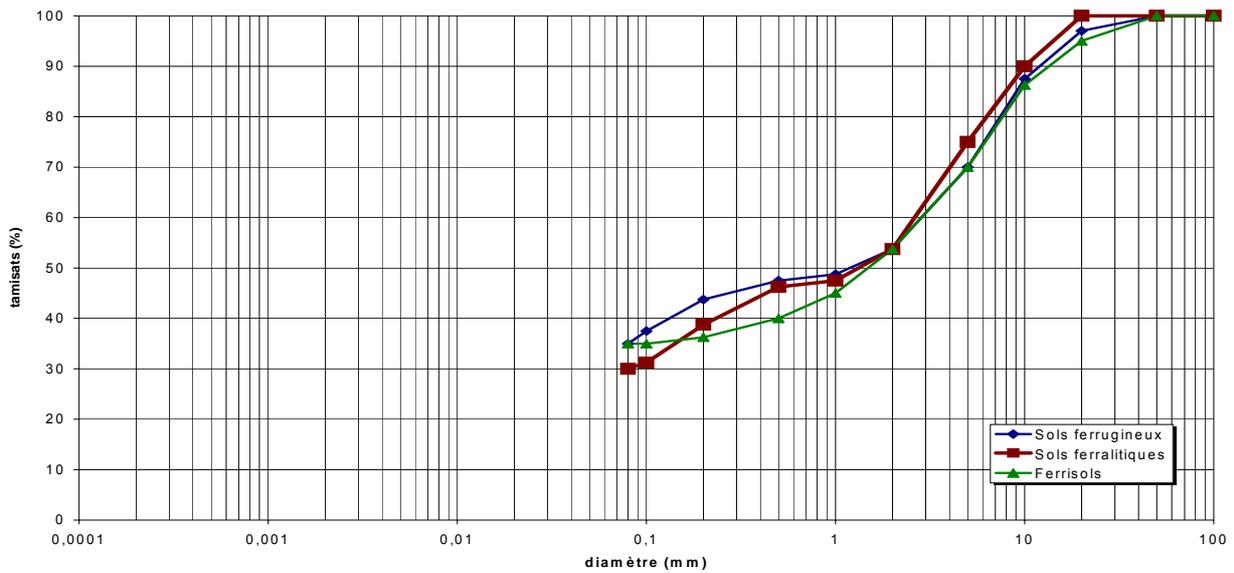


Figure 2.3.. Comparaison des courbes granulométriques moyennes des sols ferrugineux, des sols ferrallitiques et des ferrisols (Ghana)

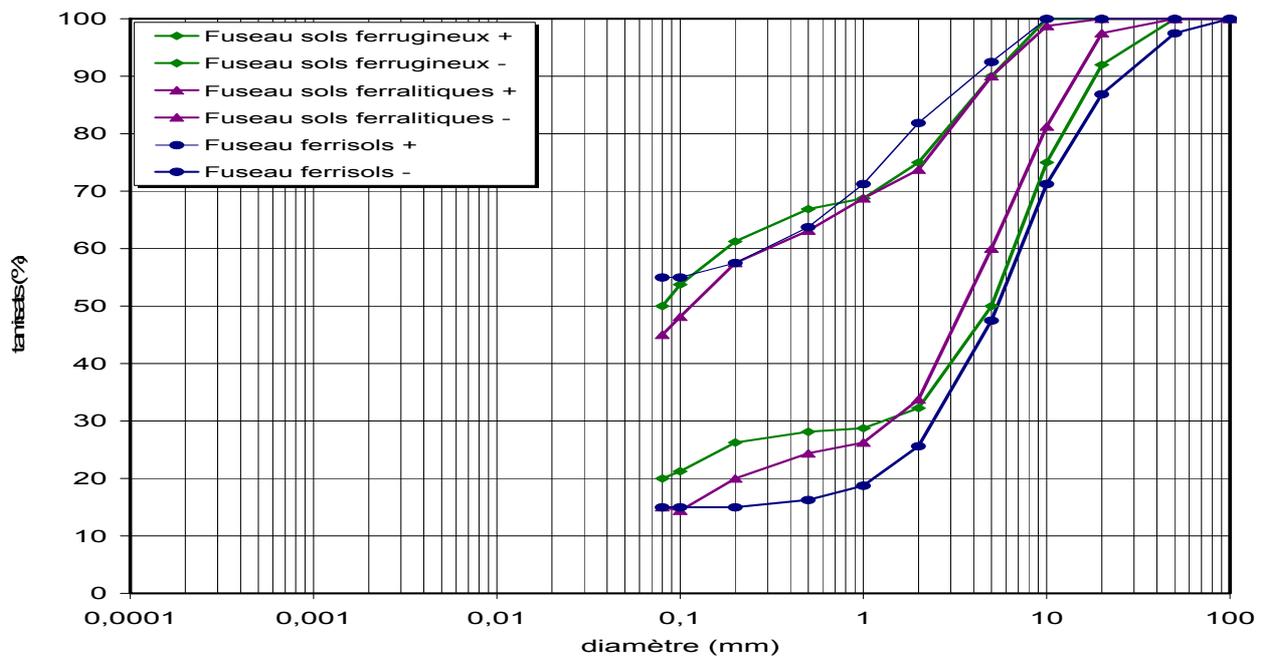


Figure 2.4. Comparaison des fuseaux granulométriques des sols ferrugineux, des sols ferralitiques et des ferrisols (Ghana)

Les indices de plasticité des trois classes de sols sont donnés dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4. Indices de plasticité : valeur moyenne et écarts types

	$I_p$ moyen	Écart type $I_p$
Sols ferrugineux	15	8
Sols ferralitiques	23	7
Ferrisols	27	12

Compte tenu des dispersions des caractéristiques des échantillons, il n'est pas facile de distinguer un graveleux ferrugineux d'un graveleux ferralitique, que ce soit par son passant à  $80 \mu\text{m}$  (teneur en particules fines) ou par son indice de plasticité. Néanmoins, les matériaux ferralitiques étudiés sont plus plastiques (tableau 2.5).

Les résultats des études de l'USAID montrent que, pour les limites de liquidité comprises entre 30 et 40 %, les indices de plasticité des trois classes de sols latéritiques (sols ferrugineux, sols ferralitiques et ferrisols) sont pratiquement identiques.

Le tableau 2.6 résume les différences entre les trois classes de sols.

Tableau 2.5. Limites de liquidité et indices de plasticité des différents sols latéritiques des études de l'USAID au Ghana

	Sols ferrugineux	Sols ferrallitiques	Ferrisols
$w_L$	$I_P$	$I_P$	$I_P$
10		2,08	3,5
20	5,7	7,78	8,5
30	12,8	13,48	13,5
40	19,9	19,18	18,5
50	27	24,88	23,5
60	34,1	30,58	28,5
70	41,2	36,28	33,5
80	48,3	41,98	38,5
90	55,4	47,68	43,5
100	62,5	53,38	48,5

Tableau 2.6. Comparaison des trois classes des sols (Ghana)

	Profondeur profil	Argile dominante	Argile accessoire	Silt/argile	$SiO_2/Al_2O_3$	Pluie (mm)
Sols ferrugineux	Rarement > 2,5 m	Kaolinite		< 0,15	= 2	< 1800
Sols ferrallitiques	Souvent profond(6 m)	Kaolinite	Parfois gibbsite	< 0,25	< 2	> 1500
Ferrisols	Souvent tronqués par érosion	Kaolinite		> 0,2	= 0,2	> 1250 < 2750

Les études de l'USAID ont également porté sur la relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité. Trois corrélations ont été proposées (figure 3.5) :

- pour les sols ferrugineux :  $I_P = 0,71 w_L - 8,5$ ,
- pour les sols ferrallitiques :  $I_P = 0,57 w_L - 3,62$ ,
- pour les ferrisols :  $I_P = 0,50 w_L - 1,5$ .

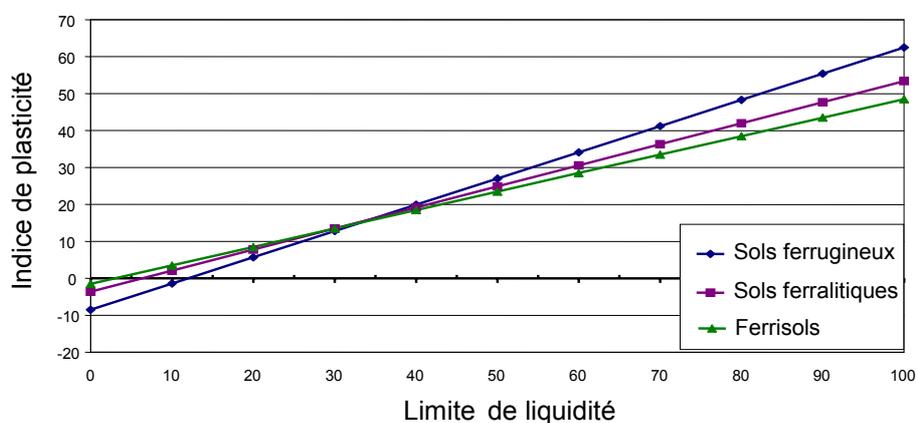


Figure 2.5. Caractéristiques de la fraction argileuse (USAID, Ghana)

### **2.4.3. Importance de la limite de retrait**

Autret (1980) indique que, pour les sols latéritiques, il faut insister sur des paramètres d'identification qui n'ont pas été pris en considération jusqu'ici et qui peuvent fournir des informations intéressantes sur les matériaux :

- la limite de retrait,
- la valeur au bleu de méthylène.

Si les limites de plasticité et de liquidité sont systématiquement déterminées sur les matériaux soumis à l'identification géotechnique, il n'en va pas de même pour la limite de retrait, qui est plus rarement prise en compte. Sa mesure présente néanmoins un grand intérêt dans les pays semi-arides où le comportement des graveleux latéritiques en saison sèche est affecté par d'importantes baisses de teneur en eau qui entraînent le développement d'un réseau de fissures de retrait. Les valeurs de la limite de retrait  $w_s$  mesurées sur une cinquantaine d'échantillons d'origine diverse sont comprises entre 10 et 30%. Une bonne corrélation a été trouvée avec la limite de plasticité, ce qui permet d'obtenir un ordre de grandeur de la limite de retrait :

$$w_s = 0,6 w_p + 4,3 \quad (\text{coefficient de corrélation} = 0,84)$$

La connaissance de la limite de retrait est utile pour prévoir si un graveleux latéritique ne risque pas d'être sujet à des retraits pouvant entraîner sa fissuration. Il faudrait alors le maintenir à l'abri des variations de teneurs en eau ou éventuellement ne pas l'utiliser sans amélioration. On peut craindre du retrait en cas d'assèchement du matériau, lorsque la teneur en eau varie d'une valeur supérieure à la limite de retrait à une valeur égale ou inférieure à cette limite.

Selon Autret (1980), la caractérisation de la fraction argileuse par l'absorption de bleu de méthylène (valeur au bleu et coefficient d'activité au bleu) ne donne pas de résultats significatifs pour les graveleux latéritiques. Il ne paraît pas y avoir de relation entre ce paramètre et la quantité de particules inférieures à  $2 \mu\text{m}$  ( $C_{2\mu\text{m}}$ ).

Les essais au bleu de méthylène ont été effectués sur les fractions  $0/2 \mu\text{m}$ ,  $0/80 \mu\text{m}$  et  $0/400 \mu\text{m}$  et comparés au coefficient d'activité de Skempton, lequel se rapporte à la fraction  $0/80 \mu\text{m}$  (Tableau 3.7), avec :

- $V_B$  = valeur en bleu (en g/100g),

- $C_A$  = coefficient d'activité au bleu :  $V_B / C_{2\mu m}$ ,
- $C_S$  = coefficient d'activité de Skempton :  $I_P / C_{2\mu m}$ .

L'analyse de la nature minéralogique des argiles contenues dans les échantillons testés a montré la présence en quantité moyenne à forte de kaolinite dans 55 % des échantillons, la présence en quantité très faible d'illite – muscovite dans 45 % des échantillons et la présence de montmorillonite en très faible quantité également dans 20 % des échantillons.

Tableau 2.7. Valeurs de  $V_B$ ,  $C_A$ ,  $C_S$  en fonction des classes granulaires

		$V_B$	$C_A$	$C_S$
<b>0/2 <math>\mu m</math></b>	m	1,10	3,58	
	$\sigma$	0,89	2,48	
	nombre	47	43	
<b>0/400 <math>\mu m</math></b>	m	1,65	3,77	
	$\sigma$	0,99	1,64	
	nombre	26	26	
<b>0/80 <math>\mu m</math></b>	m	2,43	3,86	0,37
	$\sigma$	1,44	1,91	0,11
	nombre	22	22	42

Dans la littérature spécialisée, on n'a pas noté de variation corrélée des valeurs au bleu ou de l'activité avec le pourcentage de kaolinite. Une recherche plus approfondie est nécessaire pour expliquer le comportement de ces matériaux vis-à-vis de la réaction au bleu de méthylène qui, pour les fractions argileuses, apporte généralement une information significative.

Autret et Tran (1982) ont montré qu'il semble exister une relation entre la valeur au bleu et le rapport  $R = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$  mais la signification de ce rapport est contestée et la valeur à partir de laquelle on admettait qu'un sol est latéritique ( $R \leq 1,33$ ) n'est plus vraiment considérée comme caractéristique. Les essais d'Autret et Tran tendent à montrer qu'il faudrait, pour les matériaux latéritiques, adapter le mode opératoire et effectuer la manipulation à un pH donné.

#### **2.4.4. Les études du Congo démocratique (Ex Zaïre)**

Au Congo Démocratique (Zaïre), les recherches effectuées sur les sols congolais en 1983 par la cellule de recherches routières, concernant la capacité d'absorption des sols à

l'essai de bleu de méthylène, confirment la dispersion des résultats notée par les autres auteurs, mais notent que, si la valeur de bleu déterminée sur la fraction 0/5 mm mais rapportée au matériau total (0/D) est supérieure à 0,4 g/100g, l'indice CBR ( $I_{CBR}$ ) est toujours inférieur à 40 (à 95 % de l'Optimum Proctor Modifié).

Pour les auteurs congolais, une valeur  $V_B(0/D)$  inférieure à 0,3 g/100g serait caractéristique de graveleux latéritiques à fines peu actives et de bonne portance (figure 2.6).

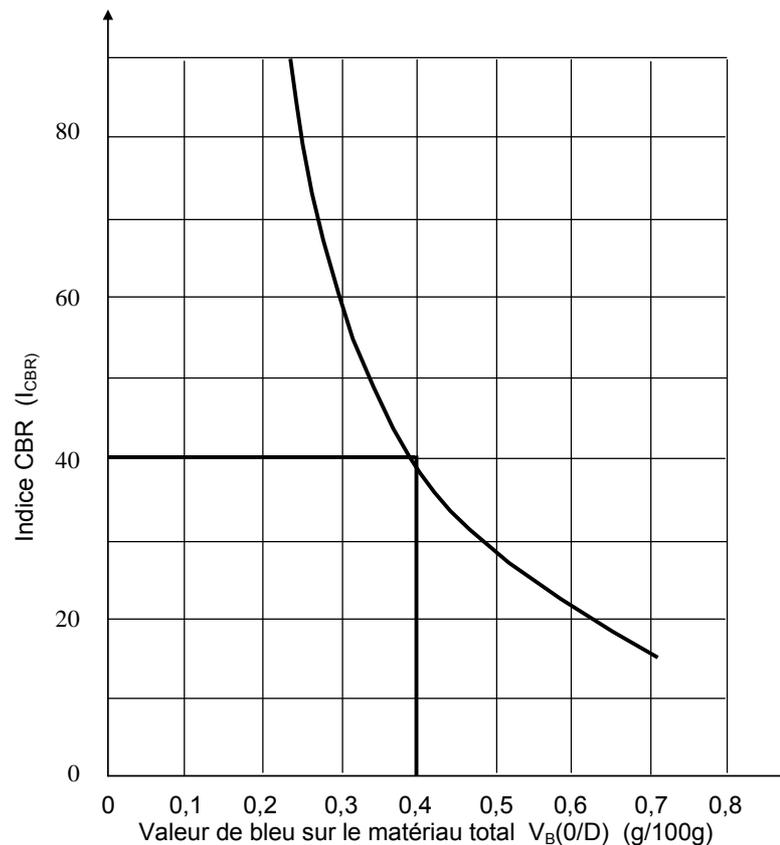


Figure 2.6. Sols graveleux latéritiques du Congo Démocratique (Zaïre) : relation entre l'indice CBR à 95% de l'optimum Proctor modifié et la valeur de bleu sur le matériau total

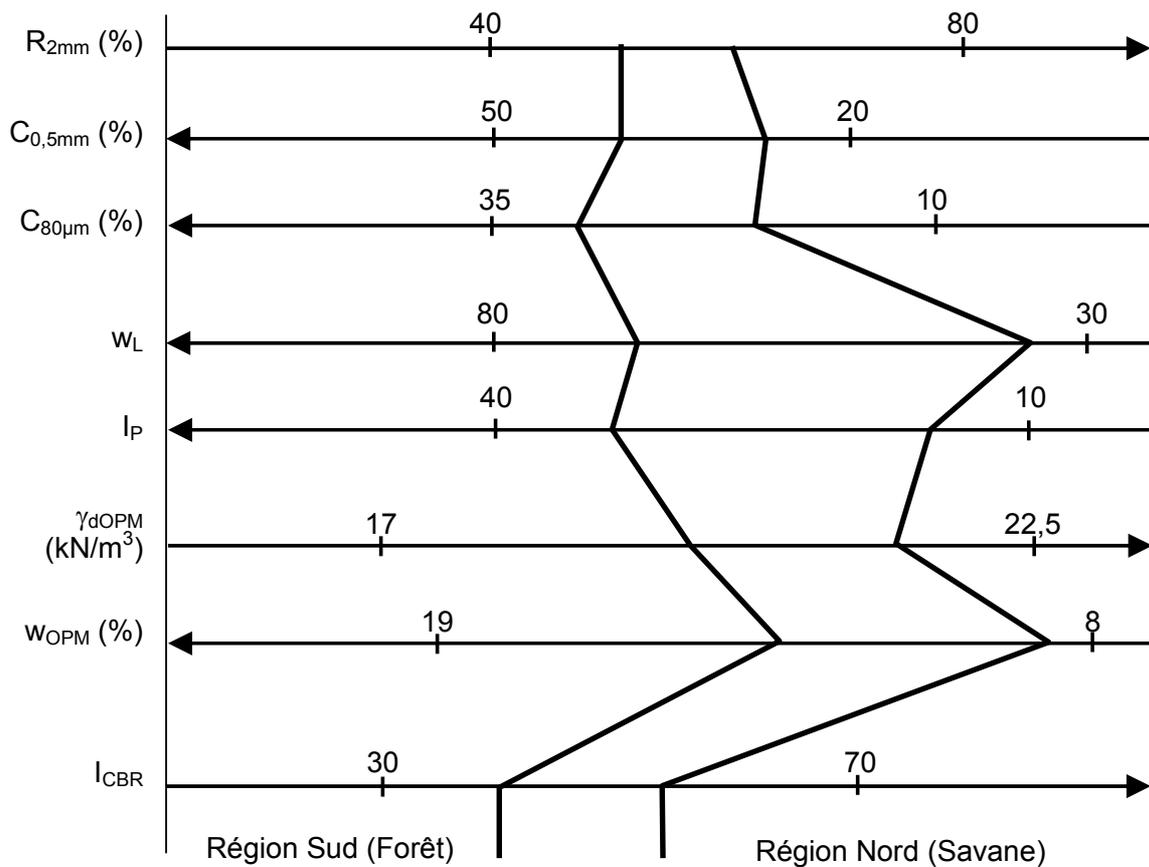
Une manière commode de représenter les paramètres d'identification d'un sol graveleux latéritique sur un diagramme où l'on fait croître ou décroître ensemble les valeurs qui évoluent dans le même sens a été proposée (figure 3.7). Elle fait varier dans le même sens d'une part :

- le refus à 2mm (fraction graveleuse) :  $R_{2mm} = 1 - C_{2mm}$ ,
- le poids volumique sec à l'optimum Proctor modifié  $\gamma_{dOPM}$ ,
- l'indice CBR ( $I_{CBR}$ ),

et, d'autre part :

- la teneur en particules inférieures à 0,5mm ( $C_{0,5mm}$ ),
- la teneur en fines ou passant à 80  $\mu\text{m}$  ( $C_{80\mu\text{m}}$ ),
- l'indice de liquidité  $w_L$ ,
- l'indice de plasticité  $I_P$ ,
- la teneur en eau optimale à l'optimum Proctor modifié  $w_{OPM}$ .

Chaque type de matériau se trouve ainsi représenté par un zigzag continu occupant une certaine position dans le diagramme (figure 3.7).



Relation empirique :  $I_{CBR} = 0,44 [(R_{2mm} - 30) - (C_{80\mu\text{m}} - 10) - (I_P - 10)] + 47,5$

Figure 2.7. Diagramme d'identification géotechnique des graveleux latéritiques proposé par les études du Congo Démocratique

La cellule de recherche routière du Congo Démocratique (ex Zaïre) a fondé sa classification des graveleux latéritiques sur le pourcentage de fines ( $C_{80\mu\text{m}}$ ) et le produit  $C_{80\mu\text{m}} \times I_P$ , avec trois classes de graveleux latéritiques : GL1, GL2, GL3. Les caractéristiques géotechniques de ces trois classes sont résumées dans le tableau 2.8.

Tableau 2.8. Définition des trois classes de graveleux latéritiques du Congo Démocratique

	GL1	GL2	GL3
Refus à 2 mm (%)	63 – 85 (74)	53 – 79 (66)	44 – 71 (57)
Passant à 0,08 mm (%)	8 – 18 (13)	16 – 26 (21)	25 – 37 (31)
Limite de liquidité ( $w_L$ )	26 – 52 (39)	32 – 58 (45)	36 – 66 (50)
Indice de plasticité ( $I_P$ )	9 – 25 (16)	14 – 26 (20)	14 – 34 (24)
$C_{80\mu m} \times I_P$	125 – 265 (195)	300 – 520 (410)	535 – 915 (725)
$\gamma_s$ ( $kN/m^3$ )	> 30	> 29	> 28
$\gamma_{d OPM}$ ( $kN/m^3$ )	21 – 24 (22,5)	19,8 – 23,2 (21,5)	18,5 – 21,5 (20)
Teneur en eau $w_{OPM}$ (%)	6 – 11 (9)	8 – 13 (11)	10 – 16 (13)
$I_{CBR}$ (95 % OPM)	22 – 102 (62)	14 – 68 (41)	14 – 46 (30)
Gonflement (moule CBR)	0,1	0,4	0,8

### 2.4.5. Les études du Nigéria

Lyon Associates (1976) a étudié les sols du Nigéria, comme l'ont été les sols du Ghana. Ces études ont fait intervenir les facteurs « roche mère » et « degré d'altération ». Les études de Kahl (1976) donnent les propriétés géotechniques des sols du Nigeria en relation avec la roche mère. (Figure 2.8 et Tableau 2.9).

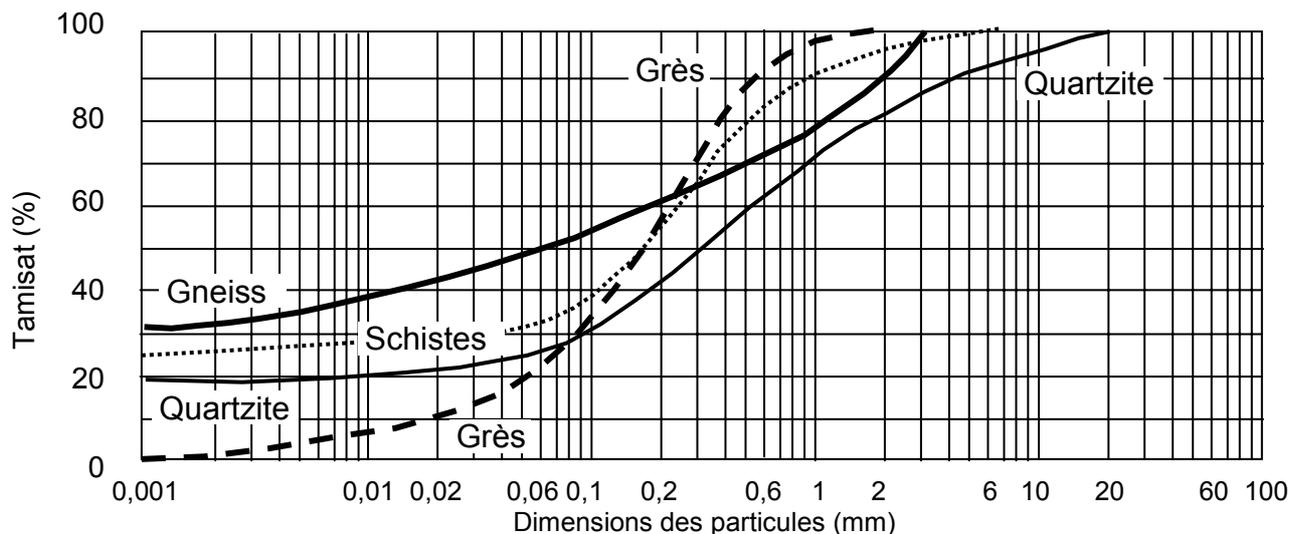


Figure 2.8. Courbes granulométriques des sols du Nigéria en fonction de la roche mère

Tableau 2.9. Caractéristiques géotechniques des sols de Nigéria en fonction de la roche mère (Kahl, 1976)

	Schiste	Quartzite	Gneiss	Granite	Grès
Teneur en eau $w$ (%)	6,9	12,5	25,4	26,6	7,2
Limite de liquidité $w_L$	36,4	40,6	60,2	53,7	26,9
Limite de plasticité $w_P$	32,0	31,9	48,5	50,1	21,0
Indice de plasticité $I_P$	4,4	8,5	11,7	13,6	5,9
Retrait linéaire (%)	5,0	11,6	14,1	7,3	2,2
Densité des particules $G_s$	2,59	2,56	2,71	2,59	2,54
Capacité d'absorption d'eau (%)	51,7	85,8	73,3	103	48,3
Cohésion (kPa)	40	20	40	25	10
Angle de frottement interne $\varphi$ (degrés)	25	27	31	28,5	27
Teneur en $\text{SiO}_2$ (%)	48,09	68,52	57,42	53,91	63,97
Teneur en $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	24,31	8,01	10,22	11,30	7,58
Teneur en $\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	27,44	22,79	9,5	23,04	29,83

#### 2.4.6. Les études du Sénégal

Atlan et al. (1981) ont publié une étude des relations entre caractéristiques pédologiques et caractéristiques géotechniques des sols fins du Sénégal. Leurs résultats montrent qu'il existe une bonne corrélation entre la teneur en eau à pF 2,5 et l'indice de plasticité de ces sols. La présence d'une quantité même faible de montmorillonite implique une très nette diminution de leurs propriétés géotechniques.

Fall et al. (1995) ont travaillé sur le comportement non drainé sous chargement monotone et cyclique de graveleux latéritiques compactés de l'ouest du Sénégal. Ces auteurs se sont préoccupés de l'évolution de la résistance au cisaillement de ces sols sous charge. Ils présentent les résultats d'essais triaxiaux consolidés non drainés sur des échantillons reconstitués sous un chargement monotone et cyclique. Ces résultats montrent l'existence de deux types de comportement, en fonction de la densité initiale. La réponse des sols provenant des trois sites de prélèvement (Ndienné, Sébikotane, Yenne/mer) est décrite. Les matériaux de Yenne sont des sols latéritiques de la famille des sols ferrallitiques formés sur des schistes. Ceux de N'Dienne et de Sébikotane appartiennent à la famille des cuirasses ferrallitiques formées sur du calcaire (N'Dienne) et sur des calcaires marneux ou des schistes (Sébikotane).

Les poids volumiques de ces sols ont été déterminés au picnomètre pour trois classes granulaires ( $D < 4$  mm,  $4$  mm  $< D < 10$  mm et  $D > 10$  mm), tout en changeant la solution (eau ou trichlorocarbène). Le tableau 3.10 présente les résultats des essais et donne la moyenne pour chaque échantillon. La densité augmente quand on passe des fractions fines aux fractions grossières (tableau 2.11), ce qui signifie qu'il y a une grande concentration des oxydes de fer dans les concrétions ou les pisolites, la fraction fine étant la plupart du temps argileuse.

Tableau 2.10. Propriétés des matériaux (Sénégal)

	N'Dienné	Sébikotane	Yenne/Mer
Limite de liquidité $w_L$	21	36	39,5
Limite de plasticité $w_P$	13	16	19
Indice de liquidité $I_P$	8	20	20,5
Fraction graveleuse $R_{2mm}$ (%)	26	30	15
Fraction supérieure à 0,1 mm $R_{0,1mm}$ (%)	6	6	7
Coefficient d'uniformité $C_U$	28	27	5
Coefficient de courbure $C_C$	8,1	5,81	2,59
Densité sèche optimale $G_{dOPM}$	2,09	2,075	1,77
Teneur en eau optimale $w_{OPM}$ (%)	8,6	8,9	8,5
Coefficient de perméabilité $k$ (m/s)	$7 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Essai Los Angeles (% perte)	59,7	89,7	83,1
Indice CBR $I_{CBR}$ (%)	113	82	86
Gonflement (%)		0	0 à 0,08
Classification LCPC (GTR)	B6	B6	B5
Classification USCS	Gw à Gc		
Classification HRB	A <sub>2-7</sub> à A <sub>2-4</sub>		

Les tableaux 2.12 à 2.14 présentent les résultats de l'analyse aux rayons X. Dans le cas de l'échantillon de Ndienné, l'aspect du millisite certifie son origine. Ces faciès issus du substratum éocène (les schistes) ont une épaisseur d'environ 3 m.

Tableau 2.11. Poids volumiques (kN/m<sup>3</sup>) des sols étudiés en fonction de la granularité

Classe granulaire	D < 4 mm	4 mm < D < 10 mm	D > 10 mm	Sol entier
N'Dienné	28,9	30,4	30,7	30,0
Sébikotane	29,6	31,4	31,6	30,9
Yenne/Mer	32,3	35,7	36,2	34,7

Tableau 2.12. Composition minéralogique en fonction de la granularité (N'Dienné)

Minéral	D < 4 mm	4 mm < D < 10 mm	D > 10 mm
Millisite	28,9	30,4	30,7
Goethite	29,6	31,4	31,6
Quartz	32,3	35,7	36,2
Kaolinite	10	4	0

Tableau 2.13. Composition minéralogique en fonction de la granularité (Sébikotane)

Minéral	D < 4 mm	4 mm < D < 10 mm	D > 10 mm
Quartz	30	18	25
Goethite	25	30	30
Kaolinite	10	6	–

Tableau 2.14.. Composition minéralogique en fonction de la granularité (Yenne/Mer)

Minéral	D < 4 mm	4 mm < D < 10 mm	D > 10 mm
Goethite	22	22	18
Hématite	27	30	33
Quartz	20	13	13
Kaolinite	10	6	6

Les résultats des essais préliminaires d'identification aident à placer les trois sols de graveleux latéritiques dans le groupe des sols latéritiques ferrugineux (Remillon, 1967) en raison de leur plasticité et des paramètres de tassement.

La faible plasticité des sols de N'Dienné peut être expliquée par le fait que ce matériau est plus sableux que les autres. La densité croît quand la fraction devient plus grossière. Ces résultats sont dus à une concentration très forte des pisolites ou des concrétions de fer.

### **2.4.7. Les études du Burkina Faso**

Le Burkina-Faso est riche en petits gisements de latérite, généralement de faible épaisseur. Ce sont des latérites de savane, dont les paramètres géotechniques usuels sont les suivants :

- Classes granulométriques 0/D : 0/20 à 0/40,
- Teneur en fines  $C_{80\mu m}$  : 5 à 30,
- Refus à 2 mm : 50 à 80,
- Indice de plasticité  $I_p$  : 4 à 30,
- Indice CBR : 18 à 85,
- Classification : HRB A 24 (0) à A 26 (0).

### **2.5. Conclusion**

Les études analysées dans ce chapitre donnent l'idée que les propriétés des sols latéritiques sont complexes et ne peuvent être décrites de façon totalement cohérente.

L'appréciation de l'induration, qui est une caractéristique commune aux latérites, est empirique car aucune caractéristique liée à la mécanique du matériau ne peut être chiffrée. On peut considérer cependant qu'il y a induration quand le milieu a une consistance dure et fragile.

Les analyses chimiques sont beaucoup trop globales pour révéler la composition, la nature et l'origine des latérites (Campbell, 1917). Des latérites présentant les mêmes propriétés physiques peuvent fortement différer quant à leur composition chimique et, inversement, des latérites présentant une composition chimique comparable peuvent posséder des propriétés physiques très différentes. Depuis des années, de nombreux chercheurs tentent de compléter les déterminations chimiques par des études minéralogiques diverses.

La combinaison variable des différents facteurs de la création des latérites (climat, végétation, géologie et topographie) produit nécessairement des matériaux à texture, composition et caractéristiques variables.

L'analyse de la densité apparente des latérites est instructive à plusieurs points de vue : elle permet d'apprécier l'intensité de lessivage de certains matériaux et de déterminer l'ordre de grandeur des surfaces actives. Ainsi la densité apparente est toujours plus élevée dans les horizons de surface des latérites qu'en profondeur. Les cuirasses anciennes sont plus denses que les cuirasses récentes. Plus la structure est lâche, plus la densité est faible pour une même composition. Les formations cimentées sont plus denses que celles scoriacées et celles-ci plus denses que celles à structures alvéolaires...

Dans la littérature spécialisée, on n'a pas noté de variation corrélée des valeurs au bleu ou de l'activité avec le pourcentage de kaolinite. Une recherche plus approfondie est nécessaire pour expliquer le comportement de ces matériaux vis à vis de la réaction au bleu de méthylène qui, pour les fractions argileuses, apporte généralement une information significative.

La majeure partie des pays étudiés utilise pratiquement les mêmes paramètres d'identification. Il n'est pas observé de différences significatives entre les divers résultats recueillis à l'exception de ceux du Congo Démocratique, dont le graphe sera utilisé pour une comparaison avec les sols latéritiques de la région de l'Agnéby (Côte d'Ivoire).



## Chapitre 3

# LES LATÉRITES DE CÔTE D'IVOIRE

### 3.1. Introduction

Avant de concentrer les travaux de ce mémoire sur les latérites d'une région de Côte d'Ivoire, il est utile de donner une vue d'ensemble de ce pays, et de faire une présentation générale des connaissances existantes dans le domaine de l'utilisation des graveleux latéritiques en construction routière. C'est ce qui est fait dans ce chapitre.

### 3.2. Présentation de la Côte d'Ivoire

#### a. Géographie

La République de Côte d'Ivoire est située dans l'hémisphère Nord, dans la zone intertropicale, entre le 4<sup>e</sup> et le 11<sup>e</sup> degrés de latitude Nord et entre le 2<sup>e</sup> et le 8<sup>e</sup> degrés de longitude Ouest. Colonie française depuis 1893, la Côte d'Ivoire est devenue indépendante le 7 Août 1960. C'est un état de l'Afrique de l'Ouest, limité au nord par le Mali et le Burkina Faso, à l'ouest par la Guinée Conakry et le Libéria, à l'est par le Ghana et au sud par l'océan Atlantique (Figure 3.1). Sa superficie est de 322.462 km<sup>2</sup>. Elle comptait 19.163 millions d'habitants en 2006.

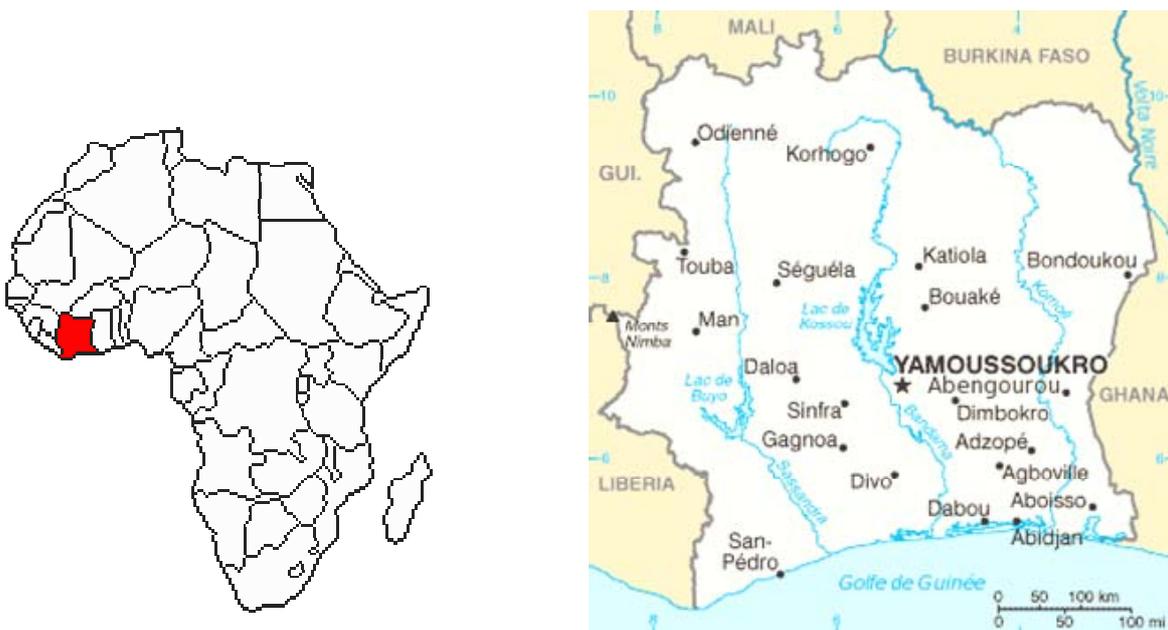


Figure 3.1. La Côte d'Ivoire en Afrique de l'Ouest

Dans l'ensemble, elle bénéficie de conditions naturelles favorables à son développement. Au niveau du relief, à part l'ouest et le nord ouest montagneux, une grande partie du territoire est constituée de plaines au sud et de plateaux au centre et au nord.

Concernant les climats, l'hydrographie et la végétation, sa situation dans la zone intertropicale lui vaut :

- quatre nuances de climats chauds et humides : au sud le climat attiéen (climat subéquatorial), au centre le climat baouléen (climat humide), au nord le climat soudanais (climat tropical de transition) et à l'ouest le climat de montagne ;
- une pluviométrie et une hydrométrie suffisante ;
- une végétation variée, composée de forêts au sud, jusqu'au 9<sup>e</sup> parallèle, et de savanes au nord.

Concernant les sols (au sens de la pédologie et de l'agriculture), on distingue des sols hydromorphes surtout sur le littoral, des sols ferrallitiques dans le sud forestier et des sols ferrugineux au nord.

Le sous-sol contient des minerais dont l'or, le diamant, le nickel, le manganèse, le fer, le pétrole et le gaz naturel.

En outre, la Côte d'Ivoire dispose d'une grande façade maritime et d'un vaste réseau hydrographique, comportant notamment des lagunes, quatre grands fleuves et des lacs de retenue.

## ***b. Économie***

À côté des facteurs naturels, la Côte d'Ivoire dispose d'autres potentialités de développement économique.

Le pays a une démographie galopante (taux d'accroissement naturel = 3,8%), avec une population inégalement répartie, de nombreuses ethnies (60) et de nombreux habitants étrangers (26%).

Son contexte économique est favorable grâce à des facteurs historiques et d'attrait social (hospitalité, brassage de la population) et à une économie qui reste dynamique malgré la crise politique.

L'économie Ivoirienne repose sur trois secteurs d'activités économiques. L'agriculture est la première de l'Afrique de l'ouest. Elle réalise 24,3% du PIB, 70% des recettes d'exportation et emploie 54% de la population active. L'agriculture d'exportation réalise une production abondante et variée de cultures tropicales dont les plus importantes sont le cacao (1<sup>er</sup> rang mondial) et le café (7<sup>e</sup> rang mondial). L'agriculture vivrière réalise aussi des productions abondantes et variées de céréales (riz, maïs, mil, sorgho), de tubercules (manioc, igname, tarot), de banane plantain et de légumes. La Côte d'Ivoire n'est pas autosuffisante en matière de production de riz et de production animale. L'exploitation forestière participe aussi au développement de la Côte d'Ivoire (troisième produit d'exportation).

L'industrie Ivoirienne réalise 23,9% du PIB. Le tissu industriel est varié. Il est constitué des industries extractives de diamant (20<sup>e</sup> rang mondial), d'or (environ 3t/an), de pétrole et de gaz naturel (50 000 barils/jour), des agro-industries, des industries chimiques, mécaniques, électriques et des papeteries...

Le secteur tertiaire est le plus important. Il réalise 54,1% du PIB. Le commerce extérieur est dynamique, la balance commerciale est excédentaire, elle s'élevait à 1262 milliards de FCFA en 2005. En général, la Côte d'Ivoire vend plutôt des produits bruts à l'étranger. Elle échange principalement avec l'Union Européenne et notamment la France (53% du commerce ivoirien).

### ***c. Organisation administrative***

La Côte d'Ivoire a pour capitale politique Yamoussoukro et pour capitale économique Abidjan (plus de 5 millions d'habitants). Le pays est divisé en dix-neuf régions administratives (figure 3.2). Chaque région est divisée en départements et chaque département en sous-préfectures.

Il a été indiqué plus haut que le pays comporte deux principales zones de végétation. Les régions administratives se répartissent comme suit entre ces zones :

- la zone de forêt (au sud) regroupe les onze régions des 18 montagnes (Man), du Haut Sassandra (Daloa), de la Marahoué (Bouaflé), du Fromager (Gagnoa), du Moyen Cavally (Guiglo), de l'Agnéby (Agboville), du Sud Bandaman (Divo), du Bas Sassandra (San - Pédro), des Lagunes (Abidjan), du Sud Comoé (Aboisso), du Moyen Comoé (Abengourou) ;
- la zone de savane (au nord) regroupe les huit régions du N'Zi Comoé (Dimbokro), des Lacs (Yamoussoukro), du Bafing (Touba), du Worodougou (Séguéla), de la Vallée du Bandaman (Bouaké), du Zanzan (Bondoukou), des Savanes (Korhogo), et du Denguélé (Odienné).

La région de l'Agneby, objet de notre étude, est divisée en deux départements (Agboville et Agnopé) et treize sous-préfectures.



Figure 3.2. Carte administrative de la Côte d'Ivoire

#### **d. Infrastructures**

Les conditions naturelles favorables et l'activité des Ivoiriens ont permis la création d'importantes infrastructures, parmi les meilleures en Afrique de l'ouest (figures 3.3 et 3.4).

Ce sont :

- un réseau routier qui s'étend tous les ans (tableau 3.1) et comportait en 2001 81 996 km de routes, dont 6 514 km de routes bitumées, 75 482 km de routes en terre et 145 km d'autoroute, répartis comme indiqué dans le tableau 3.2 et sur la figure 3.5 ;
- le chemin de fer Abidjan – Burkina Faso, long de 625 km ;
- une vingtaine d'aérodromes, dont trois aéroports internationaux : l'aéroport Félix Houphouët Boigny d'Abidjan et ceux de Yamoussoukro et de Bouaké ;
- deux grands ports : le Port autonome d'Abidjan, qui est le premier port d'Afrique de l'ouest et l'un des plus modernes de toute l'Afrique, et le Port de San Pedro. Leur trafic total s'élève à 20 millions de tonnes par an ;
- le réseau lagunaire, utilisé dans les transports urbains et interurbains ;
- un réseau de télécommunication performant avec une compagnie de téléphonie fixe et quatre réseaux de téléphonie mobile et d'Internet.

La relance de l'économie, la reconstruction post-crise du pays, la recherche d'une meilleure qualité de vie pour une population toujours croissante créent des défis nouveaux en matière de construction, d'amélioration et d'entretien des infrastructures. Il s'agit, pour développer davantage l'agriculture et le commerce, d'augmenter le nombre des routes bitumées et de construire de nouvelles routes et autoroutes pour mieux évacuer les produits et faciliter les échanges, de construire des ponts, des barrages de retenue d'eau pour l'irrigation et de construire des marchés. Il s'agit aussi, dans le cadre de l'urbanisation, de créer des ouvrages d'assainissement et de bitumer des voies, surtout dans les grandes villes comme Abidjan, Bouaké, Daloa et Korhogo.

Tableau 3.1. Évolution du réseau routier ivoirien depuis 1985 (longueur en km)

Années	1985	1988	1989	1990	1993	1995	1997	1999	2001
Routes revêtues	3 850	4 620	4 683	5 130	5 290	5 800	6 000	6 514	6 514
Routes en terre	49 650	62 892	63 267	62 894	56 751	62 241	64 000	75 482	75 482
TOTAL RESEAU	53 500	67 512	67 950	68 024	62 041	68 041	70 000	81 996	81 996

Source: DRV (Direction des Routes et Voiries)



Figure 3.3. Passage supérieur dans la ville d'Abidjan-Plateau



Figure 3.4. Pont sur une route rurale (Divo-Gbabam)

Tableau 3.2. Répartition du réseau routier par région administrative, par catégorie et par type de routes (Année 2001)

Régions	Routes Bitumées				Routes en Terre					Total réseau km	% réseau bitumé / réseau total	Superficie *
	A	B	C	Total	A	B	C	D	Total			
	km	km	km	km	km	km	km	km	km			
LAGUNES	266	402	136	804	7	85	2 368	1 023	3 483	4 287	18,8 %	13 323
SUD-BANDAMA	110	59	0	169	0	230	1 290	694	2 214	2 383	7,1%	10 677
SUD-COMOE	133	233	0	366	0	133	1 289	1 056	2 478	2 844	12,9 %	7 252
<b>AGNEBY</b>	<b>273</b>	<b>67</b>	<b>0</b>	<b>340</b>	<b>118</b>	<b>210</b>	<b>2 128</b>	<b>1 188</b>	<b>3 644</b>	<b>3 984</b>	<b>8,5%</b>	<b>9 234</b>
HAUT-SASSANDRA	296	143	16	455	0	269	1 493	1 837	3 599	4 054	11,2 %	15 242
MARAHOUÉ	82	161	0	243	12	335	894	1 116	2 357	2 600	9,3%	8 698
SAVANES	369	68	0	437	346	866	5 692	2 464	9 368	9 805	4,5%	40 210
VALLEE DU BANDAMA	489	341	0	830	229	620	2 243	4 165	7 257	8 087	10,3 %	28 518
MOYEN-COMOE	141	0	0	141	178	192	1 070	950	2 390	2 531	5,6%	6 921
MONTAGNES	281	0	0	281	188	336	2 519	665	3 708	3 989	7,0%	16 782
FROMAGER	202	69	3	274	41	56	1 354	1 668	3 119	3 393	8,1%	6 903
MOYEN-CAVALLY	184	0	0	184	196	62	968	1 452	2 678	2 862	6,4%	14 268
LACS	330	0	6	336	0	157	1 907	341	2 405	2 741	12,3 %	8 875
N'ZI-COMOE	288	182	92	562	34	489	2 717	1 203	4 442	5 004	11,2 %	19 242
ZANZAN	312	0	3	315	449	596	2 669	2 364	6 078	6 393	4,9%	38 251
BAS-SASSANDRA	451	20	0	471	172	221	3 306	3 552	7 251	7 722	6,1%	26 440
DENGUELE	87	0	0	87	254	494	615	2 082	3 445	3 532	2,5%	20 996
WORODOUGOU	87	0	0	87	269	763	536	1 881	3 449	3 536	2,5%	22 166
BAFING	132	0	0	132	0	412	289	1 416	2 117	2 249	5,9%	8 922
<b>TOTAL</b>	<b>4 513</b>	<b>1 745</b>	<b>256</b>	<b>6514</b>	<b>2493</b>	<b>6 526</b>	<b>35 347</b>	<b>31 117</b>	<b>75 482</b>	<b>81 996</b>	<b>7,9%</b>	<b>322920</b>

Source: DRV (Direction des Routes et Voiries)

\* Source: CNTIG (Comité National de Télédétection et d'Information Géographique)

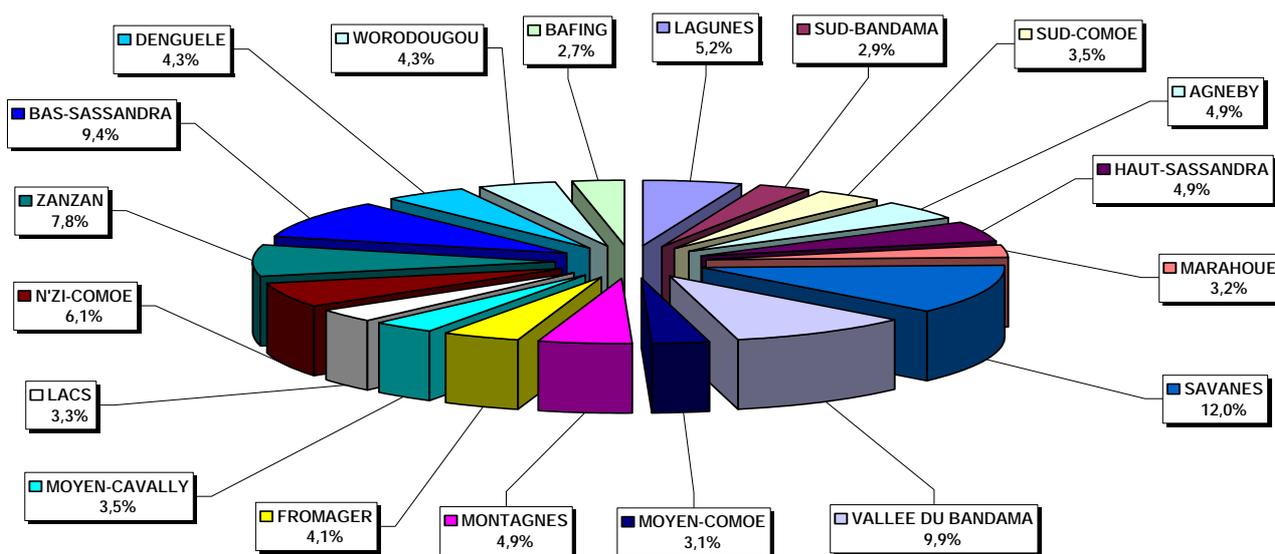


Figure 3.5. Répartition régionale du réseau routier

### 3.3. Les latérites de Côte d'Ivoire

#### a. Généralités

En Côte d'Ivoire, l'histoire des latérites se confond avec l'histoire des chaussées bitumées. On constate aujourd'hui l'impressionnant service rendu à la route par les graveleux latéritiques naturels. Alors que l'extension actuelle du réseau routier bitumé représente environ 6800 km, on peut estimer à près de 5000 km, la longueur des itinéraires dont la couche de fondation est constituée par des graveleux latéritiques naturels. En effet, à l'exclusion de la frange littorale où la seule ressource en matériaux meubles est le sable, l'assise inférieure de la quasi-totalité des chaussées bitumées a été réalisée en faisant appel aux nombreux gisements de latérites dont le sous-sol ivoirien regorge.

L'emploi systématique de ce matériau au niveau supérieur des structures de chaussées pour les routes en terre n'a commencé dans le réseau principal qu'aux environs de 1955, avec pour rivales, vite supplantées d'ailleurs, les techniques importées du macadam et du sol-bitume.

Les toutes premières réalisations furent entreprises le long de l'axe Abidjan – Adzopé – Abengourou dans le sud-est de la Côte d'Ivoire, dont le socle schisteux, la forte pluviométrie et l'importante couverture forestière s'avéraient finalement peu propices au développement de tout-venant à granularité et plasticité convenables. Dès lors, des

tentatives d'amendement au sable furent faites dans le double but de réduire la plasticité des fines et l'indice des vides en compensant la carence caractéristique des matériaux naturels en éléments de dimensions comprises entre 0,2 et 2 mm. Cette double amélioration était destinée à accroître la portance de la grave en même temps que sa résistance à l'eau. Cette technique fut baptisée « béton de sol » et, entre 1954 et 1960, quelques 200 kilomètres de couche de base furent ainsi constitués.

Si l'adjonction au graveleux d'une portion de sable propre généralement comprise entre 10% et 30% (la teneur optimale se situant aux environs de 20%) permettait effectivement de constater en laboratoire une augmentation assez sensible de l'indice portant CBR après saturation (sa valeur passant parfois de 20 à 60) et une réduction moins sensible de la plasticité ( $I_p$  chutant de 30 à 15), le comportement sous trafic des bétons de sol apporta néanmoins quelques désillusions. En effet, des travaux de renforcement sur certains tronçons de l'axe Abidjan – Adzopé – Akoupé s'avéraient déjà nécessaires en 1964, c'est-à-dire à peine six ans après leur ouverture à la circulation ; cette technique ne paraissait donc pouvoir supporter qu'un trafic cumulé maximum de l'ordre d'un demi-million à un million de poids lourds. La mise en place des graveleux latéritiques améliorés au ciment devait, par la suite, permettre d'assurer la relève et prolonger cette espérance de vie.

Mais au fur et mesure que le réseau s'étendait vers l'est, le centre et puis le nord de la Côte d'Ivoire, délaissant les paysages schisteux trop pluvieux pour se développer dans les zones granitiques, la présence de graves d'une meilleure qualité permit de passer de la nécessité fastidieuse d'un amendement au sable et les premières couches de base en graveleux véritablement naturels furent mise en place : sur les axes N'Douci–Divo et N'Douci–Ossou–Toumodi–Yamoussoukro entre 1958 et 1960, puis sur l'axe Yamoussoukro–Bouaké entre 1966 et 1968. Ainsi, aux environs de 1970, près de 300 km des routes du réseau principal bitumé d'alors, soit un tiers, comportaient en couche de base du graveleux latéritique naturel sur une épaisseur moyenne de 15 cm.

Quel fut le résultat en termes de comportement sous trafic de ces couches de base aux caractéristiques peu traditionnelles au regard des normes européennes et dont l'unique protection consistait le plus souvent en un tapis de sable–asphalte relativement perméable et dont l'épaisseur ne dépassait pas 3 cm ?

À l'analyse des chiffres de 1977, on s'aperçoit que :

- le tronçon N'Douci-Ossou, dont l'état en 1970 paraissait encore excellent, avait supporté en dix ans un trafic cumulé de l'ordre de 2 millions de poids lourds. Il n'a été véritablement renforcé qu'en 1976, lorsque le nombre de passages cumulés de poids lourds avait atteint près de 4 millions ;
- les tronçons N'Douci-Divo et Toumodi-Yamoussoukro ont reçu, avant renforcement, un nombre de passages cumulés de poids lourds que l'on estimait à cette époque aux alentours de 5 millions ;
- l'une des sections récentes en 1977, l'axe Yamoussoukro-Bouaké, dont la qualité de roulement était à cette époque convenable, avait supporté deux millions et demi de passages de poids lourds depuis sa construction.

Ces chiffres bibliographiques nous paraissent suffisamment éloquents et traduisent, en tout état de cause, l'intérêt que l'on peut tirer de l'emploi des graveleux latéritiques naturels, dans le cadre de la construction économique de routes destinées à supporter ces gammes de trafics.

Mais encore faut-il définir les meilleures conditions d'un tel emploi et rappeler, à partir de l'expérience acquise, les normes optimales d'étude et de mise en œuvre de cette technique authentiquement tropicale.

### ***b. Définition et classification des graveleux latéritiques de Côte d'Ivoire***

Un graveleux latéritique est un sol résiduel d'altération tropicale, constitué par un mélange de particules de dimensions généralement comprises entre 2 et 20 mm (pisolithes, concrétions ou nodules plus ou moins durs et/ou rognons de quartz) et d'argile latéritique de couleur le plus souvent rougeâtre ou ocre (parfois grise, plus au nord). La granularité du mélange est assez souvent discontinue, marquée par une absence caractéristique d'éléments sableux de dimensions comprises entre 0,2 et 2 mm (figures 3.6 et 3.7).

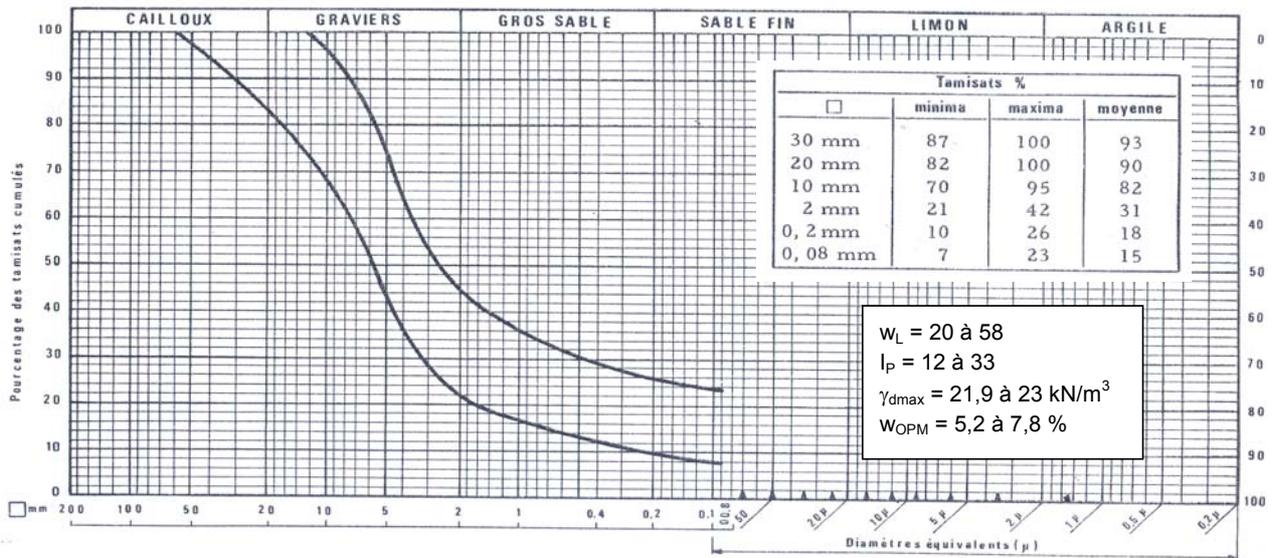


Figure 3.6. Exemple de fuseau granulométrique obtenu pour un graveleux latéritique ferralitique en zone de forêt (Route Duékoué-Guessabo-Issia, moyenne de 25 emprunts)

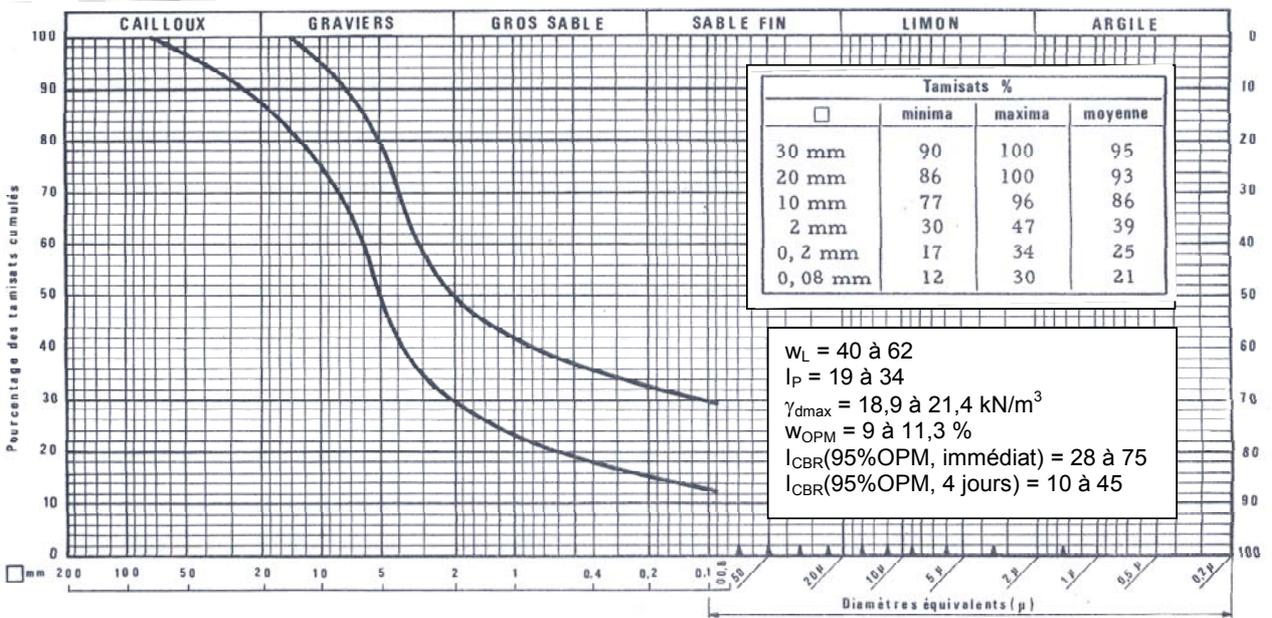


Figure 3.7. Exemple de fuseau granulométrique obtenu pour un graveleux latéritique ferralitique en zone de savane (Voie ferrée Bouaké-Tafiré, moyenne de 44 emprunts)

Les pisolithes, concrétions ou nodules, sont constitués soit par le dépôt et l'accumulation autour d'un noyau (généralement un grain de quartz) de sesquioxides de fer ( $Fe_2O_3$ ) et d'alumine ( $Al_2O_3$ ), soit par des débris de cuirasse latéritique (couche indurée très riche en  $Fe_2O_3$ ).

Dans les régions à climat tropical comportant une saison humide et une longue saison sèche bien marquée, les oxydes de fer prédominent et les graveleux latéritiques sont dits de type « ferrugineux ». Par contre, dans les régions plus humides à climat équatorial, ce sont les oxydes d'alumine qui prédominent et les graveleux sont dits de type « ferralitiques ». D'après la terminologie des pédologues, les graveleux latéritiques se situent presque toujours au sommet de « l'horizon B ».

### **c. Classification géotechnique ivoirienne des graveleux latéritiques**

Plusieurs classifications ont été élaborées en Côte d'Ivoire pour les graveleux latéritiques. Elles s'appuient essentiellement sur les travaux pédologiques de l'ORSTOM de Côte d'Ivoire. Le système de classification est le suivant :

- en géotechnique, classer en fonction de la granulométrie (tamisat à 0,08 mm ou teneur en fines) et de la plasticité (indice de plasticité  $I_p$ ),
- en géologie, préciser la roche mère,
- en pédologie, préciser la place occupée par l'échantillon dans le profil type ABC, préciser la nature de l'altération (ferralitique ou ferrugineuse) et le faciès de la couche.

Dès 1967, trois classes de graveleux avaient été mises en évidence (tableau 3.3), correspondant à des qualités géomécaniques décroissantes (G1, G2, G3). Les classifications successives ont abouti à affiner les distinctions, mais les trois classes ont subsisté.

Tableau 3.3. Classification des graveleux naturels en Côte d'Ivoire (LBTP, 1977)

Catégorie	Indice de plasticité	Tamisat à 0,08 mm ou teneur en fines	Valeurs moyennes de certaines caractéristiques géotechniques		
			$I_{CBR}$ à 95%OPM à 4 jours d'immersion	Densité sèche maximale à l'OPM	Teneur en eau optimale OPM
G1	5 - 15	5 - 15	30 à 80	2,10 à 2,30	5 à 8%
G2	15 - 25	15 - 25	20 à 50	2,0 à 2,25	9 à 10%
G3	25 - 35	25 - 35	15 à 40	1,90 à 2,20	8 à 12%

Selon les systèmes internationaux de classification, les graveleux correspondent à des graves argileuses GA ou à des graves mal graduées Gm (classification LCPC des sols) ou encore à des sols A-2-6 ou A-2-7 (classification HRB) à moins que la plasticité et la

proportion des fines ne soient très élevées, auquel cas ils peuvent correspondre, selon la classification américaine, à des sols A-7-6.

La dimension maximale des graves se situe le plus souvent entre 20 mm et 40 mm et la proportion d'éléments de dimension supérieure à 2 mm est généralement supérieure à 50 %.

Il est assez rare de trouver dans un même gisement une seule catégorie de graveleux latéritiques et l'on a le plus souvent affaire à des mélanges de type G1-G2 ou G2-G3.

La qualité géotechnique des graveleux est souvent liée aux données géomorphologiques. Le pourcentage de fines (passant à 0,08 mm) et l'indice de plasticité diminuent, d'une manière générale, quand on passe :

- d'une roche mère schisteuse à une roche mère granitique ;
- pour une roche mère grenue, d'un granite à grain fin à un granite à gros grain (migmatite) ;
- d'un plateau ou d'un bas-fond à un versant long et faiblement incliné ;
- d'une région forestière à une région de savane arbustive.

#### ***d. Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière***

Lors des journées africaines de Géotechnique tenues du 3 au 7 octobre 1988 à Yamoussoukro, il a été suggéré de limiter l'usage du mot latérite à son emploi comme adjectif dans des expressions sans ambiguïté comme :

- graveleux latéritiques,
- argiles latéritiques,
- carapace ou cuirasse latéritique.

Les graveleux latéritiques sont les plus utilisés en techniques routières. De nombreux pays disposent de normes ou plus simplement de règles habituelles pour leur utilisation tant pour les routes revêtues que pour les routes en terre. Au Brésil, par exemple, les graveleux latéritiques utilisés en couche de fondation doivent avoir un indice de plasticité inférieur à 15, une limite de liquidité inférieure à 40, une teneur en fines comprise entre 5 et 30%, un indice portant CBR supérieur à 60 ou 80, un indice Los Angeles (sur la fraction

supérieure à 2mm) inférieur ou égal à 65. Deux fuseaux granulométriques sont donnés en fonction du trafic. L'essieu légal a une charge de 8,2 t.

Au début des années 1960, les graveleux latéritiques de Côte d'Ivoire étaient classés en trois catégories en fonction de leur indice de plasticité et de leur teneur en fines :

- graveleux G1 : indice de plasticité inférieur à 12 et teneur en fines inférieure à 15%,
- graveleux G2 : indice de plasticité inférieur à 20 et teneur en fines inférieure à 20%,
- graveleux G3 : indice de plasticité supérieur à 20 et teneur en fines supérieure à 20%.

Les graveleux de classe G1 et G2 sont utilisés en couche de fondation ou de base, avec ou sans traitement, en fonction des résultats des essais mécaniques. Les graveleux peuvent être utilisés en couche de forme uniquement.

Cette première classification a été par la suite modifiée et complétée par des critères de portance CBR et des indications de densité sèche. Elle fut actualisée à la lumière de l'expérience acquise par le Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP) d'Abidjan de 1970 à 1977 (Tableau 3.3).

Les règles diffèrent selon les pays et les auteurs car elles découlent de leur propre expérience. Par exemple, en Côte d'Ivoire, il a été préconisé pour l'entretien des routes en terre de retenir les indices de plasticité suivants pour les matériaux constituant la couche de roulement :

$$14 \leq I_p \leq 22 \quad \text{en zone forestière,}$$

$$18 \leq I_p \leq 25 \quad \text{en zone de savane.}$$

Le manuel sur la conception des routes dans les zones tropicales et désertiques (BCEOM-CEBTP, 1975) indique les limites admises dans certains pays africains (Tableaux 3.4 et 3.3).

Tableau 3.4. Règles d'utilisation des latérites pour les routes non revêtues dans différents pays d'Afrique

	Côte d'Ivoire	Sénégal	Cameroun	Congo	RCA	Gabon	Niger
Tamisat à 2mm (%)	30 à 65	60	27 à 65	< 50	40 à 70	< 50	35 à 60
Tamisat à 80 µm (%)	16 à 30	20 à 35	10 à 28	< 40	20 à 40	< 40	< 25
Indice de plasticité	15 à 28	10 à 25	20 à 35	< 40	10 à 25	< 40	5 à 16
Groupe	A2-6 / A2-7			A2-6 / A7-5	A2-6 / A2-7	A2-6 / A7-5	
Indice de groupe	2			2		2	

Tableau 3.5. Règles d'utilisation des latérites pour les routes revêtues dans différents pays d'Afrique

		Côte d'Ivoire	Mozambique	Afrique du Sud	Rhodésie du sud	Rhodésie du nord
Fondation	Indice de plasticité	20	12		18	25
	Indice portant CBR	30	45			
	Pourcentage de fines	20	50			
Couche de base	Indice de plasticité	12		8	6	10
	Indice portant CBR	60 (à 95 % OPM)	67	75		
	Pourcentage de fines	15 %	25 %			20 %
	Limite de liquidité			30		
	Retrait linéaire			4 %		
	Expansion maximale à $w_{OPM}$			0,5 %		

Le manuel de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux (CEBTP, 1972), recommande les caractéristiques résumées dans le tableau 3.6 et accorde au paramètre  $I_{CBR}$  un poids considérable. La valeur de l'indice CBR imposée correspond à la valeur obtenue après quatre jours d'imbibition sur éprouvettes compactées à la teneur en eau et à la densité obtenue à l'optimum Proctor modifié.

S'il paraît normal, dans certains pays à pluviométrie élevée, de vérifier la portance d'un matériau après imbibition, il paraîtrait pessimiste de le faire dans des pays au climat moins humide. Cela rend difficile la mise en place de procédures uniformes et universelles. Il apparaît aujourd'hui compliqué d'imaginer une règle universelle pour l'emploi des graveleux latéritiques eu égard aux variations du climat dans les zones couvertes par les latérites. Chaque pays a établi sa propre norme, fondée sur l'expérience internationale et sa propre expérience, et adaptée à son environnement au sens le plus large : géographie, climat, parc routier, politique routière, etc.

La publication d'une recommandation pour l'utilisation en corps de chaussée de graveleux latéritiques naturels par le Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP) de Côte d'Ivoire (LBTP Côte d'Ivoire, 1977), va dans ce sens. Le tableau 3.6 résume les principales recommandations relatives à l'emploi de ces matériaux en fonction du trafic, en relation avec le catalogue des structures routières ivoirien.

Tableau 3.6. Recommandations relatives à la qualité des graveaux latéritiques naturels

Importance du critère	Caractéristiques	Couches concernées	Classe de trafic				
			T1	T2	T3	T4	T5
Critère d'acceptabilité	Indice portant CBR	Fondation Base	≥ 25 ≥ 60	≥ 30 ≥ 80	≥ 30 ≥ 80	≥ 30-35 -	≥ 30-35 -
Critères sélectifs ou indices de qualité	Dureté Los Angeles des nodules	Fondation Base	≤ 60 ≤ 45	≤ 60 ≤ 45	≤ 55 ≤ 40	≤ 50 -	≤ 50 -
	Teneur en fines (<0,08 mm)	Fondation Base	≤ 25 ≤ 15	≤ 25 ≤ 15	≤ 20 ≤ 15	≤ 20 -	≤ 20 -
	Indice de plasticité	Fondation Base	≤ 25 ≤ 20	≤ 25 ≤ 15	≤ 20 ≤ 15	≤ 20 -	≤ 20 -
	Gonflement linéaire	Fondation Base	1 à 2 % au maximum 0,1 à 1 % au maximum				
	Densité sèche maximale OPM	Fondation Base	> 1,90 > 2,00				

### 3.4. Conclusion

Les règles d'application des graveaux latéritiques sont actuellement définies de façon diverse selon les pays, ce qui peut s'expliquer par les différences dans les conditions climatiques et l'expérience accumulée localement sur l'emploi de ces matériaux en construction routière. La Côte d'Ivoire dispose déjà de recommandations détaillées, qui nécessitent sans doute des modifications mais restent hors de portée de notre étude, consacrée à l'analyse des variations géographiques des propriétés des graveaux latéritiques

Notre étude des caractéristiques géotechniques des graveaux latéritiques de la région de l'Agnéby s'appuiera sur les paramètres classiquement utilisés dans les recommandations ivoiriennes, à savoir la granulométrie, les limites d'Atterberg, les caractéristiques de compacité à l'optimum Proctor modifié et l'indice portant CBR.

## Chapitre 4

# ÉTUDE DES LATÉRITES DE LA RÉGION DE L'AGNÉBY

### 4.1. Introduction

Les graveleux latéritiques sont couramment utilisés pour la construction des routes dans la région de l'Agnéby et de nombreuses données ont été accumulées dans les dossiers d'étude de ces projets. Nous avons décidé d'exploiter ce fonds documentaire pour en extraire les caractéristiques des latérites étudiées en de nombreux points de la région, analyser leur variabilité et la relier si possible à leur localisation ou à des facteurs plus généraux tels que la composition minéralogique, le lieu et le mode de formation des latérites de chaque site. Ce travail a été permis par la collaboration des organismes qui détiennent les archives de ces projets, le Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP) d'Abidjan et le Bureau National d'Études Techniques et de Développement (BNETD).

Nous allons successivement décrire les conditions dans lesquelles cette étude a été réalisée, puis les données rassemblées, classées par itinéraires et leur analyse. L'application de l'analyse factorielle à cet ensemble de données est l'objet du chapitre 5.

### 4.2. Objectifs et méthodes

L'étude rapportée ici a pour objectif d'étudier les propriétés des graveleux latéritiques de la région de l'Agnéby à partir des résultats des essais d'identification géotechnique des emprunts de matériaux naturels pour la construction de routes. Ces données ont été extraites des dossiers de projets routiers puis rassemblées et mises en forme et enfin analysées par projet et globalement afin d'en tirer des informations utiles pour les futurs projets routiers en Côte d'Ivoire et de définir une méthodologie pour l'extension de cette analyse à l'ensemble du territoire ivoirien, voire aux pays voisins.

En fonction des dossiers accessibles et des données qu'ils contenaient, dix itinéraires routiers de la région de l'Agnéby ont été retenus. Ces itinéraires sont représentés sur la carte de la figure 4.1.

- A = 40 km
- B = 64 km
- C = 54 km
- D = 63 km
- E = 35 km
- F = 44 km
- G = 14 km
- H = 24 km
- I = 39 km
- J = 41 km



Figure 4.1. Carte des dix itinéraires étudiés dans la région de l’Agnéby

Pour des raisons de commodité, les itinéraires ont été désignés par des lettres, selon la correspondance suivante :

- Itinéraire A : Adonkoi-Abié
- Itinéraire B : Adzopé-Bonaouin
- Itinéraire C : Azopé-M’Basso Attié
- Itinéraire D : Agboville-Rubino-Cécchi
- Itinéraire E : Agboville-Oress Krobou
- Itinéraire F : Agou-Azaguié
- Itinéraire G : Assikoi-Lobo Opé
- Itinéraire H : Grand Morié-Agou
- Itinéraire I : Loaguié-Affery
- Itinéraire J : Offoumpo-Cécchi

Sur chaque itinéraire, des prélèvements en nombre variable ont été effectués dans les sols latéritiques afin de sélectionner les matériaux utilisables pour le chantier. Chacun de

ces prélèvements a été identifié par la lettre de l'itinéraire et un numéro d'ordre. La position des prélèvements le long de l'itinéraire est indiquée en annexe 2, avec l'ensemble des résultats relatifs à chaque prélèvement.

Chaque prélèvement a fait l'objet de différents essais, conformément aux procédures d'études géotechniques en vigueur en Côte d'Ivoire :

- analyse granulométrique,
- détermination des limites de plasticité et de liquidité,
- essai Proctor modifié,
- essai CBR.

Pour chaque itinéraire, nous avons d'abord analysé les variations (valeurs minimale et maximale, valeur moyenne) de chaque paramètre mesuré :

- pourcentage de fines ( $C_{80\mu m}$ ),
- limite de liquidité  $w_L$ ,
- limite de plasticité  $w_P$ ,
- indice de plasticité  $I_P$ ,
- densité sèche à l'optimum Proctor modifié  $G_{OPM}$ ,
- teneur en eau à l'optimum Proctor modifié  $w_{OPM}$ ,
- indice CBR ( $I_{CBR}$ ).

Puis nous avons analysé les relations entre ces paramètres :

- indice de plasticité et pourcentage de fines,
- indice de plasticité et limite de liquidité,
- indice CBR et indice de plasticité,
- indice CBR et pourcentages de fines,
- indice CBR et produit de l'indice de plasticité par le pourcentage de fines,
- indice CBR et densité sèche à l'optimum Proctor modifié,
- densité sèche à l'optimum Proctor modifié (OPM) et teneur en eau à l'OPM.

Pour chaque itinéraire, nous avons aussi établi des fuseaux granulométriques en utilisant les différents prélèvements effectués. L'ensemble de ces fuseaux nous a permis de tracer le fuseau granulométrique de la région de l'Agnéby (Côte d'Ivoire).

Ces différents paramètres et fuseaux ont été analysés et comparés dans ce chapitre aux plages de référence utilisées en Côte d'Ivoire pour la construction de chaussées neuves. Le chapitre 5 présente l'analyse de ces données par la méthode d'analyse factorielle.

### 4.3. Analyse des propriétés des latérites des itinéraires étudiés

#### 4.3.1. Introduction

Nous avons commencé par analyser les données disponibles en procédant par itinéraire. L'ensemble des données est ensuite étudié de façon globale (section 4.3.3).

#### 4.3.2. Résultats par itinéraire

##### a. Itinéraire A (Adonkoi-Abié)

La partie étudiée de l'itinéraire Adonkoi – Abié est longue de 6,15 kilomètres. 21 prélèvements ont été analysés (A1 à A21). Les résultats des essais varient dans les intervalles suivants :

	Caractéristiques géotechniques							
	Analyse granulométrique		Essai Proctor modifié		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
	$C_{80\mu m}$ (%)	$C_{80\mu m} * I_P$	$G_{dOPM}$	$W_{OPM}$ (%)	$I_{CBR}$	$W_L$	$W_P$	$I_P$
Valeur maximale	41	1 353	2,32	13,90	49	62	29	35
Valeur minimale	12	252	1,95	6,30	11	33	15	18
Valeur moyenne	21	499	2,13	8,72	31	48	24	24
Écart type	7	288	0	2	11	7	3	5
Intervalle de variation	12-41	252-1353	1,95-2,32	6,3-13,9	11-49	33-62	15-29	18-35

Les relations entre les différents paramètres géotechniques établies pour l'itinéraire A sont représentées sur les figures 4.2 à 4.9.

Par rapport aux limites d'utilisation fixées dans les recommandations ivoiriennes de 1977, les sols latéritiques de l'itinéraire A (Adonkoi-Abié) sont juste compatibles avec un emploi en couche de fondation, mais pas en couche de base de structure de chaussée, comme on le voit dans le tableau 4.1.

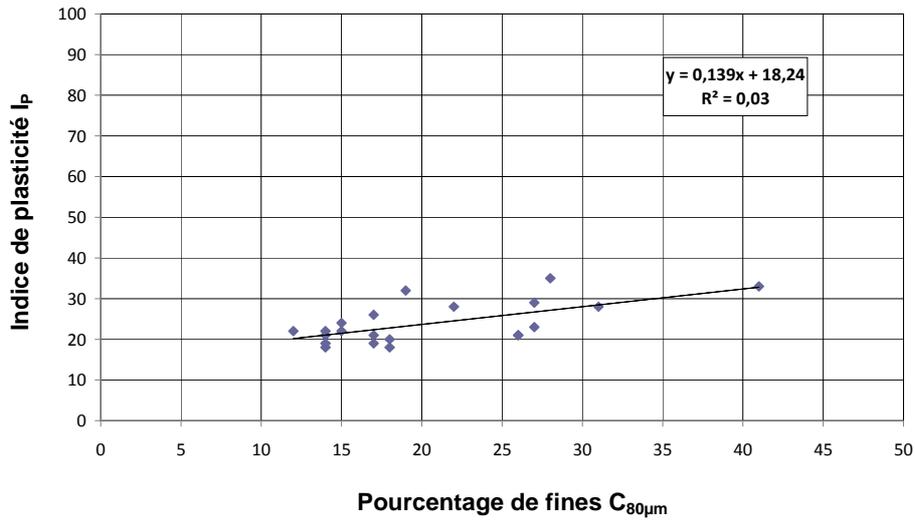


Figure 4.2. Relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage de fines (Itinéraire A)

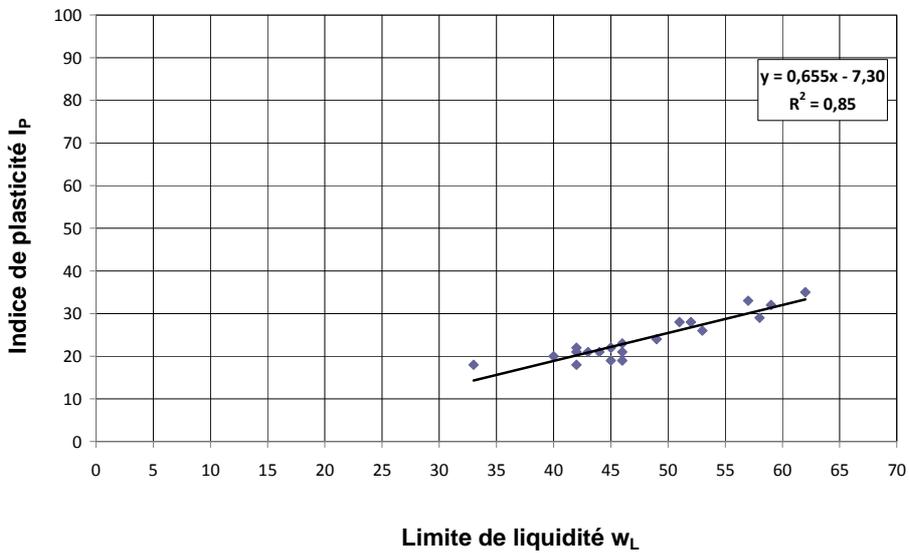


Figure 4.3. Relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité (Itinéraire A)

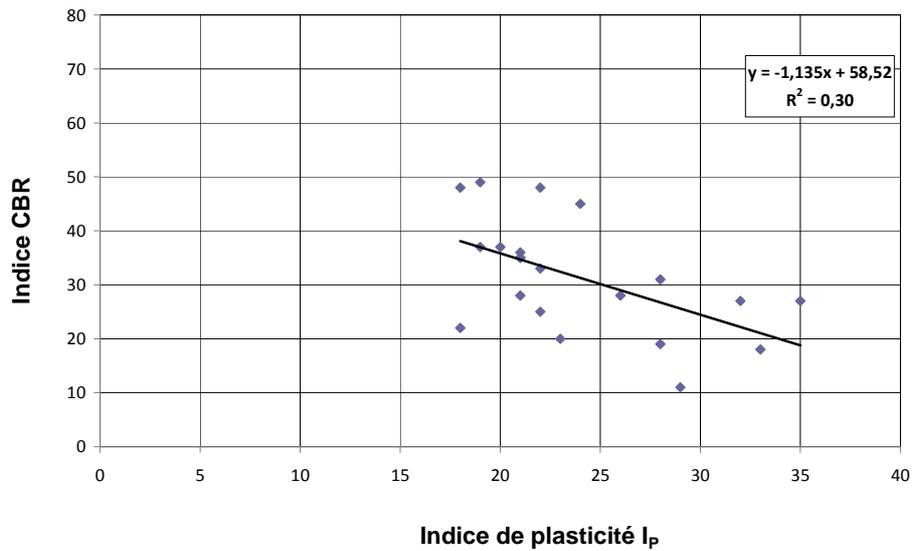


Figure 4.4. Relation entre l'indice CBR et l'indice de plasticité (Itinéraire A)

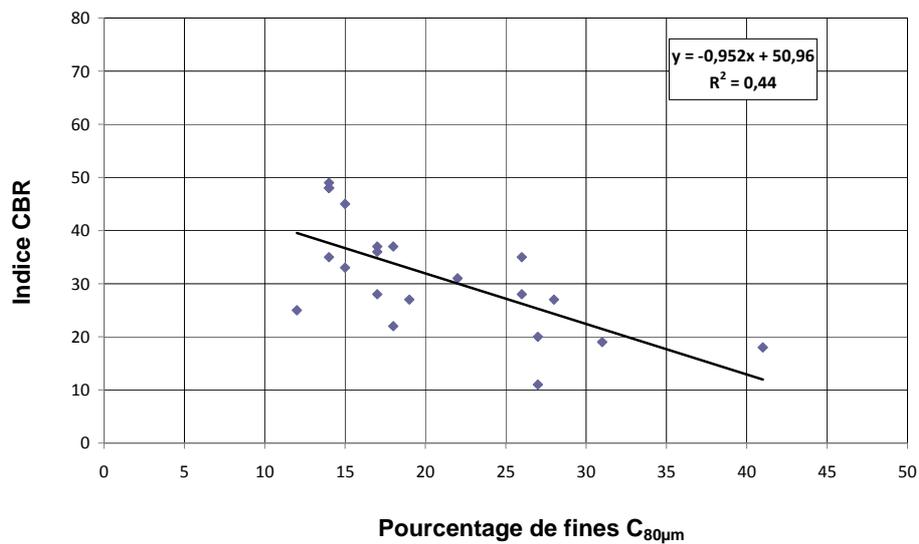


Figure 4.5. Relation entre l'indice CBR et le pourcentage de fines (Itinéraire A)

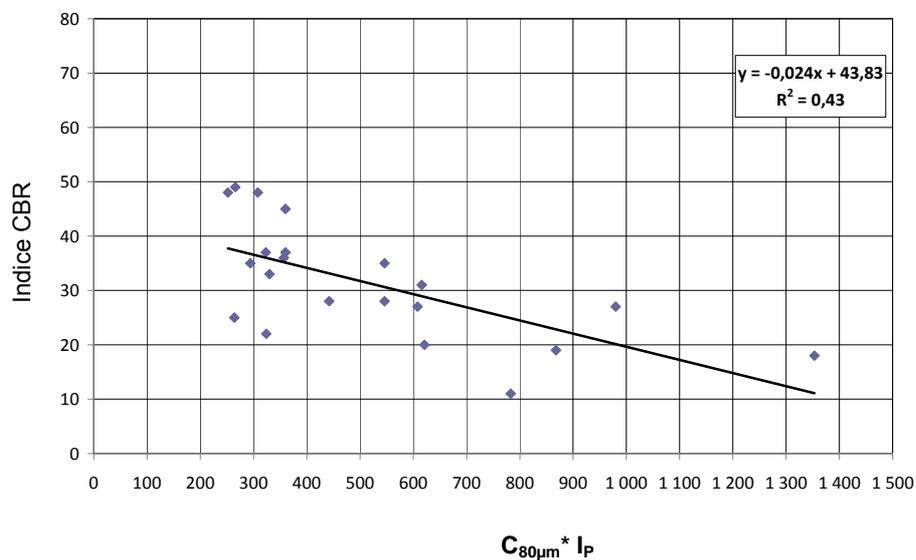


Figure 4.6. Relation entre l'indice CBR et le produit  $C_{80\mu m} \times I_p$  (Itinéraire A)

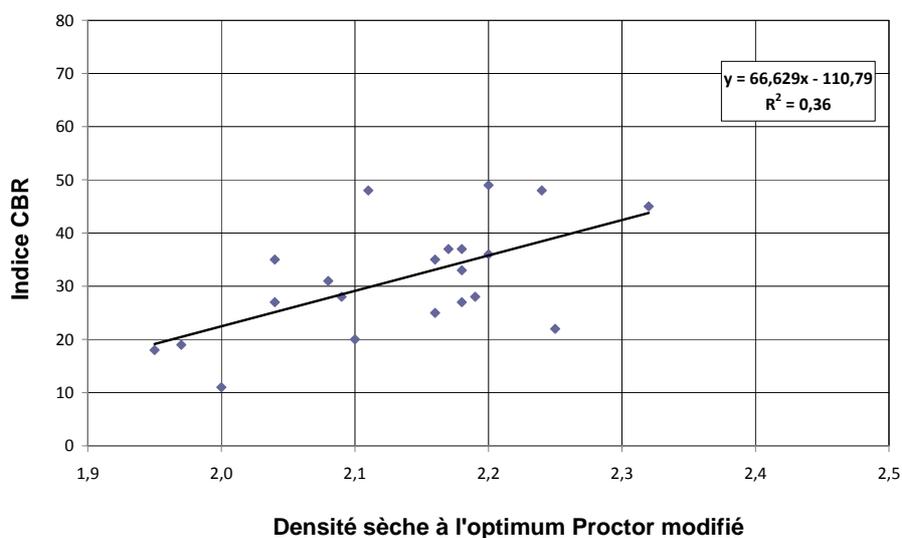


Figure 4.7. Relation entre l'indice CBR et la densité sèche à l'optimum Proctor modifié (Itinéraire A)

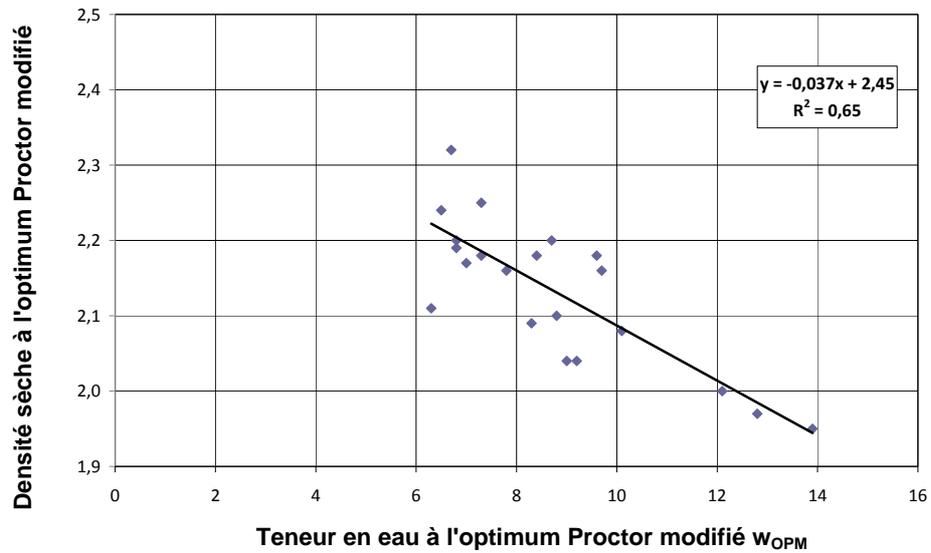


Figure 4.8. Relation entre la densité sèche et la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié (Itinéraire A)

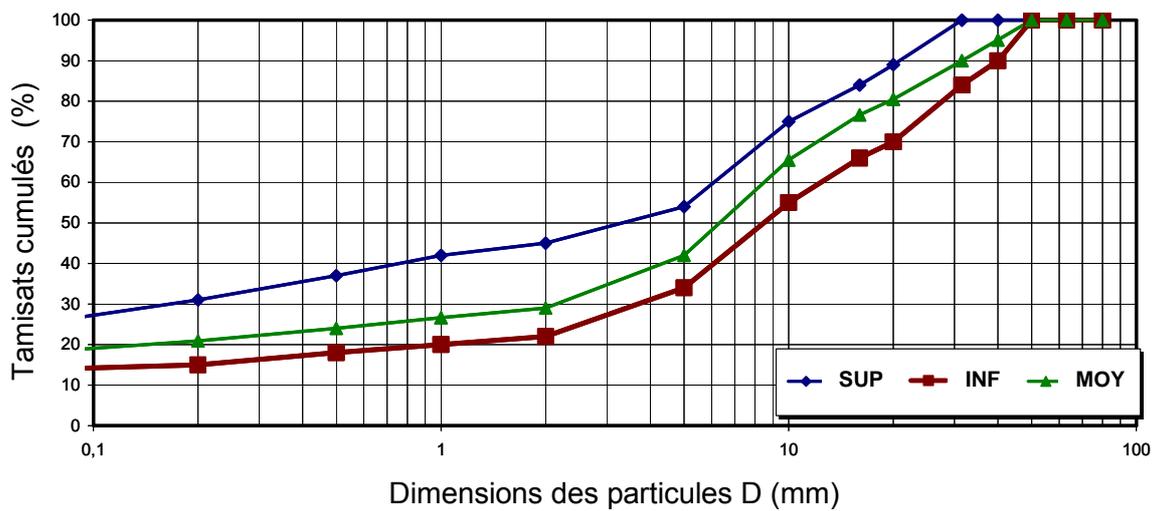


Figure 4.9. Fuseau granulométrique des échantillons prélevés sur l'itinéraire A

Tableau 4.1. Comparaison des sols latéritiques de l'itinéraire A avec les limites des recommandations ivoiriennes pour les couches de chaussée (1977)

Valeurs mesurées et seuils	$I_p$	$I_{CBR,95\%OPM}$	$C_{80\mu m}$ (%)
Itinéraire A (moyenne)	24	31	20
Couche de fondation	< 20	> 30	< 20
Couche de base	< 12	> 60	< 15

b. Itinéraire B (Adzopé-Bonaouin)

L'itinéraire étudié entre Adzopé – Bonaouin est long de 5,15 kilomètres. 13 prélèvements ont été analysés. Les prélèvements effectués sur ce tronçon sont identifiés par la lettre « B » et vont de B1 à B13. Les résultats des essais varient dans les intervalles suivants :

	Caractéristiques géotechniques							
	Analyse granulométrique		Essai Proctor modifié		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
	$C_{80\mu m}$ (%)	$C_{80\mu m} * I_P$	$G_{dOPM}$	$W_{OPM}$ (%)	$I_{CBR}$	$W_L$	$W_P$	$I_P$
Valeur maximale	41	1 353	2,36	13,90	36	62	29	35
Valeur minimale	12	264	1,95	6,60	11	33	15	18
Valeur moyenne	24	640	2,16	9,57	25	48	23	25
Écart type	8	307	0	2	7	8	4	5
Intervalle de variation	12-41	264-1353	1,95-2,36	6,6-13,9	11-36	33-62	15-29	18-35

Les relations entre les différents paramètres géotechniques établies pour l'itinéraire B sont représentées sur les figures 4.11 à 4.17.

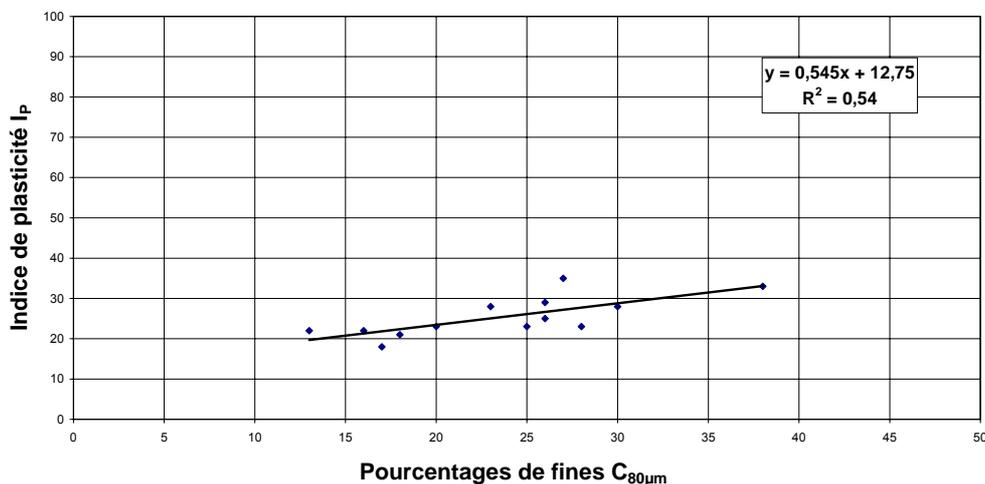


Figure 4.10. Relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage de fines (Itinéraire B)

Par rapport aux limites d'utilisation fixées dans les recommandations ivoiriennes de 1977, les sols latéritiques de l'itinéraire B (Adzopé-Bonaouin) ne vérifient pas les conditions d'emploi en couche de fondation ni en couche de base de structure de chaussée, comme on le voit dans le tableau 4.2. Ils peuvent seulement être utilisés en remblai.

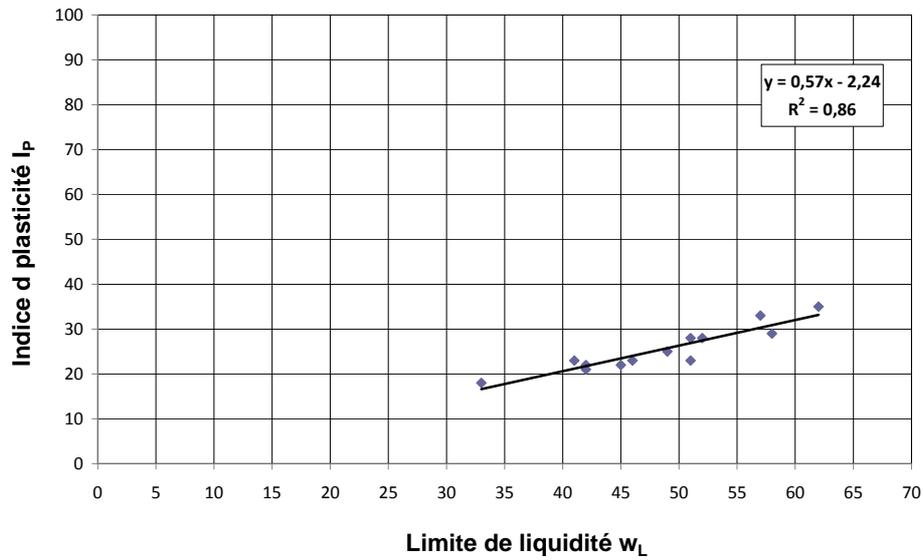


Figure 4.11. Relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité (Itinéraire B)

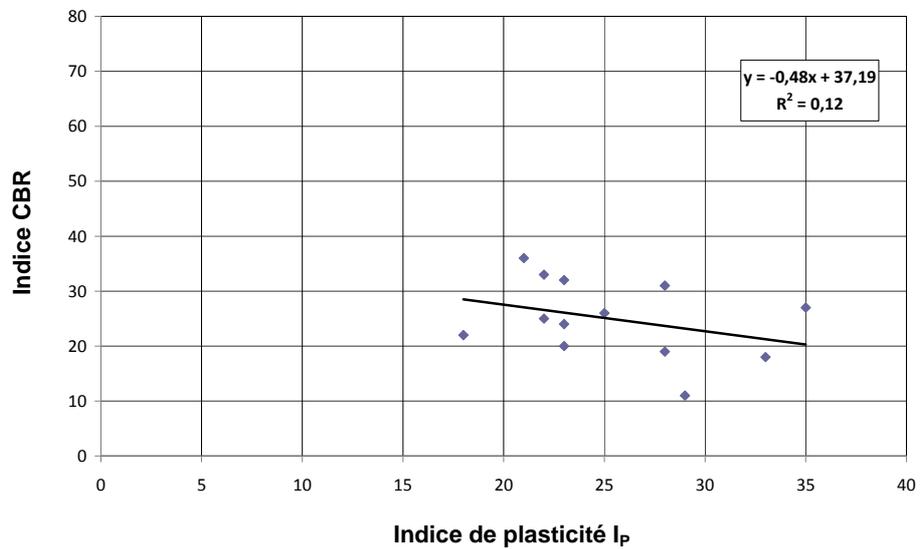


Figure 4.12. Relation entre l'indice CBR et l'indice de plasticité (Itinéraire B)

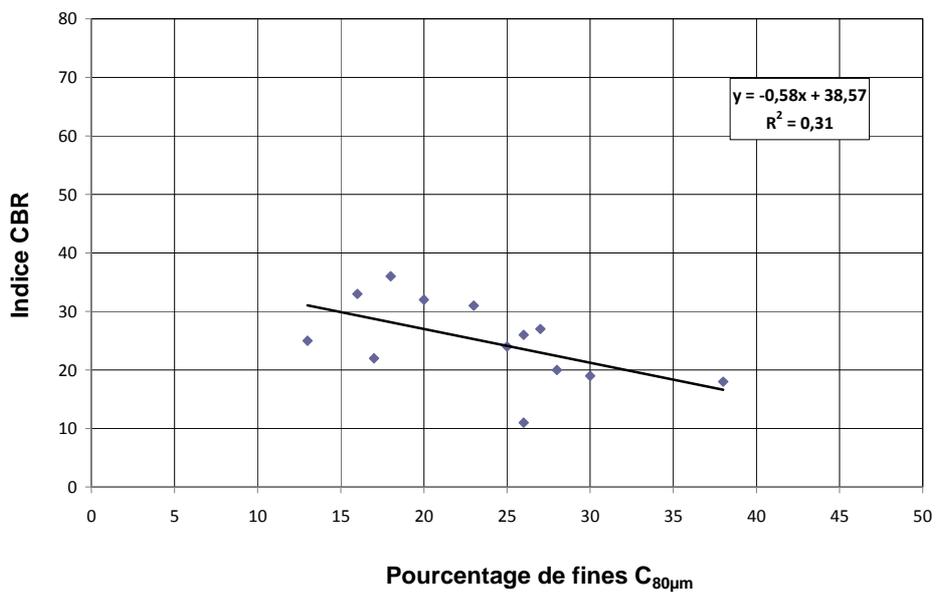


Figure 4.13. Relation entre l'indice CBR et le pourcentage de fines (Itinéraire B)

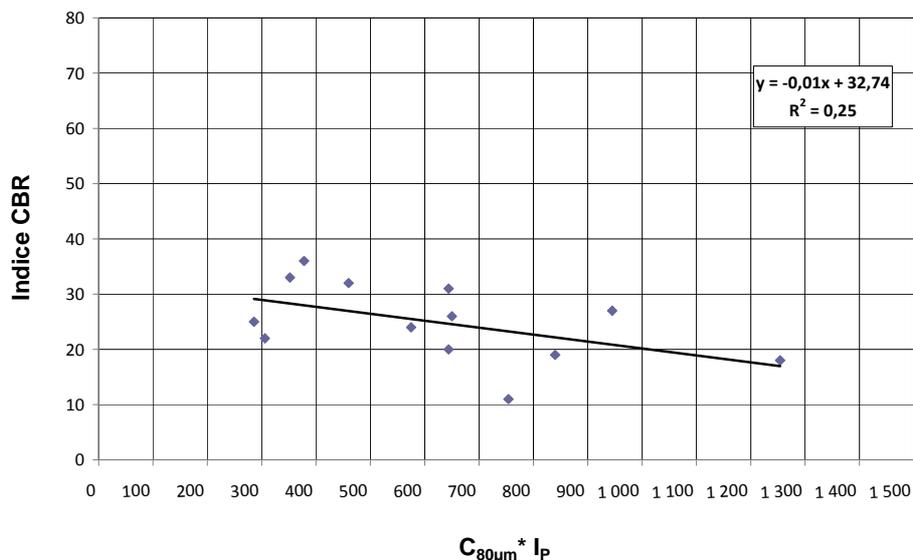


Figure 4.14. Relation entre l'indice CBR et le produit  $C_{80\mu m} \times I_P$  (Itinéraire B)

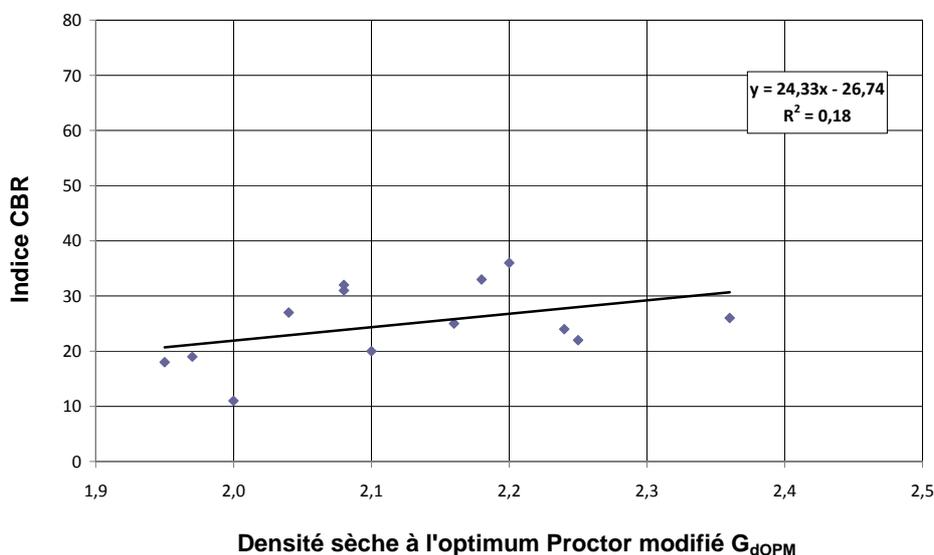


Figure 4.15. Relation entre l'indice CBR et la densité sèche à l'optimum Proctor modifié (Itinéraire B)

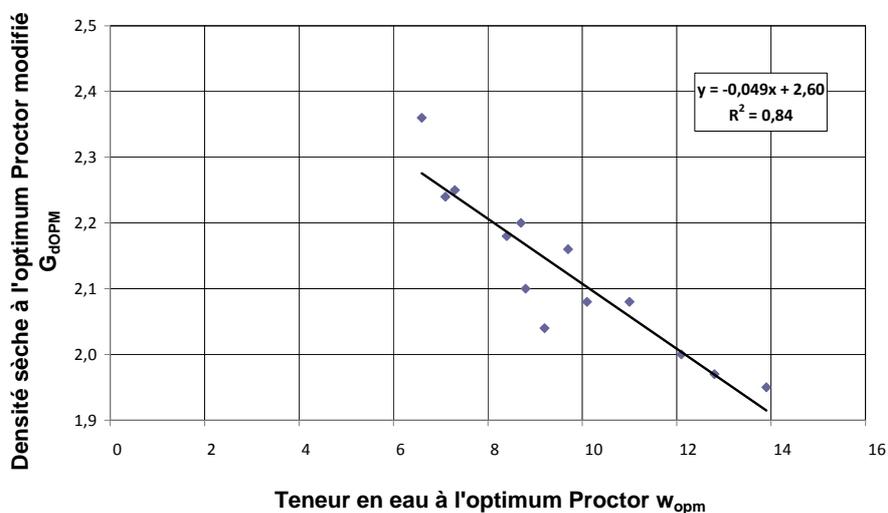


Figure 4.16. Relation entre la densité sèche et la teneur en eau à l'OPM (Itinéraire B)

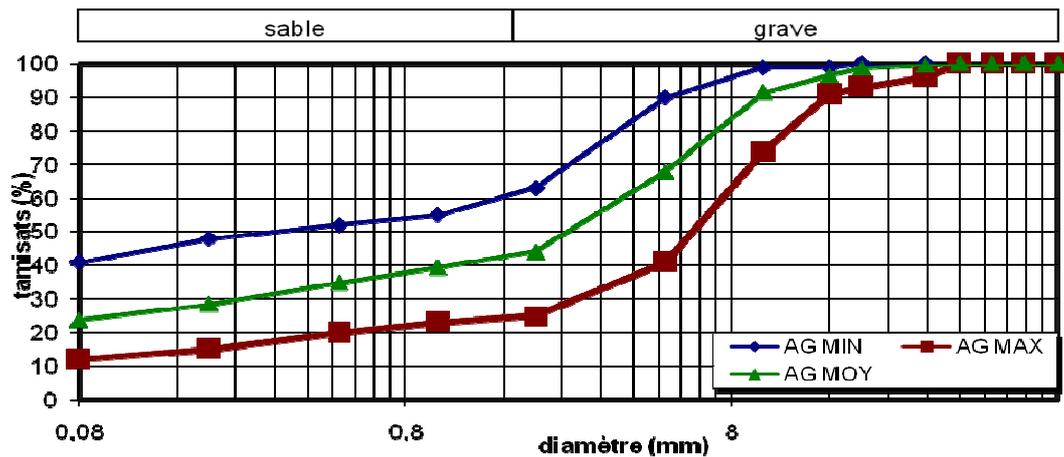


Figure 4.17. Fuseau granulométrique des échantillons prélevés sur l'itinéraire B

Tableau 4.2. Comparaison des sols latéritiques de l'itinéraire B avec les limites des recommandations ivoiriennes pour les couches de chaussée (1977)

Valeurs mesurées et seuils	$I_P$	$I_{CBR,95\%OPM}$	$C_{80\mu m}$ (%)
Itinéraire B (moyenne)	25	25	24
Couche de fondation	< 20	> 30	< 20
Couche de base	< 12	> 60	< 15

c. Itinéraire C (Azopé-M'Basso Attié)

L'itinéraire Adzopé-M'Basso Attié est long de 49 kilomètres. 15 prélèvements ont été analysés. Les prélèvements effectués sur ce tronçon sont identifiés par la lettre « C » et vont de C1 à C15. Les résultats varient dans les intervalles suivants :

	Caractéristiques géotechniques							
	Analyse granulométrique		Essai Proctor modifié		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
	$C_{80\mu m}$ (%)	$C_{80\mu m} * I_P$	$G_{dOPM}$	$W_{OPM}$ (%)	$I_{CBR}$	$W_L$	$W_P$	$I_P$
Valeur maximale	34	884	2,40	13,80	43	54	28	28
Valeur minimale	10	180	1,96	5,20	21	28	14	14
Valeur moyenne	21	455	2,20	8,20	31	43	21	22
Écart type	8	200	0	2	8	7	4	4
Intervalle de variation	10-34	180-884	1,96-2,40	5,2-13,8	21-43	28-54	14-26	14-28

Les relations entre les différents paramètres géotechniques établies pour l'itinéraire C sont représentées sur les figures 4.18 à 4.24.

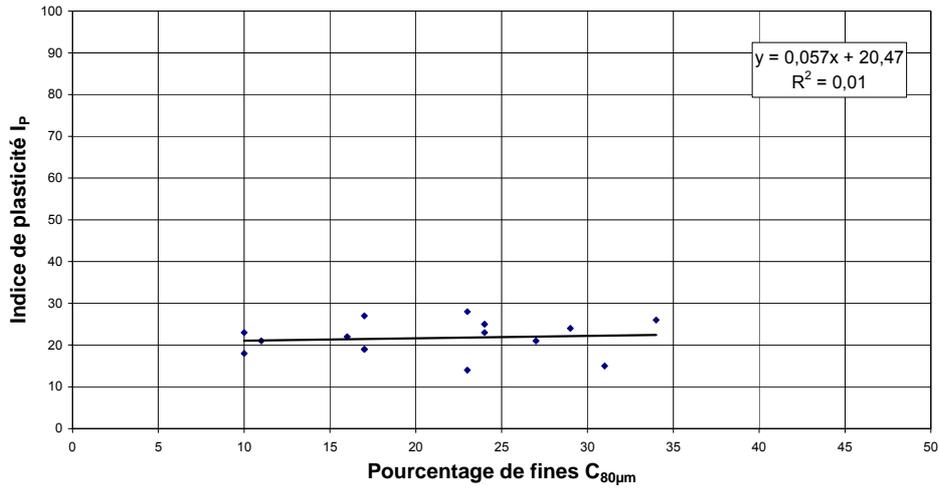


Figure 4.18. Relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage de fines (Itinéraire C)

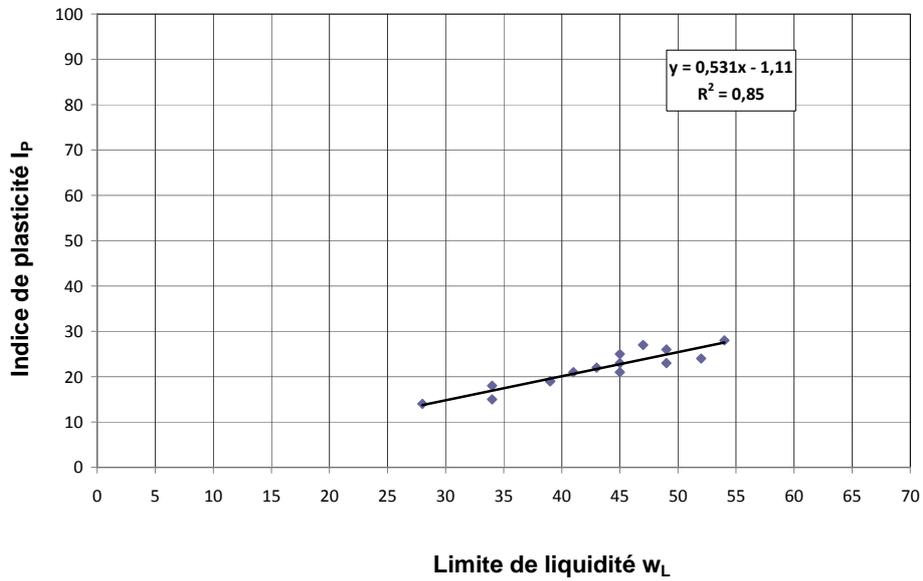


Figure 4.19. Relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité (Itinéraire C)

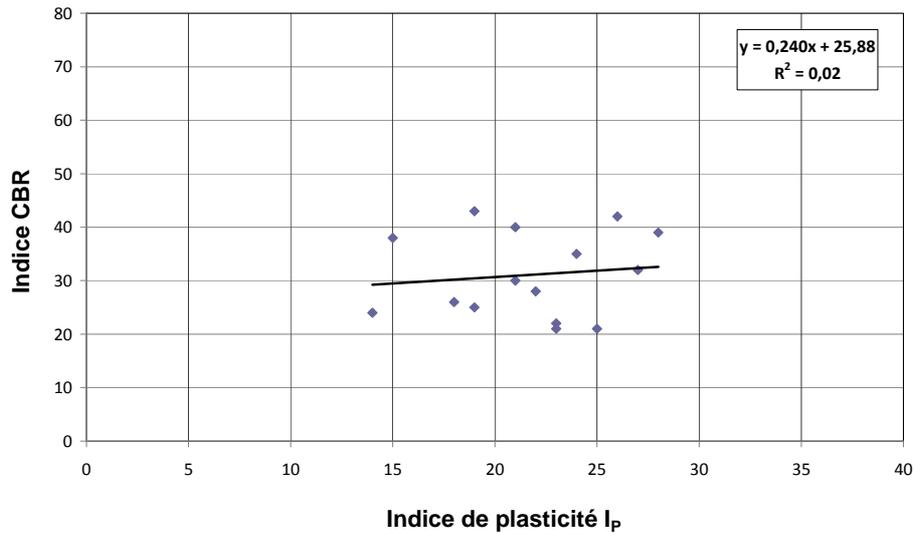


Figure 4.20. Relation entre l'indice CBR et l'indice de plasticité (Itinéraire C)

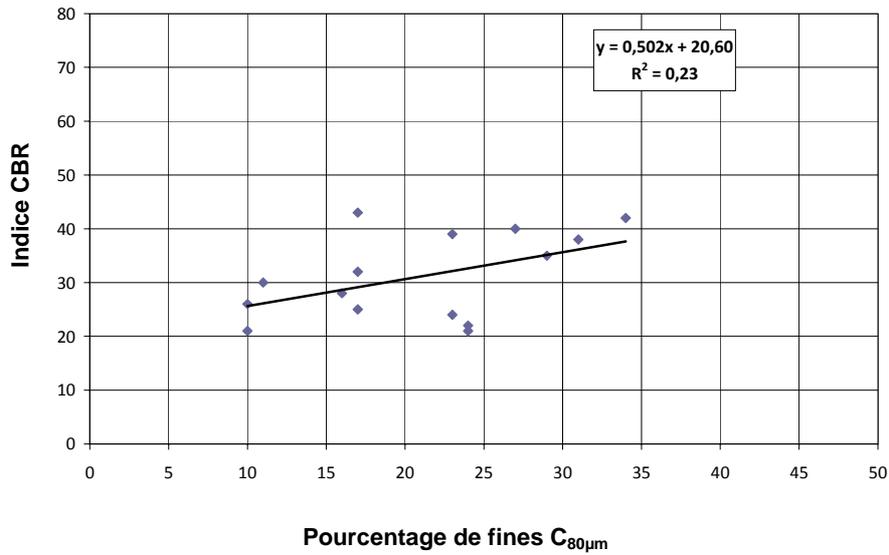


Figure 4.21. Relation entre l'indice CBR et le pourcentage de fines (Itinéraire C)

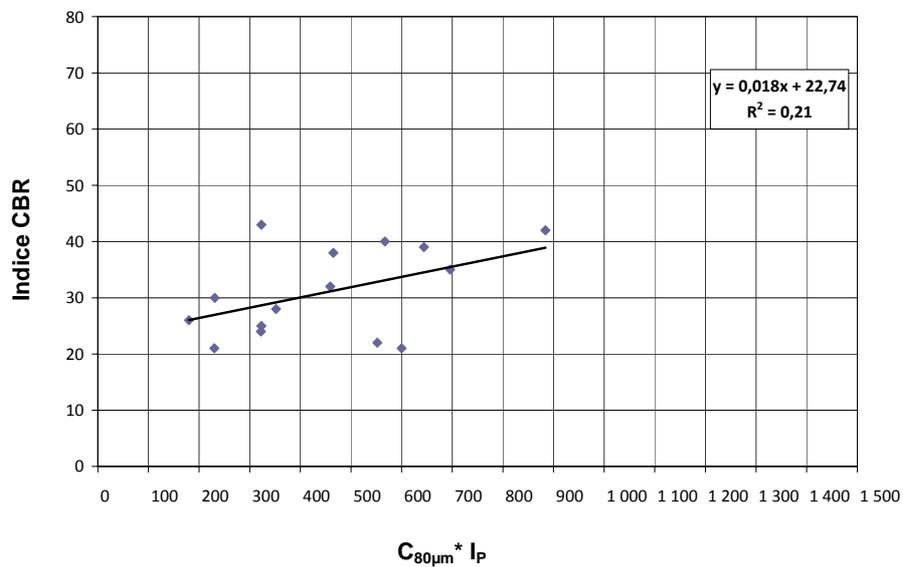
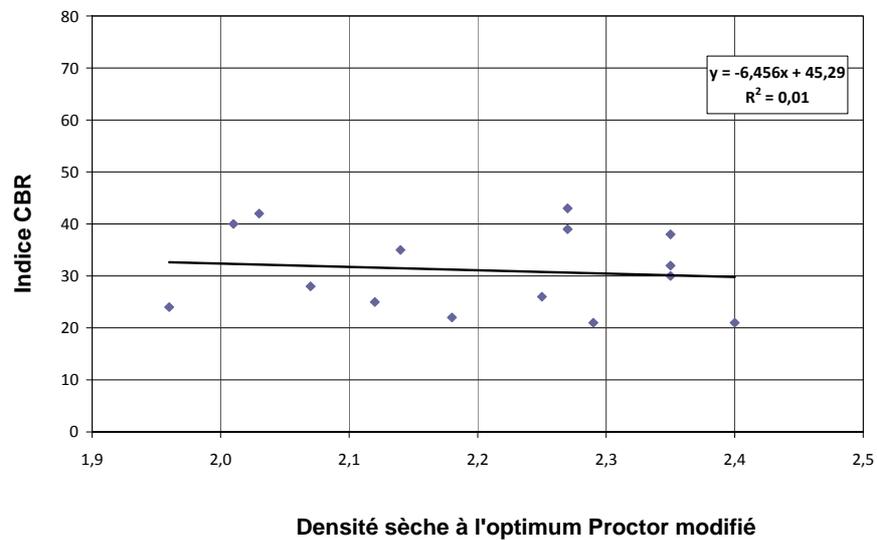


Figure 4.22. Relation entre l'indice CBR et le produit  $C_{80\mu m} \times I_p$  (Itinéraire C)



4.23. Relation entre l'indice CBR et la densité sèche à l'OPM (Itinéraire C)

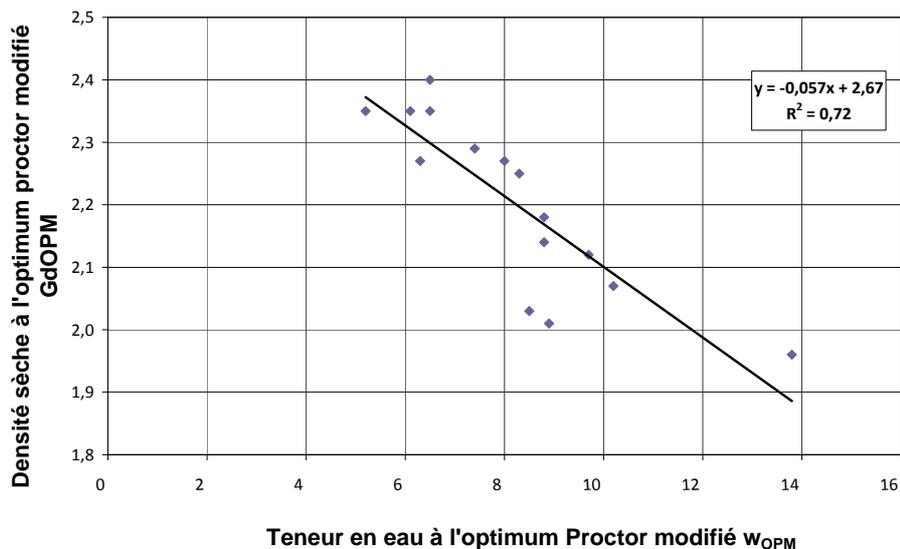


Figure 4.24. Relation entre la densité sèche et la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié (Itinéraire C)

Par rapport aux limites d'utilisation fixées dans les recommandations ivoiriennes de 1977, les sols latéritiques de l'itinéraire C (Adzopé-M'Basso Attié) ne vérifient pas les conditions d'emploi en couche de fondation ni en couche de base de structure de chaussée, comme on le voit dans le tableau 4.3. Ils peuvent seulement être utilisés en remblai.

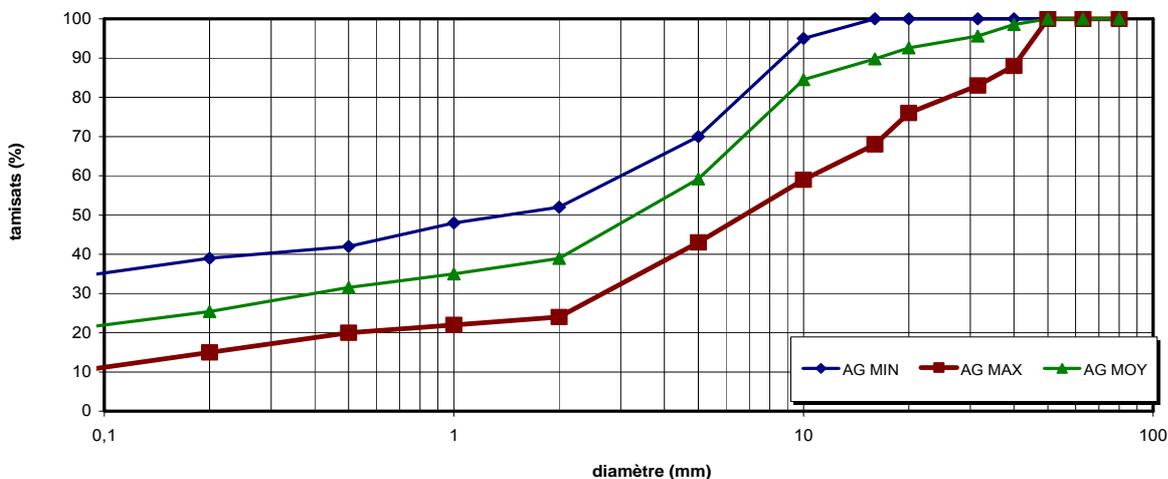


Figure 4.25. Fuseau granulométrique des échantillons prélevés sur l'itinéraire C

Tableau 4.3. Comparaison des sols latéritiques de l'itinéraire C avec les limites des recommandations ivoiriennes pour les couches de chaussée (1977)

Valeurs mesurées et seuils	$I_p$	$I_{CBR,95\%OPM}$	$C_{80\mu m}$ (%)
Itinéraire C (moyenne)	22	31	21
Couche de fondation	< 20	> 30	< 20
Couche de base	< 12	> 60	< 15

d. Itinéraire D (Agboville-Rubino-Céchi)

L'itinéraire Agboville-Rubino-Céchi est long de 44 kilomètres. 40 prélèvements ont été analysés. Les prélèvements effectués sur ce tronçon sont identifiés par la lettre « D » et vont de D1 à D40. Les résultats varient dans les intervalles suivants :

	Caractéristiques géotechniques							
	Analyse granulométrique		Essai Proctor modifié		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
	$C_{80\mu m}$ (%)	$C_{80\mu m} * I_P$	$G_{dOPM}$	$W_{OPM}$ (%)	$I_{CBR}$	$W_L$	$W_P$	$I_P$
Valeur maximale	32	624	2,29	10,60	65	54	28	28
Valeur minimale	12	195	2,05	5,80	13	28	13	14
Valeur moyenne	20	430	2,17	8,08	30	42	21	21
Écart type	7	108	0	1	10	6	3	3
Intervalle de variation	12-32	195-624	2,05-2,29	5,9-10,6	13-65	28-54	13-28	14-28

Les relations entre les différents paramètres géotechniques établies pour l'itinéraire D sont représentées sur les figures 4.25 à 4.33.

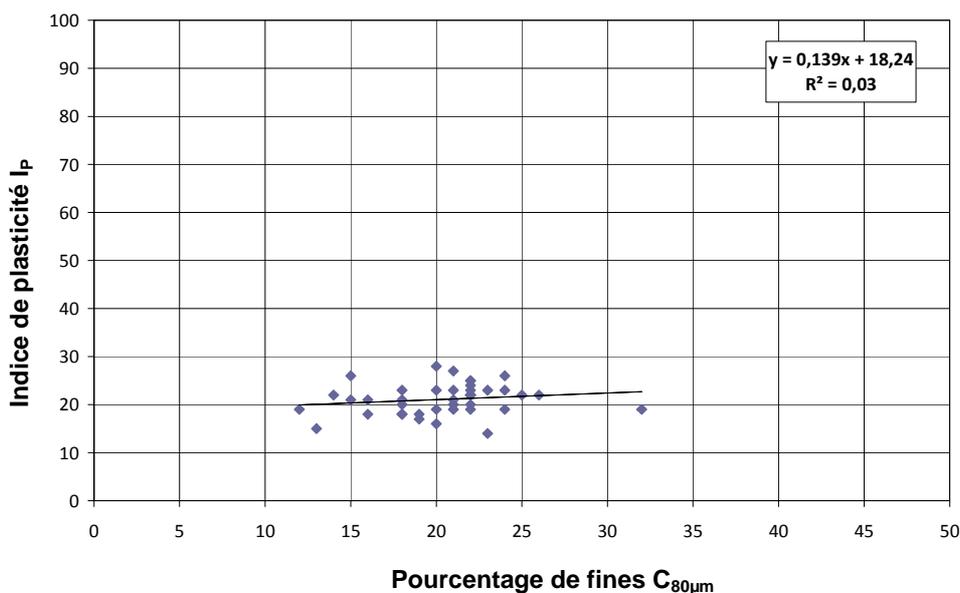


Figure 4.26. Relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage de fines (Itinéraire D)

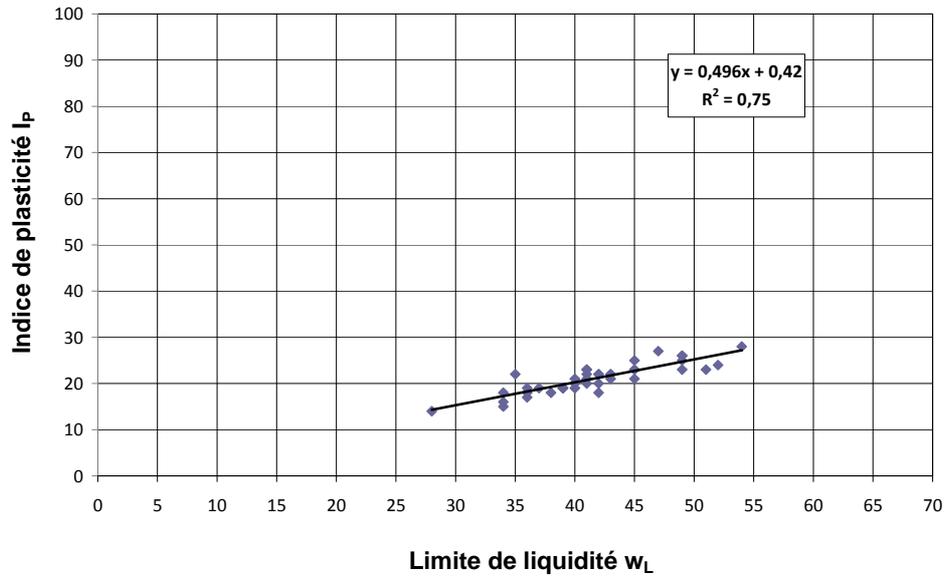


Figure 4.27. Relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité (Itinéraire D)

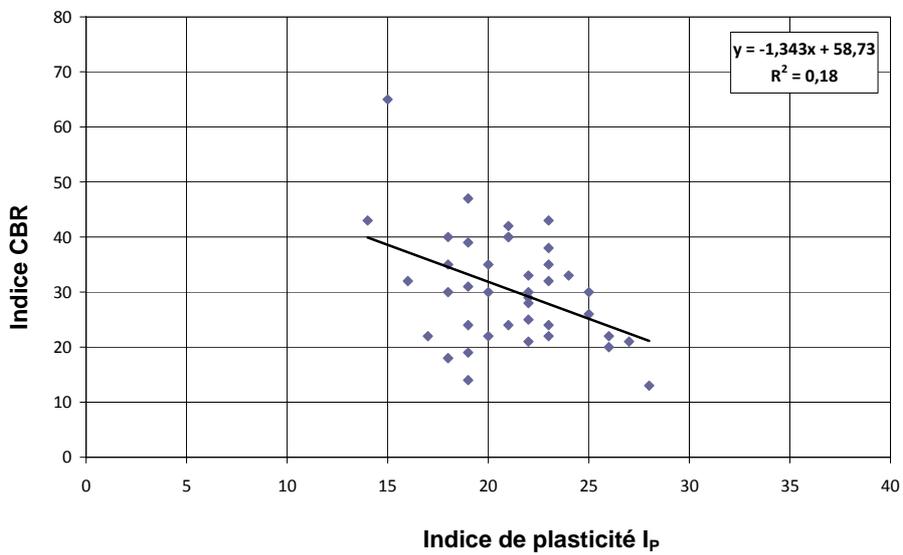


Figure 4.28. Relation entre l'indice CBR et l'indice de plasticité (Itinéraire D)

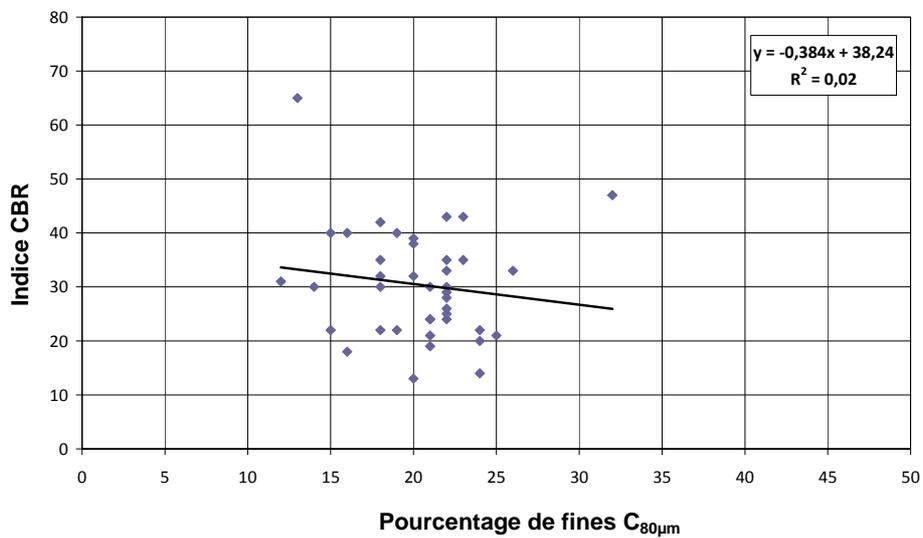


Figure 4.29. Relation entre l'indice CBR et le pourcentage de fines (Itinéraire D)

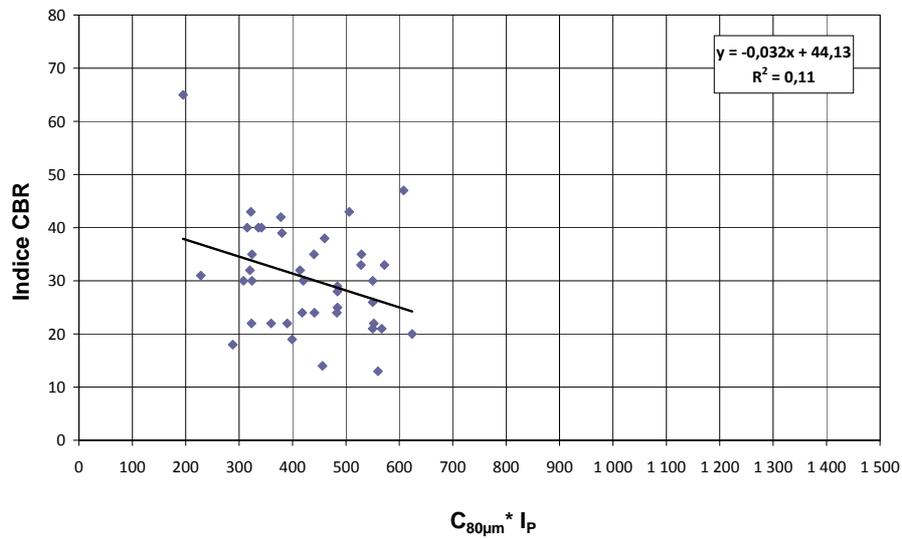
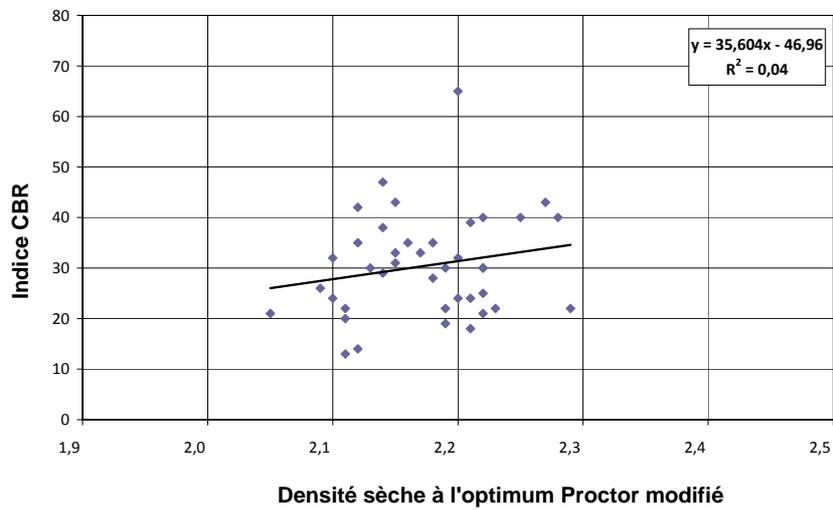


Figure 4.30. Relation entre l'indice CBR et le produit  $C_{80\mu m} \times I_p$  (Itinéraire D)



4.31. Relation entre l'indice CBR et la densité sèche à l'optimum Proctor modifié (Itinéraire D)

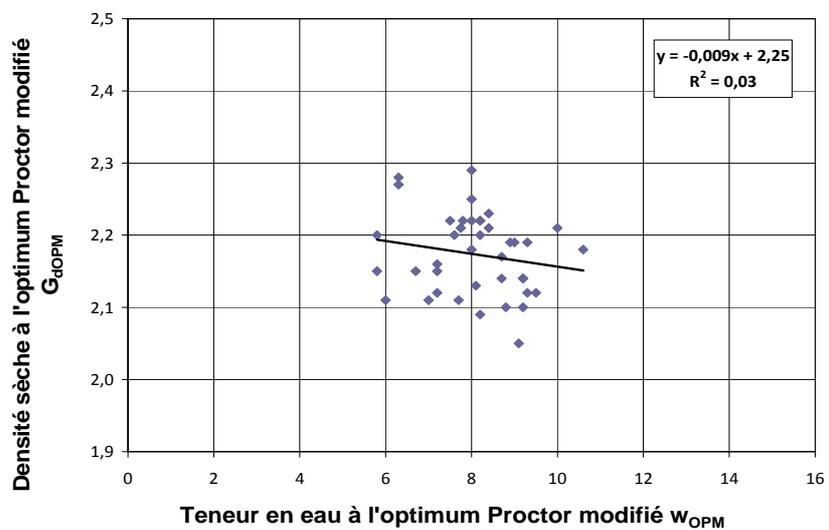


Figure 4.32. Relation entre la densité sèche et la teneur en eau à l'OPM (Itinéraire D)

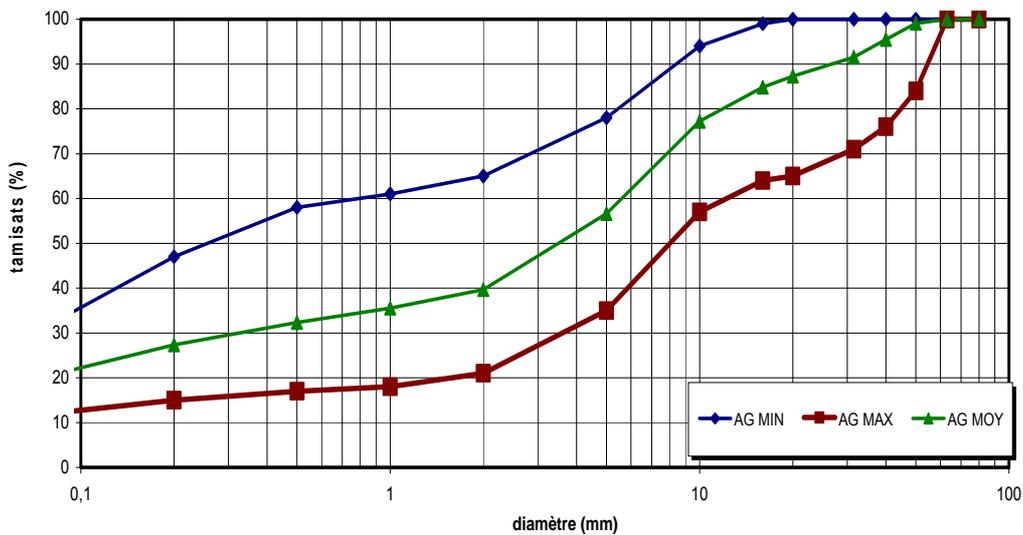


Figure 4.33. Fuseau granulométrique des échantillons prélevés sur l'itinéraire D

Tableau 4.4. Comparaison des sols latéritiques de l'itinéraire D avec les limites des recommandations ivoiriennes pour les couches de chaussée (1977)

Valeurs mesurées et seuils	$I_P$	$I_{CBR,95\%OPM}$	$C_{80\mu m}$ (%)
Itinéraire D (moyenne)	21	30	20
Couche de fondation	< 20	> 30	< 20
Couche de base	< 12	> 60	< 15

e. Itinéraire E (Agboville-Oress Krobou)

L'itinéraire Agboville-Oresskrobo est long de 33 kilomètres. 12 prélèvements ont été analysés. Les prélèvements effectués sur ce tronçon sont identifiés par la lettre « E » et vont de E1 à E12. Les résultats varient dans les intervalles suivants :

	Caractéristiques géotechniques							
	Analyse granulométrique		Essai Proctor modifié		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
	$C_{80\mu m}$ (%)	$C_{80\mu m} * I_P$	$G_{dOPM}$	$W_{OPM}$ (%)	$I_{CBR}$	$W_L$	$W_P$	$I_P$
Valeur maximale	33	792	2,27	10,20	40	50	25	28
Valeur minimale	11	143	1,96	5,00	14	27	14	11
Valeur moyenne	20	416	2,10	6,99	23	40	20	20
Écart type	6	185	0	2	7	8	4	5
Intervalle de variation	11-33	143-792	1,96-2,27	5,0-10,2	14-40	27-50	13-28	11-28

Les relations entre les différents paramètres géotechniques établies pour l'itinéraire E sont représentées sur les figures 4.34 à 4.41.

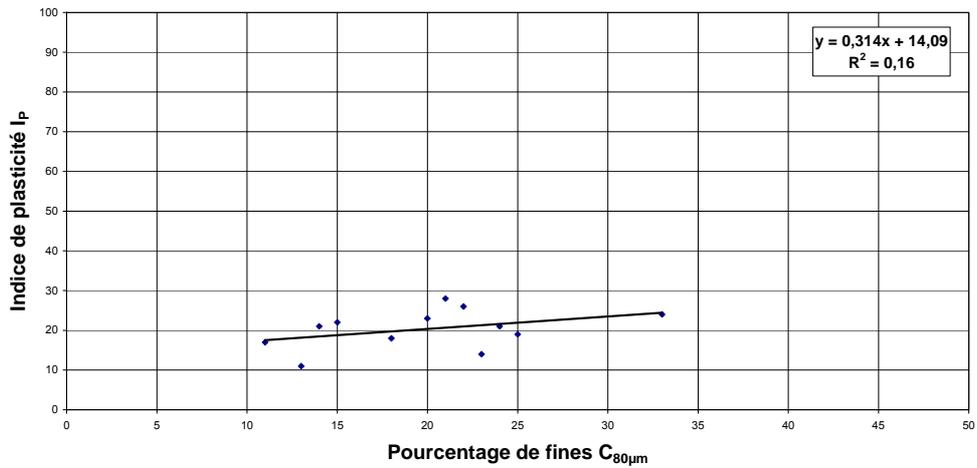


Figure 4.34. Relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage de fines (Itinéraire E)

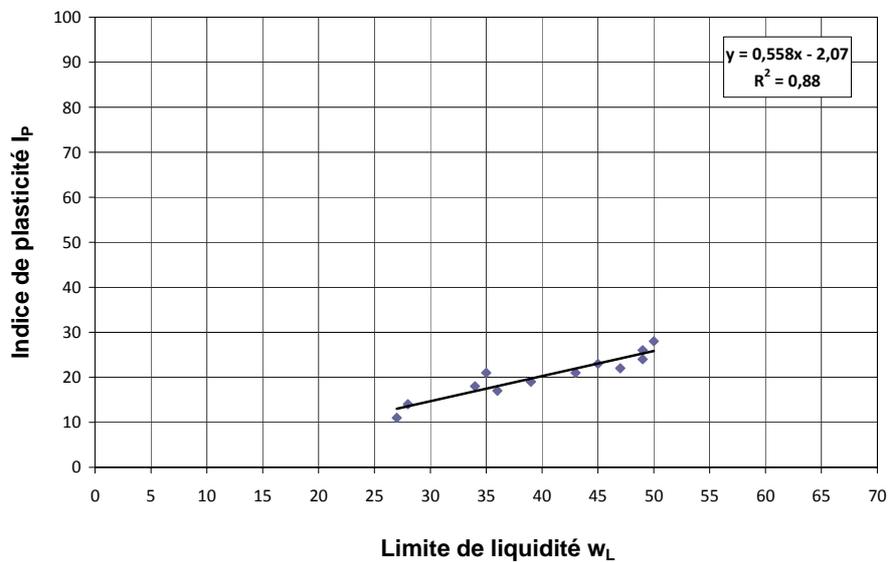


Figure 4.35. Relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité (Itinéraire E)

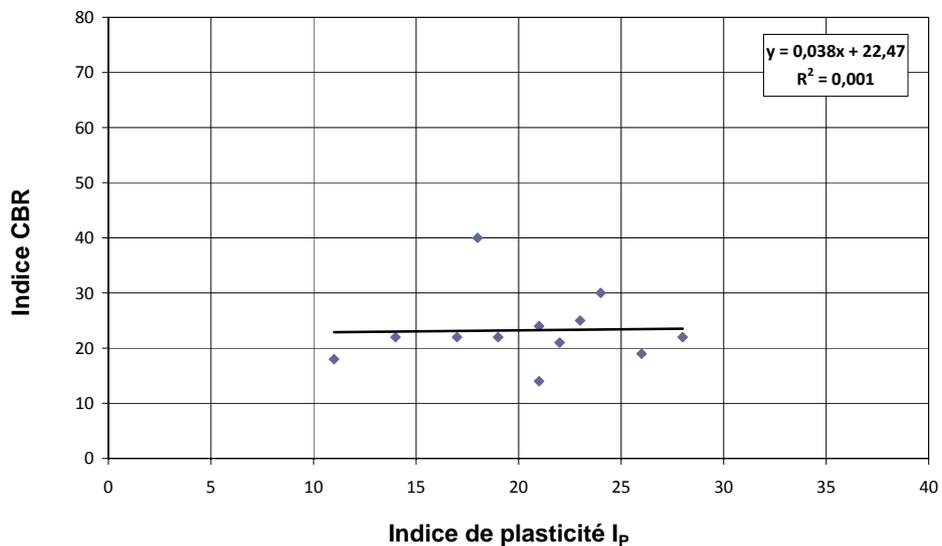


Figure 4.36. Relation entre l'indice CBR et l'indice de plasticité (Itinéraire E)

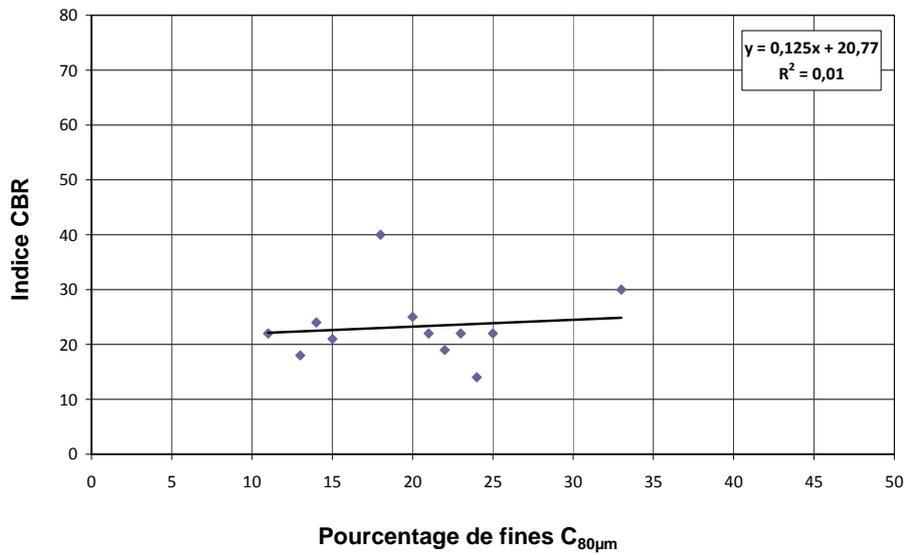


Figure 4.37. Relation entre l'indice CBR et le pourcentage de fines (Itinéraire D)

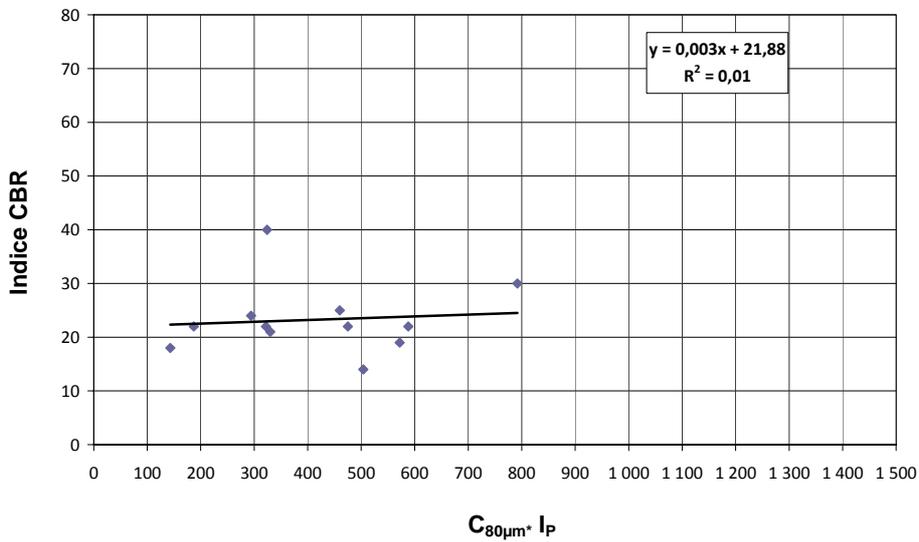
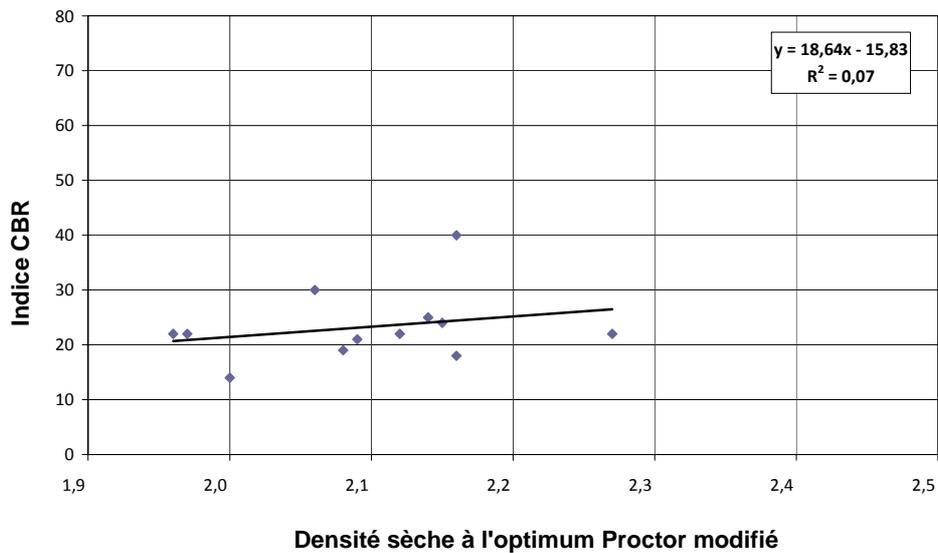


Figure 4.38. Relation entre l'indice CBR et le produit  $C_{80\mu m} \times I_p$  (Itinéraire E)



4.39. Relation entre l'indice CBR et la densité sèche à l'optimum Proctor modifié (Itinéraire E)

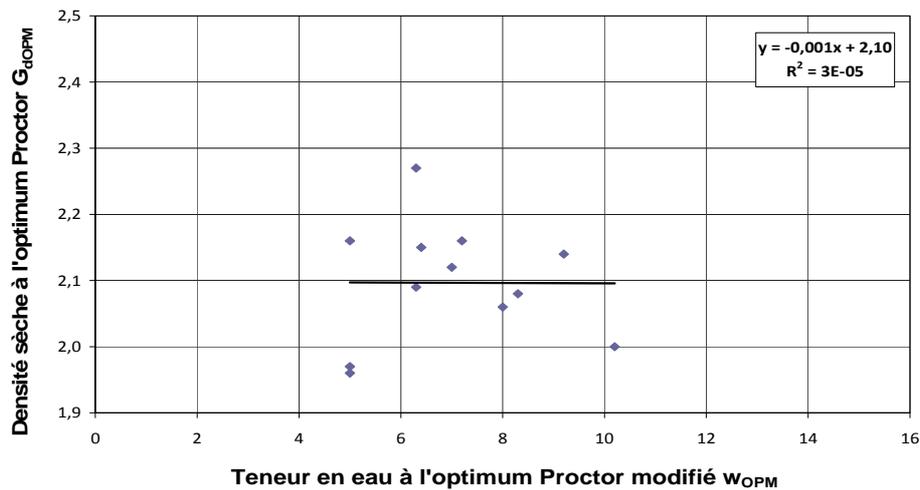


Figure 4.40. Relation entre la densité sèche et la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié (Itinéraire E)

Par rapport aux limites d'utilisation fixées dans les recommandations ivoiriennes de 1977, les sols latéritiques de l'itinéraire E (Agboville-Oresskrobou) ne vérifient pas les conditions d'emploi en couche de fondation et en couche de base de structure de chaussée, comme on le voit dans le tableau 4.5. Ils peuvent seulement être utilisés en remblai.

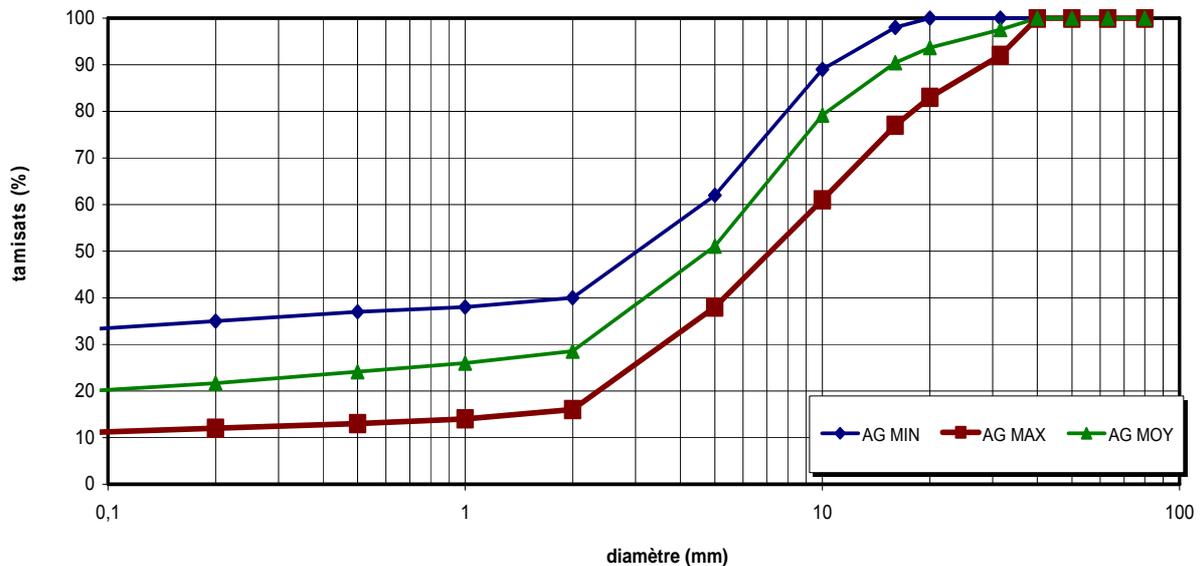


Figure 4.41. Fuseau granulométrique des échantillons prélevés sur l'itinéraire E

Tableau 4.5. Comparaison des sols latéritiques de l'itinéraire E avec les limites des recommandations ivoiriennes pour les couches de chaussée (1977)

Valeurs mesurées et seuils	$I_p$	$I_{CBR,95\%OPM}$	$C_{80\mu m}$ (%)
Itinéraire E (moyenne)	20	23	20
Couche de fondation	< 20	> 30	< 20
Couche de base	< 12	> 60	< 15

f. Itinéraire F (Agou-Azaguié)

L'itinéraire Agou-Azaguié est long de 44 kilomètres. 7 prélèvements ont été analysés. Les prélèvements effectués sur ce tronçon sont identifiés par la lettre « F » et vont de F1 à F7. Les résultats varient dans les intervalles suivants :

	Caractéristiques géotechniques							
	Analyse granulométrique		Essai Proctor modifié		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
	$C_{80\mu m}$ (%)	$C_{80\mu m} * I_P$	$G_{dOPM}$	$W_{OPM}$ (%)	$I_{CBR}$	$W_L$	$W_P$	$I_P$
Valeur maximale	30	840	2,35	10,20	47	59	28	33
Valeur minimale	11	209	2,01	5,90	30	37	17	19
Valeur moyenne	22	573	2,13	8,63	41	46	21	25
Écart type	6	219	0	2	6	8	4	5
Intervalle de variation	11-30	209-840	2,01-2,35	5,9-10,2	30-47	37-59	17-28	19-33

Les relations entre les différents paramètres géotechniques établies pour l'itinéraire F sont représentées sur les figures 4.42 à 4.49.

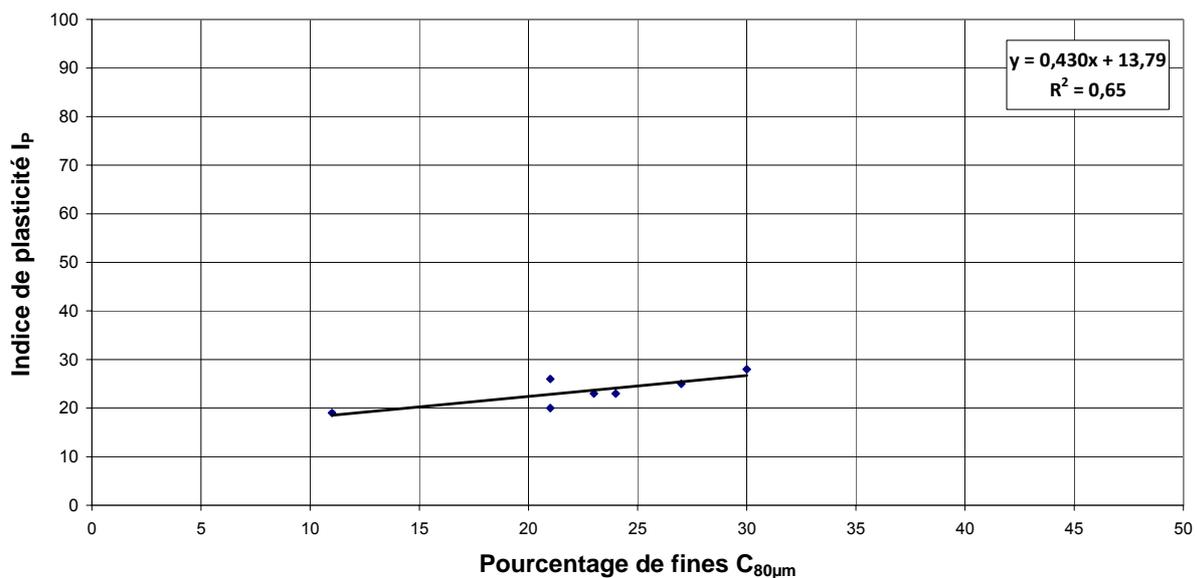


Figure 4.42. Relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage de fines (Itinéraire F)

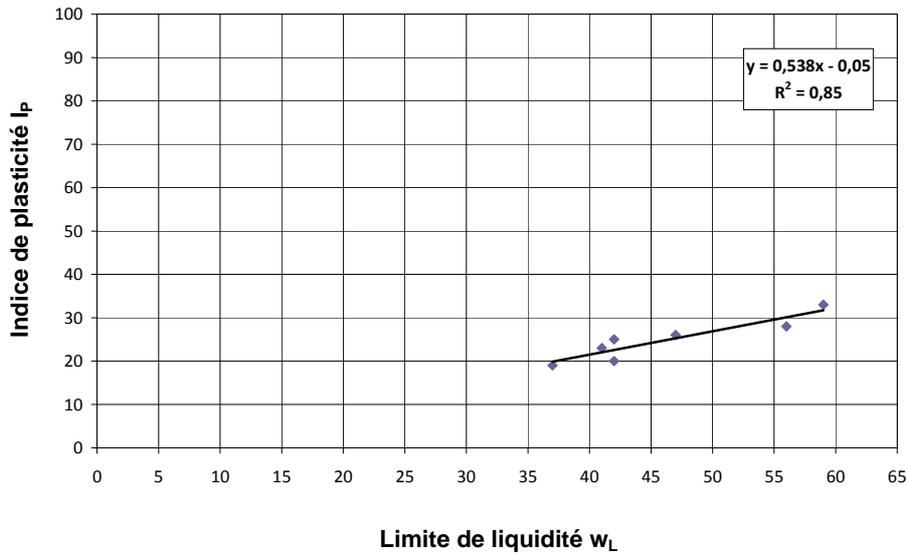


Figure 4.43. Relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité (Itinéraire F)

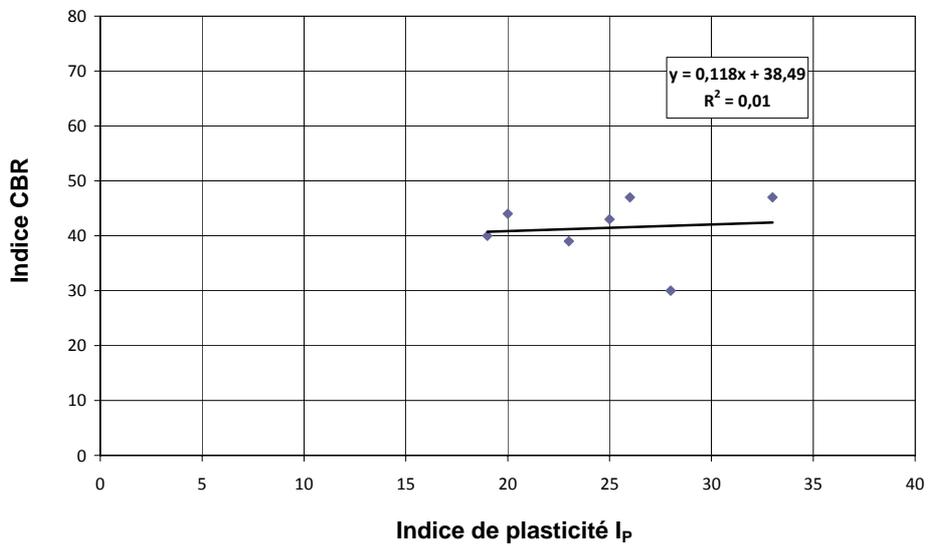


Figure 4.44. Relation entre l'indice CBR et l'indice de plasticité (Itinéraire F)

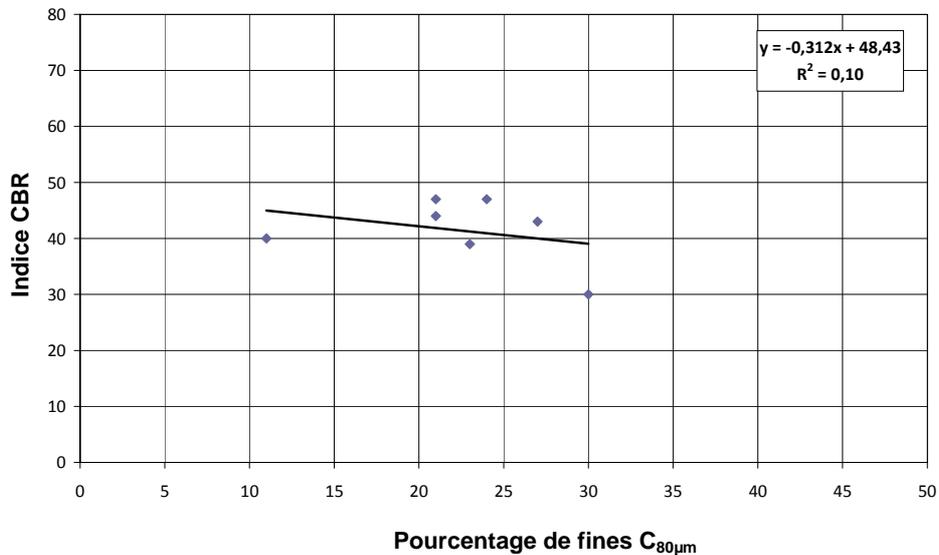


Figure 4.45. Relation entre l'indice CBR et le pourcentage de fines (Itinéraire F)

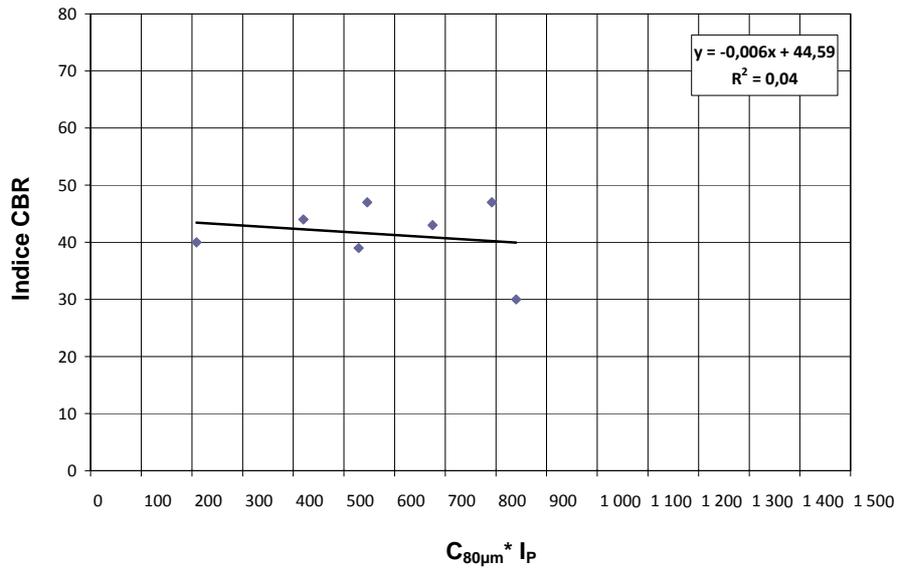
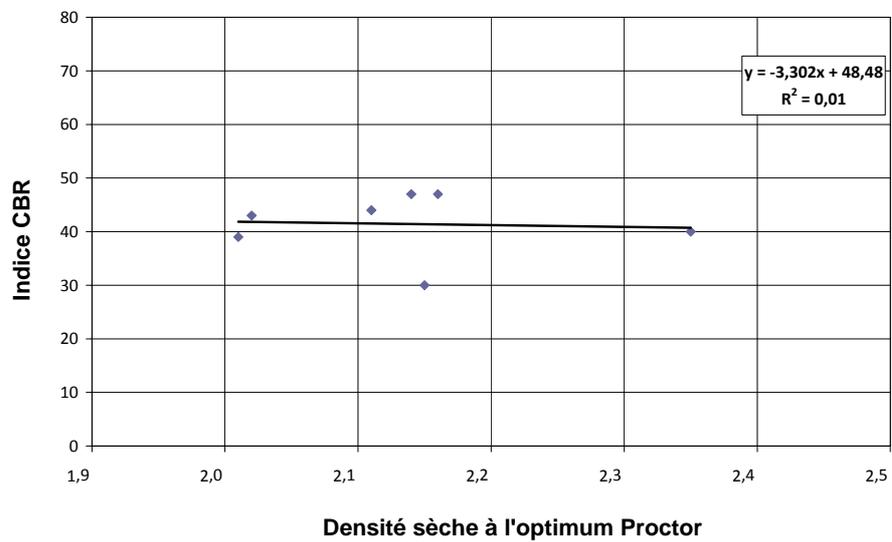


Figure 4.46. Relation entre l'indice CBR et le produit  $C_{80\mu m} \times I_p$  (Itinéraire F)



4.47. Relation entre l'indice CBR et la densité sèche à l'OPM (Itinéraire F)

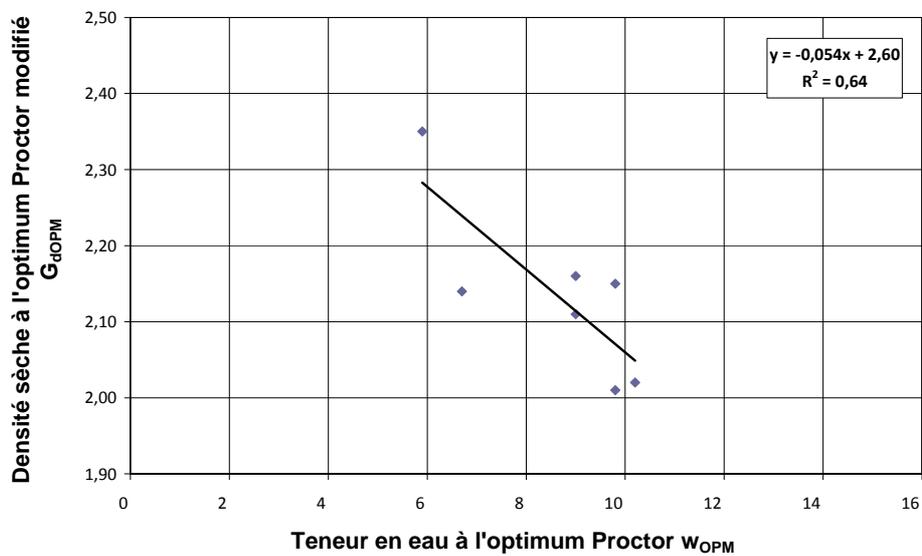


Figure 4.48. Relation entre la densité sèche et la teneur en eau à l'OPM (Itinéraire F)

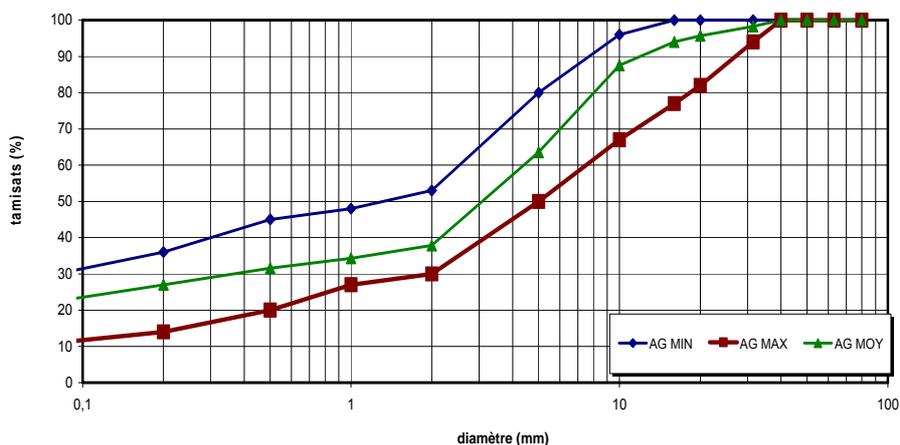


Figure 4.49. Fuseau granulométrique des échantillons prélevés sur l'itinéraire F

Par rapport aux limites d'utilisation fixées dans les recommandations ivoiriennes de 1977, les sols latéritiques de l'itinéraire F (Agou-Azaguié) ne vérifient pas les conditions d'emploi en couche de fondation et en couche de base de structure de chaussée, comme on le voit dans le tableau 4.6. Ils peuvent être utilisés en remblai.

Tableau 4.6. Comparaison des sols latéritiques de l'itinéraire F avec les limites des recommandations ivoiriennes pour les couches de chaussée (1977)

Valeurs mesurées et seuils	$I_P$	$I_{CBR,95\%OPM}$	$C_{80\mu m}$ (%)
Itinéraire F (moyenne)	25	30	22
Couche de fondation	< 20	> 30	< 20
Couche de base	< 12	> 60	< 15

#### g. Itinéraire G (Assikoi-Lobo Opé)

L'itinéraire Assikoi-Lobo Opé est long de 13,49 kilomètres. 15 prélèvements ont été analysés. Les prélèvements effectués sur ce tronçon sont identifiés par la lettre « G » et vont de G1 à G15. Les résultats varient dans les intervalles suivants :

	Caractéristiques géotechniques							
	Analyse granulométrique		Essai Proctor modifié		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
	$C_{80\mu m}$ (%)	$C_{80\mu m} * I_P$	$G_{dOPM}$	$W_{OPM}$ (%)	$I_{CBR}$	$W_L$	$W_P$	$I_P$
Valeur maximale	36	756	2,25	12,10	45	53	28	25
Valeur minimale	10	210	2,01	7,80	15	30	13	16
Valeur moyenne	22	447	2,13	9,31	27	40	19	21
Écart type	8	162	0	1	9	6	4	2
Intervalle de variation	10-36	210-756	2,01-2,25	7,8-12,1	15-45	30-53	13-28	16-25

Les relations entre les différents paramètres géotechniques établies pour l'itinéraire G sont représentées sur les figures 4.50 à 4.57.

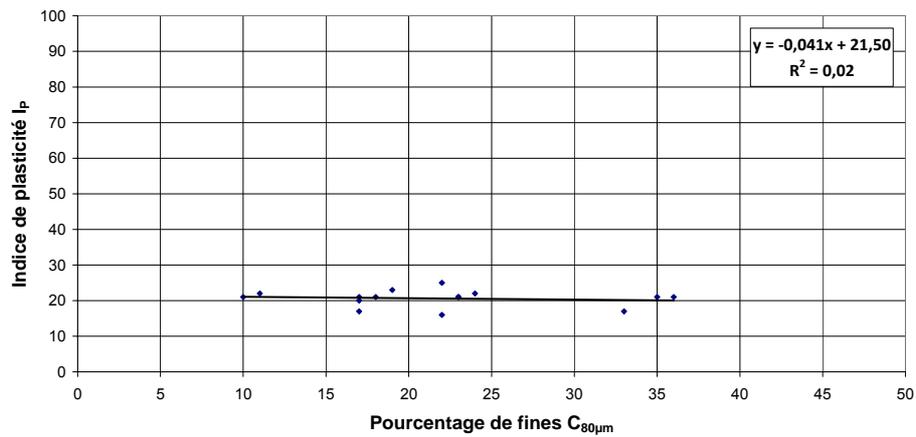


Figure 4.50. Relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage de fines (Itinéraire G)

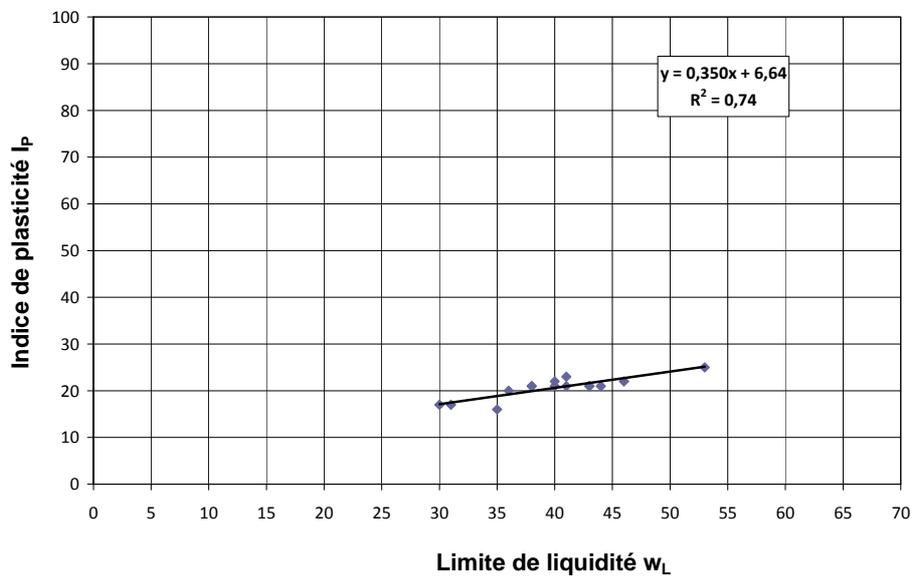


Figure 4.51. Relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité (Itinéraire G)

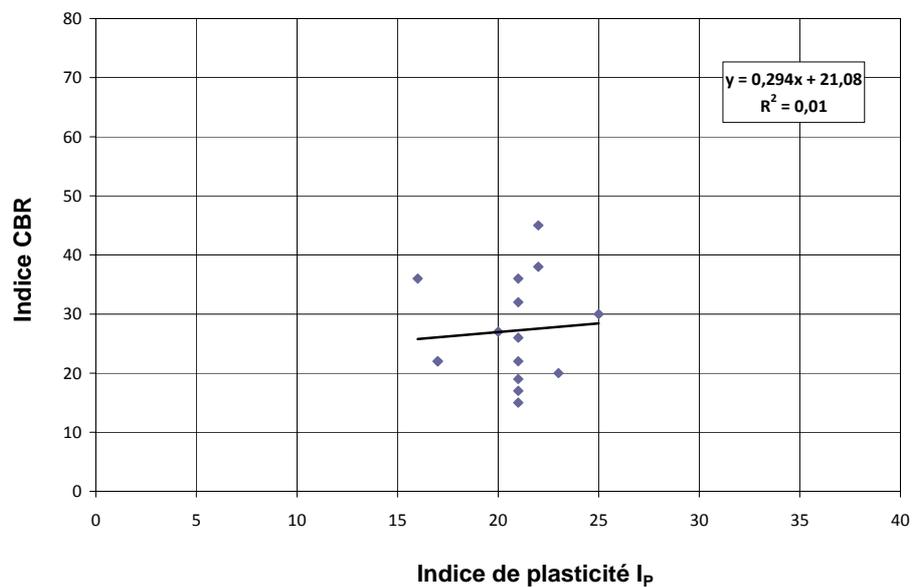


Figure 4.52. Relation entre l'indice CBR et l'indice de plasticité (Itinéraire G)

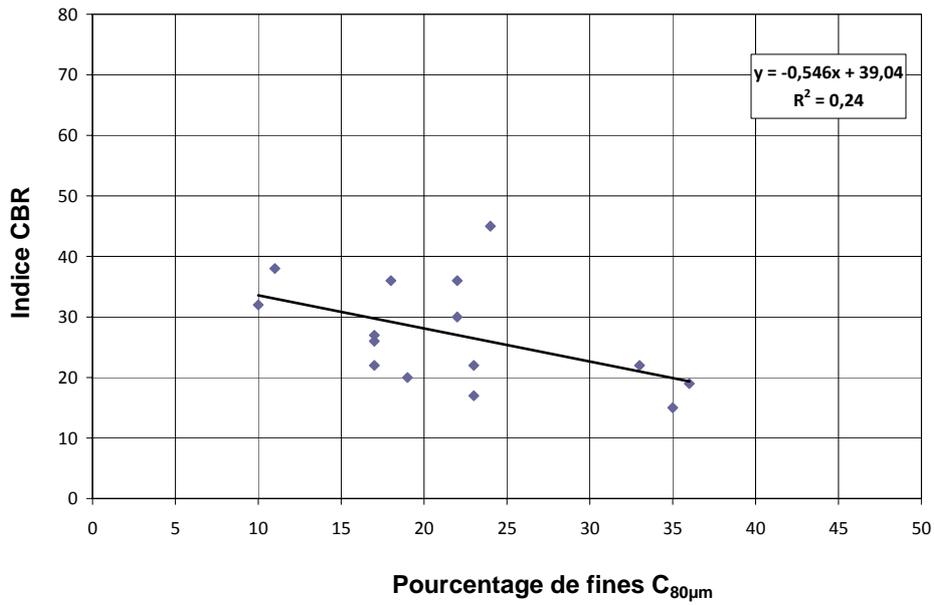


Figure 4.53. Relation entre l'indice CBR et le pourcentage de fines (Itinéraire G)

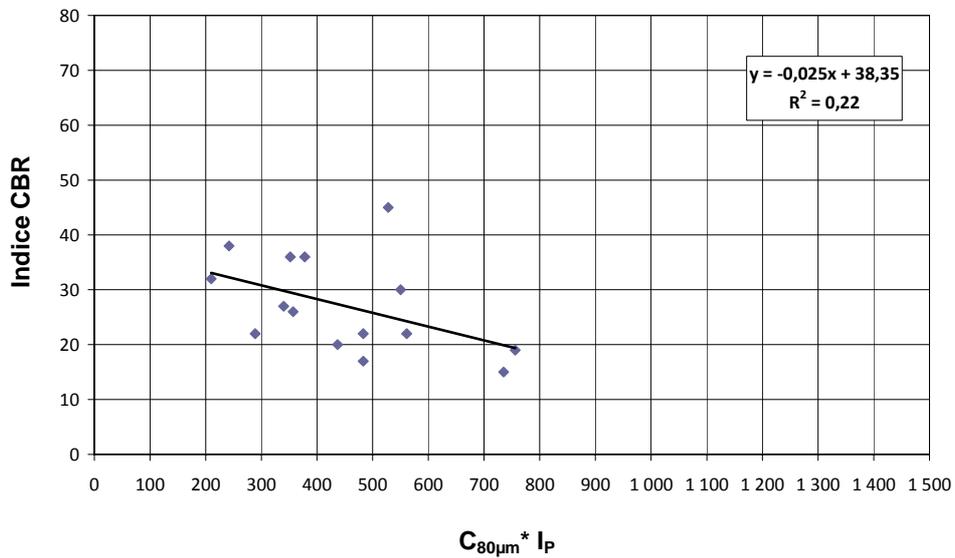


Figure 4.54. Relation entre l'indice CBR et le produit  $C_{80\mu m} \times I_P$  (Itinéraire G)

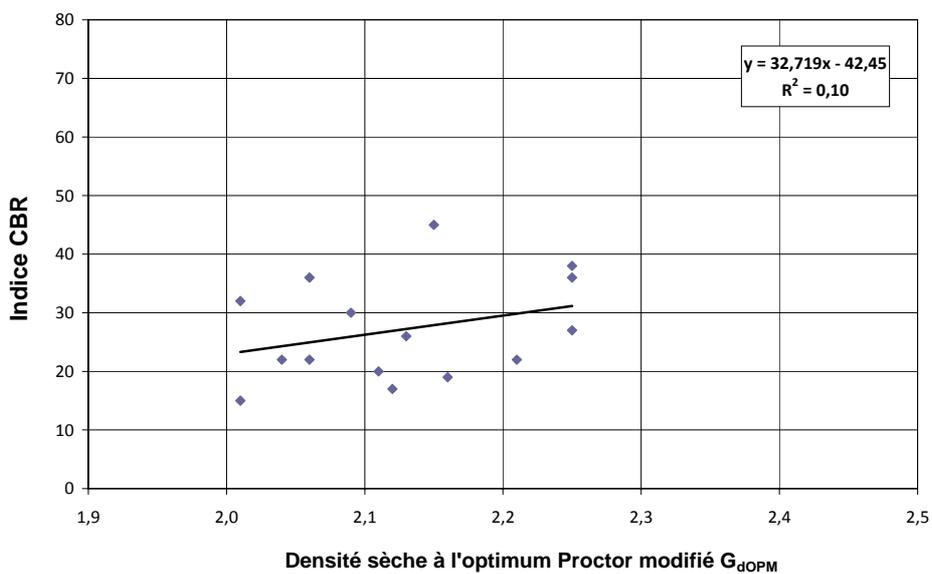


Figure 4.55. Relation entre l'indice CBR et la densité sèche à l'OPM (Itinéraire G)

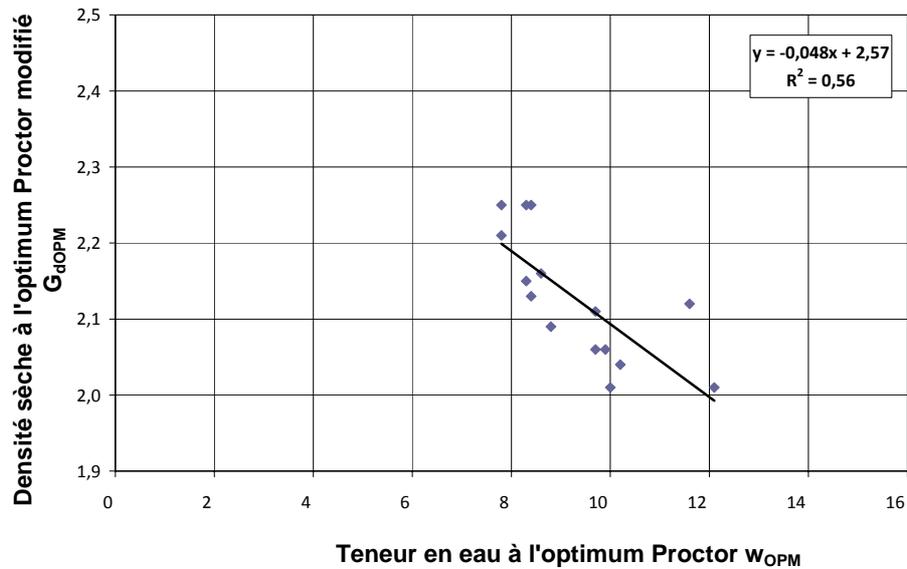


Figure 4.56. Relation entre la densité sèche et la teneur en eau à l'OPM (Itinéraire G)

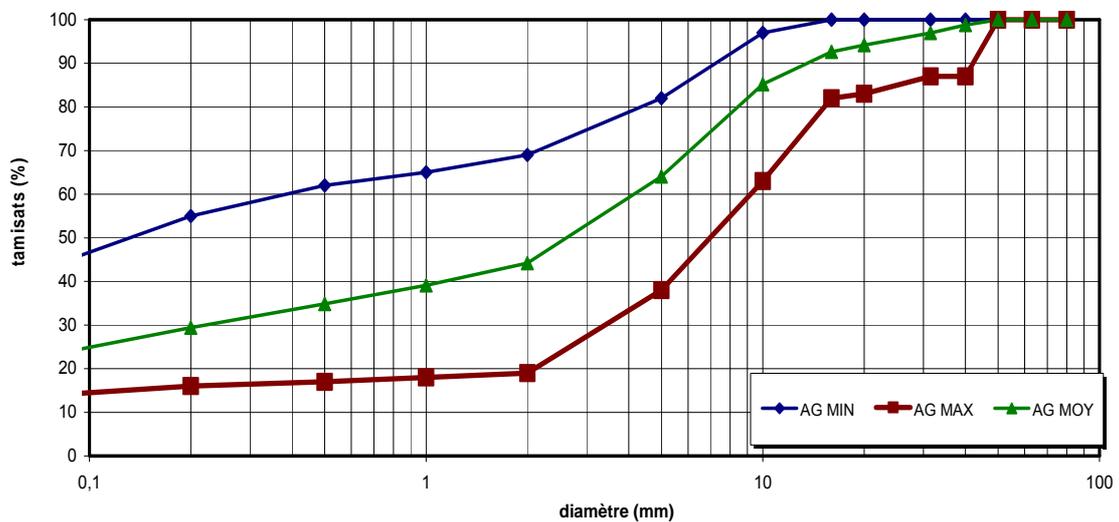


Figure 4.57. Fuseau granulométrique des échantillons prélevés sur l'itinéraire G

Par rapport aux limites d'utilisation fixées dans les recommandations ivoiriennes de 1977, les sols latéritiques de l'itinéraire G (Assikoi-Lobo Opé) ne vérifient pas les conditions d'emploi en couche de fondation et en couche de base de structure de chaussée, comme on le voit dans le tableau 4.7. Ils peuvent seulement être utilisés en remblai.

Tableau 4.7. Comparaison des sols latéritiques de l'itinéraire G avec les limites des recommandations ivoiriennes pour les couches de chaussée (1977)

Valeurs mesurées et seuils	$I_p$	$I_{CBR,95\%OPM}$	$C_{80\mu m}$ (%)
Itinéraire G (moyenne)	21	27	22
Couche de fondation	< 20	> 30	< 20
Couche de base	< 12	> 60	< 15

#### h. Itinéraire H (Grand Morié-Agou)

L'itinéraire Grand Morié-Agou est long de 22,5 kilomètres. 15 prélèvements ont été analysés. Les prélèvements effectués sur ce tronçon sont identifiés par la lettre « H » et vont de H1 à H15. Les résultats varient dans les intervalles suivants :

	Caractéristiques géotechniques							
	Analyse granulométrique		Essai Proctor modifié		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
	$C_{80\mu m}$ (%)	$C_{80\mu m} * I_P$	$G_{dOPM}$	$W_{OPM}$ (%)	$I_{CBR}$	$W_L$	$W_P$	$I_P$
Valeur maximale	35	840	2,39	12,10	47	61	34	33
Valeur minimale	9	117	2,01	5,90	15	33	17	13
Valeur moyenne	21	504	2,15	9,01	35	46	23	23
Écart type	7	204	0	2	11	9	5	5
Intervalle de variation	9-35	117-840	2,01-2,39	5,9-12,1	15-47	30-61	17-34	13-33

Les relations entre les différents paramètres géotechniques établies pour l'itinéraire H sont représentées sur les figures 4.58 à 4.65.

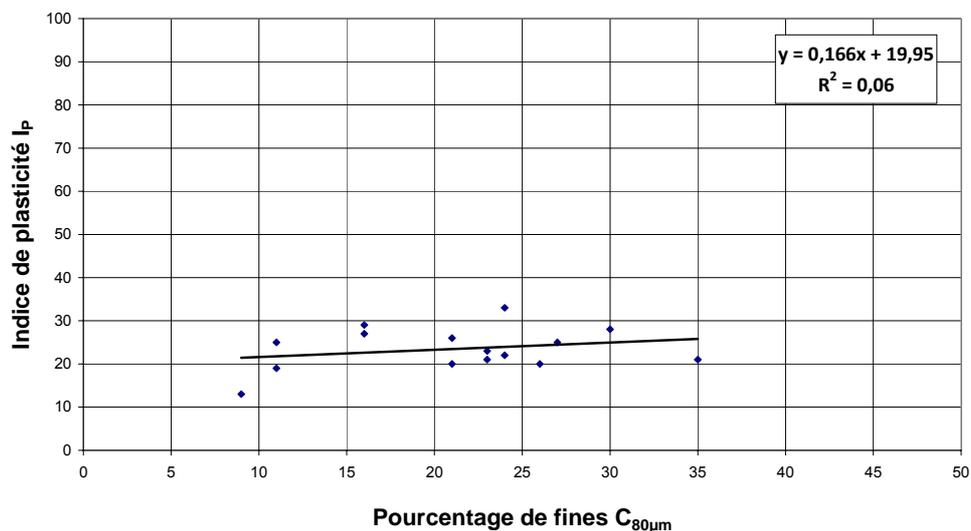


Figure 4.58. Relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage de fines (Itinéraire H)

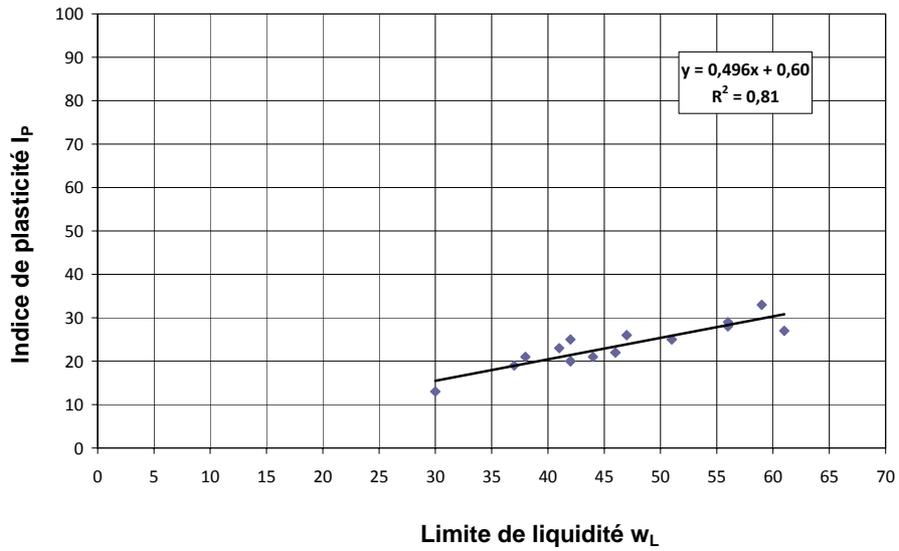


Figure 4.59. Relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité (Itinéraire H)

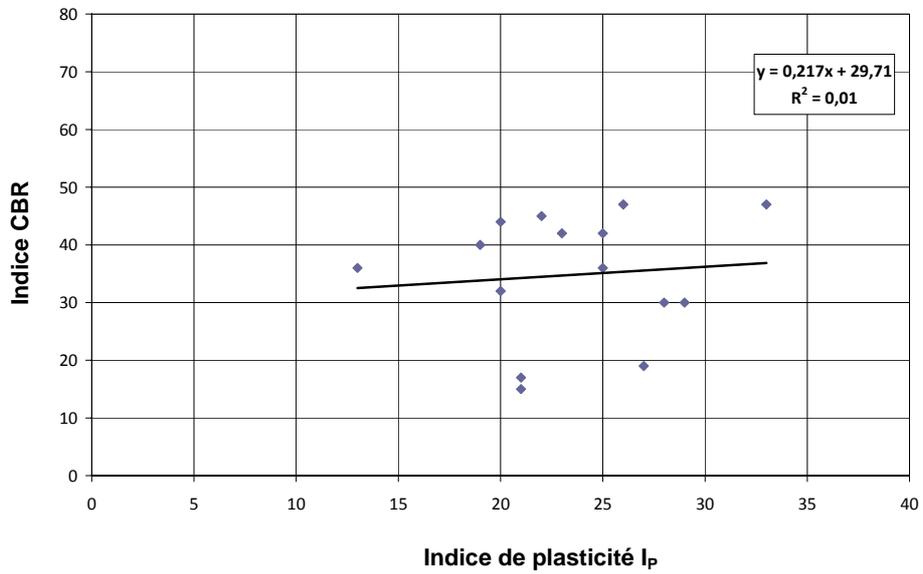


Figure 4.60. Relation entre l'indice CBR et l'indice de plasticité (Itinéraire H)

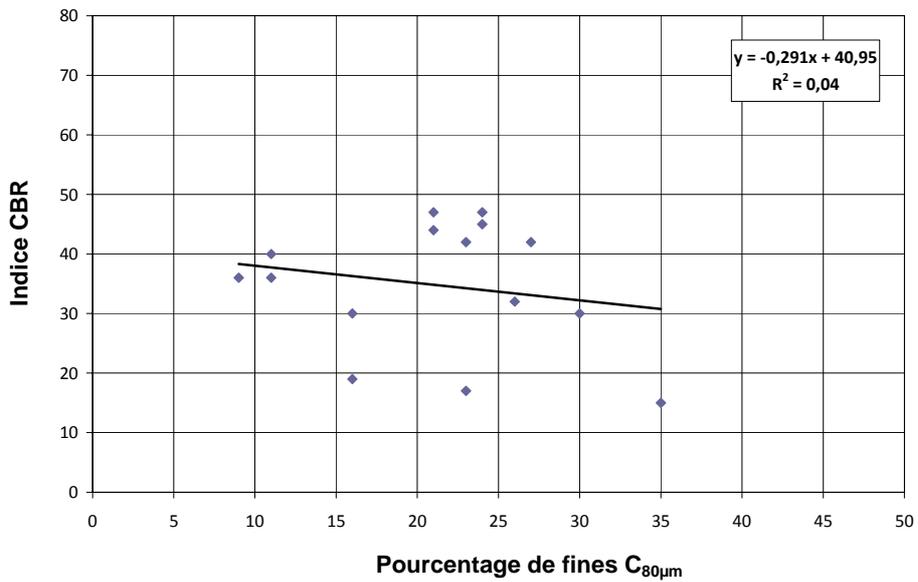


Figure 4.61. Relation entre l'indice CBR et le pourcentage de fines (Itinéraire H)

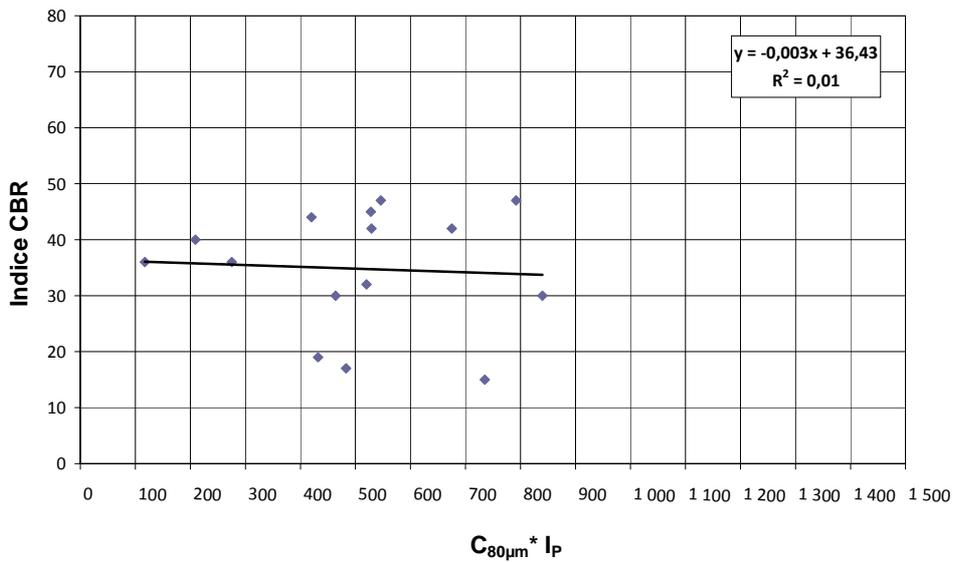


Figure 4.62. Relation entre l'indice CBR et le produit  $C_{80\mu m} \times I_P$  (Itinéraire H)

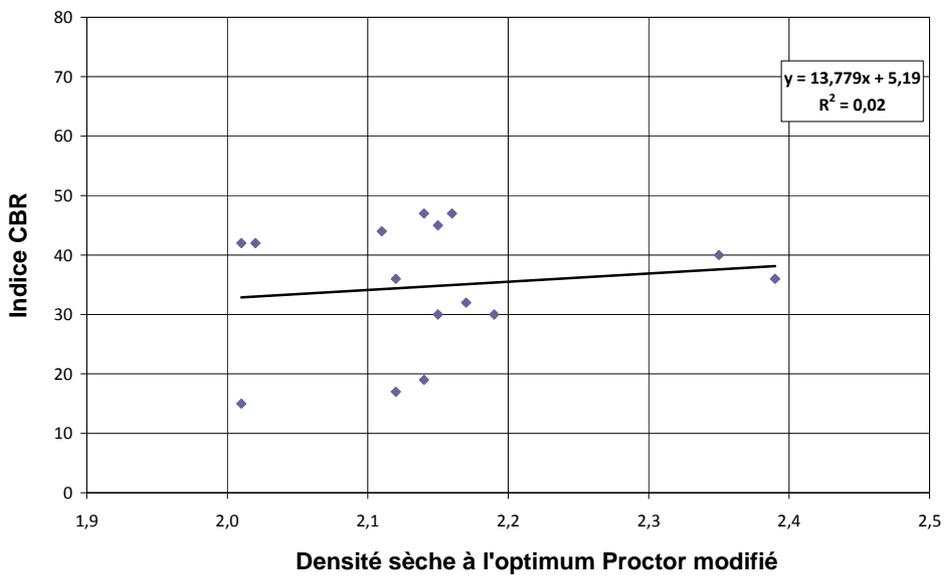


Figure 4.63. Relation entre l'indice CBR et la densité sèche à l'OPM (Itinéraire H)

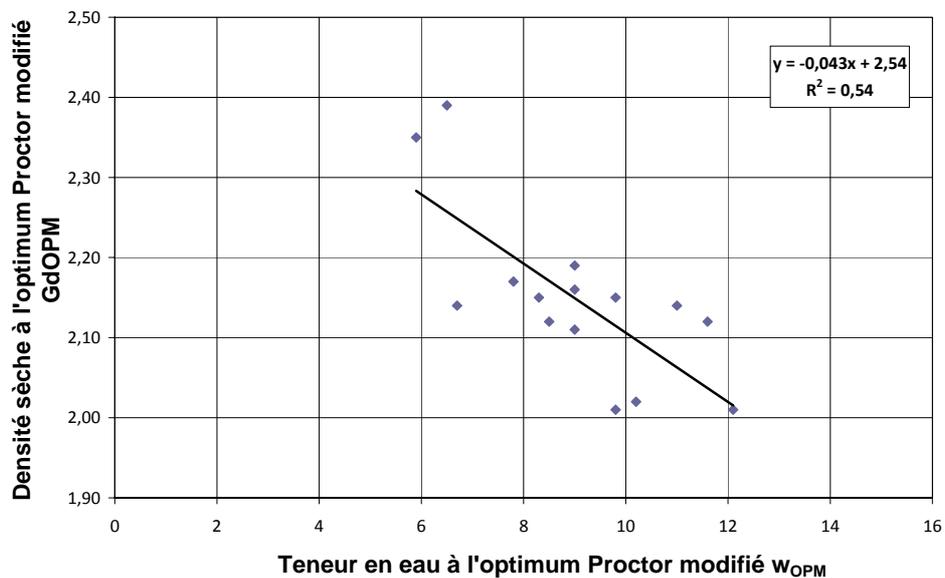


Figure 4.64. Relation entre la densité sèche et la teneur en eau à l'OPM (Itinéraire H)

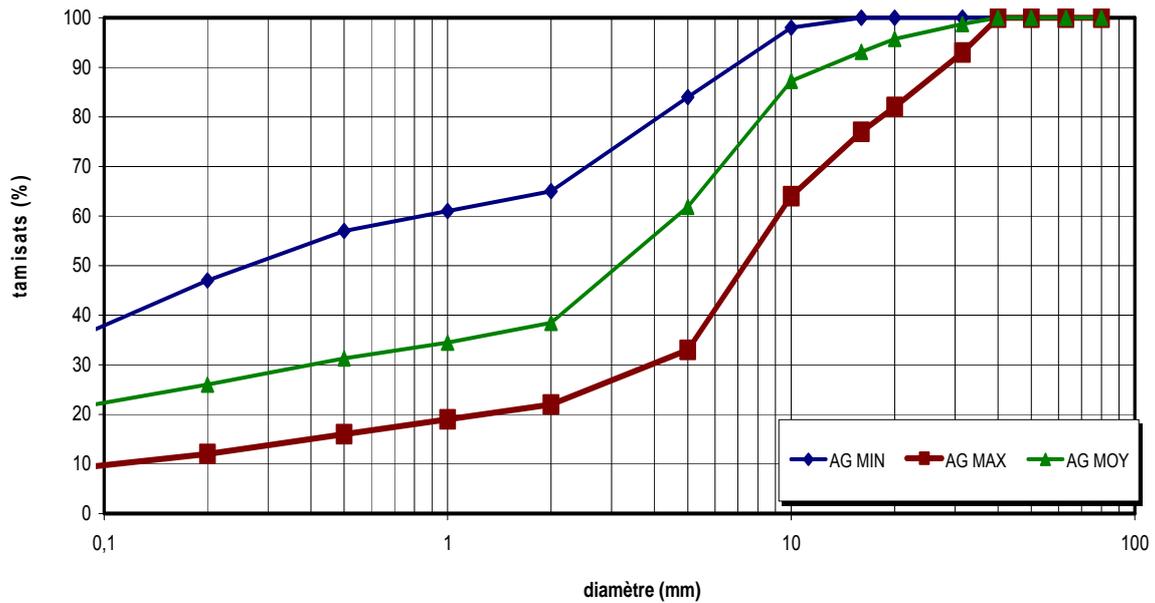


Figure 4.65. Fuseau granulométrique des échantillons prélevés sur l'itinéraire H

Par rapport aux limites d'utilisation fixées dans les recommandations ivoiriennes de 1977, les sols latéritiques de l'itinéraire H (Grand Morié-Agou) ne vérifient pas les conditions d'emploi en couche de fondation et en couche de base de structure de chaussée, comme on le voit dans le tableau 4.8. Ils peuvent seulement être utilisés en remblai.

Tableau 4.8. Comparaison des sols latéritiques de l'itinéraire H avec les limites des recommandations ivoiriennes pour les couches de chaussée (1977)

Valeurs mesurées et seuils	$I_p$	$I_{CBR,95\%OPM}$	$C_{80\mu m}$ (%)
Itinéraire H (moyenne)	23	35	21
Couche de fondation	< 20	> 30	< 20
Couche de base	< 12	> 60	< 15

#### i. Itinéraire I (Loaguié-Afféry)

L'itinéraire Loaguié-Afféry est long de 38 kilomètres. 37 prélèvements ont été analysés. Les prélèvements effectués sur ce tronçon sont identifiés par la lettre « I » et vont de I1 à I37. Les résultats varient dans les intervalles suivants :

Caractéristiques géotechniques								
	Analyse granulométrique		Essai Proctor modifié		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
	$C_{80\mu m}$ (%)	$C_{80\mu m} * I_P$	$G_{dOPM}$	$W_{OPM}$ (%)	$I_{CBR}$	$W_L$	$W_P$	$I_P$
Valeur maximale	44	1 144	2,35	13,00	49	63	33	33
Valeur minimale	14	187	1,94	5,70	11	27	16	11
Valeur moyenne	23	530	2,15	8,65	29	44	22	22
Écart type	7	239	0	2	10	7	3	5
Intervalle de variation	14-44	187-1144	1,94-2,35	5,7-13,0	11-49	27-63	16-33	11-33

Les relations entre les différents paramètres géotechniques établies pour l'itinéraire I sont représentées sur les figures 4.66 à 4.73.

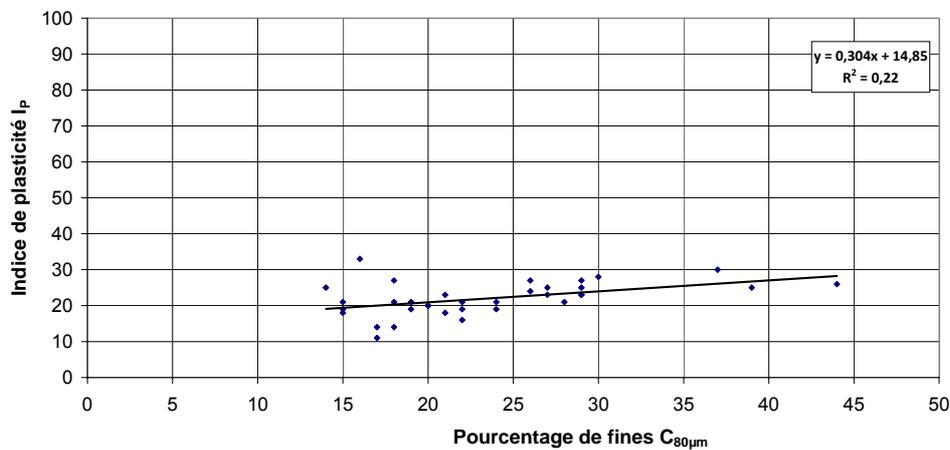


Figure 4.66. Relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage de fines (Itinéraire I)

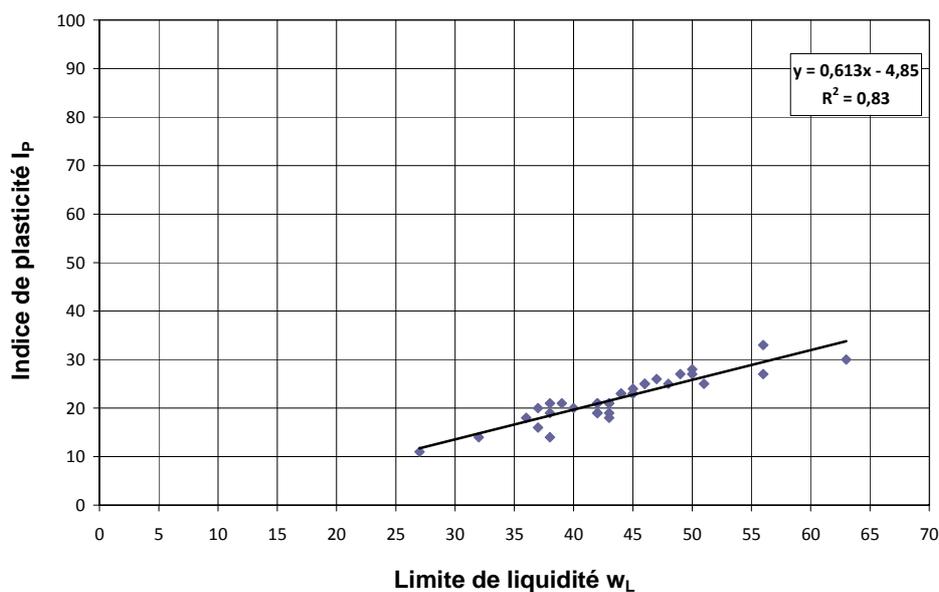


Figure 4.67. Relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité (Itinéraire I)

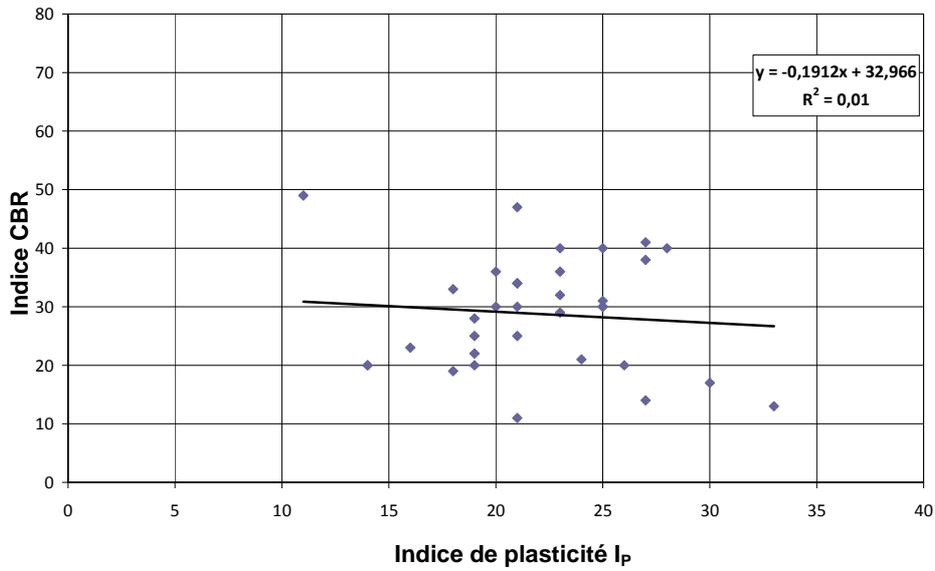


Figure 4.68. Relation entre l'indice CBR et l'indice de plasticité (Itinéraire I)

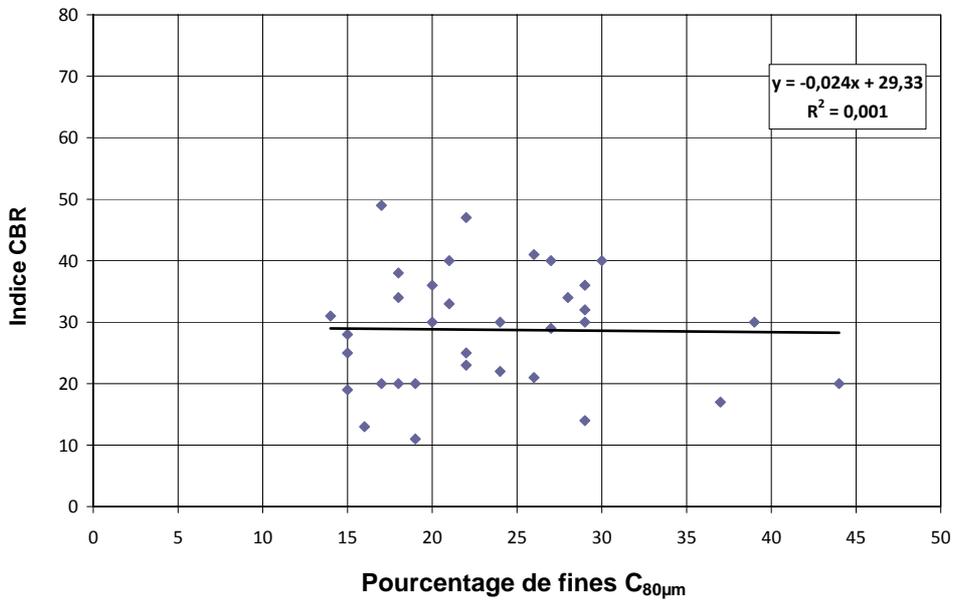


Figure 4.69. Relation entre l'indice CBR et le pourcentage de fines (Itinéraire I)

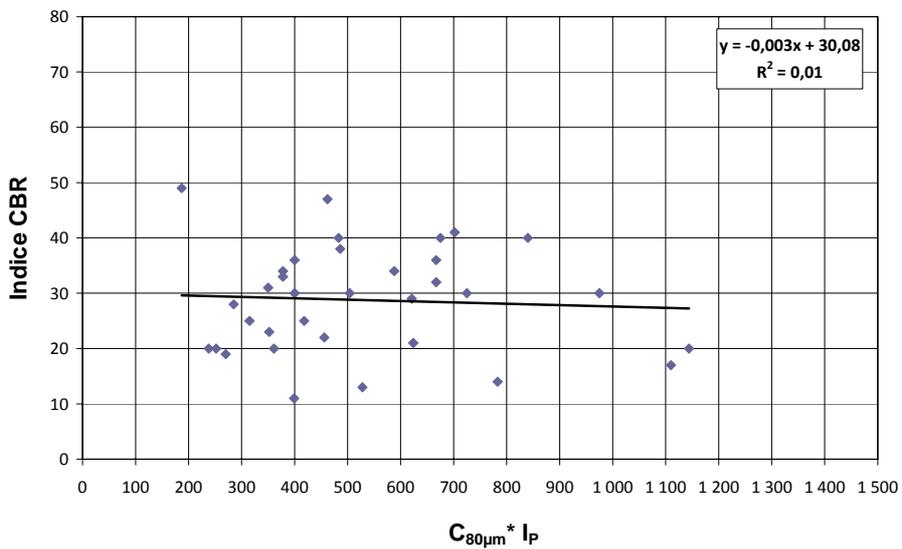
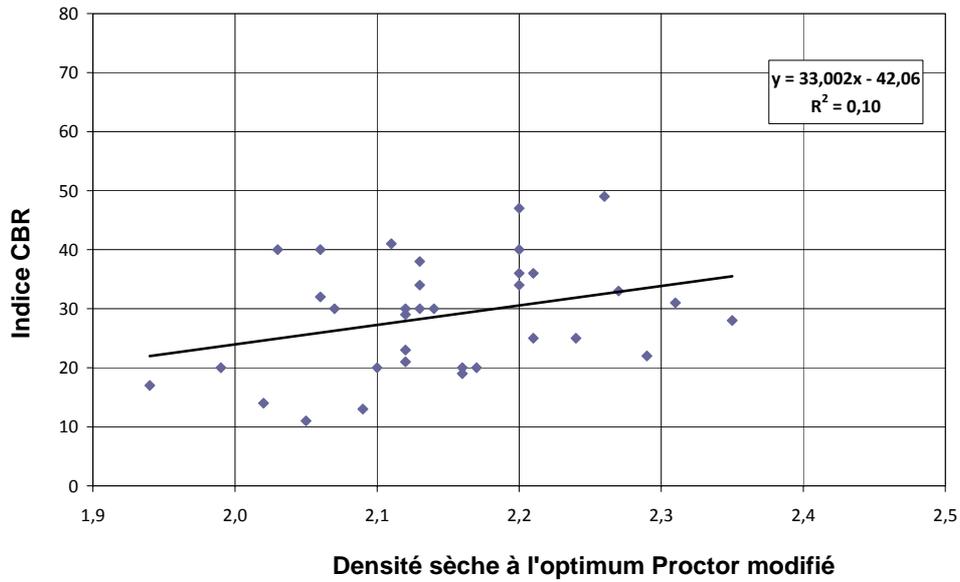


Figure 4.70. Relation entre l'indice CBR et le produit  $C_{80\mu m} \times I_p$  (Itinéraire I)



4.71. Relation entre l'indice CBR et la densité sèche à l'OPM (Itinéraire I)

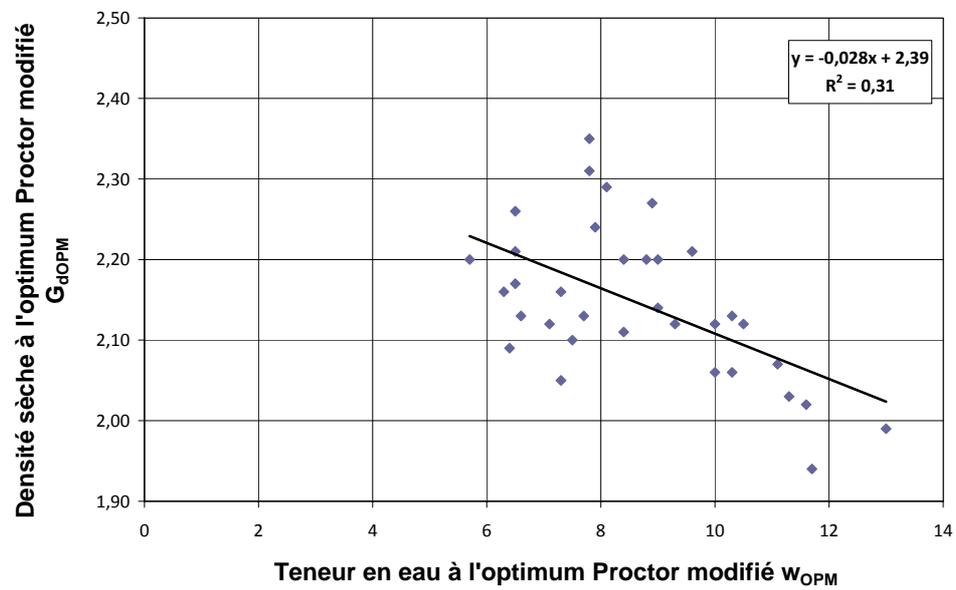


Figure 4.72. Relation entre la densité sèche et la teneur en eau à l'OPM (Itinéraire I)

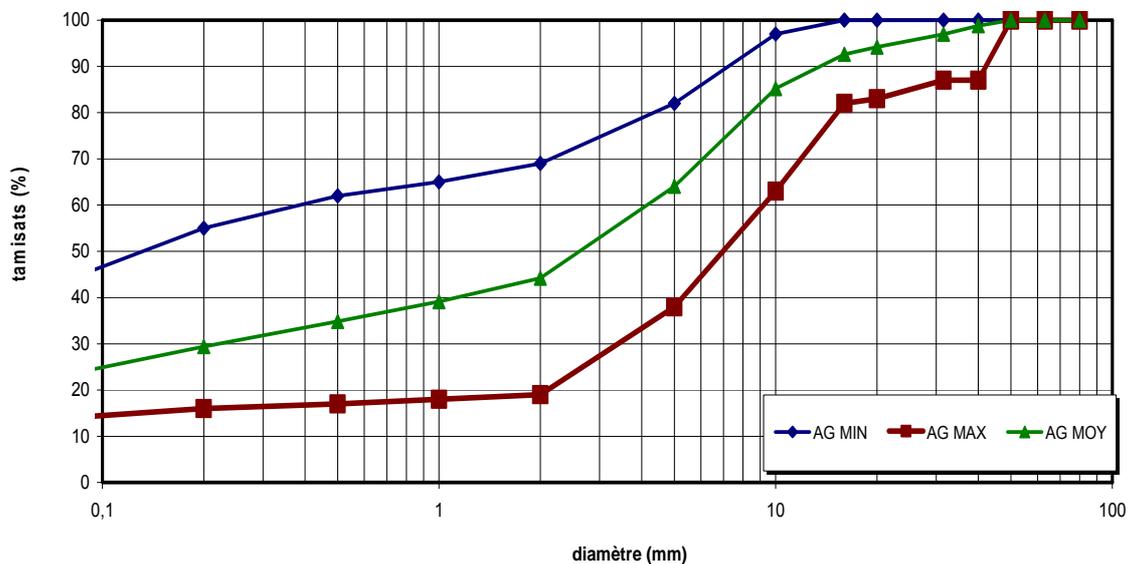


Figure 4.73. Fuseau granulométrique des échantillons prélevés sur l'itinéraire I

Par rapport aux limites d'utilisation fixées dans les recommandations ivoiriennes de 1977, les sols latéritiques de l'itinéraire I (Loaguié-Afféry) ne vérifient pas les conditions d'emploi en couche de fondation et en couche de base de structure de chaussée, comme on le voit dans le tableau 4.9. Ils peuvent seulement être utilisés en remblai.

Tableau 4.9. Comparaison des sols latéritiques de l'itinéraire I avec les limites des recommandations ivoiriennes pour les couches de chaussée (1977)

Valeurs mesurées et seuils	$I_P$	$I_{CBR,95\%OPM}$	$C_{80\mu m}$ (%)
Itinéraire I (moyenne)	22	29	23
Couche de fondation	< 20	> 30	< 20
Couche de base	< 12	> 60	< 15

#### j. Itinéraire J (Offoumpo-Céchi)

L'itinéraire Offoumpo-Céchi est long de 43,2 kilomètres. 13 prélèvements ont été analysés. Les prélèvements effectués sur ce tronçon sont identifiés par la lettre «J» et vont de J1 à J13. Les résultats varient dans les intervalles suivants :

	Caractéristiques géotechniques							
	Analyse granulométrique		Essai Proctor modifié		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
	$C_{80\mu m}$ (%)	$C_{80\mu m} * I_P$	$G_{dOPM}$	$W_{OPM}$ (%)	$I_{CBR}$	$W_L$	$W_P$	$I_P$
Valeur maximale	36	972	2,29	15,70	49	53	25	28
Valeur minimale	15	315	2,00	7,50	19	36	18	16
Valeur moyenne	26	624	2,10	9,79	27	46	22	23
Écart type	7	247	0	2	9	7	3	4
Intervalle de variation	15-36	315-972	2,00-2,29	7,5-15,7	19-49	36-53	18-25	16-28

Les relations entre les différents paramètres géotechniques établies pour l'itinéraire J sont représentées sur les figures 4.74 à 4.81.

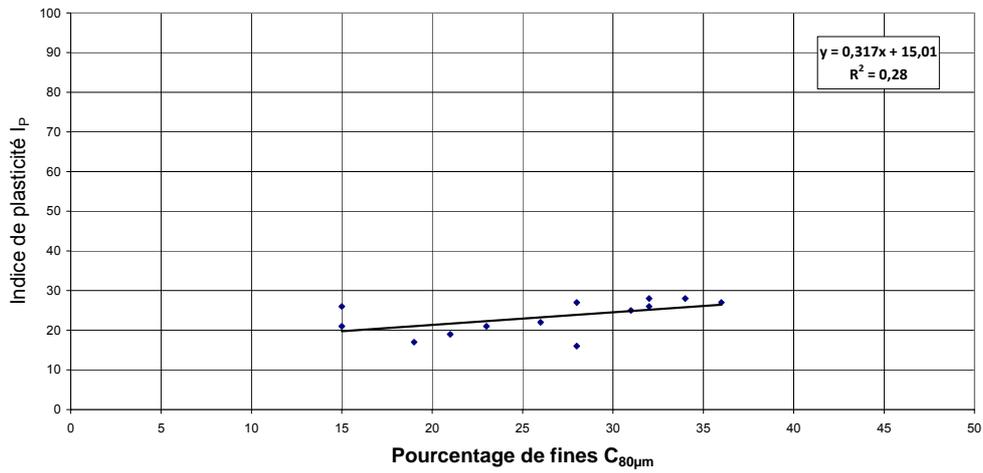


Figure 4.74. Relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage de fines (Itinéraire J)

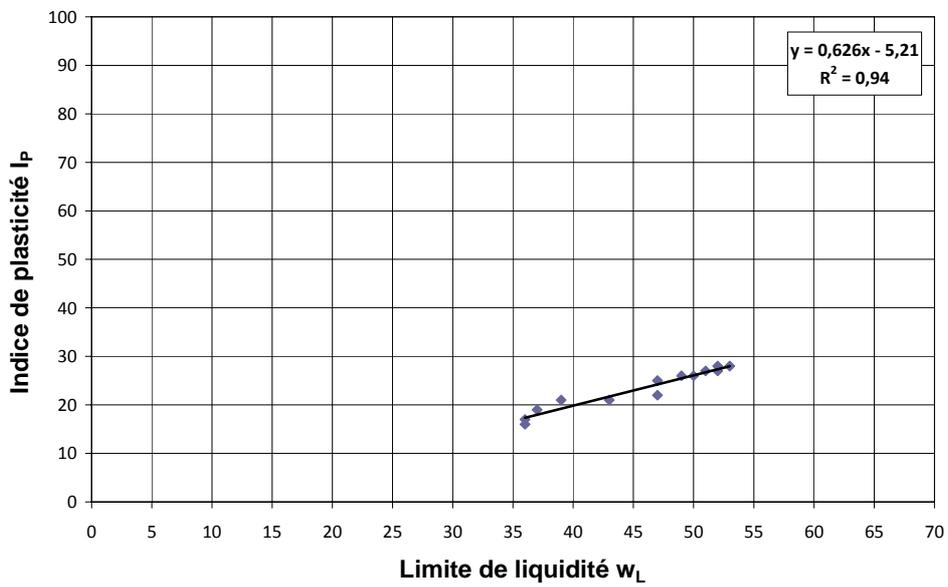


Figure 4.75. Relation entre l'indice de plasticité et la limite de liquidité (Itinéraire J)

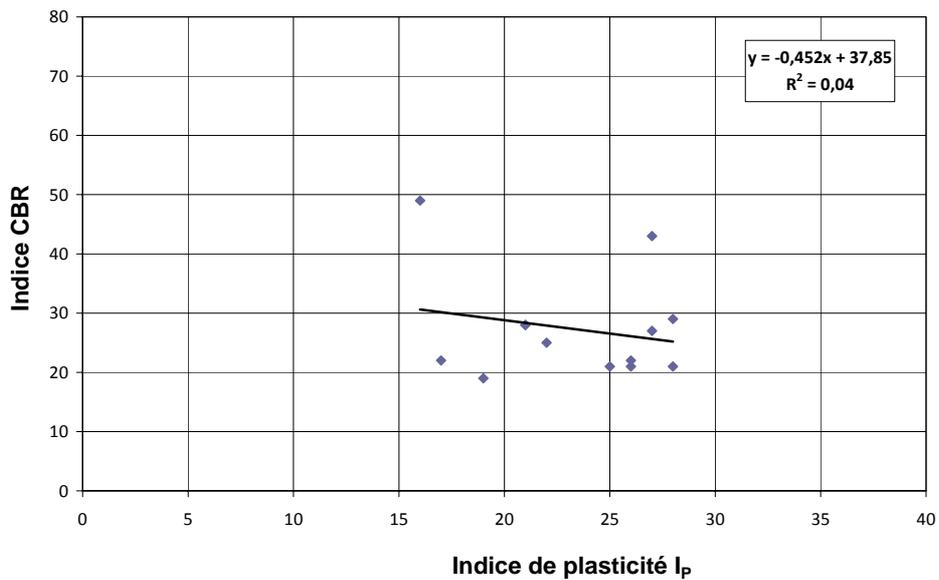


Figure 4.76. Relation entre l'indice CBR et l'indice de plasticité (Itinéraire J)

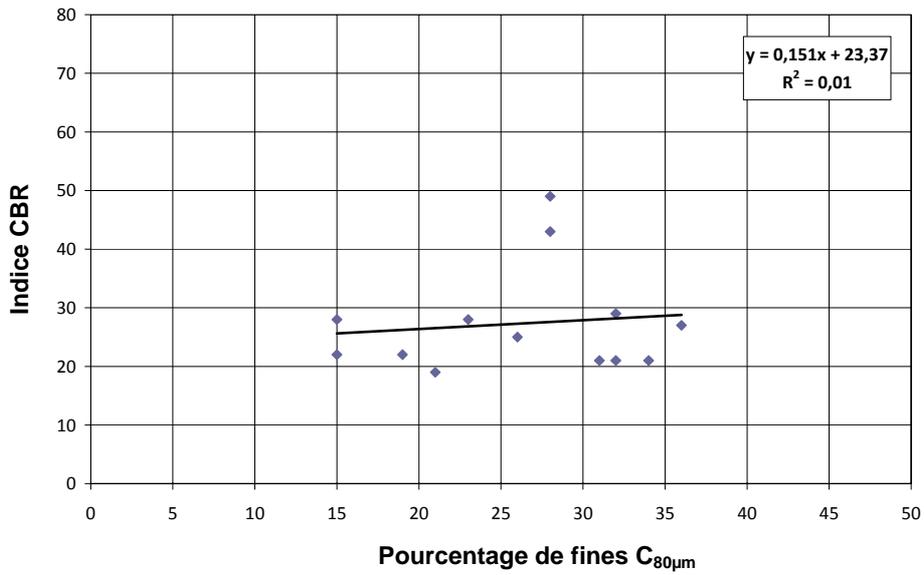


Figure 4.77. Relation entre l'indice CBR et le pourcentage de fines (Itinéraire J)

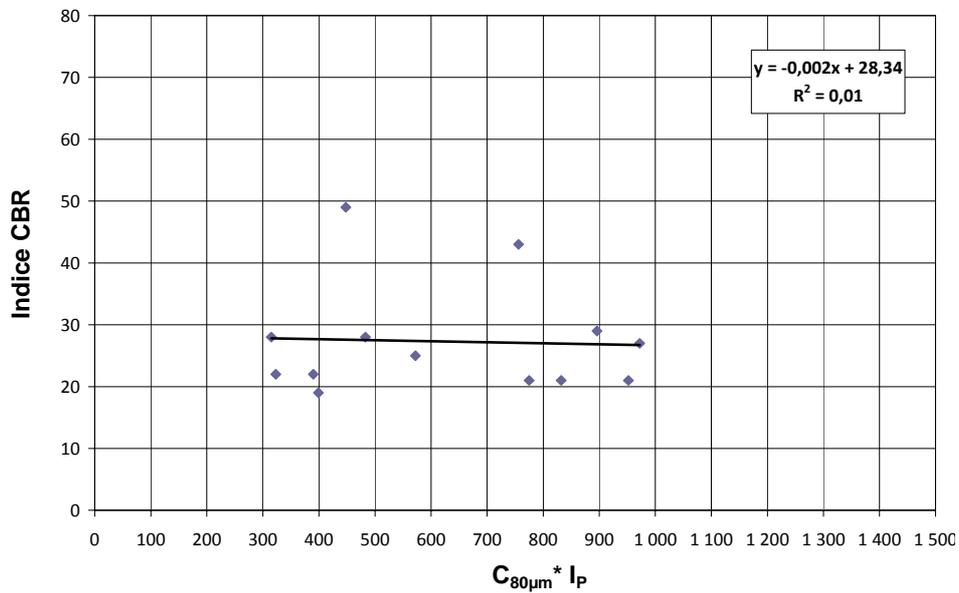


Figure 4.78. Relation entre l'indice CBR et le produit C<sub>80µm</sub> x I<sub>p</sub> (Itinéraire J)

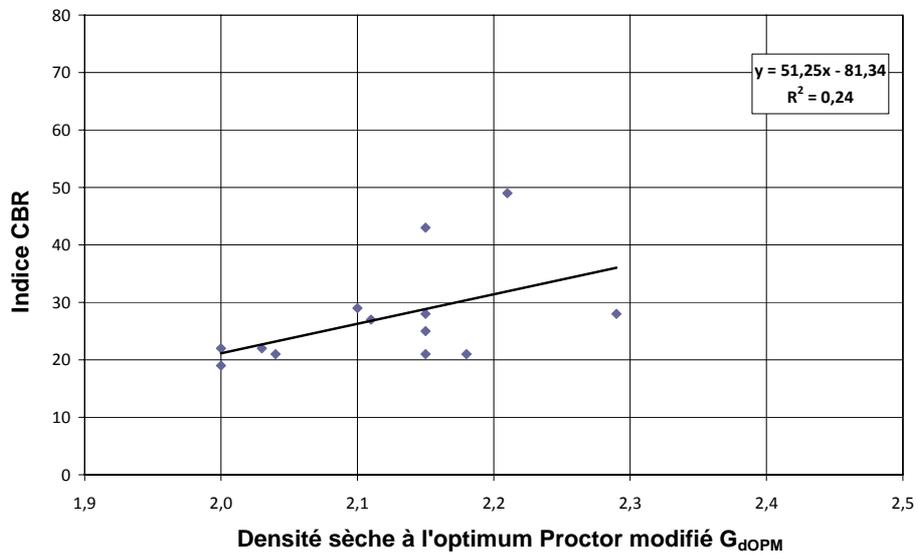


Figure 4.79. Relation entre l'indice CBR et la densité sèche à l'OPM (Itinéraire J)

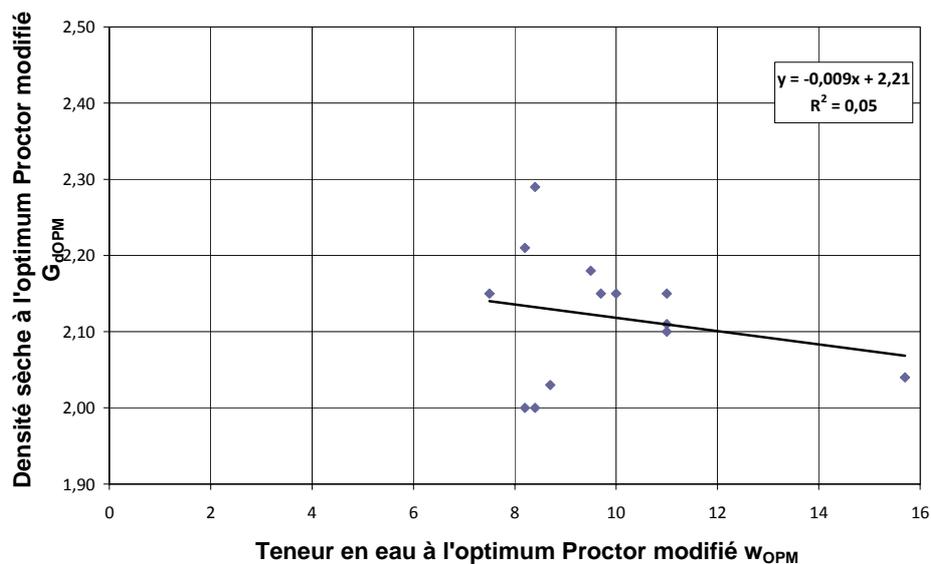


Figure 4.80. Relation entre la densité sèche et la teneur en eau à l'OPM (Itinéraire J)

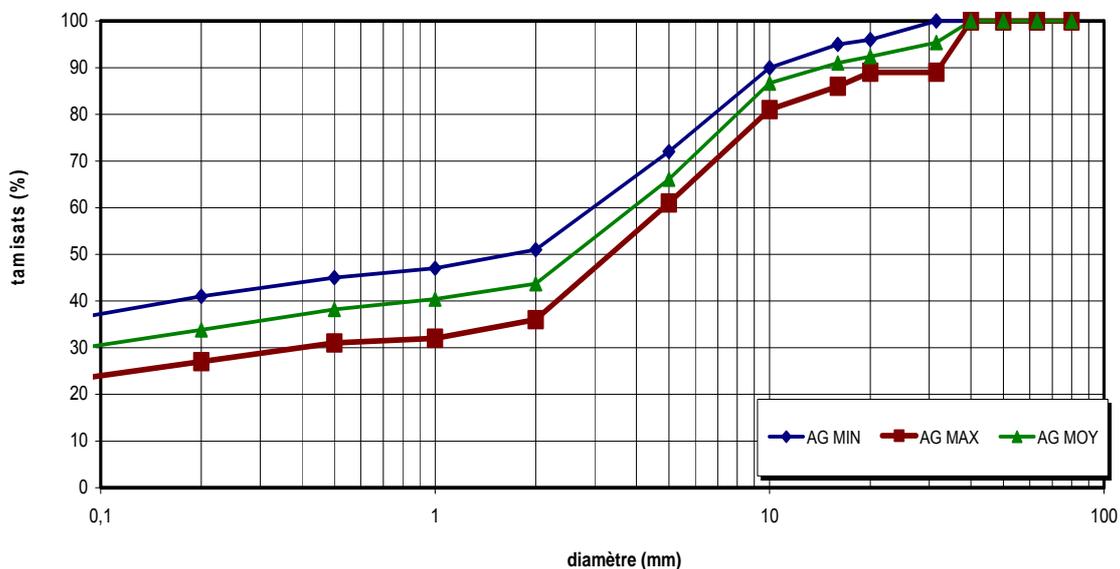


Figure 4.81. Fuseau granulométrique des échantillons prélevés sur l'itinéraire J

Par rapport aux limites d'utilisation fixées dans les recommandations ivoiriennes de 1977, les sols latéritiques de l'itinéraire J (Offoumpo-Céchi) ne vérifient pas les conditions d'emploi en couche de fondation et en couche de base de structure de chaussée, comme on le voit dans le tableau 4.10. Ils peuvent seulement être utilisés en remblai.

Tableau 4.10. Comparaison des sols latéritiques de l'itinéraire J avec les limites des recommandations ivoiriennes pour les couches de chaussée (1977)

Valeurs mesurées et seuils	$I_p$	$I_{CBR,95\%OPM}$	$C_{80\mu m}$ (%)
Itinéraire J (moyenne)	23	27	26
Couche de fondation	< 20	> 30	< 20
Couche de base	< 12	> 60	< 15

### 4.3.3. Analyse globale

Si l'on analyse globalement les 188 prélèvements détaillés dans la section précédente, on peut établir un fuseau granulométrique global (Figure 4.82) et représenter les courbes granulométriques moyennes des dix itinéraires (Figure 4.83).

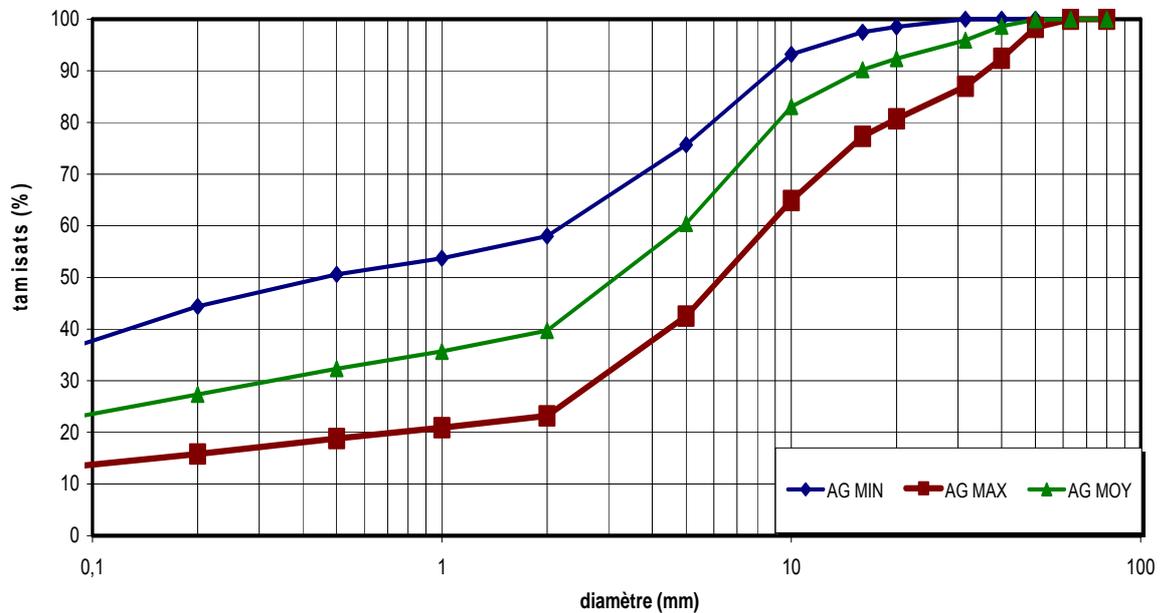


Figure 4.82. Fuseau granulométrique des sols latéritiques de la région de l'Agnéby (Côte d'Ivoire)

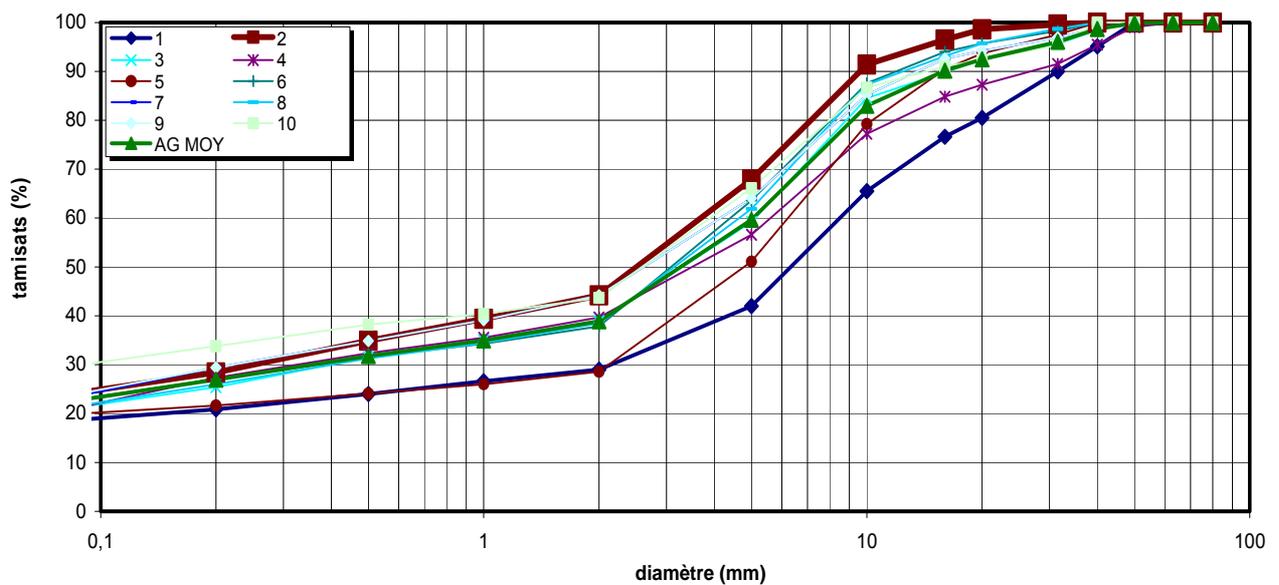


Figure 4.83. Courbes granulométriques moyennes des sols latéritiques des différents itinéraires de la région de l'Agnéby (Côte d'Ivoire)

Les pourcentages de fines moyens ( $C_{80\mu m}$ ) sont compris entre 13 % et 36 %. La valeur moyenne du pourcentage de fines pour les 188 prélèvements est égale à 22 %.

Les propriétés géotechniques moyennes déterminées sur chaque itinéraire sont aussi synthétisées dans le tableau 4.11. Les intervalles de variation des données sont indiqués par itinéraire et pour l'ensemble de la région dans le tableau 4.12.

Tableau 4.11 Variations des caractéristiques géotechniques moyennes des dix itinéraires

Itinéraire	CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES							
	Analyse granulométrique		Essai Proctor		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
	$C_{80\mu m}$	$C_{80\mu m} * I_p$	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_{OPM}$ (%)	$I_{CBR}$	$w_L$	$w_P$	$I_P$
A	21	504	21,3	8,72	31	48		24
B	24	600	21,2	9,67	25	48		25
C	21	462	22	8,2	31	43		22
D	20	420	21,7	8,08	30	42		21
E	20	400	21	6,99	23	40		20
F	22	550	21,3	8,63	41	46		25
G	22	462	21,3	9,31	27	40		21
H	21	483	21,5	9,01	35	46		23
I	23	506	21,5	8,65	29	44		22
J	26	598	21,2	9,79	27	46		23
Intervalle de variation	20-26	400-600	21-22	6,99-9,79	23-35	40-48		20-25

Tableau 4.12 Intervalles de variation des caractéristiques géotechniques pour les dix itinéraires étudiés et pour l'ensemble de la région

Itinéraire	CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES							
	Analyse granulométrique		Essai Proctor		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
	$C_{80\mu m}$	$C_{80\mu m} * I_p$	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_{OPM}$ (%)	$I_{CBR}$	$w_L$	$w_P$	$I_P$
A	12-41	252-1353	1,95-2,32	6,3-13,9	11-49	33-62	15-29	18-35
B	12,41	264-1353	1,95-2,36	6,6-13,9	11-36	33-62	15-29	18-35
C	10-34	180-884	1,96-2,4	5,2-13,8	21-43	28-54	14-28	14-28
D	12-32	195-624	2,05-2,29	5,8-10,6	13-65	28-54	13-28	14-28
E	11-33	143-792	1,96-2,27	5-10,2	14-40	27-50	13-28	11-28
F	11-30	209-840	2,01-2,35	5,9-10,2	30-47	37-59	17-28	19-33
G	10-36	210-756	2,01-2,25	7,8-12,1	15-45	30-53	13-28	16-25
H	9-35	117-840	2,01-2,39	5,9-12,1	15-47	30-61	17-34	13-33
I	14-44	187-1144	1,94-2,35	5,7-13	11-49	27-63	16-33	11-33
J	15-36	315-972	2-2,29	7,5-15,7	19-49	36-53	18-25	16-28
<b>Ensemble</b>	<b>9-44</b>	<b>117-1353</b>	<b>1,94-2,36</b>	<b>5-15,7</b>	<b>11-65</b>	<b>27-63</b>	<b>13-34</b>	<b>11-35</b>

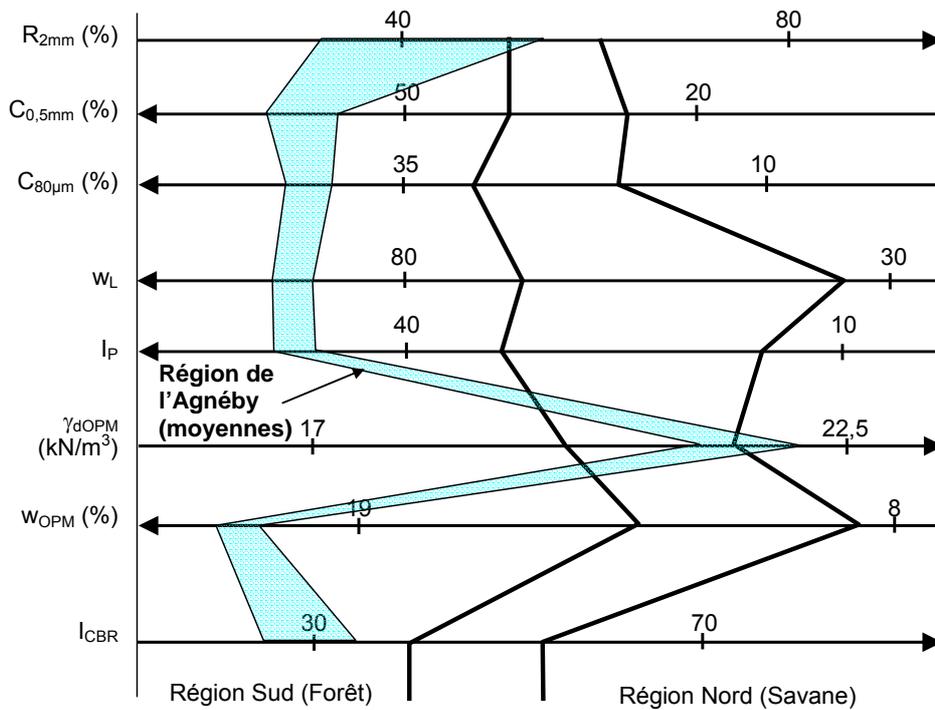
On peut comparer ces valeurs à celles de la classification des graveleux latéritiques présentée en 1977 par le Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP) de Côte d'Ivoire (tableau 4.13). On observe que les sols étudiés dans la région de l'Agnéby sont en moyenne proches de la catégorie G2, mais l'intervalle de variation des caractéristiques des sols prélevés est bien plus large. Cette observation conduit à se demander si les matériaux prélevés seront mélangés ou non lors de leur mise en œuvre. Les données disponibles ne permettent pas de répondre à cette question.

Tableau 4.13 Valeurs de référence de la classification des graveleux latéritiques du LBTP et intervalles de variation des moyennes par itinéraire et des valeurs par prélèvement

Catégorie de graveleux latéritiques	Indice de plasticité $I_p$	Pourcentage de fines $C_{80\mu m}$	Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques analysées		
			Indice CBR à 95% de l'OPM après 4 jours d'immersion	Densité sèche à l'OPM $G_{dOPM}$	Teneur en eau à l'OPM $W_{OPM}$ (%)
G1	5 à 15	5 à 15	30 à 80	2,1 à 2,3	5 à 8
G2	15 à 25	15 à 25	20 à 50	2 à 2,25	9 à 10
G3	25 à 35	25 à 35	15 à 40	1,9 à 2,2	8 à 12
Moyennes Agnéby	20 à 25	20 à 26	23 à 25	2,1 à 2,2	7 à 9,8
Valeurs extrêmes Agnéby	11 à 35	9 à 44	11 à 65	1,94 à 2,36	5 à 15,7

#### 4.3.4. Comparaison avec les courbes de référence établies au Congo

Le diagramme établi au Congo et montrant la différence importante entre les latérites de savane et les latérites de plateau a suscité notre intérêt et nous avons reporté sur ce diagramme les intervalles de variation des moyennes des propriétés déterminées sur les dix itinéraires de notre étude des sols latéritiques de la région forestière de l'Agnéby. La comparaison est présentée sur la figure 4.84. Notons que la prise en compte directe des 188 prélèvements donnerait des intervalles de variation plus larges pour chaque propriété.



Relation empirique :  $I_{CBR} = 0,44 [(R_{2mm} - 30) - (C_{80\mu m} - 10) - (I_p - 10)] + 47,5$

Figure 4.84. Comparaison du diagramme d'identification géotechnique des graveleux latéritiques établi au Congo avec les propriétés des latérites de la région de l'Agnéby (intervalles de variation des valeurs moyennes)

Il apparaît que les propriétés qui ont été déterminées dans notre étude ne sont pas compatibles avec les courbes de référence du diagramme congolais : la densité sèche à l'optimum Proctor modifié n'a pas de valeurs logiques par référence aux deux états définis au Congo. Nous n'avons pas eu la possibilité de rechercher la raison de cette divergence, découverte à la fin de nos travaux, mais c'est certainement un sujet de réflexion important pour la poursuite de ces recherches.

#### 4.4. Conclusion

Les valeurs des paramètres géotechniques des sols latéritiques des 188 prélèvements analysés dans la région de l'Agnéby ont été analysées soit individuellement soit après calcul de moyennes sur les dix itinéraires étudiés. Ces analyses ont confirmé l'existence connue de corrélations entre les paramètres de plasticité des sols. Elles ont aussi montré une certaine uniformité des sols analysés, qui sont tous des latérites de la région forestière de la Côte d'Ivoire. La comparaison avec les conclusions de l'étude effectuée au Congo a rappelé que des latérites d'autres provenances pourraient être sensiblement

différentes, même si la distinction entre latérites de savane et latérites de forêt n'est peut-être pas aussi simple qu'il n'y paraît.

Pour approfondir l'analyse des données, nous avons effectué une analyse factorielle en composantes principales, qui est exposée dans le chapitre suivant.

## Chapitre 5

# ANALYSE STATISTIQUE DES PROPRIÉTÉS DES LATÉRITES DE LA RÉGION DE L'AGNÉBY

### 5.1. Introduction

Pour tenter d'affiner l'analyse des propriétés géotechniques des 188 prélèvements effectués le long des dix itinéraires que nous avons choisis dans la province de l'Agnéby, nous avons appliqué la méthode d'analyse en composantes principales, en utilisant le logiciel Statgraphics.

L'analyse présentée ici porte sur l'ensemble des paramètres géotechniques déterminés sur les dix itinéraires retenus pour l'étude. Avant de présenter les résultats de cette étude, nous rappelons les principes de l'analyse factorielle.

### 5.2. La méthode d'analyse factorielle (Rappels)

L'analyse factorielle cherche à représenter la variabilité d'un ensemble de  $n$  variables aléatoires  $\{X_i\}_{i=1,n}$  par un plus petit nombre  $p$  d'autres variables  $\{Y_j\}_{j=1,p}$  appelées catégories ou facteurs. Ce travail se fait à partir de  $m$  observations des variables  $X_i$ , soit  $\{X_{ik}\}_{i=1,n ; k=1,m}$ .

Pour atteindre cet objectif, on construit par étapes une suite de variables  $Y_j$  qui représentent chacune l'essentiel de la variabilité restante des données. Ce travail peut être représenté comme la recherche des axes principaux des  $m$  points observés dans l'espace à  $n$  dimensions d'axes  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ .

Pour  $n = 3$ , cette procédure est représentée sur la figure 5.1 :

- la première phase est la recherche de l'axe  $Y_1$ , qui passe par le centre de gravité  $G$  des points et minimise la somme des carrés des distances des points  $\{x_{ij}\}$  à ce premier axe ;

- la deuxième phase est la recherche de l'axe principal d'inertie  $Y_2$  dans le plan passant par  $G$  et perpendiculaire à l'axe  $Y_1$ . La procédure est la même que pour  $Y_1$  : on cherche l'orientation de l'axe  $Y_2$  qui minimise la somme des carrés des distances des points au plan  $Y_1Y_2$  ;

- le troisième axe est perpendiculaire aux deux premiers.

Quand il existe plus de trois variables  $X_i$ , la procédure est la même avec un axe principal  $Y_1$  et des axes successifs définis par minimisation par rapport à des hyperplans.

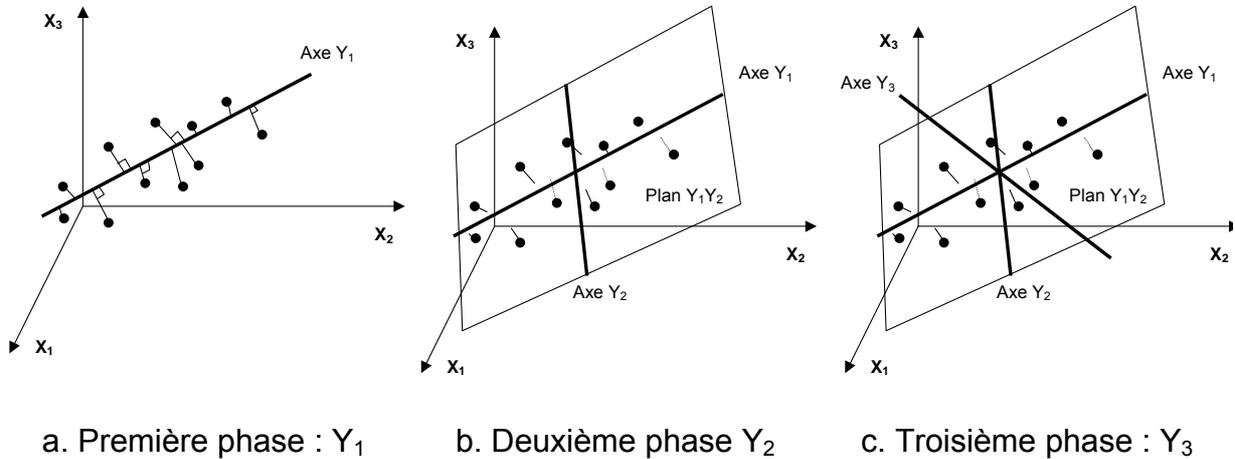


Figure 5.1. Procédure de recherche des axes principaux d'inertie

L'expression mathématique de la procédure de recherche des axes  $\{Y_j\}$  est décrite dans divers ouvrages (Berthier et Bouroche, 1977 ; Dagnelie, 1975 ; Lebart et al., 1982). Elle est brièvement rappelée ci-après.

La relation cherchée entre les  $n$  variables  $\{X_i\}$  et les  $p$  variables  $\{Y_j\}$  peut s'écrire sous la forme générale :

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ \dots \\ Y_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{11} & \dots & u_{1n} \\ \dots & u_{ji} & \dots \\ u_{p1} & \dots & u_{pn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ \dots \\ X_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \dots \\ \varepsilon_p \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

$$\{Y\} = \{U\} \{X\} + \{\varepsilon\}$$

où  $\{\varepsilon\}$  est la matrice des résidus (écarts entre les valeurs réelles et les valeurs calculées) de la relation. La matrice  $\{U\}$ , pour sa part, est la matrice de passage du repère orthonormé des variables  $\{X_i\}$  au repère orthonormé des nouvelles variables  $\{Y_j\}$ . Cette matrice contient les coordonnées en ligne des vecteurs unitaires des axes  $\{Y_j\}$  par rapport à la base des vecteurs unitaires des axes  $\{X_i\}$ .

Compte tenu de son origine, la matrice  $\{U\}$  a les propriétés suivantes :

$$\sum_i u_{ji}^2 = 1 \text{ (vecteur unitaires)} \quad (5.2)$$

et

$$\sum_i u_{ji} u_{ki} = 0 \text{ pour } j \neq k \text{ (vecteurs orthogonaux par deux)}. \quad (5.3)$$

Par conséquent, la matrice  $\{U\}$  est telle que  $\{U\}\{U\}^t = \{1\}$  (matrice unité) et  $\{U\}^t$  est l'inverse de  $\{U\}$ .

Les points  $P_k$  observés ( $m$  valeurs des  $\{X_i\}$ , soit  $\{x_{ik}\}$ ) ont pour coordonnées dans le nouveau repère des  $\{Y_j\}$  :

$$\{y_{jk}\} = \{u_{ij}\} \{x_{ik}\}. \quad (5.4)$$

Dans ces matrices, les coordonnées des points  $P_k$  sont rangées en colonnes et les  $\{y_{jk}\}$  correspondants en lignes.

Si l'origine des axes est placée au centre de gravité  $G$  des points  $P_k$ , la distance entre le point  $G$  et la projection  $H_{k1}$  d'un point  $P_k$  sur l'axe portant la variable  $Y_1$  (Figure 5.2), vaut

$$\{y_{1k}\} = \{u_{1i}\} \{x_{ik}\}. \quad (5.5)$$

Le carré de cette distance est égal à

$$|GH_{k1}|^2 = \{u_{1i}\} \{x_{ik}\} \{x_{ik}\}^t \{u_{1i}\}^t = \sum_i u_{1i}^2 x_{ik}^2. \quad (5.6)$$

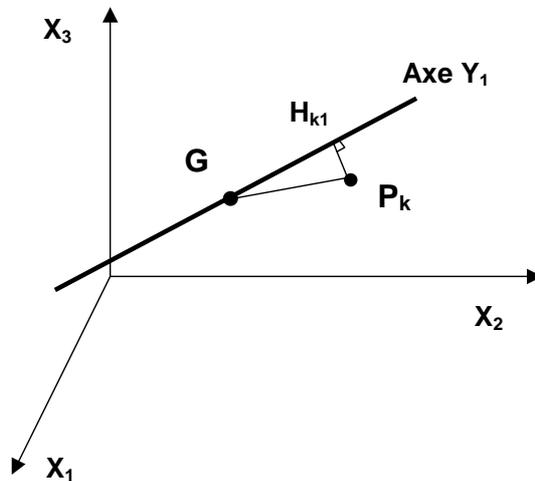


Figure 5.2. Distance du point  $P_k$  à l'axe  $Y_1$ .

La somme  $\Sigma^2$  des carrés des distances  $GH_{k1}$  pour tous les points  $P_k$  est donnée par le produit de matrices

$$\Sigma^2 = \{y_{1k}\} \{y_{1k}\}^t = \{u_{1i}\} \{x_{ik}\} \{x_{ik}\}^t \{u_{1i}\}^t. \quad (5.7)$$

La somme des carrés des distances des points  $P_k$  à l'axe  $GY_1$  est égale à

$$\sum_k H_{k1} P_k^2 = \sum_k G P_k^2 - \sum_k G H_{k1}^2. \quad (5.8)$$

Comme  $\sum_k GP_k^2$  est constant pour un ensemble de points  $P_k$  donné, minimiser  $\sum_k H_{k1}P_k^2$

revient à maximiser  $\sum_k GH_{k1}^2 = \Sigma^2$ .

Pour maximiser  $\Sigma^2$  par le choix optimal de l'axe  $GY_1$ , on procède de la façon suivante.

On recherche le vecteur unitaire de  $GY_1$  de composantes  $\{u_{1i}\}$  sur la base orthonormée des  $\{X_i\}$  qui maximise le produit  $\{u_{1i}\}\{x_{ik}\}\{x_{ik}\}^t\{u_{1i}\}^t$ .

La matrice  $\{A\} = \{x_{ik}\}\{x_{ik}\}^t$  est symétrique et définie positive, donc diagonalisable, avec des valeurs propres positives. Soit  $\{B\}$  la matrice des coordonnées en colonnes des vecteurs propres unitaires de  $\{A\}$  dans le repère des  $\{X_i\}$  et  $\{\Lambda\}$  la matrice de ses valeurs propres :

$$\{B\} = \{b_{\alpha i}\} \quad \{\Lambda\} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_n \end{bmatrix}. \quad (5.9)$$

On peut écrire

$$\{A\}\{B\} = \{B\}\{\Lambda\} \quad (5.10)$$

d'où

$$\{A\} = \{B\}\{\Lambda\}\{B\}^t \quad \text{car} \quad \{B\}\{B\}^t = \{1\}. \quad (5.11)$$

Si l'on écrit les coordonnées des vecteurs propres unitaires  $\{b_{\alpha i}\}$  dans leur repère (qui est celui des  $Y_j$  cherchés), on obtient une nouvelle matrice

$$\{C\} = \{c_{\alpha j}\} = \{B\}^t \{U\}^t, \quad (5.12)$$

et l'on peut écrire que

$$\{U\}\{X\}\{X\}^t\{U\}^t = \{U\}\{B\}\{\Lambda\}\{B\}^t\{U\}^t = \{C\}^t\{\Lambda\}\{C\}. \quad (5.13)$$

La condition  $\{U\}^t\{U\} = \{1\}$  devient alors

$$\{C\}^t\{C\} = \{U\}\{B\}\{B\}^t\{U\}^t = \{U\}\{U\}^t = \{1\}. \quad (5.14)$$

La maximisation de  $\{U\}\{X\}\{X\}^t\{U\}^t$  pour la première direction propre correspond donc à celle de l'expression

$$\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} c_{\alpha 1}^2 \quad (5.15)$$

sous la condition  $\sum_{\alpha} c_{\alpha 1}^2 = 1$ .

En effet, les  $c_{\alpha 1}$  sont les coordonnées des vecteurs propres unitaires sur la première direction propre. On peut remplir les conditions imposées en choisissant la direction propre associée à la plus grande valeur propre  $\lambda_1$ . On a ainsi déterminé l'orientation du premier facteur  $Y_1$ .

La procédure se continue en utilisant successivement les valeurs propres et directions propres dans l'ordre décroissant des valeurs propres.

Si l'on détermine également les valeurs propres  $\mu_\alpha$  de la matrice  $X^t X$  et les vecteurs propres unitaires  $v_\alpha$  correspondants, on démontre que

$$\lambda_\alpha = \mu_\alpha \quad , \quad (5.16)$$

$$Xv_\alpha = \sqrt{\lambda_\alpha} u_\alpha \quad , \quad (5.17)$$

d'où

$$X = \sum_{\alpha=1}^{\alpha=p} \sqrt{\lambda_\alpha} v_\alpha u_\alpha^t \quad . \quad (5.18)$$

Le taux d'inertie ou part de variance expliquée

$$\tau_p = \frac{\sum_{\alpha=1}^p \lambda_\alpha}{\sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha} \quad (5.19)$$

permet d'apprécier la qualité de la représentation des  $X_i$  par les  $Y_j$ .

### 5.3. Application à l'analyse des données de la région de l'Agnéby

#### a. Généralités

Cette analyse statistique de nos données a pour but de voir si l'utilisation de l'analyse factorielle, sous la forme de l'analyse en composantes principales peut apporter des résultats différents des analyses déjà effectuées par l'établissement des corrélations et des régressions linéaires effectuées au chapitre précédent.

La méthode d'analyse en composantes principales permet d'étudier un tableau d'individus  $X$  variables dans le cas où toutes les variables ont des valeurs numériques. La méthode permet d'obtenir une carte des individus en fonction de leurs proximités et une carte des variables en fonction de leurs corrélations. Il est également possible d'obtenir une représentation simultanée (Biplot). La possibilité d'analyser des individus et des variables supplémentaires (quantitatives ou qualitatives) est offerte.

Les analyses en composantes principales présentées ont été réalisées au moyen du logiciel STATGRAPHICS – UNWIN PLUS. Le calcul traite le tableau des valeurs des variables pour les 188 prélèvements de notre étude et fournit :

- un vecteur contenant les valeurs propres, qui expriment la variance de chaque composante principale,
- une matrice contenant les vecteurs propres, qui sont les pondérations à appliquer aux variables pour obtenir les facteurs,
- une matrice contenant les corrélations entre les variables de départ et les facteurs (utile à l'interprétation des facteurs).

La projection des individus et des caractères est réalisée sur l'espace principal considéré.

En général, comme nous avons pu le vérifier, le plan défini par les deux premiers axes factoriels comprend un pourcentage important de l'information.

L'interprétation des résultats et de leurs représentations graphiques conduit aux informations suivantes :

- l'origine des axes G est le centre de gravité du nuage : il représente la tendance moyenne des individus. Les individus situés loin du centre présentent un écart important par rapport à cette moyenne et influencent beaucoup les statistiques ;
- l'inertie d'un axe, représentée par la valeur propre associée à son vecteur directeur, témoigne de la représentativité de cet axe par rapport au nuage de points : plus l'inertie du plan est forte, plus la projection du nuage sur ce plan est réaliste avec un minimum de perte d'information ;
- les coordonnées des points sur les axes factoriels sont les coefficients de corrélation des individus qu'ils représentent avec ces axes. La valeur du produit scalaire des vecteurs joignant deux points à l'origine est le coefficient de corrélation entre les deux variables correspondantes : des vecteurs voisins indiquent des variables fortement corrélées ;
- la proximité, dans le plan, d'individus et de variables n'a pas de signification. Un lien entre ces paramètres nécessite une interprétation de la signification des facteurs.

### ***b. Données analysées***

Les neuf paramètres géotechniques qui ont fait l'objet de l'analyse statistique sont :

- le pourcentage de fines ( $C_{80\mu m}$ ),
- le produit du pourcentage de fines ( $C_{80\mu m}$ ) et de l'indice de plasticité ( $I_P$ ),
- la densité sèche maximale à l'optimum Proctor modifié ( $G_{dOPM} = \gamma_{dOPM}/\gamma_w$ ),

- la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié ( $w_{OPM}$ ),
- l'indice portant CBR ( $I_{CBR}$ ),
- la limite de liquidité ( $w_L$ ),
- la limite de plasticité ( $w_P$ ),
- l'indice de plasticité ( $I_P$ ),
- la valeur de  $D_{90}$  (mm).

Leurs valeurs sont rassemblées dans le tableau 5.1. Pour faciliter le traitement par Statgraphics, les prélèvements ont reçu un nouveau code constitué d'un chiffre pour l'itinéraire (A-100, B-200, C-300, D-400, E-500, F-600, G-700, H-800, I-900, J-1000) et du même numéro d'ordre de prélèvement).

Tableau 5.1. Valeurs des paramètres géotechniques analysés

Nom	$C_{80\mu m}$	$C_{80\mu m} * I_P$	$G_{dOPM}$	$w_{OPM}$	$I_{CBR}$	$w_L$	$w_P$	$I_P$	$D_{90}(mm)$
101	18	360	2,17	7	37	40	20	20	30
102	17	442	2,09	8,3	28	53	27	26	20
103	26	546	2,04	9	35	44	23	21	35
104	19	608	2,18	9,6	27	59	27	32	30
105	14	308	2,24	6,5	48	45	23	22	40
106	14	294	2,16	7,8	35	46	25	21	36
107	14	252	2,11	6,3	48	42	24	18	37
108	26	546	2,19	6,8	28	43	22	21	28
109	17	323	2,18	7,3	37	45	26	19	32
110	14	266	2,2	6,8	49	46	27	19	29
111	15	360	2,32	6,7	45	49	25	24	14
112	31	868	1,97	12,8	19	51	23	28	19
113	27	783	2	12,1	11	58	29	29	9
114	15	330	2,18	8,4	33	45	23	22	14
115	27	621	2,1	8,8	20	46	23	23	28
116	28	980	2,04	9,2	27	62	27	35	8,5
117	22	616	2,08	10,1	31	52	24	28	9
118	18	324	2,25	7,3	22	33	15	18	10
119	41	1 353	1,95	13,9	18	57	24	33	9,2
120	17	357	2,2	8,7	36	42	21	21	9
121	12	264	2,16	9,7	25	42	20	22	16
201	31	868	1,97	12,8	19	51	23	28	9,2
202	27	783	2	12,1	11	58	29	29	9
203	15	330	2,18	8,4	33	45	23	22	10,5
204	27	621	2,1	8,8	20	46	23	23	5
205	28	980	2,04	9,2	27	62	27	35	8,6
206	22	616	2,08	10,1	31	52	24	28	9
207	18	324	2,25	7,3	22	33	15	18	10
208	41	1 353	1,95	13,9	18	57	24	33	7
209	17	357	2,2	8,7	36	42	21	21	9
210	12	264	2,16	9,7	25	42	20	22	10,6
211	27	675	2,36	6,6	26	49	24	25	5
212	28	644	2,24	7,1	24	41	18	23	8,5
213	22	506	2,08	11	32	51	28	23	9

<b>Nom</b>	<b>C<sub>80μm</sub></b>	<b>C<sub>80μm</sub>*I<sub>p</sub></b>	<b>G<sub>dOPM</sub></b>	<b>W<sub>OPM</sub></b>	<b>I<sub>CBR</sub></b>	<b>W<sub>L</sub></b>	<b>W<sub>P</sub></b>	<b>I<sub>p</sub></b>	<b>D<sub>90</sub>(mm)</b>
301	23	644	2,27	6,3	39	54	26	28	32
302	34	884	2,03	8,5	42	49	23	26	20
303	31	465	2,35	6,5	38	34	19	15	9,2
304	29	696	2,14	8,8	35	52	28	24	40
305	17	323	2,27	8	43	39	20	19	20
306	10	230	2,4	6,5	21	49	26	23	10,6
307	11	231	2,35	5,2	30	41	20	21	20
308	17	323	2,12	9,7	25	39	20	19	20
309	27	567	2,01	8,9	40	45	24	21	42
310	24	552	2,18	8,8	22	45	22	23	9
311	10	180	2,25	8,3	26	34	16	18	9,5
312	23	322	1,96	13,8	24	28	14	14	10,4
313	17	459	2,35	6,1	32	47	20	27	9
314	24	600	2,29	7,4	21	45	20	25	9,2
315	16	352	2,07	10,2	28	43	21	22	9
401	20	560	2,11	7,7	13	54	26	28	50
402	24	624	2,11	7	20	49	23	26	44
403	13	195	2,2	5,8	65	34	19	15	40
404	22	528	2,15	7,2	33	52	28	24	45
405	12	228	2,15	5,8	31	39	20	19	38
406	22	506	2,15	6,7	43	49	26	23	35
407	16	336	2,28	6,3	40	41	20	21	42
408	20	380	2,21	8,4	39	39	20	19	40
409	18	378	2,12	7,2	42	45	24	21	35
410	20	460	2,14	9,2	38	45	22	23	54
411	18	324	2,16	7,2	35	34	16	18	27
412	23	322	2,27	6,3	43	28	14	14	20
413	21	567	2,22	7,5	21	47	20	27	45
414	22	550	2,22	8,2	30	45	20	25	16
415	22	484	2,22	8,2	25	43	21	22	24
416	19	342	2,22	8	40	42	24	18	28
417	18	360	2,11	6	22	42	22	20	52
418	22	550	2,09	8,2	26	49	24	25	30
419	21	483	2,1	9,2	24	41	18	23	34
420	18	414	2,1	8,8	32	51	28	23	32
421	25	550	2,05	9,1	21	42	20	22	30
422	22	484	2,18	8	28	35	13	22	33
423	15	315	2,25	8	40	40	19	21	22
424	14	308	2,19	8,9	30	41	19	22	18
425	22	484	2,14	8,7	29	43	21	22	17
426	23	529	2,18	10,6	35	45	22	23	12
427	26	572	2,17	8,7	33	42	20	22	9,5
428	32	608	2,14	9,2	47	39	20	19	8,4
429	20	320	2,2	7,6	32	34	18	16	10,3
430	21	420	2,13	8,1	30	41	21	20	21
431	22	440	2,12	9,3	35	40	20	20	12
432	18	324	2,22	7,8	30	38	20	18	33
433	22	418	2,2	8,2	24	40	21	19	9,5
434	21	399	2,19	9,3	19	37	18	19	9,7
435	15	390	2,19	9	22	49	23	26	33
436	19	323	2,29	8	22	36	19	17	24
437	24	456	2,12	9,5	14	36	17	19	15

Nom	C <sub>80µm</sub>	C <sub>80µm</sub> *I <sub>p</sub>	G <sub>dOPM</sub>	W <sub>OPM</sub>	I <sub>CBR</sub>	W <sub>L</sub>	W <sub>P</sub>	I <sub>p</sub>	D <sub>90</sub> (mm)
438	16	288	2,21	7,75	18	36	18	18	21
439	24	552	2,23	8,4	22	41	18	23	20
440	21	441	2,21	10	24	43	22	21	15
501	22	572	2,08	8,3	19	49	23	26	18
502	25	475	1,97	5	22	39	20	19	11
503	21	588	2,12	7	22	50	22	28	19
504	24	504	2	10,2	14	35	14	21	11
505	13	143	2,16	5	18	27	16	11	20
506	11	187	1,96	5	22	36	19	17	20
507	14	294	2,15	6,4	24	43	22	21	16
508	15	330	2,09	6,3	21	47	25	22	28
509	33	792	2,06	8	30	49	25	24	14
510	20	460	2,14	9,2	25	45	22	23	38
511	18	324	2,16	7,2	40	34	16	18	27
512	23	322	2,27	6,3	22	28	14	14	20
601	24	792	2,16	9	47	59	26	33	9,5
602	30	840	2,15	9,8	30	56	28	28	9,8
603	21	546	2,14	6,7	47	47	21	26	27
604	21	420	2,11	9	44	42	22	20	17
605	11	209	2,35	5,9	40	37	18	19	10
606	23	529	2,01	9,8	39	41	18	23	7
607	27	675	2,02	10,2	43	42	17	25	8
701	17	289	2,21	7,8	22	31	14	17	8,5
702	11	242	2,25	8,4	38	40	18	22	25
703	19	437	2,11	9,7	20	41	18	23	20
704	23	483	2,06	9,9	22	40	19	21	30
705	17	357	2,13	8,4	26	41	20	21	9,2
706	33	561	2,04	10,2	22	30	13	17	20
707	17	340	2,25	8,3	27	36	16	20	35
708	10	210	2,01	10	32	43	22	21	25
709	22	352	2,06	9,7	36	35	19	16	20
710	36	756	2,16	8,6	19	38	17	21	7
711	22	550	2,09	8,8	30	53	28	25	18
712	18	378	2,25	7,8	36	43	22	21	17
713	35	735	2,01	12,1	15	38	17	21	8,2
714	23	483	2,12	11,6	17	44	23	21	10
715	24	528	2,15	8,3	45	46	24	22	18
801	24	792	2,16	9	47	59	26	33	9,5
802	30	840	2,15	9,8	30	56	28	28	10
803	21	546	2,14	6,7	47	47	21	26	28
804	21	420	2,11	9	44	42	22	20	17
805	11	209	2,35	5,9	40	37	18	19	10
806	23	529	2,01	9,8	42	41	18	23	8
807	27	675	2,02	10,2	42	42	17	25	8
808	26	520	2,17	7,8	32	42	22	20	9
809	9	117	2,39	6,5	36	30	17	13	10
810	16	432	2,14	11	19	61	34	27	11
811	16	464	2,19	9	30	56	27	29	20
812	11	275	2,12	8,5	36	51	26	25	17
813	35	735	2,01	12,1	15	38	17	21	6,8
814	23	483	2,12	11,6	17	44	23	21	8,7
815	24	528	2,15	8,3	45	46	24	22	8

Nom	C <sub>80µm</sub>	C <sub>80µm</sub> * I <sub>p</sub>	G <sub>dOPM</sub>	W <sub>OPM</sub>	I <sub>CBR</sub>	W <sub>L</sub>	W <sub>P</sub>	I <sub>P</sub>	D <sub>90</sub> (mm)
901	21	378	2,27	8,9	33	43	25	18	14
902	29	667	2,21	9,6	36	45	22	23	8,5
903	28	588	2,13	10,3	34	42	21	21	8,5
904	30	840	2,03	11,3	40	50	22	28	13
905	27	621	2,12	10	29	45	22	23	41
906	39	975	2,07	11,1	30	48	23	25	10
907	21	483	2,2	8,4	40	44	21	23	9,8
908	17	187	2,26	6,5	49	27	16	11	8,5
909	18	378	2,2	8,8	34	39	18	21	42
910	20	400	2,2	5,7	36	37	17	20	12
911	26	624	2,12	10,5	21	45	21	24	26
912	22	462	2,2	9	47	38	17	21	23
913	22	418	2,24	7,9	25	38	19	19	10
914	44	1 144	1,99	13	20	47	21	26	7
915	29	783	2,02	11,6	14	49	22	27	22
916	29	725	2,12	9,3	30	46	21	25	12
917	16	528	2,09	6,4	13	56	23	33	18
918	15	285	2,35	7,8	28	42	23	19	17
919	24	456	2,29	8,1	22	42	23	19	9
920	14	350	2,31	7,8	31	51	26	25	10
921	19	399	2,05	7,3	11	42	21	21	40
922	15	315	2,21	6,5	25	43	22	21	32
923	15	270	2,16	6,3	19	36	18	18	33
924	22	352	2,12	7,1	23	37	21	16	33
925	18	252	2,1	7,5	20	38	24	14	20
927	18	486	2,13	6,6	38	50	23	27	14
928	26	702	2,11	8,4	41	56	29	27	12
929	37	1 110	1,94	11,7	17	63	33	30	12
930	17	238	2,17	6,5	20	32	18	14	10
931	19	361	2,16	7,3	20	43	24	19	13
932	29	667	2,06	10,3	32	44	21	23	11
933	20	400	2,13	7,7	30	40	20	20	17
934	27	675	2,06	10	40	46	21	25	12
935	24	504	2,14	9	30	43	22	21	10
1001	34	952	2,15	9,7	21	52	24	28	14
1002	31	775	2,18	9,5	21	47	22	25	12
1003	23	483	2,29	8,4	28	43	22	21	10
1004	15	315	2,15	7,5	28	39	18	21	20
1005	26	572	2,15	10	25	47	25	22	14
1006	32	896	2,1	11	29	53	25	28	11
1007	28	448	2,21	8,2	49	36	20	16	13
1008	36	972	2,11	11	27	51	24	27	20
1009	32	832	2,04	15,7	21	50	24	26	14
1010	28	756	2,15	11	43	52	25	27	32
1011	21	399	2	8,2	19	37	18	19	50
1012	15	390	2,03	8,7	22	49	23	26	41
1013	19	323	2	8,4	22	36	19	17	26

L'analyse a été menée en composantes principales normées et centrées, pour éliminer l'influence des ordres de grandeur des valeurs des variables analysées (certaines ont des valeurs beaucoup plus grandes que les autres et elles peuvent influencer inutilement les résultats si l'analyse est menée sur les valeurs brutes).



### c2. Individus et variables de base (Biplot factoriel 1-2)

Les variables de base sont représentées par des vecteurs et les individus par des points sur la figure 5.4.

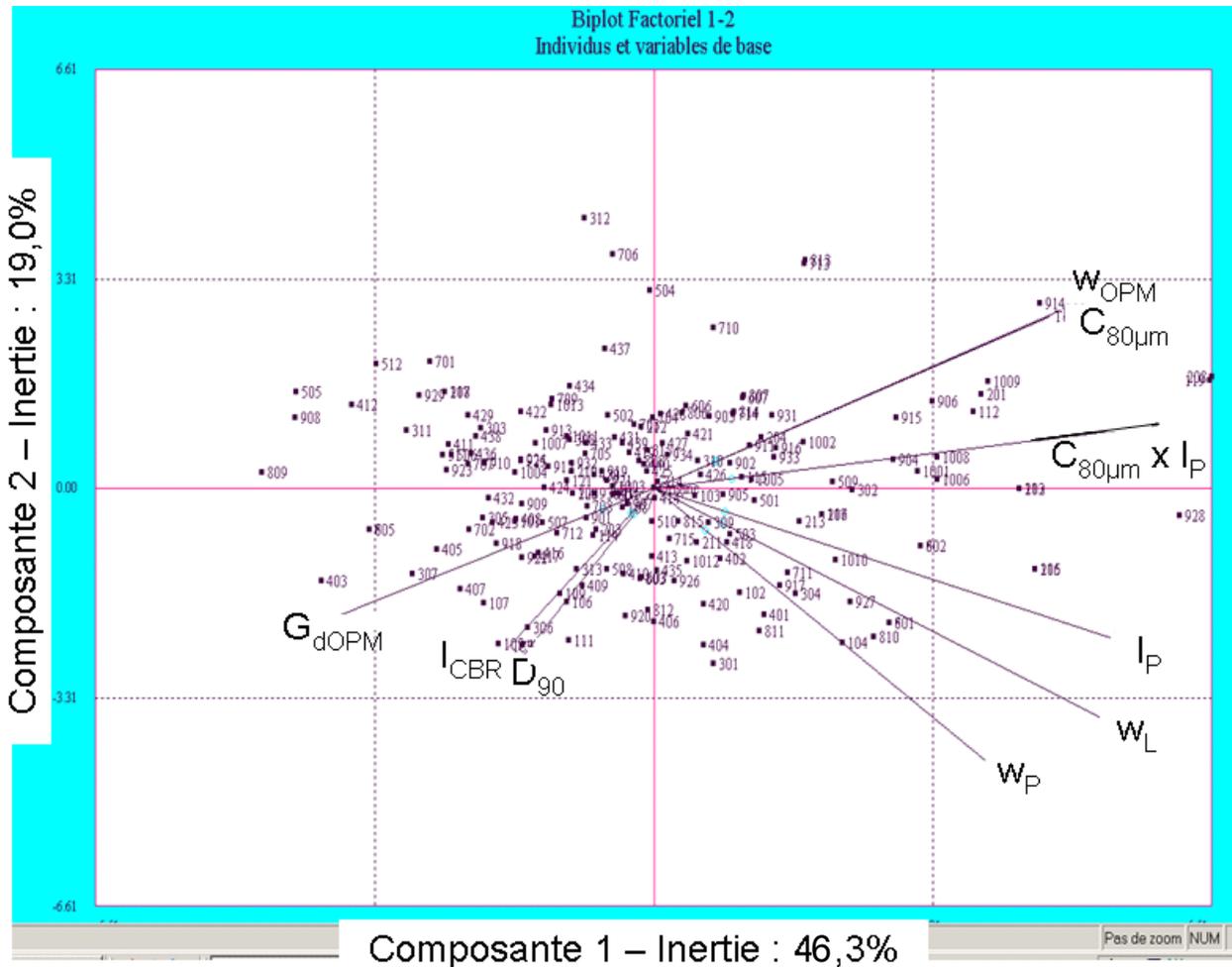


Figure 5.4. Représentation des individus et des variables de base sur le biplot factoriel 1-2

### c3. Représentation des corrélations des variables de base

Les variables sont représentées dans le plan des deux premiers axes factoriels sur la figure 5.5. Les variables sont d'autant mieux corrélées aux axes principaux qu'elles sont proches du cercle. Elles sont d'autant mieux corrélées à l'axe principal (axe 1) que le point représentatif est proche de cet axe sur le cercle.

On voit ainsi que le produit  $C_{80\mu m} \times I_P$  est la variable la plus proche de l'axe factoriel principal, qui explique 46,3% de la variance totale de l'ensemble des individus. Cette variable joue donc un rôle important dans la classification des sols latéritiques, comme c'est le cas dans les pratiques de certains pays d'Afrique tropicale.

Les limites d'Atterberg sont aussi proches du cercle (et proches les unes des autres) ce qui signifie qu'elles sont bien représentées par les deux premiers axes factoriels (et qu'elles sont assez bien corrélées les unes avec les autres). C'est le cas aussi pour le pourcentage des particules fines  $C_{80\mu\text{m}}$  et la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié.

On note d'autre part la proximité de l'indice CBR et de  $D_{90}$ .

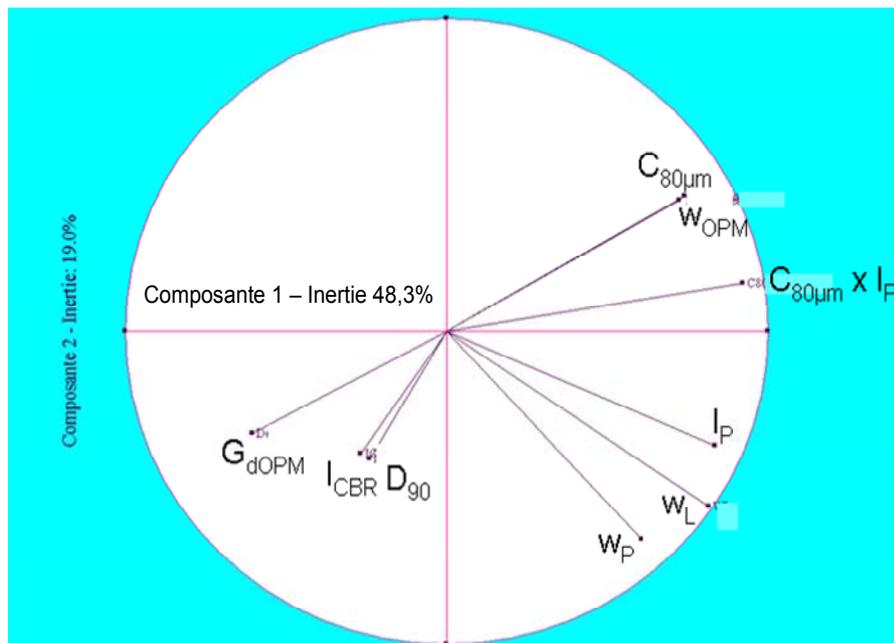


Figure 5.5. Représentation des variables de base sur le cercle de corrélation

#### c4. Autres résultats

L'analyse factorielle fournit aussi de nombreux autres résultats numériques :

- moyennes et écarts types des variables (Tableau 5.2). La diversité des valeurs confirme l'intérêt d'avoir effectué l'analyse en composantes normées ;
- coefficients de corrélation des variables deux à deux (Tableau 5.3). L'analyse des corrélations directes reste une composante essentielle de l'analyse des données. Toutes les variables ne sont pas équivalentes du point de vue de l'utilisation des latérites en construction routière. Si le produit «  $C_{80\mu\text{m}} \times I_P$  » explique le mieux la variabilité des données analysées, il est mal corrélé aux paramètres de comportement routier que sont la densité sèche optimale ( $G_{dOPM}$ ) et l'indice portant CBR ( $I_{CBR}$ ) et n'est donc pas le paramètre « miracle » espéré ;
- les pourcentages d'inertie expliqués par chaque axe (Tableau 5.4),
- les coordonnées des axes par rapport aux variables initiales (Tableau 5.5).

Tableau 5.2. Moyennes et écarts types des variables

	Moyenne	Écart type
$C_{80\mu m}$ (%)	21,9	6,7
$C_{80\mu m} \times I_P$	500	219
Densité sèche OPM $G_{dOPM}$	2,15	0,095
Teneur en eau $w_{OPM}$	8,6	1,85
$I_{CBR}$	29,7	9,75
$w_L$	43,9	7,3
$w_P$	21,6	3,73
$I_P$	22,3	4,4
$D_{90}$ (mm)	19,4	11,52

Tableau 5.3. Matrice de corrélation des variables

	$C_{80\mu m}$	$C_{80\mu m} \times I_P$	$G_{dOPM}$	$w_{OPM}$	$I_{CBR}$	$w_L$	$w_P$	$I_P$	$D_{90}$
$C_{80\mu m}$	1	0,90	-0,47	0,61	-0,18	0,32	0,15	0,40	-0,28
$C_{80\mu m} \times I_P$	0,9	1	0,50	0,64	0,19	0,64	0,39	0,74	0,25
$G_{dOPM}$	-0,47	-0,50	1	-0,58	0,27	-0,29	-0,17	-0,33	-0,02
$w_{OPM}$	0,61	0,64	-0,58	1	-0,28	0,36	0,20	0,42	-0,31
$I_{CBR}$	-0,18	-0,19	0,27	-0,28	1	-0,07	0,02	-0,13	0,09
$w_L$	0,32	0,64	-0,29	0,36	-0,07	1	0,88	0,91	-0,04
$w_P$	0,15	0,39	-0,17	0,20	0,02	0,88	1	0,61	0,04
$I_P$	0,40	0,74	-0,33	0,42	-0,13	0,91	0,61	1	-0,10
$D_{90}$	-0,28	-0,25	-0,02	-0,31	0,09	-0,04	0,04	-0,10	1

Tableau 5.4. Tableau des inerties

Axe	Valeur propre	% variance	% cumulé	Variation
1	4,166	46,288	46,288	0,00000
2	1,707	18,969	65,257	27,318
3	1,042	11,573	76,830	7,397
4	0,848	9,418	86,248	2,154
5	0,556	6,173	92,421	3,246
6	0,342	3,795	96,216	2,378
7	0,328	3,644	99,860	0,151
8	0,013	0,140	100	3,505
9	0	0	100	0,140

Tableau 5.5. Tableau des vecteurs propres

	Vecteur 1	Vecteur 2	Vecteur 3
$C_{80\mu m}$	0,36430	0,33253	- 0,13210
$C_{80\mu m} \times I_P$	0,45249	0,11812	-0,11334
$G_{dOPM}$	-0,29571	-0,25020	-0,46659
$W_{OPM}$ (%)	0,35554	0,32195	0,02289
$I_{CBR}$	-0,13080	-0,29847	-0,47230
$W_L$	0,40041	-0,42932	-0,02156
$W_P$	0,29814	-0,51031	0,00169
$I_P$	0,41061	-0,27922	-0,03710
$D_{90}$ (mm)	-0,11730	-0,31216	0,72565

#### 5.4. Conclusion

Le but de cette étude statistique par analyse en composantes principales était de mettre en évidence d'éventuelles relations entre les variables analysées qui viennent compléter les corrélations classiquement obtenues et de trouver ainsi des pistes d'analyse pour améliorer la caractérisation de l'emploi des latérites dans les chantiers de construction routière.

À l'issue de cette étude, nous constatons que :

- les résultats de l'analyse en composantes principales effectuée en utilisant le logiciel Statgraphics plus et Uniwin plus 3.0 sur les données des différents itinéraires de la région de l'Agnéby, confirment les corrélations connues entre :
  - $I_P$  et  $w_L$ ;
  - la densité sèche à l'OPM et la teneur en eau à l'OPM :
- d'autre part, ces résultats dégagent des relations qu'il conviendrait d'explorer, entre :
  - la teneur en eau à l'OPM et le pourcentage de fines ( $C_{80\mu m}$ ) ;
  - la teneur en eau à l'OPM et le produit du pourcentage de fines par l'indice de plasticité ( $C_{80\mu m} \times I_P$ ) ;
  - la densité sèche maximale à l'optimum Proctor modifié ( $G_{dOPM}$ ) et le pourcentage de fines ( $C_{80\mu m}$ ).

Mais les relations avec l'indice CBR restent peu convaincantes.

## Chapitre 6

# PERSPECTIVES D'ÉTUDE DES LATÉRITES À L'ÉCHELLE DU PAYS OU DU CONTINENT

### 6.1. Introduction

L'analyse des sols graveleux latéritiques de la région de l'Agnéby a permis de mettre en évidence un certain nombre de propriétés statistiques de ces sols, d'étendues de variation, moyennes et écarts types, de corrélations entre paramètres, sans toutefois trouver de nouvelles idées pour la classification de ces sols. La comparaison des graveleux latéritiques de la région de l'Agnéby avec les diagrammes établis au Congo pour les latérites de savane et de forêt (chapitre 4) laisse pourtant entrevoir des variations importantes des caractéristiques des graveleux latéritiques, en fonction de leurs conditions de formation et peut-être aussi de la roche mère. Le fait que toute la région de l'Agnéby soit dans la zone forestière de la Côte d'Ivoire peut expliquer pourquoi les graveleux latéritiques étudiés ont finalement des propriétés assez semblables. La méthode appliquée pour leur étude peut certainement donner des résultats différents si l'on analyse des sols d'origines plus variées.

D'autre part, nous avons noté que les sols latéritiques sont analysés de point de vue différents par les géologues miniers, les pédologues et les géotechniciens. Il pourrait être utile de rassembler les propriétés des sols latéritiques auxquels ces trois professions s'intéressent pour faire une analyse factorielle globale et peut-être découvrir de nouvelles approches pour la gestion de l'utilisation des latérites en construction routière.

Une telle analyse n'a pas été possible pendant la durée de cette thèse, à cause des problèmes politiques de la Côte d'Ivoire, mais elle reste souhaitable et l'objet de ce chapitre est de décrire comment elle pourrait être menée.

## **6.2. Objectifs**

L'objectif d'une étude plus large des sols latéritiques à l'échelle d'un pays, la Côte d'Ivoire, ou de plusieurs pays, comme la zone intertropicale du continent africain, peut être de trouver des relations nouvelles entre les différentes propriétés des sols latéritiques, définir les facteurs de leur comportement mécanique en remblai ou en couches de chaussée, pour établir ensuite des règles applicables dans les études de projets ou plus généralement pour la définition d'une politique à l'échelle d'un pays. Cela peut se faire par analyse statistique de vastes ensembles de données couvrant d'une part des sols d'origine variée et d'autre part des paramètres variés, débordant du cadre de la géotechnique appliquée aux routes. Il faut donc d'abord commencer par rassembler des données.

## **6.3. Données disponibles ou à obtenir**

Les données d'une étude aussi large des sols latéritiques ne peuvent provenir que de sources existantes, des données complémentaires ne pouvant être obtenues qu'au prix de dépenses importantes en temps et en argent. L'expérience de notre étude de la région de l'Agnéby a montré qu'il existe un gisement de données géotechniques dans les dossiers d'étude des projets de travaux routiers. C'est donc naturellement dans cette direction qu'il faut commencer à chercher pour accumuler les données nécessaires à une étude plus générale. Il existe aussi des dossiers d'études qui ont porté sur les latérites un autre regard, en déterminant d'autres paramètres physico-chimiques, minéralogiques ou génétiques de ces sols. Une étude générale passe par l'obtention de données de ce type, car les données purement géotechniques ne permettent certainement pas de décrire tout ce qui peut avoir une influence sur les sols latéritiques. Ces données peuvent être quantitatives (avoir une valeur chiffrée) ou être qualitatives (comme le contexte du processus de latérisation). Les méthodes de l'analyse factorielle permettent de prendre en compte tous les types de variables.

Compte tenu de l'objectif, qui est de prendre en compte le plus grand nombre possible de caractéristiques des sols latéritiques, il nous semble que les futures recherches devraient porter sur :

- les caractéristiques géotechniques déjà analysées dans le présent mémoire,

- les coordonnées précises des prélèvements (en plan et en altitude), l'épaisseur totale des dépôts latéritiques,
- les caractéristiques chimiques des latérites,
- le contexte géologique (roche mère, processus d'évolution naturelle), climatique, environnemental (forêt, savane...) et géomorphologique (plateau, pente, vallée) de leur formation.

#### **6.4. Analyse géotechnique et géographique des réserves de latérites**

Une fois rassemblées les données citées ci-dessus, pour des aires géographiques étendues et variées, on peut organiser une analyse qui produise à la fois des informations sur les relations entre les divers aspects et comportements des sols latéritiques et des informations sur la répartition géographique des sols latéritiques, en tenant compte de leurs propriétés. Cela peut se faire qualitativement en considérant les données suivant l'origine géographique des échantillons ou bien de façon plus systématique et quantitative par des méthodes d'analyse factorielle, dont un exemple a été présenté dans le chapitre 5.

La cartographie des gisements de sols latéritiques de caractéristiques données permet d'envisager des réflexions sur leur meilleur emploi (soit pas transport dans les zones n'ayant pas les matériaux adéquats, soit en adaptant localement les règles).

L'analyse géotechnique peut conduire à définir des équivalences entre propriétés et à compléter les règles appliquées actuellement en construction routière.

La coopération internationale avec les pays de la même zone géographique est un facteur de succès supplémentaire pour une telle entreprise.

#### **6.5. Relations entre les propriétés des latérites et celles des routes**

L'étude des propriétés des latérites pour la construction routière suppose que l'on ait une idée de l'effet des propriétés des remblais et couches de fondation et forme latéritiques sur le comportement mécanique des chaussées sous circulation. Les recommandations en vigueur dans les différents pays où l'on trouve des latérites (chapitre 2) tiennent compte de

l'expérience nationale dans ce domaine et elles ne peuvent être globalement mises en cause. Les exemples cités dans ce mémoire suggèrent que la construction routière procède surtout par l'expérience des effets des innovations ou modifications appliquées à l'échelle d'un chantier. Ce processus d'évolution permet de fournir des idées de recherche mais il n'en donne pas les moyens, de sorte que l'on sait que certaines techniques de construction sont efficaces quand on les utilise avec tel ou tel matériau, de telles ou telles caractéristiques, sans vraiment déterminer les limites de ces recommandations.

Le succès de l'analyse des latérites vis-à-vis de la construction et de l'entretien des routes suppose que l'on puisse mieux comprendre et formaliser ce qui fait le succès ou l'échec des règles imposées aux matériaux. On peut avoir aussi l'idée d'étudier les frontières des domaines d'utilisation des matériaux, pour préparer les jours où ils seront devenus rares puis inexistantes. Cela suppose dans tous les cas de reprendre une étude méthodique des relations entre les matériaux, leur mise en œuvre et le comportement de la route sous trafic. Une compréhension améliorée des relations entre les sols latéritiques dans leur milieu naturel et leur comportement une fois compactés dans un remblai ou une couche de chaussée aiderait certainement à rattacher leurs propriétés au comportement des routes.

## **6.6. Conclusion**

Il nous semble que la connaissance des sols latéritiques et la maîtrise de leur utilisation en construction routière peuvent encore progresser et que ce progrès passe par l'analyse des données de diverses natures disponibles sur ces sols dans leurs diverses applications, notamment routière.

La mise en œuvre d'une recherche inspirée des principes énoncés ci-dessus nous paraît souhaitable.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Les travaux présentés dans ce mémoire avaient pour objectif général d'améliorer la connaissance des ressources en graveleux latéritiques sur le territoire de la Côte d'Ivoire afin de contribuer au progrès des techniques de construction routière.

Du fait des contraintes imposées par la situation générale dans le pays, le travail a porté sur un ensemble de cent quatre-vingt-huit prélèvements ou échantillons issus de dix tronçons de routes de la région de l'Agnéby, ces données étant prélevées dans les dossiers d'études routières du Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics d'Abidjan et du Bureau National d'Études Techniques et de Développement.

Les données provenant d'études de projets routiers ont été répertoriées et analysées dans un premier temps par référence à ces itinéraires, dont la liste est rappelée dans le tableau suivant.

Code	Itinéraire	Nombre de prélèvements
A	Adonkoi - Abié	21
B	Adzopé - Bonaouin	13
C	Adzopé – M'Basso Attié	15
D	Agboville – Rubino - Cechi	40
E	Agboville - Oresskrobou	12
F	Agou - Azaguié	7
G	Assikoi – Lobo Opé	15
H	Grand Morié - Agou	15
I	Loaguié - Afféry	37
J	Offoumpo Céchi	13
Total		188

Les données ont été d'abord analysées par référence aux pratiques usuelles en Côte d'Ivoire pour l'utilisation des graveleux latéritiques en construction routière. Les valeurs moyennes et intervalles de variation de chaque propriété géotechnique ont été comparés et des corrélations ont été cherchées entre les valeurs mesurées. Ces analyses ont montré une faible variabilité d'un itinéraire à l'autre pour l'ensemble de la région, mais une variabilité nettement plus forte quand on s'intéresse individuellement à l'ensemble des prélèvements effectués pour les dix projets.

L'analyse factorielle en composantes principales présentée dans le chapitre 5 n'a pas fourni d'idées nouvelles pour caractériser les sols étudiés ni montré de différenciation entre les prélèvements, mais cela peut provenir de l'origine des latérites, qui viennent toutes d'une région forestière. L'exemple de différenciation des latérites de savane et de forêt publié au Congo donne l'idée que les données étudiées n'étaient pas assez diversifiées et que l'on pourrait espérer des résultats plus marqués si l'étude était étendue à l'ensemble des types de sols latéritiques de la Côte d'Ivoire ou de l'Afrique intertropicale.

La poursuite de cette étude sur une base élargie nous paraît pour cette raison recommandable. Nous avons esquissé les objectifs et moyens d'une telle étude dans le chapitre 5, en insistant sur le fait qu'il est souhaitable de combiner les points de vue de la géotechnique, de la géologie des minéraux et de la pédologie pour que l'analyse embrasse un plus grand ensemble de propriétés des sols latéritiques et permette peut-être de mieux en comprendre le fonctionnement dans la construction routière et dans les autres secteurs d'activité où ces sols sont utilisés.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Atlan I., Feller C., Viargues M. (1981). Corrélation entre les classifications pédologiques et les classifications géotechniques des sols tropicaux. Revue bibliographique. Éditions du BRGM - Service Géologique National, 63 pages.
- Autret P. (1980). Contribution à l'étude des graveleux latéritiques traités au ciment, Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 434 pages.
- Autret P. (1982). Contribution à l'étude des graveleux latéritiques. Limites de retrait. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 118, pp. 7-16.
- Autret P. (1983). Latérites et graveleux latéritiques, Études ISTED-LCPC, 38 pages.
- Autret P., Tran Ngoc Lan (1982). Application de l'essai au bleu de méthylène aux graveleux latéritiques, Revue Générale des Routes et Aérodrômes, N° 586, pp. 19-27.
- BCEOM-CEBTP (1975), Manuel sur les routes dans les zones tropicales et désertiques. Tome 2 : Études et construction. Ministère de la coopération, Paris, 484 pages.
- Berthier P., Bouroche J.M. (1977). Analyse de données multidimensionnelles. Presses universitaires de France, 2ème édition.
- Bourgeon G., Gunnel Y. (2005). La latérite de Buchanan. Étude et gestion des sols, vol. 12, n°2, pp. 87-100.
- Bramao D.L., Lemos P. (1960). Soil map of South America. Transactions of the 7<sup>th</sup> International Congress of Soil Sciences.
- Buchanan F. (1807). A journey through the countries of Mysore, Canara and Malabar. (1988 reprint, Asian Educational Services, New-Delhi). 3 volumes., 440, 566 et 512 pages.
- Campbell J.M. (1917). Laterite : its origine, structure and minerals, Mining Magazine, n°17 pp 67-77, 120-128, 171-179, 220-229.
- CEBTP (1972), Manuel de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. Secrétariat d'Etat aux affaires étrangères chargé de la coopération, Paris, 51 pages.
- Dagnelie P. (1975). Analyse statistique à plusieurs variables. Presses agronomiques de Gembloux, diffusion Vander-Oyez réédition, 362 pages.
- De Graft-Johnson J.W., Bhatia W.S. (1969). Engineering properties of lateritic soils. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, vol. 2, pp. 13-47

- D'Hoore J. (1954). L'accumulation des sesquioxides libres dans les sols tropicaux. Série scientifique n° 62a, INEAC : Institut National pour l'Étude Agronomique du Congo Belge, 132 pages.
- Encyclopédie Larousse (1975), 24 vol., page 9237 et 9238, pédologie, pédogénèse.
- Fall M., Tisot J.P., Cissé I.K. (1995). Comportement mécanique à l'appareil de cisaillement de Casagrande de trois graveleux latéritiques compactés provenant du Sénégal occidental. Bulletin of the International Association of Engineering Geology and the Environment, vol. 52, pp. 59-73.
- Florentin J., L'Hériteau J. (1952). Études bibliographiques des latérites. BCEOM, Paris.
- Gidigas M.D. (1976). Laterite soil engineering: pedogenesis and engineering principles. Developments in Geotechnical Engineering, volume 9, Elsevier, 554 pages.
- Gidigas M.D. (1988). The use of non traditional tropical and residual materials for pavement construction (a review). Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Geomechanics in tropical soils, Singapore, pp. 397-403.
- Journées Africaines de Géotechnique (1988). Actes. Bulletin LBTP n° 10, 11, 12, Yamoussoukro, 233 pages.
- Kahl R.W. (1976). Lateritic soils in environmental management in Nigeria. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, vol.13, n°1, pp 47-53.
- LBTP Côte d'Ivoire (1977). Étude actualisée de la classification des graveleux latéritiques en Côte d'Ivoire, Rapport de recherche N° RR1, série Études de synthèse, LBTP.
- LBTP Côte d'Ivoire (1977). Recommandation pour l'utilisation en corps de chaussées des graveleux latéritiques améliorés au ciment. LBTP.
- LBTP Côte d'Ivoire (1977). Recommandation pour l'utilisation en corps de chaussées des graveleux latéritiques naturels. LBTP.
- Lebart L., Morineau A., Fénelon J.P. (1982). Traitement des données statistiques : méthodes et programmes. Dunod, Paris, 510 pages.
- Leneuf N. (1959). L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. Thèse : Université de Paris, 210 pages.
- Lyon Associates Inc. (1971). Laterite and lateritic soils and other problem soils in Africa. An AID engineering study, BPRI Kumasi, Ghana.
- Maignien R. (1958). Le cuirassement des sols en Guinée, Afrique occidentale. Thèse Sciences. Mémoires du Service de la Carte géologique d'Alsace et de Lorraine, n°16, Université de Strasbourg, 239 pages.
- Maignien R. (1966). Compte rendu de recherches sur les latérites, UNESCO, 155 pages.

- Mückenhausen E., Tavernier R. (1960). The soil map of Western Europe on scale 1:2,5 mill., 7<sup>th</sup> International Congress of Soil Sciences, Madison, Wisconsin, USA, vol. 4, pp. 44-48.
- Prescott J.A., Pendleton R.L. (1952). Laterite and lateritic soils. Commonwealth Agricultural Bureaux, London, 51 pages.
- Rémillon A. (1967). Les recherches routières entreprises en Afrique d'expression française. Application à la conception et au renforcement des chaussées économiques. Annales ITBTP, Paris, n° 231-232.
- Seaton T.H., Lacey J.M., Pollard A.R., Sykes E.F., Wooltorton F.L.D. (1938). Correspondence. Engineering problems associated with clay, with special reference to clay slips. Journal of the Institution of Civil Engineers, vol. 9, n°8, pp. 523-527.
- Slansky M., Lallemand A., Millot G. (1964). La sédimentation et l'altération latéritique des formations phosphatées du gisement de Taïba. Bulletin du Service de la Carte Géologique d'Alsace et de Lorraine, pp. 311-324.
- Stephens C.G. (1961). Laterite at the type locality, Angadipuram, Icerala, India. Journal of Soil Science, vol. 12, n°2, pp. 214-217.
- Warth H., Warth F.J. (1903). The composition of Indian laterite. Geological Magazine, vol. 4, n°10, pp. 154-159.

# ANNEXE

## Données rassemblées par itinéraire dans la région de l'Agnéby

### A.1. Itinéraire A - Adonkoi – Abié

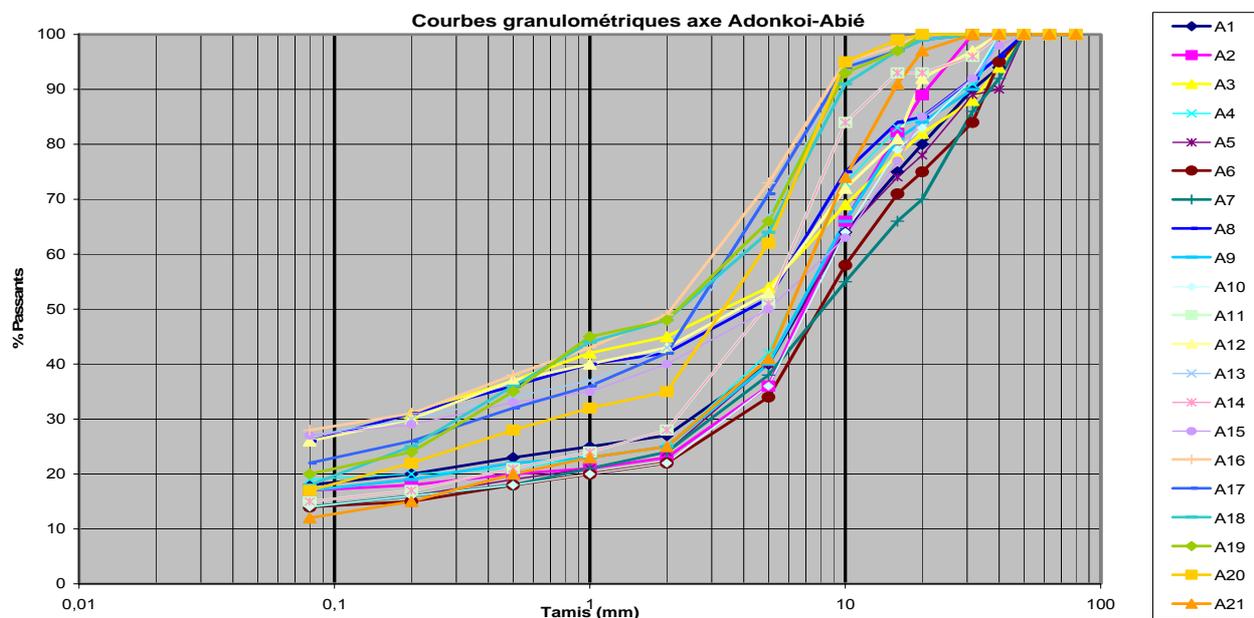
#### Paramètres d'identification de l'itinéraire A (Adonkoi – Abié)

N°	Point kilométrique (PK)	CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES							
		Analyse granulométrique		Essai Proctor		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
		C <sub>80µm</sub>	C <sub>80µm</sub> * I <sub>p</sub>	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>opt</sub> (%)	I <sub>CBR</sub>	w <sub>L</sub>	w <sub>P</sub>	I <sub>p</sub>
	Adonkoi 0								
A1	0,40	18	360	21,7	7	37	40	20	20
A2	0,75	17	442	20,9	8,3	28	53	27	26
A3	1,10	26	546	20,4	9	35	44	23	21
A4	1,45	19	608	21,8	9,6	27	59	27	32
A5	1,80	14	308	22,4	6,5	48	45	23	22
A6	2,15	14	294	21,6	7,8	35	46	25	21
A7	2,50	14	252	21,1	6,3	48	42	24	18
A8	2,85	26	546	21,9	6,8	28	43	22	21
A9	3,20	17	323	21,8	7,3	37	45	26	19
A10	3,55	14	266	22,0	6,8	49	46	27	19
A11	3,90	15	360	23,2	6,7	45	49	25	24
A12	4,25	31	868	19,7	12,8	19	51	23	28
A13	4,35	27	783	20,0	12,1	11	58	29	29
A14	4,50	15	330	21,8	8,4	33	45	23	22
A15	4,60	27	621	21,0	8,8	20	46	23	23
A16	4,75	28	980	20,4	9,2	27	62	27	35
A17	4,90	22	616	20,8	10,1	31	52	24	28
A18	5,10	18	324	22,5	7,3	22	33	15	18
A19	5,35	41	1 353	19,5	13,9	18	57	24	33
A20	5,70	17	357	22,0	8,7	36	42	21	21
A21	5,90	12	264	21,6	9,7	25	42	20	22
Abié	6,15								
Valeur maximale		41	1 353	23,2	13,90	49	62	29	35
Valeur minimale		12	252	19,5	6,30	11	33	15	18
Moyenne		21	499	21,3	8,72	31	48	24	24
Écart type		7	288	0	2	11	7	3	5
Intervalle de variation		12-41	252-499	19,5-21,3	6,30-8,72	11-31	7-48	3-24	5-24

**Itinéraire A (Adonkoi-Abié)**  
**ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES**  
 effectuées conformément à la norme NF P94-051

Tamis (mm)		80	63	50	40	31,5	20	16	10	5	2	1	0,5	0,2	0,08
A1	Passant (%)	100	100	100	94	90	80	75	64	40	27	25	23	20	18
A2	Passant (%)	100	100	100	100	100	89	82	66	36	23	21	20	18	17
A3	Passant (%)	100	100	100	94	88	82	78	69	54	45	42	37	31	26
A4	Passant (%)	100	100	100	100	91	85	83	73	42	25	23	21	20	19
A5	Passant (%)	100	100	100	90	89	78	74	64	40	24	21	19	16	14
A6	Passant (%)	100	100	100	95	84	75	71	54	34	22	20	18	15	14
A7	Passant (%)	100	100	100	95	84	75	71	54	34	22	20	18	15	14
A8	Passant (%)	100	100	100	96	92	85	84	75	52	42	40	36	31	26
A9	Passant (%)	100	100	100	100	90	84	81	66	40	25	23	22	19	17
A10	Passant (%)	100	100	100	100	92	83	79	64	36	22	20	18	16	14
A11	Passant (%)	100	100	100	100	96	93	93	84	51	28	24	21	17	15
A12	Passant (%)	100	100	100	100	97	92	81	72	53	43	40	37	30	26
A13	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	99	94	67	43	37	34	30	27
A14	Passant (%)	100	100	100	100	96	93	93	84	51	28	24	21	17	15
A15	Passant (%)	100	100	100	98	92	85	77	63	50	40	35	33	29	27
A16	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	98	95	73	49	43	38	31	28
A17	Passant (%)	100	100	100	100	100	99	97	94	71	42	36	32	26	22
A18	Passant (%)	100	100	100	100	100	99	97	91	64	48	44	36	25	18
A19	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	97	93	66	48	45	35	24	20
A20	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	99	95	62	35	32	28	22	17
A21	Passant (%)	100	100	100	100	100	97	91	74	41	25	23	20	15	12

Courbes granulométriques



## A.2. Itinéraire B – Adzopé - Bonaouin

### Paramètres d'identification de l'itinéraire B (Adzopé - Bonaouin)

N°	Point kilométrique (PK)	CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES							
		Analyse granulométrique		Essai Proctor		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
		C <sub>80µm</sub>	C <sub>80µm</sub> *I <sub>p</sub>	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>opt</sub> (%)	I <sub>CBR</sub>	w <sub>L</sub>	w <sub>P</sub>	I <sub>p</sub>
	Adzopé 0								
B1	0,60	31	868	19,7	12,8	19	51	23	28
B2	0,95	27	783	20,0	12,1	11	58	29	29
B3	1,30	15	330	21,8	8,4	33	45	23	22
B4	1,65	27	621	21,0	8,8	20	46	23	23
B5	2,00	28	980	20,4	9,2	27	62	27	35
B6	2,35	22	616	20,8	10,1	31	52	24	28
B7	2,70	18	324	22,5	7,3	22	33	15	18
B8	3,05	41	1 353	19,5	13,9	18	57	24	33
B9	3,40	17	357	22,0	8,7	36	42	21	21
B10	3,75	12	264	21,6	9,7	25	42	20	22
B11	4,10	27	675	23,6	6,6	26	49	24	25
B12	4,45	28	644	22,4	7,1	24	41	18	23
B13	4,80	22	506	20,8	11,0	32	51	28	23
<b>Bonaouin : 5,15</b>									
	Valeur maximale	41	1 353	23,6	13,9	36	62	29	35
	Valeur minimale	12	264	19,5	6,60	11	33	15	18
	Moyenne	24	640	21,2	9,67	25	48	23	25
	Écart type	8	307	0	2	7	8	4	5
	Intervalle de variation	12-41	264-1353	19,5-23,6	6,6-13,9	11-36	33-62	15-29	18-35

### Itinéraire B (Azopé-Bonaouin)

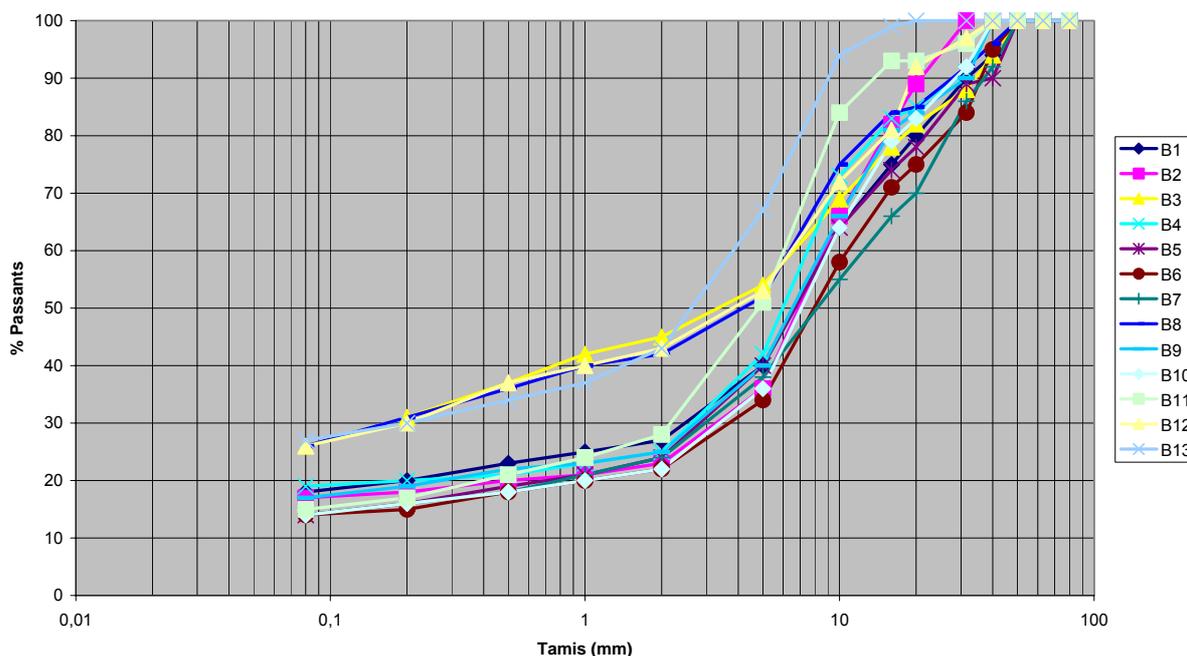
#### ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES

effectuées conformément à la norme NF P94-051

Tamis (mm)		80	63	50	40	31,5	20	16	10	5	2	1	0,5	0,2	0,08
B1	Passant (%)	100	100	100	100	100	98	95	92	76	51	47	43	36	31
B2	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	99	94	67	43	37	34	30	27
B3	Passant (%)	100	100	100	100	96	93	93	84	51	28	24	21	17	15
B4	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	99	99	90	63	53	45	34	27
B5	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	98	95	73	49	43	38	31	28
B6	Passant (%)	100	100	100	100	100	99	97	94	71	42	36	32	26	22
B7	Passant (%)	100	100	100	100	100	99	97	94	71	42	36	32	26	22
B8	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	97	96	84	58	55	52	48	41
B9	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	99	95	62	35	32	28	22	17
B10	Passant (%)	100	100	100	100	100	97	91	74	41	25	23	20	15	12
B11	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	99	99	90	63	53	45	34	27
B12	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	98	95	73	49	43	38	31	28
B13	Passant (%)	100	100	100	100	100	99	97	94	71	42	36	32	26	22

# Courbes granulométriques

## Courbes Granulométriques Adzopé-Bonaouin



### A.3. Itinéraire C - Adzopé – M'Basso Attié

#### Paramètres d'identification de l'itinéraire C (Adzopé – M'Basso Attié)

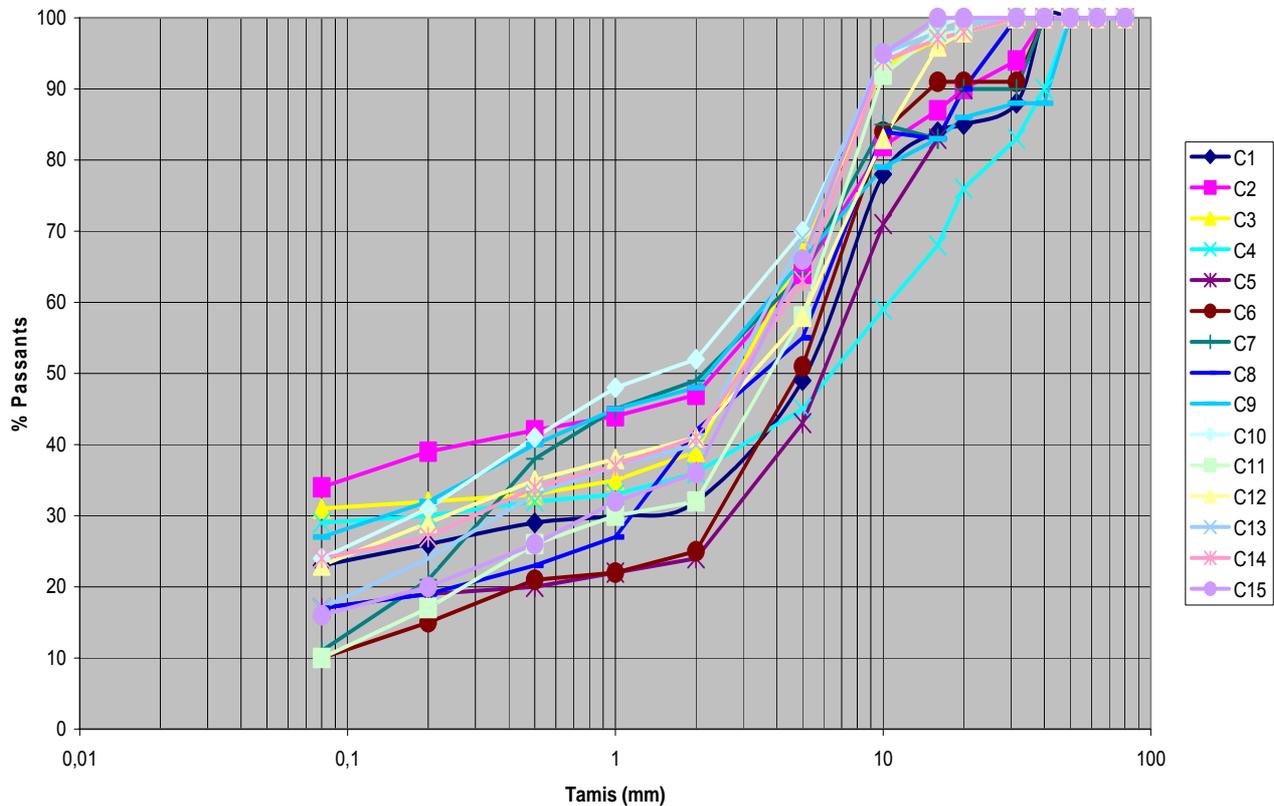
N°	Point kilométrique (PK)	CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES							
		Analyse granulométrique		Essai Proctor		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
		C <sub>80μm</sub>	C <sub>80μm</sub> *I <sub>p</sub>	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>opm</sub> (%)	I <sub>CBR</sub>	w <sub>L</sub>	w <sub>P</sub>	I <sub>P</sub>
	Adzopé 0								
C1	1	23	644	2,27	6,30	39	54	26	28
C2	5	34	884	2,03	8,50	42	49	23	26
C3	9	31	465	2,35	6,50	38	34	19	15
C4	13	29	696	2,14	8,80	35	52	28	24
C5	17	17	323	2,27	8,00	43	39	20	19
C6	21	10	230	2,40	6,50	21	49	26	23
C7	25	11	231	2,35	5,20	30	41	20	21
C8	29	17	323	2,12	9,70	25	39	20	19
C9	33	27	567	2,01	8,90	40	45	24	21
C10	37	24	552	2,18	8,80	22	45	22	23
C11	40	10	180	2,25	8,30	26	34	16	18
C12	42	23	322	1,96	13,80	24	28	14	14
C13	43	17	459	2,35	6,10	32	47	20	27
C14	45	24	600	2,29	7,40	21	45	20	25
C15	47	16	352	2,07	10,20	28	43	21	22
	M'Basso-Attié:49,07								

Valeur maximale	34	884	2,40	13,80	43	54	28	28
Valeur minimale	10	180	1,96	5,20	21	28	14	14
Moyenne	21	455	2,20	8,20	31	43	21	22
Écart type	8	200	0	2	8	7	4	4
Intervalle de variation	10-34	180-884	1,96-2,40	5,2-13,8	21-31	28-54	14-28	14-22

**Itinéraire C (Adonkoi-Abié)**  
**ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES**  
effectuées conformément à la norme NF P94-051

Tamis (mm)		80	63	50	40	31,5	20	16	10	5	2	1	0,5	0,2	0,08
C1	Passant (%)	100	100	100	100	88	85	84	78	49	32	30	29	26	23
C2	Passant (%)	100	100	100	100	94	90	87	82	64	47	44	42	39	34
C3	Passant (%)	100	100	100	100	100	98	97	93	67	39	35	33	32	31
C4	Passant (%)	100	100	100	90	83	76	68	59	45	36	33	32	30	29
C5	Passant (%)	100	100	100	100	100	90	83	71	43	24	22	20	19	17
C6	Passant (%)	100	100	100	100	100	90	83	71	43	24	22	20	19	17
C7	Passant (%)	100	100	100	100	94	90	87	85	64	49	45	38	21	11
C8	Passant (%)	100	100	100	100	100	90	87	84	55	42	27	23	19	17
C9	Passant (%)	100	100	100	88	88	86	83	79	66	48	45	40	32	27
C10	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	99	94	70	52	48	41	31	24
C11	Passant (%)	100	100	100	100	100	98	98	92	58	32	30	26	17	10
C12	Passant (%)	100	100	100	100	100	98	96	83	58	41	38	35	29	23
C13	Passant (%)	100	100	100	100	100	99	98	95	69	40	37	33	24	17
C14	Passant (%)	100	100	100	100	100	98	97	94	63	41	37	34	27	24
C15	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	100	95	66	36	32	26	20	16

**Courbes granulométriques**  
**Courbes Granulométriques Adzopé-M'Basso Attié**



#### A.4. Itinéraire D - Agboville – Rubino – Cechi

##### Paramètres d'identification de l'itinéraire D (Agboville – Rubino – Cechi)

N°	Point kilométrique (PK)	CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES							
		Analyse granulométrique		Essai Proctor		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
		C <sub>80µm</sub>	C <sub>80µm</sub> *I <sub>p</sub>	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>opt</sub> (%)	I <sub>CBR</sub>	W <sub>L</sub>	W <sub>P</sub>	I <sub>P</sub>
	Agboville 0								
D1	1	20	560	21,1	7,7	13	54	26	28
D2	2	24	624	21,1	7	20	49	23	26
D3	4	13	195	22,0	5,8	65	34	19	15
D4	6	22	528	21,5	7,2	33	52	28	24
D5	7	12	228	21,5	5,8	31	39	20	19
D6	8	22	506	21,5	6,7	43	49	26	23
D7	9	16	336	22,8	6,3	40	41	20	21
D8	10	20	380	22,1	8,4	39	39	20	19
D9	11	18	378	21,2	7,2	42	45	24	21
D10	12	20	460	21,4	9,2	38	45	22	23
D11	13	18	324	21,6	7,2	35	34	16	18
D12	14	23	322	22,7	6,3	43	28	14	14
D13	15	21	567	22,2	7,5	21	47	20	27
D14	16	22	550	22,2	8,2	30	45	20	25
D15	17	22	484	22,2	8,2	25	43	21	22
D16	18	19	342	22,2	8	40	42	24	18
D17	19	18	360	21,1	6	22	42	22	20
D18	20	22	550	20,9	8,2	26	49	24	25
D19	21	21	483	21,0	9,2	24	41	18	23
D20	22	18	414	21,0	8,8	32	51	28	23
D21	23	25	550	20,5	9,1	21	42	20	22
D22	24	22	484	21,8	8	28	35	13	22
D23	25	15	315	22,5	8	40	40	19	21
D24	26	14	308	21,9	8,9	30	41	19	22
D25	27	22	484	21,4	8,7	29	43	21	22
D26	28	23	529	21,8	10,6	35	45	22	23
D27	29	26	572	21,7	8,7	33	42	20	22
D28	30	32	608	21,4	9,2	47	39	20	19
D29	31	20	320	22,0	7,6	32	34	18	16
D30	32	21	420	21,3	8,1	30	41	21	20
D31	33	22	440	21,2	9,3	35	40	20	20
D32	34	18	324	22,2	7,8	30	38	20	18
D33	35	22	418	22,0	8,2	24	40	21	19
D34	36	21	399	21,9	9,3	19	37	18	19
D35	37	15	390	21,9	9	22	49	23	26
D36	38	19	323	22,9	8	22	36	19	17
D37	39	24	456	21,2	9,5	14	36	17	19

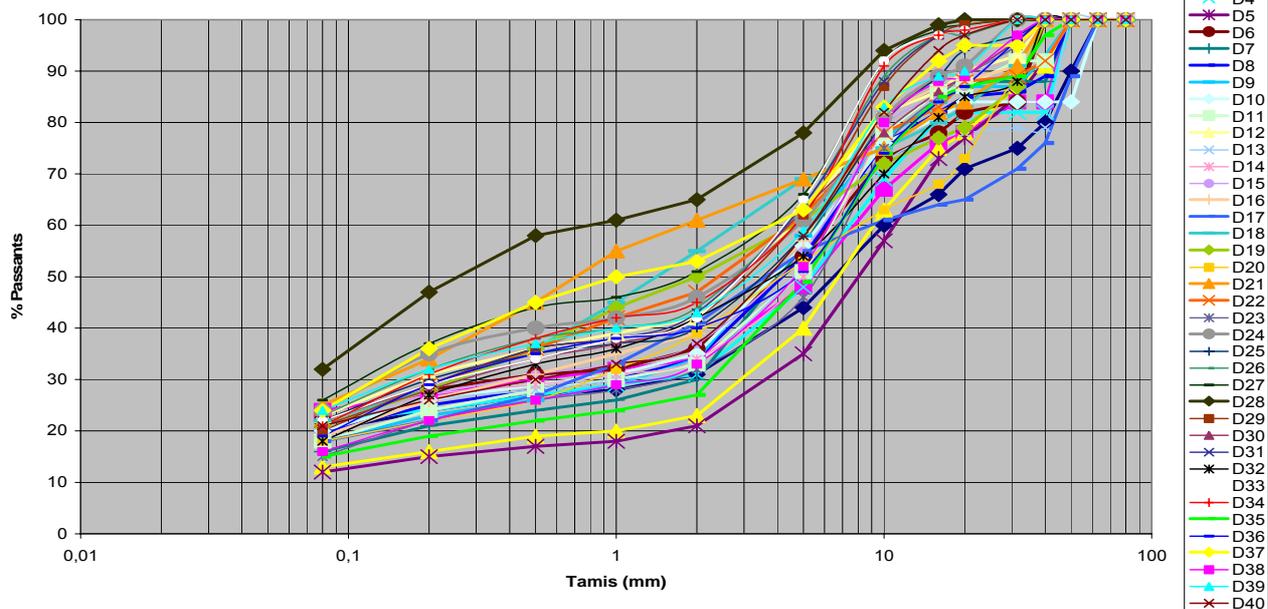
D38	40	16	288	22,1	7,7	18	36	18	18
D39	41	24	552	22,3	8,4	22	41	18	23
D40	42	21	441	22,1	10	24	43	22	21
Céchi : 44									
Valeur maximale	32	624	22,9	10,6	65	54	28	28	
Valeur minimale	12	195	20,5	5,8	13	28	13	14	
Moyenne	20	430	21,7	8,1	30	42	21	21	
Écart type	4	108	0	1	10	6	3	3	
Intervalle de variation	12-32	195-624	20,5-22,9	5,8-10,6	13-65	28-54	13-28	14-28	

**Itinéraire D (Agboville-Rubino-Céchy)**  
**ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES**  
effectuées conformément à la norme NF P94-051

Tamis (mm)		80	63	50	40	31,5	20	16	10	5	2	1	0,5	0,2	0,08
D1	Passant (%)	100	100	90	80	75	71	66	60	44	31	28	27	24	20
D2	Passant (%)	100	100	100	84	84	78	76	67	48	34	32	30	27	24
D3	Passant (%)	100	100	100	91	87	78	75	63	40	23	20	19	16	13
D4	Passant (%)	100	100	100	82	82	82	81	69	48	31	29	27	24	22
D5	Passant (%)	100	100	100	92	85	77	73	57	35	21	18	17	15	12
D6	Passant (%)	100	100	100	100	84	82	78	73	54	36	32	31	28	22
D7	Passant (%)	100	100	100	88	88	88	87	82	56	30	26	24	21	16
D8	Passant (%)	100	100	100	89	86	85	82	76	54	34	30	28	25	20
D9	Passant (%)	100	100	100	93	87	87	84	77	58	34	29	26	23	18
D10	Passant (%)	100	100	84	84	84	84	81	76	56	35	31	29	26	20
D11	Passant (%)	100	100	84	84	84	84	81	76	56	35	31	29	26	20
D12	Passant (%)	100	100	84	84	84	84	81	76	56	35	31	29	26	20
D13	Passant (%)	100	100	84	84	84	84	81	76	56	35	31	29	26	20
D14	Passant (%)	100	100	100	100	95	95	91	79	50	34	31	29	27	22
D15	Passant (%)	100	100	100	100	97	87	85	79	55	37	33	31	27	22
D16	Passant (%)	100	100	100	100	91	88	87	82	57	39	35	31	26	19
D17	Passant (%)	100	100	88	76	71	65	64	61	55	41	33	27	22	18
D18	Passant (%)	100	100	100	100	91	83	80	75	69	55	45	36	28	18
D19	Passant (%)	100	100	100	100	87	79	77	72	61	50	44	36	28	21
D20	Passant (%)	100	100	100	100	90	73	68	63	53	39	32	26	22	18
D21	Passant (%)	100	100	100	100	91	84	82	75	69	61	55	45	34	25
D22	Passant (%)	100	100	100	92	89	88	83	78	62	47	42	36	29	22
D23	Passant (%)	100	100	100	100	95	89	85	75	46	32	28	26	22	15
D24	Passant (%)	100	100	100	100	100	91	89	81	61	46	42	40	35	24
D25	Passant (%)	100	100	100	100	97	94	89	80	58	40	37	35	30	22
D26	Passant (%)	100	100	100	100	100	97	97	89	64	44	40	38	32	23
D27	Passant (%)	100	100	100	100	100	99	98	92	66	51	46	44	37	26
D28	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	99	94	78	65	61	58	47	32
D29	Passant (%)	100	100	100	100	100	99	97	87	62	42	38	36	29	20
D30	Passant (%)	100	100	100	100	100	99	97	87	62	42	38	36	29	20
D31	Passant (%)	100	100	100	100	100	98	97	88	64	43	38	36	29	22
D32	Passant (%)	100	100	100	100	88	85	81	70	54	42	36	33	27	18
D33	Passant (%)	100	100	100	100	100	98	97	92	65	42	38	34	29	22
D34	Passant (%)	100	100	100	100	100	98	97	91	62	45	42	38	31	21
D35	Passant (%)	100	100	100	97	89	87	85	74	49	27	24	22	19	15
D36	Passant (%)	100	100	100	100	96	87	84	74	51	40	38	35	29	19
D37	Passant (%)	100	100	100	100	95	95	92	83	63	53	50	45	36	24
D38	Passant (%)	100	100	100	100	97	89	88	80	52	33	29	26	22	16
D39	Passant (%)	100	100	100	100	97	89	88	80	52	33	29	26	22	16
D40	Passant (%)	100	100	100	100	100	97	94	82	58	37	33	30	26	21

## Courbes granulométriques

Courbes granulométriques Agboville-Rubino-céchi



### A.5. Itinéraire E - Adzopé – M'Basso Attié

#### Paramètres d'identification de l'itinéraire E (Agboville – Oresskrobou)

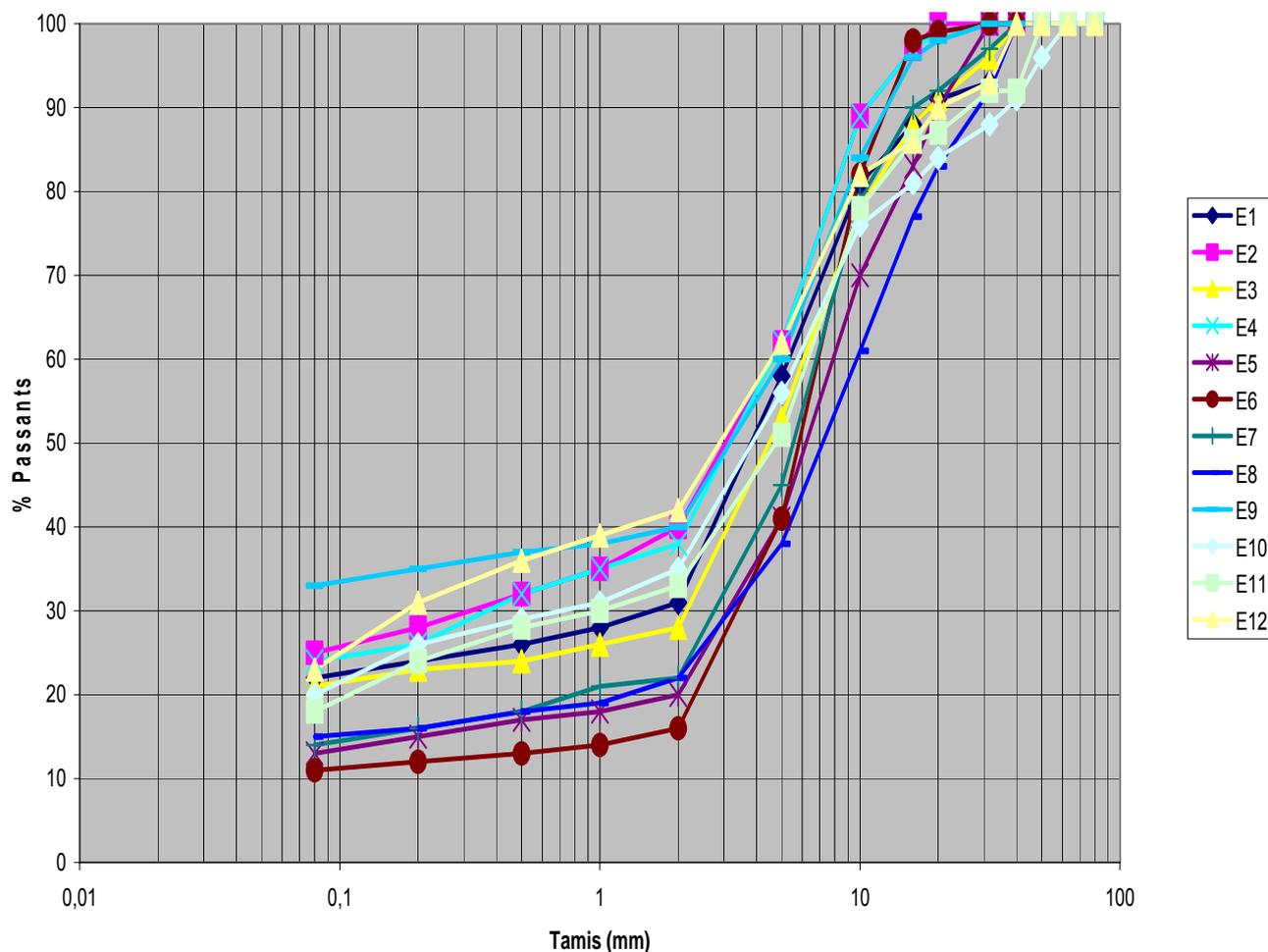
N°	Point kilométrique (PK)	CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES							
		Analyse granulométrique		Essai Proctor		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
		$C_{80\mu m}$	$C_{80\mu m} * I_p$	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_{opt}$ (%)	$I_{CBR}$	$w_L$	$w_P$	$I_p$
	Agboville 0								
E1	1,5	22	572	20,8	8,3	19	49	23	26
E2	3	25	475	19,7	5	22	39	20	19
E3	4,5	21	588	21,2	7	22	50	22	28
E4	7,5	24	504	20,0	10,2	14	35	14	21
E5	10,5	13	143	21,6	5	18	27	16	11
E6	13,5	11	187	19,6	5	22	36	19	17
E7	15	14	294	21,5	6,4	24	43	22	21
E8	16,5	15	330	20,9	6,3	21	47	25	22
E9	19,5	33	792	20,6	8	30	49	25	24
E10	22,5	20	460	21,4	9,2	25	45	22	23
E11	25,5	18	324	21,6	7,2	40	34	16	18
E12	28,5	23	322	22,7	6,3	22	28	14	14
<b>Oresskrobou: 33</b>									
	Valeur maximale	33	792	22,7	10,2	40	50	25	28
	Valeur minimale	11	143	19,6	5	14	27	14	11
	Moyenne	20	416	21,0	7	23	40	20	20
	Écart type	6	185	0	2	7	8	4	5
	Intervalle de variation	11-33	143-792	19,6-22,7	5-10,2	14-40	27-50	14-25	11-28

**Itinéraire E (Agboville-Oresskrobou)**  
**ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES**  
 effectuées conformément à la norme NF P94-051

Tamis (mm)		80	63	50	40	31,5	20	16	10	5	2	1	0,5	0,2	0,08
<b>E1</b>	Passant (%)	100	100	100	100	93	91	88	81	58	31	28	26	24	22
<b>E2</b>	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	97	89	62	40	35	32	28	25
<b>E3</b>	Passant (%)	100	100	100	100	96	91	88	78	53	28	26	24	23	21
<b>E4</b>	Passant (%)	100	100	100	100	100	99	97	89	62	38	35	32	26	24
<b>E5</b>	Passant (%)	100	100	100	100	100	90	88	70	41	20	18	17	15	13
<b>E6</b>	Passant (%)	100	100	100	100	100	99	98	82	41	16	14	13	12	11
<b>E7</b>	Passant (%)	100	100	100	100	97	92	90	79	45	22	21	18	16	14
<b>E8</b>	Passant (%)	100	100	100	100	92	83	77	61	38	22	19	18	16	15
<b>E9</b>	Passant (%)	100	100	100	100	100	98	96	84	60	40	38	37	35	33
<b>E10</b>	Passant (%)	100	100	96	91	88	84	81	76	56	35	31	29	26	20
<b>E11</b>	Passant (%)	100	100	100	92	92	87	86	78	51	33	30	28	24	18
<b>E12</b>	Passant (%)	100	100	100	100	93	90	86	82	62	42	39	36	31	23

Courbes granulométriques

Courbes granulométriques Agboville - Oresskrobou



## A.6. Itinéraire F - Agou – Azaguié

### Paramètres d'identification de l'itinéraire F (Agou - Azaguié)

N°	Point kilométrique (PK)	CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES							
		Analyse granulométrique		Essai Proctor		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
		C <sub>80µm</sub>	C <sub>80µm</sub> *I <sub>p</sub>	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>opt</sub> (%)	I <sub>CBR</sub>	w <sub>L</sub>	w <sub>P</sub>	I <sub>P</sub>
	Agou 0								
F1	5,5	24	792	21,6	9	47	59	26	33
F2	11	30	840	21,5	9,8	30	56	28	28
F3	16,5	21	546	21,4	6,7	47	47	21	26
F4	22	21	420	21,1	9	44	42	22	20
F5	27,5	11	209	23,5	5,9	40	37	18	19
F6	33	23	529	20,1	9,8	39	41	18	23
F7	38,5	27	675	20,2	10,2	43	42	17	25
<b>Azaguié : 44</b>									
	Valeur maximale	30	840	23,5	10,2	47	59	28	33
	Valeur minimale	11	209	20,1	5,9	30	37	17	19
	Moyenne	22	573	21,3	8,6	41	46	21	25
	Écart type	6	219	0	2	6	8	4	5
	Intervalle de variation	11-30	209-840	20,1-23,5	5,9-10,2	30-47	37-59	17-28	19-33

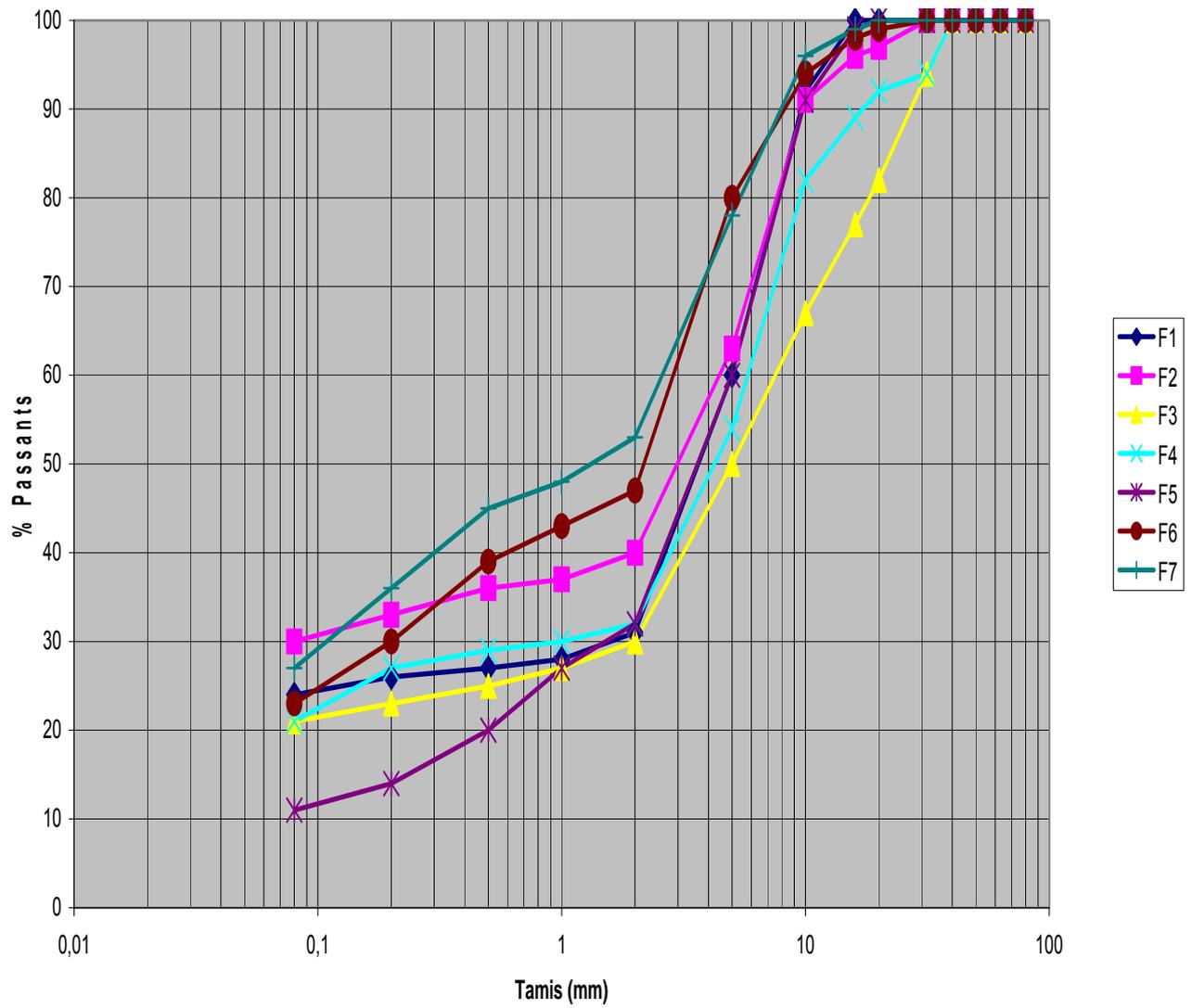
### Itinéraire F (Agou-Azaguié)

#### ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES effectuées conformément à la norme NF P94-051

Tamis (mm)		80	63	50	40	31,5	20	16	10	5	2	1	0,5	0,2	0,08
<b>F1</b>	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	100	92	60	31	28	27	26	24
<b>F2</b>	Passant (%)	100	100	100	100	100	97	96	91	63	40	37	36	33	30
<b>F3</b>	Passant (%)	100	100	100	100	94	82	77	67	50	30	27	25	23	21
<b>F4</b>	Passant (%)	100	100	100	100	94	82	77	67	50	30	27	25	23	21
<b>F5</b>	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	99	91	60	32	27	20	14	11
<b>F6</b>	Passant (%)	100	100	100	100	100	99	98	94	80	47	43	39	30	23
<b>F7</b>	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	99	96	78	53	48	45	36	27

# Courbes granulométriques

## Courbes Granulométriques Agou - Azaguié



## A.7. Itinéraire G - Assikoi – Lobo Opé

### Paramètres d'identification de l'itinéraire G (Assikoi – Lobo Opé)

N°	Point kilométrique (PK)	CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES							
		Analyse granulométrique		Essai Proctor		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
		C <sub>80µm</sub>	C <sub>80µm</sub> *I <sub>p</sub>	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>optm</sub> (%)	I <sub>CBR</sub>	w <sub>L</sub>	w <sub>P</sub>	I <sub>p</sub>
	Adzopé 0								
G1	0,89	17	289	22,1	7,8	22	31	14	17
G2	1,73	11	242	22,5	8,4	38	40	18	22
G3	2,57	19	437	21,1	9,7	20	41	18	23
G4	3,41	23	483	20,6	9,9	22	40	19	21
G5	4,25	17	357	21,3	8,4	26	41	20	21
G6	5,09	33	561	20,4	10,2	22	30	13	17
G7	5,93	17	340	22,5	8,3	27	36	16	20
G8	6,77	10	210	20,1	10	32	43	22	21
G9	7,61	22	352	20,6	9,7	36	35	19	16
G10	8,45	36	756	21,6	8,6	19	38	17	21
G11	9,29	22	550	20,9	8,8	30	53	28	25
G12	10,13	18	378	22,5	7,8	36	43	22	21
G13	10,97	35	735	20,1	12,1	15	38	17	21
G14	11,81	23	483	21,2	11,6	17	44	23	21
G15	12,65	24	528	21,5	8,3	45	46	24	22
<b>M'Basso-Attié:13,49</b>									
	Valeur maximale	36	756	22,5	12,1	45	53	28	25
	Valeur minimale	10	210	20,1	7,8	15	30	13	16
	Moyenne	22	447	21,3	9,3	27	40	19	21
	Écart type	8	162	0	1	9	6	4	2
	Intervalle de variation	10-36	210-756	20,1-22,5	7,8-12,1	15-45	30-53	13-28	16-25

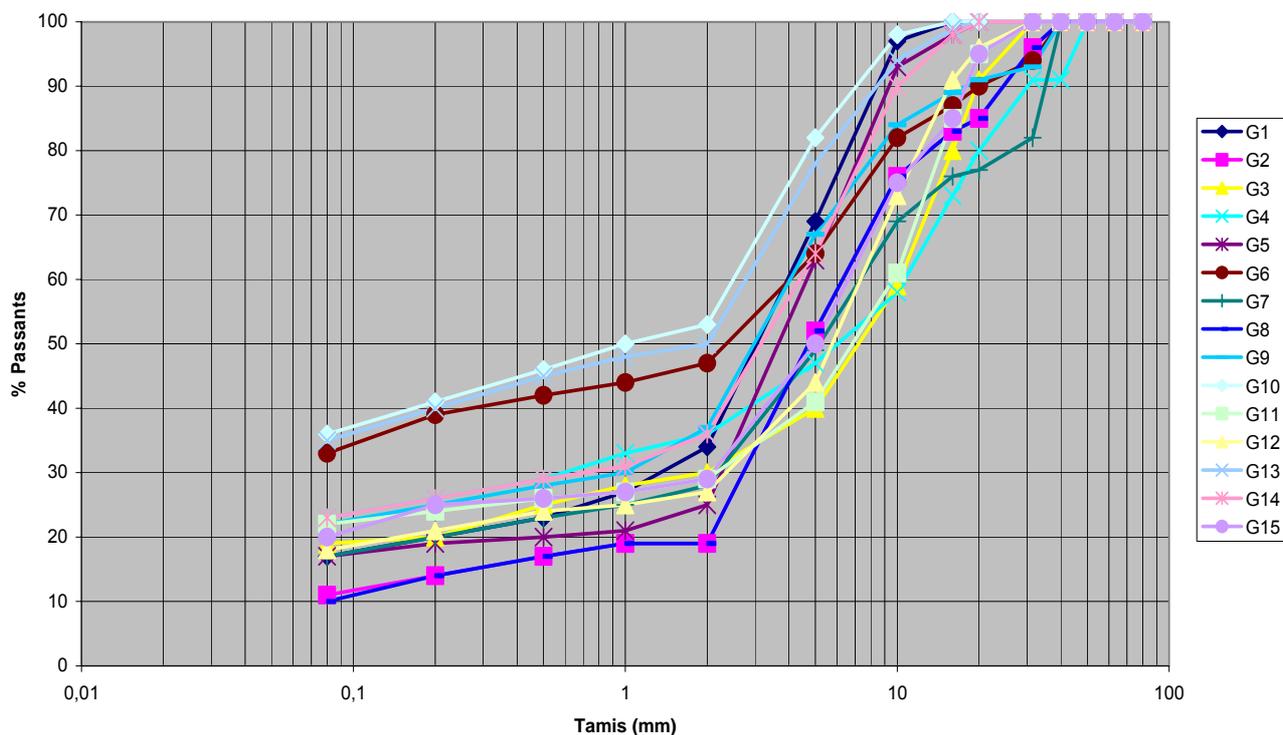
### Itinéraire G (Assikoi – Lobo Opé)

ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES  
effectuées conformément à la norme NF P94-051

Tamis (mm)		80	63	50	40	31,5	20	16	10	5	2	1	0,5	0,2	0,08
G1	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	100	97	69	34	27	23	20	17
G2	Passant (%)	100	100	100	100	96	85	83	76	52	19	19	17	14	11
G3	Passant (%)	100	100	100	100	100	91	80	59	40	30	28	25	20	19
G4	Passant (%)	100	100	100	91	91	80	73	58	47	36	33	29	26	23
G5	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	98	93	63	25	21	20	19	17
G6	Passant (%)	100	100	100	100	94	90	87	82	64	47	44	42	39	33
G7	Passant (%)	100	100	100	100	82	77	76	69	49	28	25	23	20	17
G8	Passant (%)	100	100	100	100	96	85	83	76	52	19	19	17	14	10
G9	Passant (%)	100	100	100	100	93	91	89	84	67	37	30	28	25	22
G10	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	100	98	82	53	50	46	41	36
G11	Passant (%)	100	100	100	100	100	95	85	61	41	29	27	26	24	22
G12	Passant (%)	100	100	100	100	100	96	91	73	44	27	25	24	21	18
G13	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	99	94	78	50	48	45	40	35
G14	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	98	90	64	36	31	29	26	23
G15	Passant (%)	100	100	100	100	100	95	85	75	50	29	27	26	25	20

# Courbes granulométriques

## Courbes Granulométriques Assikoi - Lobo Opé



## A.8. Itinéraire H – Grand Morié – Agou

### Paramètres d'identification de l'itinéraire H (Grand Morié - Agou)

N°	Point kilométrique (PK)	CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES							
		Analyse granulométrique		Essai Proctor		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
		$C_{80\mu m}$	$C_{80\mu m} * I_p$	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_{opm}$ (%)	$I_{CBR}$	$W_L$	$W_P$	$I_P$
Grand Morié 0									
H1	1	24	792	21,6	9	47	59	26	33
H2	2	30	840	21,5	9,8	30	56	28	28
H3	3,5	21	546	21,4	6,7	47	47	21	26
H4	5,5	21	420	21,1	9	44	42	22	20
H5	6,5	11	209	23,5	5,9	40	37	18	19
H6	7,5	23	529	20,1	9,8	42	41	18	23
H7	9,5	27	675	20,2	10,2	42	42	17	25
H8	10,5	26	520	21,7	7,8	32	42	22	20
H9	11	9	117	23,9	6,5	36	30	17	13
H10	13	16	432	21,4	11	19	61	34	27
H11	15	16	464	21,9	9	30	56	27	29
H12	17	11	275	21,2	8,5	36	51	26	25
H13	18	35	735	20,1	12,1	15	38	17	21
H14	21	23	483	21,2	11,6	17	44	23	21
H15	22	24	528	21,5	8,3	45	46	24	22

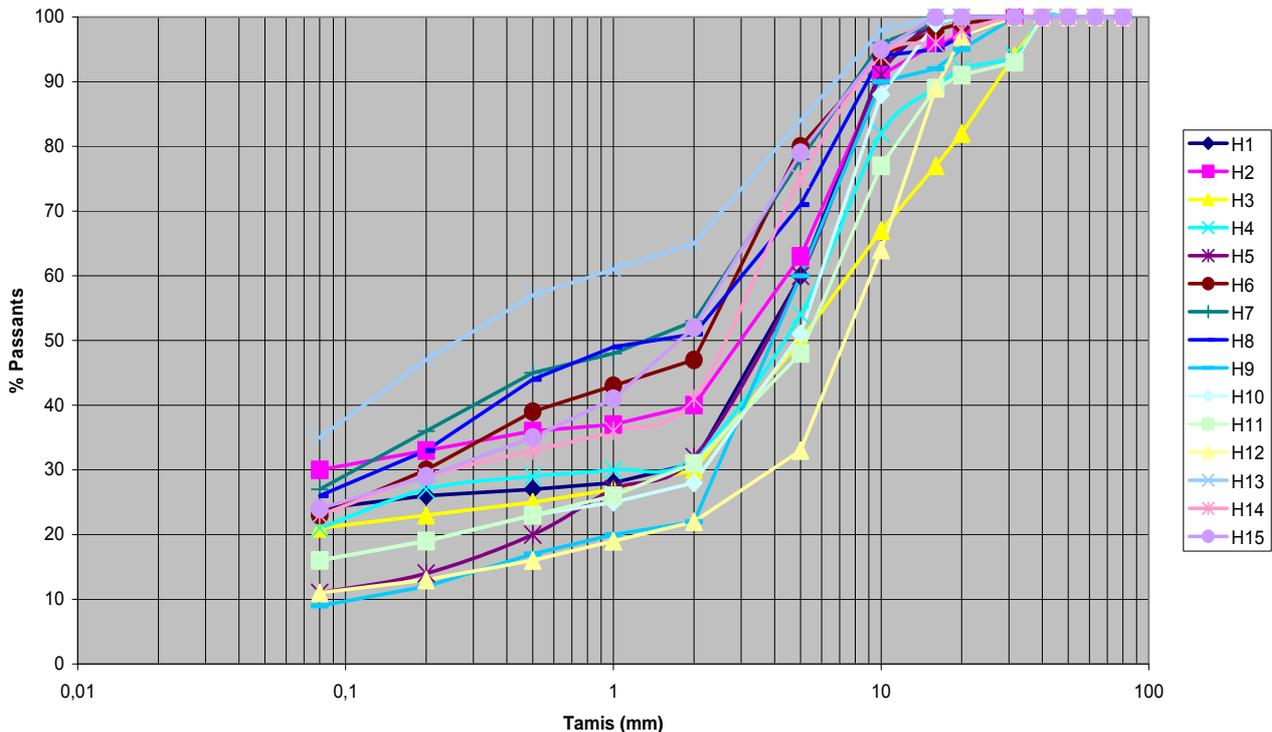
Agou : 22,5								
Valeur maximale	35	840	23,9	12,1	47	61	34	33
Valeur minimale	9	117	20,1	5,9	15	30	17	13
Moyenne	21	504	21,5	9	35	46	23	23
Écart type	7	204	0	2	11	9	5	5
Intervalle de variation	9-35	117-840	20,1-23,9	5,9-12,1	15-47	30-61	17-34	13-33

**Itinéraire H (Grand Morié – Agou)**  
**ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES**  
effectuées conformément à la norme NF P94-051

Tamis (mm)		80	63	50	40	31,5	20	16	10	5	2	1	0,5	0,2	0,08
H1	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	100	92	60	31	28	27	26	24
H2	Passant (%)	100	100	100	100	100	97	96	91	63	40	37	36	33	30
H3	Passant (%)	100	100	100	100	94	82	77	67	50	30	27	25	23	21
H4	Passant (%)	100	100	100	100	94	92	89	82	54	32	30	29	27	21
H5	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	99	91	60	32	27	20	14	11
H6	Passant (%)	100	100	100	100	100	99	98	94	80	47	43	39	30	23
H7	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	99	96	78	53	48	45	36	27
H8	Passant (%)	100	100	100	100	100	97	95	94	71	51	49	44	33	26
H9	Passant (%)	100	100	100	100	100	95	92	90	60	22	20	17	12	9
H10	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	99	88	51	28	25	23	19	16
H11	Passant (%)	100	100	100	100	93	91	89	77	48	31	26	23	19	16
H12	Passant (%)	100	100	100	100	100	97	89	64	33	22	19	16	13	11
H13	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	100	98	84	65	61	57	47	35
H14	Passant (%)	100	100	100	100	100	98	96	94	75	41	36	33	29	23
H15	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	100	95	79	52	41	35	29	24

Courbes granulométriques

Courbes Granulométriques Grand Morié - Agou



## A.9. Itinéraire I - Loagué – Affery

### Paramètres d'identification de l'itinéraire I (Loagué – Affery)

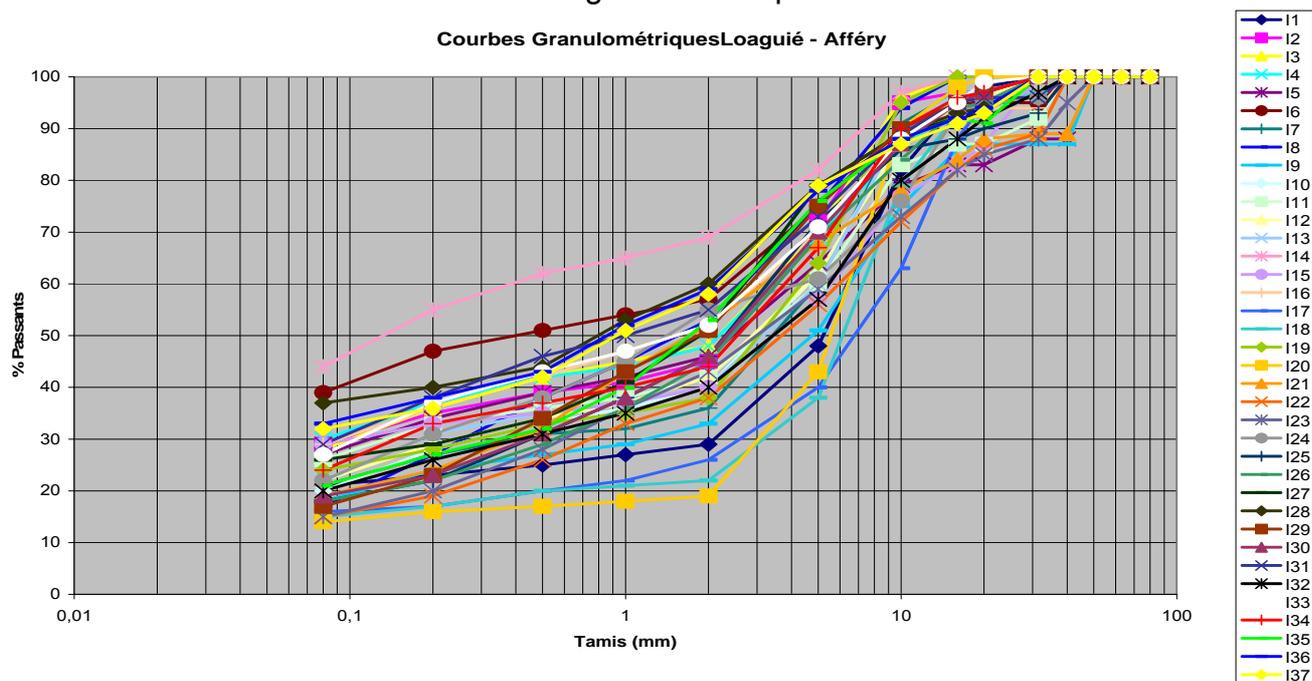
N°	Point kilométrique (PK)	CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES							
		Analyse granulométrique		Essai Proctor		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
		C <sub>80µm</sub>	C <sub>80µm</sub> *I <sub>p</sub>	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>opt</sub> (%)	I <sub>CBR</sub>	W <sub>L</sub>	W <sub>P</sub>	I <sub>P</sub>
	Loagué 0								
I1	1	21	378	22,0	5,7	36	37	17	20
I2	2	29	667	21,2	10,5	21	45	21	24
I3	3	28	588	22,0	9	47	38	17	21
I4	4	30	840	22,4	7,9	25	38	19	19
I5	5	27	621	19,9	13	20	47	21	26
I6	6	39	975	20,2	11,6	14	49	22	27
I7	7	21	483	21,2	9,3	30	46	21	25
I8	8	17	187	20,9	6,4	13	56	23	33
I9	9	18	378	23,5	7,8	28	42	23	19
I10	10	20	400	22,9	8,1	22	42	23	19
I11	11	26	624	23,1	7,8	31	51	26	25
I12	12	22	462	20,5	7,3	11	42	21	21
I13	13	22	418	22,1	6,5	25	43	22	21
I14	14	44	1 144	21,6	6,3	19	36	18	18
I15	15	29	783	21,2	7,1	23	37	21	16
I16	16	29	725	21,0	7,5	20	38	24	14
I17	17	16	528	21,3	6,6	38	50	23	27
I18	18	15	285	21,1	8,4	41	56	29	27
I19	19	24	456	19,4	11,7	17	63	33	30
I20	20	14	350	21,7	6,5	20	32	18	14
I21	21	19	399	21,6	7,3	20	43	24	19
I22	22	15	315	20,6	10,3	32	44	21	23
I23	23	15	270	21,3	7,7	30	40	20	20
I24	24	22	352	20,6	10	40	46	21	25
I25	25	18	252	21,4	9	30	43	22	21
I26	26	18	486	22,0	5,7	36	37	17	20
I27	27	26	702	21,2	10,5	21	45	21	24
I28	28	37	1 110	22,0	9	47	38	17	21
I29	29	17	238	22,4	7,9	25	38	19	19
I30	30	19	361	19,9	13	20	47	21	26
I31	31	29	667	20,2	11,6	14	49	22	27
I32	32	20	400	21,2	9,3	30	46	21	25
I33	33	27	675	20,9	6,4	13	56	23	33
I34	34	24	504	23,5	7,8	28	42	23	19
Affery :	38								

Valeur maximale	44	1 144	23,5	13	49	63	33	33
Valeur minimale	14	187	19,4	5,7	11	27	16	11
Moyenne	23	530	21,5	8,6	29	44	22	22
Écart type	7	239	0	2	10	7	3	5
Intervalle de variation	14-44	187-1144	19,4-23,5	5,7-13	11-49	27-63	16-33	11-33

**Itinéraire I (Loaguié-Afféry)**  
**ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES**  
effectuées conformément à la norme NF P94-051

Tamis (mm)		80	63	50	40	31,5	20	16	10	5	2	1	0,5	0,2	0,08
I1	Passant (%)	100	100	100	100	100	98	95	82	48	29	27	25	23	21
I2	Passant (%)	100	100	100	100	100	97	97	95	72	45	41	39	35	29
I3	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	100	96	70	48	45	42	36	28
I4	Passant (%)	100	100	100	100	100	95	93	87	69	48	44	42	37	30
I5	Passant (%)	100	100	100	88	88	83	83	79	64	46	42	39	34	27
I6	Passant (%)	100	100	100	100	95	95	95	90	75	57	54	51	47	39
I7	Passant (%)	100	100	100	100	100	97	97	91	60	36	32	31	27	21
I8	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	100	94	75	53	45	38	27	17
I9	Passant (%)	100	100	100	87	87	87	86	75	51	33	29	27	24	18
I10	Passant (%)	100	100	100	100	96	96	95	88	62	40	36	33	28	20
I11	Passant (%)	100	100	100	100	92	87	87	83	60	42	38	36	33	26
I12	Passant (%)	100	100	100	100	100	96	96	87	62	42	37	34	29	22
I13	Passant (%)	100	100	100	100	100	97	97	90	60	40	37	35	31	22
I14	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	100	97	82	69	65	62	55	44
I15	Passant (%)	100	100	100	100	100	87	83	77	57	40	37	35	33	29
I16	Passant (%)	100	100	100	100	94	94	94	88	70	52	47	42	36	29
I17	Passant (%)	100	100	100	100	100	95	88	63	40	26	22	20	17	16
I18	Passant (%)	100	100	100	100	97	94	93	79	38	22	21	20	17	15
I19	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	100	95	64	38	35	33	28	24
I20	Passant (%)	100	100	100	100	100	100	98	90	43	19	18	17	16	14
I21	Passant (%)	100	100	100	89	89	88	84	78	68	52	43	32	24	19
I22	Passant (%)	100	100	100	100	89	86	82	72	56	38	33	26	19	15
I23	Passant (%)	100	100	100	95	88	85	82	73	59	43	36	28	20	15
I24	Passant (%)	100	100	100	100	96	95	93	76	61	55	45	38	31	22
I25	Passant (%)	100	100	100	100	93	90	88	86	72	46	38	31	22	18
I26	Passant (%)	100	100	100	100	100	95	94	84	69	45	36	29	22	18
I27	Passant (%)	100	100	100	100	100	93	92	89	79	51	41	34	29	26
I28	Passant (%)	100	100	100	100	100	94	93	89	79	60	53	44	40	37
I29	Passant (%)	100	100	100	100	100	97	95	90	75	51	43	34	23	17
I30	Passant (%)	100	100	100	100	100	97	95	87	70	46	38	31	23	19
I31	Passant (%)	100	100	100	100	96	96	95	89	73	55	50	46	38	29
I32	Passant (%)	100	100	100	100	97	92	88	80	57	40	35	31	26	20
I33	Passant (%)	100	100	100	100	100	99	95	88	71	52	47	43	37	27
I34	Passant (%)	100	100	100	100	100	97	96	90	67	44	40	37	33	24
I35	Passant (%)	100	100	100	100	100	93	92	88	76	53	40	32	27	21
I36	Passant (%)	100	100	100	100	100	94	92	88	78	59	52	43	38	33
I37	Passant (%)	100	100	100	100	100	93	91	87	79	58	51	42	36	32

## Courbes granulométriques



### A.10. Itinéraire J – Offoumpo - Céchy

#### *Paramètres d'identification de l'itinéraire J (Offoumpo - Céchy)*

N°	Point kilométrique (PK)	CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES							
		Analyse granulométrique		Essai Proctor		Essai CBR	Limites d'Atterberg		
		C <sub>80µm</sub>	C <sub>80µm</sub> *I <sub>p</sub>	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>optm</sub> (%)	I <sub>CBR</sub>	w <sub>L</sub>	w <sub>P</sub>	I <sub>p</sub>
Offoumpo 0									
J1	1,8	34	952	21,5	9,7	21	52	24	28
J2	5,4	31	775	21,8	9,5	21	47	22	25
J3	7,2	23	483	22,9	8,4	28	43	22	21
J4	10,8	15	315	21,5	7,5	28	39	18	21
J5	12,6	26	572	21,5	10	25	47	25	22
J6	16,2	32	896	21,0	11	29	53	25	28
J7	21,6	28	448	22,1	8,2	49	36	20	16
J8	23,4	36	972	21,1	11	27	51	24	27
J9	28,8	32	832	20,4	15,7	21	50	24	26
J10	30,6	28	756	21,5	11	43	52	25	27
J11	34,2	21	399	20,0	8,2	19	37	18	19
J12	36	15	390	20,3	8,7	22	49	23	26
J13	41,4	19	323	20,0	8,4	22	36	19	17
Céchy: 43,2									
Valeur maximale		36	972	22,9	15,7	49	53	25	28
Valeur minimale		15	315	20,0	7,5	19	36	18	16
Moyenne		26	624	21,2	9,8	27	46	22	23
Écart type		7	247	0	2	9	7	3	4
Intervalle de variation		15-36	315-972	20-22,9	7,5-15,7	19-49	36-53	18-25	16-28

**Itinéraire J (Offoumpo-Céchy)**  
**ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES**  
 effectuées conformément à la norme NF P94-051

Tamis (mm)		80	63	50	40	31,5	20	16	10	5	2	1	0,5	0,2	0,08
<b>J1</b>	Passant (%)	100	100	100	100	92	92	91	88	70	48	46	43	39	34
<b>J2</b>	Passant (%)	100	100	100	100	95	95	92	89	68	46	43	39	35	31
<b>J3</b>	Passant (%)	100	100	100	100	100	95	95	90	64	36	32	31	27	23
<b>J4</b>	Passant (%)	100	100	100	100	91	90	86	81	61	44	40	38	31	25
<b>J5</b>	Passant (%)	100	100	100	100	92	92	92	87	63	41	37	34	30	26
<b>J6</b>	Passant (%)	100	100	100	100	100	96	94	89	64	41	38	37	35	32
<b>J7</b>	Passant (%)	100	100	100	100	100	92	92	88	72	51	47	43	34	28
<b>J8</b>	Passant (%)	100	100	100	100	95	90	87	84	71	50	47	45	41	36
<b>J9</b>	Passant (%)	100	100	100	100	100	93	92	86	65	42	39	38	35	32
<b>J10</b>	Passant (%)	100	100	100	100	89	89	89	85	63	38	35	34	31	28
<b>J11</b>	Passant (%)	100	100	90	80	75	71	66	60	44	31	28	27	24	21
<b>J12</b>	Passant (%)	100	100	100	88	88	88	87	82	56	30	26	24	21	15
<b>J13</b>	Passant (%)	100	100	100	92	92	87	86	78	51	33	30	28	24	19

**Courbes granulométriques**

**Courbes Granulométriques Offoumpo - Céchi**

