

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

*Paix – Travail – Patrie*

\*\*\*\*\*

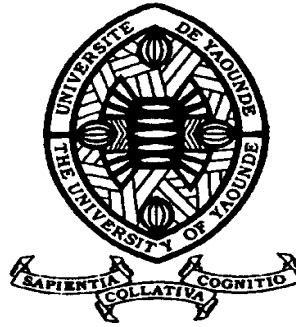
UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE SCIENCES DE LA  
TERRE

\*\*\*\*\*

LABORATOIRE DE GEOLOGIE DE  
L'INGENIEUR ET D'ALTEROLOGIE



REPUBLIC OF CAMEROUN

*Peace – Work – Fatherland*

\*\*\*\*\*

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

DEPARTMENT OF OF EARTH  
SCIENCES

\*\*\*\*\*

**CARACTERISATION MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE  
ET GEOTECHNIQUE DES GRANULATS ET DES SOLS  
LATERITIQUES NODULAIRES DE L'EST ET DU SUD  
CAMEROUN DANS L'OPTIQUE DES TRAVAUX  
ROUTIERS**

Thèse présentée en vue de l'obtention du Doctorat/Ph.D en Sciences  
de la Terre

Par : **NZABAKURIKIZA Apollinaire**  
D.E.A. en Sciences Géotechniques

Sous la direction de  
**Georges Emmanuel EKODECK**  
Professeur  
(Université de Yaoundé I)

Année Académique : 2018





**ATTESTATION DE CORRECTION**

Nous, membres du jury de soutenance de **thèse de Doctorat/Ph-D** de l'Etudiant **NZABAKURIKIZA Apollinaire**, matricule **95L172**, intitulé : « *Caractérisation minéralogique, géochimique et géotechnique des granulats et des sols latéritiques nodulaires de l'Est et du Sud Cameroun dans l'optique des travaux routiers* » certifions que le candidat a effectué les corrections conformément aux remarques et recommandations formulées lors de la soutenance de ladite thèse.

En foi de quoi, nous lui délivrons cette **Attestation de Correction**, pour servir et valoir ce que de droit.

Fait à Yaoundé, le **09 OCT 2018**

**PRESIDENT DU JURY**

Prof. NDJIGUI Paul Désiré

**RAPPORTEUR**

Prof. EKODECK Georges Emmanuel

**MEMBRES**

Prof. AYONGHE Samuel NDONWI

Prof. NGUETNKAM Jean Pierre

MC. MVONDO ONDOA Joseph

MC. MAMBA MPELE

## DEDICACE

*Je dédie cette Thèse :*

*A Mon épouse NYIRAHABIMANA Gèneviève et à mes enfants Twagilimana Fabius, Hirabawe aimée Fabiola, Ingabire Magnificat Rosine °+Stéphanie, Mahoro Pauline et Musabe Patrice David pour leur soutien dans les moments difficiles*

*A Ma mère NYIRAMALIRO Laurence pour son amour et soutien.*

## REMERCIEMENTS

Cette thèse qui marque la fin du troisième cycle de mes études universitaires est le résultat de plusieurs années de travail à l'Université de Yaoundé I pour faute de financement. Elle a pu voir le jour grâce à Dieu et à la participation de nombreuses personnes auxquelles je témoigne ici ma profonde gratitude.

Ma plus profonde reconnaissance va d'abord à Monsieur Georges Emmanuel Ekodeck, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I. Il m'a initié à la géotechnique et n'a eu de cesse depuis l'obtention de mon diplôme de Licence en Sciences de la Terre, de suivre ma formation, tout en me prodiguant des conseils à caractères technique et académique, jusqu'à l'aboutissement de cette œuvre.

Cette reconnaissance s'étend à Monsieur Panagiotis Marelis Directeur Général de l'entreprise EDOK-ETER pour son soutien financier depuis 2008.

Cette reconnaissance s'étend aussi à Monsieur Ngiruwonsanga Tharcisse qui m'a parrainé en me faisant quitter le camp des réfugiés rwandais à Kibumba en République du Congo (Ex-Zaïre) où je venais de passer une année de vie difficile, sous les tentes des Nations Unies après le drame de la guerre qu'a connue mon pays le Rwanda en 1994.

Cette reconnaissance s'étend également à Messieurs Jean Richer, Ingénieur géotechnicien français et Ntilivamunda Alphonse ancien Directeur Général des Ponts et Chaussées au Ministère des Travaux Publics au Rwanda en 1993, qui ont lutté respectivement pour l'obtention de ma première bourse de stage au Centre de Recherches d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics (C.E.B.T.P.) en 1991 et ma deuxième bourse de stage au Centre de Recherches Routières (C.R.R) en Belgique en 1993 où j'ai acquis et approfondi les notions de géotechnique.

Je tiens à cœur tous mes enseignants de l'Université de Yaoundé I, en Faculté des Sciences, pour leur encadrement académique sans relâche.

Je remercie très particulièrement Monsieur Onana Vincent Laurent, mon camarade, actuellement Maître des Conférences au Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I. Il a participé activement à la réussite de ce travail du début à la fin.

Je salue et remercie mes camarades de thèse, plus particulièrement Monsieur Ekomane Emile, Chargé de Cours au Département des Sciences de la Terre. Il a été pour moi comme un frère, toujours disponible pour les discussions scientifiques et sociales.

Pour finir, je remercie tous ceux qui, de près comme de loin, m'ont apporté un soutien tant moral que matériel.

## TABLE DE MATIERES

<b>DEDICACE</b> .....	<b>i</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>ii</b>
<b>TABLE DE MATIERES</b> .....	<b>iii</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>xiv</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	<b>xvii</b>
<b>RESUME</b> .....	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xix</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
I. PROBLEMATIQUE ET BUT DE L'ETUDE .....	1
II. TERMINOLOGIE.....	3
III. STRUCTURE DE LA THESE .....	5
<b>CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTERATURE SUR LE CADRE NATUREL ET SUR LES ETUDES ANTERIEURES</b> .....	<b>6</b>
INTRODUCTION .....	6
I.1. CADRE NATUREL .....	7
I.1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	7
I.1.2. DONNEES CLIMATIQUES.....	7
I.1.2.1. Données climatiques de la Région de l'Est .....	7
I.1.2.2. Données climatiques de la Région du Sud .....	7
I.1.3. VEGETATION.....	9
I.1.3.1. Région de l'Est .....	9
I.1.3.2. Région du Sud.....	9
I.1.4. GEOMORPHOLOGIE .....	9
I.1.4.1. Hydraugraphie .....	9
I.2.4.2. Région du Sud.....	10
I.1.5. OROGRAPHIE.....	12
I.2. ETUDES ANTERIEURES.....	12
I.2.1. GEOLOGIE .....	12
I.2.1.1. Géologie de la Région de l'Est .....	13
I.2.1.2. Géologie de la Région Sud .....	13
I.2.2. PRODUITS D'ALTERATION DES ROCHES DU SUD CAMEROUN .....	15
I.2.2.1. Définition du terme latérite.....	15
I.2.2.2. Définitions chimiques .....	17
I.2.3. FACTEURS INFLUENÇANT LE COMPORTEMENT DES SOLS LATERITIQUES ET DES GRANULATS.....	17

I.2.3.1. Nature du sol utilisable en construction routière .....	18
I.2.3.2. Nature des granulats issus de concassage des roches .....	18
I.2.3.3. Dimensionnement des chaussées revêtues.....	18
I.2.3.4. Mise en œuvre de sol .....	27
I.2.3.5. Stabilisation des sols latéritiques .....	32
I.2.3.6. Classification des sols latéritiques .....	35
I.2.3.7 Assainissement routier.....	36
I.2.4. AUTRES DONNEES .....	36
I.2.4.1. Données pédologiques .....	36
I.2.4.2. Données géotechniques des roches et des produits d'altération du Sud Cameroun ..	36
<b>CHAPITRE II. SECTEURS DE TRAVAIL SELECTIONNES, MATERIEL ET</b>	
<b>METHODES D'ETUDE.....</b>	<b>41</b>
INTRODUCTION .....	42
II.1 CHOIX DES SITES .....	42
II.1.1 REGION DE L'EST.....	42
II.1.2 REGION DU SUD .....	45
II.2. MODES DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS.....	45
II.2.2. PRELEVEMENTS DES ECHANTILLONS DES MATERIAUX NODULAIRES.....	46
II.2.2.1. Echantillons provenant de carrières d'extraction de matériaux latéritique .....	46
II.3. METHODE DE NUMEROTATION DES ECHANTILLONS .....	46
II.4. METHODES D'ANALYSE DES ECHANTILLONS .....	46
II.4.1. ANALYSES: PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE	
ET DE MECANISME D'ALTERATION .....	46
II.4.1.1: ANALYSES PETROGRAPHIQUES .....	46
II.4.1.2: Analyses mineralogiques et chimiques .....	49
II.4.1.3. Analyse de mecanisme de l'alteration supergene .....	49
II.4.2. ANALYSES GEOTECHNIQUES : ESSAIS PHYSIQUES ET MECANIQUES .....	51
II.4.2.1. Essais physiques au laboratoire.....	52
II.4.2.2. Essais physiques in-situ.....	55
II.4.2.3. Essais mécaniques en laboratoire .....	57
II.4.2.4. Essais mécaniques in-situ.....	64
II.5. TRAITEMENT DES DONNEES .....	65
<b>CHAPITRE III. RESULTATS .....</b>	<b>68</b>
INTRODUCTION .....	68
III.1. RESULTATS D'ANALYSES PETROLOGIQUES DES ROCHES ET DES SOLS	
LATERITIQUES NODULAIRES DUN PROFIL D'ALTERATION .....	69
III.1.1. PETROLOGIE DES ROCHES ET DES SOLS LATERITIQUES NODULAIRES	
DES PROFILS D'ALTERATION DE LA REGION DE L'EST.....	69

III.1.1.1. Pétrographie .....	69
III.1.1.2. Minéralogie .....	71
III.1.1.3. Géochimie .....	74
III.1.1.4. Comparaison et discussion des résultats .....	74
III.1.2. PETROLOGIE DES FORMATIONS DU SOCLE DE LA REGION DU SUD .....	77
III.1.2.1. Pétrographie des roches d'Andom et de Meyo-Nyaka .....	77
III.1.2.2. Minéralogie des roches d'Andom et de Meyo-Nyaka .....	80
III.1.2.3. Géochimie des roches d'Andom et de Meyo-Nyaka .....	80
III.1.2.4. Comparaison et discussion des résultats .....	80
III.1.1.5. Pétrologie des matériaux nodulaires des profils d'altération .....	81
III.2. CARACTERISATION NORMATIVE ALTEROLOGIQUE DES MATERIAUX DES PROFILS D'ALTERATION DES ROCHES .....	91
III.2.1. CARACTERISATION NORMATIVE ALTEROLOGIQUE DU GRANITE ET DES MATERIAUX DU NIVEAU NODULAIRE DU SECTEUR DE BERTOUA .....	91
III.2.1.1. Données minéralogiques .....	91
III.2.1.2. Données paramétriques .....	92
III.2.2. CARACTERISATION NORMATIVE ALTEROLOGIQUE DES GNEISS DE BENT, D'ANDOM, DE MEYO-NYAKA, DE NGUELEMENDOUKA, ET DES MATERIAUX NODULAIRES DE CERTAINS DE CES SECTEURS (Nguélémendouka et Palisco Ampel) .....	96
III.2.2.1. Données minéralogiques .....	96
III.2.2.2. Données paramétriques .....	97
III.2.3. CARACTERISATION NORMATIVE ALTEROLOGIQUE DES MIGMATITES ET DES MATERIAUX NODULAIRES DE BATOURI, NGOURA ET DE GARI-GOMBO .....	102
III.2.3.1. Données minéralogiques .....	102
III.2.3.2. Données paramétriques .....	103
III.2.4. Comparaison et discussion des résultats .....	107
III.3. ETUDES GEOTECHNIQUES DES FORMATIONS ROCHEUSES ET DES MATERIAUX MEUBLES NODULAIRES .....	108
III.3.1. ESSAIS SUR LES MATERIAUX DES ROCHES DE LA REGION DE L'EST ....	109
III.3.1.1. Essais sur les carrières des roches massives .....	110
III.3.2. ESSAIS SUR LES MATERIAUX ROCHEUX DE LA REGION DU SUD .....	117
III.3.2.1. Résultats des essais réalisés .....	117
III.3.2.2. Analyse des résultats des essais réalisés .....	117
III.3.3. Comparaison des résultats d'identification des carrières de la Région de l'Est et du Sud .....	117
III.3.3.1. Intéret des matériaux (cas des roches) .....	119
III.3.3.2. Dégradations .....	119
III.3.3.3. Recommandations .....	119

III.3.4. ESSAIS SUR LES MATERIAUX DES SOLS LATERITIQUES DE LA REGION DE L'EST .....	122
III.3.4.1. Résultats des matériaux utilisés sur les routes Abong-Mbang- Bonis et Mandjou-Batouri .....	122
III.3.4.2. Matériaux issus de l'altération des gneiss .....	122
III.3.4.3. Matériaux issus des migmatites .....	130
III.3.4.4. Matériaux issus des schistes.....	130
III.3.5. ESSAIS SUR LES MATERIAUX DES SOLS LATERITIQUES DE LA REGION DU SUD .....	140
III.3.5.1. Résultats des matériaux utilisés sur route de Nkoemvon Ambam.....	140
III.3.5.2. Résultats des matériaux utilisés sur route d'Ambam-Kye-Ossi.....	141
III.3.6 OBSERVATIONS ET COMPARAISON DES RESULTATS D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX PROVENANT DES CARRIERES LATERITIQUES DE L'EST ET DU SUD CAMEROUN .....	141
III.3.6.1 Intéret des matériaux .....	142
III.3.6.2.Dégradations .....	145
III.3.6.3. Recommandations .....	145
III.3.7. ESSAIS IN SITU ET AU LABORATOIRE .....	149
III.3.7.1. Cas des routes en terre .....	149
III.3.7.2 Cas des routes revêtues .....	151
III.4. CARACTERES GEOTECHNIQUES ET CARACTERES GEOCHIMIQUES : CORRELATIONS, INTERET.....	169
III.4.1. ROCHES DU SOCLE .....	169
III.4.2. PARAMETRES NORMATIFS ET PROPRIETES MECANIQUES ET PHYSIQUES.....	169
III.4.2.1. Indice relatif de lixiviation potentielle IRLP et propriétés mécaniques des matériaux.....	169
III.4.2.2. Importance potentielle du fer ferrique libre (ifl) et propriétés mécaniques et physiques des matériaux .....	169
III.4.2.3. Importance potentielle d'aluminium libre (IAL) et propriétés mécaniques des matériaux.....	170
III.4.2.4. Indice relatif de confinement potentiel (IRCP) et propriétés mécaniques des matériaux.....	170
III.4.2.5. Indice relatif de lixiviation potentiel (IRLP) et propriétés mécaniques des .....	170
III.4.3. INTERETS DES MATERIAUX ETUDIES DANS LE GENIE CIVIL .....	170
III.4.4. OBSERVATIONS SUR LES RAPPORTS GEOCHIMIE- GEOTECHNIQUE ET INTERET DES MATERIAUX .....	174
III.5. PROCEDES DE STABILISATION DES SOLS LATERITIQUES .....	174
<b>CHAPITRE IV. DISCUSSION SUR LES RESULTATS .....</b>	<b>177</b>
IV.1.PETROLOGIE DES FORMATIONS ET DES MATERIAUX NODULAIRES DE L'EST ET DU SUD -CAMEROUN .....	178



IV.1.1. PETROLOGIE DES FORMATIONS ROCHEUSES .....	178
IV.1.2. PETROLOGIE DES MATERIAUX NODULAIRES .....	179
IV.2. CARACTERISATION NORMATIVE ALTEROLOGIQUE DES MATERIAUX DU DE L'EST ET DU SUD CAMEROUN .....	180
IV.3. ETUDES GEOTECHNIQUES DES SOLS ET DES ROCHEES DU SUD CAMEROUN	181
IV.3.1. CAS DES MATERIAUX ROCHEUX .....	181
IV.3.2. CAS DES MATERIAUX MEUBLES NODULAIRES LATERITIQUES .....	182
IV.3.3. ESSAIS IN-SITU .....	183
IV.3.4 ESSAIS AU LABORATOIRE .....	184
III.4. CARACTERES GEOTECHNIQUES ET CARACTERES GEOCHIMIQUES : CORRELATIONS, INTERET .....	184
III.4.1. ROCHEES DU SOCLE .....	185
III.4.2. PARAMETRES NORMATIFS ET PROPRIETES MECANIQUES ET PHYSIQUES .....	185
III.4.2.1. Indice relatif de lixiviation potentielle IRLP et propriétés mécaniques des matériaux .....	185
III.4.2.2. Importance potentielle du fer ferrique libre (ifl) et propriétés mécaniques et physiques des matériaux .....	185
III.4.2.3. Importance potentielle d'aluminium libre (IAL) et propriétés mécaniques des matériaux .....	185
III.4.2.4. Indice relatif de confinement potentiel (IRCP) et propriétés mécaniques des matériaux .....	186
III.4.2.5. Indice relatif de lixiviation potentiel (IRLP) et propriétés mécaniques des matériaux .....	186
III.5. PROCEDURE DE STABILISATION DES SOLS LATERITIQUES NODULAIRES ....	186
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>189</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>194</b>
<b>LISTES DES ANNEXES</b>	
ANNEXE I : COORDONNEES GEOGRAPHIQUES DES CARRIERES DES SOLS LATERITQUES.	
ANNEXE II : RELEVÉ DES RESULTATS NORMATIFS.	
ANNEXE III : ANALYSES GEOTECHNIQUES.	
ANNEXE IV : TRAVAUX SCIENTIFIQUES.	

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b> Situation géographique des zones d'étude d'après la carte administrative du Cameroun .....	8
<b>Figure 2.</b> Réseau hydrographique de la zone d'étude (Olivry, 1986) .....	11
<b>Figure 3:</b> Carte géologique du Cameroun (Nzenti et al., 2010) montrant la localisation des zones d'étude .....	14
<b>Figure 4.</b> Profil type d'altération de gneiss de la localité de Bent à Doumé (Est Cameroun) .....	16
<b>Figure 5.</b> Chaussée revêtue .....	20
<b>Figure 6:</b> Profil en travers type d'une chaussée revêtue .....	21
<b>Figure 7 :</b> Affleurement de migmatite à biotite et à pyroxène situé à 1 km du carrefour .....	44
<b>Figure 8 :</b> Affleurement d'orthogneiss à biotite et à amphibole de Ben à Doumé .....	44
<b>Figure 9 :</b> Affleurement de granite à biotite et à amphibole situé à 8 km de Bertoua, .....	44
<b>Figure 10.</b> Prélèvement des moellons pour essais pétrologique dans la zone de Bent à Doumé (Est Cameroun) .....	47
<b>Figure 11.</b> Prélèvement des granulats pour essais mécaniques .....	47
<b>Figure 12 .</b> Prélèvement de sols latéritiques nodulaires dans la zone de Nganké (Est Cameroun) .....	47
<b>Figure 13.</b> Scieuse électrique .....	48
<b>Figure 14.</b> Polisseuse.....	48
<b>Figure 15.</b> Rectifieuse .....	48
<b>Figure 16.</b> Plaque chauffante.....	48
<b>Figure 17:</b> Appareil de Casagrande.....	54
<b>Figure 18:</b> Série des tamis pour analyse granulométrique .....	54
<b>Figure 19:</b> Appareil d'équivalent du sable .....	54
<b>Figure 20:</b> Appareil de coefficient d'aplatissement.....	56
<b>Figure 21.</b> Densitomètre à membrane étalonné et prêt à être utilisé.....	56
<b>Figure 22.</b> Calcul de compacité sur la couche de base du PK 54+680 à côté de cône à sable sur la route Abong-Mbang-Bonis (ville de Doumé).....	56
<b>Figure 23 :</b> Carottage sur la couche de roulement au PK 45+480D, route : Abong-Mbang-Bonis.....	59
<b>Figure 24:</b> Appareil de Los Angeles .....	59
<b>Figure 25:</b> Appareil de presse CBR et Presse Marshall .....	62
<b>Figure 26:</b> Appareil de presse à béton.....	62
<b>Figure 27:</b> Appareil de pénétration à l'aiguille pour bitume .....	62
<b>Figure 28 :</b> Poutre de Benkelman.....	66
<b>Figure 29 :</b> Sondage au pénétromètre dynamique au PK 19+900 du tronçon Ampel – Lomié au niveau de la rivière Dja (village Djaposter) .....	66

<b>Figure 30</b> : Inclinaison d'une pile pour faute de capacité portante du sol suffisante au PK 19+900 du tronçon Ampel – Lomié au niveau de la rivière Dja (village Djaposter).....	66
<b>Figure 31</b> : Une vue de l'organisation microscopique de granite de Bertoua en LPA,.....	72
<b>Figure 32</b> : Une vue de l'organisation microscopique de migmatite de Batouri en LPA, .....	72
<b>Figure 33</b> : Une vue de l'organisation microscopique de migmatite de Ngoura en LPA, Qz : Quartz, Plag : Plagioclases, Bi : Biotite .....	72
<b>Figure 34</b> : Une vue de l'organisation microscopique de migmatite de Gari-Gombo .....	73
<b>Figure 35</b> : Une vue de l'organisation microscopique des gneiss de Nguélémdouka.....	73
<b>Figure 36</b> : Une vue de l'organisation microscopique des gneiss de Bent à Doumé en LPA,....	73
<b>Figure 37</b> . Diffractogrammes des granites de Bertoua (BER), des gneiss d'Andom (AND), de Bent (BEN), de Nguélémdouka (NGU), et de Meyo-Nyaka (MEY). ..	75
<b>Figure 38</b> . Diffractogrammes des migmatites de Ngoura (NGO), de Batouri (BAT) et de Gari-Gombo (GAR).....	75
<b>Figure 39</b> : Une vue de l'organisation microscopique des gneiss d'Andom en LPA, .....	79
<b>Figure 40</b> : Une vue de l'organisation microscopique des gneiss de Meyo-Nyaka.....	79
<b>Figure 41</b> . Diffractogrammes des sols latéritiques nodulaires sur granites de Bertoua (BER 1G et BER 2G) , sur gneiss de Nguélémdouka (NGU 1G) et de Palixo-Ampel (PAL 1G). ..	82
<b>Figure 42</b> . Diffractogrammes des sols latéritiques nodulaires sur migmatites de Yokadouma-Mboy (YOK 1G), de Ngoura-Yola (YOL 1G), de Yola-Yokadouma (YOL 2G) et sur schistes de Yokadouma-Bangué (YOK 2G) et Bangué-Moloundou (MOL 1G).....	82
<b>Figure 43</b> : Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les matériaux du secteur de Bertoua (Ekodeck et Kamgang, 2002) ;.....	94
<b>Figure 44</b> : Caractérisation de l'intervention des facteurs pédologiques dans les matériaux du secteur de Bertoua (Ekodeck et Kamgang, 2002) ; A-I-C : altération, induration et confinement potentiel.....	94
<b>Figure 45</b> : Caractérisation de l'importance de lixiviation dans les matériaux du secteur de Bertoua, (Ekodeck et Kamgang, 2002) en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; L : Lixiviation potentielle .....	95
<b>Figure 46</b> : Caractérisation de l'importance de l'altération dans les matériaux du secteur de Bertoua, (Ekodeck et Kamgang, 2002) en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; A : Altération.....	95
<b>Figure 47</b> : Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les matériaux des secteurs d'Andom, Bent, Meyo-Nyaka, Nguélémdouka et de Lomié (Ekodeck et Kamgang, 2002) ; L-I-C : Lixiviation, induration et confinement potentiel.....	100
<b>Figure 48</b> : Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les matériaux des secteurs d'Andom, Bent, Meyo-Nyaka, Nguélémdouka et de Lomié, (Ekodeck et Kamgang, 2002) ; A-I-C : altération, induration et confinement potentiel.....	100
<b>Figure 49</b> : Caractérisation de l'importance de lixiviation dans les matériaux des secteurs d'Andom, Bent, Meyo-Nyaka, Nguélémdouka et Palisco (Ekodeck et Kamgang, 2002) en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; L : Lixiviation potentielle .....	101

<b>Figure 50</b> : Caractérisation de l'importance de l'altération dans les matériaux des secteurs d'Andom, Bent (Doumé), Meyo-Nyaka, Nguelémendouka et Palisco (Ekodeck et Kamgang, 2002) en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) : A: altération potentielle .....	101
<b>Figure 51</b> : Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les matériaux des secteurs de Gari-Gombo, Ngoura et Batouri (Ekodeck et Kamgang, 2002) ; L-I-C : Lixiviation, induration et confinement potentiel).....	105
<b>Figure 52</b> : Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les matériaux des secteurs de Gari-Gombo, Ngoura et Batouri (Ekodeck et Kamgang, 2002) ; A-I-C : altération, induration et confinement).....	105
<b>Figure 53</b> : Caractérisation de l'importance des facteurs pédogénétiques dans les matériaux de Gari-Gombo, de Ngoura et de Batouri (Ekodeck et de Kamgang, 2002) en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; L : Lixiviation potentielle .....	106
<b>Figure 54</b> : Caractérisation de l'importance des facteurs pédogénétiques dans les matériaux de Gari-Gombo, de Ngoura et de Batouri (Ekodeck et de Kamgang, 2002) en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; L : Lixiviation potentielle .....	106
<b>Figure 55</b> : Comparaison des résistances à la presse à béton et au scléromètre .....	111
<b>Figure 56</b> . Courbe granulométrique pour le mélange des granulats à blanc .....	116
<b>Figure 57</b> : Courbes granulométriques de 0/25 provenant de la carrière d'Andom et Meyo-Nyaka .....	118
<b>Figure 58</b> : Mise en oeuvre de la couche de base en 0/31.5 au PK 0+00 de la route Mbama-Messamena en 2017 .....	120
<b>Figure 59</b> . Mise en oeuvre de la couche de roulement en béton bitumineux 0/10 au PK 4+100 de la route Mbama-Messamena en 2017 .....	120
<b>Figure 60</b> . Mise en oeuvre des enduits superficiels bicouche 6/10 et 10/14 au PK 0+040 voie n°10 voirie d'Abong-Mbang en 2017 .....	120
<b>Figure 61</b> . Construction d'un dalot double au PK 45 de la route Abong-Mbang - Bonis en 2009 .....	120
<b>Figure 62</b> . Dégradation due au manque d'assainissement PK 0+020: de la route Abong-Mabng - Bonis 2017.....	121
<b>Figure 63</b> . Dégradation due au manque des parkings des gros porteurs PK 52+000: de la route Abong-Mabng - Bonis 2017.....	121
<b>Figure 64</b> . Dégradation due à non protection de la couche de base imprégnée au PK 72+000 de la route Abong-Mbang - Bonis 2009 .....	121
<b>Figure 65</b> . Dégradation due au sous dimensionnement au PK 2+300 de la route Ayos-Abong-Mbang en 2017.....	121
<b>Figure 66</b> . Carrière de grave latéritique issue d'altération des granites .....	123
<b>Figure 67</b> . Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Abong-Mbang-Bonis .....	123
<b>Figure 68</b> . Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Abong-Mbang-Bonis (suite) .....	123
<b>Figure 69</b> . Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Abong-Mbang-Bonis (suite) .....	123

<b>Figure 70</b> : Courbes granulométriques des matériaux de carrières utilisées sur les routes Mandjou-Batouri .....	124
<b>Figure 71</b> : Carrière de grave latéritique issu d'altération des gneiss .....	126
<b>Figure 72</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Ayos-Abong-Mbang .....	126
<b>Figure 73</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Ayos-Abong-Mbang (suite) .....	126
<b>Figure 74</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Ayos-Abong-Mbang (suite) .....	127
<b>Figure 75</b> : Courbes granulométriques des matériaux de carrières utilisées sur la route Ayos- .....	127
<b>Figure 76</b> : courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Ayos-Abong-Mbang (suite) .....	127
<b>Figure 77</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur les routes Mbet-Nguélémendouka-Mboma et Mampang-Angossas-Mboma .....	131
<b>Figure 78</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Doumé-Nguélémendouka .....	131
<b>Figure 79</b> Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Abong-Mbang-Doumé .....	131
<b>Figure 80</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur les routes : Abong-Mbang-Nkouak et Nkouak-Palisco.....	131
<b>Figure 81</b> : Carrières de grave latéritique issu d'altération des migmatites.....	134
<b>Figure 82</b> : Courbes granulométriques des matériaux d'emprunts utilisés sur la route Ngoura- Yola.....	134
<b>Figure 83</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Ngoura-Yola (NY) (suite) et Batouri-Ngoura (BN).....	134
<b>Figure 84</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Yola-Yokadouma .....	134
<b>Figure 85</b> : Carrière de grave latéritique issu d'altération de schistes .....	136
<b>Figure 86</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Yokadouma-Bangué.....	137
<b>Figure 87</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Bangué-Moloundou.....	137
<b>Figure 88</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Bangué-Moloundou (suite) .....	137
<b>Figure 89</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur les routes : Ampel-Lomié .....	137
<b>Figure 90</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières (route Nkoemvon-Ambam) .....	143
<b>Figure 91</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières (route Nkoemvon-Ambam) (suite).....	143
<b>Figure 92</b> : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées de la route Ambam- Kye- Ossi.....	144

<b>Figure 93</b> : Grave latéritique en couche de roulement PK 8 + 500 de la route Mandjou-Batouri en 2006.....	146
<b>Figure 94</b> : Grave latéritique en couche de forme au PK 0+050 route Mbama-Messamena 2017.....	146
<b>Figure 95</b> . Grave latéritique en remblais dans les zones de purge PK 1+800 de la route Mbama-Messamena en 2017.....	146
<b>Figure 96</b> . Grave latéritique en bloc technique du dalot simple au PK 1+850 (route Mbama-Messamena) en 2017.....	146
<b>Figure 97</b> . Grave latéritique en couche de fondation PK 3+000 route Mbama-Messamena en 2016.....	147
<b>Figure 98</b> : Tôles ondulées de 10 cm de hauteur au PK 10+500 de la route : Mandjou – Batouri.en 2007.....	147
<b>Figure 99</b> : Dégradation de la chaussée due à l’insuffisance du compactage.....	147
<b>Figure 100</b> : Détérioration de la chaussée par le trafic des poids lourd, à cause d’une buse obstruée faute d’entretien courant sur la route : Ngoura – Yola (78 km) au PK 3 + 000 en 2007.....	147
<b>Figure 101</b> : Bourbier créé par les gros porteurs au PK 2+000 du tronçon Ngoura – Yola après violation de la barrière de pluies en septembre 2007.....	148
<b>Figure 102</b> : Bourbier de plus de 50 cm de profondeur créé par les grumiers au PK 30 + 000 de la route Yokadouma-Bangué en 2006.....	148
<b>Figure 103</b> : Dégradation de la chaussée au PK 30 + 000 de la route Yokadouma-Bangué à cause de la nature des matériaux pendant la saison de pluies en septembre 2007.....	148
<b>Figure 104</b> : Résultats de compacité, de poids volumique sec et teneurs en eau en 2005 et en 2006 du PK 20+200 au PK 23+800 sur la route : Abong-Mbang-Nkouak.....	152
<b>Figure 105</b> : Résultats de compacité, de poids volumique sec et teneurs en eau du PK 15+000 au PK 22+800 en 2005, du PK 18+000 au PK 22+800 en 2006 et du PK 15+200 au PK 20+000 en 2007 de la route : Ngoura-Yola.....	153
<b>Figure 106</b> : Résultats de compacité, de poids volumique sec et teneurs en eau du PK 38+200 au PK 43+000 en 2006 et en 2007 sur la route : Yola-Yokadouma.....	154
<b>Figure 107</b> : Résultats de compacité, de poids volumique sec et de teneur en eau du PK 14+200 au PK 19+400 en 2005, 2006 et en 2007 sur la route Yokadouma-Bangué.....	155
<b>Figure 108</b> : Résultats de compacités sur la plate- forme du PK 60+850 au PK 63+850 sur la route Abong-Mbang-Bonis en juin 2009.....	158
<b>Figure 109</b> : Résultats de déflexions sur la plate- forme du PK 61+350 au PK 65+150 sur la route Abong-Mbang-Bonis en juin 2009.....	158
<b>Figure 110</b> : Résultats de compacités sur la couche de fondation entre PK 59+400 et 64+800 de la route Abong-Mbang-Bonis.....	158
<b>Figure 111</b> : Résultats de déflexions sur la couche de fondation entre PK 59+200 et 65+800 de la route Abong-Mbang-Bonis.....	158
<b>Figure 112</b> : Résultats de compacité sur la couche de base du PK 62+780 au PK 66+880 de la route Abong-Mbang-Bonis.....	160
<b>Figure 113</b> : Résultats de déflexions sur la couche de base entre PK 62+750 et 66+900 de la route Abong-Mbang-Bonis.....	160

<b>Figure 114</b> : Résultats de compacité sur la couche de roulement du PK 46+300 au PK 48+500 de la route Abong-Mbang-Bonis .....	160
<b>Figure 115</b> : Epaisseur de la couche de roulement du PK 46+300 au PK 48+500 de la route Abong-Mbang-Bonis.....	160
<b>Figure 116</b> : Courbes granulométrique après extraction de bitume sur la route Ayos-Abong-Mbang .....	162
<b>Figure 117</b> : Courbes granulométriques après extraction de bitume sur la route Ayos-Abong-Mbang .....	162
<b>Figure 118</b> : Quantité des liants (400/600) mesurés pour la couche d'accrochage entre PK 48+830 et 55+423 de la route Abong-Mbang-Bonis .....	163
<b>Figure 119</b> : Résultats de compacité, de poids volumique sec et de teneurs en eau du PK 18+000 au PK 20+700 sur la plate-forme de la route Nkoemvon –Ambam .....	166
<b>Figure 120</b> : Résultats de compacité, de poids volumique sec et de teneurs en eau du PK 5+900 au PK 8+750 sur la couche de fondation de la route Nkoemvon-Ambam ..	167
<b>Figure 121</b> : Résultats de compacité, de poids volumique sec et teneurs en eau du PK 10+000 au PK 12+200 sur la couche de base de la route Nkoemvon-Ambam .....	168
<b>Figure. 122</b> : Corrélation entre le Los Angeles (LA) et le degré virtuel relatif de l'altération de la roche (DVRAR).....	171
<b>Figure. 123</b> : Corrélation entre le poids spécifique ( $\gamma_s$ ) et le degré virtuel relatif de l'altération de la roche (DVRAR).....	171
<b>Figure. 124</b> : Corrélation entre le Los Angeles (LA) et l'Indice relatif d'Indiration Potentielle (IRIP).....	171
<b>Figure. 125</b> : Corrélation entre le CBR et Indice de fer ferrique libre ( IFL ) .....	172
<b>Figure. 126</b> : Corrélation entre le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) et et Indice de fer ferrique libre ...	172
<b>Figure. 127</b> : Corrélation entre le CBR et l'Indice d'aluminium libre (IAL) .....	172
<b>Figure.128</b> : Corrélation entre l'Indice de plasticité (IP) et Indice de confinement potentiel (IRCP) .....	173
<b>Figure.129</b> : Corrélation entre la limite de liquidité (WL) et l'Indice de confinement potentiel ( IRCP) .....	173

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> : Classification de grave latéritiques .....	20
<b>Tableau 2</b> : Coefficient de foisonnement en fonction de la nature des matériaux.....	20
<b>Tableau 3</b> : Différentes classes de sol .....	25
<b>Tableau 4</b> : Classe de trafic journalier .....	25
<b>Tableau 5</b> : Variation par rapport au trafic journalier moyen dans la Région de l'Est en 2003, en 2004 et en 2005 (MINTP/DR/ cellule de la programmation du Cameroun).....	25
<b>Tableau 6</b> : Répartition suivant les différentes catégories de véhicules dans la Région de l'Est .	26
<b>Tableau 7</b> : Répartition suivant les grandes catégories de véhicules dans la Région de l'Est.....	26
<b>Tableau 8</b> . Pentas des remblais en fonction de leurs hauteurs .....	29
<b>Tableau 9</b> : Pentas de déblais en fonction de leurs hauteurs.....	29
<b>Tableau 10</b> : Caractéristiques de graveleux latéritiques pour couche de base et couche de fondation .....	31
<b>Tableau 11</b> : Fuseau granulométrique de graves concassés 0/31,5 et 0/40.....	31
<b>Tableau 12</b> : Valeurs de Los Angeles et de Micro-Deval pour l'essieu entre 8 et 10 tonnes.....	31
<b>Tableau 13</b> : Valeurs de Los Angeles et de Micro-Deval pour l'essieu de 13 tonnes.....	31
<b>Tableau 14</b> : Principaux type de compacteurs en fonction de la nature du sol.....	34
<b>Tableau 15</b> : Classification américaine des sols (Highway Research Board) transposée en unités et tamis français (extrait d'Ekodeck, 1976).....	38
<b>Tableau 16</b> : Itinéraires des zones étudiées dans la Région de l'Est.....	43
<b>Tableau 17</b> . Exemple de calcul de compacité à l'aide du cône à sable .....	58
<b>Tableau 18</b> : Indications relatives à l'essai Los Angeles ( NF P 18-573).....	59
<b>Tableau 19</b> . Résultats d'analyses chimiques des éléments majeurs (%) et éléments en trace (pmm) des formations du Sud Cameroun .....	76
<b>Tableau 20</b> : Résultats d'analyses chimiques des éléments majeurs (%) et éléments en traces (ppm) des matériaux de l'horizon nodulaire du Sud Cameroun .....	84
<b>Tableau 21</b> : Bilan isozircorium des éléments en traces du niveau médian gravillonnaire .....	85
<b>Tableau 22</b> : Mobilité des éléments majeurs et en traces d'après les calculs isozircorium dans le niveau médian .....	87
<b>Tableau 23</b> : Résultats d'analyses minéralogiques et chimiques relatifs aux éléments majeurs (%) et éléments en traces (ppm) des schistes de Mboy II, (YOK 1G) de Yokadouma-Bangué (YOK 2G) et de Bangué-Moloundou (MOL 1G) comparés à la composition moyenne des schistes de Mbalmayo (MBr) et Bengbis (Ber) de Onana (2010) .....	89
<b>Tableau 24</b> : Composition minéralogique virtuelle et paramètres altérologiques des matériaux de Bertoua .....	93
<b>Tableau 25</b> : Composition minéralogique virtuelle et paramètres altérologiques des matériaux de Bent, Nguélémendouka, Palisco-Ampel (Région de l'Est) et d'Andom et Meyo- Nyaka (Région du Sud).....	99
<b>Tableau 26</b> : Composition minéralogique virtuelle et paramètres altérologiques des secteurs de Batouri, Ngoura et Yokadouma.....	104



<b>Tableau 27 :</b> Caractéristiques des matériaux des carrières des roches massives .....	111
<b>Tableau 28 :</b> Composition du béton et détermination de sa résistance à 28 jours .....	111
<b>Tableau 29 :</b> Coefficient à appliquer pour déterminer la résistance du béton à n jours.....	113
<b>Tableau 30 :</b> Analyse des constituants granulaires de gneiss de Bent pour la formulation de BB.....	113
<b>Tableau 31 :</b> Calcul des coefficients pour la formulation de BB.....	113
<b>Tableau 32 :</b> Calcul de surface spécifique .....	114
<b>Tableau 33 :</b> Fuseau de spécification pour 0/14 ainsi que la courbe du mélange à blanc de 10/14 = 34 % ; 6/10 = 11 % et 0/5 = 55 % .....	114
<b>Tableau 34 :</b> Proposition des formules retenues pour le béton bitumineux (BB).....	115
<b>Tableau 35.</b> Composition granulométrique après extraction de bitume pour chaque teneur en bitume étudiée .....	116
<b>Tableau 36.</b> Caractéristiques mécaniques obtenues des matériaux pour le BB.....	116
<b>Tableau 37 :</b> Caractéristiques des gneiss des carrières d'Andom et de Meyo-Nyaka.....	118
<b>Tableau 38:</b> Identification des carrières des roches de l'Est et du Sud .....	118
<b>Tableau 39 :</b> Caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières .....	124
<b>Tableau 40 :</b> Caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières sur les granites (route Abong-Mbang-Bonis).....	124
<b>Tableau 41 :</b> Synthèse des caractéristiques géotechniques des matériaux d'altération des granites de la Région de l'Est utilisés sur les routes Abong-Mbang-Bonis (AMB), Mandjou-Batouri (MB) et Nkoemvon-Ambam (NA).....	125
<b>Tableau 42 :</b> Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des gneiss (route Ayos-Abong-Mbang).....	128
<b>Tableau 43 :</b> Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des gneiss (route Ayos-Abong-Mbang (suite)) (ABM).....	128
<b>Tableau 44 :</b> Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des gneiss : routes : Mbet-Nguélémondouka-Mboma (M N M) Mampang-Angossas-Mboma (MAM), Doumé- Nguélémondouka (DN),.....	132
<b>Tableau 45 :</b> Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des gneiss dans les environs des Routes : Abong-Mbang-Doumé (AMD), Abong-Mbang-Nkouak (AMK) et Nkouak-Palisco (KP).....	132
<b>Tableau 46:</b> Synthèse des caractéristiques géotechniques des matériaux d'altération des gneiss de la Région de l'Est utilisés sur les routes Ayos-Abong-Mbang (AAM), Abong-Mbang-Doumé (AD),, Abong-Nkouak et Nkouak-Palisco (AKKP), Mbet-Nguélémondouka-Mboma (MNM), Mampang-Angossas-Mboma (MAM),Doumé-Nguélémondouka (DN) et Ambam-Kye-Ossi (AKO).....	133
<b>Tableau 47 :</b> Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des migmatites : routes Ngoura-Yola (NY) et Batouri-Ngoura (BN) .....	135
<b>Tableau 48 :</b> Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des migmatites : route Yola-Yokadouma .....	135

<b>Tableau 49 :</b> Synthèse des caractéristiques géotechniques des matériaux d'altération des migmatites de la Région de l'Est utilisés sur les routes Batouri-Ngoura (BN), Ngoura-Yola (NY) et Yola-Yokadouma (YY) .....	136
<b>Tableau 50:</b> Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des schistes : route Yokadouma-Bangué (YB).....	138
<b>Tableau 51 :</b> Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des schistes : route Bangué-Moloundou (BM).....	138
<b>Tableau 52 :</b> Synthèse des caractéristiques géotechniques des matériaux d'altération des schistes de la Région de l'Est utilisés sur les routes Yokadouma-Bangué (YB), Bangué-Moloundou (BM), Ampel-Lomié (AL) et Ayos-Abong-Mbang (Ayes-Mayos) (AAM) .....	139
<b>Tableau 53 :</b> Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières utilisées sur la route Nkoemvon-Ambam.....	143
<b>Tableau 54 :</b> Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières utilisées sur la route Ambam-Kye-Ossi .....	144
<b>Tableau 55:</b> Comparaison des résultats d'analyse des matériaux latéritique de l'Est et du Sud .	144
<b>Tableau 56 :</b> Comparaison des résultats des poids volumiques secs in situ obtenus lors de la mise en œuvre de la plate-forme des routes en terre entre 2005 et 2007 dans la Région de l'Est.....	156
<b>Tableau 57 :</b> Récapitulatif des contraintes admissibles des points de sondages pénétrométriques au niveau du Pont semi-définitif au PK 6 km du tronçon : Kobi-Mbang .....	156
<b>Tableau 58 :</b> Récapitulatif des contraintes admissibles des points de sondages pénétrométriques au niveau du Pont semi-définitif du PK 27,1km du tronçon : Mampang-Angossas-Mboma .....	157
<b>Tableau 59 :</b> Récapitulatif des contraintes admissibles des points de sondages pénétrométriques au niveau du Pont semi-définitif du PK 19,9 du tronçon : Ampel-Lomié .....	157
<b>Tableau 60 :</b> Résultats de viscosité du cut-back utilisé sur la route Abong-Mbang-Bonis .....	162
<b>Tableau 61 :</b> Résultats de pénétration de bitume 50/70 utilisé sur la route : Abong-Mbang-Bonis .....	163
<b>Tableau 62 :</b> Résultats de déflexion caractéristique (dc) sur la plate-forme du PK 18+00 au PK 20+940 de la route Nkoemvon-Ambam.....	165
<b>Tableau 63 :</b> Résultats de déflexion caractéristique (dc) sur la couche de fondation du PK 5+900 au PK 11+440 de la route Nkoemvon-Ambam .....	165

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>AASHTO:</b>	American Association for State Highways and Transportation Officials
<b>APS :</b>	Avant Projet Sommaire
<b>BB :</b>	Béton bitumineux
<b>BCEOM :</b>	Société Française d'Ingénierie
<b>CA :</b>	Coefficient d'aplatissement
<b>CBR:</b>	Californian Bearing Ratio
<b>CCTP :</b>	Cahier de Clauses Techniques Particulières
<b>CEBTP :</b>	Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics
<b>CRETP :</b>	Centre de Recherche et d'Etudes des Travaux Publics
<b>DA:</b>	Densité apparente
<b>DEGN:</b>	Direction des études Générales et e la Normalisation
<b>ENSP:</b>	Ecole Nationale Supérieure Polytechnique
<b>FCFA :</b>	Franc de la Communauté Financière africaine.
<b>ISTED :</b>	Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement
<b>LA:</b>	Los Angeles
<b>LCPC:</b>	Laboratoire Central des Ponts et chaussées
<b>MD:</b>	Micro-Deval
<b>N :</b>	Route nationale
<b>ORSTOM :</b>	Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
<b>Ph.D :</b>	Philosophy Doctorate
<b>PSD :</b>	Pont semi-défini
<b>PME :</b>	Petites et Moyennes Entreprises
<b>RD :</b>	Routes départements
<b>RP :</b>	Routes provinciales
<b>RPD :</b>	Résistance du pénétromètre dynamique
<b>Qadm :</b>	Contrainte admissible
<b>SETRA:</b>	Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes

## RESUME

Une étude de la caractérisation minéralogique, géochimique et géotechnique des granulats et des sols latéritiques nodulaires dans l'optique des travaux routiers a été menée au Cameroun. Cette étude a pour but d'une part de présenter les différents facteurs qui peuvent être à l'origine de dégradations prématurées de ces routes et d'autre part de caractériser sur le plan minéralogique, géochimique et géotechnique les granulats des roches et les sols latéritiques nodulaires de quelques localités des régions du Sud et de l'Est, habituellement utilisés en construction routière. La méthodologie utilisée est basée sur une approche multidisciplinaire (essais in situ, essais au laboratoire et suivi de mise en oeuvre des matériaux)

Elle a été menée sur cent quarante deux (142) échantillons de matériaux nodulaires. Cent vingt neuf (129) proviennent de la Région de l'Est et treize (13) de la Région du Sud, ainsi que sur huit (8) échantillons de roches mères courantes dont sont issus ces matériaux d'altération. Six (6) échantillons proviennent de la Région de l'Est et deux (2) de la Région du Sud. Après une description macroscopique de ces matériaux, tous les échantillons prélevés ont fait l'objet d'études géotechniques aux Laboratoires du LABOGENIE, SOIL & WATER et d'EDOK-ETER. La minéralogie des lames minces et des poudres d'échantillons de roches et de quelques échantillons de produits d'altération a pu être déterminée par microscope optique et par diffractométrie aux rayons X sur des fractions fines totales. Les déterminations chimiques globales des éléments majeurs des échantillons de roches et des échantillons du niveau médian ont été réalisées par fluorescence X, celles des éléments en traces par spectrométrie de masse. Ces analyses ont été réalisées aux laboratoires géosciences au Canada.

Sur le plan pétrologique, les résultats obtenus montrent que les granites de Bertoua et les migmatites de Batouri, de Ngoura et de Yokadouma (Gari-Gombo) sont des formations de couleur claire. Les gneiss de Bent, de Nguélémendouka, d'Andom et de Meyo-Nyaka sont des formations de couleur sombre. Ces roches sont composées dans l'ensemble de quartz, de feldspath, de biotite, de muscovite, d'amphibole et parfois de pyroxène. L'analyse chimique des roches étudiées montre que la silice et l'alumine constituent plus de 75 % en poids d'oxydes par rapport à d'autres minéraux. Le degré virtuel relatif de l'altération de la roche (DVRAR) est  $< 6$  %. Les roches étudiées sont utilisées en couche de base, en couche de roulement comme béton bitumineux ou comme enduits superficiels et en ouvrages d'art (Ponts, dalots, buses etc...). Les résultats des essais réalisés sont conformes aux spécifications du C.C.T.P.

Les sols latéritiques nodulaires dérivés de l'altération de ces roches (niveau médian) sont de couleur rougeâtre. Leur épaisseur varie de 1,2 à 2,5 m. Ils se composent de quartz, de kaolinite, de muscovite, de goethite, d'hématite, de gibbsite, d'anatase et parfois de zircon. L'analyse chimique montre qu'ils sont, soit siliceux, soit ferriques. La silice, l'alumine et le fer ferrique représentent plus de 80 % en poids d'oxydes. Le degré virtuel relatif de l'altération de la roche (DVRAR) varie entre 30 et 81 %. Les processus d'altération chimique sont la monosiallisation, l'allitisation et le cuirassement ferrugineux.

Sur le plan géotechnique, les résultats des essais de compacité et de déflexion sont conformes aux spécifications du C.C.T.P.. Les données de compacité sur la plate-forme (cas de routes en terre) montrent que la portance des matériaux diminue au fur et à mesure que les années passent si le rechargement n'est pas exécuté. Ceci par ailleurs affaiblit le comportement des matériaux qui subissent ainsi des dégradations perpétuelles surtout en périodes de pluies. Cette dégradation est accentuée par l'incivisme des usagers (gros porteurs) qui violent les barrières de pluies pendant les périodes pluvieuses. Les caractéristiques géotechniques de tous les matériaux analysés dans le niveau médian du profil d'altération montrent que ces matériaux sont utilisables en couche de fondation pour un trafic de la classe T3 sans subir aucun traitement. Les matériaux dont le CBR est  $> 45$  %, peuvent être stabilisés aux granulats de la classe 5/20 dont le Los Angeles est  $< 25$  % pour être utilisés en couche de base pour un trafic de la classe T3.

Les résultats des investigations géotechniques ont permis d'établir des corrélations entre les paramètres altérologiques et les propriétés physiques des roches et les matériaux du niveau médian nodulaire. Quelques recommandations pour palier le problème de dégradation prématurée des routes ont été données.

**Mots clés :** Sud Cameroun, Est Cameroun, roches, sols latéritiques nodulaires, minéralogie, géochimie, géotechnique et altérologie.

## ABSTRACT

A study on mineralogical, geochemical and geotechnical characterization of rock aggregates and nodular lateritic soils for road construction was conducted in Cameroon. The aim of this study was to present the various factors that may cause premature degradation of roads and to mineralogically, geochemically, and geotechnically characterize rock aggregates and lateritic nodular soils from some areas in the southern and eastern regions of Cameroon, usually used in road construction. The methodology used is a based-multidisciplinary approach (in situ tests, laboratory tests and monitoring implementation of materials). The study was conducted on 142 samples of nodular lateritic materials. One hundred and twenty-nine samples were from the eastern Region and, thirteen samples from the southern Region, as well as eight parental rock samples. Six rock samples are from eastern Region and two from southern Region. After detailed macroscopic descriptions of these materials, the collected samples were subjected to geotechnical analyzes at Labogenie, Soil & Water and Edok-Eter laboratories. The mineralogical composition of the rocks was determined with the aid of an optical microscope and that of the nodular lateritic materials by X-ray diffraction on the total fine fractions. The samples were then analysed by XRD using Co radiation at 40 kV and 45 mA at the Geoscience Laboratories (GeoLabs) of the Ontario Geological Survey in Sudbury Ontario (Canada). Major element concentrations were determined by X-ray fluorescence after sample ignition. Sample powders were ignited and then melted with lithium tetraborate flux before analysis using a Rigaku RIX-3000 wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometer. Trace elements were determined by inductively coupled plasma-mass spectrometry analysis (ICP-MS). The results obtained show that the granites from Bertoua and the migmatites from Batouri, Ngoura, and Yokadouma (Gari-Gombo) are light-colored formations. The gneisses from Bent, Nguélémendouka, Andom, and Meyo–Nyaka are dark-colored formations. These rocks are made up of quartz, feldspars, biotite, muscovite, amphibole, and sometimes pyroxene. The geochemical composition of the studied rocks shows that  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  represent more than 75% wt.% as compared to the other minerals. The relative virtual weathering degree (DVRAR) value is less than 6%. The studied rocks can be used as base and surface layers, as asphalt concrete or surface dressing, and also in civil engineering structures (bridges, scuppers, nozzles, etc.). The results of the tests carried out corroborate the CCTP specifications. The nodular lateritic soils derived from the weathering of these rocks are reddish in color. Their thickness varies between 1.2 and 2.5 m. These materials consist of quartz, kaolinite, muscovite, goethite, hematite, gibbsite, anatase, and sometimes zircon. The geochemical analyses show that these nodular lateritic soils are either siliceous or ferric.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  represent more than 80 wt.%. The relative virtual weathering degree values vary between 30 and 81%. The geochemical weathering processes that prevail in these materials are monosiallisation, allitisation and ferruginization. The results of balloon and deflection tests are in accordance with the specifications of the CCTP. The compacity data on the platform (case of earth roads) shows that the bearing capacity of the studied materials decreases as the years pass if the reload is not executed. This weakens the behavior of the studied materials, which are thus permanently damaged, especially during periods of rain. These degradations are accentuated by the incivism of users (large carriers) who violate the rain barriers during rainy periods. The geotechnical characteristics of the studied nodular lateritic soils show that these materials can be used as sub-base layer for medium volume T3 traffic without undergoing any treatment. Those of the studied nodular lateritic soils which have CBR values greater than 45% can be stabilized with 5/20 aggregates having Los Angeles values below 25% for use as base layer for medium volume T3 traffic. These geotechnical results made it possible to establish correlations between the mineralogical parameters and the physical properties of the studied rocks and nodular lateritic soils. Also, some recommendations to overcome the problem of premature degradation of roads have been given.

Keywords: South Cameroon, East Cameroon, rocks, nodular lateritic soils, mineralogy, geochemistry, geotechnics and alteration.

# **INTRODUCTION GENERALE**

## I. PROBLEMATIQUE ET BUT DE L'ETUDE

De nombreux dommages prématurés sont constatés sur les routes camerounaises. Leurs origines sont très diverses, que l'on peut classer en quatre catégories :

- catégorie 1 : sous-dimensionnement, soit par mesure d'économie, soit à cause d'études géotechniques mal réalisées ou mal adaptées, soit à cause de matériaux mal adaptés ou mal utilisés, soit encore à cause de critères de dimensionnement inadaptés ;

- catégorie 2 : exécution défectueuse ne respectant pas les règles de l'art ;

- catégorie 3 : manque d'entretien courant ou périodique, alors que le réseau routier joue un rôle vital dans l'économie des pays, l'état de son infrastructure étant pourtant important ;

- catégorie 4 : surcharge de camions, donc dépassement du tonnage prévu lors du dimensionnement, ce qui cause des dégradations considérables de la chaussée bien avant la fin de la durée de vie prévue.

Si les routes tant principales que rurales ne sont pas correctement dimensionnées, réalisées, utilisées et entretenues en temps opportun, elles se dégradent inexorablement, entraînant une augmentation des coûts d'exploitation des véhicules, un accroissement du nombre d'accidents et une baisse de la fiabilité des services de transport. Lorsque les réparations sont retardées, elles nécessitent souvent d'importants travaux de restauration, voire de rénovation, qui sont sensiblement plus coûteux que les travaux plus simples d'entretien entrepris plus tôt. La nécessité de protéger le réseau routier et de le conserver en bon état est d'une importance capitale qui a souvent priorité sur de nouveaux investissements (Mahabub, 1982).

Au Cameroun et dans la plupart des pays africains, la chaussée neuve est dimensionnée pour une durée de vie de 15 ans, avant d'envisager une éventuelle réhabilitation. Lorsqu'une dégradation nécessitant une réhabilitation totale est constatée avant ce délai à cause de l'une des causes citées ci-dessus, le Gouvernement est embarrassé car, il faut toujours faire recours à des bailleurs de fonds. Ces derniers imposent souvent des conditions de remboursement qui n'arrangent pas le pays. Mais ce dernier n'étant pas capable de financer ces travaux, il se voit obligé d'accepter ces conditions de remboursement. Des telles situations amènent beaucoup de pays africains au rang mondial de pays pauvres très endettés.

Les produits d'altération issus des roches magmatiques et métamorphiques de l'Est et du Sud Cameroun sont en général des sols ferrallitiques et des sols hydromorphes se rencontrant dans les bas - fonds (Eno Belinga, 1984). Les sols utilisés dans la construction routière sont ces sols ferrallitiques communément appelés sols latéritiques (Hieng, 2003). Dans le domaine routier, et sur les sols ferrallitiques, plusieurs travaux ont été effectués dans le but de déterminer les paramètres géotechniques ( Peltier, 1959; Gidigas, 1972; Gidigas, 1983; Ekodeck, 1984; Sikali et al., 1987;

Mbumbia et al., 2000; DEGN, 1987; Khattab, 2002; Hieng, 2003; Onana, 2010) etc.. pour les exploiter à d'autres fins.

Pour l'étude de leur caractérisation géotechnique dans les travaux routiers, plusieurs études ont été effectuées également (Simon, 1973; Sikali, 1979; Messou, 1980; Lompo, 1980; Bagarre, 1990; Attoh-Okine, 1990; Tockol, 1993; Fall, 1993; Tockol et al., 1994; Attoh-Okine, 1995; Mahalinga-Iyer et al., 1997; Khattab, 2002; Lopez-Lara et al., 2004; Millogo, 2008; Millogo et al., 2008; Bohi, 2008; Nzabakurikiza et al., 2012; Onana et al., 2015; Nzabakurikiza et al., 2016, Onana et al., 2017, Mvindi et al., 2017).

Le but de ce travail est de caractériser géotechniquement des granulats issus des roches et des sols latéritiques nodulaires de quelques localités des régions de l'Est et du Sud Cameroun lors de leur utilisation dans les travaux routiers.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- 1) déterminer les propriétés pétrographiques, minéralogiques, chimiques et géotechniques des sols latéritiques nodulaires ainsi que celles de leurs roches mères;
- 2) caractériser ces matériaux sur le plan altérologique;
- 3) déterminer des corrélations entre paramètres géotechniques et géochimiques ainsi que l'intérêt des matériaux étudiés;
- 4) proposer des procédés de stabilisation fiables dans le cas où ces matériaux seraient peu adaptés ou proposer d'autres solutions à adopter, si la dégradation prématurée des routes souvent constatée est liée à d'autres causes.

Compte tenu de la vaste étendue du Sud Cameroun qui est à cheval sur au moins trois Régions administratives (Sud, Centre et Est), seules quelques localités des régions de l'Est et du Sud ont été retenues dans la présente étude.

## **II. TERMINOLOGIE**

Quelques uns des termes utilisés dans ce mémoire, bien qu'ils soient connus, doivent être redéfinis pour rendre l'exposé plus compréhensible. Il faut signaler que la plupart de définitions ont été tirées dans la norme française NF P98-080 (1992).

La chaussée est un ensemble de couches superposées de matériaux reposant sur la plate-forme support de chaussée, destinées à répartir sans dommage sur le sol naturel les efforts dus à la circulation des véhicules.

La plate-forme support de chaussée est la surface de sol en place terrassé et nivelé, éventuellement traité, constituée soit par la couche de forme, soit par la dernière couche de remblai sur laquelle repose la structure de chaussée.



La couche de forme est l'élément de transition mis en œuvre à partir de l'arase par terrassement permettant, en fonction des caractéristiques des matériaux de remblai ou du terrain en place, d'atteindre les caractéristiques géométriques, mécaniques, hydrauliques et thermiques, prises comme hypothèses dans la conception et le calcul de dimensionnement de la chaussée.

Cet élément peut être constitué de matériaux en place ou rapportés, traités ou non traités.

La couche de fondation est l'élément de la structure de la chaussée situé au contact de la plate-forme support dont le rôle est de résister aux efforts verticaux reçus de la couche de base et de répartir les pressions qui en résultent jusqu'à un seuil admissible.

La couche de base est l'élément de la structure de la chaussée dont le rôle est de résister aux efforts verticaux reçus de la couche de roulement et de répartir les pressions qui en résultent sur le support de chaussée.

L'assise est l'ensemble des couches, de fondation et de base, qui peuvent éventuellement être confondues en une seule couche.

La couche de roulement est la couche supérieure de la chaussée qui subit directement les agressions de la circulation et des intempéries. Pour les routes en terre, la couche de roulement est constituée de graves latéritiques. Et pour les routes revêtues, elle est constituée de béton bitumineux.

La couche de liaison est une subdivision de la couche de surface supportant la couche de roulement.

La couche de surface est l'ensemble des couches de liaison et de roulement destinées à protéger les couches inférieures.

La chaussée neuve est l'ensemble de couches mises en œuvre sur une plate-forme et comprenant en général de bas en haut :

- la couche de fondation,
- la couche de base,
- la couche de surface.

La couche drainante laisse l'eau s'écouler par gravité, à l'intérieur de sa structure.

Le trafic exprime, pour une voie de circulation, le nombre de passages de véhicules dans une période déterminée et pour une voie de circulation.

Le renforcement d'une chaussée revêtue consiste à traiter les nids de poule existant suivi d'un recouvrement d'une couche mince de béton bitumineux, soit d'un enduit superficiels bicouche ou monocouche.

Le rechargement consiste à répandre les matériaux de graves latéritiques provenant de carrières sur une plate-forme (route en terre) déjà dégradée. Ce rechargement est généralement suivi d'un compactage.

Le profil d'altération est une succession verticale des matériaux lithiques en disposition horizontale ou subhorizontale de couleur, de texture et de structure différentes constituant des horizons (Duchaufour, 1977 in Onana, 2010).

Le niveau médian de sols latéritiques nodulaires est un horizon du profil d'altération se trouvant entre l'horizon supérieur argileux et l'horizon inférieur altéritique ou infragravillonnaire (Onana, 2010).

### **III. STRUCTURE DE LA THESE**

Le travail présenté dans cette thèse comporte quatre chapitres après l'introduction générale :

- le premier chapitre concerne la revue de la littérature sur le cadre naturel et sur les études antérieures outre les secteurs d'étude sélectionnés;
- le deuxième chapitre présente, les matériels et méthodes utilisés ;
- le troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus de l'étude pétrologique (pétrographie, minéralogie et géochimie), de la caractérisation normative altérologique et des caractérisations géotechniques;
- le quatrième chapitre est réservé à la discussion des résultats obtenus.

Enfin la conclusion générale fait ressortir les principaux résultats obtenus au cours de ce travail, ainsi que les recommandations et perspectives.

**CHAPITRE I. REVUE DE LA  
LITTERATURE SUR LE CADRE NATUREL  
ET SUR LES ETUDES ANTERIEURES.**

## **INTRODUCTION**

Le présent chapitre, qui est en fait une revue de la littérature produite sur les régions concernées, présente le cadre naturel de ces régions et les généralités sur les études réalisées.

Le cadre naturel définit la localisation géographique et présente les données climatiques et hydrographiques des zones dans lesquelles les travaux ont été effectués.

Les études antérieures concernent les travaux sur la géologie du Sud Cameroun, les produits d'altération des roches métamorphiques, les facteurs influençant le comportement des produits d'altération des roches métamorphiques du Sud Cameroun dans les travaux routiers, la pédologie et la géotechnique

### **I.1. CADRE NATUREL**

#### **I.1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE**

Le territoire camerounais a une forme sommairement triangulaire, et s'étend en latitude entre 2° et 12°30' au Nord de l'Equateur, et en longitude entre 8° et 16° à l'Est du méridien d'origine de convention internationale (Fig. 1). La zone d'étude est située entre les parallèles 2° 00' et 4°55' de latitude Nord, et entre 10°46' et 15°26' de longitude Est. A l'intérieur de cette zone située dans la région du Sud Cameroun, plusieurs secteurs d'étude situés dans les Régions de l'Est et du Sud ont été retenus dans les aires hachurées sur la carte de situation.

#### **I.1.2. DONNEES CLIMATIQUES**

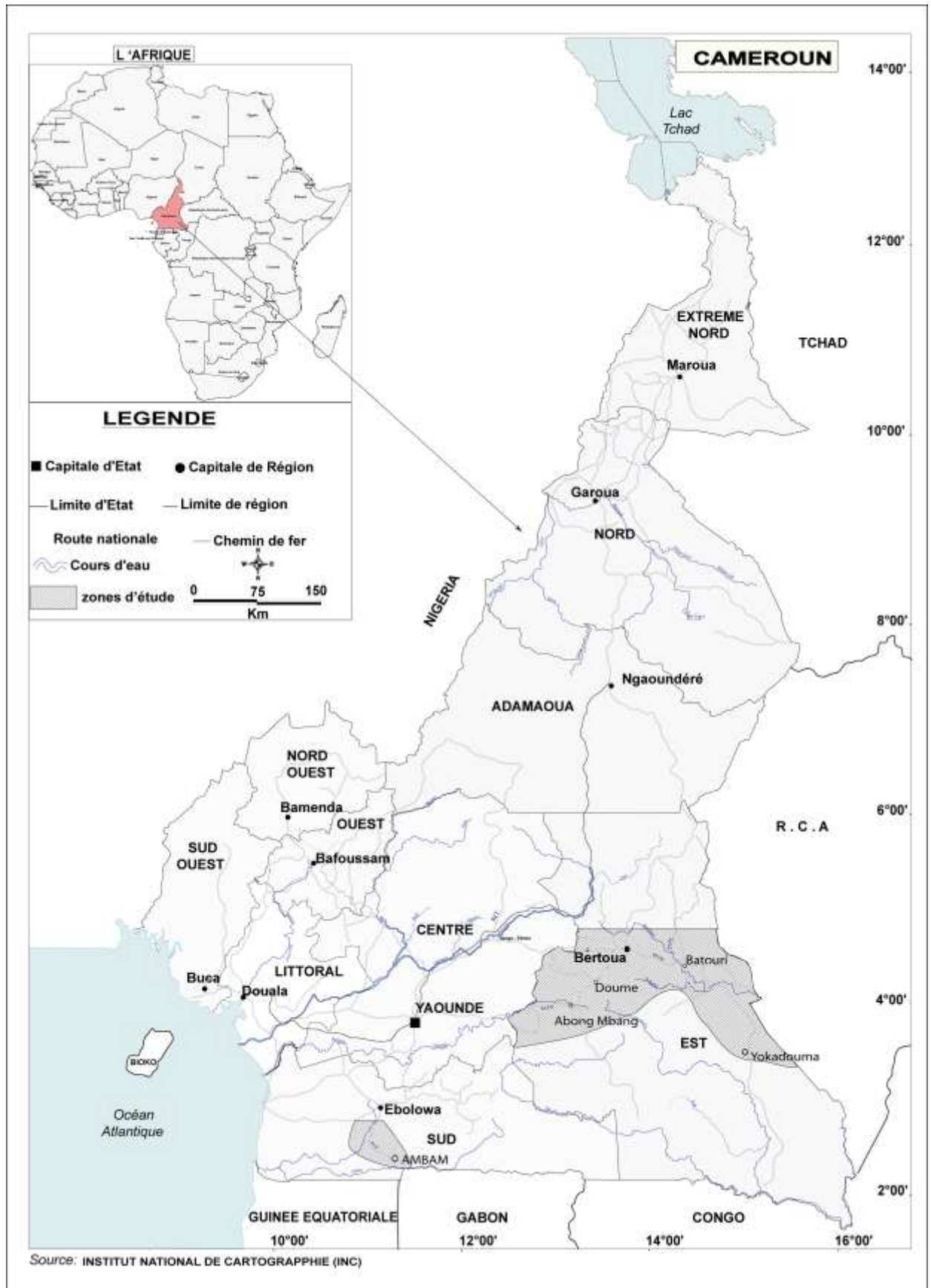
##### **I.1.2.1. Données climatiques de la Région de l'Est**

Les relevés météorologiques qui ont servi à caractériser le climat des zones d'étude dans la région de l'Est sont celles de la station météorologique de Bertoua en 2005. Le total annuel des précipitations (P) est de 2055,1 mm et les températures (T) moyennes annuelles de 24,6°C à Bertoua.

Le climat de la région d'étude est caractérisé par une pluviométrie annuelle élevée et par des températures élevées qui varient peu dans l'année. Deux saisons sèches alternent avec deux saisons humides d'inégale intensité. Ce climat est de type équatorial de transition chaud et humide. Cette caractérisation est conforme à celle d'Estienne et Godard (1970) et de Suchel (1972). Cette région d'étude présente une humidité relative moyenne, une évaporation annuelle faible. Ce qui lui confère le caractère « toujours humide ».

##### **I.1.2.2. Données climatiques de la Région du Sud**

Les relevés météorologiques qui ont servi à caractériser le climat d'Ebolowa-Ambam-Kye-Ossi sont ceux des stations météorologiques d'Ebolowa et d'Ambam pour la période entre 2000 et 2007. Le total annuel des précipitations (P) est de 1629,0 mm à Ebolowa et de 1781,0 à Ambam.



**Figure 1.** Situation géographique des zones d'étude d'après la carte administrative du Cameroun

Les températures (T) moyennes annuelles sont de 24,9 °C à Ebolowa et de 24,5°C à Ambam.

Le climat de la région est caractérisé par 4 saisons à savoir :

- une grande saison sèche de mi novembre à mi mars ;
- une courte saison de pluies de mi mars à mi juin;
- une petite saison sèche de mi juin à mi août;
- une grande saison de pluies de mi août à mi novembre.

### **I.1.3. VEGETATION**

#### **I.1.3.1. Région de l'Est**

Dans la Région de l'Est, la grande forêt dense recouvre toute l'étendue du secteur étudié. Cette forêt primaire a fait place à la forêt secondaire dégradée dans les environs des villages à la suite des coupes de bois et des cultures vivrières. Cela risque de jouer sur la perturbation du climat dans l'avenir si ce rythme de coupe de bois continue. La présence de raphias est de règle le long des cours d'eau mal drainés ou dans les dépressions marécageuses assez fréquentes.

#### **I.1.3.2. Région du Sud**

La végétation de la région d'Ebolowa et d'Ambam est du type « forêt congolaise », selon Letouzey (1985), la végétation est une forêt dense toujours verte de type guinéo-congolaise. Elle représente un étage spécifique de strates végétales qui réalisent entre 0 et 60 m du sol des conditions d'un écran qui fonctionne efficacement comme un filtre climatique (Eno Belinga, 1983). Cette végétation est constituée de trois strates :

- *la strate arborée* qui est caractérisée par des arbres dispersés ;
- *la strate arbustive* : elle est caractérisée par des arbres grêles, effilés, constituant un second écran ;
- *la strate herbacée* : elle est moins importante en forêt primaire. Elle réalise un troisième écran plus efficace contre l'érosion pluviale du sol. Cette strate permet au sol d'être constamment humide (Eno Belinga, 1985). Elle entrave le ruissellement des eaux.

La végétation forestière est très dégradée par l'homme : cultures vivrières et industrielles (banane, plantain, manioc, macabo, cacao), voies de communication, exploitation forestière, habitations. Les zones marécageuses rencontrées dans les vallées à fond plat, sont le domaine de la forêt raphiale (Letouzey, 1985).

### **I.1.4. GEOMORPHOLOGIE**

#### **I.1.4.1. Hydraugraphie**

Dans la Région de l'Est, le réseau hydrographique comportant des grands cours d'eau, est représenté sur la figure 2. Bien que des études aient été menées dans toute la Région, seules l'hydrographie de Bertoua et d'Abong Mbang sont décrites pour la simple raison que la majorité

des travaux effectués dans le cadre des travaux des routes en terre, et des routes revêtues, sont concentrés dans la zone située entre et autour de ces deux localités

#### **I.1.4.1.1. Orographie**

La sous-région de Bertoua, le réseau hydrographique appartient à deux grands bassins dont la ligne de partage suit grossièrement l'axe routier Bertoua-Ndokayo-Garoua Boulai. Il s'agit du bassin de la Sanaga au Nord-Ouest et à l'Ouest et du bassin de la Kadeï au Nord-Est, à l'Est et au Sud (Kamgang, 1998).

La Sanaga est le fleuve le plus important du Cameroun (140000 km<sup>2</sup>). Après son long trajet de l'Adamaoua à la côte, elle se jette dans l'Océan Atlantique. Elle prend sa source au Sud de l'Adamaoua et est alimenté par les rivières Pangar et Lom.

La Kadeï reçoit les eaux de la Doumé et de la Boumbé II. La Doumé, drain majeur de la région étudiée, est une rivière à pente faible. Elle reçoit les eaux des rivières Touki, Mbédé et Mbang. Elle prend sa source au Nord d'Abong-Mbang près de la ville de Doumé. Ensuite, elle coule d'Ouest en Est sous la forêt, pour se jeter dans la Kadeï à Mindourou (au Sud de Bertoua). La Boumbé II vient du Nord de *Ketté* sous forme de petites rivières que sont le Ndambi et le Mboyo et se joint à la Kadeï à Gamboula sur la frontière Centrafricaine.

#### **I.1.4.1.2. Sous-Région d'Abong Mbang**

Dans la sous-région d'Abong Mbang, le réseau hydrographique (Fig. 2) appartient au bassin du Nyong (Olivry, 1986). Après la Sanaga, le fleuve Nyong est le deuxième fleuve en importance entièrement inclus dans le territoire du Cameroun. La superficie de son bassin versant est de 27 800 km<sup>2</sup>. Le bassin du Nyong a grosso modo la forme d'une enclume dont la base reposerait sur la parallèle Ebolowa-Sangmélima et dont les bigornes (petites enclumes) seraient constituées par l'embouchure et le haut-bassin en amont d'Abong-Mbang. Sa longueur, d'environ 400 km est orientée entre les directions E-W et ENE-WSW. Sa largeur moyenne est d'environ 70 km.

#### **I.2.4.2. Région du Sud**

Pour la zone d'étude au sud, le réseau hydrographique comportant de grands cours d'eau, et représentée sur la figure 2., appartient au bassin du Ntem (Olivry, 1986). Ce bassin est caractérisé par un réseau hydrographique ramifié et dendritique. Le Ntem draine un bassin versant de 31000 km<sup>2</sup> partagé entre trois pays : le Cameroun, le Gabon et la Guinée Equatoriale.

Le Ntem lui même prend sa source au Gabon. Son bassin versant est limité au Nord et à l'Ouest par les bassins du Nyong, de la Lokoundje, de la Kienké et de la Lobé, au Nord-Est par

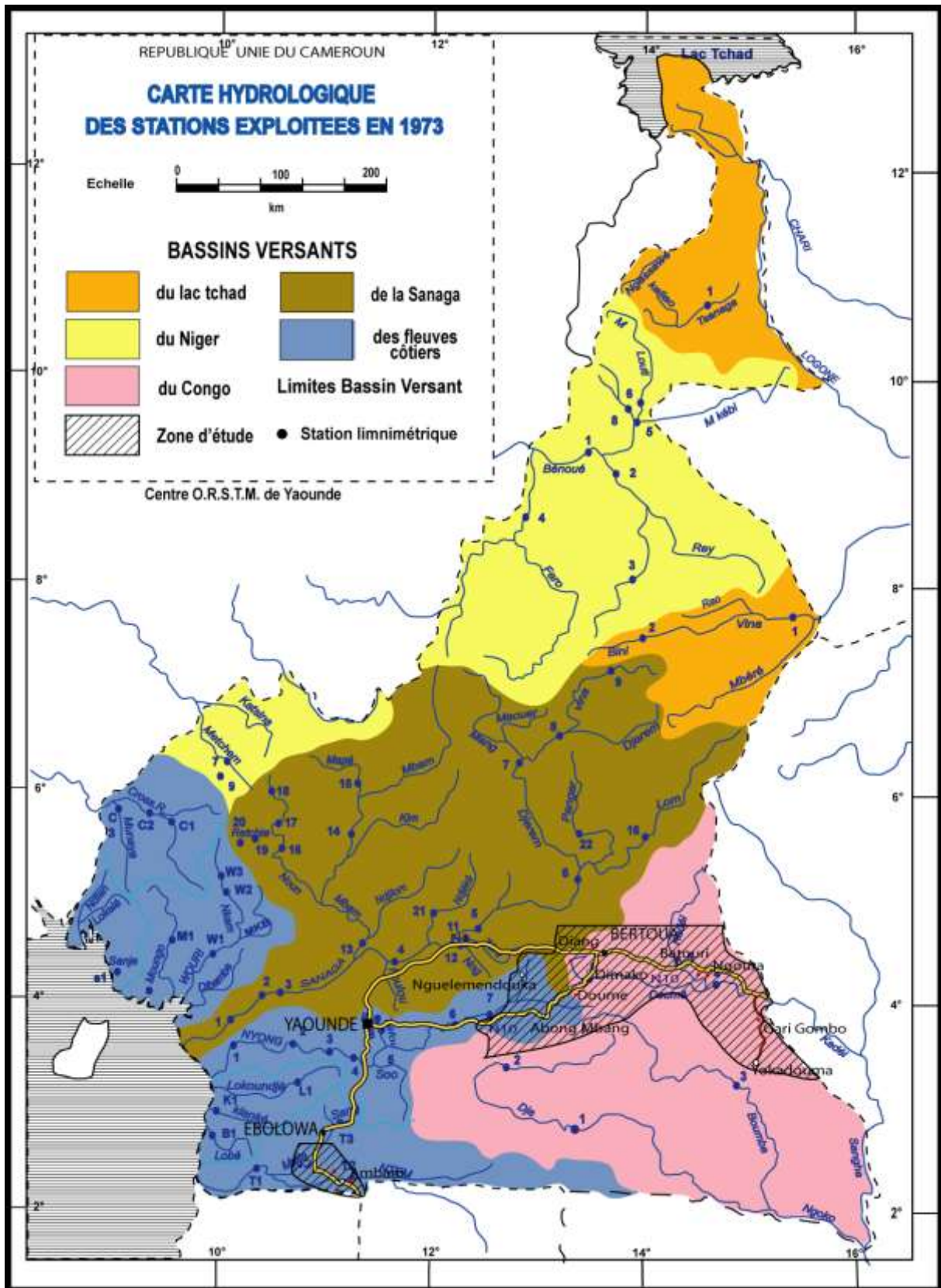


Figure 2. Réseau hydrographique de la zone d'étude (Olivry, 1986)



le bassin de l'Ayina, affluent de l'Ivindo tributaire de l'Ogoué, au Sud-Ouest par le bassin du Rio Benito et de la Mbia, en Guinée Equatoriale (Olivry, 1986)

La branche majeure du Ntem a une longueur de 460 km ; sa direction est Est-Ouest. Le bassin, comme celui du Nyong, situé sur le plateau Centre-Sud, est caractérisé par un écoulement lent des rivières dans de larges zones marécageuses aux altitudes 560-600 m, avec cependant aux limites sud et nord des reliefs pouvant dépasser 1000 m d'altitude comme le Mont Tembo au Gabon (1200 m).

Avant son confluent avec le Kom, le Ntem reçoit les apports de deux rivières importantes du Gabon : la Kié et le Nyé ou Bolo, et le Kom quant à lui reçoit la Mboua et le Nlobo. Les principaux tributaires du Ntem sont des affluents de rive droite (Cameroun) : la Mgoro ; la Mvila. En rive gauche, le Ntem reçoit, le Rio Guoro venu de Guinée Equatoriale.

La zone d'étude est drainée par un réseau hydrographique dendritique ou arborescent typique. Les cours d'eau principaux sont la Mvila et la Mgoro. Des nombreux autres cours d'eau présentent un écoulement lent dans de larges zones marécageuses.

### **I.1.5. OROGRAPHIE**

Dans la Région de l'Est, la morphologie est celle d'un grand plateau morcelé par un réseau hydrographique dense isolant de nombreux petits plateaux aux dimensions variables. L'érosion latérale des versants est faible et les dépôts alluviaux sont peu importants. La succession plateaux/vallée est d'une grande monotonie, quelques fois rompue par la présence de petites collines et dômes rocheux irrégulièrement repartis et sillonnés de nombreux affluents des fleuves : Boumba, Kadeï, Ngoko, Nyong, Bangué et Dja. Les reliefs résiduels, représentés par les dômes rocheux n'excèdent guère 1000 m d'altitude. On peut citer par exemple, le mont Nyong, Natobi, Ngakoumba au sud de Bertoua.

Le Sud Cameroun est une vaste région qui s'étend de la côte atlantique au bassin du Congo à l'Est. Cette zone est constituée de pénéplaines plus ou moins arrosées, d'altitude très variable (0-800 m). La zone d'étude (sud d'Ebolowa) est caractérisée par de nombreuses collines dont l'altitude varie entre 600 et 900 mètres. Ce relief est perturbé en certains endroits par quelques collines d'altitude pouvant atteindre plus de 1000 m (Akoamokéguen, 1102 m ; Nkolgam, 1052 m ; Nkolossendji, 1042 m). Les vallées sont souvent rectilignes et marécageuses.

## **I.2. ETUDES ANTERIEURES**

### **I.2.1. GEOLOGIE**

Le socle précambrien camerounais est subdivisé en deux grandes entités lithostructurales qui

sont: la zone mobile d'Afrique Centrale ayant affecté la quasi-totalité du Cameroun (Regnault, 1986). Elle couvre les deux tiers du territoire depuis le groupe de Yaoundé jusqu'à l'extrême Nord. Cette zone a subi un rajeunissement au panafricain, il y a 500 à 600 M.a (Ekodeck, 1984). Elle est dénommée " Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale " (Nzenti, 1987),

- le domaine cratonique qui est considéré comme zone stable depuis au moins 2500 Ma (Regnault, 1986) est représenté par la bordure nord du craton du Congo et limités au Nord par le groupe de Yaoundé. Il est constitué de formations d'âge Archéen à Paléoprotérozoïque.

#### **I.2.1.1. Géologie de la Région de l'Est**

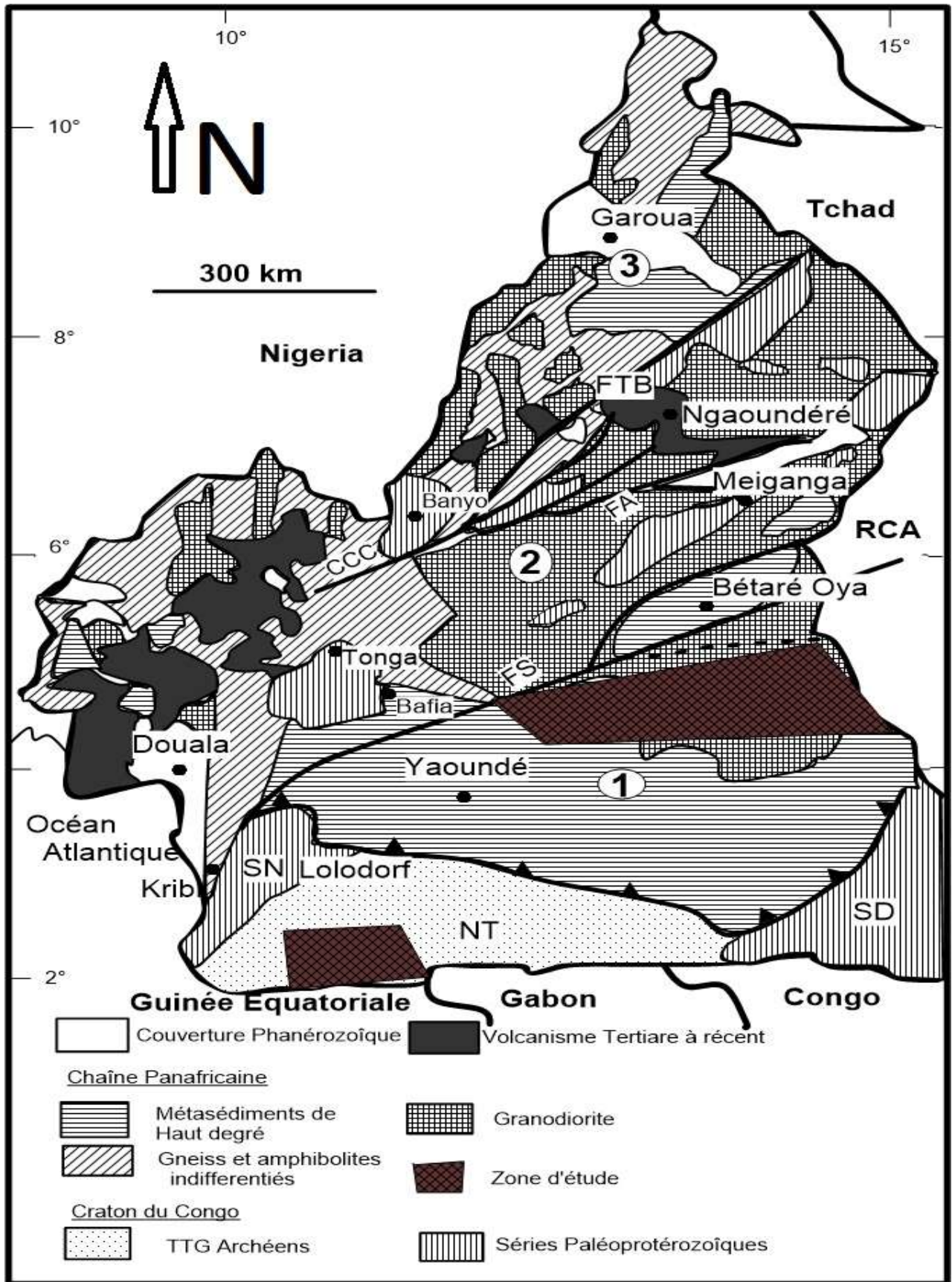
La Région de l'Est appartient à la zone mobile d'Afrique Centrale. Elle est constituée essentiellement par des formations:

- de la série du Lom constituée de métasédiments, de métavolcanites et de massifs plutoniques intrusifs (Kamgang, 1998);
- de la série du Dja constituée par deux ensembles lithologiques : les pélites et les quartzites au sommet, le complexe schisto-doléritique à la base (Laplaine., 1971 in Regnault (1986),
- des migmatites qui couvrent près des 2/3 du pays (Regnault, 1986). D'après Lasserre et Soba (1979) in Kamgang (1998), les migmatites forment un groupe des roches métamorphiques très hétérogènes englobant les gneiss et les orthogneiss. Selon Kamgang (1998), les migmatites sont des roches d'origine para ou orthodériivée, intermédiaires entre les gneiss et les granites,
- des granites d'âge panafricain. Les formations étudiées dans le cadre de ce travail à savoir : les gneiss, les orthogneiss, les granites et les migmatites sont localisées sur la carte géologique du Cameroun (Fig. 3).

#### **I.2.1.2. Géologie de la Région Sud**

La Région du Sud appartient au domaine cratonique et est constituée par plusieurs groupes lithologiques (Tchameni, 1997) :

- les formations métavolcanosédimentaires : les métasédiments (quartzites, les gneiss alumineux, gneiss à biotite, leptynites) et les metabasites;
- les charnockites et les tonalites, les granitoïdes potassiques;
- les orthogneiss de la série rubanée (gneiss enderbitiques, gneiss rubanés, leptynites et gneiss à biotite) et les syénites, les métadorélites et les schistes. Les gneiss étudiées dans le cadre de ce travail sont localisées sur la carte géologique (Fig. 3).



**Figure 3:** Carte géologique du Cameroun (Nzenti et al., 2010) montrant la localisation des zones d'étude

## **I.2.2. PRODUITS D'ALTERATION DES ROCHES DU SUD CAMEROUN**

Des nombreux auteurs se sont intéressés à l'étude des manteaux d'altération dans le Sud Cameroun (Ekodeck, 1984 ; Yongué, 1986 ; Kamgang Beyala, 1987 ; Bilong, 1988 ; Bitom, 1988 ; Ongué Mala, 1993 ; Tardy, 1993 ; Bekoa, 1994 ; Yongué, 1995 ; Kamgang Kabeyene, 1998 ; Ndjigui, 2001 ; Nyeck, 1988 ; Onana *et al*, 2007 ; Ndjigui, 2008 ; Ndjigui *et al*, 2009 ; Onana, 2010. Ces auteurs montrent que les profils d'altération des formations latéritiques sont formés de trois grands ensembles successifs plus ou moins différenciés (Fig. 4).

Ces niveaux sont du bas vers le haut :

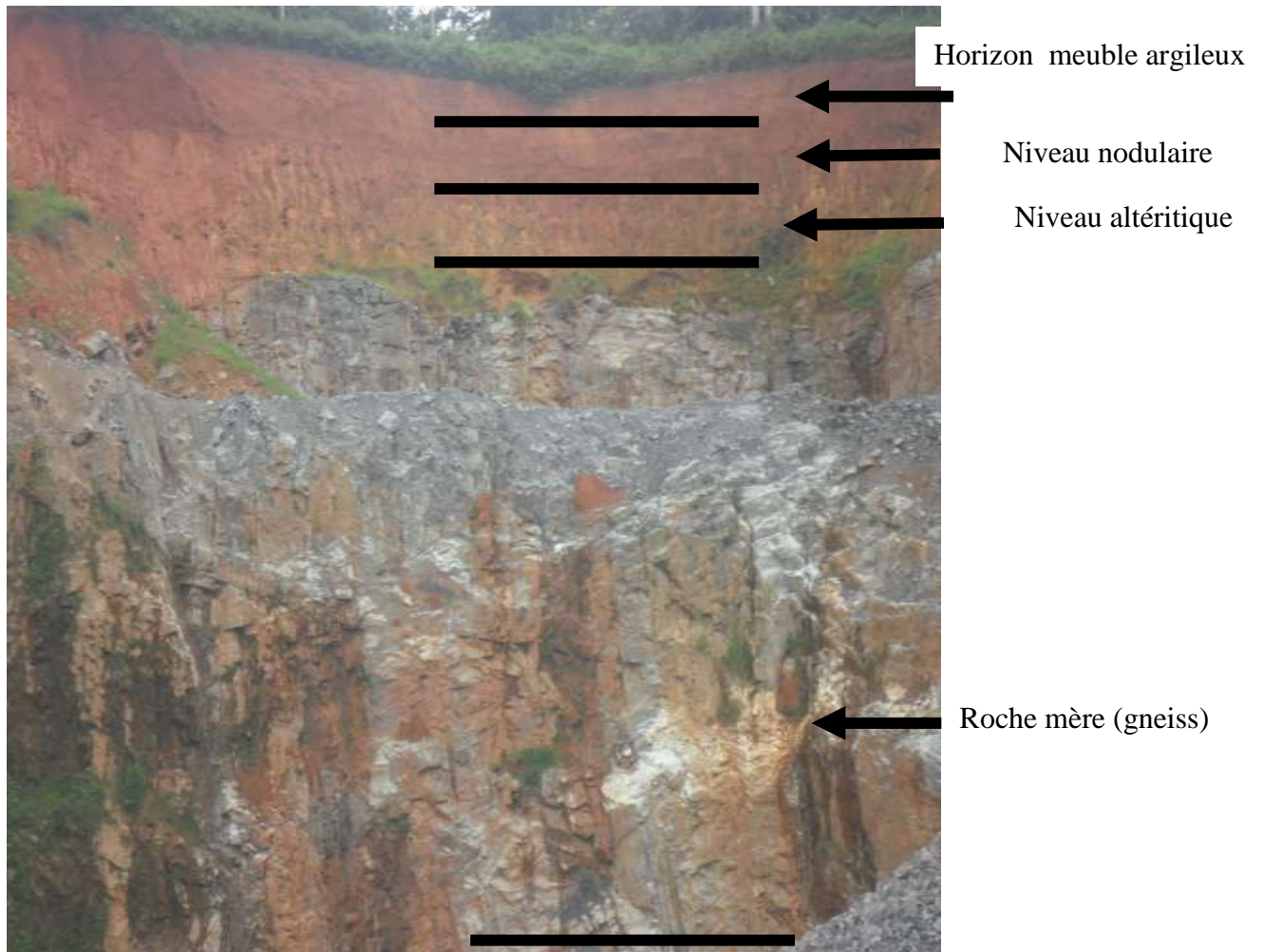
- un niveau d'altération de la roche, meuble à structures lithologique de la roche mère conservée à la base (isaltérite) et de plus en plus perturbée vers le sommet (allotérite. A côté des reliques de minéraux parentaux résistants, y dominant, la kaolinite, la gibbsite, la goethite et l'hématite (minéraux secondaires) ;

- un niveau d'accumulation d'oxyhydroxydes de fer (goethite, hématite) et d'argile kaolinique, de couleur rouge avec à la base un matériau nodulaire inférieur (à nodules ferrugineux lithorelictuels dominants, de forme irrégulière en plaquettes), une partie médiane à blocs de cuirasse ferrugineuse (à faciès variant suivant les sites), un matériau nodulaire supérieur hétérogène (à éléments grossiers de nature diversess tels les fragments de cuirasse, les nodules arrondis et les fragments de quartz) ;

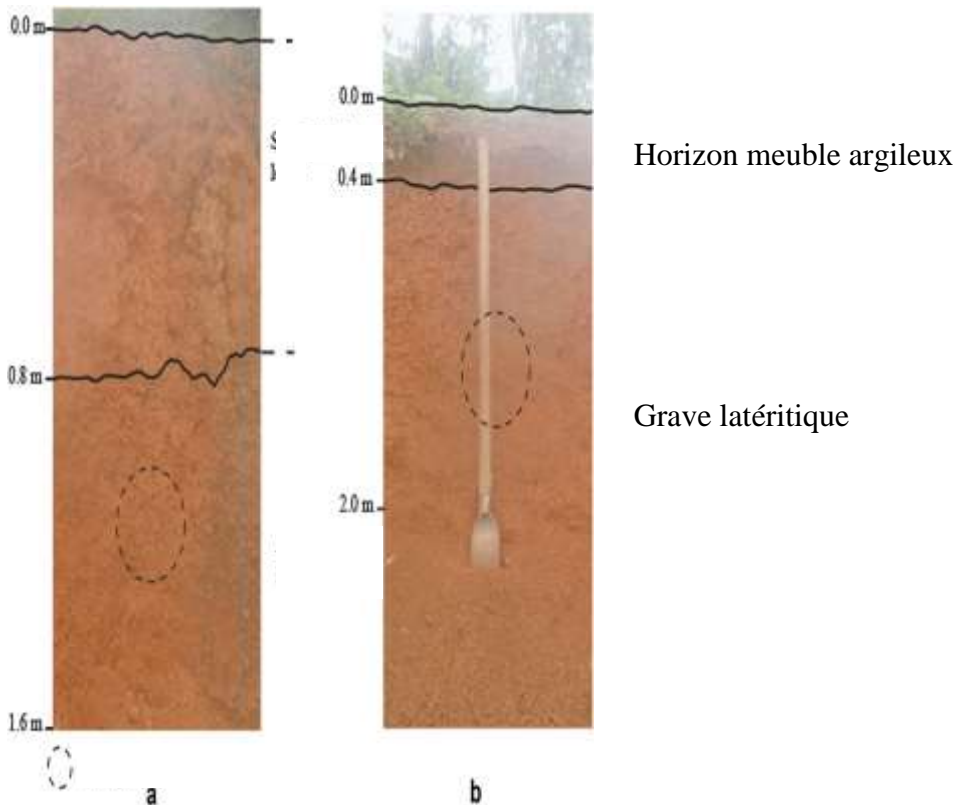
- un niveau argileux superficiel (à kaolinite et goethite), meuble à rares nodules ferrugineux millimétriques, de couleur rouge d'ensemble légèrement plus sombre dans les dix centimètres les plus superficiels. C'est le deuxième niveau qui intéresse les Ingénieurs du Génie Civil et Géotechniciens pour les travaux de construction des routes. Il est constitué des sols ferrallitiques communément appelés sols latéritiques (Hieng, 2003). L'action de ferrallitisation, c'est à dire de latéritisation, varie suivant la nature lithologique du substratum et le climat (Eno Belinga, 1983). Par définition, la ferrallitisation est un processus de formation des sols ferrallitiques dont la caractéristique essentielle est la présence d'alumine libre, dans un horizon au moins du profil. Cette alumine se trouve ordinairement sous forme de gibbsite (Regnault, 1986). Ce dernier a montré que les latérites se subdivisent en deux groupes chimiquement identifiables, selon la proportion de l'oxyde de fer  $Fe_2O_3$  et de l'oxyde d'aluminium  $Al_2O_3$ . Le groupe dans lequel l'alumine ( $Al_2O_3$ ) prédomine est composé des sols ferrallitiques.

### **I.2.2.1. Définition du terme latérite**

Sols rougeâtre de la zone tropicale humide, caractérisée par la présence d'alumine libre et d'oxyde de fer. Van Ganse (1957) in Ekodeck (1984) subdivise les latérites en deux classes :



**Figure 4.** Profil type d'altération de gneiss de la localité de Bent à Doumé (Est Cameroun)



**Figure 4.** Profil type d'un horizon nodulaire de la carrière de Nganke (Est Cameroun)

- les latérites graveleuses, composées de pisolithes (nodules primaires arrondis, ou nodules composés plus allongés), de débris de cuirasse argileux enrobés dans une matière argilo-sableuse,
- les latérites rocheuses, matériaux poreux, cohérents, semblables à des roches tendres, se présentant souvent en bancs continus dont l'épaisseur est de l'ordre du mètre.

### **I.2.2.2. Définitions chimiques**

Joachim et Kandiah (1944) in Toumou Moffou (1982), ont adopté trois classes de latérites à partir des valeurs du rapport moléculaire silice/sesquioxydes suivant :

$$r = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

On a :

- $r < 1,33$  : latérites vraies ;
- $1,33 \leq r \leq 2,00$  : sols latéritiques ;
- $2,00 < r$  : sols tropicaux altérés non latéritiques.

### **I.2.3. FACTEURS INFLUENÇANT LE COMPORTEMENT DES SOLS LATÉRITIQUES ET DES GRANULATS**

Les expériences ont montré que les facteurs influençant le comportement des granulats et sols latéritiques dans l'optique de la construction routière sont nombreux à savoir :

- la nature du sol ,
- la nature des granulats ;
- le dimensionnement des chaussées ;
- la mise en œuvre du sol ou des granulats (travaux in situ).

On peut noter que la qualité de la plate-forme a une importance capitale pour le comportement de la chaussée. A court terme, elle doit être suffisamment indéformable pour permettre le compactage des couches de chaussée surincombantes. A long terme, elle doit être bien drainée pour que sa portance ne chute pas par réimbibition. Les auscultations des chaussées en service ont montré que celles bénéficiant d'une plate-forme de bonne portance et bien drainée ont un comportement qui reste satisfaisant. Si leur construction a été en plus bien réalisée, leur vieillissement ne progresse que lentement (CEBTP, 1984).

Les accotements doivent être de largeur suffisante et adaptés au type de la chaussée.

La mise en place d'une couche de chaussée ne sera effectuée que si la couche sur laquelle, elle repose a des caractéristiques suffisantes, notamment une déflexion caractéristique admissible ou une densité acceptable convenue lors du dimensionnement.

### **I.2.3.1. Nature du sol utilisable en construction routière**

En général, les sols pouvant être utilisés convenablement en construction routière dans les pays tropicaux sont des sols latéritiques nodulaires, observés généralement dans l'horizon médian du profil d'altération (Ekodeck, 1984).

Les sols latéritiques utilisables en technique routière sont les graves latéritiques qui contiennent une proportion suffisante d'éléments de diamètres supérieurs à 2 mm, plus de 50 % (Karsenty, 2007). La classification de CEBTP (1984) distingue trois familles de graveleux latéritiques (G1, G2 et G3) d'après leur indice de plasticité (IP), leur pourcentage de fines (passants au tamis de maille 0,08 mm) et la valeur du produit de ces deux paramètres (fines x IP). Cette classification est récapitulée dans le tableau 1.

Le géotechnicien doit savoir ce qui distingue les graveleux latéritiques des autres sols.

Les matériaux contenant un pourcentage de fines supérieur à 35 % ne sont pas considérés comme étant des grave latéritiques ou sols latéritiques nodulaires.

Il faut signaler que lors de mouvement de terre, les cubatures obtenues par le calcul sont affectées d'un coefficient de foisonnement évalué en fonction de la qualité du terrain (Karsenty, 2007). Ce coefficient qui est consigné dans le tableau 2, est soit provisoire, en cours de travaux, pour le transport des terres, soit définitif, pour les remblais, après un compactage soigné (Karsenty, 2007).

L'utilisation des graveleux latéritiques en construction routière présente un intérêt évident dans les pays tropicaux et tout particulièrement au Cameroun en raison de leur abondance. Celle-ci les rend économiquement intéressants même si leurs performances mécaniques s'avèrent parfois médiocres et surtout variables.

### **I.2.3.2. Nature des granulats issus de concassage des roches**

Les granulats à utiliser dans les travaux routiers en couche de base, en couche de roulement et en ouvrages d'art proviennent soit des roches magmatiques (basaltes, granites etc...), soit des roches métamorphiques (migmatite, gneiss etc...). Il a été constaté que, les entrepreneurs se contentent des critères de qualité des granulats à savoir: le Los Angeles, le Micro-Deval et le coefficient d'aplatissement sans mettre beaucoup plus l'accent sur la granulométrie qui est aussi un critère de base pour le comportement des granulats. Un matériau ségrégué est difficile à mettre en oeuvre. Pour avoir la compacité attendue, il faut que la courbe granulométrique passe à l'intérieur du fuseau de spécification.

### **I.2.3.3. Dimensionnement des chaussées revêtues**

Une chaussée revêtue est une chaussée dont la surface de roulement est en béton bitumineux comme le montre les figures 5 et 6.

Le tracé d'une route devant joindre un point à un autre est soumis, en plus des nécessités économiques de construction, à un certain nombre de contraintes : relief du terrain, rayon de courbure à respecter, pentes limites et localités à desservir. Pour diminuer les pentes, on effectue des terrassements. Autrefois, on cherchait à balancer au mieux les déblais et les remblais. Actuellement, avec les engins modernes, il peut souvent y avoir intérêt à réduire les distances de transport, quitte à négliger l'équilibre des déblais et remblais. Dans tous les cas, il faut limiter au plus les transports de terre.

Lorsque le tracé est défini autour des points de passage obligés, on détermine les zones apparentes de sols peu stables, les points bas et les zones humides. Pour prévoir les drainages (transversaux ou latéraux) indispensables afin d'éloigner l'eau de la chaussée, la reconnaissance hydrologique (ruisseau, débit des sources et position de la nappe) est nécessaire.

La reconnaissance des sols le long du tracé vient ensuite de façon à définir les zones des carrières d'extraction de latérite pour les matériaux constitutifs de la chaussée selon les critères qui seront définis plus loin. Le projet définitif de la route, compte tenu du trafic, de la charge des véhicules qu'on peut ou non accepter (submersion partielle en cas de crue et barrières de dégel), peut être fait.

En général dans une région, il est toujours possible de trouver des matériaux ayant des qualités convenables pour réaliser les fondations et les couches filtrantes (cas de la Région de l'Est).

Pendant longtemps, le dimensionnement des chaussées au Cameroun s'est inspiré très largement du "Guide pratique pour le dimensionnement des chaussées dans les pays tropicaux" publié par CEBTP (1984), seul document, parmi les documents de référence disponibles qui prenait en compte la qualité des ressources en matériaux propres au contexte local. Ce document si précieux ne pouvait certainement pas simultanément couvrir toute la gamme de matériaux susceptibles d'être utilisés en technique de chaussée en Afrique tropicale et cerner les meilleures conditions d'utilisation de chacun des matériaux dans des conditions différentes relatives au climat, au trafic et à l'économie.

Au Cameroun comme rappelé plus haut, on constate des dégradations prématurées des routes avant leur délai de vie pour des raisons multiples:

- mauvais dimensionnement partant sur des essais sommairement effectués ;
- exécution des travaux ne respectant pas les règles de l'art ;
- manque d'entretien, etc.

Pour dimensionner une chaussée revêtue, il faut déterminer les deux paramètres suivants : L'indice portant de la plate-forme et le trafic (CEBTP, 1984).



**Tableau 1 :** Classification de grave latéritiques

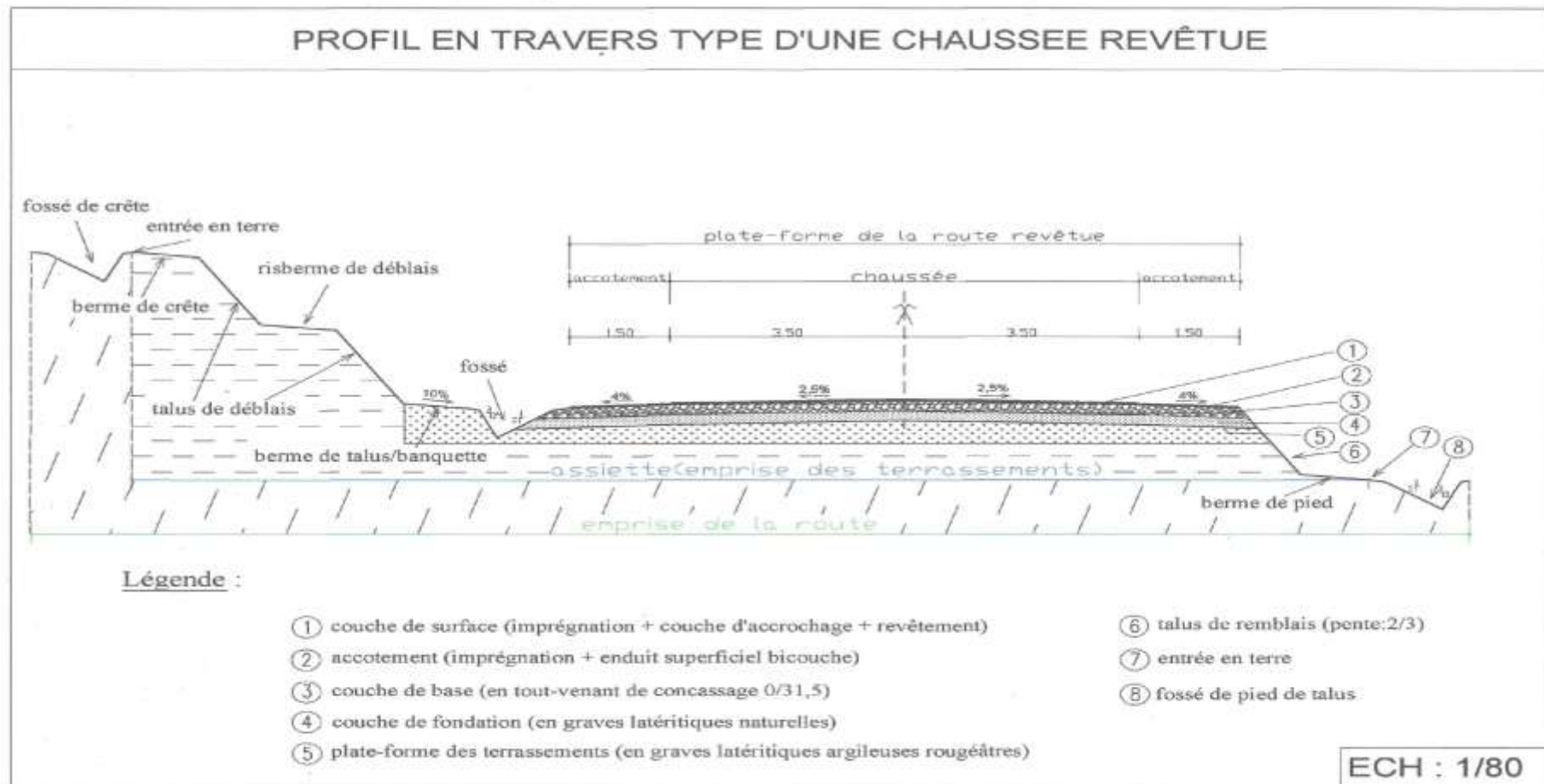
Groupe	Produit $f_x I_p$	Caractéristiques mécaniques et physiques
G1	< 250	CBR= 20 à 80, $\gamma_d \text{ max} = 2,1 \text{ à } 2,5$ , $\omega_{OPM} = 5 \text{ à } 8$
G2	250-600	CBR= 15 à 40, $\gamma_d \text{ max} = 2 \text{ à } 2,25$ , $\omega_{OPM} = 7 \text{ à } 10$
G3	> 600	CBR < 30, $\gamma_d \text{ max} = 1,9 \text{ à } 2,2$ , $\omega_{OPM} = 8 \text{ à } 12$

**Tableau 2 :** Coefficient de foisonnement en fonction de la nature des matériaux

Nature des sols	Masse volumique	Coefficient de foisonnement	
		Provisoire	Permanent
	Kg/m <sup>3</sup>	%	%
Terre végétale compacte	1700	1,20	1,05
Argile sèche	1600	1,50	1,15
Argile humide	1200 à 1800	1,25	1,08
Marne sèche	1500	1,50	1,08
Sable fin sec	1400	1,10	1,03
Sable fin humide	1600	1,20	1,04
Gravier humide	2000	1,25	1,04
Cailloux	1600	1,50	1,15
Roches diverses	2000 à 2500	1,50	1,15



**Figure 5.** Chaussée revêtue



**Figure 6:** Profil en travers type d'une chaussée revêtue

Malgré le grand nombre d'essais réalisés depuis que les laboratoires existent (CEBTP, 1984), il est à noter que l'indice portant Californian Bearing Ratio reste le meilleur moyen permettant de différencier les sols sur la base de leur résistance au poinçonnement. La valeur à retenir est la portance CBR des sols mis en œuvre dans les 30 cm supérieurs de la plate forme, il s'agit :

- des terrassements en déblais ;
- de la couche supérieure des remblais ;
- du terrain naturel ;
- d'une couche de forme.

C'est bien entendu, la réalisation des chaussées sur des sols de faible portance qui pose les problèmes majeurs. Dans les travaux routiers, et en particulier pour la confection des remblais et des couches de forme, on ne peut admettre que de faibles déformations (Dupain *et al*, 1995). On détermine donc la portance du sol, c'est-à-dire sa résistance à la rupture par l'essai Californian Bearing Ratio ou essai de portance californien (CBR). Selon le CEBTP (1984), en fonction du CBR, il existe cinq classes de sols (S1, S2, S3, S4 et S5) tel que consigné dans le tableau 3.

Les classes de trafic sont définies de plusieurs façons en fonction du degré de précision recherchée tenant compte des usagers potentiels :

- trafic journalier toutes catégories de véhicules confondues ;
- trafic cumulé de poids lourds (véhicules définis comme ayant un poids total, en charge, supérieur à 3 tonnes) ;
- trafic cumulé calculé selon les équivalences d'essieux tirés des essais AASHO par Lidoble (CEBTP, 1984).

Le trafic dont la classe est consignée dans le tableau 5 (CEBTP, 1984) a une influence directe sur le dimensionnement de la chaussée et de sa fondation. Il est caractérisé par sa nature et son importance (Karsenty, 2007).

En général, on admettra que la chaussée devra être conçue pour une période de quinze ans avant que ses caractéristiques progressivement altérées ne rendent nécessaire son renforcement. Ceci n'est pas souvent le cas pour la plupart des routes en Afrique, pour des raisons suivantes : les entreprises soumissionnent moins cher et ne parviennent pas à respecter les exigences du Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) lors de l'exécution des travaux sur le terrain. Ces entreprises travaillent bien entendu dans le but de trouver le bénéfice ; parfois, elles emploient les matériaux qui ne remplissent pas les normes, parfois les épaisseurs des différentes couches ne sont pas respectées, parfois l'assainissement n'est prise qu'à la légère, etc.

Pour éviter tout cela, le Ministère des Travaux Publics, avant de lancer un appel d'offres pour une route à construire, devrait mener des études sérieuses sur l'itinéraire et fixer le montant de l'enveloppe en conséquence, sans se fonder plutôt sur les prix fixés par les entreprises soumissionnaires ou sur les études effectuées sommairement : cas de la route Ayos- Bonis où les travaux des avenants dépassent la moitié de l'enveloppe du marché de base.

Il est possible de dimensionner une chaussée pour une durée quelconque (CEBTP, 1984). Si une route a moins de 7 m de largeur, on prendra en compte, l'ensemble du trafic dans les deux sens de circulation. Si la route a plus de 7m, ou si les voies sont à circulation unidirectionnelles, le trafic dans le sens le plus chargé sera considéré.

Le trafic en nombre de véhicules par jour est défini par son intensité journalière moyenne sur une durée de vie de l'ordre de quinze ans, toutes classes de véhicules incluses (CEBTP, 1984). Le pourcentage moyen de poids lourds est supposé de l'ordre de 30 % du trafic total. Cinq classes de trafic (T1, T2, T3, T4 et T5) sont distinguées dans le tableau 4. La classe T5 en particulier correspond à des chaussées de type autoroutier à 2 fois 2 voies ou 2 fois 3 voies.

A titre d'exemple, le trafic en nombre de véhicules par jour dans la Région de l'Est Cameroun est récapitulé dans les tableaux 5, 6 et 7. Ces tableaux montrent que les routes Batouri – Ngoura, Ngoura-Yokadouma, Ngoura- Kentzou et Yokadouma – Moloundou sont plus sollicitées par les trafics des poids lourds d'où la justification de la dégradation rapide de ces routes après l'entretien courant. Pour la route de Ngoura-Kentzou, cette dégradation est faible par rapport aux trois autres tronçons. Cela est dû aux très bons matériaux latéritiques présents dans cette zone.

En comparaison avec le trafic journalier de CEBTP (1984), on peut qualifier le trafic de l'Est comme un trafic de classe T2, mais compte tenu du pourcentage de poids lourds (> à 3 tonnes) qui est largement supérieure à 30 %, sauf pour le poste de comptage de Mandjou et de Madouma , le trafic de l'Est pour les autres postes de comptage peut être qualifié comme étant de la classe T3 voire même de T4. Effectivement, c'est la classe de trafic T3 qui a été prise en compte lors du dimensionnement de la route Ayos-Bonis en cours de bitumage depuis 2007 avec un taux de croissance annuel de 5 %.(route dimensionnée en 2000).

Il faut signaler que ce taux de croissance a été mal estimé car, un nombre de 174 de poids lourds considéré en 2000 lors de dimensionnement de la route Ayos-Bonis est passé de 174 à 835 en juin 2011, ce qui représente plutôt un taux de croissance annuel de 14 % au lieu de 5 %. Ce taux de croissance annuel des poids lourds très élevé pourrait compromettre le délai de vie prévu (15 ans) de la route d'Ayos-Bonis pourtant construite conformément aux spécifications du Cahier de Chargé Technique Particulier (CCTP).

En considérant ce taux de croissance de 14%, la structure de la route d'Ayos-Bonis devrait être l'une de deux structures suivantes :

Soit : **7 cm** de béton bitumineux pour la couche de roulement

**18 cm** de grave bitume 0/20 pour la couche de base

**30 cm** de grave latéritique pour la couche de fondation,

Soit : **7 cm** de béton bitumineux pour la couche de roulement ;

**18 cm** de grave bitume 0/20 pour la couche de base ;

**25 cm** de grave concassé 0/31.5 pour la couche de fondation. Les deux structures reposant sur une plate forme de classe de sol S4.

Pour le trafic en nombre cumulé de poids lourds, les classes retenues correspondent approximativement à celles définies par la méthode précédente, si la durée de vie de la chaussée est prise égale à quinze ans et si le pourcentage des poids lourds est voisin de 30 % (CEBTP, 1984).

Ces classes sont les suivantes :

$$T1 < 5.10^5$$

$$5.10^5 < T2 < 1,5.10^6$$

$$1,5.10^6 < T3 < 4.10^6$$

$$4.10^6 < T4 < 10^7$$

$$10^7 < T5 < 2.10^7$$

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

**Cas de croissance exponentielle :**

$$tn = t1(1+i)^{n-1}$$

$$365 \sum_1^n tn = 365t1 \frac{(1+i)^n - 1}{i}$$

**Cas de croissance linéaire :**

$$tn = t1 [1 + (n-1)i]$$

$$365 \sum_1^n tn = 365nt1 \left[ 2 + \frac{(n-1)i}{2} \right]$$

$tn$  = trafic moyen journalier de l'année  $n$  ;

$n$  = Nombre d'années (durée de vie)

$i$  = taux d'accroissement annuel du trafic

$$365 \sum_1^n tn = \text{trafic cumulé pendant la durée de vie } n .$$

**Tableau 3** : Différentes classes de sol

Classe de sol	1 <sup>ère</sup> possibilité	2 <sup>ème</sup> possibilité	3 <sup>ème</sup> possibilité
S1	$CBR < 5$	$CBR \leq 5$	$CBR < 5$
S2	$5 < CBR < 10$	$5 < CBR \leq 10$	$5 \leq CBR < 10$
S3	$10 < CBR < 15$	$10 < CBR \leq 15$	$10 \leq CBR < 15$
S4	$15 < CBR < 30$	$15 < CBR \leq 30$	$15 \leq CBR < 30$
S5	$CBR > 30$	$CBR > 30$	$CBR \geq 30$

**Tableau 4** : Classe de trafic journalier

Classe de trafic	Nombre de véhicule par jour
T1	< 300
T2	De 300 à 1000
T3	De 1000 à 3000
T4	De 3000 à 6000
T5	De 6000 à 12000

**Tableau 5** : Variation par rapport au trafic journalier moyen dans la Région de l'Est en 2003, en 2004 et en 2005 (MINTP/DR/ cellule de la programmation du Cameroun).

Poste de comptage	Section	Route	Décembre 2003	Mai 2004	Mai 2005
Gato	Yokadouma-Mouloundou	P007	207	176	110
Bonis	Abong-Mbang-Bonis	N010	494	405	374
Ngoura	Batouri-Ngoura	N010	352	470	369
Ngoura	Ngoura-Kentzou	N010	116	204	158
Ngoura	Yokadouma-Ngoura	P004	246	317	227
Madouma	Abong-Mbang-Lomié	P006	165	175	126
Mandjou	Mandjou-Batouri	N010	349	308	275

**Tableau 6 : Répartition suivant les différentes catégories de véhicules dans la Région de l'Est**  
(Comptage du mois de mai 2004)

Poste comptage	Section de route	Route	Vp (%)	Pick up (%)	Mini Bus (%)	Auto Cars (%)	Camions 2E (%)	Camions 3E (%)	Ensemble articulés (%)	Grumiers (%)	Total (%)
Gato	Yokadouma-Moloundou	P007	20,42	14,94	6,81	0,00	2,59	19,78	17,15	18,30	99,97
Bonis	Abong-Mbang-Bonis	N010	12,03	25,58	20,20	1,54	6,83	6,03	20,05	7,74	100,00
Ngoura	Batouri-Ngoura	N010	6,53	10,56	11,33	0,06	7,71	18,50	19,26	26,05	100,00
Ngoura	Kentzou-Ngoura	N010	12,11	13,21	9,73	0,14	9,31	15,64	12,80	27,06	100,00
Ngoura	Yokadouma-Ngoura	P004	4,55	12,84	11,00	0,09	8,30	21,16	20,81	21,25	100,00
Madouma	Abong-Mbang-Lomié	P006	22,71	38,00	11,53	0,08	11,63	10,42	5,54	0,08	99,99
Mandjou	Mandjou-Batouri	N010	21,58	17,44	25,72	0,19	10,08	14,94	10,06	0,00	100,01

**Tableau 7 : Répartition suivant les grandes catégories de véhicules dans la Région de l'Est**

Poste de comptage	Section de route	Route	Véhicules légers particuliers (VP+Pick-up) (%)	Transport en commun (MB+AC) (%)	Poids lourds particuliers (CE+C3+EA+GR) (%)
Gato	Yokadouma-Moloundou	P007	35,37	6,81	57,82
Bonis	Abong-Mbang-Bonis	N010	37,61	21,74	40,65
Ngoura	Batouri-Ngoura	N010	17,09	11,39	71,52
Ngoura	Kentzou-Ngoura	1010	25,32	9,87	64,81
Ngoura	Yokadouma-Ngoura	P004	17,39	11,09	71,52
Madouma	Abong-Mbang-Lomié	P006	60,71	11,62	27,67
Mandjou	Mandjou-Batouri	N010	39,01	25,90	35,08

**Légende : VP : voiture personnelle ; MB : Minibus ; AC : Auto-cars ; CE : Camions à 2 essieux ; C3 : Camions à 3 essieux ; EA : Ensemble articulé ; GR : Grumiers**

En fonction de la nature du sol et de sa classe ainsi que du trafic, le guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux (CEBTP, 1984) permet de déterminer l'épaisseur de chaque couche (revêtement, couche de base et couche de fondation).

Les accotements ont un rôle important dans le drainage de la chaussée.

Pour les routes revêtues, les accotements non stabilisés doivent avoir 4 % de pente et 6 % lorsqu'ils sont stabilisés ou imprégnés (CEBTP, 1984). Les revêtements des chaussées à faible trafic seront réalisés au moyen d'une imprégnation sur au moins 50 cm de largeur.

Pour les chaussées supportant les trafics supérieurs à T3, il est recommandé de prévoir une mono couche sur au moins 1m, au-delà de la bordure de la couche de roulement et sur 2 m en pays désertiques. Les accotements servant occasionnellement d'aire de stationnement ou d'arrêt, la portance des matériaux qui les constituent doit rester suffisante (CBR minimum de 20 pour les trafics T1 et T2 et de 30 pour les trafics T3 et T4 (CEBTP, 1984).

La pente à donner aux talus résulte d'un compromis à réaliser entre les phénomènes dû à l'érosion et la stabilité des masses découpées (déblais) ou édifiées (remblais). Dans certains cas particuliers, des études spécifiques de mécanique des sols ou de géologie structurale avec recours à l'ordinateur, seront indispensables pour définir des pentes à donner aux talus de déblais ou les conditions de réalisation des remblais sur sols compressibles.

Les valeurs données dans les tableaux 8 et 9 sont des ordres de grandeur des pentes habituelles selon lesquelles sont dressés les remblais et taillés les déblais (CEBTP, 1984).

On distingue deux types de drainage :

- le drainage superficiel destiné à évacuer les eaux de ruissellement ;
- le drainage profond dont le but est l'élimination de l'eau excédentaire contenu dans les sols.

L'imbibition de la plate-forme et les remontées capillaires sont les causes principales de perte de portance des sols contre lesquelles, il faut se prémunir. On rappellera que le matériau utilisé comme filtre doit satisfaire à certaines exigences de granulométrie pour qu'il ne soit pas contaminé par les fines du terrain encaissant.

#### **I.2.3.4. Mise en œuvre de sol**

La mise en œuvre de sol dépend de la nature du sol, de la couche concernée, de la chaussée après le terrassement (déblais et remblais) et du compactage.

Les remblais sont destinés à éloigner la chaussée d'un mauvais sol ou à permettre le franchissement d'un accident de relief. Pour les remblais d'argile molle, il faut penser aux tassements sous la fondation dans les années qui suivent la construction et prévoir la possibilité de recharge. La tourbe doit être le plus souvent éliminée par exemple par poinçonnement forcé par un remblai constructif de hauteur plus grande que celle du projet.



Dans certains cas, il faut accélérer le tassement par des drains en sable verticaux (Habib, 1973).

Pour les couches de la chaussée, avant la mise en œuvre des matériaux, l'Ingénieur de suivi doit réceptionner visuellement, le matériau et faire réaliser par le laboratoire, les essais prévus dans le cahier des clauses techniques particulières (CCTP). Il contrôlera visuellement l'homogénéité du matériau, l'absence de matières organiques, l'absence des racines d'arbres, de morceaux de bois, et l'absence des blocs de dimensions supérieures à la dimension maximale et d'autres éléments indésirables. En plus de ce contrôle visuel, l'Ingénieur de suivi fera réaliser les essais de réception prévus dans le CCTP et selon la cadence prescrite. Il s'agit généralement de l'analyse granulométrique, des limites d'Atterberg, de la teneur en eau naturelle, des essais Proctor, des essais CBR etc.

En règle générale, on entend par "**plate-forme**" la couche supérieure des terrassements dont l'épaisseur est de 30 cm. Il est indispensable de disposer d'une bonne assise pour que le corps de la chaussée soit mis en place dans des conditions satisfaisantes et pour qu'il conserve, dans le temps, une indéformabilité suffisante.

**La couche de forme** qui est une partie de la chaussée située entre la partie supérieure du terrassement et la couche d'assise, est envisagée quand les matériaux de la plate forme ont un CBR est inférieur à 15 %. Son épaisseur varie de 30 à 50 cm selon la nature en place.

Il a été constaté que les zones de substitution ne sont découvertes qu'après le terrassement au niveau de la plate forme existante et au niveau des zones de déblais pour une étude géotechnique mal réalisée lors de l'avant projet détaillé, ce qui induit un coût supplémentaire par rapport à l'enveloppe du marché de base. Ceci a pour conséquence, le retard d'exécution des travaux. obtenu pour une densité sèche correspondant à 95 % de la densité maximale du Proctor modifié. La dimension maximale des éléments n'excède pas 60 mm. Pour une meilleure résistance à l'orniérage, on préfère, autant que l'épaisseur à mettre en œuvre le permet, les matériaux dont la granulométrie est étalée La densité sèche minimale requise sera 1800 à 2000 kg/m<sup>3</sup>, selon l'importance du trafic (CEBTP, 1984). Des valeurs indicatives de déflexions admissibles sur la couche de fondation sous essieu de 13 tonnes (exprimées en  $D_m + 1,3\sigma$ ) peuvent être modulées entre 100/100 et 200/100 selon le trafic (T3 à T1) et selon la nature du sol. ( $D_m$  : Déflexion moyenne ;  $\sigma$  : Ecart type).

**La couche de fondation** est une couche de matériaux situés sous la couche de base et destinée à répartir les efforts dus aux charges sur le sol support. Quelle que soit la structure dans laquelle ils sont inclus, les matériaux pour couche de fondation doivent avoir un CBR au moins égal à 30 %

**Tableau 8.** Pentas des remblais en fonction de leurs hauteurs

Remblais	Pente des talus	
	Horizontal	Vertical
Pour les hauteurs inférieures à 1m et quelle que soit la nature des matériaux les constituants	3	1
Pour les hauteurs supérieures à 1m et pour tous les matériaux (sauf les sables pulvérulents)	1.5	1
Pour les hauteurs supérieures à 1m et quelle que soit la hauteur au-delà de ce minimum, lorsque le remblai est constitué par des sables peu cohésifs	2	1
Pour les remblais reposant sur le sol de fondation vaseux ou d'argile molle	Etude spéciale de stabilité	

**Tableau 9 :** Pentas de déblais en fonction de leurs hauteurs

Déblais	Pente des talus	
	Horizontal	Vertical
En terrain rocheux sain et * quelle que soit la hauteur	Verticale	
Dans la roche peu altérée et * quelle que soit la hauteur	1	6
Dans les matériaux latérisés et à prédominance sableuse : hauteur < 3m	1	4
3 m ≤ hauteur < 10 m	1	3
10 m ≤ hauteur < 20m	1	2
Dans les matériaux latérisés et à prédominance argileuse *: hauteur < 3m	1	5
3 m ≤ hauteur < 10m	1	4
10 m ≤ hauteur < 20m	1	3
Dans les matériaux d'origine sédimentaire, sable fin cohésif et limons	1	1
Dans les sables dénués de toute cohésion, quelle que soit la hauteur	2	1
* La pente des talus dans les matériaux schisteux ou stratifiés pouvant dépendre des valeurs du pendage et de sa direction, on devra en tenir compte dans les cas où ce phénomène est apparent et procéder à une analyse structurale du massif		

**La couche de base** est une couche située en dessous de la couche de roulement, reposant sur la couche de fondation. Elle subit plus les contraintes verticales que la couche de fondation et des efforts de cisaillement d'autant plus importante que la couche de surface est mince, son épaisseur maximum de 25 cm étant soumise à des sollicitations importantes, les matériaux qui la constituent doivent avoir des qualités suffisantes. L'indice portant CBR, sera au moins égal à 80 % pour une densité sèche correspondant à 95 % de la densité maximale du Proctor modifié. Si le matériau naturel n'atteint pas cette portance, il devrait être amélioré ou traité. De nos jours au Cameroun, la couche de base est exécutée, soit en graves concassés 0/31,5 et dont le fuseau granulométrique est défini lors de confection du CCTP, soit en graveleux améliorés au ciment ou à la chaux, soit en grave bitume, soit en grave ciment etc. Les caractéristiques de graveleux latéritiques recommandées pour les couches de base pour faible trafic et de fondation (Autret, 1983) sont récapitulées dans le tableau 10. Et pour la couche de base en grave concassés 0/31.5 et 0/40, les caractéristiques recommandées sont récapitulées dans les tableaux 11, 12 et 13.

**. La couche de roulement** est une couche de surface qui reçoit les efforts de trafic et les transmet à la couche de base.

Le compactage est une réduction de volume pratiquement instantanée du sol due à la réduction des vides remplis d'air (Schlosser, 1988).

Le but du compactage des sols est d'améliorer les caractéristiques mécaniques (cohésion et angle de frottement interne) et l'homogénéité du sol en place en augmentant sa densité, d'empêcher les tassements ultérieurs avec tous les désordres qui suivent et enfin de diminuer la perméabilité du sol et de réduire l'influence de l'eau (Costet et Sanglerat, 1969). La plupart de déformations des chaussées sont imputables à un mauvais compactage. Il en est ainsi des ornières, des flaches et de certaines ruptures de remblais mal compactés (Mahabub, 1982).

Les tassements ultérieurs peuvent produire la rupture de culées des ponts. L'effondrement de beaucoup de buses est dû à un mauvais compactage de blocs techniques. Il convient donc d'attacher beaucoup de prix à l'opération de compactage et d'éviter de faire des économies occultes. La masse volumique sèche ( $\rho_d$ ) d'un sol compacté sera donc supérieure à celle d'un sol non compacté. C'est d'ailleurs cette caractéristique qui permet de vérifier l'efficacité du compactage sur le terrain. Elle est influencée par les trois variables qui sont la teneur en eau, l'énergie de compactage et la granulométrie.

Quand l'on compacte le sol avec une énergie constante, la masse volumique du sol sec ( $\rho_d$ ) augmente avec la teneur en eau ( $\omega$ ) jusqu'à une valeur maximale. Au delà de cette valeur l'accroissement de la teneur en eau réduit la masse volumique du sol sec.

**Tableau 10 :** Caractéristiques de graveleux latéritiques pour couche de base et couche de fondation

<b>Graveleux latéritiques</b>	<b>Couche de base</b>	<b>Couche de fondation</b>
Densité sèche OPM	2,00 minimum	1,900 minimum
Limite de liquidité	35 maximum	50 maximum
Indice de plasticité	25 maximum	35 maximum
Gonflement linéaire	0,3% maximum	1% maximum
Granulométrie		
% passant 38 mm	85-100	80-100
19 mm	70-100	65-100
10 mm	50-95	50-100
5 mm	40-90	35-100
2,5 mm	30-80	25-80
0,7 mm	15-45	15-55
0,08 mm	5-20	5-35
CBR après 4 jours d'imbibition		
Pour 100 %		
Pour 95 %	80 minimum	30 minimum

**Tableau 11 :** Fuseau granulométrique de graves concassés 0/31,5 et 0/40

Granulométrie		40 mm	31,5 mm	20 mm	10 mm	6,3 mm	2 mm	0,5 mm	80 µm
Fuseau en %	0/31,5	100	95-100	64-90	40-70	30-60	20-42	10-26	2(4)-10
	0/40	95-100	85-97	65-90	40-75	30-63	20-45	12-30	4-12

**Tableau 12 :** Valeurs de Los Angeles et de Micro-Deval pour l'essieu entre 8 et 10 tonnes

	<b>Concassées</b>	<b>Matériaux liés</b>
Los Angeles	≤ 45	< 50
Micro-Deval	≤ 15	< 20

**Tableau 13 :** Valeurs de Los Angeles et de Micro-Deval pour l'essieu de 13 tonnes

	<b>Concassées</b>	<b>Matériaux liés</b>
Los Angeles	≤ 30	< 40
Micro-Deval	≤ 20	< 18

L'énergie de compactage est évaluée en  $\text{kg/cm}^2$  ou en bars. L'énergie de l'essai Proctor modifié a une valeur de 17 bars environ, alors que l'énergie de l'essai Proctor normal est de 6 bars environ (Ekodeck, 1976). La forme de la courbe dépend de la nature du sol compacté : très pointue pour les sols argileux, elle est très étalée pour les sols graveleux.

#### . Principaux types de compacteurs en fonction de nature des matériaux

Les principaux types de compacteurs (Robitaille et Tremblay, 1997) en fonction de la nature de matériaux sont récapitulés dans le tableau 14.

#### I.2.3.5. Stabilisation des sols latéritiques

La stabilisation est un ensemble des procédés physiques, physico-chimiques ou chimiques visant à améliorer les caractéristiques d'un sol, en particulier, sa résistance portante, sa sensibilité à l'eau et sa durabilité. La stabilisation du sol doit permettre de :

- réduire le volume des vides entre les particules solides ;
- colmater les vides que l'on ne peut supprimer (perméabilité) ;

En diminuant la sensibilité à l'eau, le retrait et le gonflement devront aussi être réduits. L'amélioration de ces caractéristiques doit garder un caractère irréversible.

Les méthodes de stabilisation des terres remaniées peuvent être classées en trois groupes suivant qu'elles utilisent

- créer des liens ou d'améliorer les liaisons existant entre les particules (résistance mécanique). Ces objectifs permettent d'améliorer la résistance mécanique.

- des stabilisants « **mécaniques** » qui améliorent le sol par modification de densité naturelle ;
- des stabilisants « **chimiques** » qui modifient les propriétés du sol par l'intermédiaire de certains adjuvants ;

- des stabilisants « **physiques** » qui modifient les propriétés du sol par correction granulaire ou par l'action électrique.

#### I.2.3.5.1. Stabilisation mécanique

C'est l'une des méthodes que nous utilisons par la suite. Il s'agit ici du compactage qui consiste essentiellement en une réduction de la porosité du matériau par resserrement des particules. L'action mécanique qui augmente la compacité du matériau peut être :

- **statique** : par utilisation de rouleaux à cylindre ou à pneus, presse et filières pour la confection des parpaings.

- **dynamique** : par l'utilisation des rouleaux vibrants, aiguilles et coffrages vibrants, dames et pistons. Concernant le compactage dynamique, il a été constaté qu'une grande énergie de

diminution de la perméabilité, de la compressibilité, de l'absorption d'eau et du gonflement des matériaux. Les résistances mécaniques initiales et à long terme augmentent.

#### **I.2.3.5.2. Stabilisation chimique**

Le compactage permet à lui tout seul d'obtenir un matériau aux caractéristiques élevées. Cependant, ces matériaux restent très sensibles à l'eau. Afin de diminuer cette sensibilité à l'eau, on a souvent recours à l'adjonction de produits (liants hydrauliques, résines, émulsions bitumineuses) rendant les sols traités moins hydrophiles (moins mouillés).

##### **- Stabilisation au ciment**

L'adjonction du ciment qui est un liant hydraulique permet de lier les grains de sable tout en stabilisant l'argile de terres. on obtient ainsi, une amélioration des caractéristiques mécaniques et de la sensibilité à l'eau. Pour cette stabilisation, il faudra veiller à ce que l'eau de gachage ne contienne ni matières organiques, ni sulfates. Les sols stabilisables au ciment doivent avoir parmi leurs éléments passant au tamis de 5 mm, moins de 50 % d'éléments inférieurs à 80 µm, moins de 30% d'argiles (éléments de 2 µm ou en dessous).

L'indice de plasticité doit être inférieur à 40%. Cette méthode de stabilisation est la plus pratiquée particulièrement en Afrique (Messou, 1980). Au Cameroun, la méthode de stabilisation en sol-ciment a été utilisée sur les corps de chaussées en latérites pour les ouvrages routiers suivants: Douala-Kekem, Bafoussam-Bamenda, Pont du Noun-Foumban, Voirie de Douala, Voirie de Yaoundé etc..

Ces expériences ont montré que les latérites stabilisées au ciment peuvent être utilisées en couche de base semi-rigides. En dosant avec 3 à 5 % de ciment, on peut garantir un CBR minimum de 160 à 95 % de l'OPM après 4 jours d'imbibition. Il est à noter que pour atteindre ces performances, il faut respecter certaines conditions de travail, à savoir: ne pas dépasser 2 heures après que le mélange latérite-ciment ait été réalisé sans compactage;

##### **- Stabilisation à la chaux**

En stabilisant un sol à la chaux, les objectifs suivant sont généralement atteints :

- diminution de la plasticité du matériau stabilisé qui présente, ainsi des caractéristiques mécaniques améliorées ;
- amélioration de l'ouvrabilité du sol et de sa résistance à la défloculation et à l'érosion ;
- augmentation rapide de la résistance des sols humides.

##### **- Stabilisation au bitume**

Le bitume est un liant qui ne convient pas souvent à la stabilisation de latérite quand celle-ci présente un indice de plasticité supérieur à 30 % et une teneur en eau généralement élevée.

On l'utilise malgré tout quand la plate-forme est très argileuse (voirie de Yaoundé : tronçon carrefour Warda - Hôtel Aurore).

**Tableau 14 :** Principaux type de compacteurs en fonction de la nature du sol

Types de compacteurs	Principales utilisations	Sols recommandés	Epaisseur de couches (mm)	Nombre de passes	Vitesses km/h	Qualité du compactage
• Rouleaux à jantes lisses	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usage des couches de sol</li> <li>• Compactage de grandes surfaces</li> <li>• Compactage du béton bitumineux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tous les sols</li> <li>• Roche concassée et sable grossier et moyen</li> </ul>	150 à 250	6 à 12	3 à 12	Faible à moyenne
• Rouleaux à pieds de mouton	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compactage de grandes surfaces</li> <li>• Barrage en terre</li> <li>• Remblais routiers</li> </ul>	• Sols cohérents (argile et silt)	150 à 300	3 à 12	6 à 9	Bonne
• Rouleaux à pneus	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compactage de grandes surfaces</li> <li>• Barrage en terre</li> <li>• Remblais routiers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gravier et sable à granulométrie étalée</li> <li>• Gravier silteux et argileux, sable silteux</li> <li>• Gravier et sable à granulométrie serrée, sable argileux</li> <li>• Sols cohérents inorganiques et organiques</li> </ul>	150 à 300	4 à 10	6 à 12	Bonne
			150 à 300	4 à 10	6 à 12	Moyenne
• Rouleaux vibrants	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compactage de grandes surfaces</li> <li>• Remblais routiers</li> <li>• Pistes d'atterrissage</li> <li>• Stationnements</li> <li>• Fondations des gros édifices</li> </ul>	• Sols pulvérulents (gravier et sable propre)	150 à 300	2 à 8	3 à 8	Excellente
• Plaques vibrantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compactage de petites surfaces</li> <li>• Remblais difficiles d'accès</li> <li>• Remblais près des murs de fondations ou de soutènement</li> <li>• Fondation de trottoirs</li> </ul>	• Sols pulvérulents	100 à 200	2 à 8	3 à 8	Bonne à excellente

Il faut noter qu'une passe d'un engin, c'est un aller et retour

### **I.2.3.5.3. Stabilisation physique**

Parmi les procédés physiques, on rencontre généralement les stabilisations granulaires et thermiques.

#### **Stabilisation granulaire**

Cette opération consiste à corriger la granulométrie d'une latérite avec un matériau d'apport (généralement des concassées) en vue d'améliorer sa résistance, sa portance et sa durabilité lorsqu'il est soumis à différentes conditions d'humidité et des charges. Cela permet soit de diminuer l'indice de plasticité du matériau de base, soit dans le cas de sols "top crus" à lui conférer une certaine cohésion. Il est possible d'augmenter considérablement le CBR d'une latérite de qualité médiocre par adjonction d'un certain pourcentage optimal de l'ordre de 15 à 30 de concassés d 5/15.. La densité sèche maximale augmente, la teneur en eau optimale baisse de même que la plasticité et la résistance augmente. L'augmentation des performances mécaniques est cependant conditionnée par la nature du matériau de base, sa granulométrie initiale et la nature du matériau d'apport.

#### **Stabilisation thermique**

Cette stabilisation s'obtient par apport de chaleur. On améliore ainsi la résistance des briques par dessiccation et sans compactage. A une température suffisante, le phénomène de durcissement devient irréversible pour une brique, même après immersion.

### **I.2.3.6. Classification des sols latéritiques**

Il existe plusieurs classifications des sols : la classification triangulaire ; la classification unifiée sous le nom de unified soil classification system (U.S.C.S), la classification de l'"American Association for State Highway Official " (A.A.S.H.O), la classification du cahier des charges et devis généraux (C.C.D.G), la méthode de description visuelle des sols (Robitaille et Tremblay, 1997) et la classification américaine de sol Highway Research Board (HRB) qui est fondée sur l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg (Allegret et *al.*, 1965).

La classification américaine de sol (HRB) qui a été par ailleurs utilisée au cours de ce travail, est la plus employée et la plus pratique des classifications américaines. Elle répartit tous les sols naturels en 7 groupes, de A1 à A7. Pour chaque sol, il faut en même temps évaluer, l'indice de groupe qui détermine l'adéquation de l'utilisation de ce sol dans les constructions routières.

Cet indice de groupe obtenu par calcul ou à l'aide d'un abaque, varie de 0 à 20, et les sols présentant les meilleures performances ont un indice compris entre 0 et 4 (Ekodeck, 1984). Les graveleux latéritiques couvrent plusieurs classes. Les plus graveleux sont des A-2-7 ; tandis que les argileux sont des A-7-5 ; des A-2-6 et A-7-6. Cette classification des sols par Highway Reseach Board (H.R.B) est illustrée dans le tableau 15.



### **I.2.3.7 Assainissement routier**

Une route, qu'elle soit en remblais ou en déblais, présente des risques graves d'érosion dus aux eaux de ruissellement (Nguyen et *al*, 1981). Impérativement, elle doit être protégée en mettant l'accent sur l'assainissement.

Le système d'assainissement comprend des fossés, des exutoires, des fossés de crête, des canalisations, des regards, des descentes d'eau, des buses, ainsi que des drains enterrés (cas de la route Ayos-Abong-Mbang au PK 0 + 450 et au PK 5+000, au niveau de déblais rocheux).

L'objectif de ces dispositifs est de rassembler rapidement et de conduire les eaux de pluie et les eaux souterraines hors de la route. L'eau peut causer des dégâts importants à la route en affaiblissant la chaussée ou les fondations, et par l'érosion.

Il faut donc protéger la chaussée de l'eau. Le drainage pour la plate-forme est une nécessité immédiate avec des fossés et des exutoires permettant ainsi un écoulement gravitaire des eaux pluviales. Les zones où la nappe affleure, la surface du sol méritent un traitement d'assainissement particulier avec des drains gravitaires. En cas d'impossibilité, il reste à éloigner la chaussée de mauvais sol par un remblai de grande hauteur en matériaux filtrant. La route est alors surélevée avec un écoulement latéral des eaux de pluies et sans fossés. Dans un tel cas, il faut prévoir une fondation stabilisée étanche.

## **I.2.4. AUTRES DONNEES**

### **I.2.4.1. Données pédologiques**

Deux grands groupes de sols sont rencontrés dans la région forestière du Sud-Cameroun : les sols ferrallitiques et les sols hydromorphes (Martin, 1967 ; Segalen, 1967 ; Muller, 1977 et 1979 in Bekoa (1994)). Les sols ferrallitiques, localisés sur les interfluves, sont de deux types : les sols ferrallitiques rouges et les sols ferrallitiques jaunes.

Ils sont différenciés de bas en haut en trois ensembles : un ensemble altéritique ; un ensemble médian d'accumulation d'oxydes et hydroxydes de fer ou ensemble glébulaire ou nodulaire ; un ensemble argilo-sableux à argileux meuble supérieur surmonté d'une mince pellicule humifère (Ekodeck, 1984 ; Bitom, 1988 ; Nyeck, 1988). Les ensembles glébulaires ou nodulaires qui sont concernés par les travaux routiers, sont souvent caractérisés par des successions de ferruginisation, de déferrugination et de redistribution du fer (Yongué-Fouateu, 1986 ; Bilong, 1988 ; Bitom, 1988).

### **I.2.4.2. Données géotechniques des roches et des produits d'altération du Sud Cameroun**

De nombreux travaux ont été effectués sur les roches et sur les matériaux d'altération dans le Sud Cameroun (Sikali, 1979 ; Ekodeck, 1984 ; Hieng, 2003; Onana, 2010; Nzabakurikiza et al, 2012, Nzabakurikiza et al, 2016 ), dans le but de déterminer leurs caractéristiques physiques et mécaniques.

### **I.2.4.2.1. Caractéristiques physiques**

En mécanique des sols, la détermination des caractéristiques physiques des sols, permet de décrire les propriétés mécaniques et hydrauliques ou d'expliquer certains de leurs comportements comme le tassement. Certaines de ces caractéristiques se mesurent aisément sur le terrain ou en laboratoire, d'autres sont déduites des premières à l'aide de relations mathématiques.

#### **Poids et masses volumiques des roches**

La masse volumique représente le rapport entre la masse et un certain volume de sol tandis que le poids volumique est une force unitaire exprimée par le rapport entre le poids et ce même volume de sol (Robitaille et Tremblay, 1997). La masse d'un corps est une constante, alors que son poids varie proportionnellement à la valeur de l'attraction gravitationnelle. Cette relation se traduit par l'équation suivante :

$$W = M \times g \quad \text{où } W = \text{Poids (N)} ; M = \text{Masse (kg)} \text{ et } g = \text{accélération gravitationnelle} = 9,81\text{m/s}^2$$

En termes de poids et de masse volumiques, l'équation devient :

$$\gamma = \rho \times g \quad \text{où } \gamma = \text{poids volumique et } \rho = \text{masse volumique.}$$

Dans le système international d'unité (SI), la masse volumique s'exprime en  $\text{g/cm}^3$  ou en  $\text{kg/m}^3$  et le poids volumique en  $\text{k N/m}^3$ .

En mécanique de sols, la mesure de la masse volumique est indispensable au contrôle et à l'acceptation des travaux de compactage. Par ailleurs, on a besoin du poids volumique pour calculer les contraintes dans le sol. Ce calcul étant l'une des étapes menant à l'évaluation des tassements des dépôts de sols (Robitaille et Tremblay, 1997).

Les poids volumiques des roches ont été déterminés dans le Sud Cameroun (Sikali , 1979 ; Ekodeck , 1984 ; Hieng , 2003). Ils varient entre 2,82 et 3,32  $\text{g/cm}^3$

#### **Poids volumiques des produits d'altération**

Les études effectuées (Ekodeck, 1984;) montrent que le niveau médian gravillonnaire du profil d'altération présente les valeurs de poids volumiques variant entre 2,65 et 2,92  $\text{g/cm}^3$ .

#### **Granulométrie**

Les études effectuées sur la granulométrie et limites d'Atterberg dans le Sud du Cameroun (Sikali , 1979 ; Ekodeck, 1984 ; Nzabakurikiza et al, 2012, Onana et al , 2015; Nzabakurikiza et al, 2016) montrent que tous les matériaux de l'horizon médian à éléments grossiers sont de la classe A-2-7 en moyenne suivant la classification américaine HRB.

**Tableau 15** : Classification américaine des sols (Highway Research Board) transposée en unités et tamis français (extrait d'Ekodeck, 1976)

Classification en générale	Sols grenus (35% au maximum passant au tamis de 80µm)							Sols fins (plus de 35% passant au tamis de 80µm)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
Groupe ou sous groupe de classification	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Analyse granulométrique % passant au tamis :												
2 mm.....	max 50		min 50									
0,50 mm.....	max 30	max 50										
80µm.....	max 15	max 25	max 10	max 35	max 35	max 35	max 35	min 35	min 35	min 35	min 35	min 35
Caractéristique du mortier : (fraction passant au tamis de 0,50 mm)												
Limite de liquidité.....				max40	min 40	max 40	min 40	max40	max40	max40	min40	min40
Indice de plasticité.....	max6	max 6		max10	max 10	min 10	min 10	max10	max10	min10	min10	min10
											Ip< ωL-30	Ip> ωL-30
Indice de groupe (IG)	0	0	0	0	0	max 4	max 4	max 8	max12	max16	max20	max 20
Type de matériaux habituels significatifs	Pierres, graviers et sable		Sable fin	Graves et sables limoneux ou argileux				Sols limoneux		Sols argileux		
Estimation générale comme sous sols de chaussée	Excellent à bon						Passable à mauvais					

Nota : pour chaque sol identifié, on indiquera, après son symbole de groupe, son indice de groupe entre parenthèses. Par exemple : A-2-6(3)

$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd$ , où  $a$  et  $b$  : paramètres liés à la granulométrie ;  $c$  et  $d$  : paramètres liés aux limites d'Atterberg. Si on appelle  $x$  le % de sols qui passent à travers le tamis de 0,08 mm, lorsque  $x \leq 35 \Rightarrow a = 0$  ;  $35 < x < 75 \Rightarrow a = x - 35$  ;  $75 \leq x \Rightarrow a = 40$ . Lorsque  $x \leq 15 \Rightarrow b = 0$  ;  $15 < x < 55 \Rightarrow b = x - 15$  ;  $55 \leq x \Rightarrow b = 40$ . Si on appelle  $y$  limites de liquidité, lorsque  $y \leq 40 \Rightarrow c = 0$  ;  $40 < y < 60 \Rightarrow c = y - 40$  ;  $y \geq 60 \Rightarrow c = 20$ . Si on appelle  $z$  l'indice de plasticité, lorsque  $30 \geq z \Rightarrow d = 0$  ;  $10 \leq z \leq 30 \Rightarrow d = z - 10$  ;  $30 < z \Rightarrow d = 20$ .

### **Limites d'Atterberg**

Les études effectuées dans le Sud du Cameroun sur les matériaux latéritiques (Sikali , 1979; Ekodeck, 1984 ; Hieng , 2003; Nzabakurikiza et al, 2012; Nzabakurikiza et al, 2016) montrent, en moyenne que les limites de liquidité ( $\omega_L$ ) varient entre 47 et 63 %, les limites de plasticité ( $\omega_P$ ) oscillent entre 25 et 36 % et les indices de plasticité (IP), de 22 à 29 %.

#### **I.2.4.2.2. Caractéristiques mécaniques**

##### **Essai PROCTOR**

Les études effectuées dans le Sud Cameroun (Sikali, 1979 ; Ekodeck , 1984 ; Nzabakurikiza et al, 2012; Nzabakurikiza et al, 2016, ) montrent, que les densités optimales du Proctor Modifié pour le niveau médian du profil d'altération varient entre 1800 à 2300 Kg/m<sup>3</sup>).

##### **Essai CBR**

Dans le Sud Cameroun, les études effectuées (Nzabakurikiza et al, 2016) montrent que les valeurs de CBR après 4 jours d'immersion pour les matériaux latéritiques de l'horizon médian du profil d'altération varient entre 27 et 63 % en moyenne.

### **CONCLUSION SUR REVUE DE LA LITTERATURE SUR LE CADRE NATUREL ET SUR LES ETUDES ANTERIEURES**

Les zones d'étude situées dans les régions de l'Est et du Sud-Cameroun évoluent sous climat équatorial à quatre saisons et sous une forêt dense humide, toujours verte. La morphologie est un plateau disséqué de dômes et collines répétés, séparés par des vastes zones marécageuses. Le réseau hydrographique de la Région de l'Est appartient aux bassins de la Sanaga, de la Kadeï et du Nyong et celui de la Région du Sud appartient au bassin du Ntem.

Le socle précambrien camerounais est subdivisé en deux grandes entités lithostratigraphiques qui sont:

- la zone mobile d'Afrique Centrale ayant affecté la quasi-totalité du Cameroun dénommée " Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale ". Cette zone a subi un rajeunissement au panafricain, il y a 500 à 600 M.a.

La zone d'étude située dans la Région de l'Est est constituée essentiellement par des gneiss, des migmatites et des granites d'âge panafricain.

La zone d'étude située dans la région du Sud est constituée des orthogneiss.

Les produits d'altération issus de ces formations sont des sols ferrallitiques.

Les facteurs influençant le comportement des produits d'altération des roches métamorphiques de l'Est et du Sud Cameroun dans l'optique des travaux routiers sont :

- la nature du sol et du granulat : - le dimensionnement des chaussées
- la mise en œuvre des matériaux : et l'assainissement des eaux .

De l'analyse des résultats géotechniques des travaux antérieurs sur les roches et sur les produits d'altération de l'Est et du Sud Cameroun dans l'optique des travaux de Génie Civil, il ressort que les caractéristiques physiques et mécaniques moyennes obtenues sont les suivantes :

- les poids volumiques des roches varient entre 2820 et 3320 Kg/m<sup>3</sup> en moyenne ;
  - les poids volumiques des sols notamment, ceux du niveau médian gravillonnaire du profil d'altération varient entre 2650 et 2920 Kg/m<sup>3</sup> ;
  - les limites de liquidité du niveau médian varient entre 47 et 63 % ;
  - les limites de plasticité varient entre 25 et 36 % et les indices de plasticité varient entre 22 et 29 %.
- Pour les matériaux du niveau médian du sud Cameroun, les valeurs moyennes des densités optimales du Proctor Modifié varient entre 1800 et 2300 Kg/m<sup>3</sup>; le CBR après 4 jours d'imbibition et à 95 % varie entre 27 et 63 % en moyenne..

**CHAPITRE II. SECTEURS DE TRAVAIL  
SELECTIONNES, MATERIEL ET  
METHODES D'ETUDE**

## **INTRODUCTION**

Ce chapitre concerne les secteurs de travail sélectionnés, la méthodologie de prélèvement des matériaux des roches et de sols sur le terrain et le mode de numérotation des échantillons prélevés. Il présente également, les matériels utilisés pour chaque essai, le principe d'exécution des essais conformément aux normes en vigueur, les méthodes d'analyse ainsi que celles de traitement statistique des données obtenues.

### **II.1 CHOIX DES SITES**

#### **II.1.1 REGION DE L'EST**

Dans la Région de l'Est, pour de raison des travaux de construction des routes en cours, les travaux ont été effectués dans les :

- département du Haut-Nyong (avec Chef-Lieu : Abong-Mbang) ;
- département du Lom et Djerem (avec Chef-Lieu : Bertoua) ;
- département de la Kadeï (avec Chef-Lieu : Batouri) ;
- département de la Boumba et Ngoko (avec Chef-lieu : Yokadouma).

Ces secteurs de travail sont situés entre 2°32' et 2°70' de latitude Nord, et entre 10°82' et 11°44' de longitude Est pour la Région du Sud (Fig. 1) et entre 3°55' et 4°68' de latitude Nord, et entre 12°67' et 15°28' de longitude Est pour la Région de l'Est (Fig. 1) Dans la Région de l'Est, les itinéraires concernés par ce travail sont récapitulés dans le tableau 16 et localisés sur la carte de la figure 1.

La localisation géographique de toutes les carrières qui ont fait l'objet d'étude est consignée dans le tableau A1 en annexe. Les affleurements rocheux ont été également localisés et étudiés.

Dans la Région de l'Est, six affleurements rocheux ont été étudiés.

Le premier affleurement de migmatite est une carrière non encore exploitée située dans le département de la Kadeï, à 150 m côté gauche de la route de Batouri-Ngoura au PK 24,5. Il est situé géographiquement à 4° 24'01'' de latitude Nord et 14°33'46'' de longitude Est.

Le deuxième affleurement de migmatite se situe dans le même département, à 200 m du côté gauche de la route Ngoura-Yola et au PK 1 (Fig. 7). Il est localisé à 4°23'29'' de latitude Nord et 14°34'22'' de longitude Est.

Le troisième est constitué par des roches migmatitiques. Cet affleurement est situé dans le département de la Boumba et Ngoko, à 500 m du côté gauche de la route Yola-Yokadouma, à Gari-Gombo, au PK 19+000. Ses coordonnées géographiques sont : 3°55'44'' de latitude Nord et 15°6'45'' de longitude Est.

**Tableau 16** : Itinéraires des zones étudiées dans la Région de l'Est

Catégorie des routes Et leurs numéros	Itinéraire	Longueur (km)	Département
RP6	Abong-Mbang-Nkouak-	24,25	Haut- Nyong
RP6	Nkouak-Palisco	26,47	
RP6	Palisco-Ampel	18,75	
RP6	Ampel-Lomié	75,75	
N10	Abong-Mbang-Bonis	100,44	Lom et Djerem et Haut-Nyong
N10	Ayos-Abong-Mbang	87,00	
N10	Mandjou-Gadji	42,00	
N10	Batouri- Ngoura	27,79	Kadeï
RP4	Ngoura-Yola	78,02	Boumba et Ngoko
RP4	Yola- Yokadouma	80,38	
RP4	Yokadouma-Bangoué	76,43	
RP4	Bangoué-Moloundou	144,09	
RD31	Limite-Centre-Mboma	21,00	Haut-Nyong
RP21	Mboma-Nguélémendouka-Mbet	60,00	
RD29	Doumé-Nguélémendouka	75,00	
RD27	Kobi-Kanyol II-Djampiel- Mbang	70,00	Kadeï
RD28	Batouri-Kanyol II	50,00	

N : Route nationale, RP : Routes provinciales, RD : Routes départementales





1 mm

**Figure 7 :** Affleurement de migmatite à biotite et à pyroxène situé à 1 km du carrefour Ngoura, du côté gauche de la route Ngoura-Yola et à 200 m de la route



1 mm

**Figure 8 :** Affleurement d'orthogneiss à biotite et à amphibole de Ben à Doumét situé à 37 km d'Abong-Mbang, du côté droit de la route Abong-Mbang-Bonis et à 500 m de la route



1 mm

**Figure 9 :** Affleurement de granite à biotite et à amphibole situé à 8 km de Bertoua, du côté droit de la route Bertoua- Belabo et à 1 km de la route et à 500 m côté droit de la route Abong-Mbang-Bertoua.

Le quatrième est un affleurement d'orthogneiss observable dans le département du Haut-Nyong, à Bent, au Sud Est de Doumé (Fig. 8). Il est localisé à  $4^{\circ}9'50''$  de latitude Nord et  $13^{\circ}20'43''$  de longitude Est, à environ 37 km d'Abong-Mbang, en allant vers Bertoua

On note également, le cinquième affleurement de gneiss à biotite et à grenat rencontrés dans le même département dans la carrière de Nguélémondouka située à 500 m du côté gauche de la route Mbet-Nguélémondouka au PK 25. Il est localisé à  $4^{\circ}33'34''$  de latitude Nord et  $13^{\circ}01'17''$  de longitude Est.

Le sixième affleurement est un granite de couleur grise (Fig. 9), qui est représenté de façon très importante dans les environs de Bertoua (département de Lom et Djerem). On l'observe, plus précisément à 7 km de Bertoua en allant vers Belabo et à environ 1 km, du côté droit de la route. Il est situé géographiquement à  $4^{\circ}33'57''$  de latitude Nord et  $13^{\circ}35'46''$  de longitude Est.

### **II.1.2 REGION DU SUD**

Dans la Région du Sud, les travaux de recherche ont été effectués dans les départements de la Mvila (Chef lieu : Ebolowa) sur la route Nkoemvon-Ambam et de la Vallée de Ntem (Chef lieu Ambam) sur la route Ambam-Kye-Ossi. Ces secteurs de travail choisis à cause des travaux de construction des routes en cours, sont situés entre les parallèles  $2^{\circ}00'$  et  $2^{\circ}47'$  de latitude Nord, et les méridiens  $10^{\circ}46'$  et  $11^{\circ}16'$  de longitude Est (Fig. 1).

Dans cette Région du Sud, deux affleurements d'orthogneiss ont été étudiés.

Il s'agit de l'affleurement d'Andom dans le département de la Mvila situé à  $2^{\circ}31'06''$  de latitude Nord et  $11^{\circ}10'28''$  de longitude Est et de l'affleurement de Meyo-Nyaka dans le département de Vallée de Ntem situé à  $2^{\circ}19'15''$  de latitude Nord et  $11^{\circ}18'45''$  de longitude Est.

### **II.2. MODES DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS**

. Des prélèvements de roches ont été effectués au marteau pour les affleurements observés, au ramaçage des moellons (Fig. 10) et au prélèvement à la pelle (Fig. 11) dans les carrières en cours d'exploitation, aux fins d'études pétrographiques, minéralogiques, chimiques, physiques et mécaniques. Ainsi, huit échantillons des roches ont été prélevés. Six dans la Région de l'Est à savoir : carrières de Bertoua (granite) dans le département de Lom et Djerem, de Batouri (migmatite), de Ngoura (migmatite), de Gari-Gombo (migmatite) dans le département de la Kadeï, de Bent (orthogneiss) et de Nguélémondouka (gneiss) dans le département de Haut –Nyong. Et deux dans la Région du Sud à savoir : carrières d'Andom (orthogneiss) et de Meyo-Nyaka (orthogneiss) dans le département de Vallée du Ntem. Ces sites de prélèvement sont localisés sur la figure 1

## **II.2.2. PRELEVEMENTS DES ECHANTILLONS DES MATERIAUX NODULAIRES**

Des échantillons remaniés destinés aux analyses physiques, chimiques, mécaniques et minéralogiques ont été prélevés par pelles et sacs (Fig. 12), soit dans des carrières, soit sur la plateforme des routes en terre, soit sur les différentes couches de chaussée pour les routes neuves en cours de construction.

### **II.2.2.1. Echantillons provenant de carrières d'extraction de matériaux latéritique**

Au total, 129 carrières des sols latéritiques ont fait l'objet de prélèvement dans tous les départements de la Région de l'est et 13 carrières dans la Région du Sud. Ces carrières sont généralement localisées dans les environs des différentes routes neuves en cours de construction ou des routes en terre en cours d'entretien. Les prélèvements ont été effectués en se basant sur les indices à savoir : les affleurements de cuirasses, la présence des gravillons latéritiques en surface et la présence de certains arbres que le prospecteur averti identifie. Comme le montre la figure 12, les échantillons (graveleux latéritiques) ont été prélevés à la pioche et à la pelle dans l'horizon médian de sols latéritiques nodulaires qui intéresse les Ingénieurs de génie civil et les Géotechniciens dans les travaux de construction routière.

## **II.3. METHODE DE NUMEROTATION DES ECHANTILLONS**

Pour les échantillons des roches, la numérotation a été faite au marqueur sur la roche avec précision de la carrière d'exploitation et de la nature provisoire de la roche.

Pour les échantillons provenant de carrières latéritiques, la numérotation a été faite de 1 à n points de prélèvement par carrière, sur des étiquettes pour chaque sac à échantillon avec les indications suivantes :

- plan de la carrière et son emplacement par rapport à la route ;
- distance de la carrière par rapport à l'axe de la route ;
- épaisseur de la découverte et celle exploitable ;
- nature et couleur des matériaux ; - cubature minimale exploitable ;
- profil kilométrique routier de repérage du début et longueur du tronçon.

## **II.4. METHODES D'ANALYSE DES ECHANTILLONS**

### **II.4.1. ANALYSES: PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET DE MECANISME D'ALTERATION**

#### **II.4.1.1: ANALYSES PETROGRAPHIQUES**

Les études pétrographiques ont été effectuées au Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, à partir des lames minces des roches saines confectionnées au Laboratoire de Traitement des Minerais (à Nkolbisson) du Ministère de la Recherche Scientifique et



**Figure 10.** Prélèvement des moellons pour essais pétrologique dans la zone de Bent à Doumé (Est Cameroun)



**Figure 11.** Prélèvement des granulats pour essais mécaniques



**Figure 12 .** Prélèvement de sols latéritiques nodulaires dans la zone de Nganké (Est Cameroun)



**Figure 13.** Scieuse électrique



**Figure 14.** Polisseuse



**Figure 15.** Rectifieuse



**Figure 16.** Plaque chauffante

de Rénovation. Les matériels utilisés pour confectionner les lames mices sont représentés par les figures 13, 14, 15 et figure 16.

**La lame mince est confectionnée suivant les étapes suivantes:**

- La roche à étudier est coupée en sucre par la scieuse électrique;
- Le sucre coupée est porter à la policeuse pour effacer les traces de la scie laissées par la Scieuse électrique; la lame est nettoyée;
- Chauffer la lame et le sucre sur la plaque chauffante;
- Mélange homogène d'araldite (résine+durcisseur );
- Collage sur le sucre, la lame porte objet;
- Passer une journée;
- Revenir sur la scieuse électrique pour dégrossir (séparer la lame du sucre);
- Passer la lame à la rectifieuse qui ponce la lame jusqu'à une épaisseur de 1,75  $\mu$ ;
- Revenir sur la policeuse pour poncer la lame tout en regardant au microscope, quand l'épaisseur est à 0,3  $\mu$ , la lame est déjà confectionnée.

**II.4.1.2: Analyses mineralogiques et chimiques**

La minéralogie et la chimie des roches et des produits d'altération (horizon meuble nodulaire) a pu être déterminée par diffractométrie aux rayons X sur des fractions fines aux Laboratoires de Géosciences de Toronto au Canada.

Les déterminations chimiques globales des éléments majeurs des échantillons de roches et des produits d'altération (horizon nodulaire) ont été réalisées par fluorescence X, celles des éléments en traces par spectrométrie de masse (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry) aux Laboratoires de Geosciences (Geo Labs) de Toronto au Canada.

**II.4.1.3. Analyse de mecanisme de l'alteration supergene**

On dénombre principalement trois modes d'analyse des mécanismes de l'altération qui sont l'approche minéralogique, l'approche thermodynamique et cinétique, et l'approche par le calcul des bilans (Ekodeck, 1984). L'approche minéralogique permet de suivre l'évolution minéralogique et chimique de chaque minéral primaire au cours de son altération. L'approche thermodynamique et cinétique a conduit à la différenciation des processus thermodynamiques, les uns réversibles comme les équilibres phases/néoformations des minéraux secondaires, les autres irréversibles telle la dissolution des minéraux primaires (Helgeson et *al.*, 1969, Tardy, 1969).

Le calcul des bilans vise à établir un bilan géochimique des gains et des pertes de matières subis par la roche au cours de son altération. Les bilans sont réalisés soit par comparaison entre la composition chimique de la roche et celles des eaux qui la beignent (Gac et Pinta, 1973), soit par comparaison entre la roche mère et les différents niveaux d'altération (Ekodeck, 1984).

Les bilans peuvent être répartis en deux modes particuliers d'application : les bilans chimicominéralogique et les bilans hydrogéochimiques (Ekodeck et Kamgang, 2002). Les premiers consistent à évaluer les variations absolues le long d'une colonne de sol, en référence à la roche mère. Et les deuxièmes quant eux, s'attachent à déterminer la composition et le débit des eaux qui circulent à travers le sol et s'écoulent dans les nappes souterraines, de manière à quantifier les exportations des matières.

Pour les premiers bilans, on peut distinguer parmi eux, quatre grands types de démarche :

- la comparaison des constituants minéralogiques ou chimiques globales des faciès ayant conservé leurs structures et leurs volume initiaux : c'est la méthode isovolumique ;
- le bilan des éléments chimiques par rapport à un élément stable ou supposé tel, lequel bilan a été utilisé dans ce travail en considérant le zircon comme élément moins mobile. Les éléments considérés comme moins mobiles sont, le thorium, le zircon et le titane. Pour savoir le moins mobile entre ces trois éléments, on divise la grande valeur par la petite valeur. Exemple: *pour les roches  $Zr : 201/117 = 1,72$  et pour le niveau gravillonnaire,  $Zr : 431/183 = 2,4$ , ainsi de suite*) et on choisit dans la colonne obtenue, la valeur proche de **1, c'est ça qui donne l'élément moins mobile**. Les comparaisons peuvent s'effectuer par le biais d'une relation de type (Ekodeck et Kamgang, 2002) :  $100 [(C - C^*)/C^*](K^*/K)$ . Dans cette relation, C et C\* sont des teneurs pondérales en oxyde d'un élément chimique dans un échantillon donné et dans la roche saine respectivement. K et K\* sont les teneurs pondérales en oxyde de l'élément stable dans l'échantillon considéré et dans la roche mère ;

- le bilan des minéraux par rapport à un minéral non altérable, comme le quartz.
- la détermination du comportement systématique des éléments majeurs par la recherche d'un modèle mathématique susceptible d'expliquer l'évolution des teneurs en fonction de la distance à la roche saine. Un autre mode d'analyse de mécanismes d'altération qui est par ailleurs utilisé dans le cadre de ce travail, est l'approche normative altérologique (Ekodeck, 1984, Ekodeck et Kamgang, 2002), fondée sur des résultats d'analyse chimique des éléments majeurs. Cette approche est un moyen globalisant et sans invariant, non lithodépendant, se basant sur l'élaboration d'une composition minéralogique virtuelle à partir de la recombinaison conventionnelle d'au plus 14 constituants chimiques majeurs, donnant de la réalité naturelle une image assez saisissante. En plus, le chemin aboutit à la détermination de paramètres altérologiques, qui à leur tour permettent des caractérisations ponctuelles, évolutives et prospectives.

A partir de l'analyse chimique, cette méthode de caractérisation normative altérologique a été appliquée à certains matériaux utilisés dans l'entretien et dans la construction des routes de l'Est et du Sud Cameroun, dans le but de quantifier l'ampleur des transformations qu'ils ont subies sous

l'action des agents météoriques. Ceci a permis de donner des conseils à caractère technique quant à l'utilisation de ces matériaux dans la réalisation des différentes couches de la chaussée.

A partir de la méthode dite de restructuration normative altérologique, sept paramètres ont été définis (Ekodeck, 1984, 1989 ; Ekodeck et Kamgang, 2002) pour caractériser les roches et leurs produits d'altération. Cette caractérisation se fait par la quantification des mécanismes d'enrichissement ou d'appauvrissement mis en jeu au cours de la formation de ces produits et, par la détermination des particularités du milieu de leur formation. Ces données s'obtiennent à partir des teneurs en minéraux virtuellement reconstitués. Le principe de calcul consiste à combiner 13 constituants chimiques majeurs auxquels, on associe l'eau de constitution comme quatorzième constituant. Cinq groupes standards rassemblant 37 minéraux-étalons sont susceptibles d'apparaître et permettent des études ponctuelles de roches, ou, des études évolutives et séquentielles le long de profils ou le long de toposéquences. Les paramètres évalués sont de trois types :

- les paramètres d'enrichissement du milieu d'altération subdivisés en deux groupes caractérisant, l'un, l'importance relative des éléments peu mobiles qui sont le fer oxydé et l'aluminium (PPFAL, IAL et IFL), et l'autre, l'importance du cuirassement (IRIP),

- les paramètres d'appauvrissement du milieu d'altération : prenant en compte l'appauvrissement en éléments mobiles sous l'effet de l'hydrolyse et de la lixiviation, avec formation de nouvelles phases minérales. Il s'agit de l'indice relatif de lixiviation potentielle (IRLP) et du degré virtuel relatif d'altération de la roche (DVRAR),

- le paramètre de caractérisation du milieu : ce dernier peut être ouvert, propice à la migration des éléments mobiles et donc, favorable à la monosiallisation et à l'allitisation. Il s'agit de l'indice relatif de confinement potentiel (IRCP) ou degré virtuel d'hydromorphie.

De nombreux diagrammes viennent à l'appui de l'analyse et de l'interprétation des données découlant de cette méthode. Le tableau A2 en annexe présente les résultats de la restructuration normative. Les données ayant permis de réaliser cette restructuration sont récapitulées dans les tableaux 19 et 20..

#### **II.4.2. ANALYSES GEOTECHNIQUES : ESSAIS PHYSIQUES ET MECANIQUES**

Les mesures de certains essais physiques (teneur en eau naturelle, limites d'Atterberg, analyse granulométrique, poids volumiques, équivalent de sable, coefficient d'aplatissement) et mécaniques (coefficient de Los Angeles, essai Proctor Modifié et essai CBR et essais d'écrasement des bétons hydrauliques et bétons bitumineux) ont été effectuées aux Laboratoires BRECG, SOIL  $\alpha$  WATER, FOKOU-FOBERD et au Laboratoire de PANTECHNIKI-EDOK-ETER conformément aux normes en vigueur. Il en est de même des essais physiques in-situ (essais de compacité) et mécaniques in-situ (essais de déflexion et de pénétromètre dynamique).



## **II.4.2.1. Essais physiques au laboratoire**

### **II.4.2.1.1. Teneur en eau naturelle ( $w_n$ )**

Selon la norme française NF P94-050 (1995), la teneur en eau naturelle d'un matériau est le rapport du poids de l'eau évaporée lors de l'étuvage ( $W_w$ ) sur le poids des grains solides ( $W_d$ )

exprimée en pourcentage :  $w_n = \frac{W_w}{W_d} \times 100$ . La teneur en eau naturelle ( $w_{nat}$ ) d'un matériau est la

teneur en eau déterminée lorsque les conditions de prélèvement sur site, de transport et de conservation de l'échantillon n'ont entraîné aucune modification de celle-ci.

### **II.4.2.1.2. Limites d'Atterberg**

Conformément à la norme française NF P94-051 (1993), les essais de limites d'Atterberg permettent de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action de la teneur en eau. Le principe consiste à déterminer les limites de liquidité à l'aide de l'appareil de Gasagrande (Fig. 17) et de plasticité afin d'avoir une idée approximative des propriétés du matériau étudié.

### **II.4.2.1.3. Analyse granulométrique**

Selon les normes françaises NF P 18-560 (1990) et NF P 94-056 (1996), le principe de l'analyse granulométrique consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis (Fig. 18), emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau (sec) étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement de grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Le rapport entre la masse  $R$  des refus cumulés de matériau sec sur le tamis d'ouverture  $d$  à la masse totale initiale de l'échantillon de sol sec ( $m_s$ ) fournit le pourcentage de refus

### **II.4.2.1.4. Masse volumique**

#### **II.4.2.1.4.1. Masse volumique des sols fins**

Selon la norme française NF P 94 – 053 (1991), la masse volumique d'un sol fin  $\rho$  est le quotient de la masse ( $m$ ) du sol par le volume ( $v$ ) qu'il occupe y compris les fluides qu'il contient.

L'essai consiste à mesurer successivement les paramètres masse et volume qui caractérisent un même échantillon de sol.

La masse de l'échantillon est obtenue par pesage et pour mesurer le volume, deux méthodes sont utilisables : méthode géométrique et méthode par pesée.

#### **II.4.2.1.4.2. Masse volumique des particules solides des sols**

Selon la norme française NF P 94 – 054 (1991), la masse volumique des particules solides du sol  $\rho_s$  est le quotient de la masse de ces particules solides ( $m_s$ ) par leur volume ( $v_s$ ).

La masse des particules solides est obtenue par pesage. Le volume est mesuré au pycnomètre. La masse de l'échantillon est obtenue par pesage et pour mesurer le volume, deux méthodes sont utilisables : méthode géométrique et méthode par pesée.

#### **II.4.3.2.1.5. Equivalent de sable**

L'essai d'équivalent de sable a pour but de déterminer le pourcentage des impuretés se trouvant dans le sable à l'aide de l'appareil présenté par la figure 19. Selon la norme française NF P 18-598 (1991), l'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins.

On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout dans une éprouvette en plastique graduée. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- hauteur  $h_1$  : sable propre + éléments fins ;
- hauteur  $h_2$  : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est :  $ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$

#### **II.4.2.1.6. Coefficient d'aplatissement**

Conformément à la norme française NF P 18-561 (1990), la mesure du coefficient d'aplatissement, consiste en une double opération de tamisage :

- le tamisage classique sur une colonne de tamis normalisés à mailles afin de séparer, les granulats en une succession de classes granulaires  $d/D$  dont les dimensions sont telles que  $D = 1,25 d$ .
- les différentes classes granulaires  $d/D$  ainsi isolées sont tamisées une à une sur des grilles à fentes parallèles d'écartement  $E = d/1,58$  (Fig. 20).

Le coefficient d'aplatissement ( $A$ ) est calculé par la formule suivante :

$$A = \frac{Me}{Mg} \times 100$$

$Me$  = masse de la classe granulaire  $d/D$ .

$Mg$  = masse passant à travers le tamis à fentes d'écartement  $E$  correspondant.



**Figure 17:** Appareil de Casagrande



**Figure 18:** Série des tamis pour analyse granulométrique



**Figure 19:** Appareil d'équivalent du sable

## II.4.2.2. Essais physiques in-situ

### II.4.2.2.1. Essais de compacité

La compacité est le rapport entre la densité ou masse volumique in situ et la densité ou masse volumique de référence du Proctor modifié pour le même matériau. C'est l'état de serrage des grains du sol (Collas et Havard, 1983). La masse volumique in situ est déterminée à l'aide du densitomètre à membrane pour le sol et du cône à sable pour la couche de base en concassés 0/31.5 (Fig. 21 et 22).

#### II.4.2.2.1.1. Détermination de la masse volumique à l'aide du densitomètre à membrane

L'essai qui obéit à la norme NF P 94-061-2 (1996) consiste à creuser une cavité, à recueillir et à peser la totalité du matériau extrait, puis à mesurer le volume de la cavité à l'aide d'un densitomètre à membrane.

Soit:

- $Wh$  : Poids humide des matériaux provenant du trou (g),
- $V$  : Volume du trou ( $\text{cm}^3$ )
- $W\omega$  : Poids de l'eau (g) = poids humide du matériau – poids sec du matériau
- $Wd$  : Poids du sol sec (g)
- $\gamma\omega$  : Poids volumique de l'eau, -  $\gamma h$  : Poids volumique humide
- $\gamma d$  : Poids volumique sec

La densité sèche ( $dd$ ) est obtenue à partir de la formule suivante :

$$dd = \frac{\gamma d}{\gamma \omega} = \frac{\gamma h}{(1 + \omega)\gamma \omega}$$

La compacité ( $C$ ) se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$C = \frac{\gamma d}{\gamma d'} \times 100$$

$\gamma d'$  est le poids volumique sec du Proctor modifié pour le même matériau. Sa valeur est obtenue en laboratoire.

#### II.4.2.2.1.2. Détermination de la masse volumique à l'aide du cône à sable

- Pour la compacité obtenue à l'aide du cône à sable sur la couche de base, selon la norme française NF P 94-061-3 (1996), l'essai consiste à creuser une cavité, à recueillir et peser la totalité du matériau extrait, puis à déterminer le volume de la cavité en la remplissant avec du sable sec de masse volumique connue, dans des conditions de mise en place définies et à procéder au peser des matériaux comme pour le cas de la compacité au densitomètre à membrane.
- La compacité est déterminée à partir des étapes récapitulées dans le tableau 17.



**Figure 20:** Appareil de coefficient d'aplatissement



**Figure 21.** Densitomètre à membrane étalonné et prêt à être utilisé



**Figure 22.** Calcul de compacité sur la couche de base du PK 54+680 à côté de cône à sable sur la route Abong-Mbang-Bonis (ville de Doumé)

### II.4.2.2.1.3. Essais de compacité sur la plate-forme

Après la mise en forme de la plate-forme, les essais de compacité ont été réalisés à l'aide du densitomètre à membrane. Un constat fait, la distance entre deux points de compacité prévue par le CCTP est de 200 m. Cette distance est très grande et ne permet pas de s'assurer de la bonne mise en forme surtout que la nature des matériaux n'était pas la même, tantôt grave latéritique tantôt argile pure. Cette longue distance entre deux points de compacité, était parfois à l'origine de création de bourbiers au niveau des points faibles où la compacité n'a pas atteint l'optimum.

Pour la plate-forme des routes revêues, la compacité a été réalisée à chaque 50 m et pour la couche de fondation et couche de base, la compacité a été réalisée à chaque 100 m.

Pour la couche de roulement en béton bitumineux, les essais de compacité par carottage (Fig. 23) se faisaient à 200 m d'intervalle entre deux points de mesure.

### II.4.2.3. Essais mécaniques en laboratoire

#### II.4.2.3.1. Essai de Los Angeles

L'essai Los Angeles (Fig. 24) est un essai de test de résistance à la fragmentation, aux chocs et à l'usure des matériaux. Le principe consiste, selon les normes NF P 94-067 (1992) et NF P 18-573 (1990) à mesurer la masse  $m$  d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètres compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations. Le tableau 18 présente quelques indications relatives à cet essai dont la durée est de 15 minutes.

Le coefficient de Los Angeles est déterminé par la formule suivante :

Si  $W$  est le poids du matériau soumis à l'essai (5000 g) et  $w$  est le poids des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation aux chocs s'exprime par le coefficient Los Angeles (LA) :

$$LA = \frac{w}{W} \times 100$$

#### II.4.2.3.2. Essai PROCTOR

- Soit  $Wh$  le poids du matériau humide prélevé après démoulage et  $Wd$  le poids du matériau sec après passage à l'étuve pendant 24 heures et à 105°C.

- La teneur en eau  $\omega$  en % =  $\frac{Wh - Wd}{Wd} \times 100$ .

**Tableau 17.** Exemple de calcul de compacité à l'aide du cône à sable

Numéro	Désignation	Formule
1	Poids sable initial (g)	
2	Poids sable dans le bonbonne (g)	
3	Poids sable dans le cône (g)	1 - 2
4	Densité apparente du sable	
5	Volume du sable (cm <sup>3</sup> )	$\frac{3}{4}$
6	Petit volume (cm <sup>3</sup> ) c'est-à-dire (sable retenu sur la plaque)	
7	Volume du trou (cm <sup>3</sup> )	5 - 6
8	Poids total du matériau (g)	
9	Densité humide ( $\gamma_h$ ) g/cm <sup>3</sup>	$\frac{8}{7}$
10	Poids humide (g)	
11	Poids total sec (g)	
12	Poids de l'eau (g)	10 - 11
13	Teneur en eau ( $\omega$ ) en %	$\left(\frac{12}{11}\right) \times 100$
14	Densité sèche ( $\gamma_d$ ) en g/cm <sup>3</sup>	$\frac{9}{(1 + 13)}$
15	Poids d'éléments supérieurs à 20 mm (g)	
16	Pourcentage d'éléments supérieurs à 20 mm (m)	
17	Poids spécifique ( $\gamma_s$ ) g/cm <sup>3</sup>	
18	Densité sèche corrigée ( $\gamma_d'$ )	$\frac{14 \times \left(A - \frac{16}{100}\right)}{A - \left(\frac{14}{17} \times \frac{16}{100}\right)}$
19	Densité Proctor ( $\gamma_d$ ) en g/cm <sup>3</sup>	
20	Compacité en %	$\frac{18}{19}$

Légende : A = 1



**Figure 23 :** Carottage sur la couche de roulement au PK 45+480D, route : Abong-Mbang-Bonis



**Figure 24:** Appareil de Los Angeles

**Tableau 18 :** Indications relatives à l'essai Los Angeles ( NF P 18-573)

Classes granulaires mm	Caractéristiques de la classe granulaire	Nombre de boulets	Masse totale de la charge g		Nombre de tours de la machine
4/6.3		77	3080	+ 20 à - 150	500
6.3/10		9	3960		500
10/14		11	4840		500
10/25	Doit contenir 60 % de 10/16	11	4840	+ 20 à - 150	500
16/31.5	Doit contenir 60 % de 10/16	12	5280		500
25/50	Doit contenir 60 % de 10/16	12	5280		1000



Soit  $Wh$  le poids du matériau humide rempli dans le moule après compactage et  $V$  le volume du moule. Le poids volumique volumique  $\gamma_h$  en tonne par  $m^3 = \frac{Wh}{V}$

$$\text{Le poids volumique sec } \gamma_d \text{ en tonne par } m^3 = \frac{\gamma_h}{1 + \omega\%}$$

#### II.4.2.3.3. Essai CBR

Selon la norme française NF P 94-078 (1997), les indices CBR après immersion et les indices CBR immédiat sont des grandeurs utilisées pour caractériser un sol ou un matériau élaboré, en tant que support ou constituant d'une structure de chaussée.

Le principe général de l'essai (Fig. 25) consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique de  $19,3 \text{ cm}^2$  de section pour le faire pénétrer à vitesse constante de  $1,27 \text{ mm/minute}$ , dans une éprouvette de matériau ayant été compacté à l'optimum Proctor et après 4 jours d'imbibition.

Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué les enfoncements de  $2,5$  et  $5 \text{ mm}$  sont alors rapportés aux valeurs  $13,35$  et  $20 \text{ kN}$ , qui sont les forces observées dans les mêmes conditions sur un matériau de référence.

$$\frac{\text{Effort de pénétration à } 2,5\text{mm d'enfoncement (kN)}}{13,35} \times 100$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à } 5\text{mm d'enfoncement (kN)}}{20} \times 100$$

L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés.

La capacité de portance du sol est d'autant meilleure que l'indice CBR est plus élevé.

#### II.4.2.3.4. Etude de formulation des bétons hydrauliques

L'étude de formulation d'un béton hydraulique a été réalisée en utilisant la méthode de Dreux (1981) qui consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de la partie de l'ouvrage en cause. Pour le projet de la route Ayos-Bonis, trois formulations des bétons ont été étudiées Il s'agit de l'étude de formulation du béton Q400 pour le pont sur le Nyong à Ayos, l'étude de formulation de béton Q350 destinée à l'exécution des caniveaux rectangulaires, buses, dalots et ouvrages annexes ainsi que l'étude de formulation de béton Q300 pour les fossés bétonnés.

Le ciment utilisé est un CPJ 45 en provenance de l'usine CIMENCAM de Bonabéri à Douala  $\sigma = 45 \text{ MPa}$ .

L'eau utilisée pour la confection des bétons provient du réseau de distribution du forage de la base vie d'ATOK.

Les graviers entrant dans la composition des bétons sont obtenus du concassage du gneiss migmatitique de la carrière de Bent.

Le fluidifiant utilisé est un retardateur de prise du type « PLASTIRETARD » de SIKA dont les caractéristiques sont les suivantes :

- poids spécifique :  $1,75 \text{ T/m}^3$  ;
- teneur en ions chlorures (CT) :  $< 0,1 \%$  ;
- pH : 8,5 à 0,5 %.

#### **II.4.2.3.4.1. Composition du béton**

Les compositions retenues pour un mètre cube de différents bétons ont été dosés respectivement à 400, 350 et à 300 kg de ciment.

Ainsi, plusieurs éprouvettes en béton ont été confectionnées pour être écrasées à 7 jours et à 28 jours à la presse à béton (Fig. 26) et au scléromètre conformément à la norme NF P 18-406 (1981). Une corrélation des résultats entre ces deux types d'appareil a été établie.

#### **II.4.2.3.5. Etude de formulation du béton bitumineux**

L'étude de formulation de béton bitumineux (BB) est réalisée en vue de :

- la vérification des qualités du matériau utilisé par l'entreprise ;
- la détermination des proportions des granulats pouvant entrer dans la formulation ;
- la détermination du poids volumique réel des granulats  $\gamma_{RG}$ , et de la masse volumique de l'enrobé  $\gamma_{RE}$  ;
- la détermination de la teneur en bitume, du module de richesse (K) et de la surface spécifique ( $\Sigma$ ).

Cette étude permet également, l'obtention d'un enrobé de bonnes caractéristiques mécaniques (Compacité Duriez, stabilité Marshall, fluage, résistance à la compression Duriez (RC), la tenue de la chaussée à l'eau ( $R'c/RC$ ) et la densité de référence Duriez). La densité Duriez permet de déterminer la compacité après compactage sur le terrain (SETRA-LCPC, 1984). Le bitume utilisé pour la formulation a été vérifié par les essais de pénétration à l'aiguille (Fig. 27) conformément à la norme NF EN 1426 (1999). Et pour le cut-back utilisé pour l'imprégnation et couche d'accrochage, les essais de vérification ont été effectués conformément à la norme NF T 66-005 (1986).

La compacité est déterminée par la formule suivante (SETRA-LCPC, 1984) :



**Figure 25:** Appareil de presse CBR et Presse Marshall



**Figure 26:** Appareil de presse à béton



**Figure 27:** Appareil de pénétration à l'aiguille pour bitume

$$\text{Compacité} = \frac{\text{Densité in situ}}{\text{Référence Duriez ou Marshall}} \times 100$$

Il faut signaler que pour avoir la densité in situ, on procède par carottage (Fig. 19), suivi de la pesée hydrostatique de la carotte au laboratoire.

#### II.4.2.3.5.1. Méthode de formulation d'enrobé

Il y a deux méthodes de formulation d'enrobé : la méthode de principe mathématique et la méthode de calcul par Logiciel.

##### II.4.2.3.5.1.1. Méthode de principe mathématique

La méthode de principe mathématique utilise les formules conventionnelles (SETRA-LCPC, 1984) suivantes :

- la teneur en liant qui se calcule en utilisant la formule suivante :

$$\text{teneur en liant} = K \alpha \sqrt[5]{\Sigma}$$

où,  $\Sigma$  qui est la surface spécifique conventionnelle et qui s'exprime en  $m^2/kg$ , est donnée

par la formule suivante :  $\Sigma = 0,25 G + 2,35 S + 12 s + 135 F$ , avec:

$G$  : Pourcentage d'éléments supérieurs à 6,3 mm ;

$S$  : Pourcentage d'éléments compris entre 6,3 et 0,315 mm ;

$s$  : Pourcentage d'éléments compris entre 0,315 et 0,080 mm ;

$F$  : Pourcentage d'éléments inférieurs à 0,080 mm ;

$K$  = Module de richesse variant entre 3,3 et 3,9 ;

$\alpha$  = Coefficient correcteur destiné à tenir compte du poids volumique des granulats ( $\gamma_{RG}$ )

Si le poids volumique des granulats diffère de  $2,65g/cm^3$ , alors,  $\alpha = \frac{2,65}{\gamma_{RG}}$

où  $\gamma_{RG}$  est la moyenne des poids volumiques de tous les granulats utilisés, c'est à dire 0/5, 6/10 et 10/14. Elle est déterminée par la formule suivante :

$$\gamma_{RG} = \frac{100}{\frac{P1}{\gamma_{RG1}} = \frac{P2}{\gamma_{RG2}} = \frac{P3}{\gamma_{RG3}}}$$

Où  $P1$ ,  $P2$  et  $P3$  sont les pourcentages retenus pour chaque constituant,

$\gamma_{RG1}$  ;  $\gamma_{RG2}$  et  $\gamma_{RG3}$  sont les poids volumiques de chaque constituant.

- Le poids volumique de l'enrobé ( $\gamma_{RE}$ ) est déterminée par la formule suivante :

$$\gamma_{RE} = \frac{100 + PL}{\frac{100}{\gamma_{RG}} + \frac{PL}{\gamma_{RL}}}$$

Où  $PL$  est le pourcentage du liant,  $\gamma_{RL}$  est le poids volumique du liant.

Le module de richesse ( $K$ ) est déterminé par la formule suivante :  $K = \frac{\text{Teneur en liant}}{\alpha \sqrt[3]{\Sigma}}$

#### II.4.2.3.5.1.2. Méthode de calcul par logiciel

La méthode de calcul par logiciel qui a été par ailleurs utilisée au cours de ce travail, est un programme conçu pour la formulation du béton bitumineux. Ce programme consiste à introduire les pourcentages cumulés de chaque constituant ainsi que leurs poids spécifiques respectifs. Il ressort de cette méthode de calcul les résultats suivants :

- les coefficients calculés en % de chaque constituant ;
- le pourcentage de teneurs en liant ;
- le module de richesse ;
- la surface spécifique et la masse volumique réelle de l'enrobé.

Les coefficients calculés de chaque constituant donnent la 1<sup>ère</sup> formule et les autres formules découlent de cette première formule tout en tenant compte du fuseau de spécification et des caractéristiques mécaniques attendues. C'est cette dernière méthode qui a été utilisée au cours de ce travail.

#### II.4.2.4. Essais mécaniques in-situ

##### II.4.2.4.1. Essais de déflexions

L'essai obéit à la norme française NF P 98-200 (1991). Selon cette norme, la déflexion correspond au déplacement vertical à un point d'une chaussée, engendré par le passage d'une charge et constitue un des paramètres essentiels de l'auscultation des chaussées. Les essais de déflexions sont réalisés à l'aide de poutre de Benkelman (Fig. 28).

. On distingue plusieurs déflexions:

- la déflexion maximale ( $dm$ ) : elle correspond au déplacement vertical maximal du point de mesure ;
- la déflexion rémanente ou plastique ( $dr$ ) : c'est le déplacement vertical du point de mesure, lorsque, la valeur maximale ayant été atteinte, la charge s'est éloignée de 5 m plus ou moins 10 % du point de mesure ;
- la déflexion élastique ( $de$ ) : c'est la différence entre les deux déflexions précédentes ;
- la déflexion ponctuelle ( $dp$ ) : c'est la valeur mesurée en un point ;

- la déflexion moyenne ( $dm$ ) : c'est la moyenne arithmétique des mesures réalisées ( $dm$ ) en des points régulièrement repartis sur une section unitaire d'une certaine longueur) ;
- la déflexion caractéristique ( $dc$ ) sur une section de formule  $dc = dm + 1,3\sigma$  où  $dm$  est la Valeur moyenne de déflexions sur la section considérée.

#### II.4.2.4.2. Essais au pénétromètre dynamique

Conformément à la norme française NF P94–114 (1990), l'essai de pénétration dynamique consiste, tel que le montrent la figure 29, à laisser tomber d'une hauteur de 50 cm, un mouton de 10 kg sur l'enclume et à compter le nombre de coups pour un enfoncement de 20 cm d'une tige graduée et munie d'une pointe, soit de 5 ou 10 cm<sup>2</sup>. Cette méthode est une détermination in situ de la résistance des sols et des roches tendres à la pénétration dynamique d'un cône. Il est à noter que les essais de pénétration mal réalisés peuvent entraîner la ruine d'un ouvrage et par conséquent la dégradation de la chaussée (Fig. 30)

Ainsi, la résistance est déterminée par la formule des Hollandais ci-après:

$$RPD = \frac{m^2 \times h}{A \times e (M + P)} \text{ où :}$$

$$Q_{adm} = \frac{RDP}{20}$$

$RPD$  : Résistance à la Pointe (bar)  
 $h$  : Hauteur de chute du mouton (cm)  
 $P$  : Poids unitaire de tige (kg)  
 $A$  : Section de la pointe (cm<sup>2</sup>)  
 $M$  : Masse du mouton (kg)  
 $m$  : Masse passive (kg)  
 $e$  : Enfoncement (cm)  
 $Q_{adm}$  : Contrainte admissible (bar)

#### II.5. TRAITEMENT DES DONNEES

Le traitement des données a nécessité de calculs effectués à l'aide d'une calculatrice de poche du type Porpo YH-105 pouvant fonctionner en mode normal (opération arithmétique et fonctions mathématiques courantes) ainsi qu'à l'ordinateur Pentium IV de marque TEG muni du logiciel Excel version 2003, 2007 et d'autres logiciels permettant d'exploiter les données.

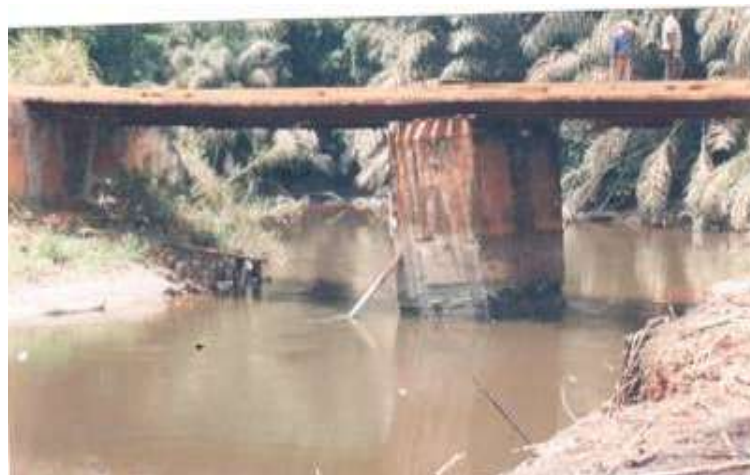
Ces données sont celles de sondages pénétrométriques, de formulation de béton bitumineux, d'analyse d'identification des matériaux d'altération et celles des paramètres normatifs altérologiques etc.



**Figure 28** : Poutre de Benkelman



**Figure 29** : Sondage au pénétromètre dynamique au PK 19+900 du tronçon Ampel – Lomié au niveau de la rivière Dja (village Djaposter)



**Figure 30** : Inclinaison d'une pile pour faute de capacité portante du sol suffisante au PK 19+900 du tronçon Ampel – Lomié au niveau de la rivière Dja (village Djaposter)

## **CONCLUSION SUR LES SECTEURS D'ETUDE ET SUR LES MATERIELS ET METHODES D'ETUDE**

Les secteurs d'étude sélectionnés sont localisés dans tous les départements pour la Région de l'Est à savoir :

- département du Haut-Nyong (avec Chef-Lieu : Abong-Mbang) ;
- département du Lom et Djerem (avec Chef-Lieu : Bertoua) ;
- département de la Kadeï (avec Chef-Lieu : Batouri) ;
- département de la Boumba et Ngoko (avec Chef-lieu : Yokadouma).

Et dans la Région du Sud, les secteurs d'étude sont localisés dans deux départements à savoir :

- département de la Mvila (Chef lieu : Ebolowa) ;
- département de la Vallée de Ntem (Chef lieu : Ambam).

Le choix de ces secteurs est dû au fait que lors de nos travaux de recherche, il y avait les travaux d'entretien et de construction des routes dans ces secteurs, ce qui nous ont permis non seulement de faire certaines analyses des matériaux dans les laboratoires des entreprises mais aussi de suivre leur comportement pendant et après la mise en œuvre sur le terrain.

Les matériels et méthodes utilisés permettent, pour les roches et matériaux nodulaires de l'horizon médian étudiés, de calculer le bilan d'altération et de procéder à une restructuration normative altérologique. Ils permettent également de déterminer leurs caractéristiques géotechniques à partir desquelles, on peut décider si les granulats issus de concassage des roches et les sols latéritiques nodulaires peuvent être utilisés en construction routière.

Pour la plate-forme, les matériels et méthodes permettent de déterminer la portance du sol afin de décider si les matériaux sont à substituer ou pas d'une part et d'autre part déterminer sa compacité et sa déformabilité.

Pour les couches de chaussée, les matériels et méthodes permettent de déterminer leur compacité et déformabilité.

Pour la couche de roulement en béton bitumineux (BB), ils permettent de déterminer la déformabilité et la formulation de béton bitumineux afin de déterminer les caractéristiques mécaniques (Essais Duriez et Marshall) qui servent de référence pour déterminer la compacité de l'enrobé in situ.

Pour les ouvrages d'art, ils permettent d'étudier la formulation du béton adéquat ainsi que la capacité portante du sol des fondations de ces ouvrages.



## **CHAPITRE III. RESULTATS**

## **INTRODUCTION**

Les différents résultats portent sur les études pétrologiques (pétrographie, minéralogie et chimie) des roches du socle et des matériaux nodulaires de l'Est et du Sud Cameroun, sur la caractérisation normative altérologique de certains matériaux utilisés dans l'entretien et dans la construction des routes de la zone d'étude, sur l'étude géotechnique de tous ces matériaux, et enfin sur les caractères géotechniques et caractères géochimiques.

### **III.1. RESULTATS D'ANALYSES PETROLOGIQUES DES ROCHES ET DES SOLS LATERITIQUES NODULAIRES DUN PROFIL D'ALTERATION**

#### **III.1.1. PETROLOGIE DES ROCHES ET DES SOLS LATERITIQUES NODULAIRES DES PROFILS D'ALTERATION DE LA REGION DE L'EST**

Dans la Région de l'Est, l'étude pétrologique des roches du socle a concerné, les granites de Bertoua, les migmatites de Batouri, de Ngoura et de Gari-Gombo, et aussi les gneiss de Nguélémdouka et de Bent.

##### **III.1.1.1. Pétrographie**

###### **III.1.1.1.1. Pétrographie des roches de Bertoua**

Au microscope (Fig. 31), les granites de Bertoua présentent une texture grenue porphyroïde. Ils sont constitués de quartz, de plagioclase, d'orthose et de biotite parfois en inclusion dans le quartz.

Le quartz (20 – 35 %) est interstitiel et rarement en association avec les feldspaths. Il est xénomorphe et rarement automorphe. Ce minéral est parfois polycristallin et apparaît parfois en inclusions dans les feldspaths. Sa taille est variable, elle est souvent en phénocristaux. Le contact entre les cristaux de feldspaths est généralement irrégulier.

Les plagioclases (25 – 30 %) sont abondants et leurs tailles sont très variables. Ils constituent généralement des phénocristaux plurimillimétriques avec des inclusions de quartz. Leur macles est le plus souvent en biseau ou kinkée.

L'orthose (3 – 5 %) est parfois sigmoïde. Les phénocristaux d'orthose montrent de fines bandelettes frustres d'exsolution.

La biotite (5 -10 %) forme des paillettes de dimensions variables (infra-millimétrique à millimétrique). Ces paillettes de biotite sont, soit agglutinées, soit parsemées. Elles semblent souligner par endroit la fluidalité. La Myrmékite est rare. Ces roches sont des granites.

Cette composition minéralogique est comparable à celle des granites de Kandara au Sud de Bertoua (Kamgang, 1998), hormis l'amphibole qu'on trouve dans les granites de Kandara.

### **III.1.1.1.2. Pétrographie des migmatites de Batouri, de Ngoura et de Gari-Gombo**

Sur le plan microscopique, les migmatites de Batouri (Fig. 32), présentent une texture granolépidoblastique. La composition minéralogique des lits clairs comprend le quartz, le plagioclase et l'orthose. Dans les lits sombres, on observe la biotite et la muscovite.

Les cristaux de quartz (20 – 35 %) parfois en inclusions dans les feldspaths (20 - 30 %) sont par moment allongés soulignant la schistosité. Les grains de quartz et des feldspaths sont souvent engrenés les uns dans les autres. On note l'association des paillettes de biotites-muscovite, soit de biotite-sillimanite soulignant généralement la schistosité.

L'orthose (5 – 20 %) dans la roche et la biotite (3 – 10 %), sont en inclusions dans les feldspaths.

La myrmékite (< 1 %) est rare dans la roche. Certains plagioclases (5 – 25 %) sont en inclusions dans le microcline (3 -5 %). La microstructure de la roche est granoblastique hétérogranulaire.

Les migmatites de Ngoura (Fig. 33) présentent une texture granoblastique plus ou moins orientée. Leur composition minéralogique comprend, le quartz (20 -25 %), les plagioclases (20 – 30 %), l'orthose (5 – 10 %) et le microcline (20 – 25 %) dans les lits clairs. Dans les lits sombres, la biotite représente 10 à 15 %. La myrmékite représente est rare. La microstructure de la roche est granoblastique hétérogranulaire.

Les migmatites de Gari Gombo (Fig. 34) présentent une microstructure granoblastique hétérogranulaire plus ou moins orientée. Les processus d'altération communs aux différents feldspaths est la damouritisation ou séricitisation. Elles sont constituées de quartz (20 -25 %), de plagioclase (20 - 25 %), de biotite (15 – 20 %), d'orthose (10 -15 %) parfois en inclusions dans le quartz et de microcline (25 – 35 %) parfois perthétique, le plus souvent à inclusions dans le quartz et la muscovite broyée. Le grenat qui est rare, est parfois en inclusion dans la biotite et la myrmékite (< 1 %). Cette roche est une migmatite.

### **III.1.1.1.3. Pétrographie des gneiss de Nguélémdouka et de Bent**

Les gneiss de Nguélémdouka et de Bent sont des roches gris clair, à grains fins à moyens. Leur structure est foliée, montrant l'alternance millimétrique des lits quartzo-feldspathiques et des ferromagnésiens.

Au microscope (Fig. 35), les roches de Nguélémdouka présentent une microstructure granolépidoblastique.

Le quartz (25 – 30 %) est le plus souvent allongé ou étiré, engrainé au contact intergranulaire avec les autres grains de quartz et les feldspaths. Ses dimensions sont variables. Ce minéral est parfois en inclusions dans le grenat.

On observe une association de paillettes parfois déchiquetées de biotite (10 – 15 %), de sillimanite (2 – 3 %) et de muscovite (10 – 15 %) avec une nette dominance de la biotite et de la muscovite. Ces minéraux sont orientés soulignant ainsi la schistosité.

Le grenat (5 – 10 %) se présente généralement en forme de larges plages avec de nombreux grains de quartz en inclusion. Il montre parfois un état d'altération plus ou moins avancée.

L'orthose (10 – 15 %) et le plagioclase (5 – 7 %) qui représentent les feldspaths sont aussi allongés. La macle de plagioclase est la plus souvent kinkée.

Le pyroxène et les oxydes représentent respectivement 1 – 2 % et 2 – 3 % de la roche. La microstructure de la roche est granolépidoblastique.

Les roches de Bent présentent une texture granolepidoplastique (Fig. 36).

Le quartz (25 – 30 %) présente de dimension variable (inframillimétrique à plurimillimétrique). Leur limite intergranulaire est généralement irrégulière. Le quartz apparaît souvent en inclusion dans les feldspaths.

Les feldspaths sont représentés par l'orthose (5 – 10 %), le plagioclase (5 – 10 %) et le microcline (20 – 25 %).

Le plagioclase et le microcline montrent le plus souvent des macles en biseau et contiennent souvent du quartz en inclusions. Leurs dimensions sont aussi variables mais rarement en phénocristaux. Le processus d'altération de plagioclase est la damouritisation

La biotite (20 – 25 %) se présente, soit en fines aiguilles, soit en paillettes. Elle présente par endroit une direction préférentielle soulignant la schistosité. Elle s'altère en chlorite et en oxydes.

La myrmékite (< 1 %), la muscovite (< 1 %) et le zircon (< 1 %) sont rares dans la roche dont sa texture est granoblastique hétérogranulaire.

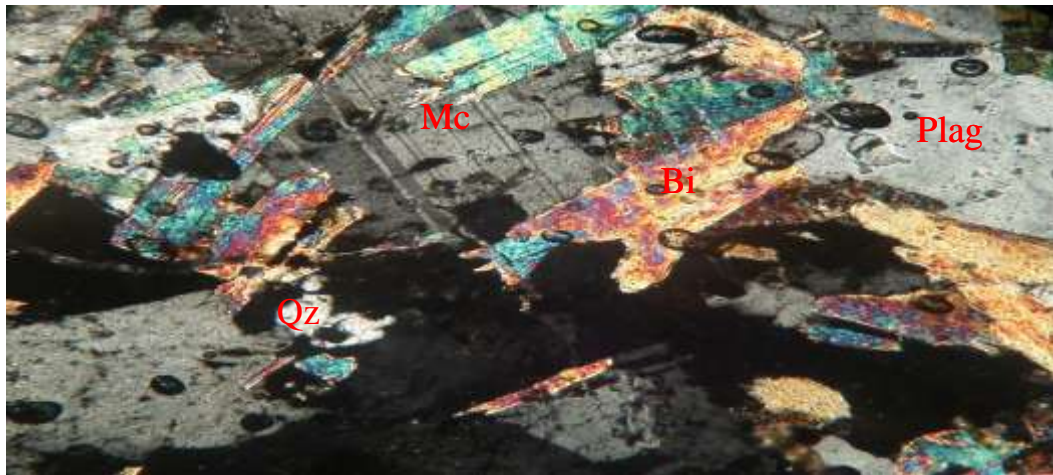
### **III.1.1.2. Minéralogie**

L'examen des diffractogrammes aux rayons X (Figure 37 et 38) montre respectivement que les granites de Bertoua sont constitués de biotite, de quartz, de plagioclase et d'amphibole. Cette composition minéralogique est la même que celle obtenue dans les granites de Kandara au Sud de Bertoua (Kamgang, 1998), hormis la muscovite que l'on trouve dans les granites de Bertoua.



1 mm

**Figure 31 :** Une vue de l'organisation microscopique de granite de Bertoua en LPA, Qz : Quartz, Plag : Plagioclases, Bi : Biotite, Mic : Microcline



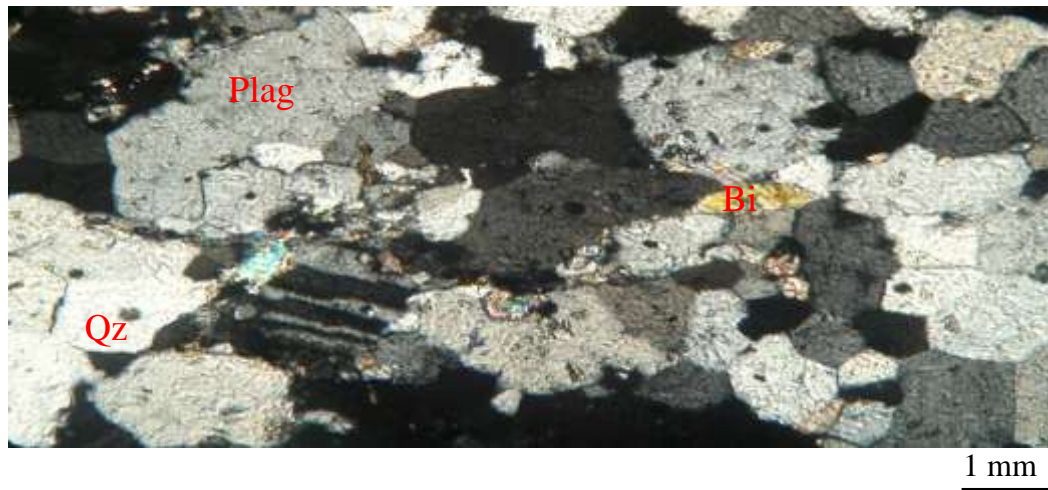
1 mm

**Figure 32 :** Une vue de l'organisation microscopique de migmatite de Batouri en LPA, Qz : Quartz, Plag : Plagioclases, Bi : Biotite, Mc : Microcline

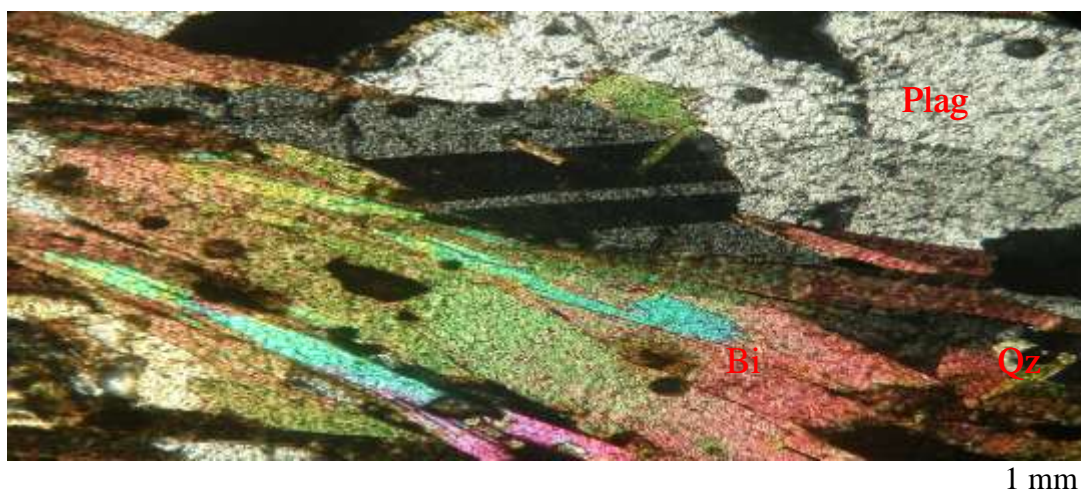


1 mm

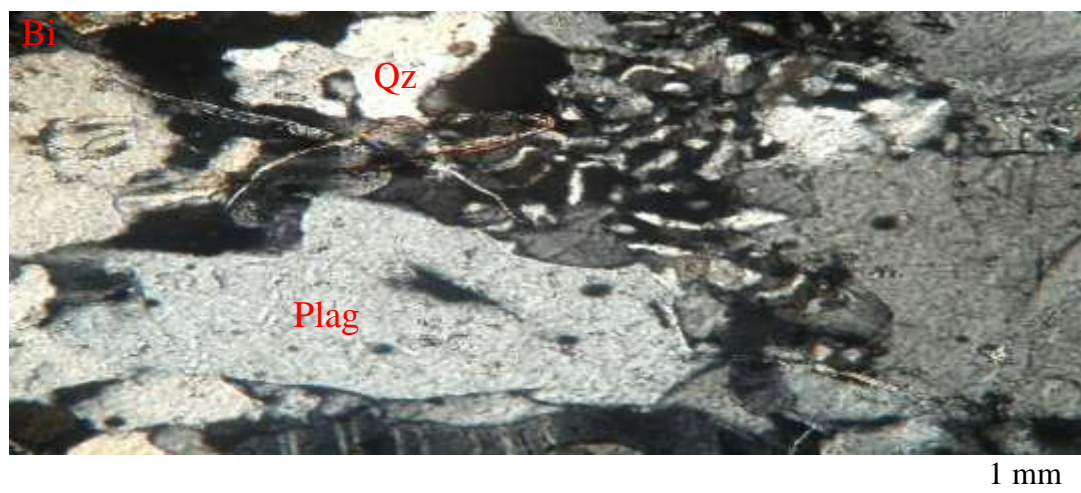
**Figure 33 :** Une vue de l'organisation microscopique de migmatite de Ngoura en LPA, Qz : Quartz, Plag : Plagioclases, Bi : Biotite



**Figure 34** : Une vue de l'organisation microscopique de migmatite de Gari-Gombo en LPA, Qz : Quartz, Plag : Plagioclases, Bi : Biotite



**Figure 35** : Une vue de l'organisation microscopique des gneiss de Nguélémeudouka en LPA, Qz : Quartz, Plag : Plagioclases, Bi : Biotite



**Figure 36** : Une vue de l'organisation microscopique des gneiss de Bent à Doumé en LPA, Qz : Quartz, Plag : Plagioclases, Bi : Biot

Les migmatites de Batouri sont constituées de muscovite, de biotite, de plagioclase, de quartz, de pyroxène et d'amphibole. Les migmatites de Ngoura sont constituées de muscovite, de biotite, de quartz et de pyroxène. Celles de Gari Gombo sont constituées de muscovite, de biotite, de plagioclase, de quartz et de pyroxène.

Les gneiss de Nguélémondouka sont constitués de muscovite, de biotite, de quartz et de pyroxène. Les gneiss de Bent sont constitués de muscovite, de biotite, de feldspaths, de quartz et d'amphibole. Cette étude minéralogique aux rayons X confirme les observations microscopiques.

### **III.1.1.3.Géochimie**

Les résultats d'analyse des éléments majeurs et en traces des échantillons étudiés sont récapitulés dans le tableau 19.

### **III.1.1.4.Comparaison et discussion des résultats**

L'étude géochimique des granites de Bertoua, des migmatites de Batouri, de Ngoura et de Gari-Gombo, de gneiss de Nguélémondouka et ceux de Bent montre que la silice et l'alumine constituent plus de 75 % en poids d'oxydes, d'une part, et que le baryum, le strontium, le zirconium et le rubidium sont les éléments en traces dont les teneurs sont plus élevées, d'autre part.

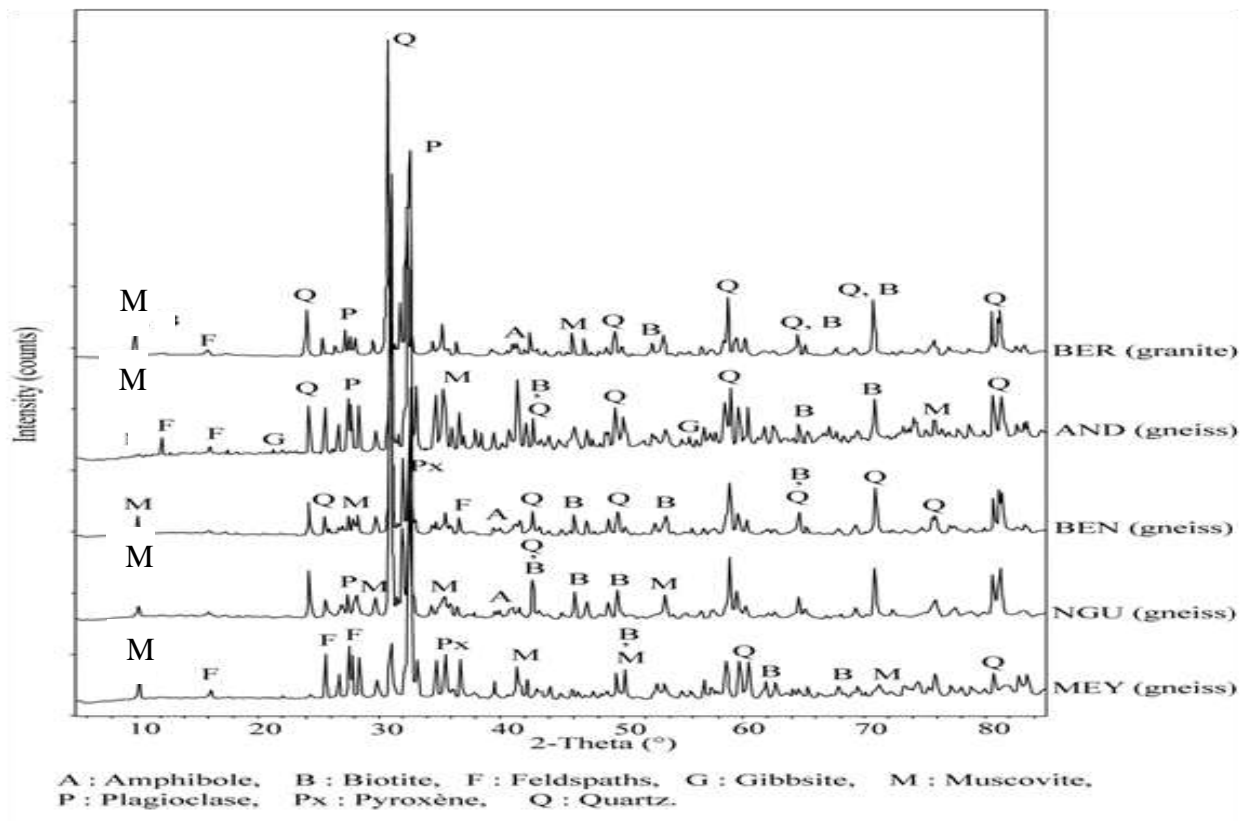
En comparaison avec les granites de Kandara au Sud de Bertoua (Kamgang, 1998), on constate que les granites de Bertoua sont riches en  $\text{SiO}_2$  et en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et pauvres en éléments majeurs restant par rapport aux granites de Kandara.

La composition chimique des granites de Bertoua est comparable à celle de granites d'Ebolowa (Tchameni, 1997). Ils sont riches en alcalins ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7,6 \%$ ) et pauvres en éléments ferromagnésiens ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2 < 3 \%$ ). Le rapport de  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  est proche de 1. Il faut noter que les valeurs proches de 1 sont connues dans les granites post - à - tardi-archéens (Tchameni, 1997).

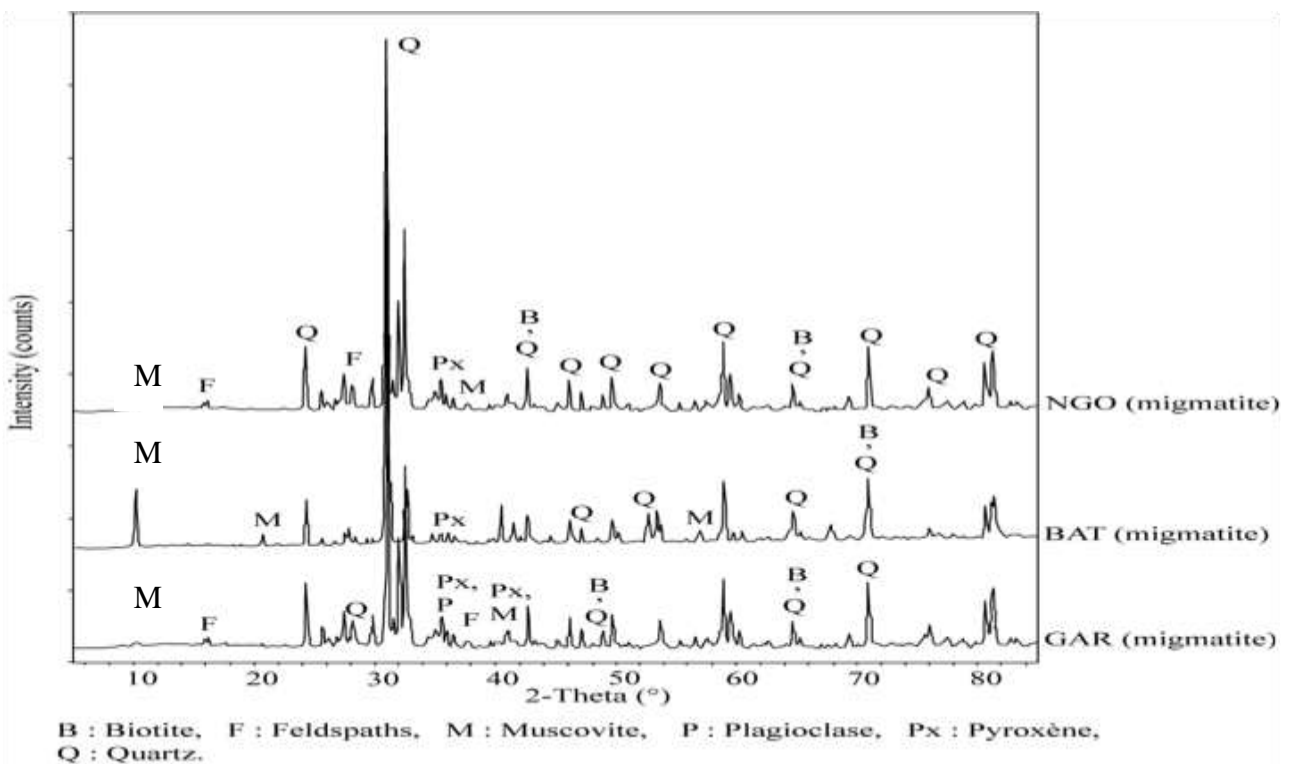
Les gneiss de Bent et ceux de Nguélémondouka ont une composition chimique proche surtout en éléments majeurs. En éléments en traces, les gneiss de Bent sont caractérisés par un enrichissement en V, Co, Ni, Cu, Sr, Ba et un appauvrissement en Zn, Ga, Rb, Y, Zr, Nb, Th et en U.

Les teneurs en  $\text{SiO}_2$  dans les gneiss de Bent et ceux de Nguélémondouka sont respectivement 71,04 et 74,34%. Ces valeurs de  $\text{SiO}_2$  sont plus élevées par rapport aux valeurs de  $\text{SiO}_2$  trouvés dans les gneiss de Yaoundé (Ekodeck et Kamgang, 2002).

- Les roches de Bent et de Nguélémondouka sont pauvres en éléments ferromagnésiens ( $1 \% < \text{Fe}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2 < 2 \%$ ) et en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , par rapport aux gneiss de Yaoundé (Ekodeck et Kamgang, 2002). Ils sont caractérisés par une richesse en  $\text{K}_2\text{O}$  (4,30 à 5,22 %).



**Figure 37.** Diffractogrammes des granites de Bertoua (BER), des gneiss d'Andom (AND), de Bent (BEN), de Nguélémdouka (NGU), et de Meyo-Nyaka (MEY).



**Figure 38.** Diffractogrammes des migmatites de Ngoura (NGO), de Batouri (BAT) et de Gari-Gombo (GAR).



**Tableau 19.** Résultats d'analyses chimiques des éléments majeurs (%) et éléments en trace (pmm) des formations du Sud Cameroun

Nature de roche	Gneiss	Gneiss	Granite	Migmatite	Migmatite	Migmatite	Gneiss	Gneiss
Localisation	Bent	Nguéléme endouka	Bertoua	Batouri	Ngoura	Gari Gombo	Andom	Meyo Nyaka
<b>Eléments majeurs (%)</b>								
Code	BEN	NGU	BER	BAT	NGO	GAR	AND	MEY
SiO <sub>2</sub>	71,04	74,34	71,54	67,34	73,23	84,38	60,27	58,27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,21	13,65	14,86	13,87	13,56	7,85	15,57	21,94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,68	0,67	0,84	1,66	1,04	0,58	3,17	1,66
FeO	1,23	0,91	1,39	5,93	0,39	0,65	5,21	1,94
MgO	0,66	0,30	0,86	2,60	0,32	0,29	2,38	1,57
MnO	0,04	0,03	0,05	0,15	0,05	0,04	0,18	0,03
CaO	2,21	0,99	2,35	2,14	0,82	0,82	6,16	5,16
Na <sub>2</sub> O	3,90	3,64	4,08	2,07	3,68	2,08	4,83	6,55
K <sub>2</sub> O	4,30	5,22	3,60	2,28	5,57	2,87	1,13	2,02
TiO <sub>2</sub>	0,23	0,20	0,30	0,88	0,18	0,17	0,93	0,47
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,09	0,13	0,20	0,06	0,04	0,17	0,19
LOI	0,68	0,78	0,49	1,30	0,75	1,25	0,19	0,71
<b>TOTAL</b>	<b>100,26</b>	<b>100,82</b>	<b>100,49</b>	<b>100,42</b>	<b>99,66</b>	<b>101,02</b>	<b>100,19</b>	<b>100,51</b>
<b>Eléments traces (ppm)</b>								
Sc	5,1	6,3	5,4	18,9	3,1	3,4	20,6	4,9
V	26	< 10	29	136	12	10	142	52
Cr	< 24	< 24	< 24	99	< 24	< 24	< 24	30
Co	4,10	1,80	4,60	21,50	1,80	1,80	23,20	13,70
Ni	16	8	17	58	21	8	21	25
Cu	8	3	5	43	2	10	57	32
Zn	34	43	41	92	34	22	110	53
Ga	16,47	17,99	17,30	16,88	16,04	10,15	20,37	23,23
Rb	104,30	143,10	93,40	69,70	199,30	137,80	12,60	50,60
Sr	350	163	337	113	115	52	242	1144
Y	7,79	23,49	9,89	28,57	18,46	44,84	53,60	6,49
Ti	1473	5338	1747	1192	1222	1095	5201	2932
Zr	138	188	117	201	126	122	190	136
Nb	5,81	8,96	8,59	16,07	9,01	20,55	15,82	4,31
Ba	1435,70	791,60	1168,60	344,50	654,90	191,70	225,80	1857,70
Pb	29,40	32,50	24,00	16,00	29,50	400	8,60	14,30
Th	7,18	22,87	7,23	9,52	10,04	44,89	1,47	0,58
U	0,17	0,97	1,10	2,04	1,93	7,93	0,87	0,47

Ces formations sont riches également en Pb (29,4 à 32,5 ppm) avec une valeur moyenne de 31 ppm. Ils ont respectivement une teneur en Th de 7,18 et de 22,87 ppm supérieure à la valeur moyenne de la croûte (5,7 ppm).

Les migmatites de Batouri, de Ngoura et de Garo-Gombo ont une composition chimique proche. Toutefois, quelques différences sont à relever:

- les migmatites de Gari-Gombo sont caractérisées par un enrichissement en SiO<sub>2</sub>, Pb, Th et en U, et un appauvrissement en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni, Zn, Sr, et Ba par rapport aux migmatites de Batouri et de Ngoura,

- les migmatites de Batouri sont caractérisées par un enrichissement en MgO, FeO, H<sub>2</sub>O, V, Cr, Co, Ni, Cu et Zn, et un appauvrissement en SiO<sub>2</sub> par rapport aux migmatites de Ngoura et de Gari-Gombo. Toutes ces migmatites sont caractérisées par un enrichissement en SiO<sub>2</sub> et un appauvrissement en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en Na<sub>2</sub>O et CaO par rapport aux migmatites de Yaoundé (Ekodeck et Kamgang, 2002).

### **III.1.2. PETROLOGIE DES FORMATIONS DU SOCLE DE LA REGION DU SUD**

Dans la Région du Sud, l'étude pétrologique concerne les carrières d'Andom et de Meyo-Nyaka.

#### **III.1.2.1. Pétrographie des roches d'Andom et de Meyo-Nyaka**

Les formations d'Andom et de Meyo-Nyaka sont des roches gris-clair, à grains fins à moyens. Leur foliation est marquée par une alternance millimétrique des lits clairs quartziques ou quartzo-feldspathiques et des lits sombres essentiellement ferromagnésiens.

Au microscope, les roches d'Andom présentent une microstructure granoblastique hétérogranulaire (Fig. 39). Les lits clairs sont constitués essentiellement de feldspaths et de quartz et les lits sombres sont constitués essentiellement d'amphibole et de pyroxène, de biotite, de muscovite, de grenat, de disthène et de minéraux opaques.

Les feldspaths montrent en général une extinction onduleuse liée à la déformation. Les processus d'altération communs aux différents feldspaths sont la vacuolisation et la damouritisation. Les feldspaths sont représentés par l'orthose (15 – 20 %), les plagioclases (10 – 15 %) souvent à inclusions de quartz.

Les plagioclases forment de cristaux de tailles et de formes plus ou moins variables, subautomorphes à automorphes. Leur macle polysynthétique est parfois kinkée et en biseau, liée à la déformation.

L'orthose est parfois très difficile à mettre en évidence car sa macle simple caractéristique est presque invisible. Les cristaux d'orthose sont xénomorphes, subautomorphes à automorphes et montrent parfois des inclusions de quartz et des microfissures.

Le microcline présente aussi de formes variables, subautomorphes à automorphes, des inclusions de quartz et une macle kinkée.

Le quartz (15 – 25 %), de tailles et des formes variables (xénomorphes à automorphes) est en inclusions dans tous les autres minéraux. Il montre généralement une extinction onduleuse.

La disposition de grains de quartz et avec d'autres minéraux tels que l'orthose, les plagioclases et le microcline met en évidence deux types de contacts intergranulaires ; un contact franc mettant en évidence la forme automorphe des minéraux et un contact irrégulier indenté.

L'amphibole et le pyroxène sont souvent poeciloblastiques (quartz et oxyde) et se transforment le plus souvent en oxydes.

Le pyroxène est varié (diopside, augite) (20 – 25 %) et se présente en cristaux automorphes. Ils sont rarement maclés, le plus souvent craquelés. Leur forme est généralement automorphe à subautomorphe.

La hornblende brune, parfois en inclusion dans le quartz (10 – 15 %) est automorphe.

Les oxydes ( $\leq 1$  %) sont rares dans la roche ainsi que l'apatite ( $\leq 1$  %) souvent en inclusion dans le quartz.

Au total, les roches de la région d'Andom sont des gneiss à amphibole et pyroxène. Elles font partie des gneiss de la série rubanée de l'unité du Ntem dans le groupe du Ntem (Tchameni, 1997). Quant aux roches de Meyo-Nyaka, leur microstructure est granoblastique hétérogranulaire (Fig. 36). Les feldspaths sont généralement affectés par la vacuolisation, la damouritisation ou la séricitisation, et sont représentés par l'orthose et le plagioclase.

Les plagioclases ont une macle polysynthétique le plus souvent frustrée, parfois kinkée. Leur contact intergranulaire avec les autres minéraux tel que l'orthose (10 – 15 %) est irrégulier.

Le quartz (10 – 20 %) est très peu abondant, il est le plus souvent xénomorphe et interstitiel.

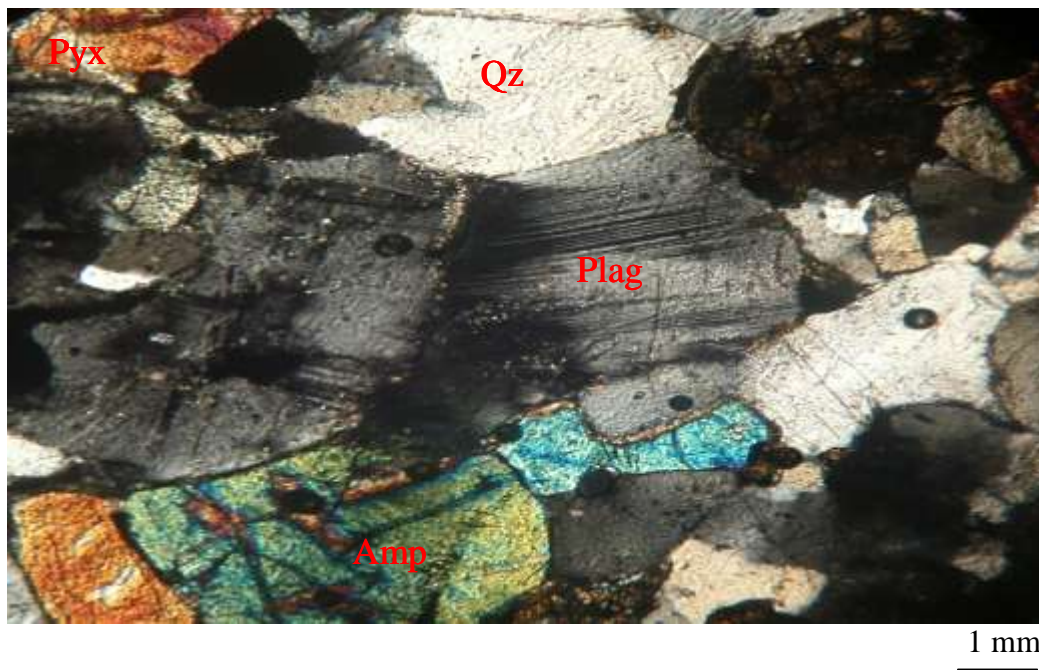
La biotite (2 – 25 %) se transforme généralement en oxydes ou en chlorite. Elle constitue des paillettes agglutinées ou parsemées. Le clivage est parfois déchiqueté ou kinké.

Le disthène (2 – 5 %) se présente généralement en petits grains agglutinés.

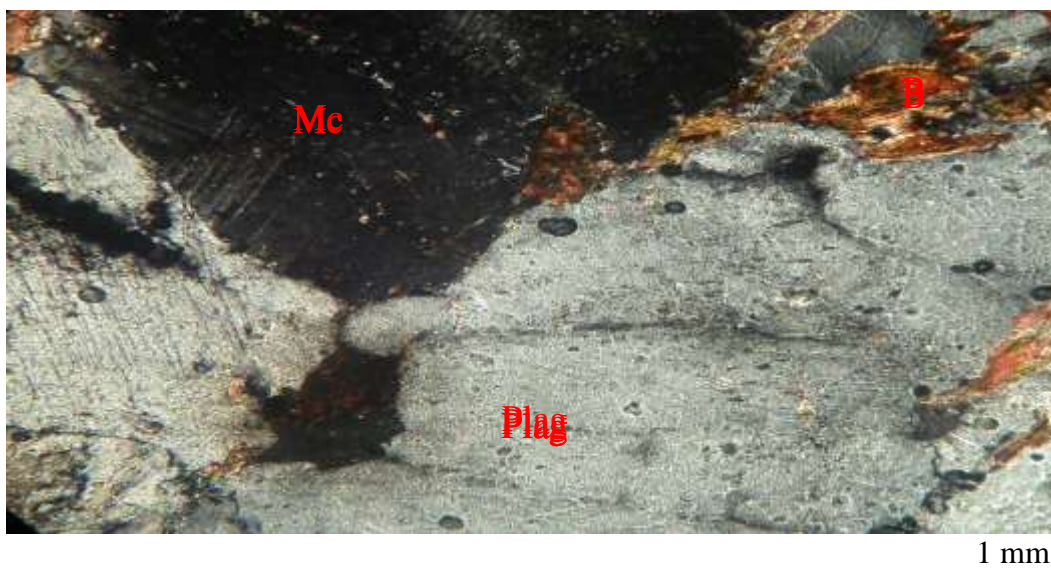
L'amphibole calcique (Trémolite) ( $< 1$  %) montre rarement des inclusions de quartz et des craquelures. Ces cristaux sont généralement automorphes.

Le zircon ( $< 1$  %) en inclusions dans le disthène, l'apatite ( $< 1$  %) en inclusions dans le quartz et la hornblende brune ( $< 1$  %) sont accessoires..

L'épidote (2 – 5 %) et la cordiérite (3 – 5 %) ainsi que les oxydes sont également présents dans la roche. Le microcline (3 – 5 %) est généralement en cours d'altération.



**Figure 39** : Une vue de l'organisation microscopique des gneiss d'Andom en LPA, Qz : Quartz, Plag : Plagioclases, Amp : Amphibole, Pyx : Pyroxène



**Figure 40** : Une vue de l'organisation microscopique des gneiss de Meyo-Nyaka en LPA, Plag : Plagioclases, Bi : Biotite, Mc : Microcline

Ces formations de Meyo-Nyaka sont des orthogneiss à biotite et font partie des orthogneiss rubanée de l'unité du Ntem dans le groupe du Ntem (Tchameni, 1997).

### **III.1.2.2. Minéralogie des roches d'Andom et de Meyo-Nyaka**

L'examen des diffractogrammes aux rayons X (Fig. 37) des gneiss d'Andom montre qu'ils sont constitués de muscovite, de biotite, de feldspaths, de quartz, de plagioclase et d'amphibole.

Les gneiss de Meyo-Nyaka (Fig. 40) sont constitués de muscovite, de biotite, de feldspath, de quartz et de pyroxène. Cette étude minéralogique confirme les observations microscopiques.

### **III.1.2.3. Géochimie des roches d'Andom et de Meyo-Nyaka**

Les résultats d'analyse des éléments majeurs et en traces sont récapitulés dans le tableau 19.

L'étude géochimique montre d'une part que la silice et l'alumine constituent plus de 75 % en poids d'oxydes, et d'autre part que le baryum, le strontium, le zirconium et le rubidium sont les éléments en traces dont les teneurs sont plus élevées d'autre part.

### **III.1.2.4. Comparaison et discussion des résultats**

L'analyse des résultats montre que les gneiss d'Andom présentent une composition pétrographique et minéralogique proche de celle de gneiss de Meyo-Nyaka. Leur composition chimique est aussi proche. Toutefois, certaines différences sont à relever. Les gneiss d'Andom sont riches en  $Fe_2O_3$ , Feo,  $H_2O$ , V, Zn, Y, Zr et en Nb et pauvres en Ba, Pb, Sr et en Rb par rapport aux gneiss de Meyo-Nyaka. La composition chimique des gneiss d'Andom et de Meyo-Nyaka est proche à celle des gneiss de Bent et de Nguélémondouka. Toutefois, quelques différences sont à relever.

- les gneiss de Bent et de Nguélémondouka sont caractérisés par un enrichissement en  $SiO_2$ ,  $K_2O$ , Rb, Pb et Th et un appauvrissement en V, Co, Ni et Cu par rapport aux gneiss d'Andom et de Meyo-Nyaka.

La composition chimique des gneiss d'Andom et de Meyo-Nyaka est comparable à celle des gneiss d'Ebolowa (Tchameni, 1997). Ces formations sont riches en éléments ferromagnésiens  $3,5 \% < Fe_2O_3 + MgO + MnO + TiO_2 < 7 \%$ ) et en  $Al_2O_3$  avec une moyenne de 18,75 % comme pour les gneiss de Yaoundé (Ekodeck et Kamgang, 2002). Elles sont également caractérisées par une richesse en  $K_2O$  (4,30 à 5,22 %). Les valeurs de  $SiO_2$  respectivement 60,27 et 58,27 % pour les gneiss d'Andom et de Meyo-Nyaka sont comparables à celles trouvées dans les gneiss de Yaoundé (Ekodeck et Kamgang, 2002). Les gneiss d'Andom et de Meyo-Nyaka ont une concentration de Th située entre (0,58 et 1,47 ppm). Cette tranche de valeur est caractéristique de plusieurs granulites archéennes du monde (Tchameni, 1977).

## **CONCLUSION SUR LA PETROLOGIE DES FORMATIONS ROCHEUSES DE L'EST ET DU SUD**

Les granites de Bertoua, les migmatites de Batouri, de Ngoura et de Gari-Gombo et les gneiss de Nguélémdouka sont des formations de couleur grise. Les gneiss d'Andom, de Meyo-Nyaka et de Bent sont des formations de couleur grise à verdâtre. Ces roches se composent en général de muscovite, de biotite, de quartz, de plagioclase, de feldspaths et parfois de pyroxène et d'amphibole.

L'étude géochimique montre que la silice et l'alumine constituent plus de 75 % en poids d'oxydes, d'une part, et que le baryum, le zirconium, le strontium et le rubidium sont les éléments en traces dont les teneurs sont les plus élevées d'autre part. Ces roches au contact des agents supergènes ont subi une intense altération qui a conduit à la formation d'un épais manteau d'altération.

### **III.1.1.5. Pétrologie des matériaux nodulaires des profils d'altération**

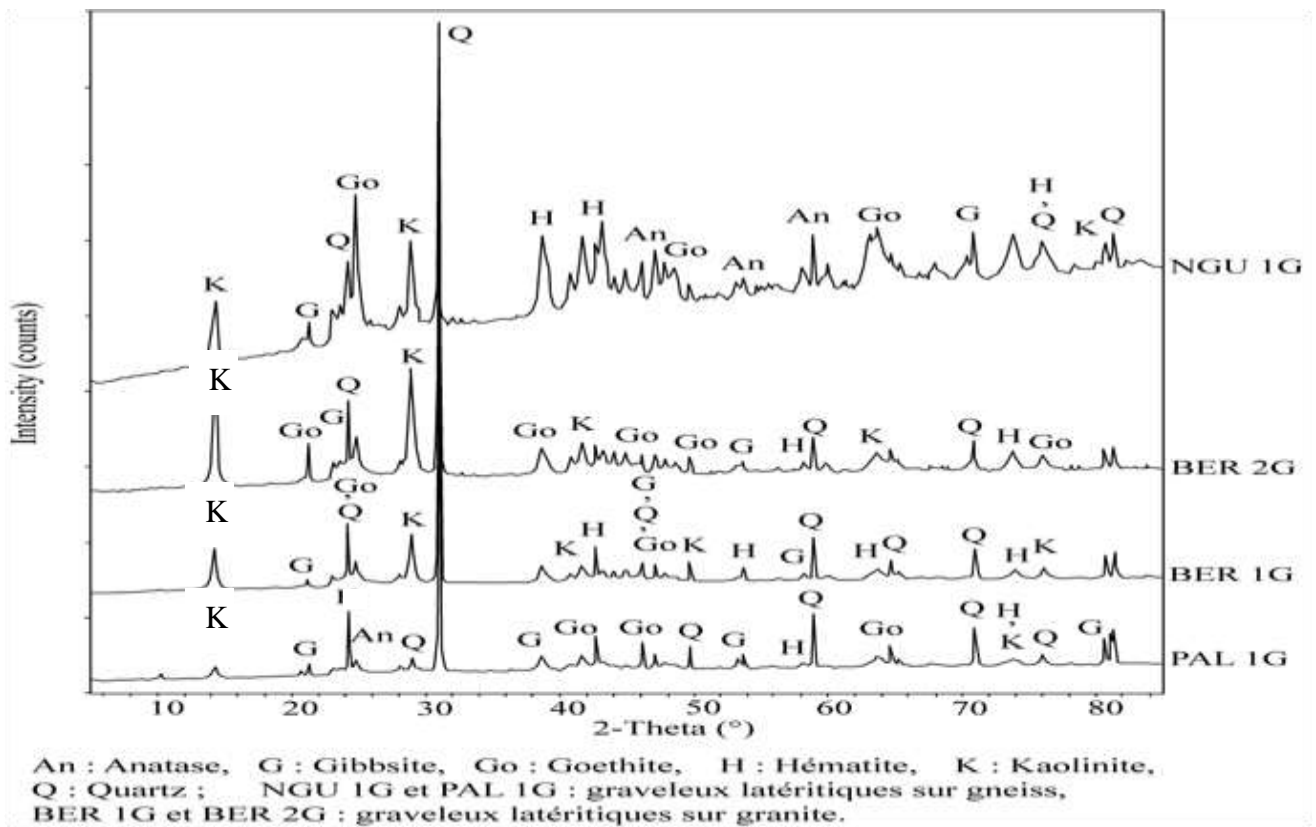
#### **III.1.1.5.1. Description mésoscopique**

*Le niveau* médian du profil d'altération se localise entre 0,30 et 2,50 m de profondeur en général et son épaisseur varie de 1,2 à 2,5 m. Dans certains sites des carrières des sols latéritiques, ce niveau repose soit sur la cuirasse fragmentée, soit sur le niveau argileux. Sa texture est nodulaire (contient beaucoup plus des nodules mélangé avec de l'argile) et sa densité apparente varie entre 1,45 et 1,56 pour une moyenne de 1,48. Sa couleur varie du rouge au jaune. Sa matrice argileuse contient divers éléments grossiers. Ces éléments sont :

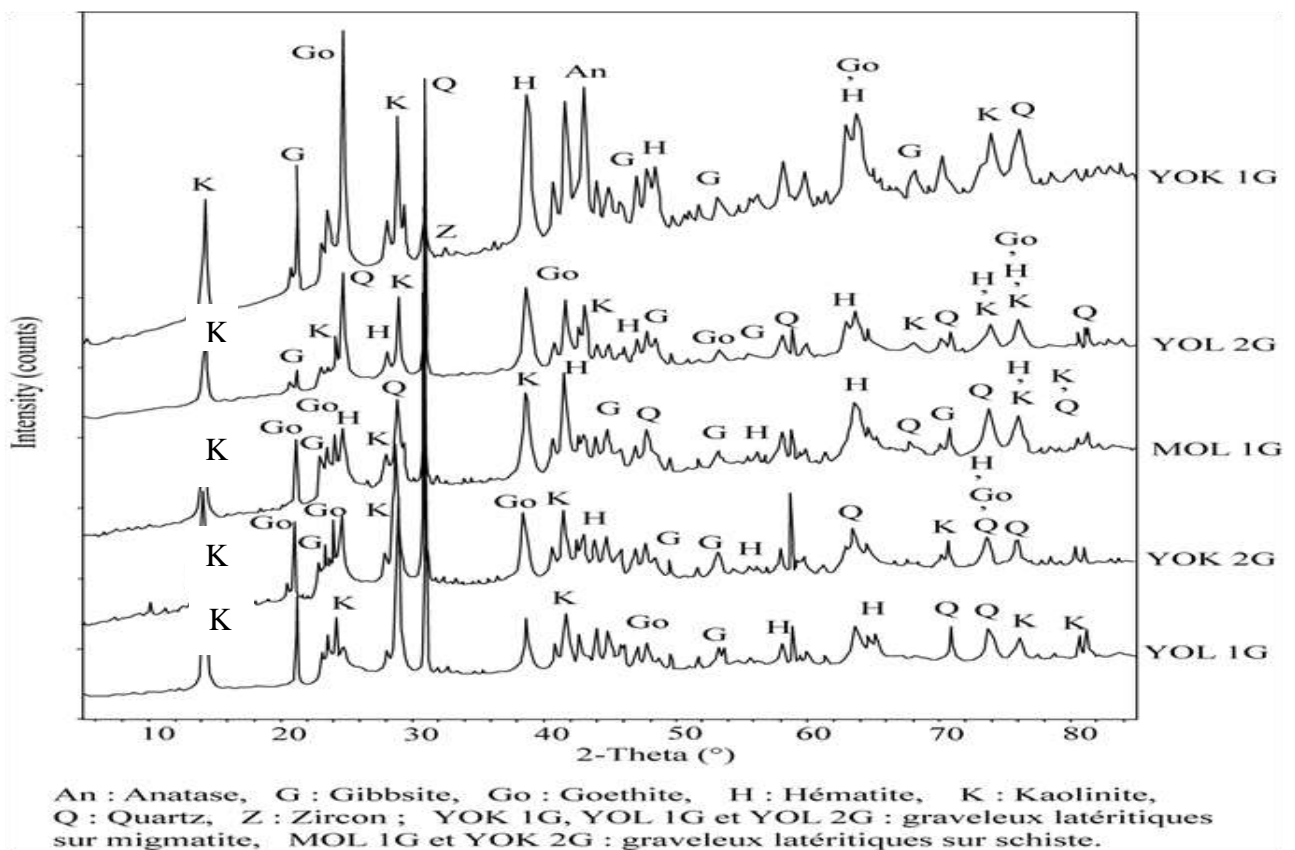
- les nodules ferrugineux millimétriques et subarrondis. Ces nodules représentent plus de 40 % du volume de ce niveau et constituent le faciès gravillonnaire fin.
- les nodules ferrugineux centimétriques à pluri-centimétriques (1– 4 cm) subarrondis représentent environ 20 % parfois un peu moins du volume des matériaux rencontrés.

#### **III.1.1.5.2. Compositions minéralogique et chimique**

L'examen des diffractogrammes aux rayons X (Fig. 41 et 42) montre respectivement que les matériaux de Yokadouma-Bangue (YOK 2G), Bertoua 1 (BER 1G), Bertoua 2 (BER 2G), Palisco-Ampel (PAL), Yokadouma-Mboy (YOK 1G), Bangue-Moloundou (MOL 1G), Nguélémdouka (NGU 1G), Yola 1 (YOL 1G) et Yola 2 (YOL 2G) se composent de quartz, de kaolinite, de muscovite, de goethite, d'hématite et de gibbsite. L'anatase apparaît dans les matériaux de Palisco-Ampel et de Yokadouma-Mboy.



**Figure 41.** Diffractogrammes des sols latéritiques nodulaires sur granites de Bertoua (BER 1G et BER 2G), sur gneiss de Nguélémdouka (NGU 1G) et de Palixo-Ampel (PAL 1G).



**Figure 42.** Diffractogrammes des sols latéritiques nodulaires sur migmatites de Yokadouma-Mboy (YOK 1G), de Ngoura-Yola (YOL 1G), de Yola-Yokadouma (YOL 2G) et sur schistes de Yokadouma-Bangué (YOK 2G) et Bangué-Moloundou (MOL 1G)

La composition chimique en éléments majeurs et en éléments en traces des matériaux du niveau médian gravillonnaire est récapitulée dans le tableau 20

L'analyse chimique montre que SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> représentent plus de 81 % en poids d'oxydes de ce niveau pour tous les matériaux étudiés. On observe un accroissement de fer ferrique par rapport à la silice et à l'alumine dans les matériaux de YOK 1G (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 43,24 % ; SiO<sub>2</sub>, 16,54 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 21,5 %), MOL 1G (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 31,56 % ; SiO<sub>2</sub>, 26,44 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 23,22 %), NGU 1G (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 35,8 % ; SiO<sub>2</sub>, 26,35 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 19,98 %) et de YOL 2G (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 44,18 % ; SiO<sub>2</sub>, 23,76 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 17,12 %). Dans les autres matériaux étudiés, on observe, un accroissement de la silice, de l'alumine et du fer ferrique. Il s'agit des matériaux de YOK 2G (SiO<sub>2</sub>, 30,6 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 25,85 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 25,33 %), de BER 1G (SiO<sub>2</sub>, 54,29 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 14,99 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 17,71 %), de BER 2G (SiO<sub>2</sub>, 45,29 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 19,55 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 21,1 %), de PAL 1G (SiO<sub>2</sub>, 38,34 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 22,71 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 22,81 %) et de YOL 1G (SiO<sub>2</sub>, 37,07 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 27,26 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 18,46 %).

MgO, K<sub>2</sub>O, FeO et TiO<sub>2</sub> présentent des valeurs inférieures à 3 % pour tous les matériaux étudiés. MnO, CaO, Na<sub>2</sub>O, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et NiO sont présents à l'état de traces. Pour les éléments en traces, tous les matériaux sont riches en vanadium, chrome, zirconium et baryum.

### **III.1.1.5.3. Bilan d'altération**

#### **III.1.1.5.3.1. Bilan géochimique**

Le bilan géochimique consiste à déterminer les gains et les pertes des éléments par rapport à un élément considéré comme immobile lors des différents processus de la pédogenèse.

De telles estimations supposent l'identification de l'élément le plus approprié, par une comparaison entre eux, des éléments susceptibles d'être retenus comme éléments invariants en milieu latéritique. Par la suite, les bilans isoéléments permettent d'estimer quantitativement les pertes et les gains d'éléments et par conséquent, de localiser spatialement leurs zones de départ et d'accumulation dans les profils afin, d'appréhender leur comportement géochimique.

Les éléments les plus utilisés comme éléments les moins mobiles sont le thorium, le titane et le zircon. Au cours de ce travail, le zircon est utilisé comme élément le moins mobile. Le bilan géochimique obtenu est récapitulé dans le tableau 21. Le facteur d'enrichissement ou de perte isozirconium est donné par la relation de type (Ekodeck et Kamgang, 2002) :

$$\% = 100 [(C - C^*)/C^*](K^*/K)$$

C = concentration de l'élément dans le niveau altéré

C\* = concentration de l'élément dans la roche saine,

K\* = concentration de zircon dans le niveau altéré.

K = concentration de zircon dans la roche mère



**Tableau 20 : Résultats d'analyses chimiques des éléments majeurs (%) et éléments en traces (ppm) des matériaux de l'horizon nodulaire du Sud Cameroun**

Nature de substratum	Granite	Granite	Gneiss	Gneiss	Schiste	Schiste	Schiste	Migmatite	Migmatite
CODE	BER 1G	BER 2G	PAL 1G	NGU 1G	YOK 1G	YOK 2G	MOL 1G	YOL 1G	YOL 2G
<b>Eléments majeurs (%)</b>									
SiO <sub>2</sub>	54,29	45,29	38,34	26,35	16,54	30,60	26,44	37,07	23,76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,99	19,55	22,71	19,98	21,50	25,85	23,22	27,26	17,12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,71	21,10	22,81	35,80	43,24	25,33	31,56	18,46	44,18
FeO	0,43	0,53	0,39	0,54	0,25	0,29	0,35	0,41	0,38
MgO	0,22	0,08	0,07	0,09	0,04	0,17	0,14	0,07	0,08
MnO	0,02	0,02	0,04	0,05	0,33	0,04	0,09	0,05	0,03
CaO	0,03	0,05	0,05	0,04	0,03	0,11	0,04	0,04	0,04
Na <sub>2</sub> O	0,09	0,03	0,04	0,07	0,07	0,07	0,06	0,04	0,09
K <sub>2</sub> O	0,60	0,18	0,16	0,08	0,02	0,24	0,17	0,14	0,16
TiO <sub>2</sub>	0,91	0,54	0,76	1,28	2,15	1,06	1,98	0,93	0,91
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09	0,13	0,16	0,24	0,20	0,17	0,15	0,12	0,25
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,07	0,07	0,09	0,09	0,05	0,08	0,02	0,09
NiO	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
LOI	9,46	11,46	13,23	14,02	14,24	15,05	14,39	14,40	12,10
<b>TOTAL</b>	<b>98,90</b>	<b>99,03</b>	<b>98,83</b>	<b>98,68</b>	<b>98,71</b>	<b>99,04</b>	<b>98,68</b>	<b>99,01</b>	<b>99,19</b>
<b>Eléments traces (ppm)</b>									
Sc	17,1	35,1	22,9	61,7	73,8	34,5	30,4	19,0	46,6
V	313	435	354	600	600	422	600	256	600
Cr	384	462	486	600	600	311	537	104	600
Co	5,50	11,50	4	8,70	17,20	9,90	12,20	5,50	4,40
Ni	18	29	27	61	41	42	58	17	24
Cu	28	24	30	132	134	58	174	13	83
Zn	36	59	30	76	48	57	50	42	48
Ga	35,87	43,77	27,71	35,44	43,58	30,81	35,1	37,33	43,39
Rb	15,70	10,50	46,10	6,20	1,90	9,40	10,60	3,80	8,5
Sr	16	25	21	12	14	4	6	18	27
Y	5,24	9,87	8,32	9,93	9,282	3,98	3,59	7,17	10,28
Ti	0,13	0,11	0,28	0,07	0,22	0,09	0,12	0,05	0,06
Zr	183	219	247	335	265	208	302	431	272
Nb	12,33	13,88	21,07	27,04	23,06	11,44	22,9	18,88	14,17
Ba	60	71,10	134,60	39,10	234,10	98	52,10	80	98,60
Pb	31,40	33,70	15,30	30,20	30,60	22	26,70	33,20	46
Th	25,13	25,08	27,90	37,99	15,20	8,84	10,38	31,17	44,67
U	3,71	5,91	2,79	4,01	2,53	2,83	2,96	3,77	6,33

**Tableau 21 : Bilan isozirocorium des éléments en traces du niveau médian gravillonnaire**

Partie du profil	Niveau roche mère	Niveau médian gravillonnaire	Niveau médian gravillonnaire	Niveau roche mère	Niveau médian gravillonnaire	Niveau roche mère	Niveau médian gravillonnaire	Niveau roche mère	Niveau médian gravillonnaire	Niveau roche mère	Niveau médian gravillonnaire
	Granite	Niveau médian nodulaire	Niveau médian nodulaire	Migmatite	Horizon médian nodulaire	Migmatite	Horizon médian nodulaire	Migmatite	Niveau médian nodulaire	Gneiss	Niveau médian nodulaire
Nom de l'échantillon	Berto ua	BER 1G	BER 2G	Batouri	YOL 1G	Ngoura	YOL 1G	Gari-Gombo	YOL 2G	Nguelém endouka	NGU 1G
Profondeur en (m)	0,0	1,50	1,70	0,00	1,80	0,00	1,80	0,00	1,65	0,00	1,35
Minéralogie	Q, M, B, P, A	G, Go, Q, He, K	G, Go, Q, He, K	Px, B, M, Q, F	K, Q, G, Go, He	M, B, F, Q, Px	K, Q, G, Go, He	M, B, F, Q, Px, P	K, Q, G, Go, He	M, B, F, Px, A	K, Q, G, Go, He
Si	0,00	- 37,71	- 68,69	0,00	-96,20	0,00	-168,88	0,00	-160,21	0,00	-115,04
Al	0,00	1,37	59,08	0,00	206,59	0,00	345,53	0,00	263,34	0,00	82,64
H	0,00	2863,26	4190,98	0,00	2156,46	0,00	6224,40	0,00	1935,64	0,00	3024,84
Mg	0,00	- 116,40	- 169,79	0,00	-208,24	0,00	-267,19	0,00	-161,48	0,00	-124,74
Mn	0,00	- 143,89	- 112,32	0,00	-142,67	0,00	0,00	0,00	-55,75	0,00	118,80
Ca	0,00	- 154,41	- 183,22	0,00	-210,00	0,00	-325,32	0,00	-212,12	0,00	-171,00
Na	0,00	- 152,96	- 185,82	0,00	-209,86	0,00	-338,28	0,00	-213,35	0,00	-174,77
K	0,00	- 130,34	- 177,84	0,00	-200,85	0,00	-333,40	0,00	-210,57	0,00	-175,46
Fe3+	0,00	3141,23	4515,09	0,00	2165,78	0,00	5727,50	0,00	16763,45	0,00	9343,53
Fe2+	0,00	- 108,02	- 115,82	0,00	-199,20	0,00	9,91	0,00	-92,63	0,00	-72,45
Ti	0,00	318,03	149,76	0,00	12,16	0,00	1425,00	0,00	970,71	0,00	962,28
P	0,00	- 48,13	0,00	0,00	-85,60	0,00	342,00	0,00	1170,75	0,00	297
Sc	0,00	338,89	1029,60	0,00	1,13	0,00	1754,12	0,00	7199,71	0,00	1567,80
V	0,00	1531,74	2620,80	0,00	188,82	0,00	6954,00	0,00	13157,00	0,00	10513,80
Cr	0,00	2346,16	3416,4	0,00	10,81	0,00	1140,00	0,00	5352,00	0,00	4276,80
CO	0,00	30,60	280,80	0,00	- 159,25	0,00	703,00	0,00	144,44	0,00	683,10
Ni	0,00	9,20	132,14	0,00	- 151,28	0,00	- 65,14	0,00	446,00	0,00	1180,57
Cu	0,00	71,95	71,14	0,00	- 167,44	0,00	1881,00	0,00	1627,90	0,00	7662,60
Zn	0,00	- 12,20	82,19	0,00	- 116,30	0,00	80,47	0,00	263,55	0,00	136,76
Ga	0,00	165,03	153,01	0,00	259,26	0,00	453,94	0,00	730,30	0,00	172,85
Rb	0,00	- 130,12	- 166,16	0,00	- 202,32	0,00	- 335,48	0,00	- 209,24	0,00	- 170,48
Sr	0,00	- 148,94	- 173,31	0,00	- 179,91	0,00	- 288,47	0,00	- 107,21	0,00	- 165,08
Y	0,00	- 73,54	- 0,38	0,00	- 160,29	0,00	- 209,16	0,00	- 171,88	0,00	- 102,87
Zr	0,00	88,23	163,20	0,00	244,88	0,00	909,29	0,00	274,18	0,00	139,33
Nb	0,00	68,10	115,28	0,00	36,01	0,00	374,64	0,00	- 31,05	0,00	359,40
Ba	0,00	- 148,38	- 175,81	0,00	- 164,30	0,00	- 300,22	0,00	- 108,30	0,00	- 169,40
Pb	0,00	10,64	75,66	0,00	230,05	0,00	42,89	0,00	- 197,36	0,00	- 7,13
Th	0,00	386,59	462,17	0,00	486,67	0,00	719,76	0,00	-1,09		117,81
U	0,00	371,11	818,57	0,00	181,48	0,00	326,05	0,00	- 44,99	0,00	558,48

Le tableau 22, réalisé à partir des données du tableau 21, permet de visualiser la mobilité des éléments dans le niveau médian gravillonnaire. Ainsi, pour ce niveau du profil, pour les matériaux de BER 1G, de BER 2G, de YOL 1G, de YOL 2G et de NGU 1G, il ressort les faits suivants en ce qui concerne les éléments majeurs et en traces.

Dans BER 1G, les alcalins et alcalino-terreux ainsi que le fer ferreux s'exportent par pertes très importantes, tandis que l'hydrogène et le fer ferrique s'y accumulent de manière très importante. L'aluminium s'y accumule faiblement à moyennement et le phosphore s'exporte par pertes moyennes. Les éléments en traces connaissent des accumulations relatives à très importantes

Dans YOL 1G, en considérant les migmatites de Ngoura (NGO), les alcalins et alcalino-terreux ainsi que le silicium et le fer ferreux s'exportent par pertes très importantes. Tandis que le manganèse s'y accumule de manière faible à moyennes, le fer ferrique et l'hydrogène s'y accumulent de manière très importante.

L'aluminium, le phosphore connaissent des accumulations importantes. Les éléments en traces : connaissent des accumulations faibles à très importantes en dehors de nickel et d'yttrium qui s'exportent de manière moyenne à très importante respectivement

Dans les matériaux de YOL 1G, en considérant les migmatites de Batouri (BAT), les alcalins et les alcalino-terreux ainsi que le fer ferreux connaissent des pertes très importantes. L'hydrogène et le fer ferrique s'accumulent de manière très importante. Tandis que l'aluminium s'accumule de manière importante. Les éléments en traces connaissent de pertes très importantes (le cuivre, le nickel, le zinc et l'yttrium) et d'autres s'accumulent de manière faible à importante (le titane, le chrome, le niobium, le vanadium, le zircon, l'uranium et le gallium). Le silicium et le phosphore connaissent de pertes importantes.

Dans les matériaux de YOL 2G, les alcalins, les alcalino-terreux et le silicium subissent des pertes très importantes. Le fer ferreux et le Magnésium sont moyennement évacués. Le fer ferrique, le phosphore et l'hydrogène connaissent des gains très importants. Les éléments traces s'accumulent de manière importante à très importantes, et d'autres (thorium, uranium et niobium) connaissent des pertes modérées à moyennes tandis que l'yttrium connaît des pertes très importantes. Dans les produits d'altération de NGU 1G, les éléments alcalins et les éléments alcalino-terreux ainsi que le silicium sont évacués de manière très importante.

Le fer-ferreux connaît des pertes importantes tandis que le manganèse et le phosphore s'accumulent s'accumulent de manière importante et l'aluminium de manière faible à moyenne.

Le fer ferrique et l'hydrogène s'accumulent de manière très importante.

Les éléments en traces s'accumulent de manière importante à très importante, excepté le plomb et l'yttrium qui s'exportent modérément à très importante respectivement.

**Tableau 22** : Mobilité des éléments majeurs et en traces d'après les calculs isozirconium dans le niveau médian

	<b>Pertes très importantes</b> $\Delta x < - 100 \%$	<b>Pertes importantes</b> $- 100 < \Delta x < - 70 \%$	<b>Pertes moyennes</b> $- 70 < \Delta x < - 40 \%$	<b>Pertes modérées</b> $- 40 < \Delta x < 0 \%$	<b>Gains faibles à moyens</b> $0 < \Delta x < 100 \%$	<b>Gains importants</b> $100 < \Delta x < 1000 \%$	<b>Gains très importants</b> $\Delta x > 1000 \%$
<b>BER 1G</b>	Mg, Mn, Ca, Na, Rb, Ba, Sr, K, Fe <sup>2+</sup>	Y	P	Si, Zn	Al, Co, Ni, Cu, Zr, Nb, Pb	Ti, Sc, Ga, Th, U	H, v, Cr, Fe <sup>3+</sup>
<b>BER 2G</b>	Mg, Mn, Ca, Na, Rb, Sr, Ba, K, Fe <sup>2+</sup>	Y	Si		Al, H, P, Cu, Zn, Ga, Pb	Ti, Cu, Ni, Zr, Nb, Th, U	Sc, V, Cr, Fe <sup>3+</sup>
<b>YOL 1G/NGO</b>	Si, Mg, Ca, Na, K, Rb, Sr, Ba, Y, Fe <sup>2+</sup>		Ni		Mn, Zn, Pb	Al, P, Co, Ga, Zr, Nb, Th, U	H, Sc, V, Cr, Cu, Ti, Fe <sup>3+</sup>
<b>YOL 1G/BAT</b>	Mg, Mn, Ca, Na, K, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Ba, Fe <sup>2+</sup>	Si, P			Ti, Sc, Cr, Nb	Al, V, Ga, Zr, Pb, Th, U	H, Fe <sup>3+</sup>
<b>YOL 2G</b>	Si, Mg, Ca, Na, K, Rb, Sr, Y, Ba, Pb	Mn, Fe <sup>2+</sup>	Nb, U	Th		Al, Ti, Co, Ni, Zn, Ga, Zr,	H, P, Sc, V, Cu, Cr, Fe <sup>3+</sup>
<b>NGU 1G</b>	Si, Mg, Ca, Na, K, Rb, Sr, Y, Ba	Fe <sup>2+</sup>		Pb	Al	Mn, Ti, P, Co, Zn, Ga, Zr, Nb, Th, U	Sc, V, Cr, H, Ni, Cu, Fe <sup>3+</sup>

#### **III.1.1.5.4. Synthèse pétrologique des matériaux d'altération**

Les produits d'altération du niveau médian des granites de Bertoua, des gneiss de Nguelémendouka et des migmatites de Batouri, de Ngoura et de Gari-Gombo ont une épaisseur variant entre 1,2 m et 2,5 m en général. Les nodules représentent 30 % dans l'ensemble et le reste est constitué d'argiles plastiques.

*Sur le plan de la minéralogie* : les sols latéritiques nodulaires issus des différents substratums sont constitués de quartz, de kaolinite, de muscovite, de goethite, d'hématite et de gibbsite.

*Sur le plan de la géochimie* : les matériaux de BER 1G, de BER 2G, de YOK 2G, de PAL 1G et de YOL 2G sont à dominance siliceuse, tandis que les matériaux de NGU 1G, de YOK 1G, de MOL 1G et de YOL 2G sont à dominance de fer ferrique. Les éléments alcalins et les éléments alcalino-terreux sont évacués de manière très importante dans l'ensemble des matériaux. Le fer ferrique s'accumule de manière très importante dans tous les matériaux. Le fer ferreux s'exporte de manière importante dans les matériaux de YOL 2G et de NGU 1G et de manière très importante dans les matériaux de BER 1G, de BER 2G, de YOL 1G/BAT et de YOL 1G/ NGO. L'aluminium s'accumule de manière faible à moyenne dans les matériaux de BER 1G, de BER 2G et de NGU 1G. Dans les matériaux de YOL 1G/NGO, de YOL 1G/BAT et de YOL 2G, il s'accumule de manière importante. Le silicium est évacué de manière modérée à très importante. L'yttrium subit des pertes importantes à très importantes. Le vanadium s'accumule de manière faible à très importante et le chrome de manière importante à très importante.

#### **III.1.1.5.5. Comparaison et discussion des résultats**

Les matériaux d'altération du niveau médian gravillonnaire développés sur les granites à Bertoua, sur les migmatites à Batouri, Ngoura et Gari-Gombo, sur les gneiss à Nguélémdouka et sur les schistes à Mboy II, Yokadouma-Bangué et Bangué-Moloundou présentent des caractères macromorphologiques semblables.

L'analyse minéralogique montre que les matériaux issus des schistes de YOK 1G, YOK 2G et de MOL 1G ont une même composition minéralogique que ceux de Mbalmayo et de Bengbis (Onana, 2010). Les matériaux issus des schistes de Yokadouma, de Mboy II et de Moloundou ont une composition chimique proche de celle des matériaux issus de schistes de Mbalmayo et de Bengbis, surtout pour les éléments majeurs (Tab. 23). Toutefois, certaines différences sont à relever :

- les matériaux de Mboy II, de Yokadouma et de Moloundou se caractérisent par un appauvrissement en  $\text{SiO}_2$  et en  $\text{H}_2\text{O}$  et un enrichissement en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Pour les éléments en traces, les matériaux de Mboy II, de Yokadouma et de Moloundou se caractérisent par un enrichissement net de tous les éléments (Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn et Zr) et un appauvrissement en thorium par rapport aux matériaux de Mbalmayo-Bengbis.

**Tableau 23 :** Résultats d'analyses minéralogiques et chimiques relatifs aux éléments majeurs (%) et éléments en traces (ppm) des schistes de Mboy II, (YOK 1G) de Yokadouma-Bangué (YOK 2G) et de Bangué-Moloundou (MOL 1G) comparés à la composition moyenne des schistes de Mbalmayo (MBr) et Bengbis (Ber) de Onana (2010)

Echantillons	YOK 2G	YOK 1G	MOL 1G	MBr	BBr
<b>Minéralogie</b>	Q, K, He, G, Go, M	Z, Q, K, He, G, Go, M	Q, K, He, G, Go, M	Q, M, Go, He, Is, K	Q, He, Go
<b>Eléments majeurs en %</b>					
SiO <sub>2</sub>	30,60	16,54	26,44	63,30	67,72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,85	21,50	23,22	8,73	9,27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,33	43,24	31,56	21,47	14,64
FeO	0,29	0,25	0,35	0,00	0,21
MgO	0,17	0,04	0,14	0,15	0,30
MnO	0,04	0,33	0,09	0,02	0,02
CaO	0,11	0,03	0,04	0,04	0,05
Na <sub>2</sub> O	0,07	0,07	0,06	0,01	0,01
K <sub>2</sub> O	0,24	0,02	0,17	0,30	0,75
TiO <sub>2</sub>	1,06	2,15	1,98	0,46	0,58
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,20	0,15	0,09	0,07
LOI	15,05	14,24	14,39	6,30	5,98
<b>TOTAL</b>	<b>98,98</b>	<b>98,61</b>	<b>98,59</b>	<b>100,87</b>	<b>99,60</b>
<b>Eléments en traces (ppm)</b>					
Sc	34,5	73,8	30,4	15,55	12,92
V	422	600	600	268,3	184,19
Cr	311	600	537	470,6	364,57
Co	9,9	17,2	12,2	2,88	3,32
Ni	42	41	58	15,64	17,61
Cu	58	134	174	46,69	31,73
Zn	57	48	50	25,63	26,79
Zr	208	265	302	145,40	133,70
Th	8,84	15,20	10,38	18,34	13,01

Q: quartz; He: hématite; Go: goethite, M: muscovite, Is: Interstratifiés illites-smectites; K: kaolinite; Z: zircon; G: gibbsite,

Les résultats d'analyse minéralogiques et chimiques des matériaux du niveau nodulaire issus d'altération des granites de Bertoua (BER 1G et BER 2G) ont été comparés à ceux de matériaux de l'ensemble meuble argileux de versant et de l'ensemble meuble argileux issus des granites de Kandara au Sud de Bertoua (Kamgang, 1998). De cette comparaison, il ressort que les matériaux issus de granites de Bertoua et ceux de granites de Kandara ont une même composition minéralogique, ils se composent de kaolinite, quartz, gibbsite, hématite et goethite.

Cependant, l'anatase, le zircon et le magnétite qu'on trouve dans les matériaux issus des granites de Kandara sont absent dans les matériaux issus des granites de Bertoua.

Du point de vue chimique, les matériaux issus des granites de Bertoua sont caractérisés par un enrichissement en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{TiO}_2$ , et un appauvrissement en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  par rapport aux matériaux issus des granites de Kandara.

Les sols latéritiques nodulaires issus d'altération des migmatites de Ngoura, de Batouri et de Gari-Gombo sont caractérisés par un appauvrissement en  $\text{SiO}_2$  par rapport aux matériaux issus des migmatites de Yaoundé (Ekodeck et Kamgang, 2002). Pour le reste des éléments, la composition chimique des matériaux issus des gneiss de l'Est est comparable à celle des matériaux issus des gneiss de Yaoundé (Ekodeck et Kamgang, 2002). Les matériaux nodulaires issus des gneiss de Nguélémdouka et de Palisco-Ampel sont caractérisés par un appauvrissement en  $\text{SiO}_2$  par rapport aux matériaux issus de gneiss de Yaoundé (Ekodeck et Kamgang, 2002). Pour le reste des éléments, la composition chimique des matériaux issus des gneiss de l'Est est comparable à celle des matériaux issus des gneiss de Yaoundé (Ekodeck et Kamgang, 2002).

## **CONCLUSION SUR L'ETUDE PETROLOGIQUE DES MATERIAUX D'ALTERATION DU NIVEAU MEDIAN DE LA REGION DE L'EST**

Les matériaux d'altération du niveau médian du profil d'altération issus des granites, des gneiss, des schistes et des migmatites ont une minéralogie constituée de quartz, de kaolinite, de muscovite, de goethite et d'hématite. Les matériaux de BER 1G, de BER 2G (sur granite), de YOK 2G (migmatite), de PAL 1G (gneissique) et de YOL 1G (migmatite) sont à dominance siliceuse, tandis que les matériaux de NGU 1G, de YOK 1G (migmatite), de MOL 1G (schiste) et de YOL 2G (migmatite) sont à dominance de fer ferrique.

L'étude du bilan d'altération a permis le regroupement des éléments et des matériaux. Dans le niveau médian, les éléments alcalins et les éléments alcalino-terreux s'exportent par pertes très importantes dans tous les matériaux. Le fer ferrique s'accumule de manière très importante et le fer ferreux s'exporte moyennement à très importante.

## **III.2. CARACTERISATION NORMATIVE ALTEROLOGIQUE DES MATERIAUX DES PROFILS D'ALTERATION DES ROCHES**

La méthode de caractérisation normative altérologique a été appliquée à certains matériaux utilisés, dans l'entretien et construction des routes des Régions de l'Est et du Sud dans le but de quantifier l'ampleur des transformations qu'ils ont subies sous l'action des agents météoriques. Ceci permet de donner des conseils à caractère technique quant à l'utilisation de ces matériaux sur les différentes couches de la chaussée. Le relevé des résultats normatifs est consigné dans le tableau A2 en annexe et les données d'analyse chimique qui ont permis de faire cette restructuration normative sont consignées dans les tableaux 19 et 20.

### **III.2.1. CARACTERISATION NORMATIVE ALTEROLOGIQUE DU GRANITE ET DES MATERIAUX DU NIVEAU NODULAIRE DU SECTEUR DE BERTOUA**

#### **III.2.1.1. Données minéralogiques**

Dans le tableau 24, est présentée la composition minéralogique obtenue par restructuration normative. Il apparaît que:

- le taux de minéraux peu ou non altérables non siliques (MNPA) (apatite, ilménite et magnétite) est extrêmement faible, de l'ordre de 2 % dans la roche mère et de 1 % dans le niveau nodulaire ;
- les teneurs en silicates anhydres primaires calco-alcalins (Sil I ca-alc) (orthose, albite, anorthite, et ferromagnésiens (Sil I Fe-Mg) (ferrosilite) sont de l'ordre de 66 % dans la roche mère et nulles dans l'horizon nodulaire ;
- les silicates supergènes calco-alcalins (Sil II Ca-alc) (scolécite) représentent 1 % dans la roche mère, 2 % dans les matériaux de BER 2G et 5 % dans les matériaux nodulaires de Bertoua Aéroport (BER 1G) ;
- les silicates supergènes ferromagnésiens (Sil II Fe-Mg) (berthiérine et antigorite) sont de l'ordre de 3 % dans la roche mère, de 1 % et 0,2 % respectivement dans les matériaux BER 1G et BER 2G ;
- les teneurs en kandites (kaolinite) sont nulles dans la roche mère et dans les matériaux BER 1G, elles sont de l'ordre de 15 % dans les matériaux BER 2G ;
- les oxyhydroxydes d'aluminium (Oxyhydrox Al) (gibbsite) n'existent pas dans la roche mère, leur teneur est de 20 % dans les matériaux de Bertoua-Aéroport et Bertoua-Mandjou,
- les oxyhydroxydes de fer ferrique (Oxyhydrox Fe) (goethite) n'existent pas dans le granite, leurs teneurs sont respectivement de 20 % et de 24 % dans BER 1G et BER 2G ;
- les oxyhydroxydes de manganèse (Oxyhydrox Mn) n'existent pas dans les matériaux étudiés ;



- le taux de silice (quartz) est de l'ordre de 28 % dans la roche mère (granite), de 52 % dans les matériaux BER 1G et de 38 % dans ceux de BER 2G.

### III.2.1.2. Données paramétriques

L'altération dans la roche mère est très faible. Elle est élevée dans les niveaux nodulaires.

L'induration potentielle en fer ferrique, nulle dans la roche mère, est moyenne dans les niveaux nodulaires.

Le milieu, confiné dans la roche mère est très ouvert dans l'horizon nodulaire.

Les diagrammes altérologiques triangulaires permettent d'établir, un certain nombre de faits. Le diagramme triangulaire L-I-C (Fig. 43) montre que le milieu d'évolution des silicates est confiné dans le granite (BER) et, dans les matériaux des niveaux nodulaires de Bertoua- Mandjou (BER 2G) et de Bertoua -Aéroport (BER 1G), le confinement cède la place à la lixiviation.

L'évolution d'ensemble du milieu d'altération, que présente le diagramme A-I-C de la figure 44, montre que le confinement dans le granite laisse la place à l'altération- induration dans les matériaux nodulaires (.BER 1G et BER 2G)

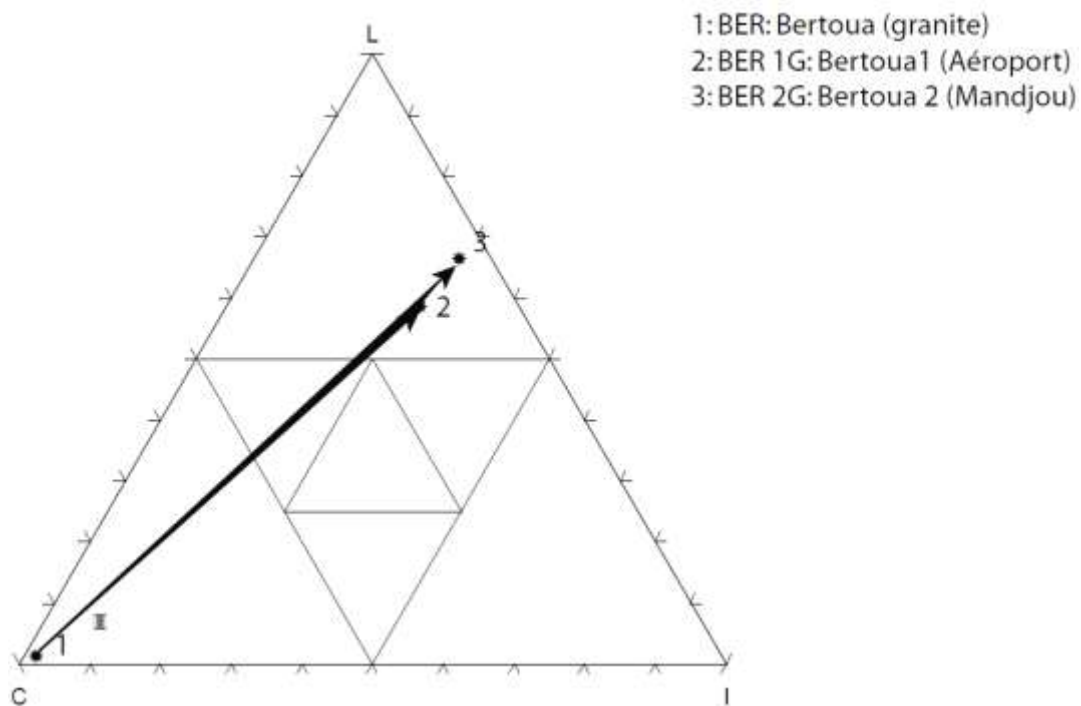
Les points représentatifs des matériaux BER 1G et BER 2G sont situés dans le domaine de la monosiallisation (Fig. 45). La figure 46 qui caractérise l'évolution d'ensemble montre que le degré d'altération, nulle à très faible dans le granite de Bertoua (BER), est moyen dans les matériaux nodulaires de Bertoua-Mandjou (BER 2G), et de Bertoua-aéroport (BER 1G).

La libération des oxyhydroxydes d'aluminium et celle des oxyhydroxydes ferriques est moyenne pour les deux matériaux BER 1G et BER 2G.

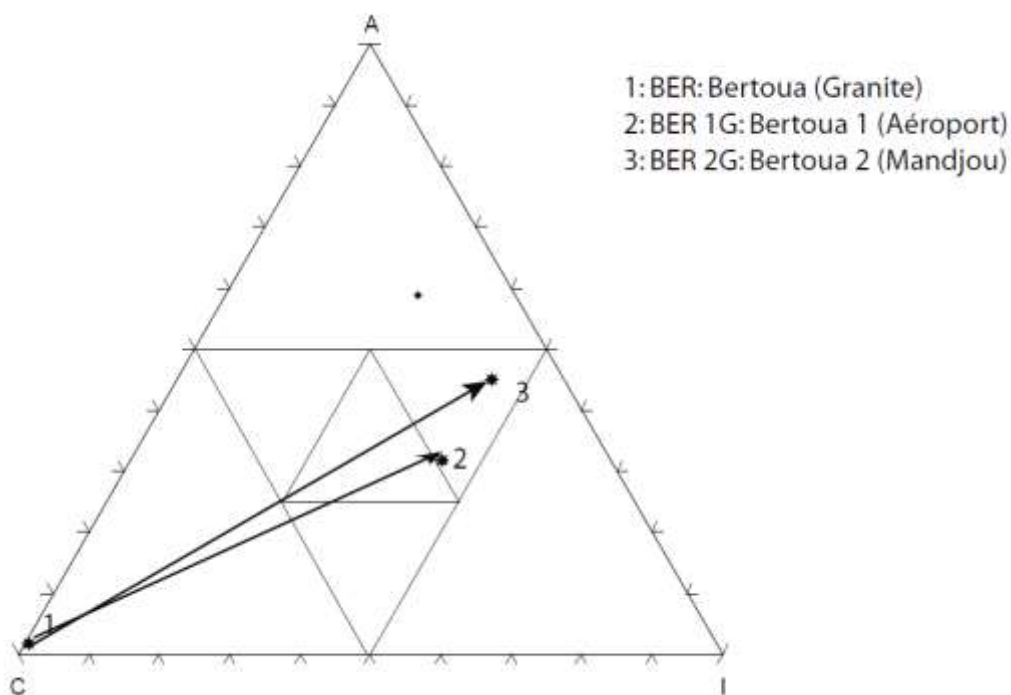
L'indice relatif de lixiviation potentielle (IRLP) et le degré virtuel relatif d'altération des matériaux (DVRAR) sont respectivement 1,65 % et 1,18 % dans la roche mère (BER), 30,03 % et 88,17 % dans les matériaux de Bertoua-Aéroport, 87,13 % et 43,12 % dans ceux de Bertoua-Mandjou. Ces valeurs de l'IRLP indiquent que pour les matériaux de BER 1G, il y a présence des silicates d'altération moyenne (chlorites, smectites confer restruration altérologique normative), ceci constitue un inconvénient majeur en raison de leur tendance au retrait et gonflement sous l'influence de l'eau. Dans les matériaux de BER 2G, où la valeur de l'IRLP montre qu'il y a des kandites. Ces minéraux ont un inconvénient potentiel pour les travaux du Génie Civil, à cause de leur comportement plastique par imbibition d'eau.

**Tableau 24 :** Composition minéralogique virtuelle et paramètres altérologiques des matériaux de Bertoua

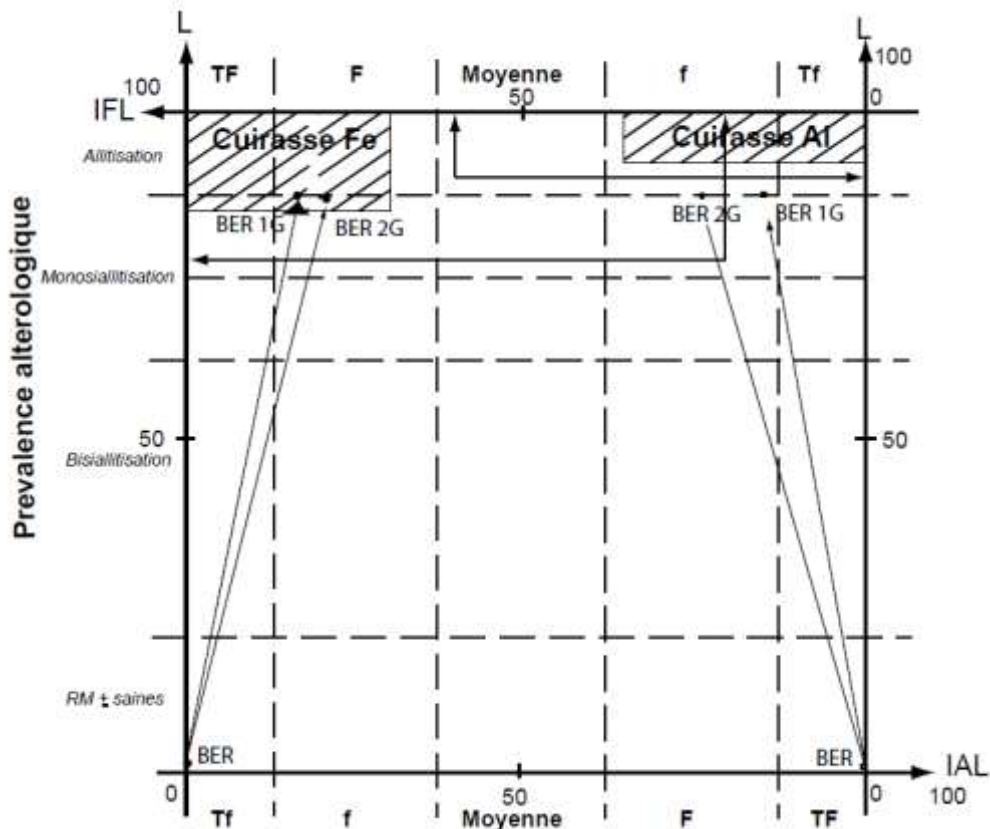
Partie du Profil	Roche mère	Niveau médian gravillonnaire	
	Granite de Bertoua	Niveau nodulaire	Niveau nodulaire
Nom de l'échantillon	N01	BER1	BER2
MNPANS	2,08	1,48	1,23
Sil I Ca-alc	66,03	0,00	0,00
Sil I Fe-Mg	0,40	0,00	0,00
Sil II Ca -alc	0,74	5,22	1,59
Sil II Fe-Mg	3,17	0,55	0,18
Kandites	0,00	0,00	15,05
Oxyhydrox Mn	0,07	0,00	0,00
Oxyhydrox Al	0,00	19,97	19,92
Oxyhydrox Fe	0,00	19,76	23,50
Silice	28,01	51,89	37,50
PPFAL	indéfini	1,01	0,85
IAL	0,00	18,85	19,57
IFL	0,00	18,65	23,08
IRLP (L)	1,65	88,17	87,13
DVRAR (A)	1,18	30,03	43,12
IRIP (I)	0,07	40,14	43,82
IRCP (C)	100,00	22,39	4,83



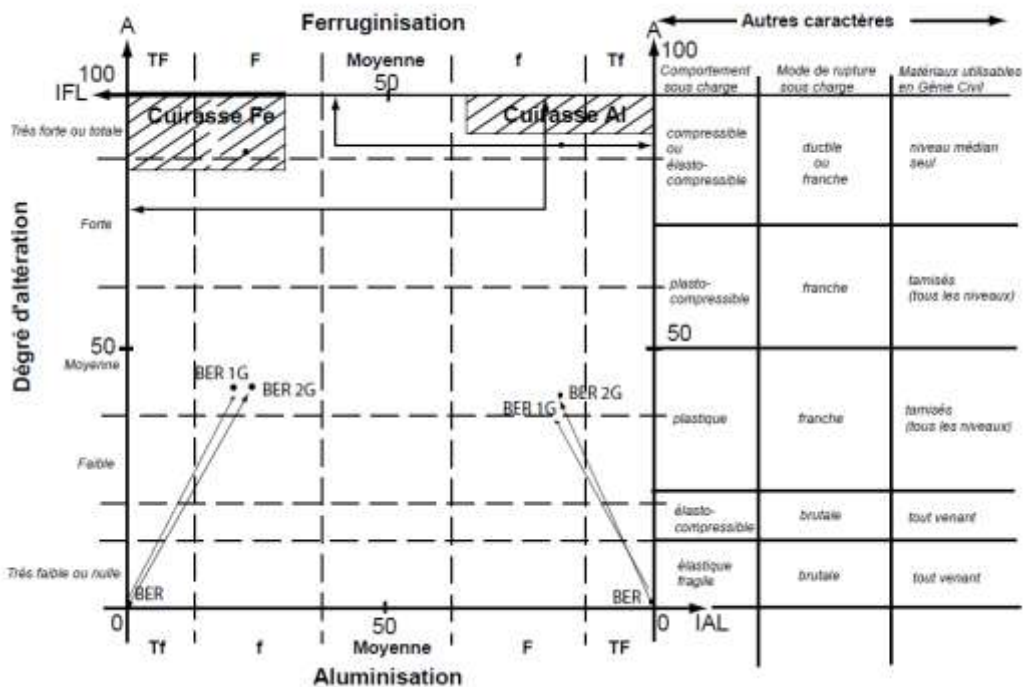
**Figure 43 :** Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les matériaux du secteur de Bertoua (Ekodeck et Kamgang, 2002) ;  
 L-I-C : Lixiviation, induration et confinement potentiel.



**Figure 44 :** Caractérisation de l'intervention des facteurs pédologiques dans les matériaux du secteur de Bertoua (Ekodeck et Kamgang, 2002) ; A-I-C : altération, induration et confinement potentiel



**Figure 45 :** Caractérisation de l'importance de lixiviation dans les matériaux du secteur de Bertoua, (Ekodeck et Kamgang, 2002) en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; L : Lixiviation potentielle



**Figure 46 :** Caractérisation de l'importance de l'altération dans les matériaux du secteur de Bertoua, (Ekodeck et Kamgang, 2002) en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; A : Altération

La valeur du DVRAR dans le granite de Bertoua (BER) est de 1,18 %. Cette valeur indique que le granite est une roche mère où l'altération est très faible. Cette roche a un comportement élastique fragile et une rupture brutale sous charge (Ekodeck et Kamgang, 2002). On peut l'employer comme matériau tout-venant, après concassage sur la couche de base ou sur la couche de roulement des routes revêtues, et même pour les enduits superficiels. Les concassés de cette roche peuvent être également utilisés pour le béton hydraulique et c.

Les valeurs de IAL et IFL sont respectivement de 18,65 % et de 23,05 %. Ce qui ne présente pas d'intérêt particulier pour les travaux du Génie Civil.

Les taux d'indice d'induration potentielle (IIP) dans le granite de Bertoua est de 0,07 % (Tab. 24), ce qui veut dire que la roche est à induration potentielle nulle à très faible.

Les valeurs de l'indice de confinement potentiel (ICP) sont de l'ordre de 100 % (Tab. 24) dans le granite, ce qui indique un milieu très fortement confiné. Elles sont de l'ordre de 22 % et de 5 % respectivement dans les matériaux BER 1G et BER 2G, ceci signifie que, le milieu est ouvert pour BER 2G est très ouvert pour BER 1G.

Ces résultats montrent que les matériaux de Bertoua-Mandjou sont plus sollicités dans les travaux routiers par rapport aux matériaux Bertoua-Aéroport.

### **III.2.2. CARACTERISATION NORMATIVE ALTEROLOGIQUE DES GNEISS DE BENT, D'ANDOM, DE MEYO-NYAKA, DE NGUELEMENDOUKA, ET DES MATERIAUX NODULAIRES DE CERTAINS DE CES SECTEURS (Nguélémondouka et Palisco Ampel)**

Ce regroupement des matériaux du Sud et de l'Est permet de faire une comparaison directe étant donné que la nature du substratum est la même (gneiss)

#### **III.2.2.1. Données minéralogiques**

Ce regroupement des matériaux du Sud et ceux de l'Est permet de faire une comparaison surtout que la nature de substratum est la même.

Dans le tableau 25, est présentée la composition minéralogique obtenue par restructuration normative. Il apparaît que :

- le taux de minéraux peu ou non altérables non siliques (MNPA) (anatase, apatite, chromite, ilménite et magnétite) est de l'ordre de 2 %, 4 %, 7 % et 4% respectivement dans les gneiss de Bent, de Nguélémondouka, d'Andom et de Meyo-Nyaka. Il est de l'ordre de 1 % et de 2 % dans les matériaux de Lomié et de Nguélémondouka.

- les teneurs en silicates anhydres primaires calco-alcalins (Sil I Ca-alc) (orthose, albite, anorthite, kaliophilite, métasilicates de potassium et de sodium, enstatite) et les silicates anhydres ferromagnésiens (Sil I Fe-Mg) (ferrosilite) sont de l'ordre de 67 %, 44 %, 69 % et 88 %

respectivement dans les gneiss de Bent, Nguélémondouka, Andom et de Meyo-Nyaka. Elles sont nulles dans le niveau nodulaire.

- le pourcentage des silicates supergènes calco-alcalins (Sil I Ca-alc) (scolécite, analcime et sérécite) est de l'ordre de 2 % dans les gneiss de Bent et de Meyo-Nyaka.

Ce taux est nul dans les gneiss d'Andom et de Nguélémondouka. Dans le niveau nodulaire, les silicates supergènes calco-alcalins sont de l'ordre de 2 % dans les matériaux de Lomié et de Nguélémondouka.

- les teneurs en silicates supergènes ferromagnésiens (Sil I Fe-Mg) (daphanite, berthiérine, antigorite et stévensite) sont de l'ordre de 3 %, 3 %, 13 % et 6 % respectivement dans les gneiss d'Andom, de Bent, de Nguélémondouka et de Meyo-Nyaka. Elles sont nulles dans le niveau nodulaire.

- le taux des kandites (kaolinite) est nul dans les roches mères. Il est de l'ordre de 17 % dans les matériaux de Lomié et de 7 % dans ceux de Nguélémondouka.

- les teneurs en oxyhydroxydes d'aluminium (Oxyhydrox-Al) (corindon et gibbsite) sont nulles dans les gneiss de Bent, d'Andom et de Meyo-Nyaka. Elles sont de l'ordre de 3 % dans le gneiss de Nguélémondouka. Dans le niveau nodulaire de Lomié et de Nguélémondouka, elles sont de l'ordre de 24 % et de 26 % respectivement.

- la teneur en oxyhydroxydes de fer ferrique (Oxyhydrox-Fe) (goethite) est nulle dans les roches mères. Elle est de l'ordre de 26 % dans les matériaux de Lomié et de 40 % dans ceux de Nguélémondouka.

- les teneurs en oxyhydroxydes de manganèse (manganosite et pyrochroïte) sont nulles et dans la roche mère et dans le niveau nodulaire.

- les concentrations en silice (quartz) sont de l'ordre de 21 %, 26 %, 37 %, et 0 % respectivement dans les gneiss d'Andom, de Bent, de Nguélémondouka et de Meyo-Nyaka. Elles sont de l'ordre de 30 % dans les matériaux de Lomié et de 22 % dans ceux de Nguélémondouka.

### **III.2.2.2. Données paramétriques**

La lixiviation dans les roches mères est très faible. Elle est élevée dans le niveau nodulaire.

L'induration potentielle en fer ferrique est nulle dans la roche mère de Meyo-Nyaka.

Elle est très faible dans les gneiss de Bent, de Nguélémondouka et d'Andom, et moyenne dans les niveaux nodulaires.

Le milieu, confiné dans la roche mère, est faiblement ouvert dans le niveau nodulaire de Lomié et dans celui de Nguélémondouka.

Les diagrammes altérologiques triangulaires permettent d'établir un certain nombre de faits. Le diagramme triangulaire L-I-C (Fig. 47) montre que le milieu d'évolution des silicates est

confiné dans le gneiss et, dans les matériaux de l'horizon nodulaire de Palisco (PAL 1G) et de Nguélémondouka (NGU 1G), le confinement cède la place à la lixiviation.

L'évolution d'ensemble du milieu d'altération, que présente le diagramme A- I-C (Fig. 48), se présente sous un schéma différent, car le confinement cède la place à l'induration dans les matériaux de Nguélémondouka, alors que dans les matériaux de Palisco, le confinement cède la place à l'altération - induration.

Les diagrammes carrés des figures 49 et 50 traduisent le caractère du phénomène de ferrallitisation dans les matériaux du niveau nodulaire. Les points représentatifs des deux échantillons PAL 1G et NGU 1G sont situés dans le domaine de l'allitisation.

La figure 42 qui caractérise l'évolution d'ensemble montre que le degré d'altération, nul à très faible dans le gneiss, est moyen dans les matériaux nodulaires PAL 1G et NGU 1G.

La libération des oxyhydroxydes d'aluminium et celle des oxyhydroxydes ferriques est moyenne pour les deux matériaux PAL 1G et NGU 1G. Ces libérations restent en dehors de leur zone de cuirassement.

Les valeurs de l'indice relatif de lixiviation potentielle (IRLP) et du degré virtuel d'altération des matériaux (DVRAR) du niveau nodulaire sont respectivement 87 % et 52 % pour PAL 1G 92 % et 56 % pour NGU 1G.

Les valeurs de l'IRLP (Tableau A4 en annexe) indiquent la présence des kandites. Ces minéraux ont un inconvénient potentiel pour les travaux du Génie Civil à cause de leur comportement plastique par imbibition d'eau.

Les valeurs de DVRAR des gneiss de Bent, de Nguélémondouka, d'Andom et de Meyo-Nyaka varient entre 0,88 et 3,28. Ces valeurs (Tableau A2 en annexe) indiquent que les gneiss étudiés sont des roches saines où l'altération est très faible. Ces roches ont un comportement élastique fragile et une rupture brutale sous charge (Ekodeck et Kamgang, 2002). Elles peuvent être employées comme matériau tout-venant, après concassage, sur la couche de base ou sur la couche de roulement des routes revêtues ainsi que pour les enduits superficiels et même dans un béton de sol. Les concassés de cette roche peuvent être aussi utilisés pour le béton hydraulique.

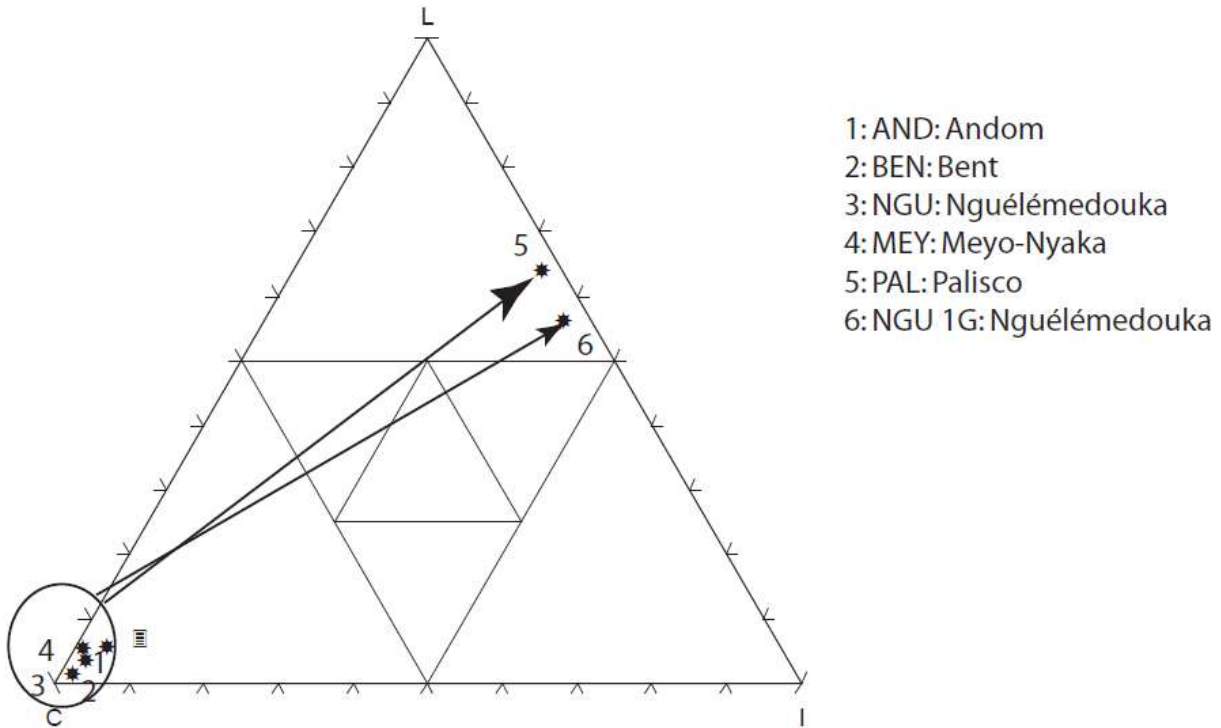
Les valeurs de l'induration potentielle (IRIP) des gneiss sont comprises entre 0,0 % et 2,85 %, ce qui montre une induration potentielle nulle à très faible.

L'indice de confinement potentiel (IRCP) est de l'ordre de 100 % (Tableau A4 en annexe) pour la roche mère, ce qui indique un milieu très fortement confiné. Et pour le niveau nodulaire, il est de l'ordre de 51% pour PAL 1G, ce qui indique un milieu moyennement confiné et de 4 % pour NGU 1G, ce qui indique le milieu non à très peu confiné. En caractérisant le milieu par le drainage qui est l'inverse de confinement, l'on peut qualifier ce milieu de NGU 1G comme étant ouvert.

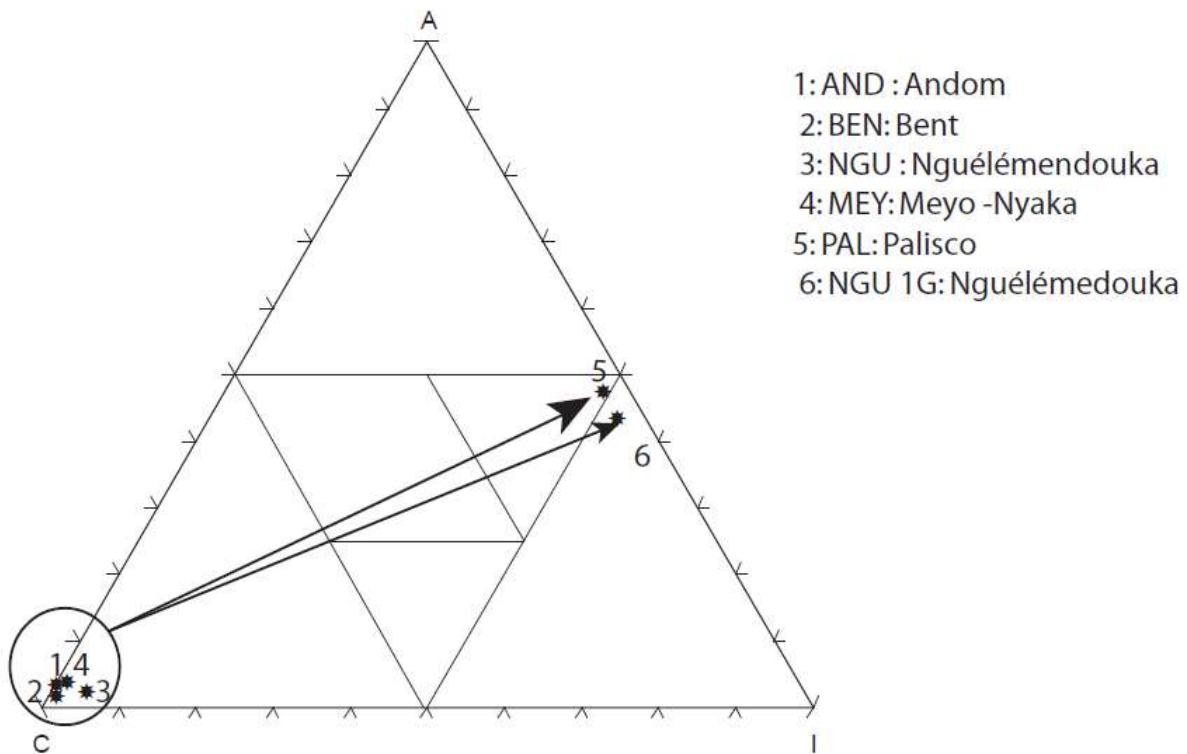
**Tableau 25 :** Composition minéralogique virtuelle et paramètres altérologiques des matériaux de Bent, Nguélémdouka, Palisco-Ampel (Région de l'Est) et d'Andom et Meyo-Nyaka (Région du Sud)

Partie du Profil	Roche mère	Niveau nodulaire	Roche mère	Niveau nodulaire	Roche mère	Roche mère
	Gneiss de Bent	Niveau nodulaire	Gneiss de Nguelémdouka	Niveau nodulaire	Gneiss d'Andom	Gneiss de Meyo-Nyaka
<b>Nom de l'échantillon</b>	BEN	PAL 1G	NGU	NGU 1G	AND	MEY
<b>Frondeur (m)</b>						
<b>MNPANS</b>	1,70	1,33	4,30	2,02	6,77	3,54
<b>Sil I Ca- alc</b>	66,68	0,00	40,36	0,00	56,60	88,04
<b>Sil I Fe -Mg</b>	0,44	0,00	3,45	0,00	9,75	0,00
<b>Sil II Ca -alc</b>	2,70	2,03	0,00	1,24	0,00	2,44
<b>Sil II Fe -Mag</b>	2,61	0,18	12,57	0,18	3,31	6,27
<b>Kandites</b>	0,00	16,60	0,00	7,05	0,00	0,00
<b>Oxyhydrox Mn</b>	0,07	0,09	0,14	0,09	0,21	0,00
<b>Oxyhydrox Al</b>	0,07	23,66	2,71	25,69	0,00	0,00
<b>Oxyhydrox Fe</b>	0,00	25,45	0,00	39,87	0,00	0,00
<b>Silice</b>	26,03	29,58	36,64	22,38	21,14	0,00
<b>PPFAL</b>	∞	0,93	∞	0,64	Indéfini	Indéfini
<b>IAL</b>	0,08	23,10	3,09	23,69	0,00	0,00
<b>IFL</b>	0,00	24,85	0,00	36,78	0,00	0,00
<b>IRLP (L)</b>	2,76	87,43	5,32	92,40	1,14	2,88
<b>DVRAR (A)</b>	2,03	51,54	3,28	55,83	0,88	2,88
<b>IRIP</b>	0,14	49,69	2,85	66,47	0,21	0,00
<b>IRCP</b>	100,00	5,21	100,00	4,15	100,00	100,00

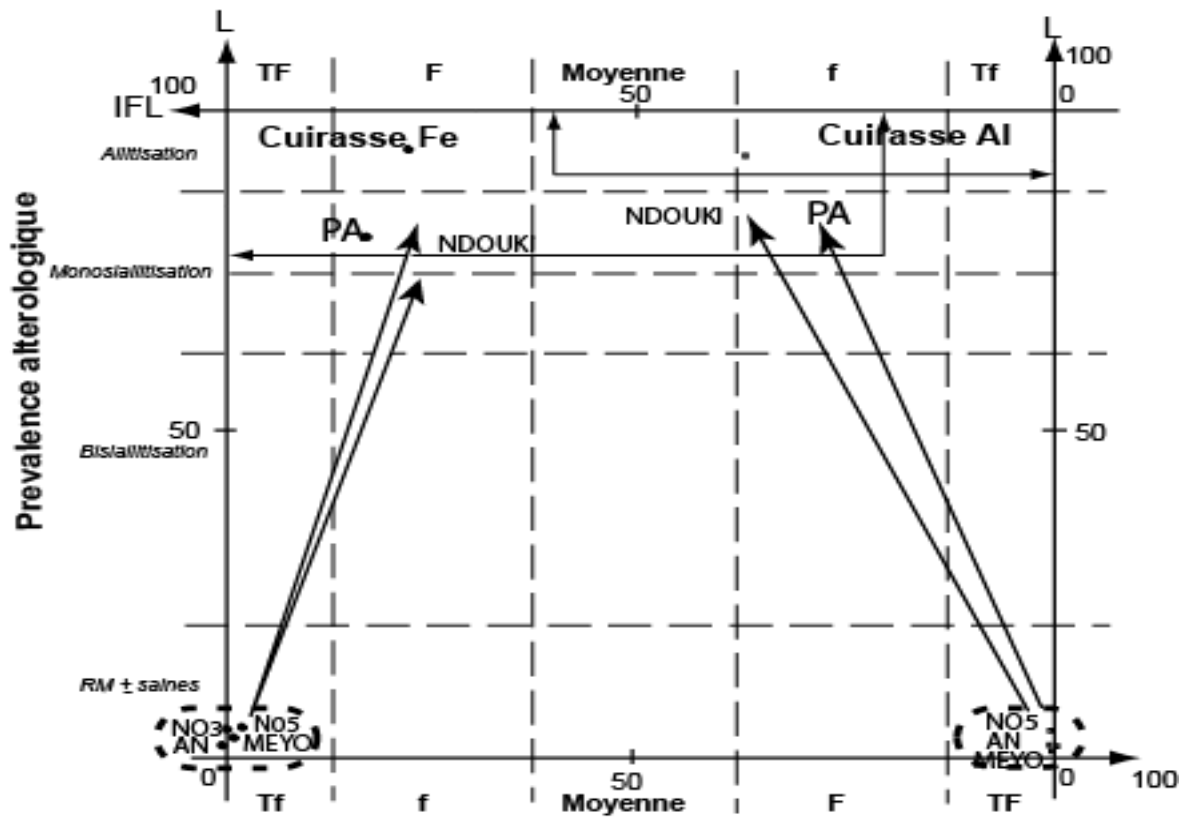




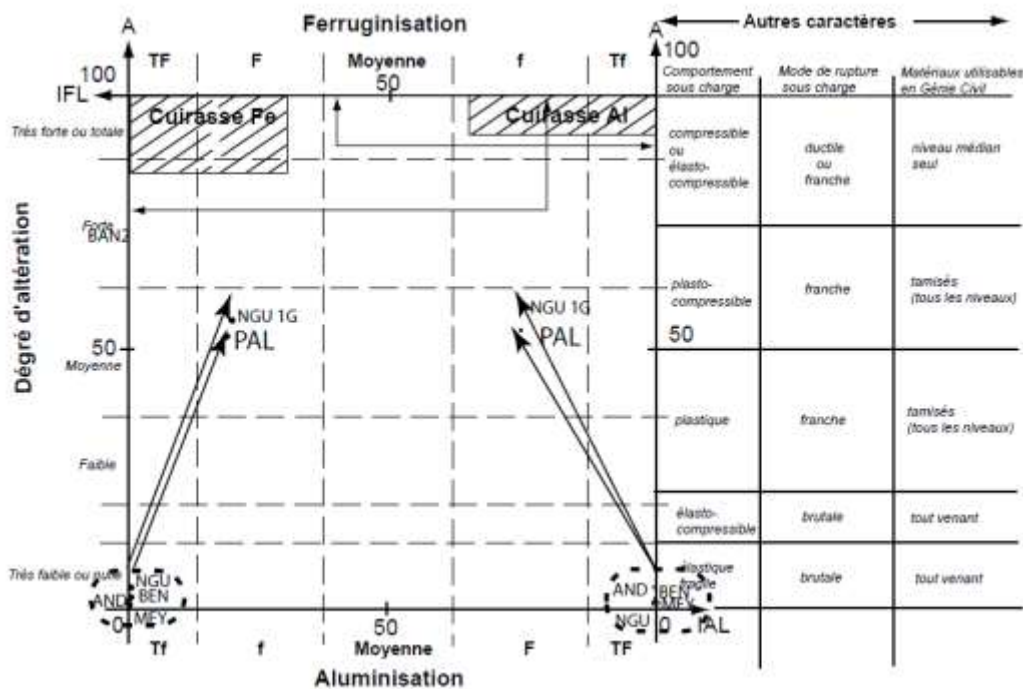
**Figure 47 :** Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les matériaux des secteurs d'Andom, Bent, Meyo-Nyaka, Nguélémedouka et de Lomié (Ekodeck et Kamgang, 2002) ; L-I-C : Lixiviation, induration et confinement potentiel



**Figure 48 :** Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les matériaux des secteurs d'Andom, Bent, Meyo-Nyaka, Nguélémedouka et de Lomié, (Ekodeck et Kamgang, 2002) ; A-I-C : altération, induration et confinement potentiel



**Figure 49 :** Caractérisation de l'importance de lixiviation dans les matériaux des secteurs d'Andom, Bent, Meyo-Nyaka, Nguelémendouka et Palisco (Ekodeck et Kamgang, 2002) en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; L : Lixiviation potentielle



**Figure 50 :** Caractérisation de l'importance de l'altération dans les matériaux des secteurs d'Andom, Bent (Doumé), Meyo-Nyaka, Nguelémendouka et Palisco (Ekodeck et Kamgang, 2002) en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) : A : altération potentielle

### **III.2.3. CARACTERISATION NORMATIVE ALTEROLOGIQUE DES MIGMATITES ET DES MATERIAUX NODULAIRES DE BATOURI, NGOURA ET DE GARI-GOMBO**

#### **III.2.3.1. Données minéralogiques**

La composition minéralogique obtenue par restructuration normative est consignée dans le tableau 26. Cette minéralogie montre que :

- le taux de minéraux peu ou non altérables non siliques (MNPA) (anatase, apatite, chromite, ilménite et magnétite) est extrêmement faible. Il est d'environ 2 % dans la migmatite et d'environ 3 % dans le niveau nodulaire.

- les teneurs en silicates anhydres calco-alcalins (Sil.I Ca alc) (orthose, albite, anorthite, métasilicates de potassium et de sodium, enstatite) et celles de silicates anhydres ferromagnésiens (Sil.I Fe Mg) (Ferrosilite) sont de l'ordre de 29 %, 65 % et 65 % respectivement dans les migmatites de Yokadouma (GAR), de Ngoura (NGO) et de Batouri (BAT). Ces teneurs sont nulles dans le niveau nodulaire.

- le taux deux silicates supergènes calco-alcalins (Sil II Ca alc) (scolécite, analcime et séricite) est très faible dans ces matériaux. Il varie entre 4 et 11 % dans la migmatite et entre 0 et 3 % dans le niveau nodulaire.

- les teneurs en silicates supergènes ferromagnésiens (Sil.II Fe-Mg) (daphanite, antigorite) sont très faibles. Elles sont de 1 % dans la migmatite de Ngoura et de 2 % dans celle de Batouri. Ces minéraux n'existent pas dans la migmatite de Gari-Gombo et dans le niveau nodulaire.

- les teneurs en kandites (kaolinite et halloysite) sont nulles dans la migmatite. Elles sont de l'ordre de 66 %, 33 %, 57 %, 24 % et 29 % respectivement dans le niveau nodulaire de YOK 2G, YOK 1G, MOL 1G, YOL 2G et YOL 1G.

- les oxyhydroxydes d'aluminium (Oxyhydrox Al) (corindon et gibbsite) n'existent pas dans la migmatite et dans les niveaux nodulaires de YOK 1G. Ces minéraux ont des teneurs de l'ordre 2 %, 10 %, 12 %, et 23 %, respectivement dans le niveau nodulaire de MOL 1G, YOL 2G, YOK 1G et YOL 1G.

- les teneurs en oxyhydroxydes de fer ferrique (Oxyhydrox Fe) (hématite et goéthite) sont nulles dans la roche mère. Elles sont respectivement 21 %, 28 %, 35 %, 48 % et 49 % et dans le niveau nodulaire de YOL 1G, YOK 1G, MOL 1G, YOK 1G et YOL 2G

- les oxyhydroxydes de manganèse (Oxyhydrox Mn) (managnosite et pyrochroïte) n'existent pas dans la roche mère et dans les horizons nodulaires.

- les teneurs en silice (quartz) sont de l'ordre de 60 %, 28 % et 30 % respectivement dans les migmatites de Gari-Gombo, de Ngoura et de Batouri. Elles sont nulles dans le niveau nodulaire de YOK 2G, YOK 1G et MOL 1G. Elles sont de l'ordre de 11 % dans les matériaux nodulaire de YOL 2G et de 24 % dans ceux de YOL 1G.

### III.2.3.2. Données paramétriques

La lixiviation est très faible dans la roche mère. Elle est élevée dans le niveau nodulaire. L'induration potentielle en fer ferrique est presque nulle dans les migmatites de Gari-Gombo (GAR), de Ngoura (NGO) et dans celle de Batouri (BAT). Elle est élevée dans le niveau nodulaire de Yokadouma-Mboy II au PK 21+ 900 côté droit (YOK 1G) et dans celui de Ngoura-Yola au PK 76+700 côté droit (YOL 2G). L'induration est moyenne dans les niveaux nodulaires de Ngoura-Yola au PK 5+350 côté droit (YOL 1G), de Yokadouma-Bangué au PK 14+550 côté gauche (YOK 2G) et Bangué-Moloundou au PK 14+200 côté gauche (MOL 1G).

Le milieu, confiné dans la roche mère est très ouvert dans les niveaux nodulaires de YOL 1G, YOL 2G, YOK 2G, YOK 1G et MOL 1G.

Le diagramme triangulaire L-I-C (Fig. 51) montre que le milieu d'évolution des silicates est confiné dans les migmatites de Gari-Gombo, de Ngoura et de Batouri et que dans les matériaux des niveaux nodulaires de ces secteurs, le confinement cède la place à la lixiviation.

L'évolution d'ensemble du milieu d'altération, que présente le diagramme A-I-C de la figure 52, se présente sous un schéma différent, car le confinement dans la migmatite cède la place à l'altération et à l'induration-altération dans le niveau nodulaire.

Les diagrammes carrés des figures 53 et 54 traduisent le caractère du phénomène de ferrallitisation dans les matériaux des niveaux nodulaires des profils d'altération.

Les points représentatifs des matériaux YOL 1G, YOL 2G, YOK 1G, MOL 1G et YOK 2G sont situés dans le domaine de monosiallisation. La libération des oxyhydroxydes d'aluminium et celle des oxyhydroxydes des fers ferriques est moyenne pour les matériaux des niveaux nodulaires.

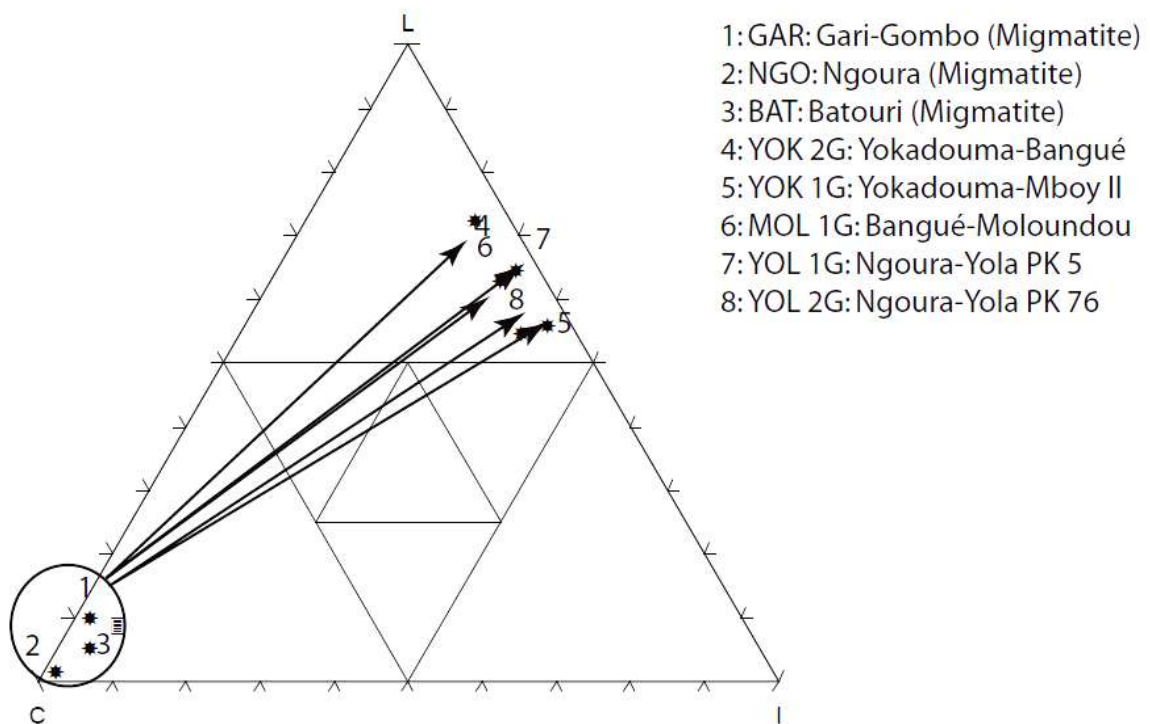
Ces libérations restent en dehors des zones de cuirassement.

Les valeurs de l'indice relatif de lixiviation potentielle et du degré virtuel d'altération des matériaux du niveau nodulaire sont respectivement 74 % et 74 % pour YOK 2G, 81 % et 81 % pour YOK 1G, 74 % et 74 % pour MOL 1G, 80 % et 61 % pour YOL 2G et enfin 85 % et 60 % pour YOL 1G. Ces valeurs indiquent la présence de kandites.

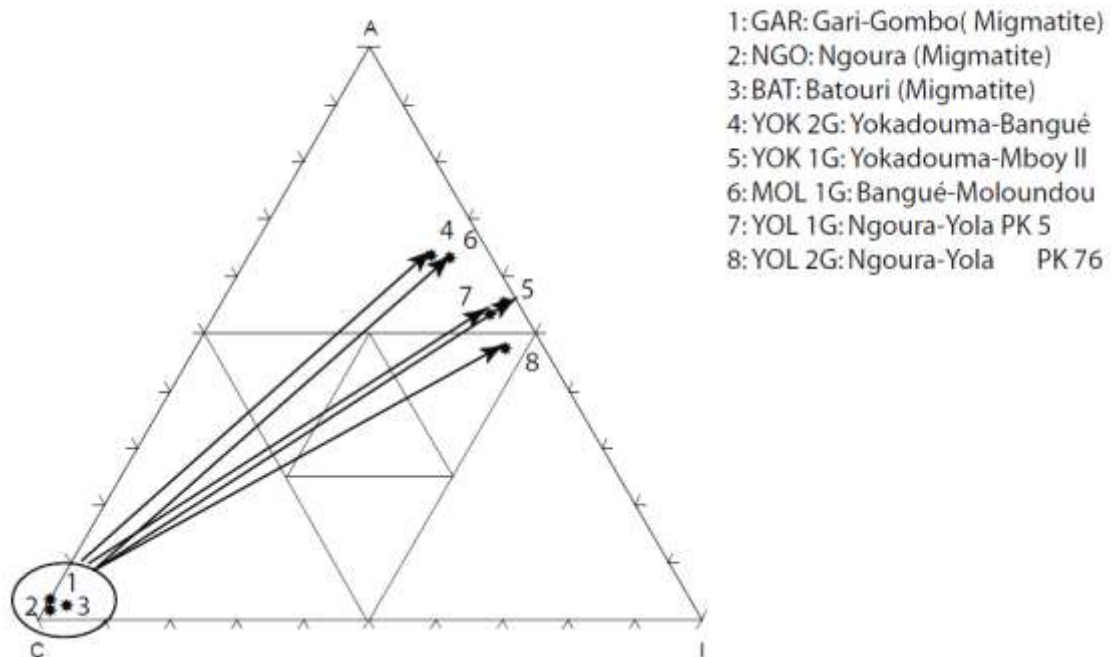
Ces minéraux ont un inconvénient potentiel pour les travaux du Génie civil, à cause de leur comportement plastique par imbibition d'eau. Les valeurs de DVRAR des migmatites de Gari-Gombo, de Ngoura et de Batouri ont des valeurs inférieures à 6 %.

**Tableau 26 :** Composition minéralogique virtuelle et paramètres altérologiques des secteurs de Batouri, Ngoura et Yokadouma

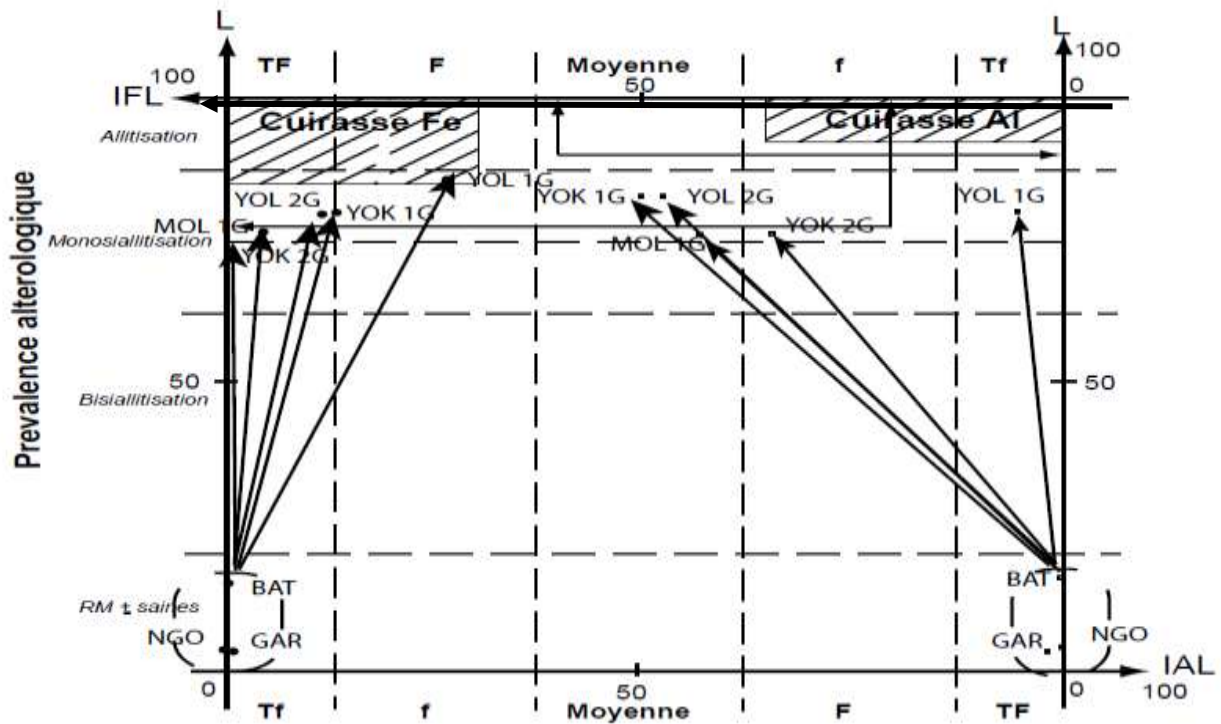
Partie du Profil	Roche mère	Niveau médian gravillonnaire			Roche mère	Niveau médian gravillonnaire	Roche mère	Niveau médian gravillonnaire
	Migmatite de Gari-Gombo	Niveau nodulaire	Niveau nodulaire	Niveau nodulaire	Migmatite de Ngoura	Niveau nodulaire	Migmatite de Batouri	Niveau nodulaire
<b>Nom de l'échantillon</b>	GAR	YOK 2G	YOK 1G	MOL 1G	NGO	YOL 2G	BAT	YOL 1G
<b>Frondeur (m)</b>								
<b>MNPANS</b>	1,23	1,61	2,54	2,53	1,00	1,41	1,54	1,49
<b>Sil I Ca- alc</b>	26,56	0,00	0,00	0,00	64,49	0,00	63,17	0,00
<b>Sil I Fe- Mg</b>	1,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00
<b>Sil II Ca- .alc</b>	11,16	2,83	0,44	2,03	4,79	2,03	4,31	1,24
<b>Sil II Fe- Mag</b>	0,00	0,37	0,09	0,37	0,74	0,18	1,54	0,18
<b>Kandites</b>	0,00	65,85	35,34	57,01	0,00	24,34	0,00	28,47
<b>Oxyhydrox Mn</b>	0,07	0,09	0,45	0,09	0,07	0,00	0,00	0,09
<b>Oxyhydrox Al</b>	0,00	0,05	11,60	1,53	0,00	10,40	0,17	23,82
<b>Oxyhydrox Fe</b>	0,00	28,12	48,06	35,07	0,48	49,13	0,00	20,47
<b>Silice</b>	60,00	0,00	0,00	0,00	27,87	11,40	29,88	23,16
<b>PPFAL</b>	Indéfini	0,00	0,24	0,04	0,00	0,26	∞	1,16
<b>IAL</b>	0,00	0,07	12,39	1,91	0,00	10,68	0,20	24,41
<b>IFL</b>	0,00	36,99	51,33	43,56	0,56	50,43	0,00	20,98
<b>IRLP (L)</b>	14,02	73,69	80,70	74,42	3,68	80,22	3,65	85,26
<b>DVRAR (A)</b>	5,59	73,69	80,70	74,42	2,64	61,31	2,56	59,57
<b>IRIP</b>	7,02	28,56	60,94	37,16	0,55	60,05	0,17	44,82
<b>IRCP</b>	100,00	4,62	1,12	3,93	100,00	5,98	100,00	2,64



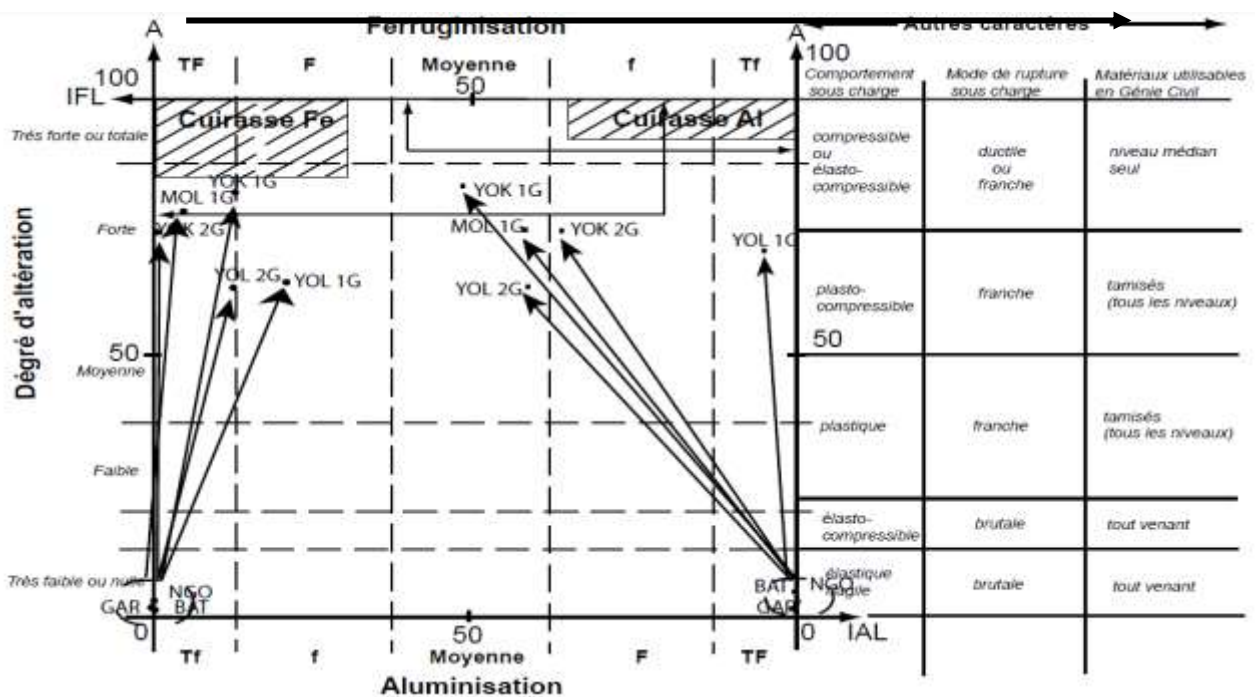
**Figure 51 :** Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les matériaux des secteurs de Gari-Gombo, Ngoura et Batouri (Ekodeck et Kamgang, 2002) ; L-I-C : Lixiviation, induration et confinement potentiel).



**Figure 52 :** Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les matériaux des secteurs de Gari-Gombo, Ngoura et Batouri (Ekodeck et Kamgang, 2002) ; A-I-C : altération, induration et confinement)



**Figure 53 :** Caractérisation de l'importance des facteurs pédogénétiques dans les matériaux de Gari-Gombo, de Ngoura et de Batouri (Ekodeck et de Kamgang, 2002) en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; L : Lixiviation potentielle



**Figure 54 :** Caractérisation de l'importance des facteurs pédogénétiques dans les matériaux de Gari-Gombo, de Ngoura et de Batouri (Ekodeck et de Kamgang, 2002) en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; L : Lixiviation potentielle

Ces valeurs obtenues de DVRAR indiquent que ces roches sont faiblement altérées.

Ces roches ont un comportement élastique fragile et une rupture brutale sous charge (Ekodeck, et Kamgang, 2002). Ces migmatites peuvent être utilisées comme matériau tout-venant après concassage, sur la couche de base ou sur la couche de roulement en béton bitumineux ou en enduits superficiels.

Les concassés de cette roche peuvent aussi être utilisés pour le béton hydraulique

#### **III.2.4. Comparaison et discussion des résultats**

Les formations des Régions de l'Est et du Sud soumises à l'altération ont subi une évolution qui a affecté leurs propriétés chimiques originelles. Les différents paramètres altérologiques analysés ayant les données chiffrées, expliquent les phénomènes qui influencent l'évolution de l'altération du granite, de migmatite et de gneiss des zonées étudiées. L'exploitation de divers diagrammes associés montre que le phénomène de ferrallitisation domine dans ces différentes zones d'étude.

Le diagramme triangulaire L-I-C montre que le phénomène dominant est la lixiviation. Toutes les substances dissoutes ( nitrate, phosphates etc..) sont entraînées vers la profondeur et les aquifères.

Le digramme triangulaire A-I-C montre que les phénomènes dominant sont l'altération et l'induration (séparation des éléments de roche suivi de leur durcissement) pour les gneiss et les migmatites et l'induration pour les granites.

Le diagramme rectangulaire L-IFL-IAL montrent que le phénomène dominant est la monosiallisation pour les granites et les migmatites. La silice, le fer ferrique et l'alumine pour les silicates formés représentent plus de 82 % en poids d'oxyde. Pour les gneiss, les phénomènes dominant sont l'allitisation et le cuirassement ferrugineux. Les matériaux d'altération sont les nodules qui sont au stade du début du cuirassement. Ils sont constitués généralement de goethite et d'hématite. L'expérience pratique montre que ces matériaux se comportent bien dans les couches de chaussée (couche de forme et couche de fondation)

Le digramme rectangulaire A-IFL-IAL montre que pour toutes roches étudiées, le phénomène dominant est l'altération moyenne à forte. Cette altération qui part de la roche mère, aboutit à la formation des altérites, à des graves latéritiques argileuses utilisables en construction routière et enfin à des argiles très plastiques.

Les résultats des paramètres altérologiques (DVRAR) obtenus, montrent que toutes les roches analysées sont à silicates non à très peu altérés. Ces roches peuvent être utilisées comme tout venant de concassage en couche de base, en couche de roulement du béton bitumineux et en béton hydraulique.



### III.3. ETUDES GEOTECHNIQUES DES FORMATIONS ROCHEUSES ET DES MATERIAUX MEUBLES NODULAIRES

Dans les projets de construction des routes, les études géotechniques sont souvent prises à la légère pendant l'étude de l'avant projet détaillé (APD) à partir duquel, les entreprises soumissionnaires des marchés se basent pour fixer les prix. Cela a pour conséquence, la dégradation rapide des chaussées construites dans ces conditions avant la durée prescrite lors de dimensionnement. Cette dégradation a été constatée sur plusieurs routes au Cameroun. L'on accuse parfois des entreprises ayant exécuté les travaux de l'incompétence.

Lorsqu'on constate que l'étude géotechnique a été prise à la légère pendant l'exécution des travaux surtout pour les quantités des purges et des déblais, l'enveloppe du marché augmente considérablement ainsi que le délai d'exécution. Les cas sont plus nombreux, l'on peut citer:

➤ le cas de la route d'Ayos-Abong-Mbang, où l'enveloppe initiale du marché était **dix sept milliards environ** pour un délai de deux ans en 2005, date de début des travaux mais, à la réception des travaux en septembre 2010, à cause des quantités supplémentaires des purges, de couche de forme, de déblais etc...qui n'avaient pas été pris en compte lors de l'étude d'avant projet détaillé (APD), s'ajoutant aussi de l'augmentation des prix des produits (bitume, carburant etc..) sur le marché, le coût du projet est monté à environ **vingt neuf milliards** et le délai d'exécution à cinq ans au lieu de 2 ans initialement prévus.

➤ le cas de la route Mbama-messamena en cours de construction en 2017, l'étude de l'APD a évalué le volume de purge à **75 000 m<sup>3</sup>** pour un montant d'**un milliard deux cent millions environ**. Lors de l'étude des zones marécageuses par l'entreprise en 2015 dans le but de confection du projet d'exécution, le volume des purges quantifié est de **180505 m<sup>3</sup>** pour un montant de **deux milliards sept cent cinquante millions environ**, sans compter le coût de la couche de forme, de déblais etc.... Ceci va sans doute augmenter considérablement l'enveloppe du marché et le délai d'exécution. L'Etat est dans l'obligation de chercher ce coût supplémenataire, soit par les bailleurs, soit par ces propres moyens Dans ces conditions, parfois les couches de chaussée ne sont pas exécutées successivement pour manque de financements, et cela fragilise la chaussée bien que les travaux sont exécutés suivant les règles de l'art. La géotechnique reste le socle du corps de la chaussée. Elle doit être étudiée sérieusement lors de l'APD dans le but d'identifier :

- les matériaux de la plate-forme existante au cas, où la route du nouveau projet suit le même itinéraire, car ces matériaux peuvent être réutilisés ou substitués,
- les matériaux des carrières latéritiques à utiliser, leur localisation par rapport à l'axe de la route et leurs cubatures,
- les matériaux des zones compressibles, s'il y en a, afin de bien quantifier le volume des purges. Pour le cas des routes en terre, l'entretien doit être régulier enfin d'éviter des dégradations

importantes qui empêchent les usagers de circuler librement. Un accent doit aussi être mis sur les barrières de pluies. Il a été constaté que, quelle que soit la portance du sol (CBR) ou ses caractéristiques géotechniques autres, en cas de pluies, si les barrières de pluies ne sont pas opérationnelles, les routes sont vite dégradées avec création de ravines ou de bourbiers répétés. Ces dégradations mettent en cause le comportement des matériaux, alors que ces derniers sont de bonnes qualités. C'est pourquoi, le Ministère des Travaux Publics doit veiller sur l'entretien et le suivi des barrières de pluies. Il est à noter que la tenue de la chaussée (route en terre) à certains endroits, dépend aussi des matériaux de bases utilisés sur l'assise de la route (plate-forme). Parfois, par manque de matériaux de bonne qualité ou à cause de petite enveloppe, l'entreprise se voit obligé d'utiliser les matériaux argileux rencontrés sur place, ce qui ne garanti pas la tenue de la chaussée ; d'où la nécessité d'un investissement dans ce sens pour remplacer ce genre de matériaux.

La dégradation de routes en terre peut être due aussi aux tôles ondulées, si l'entretien n'est pas régulier. Et l'usure annuelle pour un trafic journalier des gros porteurs allant de 100 à 300, peut atteindre plus de 5 cm en moyenne, parfois plus pour des raisons liées à la nature des matériaux et au degré du trafic . Elle peut être également causée par l'insuffisance du compactage du bloc technique au niveau des ouvrages d'art ou au niveau des couches de chaussées par manque du matériel adéquat des Petites et Moyennes Entreprises (P.M.E) alors que les matériaux sont des bonnes qualités

La dégradation peut aussi être accentuée par le manque de suivi d'assainissement des ouvrages existants (buses) qui une fois obstruée, détruisent considérablement la chaussée quelque soit la nature des matériaux utilisés. On peut citer le cas d'une buse du PK 3+000 de la route Ngoura –Yola, une fois obstruée en 2006 a causé une détérioration de la route bloquant ainsi la circulation pendant 3 jours et occasionnant ainsi des dépenses énormes d'une somme de plus de dix millions à la place de trente huit mille six cent cinquante franc s CFA prévu pour curage.

Au vu de ce qui précède, lors de l'entretien ou de construction des routes, quelque soit la nature des matériaux utilisés (portance élevée), l'accent doit être mis sur l'assainissement et sur le respect des barrières des pluies pour les route en terre.

### **III.3.1. ESSAIS SUR LES MATERIAUX DES ROCHES DE LA REGION DE L'EST**

Dans la Région de l'Est, les essais ont été effectués sur les matériaux provenant des carrières des roches massives de Bent, de Bertoua, de Ngoura et de Nguélemendouka et des carrières des sols latéritiques pour les projets de construction des routes revêtues et de l'entretien des routes en terre.

Pour le projet des routes en terre, les essais in-situ sur la plate-forme, sur la couche de roulement ont été effectués ainsi que les sondages pénétrométriques au niveau des ouvrages d'arts.

Pour le projet des routes revêtues, les essais in-situ sur la plate-forme, sur la couche de fondation, sur la couche de base en concassés 0/31.5 et sur la couche de roulement en béton bitumineux 0/10 ont été aussi réalisés.

### **III.3.1.1. Essais sur les carrières des roches massives**

Les caractéristiques géotechniques des roches massives des carrières de la Région de l'Est sont récapitulées dans le tableau 27.

De l'analyse de ces résultats, il ressort que les granites de Bertoua, de gneiss granitique de Bent et de Nguélémdouka ont une dureté (Los Angeles), un coefficient d'aplatissement et un CBR satisfaisantes pour les travaux routiers par rapport aux roches de Nguélémdouka et de Ngoura.

Pour des raisons des travaux de construction de la route Ayos-Bonis en cours en 2008, la carrière de Bent qui est proche de cette route, a été sollicitée pour l'étude de formulation du béton hydraulique 0/25 pour le contrôle des résistances du béton des ouvrages d'art et l'étude de formulation du béton bitumineux 0/14 destinée à la couche de roulement.

#### **III.3.1.1.1. Formulation du béton hydraulique**

Pour formulation du béton hydraulique, la méthode utilisée est celle de Dreux (1981). Elle consiste, connaissant les caractéristiques géotechniques des constituants et en se basant sur un certain nombre d'hypothèses (nature d'ouvrage, résistance demandée et consistance désirée), à calculer la composition théorique de béton et de l'ajuster par quelques gâchées expérimentales.

Ainsi, trois (3) formulations ont été arrêtées à savoir : la formulation pour un dosage de 300 kg/m<sup>3</sup> de ciment destinée aux petits ouvrages, pour un dosage de 350 kg/m<sup>3</sup> de ciment destinée aux buses et dalots et pour un dosage de 400 kg/m<sup>3</sup> de ciment destinée aux ponts. Ces formulations ainsi que les résultats d'écrasement à 7 jours et à 28 jours sont récapitulés dans le tableau 28.

##### **III.3.1.1.1.1. Essais de comparaison d'écrasement des bétons**

Pour ces formulations des bétons hydrauliques, plusieurs écrasements ont été effectués, soit sur la presse à béton, soit au scléromètre. Les résultats d'écrasement des bétons sont présentés par la figure 55. A partir de résistance obtenue à 7 jours, on peut déterminer la résistance du béton à n jours (tableau 29). Ces résultats de compression obtenus à l'aide de deux appareils différents ont fait l'objet d'une comparaison. De cette comparaison, il ressort que les résultats issus d'écrasement à la presse sont plus élevés que ceux issus du test d'écrasement au scléromètre à 7 jours

En appliquant le coefficient de corrélation, on trouve une équation de droite pour l'écrasement à sept jours. Cette équation est la suivante:

$$\text{- à 7 jours : } Y = 0,24\ 46X + 19,667 ; N = 15 ; r = 0,85$$

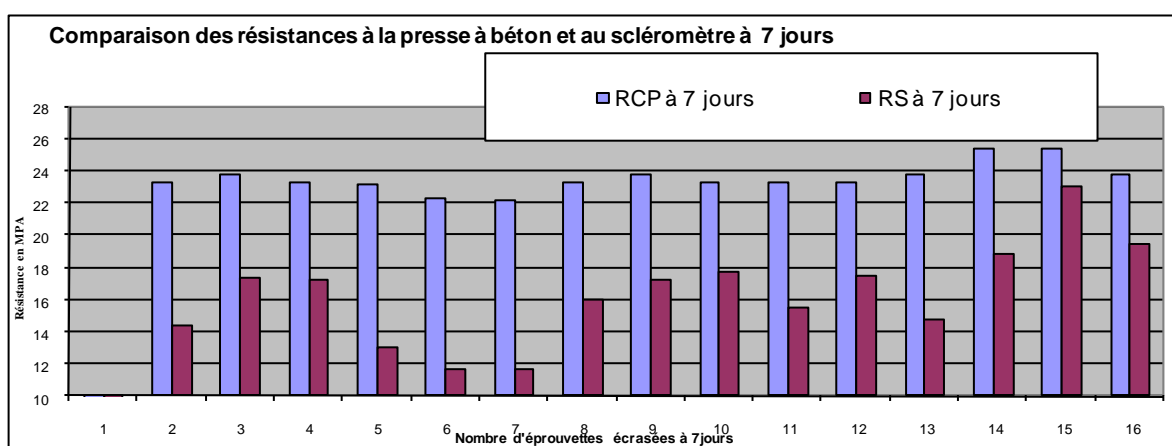
**Tableau 27** : Caractéristiques des matériaux des carrières des roches massives

	Granité de Bertoua	Gneiss de Bent	Gneiss de Ngue lémendouka	Migmatite de Ngoura	Migmatite de Ngoura
CBR	150	140	135		
Ys	2,800	2.760	2,730	2,620	2,45
LA	18	23	28	36	35
MD	13	15	19	27	26
CA	16	19	20	28	27
ES		81			
Yd		1.350			

**NB.** Le Los Angeles a été réalisé sur la classe granulaire 10/14

**Tableau 28** : Composition du béton et détermination de sa résistance à 28 jours

Désignation	Béton Q300	Béton Q350	Béton Q400
Gravier 12,5/25	995 kg/m <sup>3</sup>	921 kg/m <sup>3</sup>	872 kg/m <sup>3</sup>
Gravier 5/12,5	215 kg/m <sup>3</sup>	208 kg/m <sup>3</sup>	232 kg/m <sup>3</sup>
Sable concassé 0/5	679 kg/m <sup>3</sup>	700 kg/m <sup>3</sup>	763 kg/m <sup>3</sup>
Ciment CPJ 45	300 kg/m <sup>3</sup>	350 kg/m <sup>3</sup>	400 kg/m <sup>3</sup>
Eau de gâchage	174 l/m <sup>3</sup>	182 l/m <sup>3</sup>	208 l/ m <sup>3</sup>
Plasti-retard	500 ml/ m <sup>3</sup>	1080 ml/m <sup>3</sup>	1200 ml/ m <sup>3</sup>
Densité théorique	2363 kg/m <sup>3</sup>	2362 kg/m <sup>3</sup>	2476 kg/m <sup>3</sup>
Slum-Test			
RC à 7 jours en MPA	20	27	29
RC à 28 jours en MPA	26	34	36
Exigences du CCTP	19	24	27



$$Y = 0,2446X + 19,667$$

$$R = 0,85$$

RCP : Résistance à la presse à béton, RS : Résistance au scléromètre

**Figure 55** : Comparaison des résistances à la presse à béton et au scléromètre

Où Y = Résistance du béton à la presse à béton

X = Résistance du béton au scléromètre

N = Nombre d'éprouvettes écrasées, r = Coefficient de corrélation.

Etant donné que le nombre d'éprouvettes écrasées n'est pas beaucoup (15), cette corrélation, est à titre indicatif. Seules les études futures qui seront effectuées sur un bon nombre d'éprouvettes pourront sortir une vraie corrélation entre ces deux appareils.

### **III.3.1.1.1.2. Formulation du béton bitumineux (0/14)**

La formulation de béton bitumineux peut être obtenue à partir de deux méthodes à savoir : La méthode mathématique et la méthode de logiciel. C'est la méthode de logiciel qui a été utilisée au cours de ce travail. Pour cette dernière méthode, les données introduites dans le programme de calcul sont récapitulées dans le tableau 30.

Après avoir introduit ces données, il ressort d'un programme ayant les données suivantes :

- tableau de calcul des coefficients qui donne la 1<sup>ère</sup> formule (Tab. 31),
- calcul de surface spécifique et teneurs en bitume (Tab. 32).
- tableau de proposition de formules retenues ainsi que les données des courbes de mélange pour chaque formule (Tab. 33). Parmi les trois formules proposées (Tab. 34), on a choisi au hasard d'étudier la 3<sup>ème</sup> formule, à savoir : 10/14 = 34 % ; 6/10 = 11 % et 0/5 = 55 %.

- Ce tableau permet de calculer à partir des formules retenues partant de la 1<sup>ère</sup> qui est de 29 % pour 10/14 et de 16 % de 6/10 : le module de richesse (K), la masse volumique réelle du mélange hydrocarboné (MRV) et la teneur en liant. K est compris entre 3,4 et 3,9. Il faut noter que la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> formule ne sont pas choisies au hasard, on tient compte de fuseau de spécification.

La formule numéro 3 proposée donne une courbe cumulée qui entre dans le fuseau de spécification prévu pour le mélange à blanc (Tab. 35 et Fig. 56). Et les courbes granulométriques à partir de cette formule après l'extraction de bitume pour les différentes teneurs en liant utilisées (5,2 % ; 5,4 % ; 5,5 % ; 5,6 % et 5,8 %) passent à l'intérieur de fuseau de spécification de 0/14 (Tab. 36).

Les caractéristiques mécaniques obtenues pour cinq teneurs en bitume utilisées pendant cette formulation du béton bitumineux sont récapitulées dans le tableau 36

Pour les cinq teneurs en liants utilisées dans la formule numéro 3 (10/14 = 34 % ; 6/10 = 11 % et 0/5 = 55 %) à savoir : 5,2 ; 5,4 ; 5,5 ; 5,6 et 5,8 %, il ressort que :

- toutes les courbes granulométriques après extraction de bitume pour les teneurs en liant étudiées passent à l'intérieur du fuseau de spécification (Tab. 35) ;

les caractéristiques mécaniques obtenues pour les 5 teneurs en liant sont conformes aux exigences du CCTP dans l'ensemble (Tab. 36), mais l'on constate que la teneur en liant de 5,5 % qui est par ailleurs une teneur en liant minimale pour le BB 0/14 (S.E.T.R.A-L.C.P.C, 1984) donne,

**Tableau 29** : Coefficient à appliquer pour déterminer la résistance du béton à n jours

Nombre de jours	$\frac{R_n}{R_7}$	$\frac{\sigma_j}{\sigma_7}$	Nombre de jours	$\frac{R_n}{R_7}$	$\frac{\sigma_j}{\sigma_7}$
7 jours	1	1	60 jours	1,60	1,59
14 jours	1,19	1,27	90 jours	1,66	1,65
21 jours	1,31	1,38	6 mois	1,77	1,74
28 jours	1,40	1,45	1 an	1,83	1,81
45 jours	1,53	1,54	2 ans	1,85	1,87

**Tableau 30** : Analyse des constituants granulaires de gneiss de Bent pour la formulation de BB

Tamis (mm)	% Tamisats cumulés		
	10/14	6/10	0/5
16	100	100	100
14	92,80	100	100
12,5	49,50	97,10	100
10	6,90	88,20	100
8	3	49,70	100
6,3	2,40	9	100
5	2	3,90	99,40
4	1,20	1,40	88,60
2,5	0,90	0,90	64,70
2	0,90	0,90	53,50
1	0,90	0,80	32,10
0,5	0,80	0,80	23,40
0,080	0,60	0,60	12,60
<b>B</b> : Poids spécifiques (T/m <sup>3</sup> )	2,78	2,78	2,76
<b>C</b> : Equivalent de sable (%)			81
<b>D</b> : Coefficient d'aplatissement	19	21	
<b>E</b> : Coefficient de Los Angeles	23	26	

**Tableau 31** : Calcul des coefficients pour la formulation de BB

u <sub>1i</sub>	u <sub>2i</sub>	u <sub>1i</sub> <sup>2</sup>	u <sub>2i</sub> <sup>2</sup>	u <sub>1i</sub> *u <sub>2i</sub>	u <sub>1i</sub> *U <sub>i</sub>	u <sub>2i</sub> *U <sub>i</sub>	matrice	
t <sub>1i</sub> -t <sub>3i</sub>	t <sub>2i</sub> -t <sub>3i</sub>						47127,77	39298,65
-7,2	0	51,84	0	0	14,4	0	39298,65	36015,24
-50,5	-2,9	2550,25	8,41	146,45	757,5	43,5		
-97	-50,3	9409	2530,09	4879,1	3492	1810,8	matrice inverse	
-97,6	-91	9525,76	8281	8881,6	4196,8	3913	0,000235495	-0,000256965
-97,4	-95,5	9486,76	9120,25	9301,7	4227,16	4144,7	-0,000256965	0,000308157
-87,4	-87,2	7638,76	7603,84	7621,28	3461,04	3453,12		
-63,8	-63,8	4070,44	4070,44	4070,44	1831,06	1831,06		mat col
-52,6	-52,6	2766,76	2766,76	2766,76	1236,1	1236,1		
-31,2	-31,3	973,44	979,69	976,56	439,92	441,33		19955,82
-22,6	-22,6	510,76	510,76	510,76	235,04	235,04		17173,45
-12	-12	144	144	144	64,8	64,8		
-619,3	-509,2	47127,77	36015,24	39298,65	19955,82	17173,45		

							Coef calculés	
							Coef. de X1	29%
							Coef. de X2	16%
							Coef. de X3	55%
<b>OBSERVATIONS</b>								
Ces coefficients donnent la 1ère formule à utiliser et à partir de laquelle, découlent d'autres formules.								

**Tableau 32** : Calcul de surface spécifique

	fuseau 1er choix	fuseau 2è choix	fuseau 3è choix	Spécifications
% éléments à 6,3mm	57,1	56,9	56,8	
% éléments à 0,315mm	10,6	10,6	10,6	
% éléments à 0,08	7,2	7,2	7,2	
G	42,9	43,1	43,2	
S	46,6	46,4	46,2	
s	3,4	3,4	3,4	
f	7,2	7,2	7,2	
□	11,30	11,30	11,30	10 - 15kg/m <sup>2</sup>
γ <sub>s</sub>	2,77	2,77	2,77	
□	0,958	0,958	0,958	
Teneur en liant	5,4%	5,4%	5,4%	5,5 - 6,5%
Ce tableau présente les surfaces spécifiques et teneurs en liant pour les trois formules retenues				

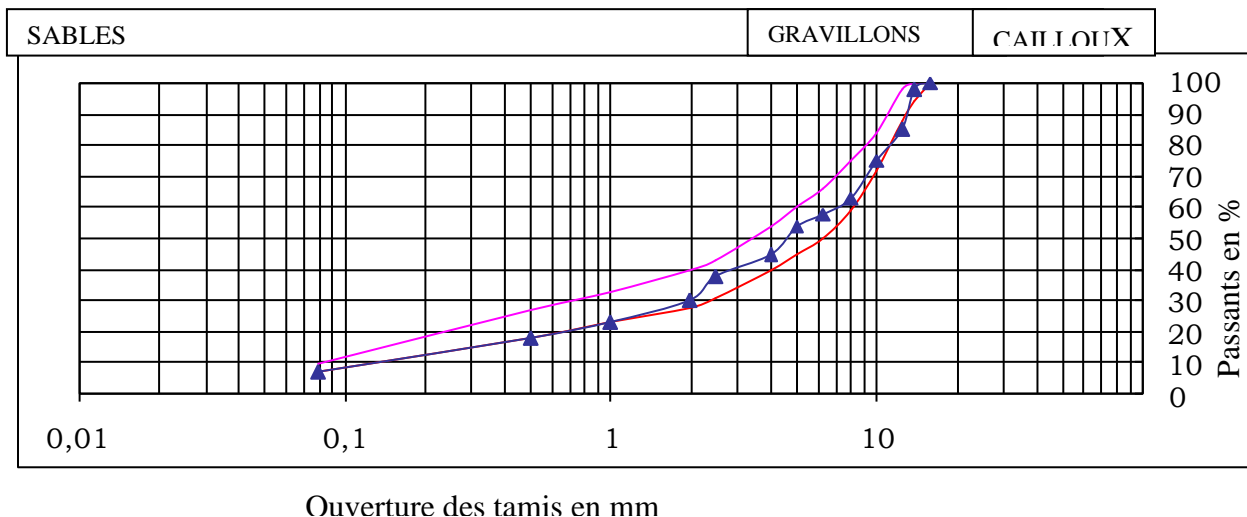
**Tableau 33** : Fuseau de spécification pour 0/14 ainsi que la courbe du mélange à blanc de 10/14 = 34 % ; 6/10 = 11 % et 0/5 = 55 %.

Tamis (mm)	Courbe inférieure	Courbe supérieure	Courbe du mélange
16	100	100	100
14	94	100	98
12,5	88	98	85,1
10	72	84	75,2
8	59	75	63
6,3	50	66	58
5	45	60	54
4	40	54	45
2,5	31	43	38
2	28	40	30
1	23	33	23
0,5	18	27	18
0,08	7	10	7,2

**Tableau 34** : Proposition des formules retenues pour le béton bitumineux (BB)

Coef calculés		1 <sup>er</sup> choix			fuseau réel	fuseau théo	fuseau 1 <sup>er</sup> choix	fuseau 2 <sup>e</sup> choix	fuseau 3 <sup>e</sup> choix
Coef. de X1	28,65%	Coef de S1	29%		97,9	100	97,9	97,7	97,6
Coef. de X2	16,42%	Coef de S2	16%		85,1	85_100	84,9	83,5	82,5
Coef. de X3	54,93%	Coef de S3	55%		63,9	76,5_91,5	63,8	62,4	61,5
					57,1	68_83	57,1	56,9	56,8
		2 <sup>eme</sup> choix			55,8	60_75	55,9	55,8	55,8
					49,2	55_68	49,3	49,3	49,3
		Coef de S1	32%		35,9	45_56	36,0	36,0	36,0
		Coef de S2	13%		29,8	40_50	29,8	29,8	29,8
		Coef de S3	55%		18,0	27_39	18,0	18,0	18,0
					13,2	18_28	13,2	13,2	13,2
		3 <sup>eme</sup> choix			7,2	7_10	7,2	7,2	7,2
		Coef de S1	34%		K		3,5		
		Coef de S2	11%		teneur en liant		5,4%	5,4%	5,4%
		Coef de S3	55%						
					MVR		2,544	2,544	2,544
					C		94%	94%	94%
					Vr		6%	6%	6%





**Figure 56.** Courbe granulométrique pour le mélange des granulats à blanc

**Tableau 35.** Composition granulométrique après extraction de bitume pour chaque teneur en bitume étudiée

Analyse granulométrique	Teneurs en bitume					Fuseau de spécification
	5,20 %	5,40 %	5,50 %	5,60 %	5,80 %	
Tamis (mm)	5,20 %	5,40 %	5,50 %	5,60 %	5,80 %	
14	98	97	88	98	97	94 – 100
10	73	73	70	72	67	72 – 84
6.3	61	59	60	60	57	50 – 66
4	45	45	49	55	51	40 – 54
2	37	35	37	39	38	28 – 40
0.80	7,60	7,30	7,60	7,40	8,20	7 - 10

**Tableau 36.** Caractéristiques mécaniques obtenues des matériaux pour le BB

Désignation	Caractéristiques mécaniques obtenues					Spécification du CCTP
Teneur en Bitume en %	5,20	5,40	5,50	5,60	5,80	
Module de richesse	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,30 - 3,90
<b>DURIEZ</b>						
RC en bars	64	63	64	63	62	> 60
R <sup>c</sup> en bars	56	53	57	57	55	
R <sup>c</sup> /Rc	0,86	0,84	0,90	0,89	0,88	> 0,75
Densité apparente en t/m <sup>3</sup>	2,39	2,39	2,40	2,41	2,40	
Masse volumique réelle du mélange t/m <sup>3</sup>	2,54	2,54	2,54	2,54	2,54	
Compacité en %	94	94	94	95	94	92 - 95
<b>MARSHALL</b>						
Teneur en bitume en %	5,20	5,40	5,50	5,60	5,80	
Stabilité Marshall en Kg	1305	1275	1248	1210	1148	750 - 1200
Fluage en 1/10mm	3,30	3,50	3,50	3,70	3,70	< 4
Densité apparente en t/m <sup>3</sup>	2,48	2,50	2,49	2,49	2,50	
Compacité en %	98	98	98	98	98	92 - 96

les caractéristiques mécaniques très conformes aux spécifications du CCTP par rapport aux autres teneurs en liant.

C'est cette formule qui a été retenue et utilisée pour le projet Ayos-Bonis. Les résultats issus de cette formule à savoir : les essais Duriez, Marshall et de carottage sont conformes aux spécifications du CCTP. Cette conformité assure un bon comportement de ces matériaux sur la chaussée.

### **III.3.2. ESSAIS SUR LES MATERIAUX ROCHEUX DE LA REGION DU SUD**

Dans la région du Sud deux carrières ont été concernées par notre étude. Il s'agit de la carrière d'Andom située au PK 54+000G de la route Nkoemvon-Ambam et à 1,5 km par rapport à l'axe de la route et de la carrière de Meyo-Nyaka située au PK 11+000 G de la route Ambam-Kye-Ossi et à 1 km par rapport à l'axe de la route.

#### **III.3.2.1.. Résultats des essais réalisés**

Pour ces deux carrières seuls les essais d'identification (AG, ES, CA, DA, OPM et CBR) ont été réalisés. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 37 et sous forme de courbes granulométriques (Fig. 57)..

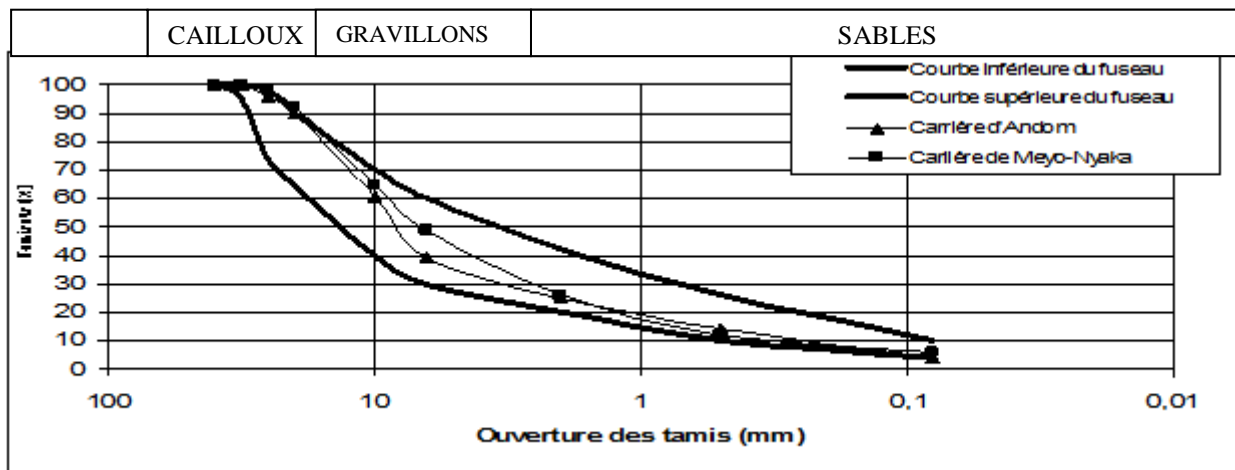
Il faut signaler qu'ici, le contrôle de fabrication des gravillons destinés au revêtement a été réalisé sur les granulats de classe 6/10 et 10/14.

#### **III.3.2.2. Analyse des résultats des essais réalisés**

De l'analyse des résultats obtenus (Fig. 57 et Tab. 37), on constate que la courbe granulométrique moyenne de dix courbes effectuées pour les deux carrières passe à l'intérieur du fuseau de spécification. Les valeurs des coefficients d'aplatissement (CA), d'Equivalent de sable (ES) et de Los Angeles (LA) sont conformes aux exigences du CCTP.

### **III.3.3. Comparaison des résultats d'identification des carrières de la Région de l'Est et du Sud**

Les résultats d'identification des carrières des roches de la Région de l'Est et du Sud récapitulés dans le tableau 38 montrent que les granites et les gneiss de l'Est sont plus résistants que les gneiss et les granites du Sud. Malgré cette différence, les caractéristiques géotechniques obtenues pour tous ces substratums (Los Angeles, Micro-Deval etc..) montrent que toutes ces carrières sont conformes aux prescriptions du CCTP pour être utilisées en construction routière, en se basant surtout sur le critère de Los Angeles Il est à noter que les roches du Sud sont plus résistantes que les migmatites de l'Est.



**Figure 57** : Courbes granulométriques de 0/25 provenant de la carrière d'Andom et Meyo-Nyaka

**Tableau 37** : Caractéristiques des gneiss des carrières d'Andom et de Meyo-Nyaka

	ES (%)	CA	LA (%)	DA (T/m <sup>3</sup> )	OPM		CBR (%)
					$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	
Andom	78	16	30	1,76	2,33	6	175
Meyo-Nyaka	74	18	32	1,72	2,35	5,6	

E.S : Equivalent de sable, LA : Los Angeles, D.A : Densité apparente, OPM : Optimum Proctor Modifié, CBR : californian Bearing-Ratio.

**Tableau 38**: Identification des carrières des roches de l'Est et du Sud

	Granité de Bertoua	Gneiss de Bent	Gneiss de Ngulémen douka	Gneiss d'Andom	Gneiss de Meyo	Migmatite de Ngoura	Migmatite de Batouri	Exigences du CCTP
CBR en %	150	140	135	140	133			$\geq 80$
$\gamma_s$ kg/m <sup>3</sup>	2800	2760	2730	2740	2730	2680	2700	
LA en %	18	23	26	30	32	35	33	< 35
MD en %	13	15	19	16	17	24	26	< 20
CA en %	16	19	20	16	18	28	27	< 25
ES en %		81		78	74			
$\gamma_d$ kg/m <sup>3</sup>		2350		2330	2350			

Les migmatites de Batouri et de Ngoura ne sont pas conformes pour être utilisées en construction routière (couche de base, couche de roulement et ouvrages d'art). Cette conformité des caractéristiques déterminées des granites de l'Est et des gneiss de l'Est et du Sud garantie la tenue de l'ouvrage si la mise en œuvre sur le terrain respecte les règles de l'art. Le Los Angeles a été réalisé sur la fraction 10/14.

### **III.3.3.1. Intérêt des matériaux (cas des roches)**

Les granulats concassés étudiés sont utilisés, en couche de base en grave concassé 0/31.5 (Fig. 58), en couche de roulement du béton bitumineux (Fig. 59), en couche de roulement en enduits superficiel (Fig. 60), en béton hydraulique pour la construction des ouvrages d'art (Fig. 61).

### **III.3.3.2. Dégradations**

Les matériaux issus des roches et utilisés dans les travaux de chaussée se dégradent, soit à cause de manque d'assainissement de la chaussée (Fig. 62), soit à cause de manque de parking des gros porteurs (Fig. 63), soit à cause de la non protection directe de la couche de base imprégnée par la couche de roulement en béton bitumineux (Fig. 64), soit à cause de sous estimation de classe de trafic lors du dimensionnement (Fig. 65).

### **III.3.3.3. Recommandations**

- Dimensionner la chaussée à partir de l'étude géotechnique bien réalisée et de la classe de trafic bien définie (facteurs majeurs de la tenue de l'ouvrage);
- Imprégner la couche de base dans un délai ne dépassant pas une semaine pour conserver les fines;
- Couvrir la couche de base du béton bitumineux dans un délai ne dépassant pas trois mois;
- Prévoir des parkings pour les gros porteurs dans chaque centre de commerce et par endroit tout le long de l'itinéraire;
- Utiliser la roche de bonne qualité et veillez au coefficient d'aplatissement pour éviter de mettre en œuvre les matériaux dont la forme est fragile;
- Mettre l'accent sur l'assainissement.



**Figure 58:** Mise en oeuvre de la couche de base en 0/31.5 au PK 0+00 de la route Mbama-Messamena en 2017



**Figure 59.** Mise en oeuvre de la couche de roulement en béton bitumineux 0/10 au PK 4+100 de la route Mbama-Messamena en 2017



**Figure 60.** Mise en oeuvre des enduits superficiels bicouche 6/10 et 10/14 au PK 0+040 voie n°10 voirie d'Abong-Mbang en 2017



Figure 61. Construction d'un dalot double au PK 45 de la route Abong-Mbang - Bonis en 2009



**Figure 62.** Dégradation due au manque d'assainissement PK 0+020: de la route Abong-Mabng - Bonis 2017



**Figure 63.** Dégradation due au manque des parkings des gros porteurs PK 52+000: de la route Abong-Mabng - Bonis 2017



**Figure 64.** Dégradation due à non protection de la couche de base imprégnée au PK 72+000 de la route Abong-Mbang - Bonis 2009



**Figure 65.** Dégradation due au sous dimensionnement au PK 2+300 de la route Ayo-Ayong-Mbang en 2017

### **III.3.4. ESSAIS SUR LES MATERIAUX DES SOLS LATERITIQUES DE LA REGION DE L'EST**

Au total 129 carrières des sols latéritiques de l'horizon nodulaire ont été analysées dans la Région de l'Est. Les résultats d'analyse des matériaux sont regroupés par nature de substratum, à savoir : - les granites, les gneiss, les migmatites et les schistes.

#### **III.3.4.1. Résultats des matériaux utilisés sur les routes Abong-Mbang- Bonis et Mandjou-Batouri**

Les résultats d'analyse des matériaux des carrières issues d'altération des granites (Fig. 66) se présentent sous forme des courbes granulométriques d'une part (Fig. 67, 68, 69 et 70) et d'autre part, sous formes des tableaux récapitulatifs des caractéristiques géotechniques obtenues (Tab. 39 et 40). La synthèse de ces résultats qui sont consignés aussi dans le tableau 41, où ils sont comparés aux résultats des carrières situées de part et d'autre de la route Nkoemvon-Ambam située aussi dans la zone de granites, sont détaillés dans le tableau A3 en annexe. L'analyse montre que toutes les courbes granulométriques passent à l'intérieur du fuseau granulométrique de graveleux latéritiques proposé par CEBTP (1984) pour les matériaux destinés à être utilisés en couche de fondation des routes revêtues et en couche de roulement ou en remblai des routes en terre. Les autres caractéristiques géotechniques sont conformes aux exigences du CCTP à savoir: le CBR; la  $\omega_L$  l'IP, les passants au tamis de 80  $\mu\text{m}$  et  $\gamma_d$ . Au vu de ces caractéristiques géotechniques conformes obtenues, les matériaux issus d'altération des granites sont qualifiés de très bons matériaux pour la couche de fondation dont la classe de trafic est de T3.

#### **III.3.4.2. Matériaux issus de l'altération des gneiss**

Les matériaux des carrières issues d'altération des gneiss (Fig. 71) ont été utilisés sur les routes d'Ayos-Abong-Mbang (Mayos-Abong-Mbang), de Doumé-Nguélémeidouka, de Mampang-Angossas-Mboma, de Mbet-Nguélémeidouka-Mboma, d'Abong-Mbang-Doumé, d'Abong-Mbang-Palisco et de Kobi-Mbang.

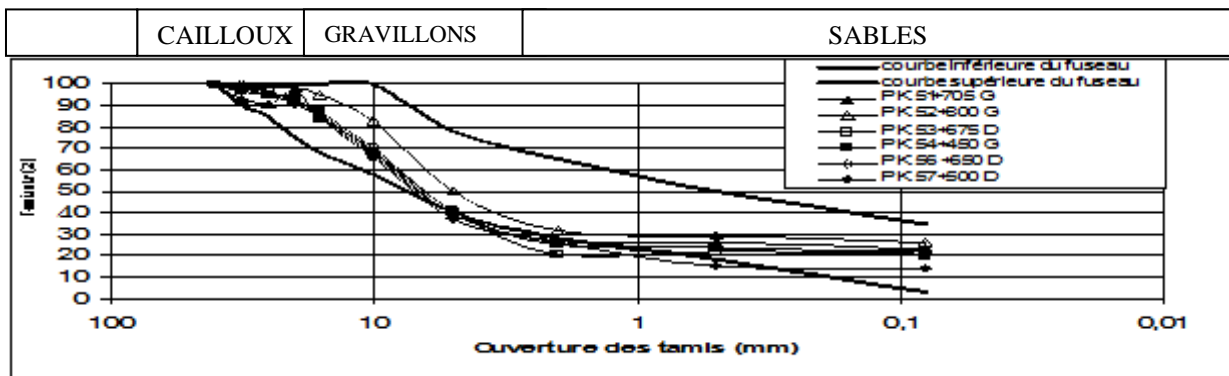
Les résultats d'analyse sont présentés sous forme des courbes granulométriques et sous forme des tableaux.

##### **III.3.4.2.1 Résultats des matériaux utilisés sur la route Ayos-Abong-Mbang**

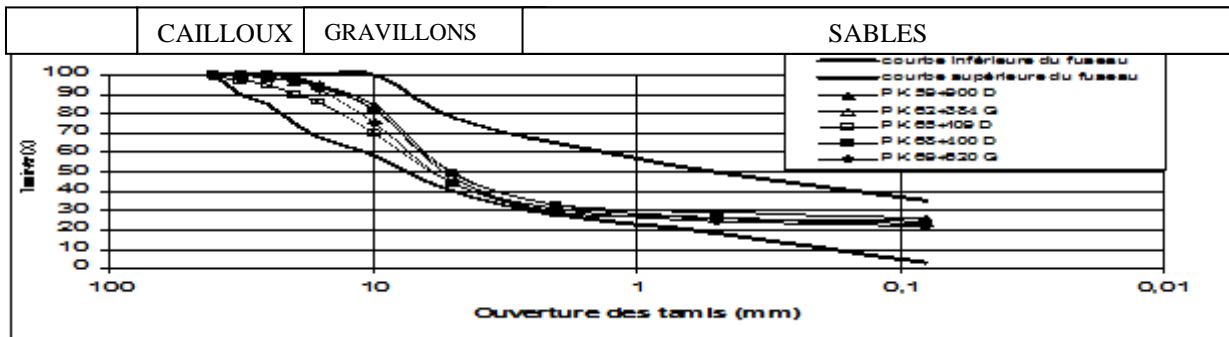
Ces résultats sont présentés sous formes des courbes granulométriques (Fig. 71, 72, 73, 74 et 75), et sous forme des tableaux (Tab. 42 et 43). Le tableau A4 en annexe les présente dans le détail. La majorité des courbes granulométriques des matériaux provenant des carrières passent à l'intérieur du fuseau granulométrique proposé par le Centre de Recherches d'Etudes des Bâtiments et des Travaux Publics (1984) pour les matériaux destinés à être utilisés en couche de fondation des routes revêtues (pour la classe de trafic T3) et en couche de roulement pour les routes en terre.



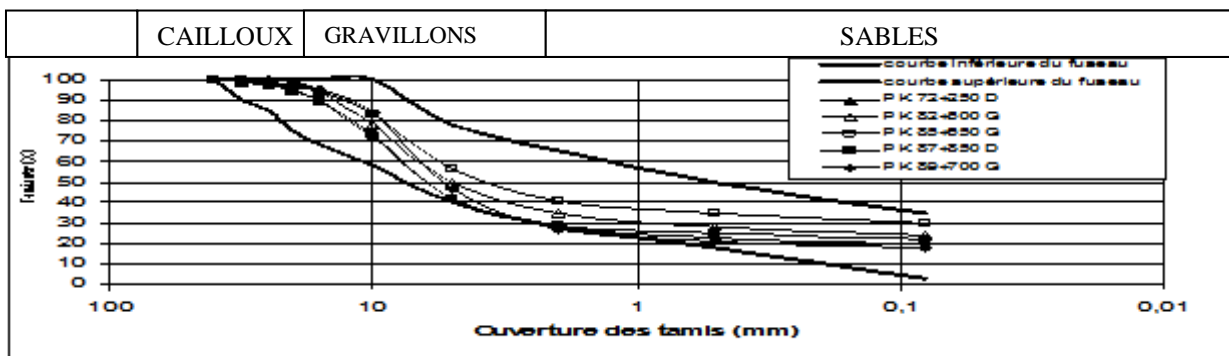
**Figure 66.** Carrière de grave latéritique issue d'altération des granites



**Figure 67.** Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Abong-Mbang-Bonis



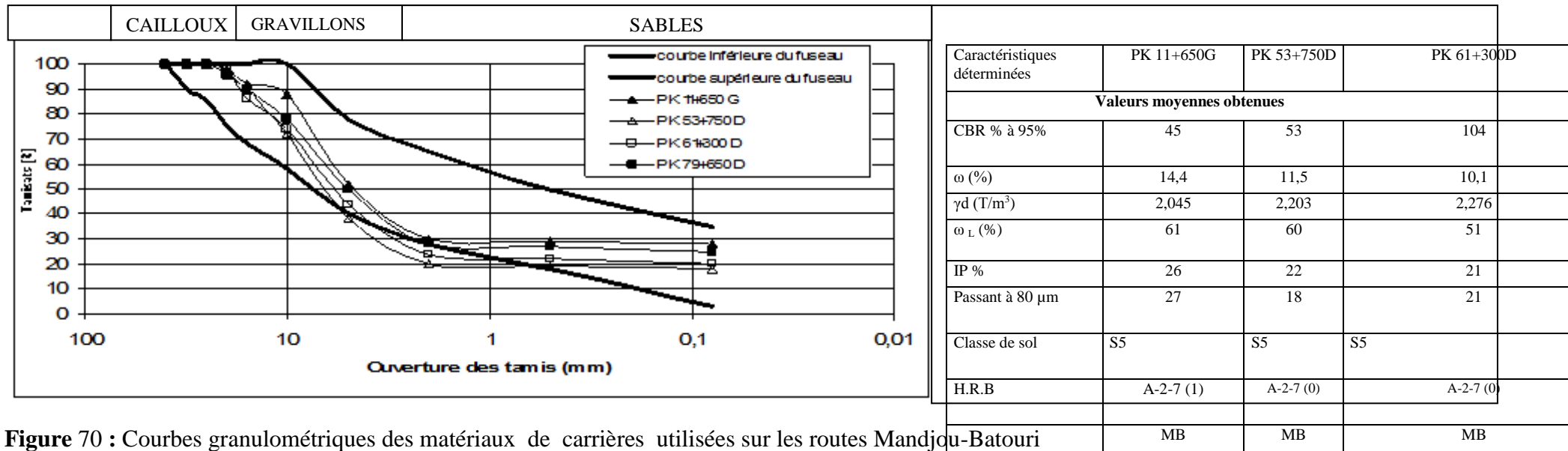
**Figure 68.** Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Abong-Mbang-Bonis (suite)



**Figure 69.** Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Abong-Mbang-Bonis (suite)



**Tableau 39** : Caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des granites (route Mandjou-Batouri (MB)).



**Figure 70** : Courbes granulométriques des matériaux de carrières utilisées sur les routes Mandjou-Batouri

**Tableau 40** : Caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières sur les granites (route Abong-Mbang-Bonis).

Caractéristiques déterminées	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK
	51+705D	52+800G	53+675D	54+450G	56+650D	57+500D	59+900D	62+384G	65+109D	68+400D	69+625G	72+250D	82+500G	85+650G	87+850D	89+700G
<b>Valeurs moyennes obtenues</b>																
CBR % à 95%	41	37	46	37	34	41	38	41	60	53	49	51	43	47	64	65
$\omega$ (%)	13,5	12,9	12,2	13,3	12,5	13,3	15,2	12,7	11,3	11,9	11,8	11,9	12,8	11,8	11,8	10,1
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	1,988	2,039	2,144	1,978	2,115	1,945	1,91	2,007	2,093	2,006	2,073	2,146	2,055	2,061	2,059	2,181
$\omega_L$ (%)	67	63	71	67	69	61	69	63	62	61	68	63	56	61	64	53
IP %	32	31	35	34	31	30	35	30	32	30	34	30	28	30	30	22
Passant à 80 $\mu$ m	23	26	19	21	22	21	26	24	23	23	22	20	24	30	22	18
H.R.B	A-2-7 (2)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (2)	A-2-7 (2)	A-2-7 (2)	A-2-7 (2)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (3)	A-2-7 (3)	A-2-7 (1)	A-2-7 (0)

**Tableau 41** : Synthèse des caractéristiques géotechniques des matériaux d'altération des granites de la Région de l'Est utilisés sur les routes Abong-Mbang-Bonis (AMB), Mandjou-Batouri (MB) et Nkoemvon-Ambam (NA)

	(AMB)	(MB)	(NA)	
<b>Tamis (mm)</b>	<b>Tamisats en %</b>			<b>Fuseau moyen</b>
31,5	93-100	100-100	98-100	<b>93-100</b>
25	91-100	100-100	95-100	<b>91-100</b>
20	87-99	96-98	89-100	<b>87-99</b>
16	84-95	86-92	80-96	<b>84-95</b>
10	65-84	72-88	67-89	<b>65-88</b>
5	39-56	38-52	33-53	<b>38-56</b>
2	21-41	20-30	18-37	<b>20-41</b>
0,5	15-35	19-29	17-33	<b>15-35</b>
0,08	14-30	18-28	15-28	<b>14-30</b>
<b>Parametres d'identification</b>				
$\omega_L$ (%)	53 -78	50 - 61	60 -76	<b>50-78 (60)</b>
IP (%)	22-40	20-28	24-43	<b>20 – 40 (27)</b>
$\gamma_d$ max T/m <sup>3</sup>	1,976 -2,183	2,042- 2,281	2,051 - 2,182	<b>1,910-2,281 (2,104)</b>
$\omega_{opt}$ (%)	10 - 14	10 - 14	11 - 13	<b>10 - 16</b>
CBR % à 95	30 - 65	33 - 107	30 - 90	<b>34 – 107 (69)</b>
Classe de portance	S5	S5	S5	<b>S5</b>
HRB	A-2-7	A-2-7	A-2-7	<b>A-2-7</b>



Figure 71 : Carrière de grave latéritique issu d'altération des gneiss

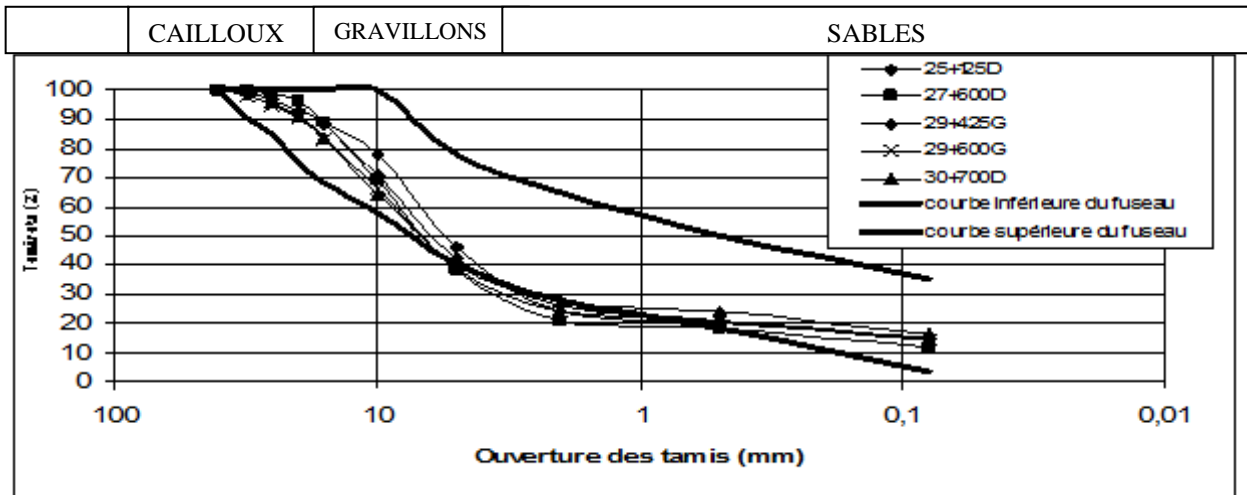


Figure 72 : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Ayos-Abong-Mbang

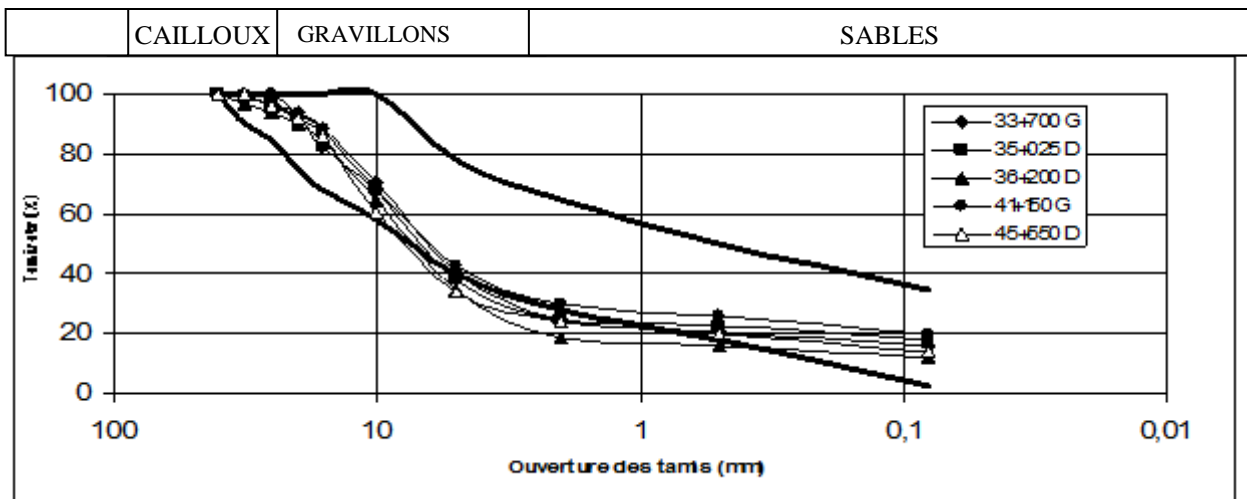
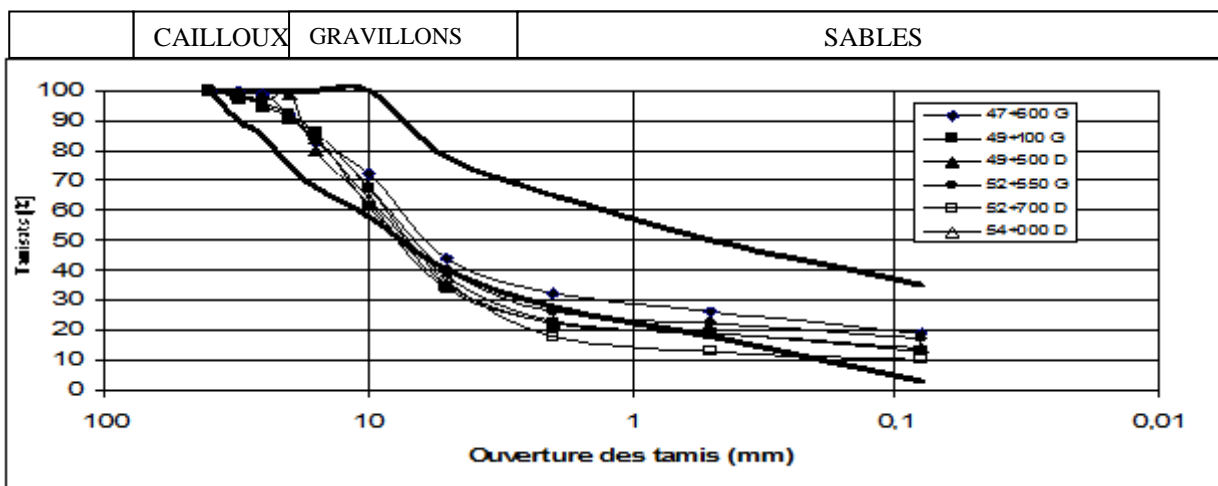
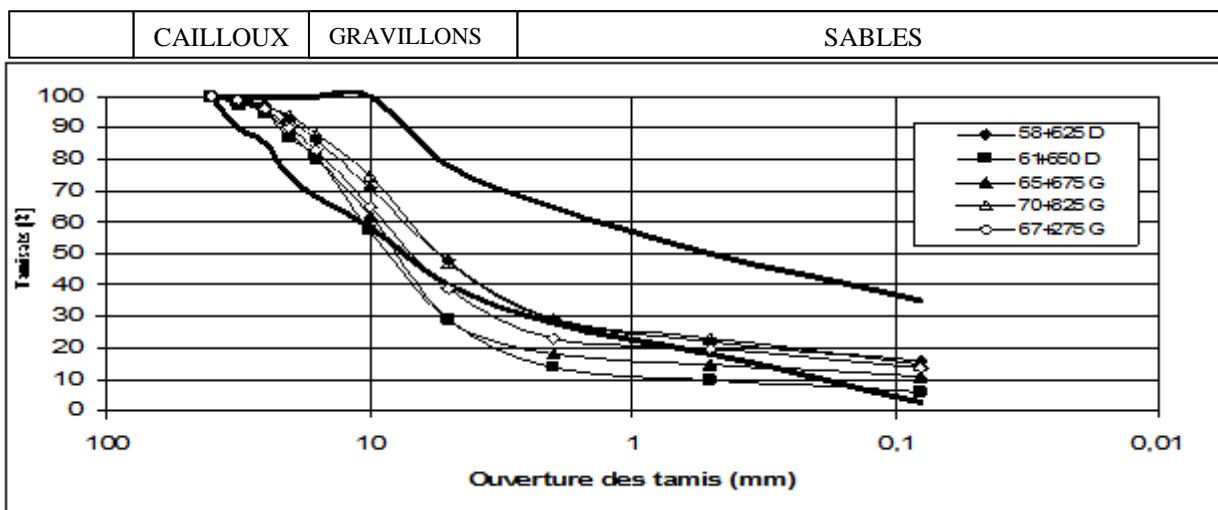


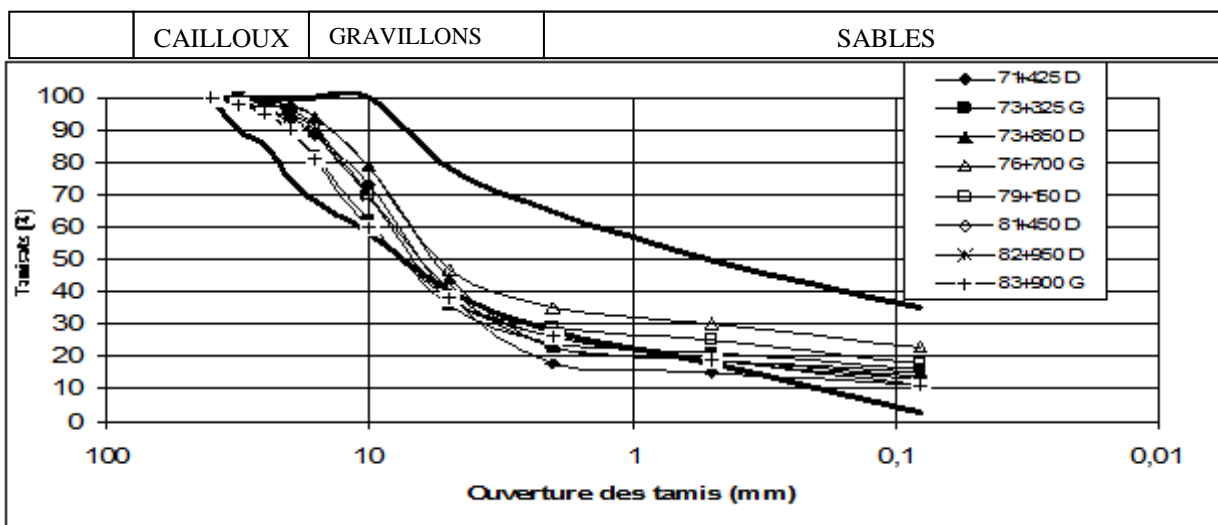
Figure 73 : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Ayos-Abong-Mbang (suite)



**Figure 74** : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Ayos-Abong-Mbang (suite)



**Figure 75** : Courbes granulométriques des matériaux de carrières utilisées sur la route Ayos-Abong-Mbang (suite)



**Figure 76** : courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Ayos-Abong-Mbang (suite)

**Tableau 42 : Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des gneiss (route Ayos-Abong-Mbang)**

Caractéristiques déterminées	PK 25+125	PK 27+600	PK 29+425	PK 29+600	PK 30+700	PK 33+700	PK 35+025	PK 36+200	PK 41+150	PK 45+550	PK 47+600	PK 49+500	PK 52+550	PK 52+700	PK 54+00	PK 58+525	PK 65+675
	<b>Valeurs moyennes obtenues</b>																
CBR à 95%	55	65	72	54	61	51	77	76	76	81	83	79	62	117	65	71	77
$\omega$ (%)	9	9	10	9	10	9	9	9	7	9	10	9	10	8	10	10	9
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	2,146	2,146	2,155	2,142	2,184	2,237	2,146	2,265	2,301	2,149	2,149	2,189	2,21	2,216	2,2151	2,155	2,22
$\omega_L$ (%)	46	43	41	41	37	42	43	43	37	38	39	41	43	43	45	43	39
IP (%)	19	18	17	17	15	17	17	15	15	17	17	18	18	18	18	17	17
Passant à 80 $\mu$ m	14	12	15	14	16	16	16	18	12	20	14	13	14	17	10	14	11
H.R.B	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)

**Tableau 43 : Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des gneiss (route Ayos-Abong-Mbang (suite)) (ABM)**

Caractéristiques déterminées	PK 67+725	PK 70+825	PK 71+425	PK 73+325	PK 73+850	PK 76+700	PK 79+150	PK 81+450	PK 82+950	PK 83+900				
	<b>Valeurs moyennes obtenues</b>													
CBR à 95%	66	82	68	69	86	74	89	87	55	88				
$\omega$ (%)	12	8	9	10	8	9	9	11	10	9				
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	2,13	2,208	2,157	2,143	2,278	2,173	2,154	2,193	2,089	2,127				
$\omega_L$ (%)	39	41	36	41	43	43	40	43	45	38				
IP (%)	17	16	17	17	16	16	16	15	19	17				
Passant à 80 $\mu$ m	14	15	11	16	15	23	18	14	13	11				
Classe de sol	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5				
H.R.B	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)				
Nomns routes	ABM	ABM	ABM	ABM	ABM	ABM	ABM	ABM	ABM	ABM				

Tous les matériaux analysés ont le CBR supérieur à 30 %,  $\omega_L$  inférieur à 70 %, IP inférieur à 25 %, passants au tamis de 80  $\mu\text{m}$  inférieurs à 35 % et  $\gamma_d$  supérieur à 1,850 T/m<sup>3</sup>.

Il faut signaler que les carrières latéritiques dont les matériaux présentent une courbe granulométrique ayant une petite partie sorte du fuseau, pendant le foisonnement, il faut une homogénéisation adéquate avant la mise en oeuvre. Donc, il faut foisonner et gerber et avant le chargement dans le camions, il faut une homogénéisation encore.

#### **III.3.4.2.2. Résultats des matériaux utilisés sur les routes de Mbet-Nguélémendouka-Mboma, Mampang-Angossas-Mboma et Doume-Nguélémendouka**

Ces résultats sont présentés sous forme des courbes granulométriques (Fig. 77 et Fig. 78) d'une part et récapitulés dans le tableau 44 d'autre part. Le tableau A5 en annexe les présente dans le détail. Toutes les courbes granulométriques des matériaux des carrières étudiées passent à l'intérieur du fuseau granulométrique proposé par CEBTP (1984) pour les matériaux destinés à être utilisés en couche de fondation des routes revêtues, et en couche de roulement ou en remblai sur routes en terre. Les autres caractéristiques géotechniques obtenues (Tab. 44) sont conformes aux exigences du CCTP.

#### **III.3.4.2.3. Résultats des matériaux utilisés sur la route Abong-Mbang-Doume**

Les résultats d'analyse se présentent sous forme de courbes granulométriques d'une part (Fig. 79) et d'autre part, sous formes du tableau récapitulatif des caractéristiques géotechniques obtenues (Tab. 45). Ces résultats sont détaillés dans le tableau A6 en annexe.

L'analyse montre que toutes les courbes granulométriques des matériaux provenant des emprunts passent à l'intérieur du fuseau granulométrique proposé par CEBTP (1984) pour les matériaux pouvant être utilisés en couche de fondation des routes revêtues et en couche de roulement ou en remblai des routes en terre., excepté celle du PK 47+450D qui sort du fuseau. Les matériaux de cet emprunt doivent être mélangés avec d'autres matériaux de bonne qualité avant de les utiliser sur la couche de fondation à raison de 30 % de bons matériaux au moins.

Les autres caractéristiques géotechniques sont conformes aux exigences du CCTP à savoir : le CBR à 95 % supérieur à 30 % ;  $\omega_L$  inférieur à 70 % ; IP inférieur à 25 % ; Passants au tamis de 80  $\mu\text{m}$  inférieurs à 35 %, ce qui qualifie ces matériaux de graves latéritiques et  $\gamma_d$  supérieur à 1850 kg/m<sup>3</sup>.

#### **III.3.4.2.4. Résultats des matériaux utilisés sur les routes Abong-Mbang-Nkouak (AMK), Nkouak-Palisco (KP)**

Les résultats d'analyse se présentent sous forme de courbes granulométriques d'une part (Fig. 80) et d'autre part, sous formes du tableau récapitulatif des caractéristiques géotechniques obtenues (Tab. 45). Ces résultats sont détaillés dans le tableau A7 en annexe.

L'analyse des résultats obtenus (Fig. 80) montre toutes les courbes granulométriques passent à l'intérieur du fuseau granulométrique proposé par CEBTP (1984), excepté celle du PK 1+925D de la route Kouak-Palisco qui sort largement du fuseau. Ces matériaux du PK 1+925D, malgré leur portance élevée (CBR à 95 % et après 4 jours d'imbibition =110 %), doivent être mélangés avec d'autres matériaux de bonnes caractéristiques (granulométrie) pour être bien compactés sur le terrain. Tous les autres matériaux peuvent être utilisés en couche de fondation des routes revêtues, et en couche de roulement ou en remblai des routes en terre sans subir aucun traitement.

Les autres caractéristiques géotechniques sont conformes aux exigences du CCTP, ils présentent un CBR à 95 % supérieur à 30 %,  $\omega_L$  inférieur à 70 %, IP inférieur à 25 %, passants au tamis de 80  $\mu\text{m}$  inférieurs à 35 %. Ces matériaux sont de graves latéritiques. Leur  $\gamma_d$  supérieur à 1,850T/m<sup>3</sup>. La synthèse de caractéristiques géotechniques pour ces matériaux issus d'altération de gneiss est consignée dans le tableau 46.

### **III.3.4.3. Matériaux issus des migmatites**

#### **III.3.4.3.1. Résultats des matériaux utilisés sur la route Batouri-Ngoura, Ngoura-Yola et Yola-Yokadouma**

Ces résultats des matériaux des carrières issues d'altération des migmatites (Fig. 81) sont présentés sous formes des courbes granulométriques (Fig. 82, 83 et Fig. 84) et sous forme des tableaux (Tab. 47 et Tab. 48). Le tableau A8 en annexe les présente dans le détail.

L'analyse des résultats montre que les courbes granulométriques des matériaux provenant des carrières passent à l'intérieur du fuseau granulométrique proposé par CEBTP (1984), excepté, les courbes du PK 34+600 G de la route Ngoura-Yola et du PK 9+300D de la route Batouri-Ngoura qui sortent un peu du fuseau, mais cela ne nécessite pas un traitement quelconque.

Ces matériaux sont utilisables en couche de fondation des routes revêtues pour la classe de trafic T3, et en couche de roulement pour les routes en terre.

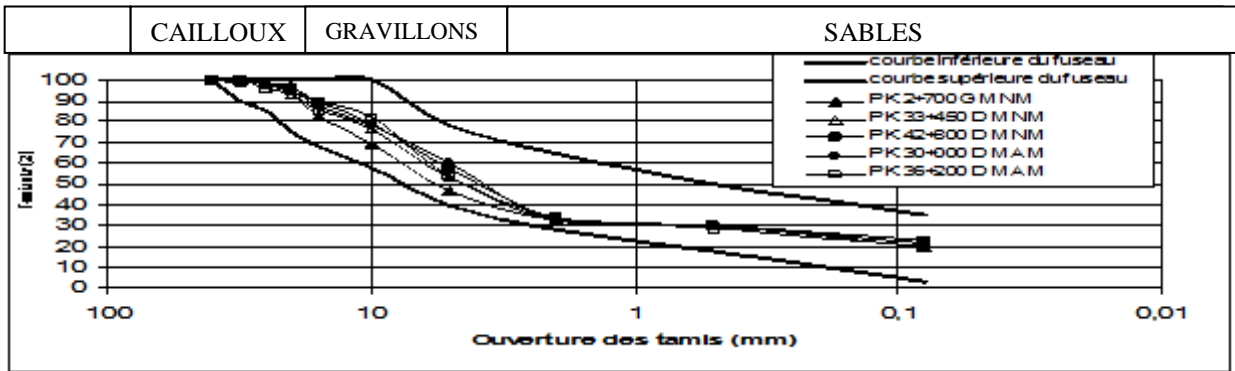
Leurs autres caractéristiques géotechniques sont conformes aux exigences du CCTP.

La synthèse de ces résultats est consignée dans le tableau 49.

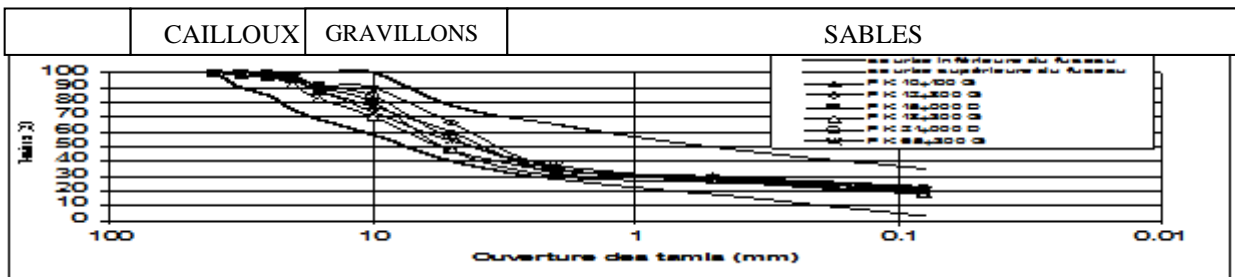
### **III.3.4.4. Matériaux issus des schistes**

#### **III.3.4.4.1. Résultats des matériaux utilisés sur la route Yokadouma-Bangue, Bangue-Moloundou, Ampel-Lomie et Ayos-Abong-Mbang (Ayos-Mayos)**

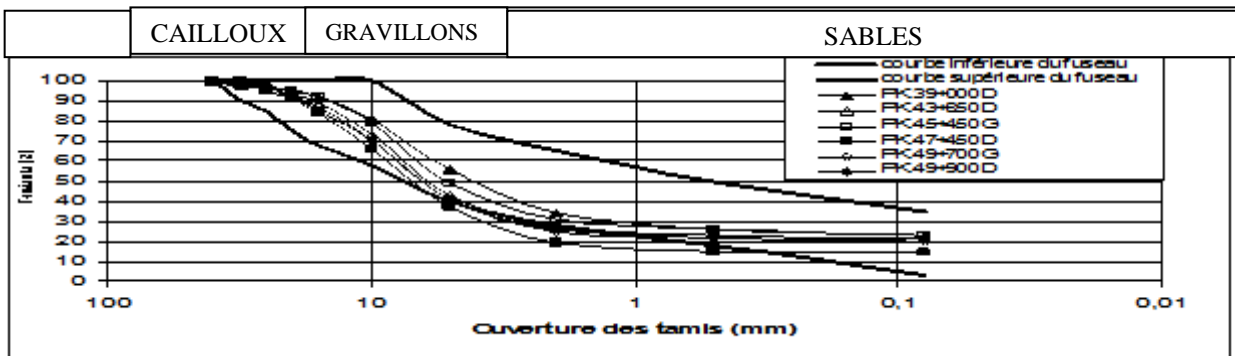
Les résultats d'analyse des matériaux des carrières issues d'altération des schistes (Fig. 85) se présentent sous forme des courbes granulométriques d'une part (Fig. 86, 87, 88 et 89) et d'autre part, sous formes des tableaux récapitulatifs des caractéristiques géotechniques obtenues (Tab. 50 et 51).



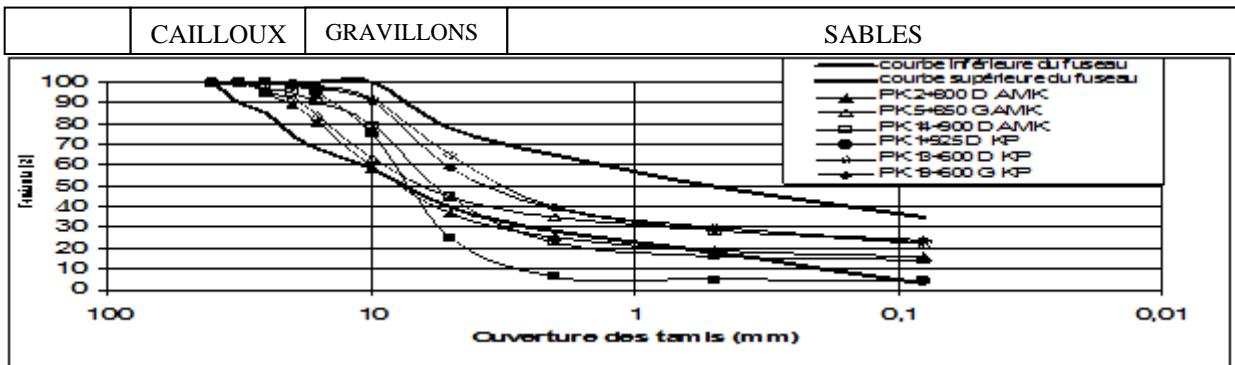
**Figure 77 :** Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur les routes Mbet-Nguélémendouka-Mboma et Mampang-Angossas-Mboma



**Figure 78:** Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Doumé-Nguélémendouka



**Figure 79** Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Abong-Mbang-Doumé



**Figure 80 :** Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur les routes : Abong-Mbang-Nkouak et Nkouak-Palisco



**Tableau 44** : Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des gneiss : routes : Mbet-Nguélémdouka-Mboma (M N M) Mampang-Angossas-Mboma (MAM), Doumé- Nguélémdouka (DN),

Caractéristiques déterminées	PK 2+700G	PK 33+450D	PK 42+800D	PK 30+000D	PK 36+200D	PK 10+100G	PK 12+800G	PK 15+000D	PK 18+300G	PK 21+000D	PK 65+300G					
	<b>Valeurs moyennes obtenues</b>															
CBR à 95%	49	51	48	47	48	51	54	42	60	36	49					
$\omega$ (%)	11,9	11,4	11	12,3	12,6	12,4	12,2	11,2	12,2	11,6	10,2					
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	2,083	2,109	2,11	2,057	2,051	2,036	2,07	2,166	2,113	2,194	2,116					
$\omega_L$ (%)	49	47	50	50	48	50	51	60	49	52	51					
IP (%)	23	20	22	22	22	21	22	24	25	21	25					
Passant à 80 $\mu$ m	23	20	23	24	23	22	25	21	19	22	29					
H.R.B	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)					
Noms des routes concernées	(M N M)	(M N M)	(M N M)	(M A M)	(M A M)	DN	DN	DN	DN	DN	DN					

**Tableau 45** : Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des gneiss dans les environs des Routes : Abong-Mbang-Doumé (AMD), Abong-Mbang-Nkouak (AMK) et Nkouak-Palisco (KP)

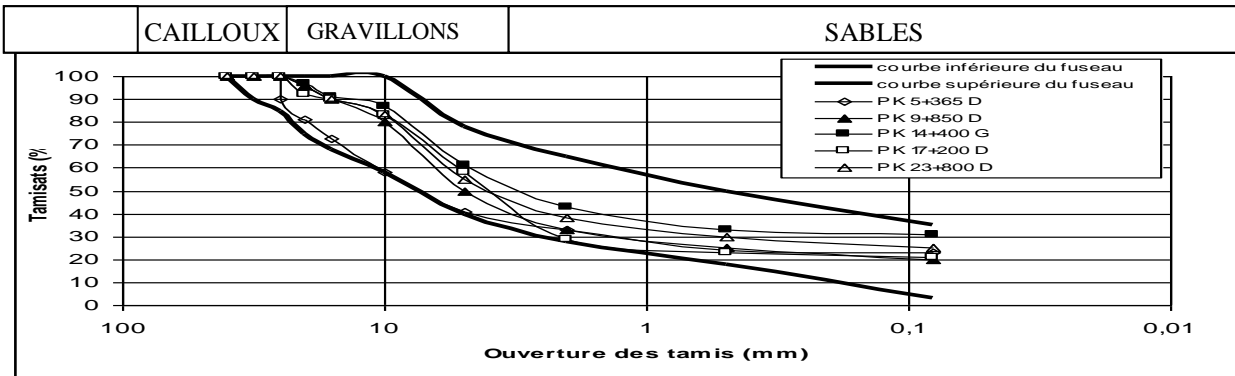
Caractéristiques déterminées	PK 39+000 D	PK 43+850 D	PK 45+450 G	PK 47+450 D	PK 49+700 G	PK 49+900 D	PK 2+800D	PK 5+850G	PK 14+900D	PK 1+925D	PK 13+600D	PK 19+600
	<b>Valeurs moyennes obtenues</b>											
CBR % à 95%	61	48	34	75	39	44	86	47	36	110	55	45
$\omega$ (%)	11,8	11,9	11,8	11,3	16,1	15,9	11,9	13,4	11,7	8,6	11,5	12,1
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	2,121	2,084	2,081	2,163	1,889	1,873	2,11	1,954	2,037	2,281	2,089	2,151
$\omega_L$ (%)	62	66	62	62	68	66	60	66	57	55	48	52
IP %	30	33	31	30	34	32	29	33	25	26	20	24
Passant à 80 $\mu$ m	23	21	23	14	32	23	16	22	14	4	23	24
H.R.B	A-2-7 (2)	A-2-7 (1)	A-2-7 (2)	A-2-7 (0)	A-2-7 (3)	A-2-7 (2)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (4)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)
Noms de routes	AMD	AMD	AMD	AMD	AMD	AMD	(AMK)	(AMK)	(AMK)	(KP)	(KP)	(KP)

**Tableau 46:** Synthèse des caractéristiques géotechniques des matériaux d'altération des gneiss de la Région de l'Est utilisés sur les routes Ayos-Abong-Mbang (AAM), Abong-Mbang-Doumé (AD), Abong-Nkouak et Nkouak-Palisco (AKKP), Mbet-Nguélémdouka-Mboma (MNM), Mampang-Angossas-Mboma (MAM), Doumé-Nguélémdouka (DN) et Ambam-Kye-Ossi (AKO)

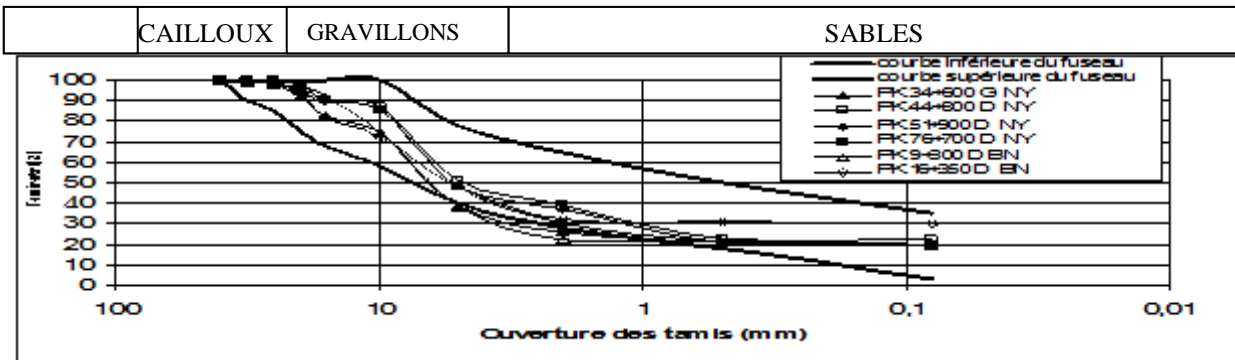
Tamis (mm)	FUSEAUX GRANULOMETRIQUES							Fuseau moyen
	AAM	AD	AKKP	MNM	MAM	DN	AKO	
31,5	97-100	97-100	100-100	100-100	99-100	99-100	94-100	<b>99-100</b>
25	94-100	95-98	95-100	96-98	98-99	96-100	87-99	<b>96-99</b>
20	87-98	91-97	89-100	93-95	96-97	94-99	83-99	<b>92-98</b>
16	80-94	84-92	81-97	83-89	87-90	87-91	78-96	<b>84-92</b>
10	57-79	66-81	59-92	69-79	78-83	70-90	62-79	<b>68-85</b>
5	29-47	37-56	25-65	47-58	54-60	47-66	21-50	<b>42-60</b>
2	13-30	19-34	6-40	33-35	32-33	30-37	15-45	<b>24-36</b>
0,5	10-30	15-26	5-30	28-30	29-31	25-29	14-40	<b>20-29</b>
0,08	6-23	14-23	4-24	20-22	22-23	17-23	12-33	<b>15-24</b>
AUTRES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES								
$\omega_L$ (%)	36-46	62-78	47-66	47-49	46-50	50-62	44 - 69	<b>36-78 (50)</b>
IP (%)	15-19	30-40	20-33	20-22	20-21	19-25	24-32	<b>15-40 (21)</b>
$\gamma_d$ max T/m <sup>3</sup>	2,089- 2,302	1,868- 2,193	1,980- 2,282	2,036- 2,210	2,036- 2,040	2,020- 2,202	1,990 - 2,188	<b>1,868-2,302 (2,108)</b>
$\omega_{opt}$ (%)	7-12	12-17	9-13	11-13	12-13		9 - 15	<b>7-17</b>
CBR								
à 95%	51-117	30-62	33-112	46-50	46-50	34-63	37 - 100	<b>30-117 (56)</b>
à 90%								
Cl. Port	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	<b>S5</b>
HRB	A-2-7	A-2-7	A-2-7	A-2-7	A-2-7	A-2-7	A-2-7	<b>A-2-7</b>



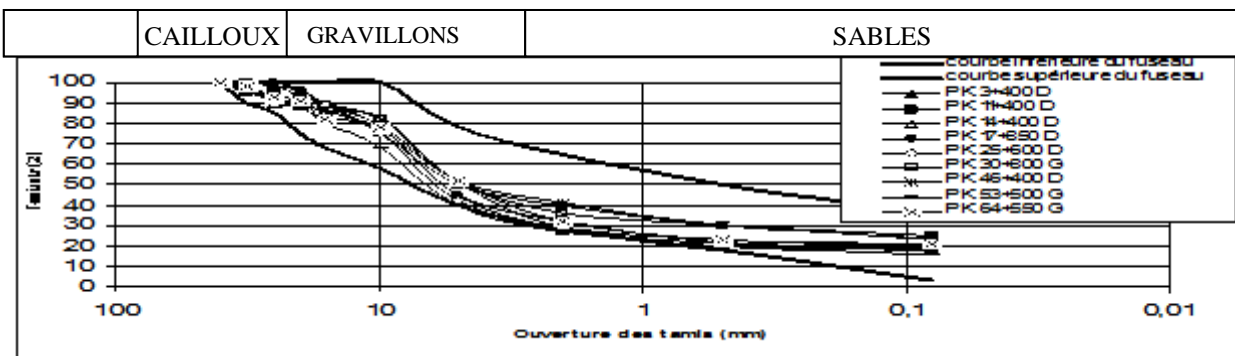
**Figure 81** : Carrières de grave latéritique issu d'altération des migmatites



**Figure 82** : Courbes granulométriques des matériaux d'emprunts utilisés sur la route Ngoura-Yola



**Figure 83** : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Ngoura-Yola (NY) (suite) et Batouri-Ngoura (BN)



**Figure 84** : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Yola-Yokadouma

**Tableau 47** : Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des migmatites : routes Ngoura-Yola (NY) et Batouri-Ngoura (BN)

Caractéristiques déterminées	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK
	5+365D	9+850D	14+400	17+200	23+800	34+600G	44+800D	51+900	76+700D	9+300G	16+350D
<b>Valeurs moyennes obtenues</b>											
CBR à 95%	33	44	55	40	36	34	39	68	55	45	46
$\omega$ (%)	14	8,1	8,5	11,4	11,4	11,8	10,6	7,6	9,5	9,8	10,4
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	1,976	2,214	2,271	2,172	2,061	2,083	2,147	2,318	2,295	2,169	2,132
$\omega_L$ (%)	52	52	51	53	51	43	48	56	46	65	52
IP (%)	22	19	18	20	21	23	22	21	19	30	25
Passant à 80 $\mu$ m	23	21	31	20	26	19	23	19	20	21	29
Classe de sol	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5
H.R.B	A-2-7(1)	A-2-7 (0)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7	A-2-7 (0)	A-2-7 (1)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (1)
					0						
Routes concernées	NY	NY	NY	NY	NY	NY	NY	NY	NY	BN	BN

**Tableau 48** : Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des migmatites : route Yola-Yokadouma

Caractéristiques déterminées	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK	PK 64+550G
	3+400D	11+400D	14+400D	17+850D	25+960D	30+800G	46+400D	53+500G	
<b>Valeurs moyennes obtenues</b>									
CBR à 95%	37	60	53	45	51	40	54	54	51
$\omega$ (%)	11,5	7,5	8,2	7,3	9,6	9,3	8,6	8,6	8,6
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	2,138	2,261	2,188	2,315	2,198	2,235	2,276	2,276	2,245
$\omega_L$ (%)	49	43	47	36	64	56	58	52	48
IP (%)	23	22	23	18	25	23	23	20	24
Passant à 80 $\mu$ m	19	25	19	17	20	24	24	17	22
Classe de sol	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5
H.R.B	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)

**Tableau 49 :** Synthèse des caractéristiques géotechniques des matériaux d'altération des migmatites de la Région de l'Est utilisés sur les routes Batouri-Ngoura (BN), Ngoura-Yola (NY) et Yola-Yokadouma (YY)

	(BN)	(NY)	(YY)	Fuseau moyen
<b>Tamis (mm)</b>	<b>Fuseaux granulométriques</b>			
31,5	100-100	93-100	95-100	<b>93-100</b>
25	99-100	90-100	90-100	<b>90-100</b>
20	94-98	81-98	88-96	<b>81-98</b>
16	82-92	72-91	80-90	<b>72-92</b>
10	72-74	58-87	68-83	<b>58-87</b>
5	38-48	41-61	40-52	<b>40-61</b>
2	22-32	26-39	27-41	<b>22-41</b>
0,5	21-31	21-33	20-30	<b>20-33</b>
0,08	20-30	19-31	16-25	<b>16-31</b>
<b>Autres caractéristiques géotechniques</b>				
$\omega_L$ (%)	51-66	43 -56	35 - 63	<b>35-66 (52)</b>
IP (%)	25-30	19-23	17-26	<b>17 – 26 (23)</b>
$\gamma_d$ max T/m <sup>3</sup>	2,130-2,170	1,990 -2,330	2,050- 2,312	<b>1,990-2,330 (2,164)</b>
$\omega_{opt}$ (%)	10-10	8 - 14	7 - 12	<b>7 - 14</b>
CBR à 100%				
à 95%	43-44	33 - 68	36 - 60	<b>33 – 68 (47)</b>
à 90%				
Classe de portance	S5	S5	S5	<b>S5</b>
HRB	A-2-7	A-2-7	A-2-7	<b>A-2-7</b>



**Figure 85 :** Carrière de grave latéritique issu d'altération de schistes

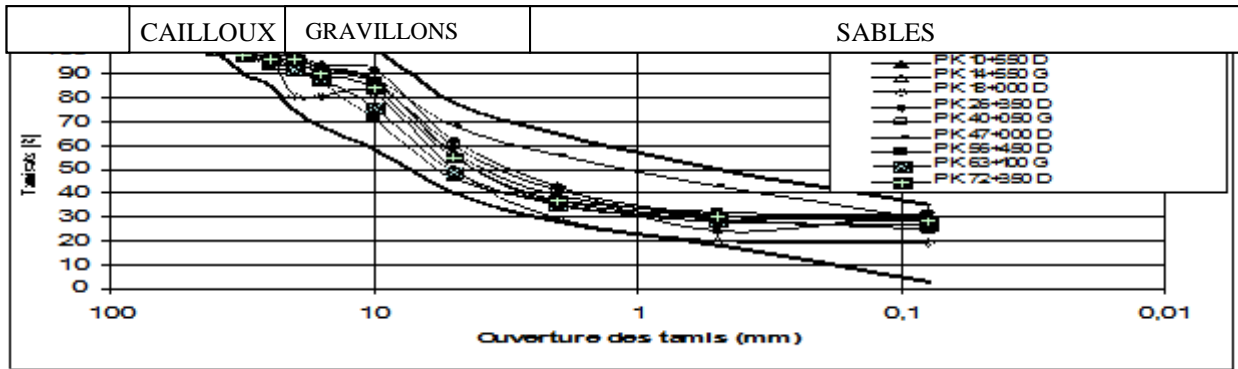


Figure 86 : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Yokadouma-Bangoué

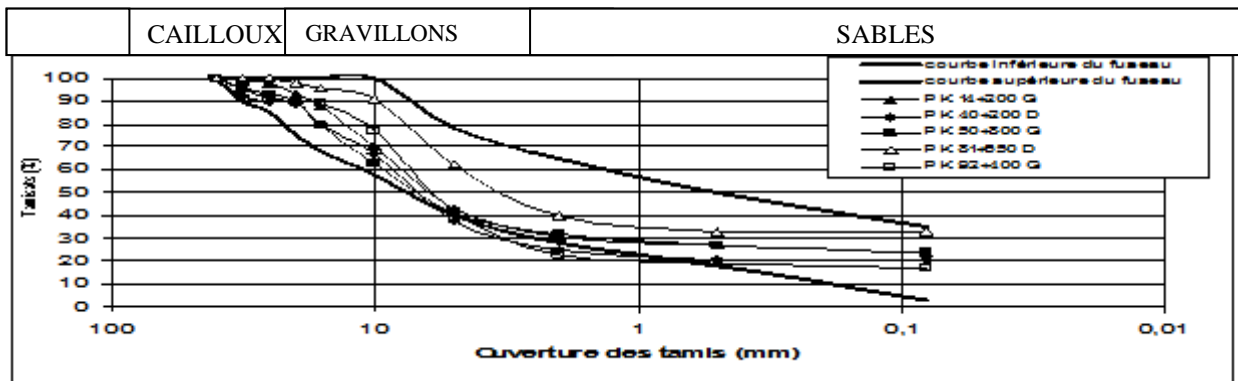


Figure 87 : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Bangoué-Moloundou

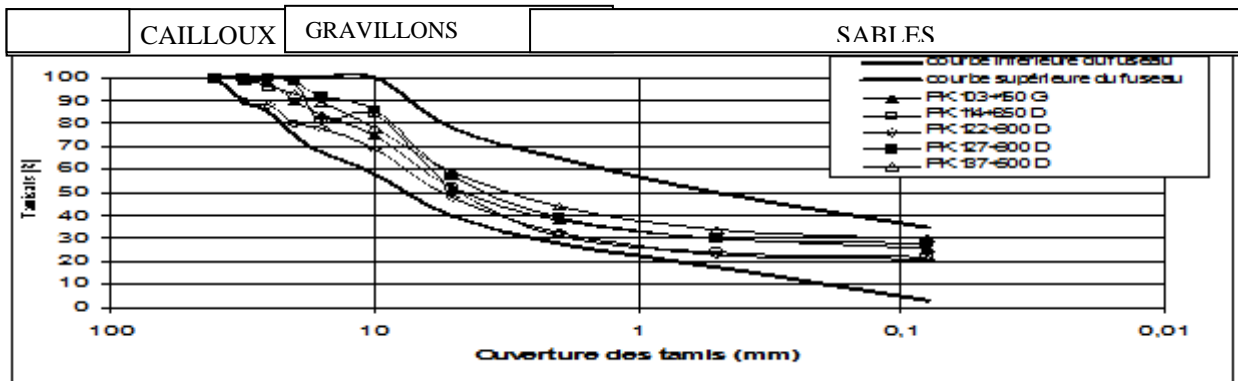


Figure 88 : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur la route Bangoué-Moloundou (suite)

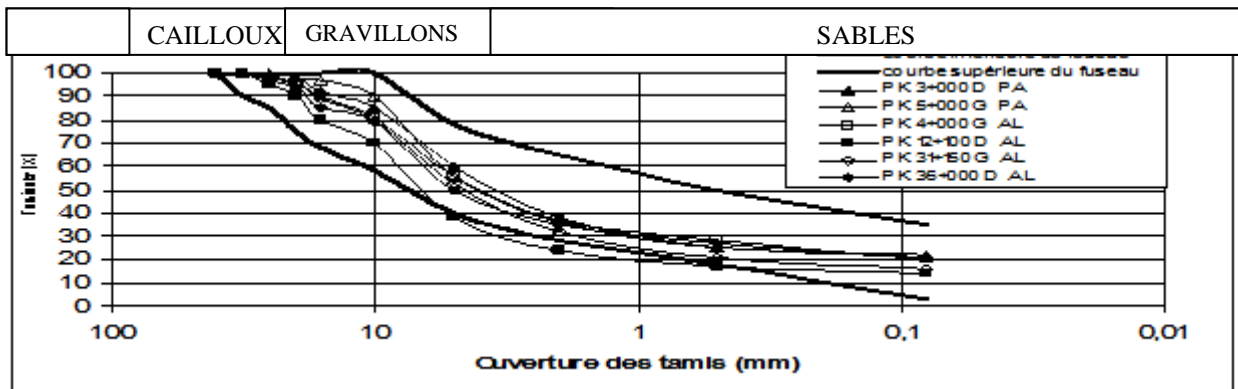


Figure 89 : Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées sur les routes : Ampel-Lomié

**Tableau 50:** Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des schistes : route Yokadouma-Bangué (YB)

**Ampel-Lomié (AL)**

Caractéristiques déterminées	PK 10+550D	PK 14+550D	PK 18+000D	PK 26+350D	PK 40+050G	PK 47+000D	PK 56+450D	PK 63+100G	PK 72+350D	PK 4+000G	PK 12+100D	PK 31+150G	PK 36+000D			
	<b>Valeurs moyennes obtenues</b>															
CBR à 95%	42	52	51	33	37	36	34	37	50	63	47	37	57			
$\omega$ (%)	12,3	10,5	7,2	15,1	11,3	12,1	10,5	11,3	8,1	9,3	9,4	8,9	9,9			
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	2,112	2,136	2,13	1,981	2,029	2,002	1,981	2,125	2,142	2,14	2,035	2,027	2,007			
$\omega_L$ (%)	60	61	57	56	54	47	53	64	64	47	47	50	51			
IP (%)	21	21	23	20	24	25	21	23	21	22	20	20	24			
Passant à 80 $\mu$ m	29	26	20	33	30	29	32	27	28	20	28	15	22			
Classe de sol	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5			
H.R.B	A-2-7 (2)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (2)	A-2-7 (2)	A-2-7 (2)				A-2-7 (1)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (1)			
Routes concernées	YB	YB	YB	YB	YB	YB	YB	YB	YB	(AL)	(AL)	(AL)	(AL)			

**Tableau 51 :** Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières issues des schistes : route Bangué-Moloundou (BM)

**et Ayos-Abong-Mbang (Ayes-Mayos) (AM)**

Caractéristiques déterminées	PK 14+200G	PK 40+200D	PK 50+800G	PK 81+650D	PK 92+400G	PK 103+150G	PK 114+700D	PK 122+850G	PK 127+300D	PK 2+100	PK 5+175	PK 6+100	PK 6+550	PK 8+225	PK 14+600	PK 16+500
	<b>Valeurs moyennes obtenues</b>															
CBR à 95%	54	42	38	40	52	39	65	35	59	40	38	40	53	58	68	70
$\omega$ (%)	9,6	11,1	12,1	10,7	9,8	12,2	11,2	12,8	11	10	9	10	10	10	10	8
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	2,166	2,182	2,067	2,149	2,218	2,027	2,224	2,085	2,154	2,127	2,106	2,072	2,166	2,177	2,153	2,253
$\omega_L$ (%)	53	64	56	56	49	54	60	58	57	43	57	48	45	45	40	40
IP (%)	22	22	22	22	19	21	24	21	24	16	19	19	17	15	17	17
Passant à 80 $\mu$ m	24	21	25	33	17	26	23	21	28	21	22	24	21	21	21	14
Classe de sol	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5
H.R.B	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7 (1)
Routes concernées	BM	BM	BM	BM	BM	BM	BM	BM	BM	AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM

**Tableau 52 :** Synthèse des caractéristiques géotechniques des matériaux d'altération des schistes de la Région de l'Est utilisés sur les routes Yokadouma-Bangué (YB), Bangué-Moloundou (BM), Ampel-Lomié (AL) et Ayos-Abong-Mbang (Ayos-Mayos) (AAM)

	(YB)	(BM)	(AL)	(AAM)		Fuseau moyen
<b>Tamis (mm)</b>	<b>Fuseaux granulométriques</b>					
31,5	90-100	98-100	100-100	98-100		<b>97-100</b>
25	88-100	93-100	95-100	95-100		<b>94-100</b>
20	80-98	81-98	89-96	90-97		<b>87-100</b>
16	78-96	80-94	80-90	86-95		<b>83-94</b>
10	62-91	71-92	69-81	66-85		<b>71-88</b>
5	38-59	46-68	38-56	36-67		<b>43-62</b>
2	22-44	29-56	24-37	22-45		<b>27-44</b>
0,5	19-34	20-43	17-28	18-31		<b>20-32</b>
0,08	16-32	19-32	14-21	14-24		<b>17-26</b>
<b>Autres caractéristiques géotechniques</b>						
$\omega_L$ (%)	49 - 64	47 - 64	46 - 50	40 - 57		<b>40-64 (54)</b>
IP (%)	20-24	20-25	20-24	15-19		<b>15 – 25 (21)</b>
$\gamma_d$ max T/m <sup>3</sup>	2,060 -2,220	1,980- 2,230	2,005- 2,140	2,072- 2,253		<b>1,980-2,253 (2,116)</b>
$\omega_{opt}$ (%)	10 - 13	7 - 15	8 - 10	8 - 10		<b>10 - 16</b>
CBR à 100%						
à 95%	39-65	32-52	35-70	38-70		<b>32 – 70 (49)</b>
à 90%						
Classe de portance	S5	S5	S5	S5		<b>S5</b>
HRB	A-2-7	A-2-7	A-2-7	A-2-7		<b>A-2-7</b>



Ces résultats dont la synthèse est consignée aussi dans le tableau 52, sont détaillés dans les tableaux A9 en annexe.

L'analyse des résultats montre que la majorité des courbes granulométriques des matériaux provenant passent à l'intérieur du fuseau granulométrique proposé par CEBTP (1984) pour les matériaux pouvant être utilisés en couche de fondation des routes revêtues et en couche de roulement ou en remblai des routes en terre. Excepté les courbes granulométriques des PK 40+200D et 92+400G de la route Bangué-Moloundou, du PK 12+100D de la route Ampel-Lomié, du PK 16+500G de la route Ayos-Abong-Mbang dont une partie sort un peu du fuseau de spécification.

Les autres caractéristiques géotechniques sont conformes aux exigences du CCTP à savoir : le CBR à 95 % supérieur à 30 % ;  $\omega_L$  inférieur à 70 % ; IP inférieur à 25 % ; Passants au tamis de 80  $\mu\text{m}$  inférieurs à 35 % et  $\gamma_d$  est supérieur à 1,850 T/m<sup>3</sup>. Cette conformité des résultats qualifie ces matériaux de graves latéritiques de bonne qualité pour les travaux routiers.

#### **Conclusion sur les essais géotechniques des matériaux de l'Est**

Au total, 129 échantillons provenant des carrières latéritiques ont été étudiés dans la Région de l'Est. L'analyse des résultats obtenus montrent que ces matériaux sont conformes aux prescriptions du Cahier de Clauses Techniques Particulères dans l'ensemble pour être utilisés en couche de fondation pour la classe de trafic T3. Certains matériaux dont le CBR est supérieur à 60 % peuvent être utilisés en couche de base pour la classe de trafic T2.

### **III.3.5. ESSAIS SUR LES MATERIAUX DES SOLS LATERITIQUES DE LA REGION DU SUD**

Dans la Région du Sud, les essais ont été effectués sur les matériaux issus d'altération des gneiss (route Ambam-Kye-Ossi.) et de granites (route Nkomvon-Ambam). Au total, 13 carrières latéritiques ont été concernées par notre recherche.

#### **III.3.5.1. Résultats des matériaux utilisés sur route de Nkoemvon Ambam ( sur granite)**

Pour la route Nkoemvon-Ambam (70 km) en cours de bitumage en 2002, 9 carrières des sols latéritiques ont fait l'objet de travaux de recherche. Compte tenu du nombre élevé de puits analysés, cinq puits par carrière, seule une moyenne des résultats des cinq puits par carrière est considérée.

Certains points de prélèvement ont donné des résultats remplissant les conditions pour être utilisés en couche de fondation et d'autres en terrassement (plate-forme et remblais).

Toutes les courbes granulométriques des matériaux provenant des carrières passent à l'intérieur du fuseau granulométrique de graveleux latéritiques proposé par CEBTP (1984), excepté

celles des PK 10 + 120D et 15 + 100 G (Fig. 90 et 91) mais qui sont acceptables. Les autres caractéristiques géotechniques (Tab. 53) qui sont détaillées dans le tableau A10 en annexe, sont supérieures aux valeurs exigées, à savoir :

- CBR > 30 %,
- $\gamma_d > 1850 \text{ kg/m}^3$ ,
- passants au travers du tamis de 80  $\mu\text{m}$  < 35 %.

- limites de liquidité < 70 %, sauf pour les matériaux des PK 30+860 et 35+260 qui doivent être mélangés avec d'autres matériaux de bonnes caractéristiques géotechniques, surtout avec de matériaux de faible plasticité (IP < 30 %) avant d'être utilisés en couche de fondation.

L'examen de ces résultats permet de distinguer un seul groupe de matériaux, les sols graveleux, essentiellement latéritiques, et utilisables en couche de fondation sans subir aucun traitement spécifique.

### **III.3.5.2. Résultats des matériaux utilisés sur route d'Ambam-Kye-Ossi**

Pour la route Ambam – Kye-Ossi (35 km) en cours de bitumage en 2002, quatre carrières des sols latéritiques ont fait l'objet d'études détaillées.

Pour les matériaux des carrières des PK 13+825G ; 22+275D ; 28+275G et du PK 30+000D, les résultats obtenus (Tab. 54) sont présentés sous forme des courbes granulométriques (Fig. 92). Les données détaillées sont récapitulées dans le tableau A10 en annexe.

En dehors des courbes de la carrière du 30+000G qui sortent un peu du fuseau, toutes les autres courbes granulométriques des matériaux passent à l'intérieur du fuseau granulométrique proposé par CEBTP (1984) pour les matériaux pouvant être utilisés en couche de fondation des routes revêtues, en couche de roulement ou en remblai des routes en terre. Les autres caractéristiques géotechniques sont conformes aux exigences du CCTP.

L'examen de ces résultats permet de distinguer un seul groupe de matériaux, les sols graveleux, essentiellement latéritiques, et utilisables en couche de fondation sans subir aucun traitement.

### **III.3.6 OBSERVATIONS ET COMPARAISON DES RESULTATS D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX PROVENANT DES CARRIERES LATERITIQUES DE L'EST ET DU SUD CAMEROUN**

Les caractéristiques géotechniques obtenues des matériaux provenant des carrières qui sont issues d'altération des granites, des gneiss, des migmatites et des schistes sont résumés dans les tableaux 41, 46, 49, et 52 .

Au total, 142 échantillons provenant des carrières des sols latéritiques ont été étudiés.

De l'analyse des caractéristiques géotechniques obtenues de ces matériaux, il ressort que:

- le poids volumique optimum du Proctor Modifié en moyenne est supérieur à 1950 Kg/m<sup>3</sup> pour les matériaux de toutes les carrières étudiées,
- les matériaux de toutes les carrières sont des classes de portance S5,
- suivant la classification HRB, les matériaux de toutes les carrières sont de A-2-7,
- l'indice de plasticité est inférieur à 30 % en moyenne pour toutes les carrières,
- l'indice CBR est supérieur à 30 % pour toutes les carrières et varie de 30 à 117 %.

Après l'analyse des résultats des essais effectués sur les matériaux de toutes les carrières, et en comparaison avec les critères de sol à savoir:

le poids volumique < 1600 Kg/m<sup>3</sup> caractérisant un mauvais sol; de 1800 à 1900 Kg/m<sup>3</sup> caractérisant un sol convenable et > 2050 Kg/m<sup>3</sup> caractérisant un sol excellent (Coquand, 1970), on constate que tous les matériaux étudiés présentent des bonnes caractéristiques géotechniques leur permettant d'être utilisés, soit en remblais, soit aux blocs techniques pour les ouvrages, soit en couche de roulement (route en terre), soit en couche de fondation des routes revêtues selon les exigences du Cahier des Clauses Techniques Particulier (CCTP). Certains matériaux peuvent être utilisés en couche de base pour le trafic faible.

Notons que pour tous les matériaux étudiés, aucun traitement ni au ciment ni à la chaux n'est nécessaire avant de les utiliser en couche de fondation pour la classe de trafic T3, sauf si l'on veut utiliser ces matériaux en couche de base dont la classe de trafic est de T3. Les matériaux dont les courbes sortent légèrement dans le fuseau granulométrique peuvent être mélangés avec les matériaux sélectionnés à raison de 70 et 30 % respectivement. Ce mélange doit s'effectuer avant l'approvisionnement sur la couche de fondation à l'aide d'une pelle chargeuse.

La synthèse des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières latéritiques de la Région de l'Est et de la Région du Sud récapitulée dans le tableau 55 montre que les matériaux issus d'altération des granites et des gneiss de la Région du Sud sont plus plastiques que ceux issus d'altération de granites et des gneiss de la Région de l'Est. Malgré la plasticité élevée pour les matériaux du Sud, d'autres caractéristiques géotechniques sont conformes et sont dans la même fourchette que ceux de la Région de l'Est.

Etant donné que les matériaux utilisés ont été sélectionnés, on constate que les portances des sols, les poids volumiques optimum du Proctor Modifié et les courbes granulométriques ne sont pas très différentes pour les matériaux issus d'altération de tous les substratums. Par conséquent, ces données bien qu'elles ne soient pas à grande échelle, peuvent servir de référence pour le Sud Cameroun lors de dimensionnement des chaussées (routes neuves).

### **III.3.6.1 Intérêt des matériaux**

Les matériaux des carrières latéritiques étudiés peuvent être utilisés:

- ✓ en couche de roulement des routes en terre (Fig. 93),
- ✓ en couche de forme des routes revêtues (Fig. 94),

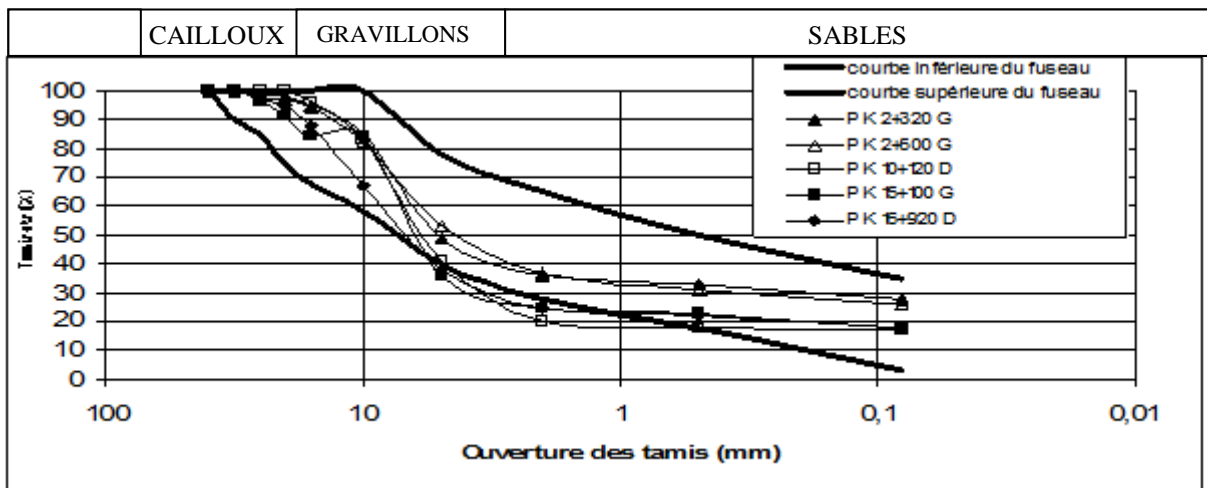


Figure 90 : Courbes granulométriques des matériaux des carrières (route Nkoemvon-Ambam)

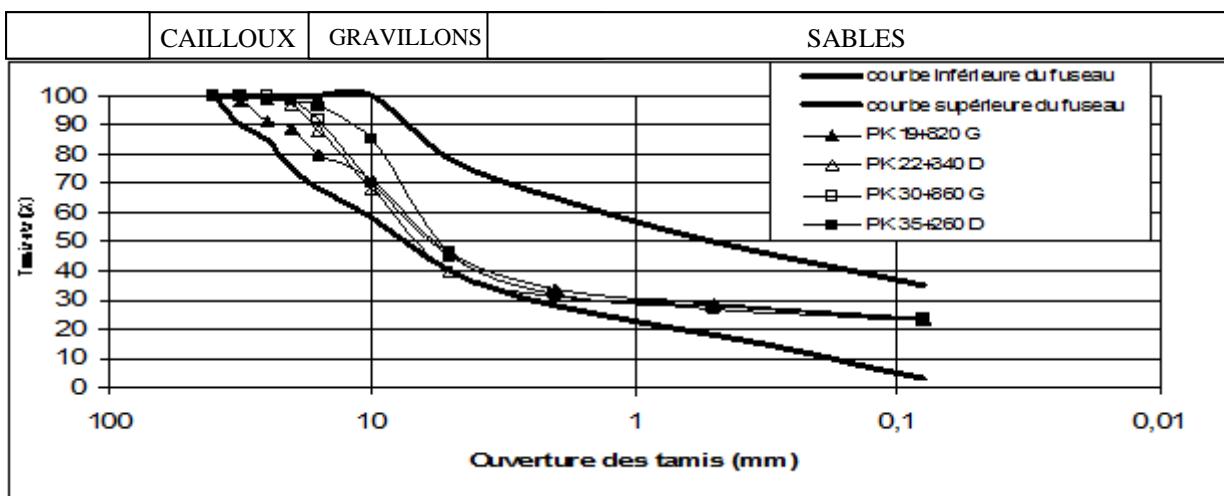
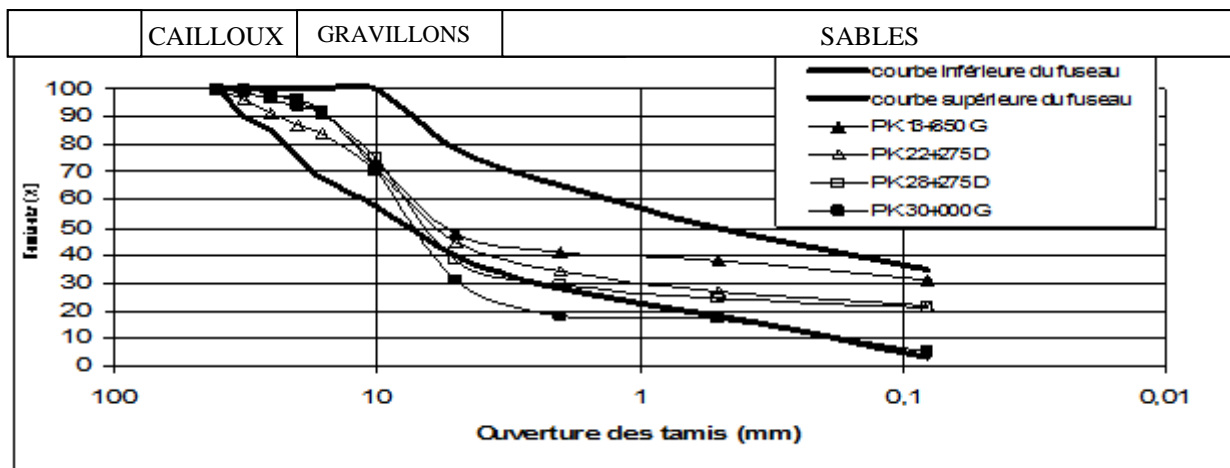


Figure 91 : Courbes granulométriques des matériaux des carrières (route Nkoemvon-Ambam) (suite)

Tableau 53 : Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières utilisées sur la route Nkoemvon-Ambam

	PK 2+300G	PK 2+500G	PK 10+120D	PK 15+100G	PK 16+920 D	PK 19+820G	PK 22+340D	PK 30+860 G	PK 35+260D
	<b>Valeurs moyennes obtenues</b>								
CBR % à 95%	27	42	90	38	48	48	40	57	36
$\omega$ (%)	13	13	12,2	12,6	12	12,6	12	11,6	12,6
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	2,082	2,09	2,182	2,12	2,12	2,096	2,12	2,075	2,051
$\omega_L$ (%)	67	62	63	60	66	64	65	74	76
IP %	26	27	33	24	32	30	34	36	43
Passant à 80 $\mu$ m	23	23	16	18	18	22	23	24	23
Classe de sol	S4	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5
H.R.B	A-2-7(1)	A-2-7 (2)	A-2-7 (0)	A-2-7 (0)	A-2-7	A-2-7 (2)	A-2-7 (2)	A-2-7 (2)	A-2-7 (2)



**Figure 92 :** Courbes granulométriques des matériaux des carrières utilisées de la route Ambam-Kye- Ossi

**Tableau 54 :** Valeurs moyennes des caractéristiques géotechniques des matériaux des carrières utilisées sur la route Ambam-Kye-Ossi

	PK 13+850 G	PK 22+275D	PK 28+275D	PK 30+000G
	<b>Valeurs moyennes obtenues</b>			
CBR % à 95%	37	58	83	100
$\omega$ (%)	13,1	10,2	11,2	10,6
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	1,99	2,125	2,188	2,139
$\omega_L$ (%)	44	57	58	65
IP %	24	29	29	32
Passant à 80 $\mu$ m	31	21	21	15
Classe de sol	S5	S5	S5	S5
H.R.B	A-2-7 (2)	A-2-7 (1)	A-2-7 (1)	A-2-7 (2)

**Tableau 55:** Comparaison des résultats d'analyse des matériaux latéritique de l'Est et du Sud

	Matériaux issus de granites de l'Est	Matériaux issus de granites du Sud	Matériaux issus de gneiss de l'Est	Matériaux issus de gneiss du Sud	Matériaux issus de migmatites de l'Est
CBR	58	58	59	69	47
$\gamma_d$	2,102	2,116	2,108	2,108	2,164
$\omega$	12	12	11,8	11,3	10,3
$\omega_L$	59	68	54	56	52
IP	27	33	21	28	23
Passants à 80 $\mu$ m	22	22	16	22	23

- ✓ en remblai des zones des purges (Fig. 95),
- ✓ en bloc technique pour ouvrages d'art (Fig. 96),
- ✓ en couche de fondation pour les routes revêtues (Fig. 97).

### III.3.6.2. Dégradations

La dégradation de ces matériaux lorsqu'ils sont utilisés dans les travaux routiers se manifeste de plusieurs manières:

- ✓ Création des tôles ondulées et des bourbiers due au manque d'entretien courant et périodique des routes en terre (Fig. 98),
- ✓ Détérioration de la chaussée due à l'insuffisance du compactage de bloc technique par manque du matériel adéquat pour PME (Fig. 99);
- ✓ Détérioration de la chaussée due au manque d'entretien des ouvrages (curage) occasionnant la coupure de route pendant plusieurs jours (Fig. 100),
- ✓ Détérioration de la chaussée due au manque d'assainissement et à la violation des barrières de pluies par les gros porteurs, ce qui crée des ravines après le rechargement ou mise en forme de la couche de roulement des routes en terre (Fig. 101),
- ✓ Détérioration de la chaussée due à l'utilisation des mauvais matériaux rencontrés sur place par les petites et moyennes entreprises (PME) (Fig 102 et 103). ;,

### III.3.6.3. Recommandations

- - Pour les zones marécageuses, purger le mauvais matériau jusqu'au sable en tenant compte du sur-largeur (banquettes) aussi pour la tenue de l'ouvrage et réceptionner en compacité, couche; par couche de 30 cm après la sortie de l'eau. Exécuter la chaussée dans ces zones après consolidation du remblai confirmé par le tassimètres après six mois au moins,
- - Curer les ouvrages régulièrement et remplacer ceux qui sont défectueux;
- - Veiller au respect de cadence des essais de compacité et fermer les trous de compacité avec la dame Proctor;
- - -Veiller à la non violation des barrières de pluie (Administration) dont la distance entre deux barrières devrait être 10 km au lieu de 20 km prévu par MINTP,
- - Laisser la couche terminée à l'auto compactage avant l'exécution de la couche suivante pour avoir la consolidation assurée.



**Figure 93 :** Grave latéritique en couche de roulement PK 8 + 500 de la route Mandjou-Batouri en 2006



**Figure 94 :** Grave latéritique en couche de forme au PK 0+050 route Mbama-Messamena 2017



**Figure 95.** Grave latéritique en remblais dans les zones de purge PK 1+800 de la route Mbama-Messamena en 2017



**Figure 96.** Grave latéritique en bloc technique du dalot simple au PK 1+850 (route Mbama-Messamena) en 2017



**Figure 97.** Grave latéritique en couche de fondation PK 3+000 route Mbama-Messamena en 2016



**Figure 98 :** Tôles ondulées de 10 cm de hauteur au PK 10+500 de la route : Mandjou – Batouri.en 2007



**Figure 99 :** Dégradation de la chaussée due à l'insuffisance du compactage



**Figure 100 :** Détérioration de la chaussée par le trafic des poids lourd, à cause d'une buse obstruée faute d'entretien courant sur la route : Ngoura – Yola (78 km) au PK 3 + 000 en 2007





**Figure 101 :** Bourbier créé par les gros porteurs au PK 2+000 du tronçon Ngoura – Yola après violation de la barrière de pluies en septembre 2007



**Figure 102 :** Bourbier de plus de 50 cm de profondeur créé par les grumiers au PK 30 + 000 de la route Yokadouma-Bangoué en 2006



**Figure 103 :** Dégradation de la chaussée au PK 30 + 000 de la route Yokadouma-Bangoué à cause de la nature des matériaux pendant la saison de pluies en septembre 2007

### **III.3.7. ESSAIS IN SITU ET AU LABORATOIRE**

Pour les routes en terre, les essais in-situ ont été réalisés sur la couche de roulement et au niveau des ouvrages d'art (étude des fondations). Et pour les route revêtues, les essais ont été réalisés sur la plate-forme, sur la couche de fondation, sur la couche de base en grave concassés 0/31.5 et sur la couche de roulement en béton bitumineux

#### **III.3.7.1. Cas des routes en terre**

Toutes les routes en terre étudiées se trouvent dans la Région de l'Est et leurs matériaux sont issus de l'altération des gneiss, granites, migmatites et schistes. Les essais de contrôle effectués sont les essais de compacité sur la plate-forme et sur la couche de roulement à l'aide du densitomètre à membrane ainsi que les essais pénétrométriques pour l'étude des fondations des ouvrages d'art (ponts).

##### **III.3.7.1.1. Essais de compacité sur la plate-forme**

Les résultats des essais de compacité qui sont consignés dans le tableau 56, sont présentés sous forme des courbes (Fig. 104, 105, 106, et 107 ci-après d'une part, et d'autre part sous forme des tableaux A11, A12, A13, A14, A15, A16, A17, A18, A19 et A20 en annexe.

Les résultats des essais de compacité obtenus in situ (Fig. 104, Tab. A11 et Tab. A12) du PK 20+200 au PK 23+800 sur la route Abong-Mbang-Nkouak sont conformes aux exigences du CCTP.

En comparant les courbes de poids volumiques secs en 2005 et en 2006, on constate que les poids volumiques secs en 2006 ont sensiblement baissé. Ceci montre une perte de portance du matériau à cause du trafic des gros porteurs qui rendent les matériaux graveleux au fur du temps de plus en plus fins.

Les résultats de compacité obtenus in situ (Fig. 105, Tab. A13; Tab. A14 et Tab. A15) du PK 15+000 au PK 22+800 en 2005, du PK 18+000 au PK 22+800 en 2006 et du PK 15+200 au PK 20+000 en 2007 de la route Ngoura-Yola sont conformes aux exigences du CCTP. En comparant les résultats des poids volumiques secs, on constate qu'ils ont baissé en 2006 par rapport en 2005. En 2007, les poids volumiques secs ont augmenté car la bande a été rechargée en 2007 après la mise en forme avec les matériaux provenant des carrières latéritiques.

Les résultats de compacité obtenus in situ (Fig. 106, Tab. A16 et Tab. A17) du PK 38+200 au PK 43+000 en 2006 et en 2007 sur la route Yola-Yokadouma sont conformes aux exigences du CCTP. En comparant les courbes des poids volumiques secs, on constate que les poids volumiques secs ont augmenté en 2007 par rapport en 2006. Ceci est justifié par le fait qu'en 2007, après la mise en forme, la section a été rechargée avec les matériaux provenant des carrières.

Les résultats de compacité obtenus in situ (Fig. 107, Tab. A18 ; Tab. A19 et Tab.A20) du PK 14+200 au PK 19+400 en 2005, 2006 et en 2007 sur la route Yokadouma-Bangoué sont conformes aux exigences du CCTP. En comparant les courbes de poids volumiques secs, on constate qu'elles n'ont pas changé en 2005 et en 2006, ceci est expliqué par le fait qu'en 2005, la section n'a pas subi de dégradation. Par contre en 2007, les poids volumiques secs ont augmenté, ceci est justifié par le fait qu'en 2007 après la mise en forme, la section a été rechargée par les matériaux provenant de carrière.

### **III.3.7.1.2. Essais au pénétromètre**

Les résultats des essais au pénétromètre dynamique des fondations des ouvrages obtenus après l'exploitation du logiciel prévu à des tels essais, sont présentés sous forme des tableaux 57, 58 et 59. Ces résultats présentent des contraintes admissibles en fonction de la profondeur.

De l'analyse des résultats de contraintes admissibles obtenues, il ressort que :

- pour le pont sem-définitif (PSD) de Kobi-Mbang, situé à 30 km de Ngoura en allant vers Yokadouma et à 6 km de Kobi vers Mbang, les résultats des sondages pénétrométriques et de fouille des culées permettent de dégager les conclusions suivantes

- le site de l'ouvrage est constitué en tête des sols argileux de contrainte admissible médiocre dont l'épaisseur varie de 0 à 0,60 m pour tous les points de sondages (profondeur prise à partir de la surface du terrain naturel),

- cette couche est suivie successivement par, une couche d'argile brunâtre plastique mélangée avec de grave d'une épaisseur moyenne de 60 cm et présentant une contrainte admissible en moyenne supérieure à 1,5 bars pour tous les points de sondages et d'une couche de grave latéritique argileuse rougeâtre compacte d'une épaisseur moyenne de 40 cm et présentant une contrainte admissible supérieure à 5 bars pour tous les points de sondages,

- sous cette couche de grave latéritique vient directement une cuirasse latéritique où la fondation de l'ouvrage doit prendre l'assise.

Pour le PSD d'Angossas, situé au PK 27,2 km de Mampang en allant vers Mboma, les résultats des sondages pénétrométriques et de fouille de culée permettent de dégager les conclusions suivantes :

- le site de l'ouvrage est constitué en tête des sols argileux de contrainte admissible faible dont l'épaisseur varie de 0 à 0,80 m en moyenne pour tous les points de sondages (profondeur prise à partir de la surface du terrain naturel),

- cette couche est suivie successivement par une couche présentant une contrainte admissible en moyenne supérieure à 1,7 bars pour tous les points de sondages et d'une couche présentant une contrainte admissible supérieure à 6 bars pour tous les points de sondages,

- sous cette couche, on a constaté un refus à partir de 1,8 m de profondeur où l'ouvrage doit prendre l'assise.

Pour le PSD de Djaposter situé au PK 19,9 km en allant vers Lomié, les résultats des sondages pénétrométriques permettent de dégager les conclusions suivantes :

- le site de l'ouvrage est constitué en tête des sols argileux de contrainte admissible faible dont l'épaisseur varie de 0 à 1,60 m pour tous les points de sondages (profondeur prise à partir de la surface du terrain naturel),

- cette couche est suivie successivement par une couche présentant une contrainte admissible en moyenne supérieure à 2 bars pour tous les points de sondages et d'une couche présentant une contrainte admissible supérieure à 3,5 bars pour tous les points de sondages,

- sous cette couche, on a constaté un refus à partir de de 3,5 m de profondeur où la fondation de l'ouvrage doit prendre l'assise.

### **III.3.7.2 Cas des routes revêtues**

Pour les routes revêtues à savoir la route Abong-Mbang-Bonis dans la Région de l'Est et la route Nkoemvan-Ambam dans la Région du Sud, les essais in situ sur la plate-forme, sur la couche de fondation, sur la couche de base et sur la couche de roulement et au laboratoire ont été réalisés.

#### **III.3.7.2.1. Route Abong-Mbang-Bonis dans la Région de l'Est**

##### **III.3.7.2.1.1. Essais de compacité et de déflexion sur la plate-forme**

Pour la route Abong-Mbang-Bonis, bien que nous avons fait les essais de compacité et de déflexions sur plusieurs km de la route, nous avons choisi une zone de 3 km allant du PK 60+850 au PK 63+850 pour les compacités et du PK 61+350 au PK 65+150, soit 3,8 km pour les déflexions.

Les résultats des essais de compacités et de déflexions sont représentés sous forme de courbes (Fig. 108 et 109) ci-après d'une part et sous formes des tableaux A21 et A22 en annexe.

Les résultats de compacités obtenus in situ (Fig. 108) du 60+850 au PK 63+850, en juin 2009, montrent que 4 points sont à reprendre, il s'agit des points des PK 61,9 km ; 62 km ; 62,2 km et du PK 62,2 km où les compacités sont inférieures à 95 %. Pour tout le reste, la compacité est conforme aux exigences du CCTP (compacité supérieure à 95 %).

Les résultats de déflexions obtenus (Fig. 109 et Tab.22 en annexe) du PK 61+350 au PK 65+150 en juin 2009 sont conformes aux exigences du CCTP (déflexions caractéristiques inférieures à 200/100 mm). Par conséquent, cette zone est réceptionnable.

Il faut signaler qu'une déflexion caractéristique ( $d_c$ ) est une moyenne calculée sur une distance de 500 m. Les mesures sur le terrain se font à une distance de 25 m pour toutes les couches de la chaussée et en quinconce (gauche, axe et droit).

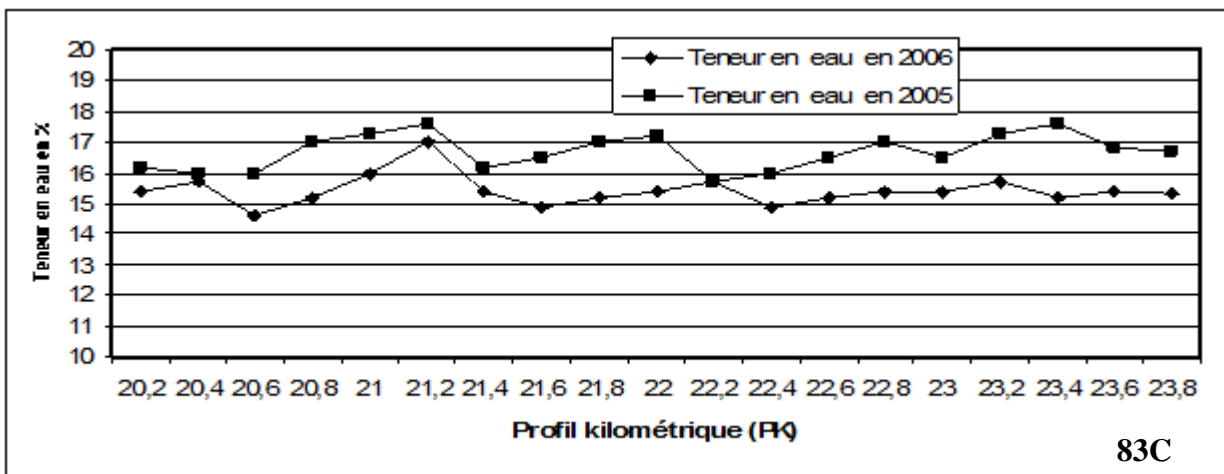
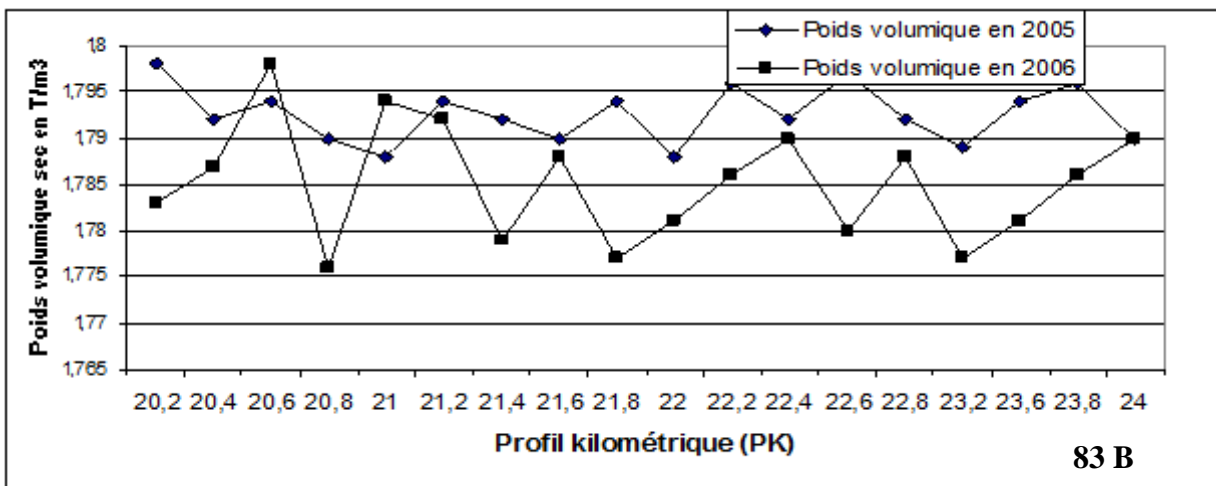
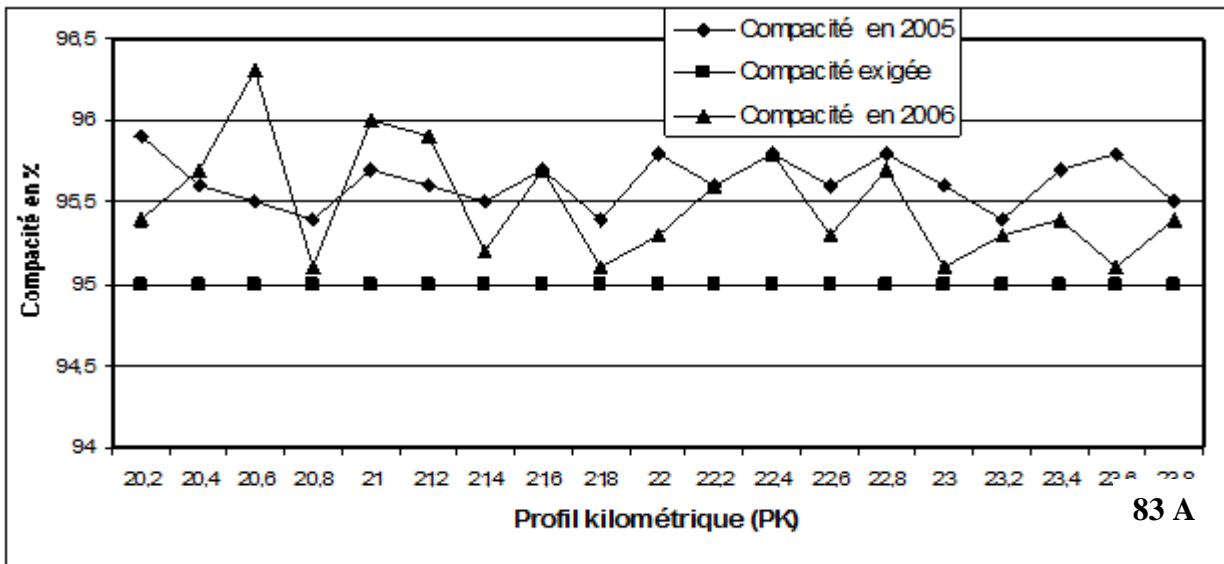
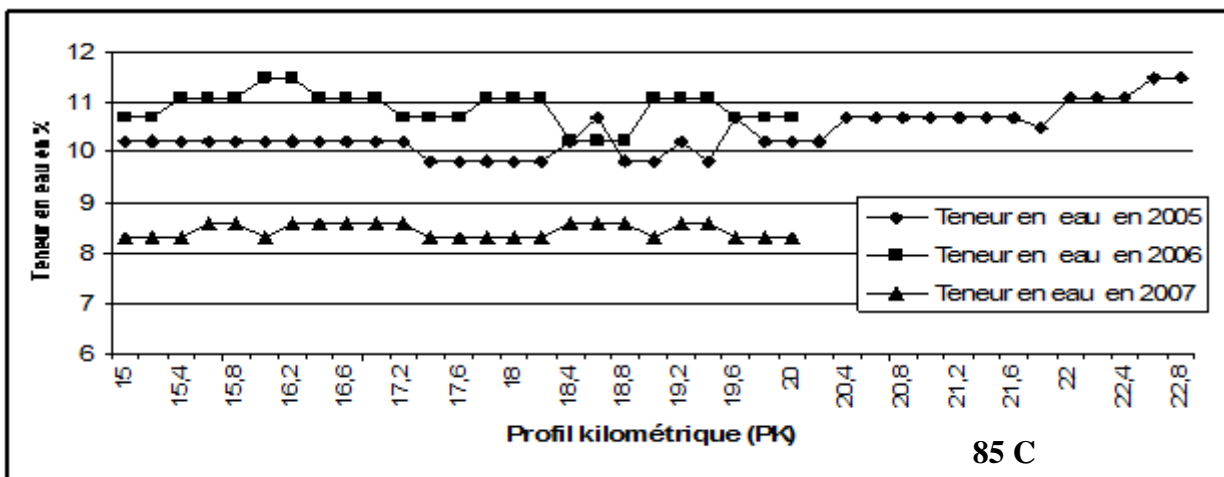
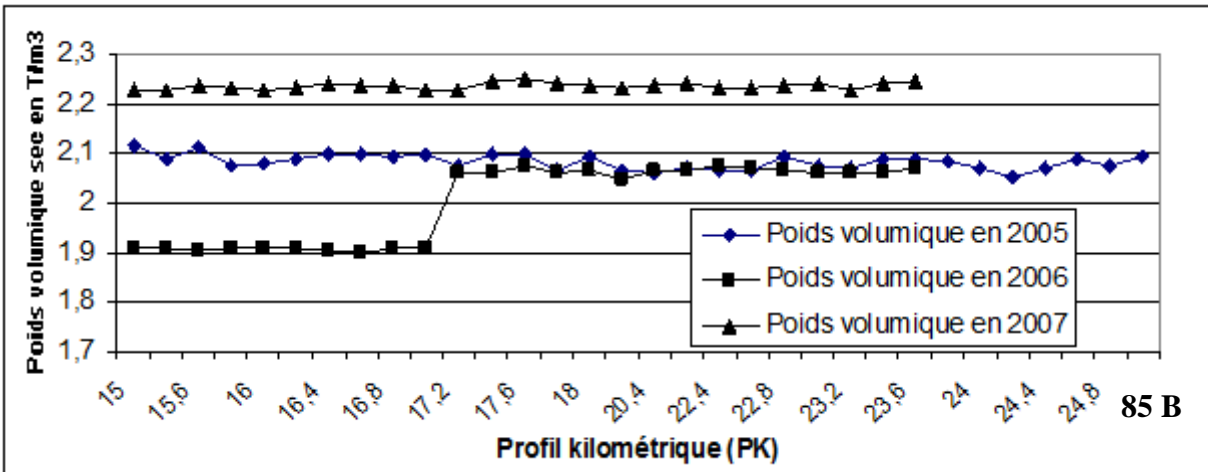
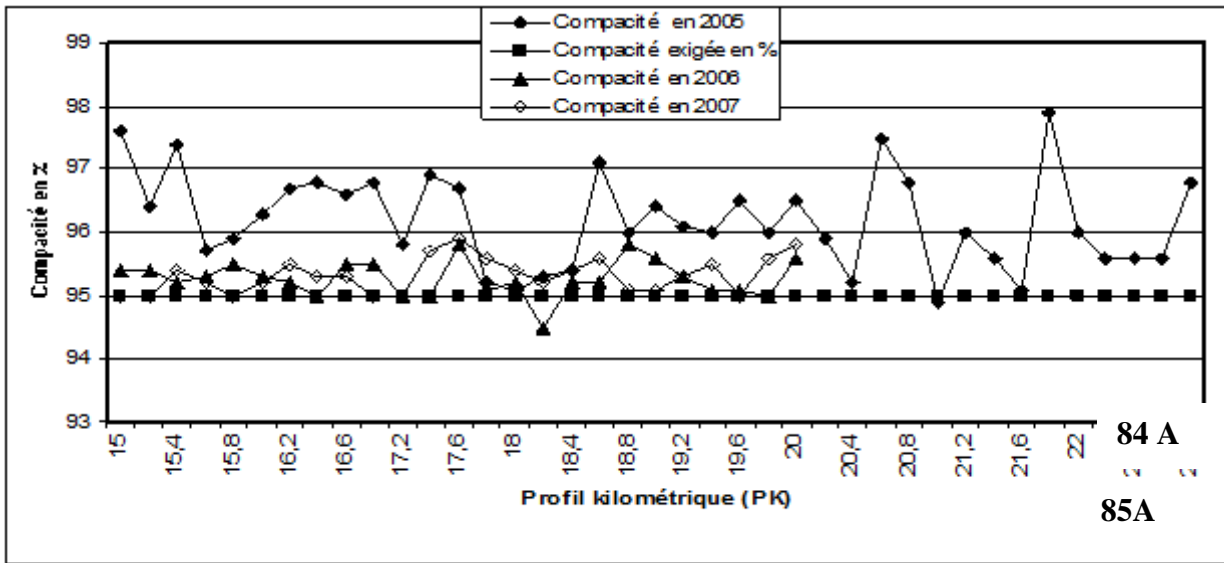


Figure 104 : Résultats de compacité, de poids volumique sec et teneurs en eau en 2005 et en 2006 du PK 20+200 au PK 23+800 sur la route : Abong-Mbang-Nkouak



**Figure 105:** Résultats de compacité, de poids volumique sec et teneurs en eau du PK 15+000 au PK 22+800 en 2005, du PK 18+000 au PK 22+800 en 2006 et du PK 15+200 au PK 20+000 en 2007 de la route : Ngoura-Yola

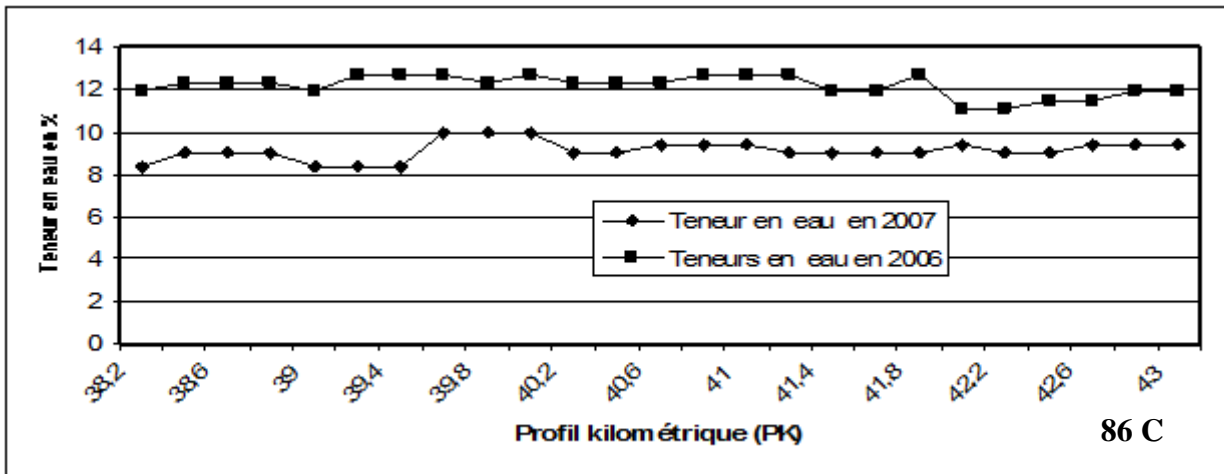
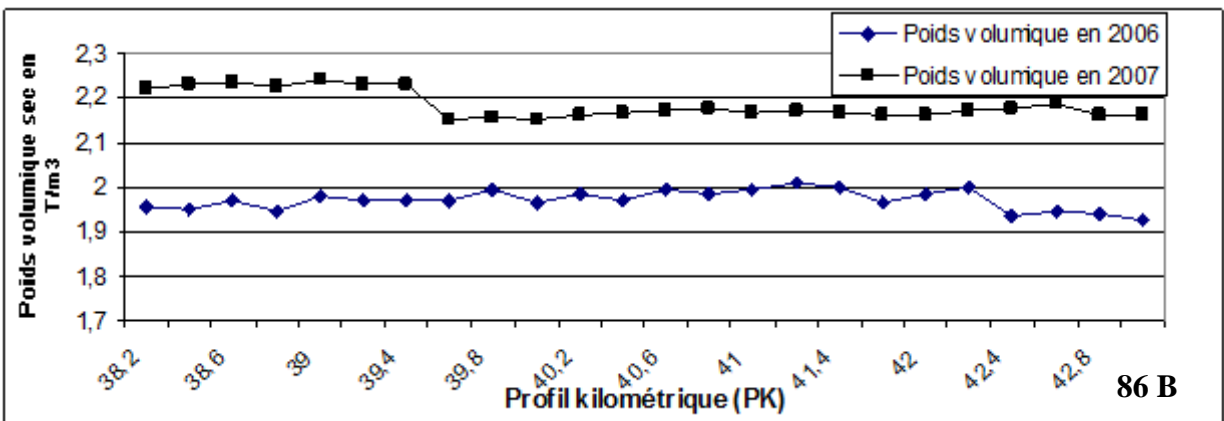
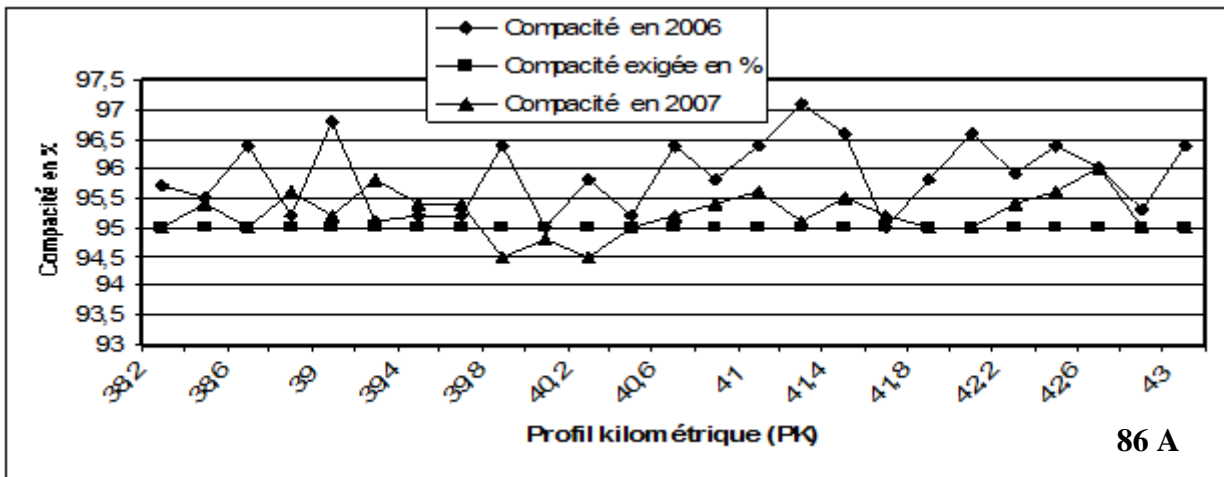


Figure 106 : Résultats de compacité, de poids volumique sec et teneurs en eau du PK 38+200 au PK 43+000 en 2006 et en 2007 sur la route : Yola-Yokadouma

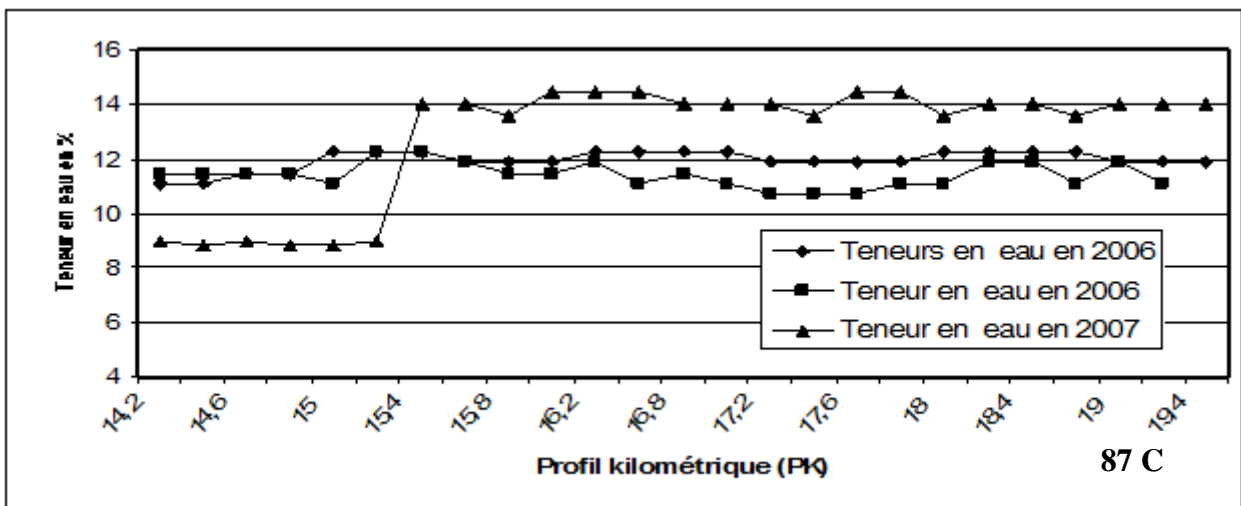
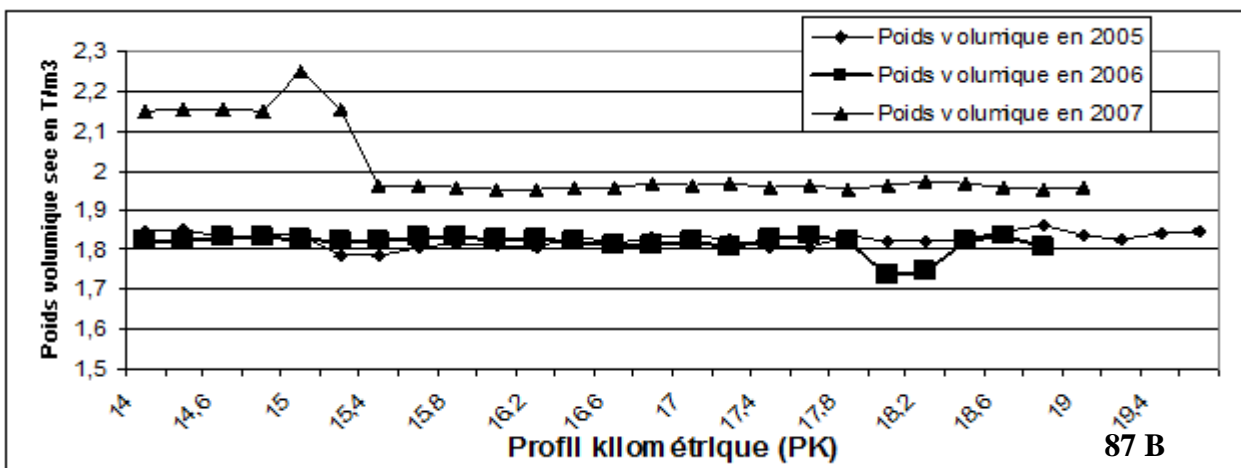
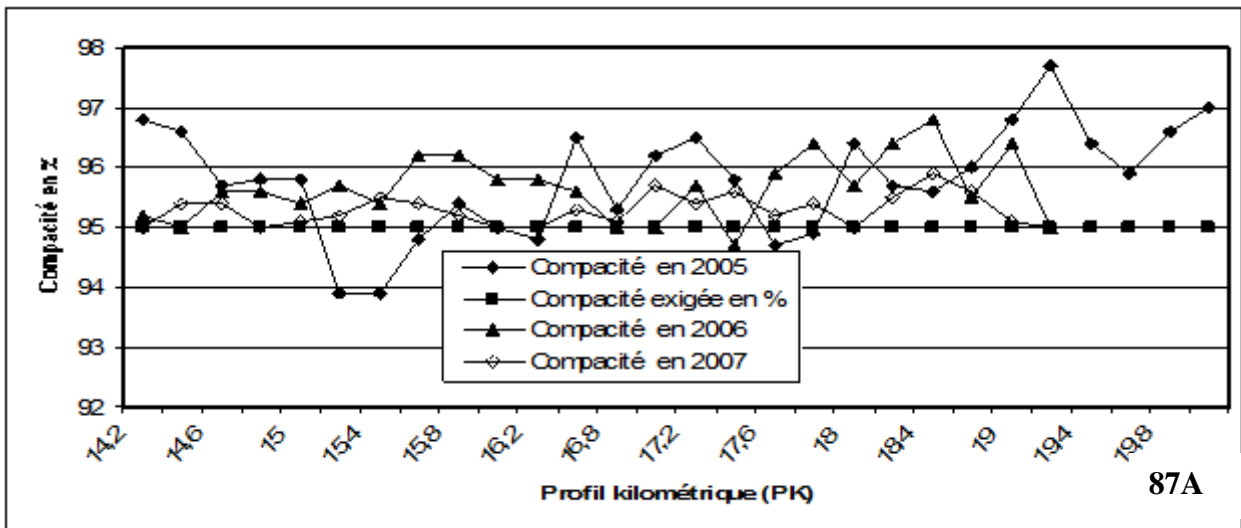


Figure 107 : Résultats de compacité, de poids volumique sec et de teneur en eau du PK 14+200 au PK 19+400 en 2005, 2006 et en 2007 sur la route Yokadouma-Bangoué



**Tableau 56** : Comparaison des résultats des poids volumiques secs in situ obtenus lors de la mise en œuvre de la plate-forme des routes en terre entre 2005 et 2007 dans la Région de l'Est

Tronçon	Année	PK	Couche concernée	Résultats moyens de poids volumiques secs obtenus	Observations
Ngoura-Yola	2005	15+000-20+000	Plate forme	$\gamma_d = 2166$ ; C > 95	Le poids volumique sec chute au fur des années pour défaut de rechargement
	2006	18+000-19+800	Plate forme	$\gamma_d = 2000$ ; C > 95	
	2007	15+200-20+000	Plate forme	$\gamma_d = 1950$ ; C > 95	
Yola-Yokadouma	2005	39+000-44+200	Plate forme	$\gamma_d = 1980$ ; C > 95	Il y a eu le rechargement en 2005 et en 2006 après la mise en forme
	2006	39+200-43+600	Plate forme	$\gamma_d = 2070$ ; C > 95	
	2007	40+200-44+200	Plate forme	$\gamma_d = 2176$ ; C > 95	
Yokadouma-Bangoué	2005	15+200-19+600	Plate forme	$\gamma_d = 1905$ ; C > 95	Il y a eu des remblais ponctuels en 2005 après la mise en forme
	2007	15+200-19+400	Plate forme	$\gamma_d = 2056$ ; C > 95	
Abong-Mbang-Kouak	2005	20+200-24+000	Plate forme	$\gamma_d = 1874$ ; C > 95	Rechargement en 2005, le poids volumique sec de référence a chuté en 2006
	2006	18+400-21+200	Plate forme	$\gamma_d = 1868$ ; C > 95	

$\gamma_d$  : Poids volumique sec de référence Proctor en kg/m<sup>3</sup> et C : compacité en %.

**Tableau 57** : Récapitulatif des contraintes admissibles des points de sondages pénétrométriques au niveau du Pont semi-définitif au PK 6 km du tronçon : Kobi-Mbang

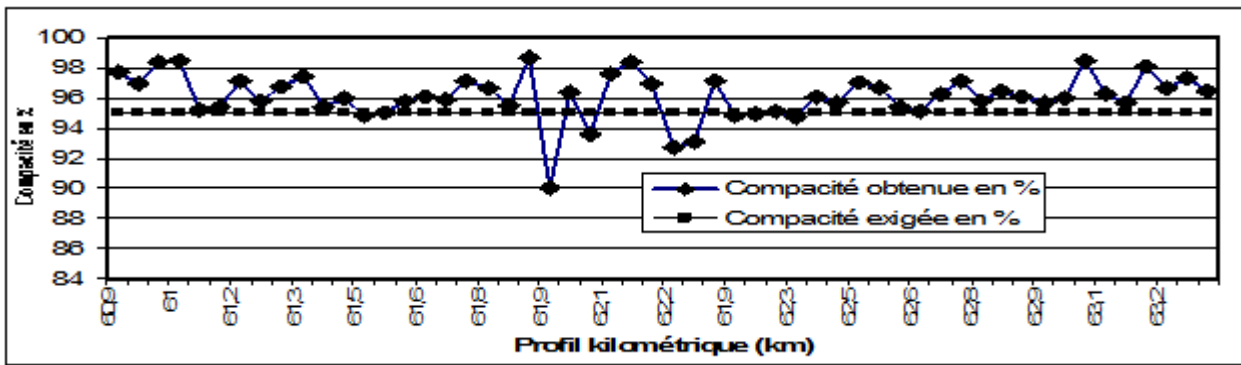
N° sondage	Profondeur par rapport au niveau du sol (m) de.....à		Résistance en pointe (bars)	Coefficient de sécurité	Contrainte admissible (bars)
SPD1	0,00	0,60	12	20	0,6
	0,60	1,60	95,2	20	4,8
SPD2	0,00	0,60	9	20	0,4
	0,60	1,00	31	20	1,6
	1,00	1,60	110	20	5,5
SPD3	0,00	0,60	9	20	0,4
	0,60	1,20	54	20	2,7
	1,20	1,60	124	20	6,2
SPD4	0,00	0,60	9	20	0,4
	0,60	1,20	25	20	2,7
	1,20	1,60	125	20	6,2
SPD5	0,00	0,60	8	20	0,4
	0,60	1,00	45,5	20	2,3
	1,00	1,60	104	20	5,2
SPD6	0,00	0,60	6	20	0,3
	0,60	1,00	39,5	20	2,0
	1,00	1,60	107	20	5,3

**Tableau 58** : Récapitulatif des contraintes admissibles des points de sondages pénétrométriques au niveau du Pont semi-définitif du PK 27,1km du tronçon : Mampang-Angossas-Mboma

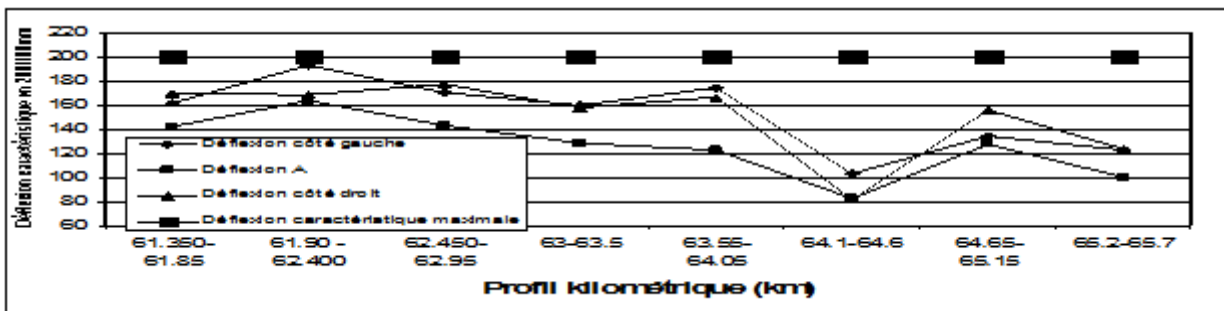
N° sondage	Profondeur par rapport au niveau du sol (m) de.....à		Résistance en pointe (bars)	Coefficient de sécurité	Contrainte admissible (bars)
SPD1	0,00	0,60	13	20	0,6
	0,60	1,40	34	20	1,7
	1,40	1,80	125	20	6,1
SPD2	0,00	0,80	20	20	1,0
	0,80	1,40	63	20	3,1
	1,40	1,80	123	20	6,1
SPD3	0,00	1,00	19	20	1,0
	1,00	1,80	68	20	3,4
	1,80	2,40	144	20	7,2
SPD4	0,00	0,20	6	20	0,3
	0,20	1,00	22	20	1,1
	1,10	1,80	73	20	3,6
	1,80	2,40	136	20	6,8

**Tableau 59** : Récapitulatif des contraintes admissibles des points de sondages pénétrométriques au niveau du Pont semi-définitif du PK 19,9 du tronçon : Ampel-Lomié

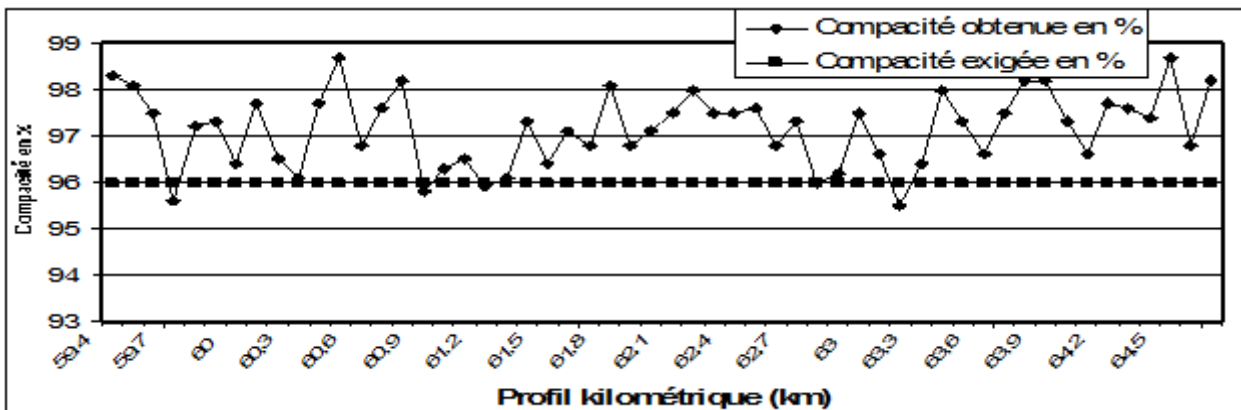
N° sondage	Profondeur par rapport au niveau du sol (m) de.....à		Résistance en pointe (bars)	Coefficient de sécurité	Contrainte admissible (bars)
SPD1	0,00	1,60	18	20	0,9
	1,60	3,20	55	20	2,8
	3,20	4,2	155	20	7,7
SPD2	0,00	1,60	17	20	0,8
	1,60	3,20	46	20	2,3
	3,20	4,20	146	20	7,3
SPD3	0,00	1,60	11	20	0,6
	1,60	2,80	42,2	20	2,1
	2,80	3,60	91	20	4,6
SPD4	0,00	1,00	9	20	0,4
	1,00	2,20	28	20	1,4
	2,20	3,20	65	20	3,2
	3,20	4,20	121	20	6,1
SPD5	0,00	1,20	15,7	20	0,8
	1,20	2,00	59,5	20	2,9
	2,00	3,60	135,7	20	6,8



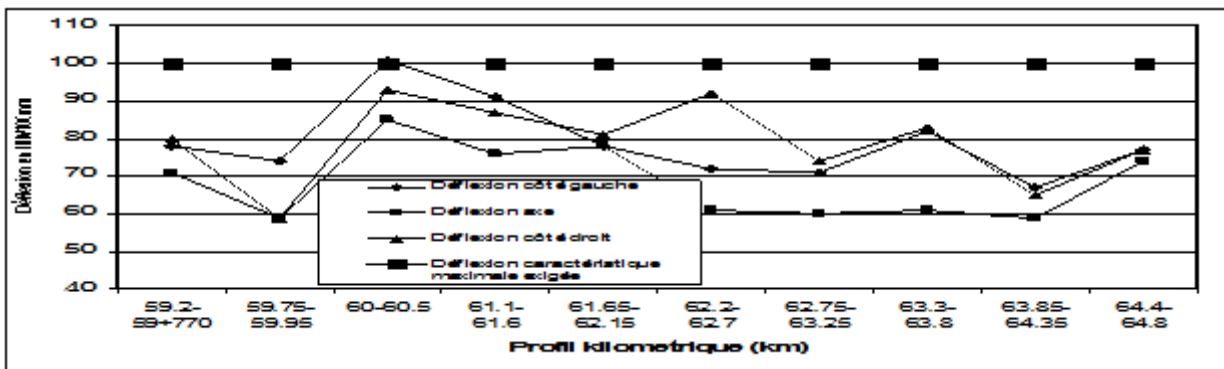
**Figure 108 :** Résultats de compacités sur la plate- forme du PK 60+850 au PK 63+850 sur la route Abong-Mbang-Bonis en juin 2009



**Figure 109 :** Résultats de déflexions sur la plate- forme du PK 61+350 au PK 65+150 sur la route Abong-Mbang-Bonis en juin 2009



**Figure 110 :** Résultats de compacités sur la couche de fondation entre PK 59+400 et 64+800 de la route Abong-Mbang-Bonis



**Figure 111 :** Résultats de déflexions sur la couche de fondation entre PK 59+200 et 65+800 de la route Abong-Mbang-Bonis

### **III.3.7.2.1.2. Essais de compacité et de déflexion sur la couche de fondation**

Les essais de compacités et de déflexions sur la couche de fondation ont été exécutés respectivement entre le PK 59+400 au PK 64+800, soit 3,4 km et entre PK 59+200 et PK 65+800, soit 6,6 km. Les résultats des essais sont représentés sous forme des courbes (Fig.110 et 111) ci-après d'une part et d'autre part sous forme des tableaux A23 et A24 dans l'annexe.

Les résultats de compacité obtenus sur la couche de fondation (Fig. 110) du PK 59+400 au PK 64+800, soit 5,4 km sont conformes aux exigences du CCTP (compacité supérieure à 96 %).

Les résultats de déflexions caractéristiques obtenus sur la couche de fondation (Fig. 111) PK 59+200 et 65+800, soit 6,6 km sont conformes aux exigences du CCTP (déflexions caractéristiques inférieures à 100/100 mm). Par conséquent, ces zones sont réceptionnables.

### **III.3.7.2.1.3. Essais de compacité et de déflexion sur la couche de base**

Les essais de compacités et de déflexions sur la couche de base ont été exécutés respectivement entre le PK 62+780 au PK 66+980, soit 4,1 km et entre PK 62+750 et PK 66+900, soit 4,250 km. Les résultats des essais sont représentés sous forme des courbes (Fig. 105 et 106) ci-après d'une part et d'autre part sous forme des tableaux A25 et A26 dans l'annexe.

Les résultats de compacités sur la couche de base (Fig. 112) du PK 62+780 au PK 66+880, soit 4,1Km montrent que 2 points sont à reprendre, il s'agit des points des PK 63+180 km et du PK 65+380 où les compacités sont inférieurs à 98 %. Les résultats de déflexions caractéristiques obtenus sur la couche de base (Fig. 113) du PK 62+750 au PK 66+900, soit 4,25 km sur la route Abong-Mbang-Bonis sont conformes aux exigences du CCTP. Par conséquent cette zone est réceptionnable.

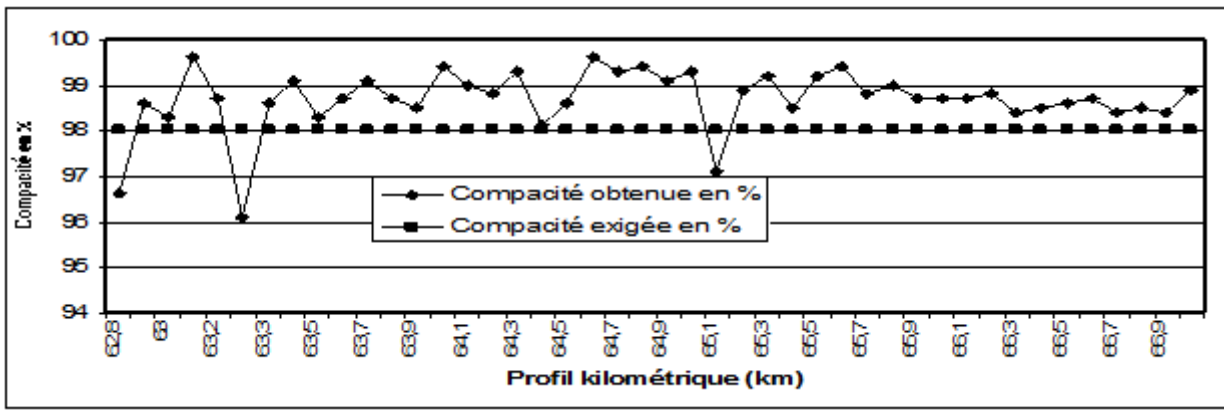
### **III.3.7.2.1.4. Essais de compacité sur la couche de roulement**

Les essais de compacités sur la couche de roulement ainsi que la mesure de l'épaisseur ont été exécutés entre PK 46+300 et PK 48+500. Les résultats des essais sont représentés sous forme des courbes (Fig. 114 et 115). Ces résultats de compacité et de mesures d'épaisseur de la couche de roulement sont conformes aux exigences du CCTP.

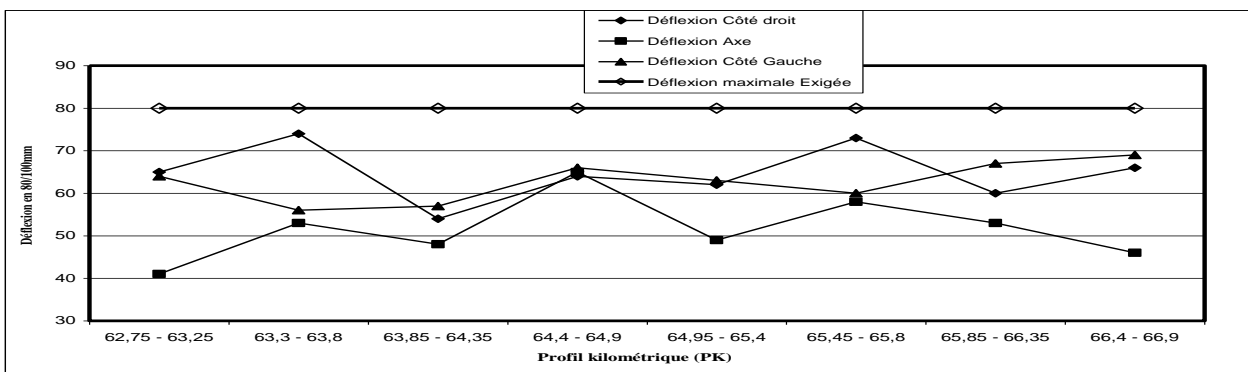
### **III.3.7.2.1.5. Essais au laboratoire sur les produits noirs**

#### **III.3.7.2.1.5.1. Essais Duriez et Marshall**

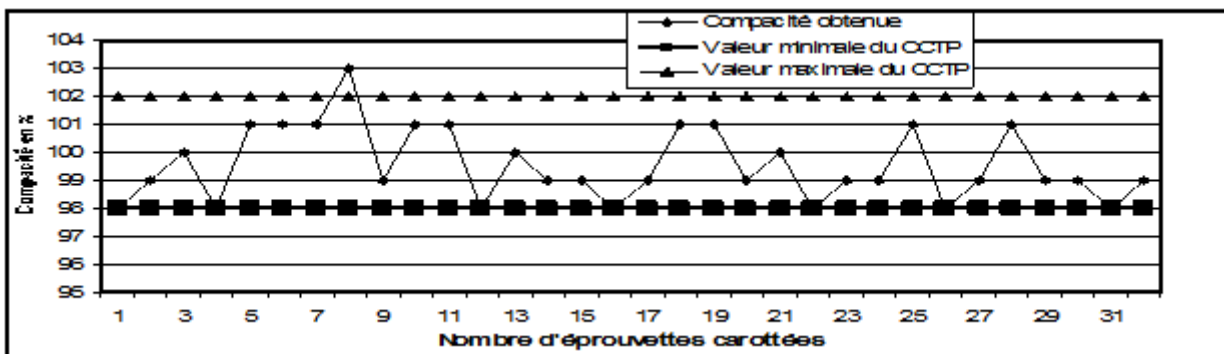
Les essais Duriez et Marshall pour l'enrobé prélevé in situ entre PK 0+000 et PK 86+000 (section discontinue) lors de mise en œuvre se sont réalisés au laboratoire. Il faut signaler que la mise en œuvre de l'enrobé sur le terrain est réalisée en fonction de la formulation du béton bitumineux arrêtée pour le projet de la route Ayos-Abong-Mbang. Il s'agit de : 34 % de 10/14, 11 % de 6/10, 55 % de 0/5 et de 5 % de bitume 50/70



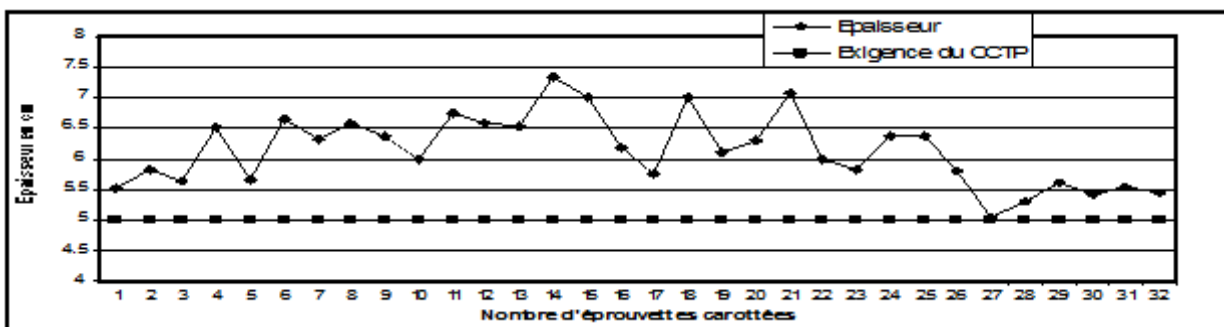
**Figure 112 :** Résultats de compacité sur la couche de base du PK 62+780 au PK 66+880 de la route Abong-Mbang-Bonis



**Figure 113 :** Résultats de déflexions sur la couche de base entre PK 62+750 et 66+900 de la route Abong-Mbang-Bonis



**Figure 114 :** Résultats de compacité sur la couche de roulement du PK 46+300 au PK 48+500 de la route Abong-Mbang-Bonis



**Figure 115 :** Epaisseur de la couche de roulement du PK 46+300 au PK 48+500 de la route Abong-Mbang-Bonis

L'extraction de bitume est représentée par les figures 116 et 117. De l'analyse de ces résultats, il ressort qu'ils sont conformes aux exigences du CCTP. Cette conformité garantit la tenue de la chaussée pendant le délai prescrit lors du dimensionnement.

#### **III.3.7.2.1.5.2. Essais de viscosité sur le Cut-Back 10/15 et sur 400/600**

Les résultats de viscosité sont récapitulés dans le tableau 60. De l'analyse de ces résultats obtenus, il ressort qu'ils sont conformes aux prescriptions techniques du CCTP. Par conséquent, ce cut back peut être utilisé sans problème.

Au vue de changement des citernes de transport du cut-back et d'un seul fournisseur des hydrocarbures au Cameroun (TOTAL), la vérification du nouvel arrivage du cut-back doit être de rigueur.

#### **III.3.7.2.1.5.3. Essais de pénétration de bitume 50/70**

Les résultats de pénétration de bitume sont présentés dans le tableau 61. Ces résultats sont conformes aux prescriptions du CCTP. Par conséquent, le bitume utilisé par l'entreprise est de la classe demandée 50/70. Comme pour le cas du cut-back, la vérification de la classe de bitume doit se faire sur chaque arrivage.

#### **III.3.7.2.1.5.4. Couche d'accrochage**

La couche d'accrochage est une couche de liaison entre la couche de base imprégnée et la couche de roulement. Cette couche est exécutée en cut-back 400/600. Pour cette couche, les résultats de quantité de liants de 400/600 obtenus entre PK 48+830 et 55+423 sont représentés sous forme des courbes (Fig. 118) .. Les résultats obtenus sont conformes.

### **III.3.7.2.2. Route Nkoemvon-Ambam dans la Région du Sud**

Pour la route Nkoemvon-Ambam, seulement les essais in-situ ont été réalisés, il s'agit des, essais de déflexion sur la plate- forme et sur la couche de fondation ainsi que les essais de compacité sur la plate-forme, sur la couche de fondation et sur la couche de base.

#### **III.3.7.2.2.1. Essais de déflexion sur la plate- forme**

Les essais de déflexions ont été réalisés en continu sur les rives gauche, et droite et sur l'axe avec un pas de mesure de 20 m (Tab. 62). Les résultats obtenus sont dans l'ensemble satisfaisants. excepté entre le PK 20+720 et le PK 20+940 où les déflexions sont supérieures à 200/100 mm au niveau de l'axe et de la bande gauche. Pour ces zones où la déflexion caractéristique est supérieure à 200/100 mm, le compactage a été repris.

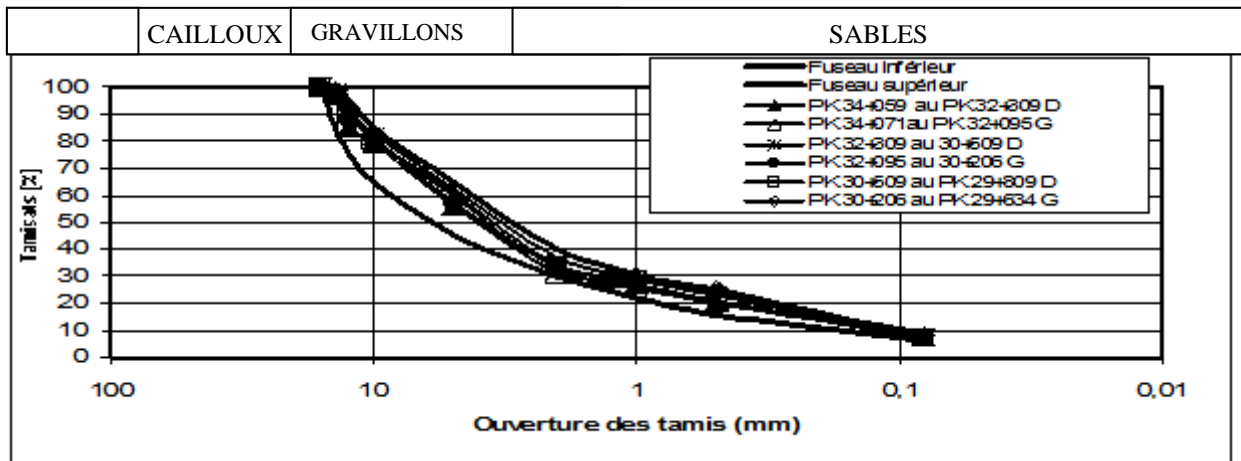


Figure 116 : Courbes granulométrique après extraction de bitume sur la route Ayos-Abong-Mbang

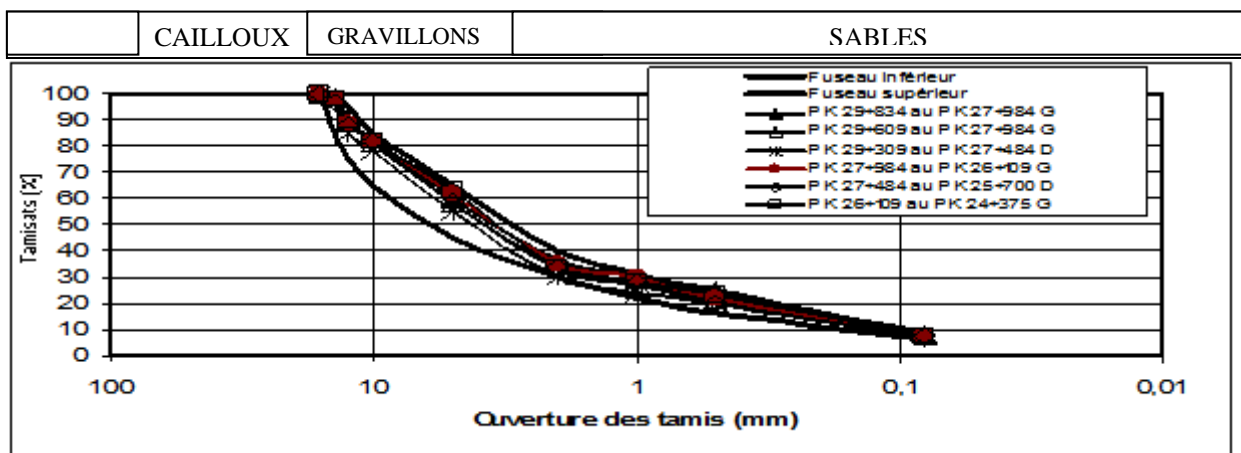


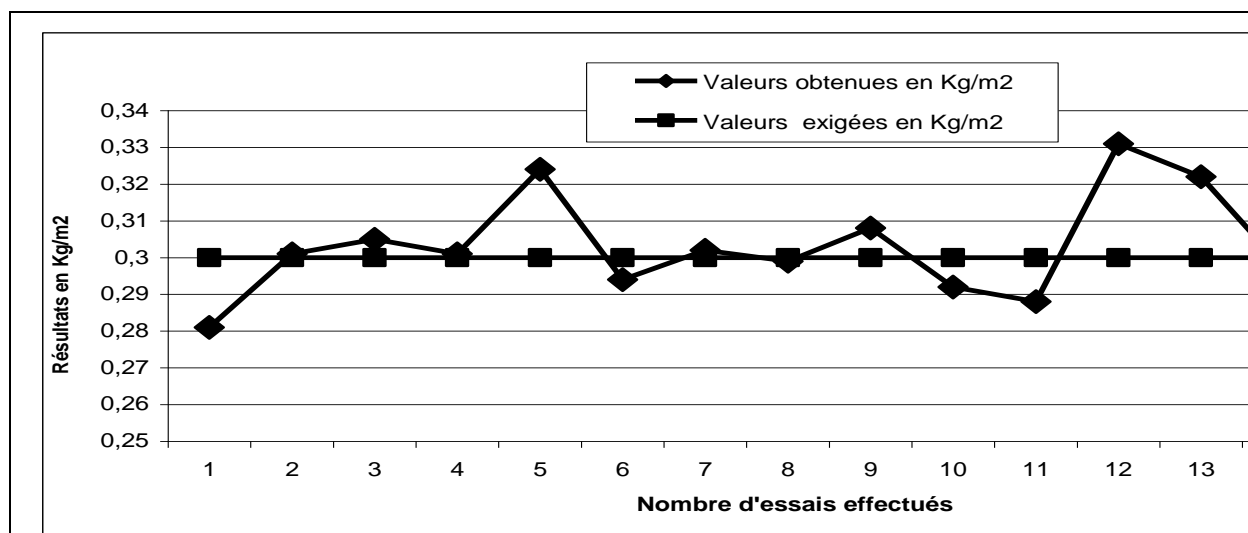
Figure 117 : Courbes granulométriques après extraction de bitume sur la route Ayos-Abong-Mbang

Tableau 60 : Résultats de viscosité du cut-back utilisé sur la route Abong-Mbang-Bonis

N°	Date	Température de l'essai	Temps d'écoulement	Moyenne	Spécification	Observations
1	02/07/2009	40	15s ; 14s	14,5 s	Entre 10 - 15s	Conforme
2	02/07/2009	40	11s ; 12s	11,5 s	Entre 10 - 15s	Conforme
3	02/07/2009	40	558s ; 550s	554 s	Entre 400-600s	Conforme
4	02/07/2009	40	16s ; 12s	14 s	Entre 10 -15s	Conforme
5	02/07/2009	40	12s ; 12s	12 s	Entre 10 -15s	Conforme
6	02/07/2009	40	11s ; 12s	11,5 s	Entre 10 -15s	Conforme
7	02/07/2009	40	366s ; 484s	425 s	Entre 400-600s	Conforme
8	02/07/2009	40	5900s ; 570s	580 s	Entre 400-600s	Conforme

**Tableau 61** : Résultats de pénétration de bitume 50/70 utilisé sur la route : Abong-Mbang-Bonis

N°	Date	T° d'essai	Enfoncement (en 10è de mm)				Spécification	Observation
			1	2	3	Moyenne		
1	03/07/09	25°C	62	66	64	64	50 - 70	Conforme
2	03/07/09	25°C	64	72	70	69	50 - 70	Conforme
3	03/07/09	25°C	66	67	71	68	50 - 70	Conforme
4	03/07/09	25°C	62	66	68	65	50 - 70	Conforme
5	03/07/09	25°C	71	60	72	68	50 - 70	Conforme
6	03/07/09	25°C	65	67	70	67	50 - 70	Conforme
7	03/07/09	25°C	63	70	73	69	50 - 70	Conforme
8	03/07/09	25°C	63	73	70	68	50 - 70	Conforme
9	03/07/09	25°C	63	62	63	63	50 - 70	Conforme
10	03/07/09	25°C	62	75	68	68	50 - 70	Conforme



**Figure 118** : Quantité des liants (400/600) mesurés pour la couche d'accrochage entre PK 48+830 et 55+423 de la route Abong-Mbang-Bonis



#### **III.3.7.2.2.2. Essais de déflexion sur la couche de fondation**

Les mesures de déflexions sur la couche de fondation sont effectuées du PK 5+900 au PK 11+440. Les résultats obtenus et qui sont par ailleurs conformes aux prescriptions du CCTP, sont récapitulés dans le tableau 63.

#### **III.3.7.2.2.3. Essais de compacité sur la plate-forme**

Les résultats de compacité, de densités et de teneurs en eau de la plate-forme de la route Nkoemvon-Ambam du PK 18+000 au PK 20+700 sont présentés sous formes de courbes (Fig. 119) et du tableau A27 en annexe. Les compacités sont conformes aux exigences du CCTP.

La moyenne de valeurs de poids volumiques secs in situ est de  $1711 \text{ Kg/m}^3$  et la moyenne des valeurs de teneurs en eau in situ est de 20,40 %. Ces résultats montrent que les matériaux de la plate-forme sont argileux.

#### **III.3.7.2.2.4. Essais de compacité sur la couche de fondation**

Pour les essais de compacité, les travaux de réglage de la couche de fondation sont rendus du PK 5+900 au PK 8+900. Les résultats sont présentés sous forme des courbes pour la compacité obtenue, les poids volumiques et les teneurs en eau (Fig. 120). Ces résultats sont détaillés dans le tableau A28 en annexe. Il ressort de l'analyse de ces résultats que les valeurs de compacité sont conformes aux exigences du CCTP.

Les poids volumiques optimum in-situ varient entre 1890 et  $2110 \text{ Kg/m}^3$  et les teneurs en eau correspondantes varient entre 11,1 et 14,4 %. Ces valeurs des poids volumiques et des teneurs en eau montrent que les matériaux utilisés sur la couche de fondation ont des bonnes caractéristiques géotechniques. Par conséquent, ces matériaux présentent un bon comportement.

#### **III.3.7.2.2.5. Essais de compacité sur la couche de base**

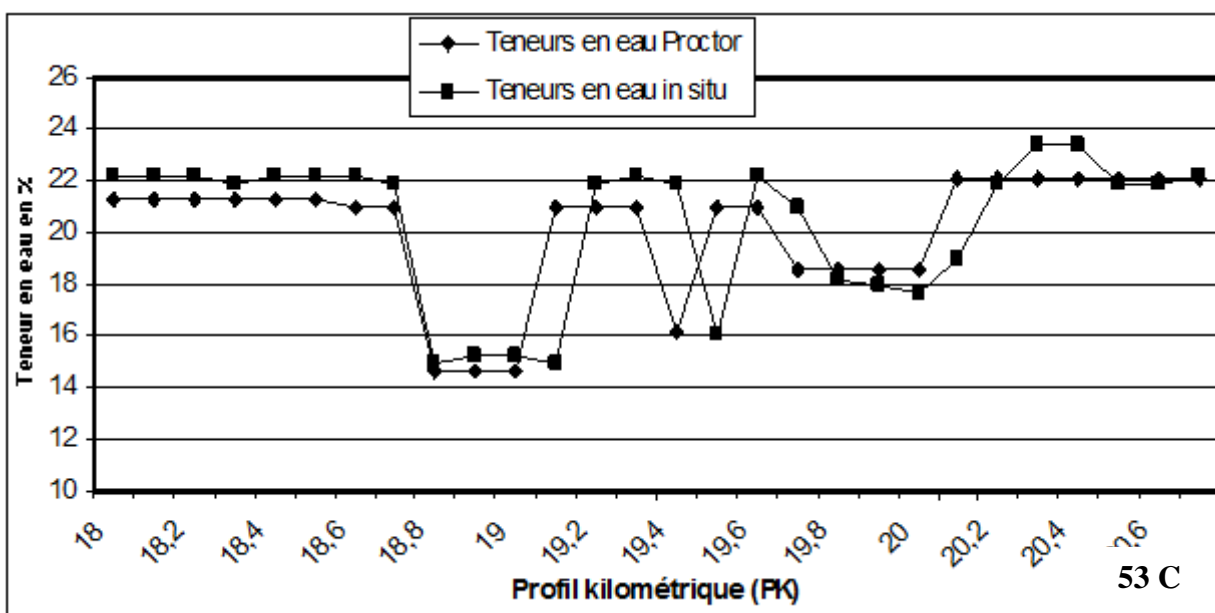
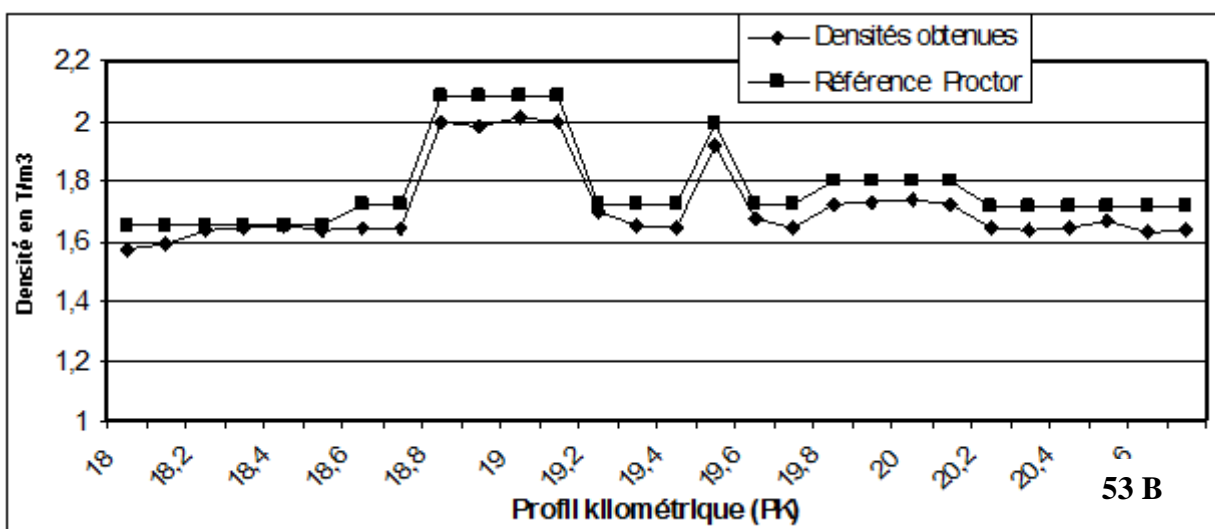
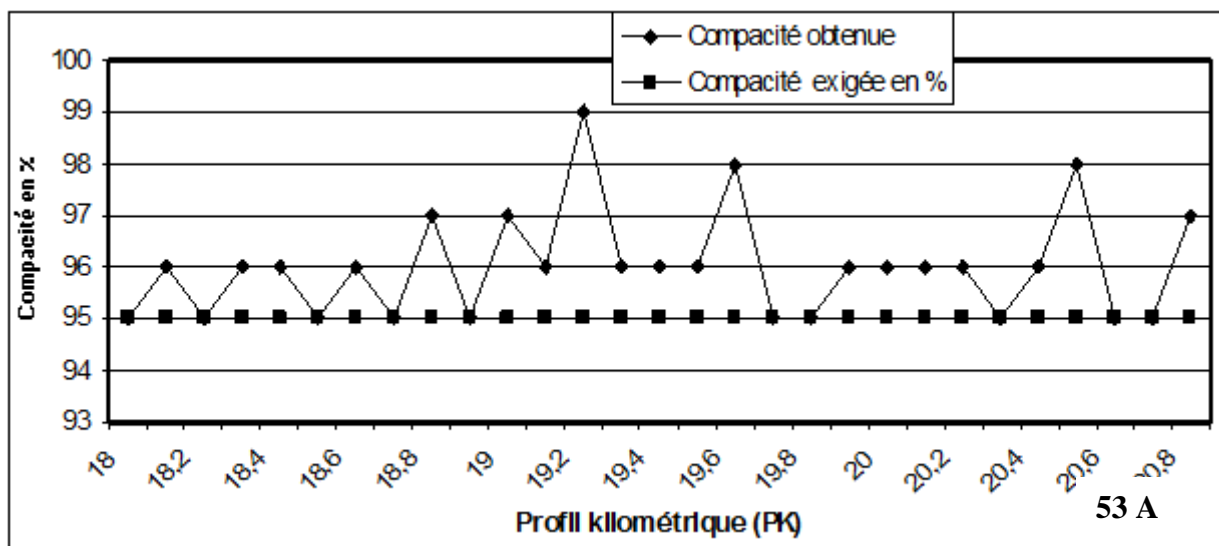
Les résultats de compacité obtenus entre PK 10+000 au PK 12+100 sont présentés sous formes des courbes (Fig. 121). Leur détail est dans le tableau A29 en annexe. Ces résultats de compacité obtenus sont conformes aux exigences du CCTP. Les poids volumiques in situ sont élevés par rapport aux poids volumiques exigés par le CCTP à savoir  $2150 \text{ Kg/m}^3$ . Ils varient entre 2233 et  $2364 \text{ kg/m}^3$ . Par conséquent, ces matériaux présentent un bon comportement et présagent d'une bonne tenue de la chaussée.

**Tableau 62 :** Résultats de déflexion caractéristique (dc) sur la plate-forme du PK 18+00 au PK 20+940 de la route Nkoemvon-Ambam

PK	Côté	Nombre de mesures	Moyenne	Ecart-type	dc
18+000-18+760	Gauche	32	70	22	99
	Axe	5	57	11	72
	Droit	32	68	28	104
18+760-19+640	Gauche	34	98	28	134
	Axe	9	95	37	143
	Droit	34	100	23	130
19+640-20+200	Gauche	24	84	23	114
	Axe	3	66	38	116
	Droit	24	61	19	86
20+200-20+720	Gauche	22	45	14	64
	Axe	4	34	11	48
	Droit	22	45	16	65
20+720-20+940	Gauche	8	147	46	207
	Axe	3	130	73	225
	Droit	8	110	34	153

**Tableau 63 :** Résultats de déflexion caractéristique (dc) sur la couche de fondation du PK 5+900 au PK 11+440 de la route Nkoemvon-Ambam

PK	Côté	Nombre de mesures	Moyenne	Ecart-type	dc
5+900-7+120	Gauche	48	56	9	68
	Axe	16	51	6	59
	Droit	48	50	7	59
7+140-7+400	Gauche	12	51	8	62
	Axe	3	45	5	52
	Droit	12	70	14	88
7+440-9+780	Gauche	123	56	11	70
	Axe	33	50	11	65
	Droit	123	55	12	71
10+020-11+440	Gauche	83	56	10	69
	Axe	13	50	10	63
	Droit	83	55	12	71



**Figure 119 :** Résultats de compacité, de poids volumique sec et de teneurs en eau du PK 18+000 au PK 20+700 sur la plate-forme de la route Nkoemvon –Ambam

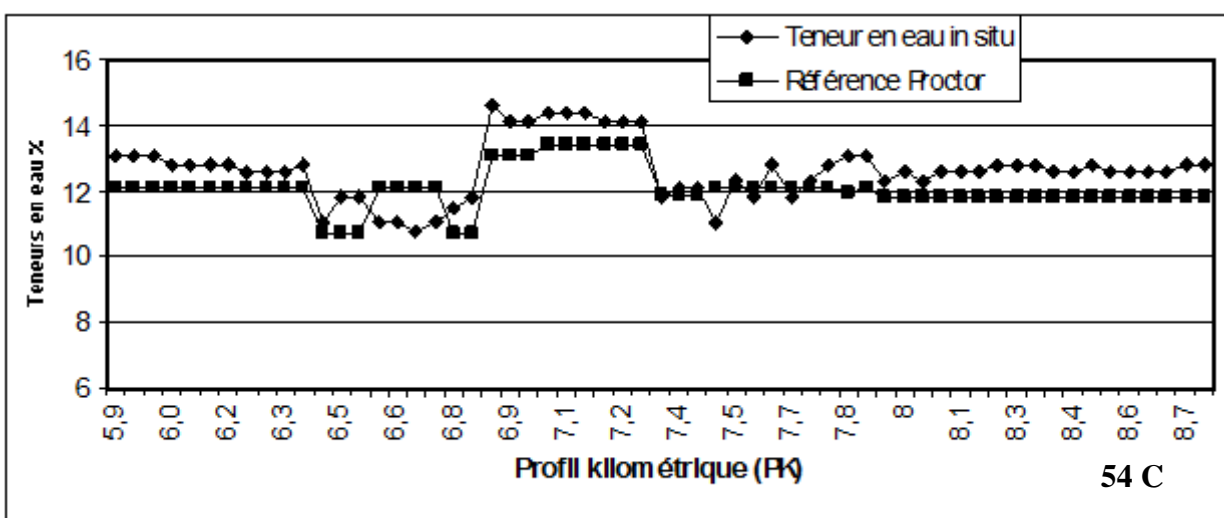
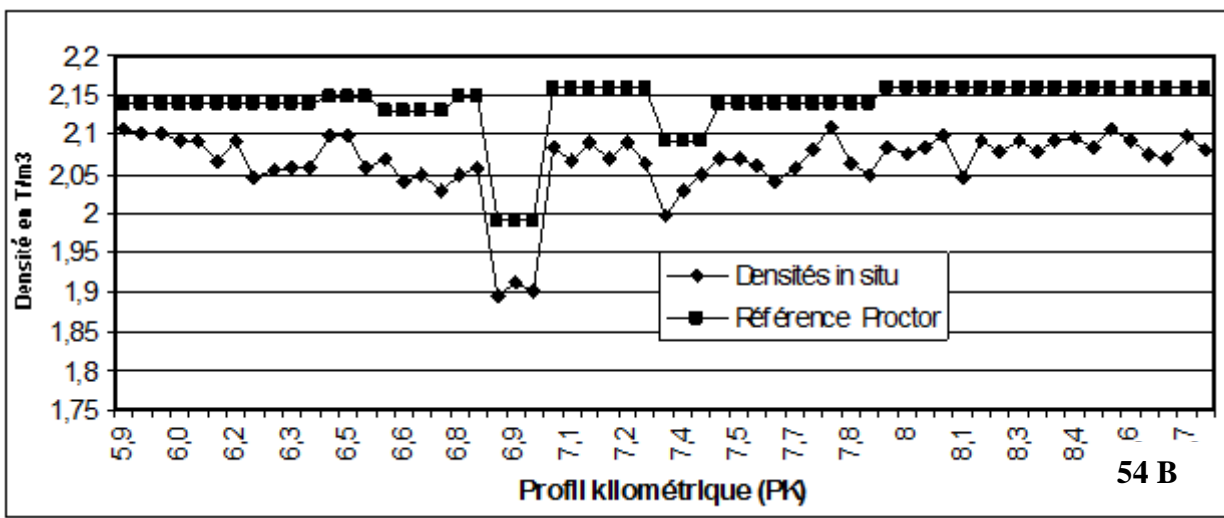
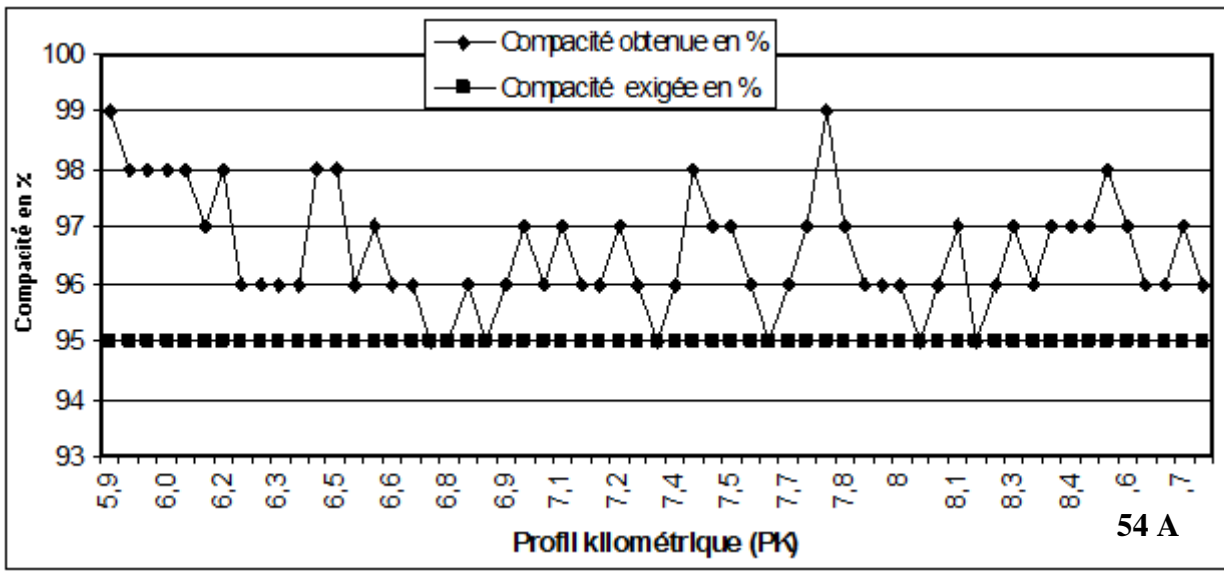
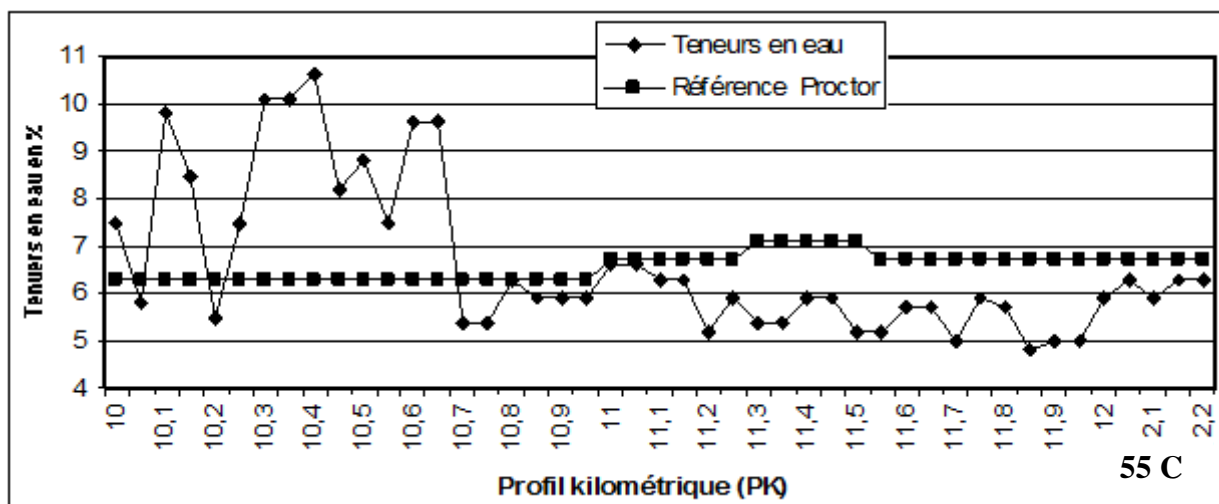
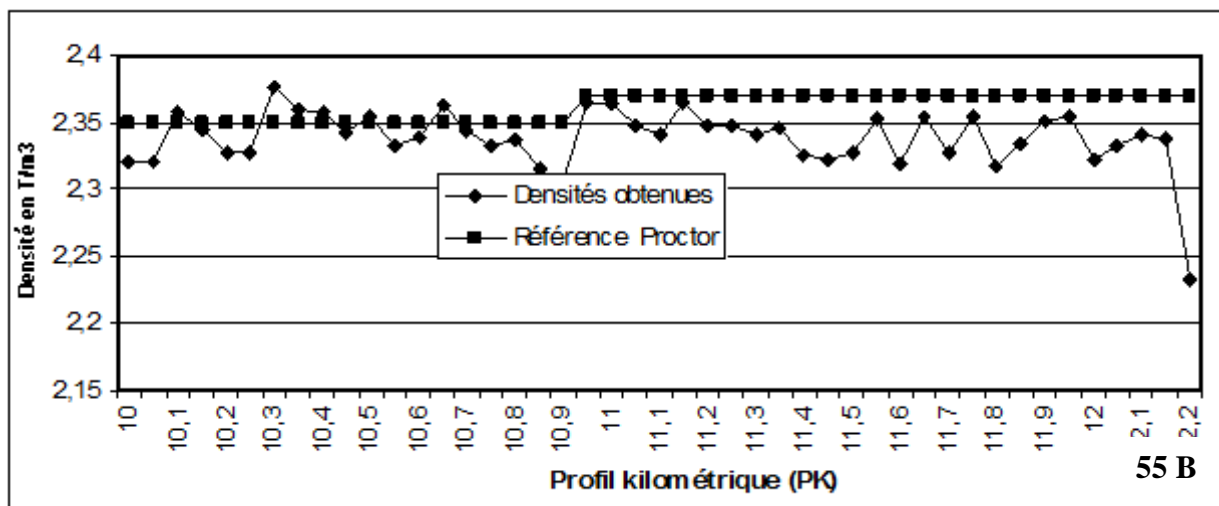
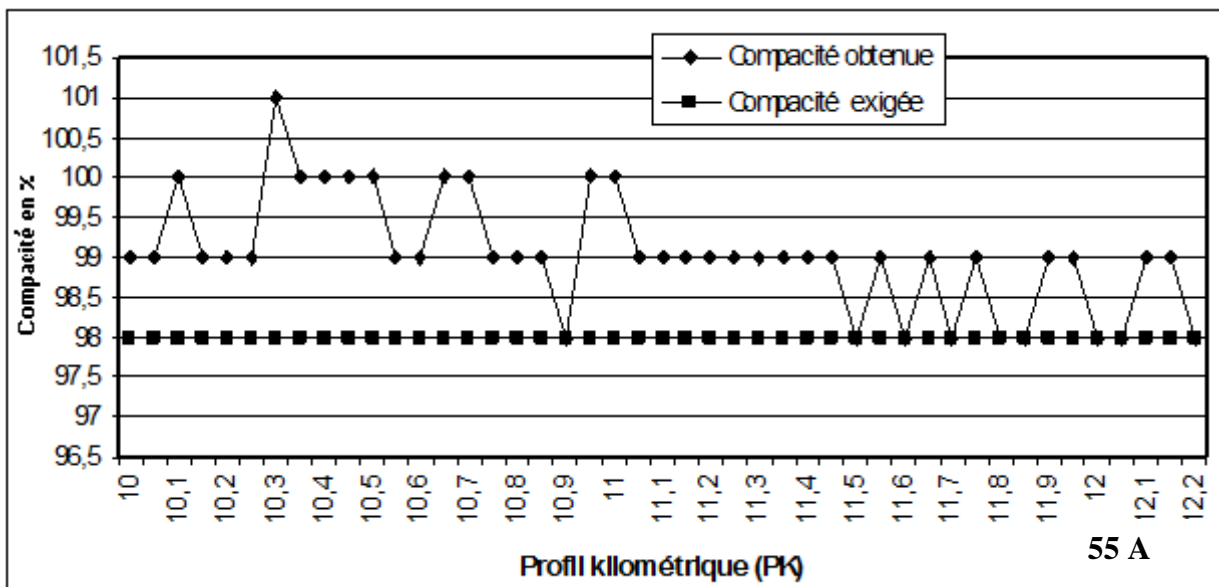


Figure 120 : Résultats de compacité, de poids volumique sec et de teneurs en eau du PK 5+900 au PK 8+750 sur la couche de fondation de la route Nkoemvon-Ambam



**Figure 121 :** Résultats de compacité, de poids volumique sec et teneurs en eau du PK 10+000 au PK 12+200 sur la couche de base de la route Nkoemvon-Ambam

### **III.4. CARACTERES GEOTECHNIQUES ET CARACTERES GEOCHIMIQUES : CORRELATIONS, INTERET**

Les comparaisons en géotechnique concernent, les caractéristiques géotechniques telles que le CBR, le poids volumique optimum et les indices de plasticité pour les matériaux du niveau médian et, les coefficients de Los Angeles et les poids spécifiques pour les roches. Il faut noter que pour les roches, trop peu d'essais ont été effectués par rapport aux matériaux d'altération.

#### **III.4.1. ROCHEs DU SOCLE**

Les relations entre propriétés géotechniques à savoir : poids spécifique ( $\gamma_s$ ) et coefficient de Los Angeles(LA) et paramètres d'appauvrissement (DVRAR) sont les suivantes :

$$LA = 1,877 \text{ DVRAR } \% + 24,74; N = 5; R^2 = 0,60;$$

$$\gamma_s = - 0,0089 \text{ DVRAR } \% + 2,767 ; N = 5 ; R^2 = 0,98.$$

N: Nombre d'échantillons; r: le coefficient de détermination qui représente la fraction de la variance de Y par la corrélation de Y avec X.

Le Los Angeles augmente avec l'altération de la roche et poids spécifique diminue avec l'altération de la roche. Ces corrélations sont aussi illustrées par les figures 122 et 123 ci-après.

Les relations entre propriétés géotechniques à savoir : poids spécifique ( $\gamma_s$ ) et coefficient de Los Angeles (LA) et paramètres d'enrichissement (IRIP) sont les suivantes :

$$LA = 1,465 \text{ IRIP } \% + 27,77; N = 5; R^2 = 0,548.$$

Le Los angeles augmente avec l'enrichissement en oxydes de fer ferrique. Cette corrélation qui est illustré aussi par la figure 124 ci-après est indicative vu le nombre réduit d'échantillons analysés.

#### **III.4.2. PARAMETRES NORMATIFS ET PROPRIETES MECANIQUES ET PHYSIQUES**

##### **III.4.2.1. Indice relatif de lixiviation potentielle IRLP et propriétés mécaniques des matériaux**

La corrélation entre IRLP ( $73,69 \leq \text{IRLP } \% \leq 85,26$ ) est :

$$\text{CBR} = - 1,32 \text{ IRLP } \% + 152,9 ; N = 5 ; R^2 = 0,73.$$

Le CBR diminue avec l'altération des silicates.

##### **III.4.2.2. Importance potentielle du fer ferrique libre (ifl) et propriétés mécaniques et physiques des matériaux**

Pour  $20,98 \leq \text{IFL} \leq 51,33$ , on obtient :

$$\text{CBR} = 0,61 \text{ IFL } \% + 24,3 ; N = 5 ; R^2 = 0,78 ;$$

$$\gamma_d = 0,01 \text{ IFL } \% + 1,77 ; N = 5 ; R^2 = 0,96.$$

Le CBR et la densité optimale augmentent avec l'enrichissement en oxydes de fer. Ces corrélations sont présentées aussi par la figure 125 et 126 ci- après.

#### **III.4.2.3. Importance potentielle d'aluminium libre (IAL) et propriétés mécaniques des matériaux**

Pour  $0,07 \leq IAL \leq 24,41$ , on a :

$$CBR = - 0,73 IAL \% + 56,5 ; N = 5 ; R^2 = 0,83$$

Le CBR diminue avec l'enrichissement en alumine. Cette corrélation est présentée aussi par la figure 127 ci - après.

#### **III.4.2.4. Indice relatif de confinement potentiel (IRCP) et propriétés mécaniques des matériaux**

$$IP = - 0,94 IRCP \% + 25,03 ; N = 5 ; R^2 = 0,96.$$

$$WL = -0,24 IRCP \% + 3,00 ; N = 5 ; R^2 = 0,81.$$

L'indice de plasticité et limite de liquidité diminuent avec l'augmentation du confinement du milieu. Ces corrélations sont présentées par les figures 128 et 129 ci après.

#### **III.4.2.5. Indice relatif de lixiviation potentiel (IRLP) et propriétés mécaniques des matériaux**

$$WP = 1,03 IRLP \% + 30,97 ; N = 5 ; R^2 = 0,78 ;$$

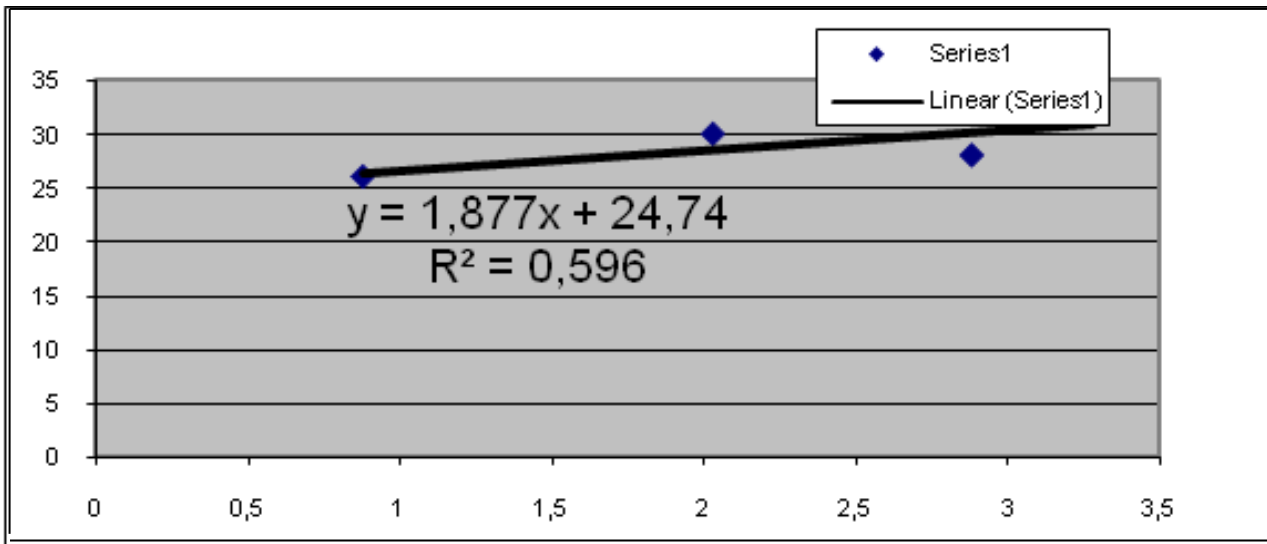
$$WL = 1,354IRLP \% - 27,09 ; N = 5 ; R^2 = 0,81.$$

Les limites de plasticité et de liquidité augmentent avec l'altération des silicates

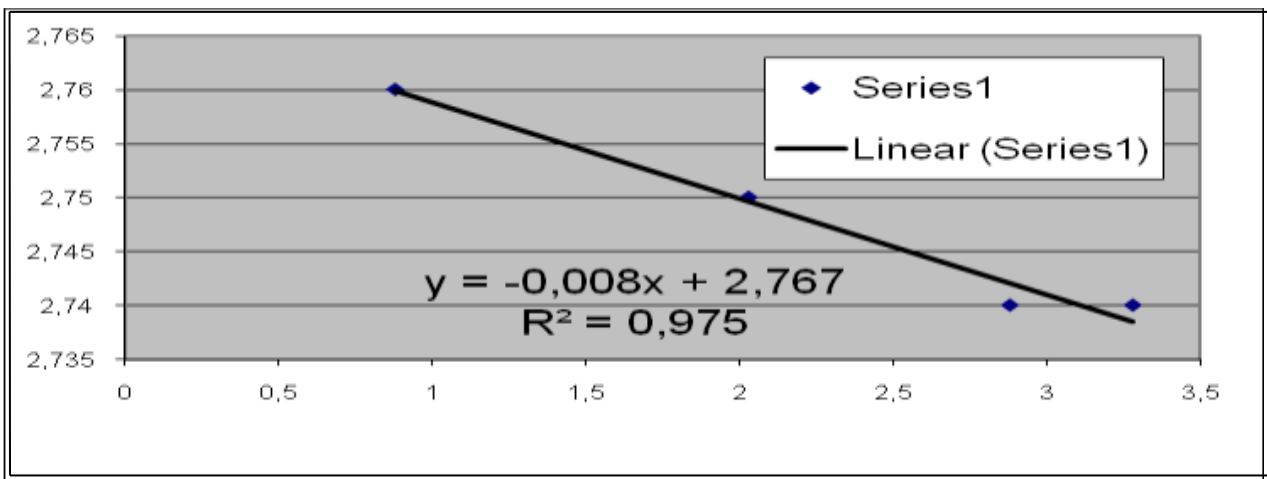
### **III.4.3. INTERETS DES MATERIAUX ETUDIES DANS LE GENIE CIVIL**

L'importance de ces matériaux est déduite d'une part de l'exploitation des diagrammes normatifs altérologiques et d'autre part des résultats des essais effectués en laboratoire. Les résultats obtenus par ces deux approches sont en concordance pour les paramètres communs exploités.

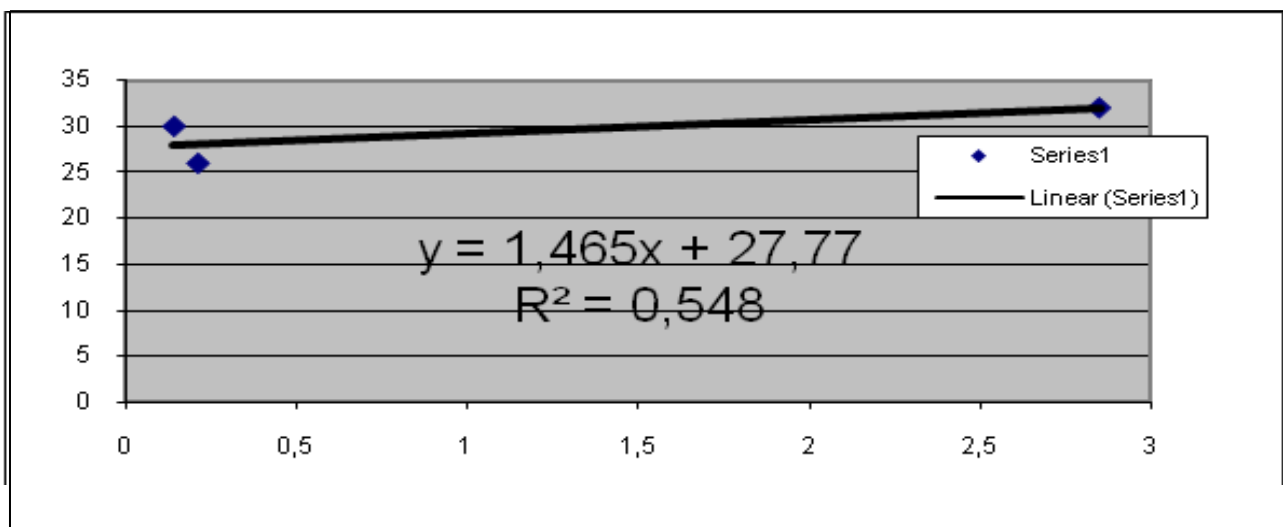
Les graves latéritiques du niveau médian des différents sites étudiés dans la Région de l'Est sont des matériaux ayant les caractéristiques géotechniques leur permettant d'être utilisés en remblais ordinaires, en remblais des blocs techniques, en couche de forme, et en couche de fondations pour les routes revêtues. Ceci amoindrit le coût par rapport aux routes construites avec les matériaux traités, soit au ciment, soit aux concassés suite à leur mauvaise qualité ne les permettant pas d'être utilisés tel quel. Les valeurs de DVRAR pour toutes les roches étudiées sont dans la classe variant de 0,88 et 5,59 %. Selon Ekodeck et Kamgang (2002), ces valeurs indiquent des roches saines ou des roches à l'altération très faible à faible, à texture rocheuse. Dans les travaux du Génie Civil, on peut les employer comme matériau tout venant, après concassage sur la couche de roulement en béton bitumineux ou en enduits superficiels, sur la couche de base ou en béton hydraulique.



**Figure. 122:** Corrélation entre le Los Angeles (LA) et le degré virtuel relatif de l'altération de la roche (DVRAR)

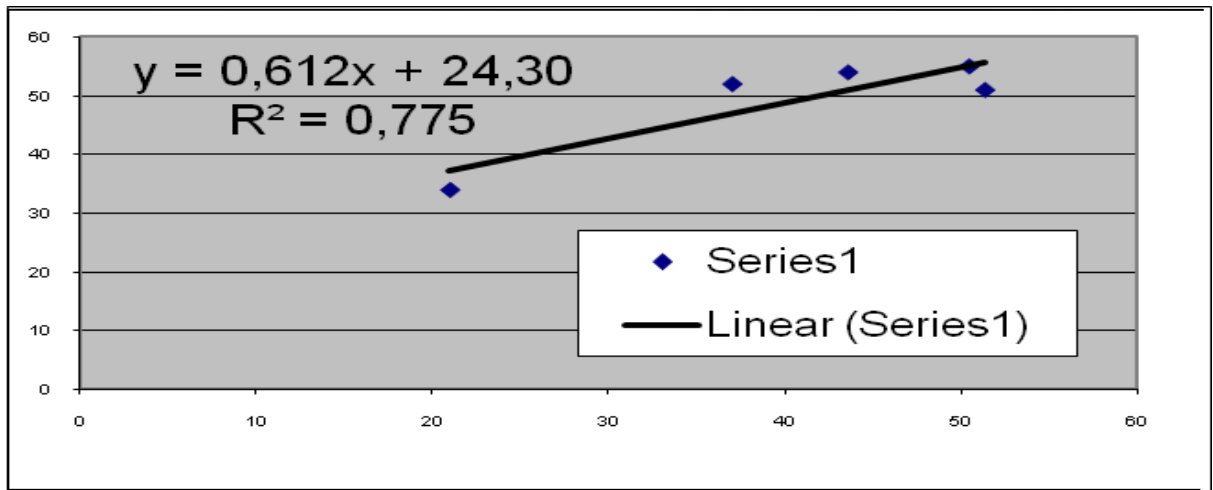


**Figure. 123:** Corrélation entre le poids spécifique ( $\gamma_s$ ) et le degré virtuel relatif de l'altération de la roche (DVRAR)

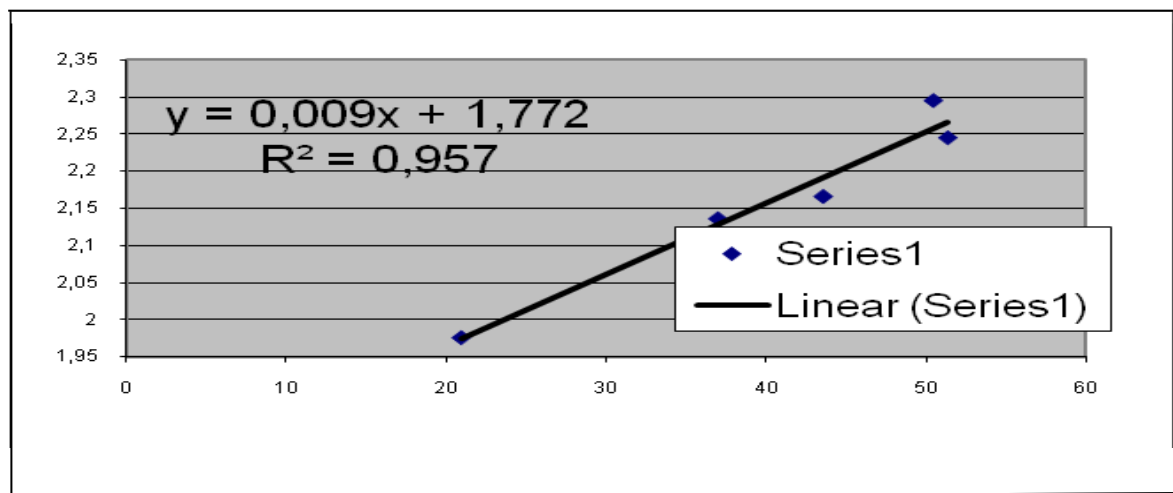


**Figure. 124:** Corrélation entre le Los Angeles (LA) et l'Indice relatif d'Induration Potentielle (IRIP)

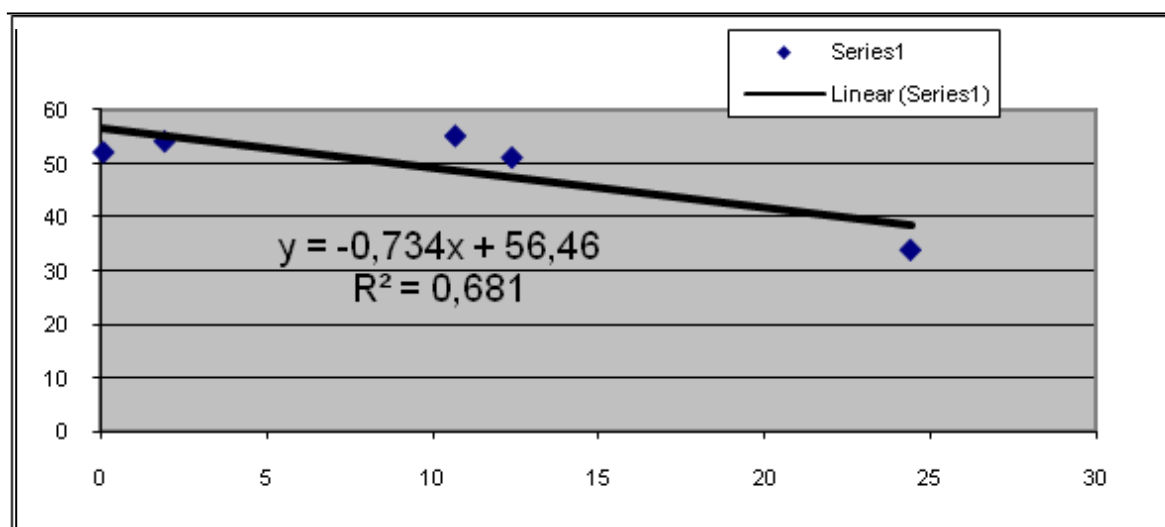




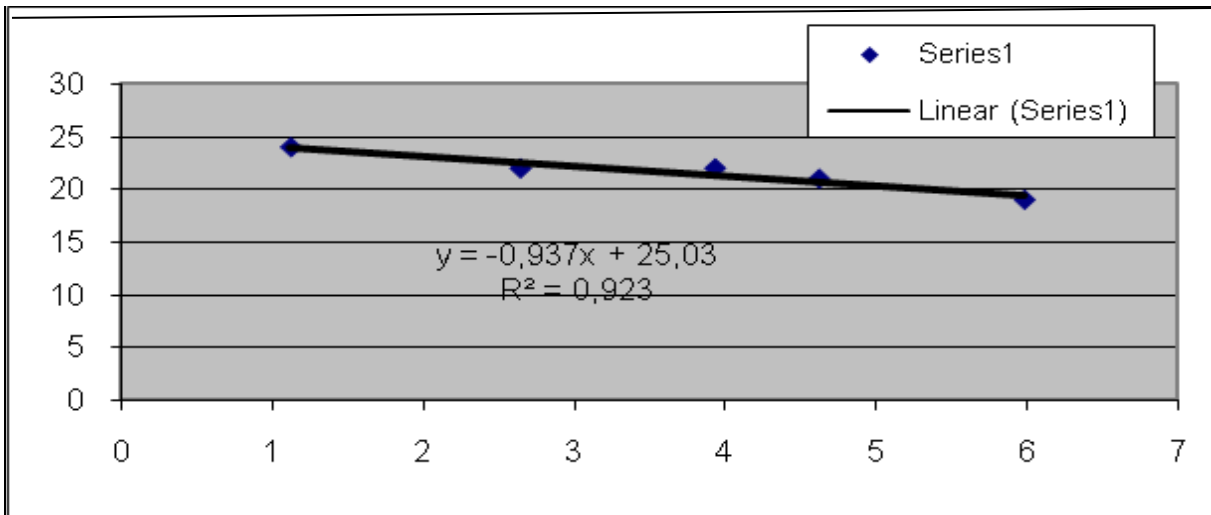
**Figure. 125:** Corrélation entre le CBR et Indice de fer ferrique libre ( IFL )



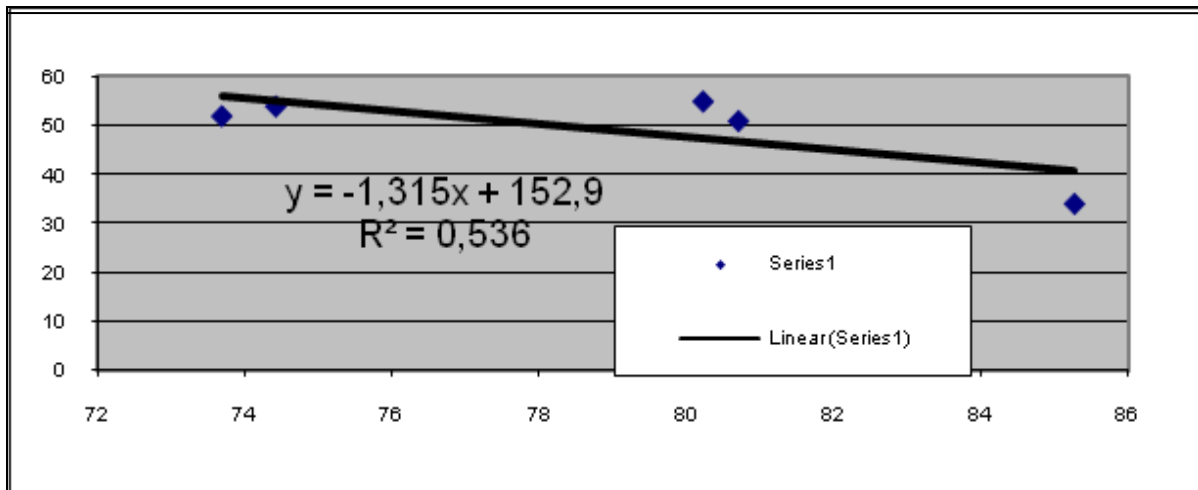
**Figure. 126:** Corrélation entre le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) et et Indice de fer ferrique libre



**Figure. 127:** Corrélation entre le CBR et l'Indice d'aluminium libre (IAL)



**Figure.128: Corrélation entre l'Indice de plasticité (IP) et l'Indice de confinement potentiel (IRCP)**



**Figure.129: Corrélation entre la limite de liquidité (WL) et l'Indice de confinement potentiel (IRCP)**

### III.4.4. OBSERVATIONS SUR LES RAPPORTS GEOCHIMIE- GEOTECHNIQUE ET INTERET DES MATERIAUX

Les substratums de la zone d'étude, soumis aux conditions thermodynamiques qui règnent à l'interface continentale en milieu équatorial ont subi une évolution supergène qui a affecté leurs propriétés physiques et mécaniques originelles. L'exploitation de divers diagrammes altérologiques associés montre que le phénomène de ferrallitisation domine dans ces différentes zones d'étude.

La méthode de caractérisation normative altérologique, en quantifiant les paramètres altérologiques permet de rapprocher, les propriétés physiques (CBR, IP, LA et  $\gamma_s$  et  $\gamma_d$ ) des matériaux et les paramètres altérologiques (IRLP, DVRAR, IRIP, IRCP, IFL et IAL).

Elle donne l'importance de ces matériaux dans le génie civil.

### III.5. PROCEDES DE STABILISATION DES SOLS LATERITIQUES

Dans le but d'utiliser la grave latéritique améliorée en couche de base dont les matériaux (0/31.5) sont plus chers et plus rares (plus de 5 fois par rapport à la grave latéritique), des procédés de stabilisation en utilisant une classe granulaire 5/15 ont été réalisées. Ainsi, la classe granulaire 5/20 sortie d'une grave concassé 0/31.5 de la carrière de Bent et dont le CBR à 95 % de l'optimum du Proctor modifié et après 4 jours d'imbibition est de 135 % a été mélangée avec une grave latéritique de Boumpial dont le CBR à 95 % de l'optimum du Proctor modifié et après 4 jours d'imbibition est de 45 %.

- Les résultats obtenus selon les proportions utilisées de chacune sont résumés ci-après.

	Mélange de 80 % de GL et 20% de GC	Mélange de 75 % de GL et 25 % de GC
CBR obtenus à 95 %	92 %	104 %

**N.B:** GL: grave latéritique; GC: grave concassé

Ces résultats montrent que avec un mélange 20 % de grave concassé 5/20, et de 80 % de la grave latéritique dont le CBR à 95 % est de 45 %, on obtient un CBR à 95 % de l'optimum du Proctor modifié de 92 %. Ce CBR est supérieur à 80 % souvent exigé par le CCTP pour les matériaux destinés à la couche de base.

## **CONCLUSIONS SUR L'ETUDE PETROLOGIQUE, SUR LA CARACTERISATION NORMATIVE ALTEROLOGIQUE, SUR L'ETUDE GEOTECHNIQUE ET SUR LES CARACTERES GEOTECHNIQUES ET CARACTERES GEOCHIMIQUES**

L'étude pétrographique et minéralogique montre que toutes les roches analysées sont constituées de muscovite, de biotite, de quartz et de feldspaths à part quelques particularités trouvées dans certaines roches notamment la présence d'amphibole, de grenat, de microcline, de myrmékite et de pyroxène.

L'analyse chimique de ces roches montre que la silice et l'alumine constituent plus de 75 % en poids d'oxydes.

L'observation des matériaux de l'horizon meuble nodulaires montre qu'ils sont de couleur rouge à jaune et leur épaisseur varie de 1,2 à 2,5 m. L'étude minéralogique montre que dans l'ensemble tous ces matériaux sont constitués de quartz, de kaolinite, de muscovite, de goethite, d'hématite, de gibbsite. Les matériaux de BER 1G, de BER 2G, de YOK 2G, de PAL 1G et de YOL 1G sont à dominance siliceuse, tandis que les matériaux de NGU 1G, de YOK 1G, de MOL 1G et de YOL 2G sont à dominance de fer ferrique.

L'étude du bilan d'altération a permis le regroupement des éléments et des matériaux. Dans le niveau médian, les éléments alcalins et les éléments alcalino-terreux s'exportent de manière très importante dans tous les matériaux. Le fer ferrique s'accumule de manière très importante. Les formations des Régions de l'Est et du Sud soumises à l'altération ont subi une évolution qui a affecté leurs propriétés chimiques originelles. Les différents paramètres altérologiques analysés ayant les données chiffrées, expliquent les phénomènes qui influencent l'évolution de l'altération du granite, de migmatite et de gneiss des zones étudiées. L'exploitation de divers diagrammes associés montre que le phénomène de ferrallitisation domine dans ces différentes zones d'étude. Les résultats des paramètres altérologiques (DVRAR) obtenus < 6 %, montrent que les roches analysées sont saines. Ces roches peuvent être utilisées en concassés sans problème pour la couche de base, pour la couche de roulement et en béton hydraulique.

L'analyse des caractéristiques géotechniques obtenues des matériaux provenant des carrières des roches massives montre que ces matériaux en dehors de migmatites sont conformes pour être utilisés en couche de base, en couche de roulement (en béton bitumineux ou en enduits superficiels) et pour les bétons hydrauliques.

L'analyse des caractéristiques des matériaux provenant des carrières des sols latéritiques, montrent que les matériaux de la Région du Sud sont plus argileux que ceux de l'Est. Les caractéristiques géotechniques des matériaux pour ces deux régions, sont conformes aux exigences du CCTP, pour être utilisés en couche de roulement des routes en terre et en couche de fondation des routes revêtues.

La grave latéritique dont le CBR est supérieur ou égal à 45 % peut être utilisée en couche de base si on la mélange avec les concassés gneissiques 5/20 dont le Los Angeles est inférieur à 25 % à raison de 75 % et 25 % respectivement.

Les résultats de compacité obtenus sur les différentes couches de la chaussée ainsi que les résultats d'analyse des matériaux obtenus au laboratoire sont conformes aux prescriptions du Cahier de Clauses Techniques Particulières.

Pour les routes en terre, les résultats des essais Proctor Modifié montrent que lorsque le rechargement de la couche de roulement (route en terre) n'est pas exécuté régulièrement, le poids volumique de référence du Proctor Modifié décroît au fur et à mesure que les années passent. Plus la route est sollicitée par les gros porteurs, plus la portance des matériaux diminue et plus ces routes se dégradent rapidement surtout pendant les périodes de pluies.

Les essais de sondage au pénétromètre dynamique effectués in situ montrent que les fondations des ouvrages exécutés sont superficielles.

La méthode de caractérisation normative altérologique en quantifiant les paramètres d'altération, permet d'établir des corrélations entre géochimie et géotechnique. Le Los Angeles augmente avec l'altération de la roche et le poids spécifique diminue avec l'altération de la roche. Le poids spécifique diminue avec l'enrichissement en oxydes de fer ferrique tandis que le Los Angeles augmente avec cet enrichissement. L'indice de plasticité diminue avec l'augmentation de confinement du milieu. Le CBR et le poids volumique optimum augmentent avec l'enrichissement en oxydes de fer. Le CBR diminue avec l'enrichissement en alumine.

## **CHAPITRE IV. DISCUSSION SUR LES RESULTATS**

La discussion des résultats obtenus concernent la pétrologie, la caractérisation normative altérologique, l'étude géotechnique des formations et des matériaux nodulaires de l'Est et du Sud Cameroun, ainsi que les caractères géotechniques et géochimiques des formations et des matériaux nodulaires: corrélations et intérêt.

#### **IV.1.PETROLOGIE DES FORMATIONS ET DES MATERIAUX NODULAIRES DE L'EST ET DU SUD -CAMEROUN**

##### **IV.1.1.PETROLOGIE DES FORMATIONS ROCHEUSES**

Sur le plan pétrographique, les gneiss de Bent se distinguent de gneiss de Nguélémdouka par leur coloration, la taille de leurs constituants et leur minéralogie. Les gneiss de Bent ont une couleur verdâtre et ceux de Nguélémdouka ont une couleur grise. Sur le plan minéralogique, ces roches sont constituées de muscovite, biotite, quartz, amphibole, feldspaths et pyroxène. Sur le plan chimique,  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  constituent plus de 75 % en poids d'oxydes pour les gneiss de Bent, et plus de 85 % en poids d'oxydes pour le gneiss de Nguélémdouka. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Tchameni (1997) obtenus sur les orthogneiss dans la région d'Ebolowa. Les gneiss de Bent et de Nguélémdouka sont riches en  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  par rapport aux gneiss de Ydé (Ekodeck et Kamagang, 2002).

Les gneiss d'Andom et de Meyo-Nyaka se rapprochent beaucoup plus de gneiss de Nguélémdouka par la couleur. Sur le plan minéralogique, ces roches sont constituées de muscovite, de biotite, de quartz, de plagioclase, de feldspaths, de pyroxène et de gibbsite. Sur le plan chimique, la silice et l'alumine constituent plus de 76 % en poids d'oxydes pour les gneiss d'Andom et plus de 80 % pour les gneiss de Meyo-Nyaka. Ces gneiss sont riches en  $\text{Na}_2\text{O}$  et en  $\text{CaO}$  par rapport aux gneiss de Bent et de Nguélémdouka. Leur composition chimique est comparable à celle de gneiss d'Ebolowa (Tchameni, 1997) et de gneiss de Ydé (Ekodeck et Kamagang, 2002).

Les granites de Bertoua sont de couleur grise. Sur le plan minéralogique, ils sont constitués de muscovite, de biotite, de quartz, de plagioclases et d'amphibole. Sur le plan chimique,  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , constituent plus de 86 % en poids d'oxydes. Ces résultats sont similaires à ceux de Kamgang (1998) sur les granites de la région de Kandara au Sud de Bertoua. Leur composition chimique est également comparable à celle de granites d'Ebolowa (Tchameni, 1997).

Les migmatites de Batouri, de Ngoura et de Gari Gombo sont de couleur grise. Ils sont constitués dans l'ensemble de muscovite, de biotite, de quartz, de pyroxène, de plagioclase et d'amphibole. Sur le plan chimique,  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  constituent plus de 81 %, 81 % et 87 % en poids d'oxydes respectivement pour les migmatites de Batouri, de Ngoura et de Gari Gombo. Ces

roches sont caractérisées par un enrichissement en silice et un appauvrissement en alumine par rapport aux migmatites de Ydé (Ekodeck et Kamgang, 2002).

#### **IV.1.2. PETROLOGIE DES MATERIAUX NODULAIRES**

Les matériaux d'altération développés sur les granites de Bertoua, sur les gneiss de Nguélémondouka et de Bent, sur les migmatites de Batouri, de Ngoura et de Gari-Gombo et sur les schistes de Yokadouma et de Moloundou présentent des caractères macromorphologiques semblables. Leur épaisseur varie de 1,2 à 2,5 m. Sur le plan minéralogique, ces matériaux sont constitués dans l'ensemble de quartz, de kaolinite, de muscovite, de goethite, d'hématite et de gibbsite. Ils sont, soit à dominance siliceuse, soit à dominance fer ferrique. La silice, l'alumine et le ferrique constituent plus de 80 % en poids d'oxyde.

les bilans isoéléments permettent d'estimer quantitativement les pertes et les gains d'éléments et par conséquent, de localiser spatialement leurs zones de départ et d'accumulation dans les profils afin, d'appréhender leur comportement géochimique.

Les éléments alcalins et les éléments alcalino-terreux sont évacués de manière très importante dans l'ensemble des matériaux. Le fer ferrique s'accumule de manière très importante dans tous les matériaux. Le fer ferreux s'exporte de manière importante dans les matériaux de Yola-Yokadouma et de Nguélémondouka et de manière très importante dans les matériaux de BER 1G, de BER 2G, de Batouri-Ngoura et de Ngoura-Yola. L'aluminium s'accumule de manière faible à moyenne dans les matériaux de BER 1G, de BER 2G et de Nguélémondouka. Dans les matériaux de Ngoura-Yola, de Batouri-Ngoura et de Yola-Yokadouma, il s'accumule de manière importante. Le silicium est évacué de manière modérée à très importante. L'yttrium subit des pertes importantes à très importantes. Le vanadium s'accumule de manière faible à très importante et le chrome de manière importante à très importante. On observe des teneurs élevées en silice dans les matériaux de BER 1G (54,29 %), de BER 2G (45,29 %), de PAL 1G (38,34 %) et de YOL 1G (37,02 %) par rapport aux autres oxydes. Des valeurs de teneurs élevées en fer ferrique apparaissent dans les matériaux de NGU 1G (35,8 %), de YOK 1G (43,24 %), de YOL 2G (44,18 %) et de MOL 1G (31,56 %) par rapport aux autres oxydes. Tous les matériaux étudiés sont riches en fer ferrique et les valeurs de teneurs en cet oxyde varient entre 17,71 et 44,18 %.

Les matériaux nodulaires issus des gneiss de Nguélémondouka et de Palisco-Ampel sont caractérisés par un appauvrissement en SiO<sub>2</sub> par rapport aux matériaux issus des gneiss de Yaoundé (Ekodeck et Kamgang, 2002).

Les matériaux nodulaires issus des migmatites de Ngoura, de Batouri et de Gari-Gombo sont caractérisés par un appauvrissement en SiO<sub>2</sub> par rapport aux matériaux issus des migmatites de Yaoundé (Ekodeck et Kamgang, 2002).



Du point de vue chimique, les matériaux issus des granites de Bertoua sont caractérisés par un enrichissement en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{TiO}_2$ , et par un appauvrissement en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  par rapport aux matériaux issus des granites de Kandara (kamgang, 1998)..

En comparant les résultats d'analyses minéralogiques et chimiques des matériaux du niveau gravillonnaire issus d'altération des schistes (YOK 1G, YOK 2G et MOL 1G) avec les travaux de Onana (2010) sur les matériaux issus d'altération des schistes de Mbalmayo (MBr) et de Bengbiss (BEr), on constate que :

- Sur le plan minéralogique, les minéraux obtenus sont semblables (Tab. 23) dans tous les matériaux, excepté les inter stratifiés illites-smectites trouvés dans les matériaux de MBr, la gibbsite trouvée dans tous les matériaux de l'Est et le zircon trouvé particulièrement dans les matériaux de YOK 1G.
- Sur le plan chimique, les matériaux de MBr et de BEr sont plus riches en  $\text{SiO}_2$  par rapport aux matériaux de YOK 1G, de YOK 2G et de MOL 1G, inversement à  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Pour les autres éléments majeurs (Tab. 23), ils sont presque dans le même ordre. Quant aux éléments en traces, Sc, V, Cr, Ni, Cu, Zn, Zr, les matériaux de YOK 1G, de YOK 2G et de MOL 1G sont plus riches par rapport aux matériaux de MBr et de BEr.

En se basant sur le rapport silice sur sesquioxydes ( $\text{SiO}_2/\text{AlO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), on constate que  $r < 1,33$  pour tous les matériaux gravillonnaires analysés. Ce sont des latérites vraies, excepté les matériaux de Bertoua 1 dont le rapport  $r$  est entre 1,33 et 2,00. Ces derniers sont des sols latéritiques.

La composition chimique des matériaux issus des gneiss est similaire à celle des matériaux issus des gneiss des secteurs de Ntui et Ngoumou (Ekodeck, 1984).

## **IV.2. CARACTERISATION NORMATIVE ALTEROLOGIQUE DES MATERIAUX DU DE L'EST ET DU SUD CAMEROUN**

Les formations des Régions de l'Est et du Sud soumises à l'altération ont subi une évolution qui a affecté leurs propriétés chimiques originelles. Les différents paramètres altérologiques analysés ayant les données chiffrées, expliquent les phénomènes qui influencent l'évolution de l'altération des granites, des migmatites et des gneiss des zonées étudiées. L'exploitation des divers diagrammes associés montre que le phénomène de ferrallitisation domine dans ces différentes zones d'étude.

Le diagramme triangulaire L-I-C montre que le phénomène dominant est la lixiviation. Toutes les substances dissoutes ( nitrate, phosphates etc..) sont entraînées vers la profondeur et les aquifères.

Le digramme triangulaire A-I-C montre que les phénomènes dominant sont l'altération et l'induration (séparation des éléments de roche suivi de leur durcissement) pour les gneiss et les migmatites et l'induration pour les granites.

Le diagramme rectangulaire L-IFL-IAL montre que le phénomène dominant est la monosiallisation pour les granites et les migmatites. La silice, le fer ferrique et l'alumine des silicates formés représentent plus de 82 % en poids d'oxyde. Pour les gneiss, les phénomènes dominant sont l'allitisation et le cuirassement ferrugineux. Les matériaux d'altération sont les nodules qui sont au stade du début du cuirassement. Ils sont constitués généralement de goethite et d'hématite. Ces matériaux se comportent bien dans les couches de chaussée.

Le digramme rectangulaire A-IFL-IAL montre que pour toutes roches étudiées, le phénomène dominant est l'altération moyenne à forte. Cette altération qui part de la roche mère, aboutit à la formation des argiles très plastiques et afin à des graves latéritiques argileuses utilisables en construction routière.

Les valeurs du degré virtuel relatif d'altération de la roche (DVRAR) obtenues, montrent que toutes les roches analysées sont faiblement altérées, le DVRAR est  $< 6\%$ .

Pour les matériaux graveleux, le DVRAR varie de 30 à 81 %. Les valeurs de ce paramètre distinguent deux types de graveleux:

**les graveleux latéritiques présentant un DVRAR  $< 62.5\%$ .** Leur comportement est élasto-compressible, leur rupture est ductile sous charge. On peut les utiliser sur la couche de fondation dont la classe de trafic est T3, en remblais et aux blocs techniques des ouvrages d'art.

**les graveleux latéritiques présentant un DVRAR  $> 62.5\%$ .** Leur comportement est élasto-plastique, leur rupture est franche sous charge. Avant de les utiliser en fondation, il faut les mélanger avec de la grave latéritique sélectionnée.

### **IV.3. ETUDES GEOTECHNIQUES DES SOLS ET DES ROCHES DU SUD CAMEROUN**

#### **IV.3.1. CAS DES MATERIAUX ROCHEUX**

Les caractéristiques géotechniques obtenues des roches massives de la Région de l'Est et de la Région du Sud (Tab.38) montrent que:

- les granites sont plus résistantes que toutes les roches étudiées ( $LA = 18\%$ );
- les gneiss de l'Est sont plus résistant que les gneiss du Sud. Le Los Angeles varie de 23 à 26 % pour les gneiss de l'Est, et de 30 à 32 % pour les gneiss du Sud. Ces roches peuvent être utilisées comme tout venant de concassage en couche de base comme 0/31.5, en couche de roulement, soit comme béton bitumineux ou soit comme enduits superficiels et en construction des ouvrages d'arts (ponts, viaduc, dalots et buses).

- les migmatites présentent des valeurs de LA qui sont à la limite des valeurs souhaitées pour les travaux des chaussées. ces roches sont sollicitées pour la construction des fossés.

#### **IV.3.2. CAS DES MATERIAUX MEUBLES NODULAIRES LATERITIQUES**

Au total, 142 carrières des sols latéritiques dans les Régions de l'Est et du Sud ont été étudiées. De l'analyse des caractéristiques géotechniques obtenues de ces matériaux (Tab. 41, 46, 49, 52, 53 et Tab. 54), il ressort que :

- le poids volumique optimum du Proctor Modifié de toutes les carrières étudiées varie de 1873 à 2330 Kg/m<sup>3</sup>;
- les matériaux de toutes les carrières sont des classes de portance S5;
- suivant la classification HRB, les matériaux de toutes les carrières étudiées sont de A-2-7;
- indice de plasticité varie de 15 % à 40 % avec une moyenne de 24 %;
- limite de liquidité varie de 35 à 75 % avec une moyenne de 54 %;
- indice CBR varie de 27 à 117 % avec une moyenne de 54 %;.
- - le % des fines est < 25 % pour tous les matériaux étudiés.

De ces matériaux étudiés, on constate que les matériaux du Sud sont plus argileux que les matériaux de l'Est (Tab.55). Cela est justifié par la nature du climat. Malgré cette plasticité des matériaux du Sud, tous les matériaux des carrières latéritiques étudiés présentent les caractéristiques leur permettant d'être utilisés, soit en remblais, soit aux blocs techniques des ouvrages d'art, soit en couche de roulement (routes en terre), soit en couche de fondation des routes revêtues, voire même en couche de base pour certains matériaux dont le CBR est > 60 % pour les faibles trafics.

Dans le but de minimiser le coût de la couche de base en 0/31.5 qui coûte cher à cause de la rareté des roches de bonne qualité dans certaines régions, les graveleux latéritiques dont le CBR à 95 % de l'optimum du Proctor Modifié, après 4 jours d'imbibition égal à 45 % a été mélangé avec le concassé 5/20 d'un gneiss dont le Los Angeles est < 25 % à raison des proportions suivantes:

- 20 % de grave concassé 5/20 avec 80 % de graveleux latéritiques;
- 25 % de grave concassé 5/20 avec 75 % de graveleux latéritiques.

Pour le premier mélange, le CBR obtenu à 95 % de l'optimum du Proctor Modifié, après 4 jours d'imbibition est de 94 %. Le deuxième mélange donne un CBR de 104 %.

### IV.3.3. ESSAIS IN-SITU

L'analyse des résultats de compacités obtenues sur la plate-forme des routes en terre (Fig. 104 à la Fig. 107), qui sont récapitulés dans le tableau 56 et dont le détail est consigné dans les tableaux A11 au tableau A 21 en annexe montre qu'ils sont conformes aux exigences du C.C.T.P. Les valeurs des poids volumiques secs ( $\gamma_d$ ) montrent que lorsqu'une année passe sans rechargement de chaussée par nouveaux matériaux latéritiques, la chaussée se dégrade et les matériaux perdent leur portance.

Les résultats des sondages aux pénétromètres dynamiques effectués dans la Région de l'Est, sur les sites où étaient prévue la construction des ponts semi-définitifs au PK 6 km de la route Kobi-Mbang, au PK 27,2 km de la route Mampang-Angoss-Mboma et au PK 19,9 km de la route Ampel-Lomié montrent que les contraintes admissibles en fonction de la profondeur et qui sont récapitulés dans les tableaux 57, 58 et tableau 59 confirment les fondations superficielles.

#### **Cas des routes revêtues (Région de l'Est)**

L'analyse des résultats de compacités obtenues sur :

- la plate-forme (Fig. 108 et Tab. A21 en annexe) ;
- la couche de fondation (Fig. 110 et Tab. A23 en annexe) ;
- la couche de base (Fig. 112 et Tab. A25 en annexe) ;
- la couche de roulement (Fig. 107 et 115) de la route Abong-Mbang-Bonis dans la Région de l'Est sont conformes aux exigences du C.C.T.P.

L'analyse des résultats de déflexions obtenus sur :

- la plate-forme (Fig. 109 et Tab. A22 en annexe),
- la couche de fondation (Fig. 111, et Tab. A24 en annexe),
- la couche de base (Fig. 113, et Tab. A26 en annexe) de la route Abong-Mbang-Bonis dans la Région de l'Est montre que ces résultats sont conformes aux prescriptions du CCTP.

#### **Cas des routes revêtues (Région du Sud)**

L'analyse des résultats de compacités obtenues sur

- la plate-forme (Fig. 119, et Tab. A27 en annexe) ;
- la couche de fondation (Fig. 120, et Tab. A28 en annexe) ;
- la couche de base (Fig. 121, et Tab. A29 en annexe) de la route Nkoemvon-Ambam dans la Région du Sud montre que ces résultats sont conformes aux prescriptions du CCTP.

Cette conformité des résultats de réceptions des couches de chaussée garantissent la tenue de l'ouvrage indépendamment de dimensionnement adopté.

#### IV.3.4 ESSAIS AU LABORATOIRE

L'analyse des résultats obtenus sur les produits noirs utilisés dans la Région de l'Est sur le projet de la route Ayo-Bonis à savoir :

- les essais Duriez, essais Marshall et essais d'extraction de bitume (Fig. 116 à Fig. 117),
- la viscosité (Tab. 60)

- la pénétration de l'aiguille (Tab. 61) et les quantité de liant pour la couche d'accrochage (Fig. 118) montre que ces essais sont conformes aux exigences du C.C.T.P. Et leur mise en œuvre a respecté les règles de l'art. Par conséquent, la couche de roulement rassure la tenue de la chaussée indépendamment du dimensionnement adopté

##### **Résultats d'écrasement des bétons**

Pour les formulations des bétons hydrauliques arrêtées, plusieurs écrasements ont été effectués, soit sur la presse à béton, soit au scléromètre. Ces résultats sont présentés par la figure 55. A partir de résistance obtenue à 7 jours, on peut déterminer la résistance du béton à n jours (Tab. 29). Ces résultats de compression obtenus à l'aide de deux appareils différents ont fait l'objet d'une comparaison. De cette comparaison, il ressort que les résultats issus d'écrasement à la presse sont plus élevés que ceux issus du test d'écrasement au scléromètre à 7 jours

En appliquant le coefficient de corrélation, on trouve une équation de droite pour l'écrasement à sept jours. Cette équation est la suivante:

$$\text{- à 7 jours : } Y = 0,24\ 46X + 19,667 ; N = 15 ; r = 0,85$$

Où Y = Résistance du béton à la presse à béton

X = Résistance du béton au scléromètre

N = Nombre d'éprouvettes écrasées, r = Coefficient de corrélation.

Etant donné que le nombre d'éprouvettes écrasées est relativement réduit (15), cette corrélation, est à titre indicatif. Seules les études futures qui seront effectuées sur un bon nombre d'éprouvettes et sur les éprouvettes à 28 jours pourront sortir une corrélation robuste entre ces deux appareils.

#### III.4. CARACTERES GEOTECHNIQUES ET CARACTERES GEOCHIMIQUES : CORRELATIONS, INTERET

Les comparaisons en géotechnique concernent, les caractéristiques géotechniques telles que le CBR, le poids volumique optimum et les indices de plasticité pour les matériaux du niveau médian et, les coefficients de Los Angeles et les poids spécifiques pour les roches. Il faut noter que pour les roches, trop peu d'essais ont été effectués par rapport aux matériaux d'altération.

### III.4.1. ROCHES DU SOCLE

Les relations entre propriétés géotechniques à savoir : poids spécifique ( $\gamma_s$ ) et coefficient de Los Angeles(LA) et paramètres d'appauvrissement (DVRAR) sont les suivantes :

$$LA = 1,877 \text{ DVRAR } \% + 24,74; N = 5; R^2 = 0,60;$$

$$\gamma_s = - 0,0089 \text{ DVRAR } \% + 2,767 ; N = 5 ; R^2 = 0,98.$$

N: Nombre d'échantillons; r: le coefficient de détermination qui représente la fraction de la variance de Y par la corrélation de Y avec X.

Le Los Angeles augmente avec l'altération de la roche et poids spécifique diminue avec l'altération de la roche. Ces corrélations sont aussi illustrées par les figures 122 et 123 ci-après.

Les relations entre propriétés géotechniques à savoir : poids spécifique ( $\gamma_s$ ) et coefficient de Los Angeles (LA) et paramètres d'enrichissement (IRIP) sont les suivantes :

$$LA = 1,465 \text{ IRIP } \% + 27,77; N = 5; R^2 = 0,548.$$

Le Los angeles augmente avec l'enrichissement en oxydes de fer ferrique. Cette corrélation qui est illustré aussi par la figure 124 ci-après est indicative vu le nombre réduit d'échantillons analysés.

### III.4.2. PARAMETRES NORMATIFS ET PROPRIETES MECANIQUES ET PHYSIQUES

#### III.4.2.1. Indice relatif de lixiviation potentielle IRLP et propriétés mécaniques des matériaux

La corrélation entre IRLP ( $73,69 \leq \text{IRLP } \% \leq 85,26$ ) est :

$$\text{CBR} = - 1,32 \text{ IRLP } \% + 152,9 ; N = 5 ; R^2 = 0,73.$$

Le CBR diminue avec l'altération des silicates.

#### III.4.2.2. Importance potentielle du fer ferrique libre (ifl) et propriétés mécaniques et physiques des matériaux

Pour  $20,98 \leq \text{IFL} \leq 51,33$ , on obtient :

$$\text{CBR} = 0,61 \text{ IFL } \% + 24,3 ; N = 5 ; R^2 = 0,78 ;$$

$$\gamma_d = 0,01 \text{ IFL } \% + 1,77 ; N = 5 ; R^2 = 0,96.$$

Le CBR et la densité optimale augmentent avec l'enrichissement en oxydes de fer. Ces corrélations sont présentées aussi par la figure 125 et 126 ci- après.

#### III.4.2.3. Importance potentielle d'aluminium libre (IAL) et propriétés mécaniques des matériaux

Pour  $0,07 \leq \text{IAL} \leq 24,41$ , on a :

$$\text{CBR} = - 0,73 \text{ IAL } \% + 56,5 ; N = 5 ; R^2 = 0,83$$

Le CBR diminue avec l'enrichissement en alumine. Cette corrélation est présentée aussi par la figure 127 ci - après.

#### **III.4.2.4. Indice relatif de confinement potentiel (IRCP) et propriétés mécaniques des matériaux**

$$IP = - 0,94 \text{ IRCP } \% + 25,03 ; N = 5 ; R^2 = 0,96.$$

$$WL = -0,24 \text{ IRCP } \% + 3,00 ; N = 5 ; R^2 = 0,81.$$

L'indice de plasticité et limite de liquidité diminuent avec l'augmentation du confinement du milieu. Ces corrélations sont présentées par les figures 128 et 129 ci après.

#### **III.4.2.5. Indice relatif de lixiviation potentiel (IRLP) et propriétés mécaniques des matériaux**

$$WP = 1,03 \text{ IRLP } \% + 30,97 ; N = 5 ; R^2 = 0,78 ;$$

$$WL = 1,354 \text{ IRLP } \% - 27,09 ; N = 5 ; R^2 = 0,81.$$

Les limites de plasticité et de liquidité augmentent avec l'altération des silicates

Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Ekodeck (1984) sur les matériaux issus des gneiss des secteurs de Ntui et de Ngoumou , d'Ekodeck et Kamgang (2002), sur les gneiss de Yaoundé, d'Onana et al., (2009) et d'Onana (2010) sur les matériaux issus des schistes de Mbalmayo-Bengbis.

### **III.5. PROCEDURE DE STABILISATION DES SOLS LATÉRITIQUES NODULAIRES**

Pour les sols latéritiques nodulaires dont le CBR est  $>$  à 45 %, une procédure de stabilisation pour que ces matériaux puissent être utilisés en couche de base a été appliquée à savoir:

- un mélange de 75 % de sols latéritiques nodulaires avec 25 % de grave concassé de la classe 5/20 d'un gneiss dont le Los Angeles est inférieur à 25 %.

A l'issu de ce mélange, le CBR après 4 jours d'immersion est de 104 %. Ce mélange prouve que ces matériaux peuvent être utilisés en couche de base pour un trafic dont la classe est T3. Ce qui diminuerait le coût de la couche de base qui coûte souvent très cher vu la rareté des roches de bonnes caractéristiques dans certaines régions.

## CONCLUSIONS SUR DISCUSSIONS DES RESULTATS

Le présent travail, qui est une étude de la caractérisation minéralogique, géochimique et géotechnique des granulats et des sols graveleux latéritiques dans l'optique des travaux routiers, a été réalisé dans la Région de l'Est et du Sud Cameroun.

Les objectifs sont spécifiques les suivants :

- déterminer les propriétés minéralogiques, chimiques et géotechniques des matériaux de l'horizon nodulaire ainsi que celles de leurs roches mères.

- caractériser ces matériaux sur le plan altérologique,

- déterminer des corrélations entre paramètres géotechniques et paramètres géochimiques ainsi que l'intérêt des matériaux étudiés

- proposer des procédés de stabilisation fiables dans le cas où ces matériaux seraient peu adaptés ou proposer d'autres solutions à adopter, si la dégradation prématurée des routes souvent constatée est liée à d'autres causes.

Elle a été menée sur cent quarante deux (142) échantillons de matériaux nodulaires. Cent vingt neuf (129) proviennent de la Région de l'Est et treize (13) de la Région du Sud, ainsi que sur huit (8) échantillons de roches mères courantes dont sont issus ces matériaux d'altération. Six (6) échantillons proviennent de la Région de l'Est et deux (2) de la Région du Sud.

Après une description macroscopique de ces matériaux, tous les échantillons prélevés ont fait l'objet d'études géotechniques aux Laboratoires LABOGENIE, SOIL & WATER, ET EDOK-ETER. La minéralogie des poudres d'échantillons de roches et de quelques échantillons de produits d'altération a pu être déterminée par microscope optique et par diffractométrie aux rayons X sur des fractions fines totales au Canada. Les déterminations chimiques globales des éléments majeurs des échantillons de roches et des échantillons du niveau médian ont été réalisées par fluorescence X, celles des éléments en traces par spectrométrie de masse au Canada.

Les résultats sur le plan pétrologique montrent que les roches étudiées sont composées dans l'ensemble de quartz, de feldspath, de biotite, de muscovite, d'amphibole et parfois de pyroxène. L'analyse chimique montre que la silice et l'alumine constituent plus de 75 % en poids d'oxydes.

Les valeurs du degré virtuel relatif d'altération de la roche (DVRAR) obtenues, montrent que toutes les roches analysées sont faiblement altérées, le DVRAR est  $< 6 \%$ .

Les produits dérivés de l'altération de ces roches (niveau médian) sont de couleur rougeâtre jaunâtre. Leur épaisseur varie de 1,2 à 2,5 m. Ils se composent de quartz, de kaolinite, de muscovite, de goethite, d'hématite, de gibbsite, d'anatase et parfois de zircon. L'analyse



chimique montre que la silice, l'alumine et le fer ferrique représentent plus de 80 % en poids d'oxydes. Ces matériaux sont, soit siliceux, soit ferriques.

Les valeurs du DVRAR varie de 30 à 81 %. Les valeurs de ce paramètre distinguent deux types de graveleux:

**les graveleux latéritiques présentant un DVRAR < 62.5 %.** Leur comportement est élasto-compressible, leur rupture est ductile sous charge. On peut les utiliser sur la couche de fondation dont la classe de trafic est T3, en remblais et aux blocs techniques des ouvrages d'art.

**les graveleux latéritiques présentant un DVRAR > 62.5 %.** Leur comportement est élasto-plastique, leur rupture est franche sous charge. Avant de les utiliser en fondation, il faut les mélanger avec de la grave latéritique sélectionnée.

Ces matériaux sont le siège des phénomènes de monosiallisation, allitisation et induration. Sur le plan géotechnique, les roches étudiées sont utilisables en couches de base, en couche de roulement et en béton hydraulique. Les matériaux issus de ces roches étudiés sont utilisables, en couche de fondation, en remblais en blocs techniques et en couche de roulement pour les routes en terre. Les résultats des essais de compacité et de déflexion obtenus sont conformes aux spécifications du Cahier de Clauses Techniques Particulières (C.C.T.P.). Les résultats des essais pénétrométriques au niveau des ponts semi-définitifs montrent que les fondations sont superficielles et reposent sur les cuirasses ferrugineuses. Les données de compacité sur la plate-forme (cas de routes en terre) montrent que la portance des matériaux diminue au fur et à mesure que les années passent si le rechargement des nouveaux matériaux latéritiques n'est pas exécuté. Les résultats des essais effectués sur les produits noirs au laboratoire sont conformes aux prescriptions du C.C.T.P.

Les matériaux latéritiques présentant un CBR supérieur à 45 % en mélange avec le concassé 5/20 dont le coefficient de Los Angeles est inférieur à 25 % sont utilisables en couche de base de la classe de trafic T3.

La corrélation indicative a été établie entre les résultats d'écrasement des bétons sur la presse à béton et sur le scléromètre.

Les corrélations entre paramètres géotechniques et géochimiques ont été établies:

Le Los Angeles augmente avec l'altération de la roche et le poids spécifique diminue avec l'altération de la roche. Le CBR diminue avec l'altération des silicates.

L'indice de plasticité, limite de liquidité et le poids volumique sec diminuent avec l'augmentation du confinement du milieu.

Le CBR et le poids volumique sec augmentent avec l'enrichissement en oxydes de fer.

Les limites de plasticité et de liquidité augmentent avec l'altération des silicates.

## **CONCLUSION GENERALE**

La présente étude sur la caractérisation minéralogique, géochimique et géotechnique des granulats et des sols latéritiques nodulaires de la Région de l'Est et du Sud a porté sur les matériaux du niveau médian du profil d'altération et des leurs roches mères en vue de leur utilisation dans les travaux routiers.

L'étude a pour but, de déterminer les propriétés minéralogiques, chimiques et géotechniques des matériaux de l'horizon nodulaire ainsi que celles de leurs roches mères.

- caractériser ces matériaux sur le plan altérologique,
- déterminer des corrélations entre paramètres géotechniques et paramètres géochimiques ainsi que l'intérêt des matériaux étudiés
- proposer des procédés de stabilisation fiables dans le cas où ces matériaux seraient peu adaptés ou proposer d'autres solutions à adopter, si la dégradation prématurée des routes souvent constatée est liée à d'autres causes.

L'étude a été menée sur cent quarante deux (142) échantillons de matériaux nodulaires. Cent vingt neuf (129) proviennent de la Région de l'Est et treize (13) de la Région du Sud, ainsi que sur huit (8) échantillons de roches mères courantes dont sont issus ces matériaux d'altération. Six (6) échantillons proviennent de la Région de l'Est et deux (2) de la Région du Sud.

Le choix de ces deux Régions pour ces travaux de recherche est lié aux travaux de construction des routes neuves et d'entretien routier qui sont en cours dans ces Régions. Ceci m'a permis après, l'analyse des matériaux au laboratoire, de suivre attentivement leur mise en œuvre ainsi que leur comportement directement (cas des routes en terre) et indirectement (cas des routes revêtues) en fonction des trafics et du temps.

La méthodologie utilisée est basée sur une approche multidisciplinaire. Dans les roches (granites de Bertoua, gneiss de Bent, de Nguélémondouka, d'Andom et de Meyo-Nyaka, migmatites de Batouri, de Ngoura et de Gari-Gombo), après une étude pétrologique succincte, les résultats pétrographiques et minéralogiques montrent que toutes les roches analysées sont constituées de muscovite, de biotite, de quartz et de feldspaths et parfois d'amphibole, de grenat, de microcline, de myrmékite et de pyroxène.

L'analyse géochimique de ces roches montre que le couple silice - alumine représente plus de 75 % en poids d'oxydes.

Sur le plan altérologique, les formations des Régions de l'Est et du Sud soumises à l'altération ont subi une évolution qui a affecté leurs propriétés chimiques originelles. Les différents paramètres altérologiques analysés ayant les données chiffrées, expliquent les phénomènes qui influencent l'évolution de l'altération des granites, des migmatites et des gneiss des zonées étudiées. L'exploitation de divers diagrammes associés montre que le phénomène de

ferrallitisation domine dans ces différentes zones d'étude. Le degré virtuel relatif de l'altération de la roche (DVRAR) est  $< 6\%$ .

Les graveleux latéritiques du niveau médian issus d'altération de ces roches, macroscopiquement, ils sont constitués de nodules ferrugineux de taille millimétrique à centimétrique. Leur couleur est rougeâtre à jaunâtre dans l'ensemble. Leur épaisseur varie de 1,2 à 2.5 m. Ces matériaux sont constitués dans l'ensemble de quartz, de kaolinite, de muscovite, de goethite, d'hématite et de gibbsite. Sur le plan géochimique, la silice, l'alumine et le fer ferrique représentent plus de 80 % en poids d'oxydes. Ils sont, soit siliceux, soit ferriques.

En se basant sur le rapport silice sur sesquioxydes ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), l'analyse chimique de tous les matériaux du niveau médian étudiés montre qu'ils sont des latérites vraies ou sols latéritiques.

Sur le plan altérologique, les processus d'altération chimique sont la monosiallisation, l'allitisation et le cuirassement ferrugineux.

Le degré virtuel relatif de l'altération de la roche, le DVRAR varie entre 30 et 81 %: On distingue 02 types de graveleux latéritiques:

**1. les graveleux latéritiques présentant un DVRAR  $< 62.5\%$  :**

Leur comportement est élasto-compressible, leur rupture est ductile sous charge.

Ces matériaux sont adéquats pour leur utilisation en corps de chaussée, notamment en couche de fondation pour la classe de trafic T3, en remblais et aux blocs techniques des ouvrages d'art.

**2. les graveleux latéritiques présentant un DVRAR  $> 62.5\%$  :**

Leur comportement est élasto-plastique, leur rupture est franche sous charge. Avant de les utiliser en fondation, il faut les mélanger avec de la grave latéritique sélectionnée.

Sur le plan géotechnique, les caractéristiques obtenues montrent que les roches étudiées sont des matériaux aptes à la construction des ouvrages d'arts (ponts, viaducs, buses et dalots), des couches de base en concassé 0/31.5 et des couches de roulement des routes revêtues, soit en béton bitumineux, soit en enduits superficiels.

Les résultats d'analyse des matériaux provenant des carrières des roches montrent que les granites de Bertoua à l'Est sont plus résistants que tout le reste et que les gneiss de Bent à l'Est sont plus résistants que les gneiss d'Andom et de Meyo-Nyaka au Sud. Les granulats de la carrière de Bent ont fait l'objet d'une formulation de béton hydraulique pour les ouvrages d'art et d'une formulation du béton bitumineux pour la route Ayos-Bonis. Les résultats des essais issus de ces formulations sont conformes aux spécifications du C.C.T.P.

Les résultats d'écrasement des bétons à la presse à béton et au scléromètre à 7 jours ont permis d'établir une corrélation entre ces deux appareils, bien qu'elle soit indicative à cause du nombre réduit des éprouvettes écrasées.

Ainsi, à 7 jours, cette corrélation est représentée par une équation de droite suivante :

$$Y = 0,24 X + 19,67 ; N = 15 ; r = 0,85 \text{ avec :}$$

Y : la résistance de béton à 7 jours à la presse ; X : la résistance de béton au scléromètre à 7 jours ; N : nombre d'éprouvettes écrasées ; r : coefficient de corrélation.

Les résultats des sondages au pénétromètre dynamique effectués dans la Région de l'Est, au niveau des sites, où était prévu la construction des ponts semi-définitifs (PSD) montrent que les contraintes admissibles en fonction de la profondeur confirment les fondations superficielles.

De l'analyse des caractéristiques géotechniques obtenues du niveau médian, il ressort que les matériaux de la Région du Sud sont plus argileux que ceux de l'Est. Ceci est expliqué par les valeurs de l'Indice de plasticité plus élevées au Sud par rapport à celles de l'Est. Les valeurs de CBR et de poids volumique du Proctor Modifié sont plus faibles pour les matériaux de la Région du Sud par rapport à celles des matériaux de la Région de l'Est. Malgré ces différences entre les caractéristiques géotechniques des matériaux de ces deux Régions, leurs valeurs sont conformes aux exigences du C.C.T.P, pour être utilisés en couche de roulement des routes en terre et en couche de fondation des routes revêtues dans l'ensemble.

Par conséquent, ces données pourront servir de base pour l'élaboration des cahiers de clauses techniques particuliers. Au vu des caractéristiques géotechniques obtenues (analyse granulométrique, CBR, Los Angeles, limites d'Atterberg, poids spécifiques et poids volumique optimum du Proctor Modifié), tous les matériaux étudiés dans les Régions du Sud et de l'Est peuvent présenter un bon comportement géotechnique pour la chaussée, lorsque leur mise en œuvre respecte les règles de l'art.

Les matériaux nodulaires dont le CBR à 95 % de l'optimum du Proctor Modifié et après 4 jours d'imbibition est  $> 45$  % en mélange avec le concassé gneissique de la classe granulaire 5/20 et dont le Los Angeles est  $< 25$  % à raison de 75 % et 25 % respectivement sont aptes pour la couche de base pour la classe de trafic T3.

Les matériaux provenant de la plate-forme (couche de roulement) pour les routes en terre ont été analysés. Les résultats de caractéristiques géotechniques obtenus montrent que le poids volumique de référence du Proctor Modifié obtenu sur la plate-forme varie de 1,832 à 2,287 T/m<sup>3</sup>. La compacité obtenue est supérieure à 95 % (valeur exigée par le C.C.T.P) pour tous les essais effectués mais parfois après la reprise de certains points. Ces résultats montrent que lorsque le rechargement n'est pas exécuté régulièrement, le poids volumique de référence du Proctor

Modifié décroît au fur et à mesure que les années passent. Plus la route est sollicitée par les gros porteurs, plus la portance des matériaux diminue et plus ces routes se dégradent rapidement.

Les résultats des essais de compacité et de déflexion in-situ réalisés sur la plate-forme, sur la couche de fondation, sur la couche de base et sur la couche de roulement en béton bitumineux des routes revêtues à savoir: la route Abong-Mbang-Bonis dans la Région de l'Est et la route Nkoenvom-Ambam dans la Région du Sud sont conformes aux prescriptions du C.C.T.P. Cette conformité garantie la tenue de l'ouvrage en rapport avec le dimensionnement adopté.

La présente étude a permis d'établir une corrélation entre paramètres géotechniques et géochimiques, ainsi:

Le Los Angeles augmente avec l'altération de la roche et le poids spécifique diminue avec l'altération de la roche;

L'Indice de plasticité diminue avec l'augmentation du confinement du milieu;

Le CBR et le poids volumique sec augmentent avec l'enrichissement en oxydes de fer;

Les limites de plasticité et liquidité augmentent avec l'altération des silicates.

Elle a en outre permis d'identifier les différentes causes occasionnant la dégradation rapide des chaussées notamment:

- le sous dimensionnement de chaussée, soit par mesure d'économie, soit par l'étude géotechnique mal réalisée ou mal adaptée, soit utilisation des mauvais matériaux;
- exécution défectueuse ne respectant pas les règles de l'art;
- manque d'entretien courant de l'ouvrage;
- surcharge des camions (dépassement des tonnages).

Les recommandations sont envisagées pour palier les problèmes de dégradations prématurées des chaussées souvent constatées avant la durée de vie prévu des chaussées.

Dimensionner la chaussée à partir de l'étude géotechnique bien réalisée et de la classe de trafic bien définie (facteurs majeurs de la tenue de l'ouvrage) ;

Couvrir la couche de base du béton bitumineux dans un délai ne dépassant pas un mois;

Prévoir les zones de parking pour les gros porteurs tout le long de l'itinéraire;

Veiller au contrôle des caractéristiques géotechniques des matériaux utilisés, mettre l'accent sur l'assainissement et au fonctionnement des barrières de pluies pour les routes en terre;

Le présent travail se base sur un nombre relativement réduit des échantillons par substratum et par carrière latéritique donnant des corrélations indicatives, pour les recherches futures, il faudra densifier l'échantillonnage afin de parvenir à des modèles robustes.

# **BIBLIOGRAPHIE**

- Allegret., Peyronnet., Cambefort., Coquand., Galarru., Leveque., Mellier., Zignali., 1965. Cours de terrassements. Editions Eryolles, Paris, 326 p.
- Akaha CT, Adunola OO. Geotechnical and chemical evaluation of tropical red soils in a deltaic environment: implications for road construction. *Int J Geo Earth Env Sci* 2016; 6(1): 19–29.
- Akpokodje EG. The geotechnical properties of lateritic and non-lateritic soils of southeastern Nigeria and their evaluation for road construction. *Bull Int Assoc Eng Geol* 1986; 33(1): 115–121.
- Attoh-Okine. N.O., 1995. Lime treatment of laterite soils and gravels-revisited. *Construc Build. Mater.* 5, 283-287.
- Attoh-Okine B., 1990. Stabilising effect of locally produced lime on selected lateritic soils. *Construc. Build . Mater.* 2, 86-91.
- Autret P., 1983. Latérites et graveleux latéritiques. Editions ISTED-LCPC, Paris, 38 p.
- Bagarre E., 1990 . Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. ISTED, Paris, p.
- Bekoa E., 1994. Etude pétrologique et géochimique d'une couverture pédologique sur gneiss: zone forestière de l'extrême Sud-Cameroun : relation avec la dynamique du fer. Tl 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Yaoundé, 187 p.
- Bilong P., 1988. Genèse et développement des sols ferrallitiques sur syénite alcaline potassique en milieu forestier du Centre-Sud Cameroun. Comparaison avec les sols ferrallitiques développés sur roches basiques. Thèse Doc. d'Etat es. Sciences, Univ. Yaoundé, Fac. Sci., Dépt. Sci.Terre, 367 p.
- Bitom D., 1988. Organisation et évolution d'une couverture ferrallitique en zone tropicale humide (Cameroun). Genèse et transformation d'ensembles ferrugineux indurés profonds. Thèse, Univ. Poitiers, 164 p.
- Bohi ZPB. Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière : le cas de la région de l'Agneby (côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'ENPC Paris ; 2008. 123 p.
- Brito Neves B. D., Van Schmus WR., Fetter A., 2002. North-Western Africa-North-Eastern Brazil. Major tectonic links and correlation problems. *Journal of African Earth Sciences* 34, 275-278.
- Castaing C., Triboulet C., Feybesse J.L., and Chèvremont P., 1993. Tectonometamorphic **evolution of Ghana, Togo and Benin** in the light of the Pan-African/Brasilian orogeny. *Tectonophysics* 218, 323-347.
- CEBTP., – L.C.P.C., 1985. Manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux, 166 p.
- CEBTP., 1984. Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, Centre d'expertise du bâtiment et des travaux publics, Saint-Remy-lès -Chevreuse, 155 p.



- Charman JH.,1988. Laterite in road pavements. London construction Industry Research and Information Association Spécial Publication 47. CIRIA, London.
- Collas J., et Havard M., 1983. Guide géotechnique, lexique et essais. Editions Eyrolles, Paris, 135p.
- Coquand R., 1970. Routes : Circulation – Tracé – Construction, Livre II : Construction et entretien. Editions Eyrolles, Paris, 337p.
- Costet J., et Sanglerat G., 1969. Cours pratique de Mécanique des sols. Editions Dunod, Paris, 599p.
- Direction des études Générales et de la Normalisation (DEGN) (1987). Recommandation pour l'utilisation en corps de chaussées de graveleux latéritiques naturels. Recommandation 30.004-R. Ministère de l'équipement, République du Cameroun.
- Dreux G., 1981. Nouveau guide du béton. Editions Eyrolles, Paris, 311 p.
- Dupain R., Lanchon R., Saint- Arroman J.C., 1995. Granulats, sols, ciments et bétons. Editions Casteilla, Paris, 234 p.
- Ekodeck G. E., 1976. Contribution à l'étude de la nature et du comportement géotechniques des dépôts superficiels gonflants du Nord Cameroun. Th Doc. 3e C. Fac. Sci. Univ. Grenoble I, 181 p.
- Ekodeck G. E., 1984. L'altération des roches métamorphiques du Sud Cameroun et ses aspects Géotechniques. Thèse Doct. D'Etat es Sci : Nat., IRIGM, Univ.Grenoble I, 392 P.
- Ekodeck G. E., 1989. L'algorithme généralisé de restructuration normative altérologique et les diagrammes correspondants d'interprétation et de caractérisation. Doc. Inéd. Dact., 116p.
- Ekodeck G.E., Kamgang K. B., 2002. L'altérologie normative et ses applications : une expression particulière de la pétrologie des roches alumino-silicatées du point de vue de leur évolution supergène. Press. Univ. de Yaoundé (Cameroun), Collect. Connaissances, 231p.
- Ekodeck G.E., Kamgang Kabeyene V., 2011. Normative alterology and advanced applications: a peculiar facet of aluminosilicate-bearing in rocks petrology, with regard to their supergene evolution. Presses Universitaires de yaoundé, yaoundé (Cameroun).
- Eno Belinga S. M., 1983. Géologie dynamique externe des pays tropicaux de la Terre. Afrique-Asie. Les paysages du fer. Librairie universitaire, université de Yaoundé, 307 p.
- Eno Belinga S. M., 1984. Géologie du Cameroun. Librairie Universitaire, Université de Yaoundé, 307 p.
- Eno Belinga S. M., 1985. Mvangan-Province du Sud. Géographie, Histoire, Economie, culture et tourisme. Bibliothèque des SC. De la Terre. Fac. Sci. Univ. Yaoundé, 327 p.
- Estienne et Godard., 1970. Climatologie, 366 p.
- Fall M, 1993. Identification et caractérisation mécanique des graveleux latéritiques du Sénégal : application au domaine routier. [Thèse de l'INLP],. p. p 179.

- Gac J. Y., Pinta M., 1973. Bilan de l'érosion et de l'altération en climat tropical humide. Estimation de la vitesse d'approfondissement des profils. Etude du bassin versant de l'Ouham (République Centrafricaine).
- Gazel J., Guiraudie Ch., 1965. Carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1/1 000 000. Direction des Mines et de la Géologie, Yaoundé – Cameroun.
- Gidigas M.D., 1972. Mode of formation and geotechnical characteristics of laterite materials of Ghana in relation to soil forming factors. Eng. Geol. 6, 79-150.
- Gidigas M.D., 1983. Geotechnical evaluation of residual gravels in pavement. Eng. Geol. 15, 1973-1984.
- Gidigas M.D., 1983. Development of acceptance specification for tropical gravel paving materials. Eng. Geol. 19, 213-240.
- Godwe., 1982. Fluage des matériaux des corps de chaussées : cas d'un grave argileux latéritique : Mém. ENSP. Univ. Yaoundé I, 102p.
- Habib P., 1973. Précis de géotechnique. Editions Dunod Paris- Bruxelles- Montréal, 145 p.
- Helgeson H. C., Garrels R. M., Mackenzie F.T., 1969. Evaluation of irreversible reactions in geochemical processes involving aqueous solutions. Geochim. And Cosmochim. Acta, n° 33, pp. 455 – 481.
- Hieng I.O., 2003. Etude des paramètres géotechniques des sols du Cameroun. Editions Clé, Yaoundé, 147 p.
- Kamgang Beyala V., 1987. L'altération supergène des roches grenatifères de la région de Yaoundé (Cameroun) : Pétrologie-Minéralogie. Th. Doct. 3<sup>ème</sup> cycle, Univ. Poitiers-France, 170 p.
- Kamgang Beyala V., 1998. Evolution supergène des roches et incidences phytogéographiques : Cas de contact forêt- savane du Sud–Est Cameroun. Th. Doct. d'Etat. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 208 p.
- Karsenty G., 2007. Guide pratique des VRD et aménagements extérieurs. Editions Eyrolles, Paris, 620 p.
- Keutchafo J. .M., 1984. Etude comparative des caractéristiques mécaniques et hydrauliques de quelques sols utilisés en construction routière au Cameroun : Prise en compte de leur composition minéralogique et de leur structure : Mém. ENSP. Univ. Yaoundé I, 85 p.
- Khattab SAA., 2002. Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux. Thèse. Doct. Univ. Orléans, 205 p.
- Kouankap Nono, G.D., Nzenti, J.P., Suh Cheo, E., Ganno, S. 2010. Geochemistry of ferriferous, high-K calc-alkaline magmas from the Banefo-Mvoutsaha Massif (NE Bafoussam), Central Domain of the Pan-African Fold Belt, Cameroon. The Open Geology Journal 4, 15-28.
- Kouankap Nono, G.D., 2011. Etude du Cisaillement Centre Camerounais dans la région de Banefo- Mvoutsaha au NE Bafoussam, dans le domaine centre de la Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale : Petrogenèse, Géochronologie et Structurologie des

- formations du socle. Thèse de Doctorat / Ph. D, Université de Yaoundé I, 118p.
- Letouzey R., 1985. Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1/500000 (domaine de la forêt humide toujours verte IRA Herbier National), Yaoundé Cameroun pp-95-240.
- Lompo P., 1980. Les matériaux utilisés en construction routière en Haute Volta. Un matériau non traditionnel "Le lithostab" . In: 4ème conférence routière africaine, Nairobi, Kenya, 20-25 Jan 1980.
- Lopez-Lara T., Zaragoza J.B., Lopez C., 2004. Mineralogical characterization of stabilized soils. *EJGE*; 9 (F).
- Mahabub V. J., 1982. Manuel international de l'entretien routier, 207 p.:
- Volume I : Entretien des dépendances et des systèmes d'assainissement. Edition BMZ Germany, 303 p.
- Volume II : Entretien des routes non revêtues. Edition ODA, The United Kingdom, 313 p.
- Volume III et IV : Entretien des routes revêtues. Edition Ministère de la Coopération, France, 278 p.
- Mahalinga-Iyer U., William D.J., 1997.. Properties and performance of lateritic soil in road pavement. *Eng Geol* 46: 71-80
- Maurizot P., Abessolo A., Feybesse J. L., Johan L.P., 1986. Etude de prospection minière du Sud-Ouest Cameroun. Synthèse des travaux de 1978 à 1985. Rapport de BRGM , 274 P.
- Mbumbia L., Merteus de Wimars A., Tirlocq J., 2000. Performance characteristics of lateritic soil bricks fired at low temperatures: a case study of Cameroon. *Construc. Build. Mater.* 14, 121-131.
- Messou M., 1980. Comportement mécanique d'une couche de base en graveleux latéritique améliorés au ciment: cas des routes en Côte d'Ivoire. Thèse Doct-Ing en génie civil à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 197.p.
- Millogo Y., Traoré K., Ouedraogo R., Kaboré K., Blanchart P., Thomassin J.H., 2008.. Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of lateritic gravels of Sapouy (Burkina Fasso) used in road construction. *Construct Build Mater* 22:70-76
- Millogo Y., 2008. Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Fasso améliorés aux liants hydrauliques: application au génie civil (bâtiment et route). Université d'Ouagadougou, Th. Dct. Chimie minérale, 142 p.
- Millogo Y., 2008. Ciment lateritic gravels mixtures: Microstructure and strength characteristics, 10 p.
- Mvindi A.T.N, Onana V.L, Ze A.N, Ohandja H.N, Ekodeck G.E... Influence of hydromorphic conditions in the variability of geotechnical parameters of gneiss-derived lateritic gravels in a savannah tropical humid area (Centre Cameroon), for road construction purposes, *Transportation Geotechnics*, (2017) doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.08.003>

- Mvondo H., den Brok S. W. J., Mvondo Ondo J., 2003. Evidence for symmetric extension and exhumation of the Yaoundé nappe (Pan-African fold belt, Cameroon). *Journal of African Earth Sciences* 36, 215–231.
- Nédélec A., Macaudière J., Nzenti J. P., et Barbey P., 1986. Evolution structurale et métamorphisme des schistes de Mbalmayo (Cameroun). Informations pour la structure de la zone mobile panafricaine d'Afrique centrale au contact du craton du Congo. *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris*, 303, II, 75-80.
- Ndjigui P. D., 2001. Métallogénie de la serpentinite de Kondong 1 de son manteau d'altération dans le Sud-Est du Cameroun : Pétrologie, Minéralogie et Géochimie. Th. Doct. 3<sup>ème</sup> cycle Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 170 p.
- Ndjigui P. D., 2008. Altération supergene des serpentinites et distribution des éléments du groupe du platine dans les profils latéritiques du complexe ultrabasique de Lomié. Th. Doct. /Ph.D, Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 255 p.
- Ndjigui P. D., Bilong, P., Bitom D., 2009. Négative cerium anomalies in the saprofile zone of serpentinites lateritic profiles in the Lomié ultramafic complex, South-East Cameroun. *J. Afr. Earth Sci.* 53, pp, 59-69.
- Neves S.P., Bruguier O., Vauchez A., Bosch D., Silva J.M.R, 2006. Timing of crust formation, deposition of supracrustal sequences, and Transamazonian and Brasiliano metamorphism in the East Pernambuco belt (Borborema Province, NE Brazil): Implications for western Gondwana assembly. *Precambrian Research* 149, 197–216
- NF EN 1426., 1999. Bitumes et liants bitumineux. Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille. AFNOR, 16 p.
- NF P 18 - 406., 1981. Bétons-Essai de compression. AFNOR, 3 P.
- NF P 18 - 560., 1990. Analyse granulométrique par tamisage pour granulats. AFNOR, 4 p.
- NF P 18 - 561., 1997. Mesure de coefficient d'aplatissement. AFNOR, 7 p.
- NF P 18 - 573., 1990. Essai Los Angeles., AFNOR, 4 p.
- NF P 18 - 598., 1991. Equivalent de sable. AFNOR, 8 p.
- NF P 94 - 050., 1995. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux : Méthode par étuvage. AFNOR, 7 p.
- NF P 94 - 051., 1993. Détermination des limites d'Atterberg., AFNOR., 15 p.
- NF P 94 - 053., 1991. Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire, 6 p.
- NF P 94 - 054., 1991. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols, 6 p.
- NF P 94 - 056., 1996. Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage. AFNOR., 15 p.
- NF P 94-061-2., 1996. Détermination de la masse volumique d'un matériau en place : méthode au densitomètre à membrane. AFNOR, 8 p.

- NF P 94-061-3., 1996. Détermination de la masse volumique d'un matériau en place : méthode au sable. AFNOR, 8 p.
- NF P 94-067., 1992. Coefficient de dégradabilité des matériaux. AFNOR., 7 p.
- NF P 94-078., 1992. Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant immédiat AFNOR., 14 p.
- NF P 94-093., 1999. Détermination de référence de compactage d'un matériau. Essai Proctor normal. Essai Proctor modifié. AFNOR, 18 p.
- NF P 94-114., 1990. Essais de pénétration dynamique type A., AFNOR, 12 p.
- NF P 98-080., 1992. Partie 1 : terminologie relative au calcul de dimensionnement des chaussées AFNOR, 10 p.
- NF P 98-200., 1991. Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante. Partie 1 : définitions, moyens de mesure, valeurs caractéristiques. AFNOR, 6 p.
- NF P 98-251-1., 1991. Essai Duriez sur mélanges hydrocarbonés à chaud. AFNOR, 6 p.
- NF P 98-251-2., 1992. Essai Marshall sur mélange hydrocarbonés à chaud. AFNOR, 6 p.
- NF T 66-005., 1986. Bitumes fluidifiés et bitumes lfluxés. Détermination de la pseudo-viscosité., AFNOR, 8 p.
- Ngako V., 1999. Les déformations continentales panafricaines en Afrique Centrale : Résultat d'un poinçonnement de type himalayen. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé I, 301 p.
- Ngako, V., Affaton, P., Njonfang, E., 2008. Pan-African tectonics in northern Cameroon: implication for the history of western Gondwana. *Gondwana Res.* 14, 509–522.
- Ngnotué T., Nzenti J. P., Barbey P., Tchoua F. M., 2000. The Ntui - Bétamba high-grade gneisses: a northward extension of the pan- African Yaoundé gneisses in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 31, 369-381.
- Nguyen Van Tuu., Lemoine B., Pouplard J., 1981. Hydraulique routière. Editions BECOM, Paris, 342 p.
- Njanko, T., Nedélec, A., Affaton, P., 2006. Synkinematic high-K calc-alkaline plutons associated to the Pan-African central Cameroon shear zone (west-Tibati area): petrology and geodynamic significance. *Journal of African Earth Sciences* 44, 494-510.
- Nyeck B., 1988. Organisation et aptitudes culturelles des sols de Zoétélé dans le région forestière humide du Sud-Cameroun. Exemple de deux toposéquences sur granite. Th. 3<sup>ème</sup> cycle, Fac. Sci. Univ. Yaoundé I (Cameroun), 325 p.
- Nzabakurikiza A., Onana V.L., Ngo'oZe A., Ndzié Mvindi A.T., Ekodeck G.E., 2016. Geological, geotechnical, and mechanical characterization of lateritic gravels from Earstern Cameroon for road construction purposes. *Bull Eng Geol Environ DOI* 10.1007/s10064-016-0979.
- Nzabakurikiza A., Onana V.L., Likiby B., Priso Ndome Effoudou., Kamagang Kabeyene V., Ekodeck G.E., 2012. Diagnostic de l'utilié en géotechnique des graveleux latéritiques

- sur migmatites de l'Est Cameroun par le biais des méthodes chimico-minéralogiques. *Rev CAMES Sér A 13 (Suppl 2): 28-33*
- Nzenti J. P., 1987. Pétrogenèse des migmatites d'Ydé (Cameroun) : élément pour un modèle géodynamique de la chaîne panafricaine nord équatoriale. Th. Doct. 3<sup>ème</sup> cycle, Univ.Nancy I – France, 147 p.
- Nzenti J. P., Ngako V., Kambou R., Penaye J., Bassahak J. et Njel O.V., 1992. Structures régionales de la chaîne panafricaine du Nord Cameroun. *Comptes Rendus Académie des Sciences Paris, tome 315, série II, 209 – 215.*
- Nzenti J. P., Barbey, P., Bertrand J. M.L. et Macaudière J., 1994. La chaîne panafricaine au Cameroun: cherchons suture et modèle. In : S.G.F. édit., 15<sup>e</sup> Réunion des Sciences de la Terre, Nancy, France, 99 P.
- Nzenti, J. P., Njanko, T., Njiosseu, E.L.T. et Tchoua, F.M., 1998. Les domaines granulitiques de la Chaîne Panafricaine Nord–Équatoriale au Cameroun. *In Géologie et environnement au Cameroun, Vicat et Bilong editors, Collection Géocam I, 255 – 264.*
- Nzenti J. .P., Kapajika. B., Worner G., and Lubala R.T., 2006. Synkinematic emplacement of granitoids in a panafrican shear zone in Central Cameroon. *Jurnal of African Earth Sciences 45, 74 – 86.*
- Nzenti, J.P., Njiosseu Tanko, E.L., Nzina, N. A., 2007. The metamorphic evolution of the Paleoproterozoic high grade Banyo gneisses (Adamawa, Cameroon, Central Africa). *Journal of Cameroun Academy of Sciences 7, 95–109.*
- Nzenti, J.P., Abaga, B., Suh, C.E., Nzolang, C., 2010. Petrogenesis of peraluminous magmas from the Akum-Bamenda Massif, Pan-African Fold Belt, Cameroon. *International Geology Review. 29p.*
- Nzina NChare, A., Nzenti, J. P., Tanko Njiosseu, E. L., Ganno, S. and Ngnotué, T., 2010. Synkinematic ferro-potassic magmatism from the Mekwene-Njimafofire Fouban Massif, along the Fouban-Banyo shear zone in central domain of Cameroun Pan-African fold belt. *Journal of Geology and Mining Research 2(6), 142-158.*
- Nzolang, C., Kagami, H., Nzenti, J. P. and Holtz, F., 2003. Geochemistry and preliminary Sr-Nd isotopic data on the Neoproterozoic granitoids from the Bantoum area, west Cameroon : evidence for a derivation from a Paleoproterozoic Archean crust. *Polar Geoscience 16, 196-226.*
- Olivry J.C., 1984. Atlas du Cameroun : Carte oro-hydrographique et réseau hydrométrique du Cameroun, Ech 1/2 000 000.
- Olivry J.C., 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. MESRES, ORSTOM, Paris, 733 p.
- Onana VL, Ngo'o Ze A, Medjo Eko R, Ntouala RFD, Nanga Bineli MT, Ngonon Owoudou B, Ekodeck GE. Geological identification, geotechnical and mechanical characterization of charnockite-derived lateritic gravels from Southern Cameroon for road construction purposes. *Transp Geotech 2017; 10: 35–46.*

- Onana V. L., Kamgang Kabeyene Beyala V., Ndome Effoudou Priso E., Ekodeck G. E., 2007. Matériaux d'altération sur schistes de la bordure septentrionale de la série de Mbalmayo-Bengbis: Remarques altérologique et implications géotechniques. In recueil des résumés (Poster) du colloque " Sols et Développement durable en Afrique intertropicale-Sols et ressources minières", Douala-Cameroun, 21-23 novembre 2007, pp, 6.
- Onana V. L., 2010. Altération supergène des chloritoschistes de la série de Mbalmayo-Bengbis (Sud Cameroun) et ses applications géotechniques : Th. Doct. Ph.D. Univ.Yaoundé I, 246 p.
- Onana V.I., Nzabakurikiza A., Ndome Effoudou E., Likiby B., Kamagang Kabeyene W., Ekodeck GE ., 2015. Geotechnical, mechanical and geological caractezation of lateric gravels of Boumpial (Cameroon) used in road construction. J Cameroon Acad Sci I: 45-54
- Onguéné Mala., 1993. Différenciations pédologiques dans la region de Yaoundé-Cameroun: transformation d'un sol rouge en sol à horizon jaune en relation avec l'évolution du modèle. Th. Doct. Univ. Paris VI, 254 p.
- Owona S., Mvondo Ondo J., Ratschbacher L., Mbola Ndzana S. P., Tchoua F. M., Ekodeck G. E., 2011. The geometry of the Archean, Paleo- and Neoproterozoic tectonics in the Southwest Cameroon. Comptes rendus Géosciences 353 (4), 312-322.
- Peltier R., 1959. Manuel du laboratoire routier. Dunod, Paris, 291 p.
- Penaye J., Toteu S. F., Van Schmus W. R et Nzenti J. P., 1993. U-Pb and Sm-Nd preliminary geochronologic data on the Yaounde series, Cameroon : re- interpretation of the granulitic rocks as the suture of a collision in the "centrafrican" belt. Centre de Recherches Académiques des Sciences de Paris, 317, 789-794.
- Pouclet A., Tchameni R., Mezger K., Vidal M., Nsifa E. N., Shang C. K., Penaye J., 2007. Archaean crustal accretion at the northern border of the Congo craton (South Cameroon), The charnockite-TTG link. Bulletin of the Geological Society of France 178, 331–342.
- Regnault J. M., 1986. Synthèse géologique du Cameroun. Editions Ministère des Mines et de l'Energie, Yaoundé, 119 p.
- Robitaille V., Tremblay D., 1997. Mécanique des sols. Théorie et Pratique. Modulo éd. Québec (Canada), 652 p.
- Schlosser F., 1988. Eléments de mécanique des sols. Editions Presse des Ponts et Chaussées, Paris, 276 p.
- Shang C, K., Liégeois J. P., Satir M., Frisch W., Nsifa E. N., 2010. Late Archaean high-K granite geochronology of the northern metacratonic margin of the Archaean Congo craton, Southern Cameroon: Evidence for Pb-loss due to non-metamorphic causes. International Association for Gondwana Research 475, 19 p.

- S.E.T.R.A – L.C.P.C., 1984. Mémento des spécifications françaises des chaussées. Editions CETE de Lyon, Paris, 67 p.
- Sikali F., Djalal M-E., 1987. Utilisation des latérites en technique routière au Cameroun. In: Séminaire Régional sur les latérites: Sols, Matériaux, Douala, Cameroun, 21-27 Jan 1986, pp 277-288
- Sikali F., 1979. Caractéristiques et comportements élastoplastique d'une latérite pour son utilisation en corps de chaussée. Thèse : Master's degree. Univ. Yaoundé I, 159 p.
- Simon AB., Gresecke J., Bidlo G., 1973. Use of lateritic soils for road construction in north Dahomey. Eng. Geol. 7, 197-218.
- Soba D., 1989. La série de Lom: Etude géologique et géochronologique d'un bassin volcano- sédimentaire de la Chaîne Panafricaine à l'Est du Cameroun. Thèse Doctorat D'Etat, Université de Paris VI, 198 p.
- Suchel J. B., 1972. La répartition des pluies et les régimes pluviométriques au Cameroun. Trav et Doc ; de géogr., 5. C E G E T, Talence, 287 p.
- Tanko Njiosseu E. L., Nzenti J. P., Njanko T., Kapajika B., Nedelec A., 2005. New U-Pb Zircon ages from Tonga (Cameroon): Coexisting Eburnean-Transamazonian (2.1 Ga) and Pan-African (0,6 Ga) imprints.- *Compte Rendu Géosciences* 337, 551-562.
- Tardy Y., 1993. *Pétrologie des latérites et des sols tropicaux*. Masson éd-France, 459 p.
- Tardy Y., 1969. *Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs d'Europe et d'Afrique*. Th. Doct. Fac. Sci. Univ. L. P. Strasbourg – France, et Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr., n°31, 199 p.
- Tchameni R., 1997. *Géochimie et géochronologie des formations de l'archéen et du paléoproterozoïque du Sud-Cameroun (Groupe du Ntem, ctaton du Congo)*. Thèse. Doct. Univ. Orléans, 356 p.
- Tockol I., Massiéra M., Chrasson PA., Maiga M.S., 1994.. *Les gravelaux latéritiques dans les pays du Sahel: cas des routes non revêtues*. 7ème congrès International de AIGI, Rotterdam, Holland.
- Tockol I., 1993.. *Contribution à l'étude des graveleux latéritiques du Sahel: cas des routes non revêtues*. M.Sc. Thesis. Ecole de Génie, Université de Moncton, Moncton
- Toteu, S. F., Michard, A., Bertrand, J. M., and Rocci, G., 1987. U/Pb of Precambrian rock from North-Cameroon, Orogenic evolution and chronology of the Pan-African belt of central African. *Precambrian Research* 37, 71-87.
- Toteu S. F., Van Schmus W. R., Penaye J., Michard A., 2001. New U-Pb and Sm-Nd data from north-central Cameroon and its bearing on the pre-Pan-African history of central Africa. *Precambrian Research* 108, 45-73.



- Traoré D., 2005. Serpentinisation hydrothermale et altération latéritique des roches ultrabasiques en milieu tropical : Evolution géochimique et minéralogique de la minéralisation en platine de la rivière des Pirogues (Nouvelle-Calédonie). Th. Doct. Univ. Nouvelle-Calédonie, 191 p.
- Yongué F. R., 1986. Contribution à l'étude pétrologique de l'altération et des faciès de cuirassement ferrugineux des gneiss migmatitiques de la région de Yaoundé. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Yaoundé, Fac. Sci., Dépt. Sci. Terre, 214 p.
- Yongué F. R., 1995. Les concentrations métallifères de nickel et de cobalt à partir de l'altération latéritique des roches ultrabasiques serpentinisées du Sud-Est du Cameroun. Th. Doct. Etat. Univ. Yaoundé I, 262 p.