

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE/ SCIENCES
TECHNOLOGIES ET GEOSCIENCES
(CRFD/STG)

Email : crfd_stg@uy1.uninet.cm

Site web : www.uy1researchstg.cm



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCE,
TECHNOLOGY AND GEOSCIENCES
(CRFD/STG)

Email: crfd_stg@uy1.uninet.cm

Site web: www.uy1researchstg.cm

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

Laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles et Applications

Laboratory of Geosciences of Superficial Formations and Applications

CARACTERISATION GEOPHYSIQUE ET GEOTECHNIQUE DU MASSIF
ROCHEUX D'ATHE (AKONOLINGA, CENTRE -CAMEROUN).

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences de la Terre

Option : Géologie des Formations Superficielles

Spécialité : Sol, Eau et Sciences Géotechniques

Par

KAMTCHOM KENMOE Franz-Luther

Matricule : 17G2725

Licencié en Sciences de la Terre



Sous la direction de

Pr. BISSO Dieudonné

Professeur

Année académique : 2024-2025

*À l'éternel DIEU Tout Puissant,
À toute ma famille.*

REMERCIEMENTS

Au risque d'oublier de faire preuve de reconnaissance vis-à-vis des soutiens précieux ayant jalonné la réalisation de ce mémoire, ma modeste personne tient à rendre grâce au Dieu Tout Puissant pour les bienfaits accomplis dans ma vie et pour m'avoir accordé la sante et tous ces éléments auxquels j'ai eu recours.

Je tiens à remercier particulièrement Pr. **BISSO** Dieudonné le Chef de Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I pour son leadership et sa disponibilité et sa rigueur dans la formation des étudiants, mon Directeur de mémoire, Géologue-Géophysicien, de m'avoir initié dans la recherche scientifique et de m'avoir ouvert les portes au sein de l'équipe de recherche. Je le remercie infiniment pour sa confiance, son encadrement, son soutien, sa disponibilité, ses conseils.

J'exprime ma profonde reconnaissance au Dr. **KOAH Na Lebogo Serge Parfait**, Géologue-Géophysicien au Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, dont je reconnais la rigueur dans l'encadrement scientifique, pour avoir accepté de diriger ce travail avec une attention particulière. Je lui adresse ma profonde gratitude pour son soutien multiforme, sa disponibilité, ses critiques et suggestions sans lesquels l'aboutissement de ce travail serait incertain. Je n'oublierai pas d'exprimer ma profonde gratitude auprès de Dr. **ETOU DI AKOA** pour sa présence sur le terrain.

J'exprime ma gratitude auprès de tout le corps enseignant du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I pour leur formation dont je suis la preuve pour la formation que j'ai reçue durant ces six dernières années. Particulièrement aux, Professeurs. **NDJIGUI Paul-Désiré**, **YONGUE FOUATEU Rose**, **ONANA Vincent Laurent**, **GANNO Sylvestre**, **NDAM Jules Remy**, **YENE ATANGANA Joseph Quentin** et **NGUEUTCHOUA Gabriel**, **NTSMA Jacqueline**, **EKOMAN Emile**, et aux docteurs **MBIDA YEM**, **ANABA Achille**, **FEUMBA Roger**, **NGO'O ZE**, **MOUAFU**.

Je remercie également tous les doctorants au Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I. Merci à vous pour vos remarques, conseils et orientations apportés tout au long de ce travail. Il m'est également agréable d'exprimer ma reconnaissance à mes aînés académiques, en particulier **SUFFEU TALLA Thierry Blondel**

Mes sincères remerciements s'adressent aux responsables du Bureau de Recherche, d'Etude et de Contrôle Géotechnique/BRECG de m'avoir accueilli et tenu la main durant les essais géotechniques au laboratoire.

Je remercie également tous mes camarades de promotion avec qui j'ai cheminé, plus particulièrement à : **CHEWA Franc Vaneck, NGBAWAME ELLE Hugues, EWOLO NGONO Didace Joyce brunelle, DJOUDA TCHINDA Ivanov, ASSONGTIA ASSONDJI Merveille, NZEMINI Cybelle Diane, OUMAR IBRAHIM Adam, ABOUBAKAR, BIANDA NGNINDJA Frederic, MINCHE MFOPOU Yasmine, ASSE Raphael, MATCHUIM DJONKO saurelle, NTEDE ANEGUE Luc junior, TCHILONG MIPO SANDRINE.**

Les mots me manquent pour remercier ma famille pour son soutien inqualifiable dans la réalisation de ce travail. Que mon père **KENMOGNE Janvier**, ma mère **TCHOUANDEM Hélène**, mes grands frères, ma grande sœur, ma petite sœur, mes oncles, mes tantes, mes cousins, mes cousines, mes neveux, nièces et ma fille prennent ce travail que leur dédie, la preuve de leur amour. Ils sont tout pour moi sans eux je ne peux rien. Une pensée aux populations de Athe pour l'accueil et l'hospitalité qu'elles nous ont réservé. Notamment, Monsieur le chef du village, garant de la tradition et toute sa famille.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIERES	iv
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	viii
RESUME	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES	3
Introduction	3
I.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	3
I.1.1 Localisation géographique et administrative de la zone d'étude.....	3
I.1.2 Climat	4
I.1.3 Végétation.....	5
I.1.4 Géomorphologie	5
I.1.5 Hydrographie	6
I.2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE	7
I.2.1 Formations de socle et tectonique	7
I.2.2 Types de sols	8
I.3 RAPPELS THEORIQUES DE LA METHODE DE PROSPECTION ELECTRIQUE...	9
I.3.1 Principe de la méthode de prospection électrique	9
I.3.2 Résistivité électrique.....	10
I.3.3 Techniques de mesure	11
I.3.4 Dispositifs de mesure.....	12
Conclusion	13
CHAPITRE II : APPROCHE METHODOLOGIQUE	14
Introduction	14
II.1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	14
II.2. PROSPECTION GEOLOGIQUE.....	14
II.2.1 Matériels.....	14
II.2.2 Méthode de prospection	15
II.3. PROSPECTION GEOELECTRIQUE.....	15
II.3.1 Equipement de mesure geoelectrique.....	15

II.3.2 principes de la méthode électrique	16
Acquisition et protocole de mesure.....	16
II.2.4.5 Traitement et inversion.....	17
II.4 ESSAIS GÉOTECHNIQUES EN LABORATOIRE	19
II.3.2 Los Angeles	19
II.3.3 Micro Deval.....	22
II.3.4. Pétrographie en lame mince	24
Conclusion	26
CHAPITRE III : PRESENTATIONS DES RESULTATS	27
Introduction	27
III.1 ETUDE PETROGRAPHIQUE	27
III.2 ETUDE GEOELECTRIQUE	30
III.2.1 Type de courbes de sondages électriques	30
III.2.1.1 Les courbes de sondage à trois terrains	30
III.2.1.2 Courbes de sondages à quatre terrains	31
III.2.1.3 Courbes de Sondage à deux terrains.....	34
III.2.2 Coupes geoélectriques.....	34
III.2.3 Carte de d'isorésistivité.....	36
III.3 ESSAIS MECANQUES.....	40
III.3.1 L'essai Los Angeles	40
III.3.2. L'essai Micro-Deval en présence d'eau (MDE)	41
Conclusion	41
CHAPITRE IV : INTERPRETATION ET DISCUSSION.....	42
Introduction	42
IV.1. NATURE LITHOLOGIQUE ET GEOMETRIE DU MASSIF ROCHEUX	42
IV.2 PROPRIETES MECANQUES DU MASSIF ROCHEUX.....	43
IV.3 EVALUATION DE LA QUALITE DU MASSIF ROCHEUX	44
Conclusion	45
CONCLUSION GENERALE	46
BIBLIOGRAPHIE	49
ANNEXES	I

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude	3
Figure 2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) appliqué aux données climatiques de la station d'Akonolinga pour la période allant de 1980 à 2015	4
Figure 3 : Carte topographie du secteur d'étude	6
Figure 4 : Carte hydrogéologique de la zone d'étude	7
Figure 5 : Carte géologique du secteur d'étude	9
Figure 6 : Quadripôle de mesure	10
Figure 7 : Procédure de prise de mesure par tomographie électrique 2D	12
Figure 8 : Configuration des électrodes pour différents dispositifs.	13
Figure 9 : Matériels de prospection géologique	15
Figure 10 : Equipement de mesure géoélectrique	16
Figure 11 : Exemple de courbe automatique de tracée par le logiciel IPI2WIN	18
Figure 12 : Carte des points d'échantillonnage sur le massif gneissique d'Ath	19
Figure 13 : Appareils de los Angeles	21
Figure 14 : Appareils de micro-Derval	22
Figure 15 : Les étapes de l'essai mécaniques des échantillons au laboratoire ; A- Concassage ; B-Tamisage ; C-pesage ; D-colonne des tamis de classe 6,3/10 et 10/14 ; E-introduction de l'échantillon de la machine los Angeles.....	25
Figure 16 : Vue panoramique de l'affleurement	27
Figure 17 : Photographie des échantillons de roche (a et c) échantillon1 et (b et d) échantillon 2	28
Figure 18 : Photographie et microphotographies des échantillons de roches :(aet c) Echantillons de roche gneiss à grenat et biotite (Ech1), (b et d) Echantillon de roche de gneiss à grenat et à disthène (Ech2). Quartz (Qtz), Feldspath (Kfs), Opaque (Op), Plagioclase (Pl), Grenat (Gr), biotite (Bt), Rutile (Rt), disthène (Ky).	29
Figure 19 : Diagrammes circulaires de la distribution des types de courbes de sondages électriques dans la zone d'étude.....	30
Figure 20 : Sondages de type K (SE2) et A (SE5).....	31
Figure 21 : Sondages de type KH (SE 6 et SE22).....	32
Figure 22 : Sondages de type KQ. (SE16 et SE17).....	33
Figure 23 : Sondages de type AK. (SE16), type HK. (SE7)	34
Figure 24 : Coupe geoélectrique cg1.....	35
Figure 25 : Coupe geoélectrique cg2.....	36
Figure 26 : Carte d'isorésistivité a une profondeur de $AB/2=3m$	37
Figure 27 : Carte d'isorésistivité a une profondeur de $AB/2=9,1m$	38
Figure 28 : Carte d'isorésistivité a une profondeur de $AB/2=19m$	39
Figure 29 : Carte d'isorésistivité a une profondeur de $AB/2=40m$	40
Figure 30 : Coupe lithologique du massif rocheux	43
Figure 31 : Interpolation du modèle de bloc 3D	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Précipitations et températures moyennes interannuelles de la station d'Akonolinga pour la période allant de 1980 à 2015	4
Tableau 2. Gamme de résistivités électriques des formations de couvertures et du socle	11
Tableau 3. Profondeur d'investigation et pouvoir de résolution.	13
Tableau 4. Nombre de rotation et des boulets correspondant à chaque classe granulaire (Norme EN 1097-2).	21
Tableau 5. Classe granulaires, poids d'échantillons et boulets équivalent	23
Tableau 6. Caractéristique de l'essai MDE pour chaque classe granulaire (Norme EN 1097-1).	24
Tableau 7. Résultat de l'essai Los-Angeles	41
Tableau 8. Résultat de MDE	41
Tableau 9. Caractéristique geoelectrique du massif du massif rocheux.....	42
Tableau 10. Guide d'évaluation de la qualité/durabilité des matériaux.....	44

LISTE DES SIGLES, ABREVIATIONS ET SYMBOLES

3D	: Trois dimensions
BRECG	: Bureau de Recherche, d'Etude et de Contrôle Géotechnique
Bt	: Biotite
ECH	: Echantillon
EN	: Européenne Norme
GNT	: Grave Non Traitée
GPS	: Global Positioning System
GrT	: Grenat
GTLH	: Graves Traités aux Liants Hydrauliques
IDRRIM	: Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité
IRGM	: Institut de Recherche Géologique Minière
KfS	: Feldspath alcalin
KY	: Disthène
LA	: Los Angeles
LGFSA	: Laboratoire des Géosciences des Formations Superficielles et Application
m	: Mètre
M	: Masse
MDE	: Micro-Deval en présence d'Eau
NF	: Norme française
PCD	: Projet Communal de Développement
PL	: Plagioclase
Qtz	: Quartz
SE	: Sondage Electrique
SEV	: Sondage Electrique Vertical
Tab	: Tableau
UNESCO	: Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture
$\Omega.m$	: Ohm-mètre
ΔV	: Différence de potentiel
ρ_a	: Résistivité apparente
ρ_w	: Résistivité de l'eau

RESUME

Cette étude a pour objectif la caractérisation géophysique et géotechnique du massif rocheux d'Athe. Pour se faire un total de 23 sondages électriques verticaux unidimensionnels et deux échantillons de roche ont été prélevés et acheminés au laboratoire, où on a procédé aux essais mécaniques, à savoir le Los Angeles (LA) et le Micro Deval (MDE). La méthodologie adoptée intègre les données géologiques, géophysiques et géotechniques. Sur le plan géologique le massif est constitué de deux faciès géologiques : un gneiss à grenat et à biotite, un gneiss à grenat et à disthène, sur le plan géophysique quatre unités lithologiques : le massif altéré, fissuré, le massif fracturé et sain, qui représente 1,7%, 22%, 4,2% et 72,1% respectivement. Il ressort que le massif est exploitable. Sur le plan géotechnique les valeurs de Los Angeles et Micro Deval sont de 38 à 40% pour l'échantillon un, et pour l'échantillon deux de 47 à 50% pour les deux classes granulaires choisies le 10/14mm et le 6.3/14, et celles de Micro Deval de 28 à 32% pour l'échantillon un et de 40,8 à 46,5% pour le deuxième échantillon. Ces résultats montrent qu'on peut utiliser ces matériaux comme couche de base et de fondation pour le trafic T5 et T4 la construction des routes. Cette étude permet ainsi d'apporter une nouvelle approche méthodologique pour la prospection des roches utilisées en construction routière, Cette étude a également permis de donner la nature, la géométrie et évaluer la qualité du massif.

Mots clés : prospection géophysique, géotechnique, Los Angeles, Micro-Deval, massif d'Athe, faciès.

ABSTRACT

This study aims to characterize the geophysical and geotechnical properties of the Athe rock mass. To achieve this, a total of 23 one-dimensional vertical electrical soundings and two rock samples were taken and sent to the laboratory, where mechanical tests were carried out, namely the Los Angeles (LA) and Micro Deval (MDE) tests. The adopted methodology integrates geological, geophysical, and geotechnical data. Geologically, the mass consists of two geological facies: a garnet and biotite gneiss, and a garnet and disthene gneiss; geophysically, there are four lithological units: the weathered, fractured mass, the fractured, and intact mass, which represent 1.7%, 22%, 4.2%, and 72.1% respectively. It appears that the mass is exploitable. . On the geotechnical level, the Los Angeles and Micro Deval values are 38 to 40% for sample one, and for sample two, they are 47 to 50% for the two selected granular classes, 10/14mm and 6.3/14, and the Micro Deval values are 28 to 32% for sample one and 40.8 to 46.5% for the second sample. These results show that these materials can be used as base and foundation layers for T5 and T4 traffic in road construction. This study thus provides a new methodological approach for the prospecting of rocks used in road construction. This study also helped to determine the nature, geometry, and assess the quality of the massif.

Keywords: geophysical prospecting, geotechnical, Los Angeles, Micro-Deval, Athe massif, facies.

INTRODUCTION GENERALE

La construction ou l'amélioration du réseau routier est un facteur clé pour le développement économique d'un pays (UNESCO, 2009). Plusieurs nations dans le monde en général et en Afrique en particulier sont en perpétuelle construction et /ou réhabilitation de leurs réseaux routiers. Au Cameroun, malgré les efforts accrus de l'Etat dans le domaine des infrastructures routières, on note encore des insuffisances, à la dégradation et l'inexistence de routes dans certaines localités du pays. La construction et la réhabilitation des infrastructures routières nécessitent l'utilisation des quantités importantes de matériaux (Benbaqqal et al., 2016 ; Tesfaye et al., 2016) qui sont pour la plupart les granulats et les latérites (Ralijaona et al., 2010). La décision du choix des matériaux de construction routière est cependant fonction de nombreux critères. Ces matériaux doivent d'une part se conformer aux normes spécifiques liées à la nature même de la roche (propriétés physiques, chimiques, mécaniques et minéralogiques) et au potentiel du site et, d'autre part, à des facteurs liés aux coûts et donc d'ordre économique, c'est-à-dire des matériaux situés à une distance de transport la plus courte possible du lieu d'implantation du projet (Primel, 1984).

Pour la recherche et l'exploitation des carrières de massif rocheux, certaines difficultés se posent : la connaissance des massifs à prospector, l'évaluation de l'épaisseur de la couche latéritique stérile de recouvrement, la détermination des propriétés physiques et mécaniques des matériaux en place, l'estimation des volumes respectifs exploitables. Des méthodes et techniques d'investigations conventionnelles ont été développées pour traiter ces difficultés à savoir les essais in situ et les essais de laboratoire. Cependant, lesdites techniques rencontrent des difficultés en raison de leur coût, poids et leur profondeur d'investigation parfois limitée. Pour remédier à ce problème, les méthodes géophysiques sont souvent utilisées pour caractériser le sous-sol car, elles sont non destructives, légères, faciles à mettre en œuvre et permettent de mesurer les paramètres physiques d'un terrain directement à la surface sans réaliser des forages (Rahmani, 2018 ; Hebbache, 2017 ; Guerrero, 2014). Elles sont moins coûteuses et peuvent aboutir à une modélisation 2D, 3D des formations étudiées.

Ce travail a pour objectif principal la caractérisation du massif rocheux de la localité de d'Athe en vue de son utilisation comme carrière de roches massives.

Les objectifs spécifiques :

- Déterminer la nature géologique et la géométrie (extension latérale et épaisseur) du massif rocheux ;
- Déterminer les propriétés mécaniques du massif rocheux ;

- Et enfin évaluer la qualité et la quantité du massif

Ce travail est réparti en quatre chapitres en dehors de l'introduction et la conclusion générale :

- ✓ Chapitre : I les généralités ;
- ✓ Chapitre : II approche méthodologique ;
- ✓ Chapitre : III résultats ;
- ✓ Chapitre : IV Essai d'interprétation-discussion ;

CHAPITRE I : GENERALITES

Introduction

Cette partie consiste à présenter le milieu naturel et de la zone d'étude.

I.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1.1 Localisation géographique et administrative de la zone d'étude

La zone d'étude est localisée entre 4°3'26'' et 4°4'48'' de latitude Nord et 12°4'48'' et 12°9'0'' de longitude Est (Fig.1) C'est une localité située à 90 km environ de la ville de Yaoundé précisément à l'Est. Elle appartient au Département du Nyong et Mfoumou, Arrondissement de Akonolinga, située sur un plateau et est traversée par le fleuve Nyong coulant à plus basse altitude (650m) dans les bas-fonds ; elle couvre une superficie de 1420 Km². Pour 80 361 habitants d'environ. Limitée au Nord par les Communes de Lembe Yezoum et d'Ayos, au Sud par les Communes d'Endom et de Bengbis à l'Est par La commune de Messamena et l'Ouest par la commune de Messamena.

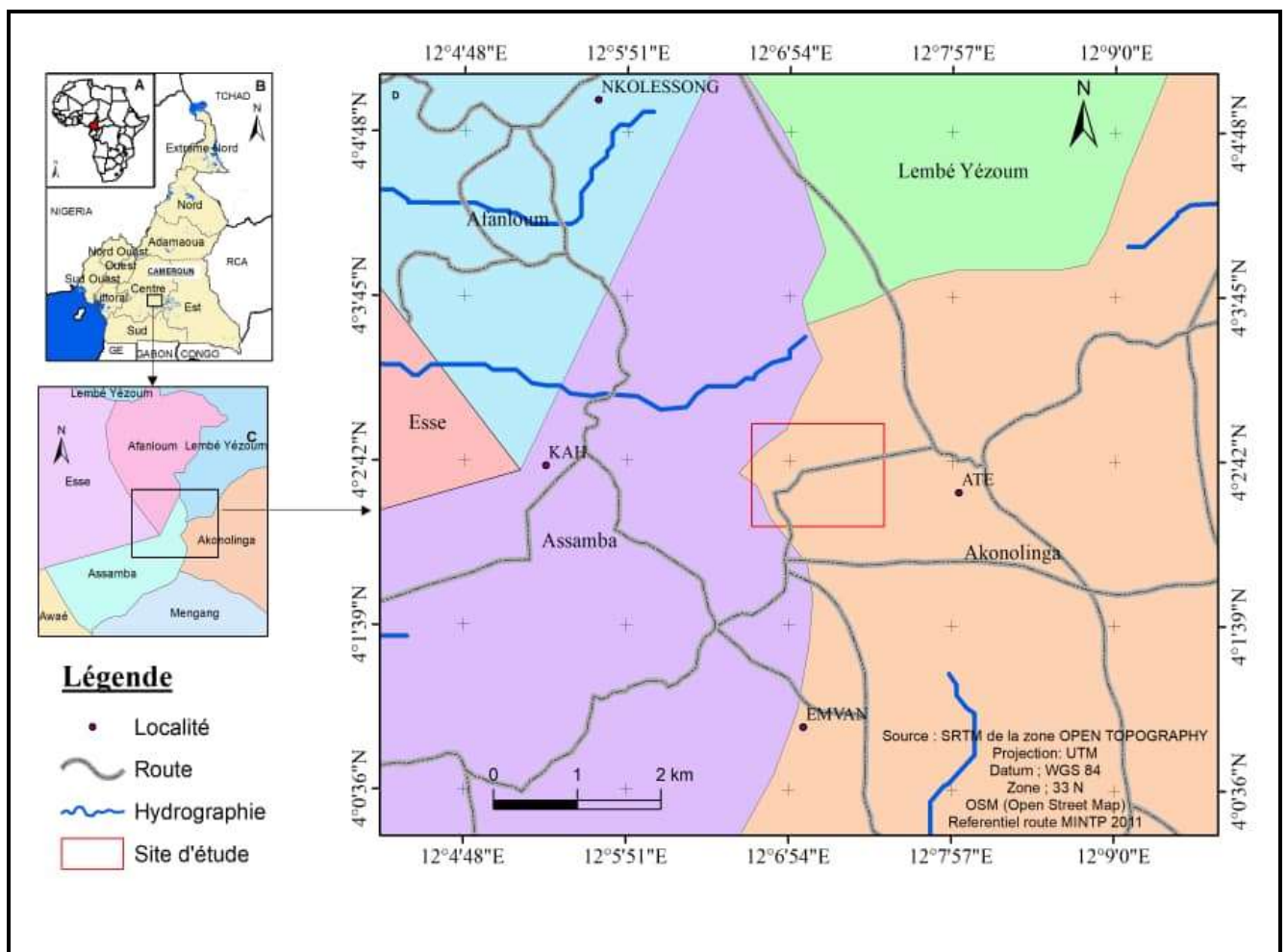


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude A) Carte d'Afrique, B) Carte du Cameroun, C) Département du Nyong et Mfoumou.

I.1.2 Climat

Le climat dans la commune est de type Subéquatorial caractérisé par quatre saisons dont. La pluviométrie, la moyenne des précipitations est de 1508,8 mm et la moyenne des températures de 24,5 °C. Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) établi à partir des relevées pluviométriques et thermiques de la station météorologique d'Akonolinga (figure 2), permet de repartir les quatre saisons comme suit :

- une grande saison sèche de décembre à février ;
- une petite saison de pluies de mars à juin ;
- une petite saison sèche de juillet à août ;
- une grande saison de pluies de septembre à novembre.

Tableau 1. Précipitations et températures moyennes interannuelles de la station d'Akonolinga pour la période allant de 1980 à 2015

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total.	Moy
P (mm)	13,3	38,5	110,3	169,6	196,5	144,1	103,8	120,9	230,3	255,0	110,8	15,7	1508,8	
T (°C)	24,9	25,6	25,4	25,1	24,7	24,1	23,4	23,5	23,9	23,9	24,3	24,6		24,5

P_m : Précipitations moyennes - T_m : Températures moyennes

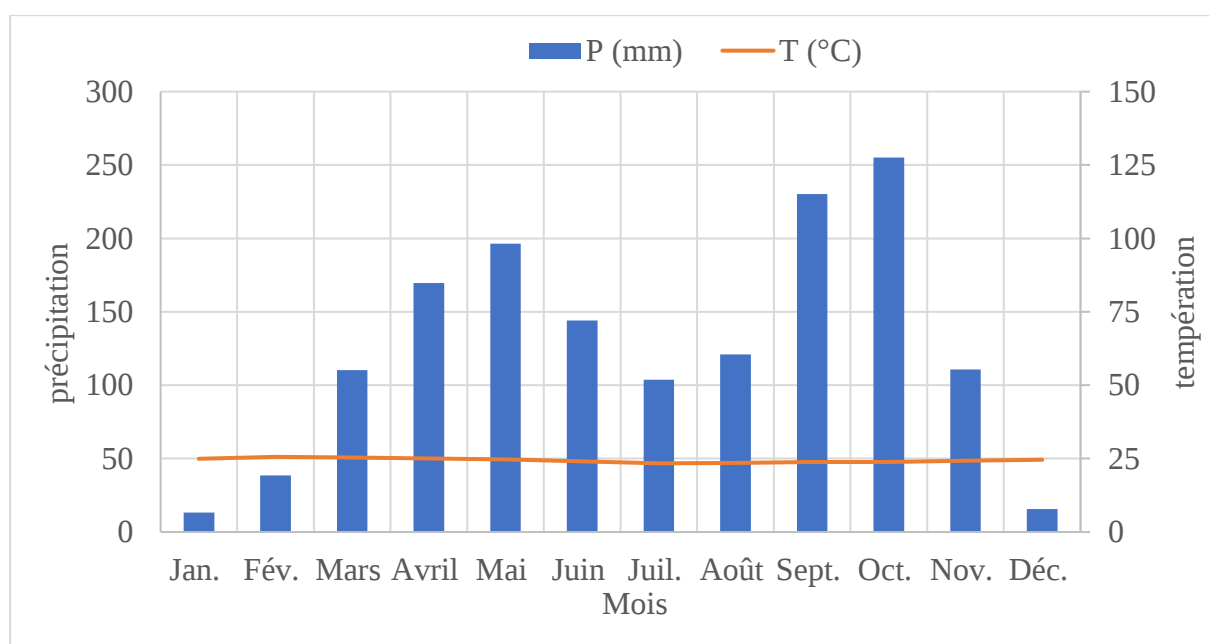


Figure 2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) appliqué aux données climatiques de la station d'Akonolinga pour la période allant de 1980 à 2015

I.1.3 Végétation

La végétation au sein de la zone d'étude appartient au domaine de la forêt dense équatoriale (**Anonyme, 2003**) on y trouve des forêts secondaires subdivisées en deux dont celles regorgeant des essences exploitables et celles dites « panthères » et plusieurs espèces d'arbre tel que : Bibigan, Sapeli, Ayous, et Iroko. On rencontre aussi des plantes médicinales, bambou de chine, des lianes etc. Aussi, on remarque l'action de l'homme qui a déjà profondément bouleversée la forêt primaire par ses multiples activités. Les arbres sont coupés pour la construction des maisons, l'usage domestique ou l'exploitation industrielle. Des secteurs très importants peuvent être défrichés pour des cultures arbustives pérennes ou des champs. Toutes ces activités concourent à la déforestation et exposent le sol à l'action des eaux de surface. L'objet d'exploitation à plus ou moins grandes échelles, des jachères jeunes et vieilles, sans oublier des investigations arbustives présent dans plusieurs parties de la commune.

I.1.4 Géomorphologie

Le relief est contrasté : il est constitué dans ses parties Ouest, Est et Nord par des collines et montagnes aux pentes plus ou moins abruptes (altitude comprise entre 678 et 821 m). Cette région appartient au plateau Sud camerounais qui se prolongent du côté Sud par une vaste vallée inondable.

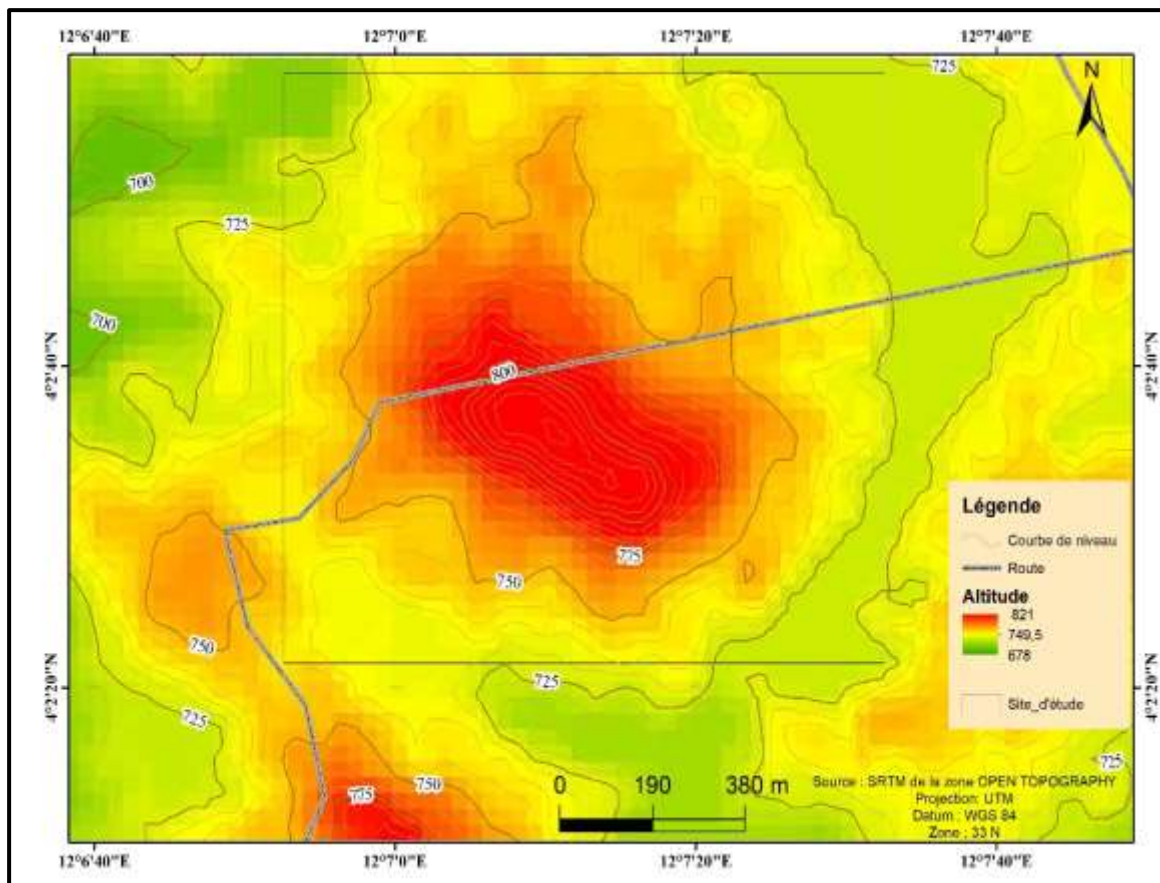


Figure 3 : Carte topographie du secteur d'étude (Dation WGS 1984)

I.1.5 Hydrographie

Le réseau hydrographique est constitué de plusieurs cours d'eau à régime variable avec un réseau hydrographique de type dendritique dû au fait que de la source jusqu'à l'océan atlantique, le fleuve Ndjombo suit un itinéraire sinueux et reçoit d'innombrables cours d'eaux. Ces derniers se ramifient en ruisselets ce qui confirme le caractère dendritique du réseau hydrographique du Nyong (**Samba, 2008**). Ce réseau appartient au bassin versant du Nyong.

Dans ce secteur d'Akonolinga, Les principaux cours d'eau sont le Nyong, le Mfoumou et l'Afamba et d'autres moins important comme le Nyelobo, Mvongo, so'o. dont les lits sont très favorables à la pisciculture et à la pêche aux poissons. La présence d'une vallée marécageuse très riche en alluvions

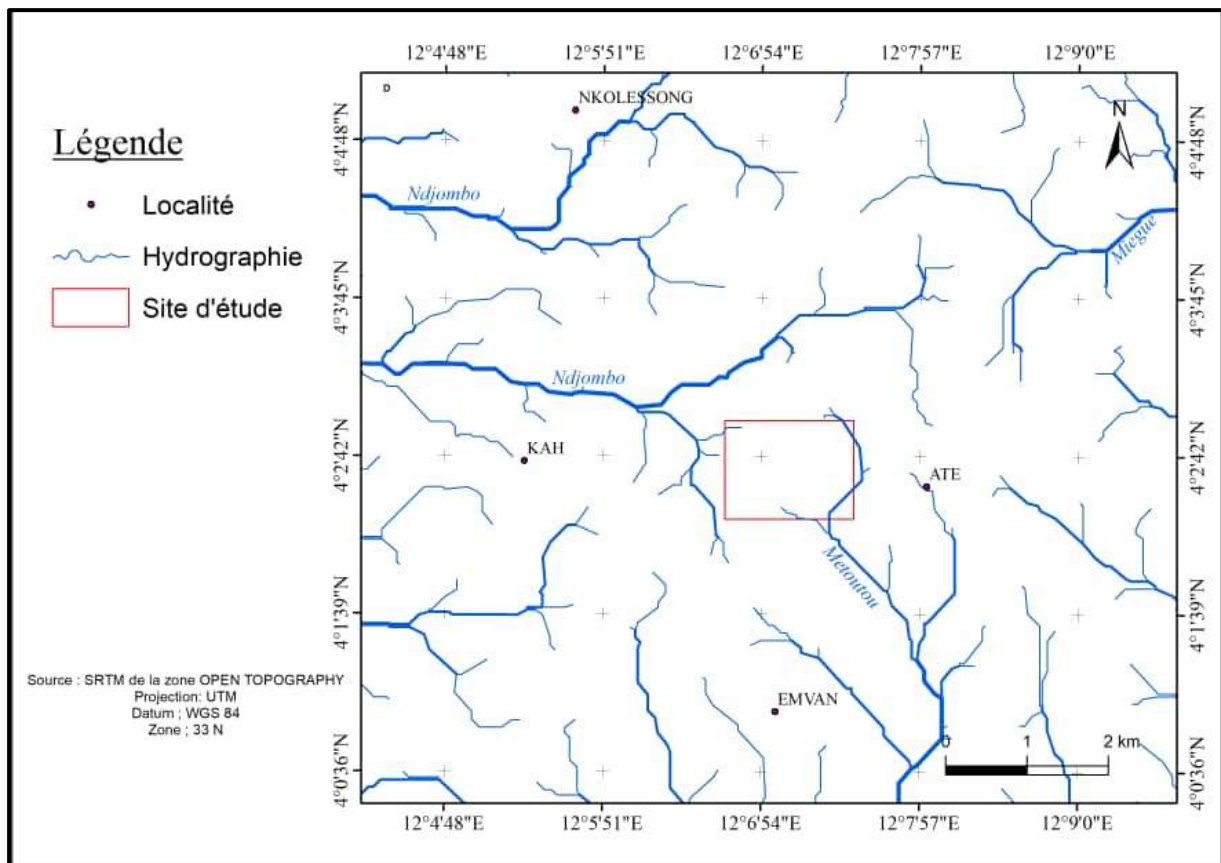


Figure 4 : Réseau hydrographique de la zone d'étude

I.2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

I.2.1 Formations de socle et tectonique

La zone d'étude est située dans un terrain ancien représentant le domaine panafricain qui comprend plusieurs séries métamorphiques. La série de Yaoundé, affectée par l'orogénèse panafricaine (600 et 500 Ma), est majoritairement formée de gneiss et de migmatites à grenat, provenant d'anciens sédiments granitisés et métamorphisés (Nzenti et al., 1987). Cette série est constituée de deux grands ensembles migmatitiques (Owona et al., 2003) :

- un ensemble Metasédimentaire ou paragneiss qui est essentiellement constitué de gneiss à grenat et à disthène, des gneiss à grenat et plagioclases, des marbres, des roches à scapolites ;
- un ensemble métaplutonique ou orthogneiss à grenat et pyroxène.

La tectonique de Yaoundé, La série de Yaoundé est caractérisée par une tectonique tangentielle de nappe (Owona et al., 2003). Cette nappe a été charriée sur le craton au cours de la première phase de déformation panafricaine. Ladite série est donc affectée par deux phases de déformations D1 et D2. La première phase D1 n'affectant que les paragneiss, est marquée

par un litage compositionnel S0/1, un métamorphisme de haut degré et un début de migmatisation partielle in situ. La deuxième phase D2 affecte les migmatites orthodérivées et les micaschistes. Elle reprend les marqueurs de la première phase dans les paragneiss car il en résulte des structures.

I.2.2 Types de sols

Dans la zone d'étude, les sols ont une texture qui varie d'une zone à l'autre. D'un côté, notamment sur les montagnes des Villages (Atong, Ebassi, Nkolbek, Meza, Obok), on rencontre des sols lessivés, Savane, ce sont les sols limoneux ou sablo-limoneux de nature hydro morphes surtout le long des cours d'eau, et les sols argilolatéritiques de couleur rouge se trouvent quant à elles, en Zones forestière (PCD, 2015). Les travaux de **Bekoa (1994)**, **Bilong et al. (1982)**, **Ekodeck et Kamgang Kabeyene (2002)**, et **Yongue Fouateu (1986)** montrent que deux types de sols sont beaucoup plus représentés dans la ville de Yaoundé et ses environs. Il s'agit des sols ferralitiques typiques et des sols hydromorphes. Les sols ferralitiques sont rencontrés aux sommets des collines et sur les versants de basses pentes. Ils présentent deux faciès à savoir : Un faciès de sols rouges, plus important situé sur les sommets des interfluves, avec des épaisseurs variables et importantes (2 à 25 m) selon la zone étudiée. Dans les bas-fonds marécageux on retrouve les sols hydromorphes (**Nguetnkam, 1994 ; Ngon Ngon**), Ils sont caractérisés par l'accumulation de la matière organique légèrement décomposée au-dessus de l'ensemble sableux et argileux gris (**Bekoa, 1994**), et par un excès d'eau qui provoque l'engorgement permanent ou temporaire d'une partie ou de tout le profil pédologique. De la surface vers la profondeur, la couleur passe du gris clair au brun jaune et sont exploités pour les cultures maraîchères de contre saison.

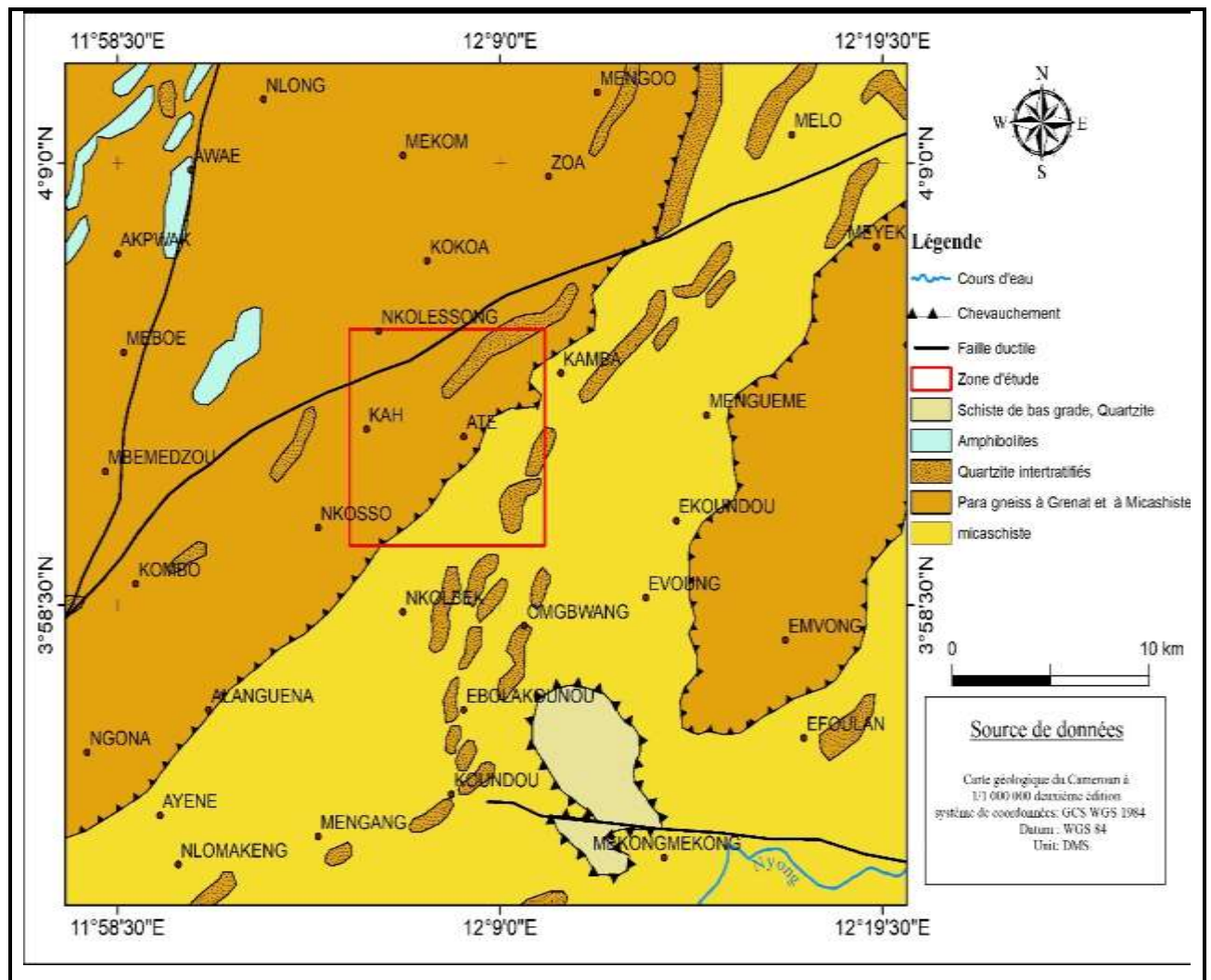


Figure 5 : Carte géologique du secteur d'étude (PRECASEM, 2021)

I.3 RAPPELS THEORIQUES DE LA METHODE DE PROSPECTION ELECTRIQUE

I.3.1 Principe de la méthode de prospection électrique

Le principe de la méthode consiste à injecter un courant électrique continu dans le sous-sol au moyen d'un dipôle dit de courant (AB) et de mesurer la différence de potentiel provoquée par ce courant à travers un autre dipôle (MN) dit de potentiel (Telford, 1990).

Connaissant la configuration des électrodes, la différence de potentiel et l'intensité du courant injecté, on calcule la résistivité du sous-sol en un point. La profondeur atteinte par les lignes de courant est proportionnelle à la longueur totale du dispositif. Dans le cadre de ce travail, l'appareillage utilisé calculait automatiquement la résistivité.

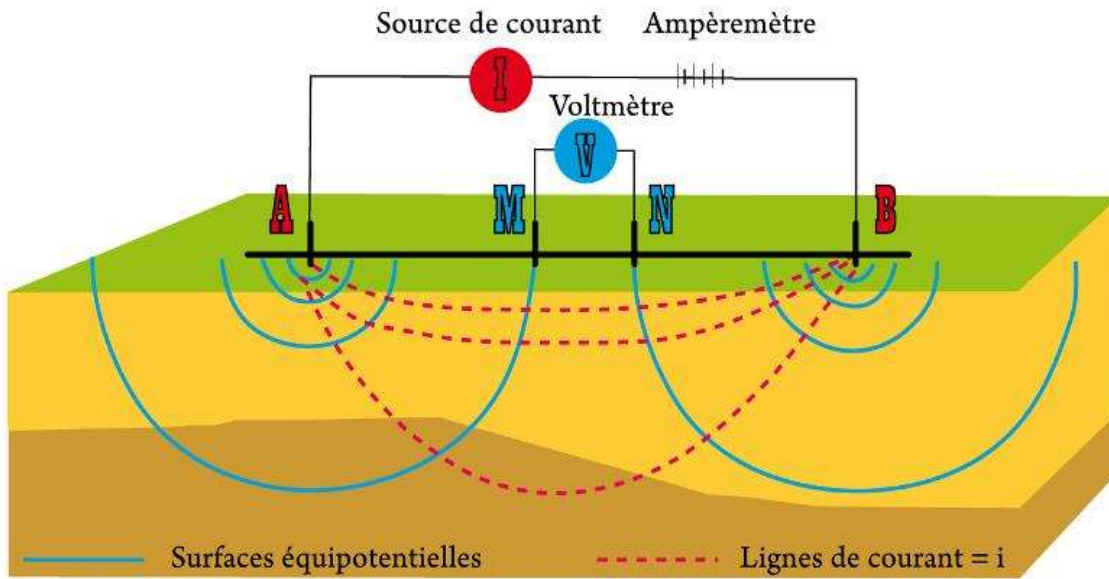


Figure 6 : Quadripôle de mesure

$$\rho_a = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN}\right)}$$

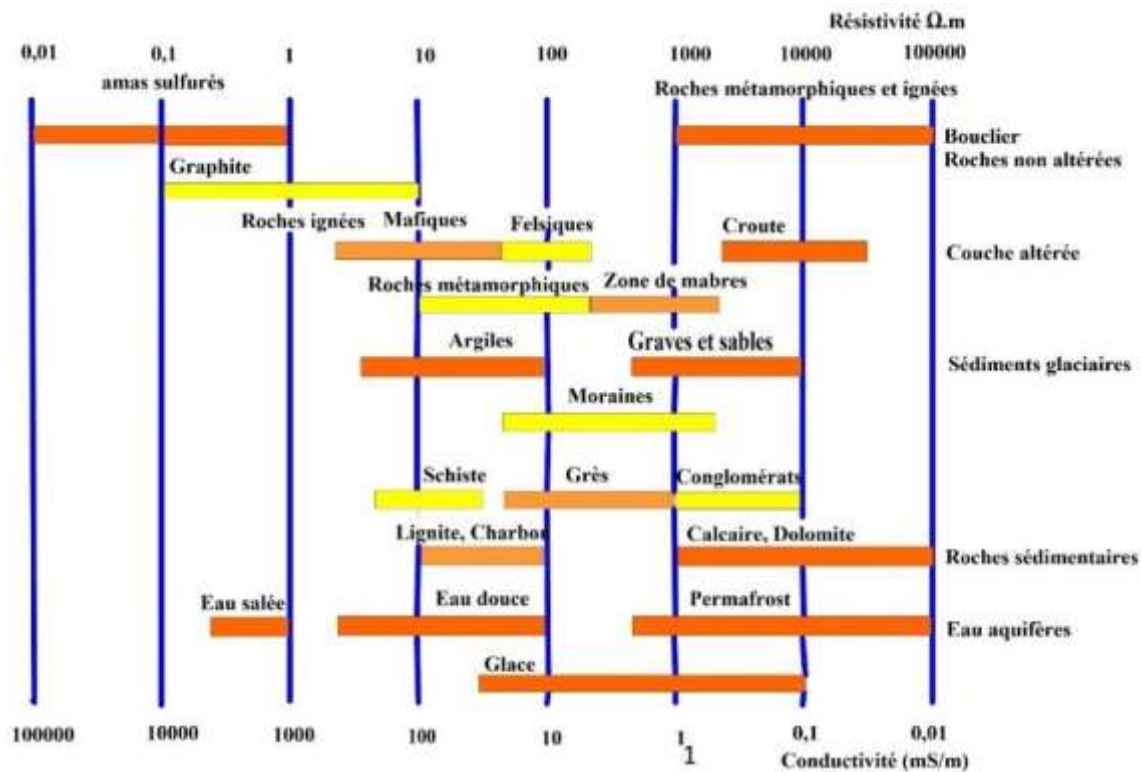
ρ_a : Résistivité apparente du matériau

K : Coefficient géométrique du dispositif

I.3.2 Résistivité électrique

La résistivité ρ est la capacité d'un milieu à s'opposer au passage du courant électrique (Chapellier, 2000 ; Chalikakis, 2006). Elle dépend de différents facteurs tels que la salinité, la teneur en eau, la porosité ou encore la température du milieu (Marescot, 2006 ; Calamite et al., 2012 ; Chrétien et al., 2014). Plusieurs abaques de résistivités ont été conçus et permettent de classer les matériaux de l'écorce terrestre à l'instar de celui de Palacky, 1991.

Tableau 2. Gamme de résistivités électriques des principaux sols terrestres (Palacky 1991).



I.3.3 Techniques de mesure

En prospection électrique les techniques de mesures utilisées englobent : les trainés électriques, les sondages et la tomographie électrique (Kunetz, 1966 ; Edwards, 1977).

Un trainé électrique se résume à évaluer la résistivité apparente à l'aide d'un dispositif approprié, et à étudier les variations latérales de cette résistivité apparente. Il met en évidence les contrastes de résistivité latérale (zone fracturée, contact lithologique), pour une épaisseur d'investigation constante.

Le sondage électrique permet d'obtenir la succession verticale des résistivités. Les résistivités mesurées sur le terrain (résistivités apparentes) sont interprétées à l'aide d'abaques ou de logiciels pour obtenir des couches électriques caractérisées par leurs épaisseurs et résistivités.

La méthode de la tomographie de résistivité électrique est fondée sur la mesure des résistivités électriques apparentes du sous-sol. La technique de tomographie électrique a pour but d'obtenir un modèle du sous-sol où la répartition de la résistivité varie verticalement et horizontalement le long du profil (Marescot, 2008). C'est une représentation en volume 2D et

3D de la répartition des résistivités du sous-sol (Dey et Morrison, 1979 ; Dahlin, 2001). Dans la pratique, les données de tomographie peuvent être collectées manuellement ou de façon automatique (Dahlin, 1993).

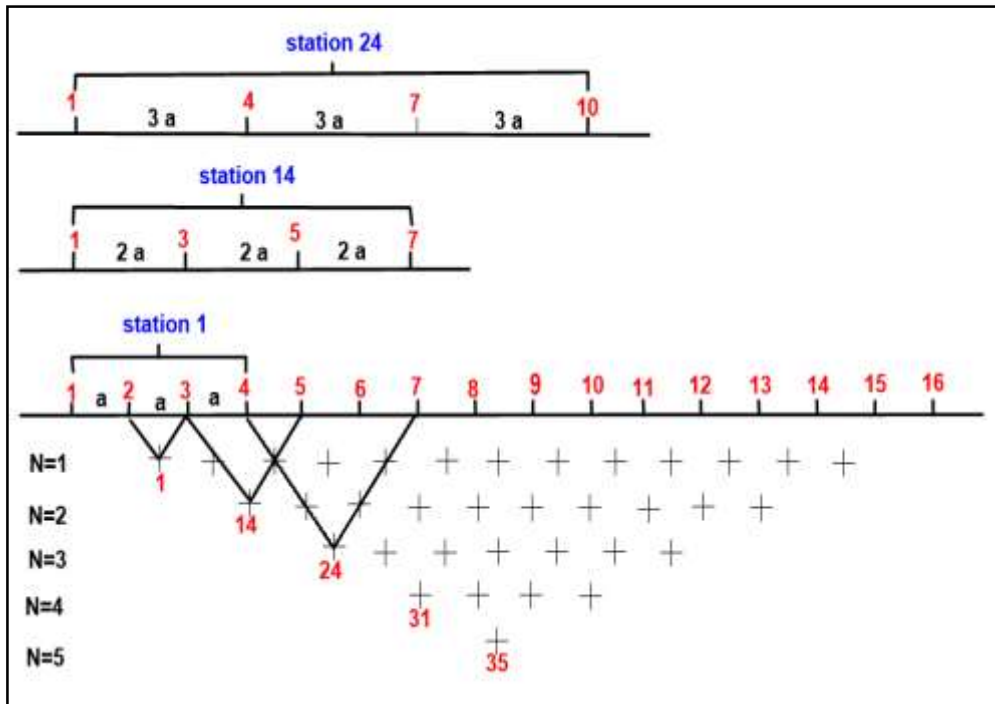


Figure 7 : Procédure de prise de mesure par tomographie électrique 2D (Loke, 2004)

I.3.4 Dispositifs de mesure

Suivant le problème auquel l'utilisateur est confronté, l'objet géologique étudié et des objectifs recherchés (résolution spatiale, sensibilité etc.), des dispositifs et des combinaisons différentes électrodes peuvent être choisis : Wenner, Schlumberger, Wenner-Schlumberger, Dipôle-dipôle, Pôle-dipôle et Pôle-pôle. Certaines configurations conviennent mieux à la direction latérale et d'autres le sont à la direction verticale. Chaque dispositif sera donc plus approprié qu'un autre selon les caractéristiques du sous-sol en présence (structures, distribution des anomalies Bouteldja, 2017).

La figure 8 et le tableau 3 illustrent les configurations des électrodes les plus utilisées pour la prospection électrique ; le coefficient géométrique, la profondeur d'investigation et la sensibilité sont également donnés.

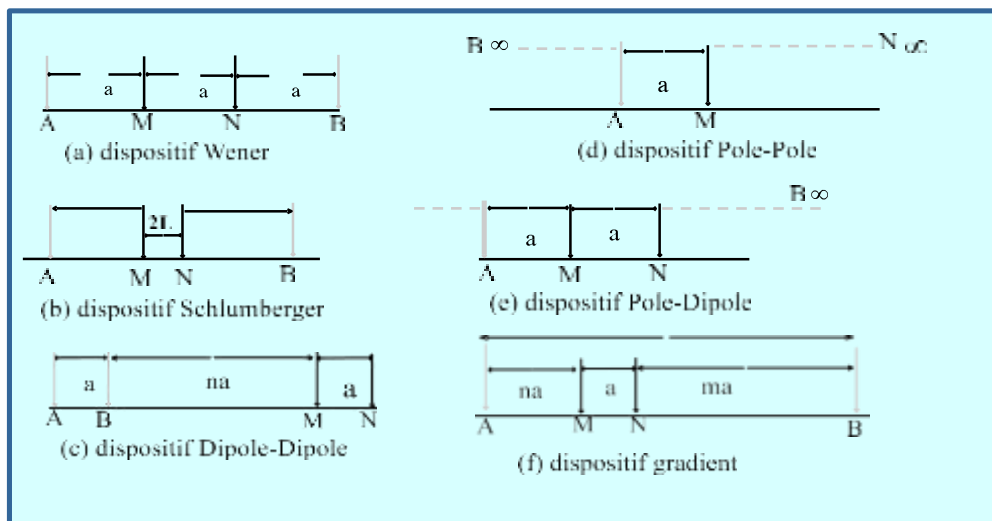


Figure 8 : Configuration des électrodes pour différents dispositifs (Aizebeokhai, 2010).

Tableau 3. Profondeur d'investigation et pouvoir de résolution (Roy et Apparao, 1971 et Barker., 1989).

Dispositif	Profondeur d'investigation		Pouvoir de résolution
	Roy (1971)	Barker (1989)	
Wenner 	0,11 L	0,17 L	1 / 2,25
Schlumberger 	0,125 L	0,19 L	1 / 2,45
Dipôle-dipôle 	0,195	0,25 L	1 / 3,45

Conclusion

Le site d'étude est situé dans la Région du Centre, il appartient au Département du Nyong et Mfoumou, soumise à un climat équatorial de type guinéen à quatre saisons très variées et inégalement réparties au cours de l'année avec une température moyenne annuelle de 24,5 °C. On retrouve dans la localité six grands groupes ethniques et une minorité d'immigrés originaire des pays voisins. La végétation caractéristique est par une forêt secondaire et le réseau hydrographique est de type dendritique avec pour cours d'eau principal le Nyong, les gneiss migmatiques de la région ont subi une altération qui a abouti à la formation des sols ferrallitiques rouges, hydromorphes.

CHAPITRE II : APPROCHE METHODOLOGIQUE

Introduction

Une étude bibliographique a été au préalable entreprise de manière générale, Ce chapitre permettra dans un premier temps de présenter les différents matériels géophysiques et géotechniques, puis la méthodologie qui servira aux interprétations, analyses et discussions dans cette étude.

II.1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

La recherche bibliographique a précédé les travaux de terrain et de laboratoire. Elle s'est faite par l'examen des thèses, des publications, des mémoires. Et Cette étape a été effectuée dans les bibliothèques du Laboratoire des Géosciences des Formations Superficielles et Applications (LGFSA) du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I. Les résultats ont donné toutes les informations nécessaires pour le bon déroulement des travaux sur le terrain et en laboratoires.

II.2. PROSPECTION GEOLOGIQUE

Deux missions de reconnaissance de terrain ont été nécessaires pour mener à bien cette étude. La première a consisté à faire une reconnaissance géologique (collecte des échantillons). Elle correspond au repérage et à la géolocalisation des sites choisis. En suite repérer le site sur une carte à l'aide des coordonnées obtenues. La deuxième mission à porter sur la description des affleurements.

II.2.1 Matériels

Le matériel de terrain utilisé pour le prélèvement et la prospection géologique comprend : un marteau du géologue, une loupe, d'une machette des sacs (2) d'échantillonnage, un marqueur pour étiqueter les échantillons, une boussole, et un appareil GPS.



Figure 9 : Matériels de prospection géologique

II.2.2 Méthode de prospection

Des observations de terrain ont permis d'estimer l'extension de l'affleurement d'une part et de déterminer le type pétrographique à partir des échantillons, et faire une cartographie de l'affleurement. Décrire et, Identifier tous les minéraux. Cet affleurement était composé de quelques faciès de couleur générale rose, de composition minéralogique variée, et de structure particulière, la structure et les paramètres utilisés pour différencier la texture au toucher.

Prélèvement et codification des échantillons

Les échantillons de roche ont été prélevés dans la carrière d'ATHE de (30kg) environ pour des études pétrographique, macroscopique et microscopique, et géotechnique, la confection des lames minces au laboratoire de l'IRGM de Yaoundé. Les essais géotechniques ont été réalisés au Bureau de Recherche d'Etude et de Contrôles géotechniques (BRECG).

II.3. PROSPECTION GEOELECTRIQUE

La mesure de la résistivité électrique a été effectuée par des sondages électriques verticaux (SEV).

II.3.1 Equipement de mesure geoelectrique

- ❖ Géorésistivimètre de marque WJD-3 de BTKS et ses accessoires ;
- ❖ Câble électrique ;

- ❖ 04 massettes de 02 kg ;
- ❖ 01 multiple décamètre ;
- ❖ 01 batterie de 12V et 75Ah ;
- ❖ 01 récepteur GPS et 01 boussole ;
- ❖ 04 électrodes ;



Figure 10 : Equipement de mesure géoélectrique

II.3.2 principes de la méthode électrique

L'essai géophysique réalisé dans le cas de notre étude est le sondage électrique. La méthode électrique est une méthode d'exploration du sous-sol qui repose sur la mesure de la résistivité électrique ρ (en Ohm) avec quatre électrodes. Celle-ci se caractérise par la capacité du courant à circuler dans le milieu naturel : sa connaissance permet d'appréhender la structure et la lithologie du sous-sol. L'injection d'un courant d'intensité connue et la mesure de la distribution du potentiel électrique, nous donnent une estimation de la résistivité apparente (ρ_a) du sous-sol. (Bisso et al., 2019)

Acquisition et protocole de mesure

Les mesures de résistivités électriques ont été prises sur le massif suivant un maillage (Fig.12). Au total, vingt-trois (23) sondages suivant le dispositif Schlumberger ont été effectués. Les caractéristiques de ce dispositif sont les suivants : $AB = 52.3$ m, $MN/2 = 0.5$ m et 5 m. Le facteur qualité sur chaque mesure était de l'ordre de 0 à 5%. Aucune valeur supérieure à ce seuil n'a été enregistrée, ce qui laisse entrevoir une bonne qualité des données géophysiques recueillies sur ce site.

La mise en installation : Il s'agit ici de dégager suffisamment d'espace pour une circulation facile le long du profil, une installation des électrodes plus optimales et le rangement des câbles. L'installation des câbles et des électrodes le long d'un profil, se fait après observation de la roche La mise en route et la vérification du contact entre électrode, roche et câble Il faut ensuite connecter tous les câbles à l'entrée du résistivimètre, lui-même relié à l'ordinateur (centrale d'acquisition) qui enregistre les résistivités apparentes mesurées. Cet appareil, grâce à une batterie, injecte le courant entre les électrodes A et B et mesure le potentiel électrique entre les électrodes M et N

II.2.4.5 Traitement et inversion

Le traitement des données de sondage a été réalisé avec le logiciel IPI2WIN. Ce traitement a consisté en la représentation et en l'interprétation des courbes de sondage électrique. Les valeurs de résistivités apparentes sont reportées sur une échelle bi-logarithmique avec en abscisse, les distances $AB/2$. L'interprétation avec ce logiciel utilise des algorithmes d'inversion. Elle consiste à comparer les courbes précalculées pour divers modèles (épaisseur et résistivité variables) avec des résultats de terrain (courbes de sondage électrique). Le but de l'opération est de créer un modèle du sous-sol constitué d'une succession de couches horizontales ayant chacune une certaine résistivité et une certaine épaisseur puis, de calculer la réponse de ce modèle (**Chapellier, 2000 ; 2001 ; Marescot, 2009**).

Il est important de donner l'épaisseur et la résistivité de chaque formation et de dénombrer celles-ci de haut en bas. Chacune de ces formations sera nommée couche géo-électrique. La spécification d'épaisseur et résistivité de chaque formation décrit, reçoit le nom de coupe géo-électrique.

Les coupes géo-électriques peuvent se classer selon le nombre de couches qui les composent. Pour un usage plus commode, on utilisera le système d'annotation d'Orellana et Mooney (1966).

Les lettres latines H, K, Q et A représentent les quatre (04) types possibles de courbes géo-électriques :

- type H : $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$;
- type K : $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$;
- type Q : $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$;
- type A : $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$.

Les coupes de quatre couches sont classées en huit (08) groupes, qui se désignent comme des combinaisons. Pour cela, on considère les trois (03) premières couches et on leur assigne la lettre correspondante ci-dessus ; ensuite on réalise la même chose avec les trois dernières. Ainsi, le type AA correspond à la combinaison de résistivité $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$ et HK $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$ (**Fig23.**), seules sont possibles les types suivants : HK, HA, KH, KQ, QQ, QH, AK, AA. Les types KK, HH, HQ etc. manquent de sens, elles impliquent donc des conditions contradictoires.

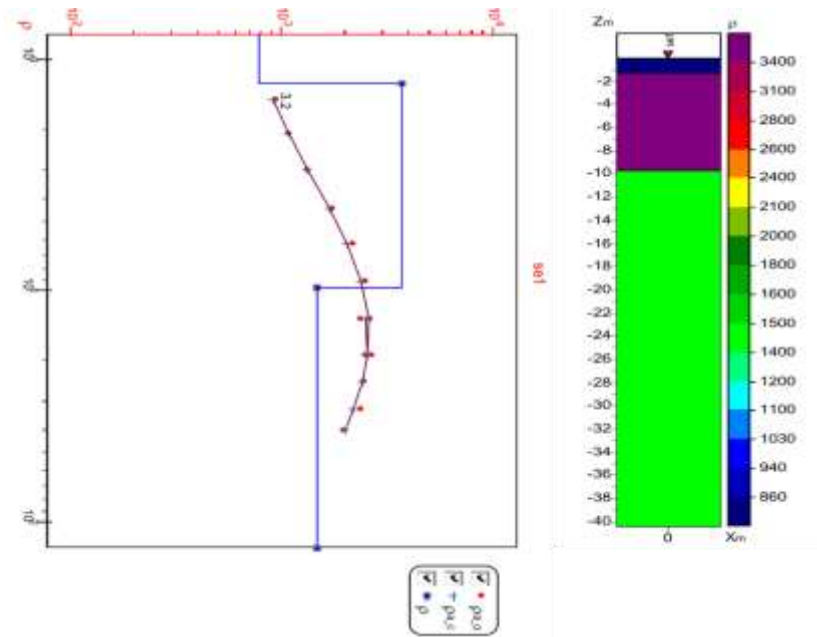


Figure 11 : Exemple de courbe automatique de tracée par le logiciel IPI2WIN

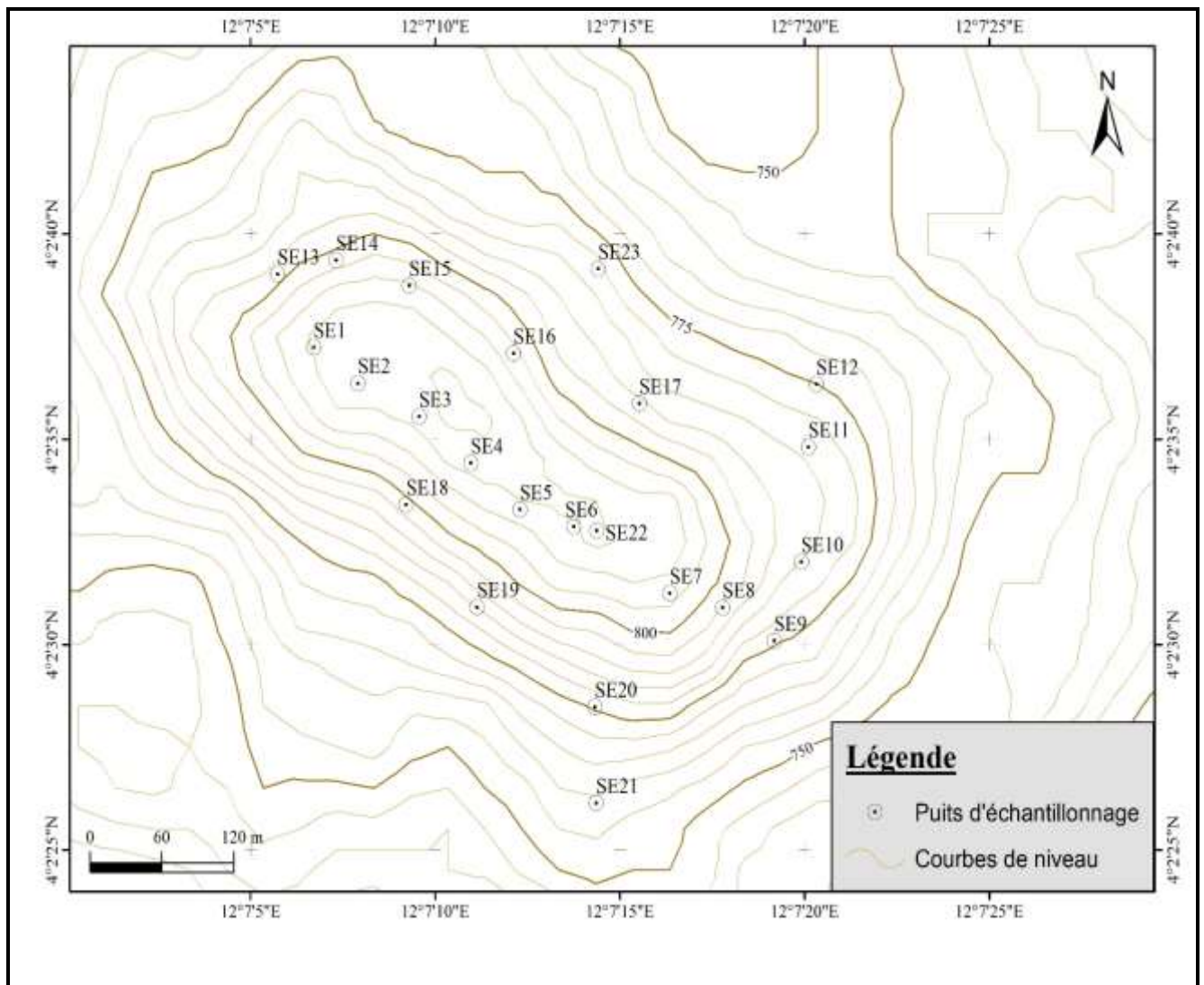


Figure 12 : Carte des points d'échantillonnage sur le massif gneissique d'Ath

II.4 ESSAIS GÉOTECHNIQUES EN LABORATOIRE

A ce niveau, il s'agit des essais mécaniques complets réalisés en laboratoire des échantillons de roches. Notamment : la Résistance à la fragmentation par choc, Résistance à l'usure permettant de tester la résistance et la sensibilité du matériau rocheux. Les essais géotechniques ont été effectués sur deux échantillons afin de déterminer leurs caractéristiques mécaniques. Les classes granulaires choisies sont 6,3/10 et 10/14.

II.3.2 Los Angeles

➤ Principe

Ce test ou essai a été réalisé suivant la norme Européenne EN 1097-2. Il vise à déterminer la dureté du matériau et ainsi mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats grâce à une charge de boulets. L'essai a consisté à effectuer 500 tours à la machine (**Fig.13**) à une vitesse comprise entre 30 et 35 trs/min pour les classes définies. Après l'essai, les granulats ont été enlevés et collectés dans le réservoir placé sous l'appareil pour éviter les pertes des granulats, l'ouverture a été faite au-dessus de ce réservoir (Fig.9). La matière contenue dans la cuve a été broyée sur le tamis de 1,6 mm puis l'effluent de mm a été lavé dans une autre cuve perforée. Après analyse, le résidu a été séché dans une étuve et les masses de la pesée M1 ont été déterminées, et le coefficient de Los Angeles a été calculé :

$$LA = 100 \frac{M - M}{M} \times 100$$

M étant la masse totale

La charge est fixée conformément au tableau II.4 ci-dessous

➤ **Matériel :**

- La machine Los Angeles
- 1 cylindre creux en acier de 12 mm ± 0,5 mm d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités, ayant un diamètre intérieur de 711 mm ± 1 mm et une longueur intérieure de 508 mm ± 1 mm
- 1 ouverture de 150 mm de largeur
- 1 Moteur d'au moins 0,75 kW
- 1 bac destiné à recueillir les matériaux après essai
- 1 jeu de tamis de 1,6 – 4 – 6,3 – 10 – 14 mm Leur diamètre ne devra pas être inférieur à 250 mm
- 1 balance précise au gramme, de portée au moins égale à 10 kg
- 1 étuve à 105 °c
- Des bacs et des truelles



Figure 13 : Appareils de Los Angeles

➤ **Mode opératoire :**

- Replacer le couvercle et serrer les boulons de fixation.
- Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 et 35 tr/mn pour toutes les classes à l'exception de la classe 25–50 mm où le nombre de rotations est de 1000.
- Enlever le granulat après l'essai.
- Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de granulat.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm ; le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.
- Laver le refus à 1,6 mm dans un bac, bien remuer à l'aide d'une truelle. Puis verser dans le bac perforé, égoutter et sécher à l'étuve jusqu'à poids constant. - Peser ce refus une fois séché, soit P' le résultat de la pesée.

Tableau 4. Nombre de rotation et des boulets correspondant à chaque classe granulaire (**Norme EN 1097-2**).

Classe granulaire	Nombre De boulets	Nombres de rotations	Durée de rotation	Masse (M) d'essai(g)
6.3/10	9	5000	15min	5000
10/14	11	5000	15min	5000

II.3.3 Micro Deval

➤ Principe

IL Consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produits dans la machine Deval par les frottements mutuels en présence d'eau et d'une charge abrasive dans un cylindre en rotation réciproque avec les chocs modérés des granulats.

L'essai Micro Deval, est une caractéristique très importante pour les matériaux entrant dans la composition des assises de chaussée soumises à des déformations périodiques dues au passage des véhicules. Le but est de déterminer la résistance à l'usure par frottement réciproque des éléments d'un granulat.

➤ Matériel :

- La machine micro-Deval
- Un moteur (environ 1 kW)
- Une balance précise au gramme, de portée au moins égale à 10 kg
- Les tamis (Tamis de 1.6 mm et les tamis pour déterminer les classes granulaires)
- La charge abrasive est constituée par des billes sphériques de $10 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ de diamètre en acier inox



Figure 14 : Appareils de micro-Deval

➤ Mode opératoire :

- L'essai se déroule avec les étapes suivantes :
- Essai sur les gravillons compris entre 4 et 14 mm. Mise en place de l'échantillon dans la machine ainsi que la charge de boulets relatifs (Tableau 4) à la classe granulaire choisie (voir tableau 4) ;

- Pour l'essai humide (en présence d'eau), ajouter 2.5 l d'eau ;
- Remplacer le couvercle et serrer les boulons de fixation. S'assurer que les cylindres sont étanches pendant leur rotation ;
- Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine 12 000 rotations à une vitesse régulière de (100 ± 5) tr/min pour toutes les classes, soit deux heures ;
- Enlever le granulat après l'essai. Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de granulat ;
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6mm ; le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération ;
- Laver le refus à 1,6 mm dans un bac, bien remuer à l'aide d'une truelle. Puis verser dans le bac perforé, égoutter et sécher à l'étuve jusqu'à poids constant ;
- Peser ce refus une fois séché, soit m' le résultat de la pesée.

Tableau 5. Classes granulaires, poids d'échantillons et boulets équivalent

Classes granulaires (mm)	Poids échantillon (g)	Poids de la charge (g)
4 – 6.3	500 $\mp$ 2	2000 $\mp$ 5
6.3 – 10	500 $\mp$ 2	4000 $\mp$ 5
10 - 14	500 $\mp$ 2	5000 $\mp$ 5

➤ **Calcul du coefficient micro-Deval**

La résistance à l'usure du granulat est appelée, par définition, coefficient micro-Derval "MD" qui s'exprime par le rapport de la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai "m", à la masse du matériau soumis à l'essai "M" multiplié par 100.

$$MD = \frac{m}{M} \times 100$$

Avec M la masse du matériau testé et m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm

La valeur de MDE est d'autant plus élevée que le matériau est sensible à l'usure. La charge est fixée conformément au tableau ci-dessous :

Tableau 6. Caractéristique de l’essai MDE pour chaque classe granulaire (Norme EN 1097-1).

Classe granulaire	Charge Abrasive	Nombres de rotations	Durée de rotation	Volume d'eau(l)	Masse (M) d'essai(g)
6.3/10	4000	12 000	2h	2,5	500
10/14	5000	12 000	2h	2,5	500

II.3.4. Pétrographie de la lame mince d’une Roche

La méthode d’étude pétrographique en laboratoire a consisté à observer puis décrire les lames minces de roche prélevée. Ces lames minces ont été confectionnées au laboratoire de l’IRGM de Yaoundé (Cameroun) et observées à l’aide du microscope polarisant, au sein du laboratoire de Géosciences et Applications de l’Université de Yaoundé I (Cameroun). La procédure de confection et la méthode d’observation se présente comme suit :

➤ Confection de la lame mince

Sa confection implique les étapes suivantes : Le sciage, l’échantillon est scié à l’aide d’une tronçonneuse munie d’une scie à bout diamantée afin d’obtenir des sucres parallélépipédiques de roche, le polissage, ici le but est d’obtenir pour le sucre, une surface lisse et régulière. Il se fait à l’aide d’une polisseuse manuelle et automatique. La surface de la lame porte objet est également polie à l’aide d’une polisseuse automatique à pression ; Le collage et le dégrossissement : la surface polie est collée sur une lame porte objet à l’aide du baume de canada. L’ensemble est fixé sous une presse pendant 8 h environ afin d’éviter l’apparition de bulles d’air due au contact de deux objets. Par la suite, le dégrossissement se fait par polissage progressif afin d’obtenir une lame mince d’environ 30 µm d’épaisseur. La lame mince ainsi obtenue est utilisée pour l’étude pétrographique au microscope.

➤ Observation microscopique

Elle utilise la microscopie optique couplée à la caméra permettant d’accroître les degrés d’observation afin de mieux apprécier la nature et les formes des minéraux sur la lame mince confectionnée.



Figure 15 : Les étapes de l'essai mécaniques des échantillons au laboratoire ; A- Concassage ; B-Tamisage ; C-pesage ; D-colone des tamis de classe 6,3/10 et 10/14 ; E-introduction de l'échantillon de la machine los Angeles.

Conclusion

Il était question dans cette partie d'aborder les différentes méthodes, matériels et traitement des données afin de comprendre les principes et mode opératoires qui régissent les méthodes géotechniques et géophysiques. Et à l'aide des appareils nous avons déterminé les paramètres géophysique et géotechniques, prélevé des échantillons réalisé d'essais et sondages électrique, L'application des différentes méthodes présentées, ainsi que les traitements appliqués aux données ont permis d'obtenir les résultats qui feront l'objet du chapitre qui suit.

CHAPITRE III : PRESENTATIONS DES RESULTATS

Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus sur le terrain et en laboratoire

III.1 ETUDE PETROGRAPHIQUE

L'observation panoramique du site d'Athe révèle deux affleurements (N 04°02'31,3" ; E 012°07'16,4" et N 04°02'39,0" ; E 012°07'05,7") sous un aspect gris sombre en forme de demi-orange (**Fig.16**) sur une superficie d'environ 292500m². Cet affleurement montre un aspect d'ensemble compositionnel caractéristique des gneiss, marqué par une alternance de lits clairs quartzo-feldspathiques et de lits sombres ferromagnésiens.

L'observation macroscopique de l'échantillon 1 montre la présence de quartz, feldspath, micas noirs et des grains de grenat (**Fig. 17**). L'échantillon 2 est caractérisé par une foliation orientée N63E61NW, et constitué quant à lui des minéraux tels que le quartz, feldspath et des grains de grenat.



Figure 16 : Vue panoramique de l'affleurement

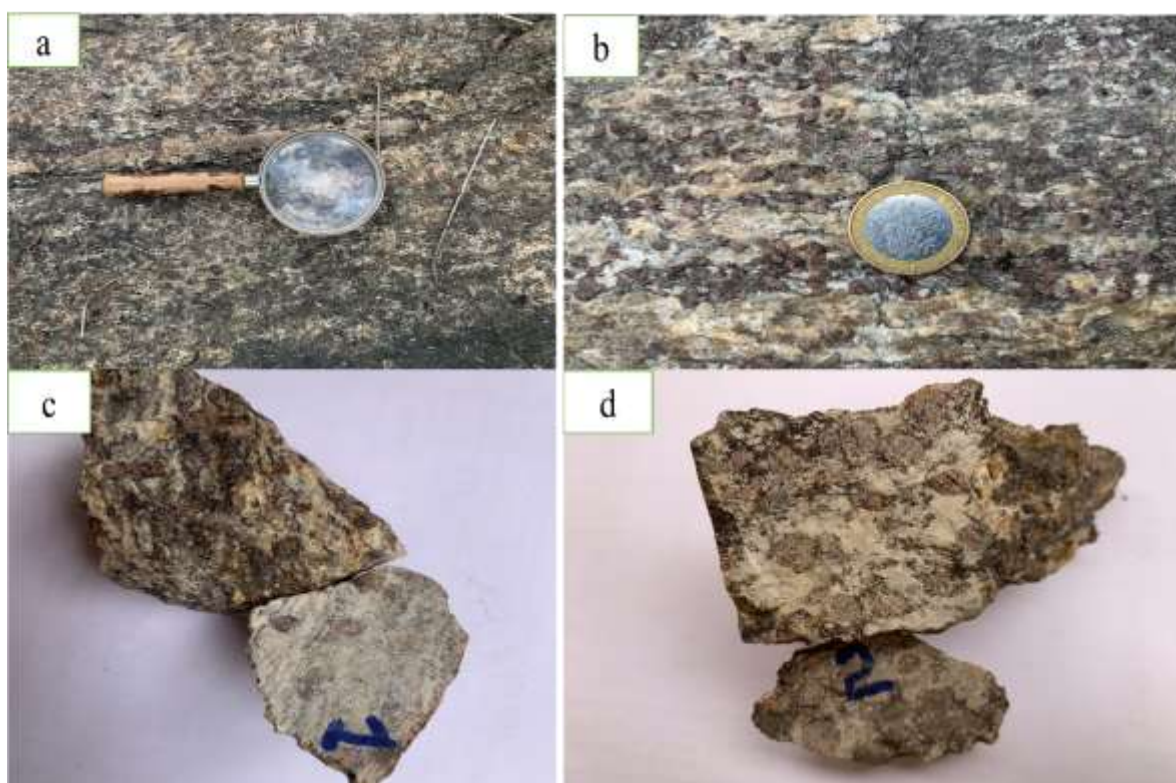


Figure 17 : Photographie des échantillons de roche (a et c) échantillon1 et (b et d) échantillon 2

L'observation microscopique des lames minces (**Fig.18**) des deux échantillons de roches montre une texture grano-lipidoblastique hétéro-granulaire plus ou moins orientée.

L'échantillon 1 est un gneiss à grenat et à biotite (**Fig.18**) : Le quartz est un peu abondant dans la roche et se présente sous forme de cristaux automorphes à sub-automorphes. Certains cristaux ont des formes ovoïdes à sub-anguleux tandis que d'autres se présentent sous forme de ruban. Le plus souvent étiré soulignant la foliation, la taille varie de 0,1 à 0,4mm. Les feldspaths alcalins se présentent sous- forme de cristaux sub-automorphe, et renferment les inclusions de quartz et de biotite de dimension comprise entre 0,3 et 0,5mm de grand axe. La biotite se présente sous-forme de lamelle de taille comprise entre 0,2mm à 0.5mm, certaines lamelles avec les inclusions de quartz et d'autres se déstabilisent en minéraux, opaques soulignant parfois la foliation. Le Plagioclase se présente sous forme de cristaux automorphes à sub-automorphes de dimension qui varie entre 0,3 et 1 mm Ces cristaux sont parfois étirés. Le grenat qui est représenté sous- forme des porphyroblastes poecelitique localement dans son ensemble, la taille comprise entre 0,6mm et 3mm de grand axe, ces cristaux renferment d'inclusion de quartz, rutile, biotite et de minéraux opaques. Et Les minéraux opaques qui proviennent de la déstabilisation de la biotite.

L'échantillon 2 (**Fig.18**) est un gneiss à grenat et à disthène : Le quartz se présente également sous forme de cristaux automorphe et sub-automorphe avec une dimension de 0,1 à 0,3mm. Le feldspath alcalin (représenté par l'orthose) se présente sous forme de cristaux sub-automorphes, et renferme les inclusions de quartz et de biotite de dimension comprise entre 0,3 et 0,5mm de grand axe. La biotite se présente sous forme de paillets automorphes à sub-automorphes. De dimension comprise entre 0,2mm et 0,5mm Ces paillets sont généralement allongés et sont parfois déchiquetés et contiennent des inclusions de quartz, Ces paillets sont entrecroisés. Le grenat se présente sous-forme des porphyroblastes poecelitiques de dimension comprise entre 0.3 et 3mm de grand axe. Ces porphyroblastes renferment des inclusions de biotite, quartz, et de minéraux opaques. Le disthène se présente parfois sous forme de baguettes allongées de couleur marron avec une taille comprise entre 0,7 et 0,9 mm. Les minéraux opaques se présentent sous-forme sub-automorphe.

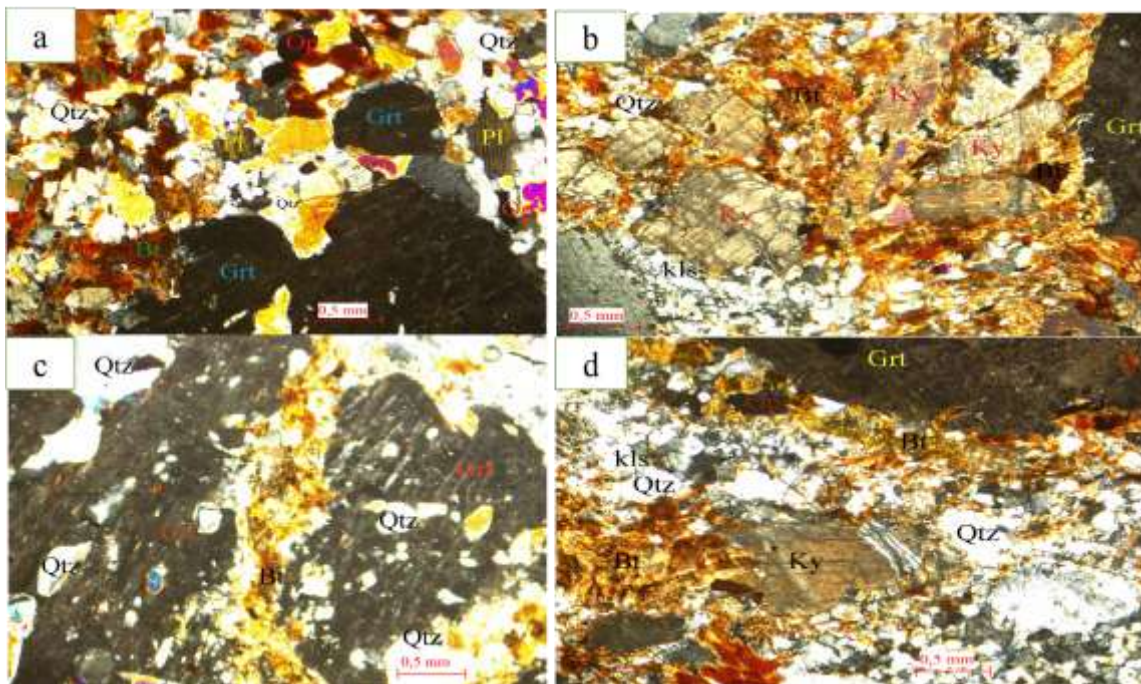


Figure 18 : Photographie et microphotographies des échantillons de roches : (a et c) Echantillons de roche gneiss à grenat et biotite (Ech1), (b et d) Echantillon de roche de gneiss à grenat et à disthène (Ech2). Quartz (Qtz), Feldspath (Kfs), Opaque (Op), Plagioclase (Pl), Grenat (Grt), biotite (Bt), Rutile (Rt), disthène (Ky).

III.2 ETUDE GEOELECTRIQUE

III.2.1 Type de courbes de sondages électriques

Les courbes de sondages électriques ont été classées selon le nombre de terrains et leur allure. Sur les vingt-trois (23) sondages effectués, on rencontre trois types de courbes géoélectriques (**Fig. 19**) :

- ✓ Les courbes à trois terrains géoélectriques (60%)
- ✓ Les courbes à quatre terrains géoélectriques (34%)
- ✓ Les courbes à deux terrains géoélectriques (6 %).

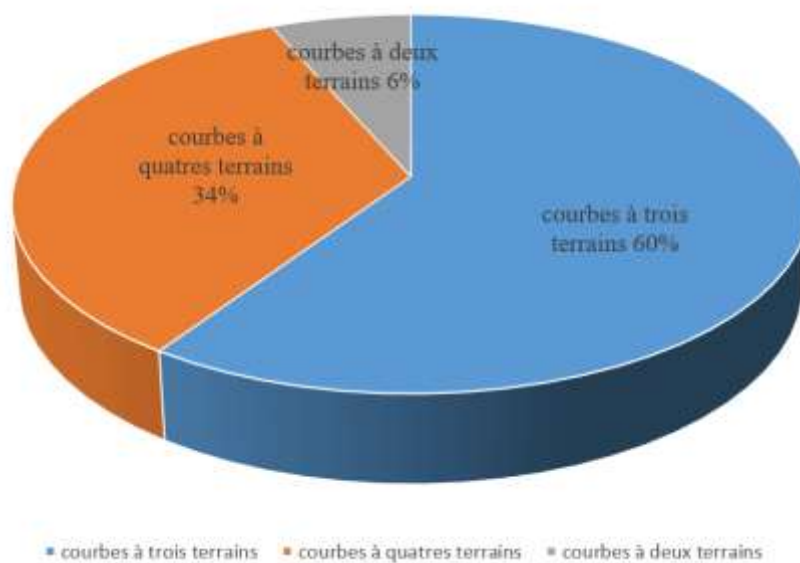


Figure 19 : Diagrammes circulaires de la distribution des types de courbes de sondages électriques dans la zone d'étude

III.2.1.1 Les courbes de sondage à trois terrains

Les sondages électriques à trois terrains sont représentés par les courbes de types A et K (**Fig.20**).

Les courbes de type A sont représentées par les sondages :SE5, SE11et SE19. Elles sont caractérisées par la structure :

- Terrains conducteurs avec des résistivités qui varient entre 593,25 et 1034,72 Ω .m.
- Terrains sémi-résistifs de résistivités allant de 1393,91 à 1737,53 Ω .m.
- Terrains résistifs de résistivités comprises entre 1618,03 et 4256,56 Ω .m.

Les courbes de type K sont représentées par les sondages SE1, SE2, SE3, SE4, SE9, SE10, SE12, SE13, SE15, SE20 et SE21. Elles sont caractérisées par la structure :

- Terrains conducteurs avec des résistivités qui varient entre 285,92 et 2915,31 $\Omega.m$.
- Terrains résistifs de résistivités comprises entre 1153,56 et 8246,04 $\Omega.m$.
- Terrains semi-conducteurs de résistivités allant de 73,41 $\Omega.m$ à 3349,1 $\Omega.m$.

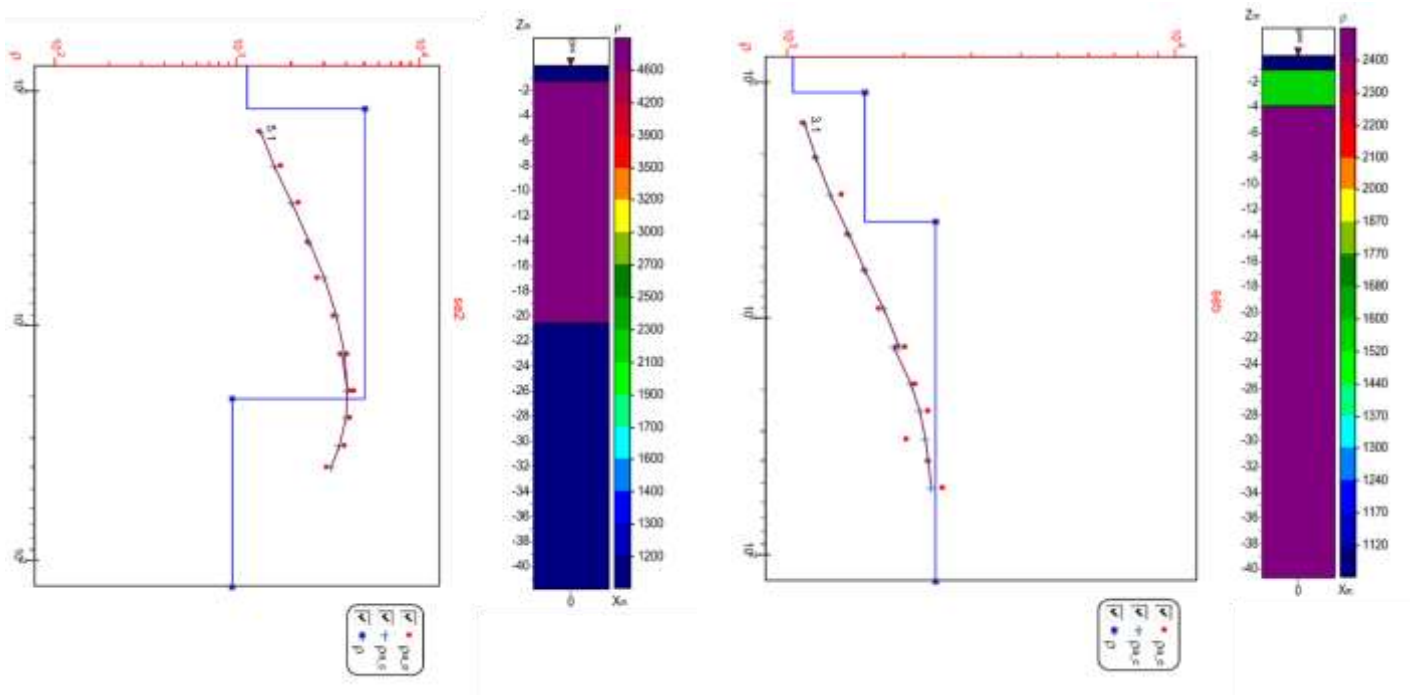


Figure 20 : Sondages de type K (SE2) et A (SE5)

III.2.1.2 Courbes de sondages à quatre terrains

Les sondages électriques à quatre terrains sont représentés par les courbes de types KH, KQ, AK et HK (Fig.21), (fig. 22) et (fig. 23).

Les courbes de type KH sont représentées par les sondages : SE6, SE8 et SE22. Elles sont caractérisées par la structure :

- Terrains conducteurs avec des résistivités comprises entre 571 et 3102 $\Omega.m$
- Terrains résistifs avec des résistivités qui varient entre 2498 et 14857 $\Omega.m$.
- Terrains semi-résistifs de résistivités allant de 433,95 à 1644 $\Omega.m$.
- Terrains résistifs dont les résistivités sont comprises entre 1202 $\Omega.m$ et 9716 $\Omega.m$.

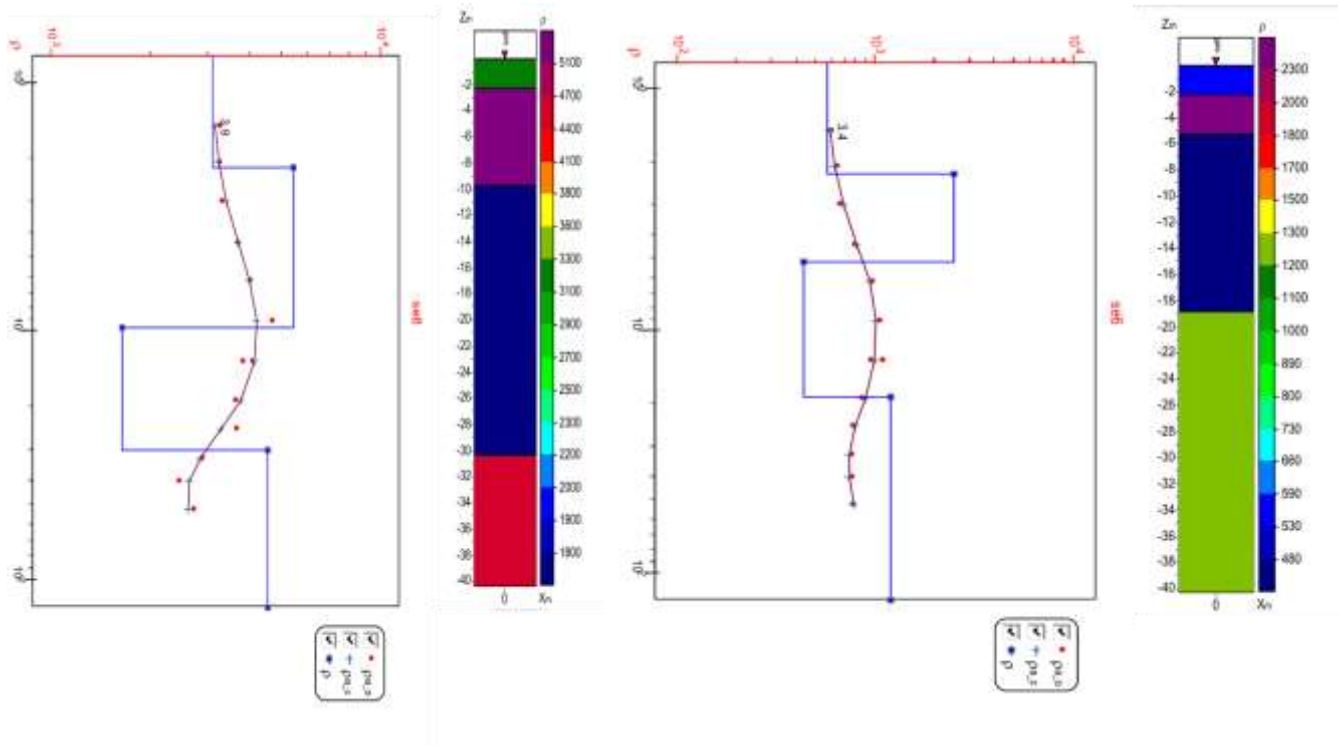


Figure 21 : Sondages de type KH (SE 6 et SE22)

Les courbes de type KQ sont représentées par les sondages : SE14, SE17 et SE18. Elles sont caractérisées par la structure suivante :

- Terrains conducteurs avec des résistivités comprises entre 538 et 1046 $\Omega.m$
- Terrains résistifs de résistivités variant entre 1367 $\Omega.m$ et 20704 $\Omega.m$.
- Terrains semi-résistifs de résistivités allant de 1018 à 1588 $\Omega.m$
- Terrains conducteurs avec des résistivités sont comprises entre 217 et 466 $\Omega.m$.

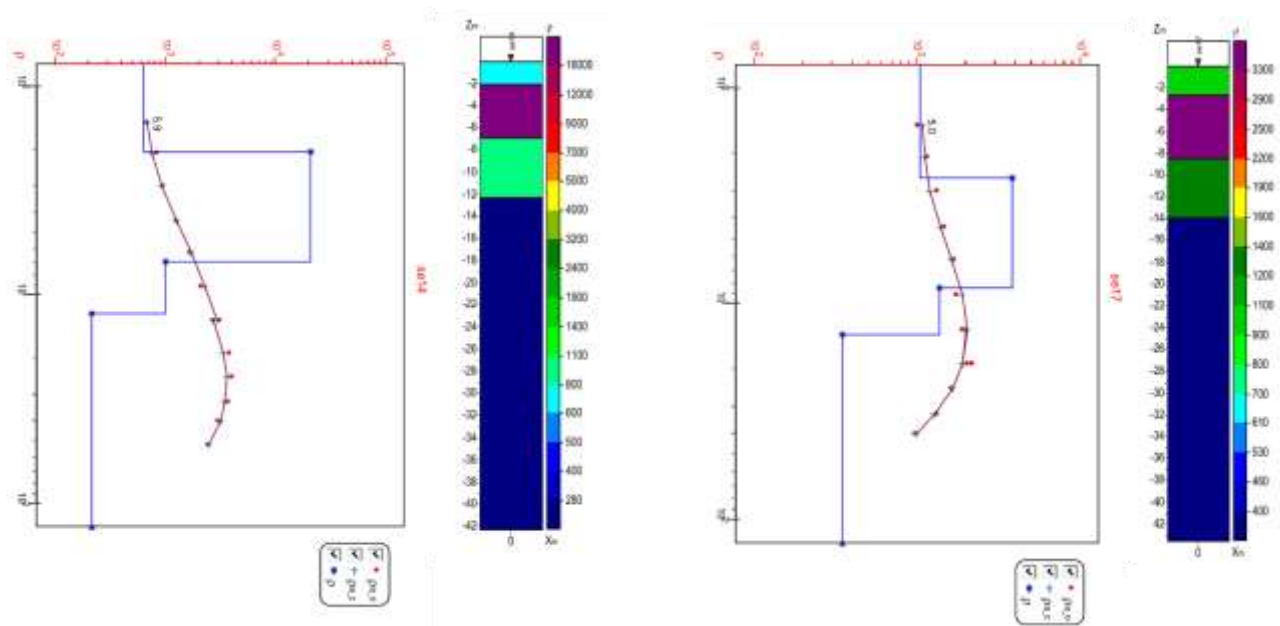


Figure 22 : Sondages de type KQ. (SE16 et SE17)

Les courbes de type AK sont représentées par le sondage SE7. Elles sont caractérisées par la structure suivante :

- Terrains conducteurs de résistivité 444,24 $\Omega.m$
- Terrains semi-conducteurs de résistivité 913,7 $\Omega.m$
- Terrains résistifs de résistivité 4073,3 $\Omega.m$
- Terrains semi-résistifs de résistivité 10105,5 $\Omega.m$

Les courbes de type AH sont représentées par le sondage SE16. Elles sont caractérisées par la structure suivante :

- Terrains résistifs de résistivité 1373 $\Omega.m$
- Terrains semi-résistifs de résistivité 735 $\Omega.m$
- Terrains résistifs de résistivité 2925 $\Omega.m$
- Terrains conducteurs de résistivité 281 $\Omega.m$

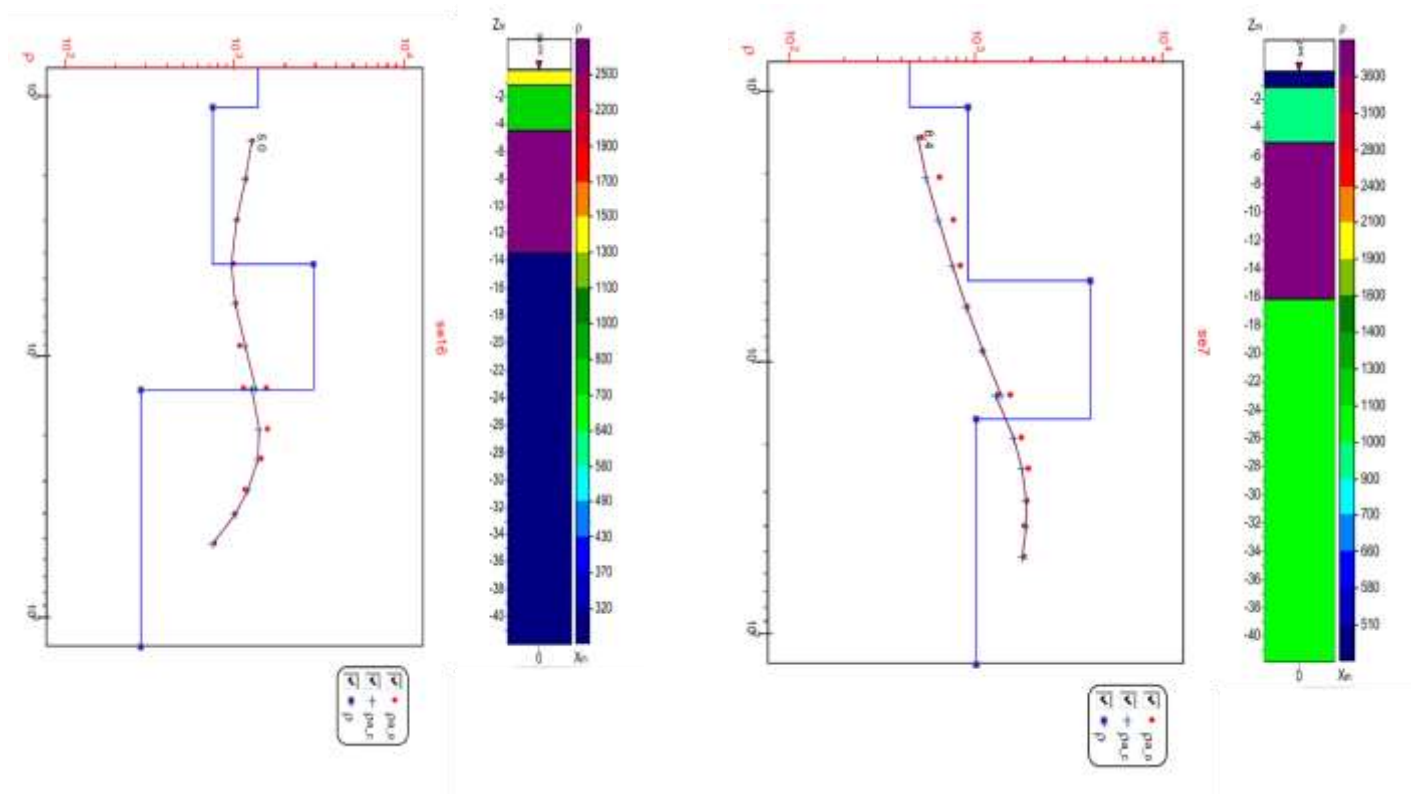


Figure 23 : Sondages de type AK. (SE16), type HK. (SE7)

III.2.1.3 Courbes de Sondage à deux terrains

Elle est représentée par la courbe de sondage SE23. Sa structure est comme suit :

- Un terrain conducteur de résistivité 835, 24 $\Omega.m$
- Un terrain résistif de résistivité 4519,34 $\Omega.m$

III.2.2 Coupes géoélectriques

Les courbes de sondages ont été interprétées sous forme de log de résistivités. Ces logs ont ensuite été corrélés sous forme de coupes géoélectriques suivants les directions : NW-SE (cg1) et SE-NW (cg2)

La coupe cg1 (Fig21) montre une succession de quatre terrains géoélectriques du haut vers le bas :

- Le premier terrain conducteur (341,53 -3101,83 $\Omega.m$) a une épaisseur presque constante qui varie entre 1et 3 m.

- Le second terrain résistif (913,7 - 8246,04 $\Omega.m$) a une épaisseur qui varie 3 et 10 m. Son épaisseur est plus importante dans les sondages SE2, SE3 et SE9 pouvant atteindre 32 m.
- Le troisième terrain semi-résistif (73,41 - 4073,3 $\Omega.m$) a une épaisseur comprise entre 10 et 30 m. Ce terrain a une épaisseur inférieure à 2 m dans le sondage SE3.
- Le quatrième terrain résistif (1010,5 - 4560,04 $\Omega.m$) apparait uniquement dans les sondages SE6, SE7 et SE8.

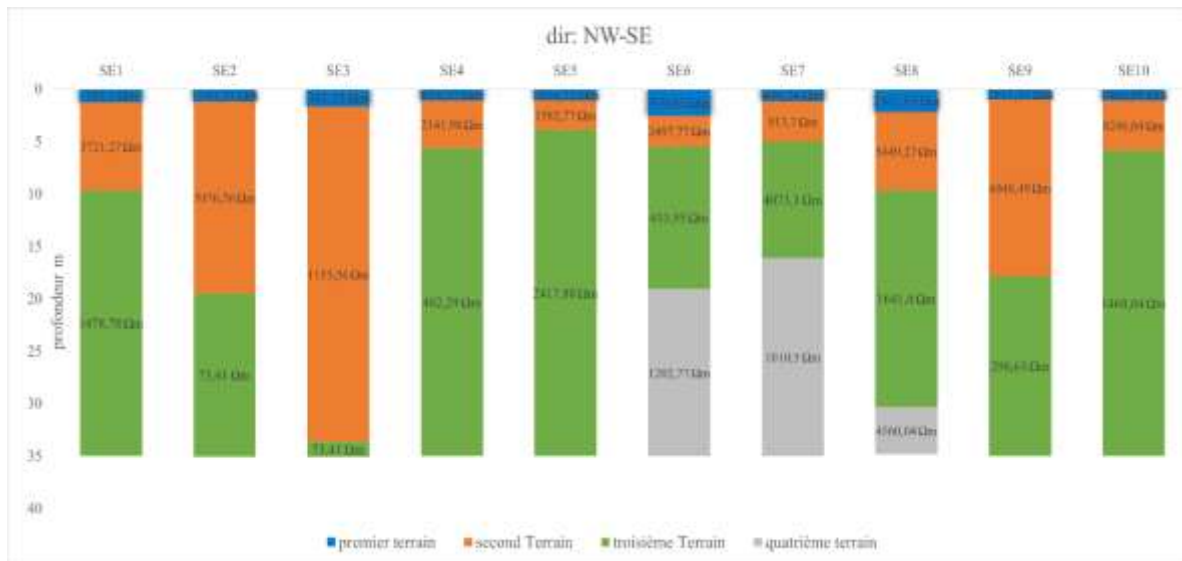


Figure 24 : Coupe géoélectrique cg1

Pour coupe géoélectrique 2 on a :

- Le premier terrain conducteur (593 - 963 $\Omega.m$) a une épaisseur presque constante qui varie entre 1et 2 m.
- Le second terrain résistif (1394 - 14857, $\Omega.m$) a une épaisseur qui varie entre 2 et 10 m. Dans le sondage SE23, son épaisseur peut atteindre 30 m.
- Le troisième terrain résistif (1162 - 3349 $\Omega.m$) n'apparaît pas dans le sondage SE23.
- Le quatre terrains semi résistif (9717 $\Omega.m$) se trouve uniquement dans le sondage SE22.

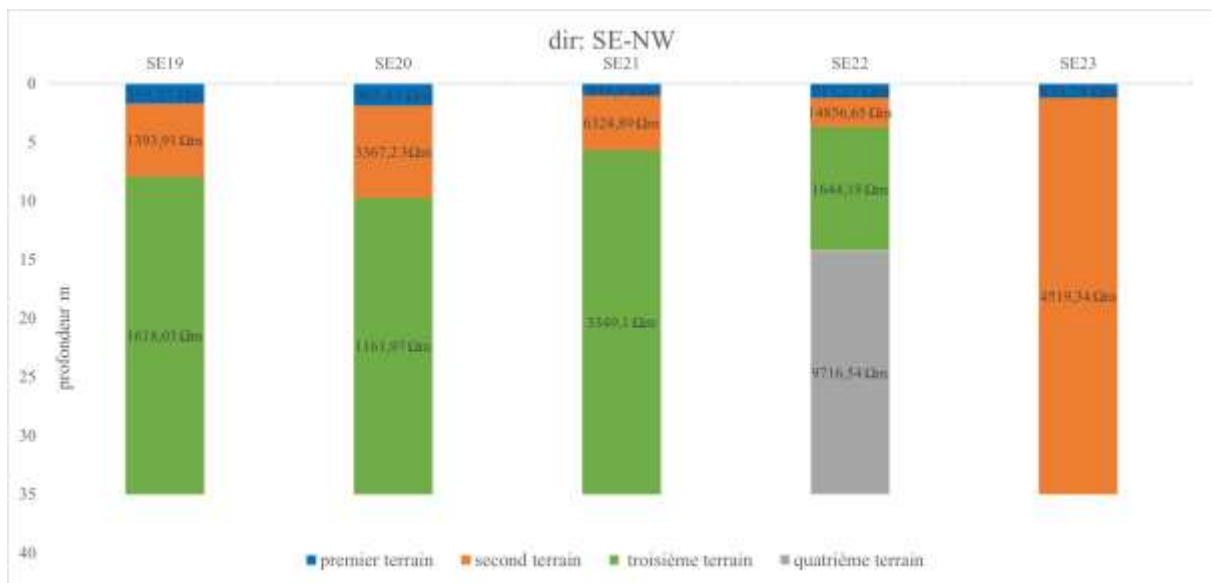


Figure 25 : Coupe géoélectrique cg2

III.2.3 Carte de d'isorésistivité

La carte d'isorésistivité est une représentation spatiale des résistivités à une profondeur donnée, elle permet de mettre en évidence la répartition des couches sur la zone d'étude. Dans cette étude, quatre cartes d'isorésistivité ont été réalisées pour : $AB/2=3$ m, $AB/2=9,1$ m, $AB/2=19$ m et $AB/2=40$ m. Les résistivités sont réparties suivant une échelle partant des terrains très résistants caractérisés par la couleur rouge, le vert pour des terrains semi-résistants et le bleu pour des terrains conducteurs.

La carte pour $AB/2= 3$ m présente les résistivités qui varient entre 200 et 4800 $\Omega.m$. Les terrains les plus conducteurs se localisent au Centre, Sud-Ouest de la zone d'étude jusqu' au Nord et représente 70% de la surface totale, avec une résistivité variante entre 400 et 1400 $\Omega.m$. Les terrains les plus résistants (20%) se localisent au Sud-Est pour des résistivités variant entre 3200 et 4800 $\Omega.m$. Quelques terrains intermédiaires (1800 - 2600 $\Omega.m$) sont situés au Nord-Ouest et représentent 10% de la surface totale.

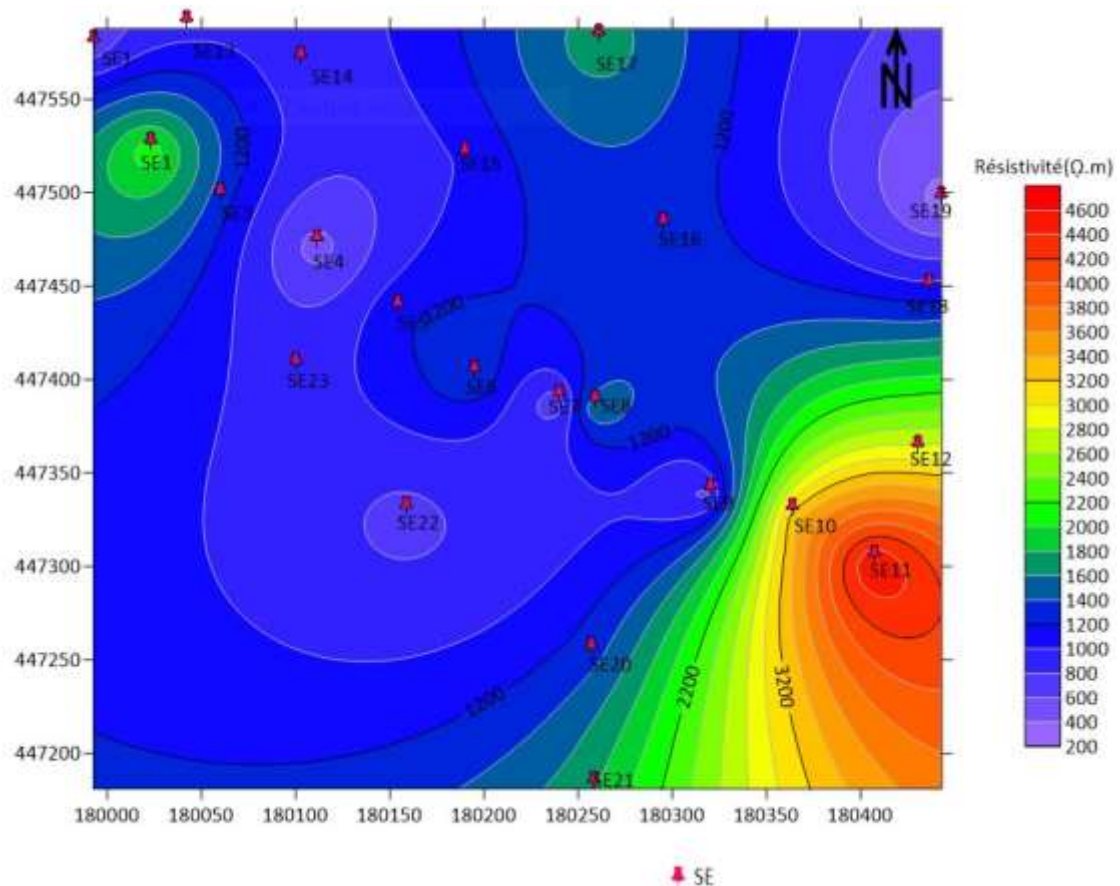


Figure 26 : Carte d'isorésistivité a une profondeur de $AB/2=3m$

La carte pour $AB/2= 9,1 m$ présente les résistivités qui varient $600 \Omega.m$ et $5600 \Omega.m$ une même allure aux premiers cas. Les terrains les plus conducteurs au Sud-Ouest et au Nord avec un point au Nord-Est de la carte 50% de la surface totale, avec une résistivité variante entre $1200 \Omega.m$ à $1800 \Omega.m$ Les terrains les plus résistants (30%) se localisent au Sud, Sud-ouest, à l'Est et un point au Nord-Ouest. Pour des résistivités qui varient entre 2400 et $3600 \Omega.m$ Au Sud-Est on observe des terrains très résistants (20%) avec des résistivités qui varient entre 4000 et $5600 \Omega.m$

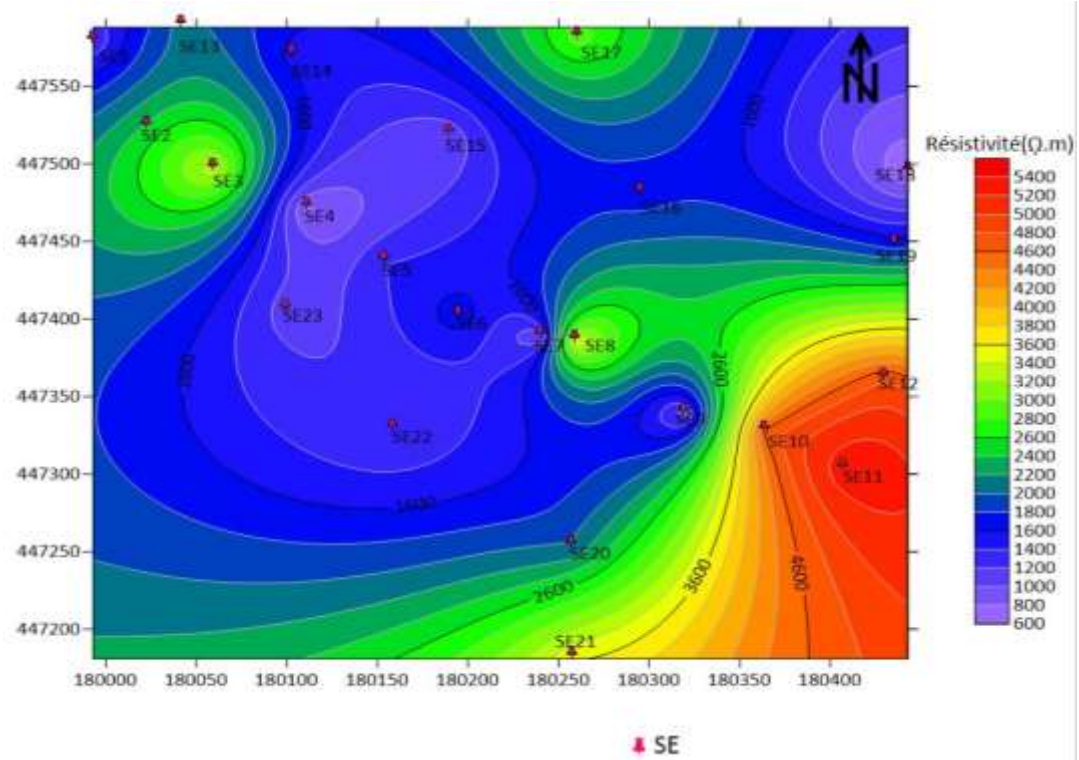


Figure 27 : Carte d'isorésistivité a une profondeur de $AB/2=9,1m$

La carte pour $AB/2= 19 m$ présente les résistivités qui varient entre 800 et 5400 $\Omega.m$. Les terrains les plus résistifs se localisent au Nord, à l'Est et une partie dans le Sud de la zone d'étude et représente 50% de la surface totale, avec une résistivité variante entre 2400 et 3400 $\Omega.m$. Les terrains les plus conducteur (35%) se localisent au Sud-Ouest et au Centre de la carte pour des résistivités variant entre 1000 et 1800 $\Omega.m$. Quelques terrains intermédiaires (4000 $\Omega.m$ et 5200 $\Omega.m$) sont situés au Sud-Est et représentent 15% de la surface totale.

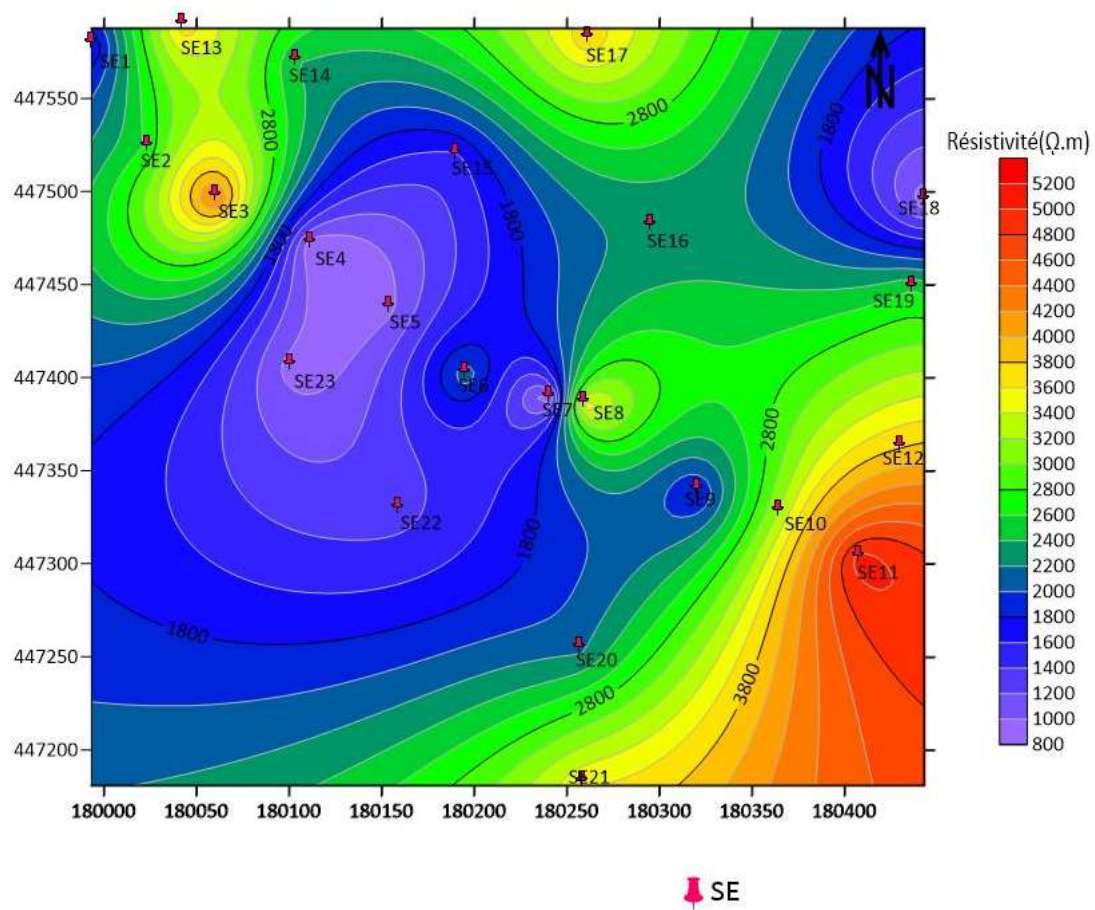


Figure 28 : Carte d'isorésistivité a une profondeur de $AB/2=19m$

La carte pour $AB/2= 40 m$ présente les résistivités qui varient entre $600 \Omega.m$ et $4400 \Omega.m$. Les terrains les plus résistants se localisent au Nord, à l'Est et au Sud et représentent 75% de la surface totale, avec une résistivité variante entre 2000 et $2800 \Omega.m$. Les terrains les plus résistants (5%) se localisent au Nord pour des résistivités variant entre 3600 et $4400 \Omega.m$. Les quelques terrains conducteurs (1000 et $1600 \Omega.m$.) sont situés au Nord-Est et représentent 20% de la surface totale.

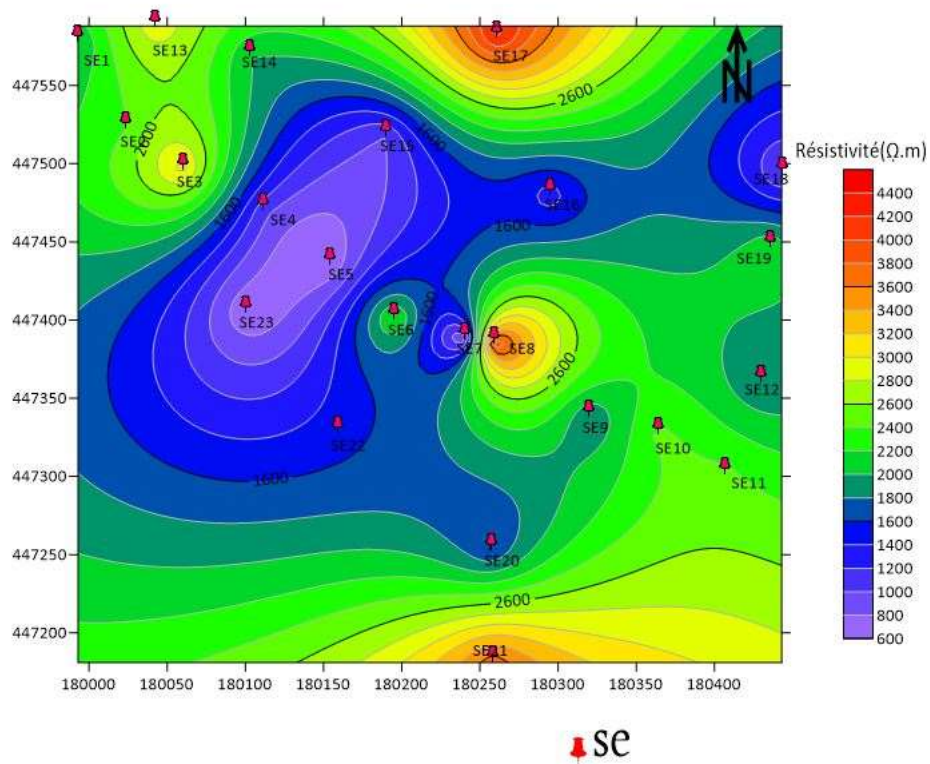


Figure 29 : Carte d'isorésistivité a une profondeur de $AB/2=40m$

III.3 ESSAIS MECANQUES

Les deux échantillons prélevés ont fait l'objet des essais mécaniques : Micro-Deval humide (MDE) et Los Angeles.

III.3.1 L'essai Los Angeles

Le récapitulatif des résultats de l'essai LA dans le tableau 7 ci-dessous comporte les points clés durant cet essai. Sur le tableau, y figure la masse prise d'essai et la masse obtenue après essai exprimée en gramme (g) et la classe granulaire. Le Tableau 5 ci-après présente également le coefficient LA avec de valeurs allant de 38% (Ech1) à 40,3% (Ech2). La moyenne de ces résultats est de 44,25%.

Tableau 7. Résultat de l'essai Los-Angeles

		Echantillon 1		Echantillon 2	
Masse prise d'essai		5000 g	5000 g	5000 g	5000 g
Classe granulaire		10/14	6,3/10	10/14	6,3/10
Nombre de boulets		11	9	11	9
Poids des boulets		4704,8	3820,5	4704,8	3820,5
Après essai masse des éléments	>1.6mm (m')	3090,5	2985,6	2615	2472,3
	<1.6mm(m)	1909,5	2014,4	2385	2527,7
Coef. Los Angeles 100×m/5000		38,2%	40,3%	47,7%	50,5%

III.3.2. L'essai Micro-Deval en présence d'eau (MDE)

Le tableau 8 présente les échantillons en fonction des paramètres recommandés pour l'essai MDE ainsi qu'un résultat montrant le coefficient de MDE. De ces échantillons de roches soumis à l'essai MDE, il ressort un coefficient de 28,4% et 32,8% pour l'échantillon 1 et de 40,8 à 46,5 % pour l'échantillon 2.

Tableau 8. Résultat de MDE

		Echantillon 1		Echantillon 2	
Masse prise d'essai		500 g	500 g	500 g	500 g
Classe granulaire		10/14	6,3/10	10/14	6,3/10
Masse l'eau de		2,5 l	2,5 l	2,5 l	2,5 l
Masse passant au tamis de 1,6 mm		141,1	164	204,4	232,6
Coef MDE		28,4	32,8	40,8	46,5

Conclusion

Les résultats des sondages électriques montrent trois et quatre terrains de résistivité électrique variée. Ces résultats des sondages électriques indiquent six types de sondages : les sondages de type A, k, HK, AK, KQ et KH. Lesdits sondages sont caractérisés par les zones conductrices, semi-résistives et résistives sur une profondeur de plus de 35m au sein du site d'Athe. Les résultats géophysiques montrent que la roche affleure de la surface jusqu'à 35 m de profondeur avec des valeurs de résistivités comprises entre 73 $\Omega.m$ et 9716,54 $\Omega.m$. Les valeurs de l'essai de résistance à la fragmentation varient entre 38,2 et 50,5 %. Ceux de l'essai de résistance à l'usure sont compris entre 28,4 et 46,5 %.

CHAPITRE IV : INTERPRETATION ET DISCUSSION

Introduction

Ce chapitre vise à proposer un essai d'interprétation et discussion des résultats présentés au chapitre précédent

IV.1. NATURE LITHOLOGIQUE ET GEOMETRIE DU MASSIF ROCHEUX

Les levées géologiques de terrain et les observations des lames minces en laboratoire montrent que le massif a une forme en demi-orange et couvre une superficie de 292500m² environs. Deux faciès lithologiques ont été identifiés un gneiss à grenat et à biotite et le deuxième un gneiss à disthène. Leur couleur varie de gris clair au gris sombre. Le faciès de gneiss à grenat et à biotite est constitué de quartz (25%), biotite (30%), tandis que le faciès à disthène est composé de quartz (20%), disthène (30%). Ces résultats corroborent avec à celle obtenu par Ndongo (2019). Sur les orthogneiss d'okola. Les travaux de Ndongo confirment que ce massif appartient au socle gneissique para-dérivées.

Le modèle conceptuel géologique (1D et 3D) obtenu à partir des 23 sondages géoelectriques verticaux a permis de reconstituer les limites d'extension latéral, les épaisseurs et les volumes des unités lithologiques du massif rocheux (fig.30) le type de modèle également qui a été établi dans les travaux de Krassakis et al (2022). Ce massif est hétérogène et caractérisé par quatre unités lithologiques : le massif sain, le massif fissuré, le massif fracturé et le massif altéré.

Tableau 9. Caractéristique geoelectrique du massif du massif rocheux

Unités lithologiques	Résistivités $\Omega.m$	Epaisseur (m)	Volume (m ³)	Pourcentages%
Socle altéré	<1000	1-3	170425	1,7
Socle fissuré	1500 - 4000	2 -5	2352500	22
Socle fracturé	700 - 2700	10 - 20	430667,5	4,2
Socle sain	>4000	15 - 30	6636800	72

Les résistivités dans l'ensemble des sondages électriques augmentent de la surface vers les profondeurs selon les résultats obtenus dans les sondages.

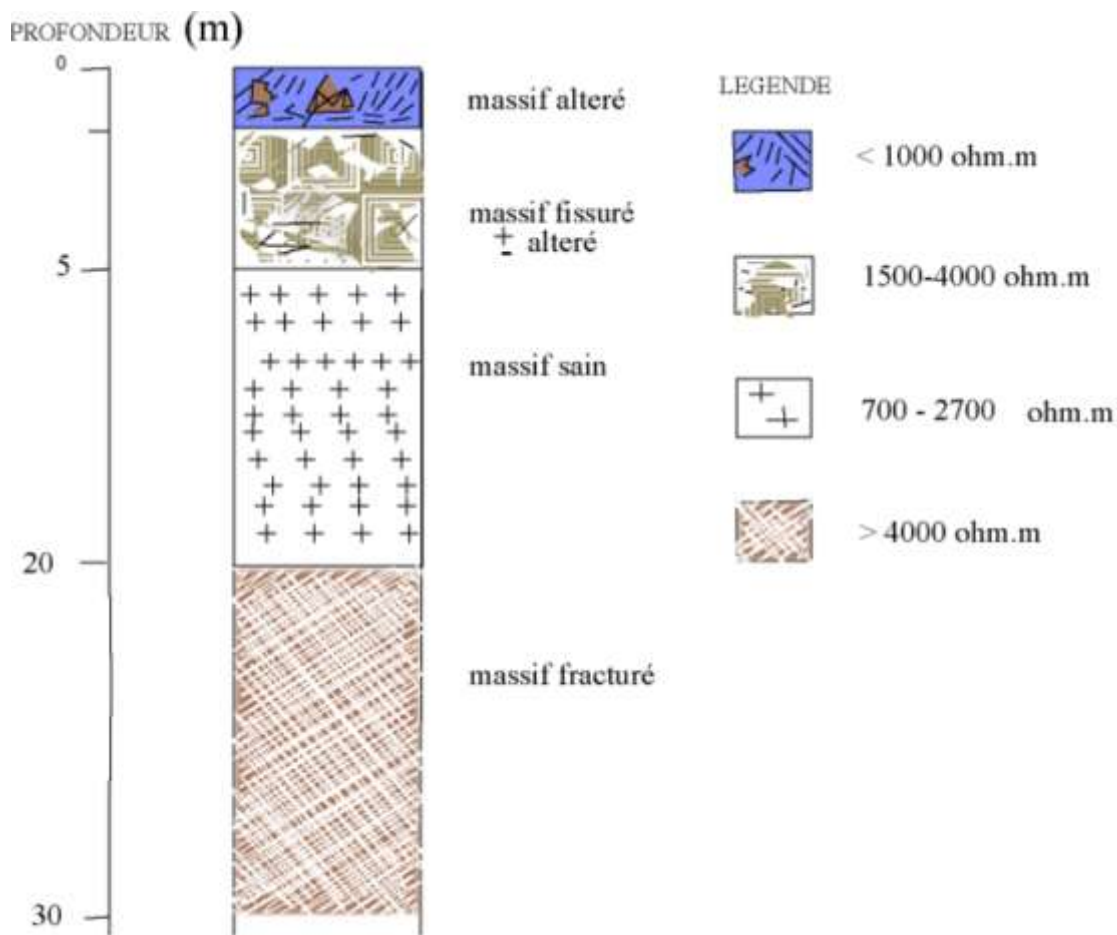


Figure 30 : Coupe lithologique du massif rocheux

IV.2 PROPRIETES MECANQUES DU MASSIF ROCHEUX

Le faciès de gneiss à grenat et à biotite a les LA de 40,3% pour la classe granulaire 6,3/10mm et 28,2% pour la classe granulaire 10/14mm, les valeurs de MDE de ce faciès sont de 32,2 et 28,4% pour les classes granulaires 6,3/10 respectivement.

Le faciès de gneiss à disthène a les LA compris entre 50,5% et 47,7% pour les classes granulaires 6,3/10 et 10/14mm respectivement. Les valeurs de MDE sont de 46,4 et 40,8 pour les classes granulométriques 6,3/10 et 10/14mm respectivement. Plus les classes granulaires diminuent plus les LA et les MDE augmente.

La fourchette dans lesquelles les valeurs LA et MDE obtenues se démarque des d'autre travaux de Bikond ,2003, Ndede (2022) sur la formation géologiques d'Okola et d'Esse. Cette différence est due au fait que les classes des matériaux étudiées par ces auteurs ne sont pas identiques à celles utilisées dans cette étude.

IV.3 EVALUATION DE LA QUALITE DU MASSIF ROCHEUX

La faible teneur en quartz (25-30%) en feldspath (5-8%) dans les roches prélevées montre que ce matériau présente une faible résistance à l'usure. D'après les travaux de (Adomako et *al.*, 2021). La teneur élevée en biotite (20-30%) dans les roches ne compromet pas la résistance totale. Ces échantillons de roches proviennent ainsi de la partie altérée du massif, la résistance, l'usure du massif sain restent donc à vérifier. Les données géophysiques montrent que le massif est subdivisé en quatre unités : le massif altéré (1,7%), le massif fissure (22%), le massif fracturé (4,2%) et le massif sain (72%).

Suite aux résultats obtenus après analyses en laboratoire, et suivant les spécifications de la norme NF P18-545 (Tab 10), issus des différents essais mécaniques réalisés pour les fractions 6,3/10 et 10/14 sont de catégorie E et D (Tab10).

Tableau 10 : Norme NF P 18-545 sur la codification des granulats.

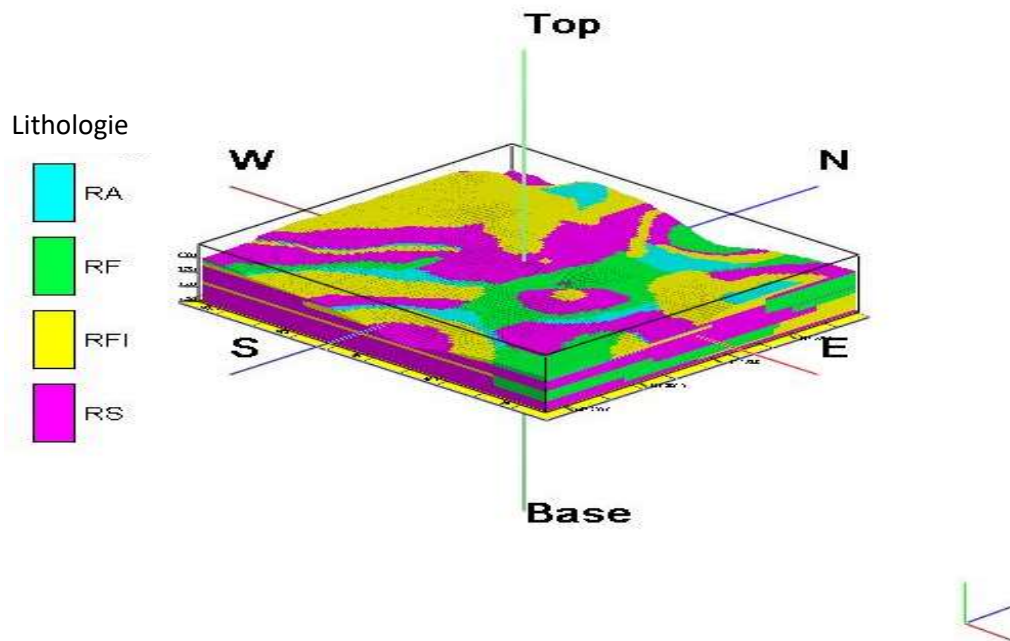
CATEGORIE	LA + MDE	LA	MDE
B	$LA + MDE \leq 35$	25	20
C	$LA + MDE \leq 45$	30	25
D	$LA + MDE \leq 55$	35	30
E	$LA + MDE \leq 80$	45	45

Tout en tenant compte de la méthode de référence NF P 18 -545, le coefficient de Los Angeles obtenu permet d'apprécier les échantillons de la manière suivante :

- Si Coef LA >35 alors l'échantillon, ce qui permet de qualifier les échantillons Ech1 et Ech2. Ces résultats ne diffèrent pas tellement de ceux de MDE et ne répondent pas aux exigences dans les marchés publics de construction de route.

Bien que les résultats soient de catégorie E et D, d'après la NF P 18-545 (Norme Française). Les destinations des granulats sont établies suivant les trafics définis par IDRRIM Ces matériaux peuvent être utilisés en couche de fondation d'après (Bagarre,1990 ; Autret,1983 ; DNIT, 2007) un granulat doit avoir un $LA \leq 60$ pour une utilisation en couche de fondation et $LA \leq 45$ pour une utilisation en couche de base.

La résistance au choc des matériaux est bonne pour l'échantillon 1 avec LA (40<LA<50) et moyenne pour l'échantillon deux LA (50<LA<60). Ils peuvent être valorisés D'après (De Graft. Johnson et al 1972).



RA : roche altérée ; **RF** : roche fracturée ; **RFI** : roche fissurée plus ou moins altérée ; **RS** : roche saine

Figure 31 : Interpolation du modèle de bloc 3D

Conclusion

Les travaux effectués dans le cadre de ce chapitre ont permis de déterminer les zones altérées, fissurées, saines et de fracturation au sein du massif rocheux et leurs pourcentages ; de donner les différents usages des granulats du massif pour sa valorisation ; d'établir un modèle géologique 3D. Ces travaux ont également permis de connaître la composition minéralogique et la qualité du matériau pour usage en construction routière.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail avait pour principal objectif la caractérisation géophysique et géotechnique du massif rocheux d'Athe la méthodologie adoptée intègre les données géologiques, géophysiques et géotechniques. Sur le plan géologique le massif est constitué de deux faciès géologiques : un gneiss à grenat et à biotite, un gneiss à grenat et à disthène, sur le plan géophysique on distingue quatre unités lithologiques : le massif altéré, le massif fissuré, le massif fracturé et le massif sain, qui représente 1,7%, 22%, 4,2% et 72% respectivement, il ressort que le massif est exploitable avec profit. Et Sur le plan géotechnique la valeur de LA de 38 à 40% pour l'échantillon 1, et l'échantillon 2 est de 47 à 50% pour les deux classes granulaires choisis, et celle de MDE de 28 à 32% pour l'échantillon 1 et de 40,8 à 46,5% pour le deuxième échantillon. Ces résultats montrent qu'on peut utiliser ces matériaux comme couche de base et de fondation pour la construction des routes pour les trafics T5 et T4. Cette étude permet ainsi d'apporter une nouvelle approche méthodologique pour la prospection des roches massives utilisées en construction routière, Cette étude a également permis de donner la nature, la géométrie et évaluer la qualité du massif. L'ensemble de ces résultats montre que le couplage des méthodes géophysiques et géotechniques sont indispensables pour la caractérisation des sols et des roches. D'après ces résultats obtenus, L'analyse de ces données montre également que les études géophysiques doivent être préliminaires pour connaître la quantité et la qualité du matériaux pour la recherche et l'exploitation des carrières elles permettent d'orienter les études géotechniques in situ. bien que les résultats soient satisfaisants pour une exploitation de carrière et un usage en construction routière.

Pour améliorer donc ce travail les sondages géotechniques doivent se réaliser pour mieux évaluer la qualité de ce matériaux rocheux. Pour cela, il faudra aussi ajouter quelques essais et test géotechniques telle que l'essai de compression triaxial, essais de cisaillement direct.

Quelques perspectives

- Faire une étude poussée des sondages carottés sur le massif pour mieux connaître les caractéristiques à une certaine profondeur et Le RQD (Rock Quality Designation) est un essai en place qui permet de déterminer le degré de fracturation d'une roche.
- Envisager une étude structurale sur l'ensemble du massif rocheux pour connaître tous les marqueurs observés en les zones de faiblesse.
- Réaliser des études minéralogiques approfondies pour donner les usages de ces granulats comme béton hydraulique en Génie civil.
- De densifier les mesures géophysiques en couplant d'autres méthodes à l'instar des trainés électriques.

BIBLIOGRAPHIE

- Adomako, S., Engelsen, C. J., Thorstensen, R. T., & Barbieri, D. M. (2021).** Review of the relationship between aggregates geology and Los Angeles and micro- Deval tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 1963–1980.
- AFNOR (2010) NF EN 1097-2.** Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques des granulats-Partie 2 : méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation p.32.
- AFNOR (2011) NF EN 1097-1.** Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval *Scientific Research and Essays*, 5(23), 3592-3605.
- AFNOR (2021) NF P18-545).** Granulats - Elément de définition, conformité et codification.
- Ait, M. (2020).** Reconnaissance Macroscopique des Roches. Manuel de Travaux Pratiques de pétrographie. Univ. Cadi Ayyad, 42 p.
- Aizebeokhai, A. (2010).** 2D and 3D geoelectrical resistivity imaging: Theory and field design.
- Autret P, (1983).** Latérites et graveleux latérique. Bulletin du laboratoire central des ponts et chaussées, France. 38p.
- Bagarre E, (1990).** Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. Rapport ISTED. 143p.
- Bagnouls F et Gaussen H., (1957).** Les climats biologiques et leur classification. *Annales de géographie*, pp.193-220.
- Baltassat J.M., Mathieu F., Ambroise B., Barbet C., Béon O., Dewandel B., Lachassagne P., Norie A., Wyns R. (2015).** Méthodologie et résultats d'application de la tomographie électrique de résistivité par courant continu pour l'exploration hydrogéologique des aquifères discontinus en domaine de socle. Vingtièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'AIH « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles ». 5p.
- Bekoa, E., 1994.** Etude pétrologique et géochimique d'une couverture pédologique sur gneiss en zone forestière de l'extrême sud Cameroun. Relation avec la dynamique du fer. Th. Doct. 3eme cycle Fac. Sci. Univ. Yaoundé, 187pp, 1994.
- Bekon Ndongo. (2019).** Etude géotechnique des produits d'altération et des granulats gneissique d'okala. Mémoire de master II Univ.Yaoundé 1, 106p

- Benbaqqal, H., Masrour, A., Benyassine, E. M., & Erragragui, M. (2016).** Approche du SIG pour la valorisation des carrières de matériaux de construction. Cas d'étude : Ex Région septentrionale de Meknès-Tafilalet, Maroc). *J. Mater. Environ. Sci.*, 7(7), 2340-2351.
- Bikond Tonye N (2003).** Caractérisation et intérêts géotechnique des minéraux du secteur Eseka -Manguégués. *Mem D.E.A. fac. Sci-Univ. Yaoundé* 1. 78p.
- Bilong P. (1988).** Genèse et développement des sols ferralitiques sur syénite alcaline potassique en milieu forestier du centre Sud-Cameroun : comparaison avec les sols ferralitiques développés sur roches basiques. *Thes. Doct.d'Etat. Univ.Yaoundé I*, 367p.
- Bisso, D., Aretouyap, Z., Nshagali Biringanine, G., Njanjock Nouck, P., & J., (2019).** Variation of subsurface resistivity in the pan-African belt of Central Africa. The structural Geology contribution to the Africa-Eurasia Geology: Basement and Reservoir Structure, Ore Mineralisation and Tectonic Modelling, pp25-27.
- Bisso, D., Ntomba, S. M., Mengbwa II, R. C., Magnekou, T. R., & Mvondo, O. J. (2020).** Geological and Geotechnical Characteristics of Ntem Formations: Insight of its Applications in the Memve'ele Dam Construction (Southern Cameroon). *Geotechnical Geological Engineering*.
- Bouteldja, F. (2017).** Cours de Géophysique Appliquée. Univ. 08 Mai 1945-Guelma, 104p.
- Chapellier D. (2001).** « Cours online Géophysique, Prospection Electrique de surface ». Univ. De Lausanne ; Institut Français du pétrole, pp.3-12.
- Chappelier D. (2000).** Résistivités électriques, in cours online de géophysique, 99p.
- Chouteau M., Giroux B. (2006).** Notes de cours : Méthodes électriques (cours de géophysique appliquée) II, École Polytechnique de Montréal, Canada) GLQ 3202.
- Dahlin T., (1993).** On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications. *Th. Doc.Univ de Lund*, 187p.
- Dahlin T., (2003).** The development of DC resistivity imaging techniques. *Comput Géoscience* 27, pp1019 – 1029.
- De Graft-Johnson. JWS, bhatia. HS Harmond M, (1992).** Lateric gravel evaluation for road construction. *Journal soil Mechonic and Fondation Division* 98(11), 1245-1265.

- Dey A., Morrison H.F. (1979).** Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophys Prospect* 27, pp.106-136.
- DNIT (Département National de l'Infrastructure et Transportes 2007)** pavimentacao-base estabilizada granulometricomment .com utilizaocao. De solo laterico -Especificao de servico 2007.Norma DNIT-098/2007-ES.
- Edwards L.S. (1977).** A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophys* 42(5), pp1020 – 1036.
- Edwards, L. (1977).** A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- Hebbache, K. (2017).** Contribution à la reconnaissance du sol par tomographie électrique. Thèse de Doctorat, Fac. Sci. Et de la Technologie. Univ. Mohamed Khider – Biskra. 155p.
- Kouakou, A. K., Kouame, N. L., Djroh, S. P., Kouadio, L. K., & Sombo, C. B. (2017).** Utilisation de la méthode de la résistivité électrique pour la recherche des carrières granitiques et estimation du tonnage rocheux sur trois sites : Ayame, Bouake et Ferkessedougou (côte d'Ivoire). *International Journal of Technical Research and Applications*, 5, 40-46.
- Krassakis, P., Pyrgaki, K., Gemeni, V., Roumpos, C., Louloudis, G., & Koukoulas, N. (2022).** GIS-Based Subsurface Analysis and 3D Geological Modelling as a Tool for Combined Conventional Mining and In-Situ Coal Conversion: The Case of Kardias Lignite Mine, Western Greece. *Mining*, 2(2), 297-314.
- Kunetz G. et al (1966).** Principles of Direct Current Resistivity Prospecting. Gebrüder Borntraeger, Berlin. p.
- Kunetz, G. (1966).** Principles of Direct Current Resistivity Prospecting. Gebrüder Borntraeger, Berlin, 103p.
- Loke M.H. (2004).** Tutorial-2D and 3D electrical imaging surveys. *Technical report, GeotomoSoftware*.
- Marescot L. (2004).** Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la méthode des éléments finis. *Thès. De Doct. Univ. De Nantes*,

- Marescot L. (2006).** "Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la méthode des éléments finis". Th. Doc. Géosc Univ. De Nantes et de Lausanne, 208p.
- Marescot L. (2008).** Imagerie électrique pour géologues : acquisition, traitement, interprétation. *www.tomoquest.com*, 73p.
- Ngon Ngon, G. P., (1996).** Etude de la genèse des dépôts de rutile alluvionnaire au Cameroun. Le cas des dépôts du rutile alluvionnaire du bassin versant de la Messié Mezoa. De la Mefou et Akono, province du Centre (Cameroun). Mémoire Maitrise Université de Yaoundé I, 71p.
- Ntede, (2022).** Caractérisation géophysique et géotechnique des formations géologiques de la carrière de Nomayos : application au projet de construction de la route Awae-Esse-Soa. Mémoire de master II fac.sc -Univ de Yaoundé 1, 75p.
- Nzenti, J-P., (1987).** Pétrogenèse des migmatites de Yaoundé (Cameroun) : éléments pour un modèle géodynamique de la chaîne pan-africaine nord-équatoriale. Thèse Doct.d'état, Univ Cheikh Anta Diop (Sénégal)-Univ.Nancy, 176p.
- PCD., (2013)** plan communal de développement d'Akonolinga, 210p.
- Primel, L. (1984).** Recherches pluridisciplinaires sur les granulats dans les laboratoires des ponts et chaussées en France. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 29(1).
- Ralijaona, H., Rasolomanana, E., Rakoto, H., & Rasolomamonjy, J. (2010).** Contribution de la méthode Electre Tri à la hiérarchisation des gisements de carrières de roches massives entre Port-Bergé et Djangoa. Madamines, Vol. 1.
- RGPC, 2005** (Recensements générale de la population du Cameroun), 196p.
- Roy, A., & Apparao, A. (1971).** Depth of investigation in direct current methods. Geophysics, 36, 943-959.
- Schumann, W. (1985).** Guide des pierres et des minéraux, 382p.
- Sombo, B. (1978).** Etude sismique de subsurface avec essai d'obtention des ondes S. Mémoire de Thèse, Univ. Bordeaux I-Bordeaux, 126p.
- Telford W. M., Geldaart L.P., (1990).** Applied geophys 2nd ed. Cambridge Univ. Press, 70.

- Yene Atangana, J., Menanga Tokouet, R., Mbida Yem, L., Onana Enama, L., Ntyame Ella, M., & Ndjigui, P.-D. (2022).** Electrical resistivity imaging and 3D geological modelling of the sedimentary architecture of the Sanaga floodplain (Cameroon, Central Africa). *Acta Geophysica*, Vol. 71, Issue 2, pp.735-755.
- Yongue-Fouateu R. (1986).** Contribution à l'étude pétrologie de l'altération et des faciès de cuirassement ferrugineux des gneiss migmatitiques de la région de Yaoundé. Th. Doct; 3ème Cyl. Univ. Yaoundé I, 260p.

ANNEXES

Annexe 1 :

Tableau 1 : Récapitulatif des sondages après traitement des données

SONDAGES	coordonnées		Résistivité($\Omega.m$)				Epaisseur(m)				ERREURS	Types de courbes
	X	X	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	h_1	h_2	h_3	h_4		
SE1	180023	447523	782,1	3721,27	1478,78		1,26	8,41	25,33		3.2	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE2	180060	447496	1143,35	5076,76	1107,62		1,2	18,28	15,6		5.1	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE3	180111	447471	341,53	1153,56	73,41		1,66	32	1,43		8.1	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE4	180154	447436	624,51	2141,98	482,29		1,08	4,58	29,35		6.5	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE5	180195	447401	1034,72	1582,77	2417,88		1,1	2,8	31,1		3.1	type A ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$)
SE6	180240	447388	570,63	2497,77	433,95	1202,77	2,55	2,92	13,63	15,9	3.4	type KH ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$)
SE7	180320	447338	444,24	913,7	4073,3	1010,5	1,15	3,88	11,08	18,89	6.4	type AK ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$)
SE8	180364	447327	3101,83	5449,27	1641,4	4560,04	2,21	7,45	20,66	4,49	3.9	type KH ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$)
SE9	180407	447302	2915,31	6048,49	298,63		1,01	16,85	17,14		4.1	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE10	180430	447361	1469,89	8246,04	1468,04		1,08	4,78	29,14		5	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE11	180042	447588	593,25	1737,53	4256,56		2,07	3,6	30,33		5.9	type A ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$)
SE12	179993	447578	526,91	2232	1848,71		1,97	15,29	29,58		3.5	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE13	180436	447447	593,25	1737,53	4256,56		1,07	3,6	17,92		6	type A ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$)
SE14	180443	447494	285,92	1633,33	1077,21		2,62	4,83	5,37	22,74	2.8	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE15	180103	447569	792,09	6154,42	1227,54		3,2	5,03	26,77		5.7	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE16	180190	447518	1373,38	734,99	2925,49	281,37	1,1	3,33	8,95	21,62	5	type HK ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$)
SE17	180295	447480	1046,47	3821,65	1367,1	346,48	2,63	5,81	5,45	21,11	5	type KQ ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$)
SE18	180100	447405	573,66	1587,75	1297,42	466,38	1,06	2,3	2,98	28,66	6.8	type KQ ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$)
SE19	180159	447328	593,39	1393,91	1618,03		1,71	6,23	27,06		4.5	type A ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$)
SE20	180257	447253	963,43	3367,23	1161,97		1,88	7,87	25,25	13,89	3.1	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE21	180258	447181	849,9	6324,89	3349,1		1,03	4,64	29,33		3.6	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE22	180259	447385	713,27	14856,65	1644,18	9716,54	1,21	2,49	10,59	20,71	5.9	type KH ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$)
SE23	180261	447581	835,24	4519,34			1,22	33,78			3.1	$\rho_1 < \rho_2$

Annexe 2 :

Tableau 2 : Récapitulatif des sondages à trois terrains après traitement des données

sondages	Résistivité($\Omega.m$)			Epaisseur(m)			Types de courbes
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	h_1	h_2	h_3	
SE1	782.10	3721.27	1478.78	1.26	8.41	25.33	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE2	1143.35	5076.76	1107.62	1.2	18.28	15.6	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE3	341.53	1153.56	73.41	1.66	32	1.43	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE4	624.51	2141.98	482.29	1.08	4.58	29.35	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE5	1034.72	1582.77	2417.88	1.1	2.8	31.1	type A ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$)
SE9	2915.31	6048.49	298.63	1.01	16.85	17.14	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE10	1469.89	8246.04	1468.04	1.08	4.78	29.14	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE11	593.25	1737.53	4256.56	1.07	3.6	30.33	type A ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$)
SE12	285.92	1633.33	1077.21	2.62	3.16	29.58	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE13	526.91	2232	1848.71	1.97	15.29	17.92	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE15	792.09	6154.42	1227.54	3.2	5.03	26.77	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE19	593.39	1393.91	1618.03	1.71	6.23	27.06	type A ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$)
SE20	963.43	3367.23	1161.97	1.88	7.87	25.25	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
SE21	849.90	6324.89	3349.10	1.03	4.64	29.33	type K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)
MIN	288.92	1153.56	73.41	1.01	2.8	1.4	
MAX	2915.31	8246.04	4256.56	3.2	32	30.3	
MOY	922.59	3629.58	1561.84	1.56	9.53	10.3	

Annexe 3 :

Tableau 3 : Récapitulatif des sondages à quatre terrains après traitement des données

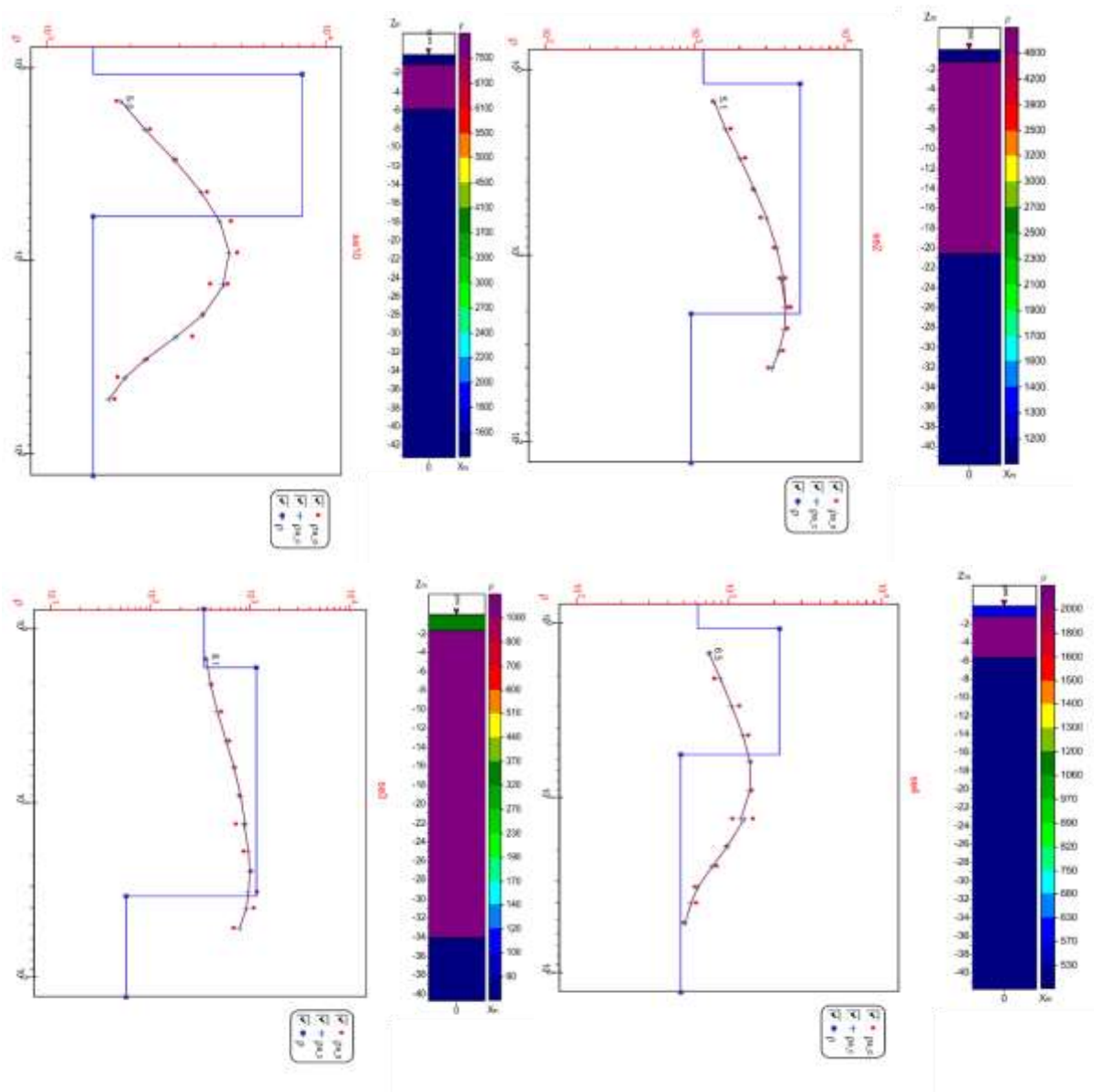
sondages	Résistivité($\Omega.m$)				Epaisseur(m)				Types de courbes
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	h_1	h_2	h_3	h_4	
SE6	570.63	2497.77	433.95	1202.77	2.55	2.92	13.63	15.9	type KH ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$)
SE7	444.24	913.7	4073.3	1010.5	1.15	3.88	11.08	18.89	type AK ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$)
SE8	3101.83	5449.27	1641.4	4560.04	2.21	7.45	20.66	4.49	type KH ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$)
SE14	639.24	20704.36	1018.35	217.5	2.06	4.83	5.37	22.74	type KQ ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$)
SE16	1373.38	734.99	2925.49	281.37	1.1	3.33	8.95	21.62	type HK ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$)
SE17	1046.47	3821.65	1367.1	346.48	2.63	5.81	5.45	13.89	type KQ ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$)
SE18	573.66	1587.75	1297.42	466.38	1.06	2.3	2.98	28.66	type KQ ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$)
SE22	713.27	14856.65	1644.18	9716.54	1.21	2.49	10.59	20.71	type KH ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$)
MIN	444.24	734.99	433.95	217.5	1.06	2.3	2.98	4.49	
MAX	3101.83	20704.36	4073.3	9716.54	2.63	7.45	20.66	28.66	
MOY	1057.84	6320.76	1800.14	1956.23	1.74	4.14	9.8	11.1	

Annexe 4 :

Tableau 4 : Récapitulatif des sondages à deux terrains après traitement des données

sondages	Résistivité($\Omega.m$)			Epaisseur(m)		Types de courbes
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	h1	h2	
SE 23	835.24	4519.34		1.22	33,78	$\rho_1 < \rho_2$

Annexe 5 :



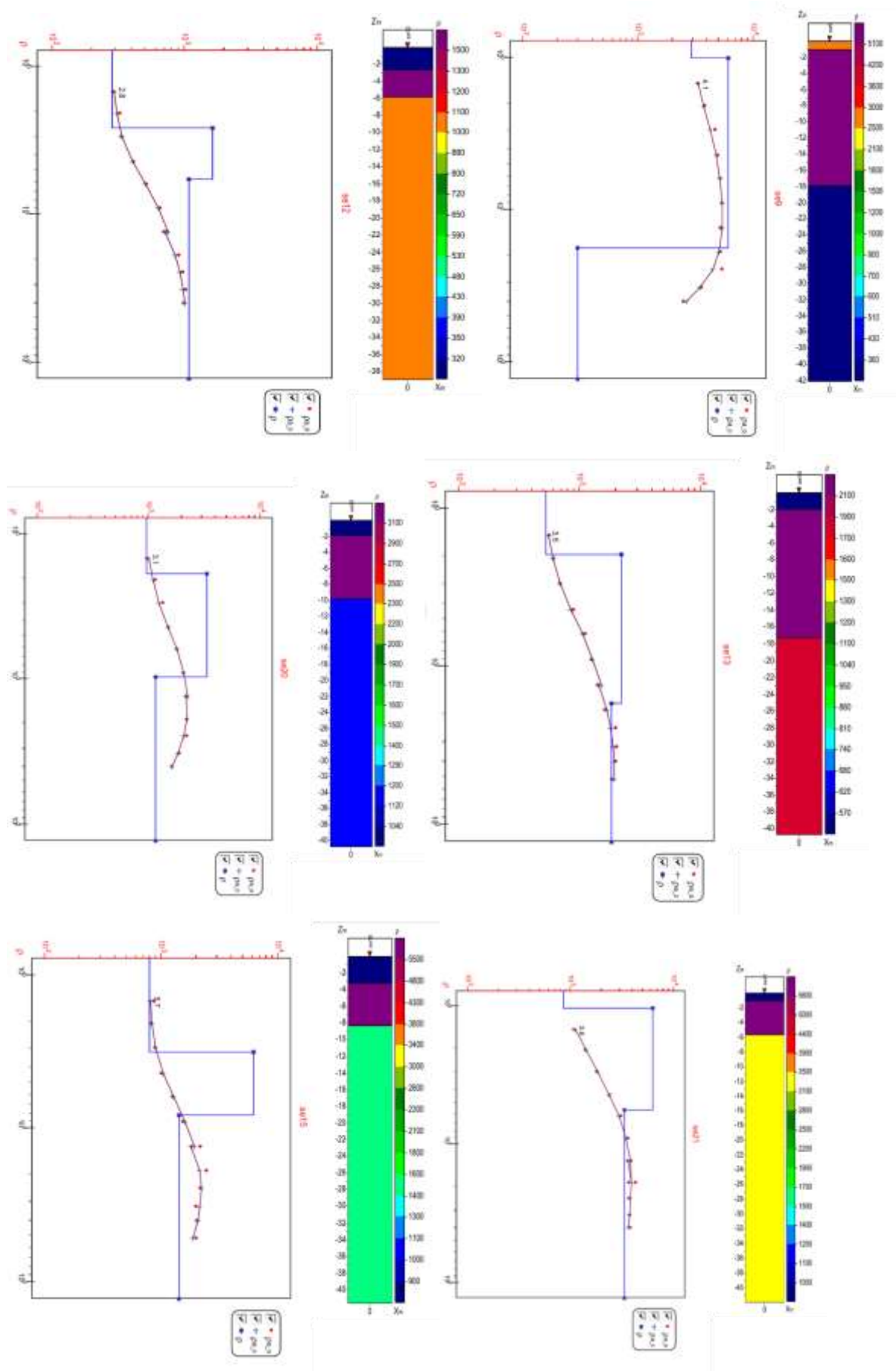


Figure 1 : Courbes de Sondage de type K

Annexe 6 :

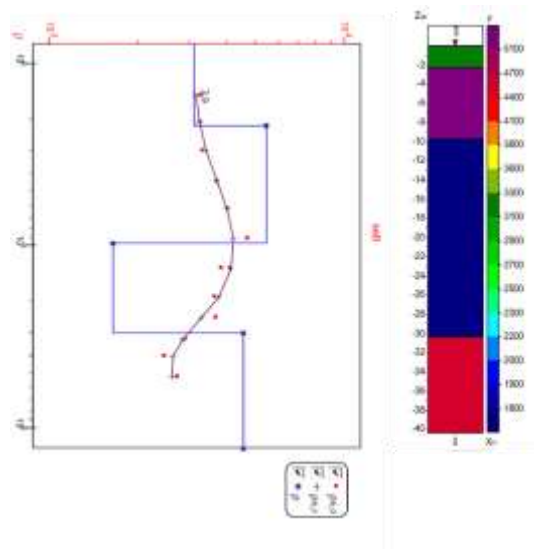


Figure 2 : Sondage de type KH

Annexe 7 :

Tableau 5 : Norme NF P 18-545 sur la codification des granulats

CATEGORIE	LA + MDE	LA	MDE
B	$LA + MDE \leq 35$	25	20
C	$LA + MDE \leq 45$	30	25
D	$LA + MDE \leq 55$	35	30
E	$LA + MDE \leq 80$	45	45

Tableau 6 : Applications des granulats catégorie E du massif rocheux d'Athe en construction routière (IDRRIM, 2013).

Usage	Fondation	Base
GNT	Utilisable pour les trafics T5 et T4	Utilisable pour les trafics T5
GTLH	Utilisable pour les trafics < T3, T3, T2	Utilisable pour les trafics < T3

Annexe 8 :

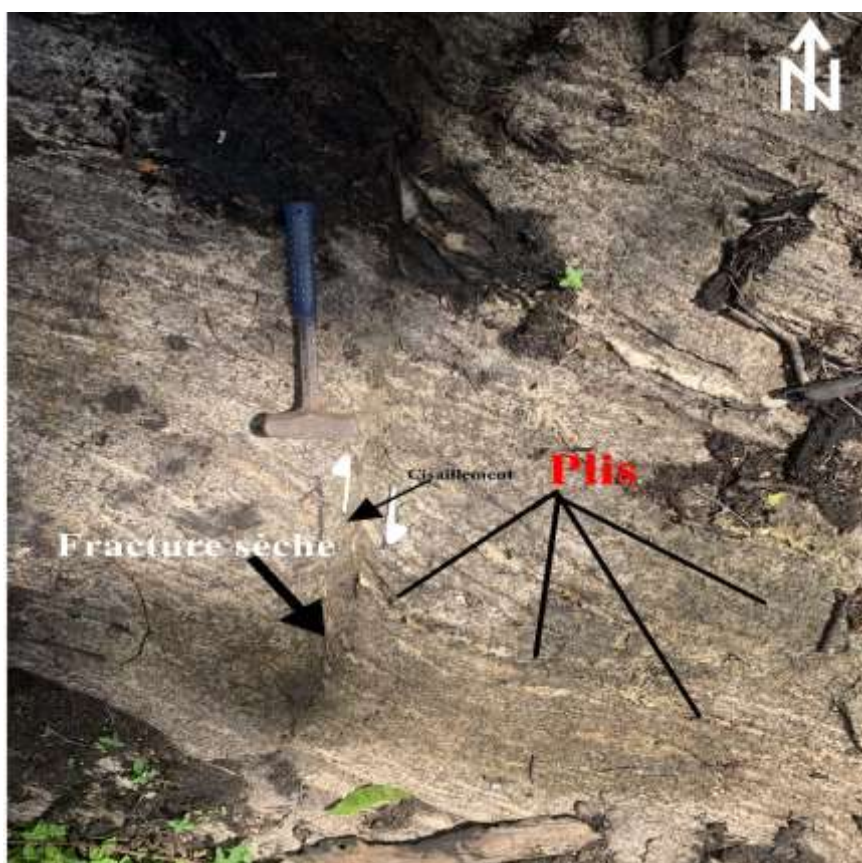


Figure 2 : Quelques structure observée sur le massif ; Cisaillement senestre d'attitude N180E73E

Annexe 9 :

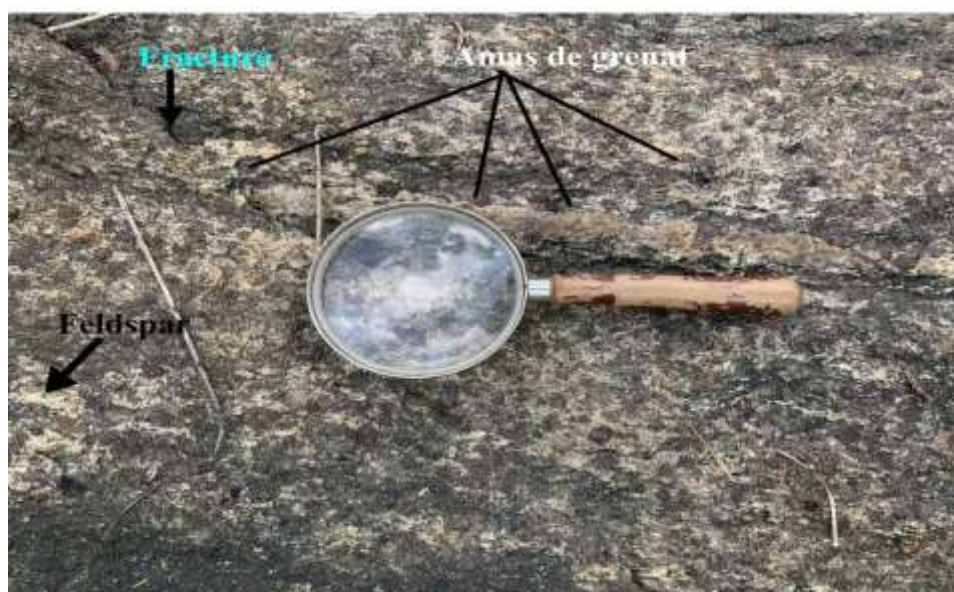


Figure 3 : Fracture observée sur le massif rocheux et l'amas de grenat

Annexe 10 :

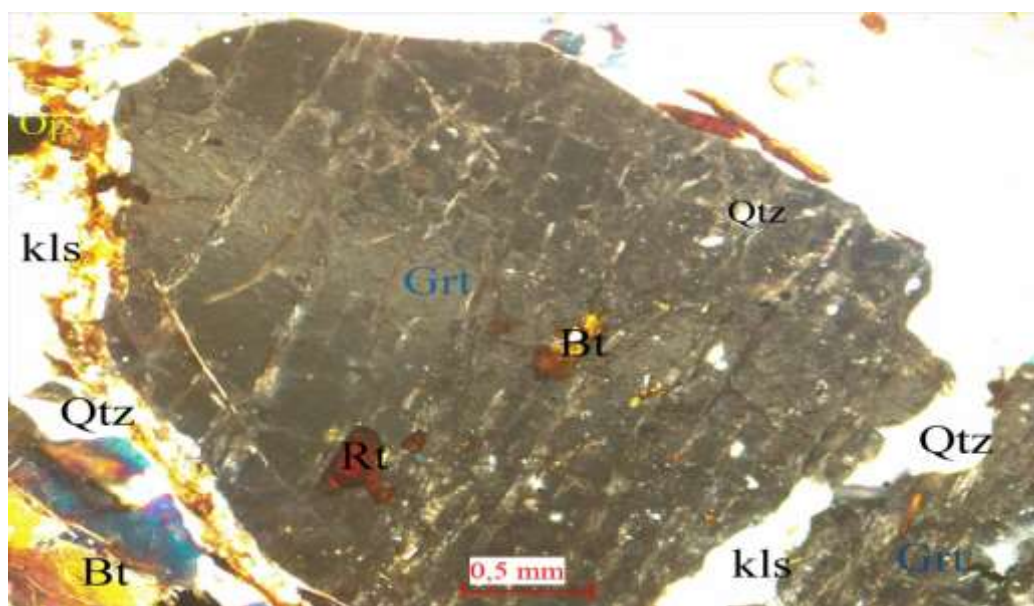
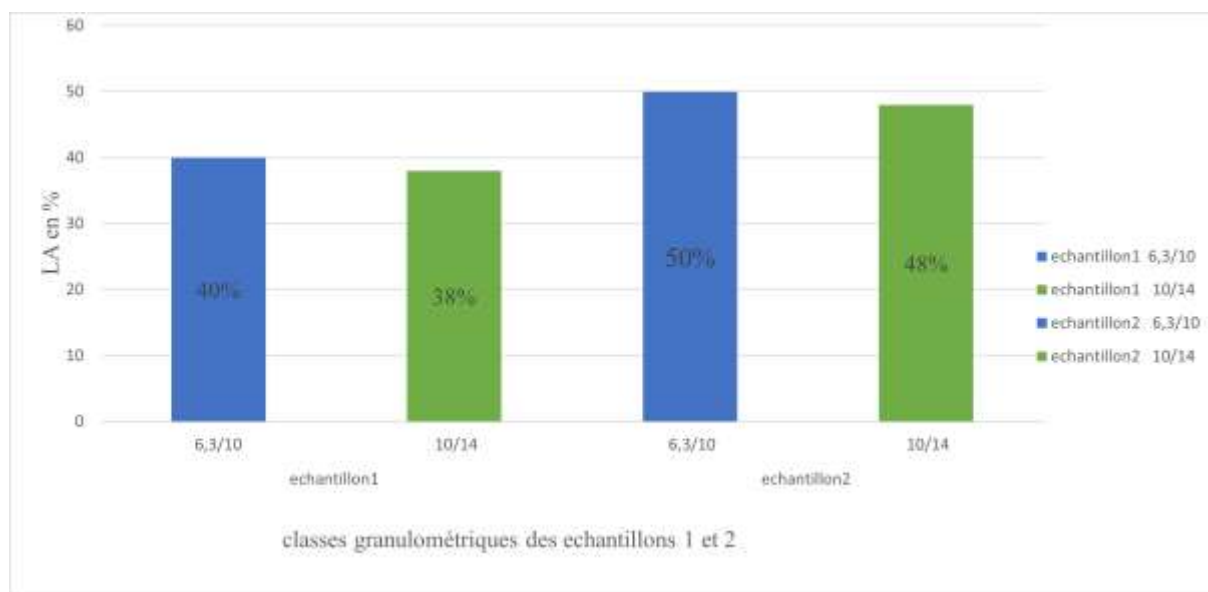


Figure 4 : Inclusion du quartz , biotite et du Ritule dans le grenat.

Annexe 11 :



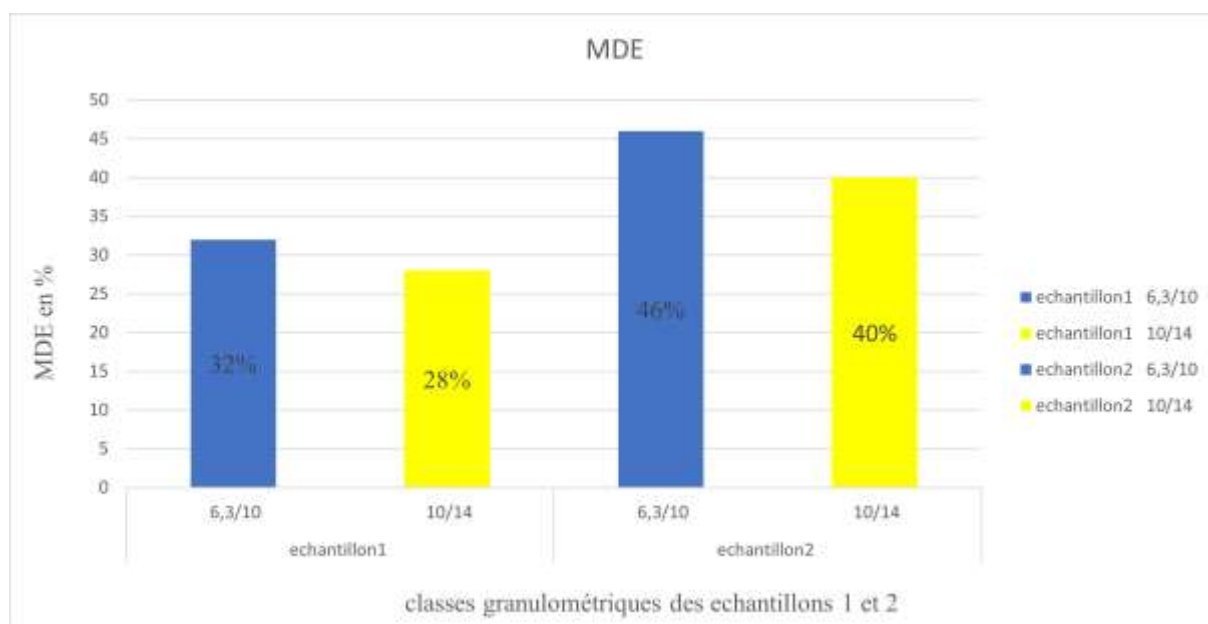


Figure 4 : Diagrammes des LA et MDE en fonction des classes granulométriques des deux échantillons

Annexe 12 :



Figure 5 : Observation au microscope des lames minces

Annexe 13 :



Figure 6 : Vue lointaine du massif rocheux orientation N088°E