

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix - Travail - Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTÉ DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE SCIENCES DE LA
TERRE

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
SCIENCES,

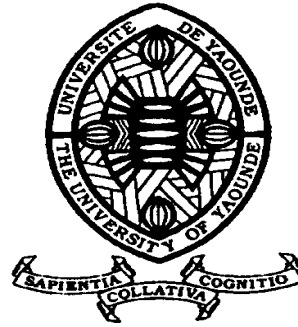
TECHNOLOGIE ET GEOSCIENCES

LABORATOIRE DES GEOSCIENCES

DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

ET

APPLICATIONS



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace - Work - Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

DEPARTMENT OF EARTH
SCIENCES

POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCES, TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES
LABORATORY OF

**Mise en évidence des relations entre déformations
tectoniques et minéralisations aurifères à l'aide de la
méthode audiomagnétotellurique (AMT) dans les
régions de Garga Sarali - Ndokayo, Est Cameroun**

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

Par : PEPOGO MAN-MVELE Augustin Didier,
MSc en Géologie

Sous la direction de
NDOUGSA MBARGA Théophile
Professeur, Université de Yaoundé I
MVONDO ONDOA Joseph
Maître de Conférences, Université de Yaoundé I

Année Académique : 2019-2020





**DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES**

**UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE DOCTORALE
EN GEOSCIENCES ET APPLICATIONS**

ATTESTATION DE CORRECTION DE THESE DE DOCTORAT/PhD

**Spécialité : Géosciences des Formations Superficielles
Option : Géologie Minière et Ressources Pétrolières**

Nom et Prénoms du candidat : PEPOGO MAN-MVELE Augustin Didier

Matricule : 05Q341

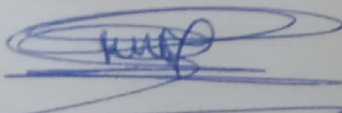
Titre de la thèse : « Mise en évidence des relations entre déformations tectoniques et minéralisations aurifères à l'aide de la méthode audiomagnétotellurique (AMT) dans les régions de Garga Sarali – Ndokayo, Est Cameroun »

Date de soutenance : Lundi, le 10 août 2020.

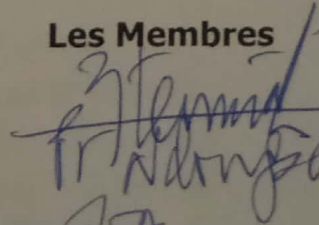
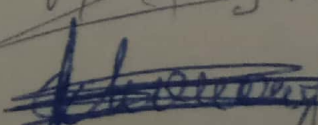
Nous, membres du jury, après avoir lu le document qui nous a été présenté, attestons que le candidat a effectué toutes les corrections, conformément aux observations formulées lors de la soutenance.

En foi de quoi, la présente **Attestation de correction** lui est délivrée, pour servir et valoir ce que de droit.

Le Président du Jury


Prof. Paul BILONG

Les Membres


J. MVONDO

J.P. TCHOUANDA

Dédicaces

*A la mémoire de mon feu papa Monsieur Maremvele Ekassi qui a
toujours su me montrer le chemin de la vie.*

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des enseignants du Département des Sciences de la Terre de l'université de Yaoundé¹ pour leurs efforts dans la formation du géologue que je suis devenu.

J'exprime ma gratitude envers le Professeur NDOUGSA MBARGA Théophile qui a initié et co-dirigé ce travail en me permettant d'intégrer son équipe du Laboratoire de géophysique et géoexploration de l'Université de Yaoundé I. Votre disponibilité malgré vos multiples fonctions, votre rigueur scientifique et dévouement au travail, vos critiques, votre modestie et surtout vos conseils en tant que père constituent la clé de succès de cette étude. Je ne saurais comment vous exprimer l'expression de ma profonde gratitude.

Mes remerciements au Professeur MVONDO ONDOA Joseph structuraliste, qui m'a accueilli au sein du Laboratoire de structural de l'Université de Yaoundé 1, et dès lors ne s'est jamais lassé de guider mes pas dans le monde de la recherche, ni de soutenir mes efforts dans l'achèvement de ce travail et surtout de me prodiguer des conseils. Je vous en suis profondément reconnaissant.

J'adresse toute ma reconnaissance au Chef de Département des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'Université de Yaoundé I, le Professeur NDJIGUI Paul Désiré pour son soutien permanent et ses conseils de parent.

Le Docteur BEKOA Etienne qui m'a aidé dans mes premiers pas dans le domaine de la géologie en me donnant la passion et l'amour pour ce corps tout aussi prestigieux. Je lui exprime ma profonde gratitude.

Je remercie les Professeurs ABOSSOLO Monique, YENE ATANGANA Quentin, EKOMANE Emile, ONANA Vincent, le Docteur ESSONO Jean, du Département des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'Université de Yaoundé I, pour vos conseils et soutiens. Je suis très reconnaissant pour tout ce que j'ai reçu auprès de vous.

Le Professeur BISSO Dieudonné, qui nous a fourni la logistique roulante nécessaire pour la collecte des données audiomagnétotelluriques. Je lui exprime ma profonde gratitude.

Je remercie tous les camarades et ami(e)s de l'Ecole Normale Supérieure de Yaoundé et du Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, le Professeur MEYING Arsène, les Docteurs GOUET Daniel, BIKORO Marcelin, MONO Jean Aimé, NTOUALA Firmin, BOAKA A KOUL Martin, ABATE Marcel, NGOUMOU Paul Claude, OWONO AMOUGOU

Olivier, Messieurs ASSEMBE Stéphane, NGOH Jean Daniel, EMBOLO EMBOLO Fabrice, MASSE Guy Alexandre pour leurs conseils et aide dans ma remise à niveau des principes physiques en général et des méthodes électriques et électromagnétiques en particulier.

Ma reconnaissance va aussi à l'endroit du Directeur Général de HARVEST MINING Co, Monsieur AVA Christophe pour l'appui logistique apporté pendant la campagne de prospection AMT. L'aboutissement de ce travail est le témoignage de la collaboration fructueuse entre l'académie et les sociétés minières privées.

Je remercie le sénateur, Dr Isabelle TOKPANOU « *mamie* », pour toute l'attention qu'elle me porte.

Ma profonde gratitude est également adressée aux personnalités scientifiques qui ont accepté spontanément d'examiner ce travail et les publications qui en découlent.

J'exprime toute ma reconnaissance (1) aux experts internes et externes des universités du Cameroun ayant validé les travaux de cette thèse ; (2) aux experts du journal *International Journal of Geophysics* pour respectivement, la validation et la publication de mes travaux dans leur maison d'édition et aux membres du jury pour tout le temps précieux qu'ils ont bien voulu sacrifier afin d'examiner le présent travail.

Je remercie profondément ma fiancée MBOUNGA SIGOUE Charline et ses parents pour leur soutien et leurs encouragements.

Je remercie mes frères et sœurs, pour tout le soutien qu'ils m'ont apporté tout au long de ce travail. Que Dieu ne vous oublie jamais et qu'il se souvienne de vous.

A Dieu soit la gloire...

A Jésus – Christ soit l'honneur...

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Table des matières	iv
Liste des Figures.....	vii
Liste des figures des annexes	xii
Liste des tableaux	xiii
Liste des abréviations et symboles	xiv
Résumé	xvi
Abstract	xvii
Introduction générale.....	1
Chapitre 1. Généralités sur le milieu naturel et travaux antérieurs	8
Introduction	9
I. Situation géographique	9
I.1. Localisation de la zone d'étude	9
I.2. Climat et végétation	10
I.3. Oro-hydrographie	10
I.4. Population et activités humaines	11
II. Cadre géologique et géodynamique	11
II.1. Bref historique sur la Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale	11
II.2. La Chaîne Panafricaine au Cameroun.....	12
II.2.1 Le domaine Nord et Ouest Cameroun	13
II.2.2 Le domaine Centre Cameroun ou domaine Adamaoua-Yadé.....	14
II.2.3 Le domaine Sud Cameroun ou domaine de Yaoundé.....	15
III. Contexte métallogénique : intérêt minier de la chaîne panafricaine au Cameroun.....	18
IV. Contexte géologique de la zone d'étude	21
IV.1 Formations sédimentaires.....	22
IV.2 Intrusions granitiques	23
IV.3 Roches métamorphiques.....	23
V. Aperçu géophysique	25
Conclusion.....	26
Chapitre 2. Matériels et méthodes.....	29

Introduction	30
I. Méthodes.....	30
I.1 Revue de la littérature	30
I.2 Travaux en laboratoire et de terrain	30
I.2.1 Méthodes d’analyse des images satellitaires pour la mise en évidence des éléments structuraux.....	30
I.3 Méthode de levé géologique et structural, cartographie des sites miniers et d’évaluation des teneurs	36
I.4 Méthodologie de la prospection géophysique	37
I.4.1 Généralités sur les méthodes de prospection géophysique.....	37
I.4.2 Objet et principales méthodes de la prospection géophysique	38
I.4.3 Généralités sur les méthodes de prospection électromagnétique	40
I.4.4 Méthode audiomagnétotellurique (AMT).....	41
I.4.5 Equations de Maxwell (cas de sous-sol tabulaire).....	44
I.4.6 Hypothèses simplificatrices	44
I.4.7 Approche de Niblett.....	45
I.4.8 Approche de Bostick	46
I.4.9 Equivalence entre la transformation de Bostick et l’approximation de Niblett.....	48
I.4.10 Origine du signal	50
I.4.11 Mise en œuvre sur le terrain	50
I.4.12 Représentation et modélisation des données	54
II. Matériels de terrain.....	56
Conclusion.....	57
Chapitre 3. Résultats	58
Introduction	59
I. Traitement, analyse de l’imagerie satellite de la zone de Garga Sarali - Ndokayo et implications structurales.....	59
I.1 Extraction des linéaments.....	61
I.2 Analyse statistique et caractérisation des linéaments.....	65
I.2.1 Analyse et caractérisation quantitative des linéaments	65
I.2.2 Analyse et caractérisation qualitative des linéaments	67
II. Implication structurale et tectonique	70
Conclusion.....	75
III. Caractérisation géologico-structurale et évaluation du potentiel artisanal minier	78
III.1 Prospection géologique et structurale.....	78

III.2 Cartographie des sites miniers	89
III.3 Evaluation des teneurs des sites d'exploitation artisanale	90
III.3.1 Prospect A	98
III.3.2 Prospect B	98
III.3.3 Prospect C	98
III.3.4 Prospect D	104
Conclusion.....	104
IV. Sondages audiomagnétotelluriques dans la zone de Garga Sarali - Ndokayo	105
IV.1 Interprétation des résultats de la collecte des données audiomagnétotelluriques de la zone de Garga Sarali – Bétaré Oya.....	105
IV.1.1 Résultats de la prospections géophysique par AMT.....	105
IV.1.2 Description des profils.....	105
IV.1.3 Traitement et interprétation des données AMT	109
IV.1.4.5 Section géoélectrique.....	142
Conclusion.....	145
Chapitre 4. Discussion.....	148
Introduction	149
I. Validités des données et des résultats	149
I.1 Validité des résultats de la collecte des données géologiques et minières et sur l'analyse des images satellitaires.	149
I.2 Validité des résultats d'AMT	149
II. Discussion des résultats	151
II.1 Caractérisation des éléments structuraux mis en évidence par l'analyse satellitaire des images LANDSAT OLI 8.....	151
II.2 Corrélation entre les linéaments structuraux et la cartographie des sites miniers aurifères.....	153
II.3 Caractérisation structurale du sous-sol par la méthode audiomagnétotellurique (AMT).....	156
Conclusion.....	157
Conclusion générale et perspectives.....	159
Conclusion générale	160
Perspectives	163
Références bibliographiques	165
1. Quelques photo de terrains	179
2. Publications issues de la thèse.....	181

Liste des Figures

Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude.	9
Figure 2: Carte oro-hydrographique et bloc diagramme de la zone d'étude.....	11
Figure 3: Reconstruction pré-drift des formations panafricaines et brésiliennes (In Ganno et al., 2010). CCSZ : Cisaillement Centre Camerounais ; ASZ : Zone de Cisaillement d'Adamaoua ; BOSZ : Zone de Cisaillement de Bétaré-Oya ; SF : Faille de la Sanaga ; TBF : Faille de Tibati Banyo ; PA : Faille de Patos ; PE : Zone de Cisaillement de Pernambuco.	16
Figure 4 : Unités litho-structurales majeures du Cameroun (d'après Toteu et al., 2004). NWC : North West Cameroon ; TBF : Tchollire Banyo Fault ; AF : Adamawa Fault ; AYD : Adamawa-Yade Domain ; SF : Sanaga Fault ; YD : Yaounde Domain ; KCF : Kribi Campo Faut ; CC : Congo Craton.	17
Figure 5: Modèle géodynamique post-collisionnel entre le CFAB et le Craton du Congo (d'après Toteu et al., 2004).....	17
Figure 6: Contexte tectonique des gisements aurifères connus (d'après Groves et al., 1998).	20
Figure 7: Carte géologique de la zone d'étude (modifiée d'après Gazel & Gerard, 1954).....	22
Figure 8: Coupe géologique schématique de la zone de Bétaré-Oya (In Kankeu et al., 2006).	25
Figure 9: Contexte structural régional du Cameroun (In Suh et al., 2006).	28
Figure 10: Chaîne de traitement de la scène Landsat OLI 8.	34
Figure 11: Matrice des différents filtres (In Yesou et al., 1993).....	36
Figure 12 : Le champ magnétique terrestre (Univ. Paul Sabatier, 2000).....	39
Figure 13 : Schéma du principe de la méthode AMT. (D'après IRD, 2002).	42
Figure 14: Graphique des harmoniques de corrélation des signaux d'une station (d'après Meying et al., 2009).....	52
Figure 15: Dispositif expérimental de collecte des données avec le Stratagem EH4 (a). Antenne d'amplification du signal (b) (Geometrics, 2000).....	53
Figure 16: une vue de l'équipement utilisé dans le cadre de la présente étude. L'équipement Stratagem (a) et les principaux instruments de prospection géologique (b).....	57
Figure 17: Image en composition R4G3B2 de la zone d'étude Garga Sarali – Bétaré - Oya..	60

Figure 18: Carte des linéaments détaillés et de la rose directionnelle des vents sur les formations des schistes du Lom (à gauche) et sur les granitoïdes (à droite) du secteur Garga Sarali – Bétaré – Oya.	63
Figure 19: Carte des linéaments et trajectoires de foliation du secteur Garga Sarali – Bétaré - Oya.....	64
Figure 20: Histogramme de distribution des longueurs et des directions azimutales des linéaments du secteur Garga Sarali – Bétaré-Oya.	66
Figure 21: Histogramme de distribution des longueurs maximales et minimales et des directions azimutales des linéaments du secteur Garga Sarali – Bétaré-Oya.....	67
Figure 22: Carte des linéaments et principales failles du secteur Garga Sarali – Bétaré - Oya.	68
Figure 23: Illustration d'un modèle de cisaillement de type Riedel et les structures secondaires se développant à partir d'un décrochement senestre (droite). Schémas montrant les relations géométriques existant entre les failles et les structures microtectoniques associées (gauche) (Davis et al., 2000).....	70
Figure 24: Carte structurale du district de Garga-Sarali – Bétaré Oya, illustrant le cisaillement principal (c) et les structures en cisaillement du système Riedel (P, P', R et R').	72
Figure 25: Carte structurale du district de Garga-Sarali – Bétaré Oya, mettant en évidence les trajectoires de foliation et illustrant le cisaillement principal (c) et les failles du système Riedel (P, P', R et R')......	73
Figure 26: Carte structurale du district de Garga-Sarali – Bétaré Oya, combinant les trajectoires de foliations et les linéaments illustrant le cisaillement principal (c) et les failles du système Riedel (P, P', R et R').	74
Figure 27: Carte géologique de la zone d'étude montrant la foliation des séries métamorphiques ressortit par l'étude des images satellitaires (modifiée d'après Gazel et Gérard, 1954 ; Kankeu et al., 2006).	76
Figure 28: Carte géologique et rosace de direction illustrant l'orientation majeure NE-SW de la zone d'étude (In Gazel et Gérard, 1954 ; Kankeu et al., 2006).	77
Figure 29: Dalle de cuirasse fortement indurée (A) ; massif granitique dans le village Oudou (B) ; blocs de granito-gneiss dans le lit d'un cours d'eau de Garga Sarali (C) ; Quartzite fortement fracturé (D) présentant des décrochements dextres et senestres (E).	80
Figure 30 : Quelques structures observées dans la zone d'étude. Intrusion quartzitique dans une dalle granitique dans la zone de Garga Sarali (A) ; bloc de granito-gneiss dans le	

village Oudou (B) ; formation schisteuse du Lom (C) ; foliation et plissement affectant une formation granitique dans la zone de Garga Sarali (D).	80
Figure 31 : Fente de tension dans une intrusion granitique dans la localité de Garga Sarali sous un régime de structure en cisaillement de type Riedel (R, R', P et P').	81
Figure 32 : Affleurement de quartzite fracturé montrant des décrochements dextre et senestre dans les environs de Ndokayo.	81
Figure 33: Diagrammes stéréographiques de schistosité mylonitique (points noirs) et des plis (points rouges). Stéréogramme des pôles et des traces cyclographiques et rosace de direction.	82
Figure 34: Diagrammes stéréographiques de fracturations illustrant le stéréogramme des pôles et la rosace de direction de la fracturation.	83
Figure 35: Diagrammes stéréographiques des axes de plis : (a) stéréogramme des pôles des axes de plis, (b) rosace de direction des axes de plis.....	83
Figure 36: Diagrammes stéréographiques de la foliation : stéréogramme des pôles et des traces cyclographiques de la foliation (à gauche), rosace de direction de la foliation (à droite).....	84
Figure 37 : Carte des points de mesures structurales (plan de foliation, axe de plis, schistosité, fracturation) sur fond géologique.	85
Figure 38 : Carte de l'orientation des plans de foliations dans le secteur de Bétaré Oya.	86
Figure 39 : Carte de l'orientation des axes de plis dans le secteur de Bétaré Oya.	87
Figure 40 : Carte de l'orientation des plans de fractures dans le secteur de Bétaré Oya.	88
Figure 41: Carte de localisation des sites d'exploitation aurifère dans la zone d'étude.	89
Figure 42: Profil d'altération dans un site d'exploitation aurifère	91
Figure 43: Gravier minéralisé (veines de quartz oxydés) dans le secteur de Garga Sarali (à gauche). Un échantillon de veine de quartz oxyde et fracture (à droite).	91
Figure 44: Cartes de distribution des teneurs des sites cartographiés de la zone Garga Sarali – Bétaré Oya.	93
Figure 45: Carte des indices et teneurs des sites cartographiés de la zone Garga-Sarali – Bétaré Oya assortie des fractures du système de Reidel.	95
Figure 46: Carte des indices et teneurs aurifères sur fond géologique du district aurifère Garga Sarali – Bétaré Oya.	97
Figure 47 : Carte des prospectes	99
Figure 48 : Carte du prospect A	100
Figure 49 : Carte du prospect B	101

Figure 50 : Carte du prospect C	102
Figure 51 : Carte du prospect D	103
Figure 52: Carte de localisation des stations AMT sur fond géologique et minier.....	107
Figure 53: Tests de dimensionnalité (résistivité et phase) des stations oud4 du profil Oudou profile (b). [mode TE (o); mode TM (□)]......	109
Figure 54: Courbes de résistivité, de phase, de cohérence et de la résistivité vraie pour un sondage test.....	110
Figure 55: Profilage de résistivité de Bostick du profil Ndokayo dans le domaine des hautes fréquences (proche surface).....	112
Figure 56: Profilage de résistivité de Bostick du profil Ndokayo dans le domaine des basses fréquences (profondeur).	112
Figure 57: Profilage de résistivité de Bostick du profil Garga Sarali dans le domaine des hautes fréquences (proche surface).....	114
Figure 58: Profilage de résistivité de Bostick du profil Garga Sarali dans le domaine des basses fréquences (profondeur).	114
Figure 59: Profilage de résistivité de Bostick du profil Oudou dans le domaine des hautes fréquences (proche surface).....	116
Figure 60: Profilage de résistivité de Bostick du profil Oudou dans le domaine des hautes fréquences (sub-surface).....	116
Figure 61: Carte de résistivité apparente à 20 Hz.	118
Figure 62: Carte de résistivité apparente à 31.6 Hz.	119
Figure 63: Carte de résistivité apparente à 39.8 Hz.	119
Figure 64: Carte de résistivité apparente à 79.4 Hz.	120
Figure 65: Carte de résistivité apparente à 200 Hz.	120
Figure 66: Carte de résistivité apparente à 794 Hz.	121
Figure 67: Carte de résistivité apparente à 3980 Hz.	121
Figure 68: Carte de résistivité apparente à 5100 Hz.	122
Figure 69: Carte de résistivité apparente à 25100 Hz.	122
Figure 70: Carte de résistivité apparente à 51000 Hz.	123
Figure 71: Pseudo-section de résistivité apparente du profil Ndokayo.....	125
Figure 72: Pseudo-section et de phase du profil Ndokayo.	125
Figure 73: Courbes de sondage à 4 couches (station Nd1).	126
Figure 74: Courbes de sondage 0 4 couches (station Nd2).	127
Figure 75: Courbes de sondage à 3 couches (station Nd3).	128

Figure 76: Courbes de sondage à 4 couches (station Nd4).	129
Figure 77: Courbes de sondage à 4 couches (stations Nd5).	129
Figure 78: Pseudo-section de résistivité apparente du profil Oudou.	131
Figure 79: Pseudo-section de phase du profil Oudou.	131
Figure 80: Courbes de sondage à 3 couches (station Oud1)	132
Figure 81: Courbes de sondage à 3 couches (station Oud2).	133
Figure 82: Courbes de sondage à 4 couches (station Oud3).	133
Figure 83: Courbes de sondage à 3 couches (station Oud4).	134
Figure 84: Pseudo-section de résistivité apparente du profil Garga Sarali.	136
Figure 85: Pseudo-section de phase du profil Garga Sarali.	136
Figure 86: Courbes de sondage à 4 couches (station GS1).	137
Figure 87: Courbes de sondage à 4 couches (station GS2).	138
Figure 88: Courbes de sondage à 4 couches (station GS3).	138
Figure 89: Courbes de sondage à 4 couches (station GS4).	139
Figure 90: Courbes de sondage à 4 couches (station GS5).	140
Figure 91: Courbes de sondage à 5 couches (station GS6).	140
Figure 92: Courbes de sondage à 4 couches (stations GS7).	141
Figure 93: Section géoélectrique du profil Ndokayo.	142
Figure 94: Section géoélectrique du profil Oudou.	143
Figure 95: Section géoélectrique du profil Garga Sarali ressortant les failles F1 et F2.	145
Figure 96 : Carte structurale de la zone d'étude intégrant le réseau de faille (Kongolo- Ndokayo) mise en évidence par la prospection AMT.	146
Figure 97 : Carte géologique de la zone d'étude intégrant le réseau de failles supposés (F1 et F2) mise en évidence par la prospection AMT.	147

Liste des figures des annexes

Figure annexe 1: Une vue de la prise de données par l'équipe (gauche) et de console AMT (droite).	179
Figure annexe 2: Une vue du module analogique (gauche) et de l'équipe lors de la prise de mesure.....	179
Figure annexe 3: Equipe de collecte en arrêt dans le village Woumbou (gauche). Présentation de la plaque indicative de la ville de Bétaré Oya.	179
Figure annexe 4: Une vue de l'antenne permettant d'intensifier le signal (gauche). Le candidat connectant le module aux câbles.	180
Figure annexe 5: Prise de mesure sur une dalle granito gneissique dans la localité de Oudou – Garga Sarali.	180
Figure annexe 6: Une vue de la dalle granito gneissique.	180

Liste des tableaux

Tableau 1: Données climatiques Bétaré-Oya.	10
Tableau 2: Caractéristiques des bandes LANDSAT OLI 8 (RGB 432) utilisées dans cette étude.....	32
Tableau 3: Classification des linéaments par valeur angulaire de 22,5°.	69
Tableau 4: Classification des linéaments par famille directionnelle.....	69
Tableau 5: Coordonnées des sites cartographiés dans le secteur Garga Sarali – Bétaré Oya. .	92
Tableau 6: Distance entre les profils AMT.	106
Tableau 7: Localisation géographique des profils Ndokayo, Garga Sarali et Oudou.	108

Liste des abréviations et symboles

ρ_a : Résistivité moyenne apparente

\vec{j} : Densité du courant électrique

$\vec{\nabla}$: Opérateur vectoriel différentiel nabla

\vec{E} : Vecteur champ électrique de l'onde

\vec{H} : Vecteur champ magnétique de l'onde

° : Degrée Celsius

2D : 2 Dimension

3D : 3 Dimension

ACP : Analyse en Composantes Principales

AMT : Audio-magnétotellurique

ASM : Anisotropie de la Susceptibilité Magnétique

ASZ : Zone de cisaillement d'Adamaoua

BOSZ : Zone de Cisaillement de Bétaré-Oya

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière

C : Cisaillement

CC : Craton du Congo

CCC: Cisaillement Centre Camerounais

CRIRSCO: Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards

E : Champ tellurique

ETM : Enhance Thematic Mapper

g/t : gramme par tonne

GPS : Global Positioning System

GS_n : Station sur le profil Garga Sarali

H : Champ magnétique

h : Profondeur

JORC: Join Ore Reserves Committee Code

L : Linéation

MT : Magnétotellurique

Nd_n : Station sur le profil Ndokayo

Oud_n : Station sur le profil Oudou

PA : Faille de Patos ;

PNUD : Programme des Nations Unis pour le Développement

PRECASEM : Projet de Renforcement des Capacités du Secteur Minier

R.C.A : République Centrafricaine

SF : Faille de Sanaga ;

SIG : Système d'Information Géographique

TBF : Faille de Tibati Banyo ;

TDEM : Time Domain Electromagnetic Methods

TE : Transverse électrique

TM : Transverse magnétique

UTM : Universal Transverse Mercator

WGS : World Géodésique Système

Z : Profondeur de pénétration

ρ_{\parallel} : Résistivité apparente en mode transverse magnétique

ρ_{\perp} : Résistivité apparentes en mode transverse électrique

$\rho_B(\mathbf{h})$: Résistivité de Bostick

σ : Conductivité électrique

σ_a : Conductivité apparente

Résumé

De nouvelles informations géologiques, structurales et minières ont été mises en évidence dans la zone fortement latéritique couvrant les localités de Garga Sarali et Bétaré-Oya à travers une méthodologie de prospection multidisciplinaire à travers une cartographie prédictive qui consiste à travers les outils SIG de corréler plusieurs résultats afin de définir des zones ayant un intérêt métallogénique. Notamment, une étude des images satellites pour ressortir l'ensemble des linéaments et leur orientation, une cartographie géologique avec la collecte des teneurs en or (Au) sur les sites d'exploitation et enfin une prospection géophysique des formations profondes par la méthode audiomagnétotellurique (AMT).

L'appareillage utilisé est un récepteur de marque STRATAGEM EH4 du constructeur Geometrics, dont les fréquences vont de 20Hz à 50000Hz. Des précautions ont été prises pour minimiser les incertitudes dans la prise de mesure issues des 16 stations AMT le long de 03 profils, recoupant les formations du domaine de l'Adamaoua Yadé (ADY) auquel appartient la zone d'étude.

L'interprétation des données s'est faite grâce à des programmes et logiciels appropriés (Arc GIS 10.3, Rock Works 15, IPI2WIN-MT, Resistivity Plotter 1.2) et l'analyse des tests de dimensionnalité ont démontré que les structures sont de dimension 2D à 3D.

La lithologie de la zone est constituée de formations sédimentaires, d'intrusions granitiques, de gneiss plus ou moins migmatites, de schistes et d'enclaves. La cartographie géologique et minière de la zone d'étude a permis d'identifier 126 sites aurifères de teneur moyenne de l'ordre de 1,54 g/t après lavage à la bâteau.

L'analyse et l'interprétation des images satellites de type LANDSAT OLI 8 du 1er février 2019 ont permis d'individualiser 1149 structures linéaires regroupées en huit (08) classes suivant les principales directions de la rosace de direction. La géométrie des structures linéaires confirme la présence d'un système de fractures de type Riedel marqué par des cisaillements dextre et senestre.

L'analyse et l'interprétation des données AMT démontrent l'hétérogénéité lithostratigraphique en profondeur de la zone marquée par les formes irrégulières des formations géoélectriques et la présence à des profondeurs de plus de 1000 mètres de formations tant résistives que conductives. Cette hétérogénéité renseignerait sur le prolongement du chevauchement du Panafricain sur le Craton du Congo au-delà du parallèle 04°N latitude. Des discontinuités électriques assimilables à des failles ont été identifiées. Notamment, au niveau de la station Nd4 du profil Ndokayo et au niveau des stations GS4 et GS6 du profil Garga Sarali. La corrélation ainsi faite a permis d'établir la présence d'un réseau de nouvelles failles profondes au-delà 400 mètres au niveau de Garga Sarali et à environ 800 mètres au niveau de Ndokayo, orienté NE-SW et qui peut être interprété comme étant les prolongements de la faille de la Sanaga.

La corrélation de tous les résultats de la présente étude a permis d'identifier quatre (04) prospects des zones prédictives marquées par des teneurs aurifères assez considérables. Ces zones qui correspondent aux intersections de fractures métallogènes représentées par les cours d'eau Lom, Guingé, Sara qui sont les signatures de fractures profondes et métallotectes qui sont des structures pièges à métaux. Il peut être établi que dans le corridor Garga-Sarali – Bétaré Oya, les minéralisations aurifères observées et faisant l'objet de l'intense activité d'exploitation artisanale sont contrôlées par des structures géologiques qui sont les marqueurs d'une déformation intense reconnue aux événements panafricains ayant affectées les formations du domaine de l'Adamaoua – Yadé (ADY).

Mots clés : *AMT, Stratagem EH4, Chaîne panafricaine, minéralisation aurifère, Garga-Sarali, Ndokayo, Adamaoua-Yadé.*

Abstract

New geological, structural and mining data was put in evidence in the strongly weathered lateritic terrane covering the localities of Garga Sarali and Ndokayo through a tactical multidisciplinary prospecting methodology using GIS technics to define predictive metallogenic targets. In particular, a study of the satellite images to arise the whole of the structures and their orientation, a cartography of the formations and mining sites with an evaluation of the gold grade and finally a geophysical prospection by the audiomagnetotellurics sounding (AMT).

The equipment used is a STRATAGEM EH4 receiver from Geometrics, whose frequencies ranging 20 Hz to 50000 Hz. We took precautions to minimize uncertainties as well in the acquisition from the 16 stations AMT along 03 profiles, cross cutting Panafrican formations of the East Cameroon.

We used appropriate programs for the interpretation of the collected data and the analysis of the dimensionality tests shows that the structures are 2D to 3D.

The lithology of the study area consists of sedimentary formations, granitic intrusions that crossed the metamorphic formations. These intrusions are either in the form of small-insulated solid masses, or in the form of granitic dyke and of pegmatites, which would represent the ultimate magmatic phase; metamorphic granito-gneiss rock made up, migmatite, schists, and enclaves (basic schists and materials). The mapping of the zone enables to identify approximately 126 gold bearing sites with an average content of 1.54 g/t.

The interpretation and analysis of LANDSAT OLI 8 image from the February 1, 2019 identified 1149 linear structures. The distribution by directional family led to the individualization of eight (08) main structural family's trend. The geometry of the structures highlights a senestral and dextral sliding corresponding to the Riedel fractures system.

The analysis of AMT data highlights the deeply litho-stratigraphic heterogeneity of geoelectrical formations with irregular shape and the presence up to 1000 meters depth of both conductive and resistive formations. This heterogeneity shows the prolongation of the overlapping of the Congo Craton on Panafrican beyond the parallel 04°N latitude and electric discontinuities assimilated as faults. In particular, on the Nd4 station of the Ndokayo profile and on the stations GS4 and GS6 of the profile Garga Sarali. The correlation therefore made it possible to establish the presence of a network of new deeper faults (> 400 meters) on the Garga Sarali and up to 800 meters on the Ndokayo profile with a NE-SW direction interpreted as the prolongations of the Sanaga Fault.

The correlation of all the relevant results of this study enables to identify four (04) targets marked by rather considerable gold bearing contents. The targeting zones that correspond to the intersections of metallogenic structure represent by rivers (Lom, Guingé, Sara) which are the subsurface signature of deeper fractures and metallotect structures considered as metal traps. Finally, we can assume that gold bearing mineralization observed and subject of the intense artisanal exploitation activity in the Garga-Sarali – Bétaré Oya's area, is controlled by the intersection of geological structures (metallogenic and metallotect), which are the indicators of an intense deformation liable to the tectonic events having affected the formations of the Adamawa – Yade domain (ADY).

Key words: AMT, Stratagem EH4, Panafrican belt, gold mineralization, Garga-Sarali, Ndokayo, Adamawa-Yade domain.

Introduction générale

*« La sagesse, ce n'est pas qu'être patient, c'est aussi ne jamais
laisser l'impatience triompher »,
Hanluo Taihan*

Le Cameroun a un fort potentiel géologique pour un certain nombre de minerais. Une meilleure gestion de ce potentiel pourrait contribuer à sa croissance économique. On identifie d'importants gisements de minerai de fer, de bauxites, de diamants, de calcaire, de rutile, de cobalt nickel et des indices d'or dont l'exploitation particulièrement artisanale est connue depuis les années d'indépendance. Cependant, en dépit de l'existence de ce fort potentiel, l'industrie minière ne joue pas encore un rôle majeur dans le développement du Cameroun, et le secteur minier reste en marge de l'économie. Le Cameroun est actuellement à un tournant important en ce qui concerne le développement du secteur minier. Une bonne maîtrise du cycle des opérations minières et des techniques d'exploration permettrait une connaissance plus poussée du potentiel minier à travers une meilleure compréhension de la métallogénie et des modèles de mise place de ces minéralisations qui sont une source de provision économique dont la gestion des bénéfices qui en découleraient contribuerait à accroître la participation de l'industrie minière au produit intérieur brute (PIB) qui se situe à l'heure actuel à 1%. L'industrie minière camerounaise repose à ce jour sur plus de 200 permis de recherche, 300 permis d'exploitation artisanale semi-mécanisée, 05 permis d'exploitation et des conventions minières en cours de finalisation. Les substances recherchées sont le fer, les pierres précieuses et semi-précieuses, la bauxite, l'uranium, le cobalt nickel, l'or, etc. Toutefois, on observe une prédominance de l'or parmi les substances qui font l'objet de la ruée des opérateurs dans le secteur minier. Ceci trouve son explication dans l'histoire des peuples où l'or a toujours eu une place importante dans la puissance des nations, car elle a une valeur économique et marchande inégalée. La force et la stabilité d'un état se mesurant par ses réserves en or dont le prix actuel se situe dans les 1672 dollars l'once et des prévisions estiment que ce prix atteindra les 2000 dollars l'once en 2020. En effet, selon les derniers chiffres du *world gold council*, la demande mondiale d'or s'est établie à 1053 tonnes au premier trimestre 2019, contre 984 tonnes sur la même période de 2018, soit une progression de 7%. Cet ensemble d'informations justifie la forte demande des permis miniers sur l'or au Cameroun. Les activités de recherches minières nécessitent la mobilisation de moyens assez importants, qui font appel à l'usage des méthodes d'investigation moderne permettant de mieux comprendre le contexte géologique et les événements tectoniques ayant conduit à la mise en place des minéralisations économiquement rentables dans l'optique de l'ouverture des mines de type industrielle, plus profitable pour l'économie tels que cela est fait dans les pays à tradition minière (Canada, Chili, Australie, Afrique du Sud, Ghana, Burkina Faso, etc.).

Au nombre de ces méthodes d'investigation, on a (i) la prospection géologique et minière qui permet d'étudier les ensembles géologiques en établissant les relations entre eux

dans l'optique de définir des zones de concentrations en substances naturelles. Pour y parvenir, elle fait appel d'après [Eno Belinga \(1986\)](#) à de nombreuses disciplines la rendant une science complète. Ainsi, elle emprunte sans discrimination aux autres sciences à savoir : les mathématiques, l'astronomie, la physique, la chimie, la biologie et l'informatique ; (ii) la géophysique qui se présente alors comme une discipline des géosciences qui, à travers son application, utilise toutes les méthodes qualitatives et quantitatives de la physique pour obtenir des informations sur les parties interne et externe du globe. Dans le domaine de la géophysique appliquée, l'investigation s'intéresse à l'identification et à l'évaluation d'une part, des ressources naturelles (prospections pétrolière et minière, hydrogéologie, pédologie, génie civil et même archéologie), et d'autre part, à la connaissance de la structure interne du globe terrestre en mettant en évidence des zones d'accidents structuraux, en déterminant les zones potentielles à risques naturels et les zones d'accumulation des polluants relevant des activités humaines. De ce fait, elle couvre aussi bien la proche surface que les couches profondes. Enfin et plus récemment (iii) la télédétection et les SIG appliqués à la géologie et à la recherche des ressources naturelles du sol et du sous-sol.

Un constat montre que les opérateurs du secteur minier camerounais bien que sollicitant les permis de recherche, optent plus pour les activités d'exploitation semi-mécanisée qui se limitent aux dépôts superficiels de type alluvionnaire et éluvionnaire, qui dans le contexte géologique reconnu aux pays de la zone intertropicale sont caractérisés par un fort couvert latéritique qui atteint parfois les 30 mètres de profondeurs, au détriment de la recherche des sources primaires plus profondes qui présentent une valeur économique plus importante sur le long terme. Ces opérateurs qui se ruent tous vers les activités d'exploitation des dépôts superficiels de type alluvionnaire et éluvionnaire font usage de techniques de prospection par tâtonnement qui impactent sur l'environnement (sonde, bâchée, ouverture des puits d'exploitation à l'aide des excavateurs). Un certain nombre de faits pourrait justifier ce constat. Le manque d'expertise avérée, l'absence d'une méthodologie d'exploration reconnue dans les standards internationaux (JORC, CRIRSCO, etc.) qui consacrent les bonnes pratiques gouvernant le secteur des industries extractives, l'absence des équipements adéquats, l'absence d'infrastructures routières et énergétiques conséquentes.

Le Cameroun est reconnu comme étant un « scandale géologique et minier » à travers l'ensemble des indices mis en évidence (PNUD, BRGM et PRECASEM) dans un contexte géologique caractérisé par des accidents majeurs (BOSZ, CCSZ, SF, TBF) orientés E-W, NE-SW, ENE-WSW et qui correspondent à des couloirs ou zones à forts indices de minéralisation

en substances naturelles (or, diamant, uranium, etc.), notamment dans la région de l'Est, connue comme le district aurifère du Cameroun.

En effet, on distingue trois (03) domaines géodynamiques dans la partie de la chaîne panafricaine du Cameroun (Castaing *et al.*, 1994, Nzenti *et al.*, 1998, 1998b ; Nzenti *et al.*, 1994; Toteu *et al.*, 2004, Van Schumus *et al.*, 2008). (i) Le domaine sud-Cameroun ou domaine de Yaoundé qui comprend un ensemble de séries sédimentaires charriées sur le craton du Congo vers le Sud ; (ii) Le domaine Centre Cameroun ou domaine de Adamaoua-Yadé encore considéré comme zone de transition ; (iii) Le domaine Nord-Cameroun ou domaine de magmatisme calco-alcalin mettant en évidence son origine très profond. Ces ensembles portent des empreintes d'une activité tectonique intense observable aussi bien en surface par les méthodes géologiques et de télédétection qu'en profondeur par les méthodes géophysiques (sismique, géoélectricité, audiomagnétotellurique, gravimétrie, etc.). Ces empreintes sont matérialisées par des zones de cisaillement, de fracturations, de plissement et de contact entre les lithologies qui suscitent le plus souvent un intérêt économique, compte tenu de leur proximité avec les concentrations des substances minérales solides et/ou liquides (Thorne, 2011) et aussi un intérêt scientifique concernant l'actualisation des connaissances sur la structuration profonde des formations géologiques d'une localité.

Dans la présente étude, la méthode électromagnétique a été choisie compte tenu de la disponibilité de l'équipement, la profondeur d'investigation qui atteint les 1 kilomètre dans un contexte de fort couvert latéritique, et la nécessité de multiplier les approches des techniques de prospection électrique. En effet, des travaux récents en géophysique par les méthodes audiomagnétotellurique et gravimétrique réalisés au Sud-Est de la zone de Garga Sarali (Messamena-Abong-Mbang) ont apporté des faits nouveaux sur la structuration des formations géologiques de la chaîne panafricaine au Cameroun en soulignant à titre d'exemple une anomalie légère, de grande extension d'orientation E-W, interprétée d'une part par Collignon, 1968, comme la partie affaissée des formations précambriennes du Sud-Cameroun et d'autre part, comme le prolongement en profondeur de la limite entre le Craton du Congo et le Panafricain jusqu'au parallèle 4°N (Mbom Abane, 1997 ; Ndougsa *et al.*, 2003 ; Tadjou, 2004 ; Tadjou *et al.*, 2004 ; Meying *et al.*, 2009 ; Ndougsa *et al.*, 2011). Ces résultats démontrent le rôle que peut jouer la prospection électromagnétique dans l'actualisation et la connaissance de la géodynamique interne.

Compte tenu des attentes que le Cameroun a mis sur le secteur minier dans l'optique d'en faire une destination minière en Afrique et du nombre sans cesse croissant de demande de

permis de recherche sur l'or, une préoccupation émerge face au constat selon lequel aucun permis portant sur la recherche de l'or n'est en phase d'ouverture d'une mine industrielle, la majorité étant orientée vers l'exploitation artisanale des manteaux d'altération, des berges et des cours d'eau. Or, l'exploitation aurifère est connue dans la région de l'Est depuis les années 60 et elle se faisait sur les (i) filons et veines de quartz, (ii) les granitoïdes et les schistes du Lom (Regnault, 1986). Le contexte géodynamique du Cameroun, riche en éléments structuraux (failles, cisaillements, contact géologique, etc.) qui sont connus pour être des zones de concentrations préférentielles de substances minéralisées reste peu exploité et/ou mal compris. Quelles approches méthodologiques permettraient aux sociétés détentrices des permis miniers d'améliorer le rendement de leurs travaux dans l'optique d'orienter leur activité vers la recherche des sources primaires aurifères en lieu et place des activités d'exploitation artisanale le plus souvent non contrôlées.

Pour ce faire, la présente étude qui s'intitule « Mise en évidence des relations entre déformations tectoniques et minéralisations aurifères à l'aide de la méthode audiomagnétotellurique (AMT) dans les régions de Garga Sarali – Ndokayo » est une contribution qui se donne pour but de montrer l'apport de nouvelles techniques d'exploration géoscientifique (télétection-SIG, géologie minière et géophysique) dans la maîtrise des environnements miniers affectés par des épisodes de déformations tectoniques qui sont multidirectionnelles, et dont la cinématique qui en découle observée aussi bien à grande échelle qu'à petite échelle soulève la question sur (i) le contrôle du prolongement au-delà du parallèle 4°N de la limite entre le Craton et le Panafricain, (ii) l'organisation litho-structurale interne des formations géologiques de la zone d'étude et (iii) les implications géologiques et tectoniques de cette structuration en relation avec la présence des minéralisations aurifères à la surface de la zone de Garga Sarali – Ndokayo – Bétaré Oya.

L'objectif global porte sur l'apport de la méthode audiomagnétotellurique (AMT) dans la compréhension de la structuration interne des formations géologiques et la définition des zones potentiellement aurifères qui sont contrôlées par les structures géologiques dans les régions de Garga-Sarali – Ndokayo, Est Cameroun.

Les objectifs spécifiques visés ont consisté à :

- Acquérir les images satellitaires de type LANDSAT OLI 8 à 30 m du sol et procéder à leur traitement et interprétation ;
- Procéder à un levé géologique et structurale et à une cartographie des sites miniers actifs et abandonnés en relevant autant que possible les teneurs aurifères ;

- Réaliser une prospection géophysique 2D fondée sur la modélisation des données de sondages audiomagnétotelluriques tensorielles collectées dans le cadre de la présente thèse ;
- Établir une corrélation entre les résultats issus de l'analyse des images satellitaires pour la réalisation des cartes de linéaments, la prospection AMT et ceux de la cartographie minière des sites et l'évaluation des teneurs aurifères.

Les résultats attendus au terme de cette étude porteront sur :

- ☞ La réalisation d'une carte détaillée des linéaments de la zone afin de mettre en évidence les éléments structuraux qui sont les empreintes à grandes échelles des évènements tectoniques et des déformations qui se sont déroulés et de ressortir leur implication tectonique ;
- ☞ La réalisation des cartes des indices, des teneurs, de corrélation entre les teneurs et la géologie, et entre les teneurs et les éléments structuraux ;
- ☞ La modélisation 2D des données issues des sondages géophysiques (carte de résistivités, profil de résistivité, courbe de sondage, pseudo-section de résistivité et de phase et section géoélectrique) qui apporteront de nouvelles informations sur la structuration interne des formations Panafricaines de la zone Garga Sarali – Ndokayo en ressortant les zones de discontinuités et d'anomalies (contacts entre les formations géologiques, les zones de faiblesses, les failles...) ;
- ☞ La réalisation d'une carte minière prédictive qui compile d'une part les données issues de la cartographie des sites miniers et des teneurs aurifères et d'autre part les éléments structuraux issus de l'analyse des images satellites et des sondages géophysiques pour mettre en évidence des zones d'intérêt qui peuvent faire l'objet d'une exploration détaillée dans le cadre de la recherche des sources primaires aurifères dans les régions de Garga Sarali – Ndokayo – Bétaré Oya.

La présente étude s'est proposée de participer à la connaissance et la recherche des substances minérales économiquement rentable, identifiées dans la zone d'étude (or, diamant, colombite-tantalite, etc.) à travers l'utilisation de nouvelles techniques et outils qui constituent une aide à l'exploration géologique et minière. Elle s'articulera en quatre (04) chapitres :

- ☞ Le **premier chapitre** portera sur la revue bibliographique dont l'objectif un sera de présenter le contexte géologique, tectonique et minier auquel appartient la zone d'étude.

↻ Le **deuxième chapitre** présentera les méthodes et données utilisées pour la réalisation de cette étude à savoir :

1. Le traitement des images satellitaires de la zone d'étude, dans l'optique de mettre en évidence les éléments structuraux (foliation générale, linéaments structuraux et failles) ;
2. La prospection géologique à travers la cartographie géologique et minière, et une analyse structurale ;
3. La corrélation entre les éléments structuraux mis en évidence et les résultats de la cartographie minière, assortie des teneurs en or de chaque site cartographié.
4. La prospection géophysique par la méthode MT/AMT dans l'optique de ressortir dans un premier temps une imagerie du sous-sol et dans un deuxième temps de mettre en évidence la structuration interne de la zone et d'établir les discontinuités observées. Cette présentation sera précédée par une brève synthèse des généralités sur la méthode magnétotellurique.

↻ Le **troisième chapitre** portera sur la présentation et l'interprétation des résultats obtenus ;

↻ Le **quatrième chapitre** portera sur la validité et la discussion des résultats.

La conclusion générale qui viendra clôturer cette étude résumera les contributions originales de la présente étude et mettra en lumière les perspectives.

Chapitre 1. Généralités sur le milieu naturel et travaux antérieurs

« Nul ne peut atteindre l'aube sans passer par le chemin de la nuit », Khalil Gibran

Introduction

Il est question dans ce chapitre de présenter dans un premier temps le cadre naturel de l'étude et par la suite une revue des connaissances sur le contexte géologique et géophysique tant régional que local.

I. Situation géographique

I.1. Localisation de la zone d'étude

La zone d'étude est située dans la région de l'Est, sur la route nationale (N10) Bertoua - Bétaré-Oya. Elle couvre les localités de Garga Sarali, Oudou et Bétaré Oya (Fig. 1).

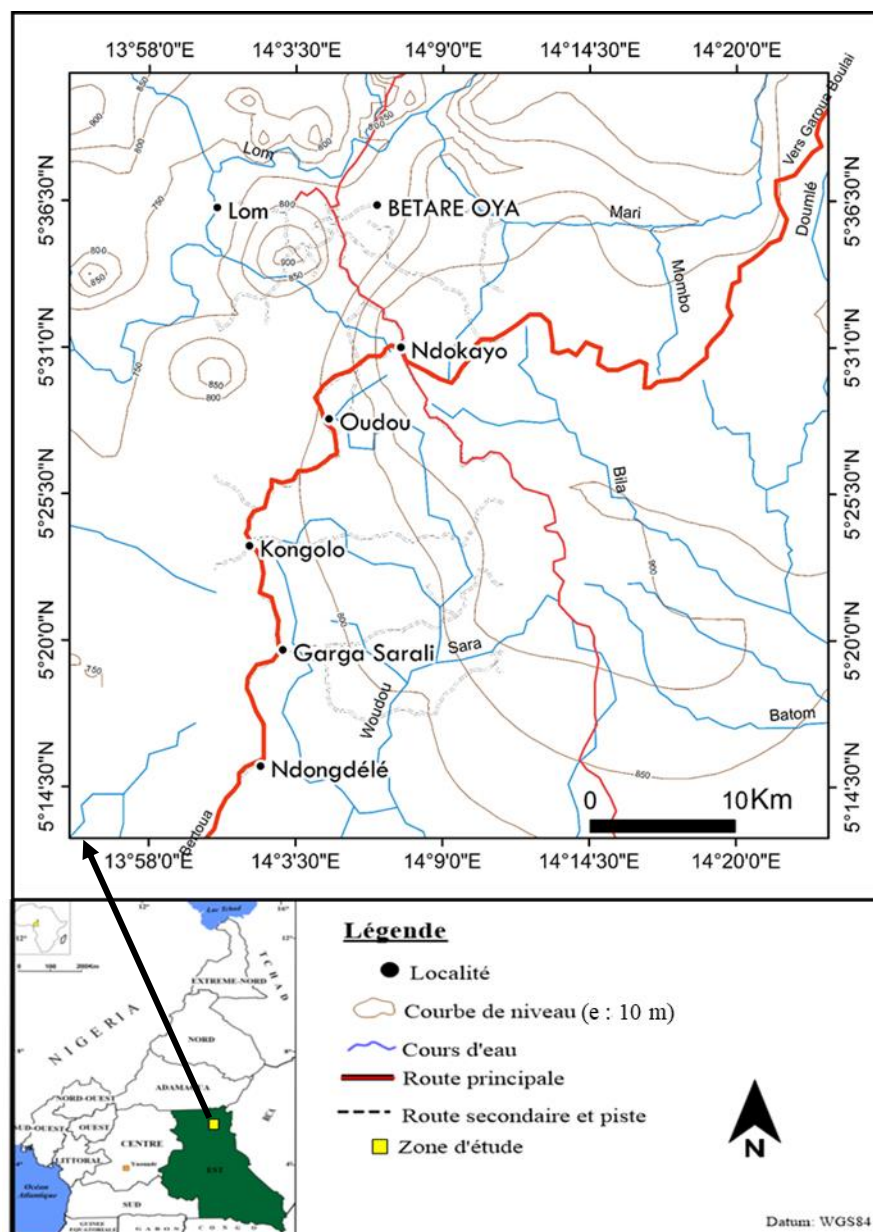


Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude.

Elle a pour limites géographiques 13°53'56'' et 14°23'24'' de longitude Est, puis 5°13'13'' et 5°42'42'' de latitude Nord, et est soumise à un climat de type équatorial guinéen forestier avec une tendance soudanienne vers le nord.

I.2. Climat et végétation

Les données climatiques de la zone d'étude sont celles de la station météorologique de Bétaré-Oya (804 mètres d'altitude, latitude 05° 36 N, longitude 14°06 E). La station possède au moment de cette étude 38 années de mesures des précipitations et neuf (09) années d'enregistrements de la température (Tab. 1).

Le climat est de type équatorial guinéen forestier avec une tendance soudanienne vers le nord. Il est caractérisé par l'alternance de quatre (04) saisons :

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

Tableau 1: Données climatiques Bétaré-Oya.

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Moy.an
P(mm)	8	23	83	127	171	176	180	211	267	266	59	7	1578

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Moy.an
T(°C)	23	24	25	23	22	22	22	22	23	23	23	23	23

La zone d'étude reçoit en moyenne 1578 mm de précipitations par an. La température maximale est de 25°C contre un minimum de 22°C au cours de l'année, soit une moyenne annuelle est de 23°C.

En ce qui concerne la végétation, deux (02) zones de végétation nettement tranchées s'individualisent : en allant vers le nord, on a une savane arbustive et herbacée et vers le sud on est en présence d'une forêt équatoriale primaire dans de nombreux endroits et secondaire, comme en témoigne la présence de certaines essences comme le parasolier.

I.3. Oro-hydrographie

La zone d'étude appartient à l'ensemble marqué par la présence de deux pénélaines d'altitude différentes qui se raccordent dans les cours d'eau en formant des chûtes plus ou moins importantes et témoignant du phénomène d'ensemble ayant soulevé l'Adamaoua par un jeu de fractures d'où résulterait le relief en paliers successifs (Fig. 5). En effet, vers le nord où se

trouve la zone d'étude, s'étend la pénélaine supérieure d'altitude comprise entre 800 et 1050m et au sud, la pénélaine inférieure d'altitude comprise entre 600 et 700m.

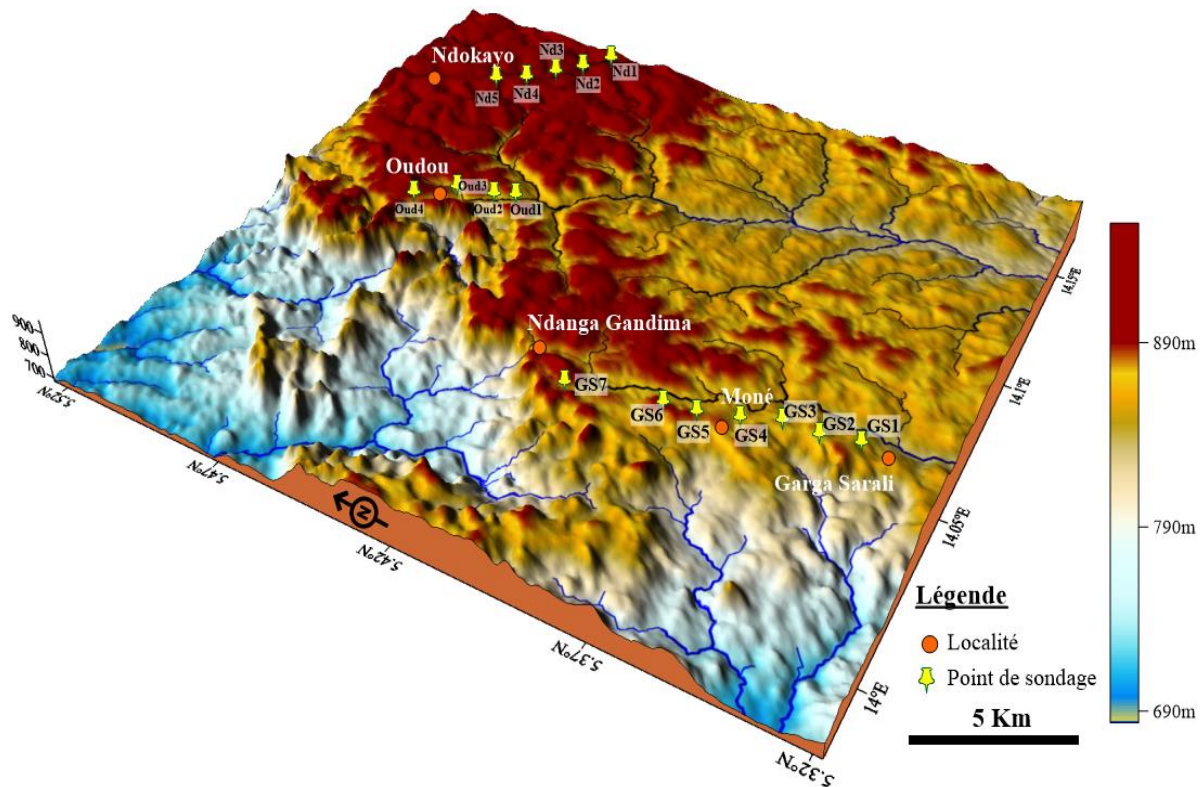


Figure 2: Carte oro-hydrographique et bloc diagramme de la zone d'étude.

Le réseau hydrographique de la zone d'étude est dendritique et constitué par le principal cours d'eau à savoir le Lom et ses affluents.

I.4. Population et activités humaines

La population du secteur d'étude est constituée de façon homogène par plusieurs groupes ethniques à savoir les Bayas, les Mboums, les Kakas, les Foulbés. Ces populations pratiquent comme activités l'orpaillage, l'agriculture, l'élevage, la pêche et la chasse.

II. Cadre géologique et géodynamique

II.1. Bref historique sur la Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale

La Chaîne Panafricaine occupe environ les 2/3 du socle formations du Cameroun (Njonfang et al., 2008). Cette chaîne est identifiée comme étant l'épicentre des évènements tectonophysiques ayant affecté le Cameroun (Njonfang et al., 2008 ; Meying, 2009 ; Gouet, 2013), et le lieu idéal pour la concentration des substances minérales utiles (Gouet, 2013). Cette chaîne présente sur la bordure nord du craton du Congo, les caractéristiques d'une chaîne de collision (Toteu et al., 2004), avec des nappes externes d'extension régionale, un

métamorphisme granulitique de haute pression, une migmatisation intense, des décrochements à l'échelle régionale et la présence de dépôts molassiques (Moussa Isseini, 2011).

Plusieurs hypothèses ont été émises afin de mieux comprendre la Chaîne Panafricaine. D'après Kennedy (1964) cette période serait considérée comme étant un épisode thermo-tectonique majeur en Afrique ($\pm 500\text{Ma}$), qui correspond à la formation d'une importante chaîne trans-continentale (Kankeu et al., 2006) et qui marque la limite entre le Précambrien et le Phanérozoïque. Les travaux de Rocci (1965) montrent que la Chaîne Panafricaine ne résulterait pas seulement d'un simple phénomène de réactivation thermique et de rajeunissement du socle précambrien, mais correspondrait bien à un cycle orogénique complet. Castaing et al., (1994) et Unrug (1997), suggèrent que le Panafricain correspondrait à une période de croissance crustale pendant laquelle des terrains continentaux, des arcs insulaires et des domaines océaniques se sont soudés pour donner naissance au socle cristallin africain vers la fin du Néoprotérozoïque.

Plus récemment, Kankeu et al., (2006), émet une hypothèse sur les principaux mécanismes tectoniques qui permettraient d'interpréter la formation de la Chaîne Panafricaine. Il s'agit du cycle de Wilson et les chaînes ensialiques ou ensimatiques. En effet, dans le cas des chaînes procédant d'un cycle de Wilson, on assisterait à la fois à un phénomène d'accrétion par sédimentation et magmatisme et à une réactivation intense et étendue d'une croûte continentale préexistante. Dans le cas des orogénèses ensialiques (chaînes intra-plaques formées par mobilité de la croûte continentale), trois étapes seraient généralement observées (Fig. 3) : (1) un rifting suivi d'une désolidarisation sous crustale de la lithosphère mantellique ; (2) un étirement crustal et formation d'un bassin géosynclinal dont le plancher est une mince croûte sialique ; (3) un écaillage de la croûte et subduction continentale provoquant un raccourcissement horizontal et une intense déformation.

II.2. La Chaîne Panafricaine au Cameroun

Quatre modèles globaux d'évolution tectonique de la Chaîne Panafricaine au Cameroun sont proposés (Ngako et al., 2001 et 2003 ; Kankeu et al., 2006, Kankeu, 2008). Il ressort de ces modèles que l'orogénèse panafricaine au Cameroun a pour origine la convergence et collision entre le Craton du Congo d'âge Archéen au sud et une ou deux plaques d'âge Paléoprotérozoïque incluant le Hoggar (Plaque du Sahara Central) (Fig. 5).

La Chaîne Panafricaine au Cameroun est marquée par des structures tectoniques majeures connues comme étant les grandes zones de cisaillements centre-camerounais

d'orientation NE-SW. Ces structures marquent le changement de directions structurales entre les chaînes trans-sahariennes orientées N-S et la chaîne des Oubanguides orientée E-W.

Trois domaines sont distingués dans la chaîne panafricaine au Cameroun (Fig. 4) à travers leurs caractéristiques lithologiques, structurales et métamorphiques (Nzenti *et al.*, 1994; Toteu *et al.*, 2004). Le domaine sud Cameroun ou domaine de Yaoundé (YD) qui comprend un ensemble de séries sédimentaires charriées sur le Craton du Congo vers le Sud, le domaine Centre-Cameroun ou domaine de Adamaoua-Yadé (ADY) encore considéré comme zone de transition et le domaine Nord et Ouest Cameroun (NWC) ou domaine de magmatisme calco-alcalin mettant en évidence son origine très profonde.

II.2.1 Le domaine Nord et Ouest Cameroun

Situé à l'ouest de la zone de cisaillement de Tcholliré-Banyo (Fig. 4), ce domaine est aussi connu comme le domaine de l'Ouest Cameroun (Toteu *et al.*, 2004). Il est constitué :

- de roches métamorphiques (schistes, metabasites et gneiss) attribuées au Néoprotérozoïque et caractérisées par un métamorphisme de degré moyen à élevé. Ces roches métamorphiques ont pour protolithes des roches volcaniques (Ngako, 1986; Toteu *et al.*, 1990) regroupant des basaltes tholéitiques d'arc et des rhyolites calco-alcalines mis en place autour de 800 Ma;
- des granitoïdes calco-alcalins pré- à tardi-tectoniques, mis en place entre 660 et 580 Ma (Toteu *et al.*, 1987; Toteu *et al.*, 2001);
- des granitoïdes alcalins post-tectoniques ;
- des roches sédimentaires issues du produit d'érosion du socle panafricain déposées dans des bassins, dont le bassin de Mangbei, et associées à des roches volcaniques (Béa *et al.*, 1990; Montes-Lauar *et al.*, 1997; Toteu *et al.*, 2004).

Les données Rb/Sr, Sm/Nd et U-Pb indiquent que ce domaine correspond principalement à une accréation juvénile de magmas d'âge Néoprotérozoïque montrant une contamination par une croûte éburnéenne (~2100 Ma ; Penaye *et al.*, 1993). Les données isotopiques et géochronologiques actuellement disponibles n'indiquent pas d'héritage de l'Archéen (Toteu *et al.*, 2001) et permettent de faire le lien avec les manifestations de l'orogénèse panafricaine dans la partie orientale du Nigéria sur la base des résultats géochronologiques U-Pb sur zircon (Ferré *et al.*, 1996; Ekwueme and Kröner, 1997; Ekwueme and Kröner, 1998; Ferré *et al.*, 2002).

L'évolution tectono-métamorphique de ce domaine se caractérise par la succession de trois phases de déformation.

- La première phase D₁, en grande partie oblitérée par les phases ultérieures, est soulignée par une foliation horizontale, des plis isoclinaux et une linéation d'étirement orientée N110°E-N140°E (Nzenti et al., 1992 ; Ferré et al., 1996). Elle est associée à des assemblages métamorphiques caractéristiques du faciès amphibolite, correspondant à une température de l'ordre de 650°C et une pression variant entre 6 et 7 kbars (Nzenti et al., 1992). Cette phase de déformation a été datée à 800-700 Ma par la méthode U-Pb sur zircon (Toteu et al., 1987; Toteu et al., 1990). Cependant, d'après certains auteurs, elle pourrait être pré-panafricaine (Ngako, 1986; Penaye, 1988).
- La seconde phase D₂ se caractérise par des plis serrés associés à une foliation de plan axial verticale. Cette foliation porte une linéation minérale parallèle aux axes de plis, orientés NNE-SSW à NE-SW et plongeant de 0 à 50° vers le sud ou le nord (Toteu et al., 2004). Cette phase s'accompagne d'assemblages minéraux caractéristiques d'un métamorphisme allant du faciès schiste vert au faciès amphibolite (Toteu et al., 2004) avec la présence de migmatites (Ngako, 1986, Njel, 1988). Elle est datée à 600-580 Ma (Toteu et al., 1987; Toteu et al., 1990). Ces deux phases sont suivies par des zones de cisaillement conjuguées contemporaines des derniers épisodes de la migmatisation. Ce sont les zones de cisaillement senestres, orientées N-S à NE-SW, localement associées à des charriages vers le sud et les zones de cisaillement dextres orientées NE-SW à ESE-WNW. Ces zones de cisaillement correspondent à une déformation mylonitique caractéristique d'un métamorphisme du faciès schiste-vert (zones de cisaillement dextres) à amphibolite (zones de cisaillement senestres) et sont respectivement attribuées aux phases 3 et 4 de la déformation panafricaine (Toteu et al. 2004).
- Enfin, la dernière phase de déformation comprend des décrochements E-W contemporains de la mise en place de granitoïdes autour de 545 Ma (Toteu et al., 1987).

II.2.2 Le domaine Centre Cameroun ou domaine Adamaoua-Yadé

Le domaine Adamaoua-Yadé, encore appelé domaine du Centre-Cameroun, est situé à l'est de la zone de cisaillement de Tcholliré-Banyo (Fig. 4). Il comprend :

- (i) des métasédiments et orthogneiss Paléoprotérozoïques, avec une importante contribution archéenne mise en évidence par des âges modèles T_{DM} et des héritages de zircons (Toteu et al., 2004) ;

- (ii) des ensembles métavolcanosédimentaires Néoprotérozoïques décrits sous l'appellation de série de Lom, affectés par un métamorphisme de degré faible à moyen ;
- (iii) et d'abondants granitoïdes syn- à tarditectoniques d'origine crustale ou mixte (Ganwa, 1988; Soba *et al.*, 1991; Tchakounte, 1999; Toteu *et al.*, 2001; Tchameni *et al.*, 2006). Ces spécificités et la présence d'un métamorphisme granulitique relictuel ancien (2100 Ma) enveloppé par les structures de la déformation panafricaine indiquent que l'Adamaoua-Yadé est un socle pré-Néoprotérozoïque réactivé au cours de l'orogénèse panafricaine (Moussa Isseini, 2011).

Le massif de Yadé, à l'ouest de la République de Centrafrique, est mal connu et pourrait être un complexe granito-gneissique d'âge Archéen (Poidevin, 1991) réactivé au Néoprotérozoïque (Toteu *et al.*, 2004). L'évolution tectono-métamorphique de l'Adamaoua-Yadé se distingue de celle du domaine précédent par la présence d'un métamorphisme granulitique daté à 2100 Ma par la méthode U-Pb sur zircon (Penaye, 1988; Toteu *et al.*, 2004). Les zones de cisaillement de la phase D₂ précédemment décrites y sont principalement représentées par le cisaillement de Tcholliré-Banyo, le cisaillement Sud-Ouest Camerounais, le cisaillement Centre-Camerounais et la faille de la Sanaga (Toteu *et al.*, 2004). D'abondants granitoïdes (leucogranites, granites et syénites) syn-D₂ sont observés dans ce domaine, où ils forment des plutons allongés parallèlement au Cisaillement Centre-Camerounais (NE-SW) (Moussa Isseini, 2011).

II.2.3 Le domaine Sud Cameroun ou domaine de Yaoundé

Le domaine Sud-Cameroun ou domaine de Yaoundé est représenté par les séries métamorphiques du groupe de Yaoundé charriées vers le sud sur le craton du Congo. Les formations du groupe de Yaoundé sont constituées (Nzenti *et al.*, 1984; Nédélec *et al.*, 1986; Nzenti, 1987; Nzenti *et al.*, 1988, Penaye *et al.*, 1993):

- (i) des roches métamorphiques de la série d'Ayos-Mbalmayo-Bengbis au sud ;
- (ii) la série de Yaoundé au centre ;
- (iii) la série de Yokaduma à l'est ;
- (iv) et la série de Bafia au nord.

Ces séries sont principalement constituées de roches paradérivées (métapélites et métagrauwackes) ainsi que des migmatites. Elles se prolongent à l'est par la série de Bolé et les gneiss granulitiques des Gbayas en Centrafrique (Pin and Poidevin, 1987). Interprétées comme des dépôts épicontinentaux d'âge Néoprotérozoïque associés à un domaine intracontinental en

extension ou à un environnement de type marge passive (Nzenti *et al.*, 1988; Nzenti *et al.*, 1992; Ngnotué *et al.*, 2000), elles sont affectées par un métamorphisme granulitique ($P = 10-12$ kbars ; $T = 750-800^{\circ}\text{C}$) autour de 620 Ma (Nzenti *et al.*, 1984; Nzenti, 1987; Nzenti *et al.*, 1988; Penaye *et al.*, 1993; Ngnotué *et al.*, 2000). Les données isotopiques Sm-Nd disponibles indiquent que les roches de ces séries proviennent de protolithes formés par un mélange de sources d'âge Paléoproterozoïque et Néoproterozoïque, sans contribution majeure à partir du craton du Congo (Penaye *et al.*, 1993 ; Ngnotué *et al.*, 2000 ; Toteu *et al.*, 2001). Enfin, ce domaine se distingue des deux premiers par la rareté des granitoïdes tardi- à post-tectoniques (Toteu, 2004) comparés aux plutonites pré- à syntectoniques charriées sur la bordure septentrionale du craton du Congo.

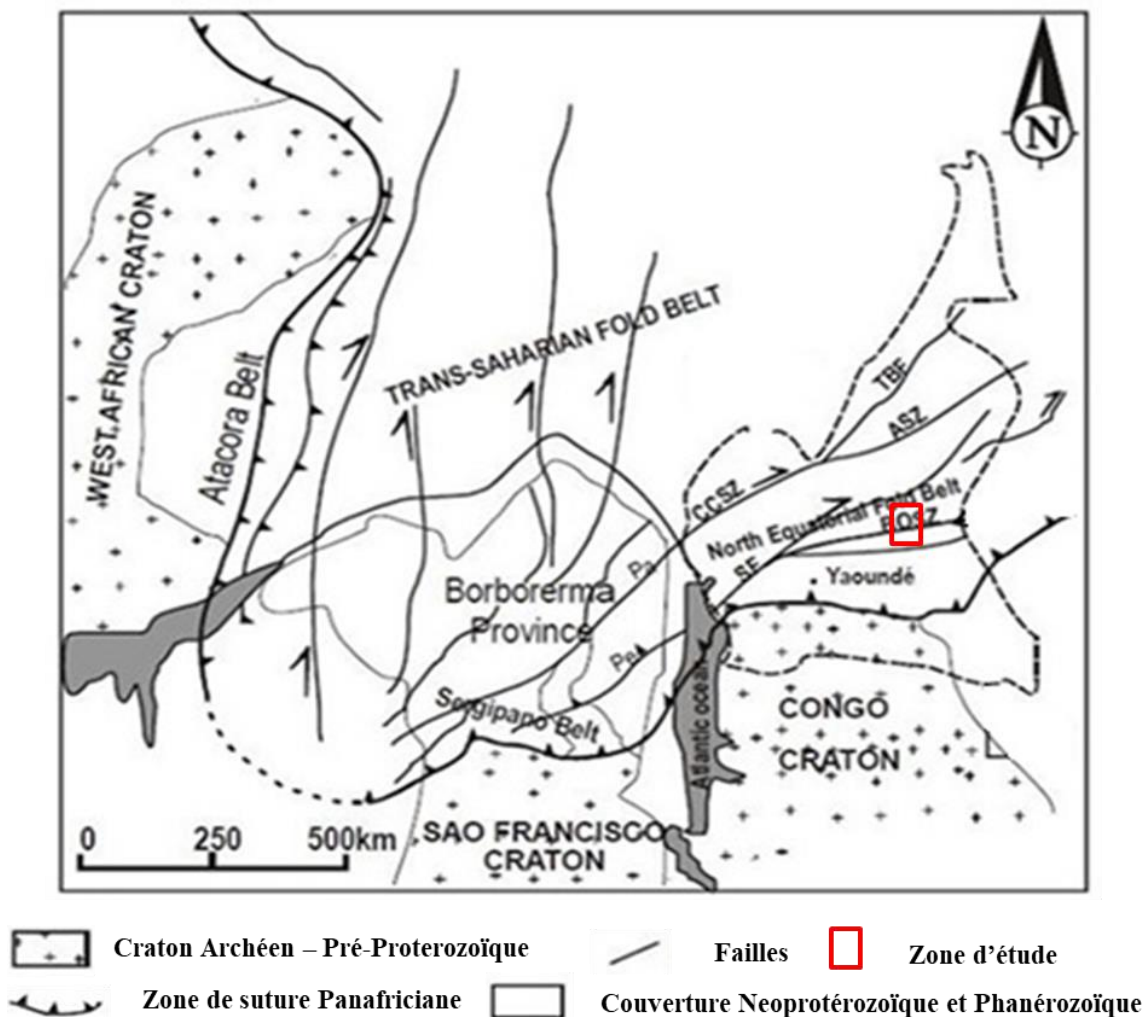


Figure 3: Reconstruction pré-drift des formations panafricaines et brésiliennes (In Ganno et al., 2010). CCSZ : Cisaillement Centre Camerounais ; ASZ : Zone de Cisaillement d'Adamaoua ; BOSZ : Zone de Cisaillement de Bétaré-Oya ; SF : Faille de la Sanaga ; TBF : Faille de Tibati Banyo ; PA : Faille de Patos ; PE : Zone de Cisaillement de Pernambuco.

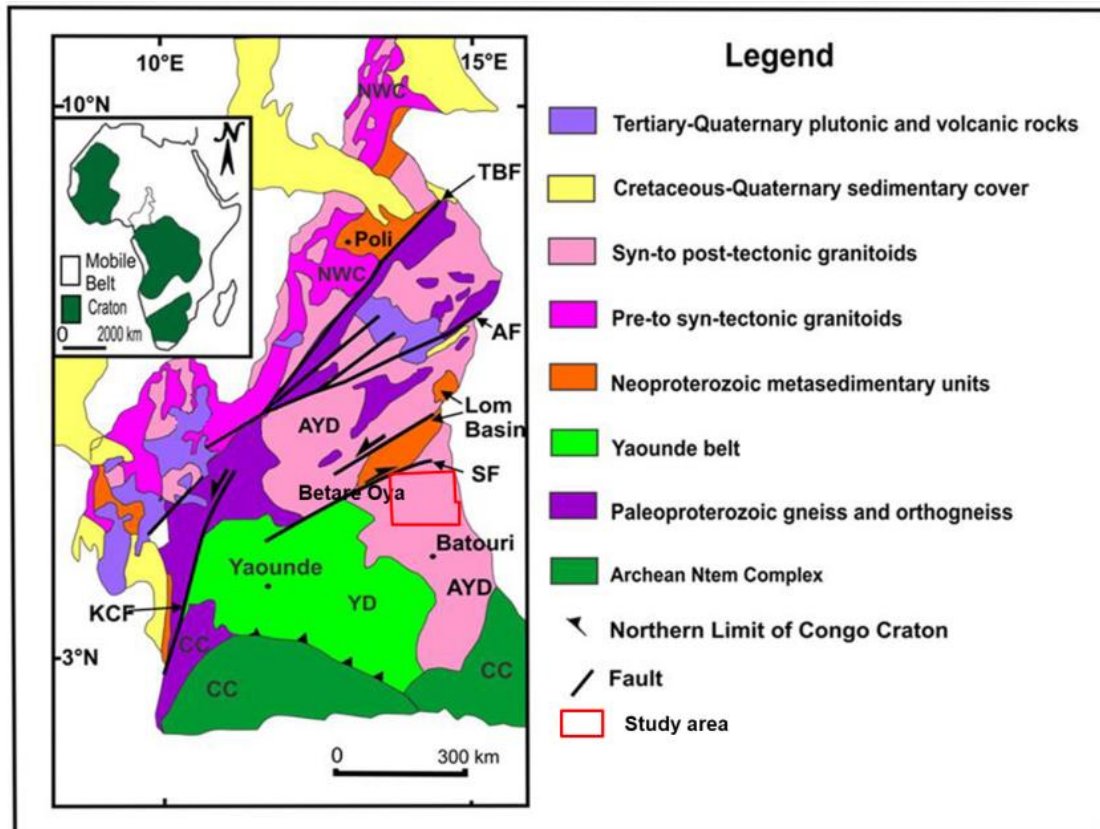


Figure 4 : Unités litho-structurales majeures du Cameroun (d'après Toteu et al., 2004). NWC : North West Cameroon ; TBF : Tchollire Banyo Fault ; AF : Adamawa Fault ; AYD : Adamawa-Yade Domain ; SF : Sanaga Fault ; YD : Yaounde Domain ; KCF : Kribi Campo Fault ; CC : Congo Craton.

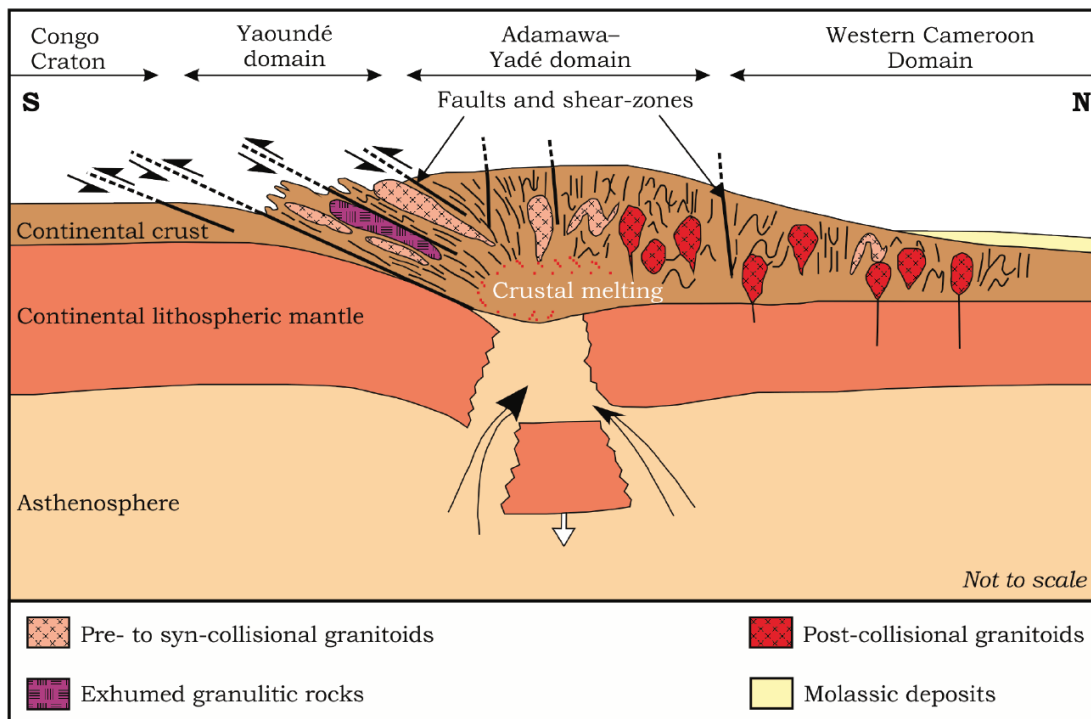


Figure 5 : Modèle géodynamique post-collisionnel entre le CFAB et le Craton du Congo (d'après Toteu et al., 2004).

III. Contexte métallogénique : intérêt minier de la chaîne panafricaine au Cameroun

La position du Cameroun au sein de la Chaîne Panafricaine laisse entrevoir une série de faits démontrant sa vocation minière. En effet, du Nord au Sud de la Chaîne Panafricaine au Cameroun, des indices de substances minérales utiles sont identifiées dans les formations géologiques ayant subi les transformations à la suite des évènements thermo-tectoniques qu'a connu la Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale et en particulier au Cameroun.

Deux types de gisements peuvent être identifiés dans le secteur abritant la zone d'étude. Les gisements de type orogénique et les gisements de type placers ou paléoplacers.

Les gisements orogéniques (primaire) sont définis comme étant des gisements qui se trouvent généralement en bordure de grande faille, où l'or a été déplacé et précipité à partir de fluides produits au cours des déformations survenues à de grandes profondeurs dans la croûte terrestre. Les divers genres de minéralisations comprennent les stockwerks, les brèches, les filons feuilletés, les filons de quartz carbonates ainsi que les minéralisations disséminées dans la roche hôte (Thorne, 2011). Ici l'or est concentré dans les veines de quartz à remplissage de calcite, mica et autres minéraux accessoires dans un assemblage de réseau de veines. Les travaux récents (Nih Fon et al., 2012) dans la localité de Bétaré Oya, montrent que les minéralisations primaires aurifères sont associées aux altérations de type silicification et séricitisation qui sont bien conservées dans les niveaux saprolitiques.

La minéralisation de type alluvionnaire est celle qui est libérée lors des phases érosives des roches porteuses. Les éléments sont transportés et déposés dans les lits des cours d'eau (or alluvionnaire) et/ou dans les flancs de piedmonts (or éluvionnaire). L'or ici est sous forme de grains, de poudre et la morphologie, la couleur renseigne sur la proximité d'avec la source.

Le contexte tectonique de la région couvrant les localités de Batouri jusqu'à Bétaré Oya semble correspondre à cette description. La présence dans cette zone des marqueurs du Cisaillement Centre Camerounais (CCC) et des minéralisations en surface (activité artisanale) ainsi que dans les lits de cours d'eau et de rivières bordant cette structure montre à suffisance le potentiel fortement minier de la zone d'intérêt. En effet, depuis les premiers travaux du BRGM (1953-1954), ces localités continuent de produire une quantité assez importante d'or et d'après certains auteurs (Toteu et al., 2006a), le grand potentiel économique des minéraux (exemple de l'or) de cet ensemble géologique pourrait s'expliquer par une remobilisation au Néoproterozoïque du socle archéen et Paléoproterozoïque.

Des sites d'orpaillage sont répertoriés entre Garga Sarali et Bétaré-Oya. Ils sont rencontrés au niveau des cours d'eau en majorité et sur les flancs de collines où sont identifiés des veines de quartz minéralisées.

La connaissance de l'architecture ayant favorisée la mise en place des minéralisations aurifères dans la région de l'Est reste peu ou mal connue. Toutefois, il existe une très forte activité d'exploitation artisanale le long des cours d'eau, ce qui témoigne de la présence des indices. La zone dans laquelle se situe l'espace sollicité a déjà connu un certain intérêt pour la recherche des sources primaires, par l'entremise des sociétés minières à l'exemple de African Aura Resources Inc, MGI Partners, Optimum Mining opérant depuis des décennies. Des recherches scientifiques (Toteu, 1994 et 2004 ; Suh et al., 2006 ; Akwina et al., 2014) fournissent une idée sur l'information scientifique au sujet de la géologie de roche en place et de la minéralisation primaire d'or de la région de Batouri.

En effet, les veines de quartz entrecoupent tous les types de roche rencontrées dans le secteur. La plupart de veines de quartz d'un aspect laiteuses blanchâtre est stérile, mais les veines bréchifiées d'un aspect grises avec des taches d'hématite sont considérées comme potentiellement aurifères.

Le contexte géologique associés aux minéralisations aurifères de la zone d'étude contenues dans les granites biotitiques à amphibole, granites porphyritiques, migmatites et d'autres roches granitoïdes, sont très semblables aux caractéristiques des gisements d'or dans un contexte de subduction (Fig. 6). L'âge des roches est principalement Néoprotérozoïque et les veines de quartz aurifères sont situées à proximités des zones de cisaillement et des zones de failles. Les similitudes dans l'âge, la composition, et les affinités géochimiques avec d'autres granitoïdes, situés dans le domaine Adamawa-Yadé suggèrent que les roches granitiques dans les zones aurifères représentent des portions de batholite d'échelle régionale, avec des multiples petits réseaux de veines de quartz aurifères à haute teneur se développant de façon préférentielle dans un contexte de déformations telles que des zones de cisaillement, les failles et les plis (Mero Yannah et al., 2015). Les travaux d'exploration minière (African aura Resources) entrepris récemment dans la localité de Batouri située au SE de la zone d'étude ont confirmé la présence d'une association spatio-temporelle des veines de quartz-calcite aurifères et une minéralisation disséminée dans les granitoïdes. Les résultats géochimiques et les interprétations structurales suggèrent que la minéralisation in situ d'or peut être classée comme gisement d'or de type orogénique (gisement d'or méso-thermal). En effet, les gisements aurifères orogéniques sont mis en place à la suite d'une circulation des fluides hydrothermaux, autre que les solutions

magmatiques. Ces dépôts sont associés au magmatisme et les intrusions sont non seulement la source de chaleur, mais les solutions aurifères sont formées avec la participation de fluides de type métamorphique, météoritique ou des eaux souterraines dans la croûte.

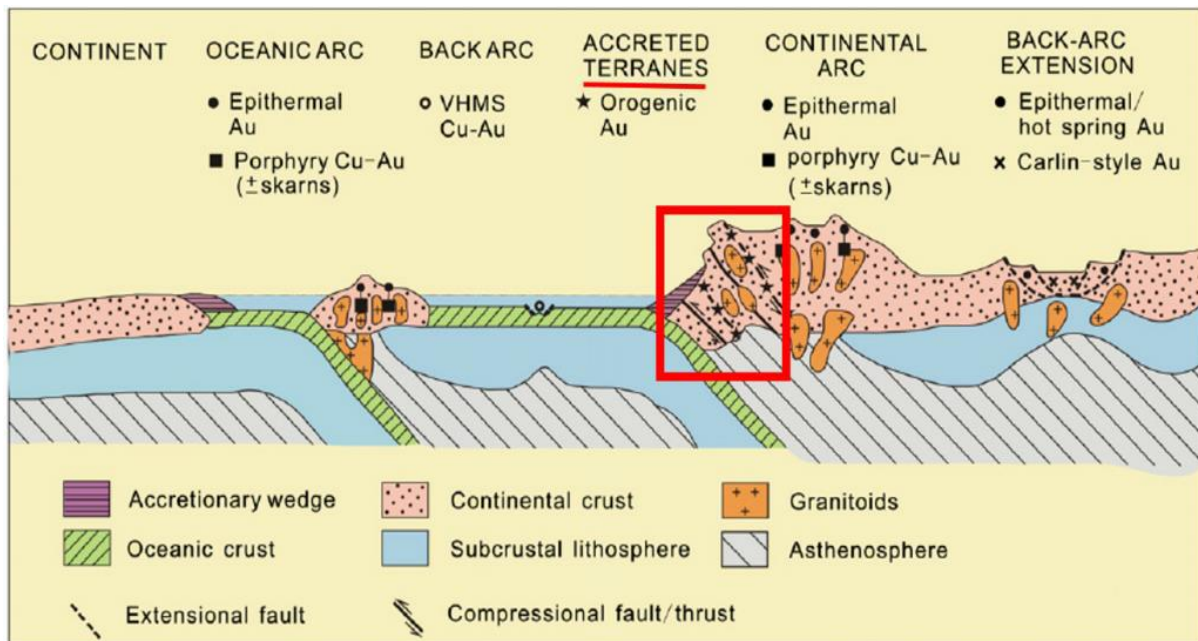


Figure 6: Contexte tectonique des gisements aurifères connus (d'après Groves et al., 1998).

Les anomalies enregistrées au cours de certains travaux d'exploration géologique et géophysique au Nord de la zone d'étude, correspondent à la signature des gisements associés au métamorphisme en particulier des filons ou des veines de quartz aurifère, faible en sulfure. Aussi, les résultats de ces campagnes montrent qu'à partir de 3 m, le sous-sol est très minéralisé. Une partie de cette minéralisation est de nature aurifère et est liée à la présence de filons de quartz de grande envergure (>10 km) ressorti également par l'imagerie satellitaire. Les schistes situés à proximité des filons portent une minéralisation aurifère de proximité due à l'altération des filons de quartz. La profondeur de la présence des zones susceptibles de porter la minéralisation varie entre 50 m et 150 m, mais peut aller au delà de 150 m en certains points au vue de l'extension des anomalies enregistrées. Ainsi, une corrélation entre d'une part une minéralisation alluvionnaire, et d'autre part, une minéralisation éluvionnaire montre une orientation de la minéralisation suivant la direction NE-SW, direction correspondant à la zone de cisaillement.

Regnault (1986) démontrera que les formations de la chaîne panafricaine contiennent des concentrations de substances utiles de forte valeur économique. À titre d'exemple, on peut citer du Sud au Nord, le fer (Mbalam, Djoum, Essong, Ntem, Sangmélina) ; le diamant (Mobilong, Yokadouma, etc.) ; l'or (Akom II, Sangmelima, Bétaré-Oya, Batouri, Colomines,

Tcholliré, Rey Bouba, etc.) ; la bauxite (Minim Martap, Ngaoundal, Fongo Tongo) ; le Nickel/Cobalt (Lomié) ; le manganèse (Nkamouna) ; le titane (Mayo Darlé), le rutile (Akonolinga) ; le calcaire (Mintom) ; l'uranium (Poli, Lolodorf). Tous ces indices ont la particularité de se retrouver non loin et parfois au sein du réseau tectonique de la Chaîne Panafricaine au Cameroun.

IV. Contexte géologique de la zone d'étude

La majeure partie du Cameroun est constituée d'un socle Précambrien comprenant des roches magmatiques et métamorphiques appartenant à diverses époques du Précambrien. Les roches qui affleurent sont principalement des granites et migmatites rajeunis lors de l'épisode Panafricain (Regnault, 1986).

Le secteur d'étude qui appartient au domaine Adamaoua-Yadé repose sur un socle archéen affecté par l'orogénèse éburnéenne au Paléo-protérozoïque. Elle a fait l'objet de travaux de levées géologiques de reconnaissance au 1/500.000 (Gazel & Gérard, 1954). Les données les plus récentes (Kankeu et al., 2006 ; Kankeu, 2008 ; Takodjou et al., 2016 ; Takodjou et al., 2018) constitueront la base de la présente étude. La zone d'étude est constituée d'une lithologie assez diversifiée qui peut être subdivisée en 03 principales zones. La zone I (groupe du Lom), la zone II (autour de Ndokayo) et la zone III (autour de Garga Sarali).

Les données utilisées sont la carte géologique feuillet Batouri Ouest au 1/200000 de Gazel et Gérard (1954), les résultats de Kankeu (2009) et les observations de terrain. Les travaux Kankeu (2006 et al., ; 2008) permettent d'identifier (Fig. 8) les formations sédimentaires ; des intrusions granitiques qui ont traversé les formations métamorphiques et sont observées soit sous forme de petits massifs isolés, soit sous forme de filons granitiques et de pegmatites qui représenteraient la phase magmatique ultimes ; des roches métamorphiques constituées de granito-gneiss, des gneiss plus ou moins migmatites et des schistes ; des enclaves (schistes et matériels basiques).

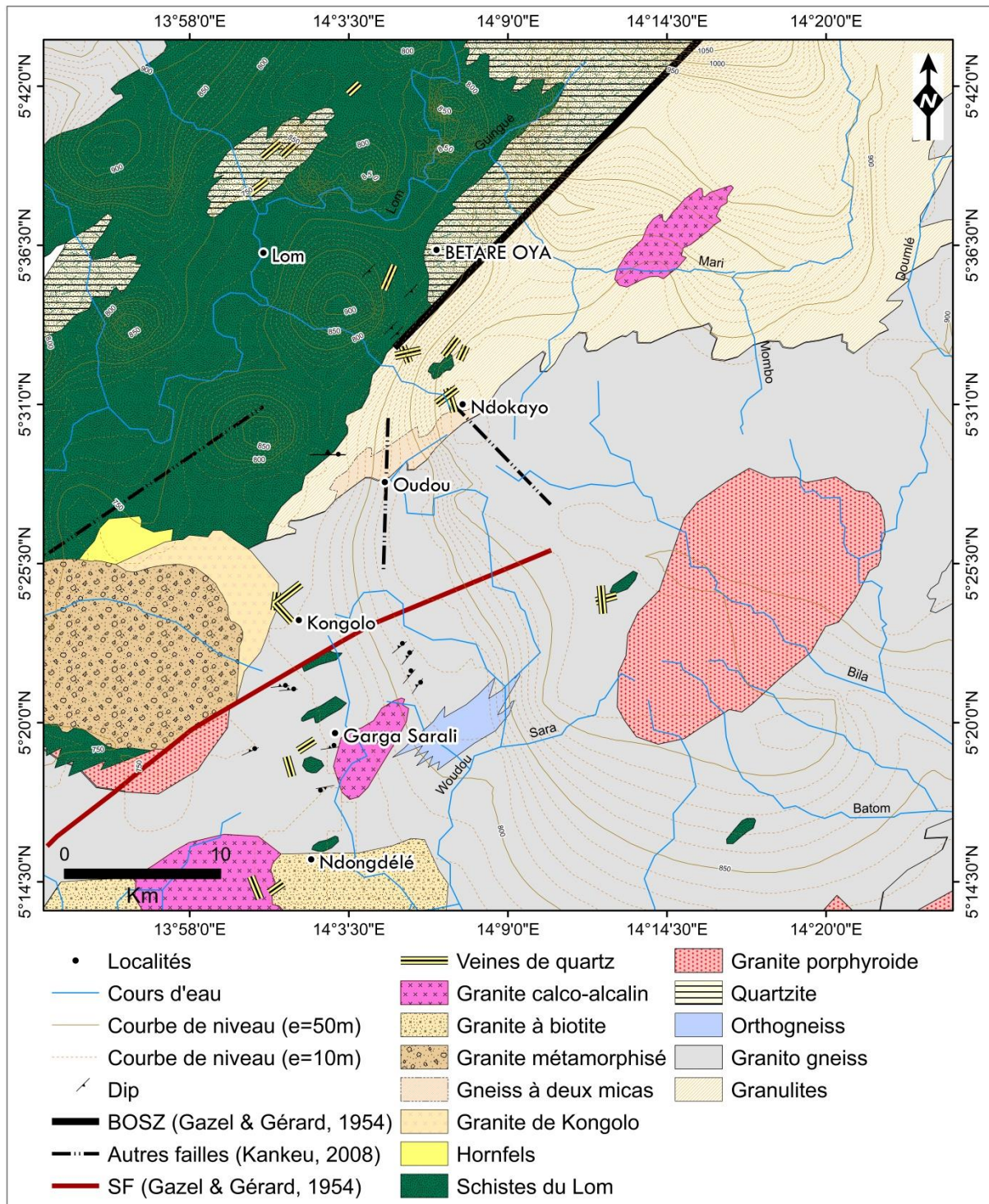


Figure 7: Carte géologique de la zone d'étude (modifiée d'après Gazel & Gerard, 1954).

IV.1 Formations sédimentaires

Les formations sédimentaires bien que rares à cause du fort processus de cuirassement sont représentées par des arènes argilo-sableuses, les argiles latéritiques et des produits ferrugineux avec des incrustations de blocs de roches ayant résisté à l'altération. Elles sont compactes et forment le plus souvent de grandes dalles à la couleur ocre.

IV.2 Intrusions granitiques

Ce sont des formations intrusives postérieures aux formations métamorphiques où elles se rencontrent sous forme d'enclaves. On y distingue ([Kankeu, 2008](#)) :

- Les **granites porphyroïdes** (type kékékéké) d'une texture grenue à grain moyen à grossier. La minéralogie est composée de quartz, de feldspath alcalin et de plagioclases, de biotite et de minéraux opaques. Ce type de granite d'après l'auteur présente des phénomènes de re-cristallisation.
- Les **granites à grain fin** (type Kongolo I) de texture grenue et dont la fabrique est affectée par la déformation. La minéralogie est composée de quartz, de feldspaths, de biotite et d'opales.
- Les **granito-gneiss** précoces et métamorphisés rencontrés à Garga-Sarali qui ont une structure orientée avec des contours concordants aux directions structurales des formations encaissantes. Ce sont des orthogneiss granitiques et dioritiques généralement leucocrates et de grain fin. L'étude des lames minces réalisées ([Kankeu, 2008](#)) montrent une texture grenue à granoblastique avec une association plus ou moins entre la biotite et la muscovite. La minéralogie est composée de quartz, de feldspaths, de micas et de minéraux opaques.
- Les **granites mylonitisés** qui sont des granites orientés NE-SW dont la foliation mylonitique est définie par des rubans de quartz intercalés de lits de micas et ou de porphyroclastes de feldspath. La minéralogie est composée de quartz, de feldspaths, de micas et d'opales.
- Les filons sont constitués entre autres des microgranites tardifs, les veines de quartz qui recoupent toutes les formations antérieures.

IV.3 Roches métamorphiques

Les roches métamorphiques comprennent des granito-gneiss, des gneiss plus ou moins migmatites et des schistes.

Schistes

Ce sont de roches métamorphiques qui affleurent sous forme d'enclaves dans les granites au niveau de Garga Sarali et ses environs. Les observations de lame mince ([Kankeu, 2008](#)) montrent que la roche est à grain très fin. On y trouve des petits grains de quartz recristallisés, de fines paillettes de minéraux phylliteux soulignant la schistosité. Dans la zone du Lom, ces schistes présentent en lame mince ([Kankeu, 2008](#)) une texture granolépidoblastique à lépidoblastique. La roche est composée de quartz recristallisé associé à

des paillettes de séricites, biotite, chlorite et de feldspath. Les données de géochronologie (Toteu et al., 2001 ; 2006a) montrent que les schistes sont par datation U-Pb (Zr) $\sim 1849 \pm 12$ à 644 ± 5 Ma ; Sm-Nd ~ 1.4 Ga.

Quartzites

Ce sont des roches métamorphiques rencontrées au sein des schistes du Lom, et qui présentent une schistosité de cristaux de quartz et des lamelles de micas blancs (Kankeu, 2008). La composition est quartz+micas+feldspath+opaques. Les données de géochronologie (Toteu et al., 2001 ; 2006a) montrent que les schistes sont par datation U-Pb sur Zircon de $\sim 1986 \pm 3$ à 972 ± 12 Ma et des âges modèles Sm-Nd de 2.2 Ga.

Granulites

Ce sont des roches métamorphiques catazonale (haute pression, haute température) à grain fin et à structure granoblastique (Kankeu, 2008)

La lithologie rencontrée permet de ressortir quelques éléments structuraux de la zone d'étude. En effet, Kankeu et al., (2006) a défini dans la zone d'étude des domaines structuraux à savoir un domaine « I » comprenant les granites porphyriques de Kékékéké et le granite à grain fin de Kongolo I et un domaine « II », porteur d'une empreinte des évènements tectoniques dont une *D1* mal connue mais qui reste visible à l'échelle microscopique (Soba, 1989 ; Kankeu et al., 2006). Une *D2* à l'origine des structures dites régionales d'orientation E-W à NE-SW et qui correspond à la foliation générale des séries métamorphiques et enfin une *D3* caractérisant les cisaillements dans des conditions de déformation ductile, marqué par une *S3* caractérisée par une foliation redressée ou subverticale de direction générale ENE-WSW et une *C3* qui correspond au contact entre les granito-gneiss et les granites à l'échelle régionale.

Il ressort de ces différents travaux que, cette zone d'étude s'intègre dans la série de Lom qui correspond à une ceinture étroite et discontinue, orientée NE-SW et constituée d'une unité inférieure et d'une unité supérieure (Soba, 1989). Cette série a subi d'après Regnault (1986), un métamorphisme régional épi à fini-mésozonal, et un métamorphisme thermique lié aux intrusions qui correspondent à deux phases majeures de structuration à savoir : la phase N40-60 conforme à la foliation des schistes et des accidents mylonitisés ; la phase N110-140, matérialisée par des effondrements visibles en photogéologie. Aussi, les formations de cette série seraient discordantes sur les formations antérieures du Complexe de base, qui seraient affectées par un léger métamorphisme et rajeunies au Panafricain.

D'après [Yonta \(2010\)](#), la série du Lom est bien connue par ses minéralisations en or et d'autres affleurements riches en éléments tels que Pb, Bi et Mo et associés aux intrusions granitiques. L'évolution tectono-métamorphique est polyphasée avec deux déformations successives. Les failles dextres ou senestres, localement parallèles à la foliation principale, caractérisent des étapes tardives de l'évolution structurale. Le métamorphisme régional est d'âge panafricain ([Soba, 1989](#)), de basse pression et associé à une tectonique transpressive ([Kankeu et al., 2006](#)). Le bassin du Lom est considéré comme post-collisionnel. Le grand potentiel économique des minéraux (exemple de l'or) de la zone du Lom peut être expliqué par la remobilisation au Néoprotérozoïque du socle archéen et Paléoprotérozoïque ([Toteu et al., 2006a](#)).

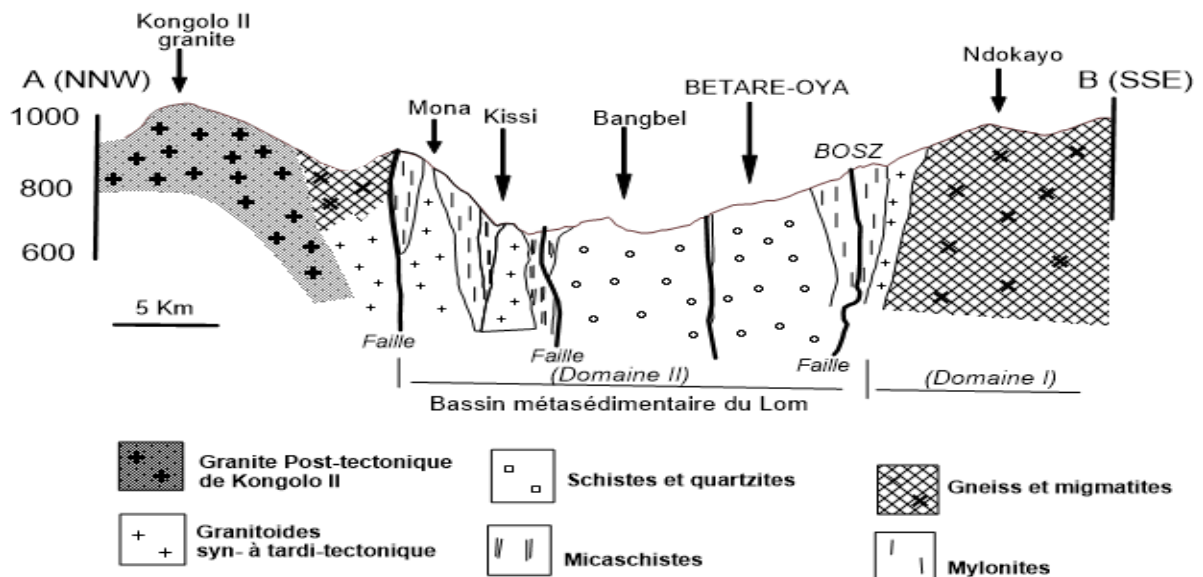


Figure 8: Coupe géologique schématique de la zone de Bétaré-Oya (In [Kankeu et al., 2006](#)).

[Kankeu et al., \(2006\)](#) suggère que les zones de cisaillement (NE-SW) et les méga plis sont contemporains et qu'elles s'intègrent dans un régime régional de transpression dans la zone panafricaine d'Afrique Centrale, impliquant un cisaillement dextre le long des couloirs mylonitiques de direction NE-SW, synchrone d'un serrage de direction perpendiculaire orienté NW-SE.

V. Aperçu géophysique

Les travaux en géophysique ont un caractère plus régional. Les travaux de levées aéromagnétiques de [Parterson & Watson \(1976\)](#) et de [Meying \(2011\)](#) mettent en évidence des anomalies magnétiques de faibles intensités liées à des formations métamorphiques. Les

travaux en gravimétrie de [Mbom-Abane \(1997\)](#) révèlent l'existence d'un accident tectonique majeur orienté E-W le long du parallèle 4°N, les travaux de [Ndougsa et al. \(2003\)](#) mettent en évidence une faille normale E-W dans la zone Mengueme/Abong-Mbang, et enfin les travaux en magnétotellurie de [Meying et al. \(2009\)](#) mettent en exergue un réseau de faille E-W s'étendant d'Akonolinga jusqu' à Abong Mbang. Les travaux de [Gouet et al. \(2013\)](#) dans la zone de Tindikala-Bouotou à Ngoura par la méthode courant direct/polarisation induite (DC/IP) a permis d'établir que (i) les minéralisations aurifères sont contenues dans les manteaux d'altération traversés par des veines de quartz fortement minéralisés qui s'étendent jusqu'à 100 mètres de profondeur, (ii) la direction de la minéralisation est N-S établissant ainsi le principe de contrôle structural. Les travaux de [Fon \(2012\)](#) dans le secteur de Bétaré Oya, utilisant la méthode DC/IP, les résultats d'échantillonnage géochimiques et l'application des SIG ont permis d'identifier un couloir de minéralisation aurifère suivant la direction NE-SW atteignant les 95 mètres de profondeurs, qui correspond à l'orientation structurale des veines de quartz observées sur les parois des puits d'exploitation artisanale. Cette orientation est parallèle à la foliation régionale des formations de la zone de cisaillement centre camerounais. Les récents travaux en géologie ([Kankeu et al., 2006](#)) ayant trait à l'application d'une méthode géophysique à savoir l'Anisotropie de la Susceptibilité Magnétique (ASM) dans la zone d'étude aura permis d'étudier la déformation tant en intensité qu'en orientation. Cette étude a contribué dans l'apport de nouvelles données sur l'évolution structurale du Panafricain au Cameroun, notamment une cartographie géologique au 1/50.000 et la mise en évidence de deux zones mylonitiques d'intense déformation à savoir la Sanaga Fault (SF) et la Betare Oya Shear Zone (BOSZ) d'orientation NE-SW, qui divisent la région d'étude en quatre domaines structuraux ayant des lithologies et des fabriques bien précises et dont notre secteur d'étude en fait partie.

Conclusion

Un ensemble de travaux récents ([Cornachia & Dars, 1983](#) ; [Ngako et al, 2003](#) ; [Penaye et al, 1993](#) ; [Mvondo et al, 2003 et 2007](#) ; [Olinga et al, 2010](#)), montre que le Cameroun est essentiellement constitué d'un socle Précambrien. Ce sont principalement des granites et migmatites rajeunis lors de l'épisode orogénique panafricaine (600-500 Ma) qui se compose du complexe métamorphique, généralement métamorphisé et granitisé ; et des formations de plates-formes, solidaires du complexe sous-jacent, plissées, peu ou pas métamorphosées. Les niveaux les plus anciens du complexe de base appartiennent au Craton du Congo, en bordure duquel se sont développées localement les formations charnockitiques qui constituent les éléments repris du socle Archéen dans la Zone Mobile. Dans la zone camerounaise ([Bessoles](#)

& Lasserre, 1977), la partie supérieure du complexe de base est représentée par les formations des séries quartzo-schisteuses à muscovites constituées des séries de Mbalmayo-Bengbis, d'Ayos, de Poli et de Lom.

Les formations de plates-formes sont représentées par la série du Dja inférieur, dont les niveaux quartzitiques sont fréquemment recoupés par les filons doléritiques.

La couverture sédimentaire repose sur le socle Précambrien, et est le témoin d'une émergence depuis le Précambrien terminal (infra Précambrien). La couverture sédimentaire est constituée, au Sud, de roches sédimentaires très récentes, et au Nord de roches sédimentaires du Mésozoïque et du Cénozoïque qui couvrent le bassin du Tchad, et au Sud-Ouest des roches du Crétacé inférieure qui couvrent le Golfe de Mamfé, le fossé de la Bénoué, le bassin de Bida (Genik, 1992).

Un volcanisme trachy-basaltique en relation avec l'ouverture des accidents majeurs préexistants qui a débuté à l'Eocène au cours de l'épisode magmatique Eocène dit ultime (Cornachia & Dars, 1983), se poursuit jusqu'à ce jour (Mont Cameroun toujours en activité).

D'après les études géochronologiques, le Cameroun comporterait principalement deux zones structurales (Bessoles & Lasserre, 1977) :

- au Sud, le Craton du Congo stable, n'ayant subi aucun effet sensible de l'événement thermo-tectonique panafricain, représenté par le complexe du Ntem ;
- les parties centrale et septentrionale correspondent à la zone mobile de l'Afrique Centrale, siège des événements tectoniques du Panafricain, qui constitue la structure essentielle de l'orogénèse panafricaine. Cette zone orogénique Nord Equatoriale, de direction E-W, au Nord du Craton du Congo, traverse le Cameroun et la R.C.A., et se prolongerait au NE du Brésil. Elle constitue la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale (Nzenti et al., 1994 ; Penaye, 1993 ; Poidevin, 1985 ; Rolin, 1992 & 1995).

Du point de vue tectonique et structural (Fig. 9), deux phases majeures de déformations sont reconnues dans la partie camerounaise de la Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale. (Ngako et al., 2003 ; Olinga et al., 2010).

- Dans la partie méridionale, on rencontre :
 - une déformation D₁ régionale, mal connue et qui ne comporte pas de tectonique tangentielle ;
 - une phase D₂ tangentielle marquée par la mise en place de la nappe de Yaoundé à déversement Sud vers le Craton du Congo.

Cette partie méridionale de la Chaîne Panafricaine qui chevauche sur le Craton du Congo est caractérisée par des régimes de tectonique horizontale en relation avec la collision continentale.

- Dans la partie septentrionale on rencontre :
 - une phase panafricaine D₁ associée à un charriage complexe W et SW affectant un socle d'âge éburnéen ;
 - une phase D₂ marquée par des plis en échelon N-S à E-W, droits ou déversés associés à des décrochements sénestres, à laquelle on associe souvent une phase tardive D₃, marquée par des décrochements dextres N70° à N110° dont le plus important est le cisaillement centre camerounais (Ngako et al., 2003 ; Olinga et al., 2010).

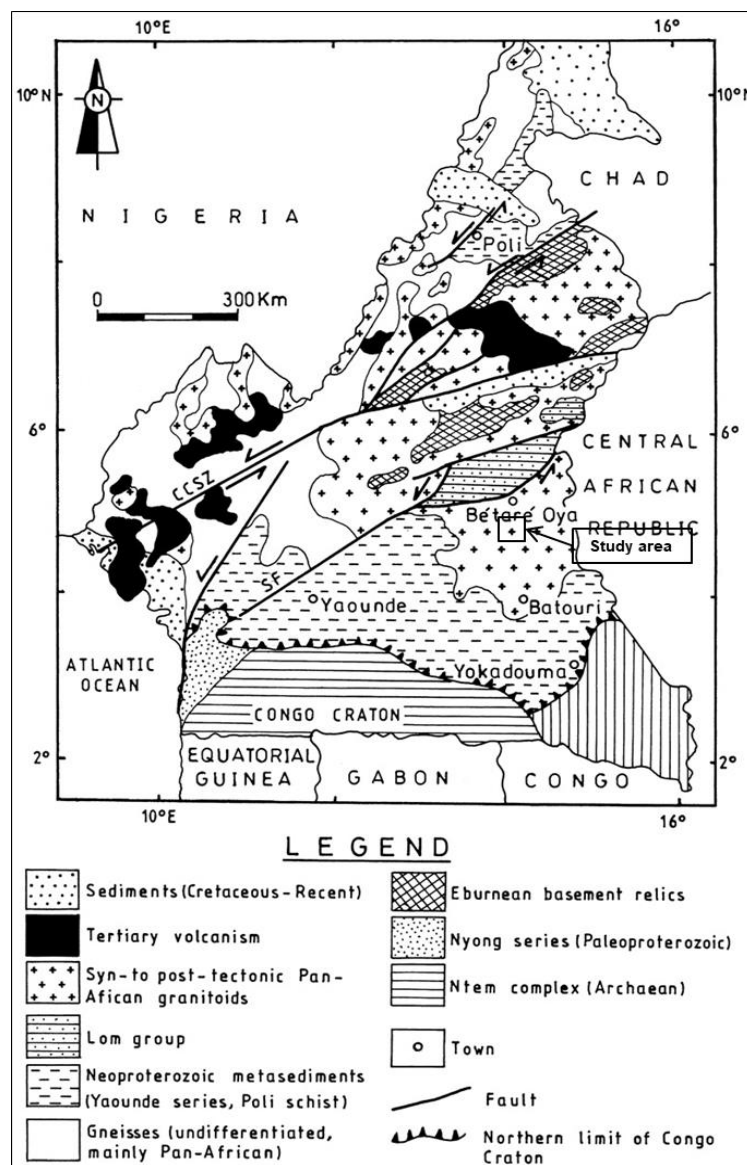


Figure 9: Contexte structural régional du Cameroun (In Suh et al., 2006).

Chapitre 2. Matériels et méthodes

« La plus grande gloire n'est pas de ne jamais tomber, mais de se relever à chaque chute », Confucius

Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter le matériel et outils utilisés pour l'acquisition et le traitement des données. Aussi, il met en exergue les fondements et les bases théoriques des méthodes d'analyse des images satellitaires pour la mise en évidence des éléments structuraux, de la cartographie minière et des méthodes magnétotelluriques, outils permettant d'établir les relations entre les éléments structuraux et la présence de substances en surface dans la zone de Garga Sarali – Bétaré Oya.

I. Méthodes

I.1 Revue de la littérature

Nous avons exploité les cartes géologiques de [Gazel & Gérard \(1954\)](#), les données et résultats obtenus des travaux de plusieurs auteurs tant dans le domaine de la géologie, de la géophysique et de la télédétection et SIG.

I.2 Travaux en laboratoire et de terrain

Les travaux en laboratoire ont consisté en l'acquisition des images satellites, à l'utilisation des outils SIG pour la réalisation des diverses cartes et l'interprétation des données collectées lors de la campagne géophysique. Les travaux de terrain ont porté sur la campagne de cartographie de sites miniers avec évaluation des teneurs, des relevés géologiques et structuraux et la collecte des données par la méthode audiomagnétotellurique.

I.2.1 Méthodes d'analyse des images satellitaires pour la mise en évidence des éléments structuraux

La cartographie géologique et minière couplée à l'analyse des linéaments structuraux représentent une composante essentielle pour la compréhension de la tectonique régionale et dans les programmes de prospection minière à caractère prédictif. Cet ensemble de méthodes permet dans la chaîne des opérations minières de gagner en temps mais surtout des économies. La géologie de la région de l'Est du Cameroun est marquée, par une rareté des affleurements et par une épaisse couche latéritique.

L'exploitation de l'or dans ce contexte particulier se fait soit dans les cours d'eau, soit au niveau des couches latéritiques recoupées par des réseaux de veines (stockworks), qui sont l'expression d'un contrôle structural à plusieurs niveaux d'observation. La maîtrise de cet environnement est rendue de nos jours possible par l'analyse et interprétation des images

satellites, des données de survol aéromagnétique et des données de terrain dans une optique de mise en évidence des éléments structuraux qui contrôlent les minéralisations.

Les linéaments sont usuellement définis comme étant des structures linéaires ou curvilignes souvent associées à des éléments géomorphologiques et/ou à des structures tectoniques variées (El Hadani, 1997). Toutefois, il convient de savoir que tous les linéaments ne sont pas considérés comme étant des structures, car les infrastructures et ouvrages humains sont aussi enregistrés comme des linéaments. Il devient à cet effet déterminant de savoir discriminer les objets et leur donner une signification géologique à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) et des données de terrain. Aussi, l'extraction des linéaments sans l'application de filtres directionnels ne fait pas ressortir tout le réseau de linéaments, mais elle reste une étape importante de pré-analyse dans la cartographie structurale. L'objectif visé étant de détecter autant que possible toutes les structures des linéaments d'une zone et d'établir dans le cas de la recherche des substances minérales les relations entre ces structures et la présence de substances utiles.

La mise en évidence des éléments structuraux à travers une interprétation des données satellites du district aurifère Garga Sarali - Bétaré Oya dont fait partie la présente zone d'étude consiste d'une part, à améliorer la connaissance géologique et minière de l'ensemble des formations Panafricaines en général et du Néoprotérozoïques en particulier, et d'autre part, constitue un outil nouveau de prédictivité et d'aide dans la définition des cibles à explorer.

Pour les besoins de notre étude, une image du capteur LANDSAT OLI a été téléchargée via le site Earth explorer : <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Pour plus d'information sur la scène, voir le fichier texte fourni avec l'image (LC08_L1TP_184056_20190201_20190206_01_T1_MTL.txt).

Les caractéristiques de cette image sont les suivantes :

- Path/Row (184/56) ;
- Date d'acquisition en saison sèche (01/02/2019) période de faible couverture nuageuse ;
- Heure d'acquisition (09 :19 :50) ;
- Couverture nuageuse (0.05).

Cette scène qui couvre la zone de Garga Sarali – Bétaré Oya, correspond à la zone 33 Nord de la projection cartographique Universal Transverse Mercator (UTM, zone 33N), et utilise le système géodésique de référence WGS 84. Elle est préalablement ortho-rectifiée

(rectification des distorsions de l'image brute) et peut être directement intégrée sous forme d'image géoréférencée dans les logiciels de type SIG (Système d'Information Géographique) en utilisant des interfaces d'importation appropriées.

À ces images s'ajoute une base de données cartographiques constituée de la carte géologique du secteur à l'échelle 1/500000, des cartes topographiques à échelle 1/200000 couvrant le secteur d'étude et les données de cartographie minières des sites d'exploitation d'or avec la collecte des teneurs, et des localisations GPS des sites actifs et déjà abandonnés. Les observations pétrographiques et les mesures structurales recueillies au cours des missions de terrain ont permis d'interpréter et de valider les structures géologiques décelées à l'aide de l'imagerie satellitaire. L'analyse croisée des différentes cartes thématiques a été réalisée grâce au logiciel Arc GIS tandis que la mise en évidence des directions s'est fait à l'aide de l'application GeoRose 0.5.1 (<https://www.yongtechnology.com>).

Tableau 2: Caractéristiques des bandes LANDSAT OLI 8 (RGB 432) utilisées dans cette étude.

Satellites	Début	Fin	Bandes	Couleurs	Longueur d'onde μm	Résolution	Altitude	Fauchée	Objets renseignés
Landsat 8 OLI	11/02/2013	Opérationnel	Band 1	Côtier/aérosol (Bleu foncé)	0,433 - 0,453	30	705 km	185 km	Qualité de l'eau
			Band 2	Bleu	0,450 - 0,515				Végétation
			Band 3	Vert	0,525 - 0,600				Sol, bâti, minéraux
			Band 4	Rouge	0,630 - 0,680				Végétation
			Band 5	PIR	0,845 - 0,885	Sol humide, bâti, minéraux			
			Band 6	Infra Rouge à ondes courtes	1,560 - 1,660	30			Chaleur
			Band 7	Infra Rouge à ondes courtes	2,100 - 2,300	30			Sol humide, bâti, minéraux
			Band 8	PAN	0,500 - 0,680	30			
			Band 9	Cirrus	0,500 - 0,680	15			Détection des nuages hauts et minces

Sigles	Significations
RBV	Return Beam Vidicon/Vidicon De retour De Faisceau
MSS	Multi Spectral Scanner/ Scanner Multi Spectral
TM	Thematic Mapper/Catographie Thématique
ETM +	Enhanced Thematic Mapper/Catographie Thématique améliorée
OLI	Operational Land Imager/Opérateur d'imagerie terrestre
TIRS	Thermal InfraRed Sensor/capteur Infrarouge Thermique
PIR	Proche Infra Rouge
MIR	Infra Rouge Moyen
TIR	Infra Rouge Thermique
PAN	Panchromatique
CIRRUS	

La mise en évidence des linéaments structuraux doit respecter les différentes étapes suivantes (Fig. 10) :

- Un prétraitement de l'image originale à travers deux types de corrections : la correction radiométrique et la correction atmosphérique.
 - **La correction atmosphérique** : elle consiste généralement à supprimer les effets des nuages et des aérosols d'une image de rayonnement. Le résultat est une image de réflectance de surface apparente. Elle a été effectuée avec le module FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes*) de ENVI 5.3;
 - **La correction radiométrique** : Le processus de traitement radiométrique se base sur des équations de conversion des nombres numériques calibrées (DNS) de chaque pixel aux unités absolues de rayonnement au-capteur spectral ce qu'on appelle la radiance, et au réflectance au Haut-de-atmosphère (TOA) qui correspond au rapport de la luminance émise par une surface élémentaire sur l'éclairement total reçu (Belhadj, 1998).

Une correction géométrique est souvent réalisée dans les centres de traitement des distributeurs des images. Les images utilisées proviennent du produit de données Niveau T1 (L1TP) du site NASA (http://landsat.usgs.gov/descriptions_for_the_levels_of_processing) qui offre une précision géométrique systématique.

- une analyse numérique par le traitement des données obtenues aux moyens de logiciels tels que Arc GIS et Geo Rose ;
- une phase de validation des données issues des analyses analogiques et numériques (à partir de cartes géologiques préexistantes et de travaux sur le terrain).

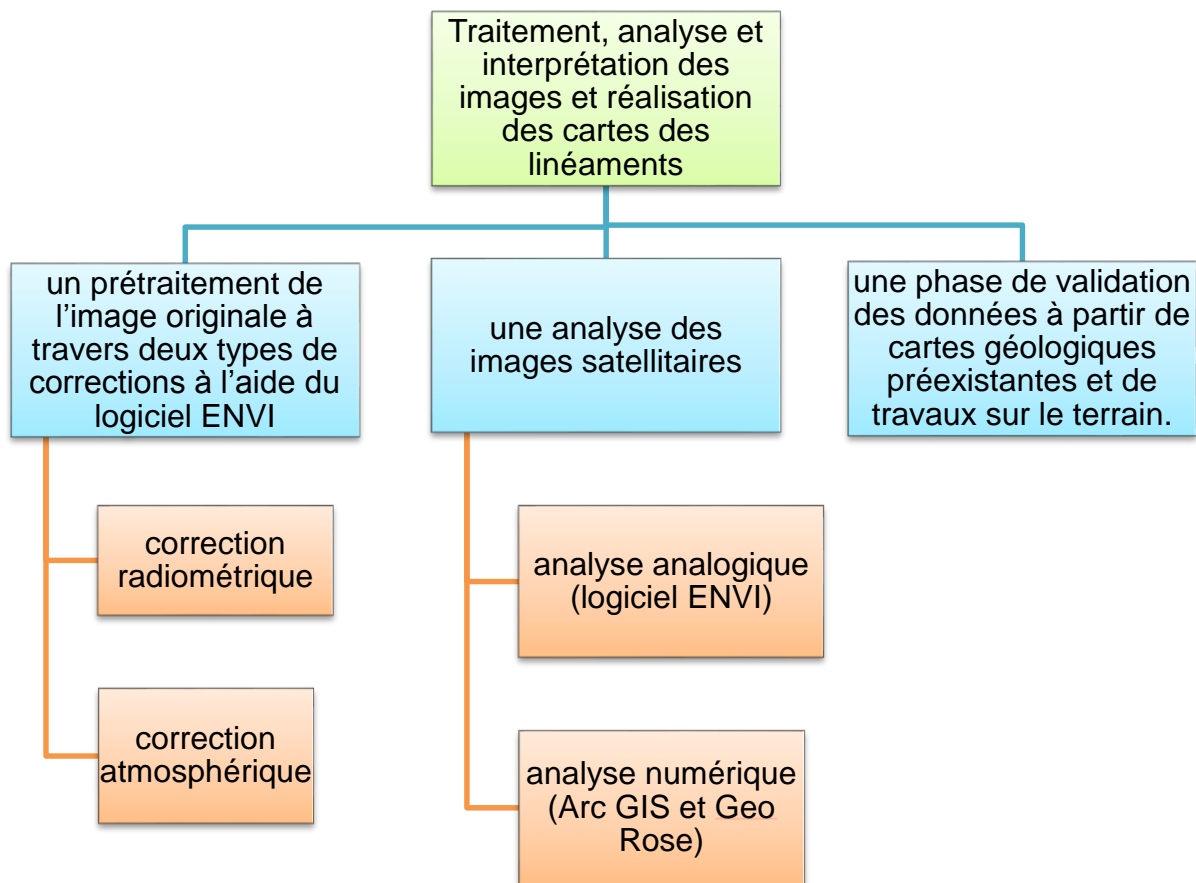


Figure 10: Chaîne de traitement de la scène Landsat OLI 8.

Deux types d'analyses sont couramment effectués sur les images. Il s'agit de l'analyse analogique et de l'analyse numérique (Koffi et al., 1998).

I.2.1.1 Analyse analogique

C'est une analyse qui consiste à faire ressortir les différentes agglomérations de la zone investiguée, à matérialiser le réseau hydrographique, les différentes limites lithologiques possédant une signature spectrale particulière et enfin toutes les structures des linéaments.

Sur une image satellitaire, les différentes zones homogènes peuvent caractériser soit un type de texture bien précise, soit un type d'objets géologiques, soit des zones fortement structurées, des parcelles brûlées, des paysages transformés par l'activité humaine. La texture sur l'image satellite est représentée par un agencement spatial de petits éléments homogènes de même intensité de rayonnements (Koffi et al., 1998). Elle est aussi matérialisée par une forme, un contenu homogène et une grandeur spécifique dans un environnement connu.

De façon générale, la texture sur les images LANDSAT OLI 8 dépend fortement de la végétation et de la couverture latéritique. Elle est représentée par un aspect lisse ou grossier. La forme, quant à elle, fait allusion aux structures circulaires observées sur les images satellites

qui peuvent correspondre aux réseaux de fractures concentriques, à la foliation magmatique qui souligne le caractère diapirique du massif granitique, à des faciès pétrographiques emboîtés et/ou des stades d'arénisation différents (Scanvic et al., 1984 ; Rolet, H et al., 1993). Les structures circulaires caractérisent la majorité des granitoïdes.

La notion de teinte prend en compte la couleur (ou le niveau de gris pour la bande panchromatique) sur les images satellites ETM+ correspondant à des lithologies particulières, mais aussi à des évènements climatiques ou à l'activité humaine.

La carte géologique et topographique étant existante dans la zone d'étude nous avons plus fais usage de l'analyse analogique.

I.2.1.2 Analyse numérique

Elle tient compte du fait que les images aient été préalablement géoréférencées et orthorectifiées. Le traitement aboutit à des images en compositions colorées. La combinaison des canaux 1, 2, 3, 4, 5, 7 permet d'avoir une image plus lisible et plus contrastée. Il s'en suit une analyse des images ainsi générées, par l'application de techniques plus pertinentes pour le rehaussement des structures linéaires. Ceci fait appel à l'utilisation des logiciels SIG. Ces logiciels sont utiles pour le rehaussement des structures linéaires et la finalisation de la carte. Différents types de traitements sont réalisés, en vue de rendre plus facilement détectables les ensembles des linéaments. Parmi ces traitements, l'on distingue, par exemple les filtres ou masques (Fig. 13). En effet, le filtrage consiste à changer la valeur d'un pixel en fonction de celle de ses voisins (Touzi et al., 1988 ; Lopez et al., 1993 ; Yésou et al., 1993). Le type de filtre utilisé dépend des résultats recherchés. Par exemple, les filtres passe-bas correspondent à un lissage de l'image par élimination des hautes fréquences. L'on a également les filtres passe-haut qui ont pour rôle d'éliminer les basses fréquences et permettent une détection des contours.

Dans le cadre de la présente étude, les filtres directionnels Sobel ont été utilisés pour le traitement et le rehaussement de l'image. Ces filtres directionnels dont les matrices d'application sont présentées dans la Figure 13 ont été conçus pour faire ressortir ou masquer des caractéristiques spécifiques d'une image en se basant sur leur fréquence liée à la texture (Akame et al., 2014). L'extraction des éléments structuraux est faite grâce à l'application des filtres directionnels sur les bandes ETM+.

1	1	1	2	1	1	1
1	1	2	3	2	1	1
1	2	3	4	3	2	1
0	0	0	0	0	0	0
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1
-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1
-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1
Filtre SOBEL de direction N-S						
0	1	1	1	1	1	2
-1	0	2	2	2	3	1
-1	-2	0	3	4	2	1
-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-2	-4	-3	0	2	1
-1	-3	-2	-2	-2	0	1
-2	-1	-1	-1	-1	-1	0
Filtre SOBEL de direction NE-SO						
-1	-1	-1	0	1	1	1
-1	-1	-2	0	2	1	1
-1	-2	-3	0	3	2	1
-2	-3	-4	0	4	3	2
-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-1	-2	0	2	1	1
-1	-1	-1	0	1	1	1
Filtre SOBEL de direction E-O						
2	1	1	1	1	1	0
1	3	2	2	2	0	-1
1	2	4	3	0	-2	-1
1	2	3	0	-3	-2	-1
1	2	0	-3	-4	-2	-1
1	0	-2	-2	-2	-3	-1
0	-1	-1	-2	-1	-1	-2
Filtre SOBEL de direction NO-SE						

Figure 11: Matrice des différents filtres (In [Yesou et al., 1993](#)).

Une carte de linéaments est obtenue à la suite d'analyse assistée et manuelle d'images résultantes de ces différentes opérations de traitements.

Les résultats de l'analyse analogique et ceux obtenus de l'analyse numérique sont scannés et numérisés puis combinés pour obtenir une carte des linéaments préliminaires. Cette carte sera, par la suite, corrigée pour, enfin, obtenir une carte des linéaments définitifs de notre zone d'étude.

I.3 Méthode de levé géologique et structural, cartographie des sites miniers et d'évaluation des teneurs

Le levé géologique et structural est une technique qui consiste relever les mesures structurales qui sont visibles sur un affleurement géologique (plis, axe de plis, foliation, failles, cisaillement, etc.) à l'aide des instruments de mesures (boussoles, GPS, clinomètres). Les données collectées sont ensuite insérées dans une base de données puis traitées et représentées à travers les logiciels SIG afin de donner les orientations structurales sur une carte.

La cartographie des sites miniers constitue une partie très importante dans l'établissement d'un contrôle structural de la minéralisation et la définition des cibles par prédictivité. La démarche scientifique consiste à :

- répertorier auprès des administrations publiques en charge des questions minières la liste des sociétés détentrices des permis dans le secteur d'étude ;

- faire des descentes sur le terrain pour géolocaliser lesdits sites en relevant les coordonnées GPS ;
- faire une description de l'environnement immédiat du site faisant l'objet d'une exploitation artisanale ;

L'évaluation des teneurs est une méthode de prospection qui consiste, à effectuer des lavages à la bâteau et à recueillir les fonds de bâteau d'où seront obtenus les quantités d'or qui seront pesées. Les résultats en g/t sont donc consignés dans la base donnée conçue dès le départ et seront exploitées pour réaliser les cartes de teneurs.

I.4 Méthodologie de la prospection géophysique

I.4.1 Généralités sur les méthodes de prospection géophysique

La géophysique est une discipline des sciences de la terre, qui utilise toutes les méthodes qualitatives et quantitatives de la physique pour obtenir des informations sur les parties du globe interne et externe. Pour ce faire, elle se subdivise en deux principales branches, à savoir la géophysique externe et interne.

La géophysique externe est la sous-branche qui s'occupe de l'étude de la couverture non minérale des planètes. Elle englobe la météorologie, l'océanographie et l'hydrologie.

La géophysique interne, objet de la présente recherche, est la sous-branche qui s'occupe de l'étude des enveloppes internes du globe. Une de ses spécialités est la géophysique appliquée qui s'intéresse à l'identification et à l'évaluation d'une part, des ressources naturelles (prospections pétrolière et minière, hydrogéologie, pédologie, génie civil et même archéologie), et d'autre part, à la connaissance de la structure interne du globe terrestre en mettant en évidence des zones d'accidents structuraux, en déterminant celles potentielles à risques naturels ainsi que les zones d'accumulation des polluants relevant des activités humaines. De ce fait, elle couvre aussi bien la proche surface, que les couches profondes.

Dans le domaine de la recherche des substances naturelles, l'un des défis de la géophysique appliquée sera de fournir les informations de proche surface et de profondeur, informations complémentaires des données d'observation de surface, qui permettront de démontrer entre autre, pourquoi la majorité des gisements sont fortement contrôlés par la structure. L'observation suivante découle du constat relatif au type de gisements rencontrés à travers le monde montre, selon [Thorne \(2011\)](#), que « la quasi-totalité des gisements se trouvent

principalement en bordure de failles (dont quelques-unes sont des limites tectoniques) ou dans les zones affectées par les grands cisaillements ».

Compte tenu de l'importance de la géophysique dans l'amélioration de la connaissance de la terre et de son contenu, il convient d'avoir plus amples informations sur ladite discipline. Pour ce faire, ce travail se propose de présenter succinctement l'objet et les principales méthodes géophysiques ; les généralités sur les méthodes de prospection électromagnétique ; la méthode audiomagnétotellurique et son importance dans l'exploration géologique et la prospection minière.

I.4.2 Objet et principales méthodes de la prospection géophysique

Plusieurs auteurs utilisant les méthodes de prospection géophysique ([Parasnis, 1997](#) ; [Garcia et Jones, 2002](#) ; [Ndougsa et al., 2011](#) ; [Meying et al., 2009](#)) s'accordent sur le fait que la prospection géophysique consiste en :

- la mise en évidence d'un environnement géologique favorable à la présence des substances minérales telles que les hydrocarbures, les métaux précieux (or, diamant, saphir), les sources d'eau minérales et thermo-minérales, les terres rares (uranium), les métaux de base (fer, argent, cuivre...) ;
- la connaissance plus éclairée de la structure du sous-sol. C'est le cas de la prospection structurale ou indirecte ;
- la recherche directe du contenu du sous-sol par la mise en évidence des effets de certaines propriétés physiques caractéristiques de quelques substances composites (minerais), perceptibles sur les mesures géophysiques.

Les principales méthodes utilisées en géophysique appliquée sont généralement classées dans deux (02) catégories :

- **Les méthodes passives**, appelées aussi naturelles, dont font partie la gravimétrie, la magnétométrie, la méthode tellurique, la radiométrie, les méthodes électromagnétiques
- **Les méthodes actives**, appelées aussi provoquées dont font partie les méthodes acoustiques et sismiques, les méthodes électriques et les méthodes électromagnétiques.

La gravimétrie est une méthode permettant de détecter les variations de densité (selon la composition des terrains) à partir de la mesure de l'intensité du champ de gravité **g** comparée

à une valeur de référence. Elle se base sur les Lois d'attraction universelle (Lois de Newton), le potentiel gravitationnel et le champ gravitationnel. Elle est exprimée en mGal (milligal), sachant que $1mGal = 10^{-5}m.s^{-2}$.

Comme avantage, la gravimétrie permet des mesures précises. Elle est facile à déployer et offre une échelle très étendue. Comme inconvénients, il y'a de nombreuses corrections à apporter aux mesures pour obtenir la valeur de la gravité.

La méthode magnétique est basée sur le champ magnétique et la susceptibilité magnétique des minéraux. Comme avantage, cette méthode peut être utilisée pour étudier tous les types de gisements. Comme inconvénients, il est impossible d'évaluer les possibilités économiques d'un gisement en se basant sur les données magnétiques seules. L'unité du système international pour mesurer l'intensité du champ magnétique est le Tesla "T" mais l'unité couramment utilisée est le gamma " γ " tel que : $1\gamma = 1.10^{-9}T$

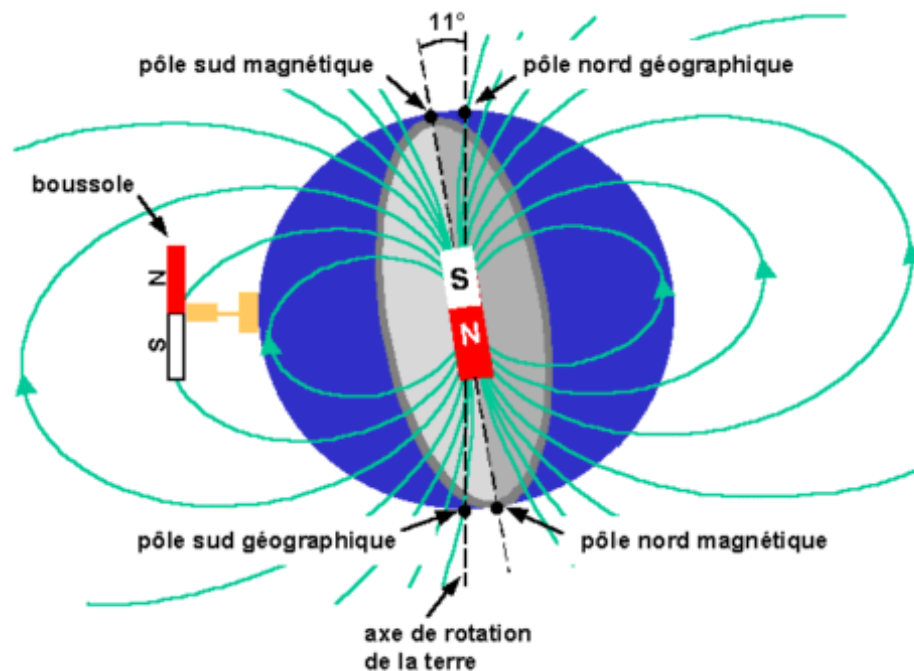


Figure 12 : Le champ magnétique terrestre (Univ. Paul Sabatier, 2000).

La méthode tellurique est basée sur la mesure des courants électriques naturels dans le sous-sol dus à des réactions physico-chimiques se produisant en profondeur. C'est au voisinage de certains minéraux (minerais, sulfures de cuivre, pyrite, graphite...), présentant la double propriété d'être bons conducteurs d'électricité et oxydables par les eaux de pluie que se développent ces courants.

Comme avantage c'est une méthode rapide et économique qui peut être utilisée en conjonction avec une méthode. Comme limites, elle ne détecte rien en l'absence de réaction de polarisation spontanée, sa profondeur est limitée à 60 m et l'interprétation quantitative est difficile à réaliser.

La méthode radiométrique est basée sur la mesure de la radioactivité de sources naturelles, telles que l'Uranium, le Thorium ou le Potassium, qui émettent à une fréquence qui leur est propre. Comme limites, on ne doit utiliser que des traceurs ayant une demi-vie très courte.

Les méthodes sismiques permettent de visualiser les structures géologiques en profondeurs grâce à l'analyse des échos d'ondes sismiques.

La méthode électrique implique la détection en surface d'effets produits lorsqu'un courant électrique traverse le sous-sol. Elle est basée sur la mesure en surface de l'intensité et de la différence de potentiel entre les différentes électrodes du dispositif de mesure. Le rapport de ces 2 paramètres permet de déterminer la résistivité des terrains sous-jacents.

Comme avantages, elle offre une flexibilité des géométries, de bonne résolution des terrains superficiels, elle est rapide à mettre en œuvre et ne nécessite aucun sondage mécanique.

Comme limites :

- Mise en œuvre est assez lourde.
- Difficulté d'injection des courants dans les terrains très secs.
- Influence importante des hétérogénéités des résistivités en surface.
- Temps de mesure important si grande longueur de ligne.
- Interprétation délicate sans données de puits ou de forage.
- Manque de précision.
- Comprend les risques d'erreurs d'interprétation non négligeables.

Dans le cadre de ce travail, il sera question de développer une composante des méthodes électromagnétiques, à savoir la méthode magnétotellurique (MT) et de présenter son importance dans l'exploration géologique et la prospection minière.

I.4.3 Généralités sur les méthodes de prospection électromagnétique

Les méthodes électromagnétiques consistent à caractériser le sous-sol par la valeur de sa conductivité (inverse de la résistivité). Ces méthodes dites "légères et rapides", sont le plus souvent utilisées pour mettre en évidence des variations latérales de couches, de matériaux et des accidents géologiques (Telford et al., 1990). En effet, à l'intérieur de la croûte terrestre, la

résistivité des unités géologiques dépend largement de leur contenu liquide, de la porosité, du degré de fracturation, de la température et de la teneur en minéraux conducteurs (Keller, 1987). Les fluides salins dans les pores et les ouvertures de fracture peuvent réduire la résistivité. La résistivité peut également être réduite par la présence de minéraux conducteurs comme les argiles, le graphite et la minéralisation de sulfures métalliques. Les températures élevées (atteignant les 300°C), provoquent très souvent la mobilité ionique réduisant ainsi considérablement la résistivité des roches (Nesbitt, 1993). Les roches ignées altérées, non fracturées sont normalement résistives, avec des valeurs typiques de 1000 Ω .m ou plus. Les zones de faille peuvent apparaître comme des unités à faible résistivité (inférieure à 100 Ω .m) quand elles sont composées de roches suffisamment fracturées pour accueillir le transport des fluides et une altération minéralogique conséquente (Eberhart-Phillips et al., 1995).

I.4.4 Méthode audiomagnétotellurique (AMT)

- **Principe théorique**

La méthode magnétotellurique (MT), proposée d'abord par Tikhonov (1950) et Cagniard (1953) fait appel aux variations naturelles du champ magnétique terrestre en fonction du temps. Tout comme la méthode magnétotellurique (MT), la méthode audiomagnétotellurique (AMT) mesure les variations naturelles du champ électromagnétique dans les gammes de fréquences audibles ou voisines, c'est-à-dire pour des fréquences comprises entre 10 et 10000 Hz. C'est une méthode géophysique qui fait usage du champ électromagnétique naturel de la terre pour explorer la résistivité du sous-sol (Telford et al., 1990 ; Vozoff, 1991). En effet, dans la partie supérieure de l'écorce terrestre, la résistivité des strates géologiques dépend plus de leur contenu fluide, de la porosité, du degré de fracturation, de la température et des minéraux conducteurs qu'elles contiennent que de la nature de la roche (Keller, 1987).

Par l'utilisation de la même théorie que la MT, l'AMT est la méthode utilisée pour estimer la résistivité électrique du sol pour des profondeurs allant de quelques mètres à environ un kilomètre (et parfois plus), en employant une bande de hautes fréquences (Zonge and Hughes, 1991). La résistivité peut être estimée à travers l'impédance électrique, une quantité tensorielle définie par le rapport $\left| \frac{\vec{E}}{\vec{H}} \right|$ des champs naturels transposés mesurés à la surface de la terre.

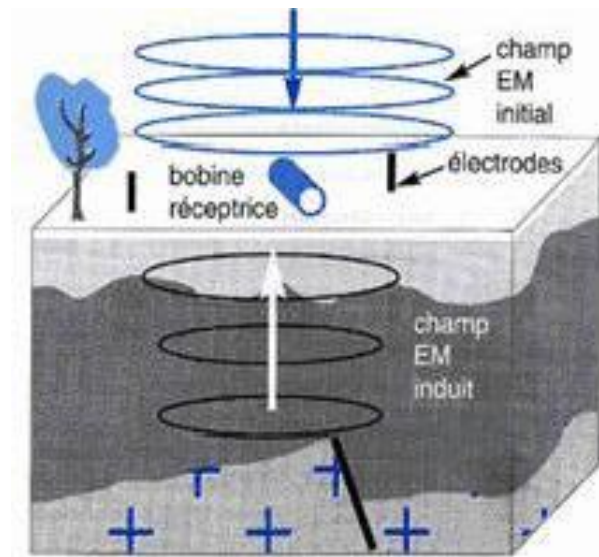


Figure 13 : Schéma du principe de la méthode AMT. (D'après IRD, 2002).

L'impédance électrique est une fonction complexe de la fréquence. Les données aux hautes fréquences sont utilisées pour une investigation des structures superficielles, tandis que celles des basses fréquences permettent des investigations en profondeur. Pour une structure 2-D, les termes diagonaux du tenseur d'impédance sont nuls, et les non diagonaux peuvent être découplés en mode transverse électrique (TE) et mode transverse magnétique (TM). Quand la géologie satisfait l'hypothèse 2-D, les données pour le mode TE mesurent le champ électrique parallèle à la structure géologique, et celles pour le mode TM mesurent le champ perpendiculaire à la structure géologique. Cette hypothèse 2-D permet une simplification significative dans la modélisation et l'inversion des données MT et AMT. L'inversion des données issues des sondages AMT donne une estimation de la résistivité en dessous du récepteur, et indique la complexité géo électrique en un site de mesure. Dans les milieux où la distribution change très peu entre les stations, le sondage de résistivité donne une estimation raisonnable des résistivités des couches en dessous du site (Mc Phee et al., 2008).

- **Les sources d'énergie MT/AMT**

Les sources d'énergie du champ MT sont exclusivement naturelles et directement liées à l'activité du soleil. Le spectre des valeurs angulaires permet de distinguer deux sources principales de perturbations EM :

- les sous-orages magnétiques générateurs des micropulsations aux fréquences inférieures à 1 hertz ;
- les orages magnétiques pour les pulsations supérieures à 1 hertz.

En deçà du hertz, les micropulsations prédominent. Ce sont des fluctuations du champ magnétique terrestre dont la valeur angulaire va de la fraction de gamma à quelques dizaines de gammas. Leur structure est quasiment périodique avec des périodes qui se situent entre 0,1 seconde et 10 minutes. Les micropulsations sont générées à partir du développement des ondes magnétiques et hydrodynamiques (Alfven, 1942), un phénomène intimement lié aux sous orages qui représentent des perturbations atmosphériques ayant une durée de l'ordre de l'heure. Les micropulsations géomagnétiques ont été subdivisées en deux classes : les pulsations continues (Pc) et les pulsations irrégulières (Pi). Chacune de ces deux classes comprend plusieurs types d'ondes suivant diverses gammes de périodes.

Au-dessus de 1 hertz les orages magnétiques d'échelle planétaire sont les principales sources du champ MT. Il existe trois grands centres d'orage magnétique situés au Brésil, en Afrique centrale et en Malaisie, avec environ 100 jours d'orage magnétique par an. D'autres centres secondaires atteignent jusqu'à 200 jours d'orage d'année. Plusieurs études ont permis de mieux appréhender et de classer ces types de fluctuations soit à partir d'une analyse statistique (Chapman et Bartels, 1940) soit d'après l'extension des perturbations (Bobrov, 1961). La classification la plus répandue est celle de Chapman (1964) qui se fonde sur les mécanismes physiques qui génèrent ces perturbations. Une distinction est faite entre les perturbations ayant une source située à la limite de la magnétosphère (*DR*) et celles qui sont liées aux effets ionosphériques (*DPJ* et *DPC*). En général un orage magnétique dure quelques secondes à plusieurs jours avec des valeurs angulaires variant de quelques gammas à quelques milliers de gammas. La fréquence d'apparition dépend de l'activité solaire et de la période de l'année.

D'après Cagniard (1953), le rapport des champs électrique et magnétique ne dépend que de la fréquence et de la résistivité du sol. Aussi, ce rapport permet de déterminer les variations de la résistivité avec la profondeur. Toutefois, ce rapport dépend de la disposition des couches ou strates géologiques. La méthode dans ce travail suppose le sous-sol tabulaire. Aussi, une série d'hypothèses, d'équations et de transformations ont permis de mieux appréhender cette théorie à l'instar des équations de Maxwell, des hypothèses simplificatrices, de l'approche de Niblett, de Bostick et de l'équivalence entre la transformation de Bostick et l'approximation de Niblett.

- **Méthode**

Les lignes électriques et les bobines sont parfaitement alignées sur les directions désirées, dans la mesure du possible en fonction des axes de la géologie locale, sinon en direction Nord et Est. On enregistre alors les deux composantes horizontales de chacun des

deux champs. Ces signaux qui, une fois amplifiés et filtrés par des filtres passe-haut et passe-bas, sont directement enregistrés dans un ordinateur, sont transformés par la transformée de Fourier rapide (FFT) et interprétés en termes de résistivité apparente et de phase. L'établissement d'un profil est toujours possible puisque l'impédance du sol est déterminée uniquement par les composantes horizontales.

Comme avantage, c'est une méthode facile à déployer qui atteint les profondeurs d'investigations considérables de l'ordre plusieurs kilomètres. Toutefois, il faudra amplifier le signal pour obtenir de bonnes valeurs de résistivités électriques.

I.4.5 Equations de Maxwell (cas de sous-sol tabulaire)

Telford et al., (1990) mettent en évidence les équations gouvernant les variations du champ électromagnétique dans les formations géologiques.

Il est toujours nécessaire de confronter le modèle géoélectrique à la géologie pour pouvoir faire une interprétation réaliste.

$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\delta \vec{H}}{\delta t}$ (1)	}	\vec{E} (Vecteur champ électrique de l'onde)
$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \sigma \vec{E}$ (2)		$\vec{\nabla}$ (Opérateur vectoriel différentiel nabla)
$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ (3)		\vec{H} (Vecteur champ magnétique de l'onde)
$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0$ (4)		\vec{j} (Densité du courant électrique)
$\vec{j} = \sigma \vec{E}$ (5)		σ (Conductivité électrique)

Toutes les quantités sont exprimées dans le système d'unités internationales (S.I) et la perméabilité magnétique vaut un dans le système CGS.

I.4.6 Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier les équations de Maxwell, des auteurs (Niblett et Sayn-Wittgenstein, 1960 ; Bostick, 1977 ; Vozoff, 1990) vont se baser sur les équations (6) et (7). Ils vont supposer d'une part, les gradients horizontaux des vecteurs champs magnétiques et telluriques négligeables comparés aux gradients verticaux et les variations du champ périodiques, et d'autre part, que la conductivité électrique variant avec la profondeur et les sources des variations du champ à l'exemple de l'extension horizontale des phénomènes à la surface soit plus grande que leur profondeur de pénétration.

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial}{\partial t} = -\frac{2\pi i}{T} \quad (6)$$

$$J_z \ll \left(J_x^2 + J_y^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{et} \quad J_z \ll \left(H_x^2 + H_y^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Ici, les variables sont définies dans un repère cartésien (x, y, z) avec T pour période. En effet, l'onde magnétotellurique est une onde plane qui se propage suivant l'axe positif (O, z) d'un trière direct (O, x, y, z) , de vecteur de base $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ polarisé tel que le champ tellurique \vec{E} se propage suivant (O, x) et le champ magnétique \vec{H} se propage selon (O, y) .

I.4.7 Approche de Niblett

En admettant les équations (6) et (7), et en prenant σ_a comme étant la conductivité apparente pour une profondeur de pénétration Z , les équations (1), (2) et (5) appellent les approximations suivantes :

$$-\frac{H_y}{Z} = 4\pi\sigma_a E_x, \quad \frac{H_x}{Z} = 4\pi\sigma_a E_y \quad (8)$$

$$-\frac{E_y}{Z} = \frac{2\pi i E_x}{T}, \quad \frac{E_x}{Z} = \frac{2\pi i H_y}{T} \quad (9)$$

L'opérateur $\frac{\delta}{\delta z}$ a été remplacé par $\frac{1}{z}$ et E_x, E_y, H_x, H_y représentant les variations du champ à la période T .

Des équations (8) et (9), on obtient :

$$\sigma_a = \frac{1}{2 \left| \frac{\vec{E}}{\vec{H}} \right|^2 T} \quad (10)$$

$$Z = \frac{1}{2\pi \left| \frac{\vec{E}}{\vec{H}} \right| T} \quad (11)$$

Où $\left| \frac{\vec{E}}{\vec{H}} \right|$ représente les rapports des valeurs angulaires $\left| \frac{E_x}{H_y} \right|$ ou $\left| \frac{E_y}{H_x} \right|$.

Si les rapports d'angle sont mesurés pour les séries des périodes naturelles, il est possible de déterminer la variation de la conductivité apparente en fonction de la profondeur à partir des équations (10) et (11). La profondeur de pénétration définie par l'équation (11) suppose un facteur d'atténuation $\frac{1}{2}$ en lieu et place du facteur $\frac{1}{e}$ habituel.

En considérant la conductivité électrique continue, finie et fonction de la profondeur entre la surface et profondeur de pénétration rencontrée, nous pouvons écrire que :

$$\sigma = f(z) \quad (12)$$

$$\sigma_a = \frac{1}{z} \int_0^z f(z) dz = \frac{1}{z} g(z) \quad (13)$$

En considérant σ_a comme la conductivité apparente à la profondeur z , on a :

$$\sigma = \frac{dg(z)}{dz} = Z \frac{d\sigma_a}{dz} + \sigma_a \quad (14)$$

La valeur de la conductivité à différentes profondeurs peut être estimée à la condition que σ_a soit établi comme une fonction connue de z .

I.4.8 Approche de Bostick

En 1977, Bostick réalise la courbe de la résistivité apparente en fonction de la fréquence et son asymptote à basse fréquence pour un modèle de terrain constitué d'une section de résistivité uniforme au-dessus d'une formation parfaitement conductrice.

Il montrera d'une façon générale que ladite asymptote dépend uniquement de la profondeur du substratum et est indépendante de la conductivité de la section résistive, nonobstant le fait que la conductivité est fonction de la profondeur. Cette asymptote aura pour formule :

$$\rho_a = \omega \mu_0 h \quad (15)$$

Avec $\omega = 2\pi f$, f (fréquences), h (la profondeur).

Bostick (1977), partira du même principe mais en supposant cette fois que le substratum est parfaitement isolant et l'épaisseur est infinie. Cette asymptote aura pour formule :

$$\rho_a = \frac{1}{\omega \mu_0 s^2} \quad (16)$$

$$\text{où } s = \int_0^h \sigma(z) dz \quad (17)$$

En éliminant $\omega \mu_0$ dans les équations (15) et (16) on a :

$$\rho_a = \frac{h}{s} \quad \text{et} \quad \sigma_a = \frac{1}{\rho_a} = \frac{1}{h} \int_0^h \sigma(z) dz$$

De l'équation (17), on obtient :

$$\frac{ds}{dh} = \sigma(z) = \frac{1}{\rho(z)}$$

$$\rho(h) = \frac{dh}{ds} = \frac{dh}{df} \frac{df}{ds} = \frac{d \left(\frac{\rho_a}{2\pi f \mu_0} \right)^{\frac{1}{2}}}{df} \frac{d \left(\frac{1}{2\pi f \mu_0 \rho_a} \right)^{\frac{1}{2}}}{df}$$

$$\rho(h) = \frac{\frac{d \left(\frac{\rho_a}{f} \right)^{\frac{1}{2}}}{df}}{\frac{d \left(\frac{1}{\rho_a f} \right)}{df}}$$

La dérivée et la développée de cette expression permet d'obtenir :

$$\rho(h) = \rho_a \frac{1 - \frac{f}{\rho_a} \frac{d\rho_a}{df}}{1 + \frac{f}{\rho_a} \frac{d\rho_a}{df}}$$

c'est-à-dire: $\rho(h) = \rho_a \frac{1-m}{1+m}$ (18)

où $m = \frac{d \log \rho_a}{d \log f} = \frac{f}{\rho_a} \frac{d\rho_a}{df}$

est le gradient de résistivité apparente à l'échelle bi-logarithmique. L'équation (18) est l'expression de la transformation de Bostick qui sert à déterminer les résistivités de Bostick.

I.4.9 Equivalence entre la transformation de Bostick et l'approximation de Niblett

La transformation de Bostick et l'approximation de Niblett donnent une distribution de la résistivité avec la profondeur, $\rho_B(h)$ et $\rho_h(h)$, où h est la profondeur de pénétration définie par :

$$h = \sqrt{\frac{\rho_{a(T)T}}{2\pi\mu_0}} \quad (19)$$

La résistivité de Bostick, $\rho_B(h)$ à une profondeur h est donnée par :

$$\rho_B(h) = \rho_a(T) \frac{1-m(T)}{1+m(T)} \quad (20)$$

Où $m(T)$ est la pente de la courbe de résistivité apparente.

La transformation de Niblett donne la conductivité à une profondeur h , $\sigma_N(h)$ à partie de l'équation :

$$\sigma_N(h) = h \frac{d\sigma_a(T)}{dh} + \sigma_a(T) \quad (21)$$

Où $\sigma_a(T) = \frac{1}{\rho_a(T)}$ et en remplaçant $\sigma_a(h)$ et h par leur expression respective dans (21)

On obtient :

$$\sigma_N(h) = \sqrt{\frac{\rho_a T}{2\pi\mu_0}} \frac{d\left(\frac{1}{\rho_a}\right)}{d\sqrt{\rho_a T}} + \frac{1}{\rho_a} = \sqrt{\rho_a T} \frac{d\left(\frac{1}{\rho_a}\right)}{d\sqrt{\rho_a T}} + \frac{1}{\rho_a}$$

En dérivant l'expression ci-dessus, on obtient :

$$\sigma_N(h) = \frac{-2T}{\rho_a \left(T + \rho_a \frac{dT}{d\rho_a} \right)} + \frac{1}{\rho_a}$$

Or $\rho_N(h) = \frac{1}{\sigma_N(h)}$

On déduit : $\rho_N(h) = \rho_a \frac{1 + \frac{T}{\rho_a} \frac{d\rho_a}{dT}}{1 - \frac{T}{\rho_a} \frac{d\rho_a}{dT}} = \rho_a(T) \frac{1+m(T)}{1-m(T)} = \rho_a(f) \frac{1-m(f)}{1+m(f)}$

où $m(f) = \frac{f}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial f}$ soit, $\rho_B(h) = \rho_N(h)$ pour toutes les profondeurs h .

Dans la suite, la transformation de Bostick est utilisée pour l'interprétation des données AMT. Les résistivités apparentes moyennes seront déduites de la formule : $\rho_a = (\rho_{\perp} \cdot \rho_{\square})^{1/2}$ (Bisso et al., 2004), où ρ_a est la résistivité moyenne apparente, ρ_{\square} et ρ_{\perp} sont respectivement les résistivités apparentes en mode transverse magnétique, et en mode transverse électrique. Des résistivités apparentes moyennes, seront alors déduites des résistivités de Bostick moyenne à partir de l'équation (18).

Toutes ces équations permettent d'avoir :

- l'expression de la profondeur d'investigation : $P = \frac{1}{2\Pi} \sqrt{\frac{10\rho}{f}}$

- l'expression de la résistivité apparente en fonction des champs électrique et

$$\text{magnétique : } \rho_a = \frac{0.2 \left(\frac{E_y}{H_x} \right)^2}{f}$$

- et les valeurs des phases obtenues par la transformation de Hilbert ([Bostick, 1977](#)) :

$$\Phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{4} \left(\frac{d \log \rho_a}{d \log f} \right)$$

I.4.10 Origine du signal

La méthode audiomagnétotellurique utilise un spectre de 8 à 10⁴ Hz. Cette méthode est souvent appliquée dans l'exploration minière, en hydrogéologie, et en géothermie ([Strangway et al., 1973](#)). La méthode magnétotellurique quant à elle, utilise un spectre couvrant des fréquences plus lentes allant de 10⁻³ à 10² Hz ; elle est utilisée en recherche pétrolière, géothermique et dans l'étude des bassins. A ces signaux naturels peuvent se superposer des signaux artificiels en général d'origine industrielle ainsi que des bruits d'origine diverse, surtout sur les composantes électriques. Il devient difficile de distinguer entre signal et bruit. Néanmoins, on considère comme signal toute variation simultanée à la fois magnétique et tellurique cohérente et comme bruits le cas contraire.

I.4.11 Mise en œuvre sur le terrain

- Principe

En général, la méthodologie en prospection électromagnétique telle que le présente le dispositif expérimental de collecte ([Fig. 15](#)), consiste en l'implantation d'électrodes dans le sol. Le principe des méthodes de prospection électromagnétique est basé sur la mesure du champ électromagnétique secondaire émis par les courants électriques induits dans le sol. Ainsi, lorsque le champ électrique naturel est mesuré, on parle de méthodes des courants telluriques ; lorsque les variations temporelles du champ magnétique sont mesurées ; on parle de méthodes électromagnétiques temporelles (Time Domain Electromagnetic Methods (TDEM)) et lorsque l'on mesure simultanément le champ électrique et le champ magnétique, on parle de méthode magnétotellurique ([Zhdanov, 2009](#)).

Les données de hautes fréquences sont utilisées pour l'investigation des structures superficielles, tandis que celles des basses fréquences permettent des investigations de profondeur. Pour une structure 2D, les termes diagonaux du tenseur d'impédance sont nuls, et les non diagonaux peuvent être découplés en mode transverse électrique (TE) et en mode

transverse magnétique (TM). Quand la géologie satisfait l'hypothèse 2D, les données pour le mode TE mesurent le champ électrique \vec{E} parallèle à la structure géologique, et celles pour le mode TM mesurent le champ \vec{E} perpendiculaire à la structure géologique. Cette hypothèse 2D permet une simplification significative dans la modélisation et l'inversion des données MT et AMT. L'inversion des données issues des sondages AMT donne une estimation de la résistivité en dessous du récepteur, et indiquent la complexité géoélectrique en un site de mesure. Dans les milieux où la distribution change très peu entre les stations, le sondage de résistivité donne une estimation raisonnable des résistivités des couches en dessous du site (McPhee et al., 2008).

Le Stratagem contient une imprimante, et l'impression dans laquelle l'annotation des résultats de chaque test est consignée aide à mieux procéder systématiquement aux réglages de l'appareil.

- Corrélation des signaux

Le champ magnétotellurique naturel qui est une superposition des signaux aléatoires de plusieurs fréquences est dynamique. Néanmoins, les signaux des champs naturels enregistrés sont pour la plupart corrélés entre eux. La réponse d'un signal devrait être similaire pour des composantes complémentaires orthogonales (Fig. 14). Cela signifie que la phase et l'angle de E_y doivent ressembler à celles de H_y . Il en est de même pour E_x et H_x . Il faudrait donc être vigilant si jamais un canal est fréquemment non corrélé avec les autres ou est constamment en dehors de l'échelle. De telles conditions sont rencontrées lors de la procédure de sélection du gain et, au lieu de continuer avec un enregistrement de routine, il est nécessaire de commencer les réglages.

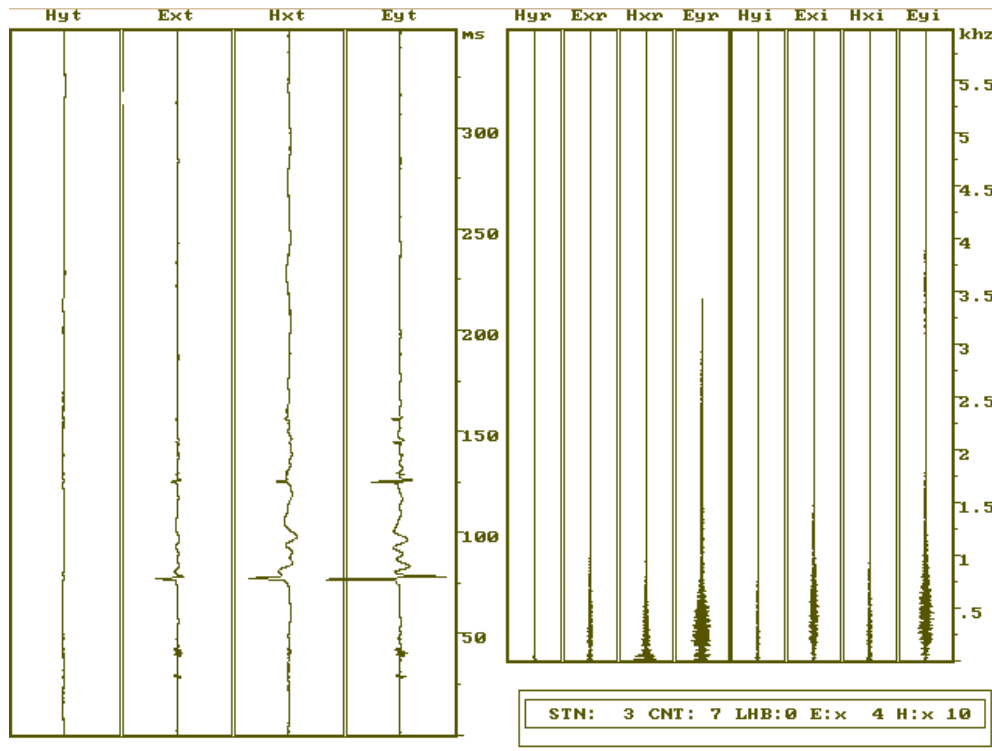


Figure 14: Graphique des harmoniques de corrélation des signaux d'une station (d'après [Meying et al., 2009](#)).

- Corrélation des impédances des composantes

Pour des sondages valides, la relation $\Phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{4} \left(\frac{d \log \rho_a}{d \log \rho f} \right)$ relie la courbe des résistivités apparentes et celle des phases. Ceci signifie qu'on doit observer une baisse de la réponse de la phase quand il y a augmentation de la résistivité apparente pendant que la période croit. L'inverse devrait s'observer quand la période décroît. De légers écarts de cette relation peuvent être observés à cause d'une faible dispersion normale des données, mais lorsqu'une portion entière de la courbe de sondage obéit à ce phénomène, il est probable que les bruits se soient introduits par le biais des sources artificielles de bruits. Comme règle, si la phase est excessivement élevée, le bruit est induit. Ce type de bruit peut être observé en plaçant le transmetteur trop près du receveur pour que l'approximation de l'onde plane soit valide. De façon similaire, les bruits qui abaissent la phase en dessous de la valeur escomptée sont dus aux sources électriques terrestres ([Géometrics, 2000](#)).

- Positionnement des stations

Les sites de mesures doivent être parfaitement éloignés des lieux ayant des sources de production et consommation de l'énergie électrique et des sites d'activités mécaniques. Ces sources comprennent : les lignes de tension, des barrières électriques, des pipelines avec protection cathodique, des transmetteurs radio, des moulins à vent métalliques et des engins en

fonctionnement de toute nature. Si on soupçonne le bruit issu de l'activité humaine comme origine du problème, son influence doit disparaître ou être considérablement réduite si on double la distance entre elle et le site de mesures. Des sites calmes pour le receveur et des bons sites pour le transmetteur devraient éliminer des bruits dus à la proximité avec des amas métalliques tels que les barres métalliques des conduits des forages ou des canaux d'irrigation, les chemins de fer, les hangars métalliques.

Les capteurs de vibrations causées par le vent ou un courant d'eau introduiront le bruit dans les capteurs et, en effectuant particulièrement des mesures en mode haute fréquence, des vibrations excessives des capteurs magnétiques conduiraient à la saturation des réponses de leurs amplificateurs.

L'enterrement des capteurs magnétiques pourraient être nécessaire pour réduire les vibrations des vents à un niveau acceptable. Il n'est pas toujours possible d'éliminer les bruits des sites, mais il est important d'être capable de les distinguer des problèmes liés aux appareils des mesures (Géometrics, 2000).

En pratique, les profils de mesures ont été réalisés le long des axes ne possédant pas une ligne électrique, et en général derrière ou loin des maisons d'habitations ou dans les plantations. Dans le cadre de ce travail, des précautions sus-évoquées ont été considérées pour minimiser les bruits de fond et les erreurs dues à l'expérimentateur et à l'appareillage, afin d'acquérir des données fiables.

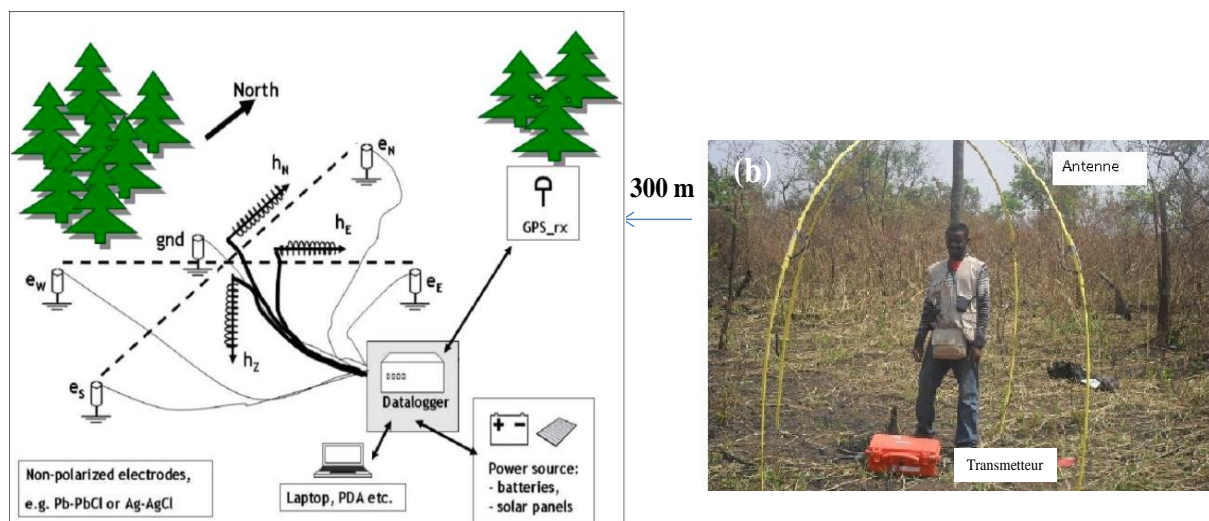


Figure 15: Dispositif expérimental de collecte des données avec le Stratagem EH4 (a). Antenne d'amplification du signal (b) (Géometrics, 2000).

I.4.12 Représentation et modélisation des données

A ce stade du travail, l'outil informatique devient plus qu'indispensable aussi bien dans la représentation des données que dans leur modélisation. Il est fait appel à des logiciels et à des assistants graphiques. A titre d'exemple :

- l'assistant graphique Microsoft Excel permettra de dresser les profils de résistivité ;
- les logiciels WINSURF, SURFER et Stratagem Resistivity Plotter peuvent permettre de réaliser les pseudo-sections et les cartes de résistivité apparente ;
- le logiciel SONDMT, quant à lui, peut servir à fournir les courbes de sondage ;
- les logiciels IPI2WIN_MT et PLOT 2D permettent de réaliser des sections géoélectriques ;
- un abaque de résistivités et de conductivités des roches pour faire ressortir des sections géologiques équivalentes (Palacky, 1987).

L'utilisation de ces différents programmes permet d'avoir plusieurs types de représentation des données collectées sur le terrain. On peut citer entre autres les courbes de sondages, les profils de résistivités, les pseudo-sections et les sections géoélectriques.

- **Courbe de sondage**

La courbe de sondage caractérise la variation de la résistivité apparente à la verticale d'une station de mesures. Son interprétation permet de déterminer le nombre de terrains du sous-sol ainsi que les résistivités et les épaisseurs de chacun d'eux.

La représentation des courbes de sondage se fait à l'aide des logiciels d'inversion qui présentent :

- en abscisses, les différentes valeurs des fréquences ;
- en ordonnées, les valeurs correspondantes de la résistivité apparente.

- **Profil de résistivité**

Il s'agit des mesures effectuées à une seule fréquence et à plusieurs stations réparties suivant un profil. Pour chacune des fréquences de la gamme couverte et pour l'ensemble des stations de mesures, on reporte dans un diagramme plan :

- en abscisses les projections suivant une direction de toutes les stations de mesures ; les distances inter-stations mesurées lors de la prospection étant respectées ;
- en ordonnées les valeurs correspondantes de la résistivité apparente ρ_a obtenues à partir de la courbe de sondage.

Il est obtenu pour chaque station du profil et à une fréquence donnée une seule valeur de résistivité apparente. En reliant les points du diagramme, le profil de résistivité est tracé.

Les profils de résistivité couvrant l'ensemble des stations de sondage permettent de localiser les zones de discontinuité. Les minimas de résistivité sont généralement associés aux amas conducteurs, dykes, failles ou contacts géologiques, notamment en mode TM (Mbom Abane, 1997).

- **Pseudo-sections**

Elle constitue la représentation des données pour une évaluation qualitative ; en effet, elle offre d'après Koziar et Stranway (1978), une image simultanée des variations latérales et verticales de la résistivité apparente. Ce sont des lignes d'iso-résistivité tracées le long d'un profil de mesures donné pour toute la gamme de fréquence couverte.

Pour un profil et pour chaque direction de la ligne tellurique, la pseudo-section est construite sur un diagramme en portant en abscisses, les distances entre les stations et en ordonnées, les logarithmes des différentes fréquences. Les iso-résistivités sont tracées et l'on peut porter sur chaque courbe la résistivité correspondante.

La pseudo-section montre la variation de la résistivité suivant une coupe verticale du sous-sol. Elle permet (Vozoff, 1972) de mettre en évidence les zones de discontinuité latérale, qui apparaissent avec un fort gradient horizontal de résistivité et contrastent par conséquent avec les zones tabulaires où les lignes d'iso-résistivités sont horizontales.

- **Sections géoélectriques**

À un stade plus avancé de l'interprétation, on peut proposer les résultats sous forme d'une section géoélectrique. La section géologique d'un profil est constituée par l'ensemble des colonnes géoélectriques du profil. Celle-ci est réalisée grâce à l'interprétation des courbes de sondage qui donnent la structure du sous-sol sous la forme d'une colonne de terrains caractérisés chacun par sa résistivité et son épaisseur.

Lorsque le rapprochement est fait avec la géologie et que l'on peut assimiler chaque terrain à une couche géologique, on obtient alors une couche lithologique du profil. Celle-ci montre la distribution des terrains le long du profil considéré. La section géologique peut être utilisée comme modèle pour une interprétation à 2 ou 3 dimensions.

Il est toujours nécessaire de confronter le modèle géoélectrique à la géologie pour pouvoir faire une interprétation réaliste.

II. Matériels de terrain

Comme toute technique d'exploration ou de prospection, le présent travail a nécessité des équipements (Fig. 16b) parmi lesquels les GPS, les appareils photos, les blocs notes, les bâchées, les pelles, les marteaux de géologues, etc.

Le protocole consiste de façon générale à :

1. Identifier un site actif ou inactifs ;
2. Prendre les coordonnées GPS (longitude, latitude, élévation) ;
3. Recueillir les informations concernant :
 - l'environnement autour de la zone
 - la profondeur du trou ou du point du cours à concentration maximale en alluvions ;
 - la disposition des couches (étude du profil de sol) et leurs différentes profondeurs ;
 - la profondeur et l'épaisseur du gravier minéralisé ;
 - la quantité des bâchées à prélever pour l'évaluation des teneurs ;
 - la qualité du gravier ;
4. Prendre des photos ;
5. Créer une base de données.

Pour parvenir à réaliser une prospection audiomagnétotellurique, il faut faire usage d'un résistivimètre (Fig. 16a). Un exemple est donné à travers le STRATAGEM EH4.

En effet, comme l'illustre la Figure ci-dessous, ce résistivimètre se compose essentiellement (Géometrics, 2000) :

- i) d'un récepteur standard comprenant : quatre électrodes en acier à travers lesquels les signaux électriques sont mesurés ; deux magnétomètres ; une console qui assure le traitement des signaux ; un module analogique qui transmet les signaux à la console ; une batterie (générateur de courant) de 12 volts ; des câbles de connexion ; un clavier IBM compatible ;
- ii) d'un émetteur de puissance 400 Am² comprenant : un module de transmission ; un générateur de 12 volts ; une prise de terre ; deux tubes constituant l'antenne ; des câbles de connexion,
- iii) un équipement additionnel composé de : un niveau d'eau ; une boussole ; un GPS ; un mètre-ruban et éventuellement des réserves d'eau (salée par mesure de prudence).



Figure 16: une vue de l'équipement utilisé dans le cadre de la présente étude. L'équipement Stratagem (a) et les principaux instruments de prospection géologique (b).

Conclusion

La prospection AMT procède soit par enregistrement, soit par mesure directe des grandeurs physiques caractérisant les propriétés physiques des roches. Le traitement de ces enregistrements ou de ces mesures permet d'obtenir différentes représentations qui permettent une interprétation. Cette interprétation aboutit soit à une étude qualitative de la zone d'étude susceptible de contenir des ressources recherchées, soit à l'étude quantitative qui fournit les paramètres géométriques et physiques des formations géologiques et structurales du sol et sous-sol concernés.

Chapitre 3. Résultats

« Le succès n'est pas final, l'échec n'est pas fatal : c'est le courage de continuer qui compte », Winston Churchill

Introduction

Le présent chapitre porte sur la présentation des différents résultats obtenus au terme de cette étude. Il est constitué de trois (03) principales séquences. La première séquence porte sur l'analyse des images satellites de type LANDSAT OLI 8 pour l'extraction manuelle des linéaments et la mise en évidence de la foliation régionale. La deuxième séquence porte sur les résultats obtenus au cours de la cartographie des sites actifs et non actifs et de la collecte des informations relatives à l'environnement immédiat, à la profondeur du trou, à l'épaisseur du gravier et à la teneur moyenne. La troisième séquence quant à elle portera sur la présentation des résultats issus des sondages audiomagnétotelluriques (courbes de sondages, courbes de profilage, pseudosections de phases et de résistivités apparentes, sections géoélectriques) effectués dans le district aurifère de Garga Sarali – Bétaré Oya.

I. Traitement, analyse de l'imagerie satellite de la zone de Garga Sarali - Ndokayo et implications structurales

La cartographie des structures des linéaments a été rendue possible grâce aux traitements numériques de l'image LANDSAT OLI 8 du 01/02/2019 (Fig. 17) effectués sur les canaux ETM+ 4, 3, 2 qui ont été sélectionnés pour leurs caractéristiques spectrales et spatiales (30 m). L'analyse en composantes principales (ACP) des canaux prétraités a fourni des canaux dérivés, dont seule la première composante apporte des résultats satisfaisants. En effet, les structures géologiques linéaires sont mieux visibles sur la première composante principale (APC1) que sur l'image multispectrale. L'application des filtres directionnels 7x7 de type Sobel dans les directions N-S, E-W, NE-SW et NW-SE et du filtre gradient de Yésou et al. (1993) permet de rehausser les discontinuités-images correspondant aux linéaments.

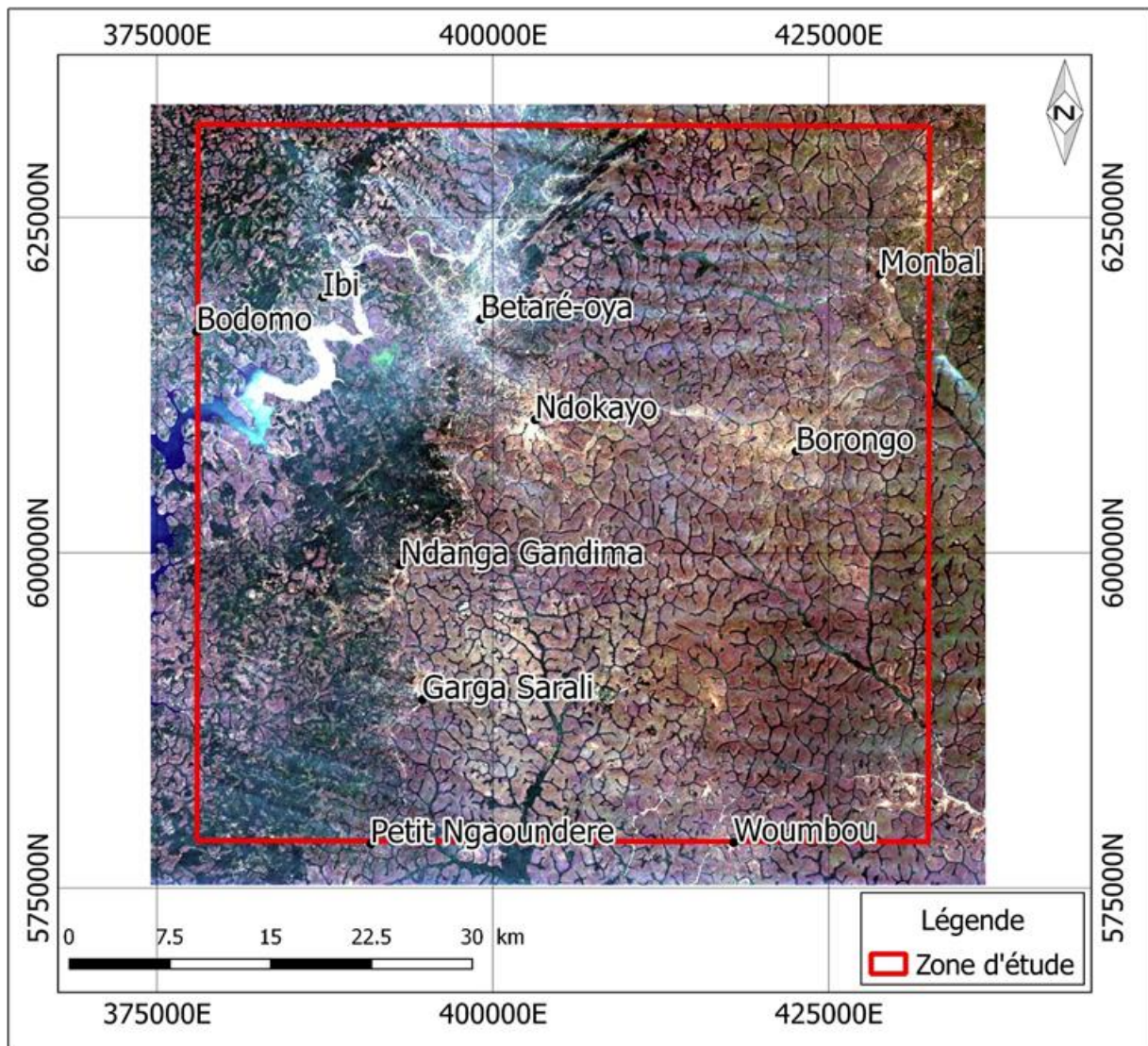
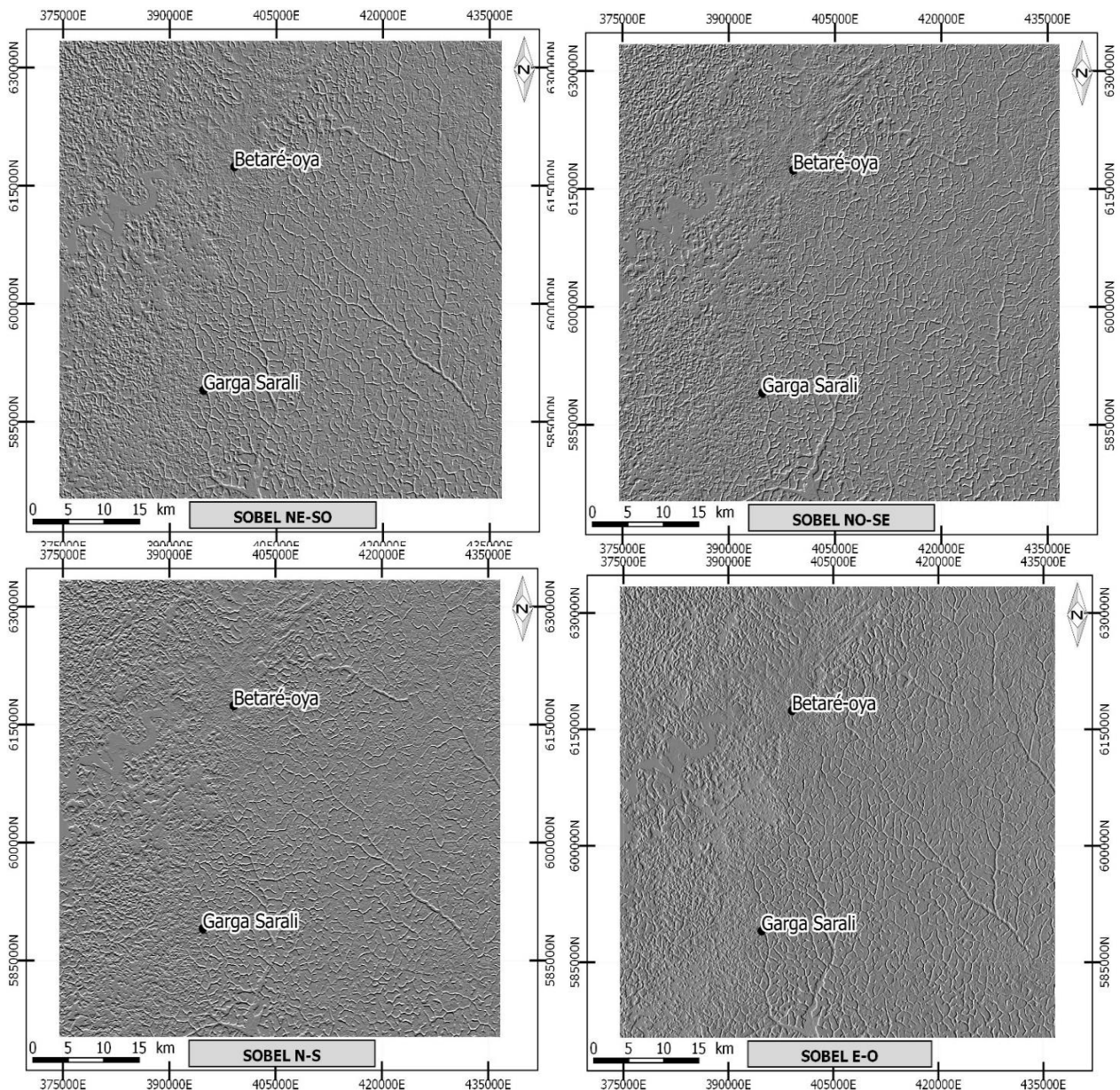


Figure 17: Image en composition R4G3B2 de la zone d'étude Garga Sarali – Bétaré - Oya.

Les filtres sont des traitements très utiles en géologie structurale car ils permettent de caractériser les directions, en l'occurrence celles des linéaments structuraux par la rupture radiométrique. En réalité, il existe différents types de filtres, nous citons à titre d'exemple celui de Sobel. Ce dernier permet de rehausser les contours dans toutes les directions. L'analyse structurale faite par ces filtrages mathématiques a pour objectif de mettre en évidence les orientations des fractures.

Seuls les linéaments d'origine structurale présentent un intérêt qui cadre avec l'objectif visé par notre étude. La combinaison d'informations à travers les Systèmes d'Information Géographique (SIG), les linéarités d'origine anthropique préalablement vectorisées (routes bitumées, pistes, lignes de haute tension, layons de délimitation de forêt et surfaces cultivées) ont été identifiées dans l'ensemble des linéaments et éliminées. Les linéaments géologiques relevés au cours des travaux antérieurs de cartographie (Shang, 2004), peu nombreux mais

fondés sur des photographies aériennes et des observations de terrain, ont été retrouvés dans notre réseau de linéaments. Les linéaments identifiés à partir des images satellitaires font l'objet d'une analyse fréquentielle permettant de ressortir les directions principales à l'aide d'un logiciel (ENVI 5.1) et la rosace des directions à l'aide du logiciel GeoRose 0.5.1. Ces résultats peuvent ensuite être comparés à celles des données relevées sur le terrain. Les images résultantes de ce filtrage sont présentées ci-dessous :



Images issues du filtrage SOBEL

I.1 Extraction des linéaments

Elle a été réalisée manuellement, fondée sur l'observation visuelle par photo interprétation (Koussoubé, 1996 ; Kouamé et al., 2006 ; Youan Ta, 2008 ; Abdou Babayé,

2012). Cette extraction manuelle consiste à tracer les segments correspondant aux discontinuités et aux variations brusques de tonalité observées sur les images ainsi traitées. Il s'agit principalement du réseau hydrographique, les ruptures de pente, et des alignements ou des contacts géologiques.

La carte détaillée des linéaments (Fig. 18) a été réalisée grâce à une interprétation des images dérivées des différentes techniques de traitements. Cette carte présente une importante densité de linéaments de tailles variables allant de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres et des formes rectilignes et curvilignes d'orientation et de longueur variables. En effet, par corrélation avec la lithologie de la zone, deux grandes zones s'individualisent :

- La zone des schistes du Lom qui présente une densité moins importante de linéaments mettant en évidence le caractère moins résistant de ces formations aux contraintes tectoniques qui sont à l'origine de la fracturation.
- La zone des granitoïdes qui, quant à elle présente une forte densité en linéaments. Ceci est dû à leur caractère très compétent et rigide aux contraintes tectoniques à l'origine de la fracturation.

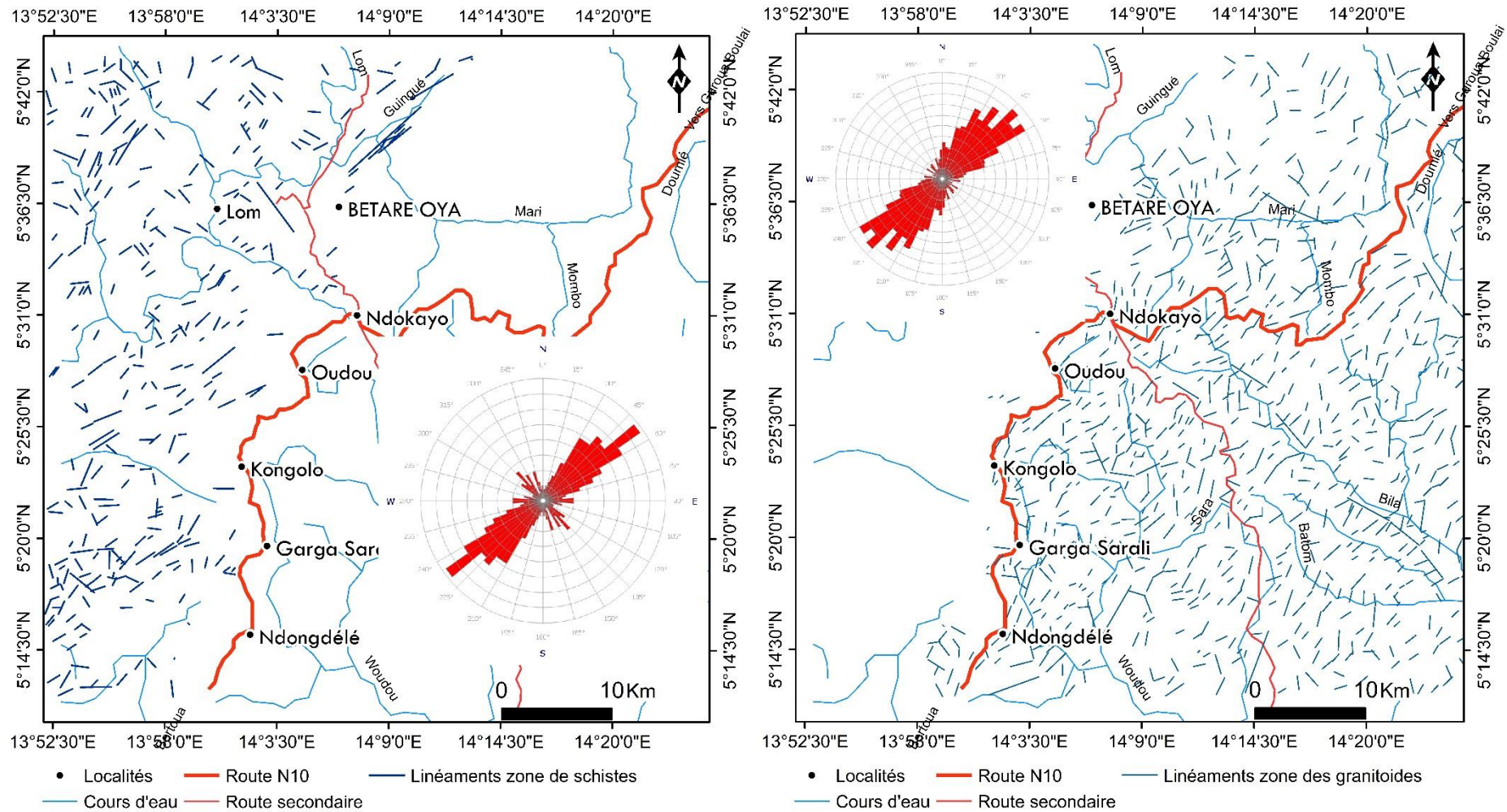


Figure 18: Carte des linéaments détaillés et de la rose directionnelle des vents sur les formations des schistes du Lom (à gauche) et sur les granitoïdes (à droite) du secteur Garga Sarali – Bétaré – Oya.

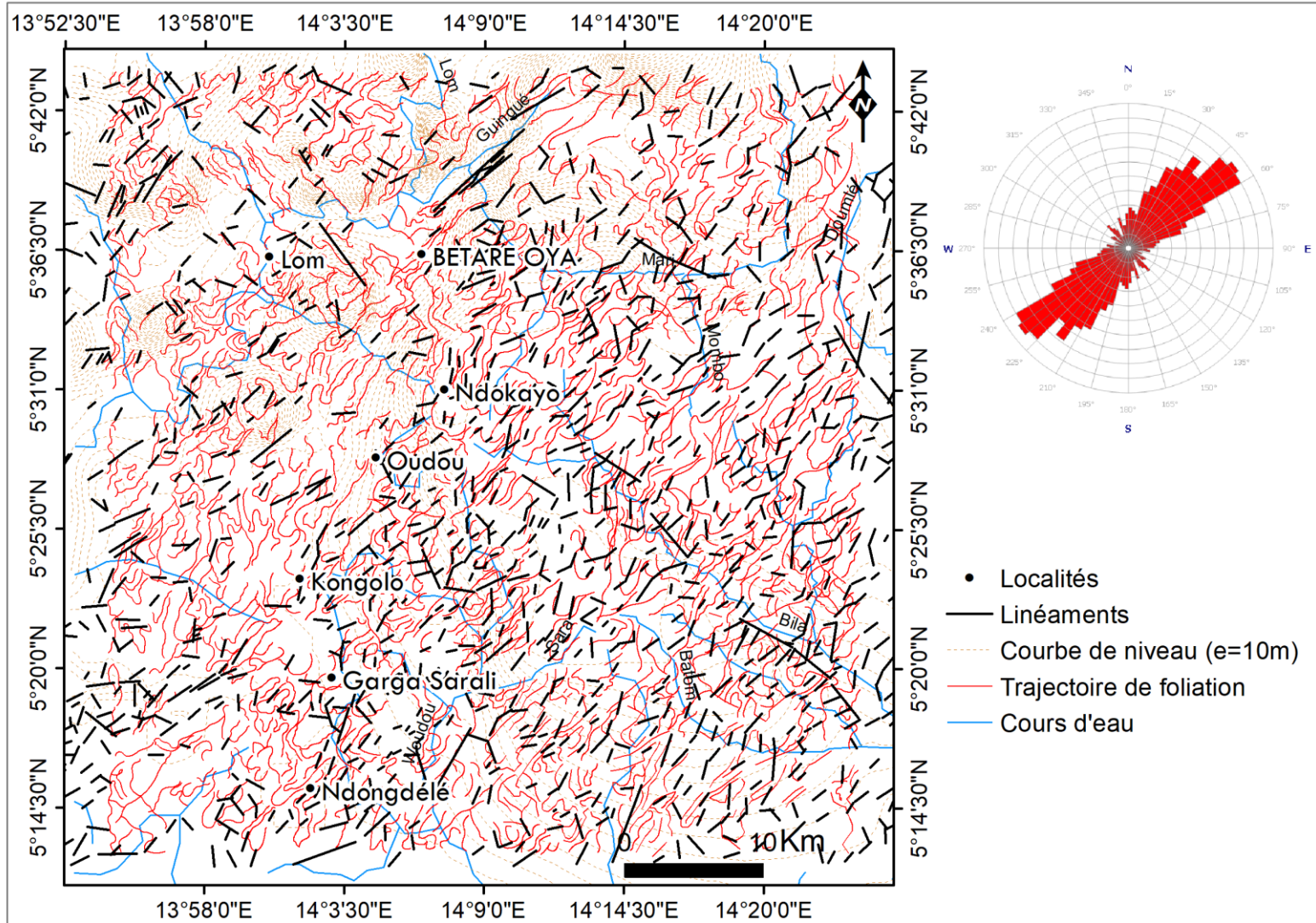


Figure 19: Carte des linéaments et trajectoires de foliation du secteur Garga Sarali – Bétaré - Oya.

La Carte LANDSAT OLI 8 intégrant les trajectoires de foliation détaillées du secteur Garga Sarali – Bétaré Oya de la zone d'étude laisse transparaître une densité de foliation (fig. 19) qui est caractérisé par des formes curvilignes d'orientation et de forme variables. Cette morphologie met en lumière une direction principale NE-SW qui est caractéristique de l'orientation générale des formations géologiques du secteur centre camerounais de la chaîne panafricaine.

I.2 Analyse statistique et caractérisation des linéaments

La carte détaillée des linéaments (fig. 20) compte 1149 éléments structuraux de taille variable. Deux méthodes d'analyse ont été utilisées à savoir l'analyse quantitative et l'analyse qualitative.

I.2.1 Analyse et caractérisation quantitative des linéaments

La zone Garga Sarali – Bétaré Oya est caractérisée par un ensemble des linéaments. La classification statistique des linéaments par valeur angulaire de $22,5^\circ$ a permis d'identifier 1149 structures linéaires d'une longueur cumulée de 12743,23 km. La zone d'étude appartient à l'ensemble marqué par la présence de deux pénéplaines d'altitude différentes qui se raccordent dans les cours d'eau en formant des chutes plus ou moins importantes et témoignant du phénomène d'ensemble ayant soulevé l'Adamaoua par un jeu de fractures d'où résulterait le relief en paliers successifs. En effet, vers le nord où se trouve la zone d'étude, s'étend la pénéplaine supérieure d'altitude comprise entre 800 et 1050m et au sud, la pénéplaine inférieure d'altitude comprise entre 600 et 700m. Toutefois, un relief particulier est observé au niveau de la série du Lom, lié aux formations quartzo-schisteuse semi-métamorphiques.

L'histogramme de fréquence des linéaments (fig. 20) qui présente la distribution des linéaments en fonction de leur longueur a été réalisé sur la base d'une valeur angulaire de $22,5^\circ$ (tab. 3). Il ressort de l'histogramme illustrant le nombre de linéaments en fonction des longueurs que les longueurs atteignent plus de 8,774 mètres. Les rosaces directionnelles de fractures en nombre et en longueurs cumulées permettent de distinguer les différentes familles directionnelles de fractures (Youan Ta et al., 2008). La rosace directionnelle (fig. 22, tab.3) en nombre de fractures met en évidence cinq (05) directions principales. Il s'agit des directions N045°-N067,5° (26.10%), N022,5°-N045° (16.5%), N202,5°-N225° (10.44%), N180°-N202,5° (9.74%) et N067,5°-N090° (9.57%). A ces directions, on a celles qui sont considérées comme secondaires. Notamment, N157,5°-N180° (6.96%), N135°-N157,5° (5.65%), N112,5°-N135° (4%), N225,5°-N247,5° (3.74%), N090°-N112,5° (3.56%), N0°-N022,5° (2.43%),

N247,5°-N270° (0.52%), N337,5°-N360° (0.43%), N292,5°-N315° (0.17%) et N315°-N337,5° (0.08%).

L'analyse du tableau de classification des linéaments par familles directionnelles individualise les fractures en huit (08) familles azimutales (tab.. 4). Elle permet de constater que la direction NE-SW (46.75%) est la plus représentative. Elle est suivie des directions ENE-WSW (15.68%), N-S (9.09%), SE-NW (8.42%), E-W (6.29%), NNE-SSW (5.51%), SSE-NNW (5.42%) et ESE-WNW (2.80%). La prédominance des directions NE-SW et ENE-WSW est conforme avec l'orientation structurale majeure des séries métamorphiques affectées par l'orogénèse panafricaine et dont les marqueurs sont la BOSZ, la CCSZ, la SF.

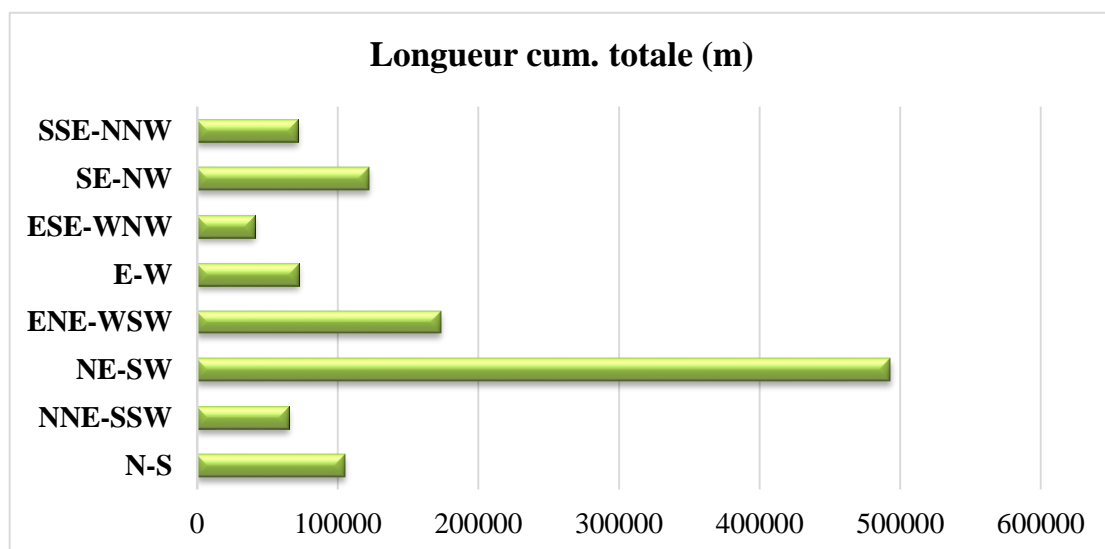
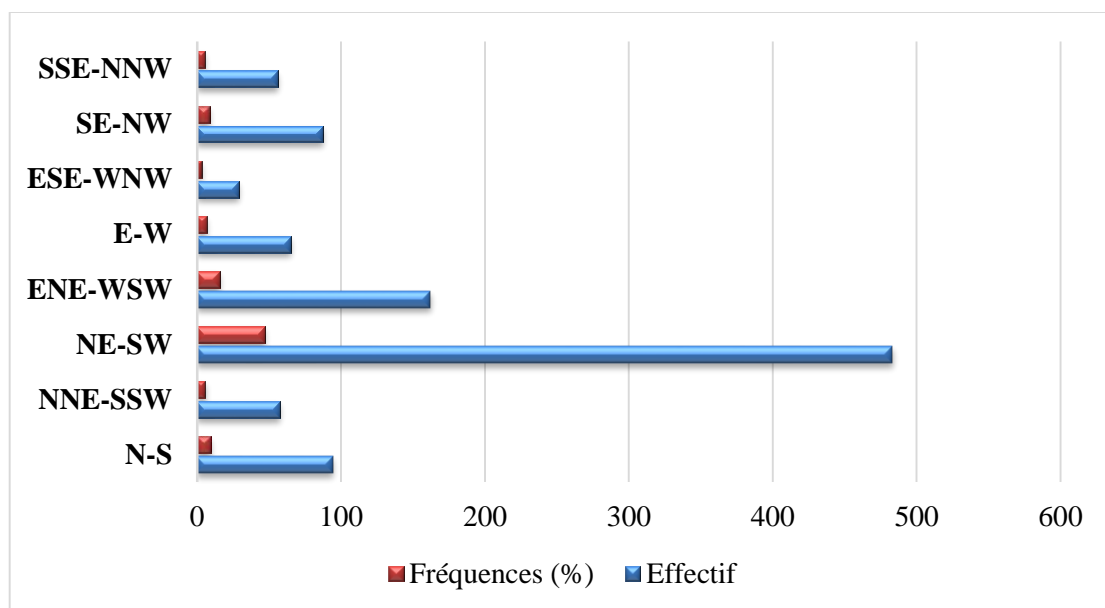


Figure 20: Histogramme de distribution des longueurs et des directions azimutales des linéaments du secteur Garga Sarali – Bétaré-Oya.

I.2.2 Analyse et caractérisation qualitative des linéaments

L'analyse qualitative des linéaments consiste à les différencier en linéaments majeurs, intermédiaires et mineurs (fig. 21). On fait usage dans ce cas des **longueurs maximales et minimales**. La classification basée sur les orientations de la rosace de direction permet d'identifier :

- Les linéaments **majeurs** regroupent par ordre croissant NE-SW, SE-NW et NNE-SSW ;
- Les linéaments **intermédiaires** regroupent par ordre croissant ENE-WSW et ESE-WNW ;
- Les linéaments **mineurs** regroupent par ordre croissant SSE-NNW, E-W et N-S

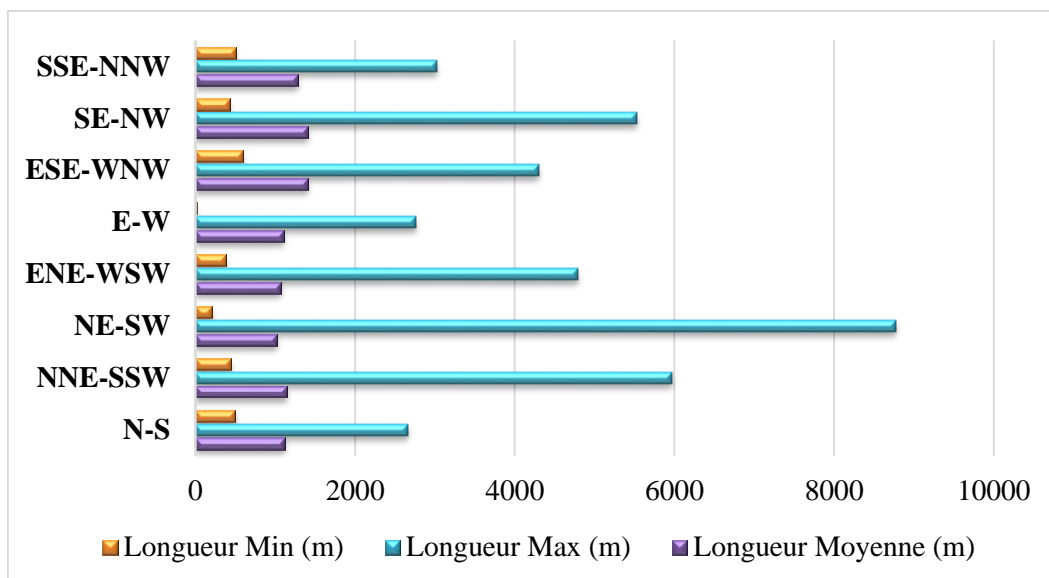


Figure 21: Histogramme de distribution des longueurs maximales et minimales et des directions azimutales des linéaments du secteur Garga Sarali – Bétaré-Oya.

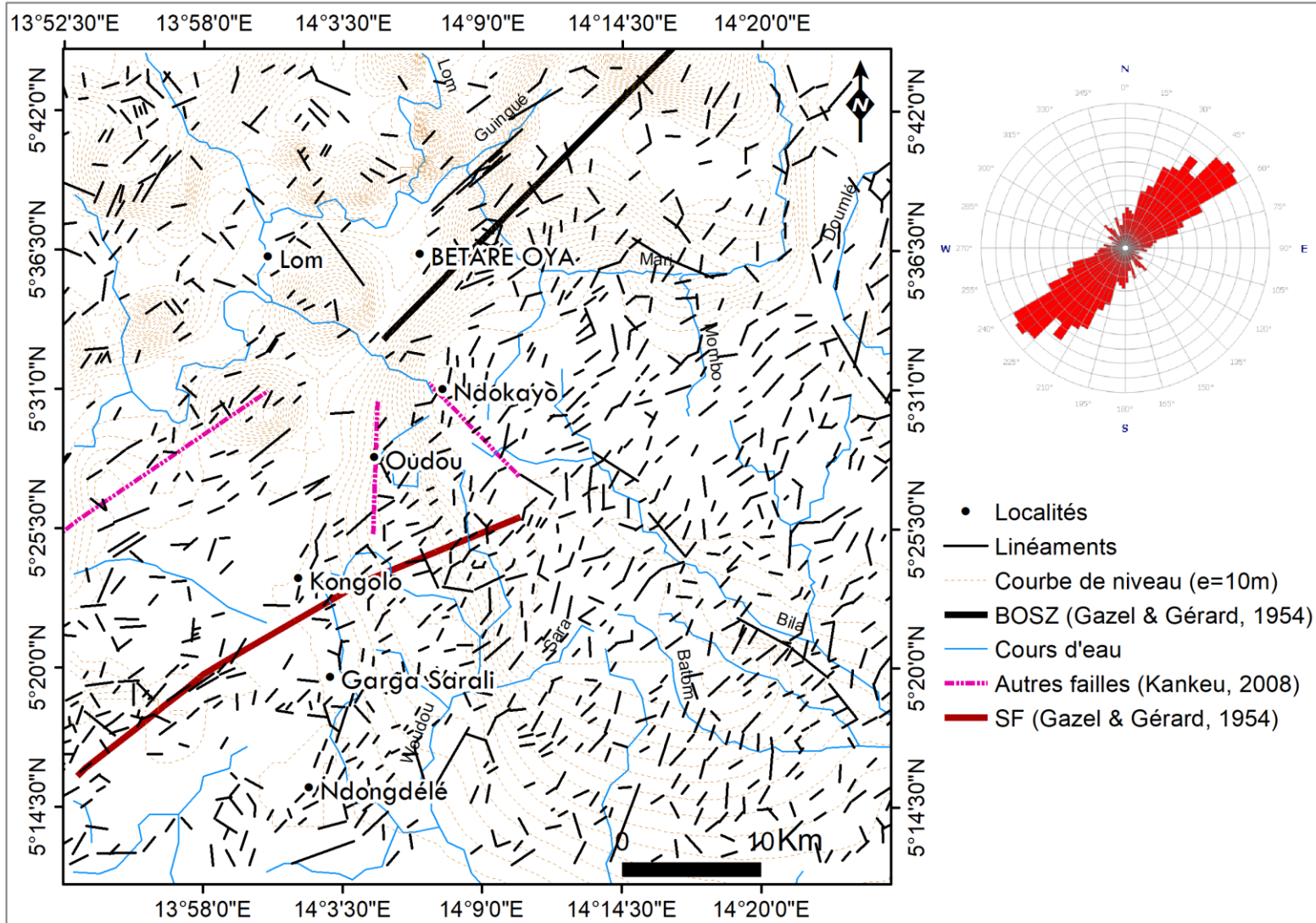


Figure 22: Carte des linéaments et principales failles du secteur Garga Sarali – Bétaré - Oya.

Tableau 3: Classification des linéaments par valeur angulaire de 22,5°.

Classes	[0-22.5]	[22.5-45]	[45-67.5]	[67.5-90]	[90-112.5]	[112.5-135]	[135-157.5]	[157.5-180]	[180-202.5]	[202.5-225]
Effectif	28	190	300	110	41	46	65	80	112	120
Fréquences	2.4369017	16.536118	26.109661	9.5735422	3.5683203	4.0034813	5.6570931	6.9625762	9.7476066	10.443864
Longueur cum. totale (m)	33897.731	184061.33	306201	123713.85	46157.403	64818.299	91607.975	91360.038	132723.31	128958.36
Longueur Moyenne (m)	1210.6333	968.74387	1020.67	1124.6714	1125.7903	1409.0935	1409.3535	1142.0005	1185.0295	1074.653
Longueur Max (m)	5960.6176	3871.4429	8774.2706	4784.6722	2282.8725	4304.2895	4477.5964	2625.8978	4084.4656	5146.9258
Longueur Min (m)	441.06101	284.6734	269.47099	14.378178	423.11927	422.8749	508.75187	497.34781	467.29078	203.33814

Classes	[225-247.5]	[247.5-270]	[270-292.5]	[292.5-315]	[315-337.5]	[337.5-360]	Total
Effectif	43	6	0.000000	2	1	5	1149
Fréquences	3.7423847	0.5221932	0.000000	0.1740644	0.0870322	0.435161	100
Longueur cum. totale (m)	48194.868	7907.854	0	3468.1673	5529.9377	5722.832	1274323
Longueur Moyenne (m)	1120.8109	1317.9757	0.000000	1734.0837	0	1144.5664	16988.075
Longueur Max (m)	3732.0444	1592.0221	0.000000	2614.8131	5529.9377	1968.7606	61750.629
Longueur Min (m)	460.3263	868.66093	0	853.35425	0	609.33626	6323.9841

Tableau 4: Classification des linéaments par famille directionnelle.

Classes	N-S	NNE-SSW	NE-SW	ENE-WSW	E-W	ESE-WNW	SE-NW	SSE-NNW	Total
Effectif	94	57	483	162	65	29	87	56	1033
Fréquences	9.0997096	5.517909	46.757018	15.682478	6.2923524	2.8073572	8.4220716	5.4211036	100
Longueur cum. totale (m)	104908.48	64860.857	492909.94	173335.24	71866.096	40787.502	122017.38	71618.108	1142303.6
Longueur Moyenne (m)	1116.0477	1137.9098	1020.5175	1069.9706	1105.6322	1406.4656	1402.4987	1278.8948	9537.9368
Longueur Max (m)	2659.6909	5960.6176	8774.2706	4784.6722	2760.7599	4304.2895	5529.9377	3024.8898	37799.128
Longueur Min (m)	497.34781	441.06101	203.33814	379.867	14.378178	591.08128	422.8749	500.1457	3050.094

II. Implication structurale et tectonique

L'analyse des images Landsat OLI 8 permet de mettre en évidence les linéaments dits "non pénétratifs" qui sont les signatures des structures régionales mises en place à la suite des évènements ayant engendrés des déformations. Les structures de cisaillement de type Riedel sont généralement interprétées en relation avec les déformations observées sur les affleurements localisés dans les zones de décrochement ductile cisailant (Riedel, 1984 ; Davis et al., 2000) (non exprimé par un contact anormal séparant nettement deux compartiment). En effet, on note **R** et **P** pour les structures de cisaillement de type Riedel synthétiques du décrochement (mouvement dans le même sens) faisant avec le cisaillement principal un angle de 15° environ. Les fractures ou failles **R'** et **P'** désignent les structures de cisaillement de type Riedel antithétiques du décrochement à angle prononcé au cisaillement principal noté **C** (mouvement de sens inverse) avec qui ils font un angle de 75° environ. Dans un tel système, l'axe **Z** de l'ellipsoïde de déformation est horizontal et bissecteur du dièdre aigu **R-R'**, l'axe **X** étant horizontal et **Y** vertical. Dans les cas simples, la reconnaissance sur le terrain des fractures **R** et **R'**, et éventuellement de fentes de tension, permet de reconnaître ce type de mouvement décrochant et d'en préciser le jeu.

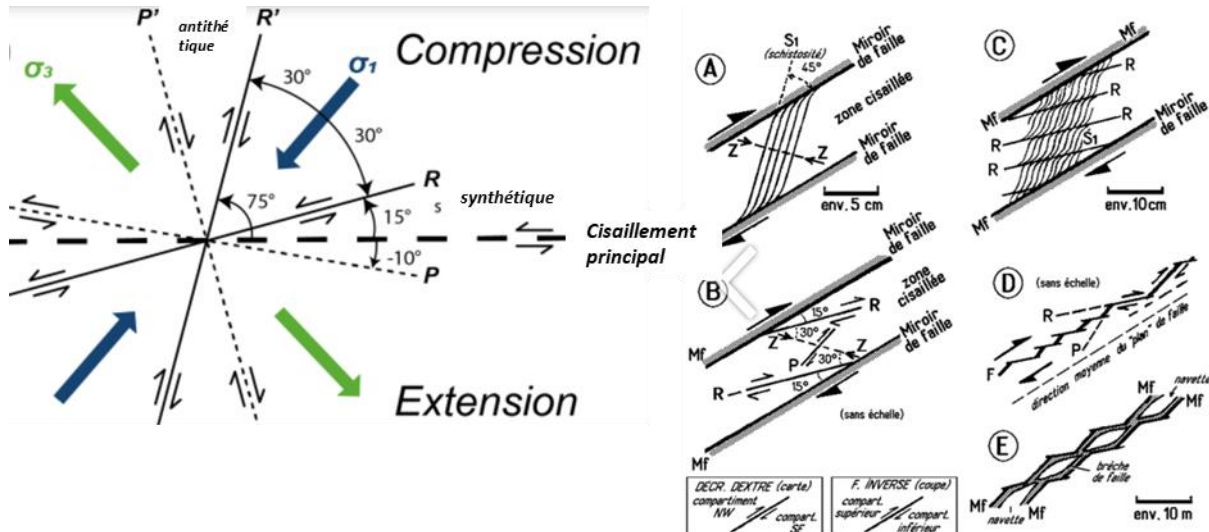


Figure 23: Illustration d'un modèle de cisaillement de type Riedel et les structures secondaires se développant à partir d'un décrochement senestre (droite). Schémas montrant les relations géométriques existant entre les failles et les structures microtectoniques associées (gauche) (Davis et al., 2000).

Les schémas *A*, *B* et *C* donnent une représentation schématique de la disposition géométrique des plans de déformation microtectonique dans le couloir de faille, entre les deux miroirs de faille (**Mf**), c'est-à-dire dans la "zone cisailée", où se concentre la déformation et leur disposition par rapport à la direction principale de raccourcissement (**Z**). Le schéma *B* montre notamment la disposition angulaire des failles secondaires, "de Riedel", ainsi créées et

le *schéma C* montre comment elles sont disposées en échelons. Leur intersection avec le feuilletage schisteux aboutit à une texture de déformation microtectonique de la roche dite **texture S/C**, où les plans de schistosité (**S**) s'entrecroisent avec des plans de cisaillement (**C**) que sont les microfailles P. Le *schéma D* montre le rôle que jouent souvent les fractures secondaires pour donner au tracé des failles principales un dessin en baïonnette (notamment à l'échelle décamétrique). Le *schéma E* montre enfin comment ce tracé en zig-zag peut détacher des navettes entre les deux miroirs de failles **Mf**.

Les directions principales identifiées (figs. 24 et 25) à la suite de l'analyse qualitative et quantitative des linéaments de notre zone d'étude sont par ordre de priorité NE-SW, ENE-WSW, NW-SE, N-S, E-W, ESE-WNW, NNW-SSE et NNE-SSW. La direction NE-SW correspond à la structure Riedel de type **P (cisaillement dextre)** de foliation **S₂** (foliation régionale) (figs. 25 et 26). La direction ENE-WSW est la matérialisation du cisaillement principale dextre N070 (**C**), regroupant les cisaillements aussi connu sous les vocables de Cisaillement Centre Camerounais (CCC), Faille de la Sanaga (FS), Cisaillement de Bétaré-Oya (CBO), Cisaillement de l'Adamaoua (CA). Les directions NW-SE et ESE-WNW représentent les structures Riedel de type **R' (cisaillement senestre)**. Les directions N-S et NNW-SSE correspondent aux structures Riedel de type **P' (cisaillement senestre)** et enfin la direction E-W représente les structures Riedel de type **R**. Les orientations ESE-WNW et NNW-SSE d'un point de vue cinématique sont les marqueurs du réajustement lié à la transpression.

Il ressort de l'analyse qualitative des différentes familles de fractures que les directions (NE-SW, SE-NW et NNE-SSW) présentent les longueurs les plus importantes, ce qui témoigne de leur enracinement en profondeur.

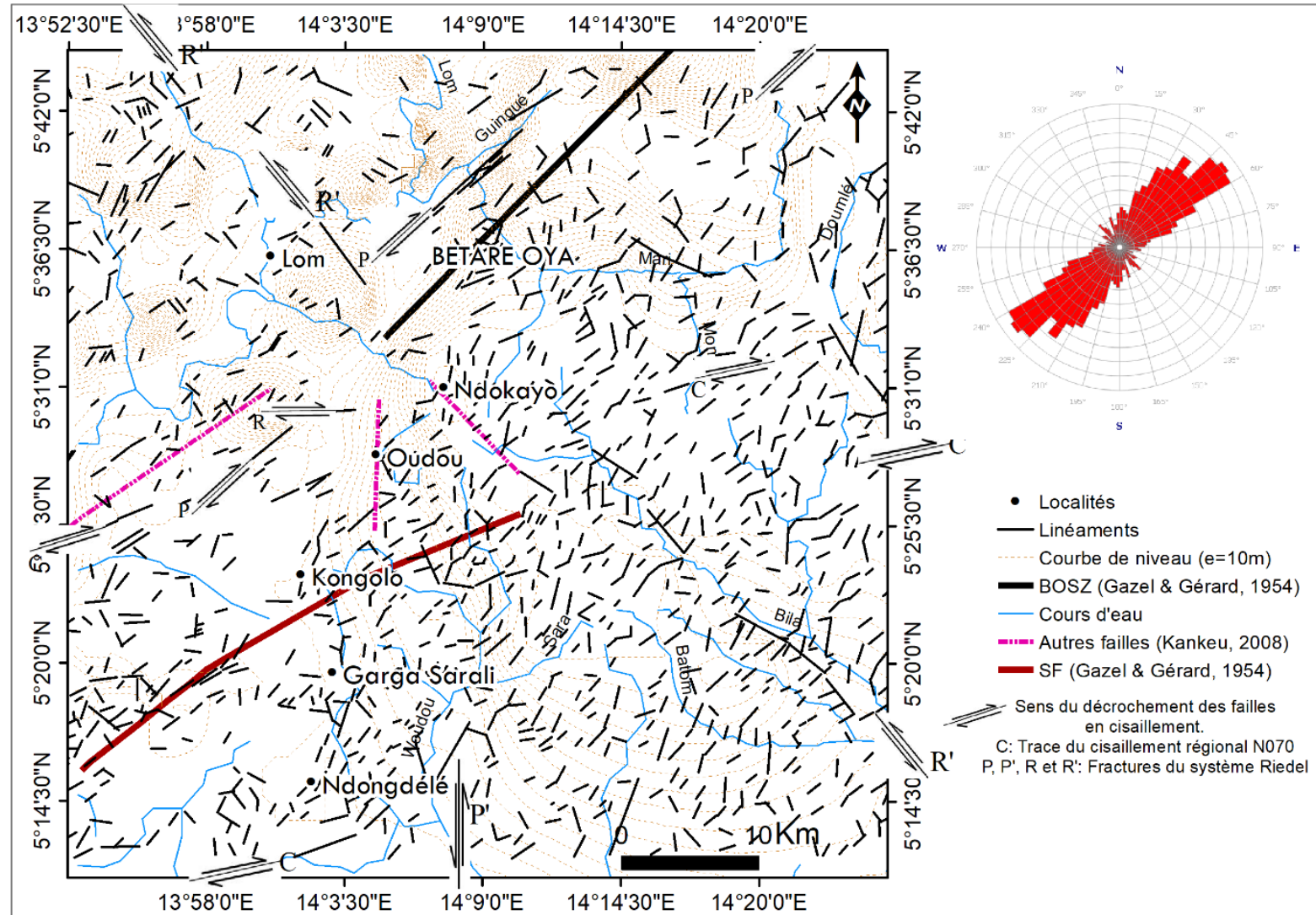


Figure 24: Carte structurale du district de Garga-Sarali – Bétaré Oya, illustrant le cisaillement principal (c) et les structures en cisaillement du système Riedel (P, P', R et R').

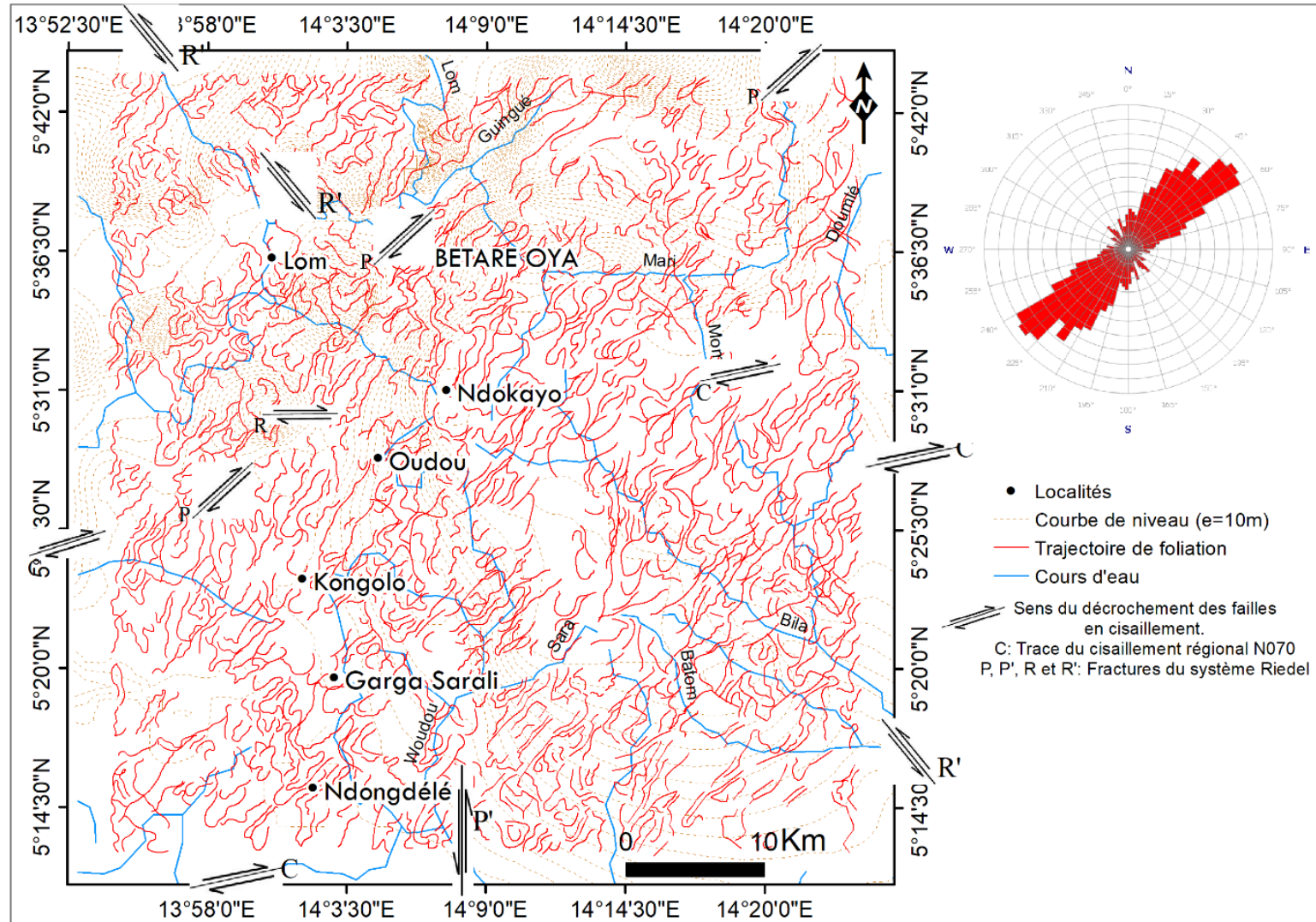


Figure 25: Carte structurale du district de Garga-Sarali – Bétaré Oya, mettant en évidence les trajectoires de foliation et illustrant le cisaillement principal (c) et les failles du système Riedel (P, P', R et R').

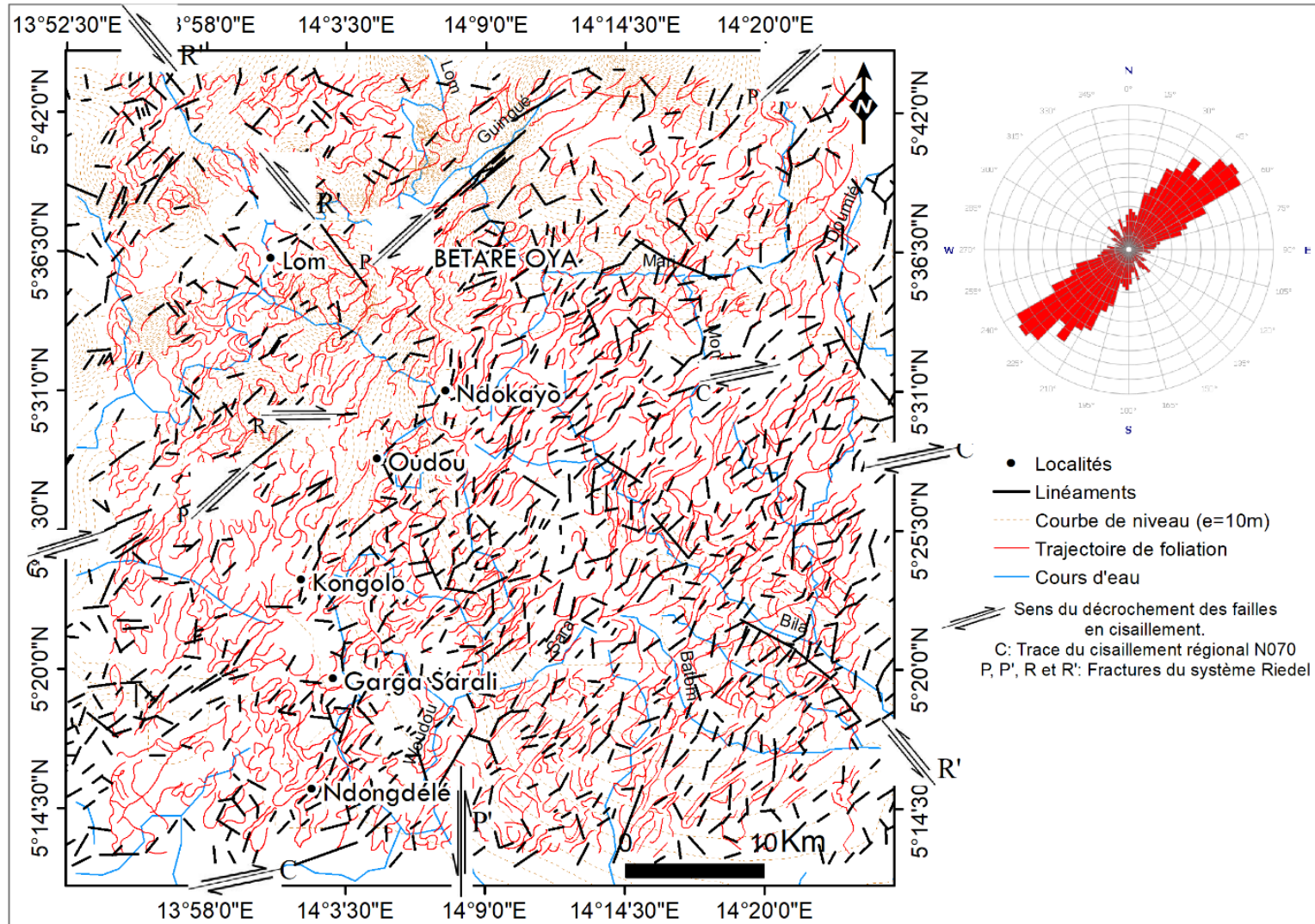


Figure 26: Carte structurale du district de Garga-Sarali – Bétaré Oya, combinant les trajectoires de foliations et les linéaments illustrant le cisaillement principal (c) et les failles du système Riedel (P, P', R et R').

Conclusion

L'étude analytique des images satellites et leur implication structurale et tectonique a permis d'identifier 1149 linéaments, regroupés en huit (08) familles directionnelles. La famille ENE-WSW caractérise le cisaillement majeur N070 qui affecte toutes les formations de la Chaîne Panafricaine dans le domaine de l'Adamaoua-Yadé (ADY). Les familles NE-SW, NW-SE, N-S, E-W, ESE-WNW et NNW-SSE quant à elles sont les éléments structuraux de type Riedel qui témoignent d'une tectonique caractéristique des zones affectées d'un mouvement décrochant ductile.

Les cartes des linéaments mettent en évidence une foliation générale NE-SW (Fig. 27) affectant les formations géologiques et des nœuds des fractures (Fig. 28) constitués par les intersections qui correspondraient à des zones à fort potentiel minier. Ils apparaissent souvent avec un décalage plus ou moins marqué, mais à l'échelle d'observation satellitaire, ils sont parfois difficilement observables. Cependant, à certains endroits, on peut observer des zones de décrochements transverses nets entre les linéaments, caractéristiques d'une zone de cisaillement.

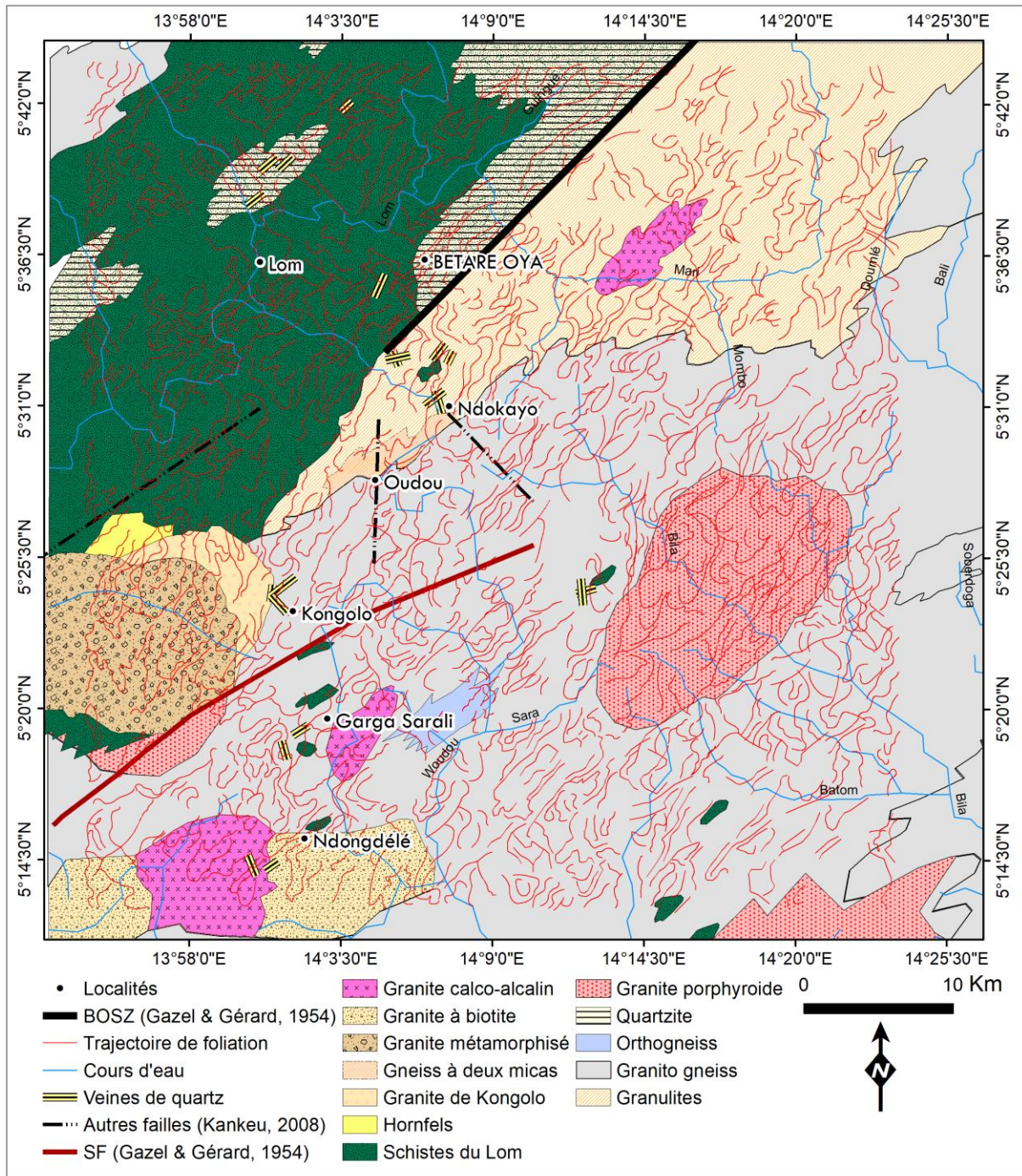


Figure 27: Carte géologique de la zone d'étude montrant la foliation des séries métamorphiques ressortit par l'étude des images satellitaires (modifiée d'après Gazel et Gérard, 1954 ; Kankeu et al., 2006).

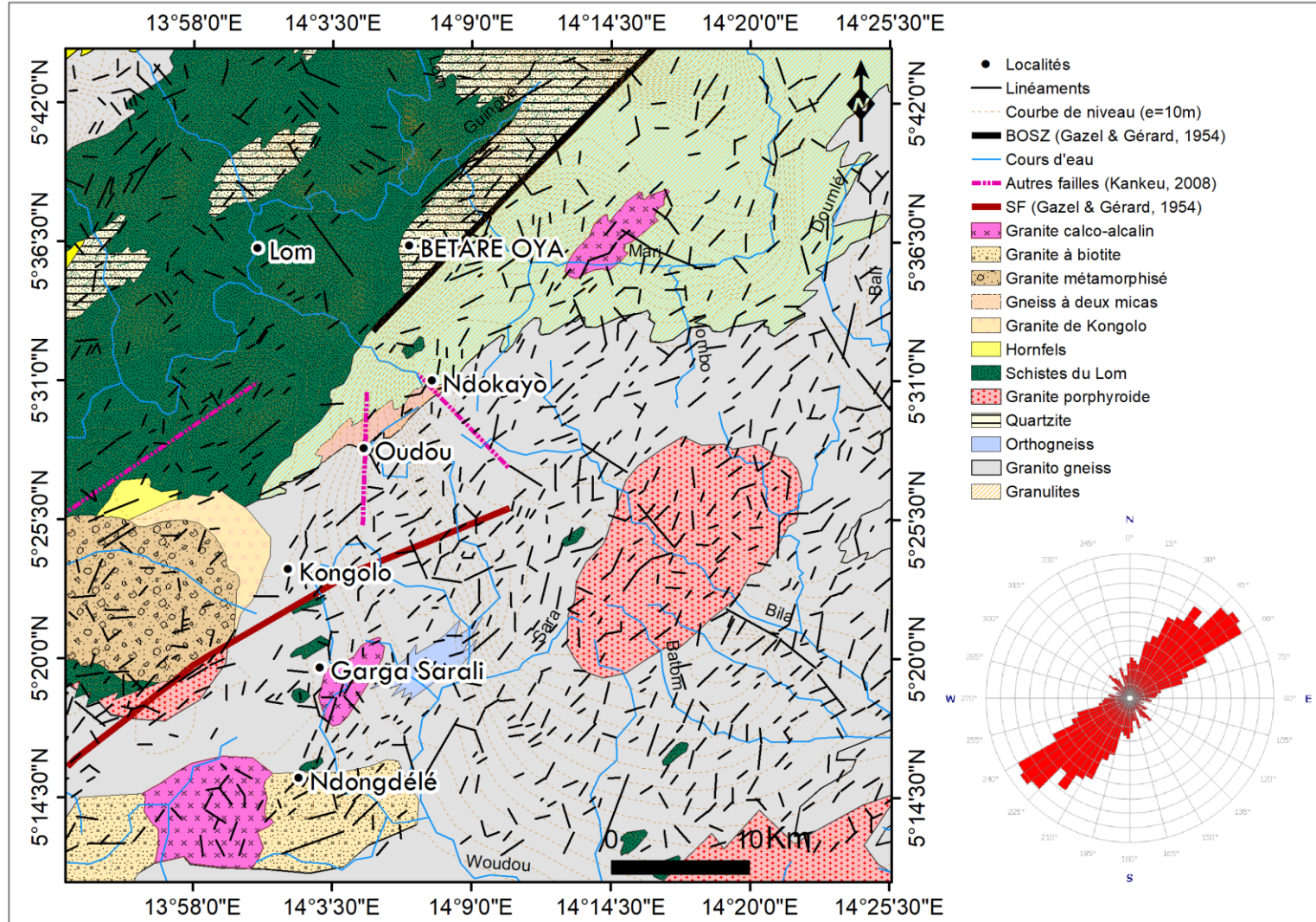


Figure 28: Carte géologique et rosace de direction illustrant l'orientation majeure NE-SW de la zone d'étude (In Gazel et Gérard, 1954 ; Kankeu et al., 2006).

III. Caractérisation géologico-structurale et évaluation du potentiel artisanal minier

III.1 Prospection géologique et structurale

La lithologie de la zone d'étude est marquée par des formations géologiques qui ont subi une déformation polyphasée. Une épaisse couverture latéritique caractéristique des zones équatoriales rend assez complexe l'analyse structurale permettant la définition des structures pénétratives. Toutefois, les zones autour de Bétaré-Oya, Ndokayo et Garga Sarali contiennent des affleurements sur lesquels des marqueurs de déformation sont visibles. Des travaux effectués dans la zone (Kankeu et al., 2006 ; Kankeu, 2008) ont apporté des informations plus récentes concernant la lithologie qui est rencontrée dans la zone d'étude. L'étude de ces éléments structuraux constitue à cet effet un outil très indispensable pour la compréhension des relations pouvant exister entre les déformations structurales ayant affectées la zone et la présence des indices aurifères faisant l'objet de l'intense activité minière artisanale observée.

L'étude des déformations des domaines ductiles fait appel à l'analyse tectonique moderne qui définit des structures planaires, linéaires et plano-linéaires congénères, de manière à les regrouper dans un seul et même régime de déformation, et de diminuer ainsi le nombre des phases structurales.

Le présent travail qui s'appuie sur l'utilisation de cette nouvelle interprétation des structures fait appel à une compilation des données structurales des études antérieures (Kankeu et al., 2006 ; Kankeu, 2008) et celles prises au cours des descentes de terrain. En effet, compte tenu de la rareté des affleurements, d'accessibilité difficile et du fort couvert latéritique, la prise des données est rendue possible sur les affleurements qui sont plus visibles dans les alentours de Bétaré-Oya.

La cartographie et l'analyse structurale sont ainsi des outils qui aident à caractériser les déformations (natures, géométrie, etc.) dans le but d'améliorer la connaissance des épisodes tectoniques qui ont affecté les unités géologiques de la zone d'étude et par conséquent sont à l'origine de la mise en place des minéralisations observées en surface et faisant l'objet d'une activité minière assez intense.

L'environnement immédiat du secteur d'étude est celui du bassin du Lom qui est considéré comme post-collisionnel. Il a été établi par des auteurs (Toteu et al., 2006a) que le grand potentiel économique des minéraux (exemple de l'or) qui s'y trouvent peut-être expliqué par la remobilisation au Néoprotérozoïque du socle archéen et Paléoprotérozoïque.

La lithologie de la zone qui s'intègre dans la série du Lom est constituée entre autre (figs. 29, 30) des formations sédimentaires et des intrusions granitiques qui ont traversé les formations métamorphiques. Ces intrusions, sont observées soit sous forme de petits massifs isolés, soit sous forme de filons granitiques et de pegmatites qui représenteraient la phase magmatique ultimes. Enfin, des roches métamorphiques constituées de granito-gneiss, des gneiss plus ou moins migmatites et des schistes ; et des enclaves (schistes et matériels basiques). Cette lithologie porte les empreintes de phase de déformation qui se sont déroulés durant l'orogène Panafricaine (figs. 30 et 31).

Les formations sédimentaires sont représentées par des produits d'altération qui n'ont pas subi de transport ou seulement un transport négligeable, formant ainsi des arènes argilo-sableuses au sein desquelles flottent des blocs de roches qui ont résisté à l'altération météoritique (fig. 29A).

Les intrusions granitiques sont celles qui ont recoupé les formations métamorphiques (fig. 30). En effet, ces intrusions se rencontrent sous forme de filons granitiques et de pegmatites qui symbolisent la phase magmatique ultime (Kankeu et al., 2006; Kankeu, 2008). Il est observé au niveau de Garga Sarali des granito-gneiss à structure orientée ayant les contours concordants avec les directions structurales des encaissants (fig. 28B). Au niveau de Kongolo des granites de type Kékéyéké (Kankeu et al., 2006; Kankeu, 2008) sont identifiés. Ils se présentent sous forme de massifs circonscrits et contenant des enclaves de l'encaissant. Ces granites n'ont pas d'orientation. Les filons sont des microgranites peu épais qui recoupent toutes les formations antérieures.

Les roches métamorphiques comprennent les granito-gneiss (figs. 30A, 30B), les gneiss plus ou moins migmatites et les schistes (fig. 30C).



Figure 29: Dalle de cuirasse fortement indurée (A) ; massif granitique dans le village Oudou (B) ; blocs de granito-gneiss dans le lit d'un cours d'eau de Garga Sarali (C) ; Quartzite fortement fracturé (D) présentant des décrochements dextres et senestres (E).

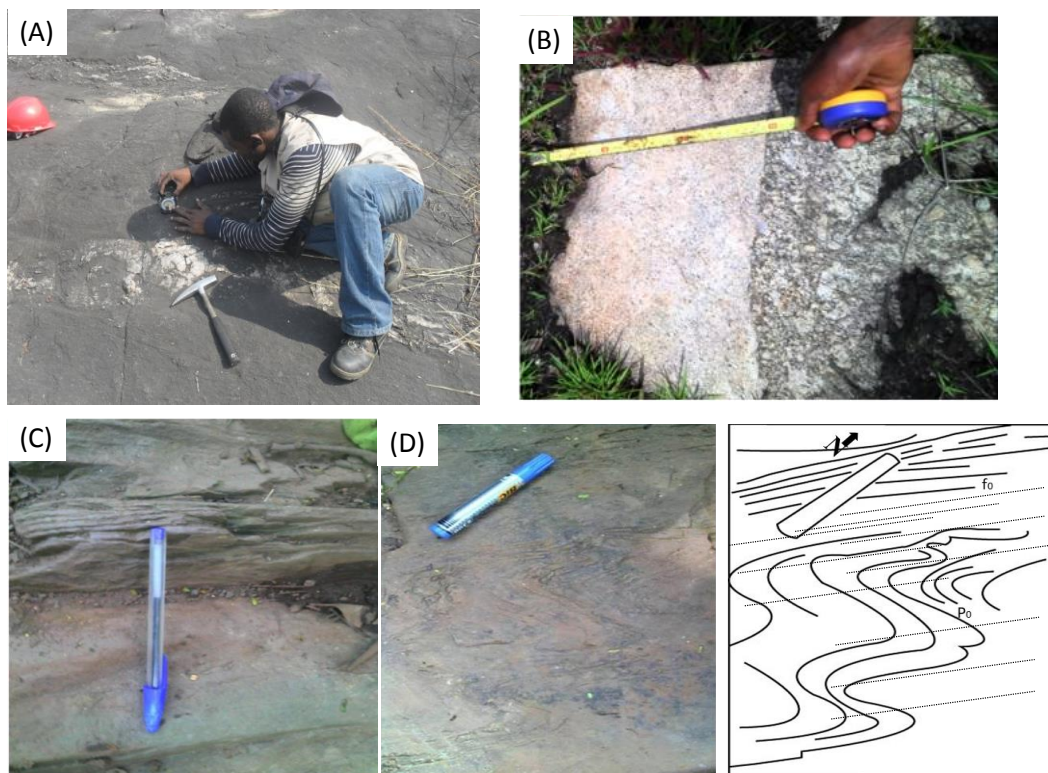


Figure 30 : Quelques structures observées dans la zone d'étude. Intrusion quartzitique dans une dalle granitique dans la zone de Garga Sarali (A) ; bloc de granito-gneiss dans le village Oudou (B) ; formation schisteuse du Lom (C) ; foliation et plissement affectant une formation granitique dans la zone de Garga Sarali (D).

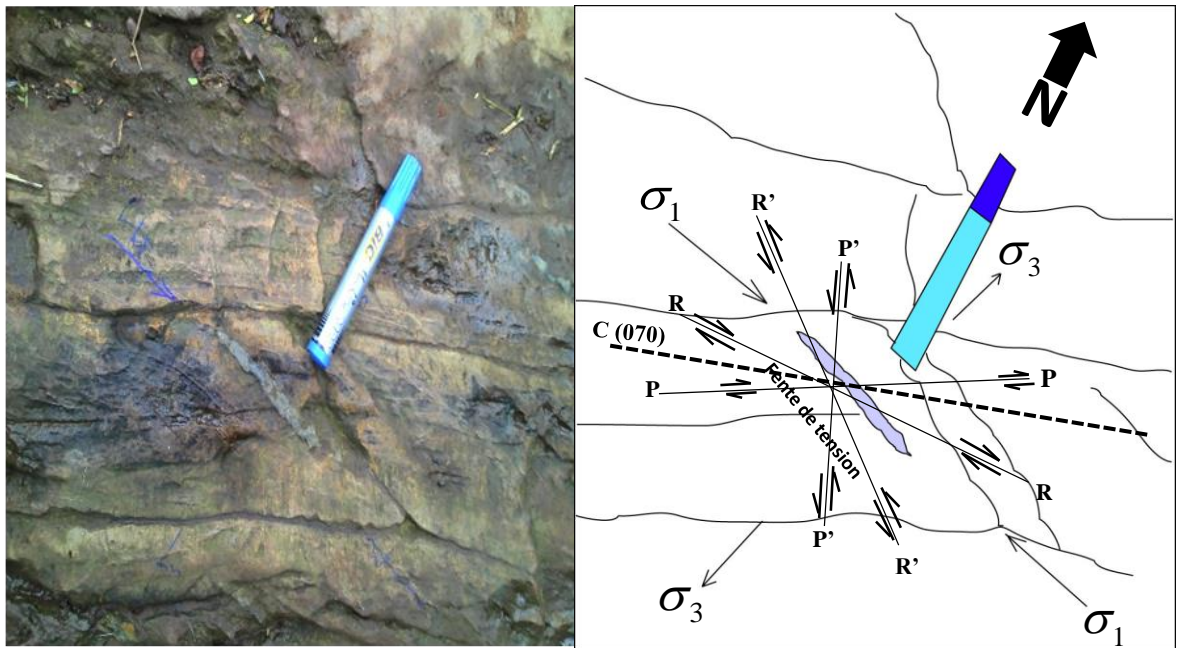


Figure 31 : Fente de tension dans une intrusion granitique dans la localité de Garga Sarali sous un régime de structure en cisaillement de type Riedel (R, R', P et P').

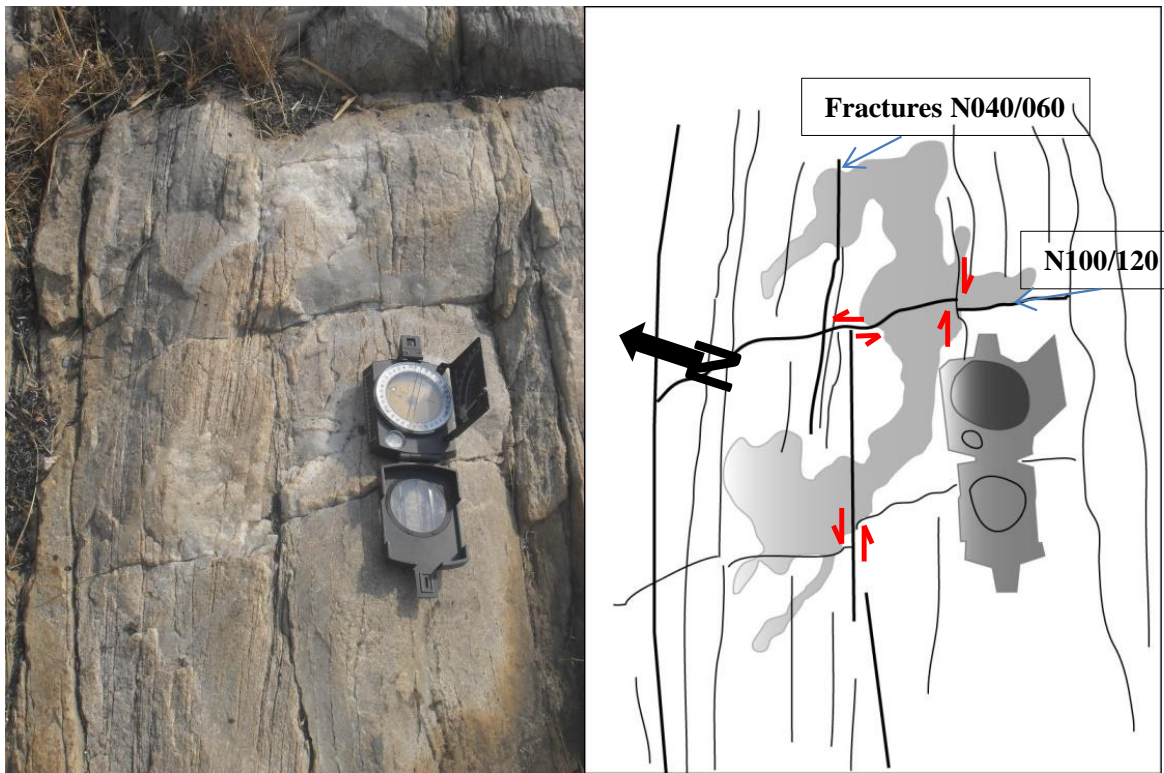


Figure 32 : Affleurement de quartzite fracturé montrant des décrochements dextre et senestre dans les environs de Ndokayo.

Des mesures structurales ont été prises sur les formations géologiques identifiées mais assez rares du fait du fort couvert latéritique. Notamment, les zones autour de Bétaré Oya, Ndokayo et Garga Sarali (fig. 37). L'objectif ici étant d'avoir une esquisse de la déformation

affectant la lithologie rencontrée. Plusieurs marqueurs de la déformation sont ainsi répertoriés à l'instar de la foliation, la schistosité, les plis et les fractures.

- **Schistosité mylonitique et plis**

Au point de coordonnées 5.54972 LatN/14.09444 LongE ; 846m, des mesures sur plis et des plans de schistosité mylonitique ont été prises en compte simultanément. Les plans de foliation (points noirs) ont des pendages forts (fig. 33). La grande majorité des pôles des plans de schistosité mylonitique est localisée dans le quadrant SE. La rosace présente deux directions majeures : N-S et NNE-SSW (fig. 33). Les axes de plis (points rouges) par contre sont éparpillés et non groupés, avec des pendages moyens (fig. 33). La rosace de direction montre deux directions à savoir une direction majeure vers laquelle les axes de plis plongent suivant la direction ENE-WSW (fig. 38), et une direction secondaire orientée NNE-SSW (figs. 33, 39).

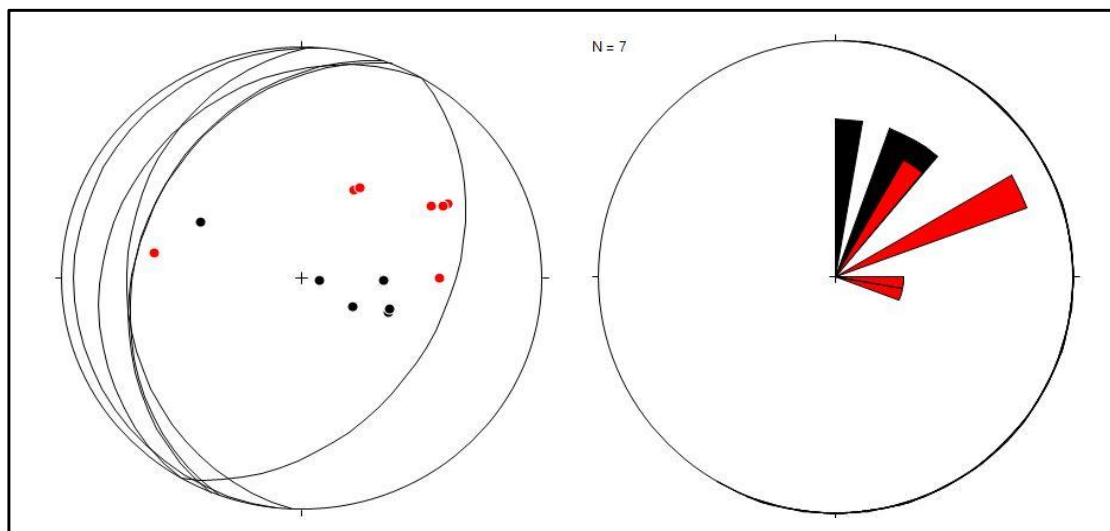


Figure 33: Diagrammes stéréographiques de schistosité mylonitique (points noirs) et des plis (points rouges). Stéréogramme des pôles et des traces cyclographiques et rosace de direction.

- **Fracturation**

Au point de coordonnées 5.60333 LatN/14.09083 LongE ; 790m, plusieurs périodes de fractures ont été identifiées (F1, F2, F3, F4 et F5) et vingt-trois (23) mesures ont été prises sur le terrain (fig. 34). Trois directions spécifiques (fig. 40) sont relevées ici à savoir la direction majeure (SSE-NNW), la direction secondaire (SE-NW), et la direction mineure (NE-SW) (fig. 34).

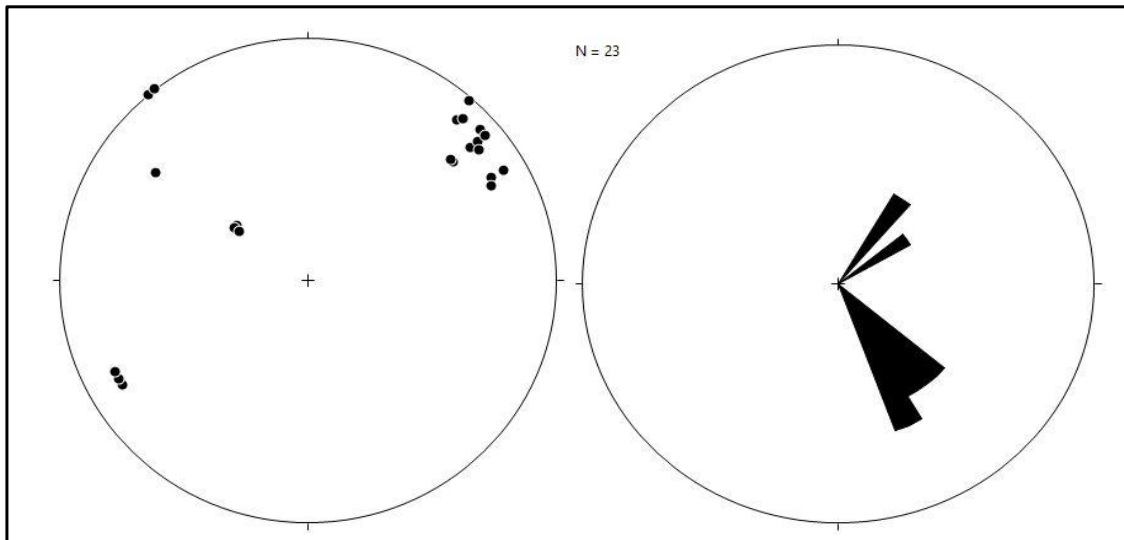


Figure 34: Diagrammes stéréographiques de fracturations illustrant le stéréogramme des pôles et la rosace de direction de la fracturation.

- **Axes de plis**

Au point de coordonnées 5.54778 LatN/14.09778 LongE ; 889m, il est observé un degré de déformation important. Plusieurs structures y ont été identifiées. Parmi elles, plusieurs plis. Une cinquantaine de mesures a été prise sur les axes de plis. Les pôles forment un nuage de points dans le quadrant SE (fig. 35). Les pendages ici sont majoritairement moyens à faibles. Ces axes de plis plongent vers le SE (fig. 35), suivant la direction NW-SE (fig. 39).

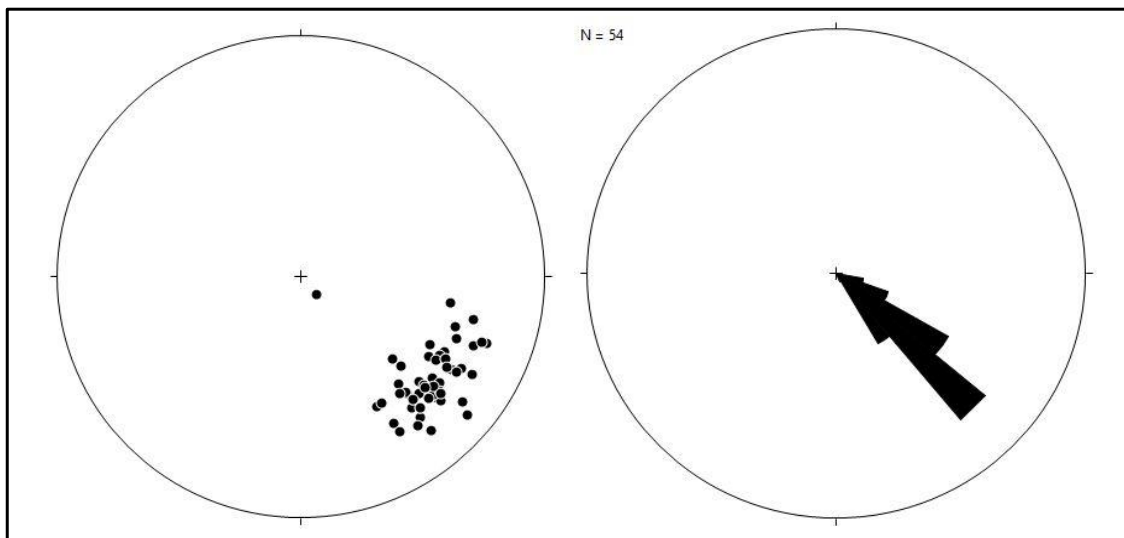


Figure 35: Diagrammes stéréographiques des axes de plis : (a) stéréogramme des pôles des axes de plis, (b) rosace de direction des axes de plis.

- **Foliation**

Au point de coordonnées 5.54778 LatN/14.09778 LongE ; 889m, une dizaine de mesures a été collectée. Les directions des foliations sont fortement rapprochées et le stéréogramme des pôles et des tracés cyclographiques des plans de foliation montre un

alignement suivant l'axe N-S (fig. 36a). Les pendages ici sont très variables. D'après la rosace de direction, ces structures sont toutes orientées vers l'Est, suivant la direction E-W (figs. 36b, 38).

Au point de coordonnées 5.60333 LatN/14.09083 LongE ; 790m, deux groupes de mesures sont distinctement observés. Cette différence est due à deux groupes de directions semblables. Bien que les directions sur le terrain soient différentes, les pôles sont tous localisés dans le quadrant SE (fig. 36b). Ces plans de foliation sont orientés vers le NNE suivant la direction NNE-SSW (fig. 38), pour le premier groupe ; et vers l'Est suivant la direction E-W, pour le deuxième groupe (figs. 36b, 37).

Au point de coordonnées 5.53889 LatN/14.24417 LongE ; 849m, vingt-cinq mesures de foliation ont été collectées. Le stéréogramme montre un nuage de points localisé sur deux quadrants différents NE et SE (fig. 36c). Les pendages sont moyens à forts. La rosace de direction indique que les pendages sont majoritairement orientés NNE-SSW (figs. 36c, 37). Toutefois, plusieurs directions mineures sont également répertoriées.

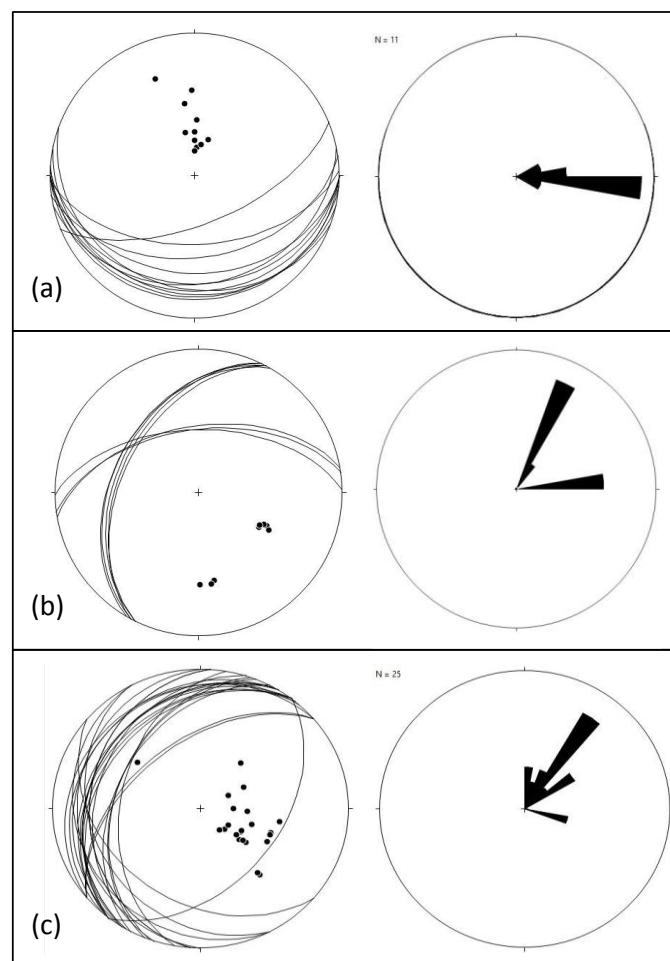


Figure 36: Diagrammes stéréographiques de la foliation : stéréogramme des pôles et des traces cyclographiques de la foliation (à gauche), rosace de direction de la foliation (à droite).

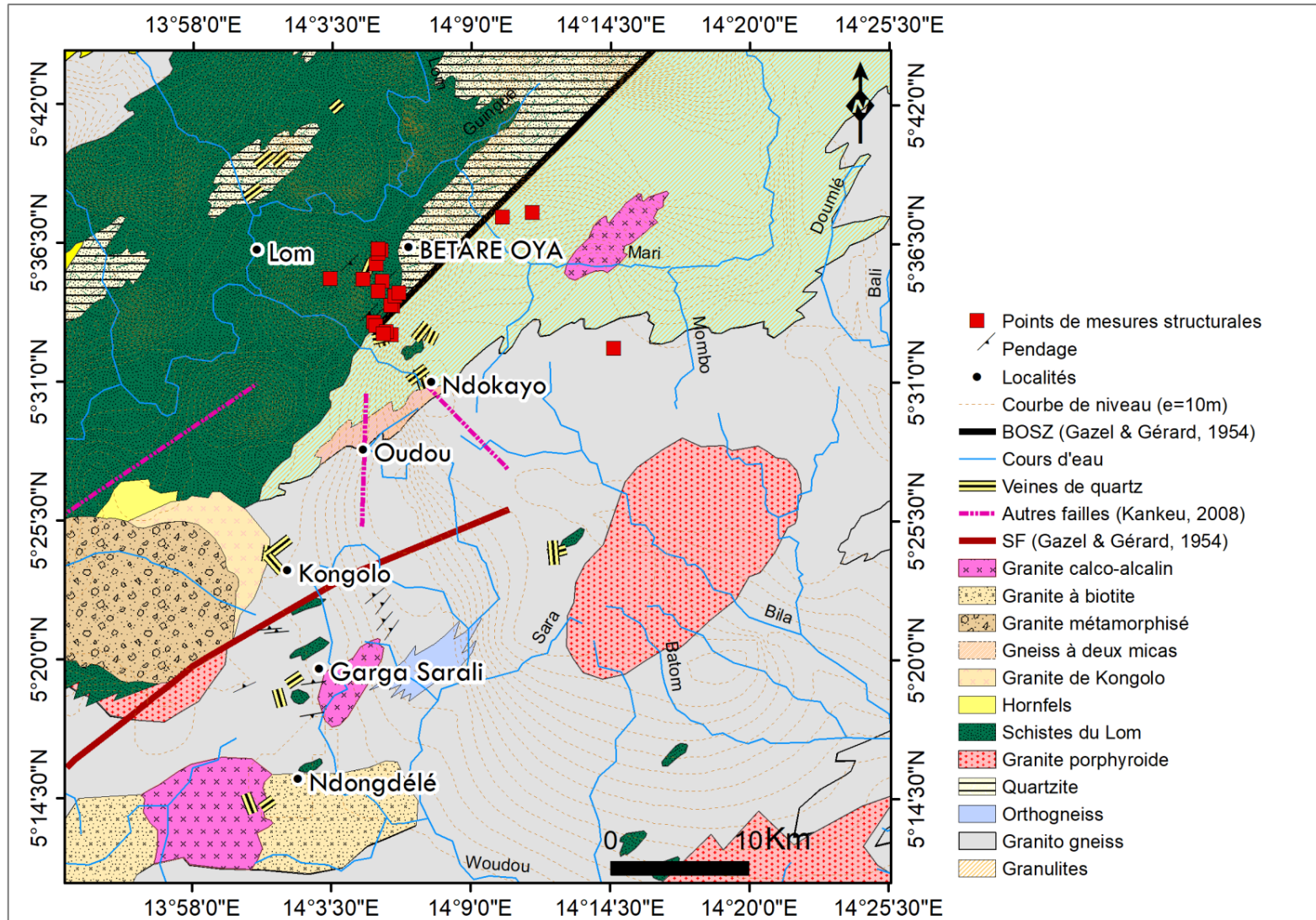


Figure 37 : Carte des points de mesures structurales (plan de foliation, axe de plis, schistosité, fracturation) sur fond géologique.

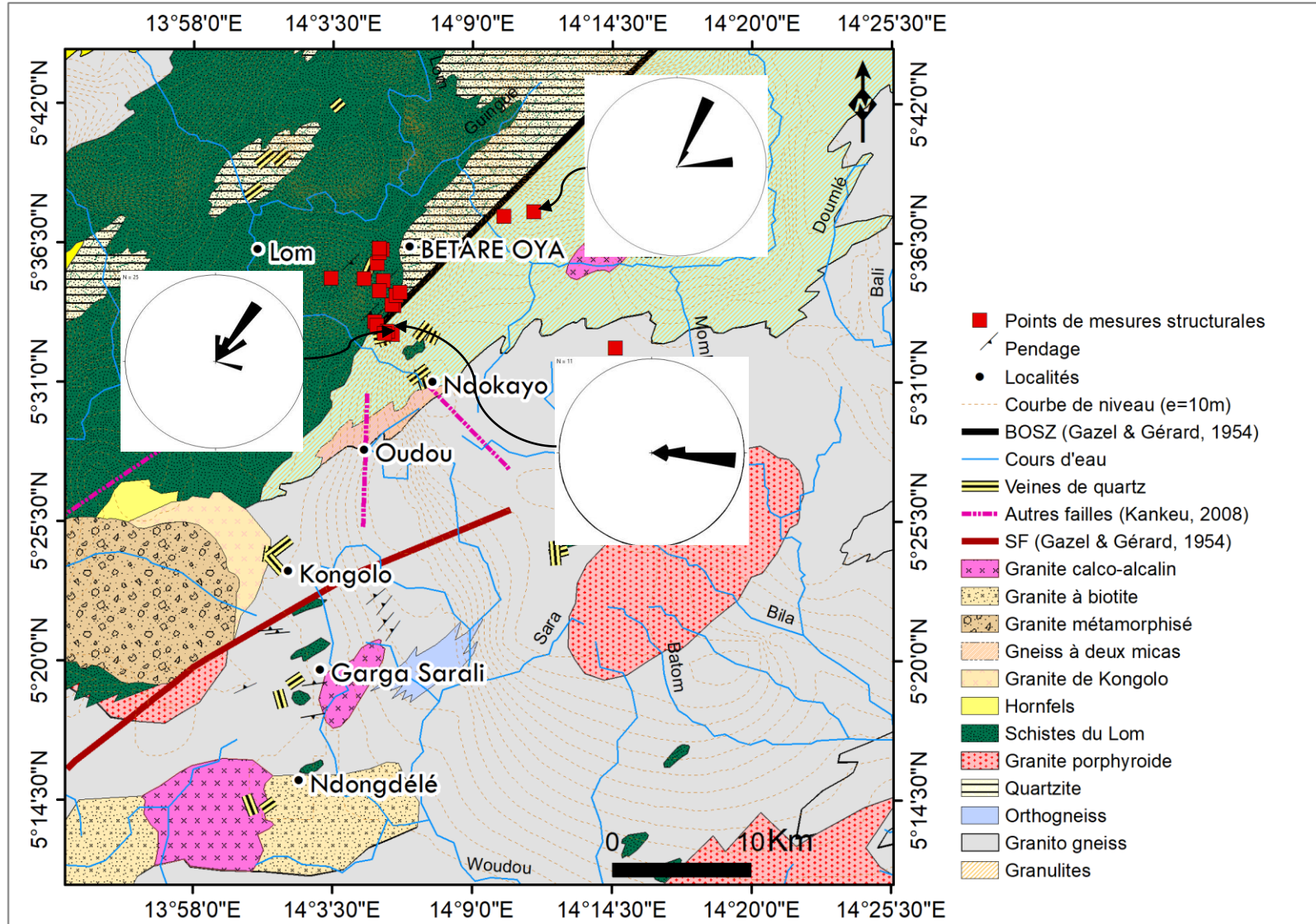


Figure 38 : Carte de l'orientation des plans de foliations dans le secteur de Bétaré Oya.

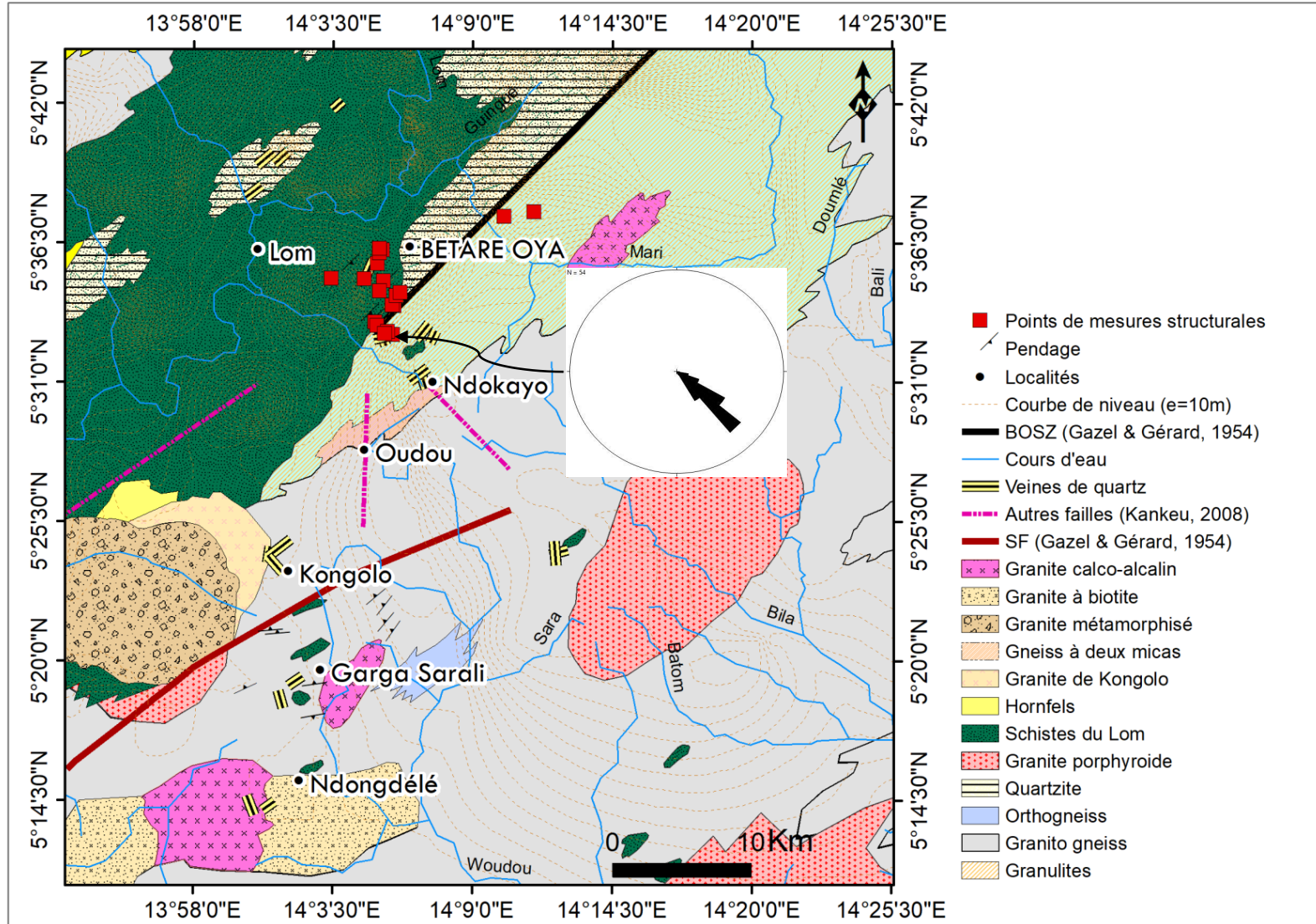


Figure 39 : Carte de l'orientation des axes de plis dans le secteur de Bétaré Oya.

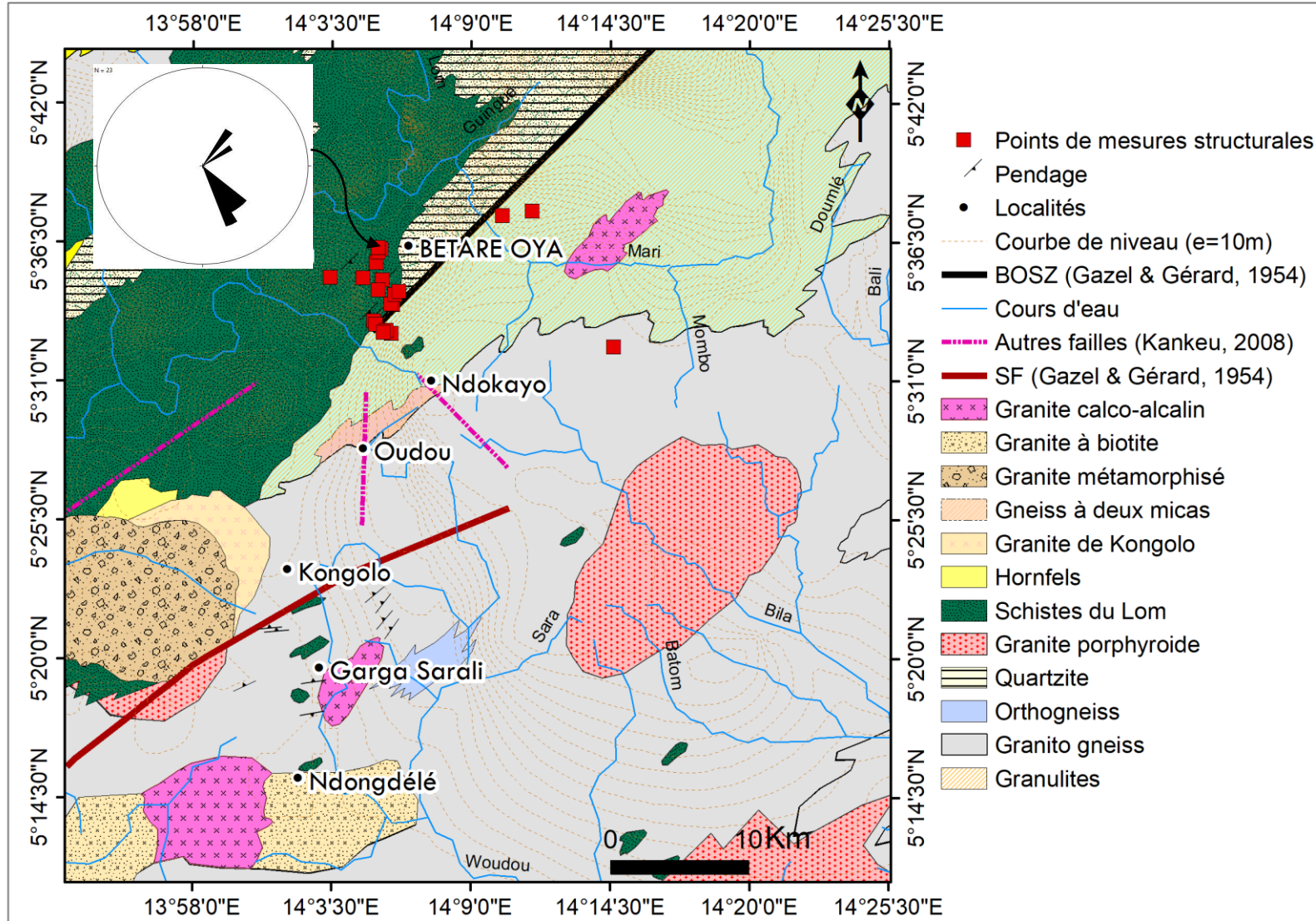


Figure 40 : Carte de l'orientation des plans de fractures dans le secteur de Bétaré Oya.

III.2 Cartographie des sites miniers

La cartographie des sites miniers actifs et non actifs a été réalisée au niveau des districts aurifères Garga Sarali – Bétaré Oya (Figure 41). Un total de 126 sites éluvionnaires et alluvionnaires a été identifié et cartographiés. En effet, chaque site d'exploitation minière a fait l'objet d'une géolocalisation, d'une description de l'environnement immédiat et d'une évaluation à la bâtée de la teneur moyenne. La collecte des données et informations a permis de créer une base de données et à l'aide des logiciels SIG (Arc GIS), de générer des cartes thématiques qui permettent de définir des zones d'intérêt aurifère.

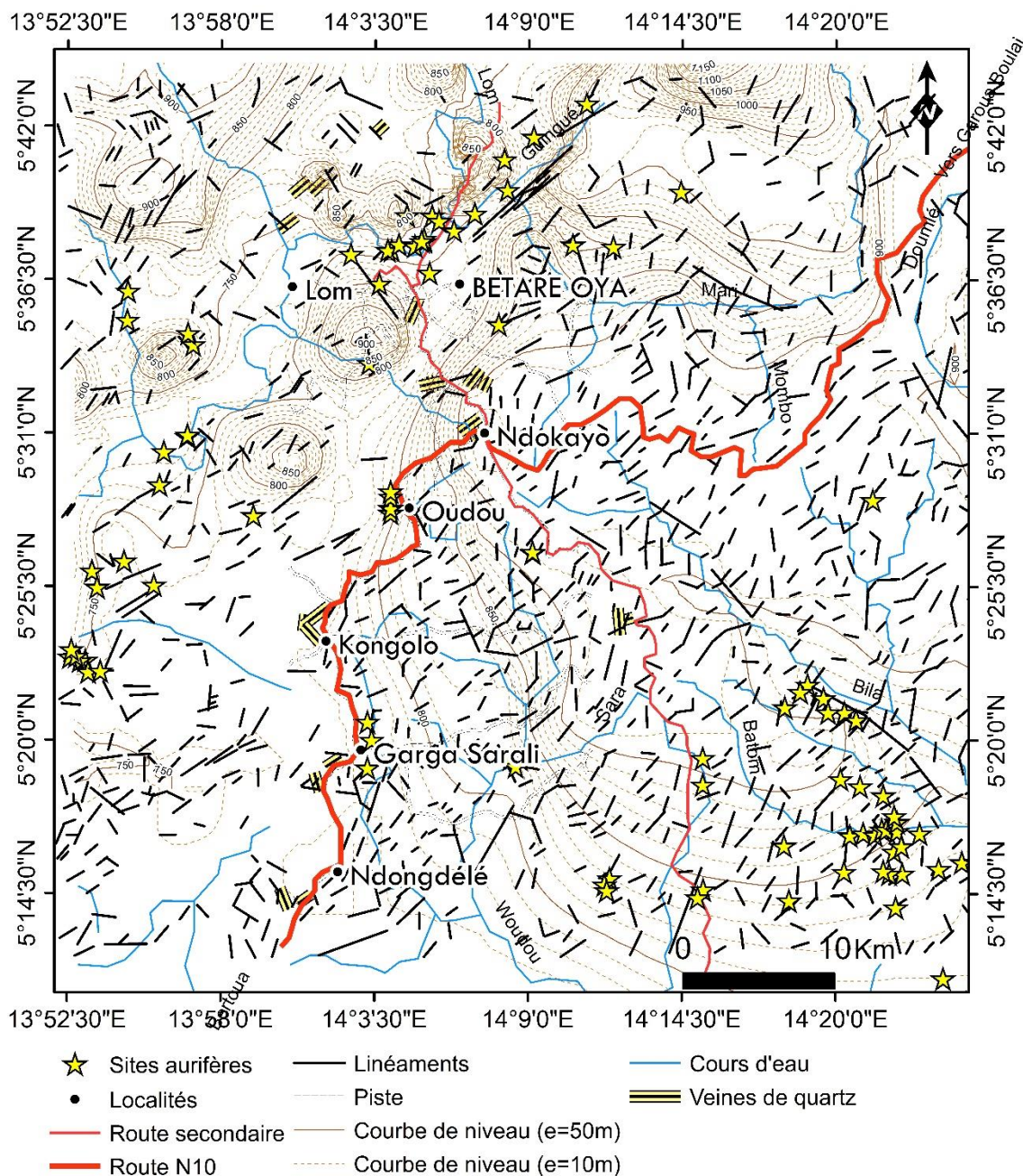


Figure 41: Carte de localisation des sites d'exploitation aurifère dans la zone d'étude.

L'observation de la carte de localisation des sites d'exploitation aurifère (fig.41) apporte les observations sur la dispersion préférentielle des indices aurifères dans le secteur d'étude. En effet, les sites géolocalisés (cf. tableau 5) occupent la presque totalité de la zone d'étude. Toutefois, il se dégage des couloirs où ces sites sont plus denses que d'autres. Le premier couloir situé dans la partie nord et nord-ouest de Bétaré Oya présente la plus importante densité des sites cartographiés. Ces sites sont en majorité localisés le long du cours d'eau Lom et de ses affluents, et au niveau de certains sommets où affleurent des veines de quartz et des manteaux d'altération constitués de roche très altérées. Ils suivent une orientation NE-SW. Le deuxième couloir est situé à l'ouest du village Oudou où les sites suivent l'orientation du Lom dans la direction NW-SE et sont situés au niveau des terrasses où des veines de quartz sont identifiées. Le troisième couloir se situe au SE de la zone d'étude où les sites suivent l'orientation des cours d'eau Bila et Batom de direction NW-SE et sont situés sur les terrasses où les manteaux d'altération sont exploités. Le quatrième couloir est situé autour du village Garga Sarali où les sites suivent l'orientation des cours d'eau Woudou et Sara de direction NE-SW.

Deux principaux types de minéralisations aurifères semblent font l'objet de l'exploitation artisanale dans la zone à savoir les minéralisations alluvionnaires le long des cours d'eau et les minéralisations éluvionnaires au niveau des manteaux d'altération riche en système de veines de quartz.

III.3 Evaluation des teneurs des sites d'exploitation artisanale

L'évaluation des teneurs s'est faite suivant deux (02) méthodes. La première a consisté à faire des lavages à la bâteau des graviers minéralisés obtenus au niveau des trous ouvert le long des cours d'eau. Dans chaque trou d'exploitation rencontré, trois (03) bâteaux était lavées. On calculait alors la teneur moyenne en g/m^3 et on convertissait en g/t . la deuxième évaluation a consisté à faire le même procédé au niveau des trous ouverts sur les manteaux d'altération et où des veines de quartz oxydées et fracturées ont été broyées puis lavées à la bâteau.

Le profil d'altération type rencontré dans l'ensemble de la zone investiguée (fig. 42) est constitué d'un niveau organique (N.o), d'un niveau nodulaire graveleux (N.ng), d'un niveau graveleux argileux à cuirasse latéritique (N.gacl), d'un niveau allotéritique (N.al) (mélange graveleux argileux, sableux et/ou argileux limoneux) et de la saprolite rocheuse (niveau isaltéritique) (N.is) qui est le plus souvent en contact avec la zone de **gravier** riche en minéralisation (figs. 43 et 46). L'épaisseur du profil varie de 2 à 10 mètres, tandis que celle du gravier varie de 0,5 à 1,5 mètres.

La teneur moyenne dans les 126 sites identifiés est de 1,54 g/t (Tab. 5) avec une teneur maximale de 5,02 g/t et une teneur minimale de 0,05 g/t.



Figure 42: Profil d'altération dans un site d'exploitation aurifère



Figure 43: Gravier minéralisé (veines de quartz oxydés) dans le secteur de Garga Sarali (à gauche). Un échantillon de veine de quartz oxyde et fracture (à droite).

Tableau 5: Coordonnées des sites cartographiés dans le secteur Garga Sarali – Bétaré Oya.

Site	UTMN (m)	UTME (m)	Moy. Au(g/t)	Site	UTMN (m)	UTME (m)	Moy. Au(g/t)	Site	UTMN (m)	UTME (m)	Moy. Au(g/t)
1	631598.368	409706.223	1.75	44	694547.846	465046.773	1	87	592747	423798	2.03
2	622140.662	411461.897	1.75	45	697166.89	460682.42	1	88	591394	425644	3.98
3	609646.113	383270.425	2.25	46	708871.41	457870.532	1.75	89	590900	427490	2.83
4	609744.305	383316.758	2.5	47	708731.165	456534.178	1.75	90	590789	395202	1.28
5	606452.313	381464.491	2.5	48	710673.914	457893.374	1.75	91	589591	395477	1.05
6	608419.661	363012.557	2.5	49	711003.828	460277.265	1.75	92	587748	395198	0.78
7	664360.538	369962.769	2.5	50	704091.487	452429.387	1.25	93	604575	396732	0
8	608635.358	381748.434	1.75	51	704143.7	452417.143	1.25	94	604882	396732	0
9	604417.708	387668.213	1.4	52	703064.75	453780.281	1.25	95	605650	396733	0
10	651807.818	361703.16	1.4	53	697074.985	460365.895	1	96	605988	396734	0
11	652065.159	360627.326	1.25	54	698172.126	459082.388	1	97	496513	464408	1.852
12	659167.085	364293.584	1.75	55	698516.587	458329.899	1	98	496359	464408	2.023
13	665292.732	366410.393	1.75	56	697329.697	448859.715	1.75	99	496513	464254	3.944
14	663865.806	365853.778	1.75	57	697379.248	448389.67	1.75	100	486349	466099	0.024
15	664270.563	366149.855	1.75	58	669493.08	433557.91	1.9	101	486502	466099	3.826
16	624203.427	399482.08	2.25	59	672946.819	434376.302	2.25	102	486656	466099	0.94
17	623849.55	399943	2.25	60	661149.824	420675.97	1.75	103	482662	472261	0.459
18	625903.284	404468.439	2.25	61	767635.155	425987.411	1.4	104	485732	472725	1.78
19	629404.64	406208.614	2.25	62	655922.631	423568.675	1.75	105	483890	472971	2.033
20	627927.321	404271.495	2.25	63	655378.83	423780.158	1.75	106	486193	473495	0.089
21	621947.406	396808.098	2.25	64	654221.282	423655.729	1.75	107	486039	473341	0.704
22	621923.241	396555.779	2.25	65	652732.942	422842.107	1.75	108	486039	473896	1.024
23	594288.903	362922.079	1.75	66	625782.861	415936.735	1.25	109	497398	481511	0.896
24	617327.911	379345.603	1.4	67	639140.361	411974.505	1.25	110	497582	481696	1.24
25	619247.304	379379.929	1.4	68	638161.991	417881.516	1.75	111	497797	481912	1.749
26	615707.706	383684.28	1.75	69	579703	417381	1.46	112	601951	406114	0
27	616454.56	383359.452	1.75	70	579703	417381	3.96	113	602012	406114	0
28	621669.217	394118.693	1.75	71	579182	417011	1.8	114	588394	417361	0
29	614465.798	395313.151	1.75	72	580448	411194	0.76	115	586643	417358	0
30	619716.097	395995.375	1.75	73	580049	410855	0.82	116	599841	381090	0.7
31	622282.574	408782.481	0.9	74	579650	411009	2.34	117	601411	379123	0.86
32	617032.236	403886.151	0.65	75	572054	420081	1.48	118	600770	376998	0.54
33	622518.277	398962.598	2.25	76	571317	419742	0.55	119	599694	377334	0.73
34	624349.572	402300.331	1.75	77	572054	420358	2.66	120	594874	376556	0.8
35	623221.562	400923.43	1.75	78	571942	410845	1.34	121	594844	376187	1.5
36	620420.267	399310.061	1.75	79	571325	412938	0.21	122	595091	375541	1.1
37	622677.694	398941.002	1.75	80	588349	404648	0.02	123	595151	375941	1
38	624227.521	397830.055	2.25	81	588348	405264	1.33	124	595582	375634	0.5
39	622312.093	397285.549	2.25	82	587857	404986	1.67	125	594106	376739	1.7
40	622209.084	398340.649	2.25	83	593238	424291	5.02	126	594166	377540	1.3
41	622518.547	398790.311	2.25	84	592346	425337	4.83				
42	622518.547	398790.311	1.75	85	591392	426721	0.25				
43	694586.554	467114.634	1	86	591735	422782	0.71				

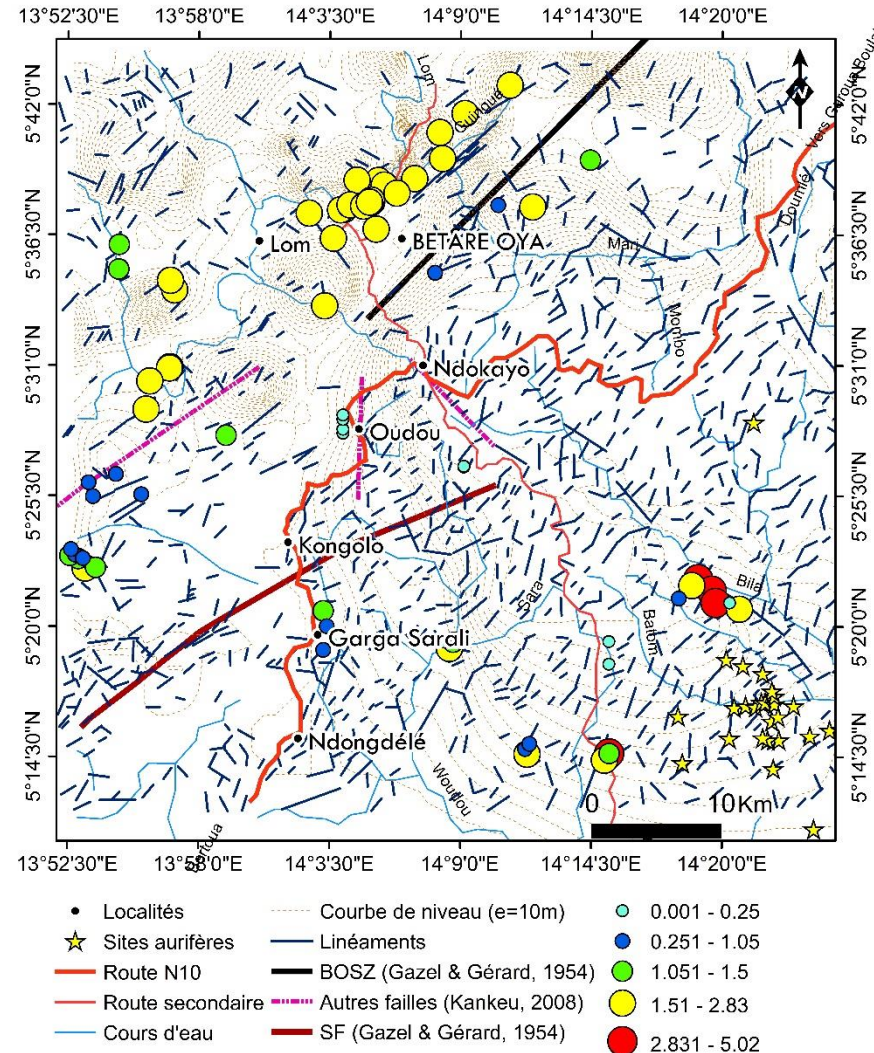
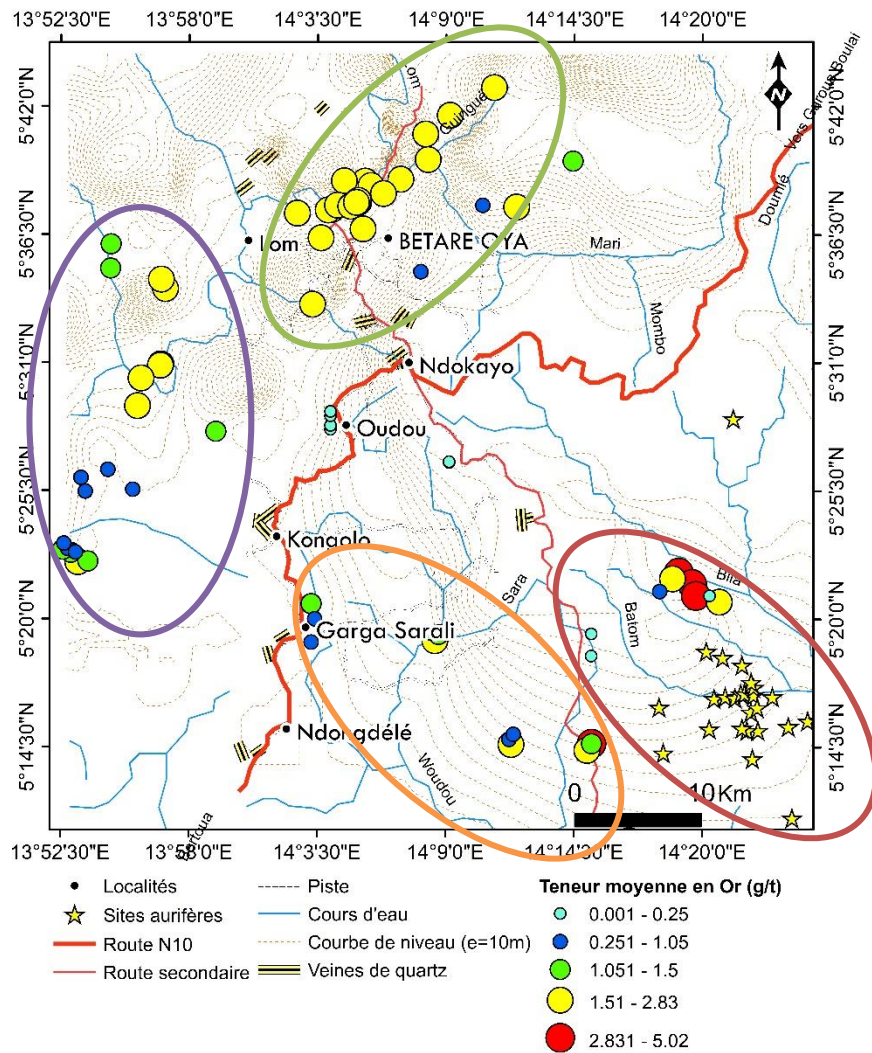


Figure 44: Cartes de distribution des teneurs des sites cartographiés de la zone Garga Sarali – Bétaré Oya.

L'analyse de la carte de distribution des teneurs des sites d'exploitation artisanale (fig. 44) montre une répartition des teneurs en or obtenue dans les sites d'exploitation cartographiés dans la zone d'étude. En effet, dans la partie nord et nord-ouest de Bétaré Oya où les sites sont les plus denses on a par ordre de prédominance des teneurs moyennes de 1.51 g/t à 2.83 g/t, de 1.051g/t à 1.5 g/t et de 0.251 g/t à 1.05 g/t. Ces teneurs suivent l'orientation NE-SW qui est celle de la faille de Bétaré Oya dont le cour d'eau Lom en est une signature structurale. A l'ouest du village Oudou où les sites suivent l'orientation du Lom dans la direction NW-SE et sont localisés au niveau des terrasses où des veines de quartz sont identifiées on a respectivement des teneurs moyennes de 1.51 g/t à 2.83 g/t, de 1.051 g/t à 1.5 g/t et 0.251 g/t à 1.05 g/t. Dans la partie SE de la zone d'étude où les sites suivent l'orientation des cours d'eau Bila et Batom de direction NW-SE et sont situés sur les terrasses où les manteaux d'altération sont exploités, on a des teneurs moyennes les plus importantes de 2.831 g/t à 5.02 g/t. On y trouve aussi les teneurs moyennes de 1.51 g/t à 2.83 g/t et faiblement celles de 0.251 g/t à 1.05 g/t. Autour du village Garga Sarali, les teneurs aurifères obtenues sont de trois (03) ordres, 0.251 g/t à 1.05 g/t, 1.051 g/t à 1.5 g/t, 1.51 g/t à 2.83 g/t et 2.831 g/t à 5.02 g/t. Les plus grandes teneurs correspondent aux minéralisations de type éluvionnaire.

La corrélation de ces résultats sur la carte structurale permet de mieux comprendre la relation entre les structures et les minéralisations aurifères (fig.45). Cinq (05) tendances de teneurs sont observées et disposées de façon préférentielle suivant les orientations structurales qui sont les signatures de fractures de type Riedel (fig.45).

- Les teneurs comprises entre 1,051 g/t et 2,83 g/t suivent les cours d'eau orientées NE-SW (fracture de type **P**), correspondant à la foliation régionale affectant les formations géologiques de la zone.
- Les teneurs comprises entre 0,251 g/t - 1,05 g/t et 1,05 g/t – 1,50 g/t sont rencontrées tant au niveau des éluvions qu'au niveau des cours d'eau orientés NW-SE. Cette orientation est celle concordante aux teneurs les plus importantes à savoir 2,831 g/t – 5,02 g/t, de type éluvionnaire, toutefois bordant les cours d'eau qui sont des signatures des fractures de type Riedel (**R'**) d'orientation NW-SE (Fig. 45).

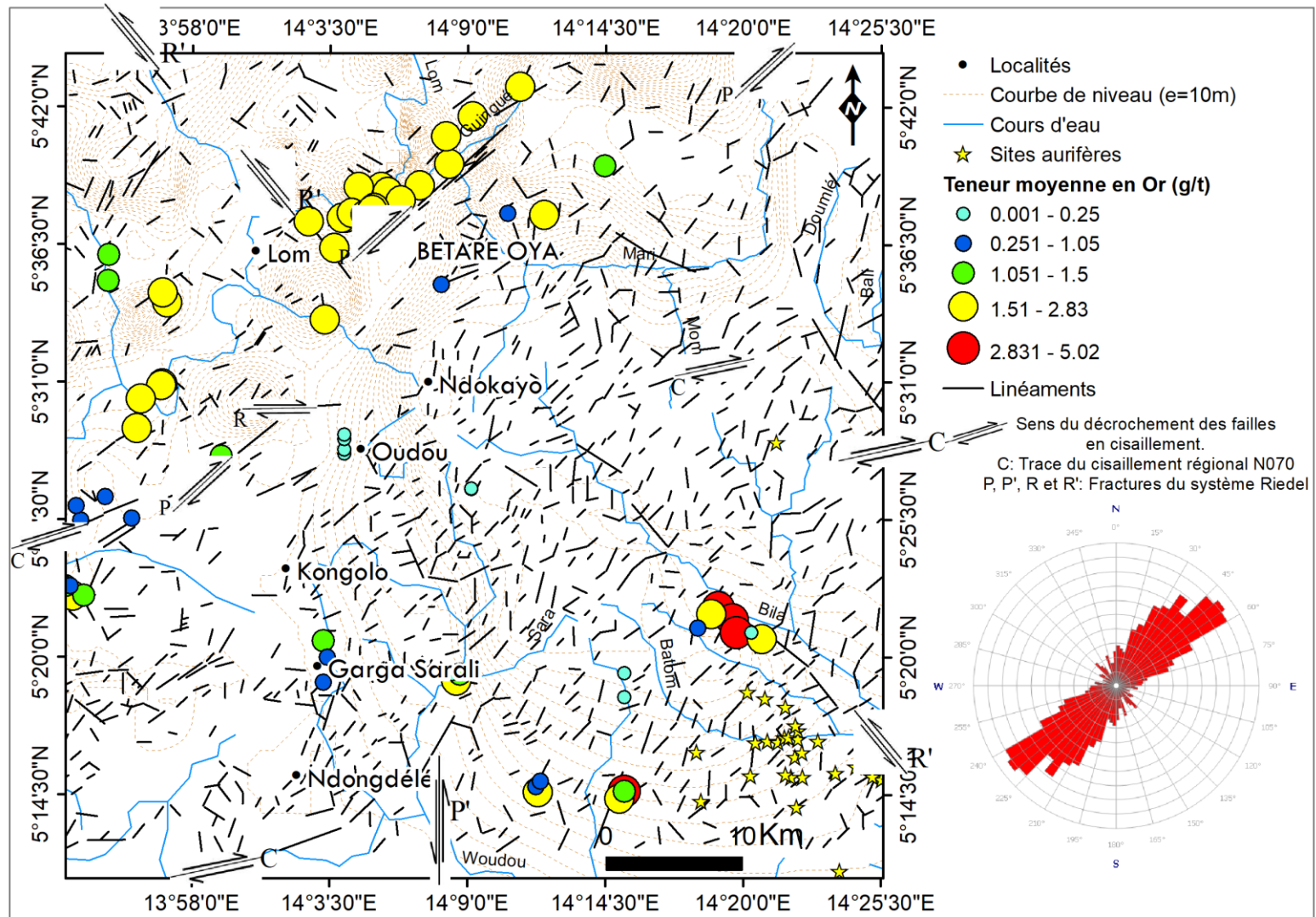


Figure 45: Carte des indices et teneurs des sites cartographiés de la zone Garga-Sarali – Bétaré Oya assortie des fractures du système de Reidel.

La corrélation entre l'évaluation des teneurs aurifères, la lithologie et les linéaments structuraux (figs.45, 46) de la zone met en relief :

- des métallotectes lithologiques :
 - La zone couverte par les formations schisteuses du Lom, les quartzites et les veines de quartz sont les types pétrographiques encore considérés comme des métallotectes lithologiques où la densité des sites d'exploitation artisanale aurifère est la plus importante ;
 - Les contacts entre les granites porphyroïdes et les granito gneiss constitueraient les zones de concentration préférentielle des minéralisations aurifères ;
- et les faits suivants :
 - Le réseau hydrographique de la zone d'étude est dendritique avec des orientations principales NE-SW, NW-SE, E-W et N-S. L'analyse des images satellites permet de considérer ce réseau hydrographique comme des signatures de fractures plus ou moins profondes ;
 - Les linéaments générés et les observations issues des levés structuraux sur le terrain permettent de situer les fractures dans un modèle de fractures Riedel qui constituent des éléments de compréhension du contrôle structurale des minéralisations ;
 - La cartographie des sites et l'évaluation des teneurs moyennes montre que les principaux flats ou berges des cours d'eau qui font l'objet des activités d'exploitation artisanale sont des fractures primaires ou structures métallogènes à travers desquelles les fluides riches en métaux ont circulé pour s'accumuler au sein des fractures secondaires ou structures métallotectes considérées comme étant des pièges à métaux.

Quatre zones prospectives se dégagent ainsi de la corrélation entre les résultats de l'évaluation des teneurs moyennes et les linéaments structuraux. Dans le cadre de cette étude, nous les avons nommés Prospect A, B, C et D (fig.47).

III.3.1 Prospect A

La carte du prospect A (fig 48) met en relief des éléments de contrôle structural. En effet, la cartographie des sites et l'évaluation des teneurs moyennes permet de constater que le cours d'eau Bila (fig.48) est la signature d'une fracture profonde qui est la structure métallogène. Les sites d'exploitation sont situés sur les structures orientées NE-SW à NNE-SSW qui sont des structures métallotectes ou structures pièges à métaux. Il peut donc être établi dans le prospect A que les structures qui contrôlent la minéralisation sont les zones d'intersection entre les structures métallogènes (NW-SE) et métallotectes (NE-SW à NNE-SSW).

III.3.2 Prospect B

La carte du prospect B (fig.49) met en relief des éléments de contrôle structural. En effet, la cartographie des sites et l'évaluation des teneurs moyennes permet de constater que les cours d'eau Lom et Guingé (fig.49) sont les signatures de fractures profondes qui sont les structures métallogènes NE-SW qui font l'objet d'une exploitation par dragage. Toutefois, on observe que sur les structures orientées NW-SE sont des structures métallotectes ou structures pièges à métaux. Il peut donc être établis dans le prospect B que les structures qui contrôlent la minéralisation sont les zones d'intersection entre les structures métallogènes (NE-SW) et métallotectes (NW-SE).

III.3.3 Prospect C

La carte du prospect C (fig.50) met en relief des éléments de contrôle structural. En effet, la cartographie des sites et l'évaluation des teneurs moyennes permet de constater que le cours d'eau Lom (fig.50) est la signature de fractures profondes qui sont les structures métallogènes d'orientation NE-SW et NNW-SSE qui font l'objet d'une exploitation par dragage. Toutefois, on observe que les sites d'exploitation sont situés sur les structures sécantes aux structures métallogènes. Il peut donc être établis dans le prospect C que les structures qui contrôlent la minéralisation sont les zones d'intersection entre les structures métallogènes (NE-SW et NNW-SSE) et métallotectes (NW-SE).

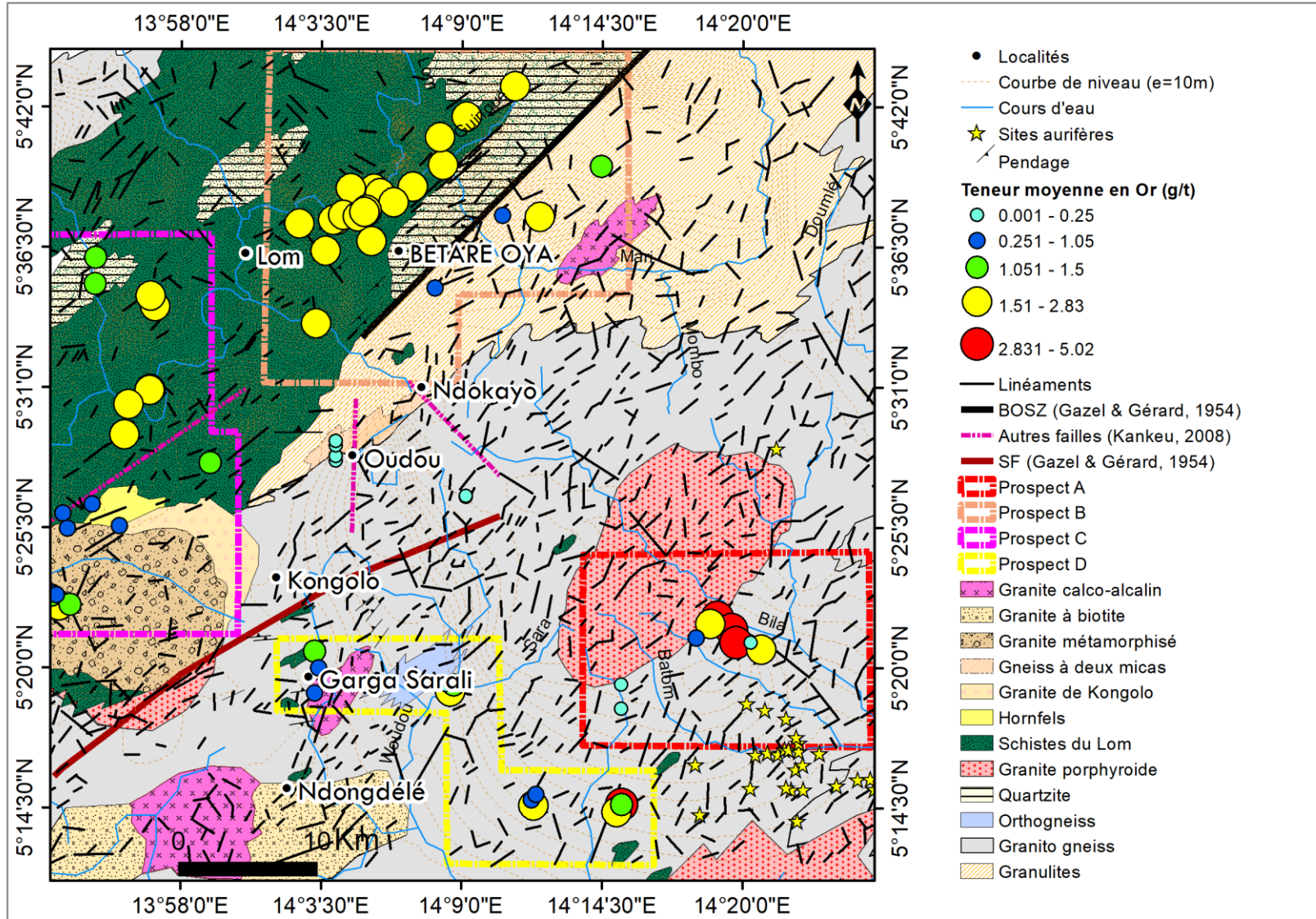


Figure 47 : Carte des prospects

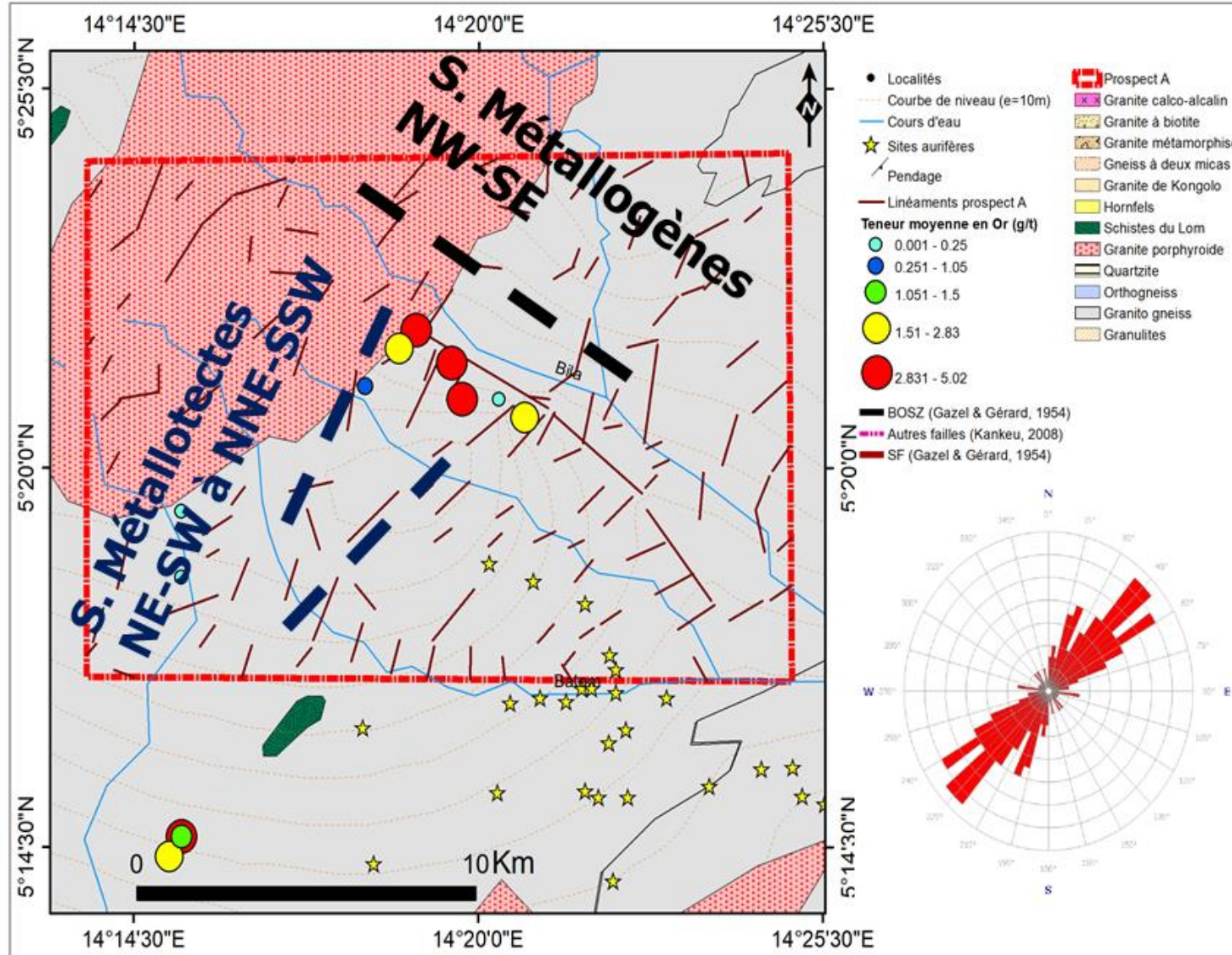


Figure 48 : Carte du prospect A

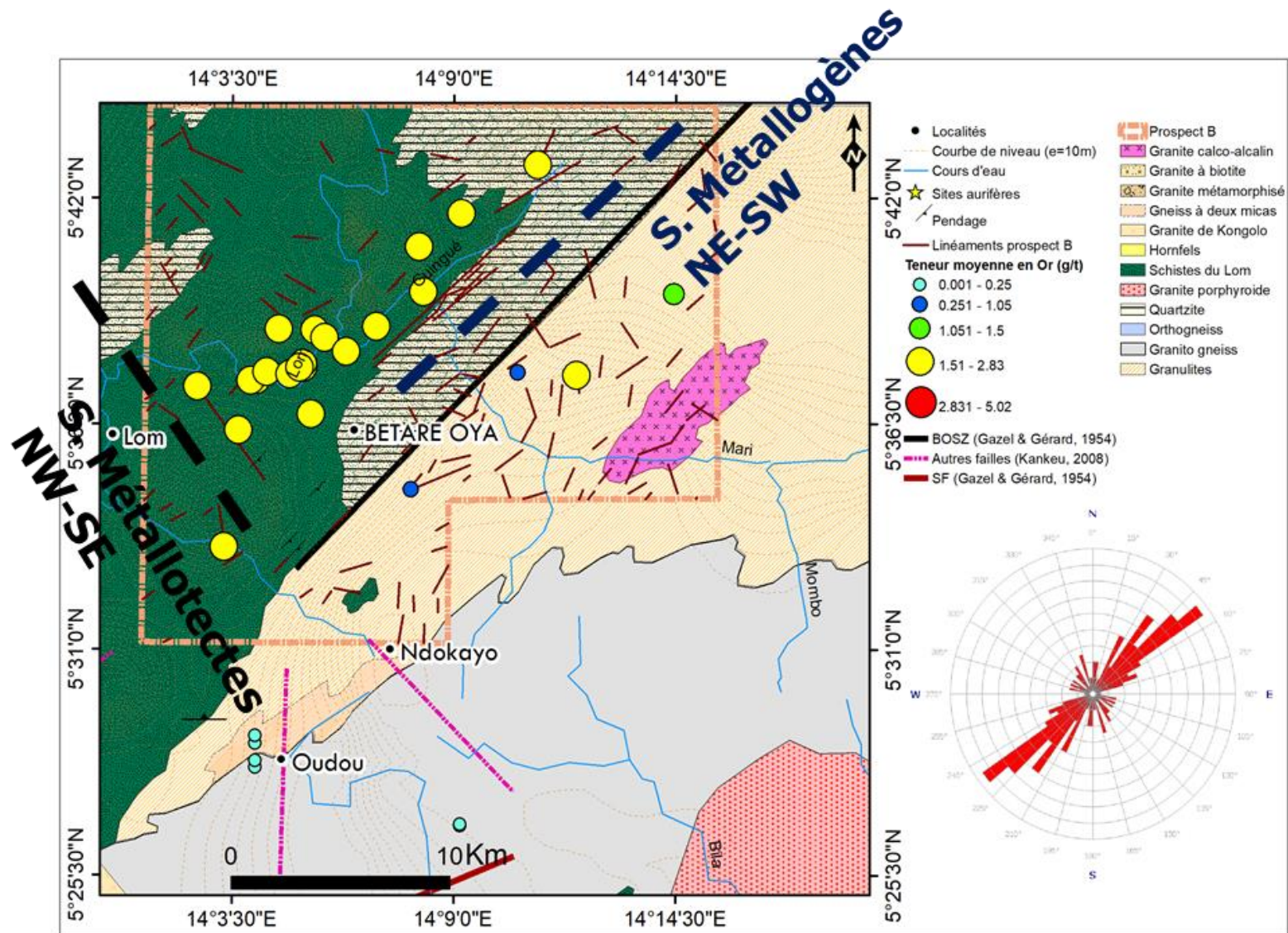


Figure 49 : Carte du prospect B

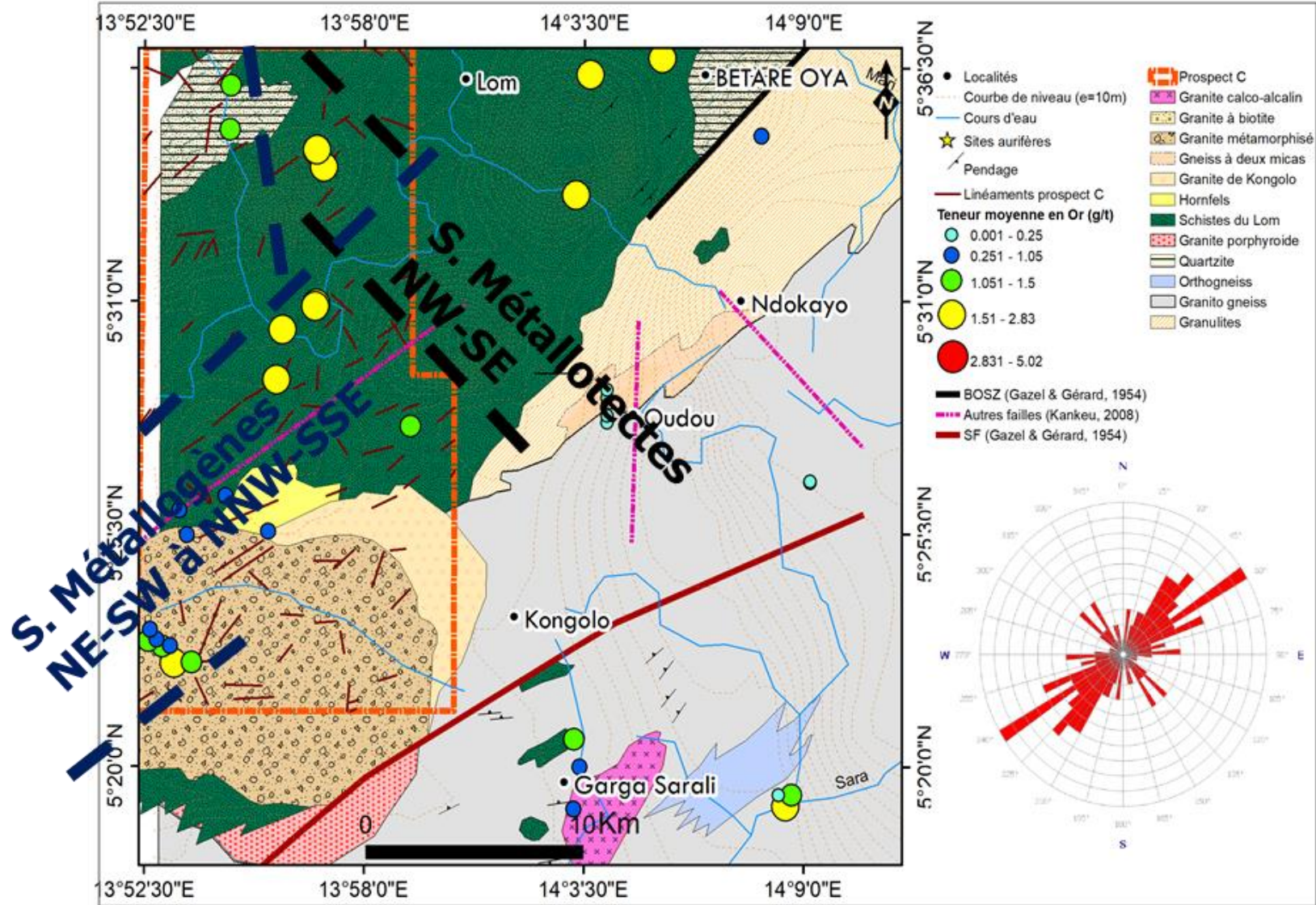


Figure 50 : Carte du prospect C

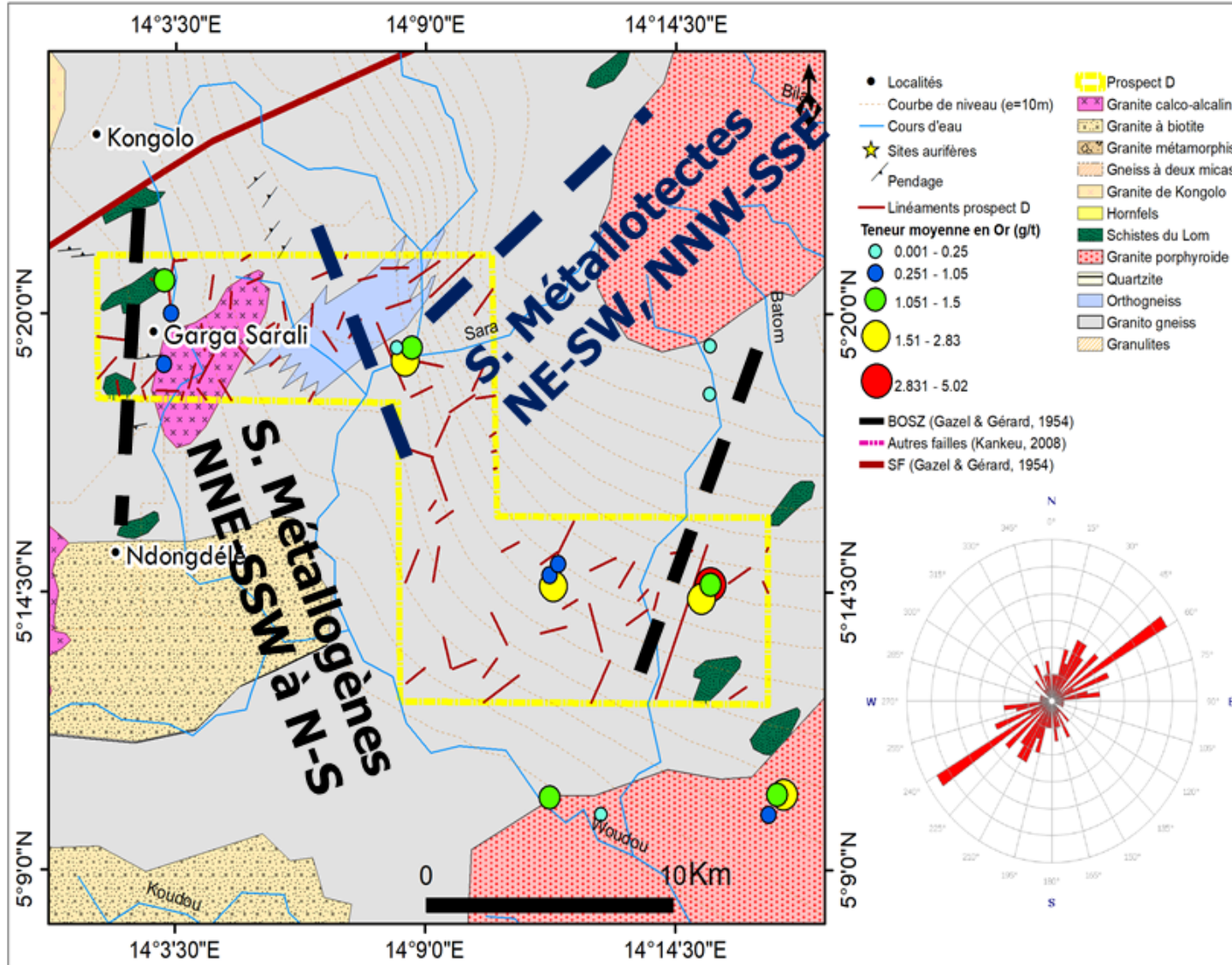


Figure 51 : Carte du prospect D

III.3.4 Prospect D

La carte du prospect D (fig 51) met en relief des éléments de contrôle structural. En effet, la cartographie des sites et l'évaluation des teneurs moyennes permet de constater que les cours d'eau (fig 51) sont les signatures de fractures profondes qui constituent les structures métallogènes d'orientation NNE-SSW à N-S. Les sites d'exploitation sont situés sur les structures orientées NE-SW à NNW-SSE et E-W qui sont des structures métallotectes ou structures pièges à métaux. Il peut donc être établi dans le prospect D que les structures qui contrôlent la minéralisation sont les zones d'intersection entre les structures métallogènes (NNE-SSW à N-S) et métallotectes (NE-SW à NNW-SSE et E-W).

Conclusion

En définitive, la cartographie des sites réalisée dans le cadre de cette étude a permis de mettre en relief la corrélation entre la tectonique, les indices aurifères et le réseau hydrographique. Cette architecture constitue une base fondamentale dans l'étude du contrôle structurale et la réalisation de cartes prédictives.

Dans la partie Nord qui couvre la zone de Garga Sarali – Bétaré Oya, on observe que les sites productifs sont concentrés le long des cours d'eau Lom et Guingé (NE-SW), Bila (NW-SE) et Sara (NNE-SSW à N-S) (fig.44). Cette observation permet d'établir que les cours d'eau seraient des signatures profondes de fractures voir des failles qui ont servi de structures métallogènes permettant aux fluides riches en métaux de circuler et de s'accumuler dans les fractures secondaires (métallotectes) qui leur sont sécantes. Toutefois, les teneurs les plus importantes (5,02 g/t) présentent une orientation NW-SE (fig.45). Ceci laisse à croire que les zones les plus productives suivent cette direction et témoigne d'une déformation tectonique ductilo-cassante.

IV. Sondages audiomagnétotelluriques dans la zone de Garga Sarali - Ndokayo

IV.1 Interprétation des résultats de la collecte des données audiomagnétotelluriques de la zone de Garga Sarali – Bétaré Oya

La prospection géophysique par audiomagnétotellurique a été réalisée afin de répondre à un constat selon lequel la zone Garga-Sarali – Ndokayo ne présentait pas une forte activité d'exploitation artisanale en surface avec néanmoins la présence de dalles de cuirasses fortement indurées de plus de 4 mètres de profondeurs. Cette prospection par AMT tend à travers la cartographie des formations de profondeur d'obtenir une imagerie du sous-sol dont l'interprétation permettra de comprendre la structuration interne et de mettre en relief des zones de discontinuités et d'anomalies ayant un intérêt métallogénique.

IV.1.1 Résultats de la prospections géophysique par AMT

L'interprétation des données issues de l'investigation AMT tensorielles vise la mise en évidence, par des techniques de visualisation adéquates, de la localisation des accidents structuraux exprimés par des discontinuités du champ électromagnétique. Ainsi, les données seront présentées pour analyse sous forme de pseudo-sections de résistivités apparentes, de phases et de sections géo électriques toutes obtenues à l'aide du logiciel surfer 10. C'est un logiciel de modélisation 2-D qui est utilisé dans la modélisation des données audiomagnétotelluriques (AMT), et permet de faire le lissage par la Méthode de Krigeage.

IV.1.2 Description des profils

Trois (03) profils de direction N120-N130 ([fig.52](#)), comportant respectivement 05 stations pour le profil Ndokayo, 07 stations pour le profil Garga Sarali et 04 stations pour le profil Oudou ont été réalisés ([Tab. 6](#)). De façon générale, le choix d'implantation de chaque point de sondage doit être fait en tenant compte des réalités du site à savoir : l'accessibilité, l'éloignement des infrastructures et activités humaines, la présence des indicateurs d'activités d'orpaillage et surtout la perpendicularité avec l'orientation structurale régionale. Dans le cas de la présente étude, le positionnement des stations et profils dans la zone spécifique de Garga Sarali – Ndokayo s'est justifiée par le fait qu'au moment de la cartographie des sites et évaluation des teneurs, cette zone ne présentait pas une activité assez intense comme observé dans les deux (02) principales zones où abondent les sites d'exploitation. Sachant que du point de vue géologique et tectonique la zone d'étude appartient au même environnement toutefois marqué par une rareté des affleurements et un fort couvert latéritique, il nous a semblé important de comprendre ce qui pouvait en être la cause. Une reconnaissance des environs des profils et points de sondage a permis de constater la présence d'importantes dalles de cuirasse fortement

indurées atteignant les 5 mètres de profondeurs ce qui du point de vue effort physique devient un obstacle majeur à la prolifération des sites d'exploitation. Connaitre à l'aide des sondages AMT le comportement interne de cette partie de la zone d'étude s'est trouvé comme une piste pouvant apporter des éléments nouveaux qui contribueraient à mieux établir les relations entre les déformations tectoniques et les minéralisations aurifères.

Le profil Ndokayo a une longueur d'environ 4090 m, le profil Garga Sarali a environ 7700 m tandis que le profil Oudou a une longueur d'environ 3200 m. La distance inter station est en moyenne de 1000 m pour le profil Ndokayo, de 1200 m pour le profil Garga Sarali et de 1000 m pour le profil Oudou (tab. 7).

Tableau 6: Distance entre les profils AMT.

N°	Nom du Profile	Nombre de stations	Espacement entre les stations (m)	Dist (km)
1	Ndokayo	05 (Nd1, Nd2, Nd3, Nd4)	Nd1 to Nd2=1040 m; Nd2 to Nd3=1010 m; Nd3 to Nd4=1010 m; Nd4 to Nd5=1030 m.	0
2	Oudou	04 (Oud1, Oud2, Oud3, Oud4)	Oud1 to Oud2=703 m; Oud2 to Oud3=1067 m; Oud3 to Oud4=1370 m.	7
3	Garga Sarali	07 (GS1, GS2, GS3, GS4, GS5, GS6, GS7)	GS1 to GS2=1040 m; GS2 to GS3=990 m; GS3 to GS4=1020 m; GS4 to GS5=1050 m; GS6 to GS7=2600m	9

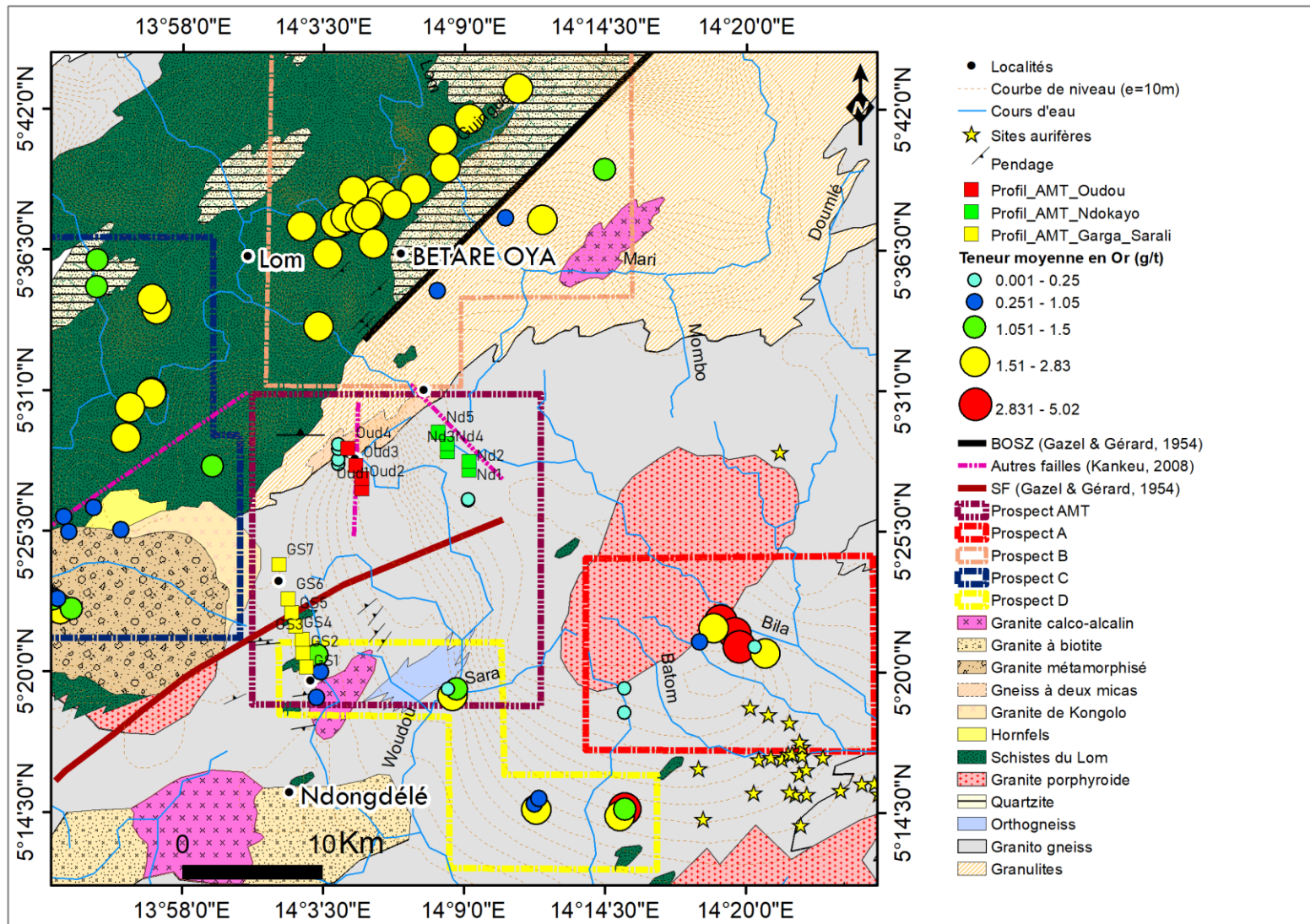


Figure 52: Carte de localisation des stations AMT sur fond géologique et minier.

Tableau 7: Localisation géographique des profils Ndokayo, Garga Sarali et Oudou.

Coordonnées géographiques des stations - Profil Ndokayo				
Stations	Longitude Est	Latitude Nord	Elévation (m)	Distance au prochain point(m)
1	14°09'39,6"	5°27'53,1"	930±3	0
2	14°09'12,2"	5°28'12,7"	935±3	1020
3	14°08'47,9"	5°28'35,0"	930±3	1020
4	14°08'21,3"	5°28'54,3"	934±3	1020
5	14°07'59,8"	5°29'20,8"	926±3	1000
<i>NB: Direction profil N120 - N130. Longueur profil~ 4090 m</i>				
Coordonnées géographiques des stations - Profil Garga Sarali				
Stations	Longitude Est	Latitude Nord	Elévation (m)	Distance au prochain point(m)
1	14°02'51,4"	5°20'09,8"	771±3	0
2	14°02'43,6"	5°20'42,6"	883±3	1000
3	14°02'42,3"	5°21'14,9"	874±3	1030
4	14°02'27,4"	5°21'45,4"	886±3	1400
5	14°02'17,0"	5°22'17,8"	880±3	1500
6	14°02'09,2"	5°22'49,2"	879±3	1200
7	14°01'47,3"	5°24'10,3"	769±3	1300
<i>NB: Direction profil N120 - N130. Longueur profil ~ 7700 m</i>				
Coordonnées géographiques des stations - Profil Oudou				
Stations	Longitude Est	Latitude Nord	Elévation (m)	Distance au prochain point(m)
1	14°05'10,5"	5°27'08,8"	900±3	0
2	14°05'01,8"	5°27'32,0"	889±3	1000
3	14°04'46,7"	5°28'03,1"	899±3	1063
4	14°04'28,1"	5°28'43,3"	859±3	1000
<i>NB: Direction profil N120 - N130. Longueur profil ~ 3200 m</i>				

IV.1.3 Traitement et interprétation des données AMT

IV.1.3.1 Traitement des données

Après avoir transformé les données temporelles enregistrées au domaine fréquentiel, les fonctions de transfert électromagnétiques à partir desquelles les résistivités apparentes et les phases peuvent être calculés en chaque site sont estimées. La résistivité apparente et la phase sont liées par la transformation de Hilbert (Bostick, 1977). La phase est proportionnelle à la pente de la courbe de résistivités apparentes dans un graphe bi logarithmique (Vozoff, 1991).

Des valeurs du champ électrique peuvent être estimées à partir des mesures du champ magnétique (Vozoff, 1991). La cohérence entre les valeurs du champ électrique prédites et celles mesurées est le rapport signal sur bruit. Ce rapport définit la qualité des données enregistrées. Les valeurs de la cohérence (figs.53 et 54) sont comprises entre 0 et 1 où 0,5 correspond à un niveau de signal égal au bruit.

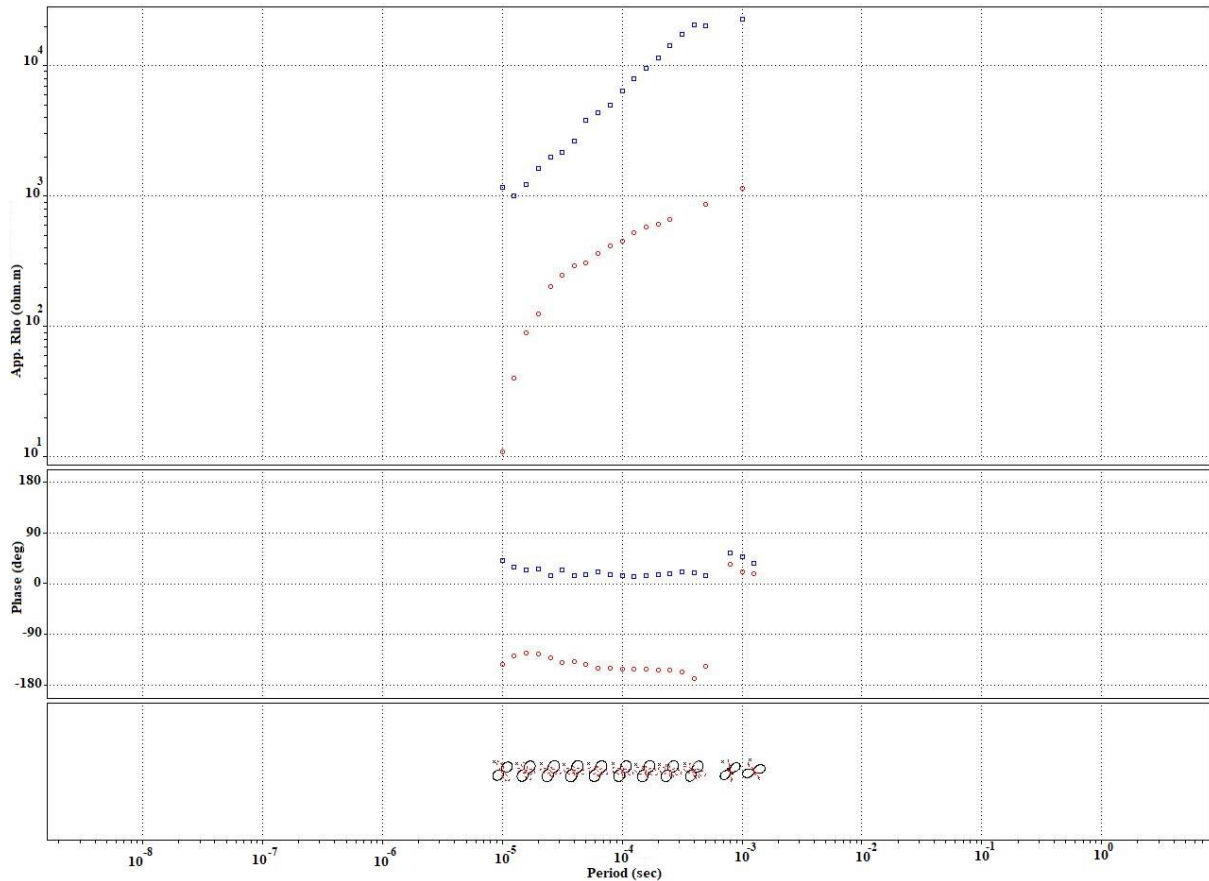


Figure 53: Tests de dimensionnalité (résistivité et phase) des stations oud4 du profil Oudou profile (b). [mode TE (o); mode TM (□)].

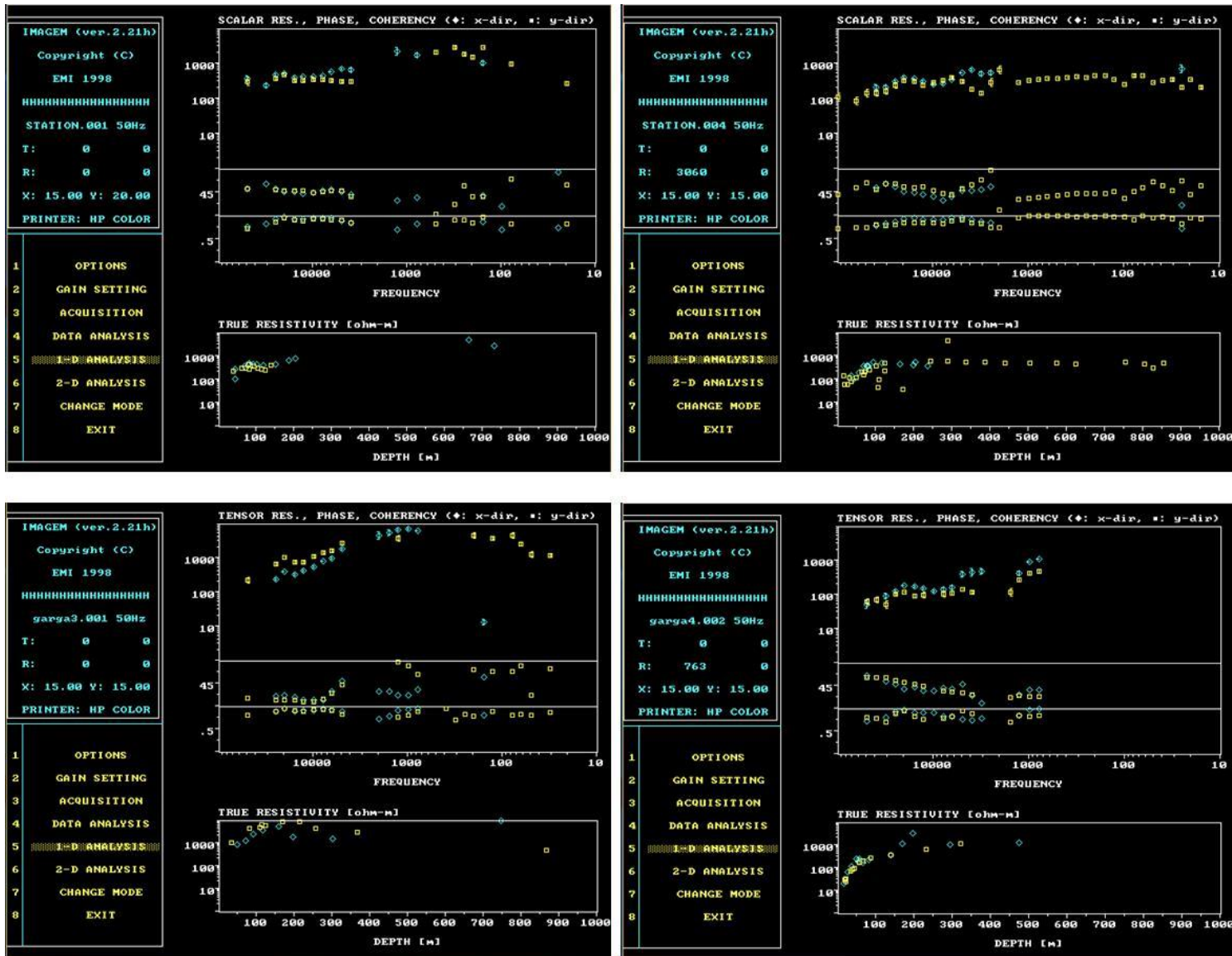


Figure 54: Courbes de résistivité, de phase, de cohérence et de la résistivité vraie pour un sondage test.

Le choix de la direction des profils et de l'implantation des stations a été fait sur la base des informations géologiques disponibles de la zone d'étude. A cet effet, l'orientation des lignes tectoniques majeures, ainsi que, les failles supposées observées dans la zone d'étude ont permis un choix de profils de manière à ce que la direction générale de l'ensemble des profils soit sécante aux lignes structurales sus-évoquées.

IV.1.3.2 Interprétation des profils de résistivité

a. Profil de résistivité Ndokayo

Les observations du profil de résistivité de Bostick (figs. 55 et 56) localisé dans la zone de Ndokayo permettent d'établir les faits suivants :

- Dans le domaine des **hautes fréquences** (proche surface), on observe une variation verticale et latérale en dents de scies de la résistivité qui permet d'identifier 04 terrains hétérogènes. De la station Nd1 à Nd3, on observe une augmentation de la résistivité. Cette progression chute brusquement au niveau de la station Nd4, marquant ainsi le passage à un niveau de faible résistivité. Ce changement brusque est assimilé à la présence d'une discontinuité électrique majeure au niveau de la station Nd4. La résistivité reprend une variation ascendante, ce qui témoigne du passage à un nouveau terrain de forte résistivité ;
- Dans le domaine des **basses fréquences** (profondeur), on observe une variation verticale et latérale de la résistivité en dents de scies. On peut distinguer aussi 04 principaux terrains formant un ensemble hétérogène et caractérisé par une chute de la résistivité de la station Nd1 à la station Nd2, marquant (1) le passage d'un ensemble très résistif vers un autre faiblement résistif et (2) la présence d'une discontinuité électrique au niveau de la station Nd2. La résistivité augmente ensuite de la station Nd2 à la station Nd3, témoignant le passage à un horizon de résistivité moyennement important pour chuter de façon considérable à nouveau au niveau de la station Nd4 marquant le passage à un terrain de faible résistivité et se stabiliser de la station Nd4 jusqu'à la station Nd5, montrant le passage à un niveau très conducteur.

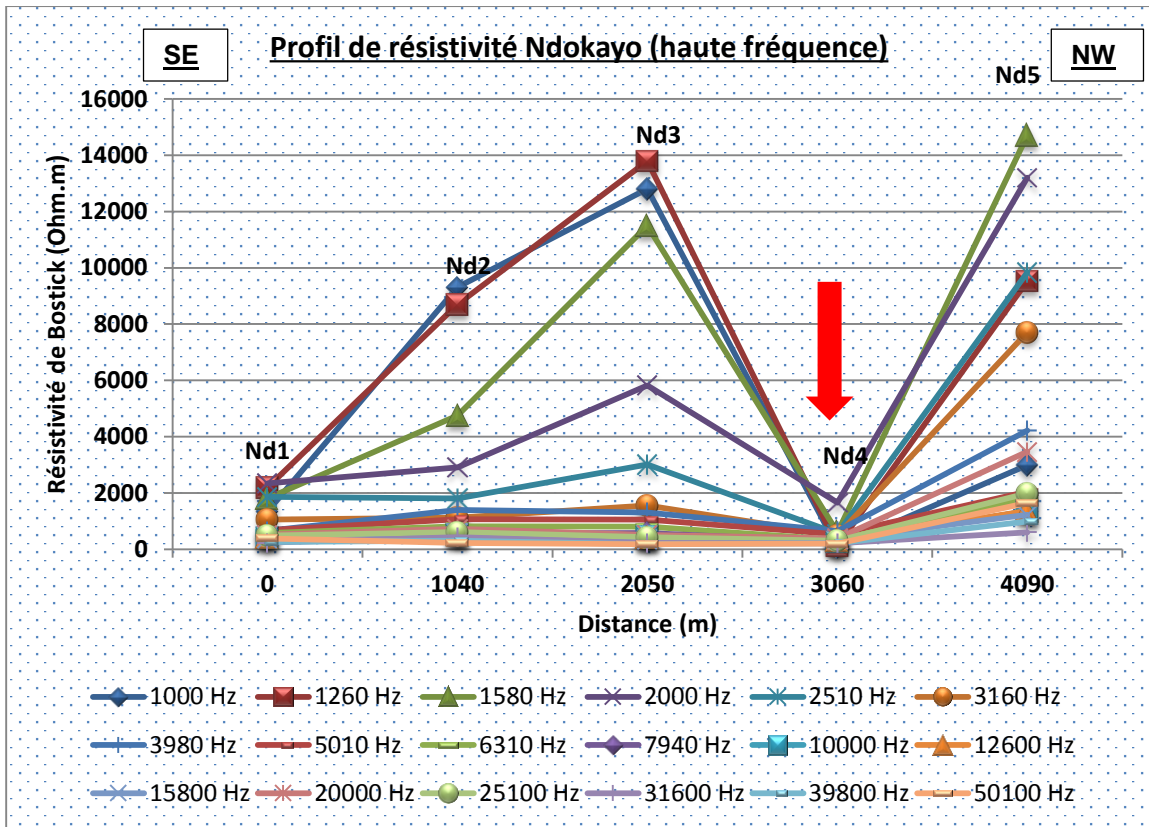


Figure 55: Profilage de résistivité de Bostick du profil Ndokayo dans le domaine des hautes fréquences (proche surface).

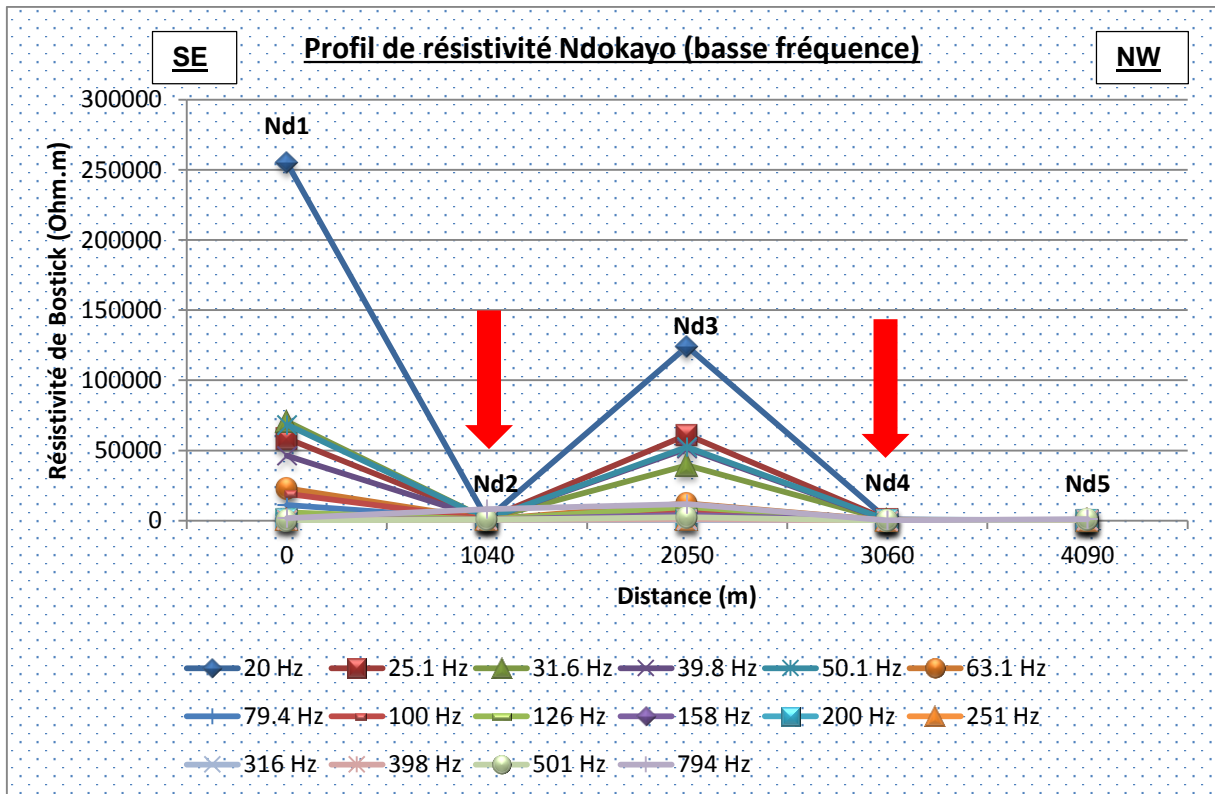


Figure 56: Profilage de résistivité de Bostick du profil Ndokayo dans le domaine des basses fréquences (profondeur).

En définitive, les observations qui découlent de l'interprétation des profils de résistivité Ndokayo dans les domaines des hautes et basses fréquences permettent d'identifier 02 principales zones de discontinuités respectivement au niveau de la station Nd2 dans le domaine des basses fréquences et de Nd4 dans le domaine des hautes fréquences. Partant du principe de l'horizontalité des terrains à l'état initiale, la forme en dents de scie de la variation de la résistivité souligne le caractère hétérogène de la zone qui suggère que les formations de la zone investiguée ont subi des déformations géologiques compressives d'où l'aspect de plissement observé.

b. Profil de résistivité Garga Sarali

Les observations du profil de résistivité de Bostick localisé dans la zone de Garga Sarali permettent d'établir les faits suivants (figs. 57 et 58) :

- Dans le domaine des hautes fréquences (proche surface), on observe aussi une variation verticale et latérale de la résistivité sous forme de dents de scies à travers 04 principaux terrains hétérogènes. On observe respectivement une variation décroissante de la résistivité entre la station GS1 et la station GS2, marquant le passage d'un niveau de forte résistivité vers un niveau de faible résistivité. Ensuite, on observe une variation assez faible de la résistivité entre les stations GS2 et GS6, caractérisant le passage du courant dans des niveaux assez homogènes. La résistivité augmente à nouveau pour atteindre des valeurs assez considérables jusqu'à la station GS7 témoignant la présence d'un nouveau terrain de forte résistivité. Les pics de variation observés respectivement au niveau des stations GS2 et GS6 marquent respectivement la présence des discontinuités électriques au niveau des stations GS2 et GS6.
- Dans le domaine des basses fréquences (profondeur), on observe aussi une variation verticale et latérale de la résistivité sous forme de dents scies à travers 04 principaux terrains hétérogènes avec les valeurs de résistivité apparente maximale l'ordre de 3000 Ohm.m, soulignant le caractère conducteur de la zone. On observe des faibles valeurs de résistivité de la station GS1 à la station GS5, marquant le passage du courant dans un ensemble de terrain de faible résistivité. Entre les stations GS2 et GS3, la résistivité semble s'annuler traduisant de ce fait la présence d'un noyau très conducteur qui serait une concentration de fluides, d'une nappe d'eau souterraine. A partir de la station GS3, la résistivité augmente de nouveau mais faiblement jusqu'à la station GS5 montrant le passage à un niveau de résistivité faible. La résistivité décroît ensuite jusqu'à la station GS6, démontrant le passage à un nouveau terrain conducteur pour augmenter de

nouveau et de façon significative présentant le passage d'un ensemble conducteur vers un ensemble résistif.

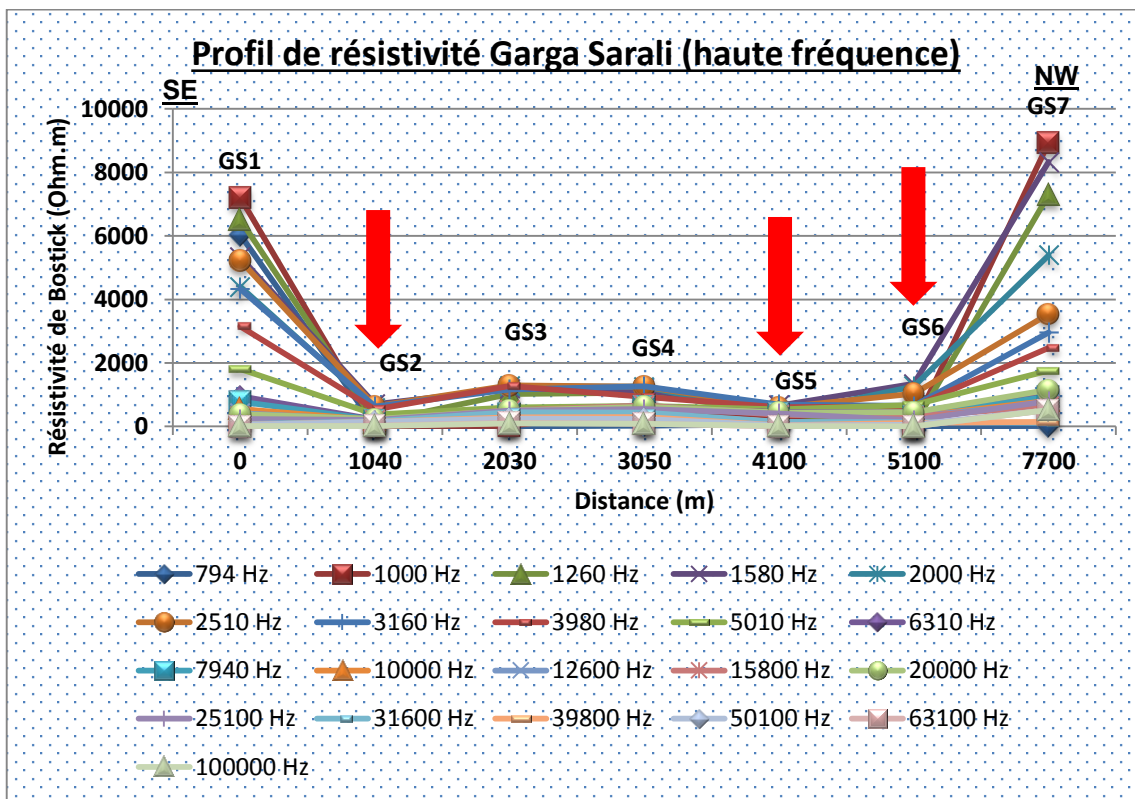


Figure 57: Profilage de résistivité de Bostick du profil Garga Sarali dans le domaine des hautes fréquences (proche surface).

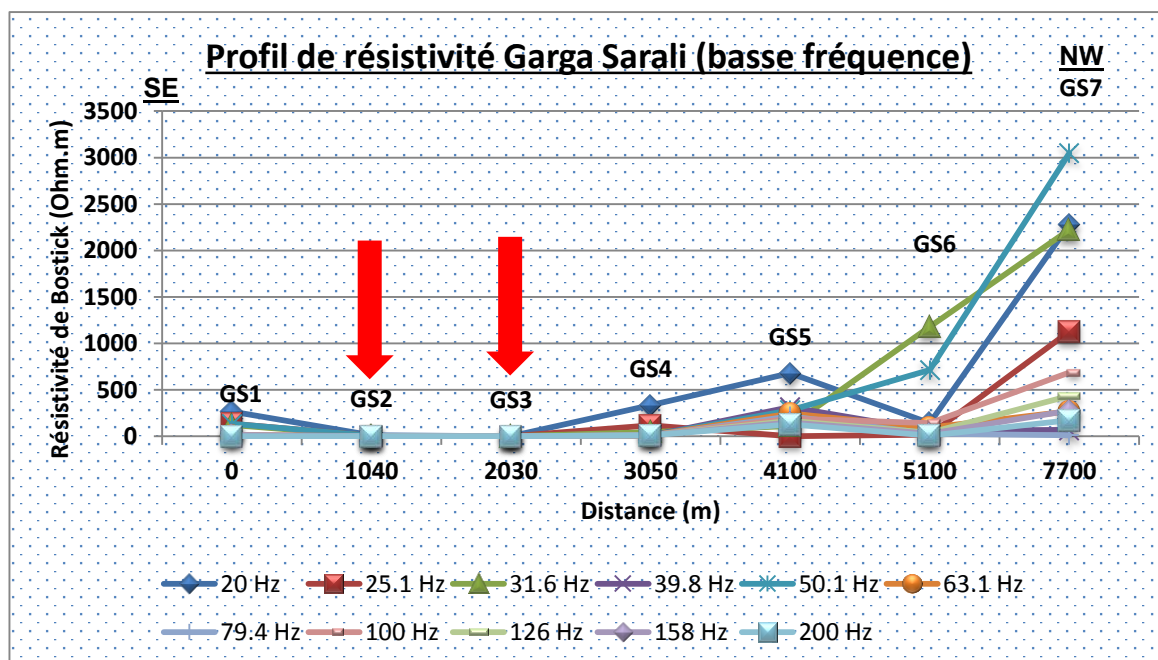


Figure 58: Profilage de résistivité de Bostick du profil Garga Sarali dans le domaine des basses fréquences (profondeur).

En définitive, l'observation des profils de résistivités dans les différents domaines met en évidence deux (02) principales discontinuités respectivement au niveau de la station GS2 et GS6 et une zone de concentration de fluides ou de nappes d'eau souterraine entre les stations GS2 et GS3 dans le domaine des basses fréquences. Aussi, on observe que le profil Garga Sarali est constitué de formations très conductives en profondeur, ce qui n'est pas le cas en surface. La forme en dents de scie de la variation de la résistivité souligne le caractère hétérogène de la zone qui suggère que les formations de la zone investiguée ont subi des déformations géologiques.

c. Profil de résistivité Oudou

Les observations du profil de résistivité de Bostick localisé dans la zone de Oudou permettent d'établir les faits suivants (figs. 59 et 60) :

- Dans le domaine des hautes fréquences (proche surface), on observe aussi une variation verticale et latérale de la résistivité sous forme de dents scies à travers quatre (04) principaux terrains hétérogènes. On observe d'une part, une variation décroissante de la résistivité entre la station Oud1 et Oud2. Cette variation traduit le passage d'un niveau de forte résistivité à un niveau de faible résistivité. Dans la suite, on a une remontée importante de la résistivité entre les stations Oud2 et Oud4, avec une légère variation entre la station Oud2 et la station Oud3 correspondant à un passage du courant dans un terrain moins résistif. Cette variation marque respectivement la présence d'une discontinuité électrique au niveau des stations Oud2.
- Dans le domaine des basses fréquences (profondeur), on observe aussi une variation verticale et latérale de la résistivité sous forme de dents scies à travers quatre (03) principaux terrains hétérogènes avec les valeurs de résistivité maximale l'ordre de 13000 Ohm.m, soulignant le caractère résistif de la zone. On observe une chute de la résistivité de la station Oud1 à la station Oud2. Cette chute marque le passage d'un terrain très résistif à un autre très conducteur. Ensuite, on a une remontée de de la résistivité de la station Oud2 à la station Oud3, traduisant le passage du courant dans un terrain plus résistif. Cette variation marque la présence d'une discontinuité électrique en Oud2. Les valeurs de la résistivité recommencent à chuter après la station Oud3 jusqu'à la station Oud4, marquant le passage à des formations de faibles valeurs de résistivité.

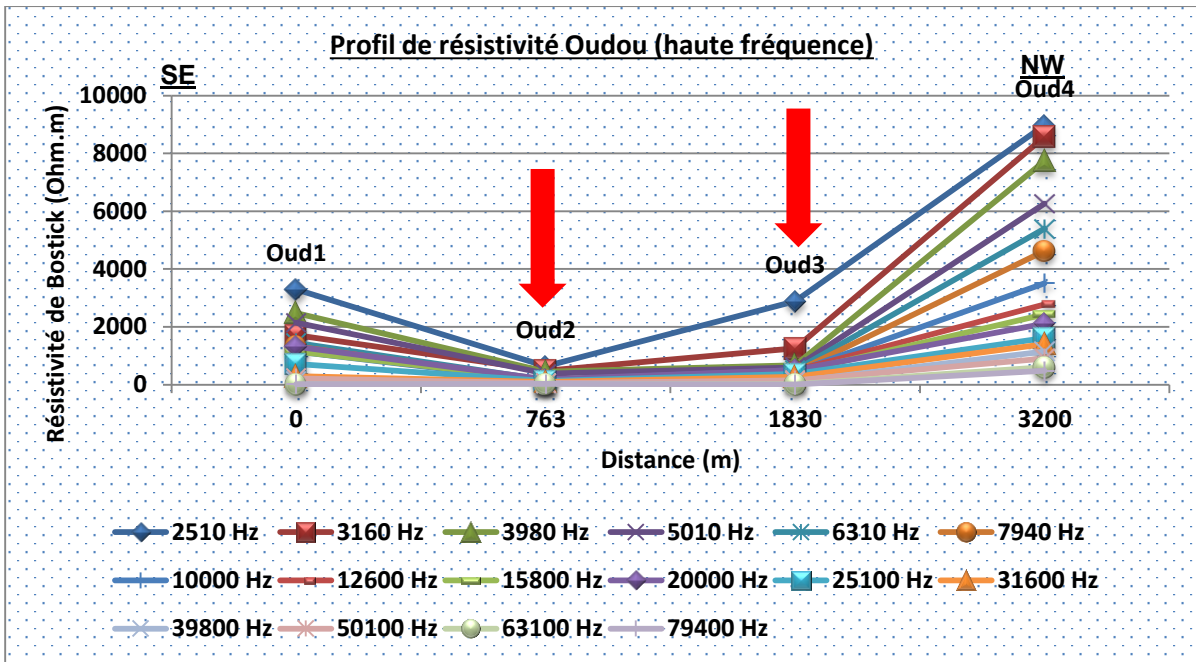


Figure 59: Profilage de résistivité de Bostick du profil Oudou dans le domaine des hautes fréquences (proche surface).

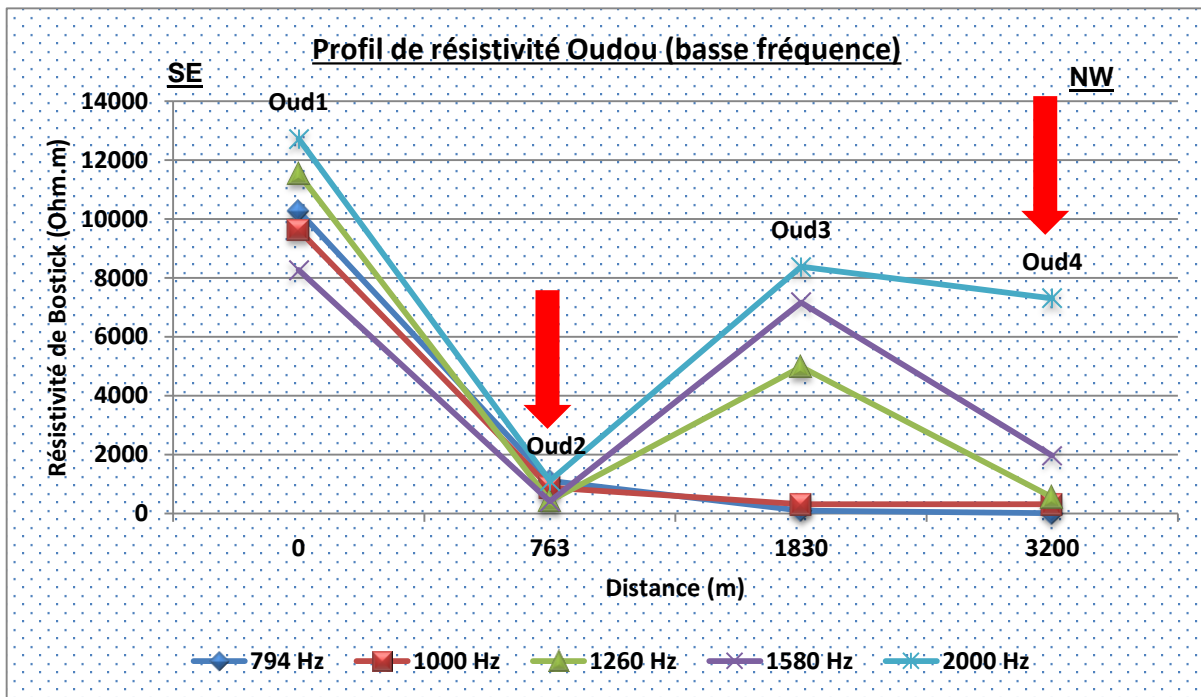


Figure 60: Profilage de résistivité de Bostick du profil Oudou dans le domaine des hautes fréquences (sub-surface).

En définitive, l'observation des profils de résistivités dans les différents domaines met en évidence une (01) discontinuité au niveau de la station Oud2 qui marque vraisemblablement la transition nette s'assimilant à un contact entre deux (02) ensembles géologiques de faciès hétérogènes. La forme en dents de scie de la variation de la résistivité souligne le caractère hétérogène de la zone qui suggère que les formations de la zone investiguée ont subi des déformations géologiques.

IV.1.3.3 Carte d'iso-résistivité apparente

La résistivité apparente peut donner une information qualitative sur les formations géologiques et leur variation au sein de la zone d'étude pour avoir une interprétation correcte des propriétés de sous-sol de ce terrain. A l'aide de logiciel de traitement SURFER, il a été possible de réaliser des cartes d'iso-valeurs des résistivités apparentes pour différentes fréquences. Notamment, dans les domaines des hautes fréquences (surface et sub-surface) et des basses fréquences (profondeur). Les cartes sont construites à partir de grille d'extrapolation par Krigeage avec variogramme linéaire.

Il est important de noter que, sur la zone étudiée, certains sondages n'ont pas été réalisés à la fréquence de 20 Hz (domaine de basse fréquence). Particulièrement, dans la zone d'Oudou. Ceci implique une extrapolation des variations de résistivités dans les domaines de 20 Hz à 200 Hz. Toutefois, l'observation de la variation de la résistivité dans les mêmes domaines au niveau de Garga Sarali et Ndokayo ont permis de balayer toute la zone d'étude et d'avoir un résultat réaliste.

a. Carte d'iso-résistivité apparente dans le domaine des basses fréquences (20 Hz – 200 Hz)

Les cartes de résistivité dressées pour les fréquences 20 Hz à 200 Hz, ont des caractéristiques semblables (figs. 61 à 65). Les formations situées au côté Est de Ndokayo sont les plus résistives avec une individualisation de noyaux résistifs aux isocontours assez resserrés, laissant transparaître des discontinuités entre les stations Nd1, Nd2, Nd3 et Nd4. L'orientation préférentielle des isocontours est sécante à la direction des profils audiomagnétotelluriques. Toutefois, on observe une prédominance de couches de faibles résistivités, ce qui entraîne un contraste au vu de la profondeur d'investigation mais aussi renseigne sur le caractère et l'intensité de la déformation qui aurait eu lieu dans la zone d'étude. Notamment la collision entre le Craton du Congo et le Panafricain.

b. Carte d'iso-résistivité apparente à 794 Hz

La carte de résistivité dressée à 794 Hz (fig. 66) marque le passage du domaine des basses fréquences au domaine des hautes fréquences. On observe la présence d'une couche résistive ($Rho \sim 10000 \text{ ohm.m}$) dans la partie centrale de la zone d'étude, avec une accentuation au niveau d'Oudou et de Ndokayo. Les isocontours sont assez resserrés et permettent d'identifier une discontinuité entre les stations Oud1 et Oud2.

c. Carte d'iso-résistivité apparente dans le domaine des hautes fréquences (794Hz – 51000 Hz)

Les cartes de résistivité dressées pour les fréquences de 794 Hz à 51000 Hz, ont des caractéristiques semblables (figs. 66 à 70). Elles présentent une certaine hétérogénéité avec des formations faiblement résistives au niveau du profil Ndokayo, un noyau aussi conducteur entre les stations Oud2 et Oud3 et entre les stations GS2 et GS6. Ces formations peu résistives occupent plus de 2/3 de la zone et sont situées au contact des autres formations résistives qui occupent la partie NW de la zone d'étude, avec une discontinuité entre les stations Oud3 et Oud4. Aussi, on observe qu'au fur et à mesure que la fréquence augmente, les formations résistives sont rencontrées et semblent occuper la majeure partie de la zone d'étude.

En définitive, l'analyse des cartes de résistivité apparentes dans les domaines de hautes et basses fréquences permet de mettre en évidence les faits suivants : (1) la zone d'étude est constituée d'un mélange de formations résistives et conductives à des profondeurs assez importantes ; (2) les formations peu résistives sont rencontrées plus en profondeur ; (3) les formes des isocontours de résistivité sont serrées et mettent en évidence des discontinuités assez profondes.

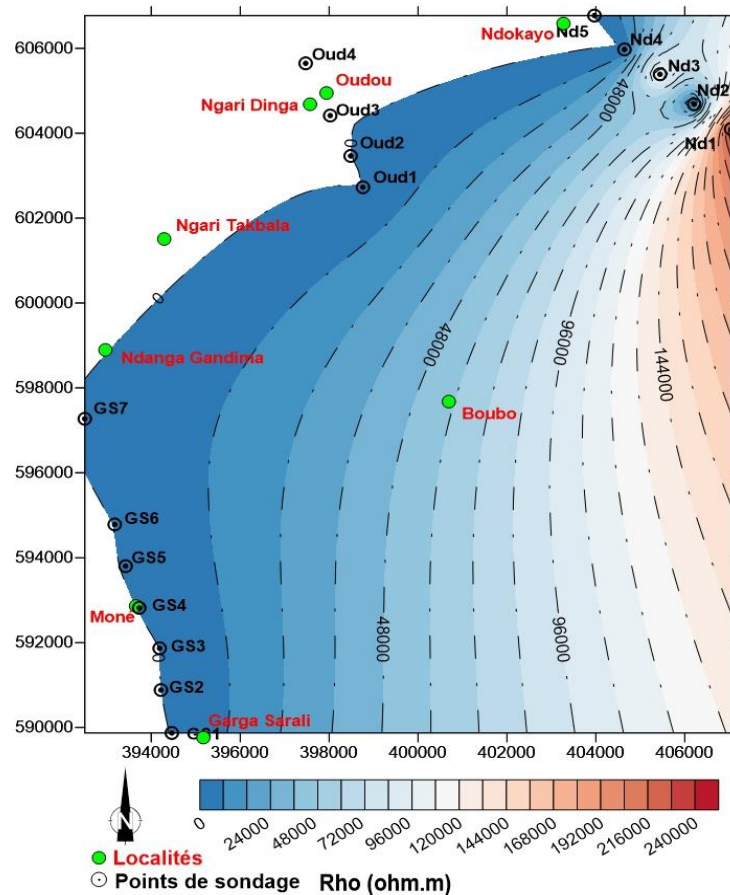


Figure 61: Carte de résistivité apparente à 20 Hz.

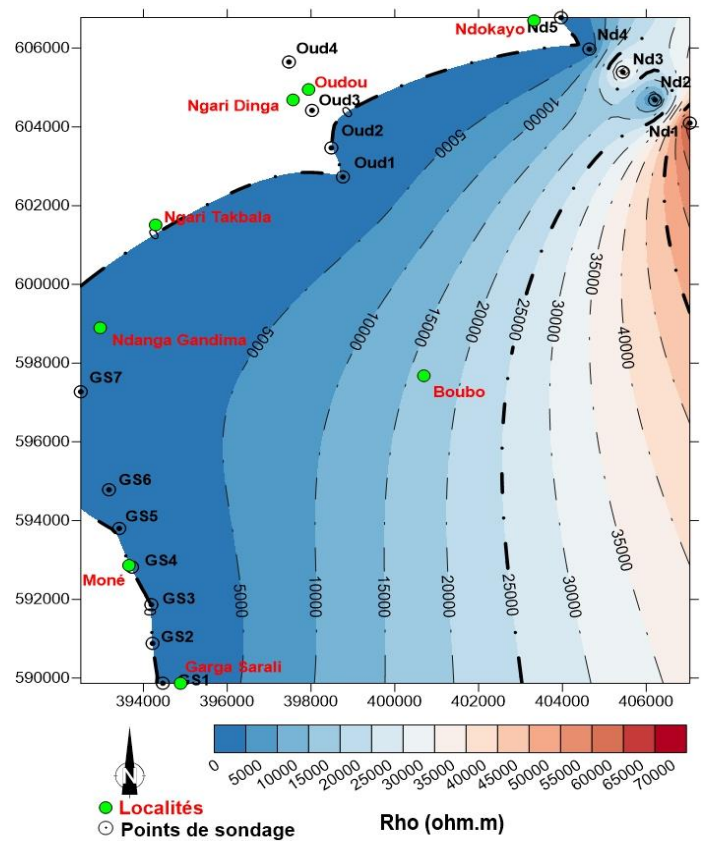


Figure 62: Carte de résistivité apparente à 31.6 Hz.

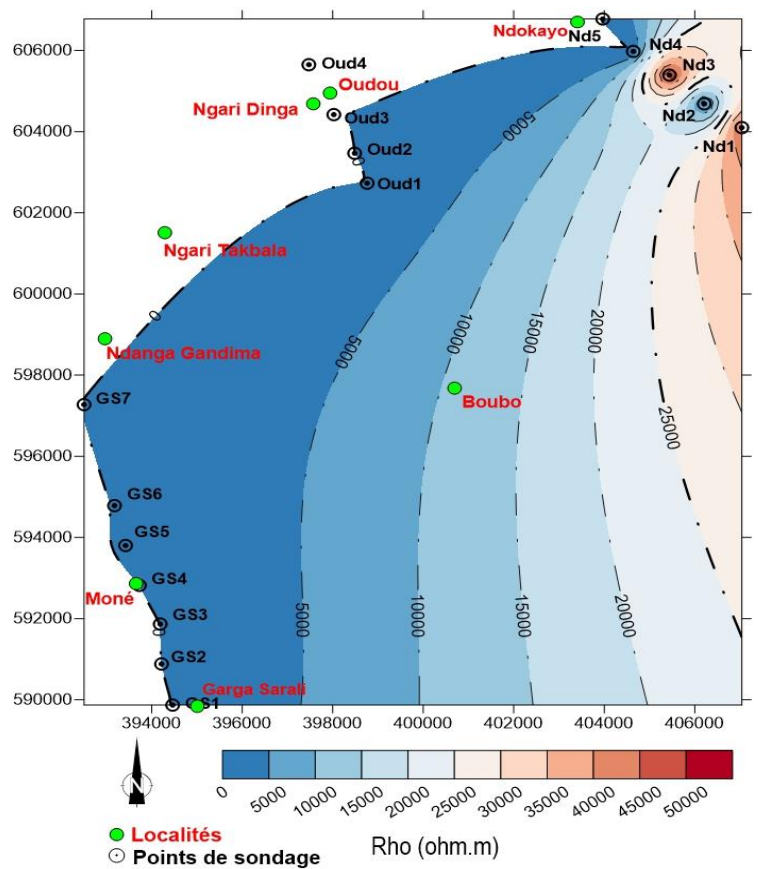


Figure 63: Carte de résistivité apparente à 39.8 Hz.

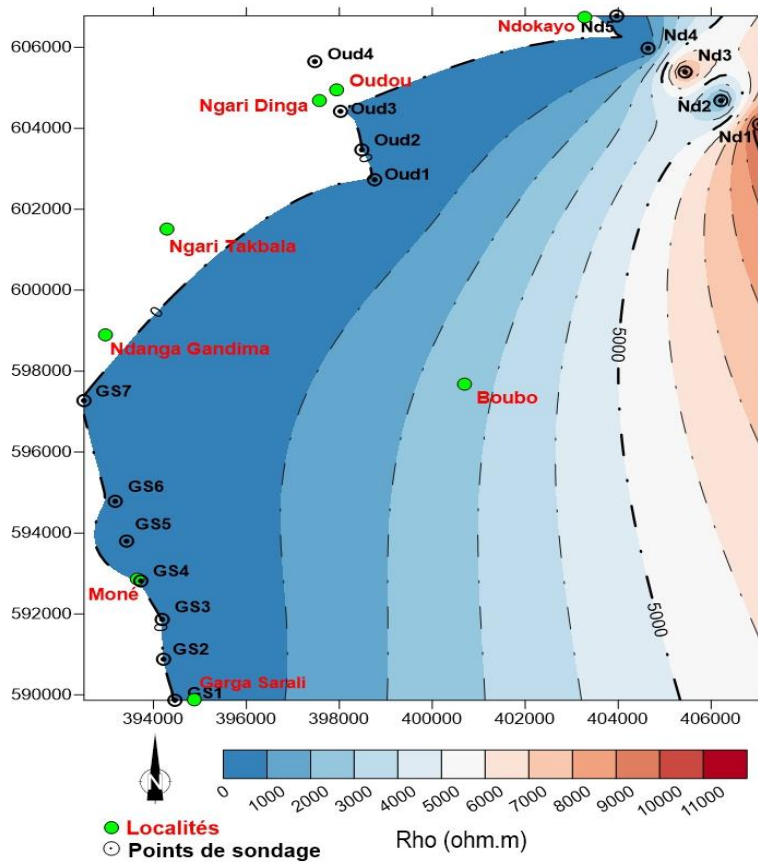


Figure 64: Carte de résistivité apparente à 79.4 Hz.

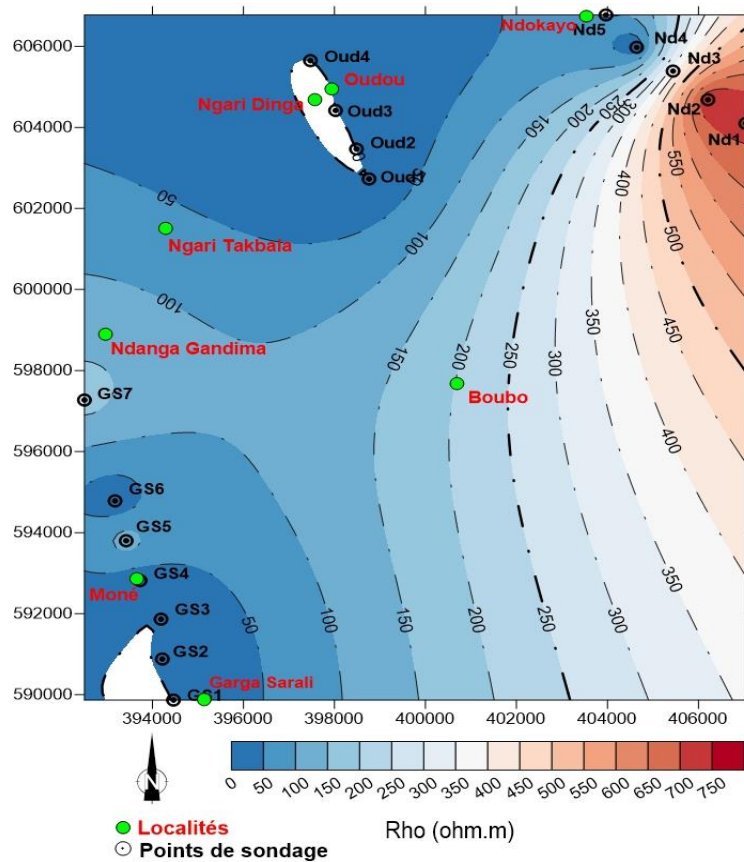


Figure 65: Carte de résistivité apparente à 200 Hz.

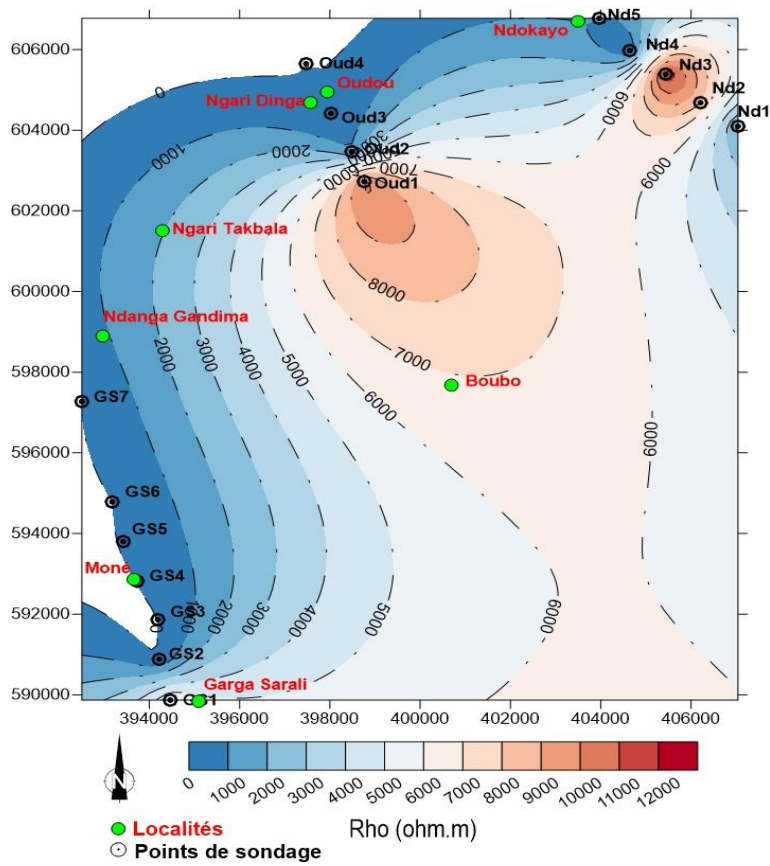


Figure 66: Carte de résistivité apparente à 794 Hz.

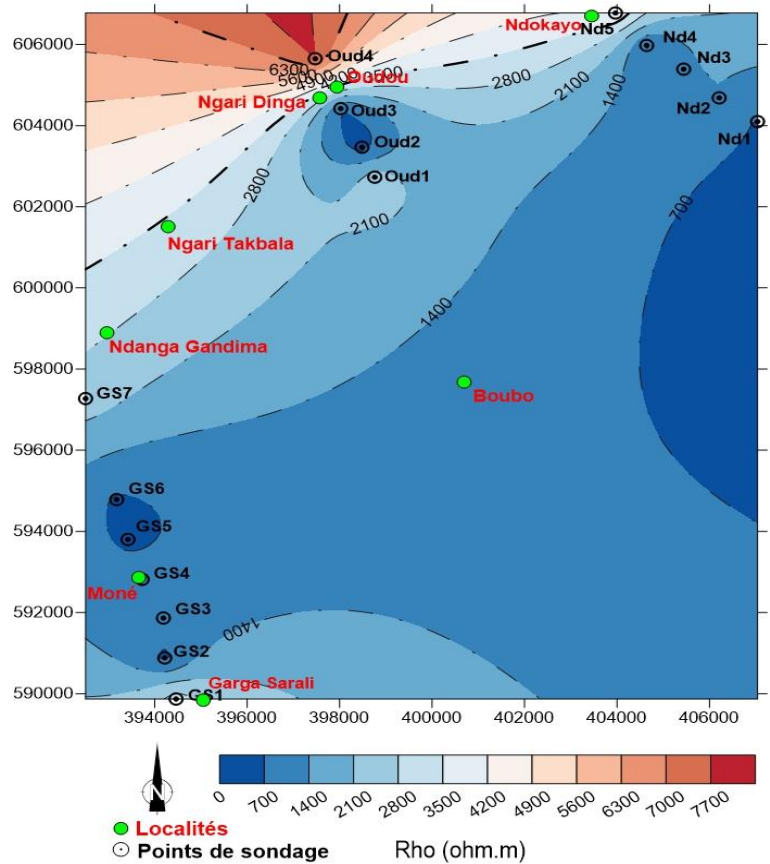


Figure 67: Carte de résistivité apparente à 3980 Hz.

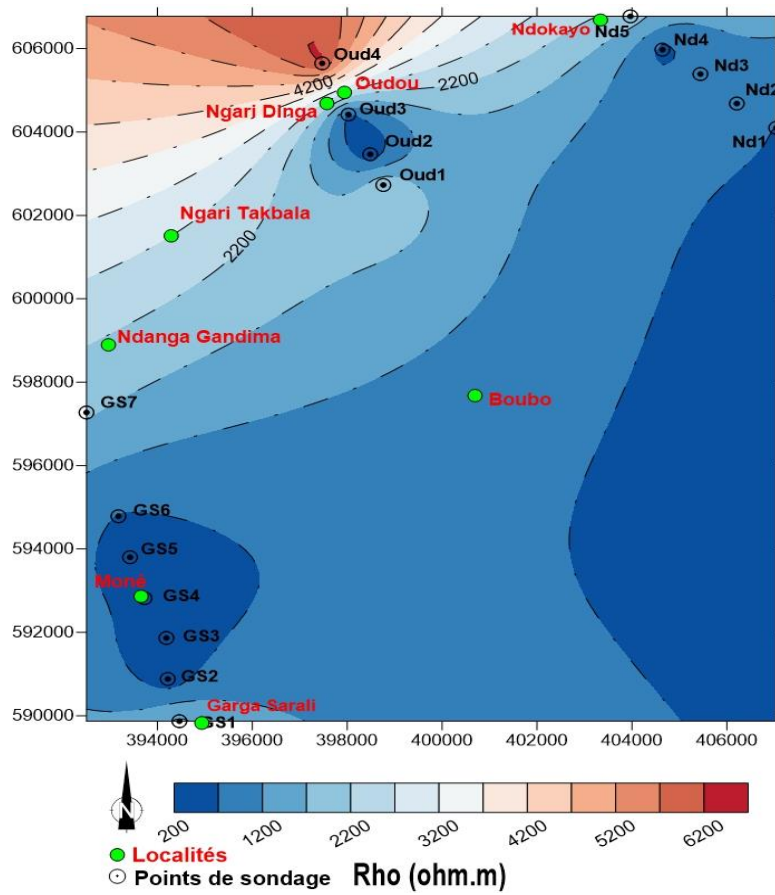


Figure 68: Carte de résistivité apparente à 5100 Hz.

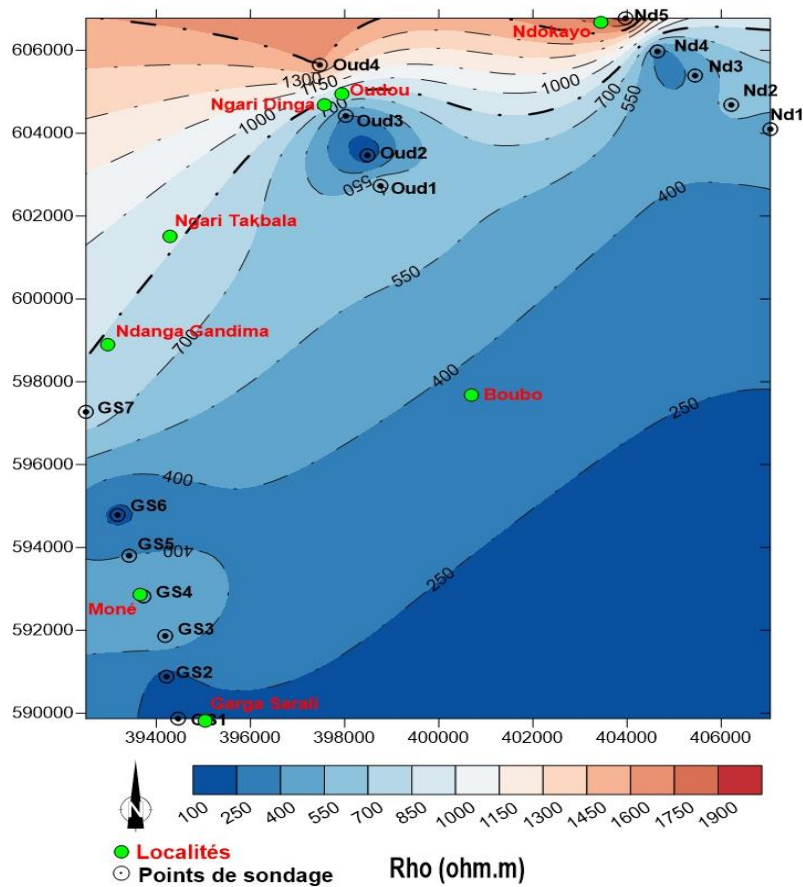


Figure 69: Carte de résistivité apparente à 25100 Hz.

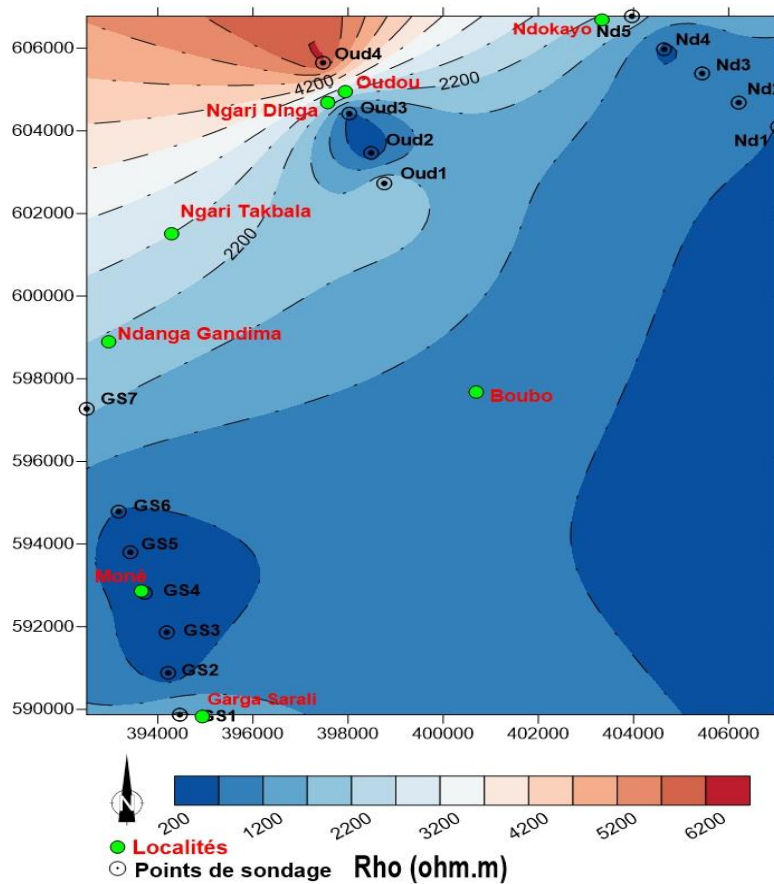


Figure 70: Carte de résistivité apparente à 51000 Hz.

IV.1.3.4 Pseudo-section de résistivité et de phase

Les pseudo-sections permettent une visualisation qualitative des variations latérales et verticales des résistivités et des phases. Aussi, elles aident à l'identification des discontinuités électriques majeures à l'exemple des failles qui se caractérisent par des courbes iso-quantitatives sub-verticales à verticales, et un gradient latéral élevé.

A. Profil Ndokayo

A.1 Pseudo-section de résistivité apparente

La pseudo-section de résistivité apparente (fig. 71) confirme les observations faites avec les profils de résistivités et présente trois (03) zones d'anomalies géoélectriques. On observe partant de la surface vers la profondeur :

- une première zone conductrice à moyennement conductrice s'étendant latéralement dans le domaine des hautes fréquences de la station Nd1 à environ 500 m après la station Nd4. Les contours d'iso-résistivités présentent des formes ondulatoires à pentages horizontaux (Nd1 à Nd4) et sub-verticaux après la station Nd4, marquant la transition avec la deuxième zone ;
- une deuxième zone moyennement conductrice à résistive qui s'étend du domaine de hautes fréquences au domaine de basses fréquences et dans laquelle s'incruste un couloir résistif

discontinu au niveau de la station Nd4 et qui réapparaît au niveau de la station Nd5. Cette zone repose en profondeur au niveau de la station Nd5 sur une couche très conductrice, de forme concentrique avec des contours d'iso-résistivités très serrées, sub-verticaux à verticaux ;

- une zone fortement résistive, située dans le domaine des basses fréquences et qui semble remonter sous forme d'intrusion verticale au niveau de la station Nd2 et Nd3. Les contours sont concentriques et verticaux.

A.2 Pseudo-section de phase

Tout comme la pseudo-section de résistivité, la pseudo-section de phase (fig. 72) présente de la surface vers la profondeur des isophases plus ou moins concentriques avec des formes irrégulières, qui s'entrecroisent prouvent d'un plissement avec broyage en profondeur. La station Nd4 se situerait sur un couloir tectonique cassant dont les indications montreraient qu'il s'agit d'une faille verticale.

On observe en général trois zones :

- La première zone observée en proche surface au niveau de la station Nd1, présente la même physionomie que, la première zone de la pseudo-section de résistivité apparente marquée par des isophases de forme similaire entre la station Nd3 et la station Nd4 avec des pendages de 55° ;
- La deuxième zone d'isophases présente la même physionomie avec des valeurs moyennes de pendage d'environ 45° . Elle est affectée par un couloir d'isophases concentriques et de formes irrégulières (de valeur de phase faible comprise entre 0 et 20°) en forme de nœud papillon qui présente des pendages sub verticaux à verticaux. Notamment, entre les stations Nd1 et Nd3 sur plus de 2000 m de distance en partant des moyennes profondeurs vers les profondeurs les plus grandes ;
- La troisième zone qui est une reprise en profondeur de la première zone respectivement au niveau de la station Nd1, Nd3 et Nd5 avec des valeurs d'isophases supérieures à 55° .

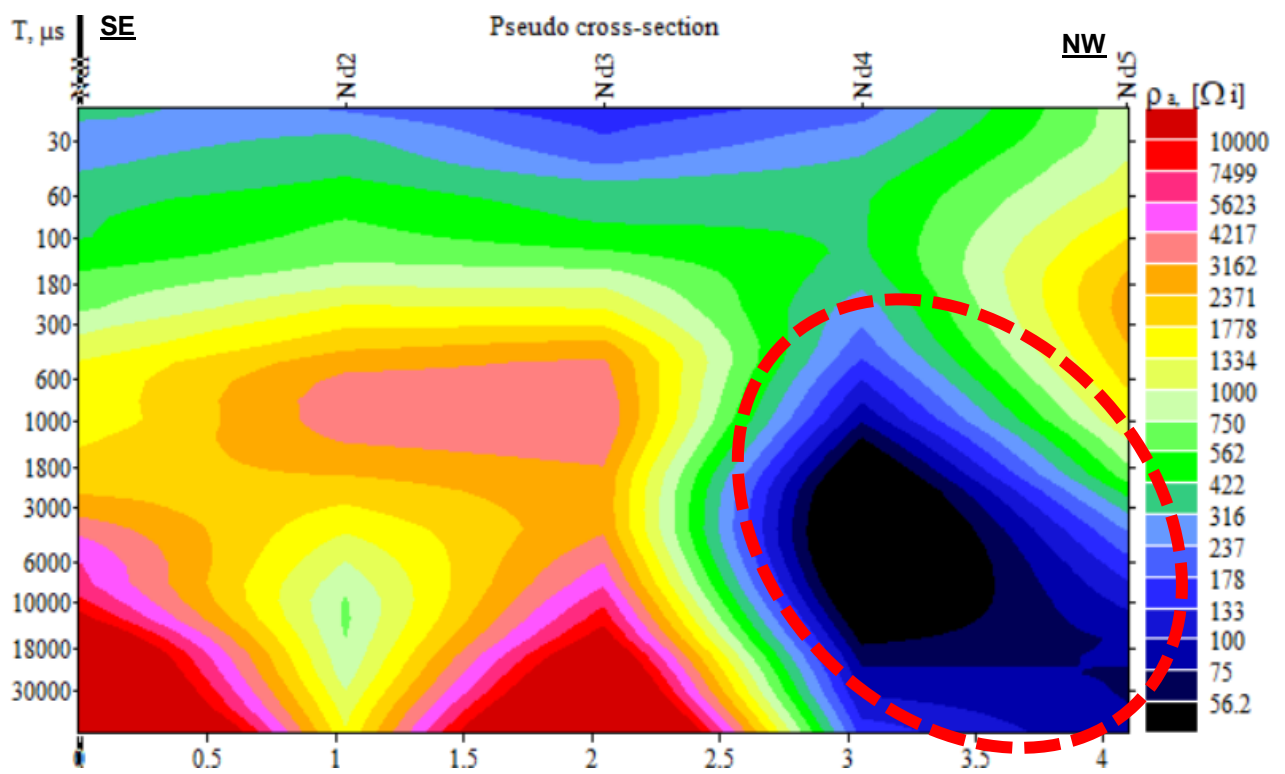


Figure 71: Pseudo-section de résistivité apparente du profil Ndokayo.

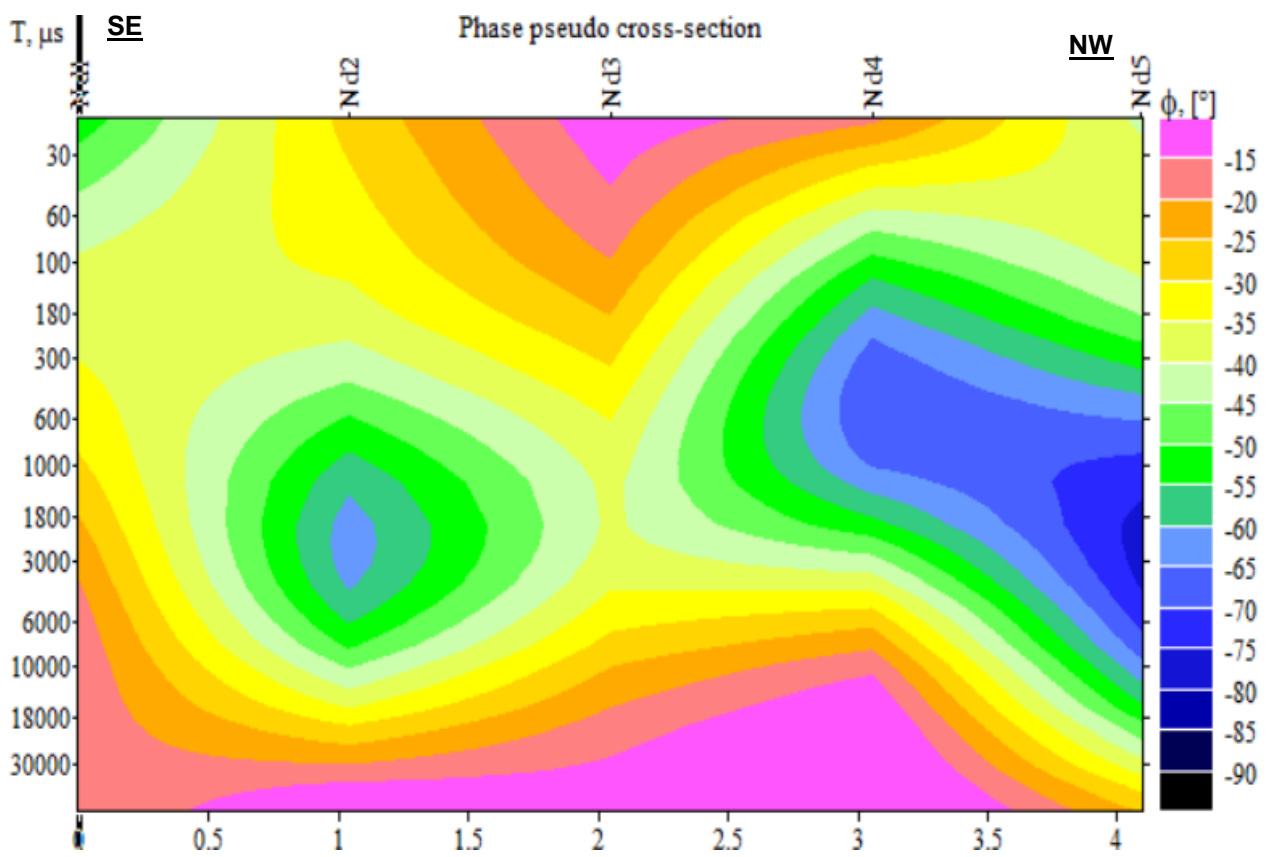


Figure 72: Pseudo-section et de phase du profil Ndokayo.

A.3 Courbe de sondages

Les courbes de sondage caractérisent la variation de la résistivité apparente à la verticale d'une station de mesures. L'interprétation qui en découle permet de déterminer le nombre de terrains du sous-sol ainsi que les résistivités et les épaisseurs de chacun d'eux.

La représentation des courbes de sondage qui se fait à l'aide des logiciels d'inversion présente en abscisses, les différentes valeurs des fréquences et en ordonnées, les valeurs correspondantes de la résistivité apparente.

A.4 Courbe de sondage du profil Ndokayo

▪ Sondage à la station Nd1

Selon l'allure de la courbe (fig. 73), le sondage électrique réalisé au niveau de la station Nd1 fait ressortir un modèle de sous-sol à quatre (04) couches de terrains. La résistivité augmente du premier terrain jusqu'au troisième terrain avant de décroître au quatrième terrain. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater que deux (02) terrains de résistivité apparente (ρ_a) ≥ 10000 ohm.m sont encadrés par deux (02) couches conductives de résistivité inférieure à 500 ohm.m.

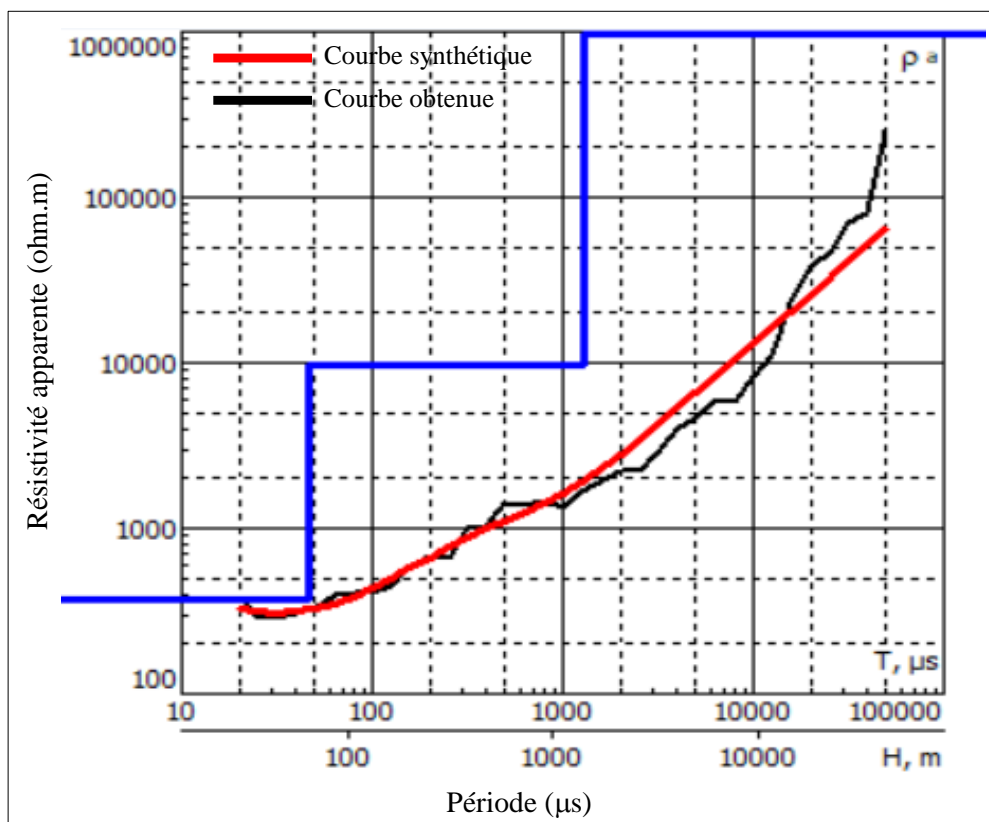


Figure 73: Courbes de sondage à 4 couches (station Nd1).

- **Sondage à la station Nd2**

Selon l'allure de la courbe (fig. 74), le sondage électrique réalisé au niveau de la station Nd2 fait ressortir un modèle de sous-sol à quatre (04) couches. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater une alternance répétitive entre un terrain très conducteur suivi d'un terrain de forte résistivité apparente.

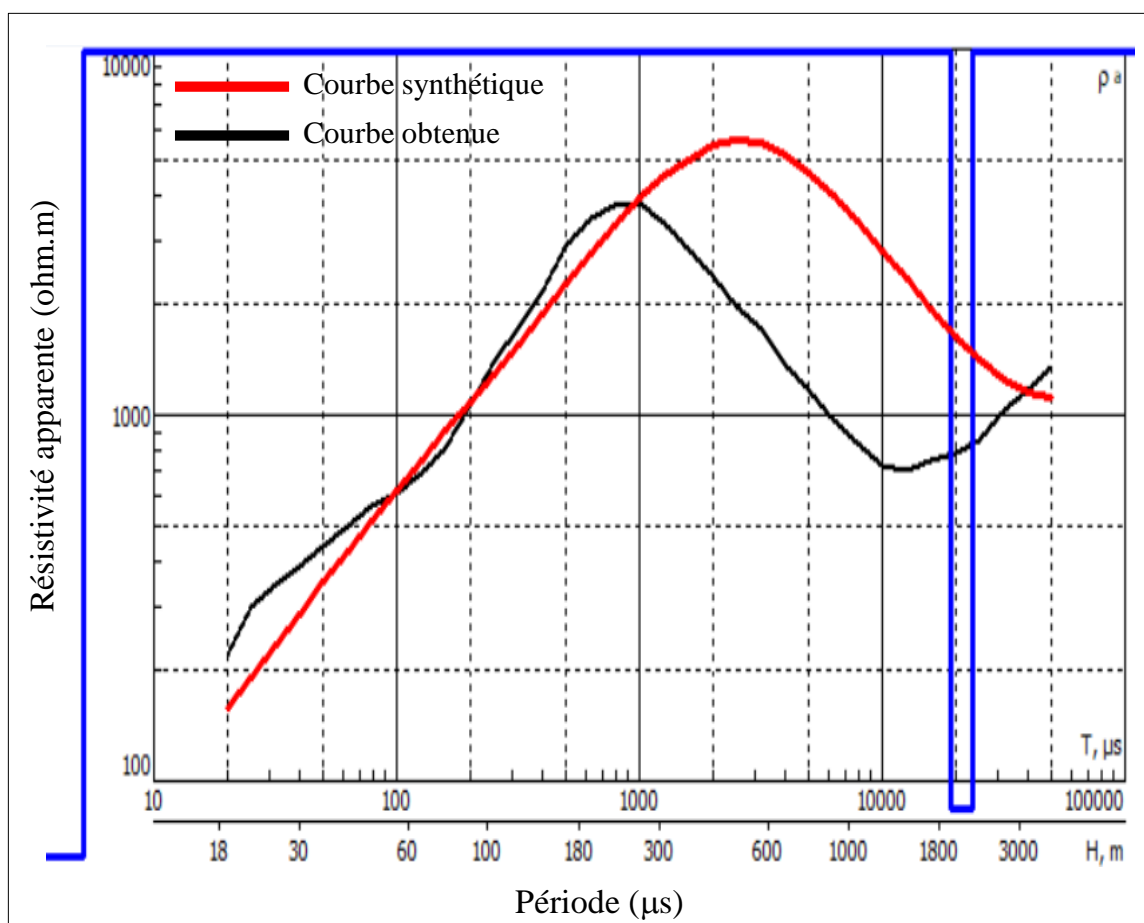


Figure 74: Courbes de sondage 0 4 couches (station Nd2).

- **Sondage à la station Nd3**

Selon l'allure de la courbe (fig. 75), le sondage électrique réalisé au niveau de la station Nd3 fait ressortir un modèle de sous-sol à quatre (04) couches superposées. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater qu'elle augmente avec la profondeur partant d'une première couche moins résistive à deux autres plus résistives.

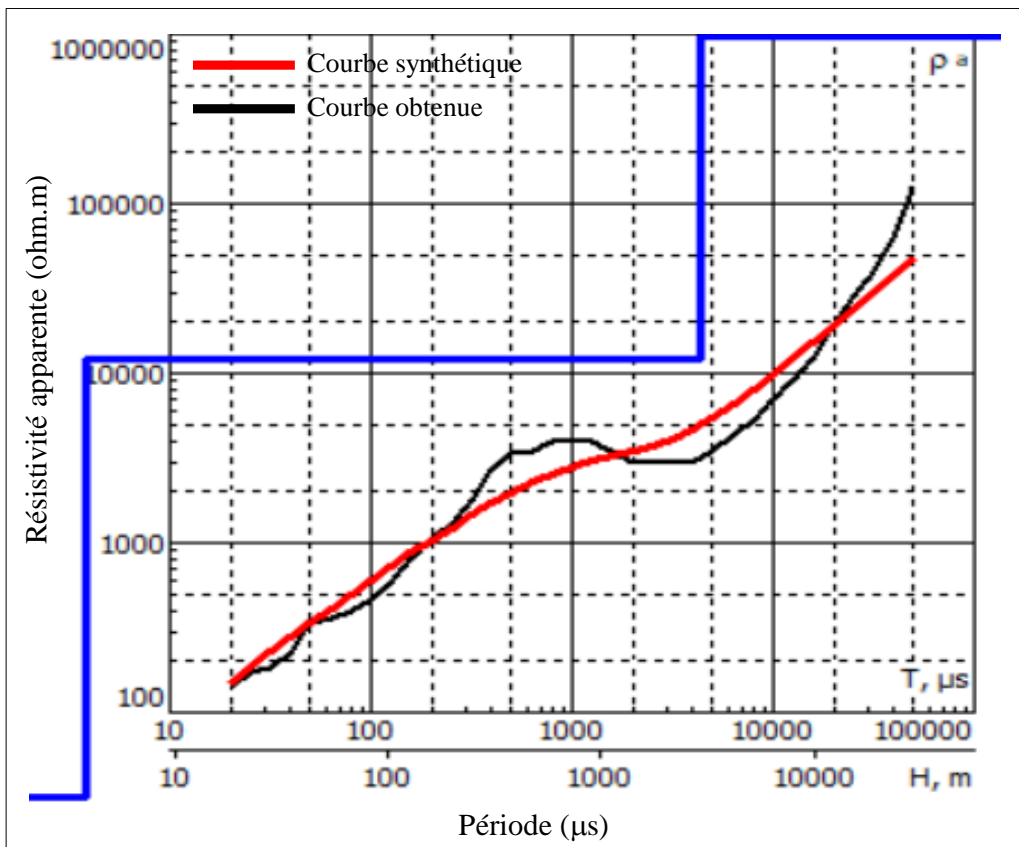


Figure 75: Courbes de sondage à 3 couches (station Nd3).

- **Sondage à la station Nd4**

Selon l'allure de la courbe (fig. 76), le sondage électrique réalisé au niveau de la station Nd4 fait ressortir un modèle de sous-sol à quatre (04) couches. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater une alternance répétitive en dents de scie entre des terrains conducteurs et des terrains résistifs. De façon plus précise, un premier terrain conducteur ($\rho_{app} \sim 50 \text{ ohm.m}$) suivi d'un terrain de résistivité atteignant les 1000 ohm.m. Ce terrain est repris par un terrain très conducteur ($\rho_{app} \sim \text{ohm.m}$) qui est l'indicateur d'une discontinuité géoélectrique au niveau de la station Nd4. Le quatrième terrain similaire au deuxième est marqué par une augmentation de la résistivité.

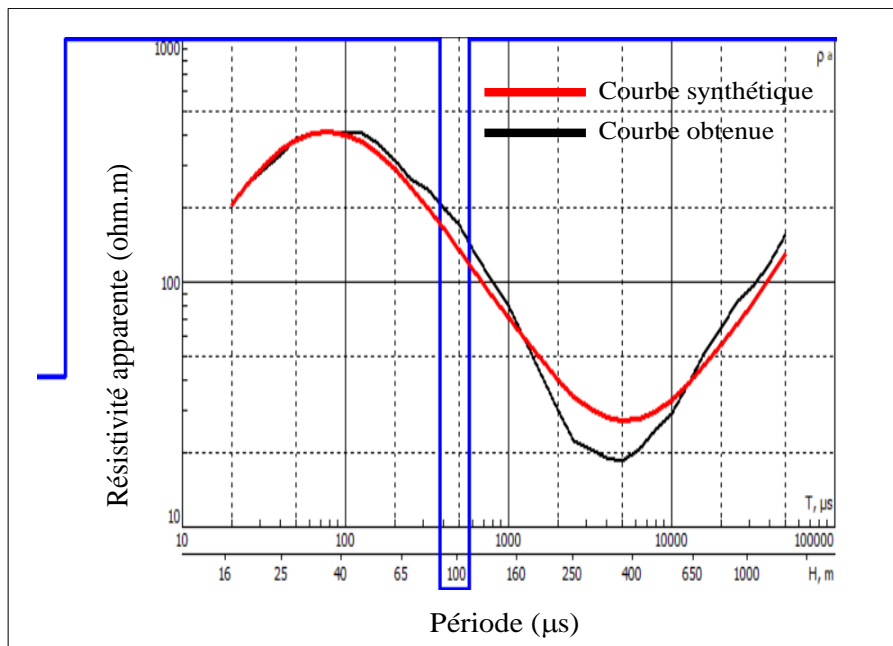


Figure 76: Courbes de sondage à 4 couches (station Nd4).

▪ **Sondage à la station Nd5**

Selon l'allure de la courbe (fig. 77), le sondage électrique réalisé au niveau de la station Nd5 fait ressortir un modèle de sous-sol à quatre (04) couches de terrain. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater une alternance répétitive en dents de scie entre un terrain conducteur ($\rho_{app} < 1000 \text{ ohm.m}$) suivi d'un terrain résistant ($\rho_{app} \sim 10000 \text{ ohm.m}$). Toutefois, le troisième terrain est très conducteurs ($\rho \sim 0 \text{ ohm.m}$) comparés au premier et traduit la présence d'une discontinuité géoélectrique au niveau de la station Nd5.

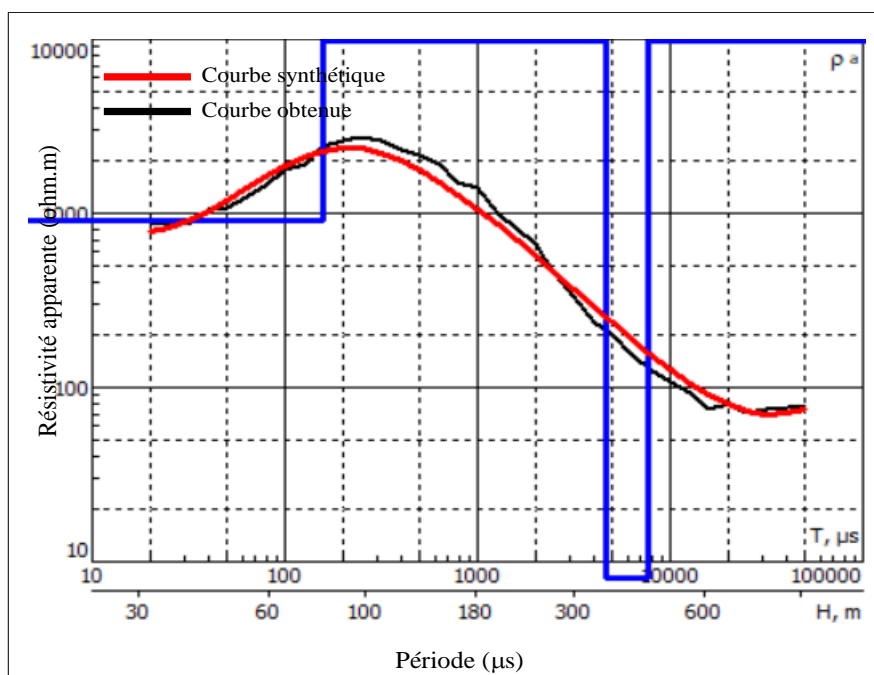


Figure 77: Courbes de sondage à 4 couches (stations Nd5).

B. Profil Oudou

B.1 Pseudo-section de résistivité apparente

La pseudo-section de résistivité apparente (fig. 78) permet d'observer de la surface à la profondeur des zones dont la résistivité croît avec la profondeur, avec un important gradient au niveau de la station Oud2 qui traduirait un rifting en moyenne profondeur suivi d'une discontinuité cassante en très grande profondeur. Cette pseudo-section présente trois (03) zones d'anomalies géoélectriques :

- la première zone s'étend dans le domaine des hautes fréquences de la station Oud1 à la station Oud3 sur plus de 2500 m de distance. Cette zone est très conductrice surtout au niveau de la station Oud1 et Oud3. Les contours d'iso-résistivités sont concentriques et épousent le plissement qui affecte les couches de cette zone ;
- la deuxième zone de tendance moyennement résistive va de la surface à la profondeur et s'étend de la station Oud1 à la station Oud3. Les contours sont concentriques, resserrés et verticaux à sub-verticaux ;
- une zone fortement résistive traverse la deuxième zone en formant un couloir de formes concentriques avec des isocontours de pendages sub-verticaux d'orientation opposées entre les stations Oud1 et Oud3 d'une part et entre les stations Oud3 et Oud4 d'autre part, mettant en évidence le caractère conducteur (le couloir étant segmenté par des formations moins résistives donc plus conductives) qui indiquerait une discontinuité au niveau de la station Oud2. Au niveau de la station Oud4, ce couloir de formations résistives affleure.

B.2 Pseudo-section de phase

La pseudo-section de phase présente de la surface vers la profondeur (fig. 79) trois (03) zones :

- une zone d'isophases élevées ($>50^\circ$) qui se situe entre les stations Oud2 et Oud3 (environ 1500 m de distance) ;
- une seconde zone d'isophases élevées ($35 - 50^\circ$) est présente le long du profil de la surface vers la profondeur.
- une troisième zone qui est en fait un couloir tectonique de phase moyenne 25° qui sépare les deux premiers compartiments de caractéristiques quasi identiques.

L'observation générale de ces pseudo-sections confirmerait l'hypothèse selon laquelle la zone est composée de formations conductrice traversée par des couloirs de formations résistives. Cette particularité renseignerait sur la nature des formations de la série du Lom, qui sont des méta-volcano-sédiments.

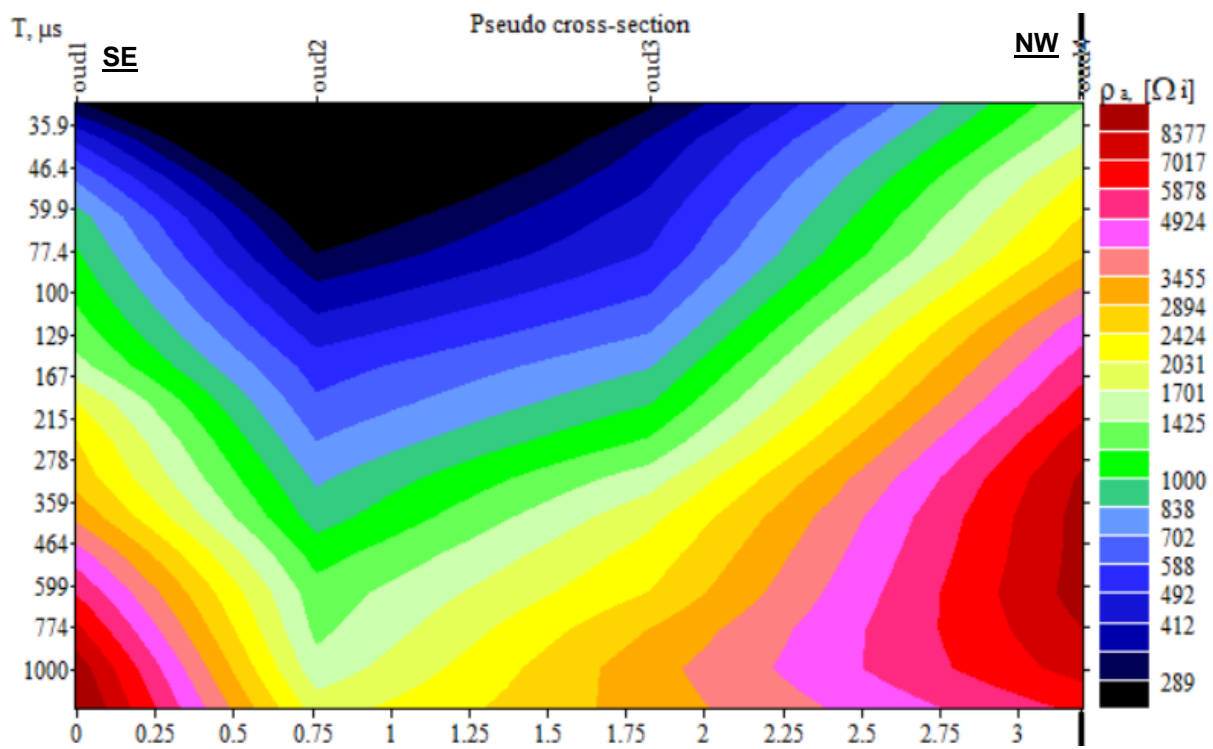


Figure 78: Pseudo-section de résistivité apparente du profil Oudou.

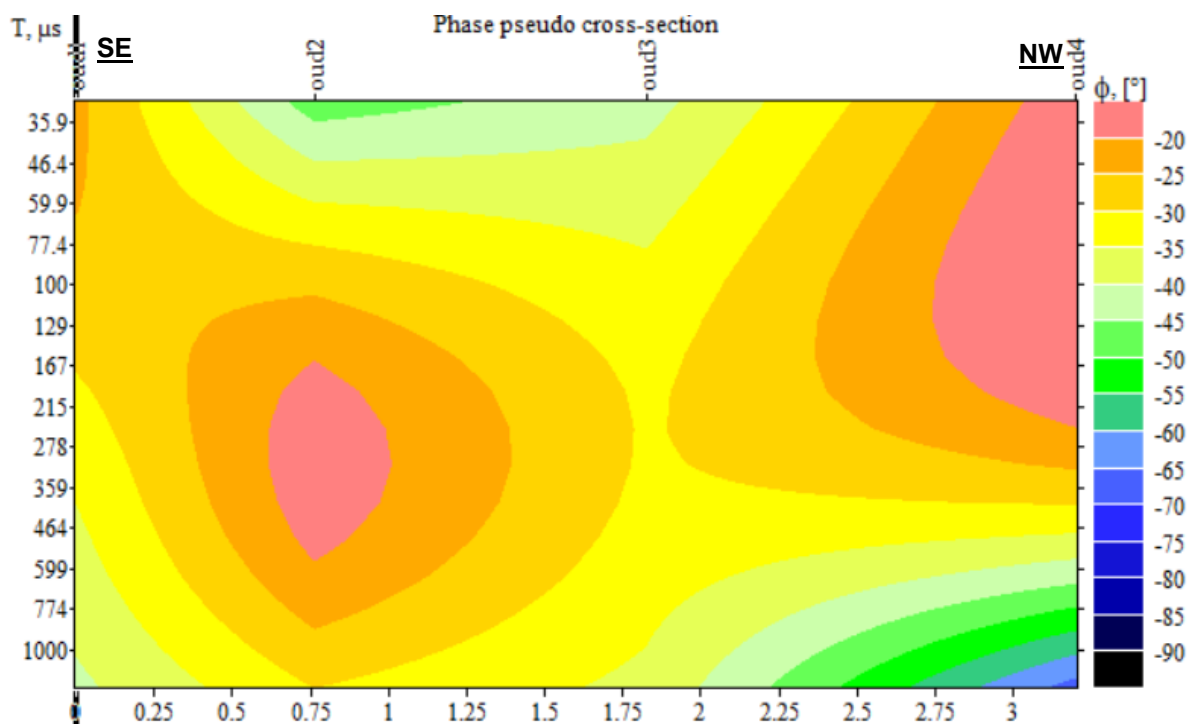


Figure 79: Pseudo-section de phase du profil Oudou.

B.3 Courbe de sondages du profil Oudou

▪ *Sondage à la station Oud1*

Selon l'allure de la courbe (fig. 80), le sondage électrique réalisé au niveau de la station Oud1 fait ressortir un modèle de sous-sol à trois (03) couches de terrains superposés. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater que deux (02) terrains conducteurs (le premier de $\rho < 2 \cdot 10^2$ ohm.m et le troisième de $\rho \sim 500$ ohm.m) encadrent un terrain (01) dont la résistivité apparente atteint les 10^3 ohm.m.

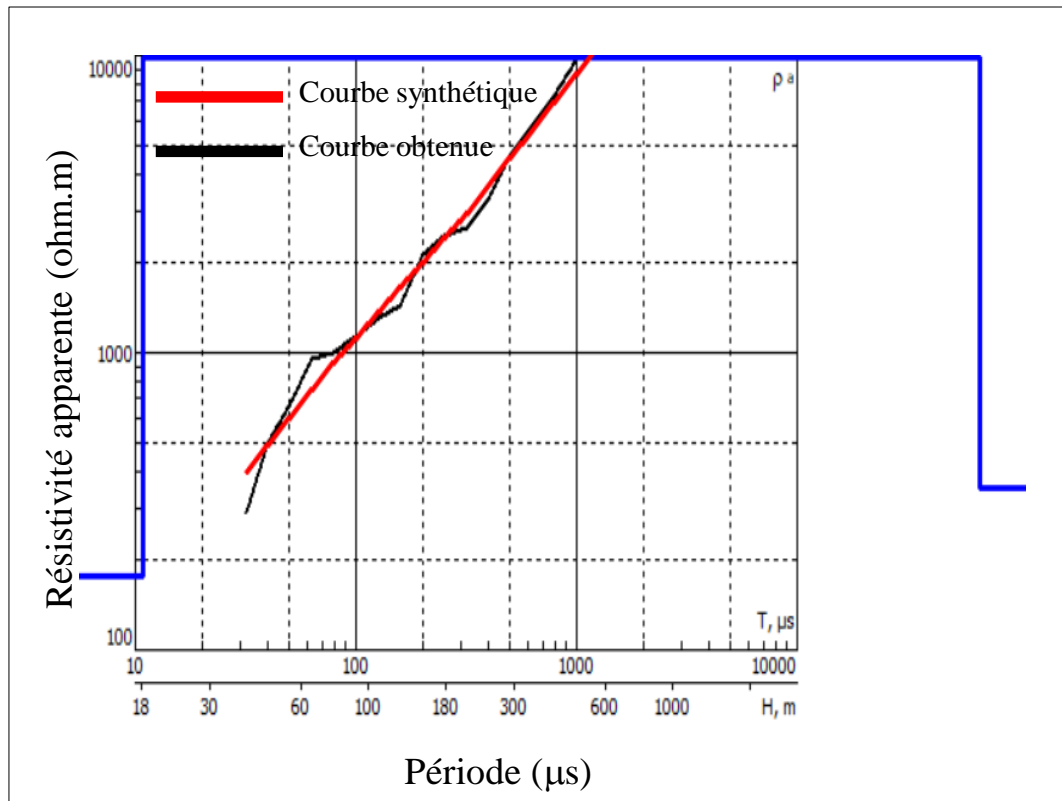


Figure 80: Courbes de sondage à 3 couches (station Oud1)

▪ *Sondage à la station Oud2*

Selon l'allure de la courbe (fig. 81), le sondage électrique réalisé au niveau de la station Oud2 fait ressortir un modèle de sous-sol à trois (03) couches de terrains superposés. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater un terrain conducteur ($\rho \sim 300$ ohm.m) suivi d'un terrain résistant ($\rho \sim 4000$ ohm.m) et d'un autre terrain résistant ($\rho \sim 10^3$ ohm.m).

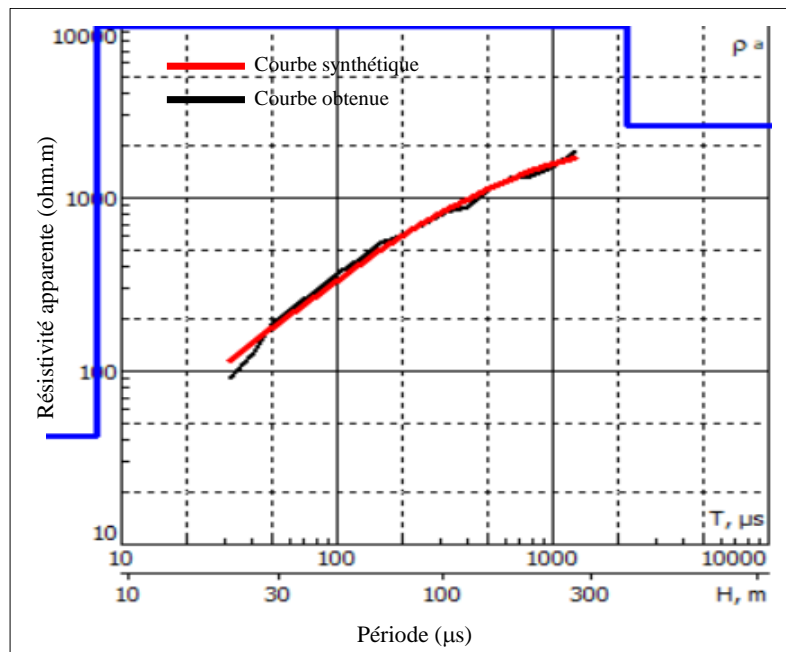


Figure 81: Courbes de sondage à 3 couches (station Oud2).

▪ **Sondage à la station Oud3**

Selon l'allure de la courbe (fig. 82), le sondage électrique réalisé au niveau de la station Oud3 fait ressortir un modèle de sous-sol assez hétérogène de quatre (04) couches de terrains superposés traversés par le courant. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater au départ un premier terrain très conducteur ($\rho \sim 0$ ohm.m) suivi d'un second terrain résistant ($\rho \sim 6.10^3 - 10^3$ ohm.m) qui est traversé par une poche moins résistive ($\rho \sim 200$ ohm.m) et enfin un troisième terrain très conducteur semblable au premier terrain.

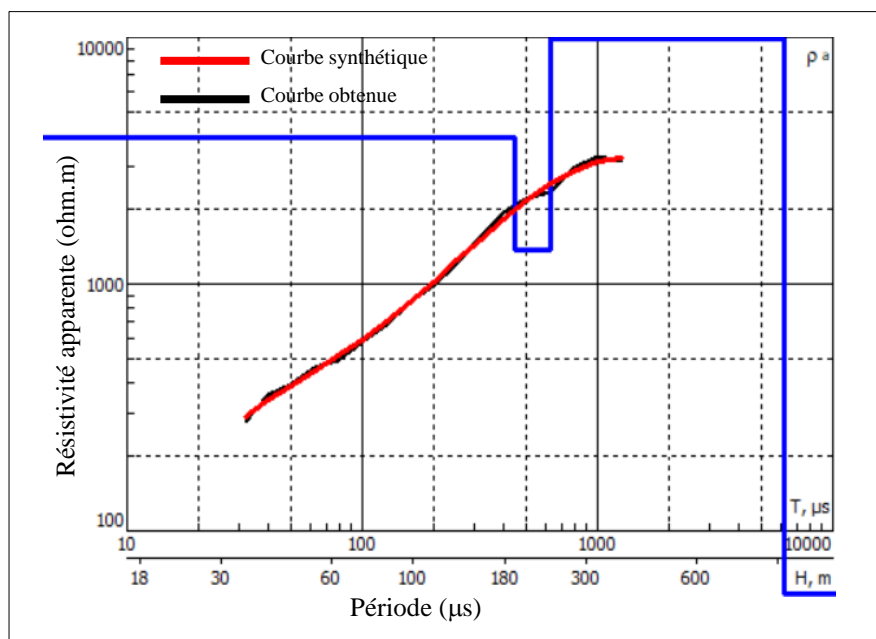


Figure 82: Courbes de sondage à 4 couches (station Oud3).

▪ *Sondage à la station Oud4*

Selon l'allure de la courbe (fig. 83), le sondage électrique réalisé au niveau de la station Oud3 fait ressortir un modèle de sous-sol de trois (03) couches de terrains superposés traversés par le courant. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater au départ un premier terrain faiblement résistif ($\rho \sim 10^3 \text{ ohm.m}$) suivi d'un second terrain résistant ($\rho > 10^4 \text{ ohm.m}$) et enfin un troisième terrain très conducteur ($\rho \sim 0 \text{ ohm.m}$) semblable au premier terrain.

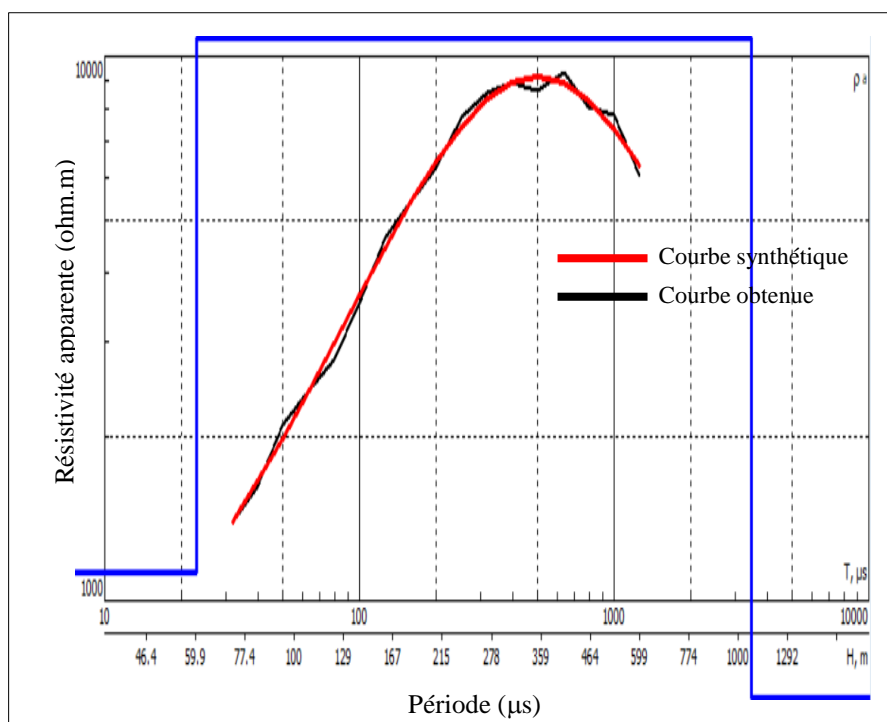


Figure 83: Courbes de sondage à 3 couches (station Oud4).

C. Profil de Garga Sarali

C.1 Pseudo-sections de résistivité apparente

La pseudo-section de résistivité apparente du profil Garga Sarali (fig. 84) présente :

- une première zone comportant des formations très conductives respectivement entre les stations GS4 et GS5 (environ 1500 m de distance), sujette à un plissement avec des flancs de plis sub-verticaux à verticaux ;
- une deuxième zone de formations moyennement résistives située respectivement entre les stations GS1 et GS7 (plus de 6000 m de distance à l'horizontale), dont les isocontours de résistivités sous forme d'ondulations sont affectées au niveau de la station GS3 par une remontée de formations assez résistives ;

- une troisième zone de formations résistives qui se présentent sous forme de couloir très résistif affecte les formations en sub-surface et surface en remontant au niveau de la station GS3 et en affleurant au niveau de la station GS7. Les isocontours de résistivités sont irrégulièrement concentriques avec des pendages sub-verticaux à verticaux. Ceci pourrait indiquer la présence d'une discontinuité résistive à cette profondeur le long du profil avec des accentuations au niveau des stations GS1 et GS7.

La zone de formations résistives sus-évoquées est reprise par une formation moyennement résistives à conductives ayant les caractéristiques presque identiques que les deux (02) premières formations identifiées en surface et en proche surface. En effet, on observe la présence de poches assez conductives (fig. 84) d'isocontours de résistivité concentriques et de pendage sub-vertical à vertical qui mettraient en évidence la présence de discontinuités conductives entre les stations GS1 et GS3 (3000 m de long) et au niveau de la station GS5. Toutefois, on observe entre 3000 m et 5000 m une augmentation de la résistivité qui correspondrait à une discontinuité résistive et mettrait en évidence la présence des formations du socle.

C.2 Pseudo-section de phase

Tout comme la pseudo-section de résistivité apparente, elle présente la même physionomie et on observe de la surface vers la profondeur (fig. 85) :

- une zone d'isocontours de phase comprise entre 20° et 30° respectivement entre les stations GS5 et GS6 ;
- une zone d'isocontours de phase comprise entre 35° et 50° , qui est prédominante et présente de la proche surface vers la profondeur.
- elle est traversée par un couloir d'isophases faibles ($<25^\circ$), de forme concentriques plus ou moins irrégulières situées respectivement entre les stations GS1 et GS4 sur plus de 4000 m de distance. On retrouve encore cette zone de la proche surface vers la profondeur au niveau de la station GS7 ;
- des poches d'isocontours de phases concentriques de valeur élevées qui forme des nœuds papillons en reprenant le couloir d'isophases ($<25^\circ$) au niveau de la station GS2.

La succession de zone de phases de valeur élevées à faible et d'isocontours de phases concentriques mettrait en évidences la présence de discontinuité au niveau de la station GS1 de la surface vers la profondeur.

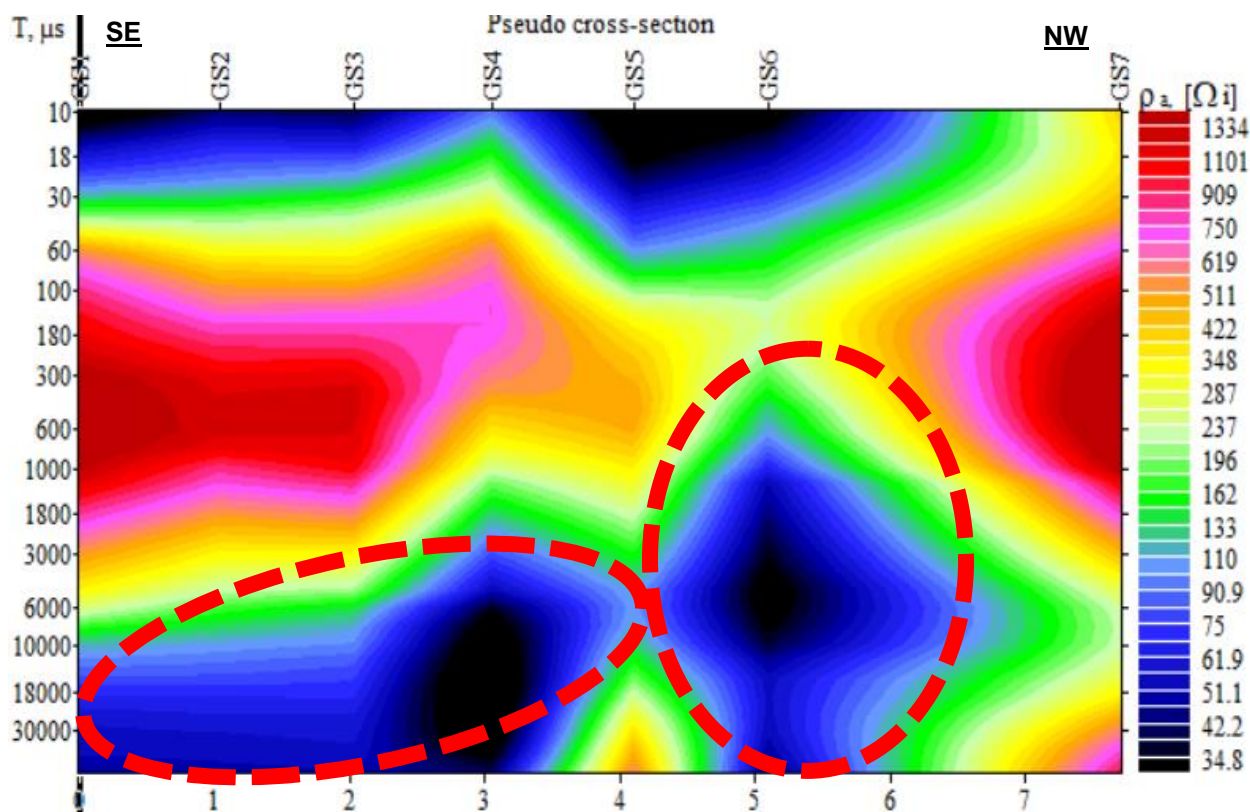


Figure 84: Pseudo-section de résistivité apparente du profil Garga Sarali.

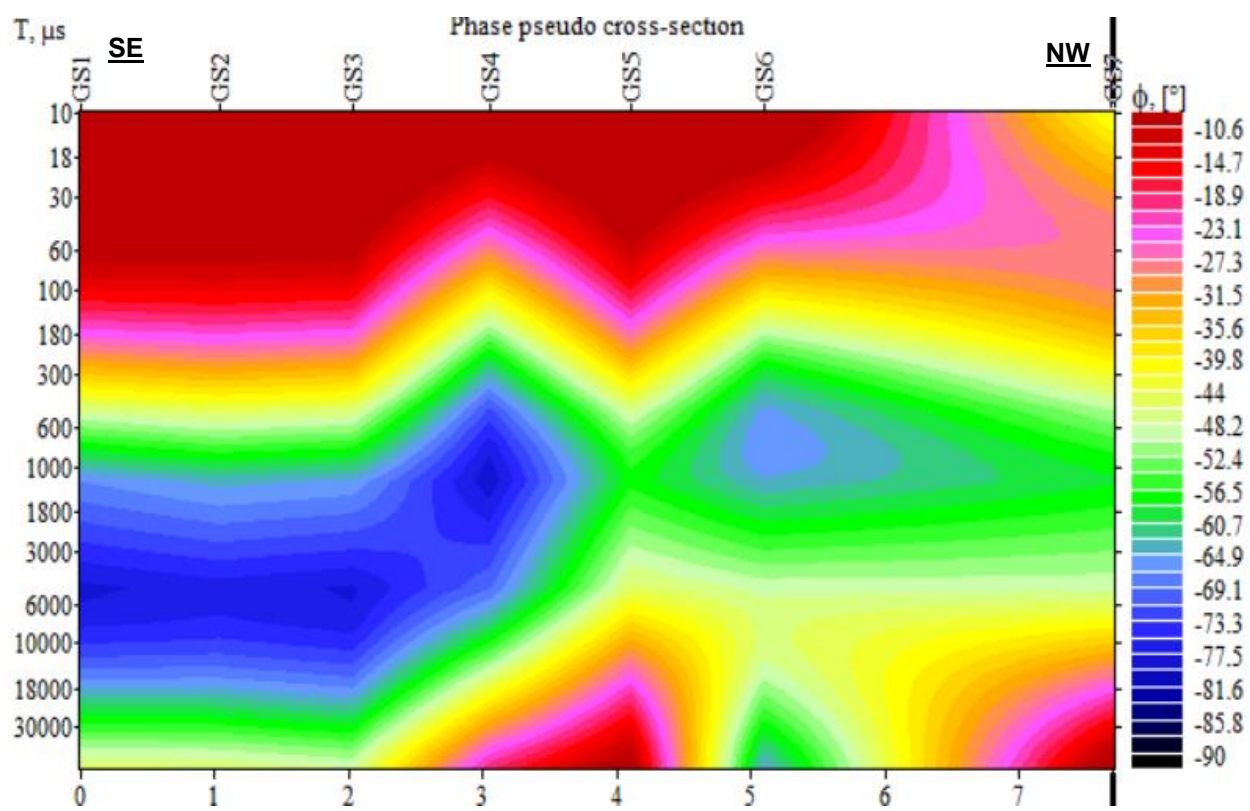


Figure 85: Pseudo-section de phase du profil Garga Sarali.

C.3 Courbe de sondages du profil Garga Sarali

▪ Sondage à la station GS1

Selon l'allure de la courbe (fig. 86), le sondage électrique réalisé au niveau de la station GS1 fait ressortir un modèle de sous-sol de quatre (04) couches superposés traversés par le courant. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater au départ un premier terrain très conducteur ($\rho \sim 0$ ohm.m) suivi d'un second terrain résistant ($\rho > 10^4$ ohm.m), d'un troisième terrain très conducteur ($\rho \sim 0$ ohm.m) marquant la présence d'une anomalie géoélectrique au niveau de la station GS1 et enfin un quatrième terrain résistif ($\rho \sim 10^4$ ohm.m) semblable au second terrain.

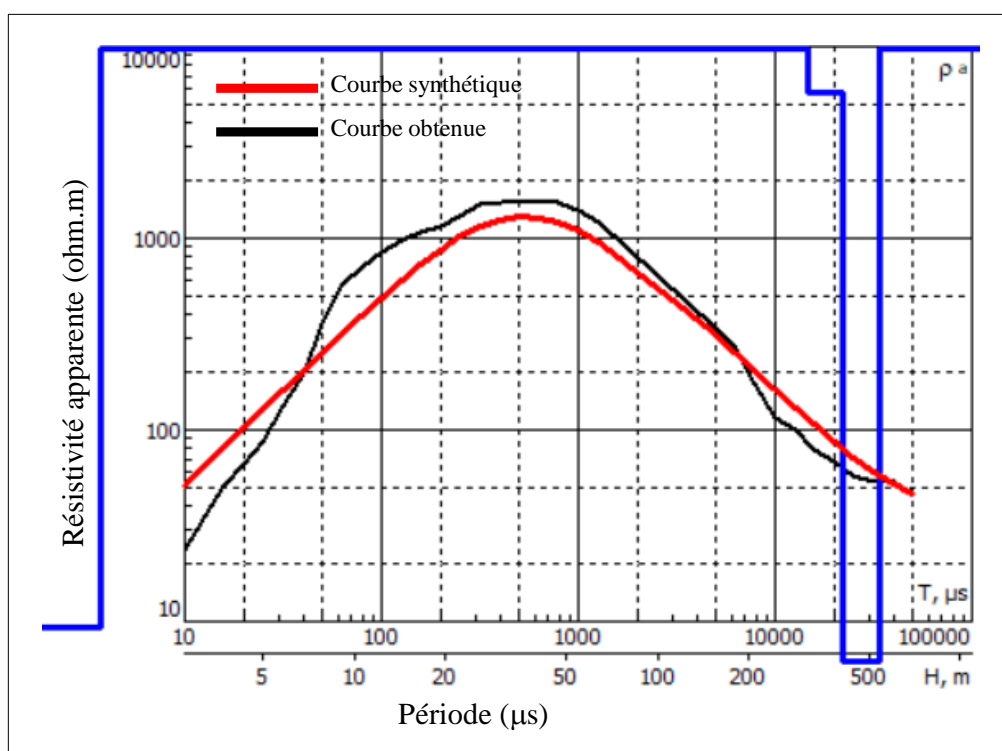


Figure 86: Courbes de sondage à 4 couches (station GS1).

▪ Sondage à la station GS2

Selon l'allure de la courbe (fig. 87), le sondage électrique réalisé au niveau de la station GS2 fait ressortir un modèle de sous-sol de quatre (04) couches de terrains superposés traversés par le courant. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater au départ un premier terrain très conducteur ($\rho \sim 0$ ohm.m) suivi d'un second terrain résistant ($\rho > 10^4$ ohm.m), d'un troisième terrain très conducteur ($\rho \sim 0$ ohm.m) marquant la présence d'une anomalie géoélectrique au niveau de la station GS2 et enfin un quatrième terrain résistif ($\rho \sim 10^4$ ohm.m) semblable au second terrain.

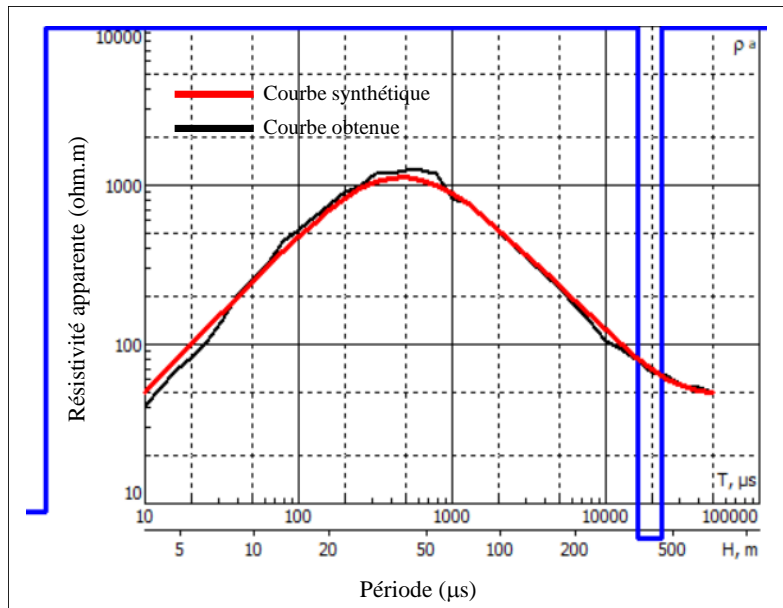


Figure 87: Courbes de sondage à 4 couches (station GS2).

▪ **Sondage à la station GS3**

Selon l'allure de la courbe (fig. 88), le sondage électrique réalisé au niveau de la station GS3 fait ressortir un modèle de sous-sol de quatre (04) couches de terrains superposés traversés par le courant. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater au départ un premier terrain très conducteur ($\rho \sim 0$ ohm.m) suivi d'un second terrain résistant ($\rho > 10^4$ ohm.m), d'un troisième terrain très conducteur ($\rho \sim 0$ ohm.m) marquant la présence d'une anomalie géoélectrique au niveau de la station GS3 et enfin un quatrième terrain résistif ($\rho \sim 10^4$ ohm.m) semblable au second terrain.

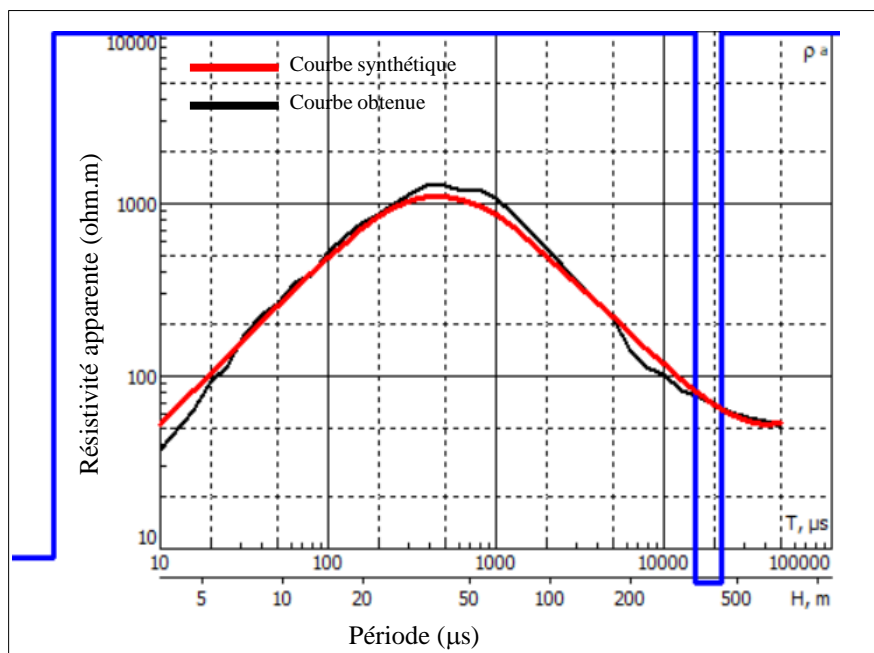


Figure 88: Courbes de sondage à 4 couches (station GS3).

- **Sondage à la station GS4**

Selon l'allure de la courbe (fig. 89), le sondage électrique réalisé au niveau de la station GS4 fait ressortir un modèle de sous-sol de quatre (04) couches superposés traversés par le courant. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater au départ un premier terrain très conducteur ($\rho \sim 30 \text{ ohm.m}$) suivi d'un second terrain résistant ($\rho > 1000 \text{ ohm.m}$), d'un troisième terrain très conducteur ($\rho \sim 0 \text{ ohm.m}$) marquant la présence d'une anomalie géoélectrique au niveau de la station GS4 et enfin un quatrième terrain résistif ($\rho \sim 1000 \text{ ohm.m}$) semblable au second terrain.

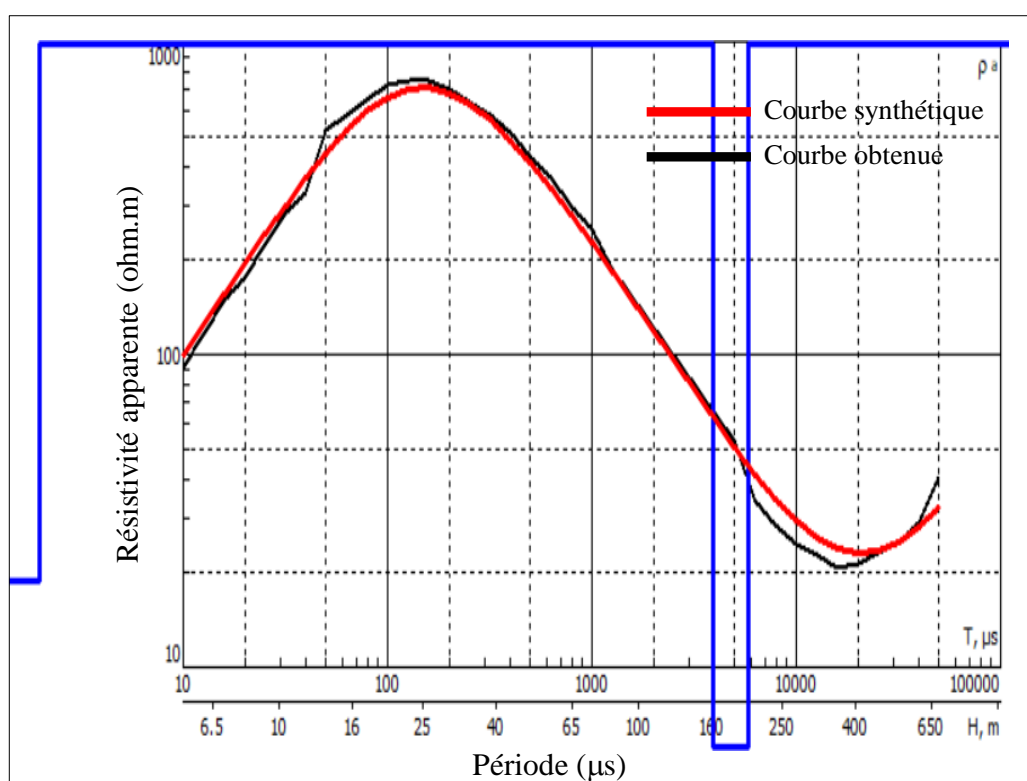


Figure 89: Courbes de sondage à 4 couches (station GS4).

- **Sondage à la station GS5**

Selon l'allure de la courbe (fig. 90), le sondage électrique réalisé au niveau de la station GS5 fait ressortir un modèle de sous-sol de quatre (04) couches superposés traversés par le courant. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater au départ un premier terrain très conducteur ($\rho \sim 0 \text{ ohm.m}$) suivi d'un second terrain résistant ($\rho > 1000 \text{ ohm.m}$), d'un troisième terrain très conducteur ($\rho \sim 30 \text{ ohm.m}$) marquant la présence d'une anomalie géoélectrique au niveau de la station GS5 et enfin un quatrième terrain résistif ($\rho \sim 1000 \text{ ohm.m}$) semblable au second terrain.

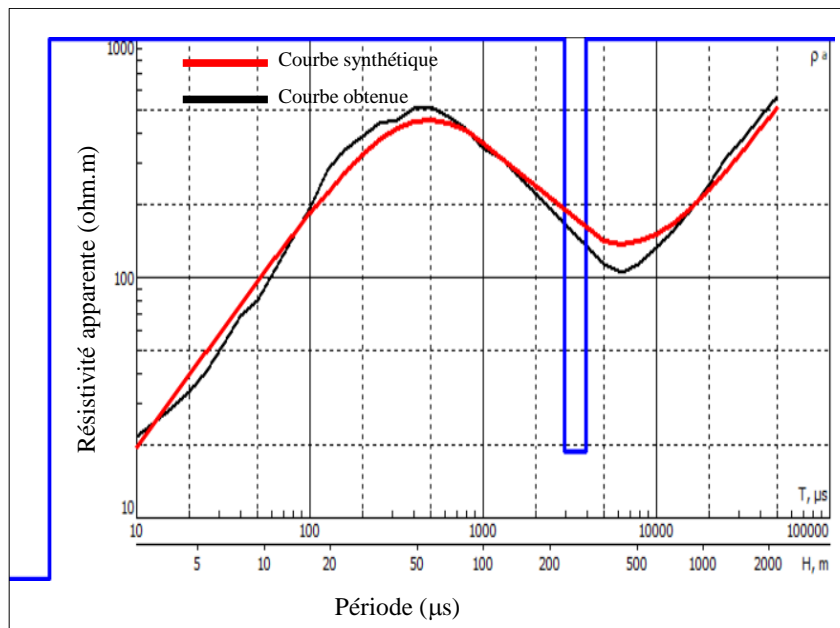


Figure 90: Courbes de sondage à 4 couches (station GS5).

▪ **Sondage à la station GS6**

Selon l'allure de la courbe (fig. 91), le sondage électrique réalisé au niveau de la station GS6 fait ressortir un modèle de sous-sol de cinq (05) couches superposés traversés par le courant. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater au départ un premier terrain très conducteur ($\rho \sim 0$ ohm.m) suivi d'un second terrain résistif ($\rho > 1000$ ohm.m), d'un troisième terrain très conducteur ($\rho \sim 0$ ohm.m), d'un quatrième terrain résistif ($\rho \sim 1000$ ohm.m) semblable au second terrain et d'un quatrième terrain très conducteur ($\rho \sim 0$ ohm.m).

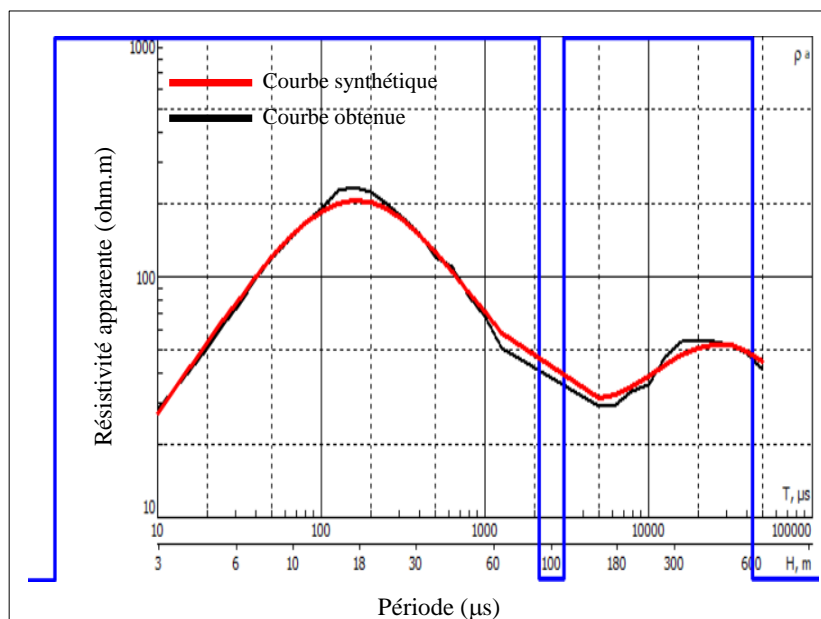


Figure 91: Courbes de sondage à 5 couches (station GS6).

▪ Sondage à la station GS7

Selon l'allure de la courbe (fig. 92), le sondage électrique réalisé au niveau de la station GS6 fait ressortir un modèle de sous-sol de quatre (04) couches de terrains superposés traversés par le courant. L'observation de la variation de la résistivité permet de constater au départ un premier terrain très conducteur ($\rho > 500$ ohm.m) suivi d'un second terrain résistif ($\rho > 10^4$ ohm.m), d'un troisième terrain très conducteur ($\rho \sim 0$ ohm.m) marquant la présence d'une anomalie géoélectrique au niveau de la station GS7 et enfin d'un quatrième terrain résistif ($\rho \sim 10^4$ ohm.m) semblable au second terrain.

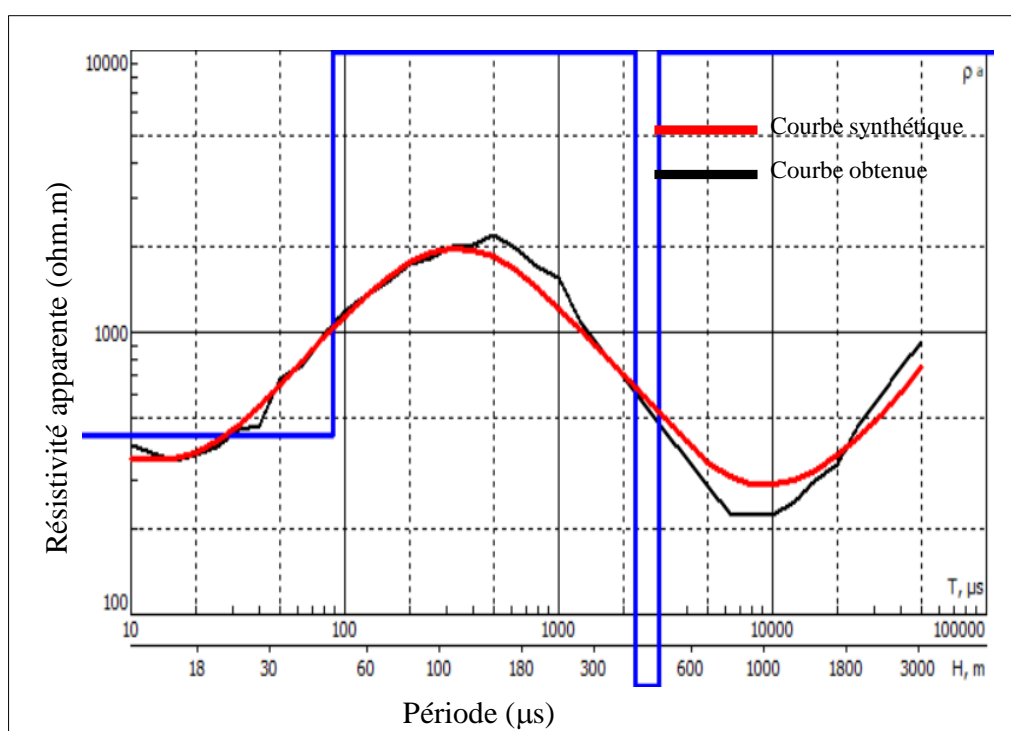


Figure 92: Courbes de sondage à 4 couches (stations GS7).

Conclusion

D'une observation globale, les pseudo-sections de résistivité et de phase présentent une physionomie assez hétérogène faite d'isocontours de résistivité et de phase très déformés à l'allure très resserré, mettant en évidence des zones de discontinuités géoélectriques. Cette hétérogénéité témoignerait d'une histoire géologique ayant affecté la région et caractérisée d'une part par des marqueurs de la déformation (plissements intenses, fracturations, cisaillement, failles) et d'autre part, la présence en profondeur des couloirs très conducteurs logés au sein des ensembles très résistifs. Cette apparence indiquerait soit (1) la présence des zones fortement chargées pouvant être assimilées à des pièges à substances utiles, soit (2) une zone de transition entre un domaine fortement résistif (Craton) et un domaine plus conducteur (Panafrique) ou enfin (3) un ensemble s'inscrivant dans un régime de cisaillement qui a la

capacité vu la dynamique qui la constitue d'amener vers les profondeurs des formations de proches surfaces.

IV.1.4.5 Section géoélectrique

A. Profil Ndokayo

L'observation de la section géoélectrique et des tests de dimensionnalité du profil Ndokayo au niveau de chaque station montre de la surface en profondeur (fig. 93) :

- un terrain assez conducteur qui s'étend de la station Nd1 à 500 m après la station Nd4. La profondeur varie de 50 m au niveau de la station Nd1 à environ 200 m au niveau de la station Nd4 ;
- un deuxième terrain à tendance résistive qui s'étend de la station Nd1 à la station Nd5. L'épaisseur de ce terrain varie d'environ 150 m entre les stations Nd1 et Nd2 à 50 m au niveau de la station Nd3 et de 200 m à 1000 m au niveau de la station Nd4 ;
- un troisième terrain très résistif dont la profondeur varie grandement de 500 m au niveau de la station Nd1, de 600 à 700 m entre la station Nd2 et Nd3 et de la surface en profondeur au niveau de la station Nd5.

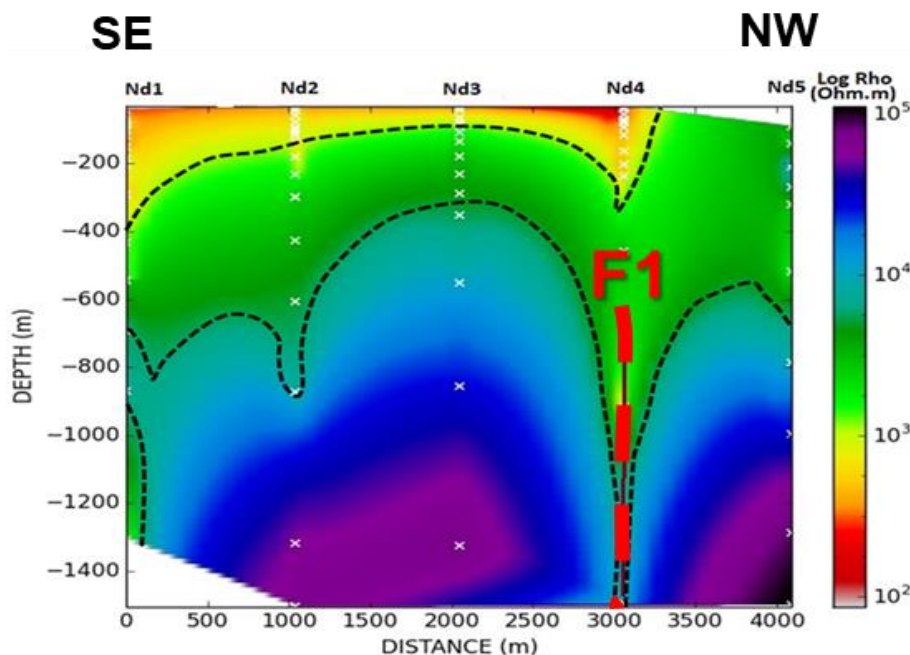


Figure 93: Section géoélectrique du profil Ndokayo.

L'analyse du point de vue tectonique et structural de ce profil, permet de souligner l'existence de discontinuités électriques dont les contours d'iso-résistivité sont verticaux et resserrés, représentant des fracturations communément identifiées comme étant des failles au niveau de la station Nd4 (F) et des contacts entre des formations géologiques de faciès hétérogènes distincts des terrains 2 et 3 (C).

En définitive, le profil Ndokayo montre que la résistivité augmente avec la profondeur. La présence d'un mélange entre les formations résistives et conductives de la surface en profondeur témoigne d'un processus de remobilisation des formations panafricaines. La discontinuité majeure au niveau de la station Nd4 qui s'assimile à une fracturation ou faille mis en évidence, porte l'orientation générale de la grande zone de cisaillement et ressort à suffisance le caractère tectonique très intense de la zone traversée par le profil Ndokayo.

B. Profil Oudou

L'observation de la section géoélectrique et des tests de dimensionnalité à chaque station de mesure montre de la surface à la profondeur (fig. 94) :

- un terrain constitué des formations conductives d'environ 20 m d'épaisseur qui s'étend de la station Oud2 à la station Oud3 (de 500 à 2500 m de distance). Au niveau de la station S2 et S3, on observe une remontée des formations résistives qui seraient celles du socle ;
- un second terrain de 200 m d'épaisseur à tendance résistive, qui affleure en Oud1 et 500 m après la station Oud3. Ce second terrain se présente sous forme de graben ;
- un troisième terrain très résistif qui va de 100 m à 1000 m de profondeur et ce tout le long du profil. Ce terrain présente des phénomènes de rifting/marche en escaliers, avec des caractères très plissé.

L'analyse du point de vue tectonique et structural, permet de souligner l'existence de discontinuités électriques, caractérisant les zones de contacts (C) entre les formations géologiques de faciès de compositions assez hétérogènes.

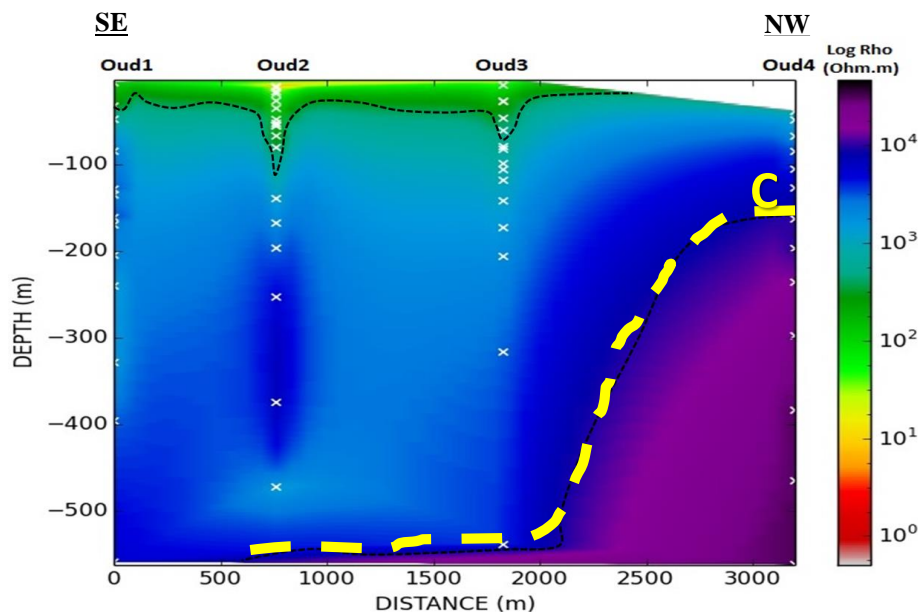


Figure 94: Section géoélectrique du profil Oudou.

En définitive, le profil Oudou montre que la résistivité croît avec la profondeur. Aussi, le caractère plissé des terrains témoigne d'une activité tectonique ayant affecté la zone.

C. Profil Garga Sarali

L'observation de la section géoélectrique et des tests de dimensionnalité à chaque station de mesure montre de la surface vers la profondeur (fig. 95) :

- un terrain conducteur dont la profondeur varie entre 25 m et 50 m et qui s'étend de la station GS1 à la station GS6. Ce terrain semble être affecté par un plissement ;
- un deuxième terrain moyennement résistif reprend le précédent terrain et s'étend sur tout le long du profil sur une profondeur d'environ 300 m. En effet, il est caractérisé par un plissement local et est marqué à l'horizontal entre 2000 m et 3000 m de distance par un fossé d'effondrement sur plus de 600 m de profondeur entre les stations GS3 et GS6 ;
- les formations résistives du socle qui constituent le troisième terrain présentent la même physionomie du plissement local. Toutefois, elles auraient la particularité de se retrouver en proche surface respectivement au niveau des stations GS1 et GS7, où elles présentent des isocontours de résistivités de pentages sub verticaux orientés N300, pour celles situées respectivement entre les stations GS1 et GS3 et orientés N120 pour celles situées respectivement entre les stations GS4 et GS7, mettant en évidence des discontinuités de part et d'autre d'un synclinal.

L'analyse du point de vue tectonique et structural, permet de souligner l'existence de discontinuités électriques. On en dénombre deux (02) principales qui sont situées au niveau des stations GS4 et GS6, et qui sont considérées, comme étant des discontinuités profondes assimilables à des failles (**F1** et **F2**). Toutes ces discontinuités semblent suivre la direction structurale majeur de la zone de cisaillement centre camerounais (CCSZ) à savoir NE-SW.

En définitive, l'analyse de la section géoélectrique du profil Garga Sarali permet d'identifier une zone qui aurait été affectée par d'intenses activités tectoniques, qui auraient façonnées ce modèle définitif en laissant sur place une succession : anticlinal – synclinal – anticlinal et qui ressemblerait fortement à des zones de compressions tectoniques.

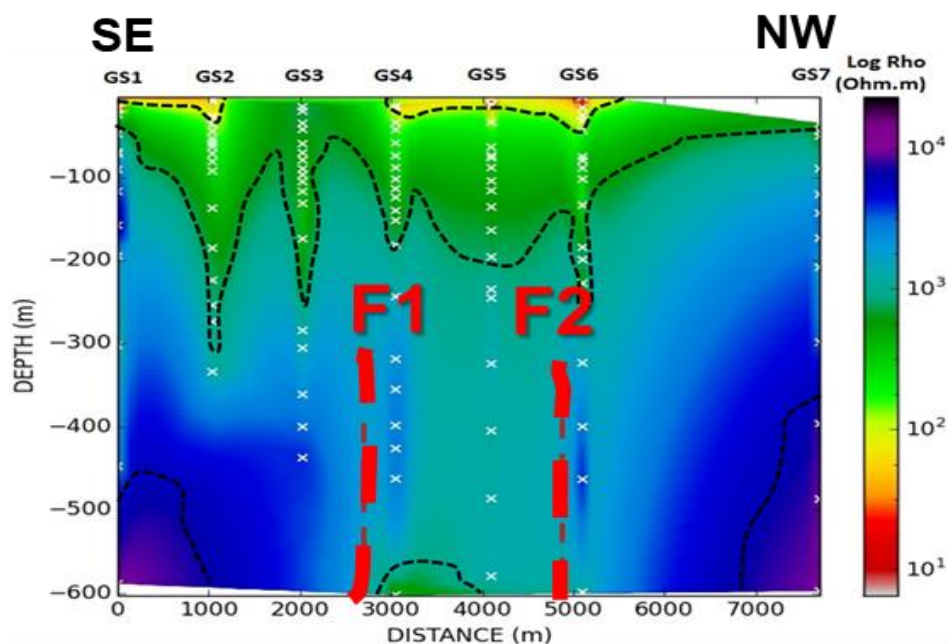


Figure 95: Section géoélectrique du profil Garga Sarali ressortant les failles F1 et F2.

Conclusion

La présente partie consacrée à l'investigation géophysique a eu pour principal objectif la mise en évidence des faits structuraux nouveaux à travers une cartographie géophysique par la méthode audiomagnétotellurique (AMT) des formations panafricaines de la zone Garga-Sarali – Bétaré Oya qui sont le siège de minéralisations aurifères faisant l'objet d'une attraction de la part des opérateurs miniers. Les données collectées sur les seize (16) stations a permis de mettre en évidence des zones de discontinuités électriques affectant les formations du socle et les formations de sub-surface, qui s'apparentent à des accidents structuraux pour certaines et à des zones de concentration ou pièges de substances naturelles. L'observation à l'échelle régionale de chaque profil AMT permet d'identifier un réseau de failles allant du profil Garga Sarali jusqu'au profil Ndokayo (figs. 96 et 97). Cette structure mise en évidence a la même orientation que celle des lignes tectoniques, qui elles même suivent l'orientation régionale NE-SW des évènements ayant affecté la Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale. Cette faille recoupe celle mise en évidence par Kankeu et al., 2006 au niveau de Ndokayo. Aussi, elle semble être une branche proche de la faille de la Sanaga qui passe par Garga Sarali et suit la même orientation.

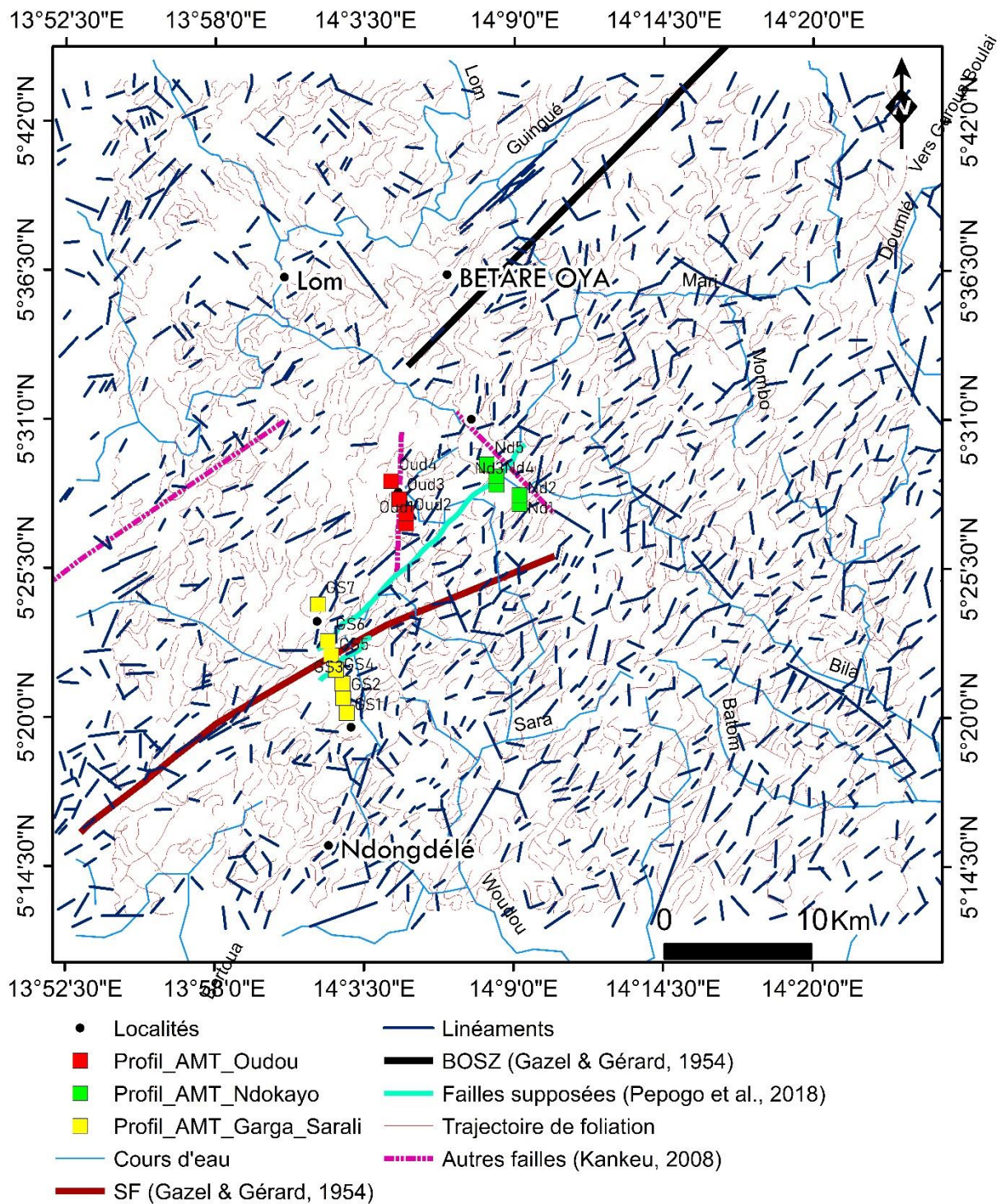


Figure 96 : Carte structurale de la zone d'étude intégrant le réseau de faille (Kongolo-Ndokayo) mise en évidence par la prospection AMT.

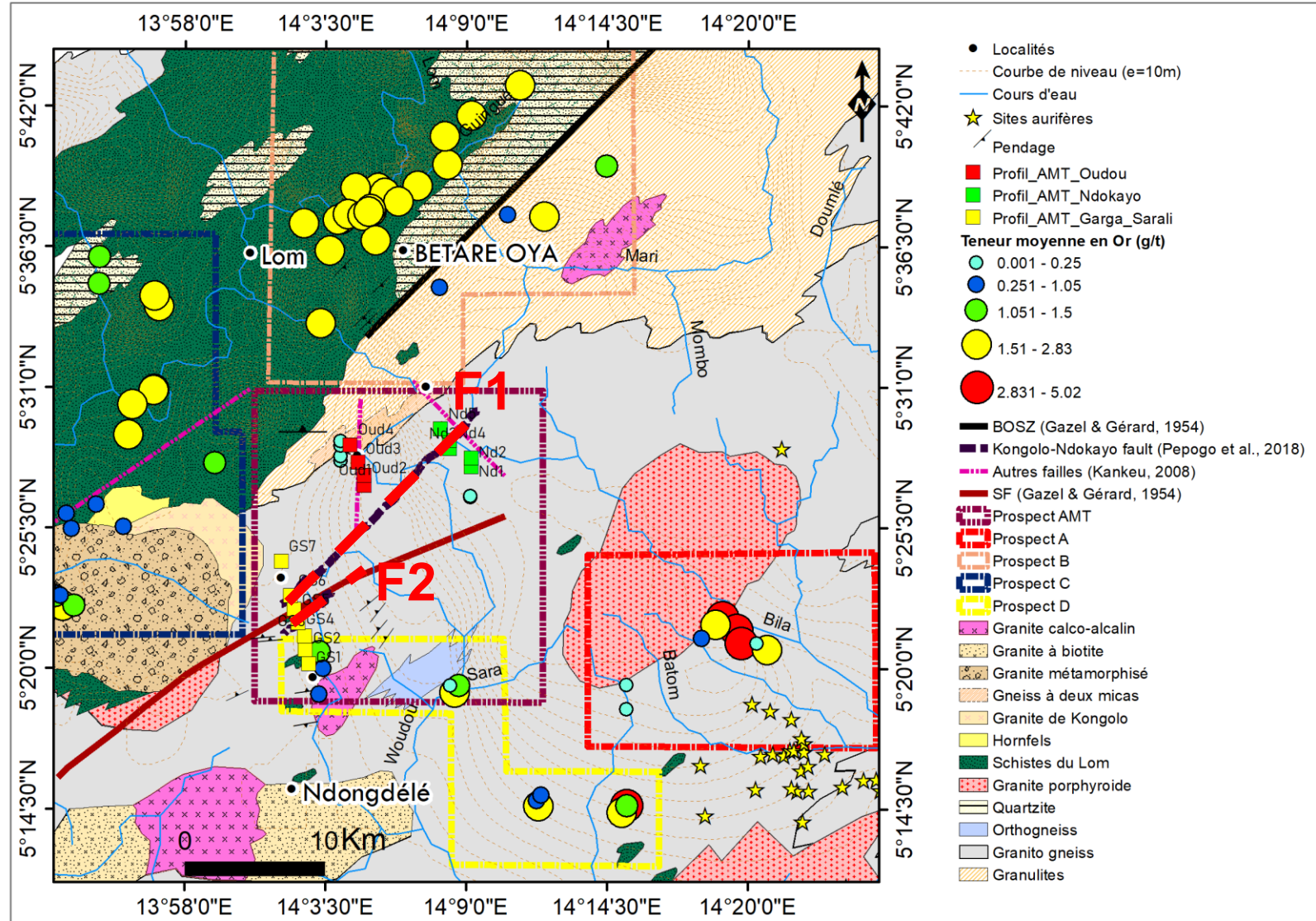


Figure 97 : Carte géologique de la zone d'étude intégrant le réseau de failles supposés (F1 et F2) mise en évidence par la prospection AMT.

Chapitre 4. Discussion

« L'éducation n'est pas le fait de l'école, mais bien de quelque vertu qu'on porte en soi », Louis Bromfield

Introduction

Il sera question dans cette partie de procéder à la discussion des résultats obtenus au terme de ce travail. Toutefois, sachant que la fiabilité des résultats d'une investigation dépend de la méthode et des techniques de traitement de données utilisées, la crédibilité des conclusions dépend de la précision avec laquelle les résultats ont été obtenus.

I. Validités des données et des résultats

I.1 Validité des résultats de la collecte des données géologiques et minières et sur l'analyse des images satellitaires.

La prospection géologique et minière fait appel à un équipement spécifique parmi lesquels le GPS, la boussole, le clinomètre, une balance électronique, des bâchées, etc. Pour la prise des données de positionnement par GPS, la précision a été de ± 3 mètres. Pour l'orientation, les boussoles et les clinomètres utilisés ont une précision ou une marge d'erreur de 2°. Enfin, l'évaluation des teneurs a été réalisée à l'aide d'une balance électronique dont la sensibilité est 0,1g. Cette marge de précision est très bonne car les erreurs sont inférieures à 15%.

Les données satellites utilisées sont de type LANDSAT OLI 8 du 01 février 2019 à 30 m. Les bandes utilisées (RVB 432) et leur résolution (30x30) permettent de générer les éléments via le logiciel ENVI 5.3 et par digitalisation à l'aide des logiciels appropriés à l'instar d'Arc GIS conduisent à l'extraction des linéaments, de la foliation et de la détermination des orientations suivant la rose des vents via le logiciel GeoRose. La viabilité de ces outils rassure sur la validité des résultats présentés.

I.2 Validité des résultats d'AMT

La qualité de l'équipement (STRATAGEM EH4) qui est un outil utilisant un algorithme intégré basé sur l'approche de Bostick, permet d'une part, de réduire au minimum l'incertitude sur la valeur de résistivité et, d'autre part, de contrôler la qualité d'un bon sondage en supposant que la résistivité apparente est incontestablement positive.

Le contrôle qualité est apprécié par la cohérence des signaux. Les valeurs du champ électrique peuvent être estimées à partir des mesures du champ magnétique (Vozoff, 1991). La cohérence entre les valeurs du champ électrique prédites et celles mesurées est le rapport signal/bruit. Ce rapport définit la qualité des données enregistrées. Les valeurs de la cohérence sont comprises entre 0 et 1, où 0,5 correspond à un niveau de signal égal au bruit.

L'acquisition de données s'est effectuée loin des activités humaines et d'infrastructures routières et électriques, ce qui a réduit de façon drastique le bruit (Geometrics, 2000).

Dans le cadre de la présente étude, plusieurs données ont été enregistrées à chaque station. Le meilleur sondage considéré étant celui dont la cohérence supérieure à 0,70. Les données tensorielles sont calculées par le logiciel Imagem (Geometrics, 2000). Le lissage des données a permis de faire le test sur la dimensionnalité. En effet, L'analyse des courbes (figs. 53 et 54) montre qu'il n'y a pas toujours une superposition complète entre les courbes calculée et mesurée sur toutes les stations. De plus, les courbes de résistivités apparentes en fonction de la fréquence issue du logiciel Imagem (Geometrics, 2000) sur toutes les stations pour les deux directions telluriques ne sont pas toujours totalement superposées. Ceci traduit le fait que la variation des résistivités n'est pas de 1D, mais plutôt de 2D ou 3D. Néanmoins, la superposition observée entre les deux courbes par interpolation peut faire référence à un modèle de structure 1-D ou 2-D. Mais au regard de la tectonique complexe de cette zone, l'interprétation 2-D s'avère plus indiquée pour cette étude. Une nouvelle correction par lissage des données a été faite à partir des courbes de dimensionnalité permettant ainsi d'obtenir une nouvelle grille de données qui ont été utilisées pour la présente interprétation. Pendant la prise des données, on a aussi tenu compte de la corrélation des signaux et de la corrélation des impédances des composantes des champs.

L'analyse des différentes représentations de la fonction RMS (Root Mean Square, qui est l'erreur ou niveau de corrélation entre la courbe expérimentale des données et celle théorique), montre que les différentes pseudo-sections (phase et résistivité) sont fiables. En effet, pour toutes ces courbes, le RMS varie entre 0,4 et 1,5 pour l'erreur sur les données, et entre 0 et 0,3 pour les contraintes du modèle. Les sections géoélectriques ont été réalisées par le logiciel Stratagem Resistivity Plotter v.1.2 qui utilise le programme de visualisation 2D Python. Les épaisseurs des couches et leurs résistivités sont estimées à 2% près.

II. Discussion des résultats

II.1 Caractérisation des éléments structuraux mis en évidence par l'analyse satellitaire des images LANDSAT OLI 8

L'analyse des images satellitaires (qualitative et quantitative) a permis de mettre en évidence des cartes des éléments structuraux non pénétratifs (linéaires, curvilignes).

- **Foliation**

La carte de la foliation de la zone d'étude présente une orientation directionnelle préférentielle NE-SW. En effet, les travaux de [Gazel et Gérard \(1954\)](#) ont défini les trajectoires de foliations régionales affectant la majeure partie de la région de l'Est voir du Cameroun. L'orientation directionnelle principale de cette foliation régionale est NE-SW avec des directions secondaires E-W, N-S et NW-SE. Ces résultats sont confirmés par les travaux de [Kankeu et al., \(2006\)](#) et [Kankeu, \(2008\)](#) utilisant l'anisotropie de la susceptibilité magnétique (AMS) pour évaluer l'intensité de la déformation et la géométrie de l'ellipsoïde de la déformation des formations géologiques à minéraux magnétiques. Se basant sur le fait que les minéraux de ces formations géologiques lors de la cristallisation suivent une orientation préférentielle, les roches qui en découlent portent à l'échelle régionale la tendance observée à l'échelle locale. Dans la zone de Bétaré Oya, [Kankeu \(2008\)](#) démontre que les foliations magnétiques suivent la direction NE-SW. L'observation de la carte de foliation obtenue par traitement des images LANDSAT OLI 8 ([fig. 25](#)) dans cette partie présente des similitudes et confirme l'orientation NE-SW des grands ensembles structuraux connus (BOSZ, CCSZ, SF). Dans le secteur de Ndokayo, les trajectoires de foliation suivent les directions E-W à NE-SW et parfois dessinent les formes plissées qui témoignent d'une déformation ductile ([fig. 25](#)). Dans la zone de Garga Sarali, les trajectoires de foliation suivent la même orientation que les trajectoires de la foliation magnétique mis en évidence par [Kankeu et al., \(2006\)](#) par la méthode AMS, à savoir E-W, NE-SW et NW-SE.

Les mesures de plans de foliation prises sur le terrain au niveau de Ndokayo et Bétaré Oya montrent les tendances directionnelles obtenues ([fig. 38](#)) à savoir NE-SW, E-W, N-S et NW-SE.

- **Linéaments**

L'analyse des images satellitaires a permis de générer 1149 linéaments. Ces linéaments ont été regroupés en famille de fractures multidirectionnelles de premier ordre (principale), de

second ordre (intermédiaire) de longueurs variables donnant une idée sur leur enracinement en profondeurs (fig. 24) et l'implication structurale et métallogénique qui en découle.

La répartition par famille directionnelle a permis de regrouper ces structures linéaires en huit (08) principales classes qui suivent des directions préférentielles particulières avec des ordres de grandeurs aussi différents, ressortant ainsi l'hétérogénéité géologique de la zone qui s'inscrit dans un régime de structures du système de Riedel (Riedel, 1984 ; Davis et al., 2000).

Les directions principales identifiées à la suite de l'analyse qualitative et quantitative des linéaments de notre zone d'étude sont par ordre de priorité NE-SW, ENE-WSW, NW-SE, N-S, E-W, ESE-WNW, NNW-SSE et NNE-SSW. Les directions NE-SW (D2) correspondent à la structure Riedel secondaire de type **P** qui sont les signatures lithologiques de la schistosité régionale (Kankeu et al., 2006 ; Kankeu, 2008). La direction ENE-WSW qui marque la phase D3 est la matérialisation de la foliation mylonitique (cisaillement principale dextre N070), regroupant les cisaillements aussi connu sous les vocables de Cisaillement Centre Camerounais (CCC), Faille de la Sanaga (FS), Cisaillement de Bétaré-Oya (CBO), Cisaillement de l'Adamaoua (CA) (Gazel & Gérard, 1954 ; Regnoul, 1986 ; Takoudjou et al., 2018). Les directions NW-SE et ESE-WNW représentent les structures Riedel de type **R'**. Les directions N-S et NNW-SSE correspondent aux structures Riedel secondaires de type **P'** et enfin la direction E-W (D2) représente les structures Riedel de type **R**. Les orientations ESE-WNW et NNW-SSE (D4) d'un point de vue cinématique sont les marqueurs du réajustement lié à la transpression formée durant l'orogénèse Panafricaine (Toteu et al., 2004 ; Kankeu et al., 2006 ; Kankeu, 2008).

La géométrie des structures met en lumière (fig. 25) un cisaillement dextre le long des structures NE-SW et ENE-WSW qui a facilité le développement des structures orientées NW-SE à ESE-WNW et E-W au cours de l'orogénèse Panafricaine (Nzenti et al. 1998 ; Njongfang et al., 2008; Kankeu et al., 2006; Pepogo et al., 2018). Les points de contacts soulignent des nœuds de fractures qui présenteraient un potentiel hydrique non négligeables et correspondraient à des zones à fort potentiel minier (fig. 46).

La superposition des éléments structuraux (linéaires et curvilignes) montre que les linéaments recoupent les trajectoires de foliation. Ce qui indique que la mise en place de la foliation est postérieure à la mise en place des fractures et de ce fait renseigne sur des épisodes de déformation tectonique distincts auxquels appartiennent chaque structure.

II.2 Corrélation entre les linéaments structuraux et la cartographie des sites miniers aurifères

La zone d'étude est marquée par une activité minière artisanale et sémi-mécanisée poussée (fig. 41). Cette dernière est soit alluvionnaire (au niveau des lits de cours d'eau), soit éluvionnaire (sur les flancs de collines) et primaire (sur les veines de quartz identifiées). L'exploration est rendue assez difficile à cause de la forte épaisseur du couvert latéritique et la rareté des affleurements. La corrélation entre les éléments structuraux et la cartographie des sites d'orpaillage peut constituer un outil d'orientation pour l'exploration. Les corrélations des occurrences aurifères le long des couloirs de failles coulissantes ont été identifiées dans la région de l'Est du Cameroun (Vishiti et al., 2015 ; Rakotondrabe et al., 2018). L'analyse de la carte des indices aurifères (fig. 41) met en lumière la distribution des teneurs aurifères dans les sites géolocalisés (fig. 44). La corrélation de tous ces résultats avec la carte structurale (fig. 45) permet de mieux comprendre la relation existante entre les structures et la minéralisation aurifère dans la définition des zones cibles.

La cartographie menée au cours de cette étude a consisté à collecter les informations sur la production de chaque site auprès des propriétaires et par moment à travers des tests de lavage à la bâtée. Il s'en est suivi la réalisation d'une base de données qui a permis de réaliser la carte de cibles potentielles du secteur Garga Sarali - Bétaré Oya.

Pour des besoins d'interprétation, 05 classes de teneurs ont été définies en utilisant le logiciel Arc GIS. Ces classes suivent une orientation conforme à celle des structures linéaires et curvilignes qui s'inscrivent dans un système de fractures Riedel.

- Les teneurs comprises entre 1,051 g/t et 2,83 g/t suivent les cours d'eau orientées NE-SW, correspondant à la foliation régionale affectant les formations géologiques de la zone.
- Les teneurs comprises entre 0,251 g/t - 1,05 g/t et 1,05 g/t – 1,50 g/t sont rencontrées tant au niveau des éluvions qu'au niveau des cours d'eau orientés NW-SE. Cette orientation est celle qui porte les teneurs les plus importantes à savoir 2,831 g/t – 5,02 g/t correspond aux minéralisations de type éluvionnaire bordant les cours d'eau qui sont des signatures des fractures d'orientation NW-SE (fig. 45).

- ***Relation entre la lithologie et les minéralisations aurifères : métallogènes et métallotectes lithologiques***

Les formations géologiques rencontrées sont de nature métamorphique à prédominance de schistes, granites et des veines de quartz bréchifiées (figs. 43 et 44). L'orientation du couloir à fort indice aurifère suit le NE-SW, correspondant à la zone de cisaillement de Bétaré Oya (BOSZ).

La corrélation entre la lithologie de la zone et les teneurs aurifères permet d'établir que les minéralisations aurifères dans le corridor Garga-Sarali – Bétaré Oya sont de deux (02) ordres :

- Les minéralisations aurifères liées au type pétrographique. Ici, (i) les formations schisteuses du Lom constituent le type pétrographique de concentration aurifère maximale. Les travaux de [Nih Fon Albert \(2012\)](#) et les résultats d'exploration de la société minière Caminco S.A montrent que les formations schisteuses du Lom qui sont facilement altérables sont caractérisées par une intrusion de réseau de veines de quartz aurifères fortement fragmentés (stockwerks) et (ii) les granitoïdes dont le lien génétique avec les minéralisations aurifères est lié à l'orogénèse panafricaine (640 – 620 Ma) ([Suh et al., 2016](#)).
 - Les minéralisations aurifères de type « *contact* » entre les faciès. On les observe autour et à l'Est de Garga-Sarali au contact entre (i) les gneiss et les granites porphyroïdes (0,251 – 1,05 g/t, 1,501 – 2,83 g/t et 2,831 – 5,02 g/t), (ii) les gneiss et les granites calco-alcalins (0,251 – 1,05 g/t) reconnus pour être le type pétrographique favorable au minéralisation Cu-Au ([Jensen et Barton, 2000](#) ; [Robb, 2005](#) ; [Goldfarb et al., 2005](#) et [Assah et al., 2014](#)) et (iii) les reliques de schistes et les gneiss au niveau du village de Kongolo.
- ***Relation entre les structures « non pénétratives » et les minéralisations aurifères : métallogènes et métallotectes structurales***

La corrélation entre la carte détaillée des linéaments et les teneurs aurifères montre une certaine concordance. Des teneurs comprises entre 0.251 – 1.05 g/t et 1.05 – 1.50 g/t ont été identifiées au niveau des cours d'eau orientés NE-SW et des zones d'éluvions. Des teneurs les plus élevées de l'ordre de 2,831 g/t à 5,02 g/t ont été obtenues au niveau des éluvions et proche des cours d'eau d'orientation NW-SE de façon hétérogène dans le reste de la zone en générale

et au niveau des contacts entre les structures NE-SW, NNE-SSW and NNW-SSE, E-W, ressortant ici le caractère conjugué des structures et la présence des nœuds de fractures.

Quatre prospects ont été définis en fonction de la lithologie, la distribution des teneurs moyennes en or et les éléments structuraux mis en évidence à travers le traitement des images satellites. En effet, il se dégage quatre (04) principales zones à forte occurrences aurifères (fig. 94). Ces zones sont marquées par l'intersection entre des familles directionnelles :

- NW-SE (**R'**) et NE-SW (**C**) à NNE-SSW pour le prospect A ;
- NE-SW (**C**) et NW-SE (**R'**) pour le prospect B ;
- NE-SW (**C**) à NNW-SSE et NW-SE (**R'**) pour le prospect C ;
- NNE-SSW (**P**) à N-S (**P'**) et NE-SW à NNW-SSE et E-W (**R**) pour le prospect D.

D'une façon générale, on observe que les linéaments suivent l'orientation structurale majeure NE-SW qui est celle de la série métamorphique et des accidents tectoniques reconnus dans la zone d'étude à savoir la BOSZ, la SF. Le réseau hydrographique dendritique qui est en fait la signature structurale des fractures profondes constitue les structures métallogènes à travers lesquelles les fluides riches en métaux ont circulé. Cette observation est confortée par la concentration des sites d'exploitation artisanale sur les flats et dans les environs immédiats desdits cours d'eau, abritant les fractures secondaires qui sont des structures métallotectes ou pièges à métaux.

Cette hétérogénéité ressort le caractère fortement fracturé de la zone d'étude qui a été mis en place à la suite de nombreux événements tectoniques ductiles et fragiles pendant l'orogénèse Panafricaine (Njonfang et al, 2008 ; Meying et al, 2009) dont les empreintes visibles (BOSZ, la SF et CCSZ) font du district minier de Garga Sarali – Bétaré Oya l'endroit idéal pour l'exploration des gisements aurifères (Gouet, 2013).

En effet, les travaux de Assah et al., 2014 dans la zone de Batouri qui présente le même contexte géologique que le secteur d'étude, permet d'établir que :

- Les fractures ou structures orientées NNW-SSE et WNW-ESE sont des structures pré-minéralisations ;
- Les fractures ou structures orientées NE-SW, NNE-SSW sont des structures syn-minéralisations ;
- Les fractures ou structures ENE-WSW sont post-minéralisations.

II.3 Caractérisation structurale du sous-sol par la méthode audiomagnétotellurique (AMT)

Les observations et les données recueillies sur le terrain, les données géologiques existantes, et la collecte des données géophysiques par la méthode audiomagnétotellurique montrent que la distribution en sub-surface de la résistivité le long des trois (03) profils est corrélable avec le contexte géologique et structural. La zone couvrant les sondages AMT ne présentent pas certes un signal d'anomalies de surface. Cependant, les résultats issus de l'interprétation des données a permis d'identifier en profondeur des zones de discontinuités (fracturations) et des couloirs très conducteurs qui marquent l'existence soit (1) des zones à forte concentration de fluides plus ou moins riches en substances utiles, soit (2) des nappes d'eau souterraines.

Le profil de Ndokayo se situe sur les granites porphyritiques (à deux micas), le profil Oudou quant à lui recoupe des gneiss porphyritiques et le profil Garga Sarali enfin est sur les schistes de Lom et les granites porphyritiques.

La forme irrégulière des isocontours de résistivité fortement resserrés, parfois plissés, verticales à sub-verticales et la déformation ayant affectée les formations rocheuses à travers les mylonites à tendances écrasés orientées mettent en évidence une activité tectonique intense dans le secteur d'étude. L'observation à l'échelle régionale de chaque profil AMT permet d'identifier un réseau de faille allant du profil Garga-Sarali jusqu'au profil Ndokayo (figs. 96 et 97). Cette structure mise en évidence a la même orientation que celle des lignes tectoniques connues plus connues sous le terme foliation régionale (Gazel et Gérard, 1954 ; Kankeu et al., 2006 ; Kankeu, 2008), qui elles-mêmes suivent l'orientation régionale NE-SW des évènements ayant affecté la chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale. Cette faille recoupe une autre faille connue au niveau de Ndokayo (Kankeu et al., 2006, Kankeu, 2008). Aussi, elle semble être une branche proche de la faille de la Sanaga qui passe par Garga Sarali et suit la même orientation ENE-WSW.

La ligne de faille mise en évidence résulterait des phases de déformation D2 responsable des structures régionales orientées E-W et NE-SW correspondants à la foliation des séries métamorphiques et D3 responsable du cisaillement en condition ductile. Cette observation est confortée par les résultats des auteurs ayant travaillé sur la chaîne Panafricaine (Nzenti et al., 1998 ; Ngako et al., 2001 ; Kankeu et al., 2006 ; Njonfang et al., 2008 ; Kankeu, 2008). La morphologie des profils de résistivités apparentes (en dent de scie), des pseudosections et des sections géoélectriques (forme ondulée) montre que les structures et formations géologiques

dont elles sont la réponse ont été déformées par plissement et fractures. Ces événements correspondent à l'orogénèse Panafricaine matérialisée par la présence de la BOSZ (Nzenti et al., 1998 ; Ngako et al., 2001 ; Kankeu et al., 2006 ; Njonfang et al., 2008 ; Kankeu, 2008).

La zone investiguée se situe à proximité de la transition entre le Panafricain et le Craton du Congo. Cette observation est confirmée par la présence en profondeur d'un mélange de matériaux très conducteurs et très résistifs, suggérant le prolongement du chevauchement entre le Panafricain et le craton du Congo en profondeur vers le nord de la zone d'étude. Cette observation est confortée par des études géophysiques par AMT menées au Sud Est de la zone d'étude (Ndougsa et al., 2012, Meying et al., 2009), et par la gravimétrie (Collignon, 1968 ; Mbom Abane, 1997 ; Tadjou, 2004 ; Tadjou et al., 2004) faisant état de la présence de la limite entre le Panafricain et le craton du Congo au-delà du parallèle 04° Latitude Nord.

Le NW des profils audiomagnétotelluriques sont situés à proximités de la zone de cisaillement de Bétaré Oya. Cette partie présente en profondeur des formations résistives qui affleurent presque à la surface. Dans la partie SE, ces formations sont aussi identifiées mais plus en profondeur en étant recouvertes en surface par des niveaux assez conducteurs. En effet, cette configuration mettrait en évidence une caractéristique de la zone de cisaillement de Bétaré Oya, qui ne serait pas seulement une zone de « cisaillement » mais aussi, une faille avec des compartiments soulevés et des compartiments affaissés (Gazel & Gérard, 1954 ; Castaing, 1994).

Conclusion

La zone d'étude du point de vue géologique appartient au domaine de l'Adamawa-Yadé. Cette région est constituée de granitoïdes déformés entrecoupés par un système de veines quartz aurifères et affectés par un métamorphisme de contact qui sont des éléments favorisant la mise en place des minéralisations riches en métaux. L'interprétation des résultats issus des profils audiomagnétotelluriques montrent à certains endroits des zones très conductives en profondeur qui correspondent à l'intersection des familles de linéaments orientés NE-SW à NNE-SSW et NW-SE à NNW-SSE. Ces zones pourraient être des endroits favorables soit à la présence filons de quartz ayant des métaux précieux et des filons ou corps minéralisés d'autres sulfures polymétalliques. Il a été mis en évidence un réseau de failles orientées ENE-WSW à NE-SW qui suit la trajectoire de la foliation mylonitique et la schistosité régionale connue pour être la zone favorable où l'exploitation artisanale est la plus abondante (figs. 96 et 97).

En définitive, il peut être établi dans le corridor Garga-Sarali – Bétaré Oya que les minéralisations aurifères observées lors de cette étude et qui font l'objet de l'intense activité d'exploitation artisanale éluvionnaire et alluvionnaire seraient contrôlées, par des structures qui sont les marqueurs d'une déformation intense reconnue aux événements tectoniques ayant affectées les formations du domaine de l'Adamaoua – Yadé (ADY) et dont les lithologies géologiques qui en résultent constituent aussi des métallotectes de concentrations importantes en or et substances connexes.

Conclusion générale et perspectives

*« Le défi de la vie c'est la patience pour atteindre
l'objectif », Abdel Kerfala Touré*

Conclusion générale

Le potentiel minier camerounais n'est plus à démontrer. Les études et travaux antérieurs et les travaux menés par des sociétés détentrices des permis de recherche montrent que le contexte géologique est favorable à la mise en place des substances à travers des épisodes tectono-métamorphiques, qui ont permis la remontée et la mise en place des zones de concentrations maximales. De nombreux permis de recherche sont attribués à des sociétés minières depuis des décennies. Toutefois, aucune mine industrielle n'est ouverte ce qui constitue un manque à gagner à l'Etat et l'absence d'une information géologique et minière qui est un outil de promotion et de vulgarisation du secteur minier. Le présent travail se veut un modèle de méthodologie qui peut être implémenté par les structures minières afin de permettre dans l'intervalle de temps que prévoit la loi de parvenir à mettre en évidence des zones potentielles qui peuvent être développées à travers une exploration détaillée.

Les résultats obtenus au terme de cette étude à travers la combinaison de plusieurs disciplines des géosciences revêtent un caractère d'outil méthodologique dans la séquence des opérations d'exploration géologique et minière, améliorent la connaissance de la structuration interne de la zone d'étude et de ce fait n'ouvre qu'un chemin dans la maîtrise du principe de contrôle structural de la minéralisation aurifère dans le district aurifère de Garga Sarali – Bétaré Oya.

Les formations géologiques de la zone d'étude bien que fortement recouvertes d'une épaisseur latéritique sont formées d'une lithologie constituée de formations sédimentaires ; des intrusions granitiques qui ont traversé les formations métamorphiques et qui sont observées soit sous forme de petits massifs isolés, soit sous forme de filons granitiques et de pegmatites qui représenteraient la phase magmatiques ultimes ; des roches métamorphiques constituées de granito-gneiss, des gneiss plus ou moins migmatites et des schistes ; des enclaves (schistes et matériels basiques). Les études antérieures ([Kankeu, 2008](#) ; [Kankeu et al., 2006 & 2009](#) ; [Toteu et al., 2001 & 2004](#) ; [Nzenti et al., 1998 & 1994](#)) et les données issues de la présente étude montrent que cet ensemble géologique porte par endroit des marqueurs de la déformation à savoir :

- une *D2* d'orientation E-W à NE-SW correspondant à la foliation générale des séries métamorphiques et des lignes tectoniques ;
- une *S2* observée au Sud-Est de la zone mylonitique majeure avec des pendages moyens à fort vers le NW, le SE et parfois le SW ;

- et une *L2* de plongement vers le NE-SW et qui se développe au sein des orthogneiss dioritiques ;
- et enfin une *D3* marqué par une *S3* caractérisée par une foliation redressée ou subverticale de direction générale ENE-WSW et une *C3* qui correspond au contact entre les granito-gneiss et les granites à l'échelle régionale.

L'étude des images satellitaires a permis de déterminer 1149 linéaments d'une longueur cumulée de 2213,85 km. La répartition par famille directionnelle a permis de regrouper ces structures linéaires en huit (08) principales classes qui suivent des directions préférentielles particulières avec des ordres de grandeurs aussi différents, ressortant ainsi l'hétérogénéité géologique de la zone. Les directions principales identifiées à la suite de l'analyse qualitative et quantitative des linéaments de notre zone d'étude sont par ordre de priorité NE-SW, ENE-WSW, NW-SE, N-S, E-W, ESE-WNW, NNW-SSE et NNE-SSW. En effet, les directions NE-SW correspondent à la structure Riedel de type **P** (schistosité régionale). La direction ENE-WSW (schistosité mylonitique) quant à elle, est la matérialisation du cisaillement principale dextre N070, regroupant les cisaillements aussi connu sous les vocables de Cisaillement Centre Camerounais (CCC), Faille de la Sanaga (FS), Cisaillement de Bétaré-Oya (CBO), Cisaillement de l'Adamaoua (CA). Les directions NW-SE et ESE-WNW représentent les structures Riedel de type **R'**. Les directions N-S et NNW-SSE correspondent aux structures Riedel de type **P'** et enfin la direction E-W représente les structures Riedel de type **R**.

La carte des linéaments met en évidence une foliation générale NE-SW affectant les formations géologiques et des nœuds des fractures constituées par leurs intersections qui présenteraient un potentiel hydrique non négligeable et correspondraient à des zones à fort potentiel minier. Ces nœuds apparaissent souvent avec un décalage plus ou moins marqué, mais à l'échelle d'observation satellitaire, ils sont parfois difficilement observables. Cependant, à certains endroits, on peut observer des zones de décrochements nets entre les linéaments, caractéristiques d'une zone de cisaillement.

Partant du secteur de Garga-Sarali jusqu'à Bétaré-Oya, 126 sites éluvionnaires et alluvionnaires ont pu être identifiés et cartographiés. Le profil type rencontré dans l'ensemble de la zone investiguée, d'épaisseur variant de 2 à 10 mètres est constitué d'un niveau organique, d'un niveau nodulaire graveleux, d'un niveau graveleux argileux à cuirasse latéritique, d'un niveau allotéritique (mélange graveleux argileux, sableux et/ou argileux limoneux) et de la saprolite rocheuse (niveau isaltéritique) qui est le plus souvent en contact avec la zone de gravier riche en minéralisation et dont l'épaisseur varie de 0,5 à 1,5 mètres. La teneur moyenne obtenue après lavage à la bête des graviers dans les 126 sites est de 1,54 g/t, avec une teneur maximale

de 5,02 g/t et une minimale de 0,05g/t. La base de données ainsi constituée a permis de réaliser des cartes prédictives des indices et teneurs. La corrélation de ces informations avec la lithologie de la zone montre que les formations schisteuses et les contacts entre les granites porphyroïdes constitueraient les zones de concentration préférentielle des minéralisations aurifères.

Quatre prospects ont été définis en fonction de la lithologie, la distribution des teneurs moyennes en or et les éléments structuraux mis en évidence à travers le traitement des images satellites. Le réseau hydrographique dendritique qui est en fait la signature structurale des fractures profondes constitue les structures métallogènes à travers lesquelles les fluides riches en métaux ont circulé. Cette observation est confortée par la concentration des sites d'exploitation artisanale sur les flats et dans les environs immédiats desdits cours d'eau, abritant les fractures secondaires qui sont des structures métallotectes ou pièges à métaux.

La cartographie des sites réalisée dans le cadre de cette étude a permis de mettre en relief la corrélation entre la tectonique, les indices aurifères et le réseau hydrographique. Cette architecture constitue une base fondamentale dans l'étude du contrôle structural et la réalisation de cartes prédictives dans le cadre de la métallogénie prévisionnelle.

La prospection géophysique par audiomagnétotellurique a été réalisée afin de répondre à un constat selon lequel la zone Garga-Sarali – Ndokayo ne présentait pas une forte activité d'exploitation artisanale en surface avec néanmoins la présence d'une dalle de cuirasses fortement indurées de plus de 4 mètres de profondeurs. L'appareillage, la méthodologie de collecte et de traitement des données ont permis d'atteindre des profondeurs assez considérables et de parvenir à mettre en lumière une cartographie de proche surface et de profondeur. Seize (16) points de sondages ou stations pour un linéaire cumulé de 14990 mètres ont permis de mettre en évidence un réseau de failles profondes d'orientation NE-SW. Des informations nouvelles ont été mises en lumière sur la structuration des couches ou formations géologiques, leurs contacts et les discontinuités géoélectriques. D'une observation générale, les formations géoélectriques cartographiées montrent une hétérogénéité marquée par des formes plissées, fracturées, cisailées. Cette morphologie renseigne sur le caractère ductilo-cassant de la tectonique dans la zone d'étude.

L'analyse et la modélisation des données audiomagnétotelluriques montrent l'existence des discontinuités électriques qui sont perçues comme des failles dont l'orientation est conforme à celle des éléments des linéaments mis en évidence par l'étude analytique satellitaire. Ces réseaux de failles mises en évidence sont liés aussi bien au Cisaillement Centre

Camerounais (CCC) qu'aux autres réseaux identifiés à travers des études antérieures par aéromagnétisme et gravimétriques effectuées aux abords de la zone d'étude.

L'analyse des pseudo-sections de résistivités et de phase, des sections géoélectriques montrent fait état de la présence en profondeur de formations conductives (Panafricain) et des formations résistives (Craton du Congo). Cette hétérogénéité renseigne sur le prolongement du chevauchement entre le Craton du Congo plus au nord et le prolongement de la limite entre Craton du Congo et le Panafricain au-delà du parallèle 04° Latitude Nord.

Le réseau de failles mises en évidence orienté NE-SW se serait formé vu leur enracinement lors des épisodes tectoniques durant l'orogénèse panafricaine directement liée au Cisaillement Centre Camerounais (CCC).

Des zones d'anomalies conductives ont été identifiées latéralement et verticalement sur les trois (03) profils audiomagnétotelluriques. Ces anomalies peuvent correspondre à la présence de fluides ou des corps minéralisés métalliques.

La zone de cisaillement de Bétaré Oya ne serait pas simplement une zone de cisaillement d'échelle régionale (Castaing, 1993, 1994) mais aussi une faille (Gazel & Gérard, 1954). L'analyse de la disposition et de la morphologie des sections géoélectriques des profils Garga Sarali, Ndokayo et Oudou mettant en évidence les variations de la résistivité en fonction de la profondeur montre que le bloc ouest de la faille de Bétaré Oya constitué des formations du Lom est le compartiment soulevé et le bloc Est constitué des granitoïdes est le compartiment affaissé.

En définitive, une corrélation faite entre les différents résultats obtenus ont permis d'identifier des zones prédictives ou des teneurs assez considérables issues des tests à la bâlée ont été enregistrées. Ces zones se situent à l'intersection des structures métallogènes et métallotectes.

Perspectives

Au terme de cette étude des réponses ont été apportées et des faits nouveaux établis. Toutefois, ces réponses ont ouvert des axes de recherches qui permettront d'améliorer la compréhension sur le contrôle structural de la minéralisation dans les formations géologiques de la région de l'Est. Il est prévu à cet effet de mener:

- une étude cinématique de la déformation à travers une collecte intense des mesures structurales ;

- une cartographie géophysique additive par des méthodes aéromagnétiques (cartographie des linéaments, la modélisation 2D.75 pour la structuration des couches magnétiques afin de proposer un modèle de distribution des minéralisations), et géoélectriques à maille serrée ;
- une cartographie géologique détaillée des zones prédictives prioritaires où des teneurs ont été obtenues et suivant l'orientation qui contrôle la minéralisation.

Références bibliographiques

- Akame, J.M., Mvondo, O.J., Assatse, T.W., Owona, S., Olinga, J.B, Messi, O.E.J, Ntomba, S., (2014). Apport des images landsat-7 ETM+ à l'étude structurale du socle archéen de Sangmélina (Sud -Cameroun). *Rev. Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 206, 15-25.
- Akwinga, V.A., Basem, Z., Bernd, L., Dirk, F., Ray, B., Cheo, E.S. (2014). Geochemistry and geochronology of the ~620 Ma gold-associated Batouri granitoids, Cameroon, *International Geology Review*, DOI: [10.1080/00206814.2014.951003](https://doi.org/10.1080/00206814.2014.951003)
- Alfvén, H.Py. (1942). Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves. *Nature*. DOI: 10.1038/1504050
- Béa, A., Cochemé, J. J., Trompette, R., Affaton, P., Soba, D. & Sougy, J. (1990). Grabens d'âge Paléozoïque inférieur et volcanisme tholéïitique associé dans la région de Garoua, Nord Cameroun. *Journal of African Earth Sciences*, 10, 657-667.
- Bessoles, B. and Lasserre, M. (1977). Le complexe de base au Cameroun. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 19, 1085-1092.
- Bisso, D., Manguelle-Dicoum, E., Ndougasa-Mbarga, T., Tabod, C. T., Njandjock, N. P., Njingti, N., Tadjou, J. M. and Essono, J. (2004). Geophysical Determination of the Sanaga Fault using Audio-magnetotelluric soundings in the Ebedda region, Cameroon. *SEGMITE International*, 1(1), 31-34.
- Bobrov, M. S. (1961). Planetary maps of geomagnetic disturbances of corpuscular origin. In: *Solar Corpuscular Currents*, n° 1, Resultati MGG, Moscow. 36-94.
- Bostick, F.X. (1977). A simple almost exact method of MT analysis. In : *Workshop on Electrical Methods in Geothermal Exploration, US Geol. Survey, Contract N° 14080001- 8-359: 174-183.*
- Cagniard, L. (1953). Basic Theory of the Magnetotelluric Method of Geophysical Prospecting. *Geophysics*, Vol. 18, No. 3, 1953, 605-635. [doi:10.1190/1.1437915](https://doi.org/10.1190/1.1437915)
- Castaing, C., Feybesse, J.L., Thieblemont, D., Triboulet, C., Chevremont, P. (1994). Paleogeographical reconstructions of the Pan-African/Brasiliano orogeny: closure of an oceanic domain or intracontinental convergence between major blocks. - *Precambrian Research*, 69, 327-344.
- Chapman, S. & Bartels J. (1940). Geomagnetism, In *The magnetotelluric sounding methods*, A. A. Kaufman and G. Keller (1981), Oxford university press, Oxford, 1049 p.

- Chapman, S. (1964). Solar plasma, geomagnetism and polar lights. In: Geofisika, Okolozemnoe Kosmicheskoe Prostranstvo. Goptekhnizdat, Moscow, 243-382.
- Collignon, F. (1968). Gravimétrie de reconnaissance de la République Fédérale du Cameroun. *Ostolm (Paris)*, 35p.
- Cornachia, M. & Dars, R. (1983). Un trait structural majeur du continent africain : Les linéaments centrafricains du Cameroun au golfe d'Aden. *Bulletin Société. Géologique. Fr.*, 25: 101-109.
- Davis, G.H., Bump, A.P., Garcia, P.E., Ahlgren S.G., 2000. Conjugate Riedel deformation band shear zones. *Journal of Structural Geology* 22, 169-190.
- Eberhart-Phillip, D., Stanley, W.D., Rodriguez, B.D., Lutter, W.J. (1995). Surface seismic and electrical methods to detect fluids related to faulting. *Journal of Geophysical Research*. 100, no. B7, 12, 919-12,936.
- Ekwueme, B. N. & Kröner, A. (1997). Zircon evaporation ages and chemical composition of a migmatitic schist in the Obudu plateau: evidence for Paleoproterozoic (ca.1789 Ma) component in the basement complex of southeastern Nigeria. *Journal of Mining and Geology*, 33, 81-88.
- Ekwueme, B. N. & Kröner, A. (1998). Single zircon evaporation ages from the Oban Massif, southeastern Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 26, 195-205.
- El Hadani, D. (1997). Télédétection et Systèmes d'Information Géographique pour la gestion et la recherche de l'eau. *Géo-Observateur. Les Rapport Thématiques* 1, 28 p.
- Eno Belinga, S.M. (1984). Géologie du Cameroun. *Univ. Yaoundé (Cameroun)*, 307p.
- Ferré, E. C., Déléris, J., Bouchez, J. L., Lar, A. U. & Peucat, J.-J. (1996). The Pan-African reactivation of Eburnean and Archaean provinces in Nigeria: structural and isotopic data. *Journal of the Geological Society, London*, 153, 719-728.
- Ferré, E. C., Gleizes, G. & Caby, R. (2002). Obliquely convergent tectonics and granite emplacement in the Trans-Saharan belt of Eastern Nigeria: a synthesis. *Precambrian Research*, 114, 199-219.
- Ganno, S., Nzenti, J.P., Ngnotue, T., Kankeu, B., Kouankap, N.G.D. (2010). Polyphase deformation and evidence for transpressive tectonics in the kimbi area, Northwestern Cameroon Pan-African fold belt. *Journal of Geology and Mining Research* 2 (1), 001–015.

Ganwa, A. A. (1988). Caractérisation géologique d'une unité structurale de la déformation tangentielle panafricaine dans la région de Ndom, secteur Kombé II-Mayabo Yaoundé. Doctorat de 3ème Cycle, Université de Yaoundé I (Cameroun).

Garcia, X., Jones, A.G. (2002). Atmospheric sources for audio-magnetotelluric (AMT) soundings. *Geophysics.*, 67, no. 2, 448-458.

Gazel, J., Gerard, G. (1954). Carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1/500000, Feuille Batouri-Est avec une notice explicative. Archives de la Direction des Mines et de la Géologie. Yaoundé, Cameroun, 43p.

Gbele, O., Gnammytchet, B.K., Kouakou, A.Y. (2012). Contribution des images satellitales LANDSAT 7 ETM+ à la cartographie lithostructurale du Centre-Est de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). *International Journal of Innovation Applied Studies* 1 (1), 61-75. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00771925>.

Genik, G.J. (1992). Regional framework, structural and petroleum aspect of rift bassins in Niger, Chad and the Central African Republic (C.A.R.). In: P.A. Ziegler (Editor), *Geodynamics of Rifting*, vol II. Case history studies on Rifts: North and South America and Africa. *Tectonophysics*, 213: 169-185.

Geometrics. (2000). Operation manual for Stratagem systems running IMAGEM. *ver. 2.16: Geometrics, San Jose, California.*

Gouet, D.H., Ndougssa, M.T., Meying, A., Assembe, S.P., Man-mvele, P.A.D. (2013). Gold mineralization channels identification in the Tindikala-Boutou area (Esatern-Cameroon) using geoelectrical (DC/IP) methods: a case study. *International journal of geosciences*, 4, 643-655. <https://doi:10.423/ijg.2013.43059>

Groves, D. I., Goldfarb R. J., Gebre-Mariam M., Hagemann S. G., Robert F. (1998). Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13: 7–27.

Kankeu, B. (2008). Anisotropie de la susceptibilité magnétique (AMS) et fabriques des roches Néoproterozoïques des régions de Garga-Sarali et Bétaré-Oya à l'Est Cameroun : Implication géodynamiques pour l'évolution de la chaîne pan-africaine d'Afrique Centrale. Thèse Doctorat/PhD. Univ. Yaoundé I. 232p.

Kankeu, B., Greiling, R.O. (2006). Magnetic fabrics (AMS) and transpression in the Neoproterozoic basement of Eastern Cameroon (Garga-Sarali area). *Neues Jahrbuch fur Geologie und Palaontologie –Abhandlungen* 239, 263–287.

- Kankeu, B., Greiling, R.O., Nzenti, J.P. (2009). Pan-African strike–slip tectonics in eastern Cameroon-magnetic fabrics (AMS) and structure in the Lom basin and its gneissic basement. *Precambrian Research* 174 (3-4), 258-272.
- Keller, G. V. (1987). Rock and mineral properties, in Nabighian, M. N., ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics theory: Tulsa, Okla., SEG, Tulsa,1: p.13-51*.
- Kennedy, W.Q. (1964). The structural differentiation of Africa in the Panafrican (~500Ma) tectonic episode. 8th Ann. Rep. Res. Inst. Geol. Leeds Univ. 48-49 p.
- Koffi, G.B. (1998). Possibilités et limites des images Radar ERS en cartographie géologique; Applications en Côte-d'Ivoire. *Thèse doctorat., Université. Pierre et Marie Curie (Paris VI)*, 207 p.
- Koziar, A., Strangway, D.W. (1978). Permafrost mapping by audio frequency magnetotelluric, *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 1535-1546. 15p
- Lopez, A., Nezry, E., Touzi, R., Laur, H. (1993). Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR image. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, n° .9, 1735-1758.
- Mbom-Abane, S. (1997). Investigation géophysique en bordure du Craton du Congo (région d'Abong-Mbang / Akonolinga, Cameroun) et implications structurales. Thèse Doctorat d'Etat ès Sciences, *Université de Yaoundé I, Fac. Sciences*. 187.
- McPhee, D.K., Chuchel, B.A., Pellerin, L. (2008). Audiomagnetotelluric data and preliminary two-dimensional models from Spring, Dry Lake, and Delamar Valleys, Nevada. *U.S. Geological Survey Open-File Report, 2008-1301*, pp. 59.
- Mero, Y., Cheo, Suh, C.E., Mboudou, M. (2015). Quartz veins characteristics and Au mineralization within the Batouri Au district, East Cameroon. *Science Research*. Vol.3,No4,2015,pp.137- 149. <https://doi:10.11648/j.sr.20150304.12>
- Meying, A., Ndougsa, M.T., Manguelle, D.E. (2009). Evidence of fractures from the image of the subsurface in the Akonolinga-Ayos area (Cameroon) by combining the classical and the Bostick approaches in the interpretation of audio-magnetotelluric data. *Journal of Geology and Mining Research* 1 (8) 159-171.
- Montes-Lauar, C. R., Trompette, R., Melfi, A. J., Bellieni, G., De Min, A., Béa, A., Pecerrillo, E. M., Affaton, P. & Pacca, I. G. (1997). Pan-African Rb–Sr isochron of magmatic rocks from northern Cameroon. Preliminary results. *South American Symposium on isotope geology, Brazil*.

- Moussa, I. (2011). Croissance et différenciation crustales au Néoprotérozoïque Exemple du domaine panafricain du Mayo Kebbi au Sud-Ouest du Tchad. Thèse Doctorat/PhD l'Université Henri Poincaré, Nancy I. 345p.
- Mvondo, H., Den-Brok, S.W.J., Mvondo-Ondoa, J. (2003). Evidence for symmetric extension and exhumation of the Yaoundé nappe (Pan-African Fold Belt, Cameroon). *Journal of African Earth Sciences*, 35: 215-231.
- Mvondo, H., Owona, S., Mvondo-Ondoa, J. & Essono, J. (2007). Tectonic evolution of the Yaoundé segment of the Neoproterozoic Central African Orogenic Belt in southern Cameroon. *Canadian Journal Earth Sciences*, 44: 433-444.
- Ndougssa-Mbarga, T., Feumoe, A.N.S., Manguelle-Dicoum, E., Fairhead, J.D. (2012). Aeromagnetic data interpretation to locate buried faults in south-east Cameroon, *Geophysics*, 48, no. 1-2, 49–63, 2012.
- Ndougssa-Mbarga, T., Manguelle-Dicoum, E., Tabod, C .T. & Mbom-Abane, S. (2003). Modelisation d'anomalies gravimétriques dans la région de Mengueme-Akonolinga (Cameroun). *Sciences Technology Development*, 10: 67-74
- Ndougssa-Mbarga, T., Meying, A., Bisso, D., Layu, Y.D, Sharma, K.K., Manguelle-Dicoum, E. (2011). Audiomagnetotellurics (AMT) soundings based on the Bostick approach and evidence of tectonic features along the northern edge of the Congo Craton, in the Messamena/Abong-Mbang area (Cameroon),” *Journal of Indian Geophysical. Union*, 15, 3, 145–159,
- Nédélec, A., Macaudière, J., Nzenti, J. P. & 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 de l'Académie des Sciences, Sciences de la Terre et des Planètes*, 303, 75-80.
- Nesbitt, B.E. (1993). Electrical resistivity of crustal fluids. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98, B. <https://doi.org/10.1029/92JB02576>.
- Ngako, V. (1986). Evolution métamorphique et structurale de la bordure sud-ouest de la "série de Poli", segment camerounais de la chaîne panafricaine. Doctorat de 3ème Cycle, Centre armoricain d'études structurales des socles, Rennes (France), 185.
- Ngako, V., Affaton P., Nnange, J.M., Njanko, T. (2003). Pan-African tectonic evolution in central and southern Cameroon: Transpression and transtension during sinistral shear movements,” *Journal of African Earth Sciences*, 36. 3, 207–214.

- Ngako, V., Jegouzo, P., Nzenti, J.P. (2001). Le Cisaillement Centre Camerounais. Role structural et géodynamique dans l'orogénèse panafricaine. *C.R Acad. Sci.*, 313: 457-463.
- Ngnotué, T., Nzenti, J. P., Barbey, P. & Tchoua, F. M. (2000). The Ntui-Betamba high-grade gneisses: a northward extension of the Pan-African Yaoundé gneisses in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 31, 369-381.
- Niblett, E. R., Sayn-Wittgenstein, C. (1960). Variation of electrical conductivity with deep by the magneto telluric method. *Geophysics*, 25, 998-1008.
- Nih F. A., Bih V. C., Cheo E. S. (2012). Application of electrical resistivity and chargeability data on a GIS platform in delineating auriferous structures in a deeply weathered lateritic terrain, Eastern Cameroon. *International Journal of Geosciences*, 2012, 3, 960-971. <https://doi:10.4236/ijg.2012.32097>
- Njel, U. O. (1988). Contribution à l'étude de l'orogénèse panafricaine. La ceinture volcanosédimentaire de Poli (Nord-Cameroun): lithostratigraphie, pétrographie, géochimie, minéralisations cuprifères associées. Doctorat de 3^{ème} Cycle INPL, Nancy (France), INPL, 220.
- Njonfang, E., Ngako, V., Moreau, C., Affaton, P., Diot, H. (2008). Restraining bends in high temperature shear zones, the Central Cameroon Shear Zone, Central Africa. *Journal of African Earth Sciences* 52 (1-2), 9–20.
- Nzenti, J. P. (1987). Pétrogenèse des migmatites de Yaoundé (Cameroun) : éléments pour un modèle géodynamique de la Chaîne Panafricaine Nord-Equatoriale. Doctorat de 3^{ème} Cycle, Université de Nancy I (France), 147.
- Nzenti, J. P. (1998b). Neo-proterozoic alkaline meta-igneous rocks from the Panafrican north equatorial fold belt (Yaoundé, Cameroon): biotite and magnetite rich pyroxenite. *Journal of African Earth sciences*. 26, 37-47.
- Nzenti, J. P., Barbey, P., Jegouzo, P. & Moreau, C. (1984). Un nouvel exemple de ceinture granulitique dans une chaîne Protérozoïque de transition : les migmatites de Yaoundé au Cameroun. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Sciences de la Terre et des Planètes*, 17, 1197-1199.
- Nzenti, J. P., Barbey, P., Macaudière, J. & Soba, D. (1988). Origin and evolution of the late Precambrian high grade Yaoundé gneisses (Cameroon). *Precambrian Research*, 38, 91-109.

- Nzenti, J. P., Ngako, V., Kambou, R., Penaye, J., Bassahak, J. & Njel, O. V. (1992). Structures régionales de la chaîne panafricaine du Nord Cameroun. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Sciences de la Terre et des Planètes*, 315, 209-215.
- Nzenti, J.P., Barbey, P., Bertrand, J.M., Macaudiere J. (1994). La chaîne Panafricaine au Cameroun : cherchons suture et modèle,” in *Proceedings of the Réunion des Sciences de la Terre in S.G.F.*, France, Nancy, France.
- Nzenti, J.P., Barbey, P., Tchoua, F.M. (1998). Evolution crustale au Cameroun, éléments pour un modèle géodynamique de l’orogénèse Néoprotérozoïque. Ed. collect. GEOCAM, 2/1999, Press. University of Yaoundé, 397-407.
- Olinga, J. B., Mpesse, J. E., Minyem, D., Ngako, V., Ndougsa-Mbarga, T. & Ekodeck, G. E. (2010). The Awaé - Ayos strike-slip shear zones (Southern-Cameroon): Geometry, kinematics and significance in the late Panafrican tectonics. *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, 257(1), 1-11.
- Palacky, G.J., (1987). Resistivity characteristics of geologic targets, in Nabighian, M.N., ed, *Electromagnetic methods in applied geophysics theory: Tulsa, Okla, Society of Exploration Geophysicists*, v.1. 53-129.
- Parasnis, D. S. (1997). *Principles of Applied Geophysics*. 5th edition Chapman and Hall, London, England. 124-125.
- Paterson, G., Watson, Ltd. (1976). Etude aéromagnétiques sur certaines régions de la République Unie du Cameroun. Rapport d’interprétation. A.C.D.I. Toronto, 192 p.
- Penaye, J. (1988). Pétrologie et structure des ensembles métamorphiques au Sud-Est de Poli (Nord–Cameroun). Rôles respectifs du socle protérozoïque inférieur et de l'accrétion crustale pan-africaine. Doctorat de 3ème Cycle, INPL, Nancy (France), 196 p.
- Penaye, J., Toteu, S. F., Van Schumus, W. R. & Nzenti, J. P. (1993). U-Pb and Sm-Nd geochronologic data on the Yaoundé series, Cameroon: reinterpretation of the granulitic rocks as the suture of a collision in the "Centrafrican belt". *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Sciences de la Terre et des Planètes*, 317, 789-794.
- Pepogo, M.A.D., Ndougsa, M.T., Meying, A., Ngoh, J.D., Mvondo, O.J., Ngoumou, P.C. (2018). New geological and structural facts under the lateritic cover in Garga Sarali, Ndokayo (East Cameroon) area, from audiomagnetotelluric soundings. *International Journal of Geophysics*, 17. <https://doi.org/10.1155/2018/4806357>.

Pin, C. & Poidevin, J. L. (1987). U-Pb zircon evidence for Pan-African granulite facies metamorphism in Central African Republic. A new interpretation of the high-grade series of the northern border of the Congo craton. *Precambrian Research*, 36, 303-312.

Poidevin, J. L. (1985). Le Protérozoïque supérieur de la République Centrafricaine. *Ann. Mus. Roy. Afr. Centr., Tervuren, serie in-8, Sci. Geol., 91, 74p.*

Poidevin, J. L. (1991). Les ceintures de roches vertes de la République Centrafricaine. Contribution à la connaissance du précambrien du nord du craton du Congo. Doctorat d'Etat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand (France).

Rakotondrabe, F., Ngoupayou J., Mfonka Z., Rasolomanana E., Abolo A., Ako A. (2018). Water quality assessment in the Betare-Oya gold mining area (East-Cameroon): Multivariate statistical analysis approach. *Science of the Total Environment* 610-611, 831-844.

Regnault, J.M. (1986). Synthèse géologique du Cameroun. Publication of the Directorate of Mines & Géologique du Cameroun, 119 p.

Riedel, S. (1984). The Saddle Mountains; the evolution of an anticline in the Yakima fold belt. *American Journal of Science* 284, 942-978.

Rocci, G. (1965). Essai d'interprétation des mesures géochronologiques. La structure de l'Ouest africain. *Sciences de la Terre, Fr., 10 :3-4, 461-479*

Rolet, J., Yesou, H., Besnus, Y. (1993). Structures circulaires et réseaux de fractures en pays granitique. Analyse de données SPOT, Landsat TM et Seasat sur le Massif armoricain. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 164, 2, 199-214.

Rolin, P. (1992). Présence d'un chevauchement ductile majeur d'âge Panafricain dans la partie Centrale de la R.C.A. (Afr. Centr.) ; résultats préliminaires. *C. R. Acad. Sci., Paris, 315 (II), 467-470.*

Rolin, P. (1995). La zone de décrochement panafricain des Oubanguides en République Centrafricaine. *C.R. Acad. Sc., Paris, 320(IIA) : 63-69*

Scanvic, J.Y., Dutartre, Ph., King, Ch. (1984). Correlation between spatial remote sensing, geochemical and geophysical data in the western France: an integrative and orientation technique for geological mapping and ore exploration. In: Teleki P. and Weber C Eds., *Remote sensing for geological mapping. IUGS*, 18: 57-58.

Shang, C K., Satir, W. S. M. Chen, F. Mvondo- Ondoua, J. (2004). Zircon Pb-Pb and U-Pb systematics of TTG rocks in the Congo Craton: Constraints on crust formation, magmatism, and Pan-African lead loss. *Bulletin of Geosciences*, 7(4) 205-219.

Soba, D. (1989). La série du Lom étude géologique et géochronologique d'un volcano-sédimentaire de la chaîne panafricaine à l'Est du Cameroun. Doctoral Thesis, Univ. Pierre et Marie Curie Paris, 198 p.

Soba, D., Michard, A., Toteu, S. F., Norman, D. I., Penaye, J., Ngako, V., Nzenti, J. P. & Dautel, D. (1991). Données géochronologiques nouvelles (Rb–Sr, U–Pb, Sm–Nd) sur la zone mobile panafricaine de l'Est Cameroun : âge Protérozoïque supérieur de la série de Lom. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Sciences de la Terre et des Planètes*, 315, 1453-1458.

Strangway, D.W., Swift, C. M and Holmer, R.C. (1973). The application of audio-frequency magnetotellurics (AMT) to mineral exploration. *Geophysics* 38, 1159-75.

Suh, C.E., Lehmann, B., Mafan, G.T. (2006). Geology and geochemical aspects of lode gold mineralization at Dimako- Mboscorro, SE Cameroon. *Geochemical Exploration Environment, Analysis* 6, 295-309.

Tadjou, J., Manguelle-Dicoum, E., Tabod, C., Nouayou, R., Kamguia, J., Njandjock, N., Ndougsa, M.T. (2004). Gravity modelling along the northern margin of the Congo Craton, South-Cameroon. *J. Cameroon Acad. Sci.* 4. 51-60.

Tadjou, J.M. (2004). Apport de la gravimétrie à l'investigation géophysique de la bordure septentrionale du Craton du Congo (Sud Cameroun). Thès. Doctorat/Ph.D. Univ. Yaoundé I. 178p.

Takodjou, W.J.D., Ganno, S., Afahnwie, N.A., Nomo, N.E., Mvondo, O.J., Nzenti, J.P. (2016). Use of LANDSAT 7 ETM+ data for geological structure interpretation: case study of the Ngoura-Colomines Area, Eastern Cameroon. *Journal of Geosciences and Geomatics* 4 (3), 61-72. <https://doi.org/10.12691/jgg-4-3-3>.

Takodjou, W.J.D., Ganno, S., Djonthu, L.Y.S., Kouankap, N.G.D., Fossi, D.H., Tchouatcha, M.S., Nzenti, J.P. (2018). Geostatistical and GIS analysis of the spatial variability of alluvial gold content in Ngoura-Colomines area, Eastern Cameroon: Implications for the exploration of primary gold deposit. *Journal of African Earth Sciences* 142, 138-157.

Tchakounte, J. (1999). Etude géologique de la région d'Etoundou-Bayomen dans la série de Bafia (Province du Centre). Tectonique, géochimie et métamorphisme. Doctorat de 3^{ème} Cycle, Université de Yaoundé I (Cameroun).

Tchameni, R., Pouclet, A., Penaye, J., Ganwa, A. A. & Toteu, S. F. (2006). Petrography and geochemistry of the Ngaoundéré Pan-African granitoids in Central North Cameroon: Implications for their sources and geological setting. *Journal of African Earth Sciences*, 44, 511-529.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., Keys, D. A. (1990). *Applied geophysics*. 2th edition Cambridge University press, Cambridge, G B, 770 p.

Thorne, K.G. (2011). L'or. Ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick, Division des terres, minéraux et pétrole, Profit des minéraux commercialisables, no. 8,9 p.

Tikhonov, N.A. (1950). On determining electric characteristics of the deep layers of the earth's crust. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*. 73.

Toteu, S. F., Michard, A., Bertrand, J. M. & Rocci, G. (1987). U/Pb dating 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., Nyobe, J.B. (1994). U-Pb and Sm-Nd evidence for Eburnean and Pan-African high-grade metamorphism in cratonic rocks of southern Cameroon. *Precambrian Research* 67, 321-347.

Toteu, S. F., Macaudière, J., Bertrand, J. M. & Dautel, D. (1990). Metamorphic zircons from North Cameroon; implications for the Pan-African evolution of Central Africa. *Geologische Rundschau*, 79, 777-788.

Toteu, S. F., Van Schumus, 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.

Toteu, S.F., Penaye, J., and Djomani, Y.P. (2004). Geodynamic evolution of the Pan-African belt in central Africa with special reference to Cameroon: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 41, 73–85. doi:[10.1139/e03-079](https://doi.org/10.1139/e03-079).

Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., and Penaye, J. (2006b). The Precambrian of Central Africa: Summary and perspectives: *Journal of African Earth Sciences*, v. 44, p. doi:[10.1016/j.jafrearsci.2005.12.002](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.12.002)

- Touzi, Ridha., Lopes, Armand., Bousquet, P. (1988). Statistical and geometrical edge detector for SAR images. *Geosciences and Remote Sensing, IEEE Transactions on.* 26. 764 – 773, doi:10.1109/36.7708.
- Unrug, R. (1997). Rodinia to Gondwana: the geodynamic map of Gondwana sipercontinent assembly. *GSA Today* 7, 1-6.
- Van Schumus, W,R., Oliveira, E.P., Da Silva Filho, A.F., Titeu, S.F., Penaye, J., Guimarães, I.P. (2008). Proterozoic links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African Fold Belt. In: Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., de Brito Neves, B.B., De Wit, M.J. (Eds), *West Gondwana. Pre-Cenezoic correlations across the South Atlantic Region*, 294. Geological Society, London, pp. 69-99, Special Publication.
- Vishiti, A., Suh, C.E., Lehmann, B., Egbe J., Shemang E. (2015). Gold grade variation and particle microchemistry in exploration pits of the Batouri gold district, SE Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 111, 1-13.
- Vozoff, K. (1972). The Magnetotellurics method in the exploration of sedimentary basins. *Geophysics*, 37: 98-141.
- Vozoff, K. (1990). Magnetotelluric principles and practice. *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Sci.)*, 99(4): 441-471.
- Vozoff, K. (1991). The magnetotelluric method. in *Nabighian, M. N. ed., Electromagnetic methods in applied geophysics: Tulsa, Okla, Society of Exploration Geophysicists, v. 2, part B, 641-711.*
- Yesou, H., Saint-Jean, R., Pion, J.C., Besnus, R. (1993). Amélioration des données SPOT pour la cartographie structurale en milieu tropical. Exemple de la région des chapeaux de fer de Pagala (Togo). In J.M.M. Dubois et F. Blasco (eds). *Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. Série Actualité Scientifique, Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 492 p.*
- Yonta, N.C. (2010). Le contexte géologique des indices de talc de la région de Boumnyebel (Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale, Cameroun). Thesis Doctoral Etat. Universtiy of Yaoundé I., 425 p.
- Youan, Tam., Lasm, T., Jourda, J.P., Kouame, K.F., & Razack, M. (2008). Cartographie structural par imagerie satellitaire ETM+ de Landsat-7 et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la region de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). *Revue télédétection*, vol.8, n°2, 119-135 p.

Zhdanov, M.S. (2009). Magnetotelluric and magneto-variational methods. *Geophysical Electromagnetic Theory and Methods*, vol., 45, 545-645.

Zonge, K. L. and Hughes, L. J. (1991). Controlled source audio-frequency magnetotellurics. *in Nabighian, M. N. ed., Electromagnetic methods in applied geophysics: Tulsa, Okla, Society of Exploration Geophysicists, v. 2, part B. 713-809.*

Annexes

1. Quelques photo de terrains



Figure annexe 1: Une vue de la prise de données par l'équipe (gauche) et de console AMT (droite).



Figure annexe 2: Une vue du module analogique (gauche) et de l'équipe lors de la prise de mesure.



Figure annexe 3: Equipe de collecte en arrêt dans le village Woumbou (gauche). Présentation de la plaque indicative de la ville de Béтарé Oya.



Figure annexe 4: Une vue de l'antenne permettant d'intensifier le signal (gauche). Le candidat connectant le module aux câbles.



Figure annexe 5: Prise de mesure sur une dalle granito gneissique dans la localité de Oudou – Garga Sarali.






Figure annexe 6: Une vue de la dalle granito gneissique dans la zone de Garga Sarali.

2. Publication issue de la thèse

Pepogo Man-mvele Augustin Didier, Ndougsa-Mbarga Théophile, Meying Arsène, Ngoh Jean Daniel, Mvondo-Ondoua Joseph et Ngoumou Paul Claude. (2018). New Geological and Structural Facts under the Lateritic Cover in Garga Sarali, Ndokayo (East Cameroon) Area, from Audiomagnetotellurics Soundings. *International Journal of Geophysics*. Vol (2018), Article ID 4806357, 17 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/4806357>

Research Article

New Geological and Structural Facts under the Lateritic Cover in Garga Sarali, Ndokayo (East Cameroon) Area, from Audiomagnetotellurics Soundings

Pepogo Man-mvele Augustin Didier ^{1,2},
Ndougsa-Mbarga Théophile ^{2,3}, **Meying Arsène** ⁴, **Ngoh Jean Daniel**,²
Mvondo-Ondoua Joseph,¹ and **Ngoumou Paul Claude**³

¹Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences, University of Yaoundé I, P.O. Box 812, Yaoundé, Cameroon

²Postgraduate School of Science, Technologies & Geosciences, University of Yaoundé I, P.O. Box 812, Yaoundé, Cameroon

³Department of Physics, Advanced Teacher's Training College, University of Yaoundé I, P.O. Box 47, Yaoundé, Cameroon

⁴School of Geology and Mining and Engineering, University of Ngaoundéré, Ngaoundéré, Cameroon

Correspondence should be addressed to Pepogo Man-mvele Augustin Didier; augustin.pepogo@hotmail.com and Ndougsa-Mbarga Théophile; tndougsa@yahoo.fr

Received 28 August 2017; Revised 3 December 2017; Accepted 14 January 2018; Published 22 March 2018

Academic Editor: Yun-tai Chen

Copyright © 2018 Pepogo Man-mvele Augustin Didier et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

New geological and structural facts have been identified under the auriferous lateritic cover in Garga Sarali, Ndokayo area. Data were collected using AMT receiver system with frequencies ranging from 20 Hz to 50000 Hz. It consists of 16 AMT stations along 03 profiles, over Pan-African formations of East Cameroon. The wide frequency range enabled us to probe deep into the subsurface to obtain necessary information. Using Imagem software, coherency of data has been evaluated and only the data with a coherency below or equal to 0.7 have been considered. Two programs were used to map the subsurface. The pseudosections were obtained using IPI2WIN-MT, while geoelectrical sections were obtained using Stratagem Resistivity Plotter. Analysis of the curves of dimensionality tests shows that there is not always a complete superposition between the two telluric directions, translating the fact that the variation of the resistivity is not 1D, but rather 2D or 3D. Major features of 2D resistivity model from the respective profiles were identified. These features include a set of lower resistive formations going from the surface to 1000 m depth, lying on a set of resistive formations that appears at the surface and below the lower resistive formations. However, a very conductive layer was observed in depth in the three profiles. These facts show that the study area is made up of mixture of both conductive and resistive materials, suggesting a prolongation of the overlap between the Congo Craton and the Pan-African in depth to the north and the location of the CC/Pan-African limit above 4°N parallel accordingly. Deeper electrical discontinuities, interpreted as faults following a NE-SW trend, were highlighted. All these new data suggest that the study area underwent an intense tectonic activity with ductile to brittle deformations due to the presence of the BOSZ.

1. Introduction

The Pan-African tectonic evolution in Cameroon is marked by large scale shear zones that have intensely transported early structures [1, 2]. Cameroon neoproterozoic units belong to the North Equatorial Fold Belt (NEFB) which is affected by the Central African Shear Zone (CASZ) and defined as a pre-Mesozoic crustal strike-slip fault system [1, 2]. The CASZ forms two branches in Cameroon: the Central Cameroon

Shear Zone (CCSZ) to the north and the Sanaga Fault (SF) to the south. The SF system is well represented in the east part of Cameroon by the Bétaré-Oya Shear Zone (BOSZ), where many mineralized substances are well established. The CCSZ is defined as a Pan-African postcollisional ductile fault, as a transcontinental structure marked by folds, parallel, or echelon relays [3], and as major lineament of the Pan-African orogen of Central Africa [4].

In geophysical prospecting, AMT method is used and considered as a key tool in mineral exploration [5], in geothermal investigation [6–8], in potential radioactive waste disposal characterization [9], and in the identification of tectonics structures [10].

Magnetotelluric investigations have been carried out in the east region of Cameroon. A recent study [11] permitted through the use of the MT (AMT) high frequencies and 2D modelling of resistivity and phase pseudosections, to establish the tectonic setting and by the same way a system of folds and faults in southwestern part of the present study area. The interpretation of the AMT data and correlations with geological facts confirmed the author's proposition that the southwestern part of the study area is perfectly linked to the collision between the Pan-African Chain and the Congo Craton. Fractures have been highlighted from the image of the subsurface by combining the classical and the Bostick approaches in the interpretation of AMT data in the Akonolinga-Ayos region, westward from the current study area [12].

Other studies [13–15] by aeromagnetic and gravimetric methods were carried out in the southeastern part of the present study area and the results obtained were used to update the previous geological map and to highlight the presence of a deeper major tectonic feature, oriented E-W along the 4° northern parallel emphasizing the presence of a E-W normal faults system in the Mengueme-Akonolinga region [13].

In spite of these studies, the fact that little or nothing is known about the internal structure of a large part of the eastern region of Cameroon still remains. Also, most of these studies are regional, therefore raising the debate about the internal structure and the continuity of the observed superficial structural lineaments at depth.

The aim of the present investigation was to study the electrical structure of the crust beneath the Garga Sarali neoproterozoic formations, which belong to the eastern gold district of Cameroon. This could help us understand better the relationship between the NE-SW, E-W, and N-S trending shear zone and the presence of mineralization at surface in that region of Cameroon. For that purpose, we have combined geophysical (AMT) investigations with some geological field data to enhance our results.

2. Geology Setting

2.1. Regional Geology. The study area belongs to the Pan-African belt (Figure 1), also interpreted as the result of the convergence and collision between the steady Archaean Congo Craton to the south and one or two Paleoproterozoic plates [16, 17]. Three major geological domains from south to north of the Pan-African belt in Cameroon are well identified [18–20].

- (i) The southern domain, which comprises Pan-African meta-sedimentary units, contains formations that were thrust onto the Archaean Congo Craton towards the south, during an event marked by four stages of ductile deformations corresponding to E-W to

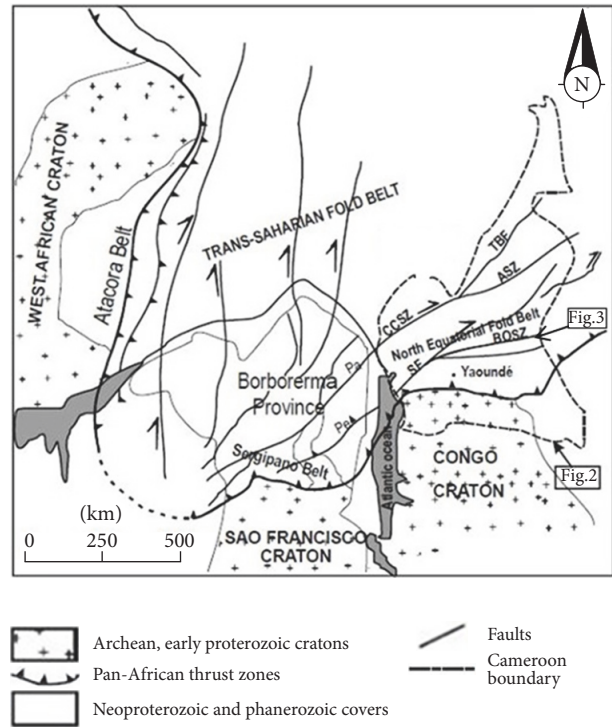


FIGURE 1: Predrift reconstruction of Pan-African and Brasiliano terranes (reproduced from Ganno et al., 2010, under the public domain; see location box in Figure 1): CCSZ: Central Cameroon Shear Zone; ASZ: Adamaoua Shear Zone; BOSZ: Bétaré-Oya Shear Zone; SF: Sanaga Fault; TBF: Tibati Banyo Fault; Pa: Patos Fault; Pe: Pernambuco Shear Zone.

NW-SE contraction (D1 and D3) and N-S to NE-SW extension (D2).

- (ii) The central domain corresponds to a large NE-striking transcurrent fault zone, including the Adamaoua and Tibati Banyo faults to the north and the SF to the south.
- (iii) The northern domain consists of subordinate 830 Ma old metavolcanic rocks of tholeiitic and alkaline affinities, which are associated with metasediments known as the Poli series and widespread 630–660 Ma old calc-alkaline plutonic rocks known as orthogneisses, which result from a major crustal accretion episode.

2.2. Local Geology. The study area (Figure 2) is located 30 km away from Bétaré-Oya, between latitudes 5°19'N and 5°31'N and longitudes 13°59'E and 14°10'E. It belongs to the eastern part of the central domain and is characterized by a detritic hydrographic network emphasizing a variety of tectonic features (Figure 3). Previous geological investigations recognized two contrasting terranes [21, 22]. The northwestern terrane consists mostly of NE-SW elongated low-grade schist with Au deposits, including a volcanoclastic schist (so-called Lom Schist), that is associated with subordinate conglomeratic quartzites and intruded by voluminous plutonites. The eastern terrane, by contrast, is characterized

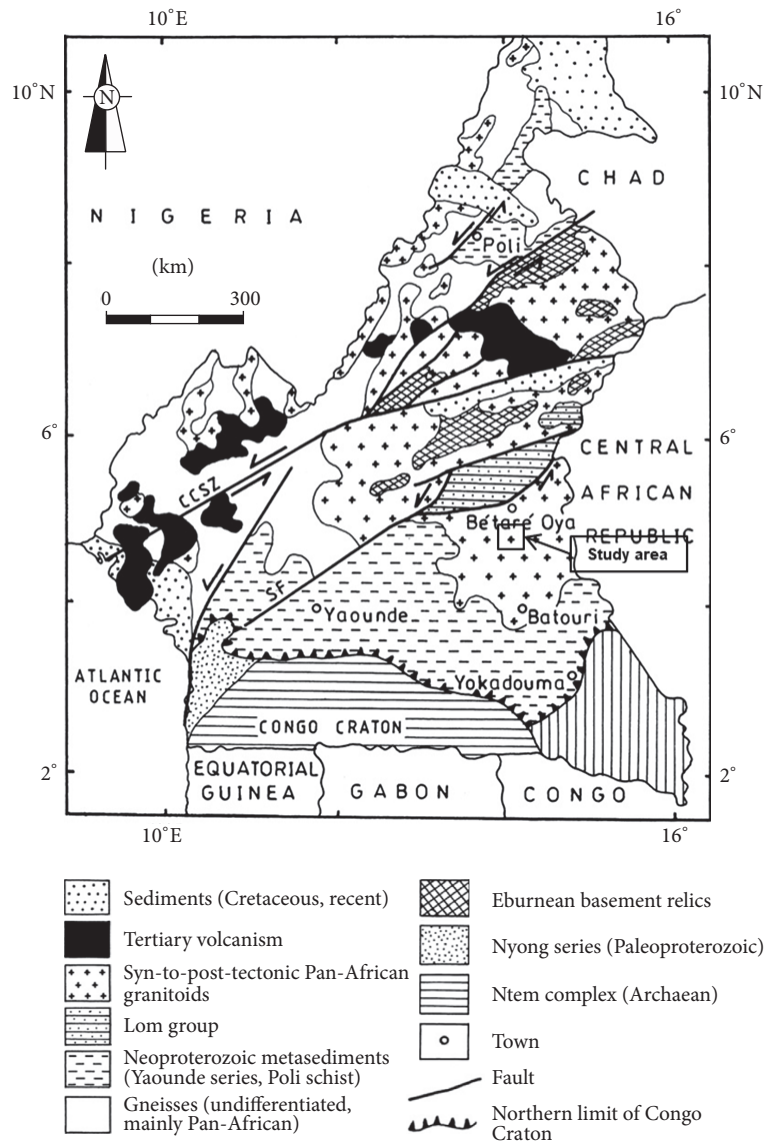


FIGURE 2: Regional structural setting of Cameroon (reproduced and modified from Suh et al., 2006, under the public domain).

by a lack of low-grade metasediments with Au deposits and by high-grade metamorphic gneiss and migmatites intruded by granite suites [21, 22]. The boundary between these two terranes is marked by a several-meters-wide NE-trending mylonitic zone referred to hereafter as Bétaré-Oya Shear Zone (BOSZ).

Recent studies show that the area belongs to the central domain. The lithology is made up of lateritic duricrust terranes, migmatites and gneisses (ortho), schist referred to as the Lom Schist belt (Figure 3(c)), metaleucogranites, metagranodiorites, porphyritic granites (Figure 3(b)), fine grained granites, and some pegmatite veins [1].

The study area is affected by the strike-slip fault (Figure 1) known locally as the BOSZ and a relay of the SF which divided the study area into two parts: a northwestern and a southeastern region [1]. The southeastern zone is dominated by various gneissic granitoids and minor bodies of porphyritic granites, while the northwestern zone is dominated by late granitoids

intrusions and early gneissic rocks with subordinate schist [1].

A preliminary assessment through a superposition of the structural map and the satellite images analysis of the area (Figure 4) displays an alignment of tectonic lines, lineaments, and foliations with the choice of the profiles, which are cross-cutting the observed structural features.

3. Method, Data Acquisition, and Processing

3.1. Method. The magnetotelluric (MT) method finds its basic principles within the electromagnetic field theory [23], in which it is demonstrated that the MT wave is a plane wave [24]. The MT method is applied in structural geology and geothermal and mineral prospecting [12, 25–28]. In MT method, natural electromagnetic fields are used to investigate the electrical structure of the earth, based on its resistivity. The MT method is unique because of its capability to explore

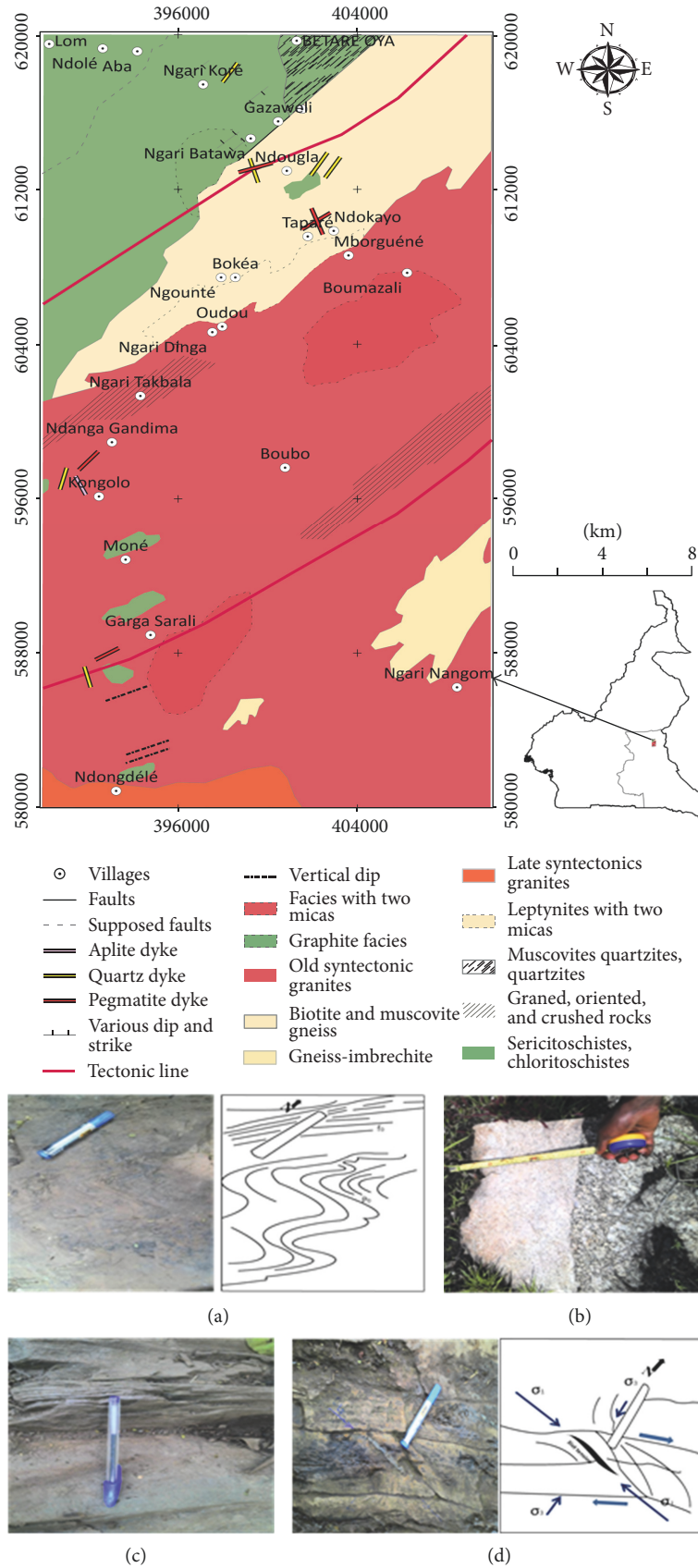


FIGURE 3: Geological map of the study area (reproduced and modified from Gazel et al., 1954, under the public domain) with AMT soundings points; field observation showing folds on a schist (a); porphyritic granite (b); schistosity (c); joint tension/dextral shear in granite (d).

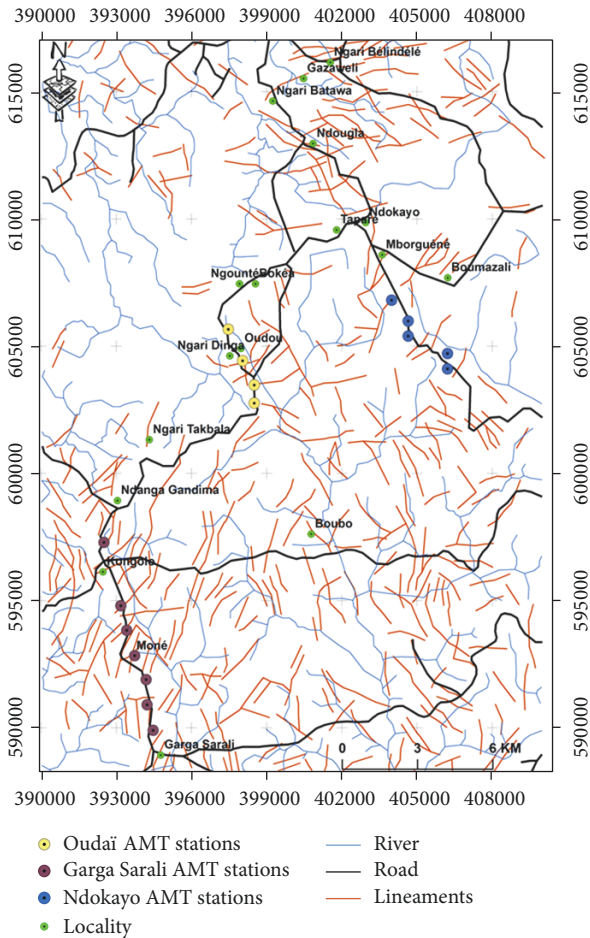


FIGURE 4: Foliation (minor lineaments) of the study area (reproduced and modified from Noutchogwe et al., 2011, under the public domain).

from very shallow to very great depth without using any artificial power source and with no environmental impact. MT data acquisition involves the simultaneous measurement of natural electric and magnetic fields at any point on the earth's surface, in order to deduce the resistivity of rocks directly under the receiver. In reality, the subsurface is inhomogeneous, and the apparent resistivity is determined instead of the true resistivity [10, 29, 30], according to the following relation: $\rho_a = 0.2T(E_x/E_y)^2$, where T is the period of the wave in seconds, E_x is the electrical field in the OX direction, and H_y the magnetic field in the OY direction perpendicular to OX .

The MT investigation at high frequencies is known as the audio frequency MT or simply audiomagnetotellurics (AMT). AMT enables investigations from shallower depths (1m) to more than 1 kilometre (depths of 7 to 10 km are reachable in some cases). Natural electromagnetic sources related to the MT/AMT method originate from spherics and thunderstorms that hit the earth and consequently induce a ground electromagnetic field. However, when dealing with AMT soundings, natural signals are generally weak in the 2000–5000 Hz frequency range, also known as the AMT dead-band [24, 31]. This weakness in natural signals strength

is improved by using artificial signals which strengthen the background fields. The technique is a variant of the AMT called controlled source AMT (CSAMT).

AMT interpretation software is used to estimate the ground electrical impedance from a series of simultaneous measurements of local electric (E) and magnetic (H) field fluctuations made over a period of several minutes. The ground impedance is a complex function of frequency where higher-frequency data are influenced by shallow or nearby features while lower-frequency data are influenced by deep structures [32]. An AMT sounding provides an estimate of vertical resistivity distribution and indicates the geoelectrical complexity beneath a sounding site.

The resistivity of geologic unit depends largely on its fluid content, porosity, degree of fracturing, temperature, and conductive mineral content [33]. Saline fluids within the pore spaces and fracture openings can reduce resistivity in a rock matrix. Also, resistivity can be lowered by the presence of conductive clay minerals, carbon, and metallic mineralization. Increased temperature causes higher ionic mobility and mineral activation energy thereby reducing rock resistivity significantly. Unaltered and unfractured igneous rocks are normally very resistive, with values typically 1,000 ohm-m or greater [34]. Also, fault zones can appear as low resistivity units of less than 100 ohm-m when they are comprised of rocks fractured enough to have hosted fluid transport and consequently mineralogical alteration [34].

3.2. Data Acquisition. To conduct the study, geophysical data were collected with a Stratagem EH-4 system from [32]. Stratagem EH-4 is a system which utilizes both natural and man-made electromagnetic signals to obtain continuous electrical sounding over the earth surface. The Stratagem system consists of two basic components (Figure 5): (1) a receiver unit that allows the use of four/five electrodes and two magnetic sensors and (2) a transmitter which provided artificial signals required to augment the natural field and improve the data quality [24, 32].

AMT data were acquired using the Geometrics STRATAGEM EH4 unit along three profiles following Garga Sarali, Ndokayo road (Figure 1), with a total of 16 soundings. These data were processed to provide tensor impedance measurements for interpreting complex 2D structures. To acquire soundings, the STRATAGEM EH4 was assembled at each station with a 25-meter dipole length in the X (TE mode) and Y (TM mode) directions using 4 buffered electrodes with stainless steel stakes. The choice of the orientation of profiles and the soundings points has been made on the basis of geological data of the area. In fact, the main structural trend of the area followed the N042. Data acquisition was performed far away from electrical networks and human activities to avoid noises. Ndokayo profile is 4090 m in length, while Oudou is 3200 m in length and Garga Sarali is 7700 m in length. According to the geological map [21] and field observations, the three profiles are crossing two mica porphyritic granites, porphyritic granite, embrechites gneisses, and schists. Distances between profiles and the base profile Ndokayo are reported in Table 1.

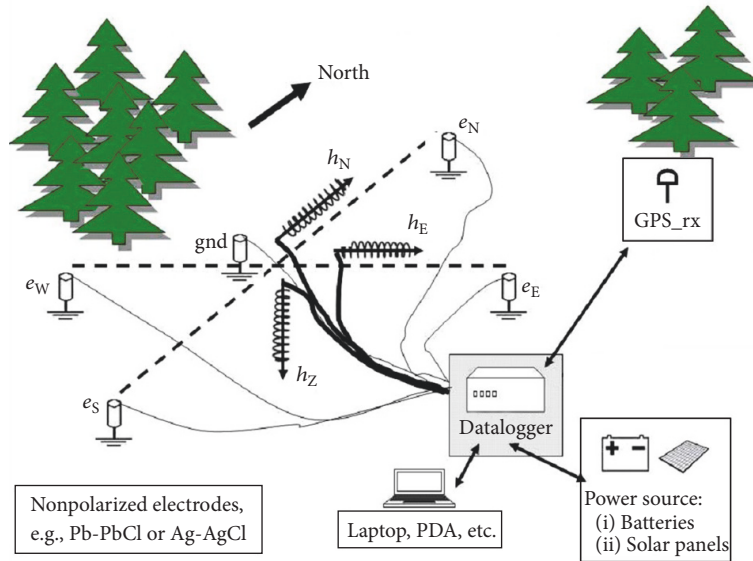


FIGURE 5: Schematic diagram of an AMT measurement site (reproduced from Lahti, 2015, under the public domain).

TABLE 1: Distances between profiles and the base profile Ndokayo.

N°	AMT profile name	Number of stations	Stations spacing (m)	Distance (km)
(1)	Ndokayo	05 (Nd1, Nd2, Nd3, Nd4)	Nd1 to Nd2 = 1040 m; Nd2 to Nd3 = 1010 m; Nd3 to Nd4 = 1010 m; Nd4 to Nd5 = 1030 m	0
(2)	Oudou	04 (Oud1, Oud2, Oud3, Oud4)	Oud1 to Oud2 = 703 m; Oud2 to Oud3 = 1067 m; Oud3 to Oud4 = 1370 m.	7
(3)	Garga Sarali	07 (GS1, GS2, GS3, GS4, GS5, GS6, GS7)	GS1 to GS2 = 1040 m; GS2 to GS3 = 990 m; GS3 to GS4 = 1020 m; GS4 to GS5 = 1050 m; GS6 to GS7 = 2600 m	9

3.3. Data Processing. After transforming the recorded time-series data to frequency domain, standard processing method was employed to determine the apparent resistivity and phase tensor at each sounding site [32]. The apparent resistivity and phase are related through the Hilbert transform. The phase is proportional to the slope of the apparent resistivity curve on a log-log plot, except from the baseline of 45 degrees [27]. Predicted values of the electric field can be computed from the measured values of the magnetic field [27]. The coherence of the predicted electric field with the measured electric field is a measure of the signal-to-noise ratio provided in the E -predicted coherency plots. The coherency obtained during the data collection has a signature that is acceptable with a value that is aligned almost to a good precision (Figure 6).

The electric and magnetic fields were measured in two directions (orthogonal and horizontal). The tensor impedance, parameterised as apparent resistivity and phase, was obtained from the time-series signals. Signals were converted to complex cross-spectra using a Fourier-transform technique. A least-squares, cross-spectral analysis was then used to solve for a transfer function (impedance) that relates the observed electric fields to the magnetic fields under the assumption that the earth consists, respectively, of two inputs

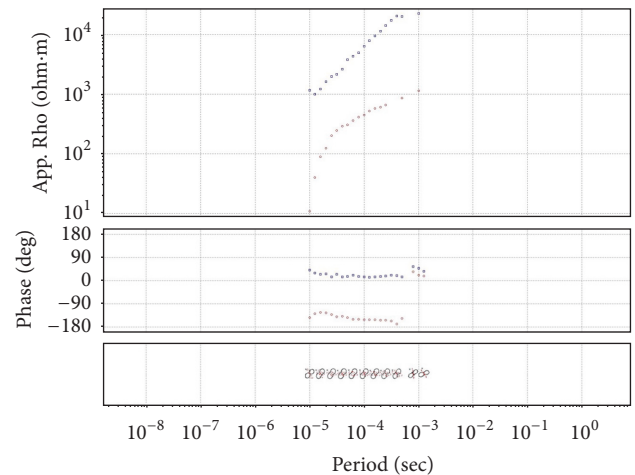


FIGURE 6: Dimensionality tests (apparent resistivity and phase) of station Oud4 of the Oudou profile [TE mode; TM mode].

(magnetic fields) and two outputs (electric fields) linear system [32].

For two-dimensional (2D) earth model, the diagonal terms of the impedance tensor are zero. The off-diagonal

terms were decoupled into transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) modes. When the geology satisfies the 2D assumption, the TE mode measures electric field parallel to geologic strike and the TM mode measures electric field perpendicular to geologic strike. Data were processed with a fixed rotation parallel and perpendicular to regional strike. The Stratagem Resistivity Plotter (program made to visualize and edit 2D modelling results produced by the Imagem software [32]) was used for making 2D plots of Stratagem Resistivity data. This program uses the Python Matplotlib scientific plotting. The program allows the combination of high and low frequency mode soundings into one plot.

Analysis of the curves of dimensionality tests (Figure 6) shows that there is not always a complete superposition between the two telluric directions. This confirms the fact that the variation of the resistivity is not 1D, but rather 2D or 3D. Nevertheless, the superposition observed can refer to a model of structure, 1D or 2D, but in comparison with complex tectonics of the study area, 2D interpretation is more indicated.

Values of the electric field can be estimated from measurements of the magnetic field [27]. Coherence between the values of the electric field predicted and those measured is the ratio between the signal and the noise ($[\text{signal}]/[\text{noise}]$). This ratio defines the quality of the recorded data. The values of coherence lie between 0 and 1 (where 0.5 corresponds to a level of signal equal to the noise). Figure 7 shows the coherency test on station 2 of the Ndokayo profile and that of station 2 of the Oudou profile. For this study, only the data with a coherency below or equal to 0.7 have been considered (Figure 7).

4. Results

4.1. Resistivity Profiling Curves

4.1.1. Ndokayo Profile. The Ndokayo resistivity profile (Figures 8(a) and 8(b)) presents a zigzag form testifying the variation of the resistivity with depth, with peaks that characterize the changes in the nature of the bodies or formations crossed by the current. Observation of the Ndokayo profile makes it possible to locate two (02) zones of anomalies. Indeed, the variation of the resistivity between the Nd1 and Nd3 stations in the high frequency domain shows the passage of the current in the fairly resistive zones. This evolution is abruptly interrupted in the field of low frequencies marked by a sharp drop of the resistivity. This reflects the existence in depth of a sufficiently conductive body. This phenomenon is still observed between the Nd4 and Nd5 stations, where a discontinuity is identified at the Nd4 station (line in red).

4.1.2. Garga Sarali Profile. At both low and high frequencies domain, the resistivity profiles from the Garga Sarali (Figures 7(c) and 7(d)) display low resistivity values at great depth. Particularly, there is a very conductive channel between stations GS2 and GS6. The above-stated channel seems to be bordered by two major electrical discontinuities

at GS2 and GS6 (Figures 8(c) and 8(d)). These discontinuities can be interpreted as faults. The irregular variation of the resistivity confirms the heterogeneity of the basement of the area and suggests its folded character and its geological setting marked by brittle-ductile deformations.

4.1.3. Oudou Profile. The curves obtained from the Oudou profile (Figures 9(a) and 9(b)) disclose a main electrical discontinuity at high and low frequencies domain, centred at station Oud2 and characterized by a decrease of the resistivity. Geologically, this rough variation of the resistivity highlights the transition of a facies of high resistivity to facies of low resistivity. This passage would thus correspond to an electric discontinuity. The resistivity variation also suggests the heterogeneity of the environment.

4.2. Pseudosections

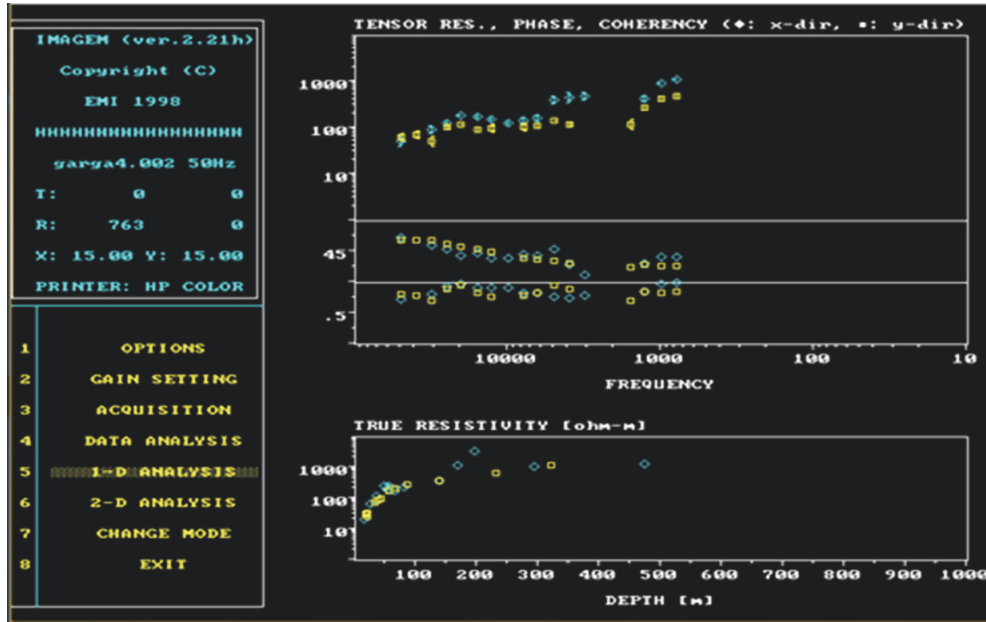
4.2.1. Ndokayo Profile. The observation of the apparent resistivity and phase pseudosection of the Ndokayo profile helps to identify (Figure 10) a conductive area that extends from station Nd1 to station Nd4 and beyond at high frequencies, which was more emphasized between stations Nd2 and Nd4. Also, a highly conductive zone was observed at depth (low frequency domain), particularly below the stations Nd3, Nd4, and Nd5. A precise observation shows that this area is separated from the first conductive zone (high frequency domain) by a resistive zone whose signatures are visible at the surface at the station Nd5. This resistive zone extends in depth with an emphasis under stations Nd1 and Nd3, where it seems to represent the basement materials. However, there is a conductive channel that divides this resistive zone in two entities. The observed facts suggest the presence of a discontinuity in depth.

4.2.2. Garga Sarali Profile. The observation of apparent resistivity and phase pseudosections (Figure 11) of the Garga Sarali profile shows a conductive zone between GS1 and GS2 and surrounding GS5 and GS6 which is observed as high frequency domain along the profile. The second that has underlain the first one is more resistive, and it is undulated with depressions at stations GS2 and GS6, suggesting the presence of electric discontinuities.

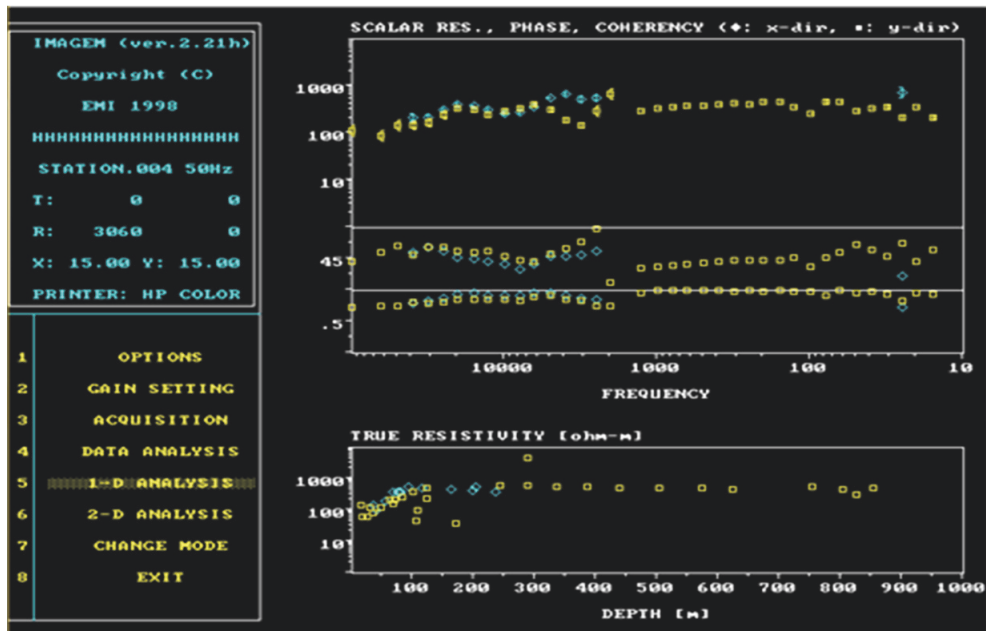
A third zone appearing beneath the second is conductive as the first zone. However, some resistive layers below the station GS7 are identified at low frequencies. These features (Figure 11) show that the area testified an intense tectonic event that is underlined by a deeper electric discontinuity under station GS5.

4.2.3. Oudou Profile. The apparent resistivity and phase pseudosections of the Oudou profile (Figure 12) underline a depressions process which affects the resistive formation cropping out at station Oud4 and extends to a great depth (low frequency domain).

This depression is marked by conductive material fillings that extend from station Oud1 across the section, over 3000 meters. This conductive region extends in depth (medium frequency) below the station Oud2, where it seems to separate



(a)



(b)

FIGURE 7: Coherency test from station 2 of the Ndokayo profile (a) and from station 2 of the Oudou profile.

into two high resistivity blocks and appear again at great depth (low frequency domain) below stations Oud3 and Oud4. This disposition suggests the presence of a discontinuity at the station Oud2 and a folding process that has affected the area.

4.3. Geoelectrical Section (2D Modelling Pseudosection)

4.3.1. Ndokayo Profile. Figure 13 represents the geoelectrical section of Ndokayo profile. It generally shows the inhomogeneous character of the area.

The major features observed on the 2D geoelectrical section from the Ndokayo profile are given as follows (from surface to depth):

- (i) The first geoelectrical layer ($Rho \leq 1000 \Omega\cdot m$) spans from Nd1 to beyond Nd4, where it is interrupted by the outcrop of the underlying layer (thus suggesting a horizontal discontinuity). This first layer reaches 400 m depth below Nd1 and 300 m below Nd4. However, it slightly thins between Nd2 and Nd4. The observed conductive zone may correspond to

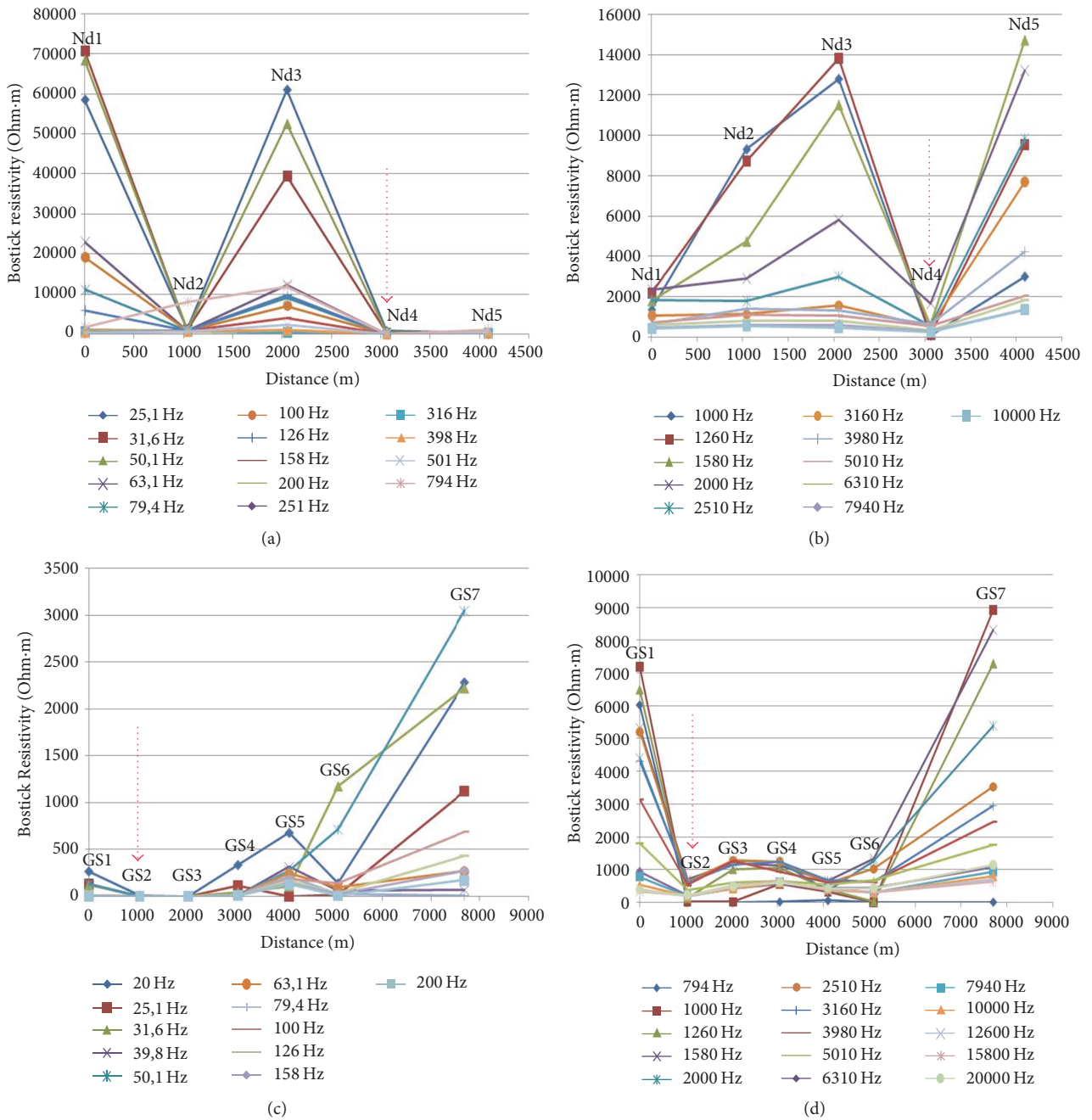


FIGURE 8: Resistivity profiling curves for Ndokayo profile, respectively, at low frequencies [25.1 Hz–501 Hz] (a) and at high frequencies [794 Hz–10000 Hz] (b); resistivity profiling curves for Garga Sarali profile, respectively, at low frequencies [20 Hz–200 Hz] (c) and at high frequencies [794 Hz–20000 Hz] (d).

sediment and metasediment deposit from the Lom series.

- (ii) The second geoelectrical layer ($1000 \Omega\cdot\text{m} < \text{Rho} \leq 4000 \Omega\cdot\text{m}$) appears in depth between 400 m and 600 m at Nd1, between 300 m and about 1100 m at Nd4, and from surface to 600 m depth at Nd5. It is characterized by a paroxysmal bulge at Nd3. This layer outcrops beyond Nd4 (from the profile's origin) where it suggests a horizontal discontinuity therein,

which could be interpreted as a change in the nature of encountered formation. Also, the trace on the section depicts an oval shaped target below station Nd4. The layer's attitude around station Nd4 infers a collapse of the underlying terrains. The second geoelectrical layer can be interpreted as two mica porphyritic granites, according to the resistivity range values.

- (iii) The third geoelectrical layer ($4000 \Omega\cdot\text{m} < \text{Rho} < 7000 \Omega\cdot\text{m}$ and above $7000 \Omega\cdot\text{m}$) appears between

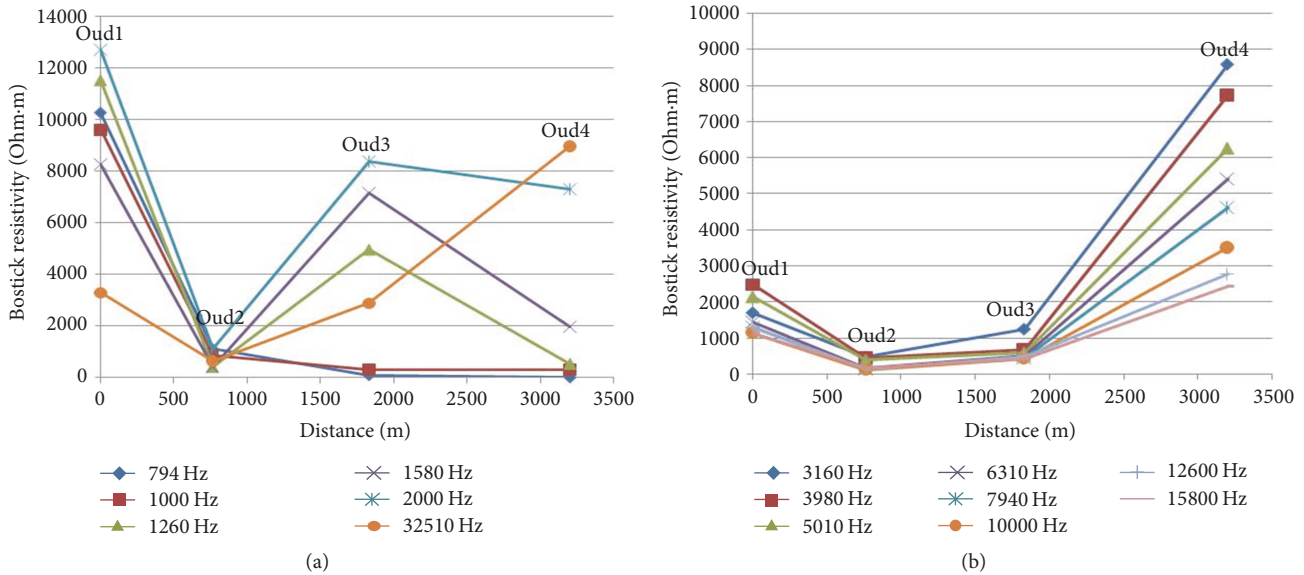


FIGURE 9: Resistivity profiling curves for Oudou profile at low frequencies [794 Hz–2000 Hz] (a); resistivity profiling curves for Oudou profile at high frequencies [2510 Hz–15800 Hz] (b).

600 m and up to 1000 m depth at Nd1 where it is embedded within the second layer. It has an average thickness of 200 m along the whole profile. These uplifts are separated by a depression that is bounded by steep slopes, inside of which two strongly resistive blocks are identified, respectively ($\text{Rho} \geq 7000 \Omega\text{-m}$). It presents alternating upraised (from Nd2 to Nd3 and at Nd5) and downthrown (centred at Nd4) blocks. The upraised block from Nd2 to Nd3 is responsible for the thinning of the overlying formations therein. Besides, the downthrown block is probably a collapse of the basement between Nd3 and Nd5. The third geoelectrical layer can be interpreted as formations that constitute the basement (probably granitoids).

A main electrical discontinuity is identified on the geoelectrical section of Ndokayo profile. This highlighted discontinuity can be interpreted as vertical faults with a NE-SW strike based on their shape and orientation. The fault may have probably resulted from the fracturing and the compartment of the basement along with vertical displacement of blocks (Figure 13).

4.3.2. Oudou Profile. The observation and analysis of the geoelectrical section of the Oudou profile (Figure 14) enable outlining features or layers having the same geoelectrical characteristics as those from the first profile (Figure 14). The features as observed from shallow depth (Figure 14) are given as follows:

- (i) The first geoelectric layer corresponds to conductive terrains ($\text{Rho} \leq 1000 \Omega\text{-m}$). It has an average thickness of 100 m with a perceptible thinning beyond station Oud3.
- (ii) The second layer ($1000 \Omega\text{-m} < \text{Rho} \leq 4000 \Omega\text{-m}$) appears between 100 m and 400 m beneath Oud1,

thickens up to 600 m at Oud2, and then becomes thinner up to the end of the profile.

- (iii) The third layer ($4000 \Omega\text{-m} < \text{Rho} < 7000 \Omega\text{-m}$) corresponds to more resistive terrains. This layer has an average thickness of 300 m. It is marked by a steep slope from Oud1 to Oud2 and gentle slope from Oud3 to Oud4. These two slopes configure the third layer like a boat which dips to the SE (beginning of the profile). The boat-like shape of the third layer matches that of the underlying fourth layer ($\text{Rho} \geq 7000 \Omega\text{-m}$) which is interpreted as the basement in the Oudou area.

4.3.3. Garga Sarali Profile. In the same way as in the previous profiles, the 2D geoelectrical section from the profile (Figure 15) in the Garga Sarali area exhibits a four-layer earth model. Downward from surface, the feature appears as follows:

- (i) The first layer ($\text{Rho} \leq 1000 \Omega\text{-m}$) surmounted by a very low resistive layer has an average thickness of 200 m. It is characterized by undulations induced by the roughness of the underlying layer's topography.
- (ii) The second layer ($1000 \Omega\text{-m} < \text{Rho} \leq 4000 \Omega\text{-m}$), as stated above, has a very irregular topography affecting the thickness. However, between stations GS3 and GS6, that thickness increases up to a mean value of 600 m. A nucleus of conductive materials is observed, especially at GS4. The isoresistivity contours are subvertical at GS3 and GS6, suggesting the presence of discontinuities at these points, respectively.
- (iii) The third horizon is characterized by resistivity values between $4000 \Omega\text{-m}$ and $7000 \Omega\text{-m}$. with a strong bending from GS1 to GS3 and subvertical contours

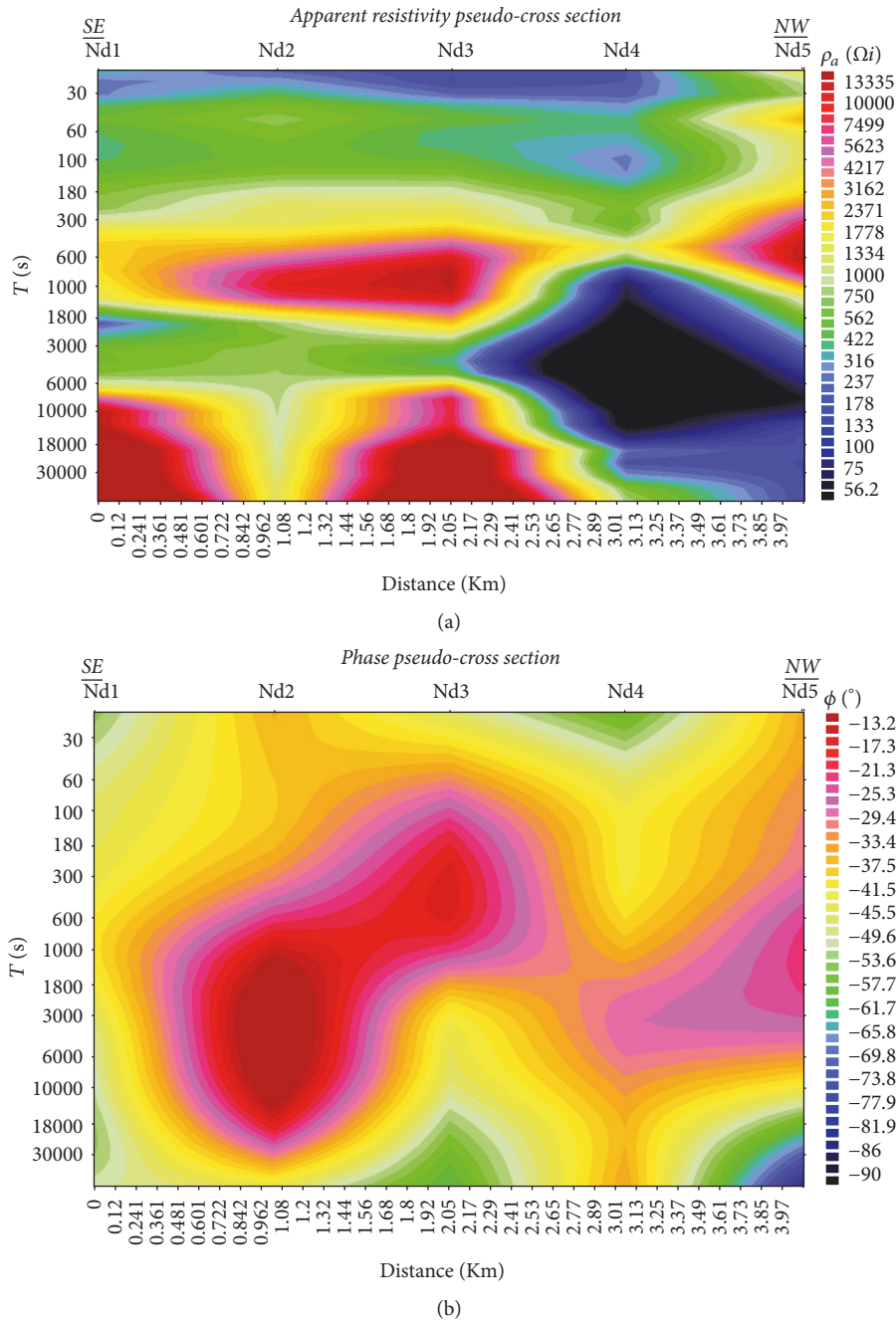


FIGURE 10: Apparent resistivity (a) and phase (b) pseudo-cross section of Ndokayo profile.

at GS3 and GS6. These subvertical contours confirm the presence therein of the discontinuities highlighted in the layer above (the second layer). These discontinuities delineate a graben between GS3 and GS6, probably induced by the collapse of the basement in the Garga Sarali area.

The geoelectrical section obtained along Garga Sarali profile shows folded structures and two vertical electrical discontinuities at GS4 and GS6 interpreted as faults oriented NE-SW. These faults seem to be associated with the tectonic events.

The results obtained from all the profiles above point to the fact that the study area has undergone deformation by folding and faulting processes. The identified electrical discontinuities followed NE-SW direction and are correlated with the CCSZ. Furthermore, the study area is made up of a mixture of both resistive and conductive formations. Recent studies [10, 12] suggest that the resistive formations account for the Congo Craton (CC) and the conductive ones belong to the Pan-African system; this mixture of materials suggests a prolongation of the overlap between the CC and the Pan-African to the north at great depth. Hence, the study suggests that the CC/Pan-African

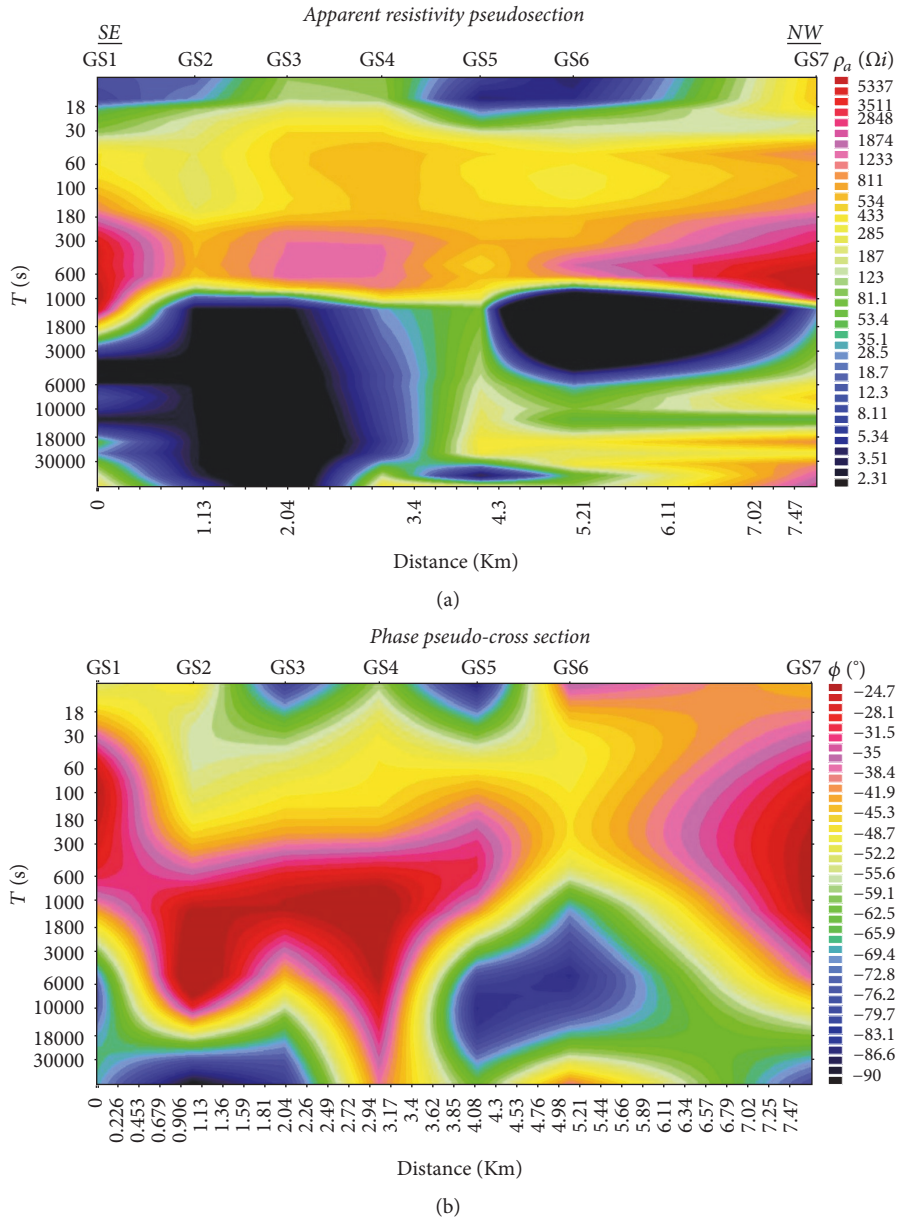


FIGURE 11: Apparent resistivity (a) and phase (b) pseudosection of Garga Sarali profile.

limit is located beyond latitude 4°N. We can therefore assume that the study area underwent a multiphase tectonic activity.

5. Discussion

Field observations, existing geological data, and satellite imagery analysis of the study area, combined with AMT investigation, show that the subsurface resistivity distribution along the three profiles is in similar geological and structural environments. Ndokayo profile is crossing mica porphyritic granites, while Oudou profile runs over porphyritic and embrechite gneisses and Garga Sarali profile was on the Lom schists and porphyritic granites.

The analysis of satellite imagery and the relevant surface structural lineaments confirms the presence of three structural families with a main NE-SW orientation followed by NNE-SSW to N-S and E-W (Figure 3). Some electrical discontinuities interpreted as faults and oriented NE-SW as the BOSZ were highlighted. A major fault was identified down the station Nd4 of the Ndokayo profile, while two (02) other faults were identified along the Garga Sarali profile (GS4 and GS6). The irregular shape of iso-resistivity contours (folds, vertical to subvertical) and the geological facts (crushed and oriented rocks) allow us to believe that an intense tectonic activity has taken place in the study area. They have the same orientation as the surface structural lineaments and some are correlating (Figure 16).

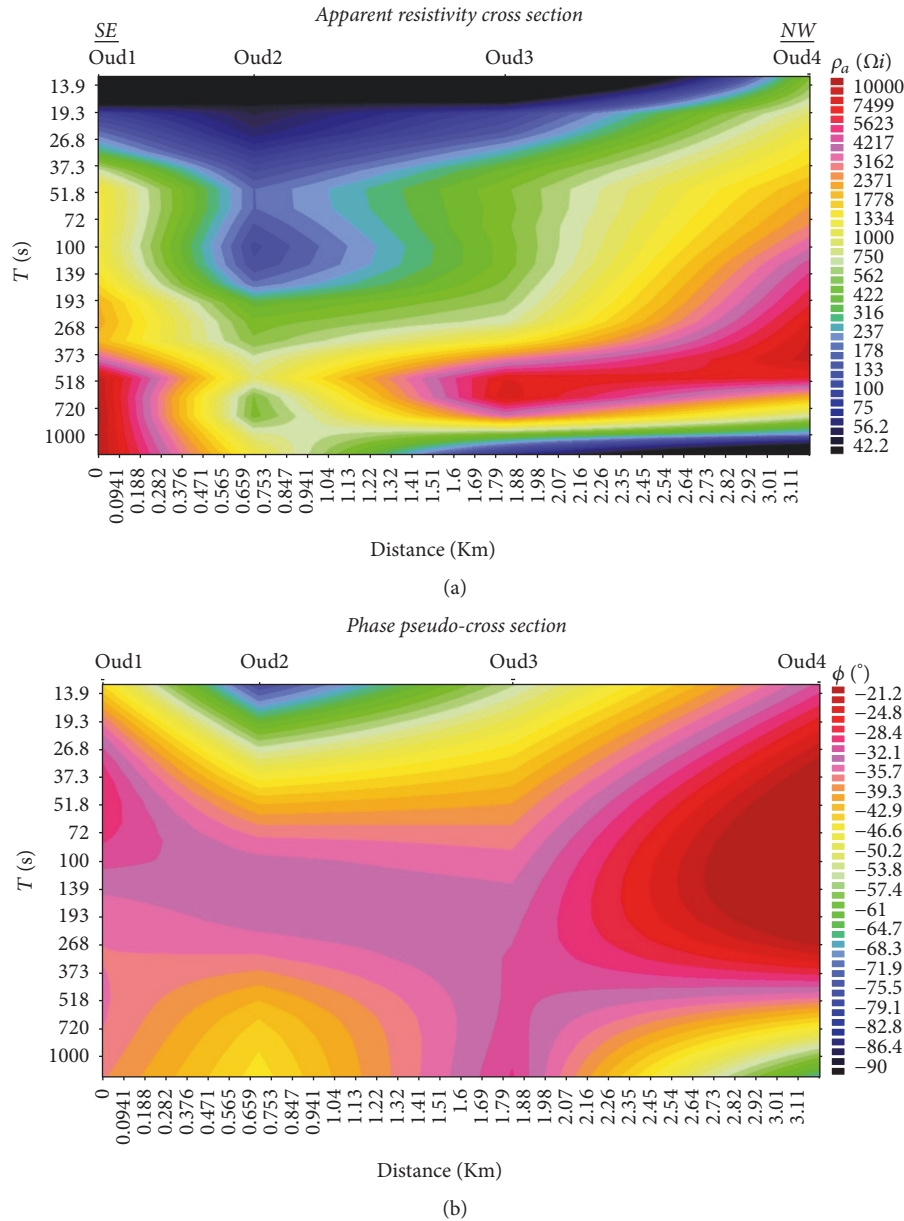


FIGURE 12: Apparent resistivity (a) and phase (b) pseudosection of Oudou profile.

These faults resulted from the deformation phases (D2 and D3) that have affected the study area. The results from previous geological studies [1, 35, 36] strengthen the present results.

The analysis of the apparent resistivity profiles, pseudosections (apparent resistivity and phase), and geoelectrical sections from the three AMT profiles shows that the structures are well deformed by folded and fractured events that correspond to the Pan-African orogeny materialised by the SF and the BOSZ [3]

The investigated area is closer to the transition zone between the Pan-African and the Congo Craton domains. This is confirmed through the mixtures of conductive and resistive materials observed beneath the investigated area, suggesting a prolongation of the overlap between the Congo

Craton and the Pan-African in depth, to the north. Other studies confirm this overlapping [10, 12] and establish the CC/Pan-African limit above the northern 4° parallel. However, studies were carried out (between latitudes 3°30N and 4°30N) some distance away from the current study area (which stretches from latitudes 5°N to 5°30N); hence, we established that the CC/Pan-African limit in the area is located north beyond the known limit documented by [10, 12]. Investigations shall be carried out in the future to explain the shift between those two locations.

Geophysical investigation shows that the NW parts of the AMT profiles, which are located closer to the BOSZ, present resistive formations that are sometimes shallow close to the surface. In the SE part, these formations are also identified. This configuration would highlight a characteristic of the

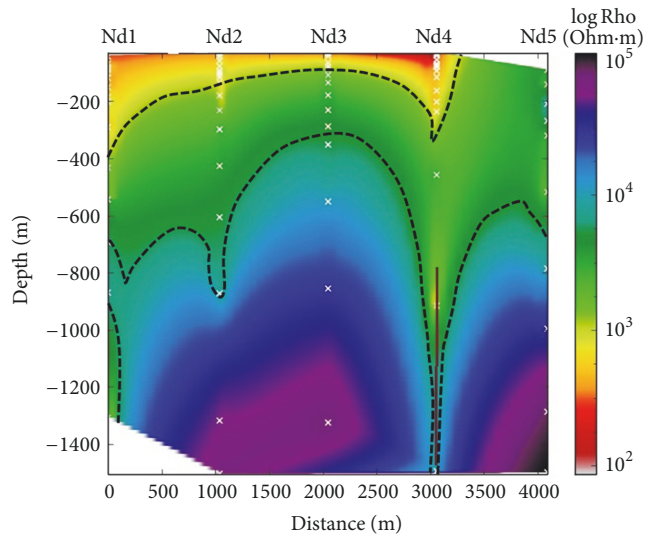


FIGURE 13: Geoelectrical section of Ndokayo profile at 1500 meters' depth.

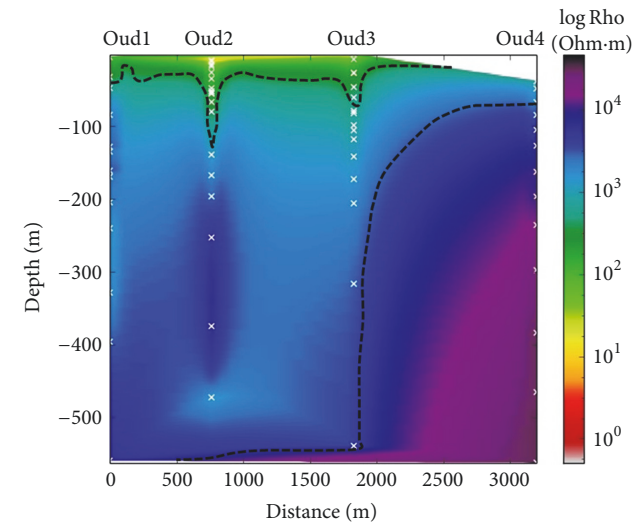


FIGURE 14: Geoelectrical section of Oudou profile at 600 meters' depth.

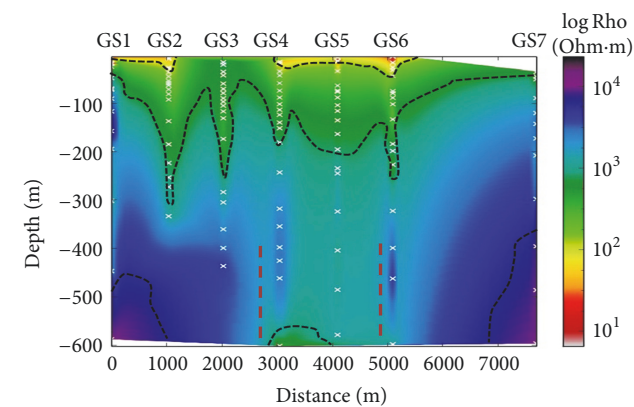


FIGURE 15: Geoelectrical section of Garga Sarali profile at 600 meters' depth.

BOSZ, which would be not only a shear zone but also a system of faults zone with raised and collapsed compartments.

The results obtained from the current study are of great importance in mining exploration. The geological investigation of the study area reported the presence of porphyritic plutonic rocks (granites) that were affected by contact metamorphism. The three AMT profiles (Ndokayo and Garga Sarali) display deeper discrete zones that are very conductive (Figure 13). These conductive areas may correspond to the presence of fluids, clay minerals, or metallic (Cu, Au, and Ag) mineralized bodies.

The combination of geological facts and audiomagnetotellurics sounding analyses and modelling has led to the detection of electrical discontinuities. These electrical discontinuities oriented NE-SW are linked to the Central Cameroon Shear Zone [3]. The prolongation of these tectonic features has been revealed by recent geophysical studies carried out in adjacent areas [11, 12, 37, 38] in the southern and the northern borders of the area under study. Hence, there is a link between the present study and the previous ones, as it shows that the fault oriented NE-SW was derived from the tectonic event that has occurred during the Pan-African orogeny and it is directly aligned with the Central African Shear Zone (CASZ).

6. Conclusion

The integration of geophysical and geological data led to the following conclusions:

- (i) The analysis, modelling, and interpretation of audiomagnetotellurics data show the existence of electrical discontinuities that could be interpreted as faults and which correlate with the surface structural lineaments trend evidenced by satellite imagery analysis.
- (ii) The identified faults oriented NE-SW were linked to the Central Cameroon Shear Zone and linked to those discovered by recent studies using aeromagnetic and gravity interpretation, based on the multiscale horizontal derivative of the vertical derivative (MSHDVD) methods applied in adjacent areas situated in the northern and southern borders of the present study area.
- (iii) The study area is made up of mixture of conductive (Pan-African) and resistive (Congo Craton) materials that suggest a prolongation of the overlap between the Congo Craton to the north and the location of the CC/Pan-African limit above $N04^\circ$.
- (iv) The fault system oriented NE-SW was formed by the tectonic event that occurred during the Pan-African orogeny and it is directly aligned with the Central African Shear Zone (CASZ).
- (v) The structural dips on the geological map correspond to the orientation of electrical discontinuities.
- (vi) The three AMT profiles (Ndokayo, Oudou, and Garga Sarali) show conductive anomalous zones that are distinct, running from the surface to great depth. These anomalies may correspond to the presence of

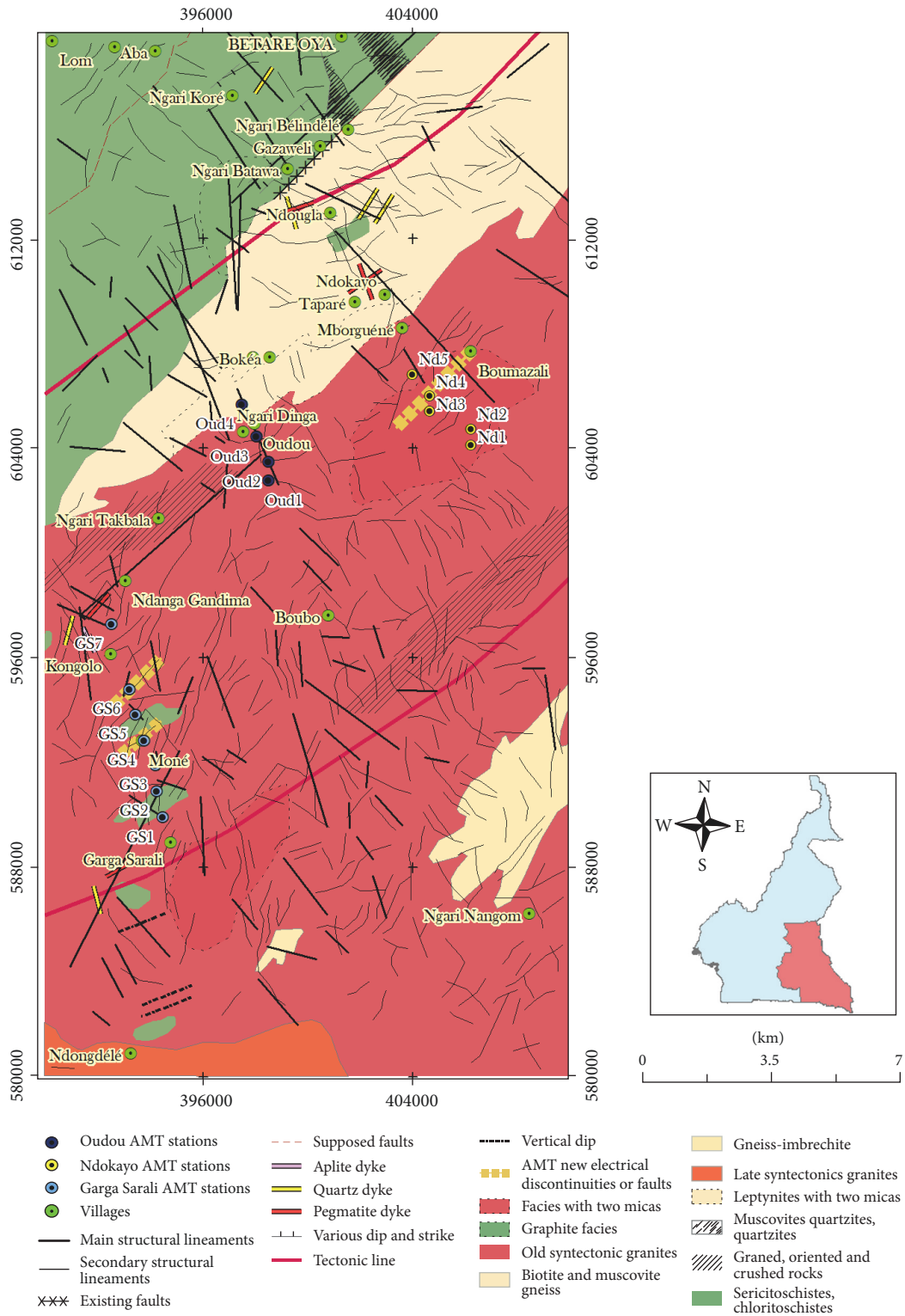


FIGURE 16: Correlation between surface structural lineaments and the new AMT electrical discontinuities (faults).

fluid, conductive clay minerals, or metallic mineralized bodies.

(vii) The BOSZ is not only a shear zone but also a system of faults with raised and collapsed compartments.

Conflicts of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

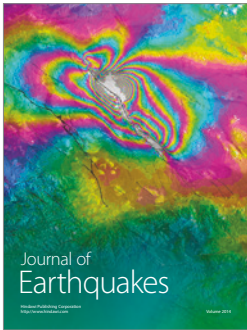
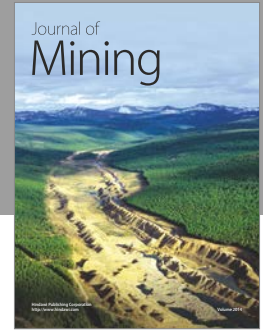
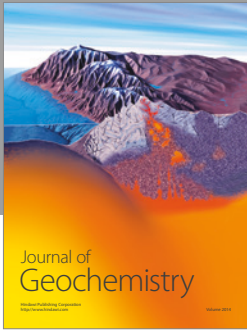
Acknowledgments

The authors are grateful to Mr. Ava Christophe, General Manager of Harvest Mining Corporation (HMC), for the logistics he provided to enable field works.

References

- [1] B. Kankeu and R. O. Greiling, "Magnetic fabrics (AMS) and transpression in the Neoproterozoic basement of Eastern Cameroon (Garga-Sarali area)," *Neues Jahrbuch fur Geologie und Palaontologie - Abhandlungen*, vol. 239, no. 2, pp. 263–287, 2006.
- [2] C. E. Suh, B. Lehmann, and G. T. Mafany, "Geology and geochemical aspects of lode gold mineralization at Dimako-Mboscorro, SE Cameroon," *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, vol. 6, no. 4, pp. 295–309, 2006.
- [3] E. Njonfang, V. Ngako, C. Moreau, P. Affaton, and H. Diot, "Restraining bends in high temperature shear zones: The "Central Cameroon Shear Zone", Central Africa," *Journal of African Earth Sciences*, vol. 52, no. 1-2, pp. 9–20, 2008.
- [4] S. Ganno, J. P. Nzenti, T. Ngnotue, B. Kankeu, and N. G. D. Kouankap, "Polyphase deformation and evidence for transpressive tectonics in the kimbi area, Northwestern Cameroon Pan-African fold belt," *Journal of Geology and Mining Research*, vol. 2, no. 1, pp. 001–015, 2010.
- [5] K. L. Zonge, A. G. Ostrander, and D. F. Emer, "Controlled-source audio-frequency magnetotelluric measurements," in *Magnetotelluric methods: Soc. Expl. Geophys.*, K. Vozoff, Ed., Geophysics Reprint Series 5, pp. 749–763, 1986.
- [6] S. K. Sandberg and G. W. Hohmann, "Controlled-source audio-magnetotellurics in geothermal exploration," *Geophysics*, vol. 47, no. 1, pp. 100–116, 1982.
- [7] L. C. Bartel and R. D. Jacobson, "Results of a controlled-source audiofrequency magnetotelluric survey at the Puhimau thermal area, Kilauea Volcano, Hawaii," *Geophysics*, vol. 52, no. 5, pp. 665–677, 1987.
- [8] T. Koichi, M. Enjang, J. Hisashi, M. Hideki, and U. Keisuke, "Imaging geothermal fractures by CSAMT method at takigami area in Japan," in *Proceedings of the 13th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, SGP-TR-176*, Stanford, Calif, USA, January 2005.
- [9] M. J. Unsworth, X. Lu, and M. Don Watts, "CSAMT exploration at Sellafield: Characterization of a potential radioactive waste disposal site," *Geophysics*, vol. 65, no. 4, pp. 1070–1079, 2017.
- [10] B. Kelsey Mosley, E. A. Atekwana, M. G. Abdelsalam et al., "Geometry and faults tectonic activity of the Okavango Rift Zone, Botswana: Evidence from magnetotelluric and electrical resistivity tomography imaging," *Journal of African Earth Sciences*, vol. 65, pp. 61–71, 2012.
- [11] T. Ndougsa-Mbarga, A. N. S. Feumoe, E. Manguelle-Dicoum, and J. D. Fairhead, "Aeromagnetic data interpretation to locate buried faults in south-east Cameroon," *Geophysica*, vol. 48, no. 1-2, pp. 49–63, 2012.
- [12] A. Meying, T. Ndougsa-Mbarga, and E. Manguelle-Dicoum, "Evidence of fractures from the image of the subsurface in the Akonolinga-Ayos area (Cameroon) by combining the Classical and the Bostick approaches in the interpretation of audio-magnetotelluric data," *Journal of Geology and Mining Research*, vol. 1, no. 8, pp. 159–171, 2009.
- [13] Paterson G., Watson Ltd., Etude aéromagnétiques sur certaines régions de la République Unie du Cameroun. Rapport d'interprétation. A.C.D.I. Toronto, article 192, 1976.
- [14] S. Mbom-Abane, *Investigation géophysique en bordure du Craton du Congo (région d'Abong-Mbang/Akonolinga, Cameroun) et implications structurales. Thèse Doctorat d'Etat ès Sciences*, Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, 1997.
- [15] T. Ndougsa-Mbarga, E. Manguelle-Dicoum, C. T. Tabod, and S. Mbom-Abane, "Modélisation d'anomalies gravimétriques dans la région de Mengueme–Akonolinga (Cameroun)," *Science, Technology and Development*, vol. 10, pp. 67–74, 2003.
- [16] V. Ngako, P. Affaton, J. M. Nnange, and T. Njanko, "Pan-African tectonic evolution in central and southern Cameroon: Transpression and transtension during sinistral shear movements," *Journal of African Earth Sciences*, vol. 36, no. 3, pp. 207–214, 2003.
- [17] S. F. Toteu, W. R. Van Schmus, J. Penaye, and A. Michard, "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*, vol. 108, no. 1-2, pp. 45–73, 2001.
- [18] J. P. Nzenti, P. Barbey, J. M. Bertrand, and J. Macaudiere, "La chaîne pan-africaine au Cameroun : cherchons suture et modèle," in *Proceedings of the Réunion des Sciences de la Terre in S.G.F.*, France, Nancy, France, 1994.
- [19] J. P. Nzenti, P. Barbey, and F. M. Tchoua, "Evolution crustale au Cameroun : éléments pour un modèle géodynamique de l'orogénèse Néoprotérozoïque," in *Géologie et environnements au Cameroun*, J. P. Vicat and P. Bilong, Eds., collect. GEOCAM, 2/1999, pp. 397–407, University of Yaounde Press, 1998.
- [20] T. Ngnotué, J. P. Nzenti, P. Barbey, and F. M. Tchoua, "The Ntui-Betamba high-grade gneisses: A northward extension of the Pan-African Yaounde gneisses in Cameroon," *Journal of African Earth Sciences*, vol. 31, no. 2, pp. 369–381, 2000.
- [21] J. Gazel and G. Gérard, "Carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1/500000 : coupure Batouri-Est avec une notice explicative," in *Archives de la Direction des Mines et de la Géologie du Cameroun. Yaoundé*, article 50, 1954.
- [22] D. Soba, La série du Lom étude géologique et géochronologique d'un volcano-sédimentaire de la chaîne panafricaine à l'Est du Cameroun. Thèse de doct. d'Etat (Univ. Pierre et Marie Curie Paris), 1989.
- [23] L. Cagniard, "Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting," *Geophysics*, vol. 18, no. 3, pp. 605–635, 1953.
- [24] X. Garcia and A. G. Jones, "Atmospheric sources for audio-magnetotelluric (AMT) sounding," *Geophysics*, vol. 67, no. 2, pp. 448–458, 2002.
- [25] K. Vozoff, "The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins," *Geophysics*, vol. 37, no. 1, pp. 98–141, 1972.
- [26] A. G. Jones, "On the Equivalence of the Niblett and Bostick transformation in the Magneto telluric Method," *Geophysics*, vol. 53, pp. 72-73, 1983.
- [27] K. Vozoff, "The magnetotelluric method," in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, M. N. Nabighian, Ed., vol. 2, part B, p. 711, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Ok, USA, 1991.

- [28] M. S. Zhdanov, "Magnetotelluric and magnetovariational methods," *Geophysical Electromagnetic Theory and Methods*, vol. 45, pp. 545–645, 2009.
- [29] K. L. Zonge and L. J. Hughes, "Controlled source audio-frequency magnetotellurics," in *Electromagnetic methods in applied geophysics*, M. N. Nabighian, Ed., vol. 2, part B, pp. 448–458, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Okl, USA, 1991.
- [30] E. Manguelle-Dicoum, A. S. Bokosah, and T. E. Kwende-Mbanwi, "Geophysical evidence for a major Precambrian schist-granite boundary in southern Cameroon," *Tectonophysics*, vol. 205, no. 4, pp. 437–446, 1992.
- [31] M. A. Goldstein and D. W. Strangway, "Audio-frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source," *Geophysics*, vol. 40, no. 4, pp. 669–683, 1975.
- [32] Geometrics, *Operation manual for Stratagem systems running IMAGEM. ver. 2.16*, Geometrics Printing Press, San Jose, Calif, USA, 2000.
- [33] G. V. Keller, "Electrical properties," in *Practical handbook of physical properties of rocks and minerals*, R. S. Carmichael, Ed., pp. 359–427, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1987.
- [34] D. Eberhart-Phillips, W. D. Stanley, B. D. Rodriguez, and W. J. Lutter, "Surface seismic and electrical methods to detect fluids related to faulting," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 100, no. B7, pp. 12,919–12,936, 1995.
- [35] J. P. Nzenti, "Neoproterozoic alkaline meta-igneous rocks from the Pan-African North Equatorial Fold Belt (Yaounde, Cameroon): Biotitites and magnetite rich pyroxenites," *Journal of African Earth Sciences*, vol. 26, no. 1, pp. 37–47, 1998.
- [36] B. Kankeu, R. O. Greiling, and J. P. Nzenti, "Pan-African strike-slip tectonics in eastern Cameroon-Magnetic fabrics (AMS) and structure in the Lom basin and its gneissic basement," *Precambrian Research*, vol. 174, no. 3-4, pp. 258–272, 2009.
- [37] C. Noutchogwe Tatchum, C. T. Tabod, F. Koumetio, and E. Manguelle-Dicoum, "A gravity model study for differentiating vertical and dipping geological contacts with application to a bouguer gravity anomaly over the Foumban Shear Zone, Cameroon," *Geophysica*, vol. 47, no. 1-2, pp. 43–55, 2011.
- [38] T. Ndougsa-Mbarga, A. Meying, D. Bisso, Y. Layu D, K. K. Sharma, and E. Manguelle-Dicoum, "Audiomagnetotellurics (AMT) soundings based on the Bostick approach and evidence of tectonic features along the northern edge of the Congo Craton, in the Messamena/Abong-Mbang area (Cameroon)," *Journal of Indian Geophysical. Union*, vol. 15, no. 3, pp. 145–159, 2011.



Hindawi

Submit your manuscripts at
<https://www.hindawi.com>

