

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

CENTRE DE RECHERCHE ET DE

FORMATION DOCTORALE EN

SCIENCES,

TECHNOLOGIES ET GEOSCIENCES

LABORATOIRE DE PHYSIQUE DE

L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

DEPARTMENT OF PHYSICS

POSTGRADUATE SCHOOL OF

SCIENCE, TECHNOLOGY AND

GEOSCIENCE

LABORATORY OF PHYSICS OF

THE TERRESTRIAL

ENVIRONMENT

**CARTOGRAPHIE AEROMAGNETIQUE ET
GRAVIMETRIQUE MULTI-ECHELLE DANS
L'EST CAMEROUN**

Thèse présentée en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat/Ph.D
en Physique

Par : **OWONO AMOUGOU Olivier Ulrich Igor**

Master of science en Physique

Sous la direction de

NDOUGSA MBARGA Théophile

Ph.D

Professeur

Année Académique : 2020



UNIVERSITE DE YAOUNDE I
UNIVERSITY OF YAOUNDE I



FACULTE DES SCIENCES
FACULTY OF SCIENCE

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
DEPARTMENT OF PHYSICS

ATTESTATION DE CORRECTION DE LA THESE DE DOCTORAT/Ph.D

Nous, Professeur **NJANDJOCK NOUCK Philippe** et Professeur **NDJAKA Jean-Marie Bienvenu**, respectivement Examineur et Président du jury de la Thèse de Doctorat/Ph.D de Monsieur **OWONO AMOUGOU Olivier Ulrich Igor**, Matricule **05Q102**, préparée sous la direction du Professeur **NDOUGSA MBARGA Théophile**, intitulée : « **CARTOGRAPHIE AEROMAGNETIQUE ET GRAVIMETRIQUE MULTI-ECHELLE DANS L'EST CAMEROUN** », soutenue le **jeudi 04 juin 2020**, en vue de l'obtention du grade de Docteur/Ph.D en Physique, Spécialité Géophysique et Géoexploration, attestons que toutes les corrections demandées par le jury de soutenance ont été effectuées.

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

Fait à Yaoundé, le

Examineur

Le Président du jury

NJANDJOCK NOUCK Philippe
Professeur

NDJAKA Jean-Marie
Professeur

Le Chef de Département de Physique

DEDICACE

À :

- mon fils **MBATSOGO OWONO Yann Thierry** ;
- ma mère **Mme Veuve EYARA Marie Ambroise** ;
- mon feu père **EYARA MBASSI Théophile** ;
- mon feu grand-frère **MBATSOGO AMOUGOU Thierry Yannick.**

REMERCIEMENTS

À l'heure de finaliser ce manuscrit, il m'est agréable de remercier sincèrement tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué à son élaboration. Évidemment un bout de papier n'est pas suffisant pour que toutes les personnes auxquelles je pense soient nommément citées.

- Ma sincère gratitude va à l'endroit du **Professeur NDOUGSA MBARGA Théophile**, qui a bien voulu diriger ce travail, malgré ses multiples occupations. A son contact, j'ai bénéficié de nombreuses qualités scientifiques qui m'ont non seulement permis d'avancer dans mes recherches, mais aussi et surtout ses grandes qualités humaines se traduisant par ses conseils avisés, et son sentiment très paternel.
- Je remercie le **Professeur OWONO OWONO Luc Calvin**, Vice-Recteur Chargé des Enseignements, de la Professionnalisation et du Développement des Technologies de l'Information et de la Communication de l'Université de Yaoundé I et par ailleurs Coordonnateur de l'Unité de Recherche et de Formation Doctorale de Physique et Applications de ladite université.
- J'adresse toute ma reconnaissance au **Professeur NDJAKA Jean Marie**, Chef du Département de Physique à la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, ainsi que tous les enseignants de ce département pour la formation reçue depuis mon admission à l'Université de Yaoundé I.
- Je remercie le **Professeur NJANDJOCK NOUCK Philippe**, enseignant au Département de Physique de l'Université de Yaoundé I pour les encouragements et les multiples conseils qu'il m'a prodigués.
- J'exprime ma gratitude aux enseignants du Laboratoire de Physique de l'Environnement Terrestre, notamment les **Professeurs TABOD Charles TABOD, NOUAYOU Robert et OWONA ANGUE Marie Louise-Clotilde** pour la qualité des enseignements reçus et surtout pour leur disponibilité.

- Je porte une grande reconnaissance à l'endroit du **Professeur BEN BOLIE Hubert Germain**, enseignant au Département de Physique de l'Université de Yaoundé I, qui m'a toujours facilité la tâche face aux difficultés rencontrées au Département de Physique de l'Université de Yaoundé I et aussi pour ses multiples conseils.
- Ma reconnaissance va aussi à l'endroit de mes aînés académiques qui m'ont accueilli au Laboratoire de Géophysique et ont facilité mon insertion, tout en m'inculquant les grandes qualités scientifiques. Je pense particulièrement au **Professeur MEYING Arsène** et aux **Docteurs : BIKORO BI ALOU Marcellin, GOUET Daniel Hervé, ENYEGUE A NYAM Françoise, ZANGA AMOUGOU Alain, MONO Jean Aimé, FEUMOE Alain Narcisse, NGOUMOU Paul Claude, TEIKEU William.**
- Je remercie également les aînés du laboratoire d'Energie Environnement notamment les **Professeurs NSOUANDELE Jean Luc** et **TAMBA Jean Gaston**, pour leurs multiples conseils et encouragements.
- J'exprime toute ma reconnaissance aux membres du jury pour tout le temps précieux qu'ils ont bien voulu sacrifier afin d'examiner ce présent travail.
- A la solide équipe de recherche formée par le Professeur **NDOUGSA MBARGA Théophile** constituée de : **NGOH Jean Daniel, ASSEMBE Stéphane Patrick, PEPOGO MAN-MVELE DIDIER, ENEME Ostwald Gaëtan, YANDJIMAIN Justine, NGOA EMGBENG Stève, NYABAN Christian, BIDICHAEL WAHILE Elvis, WANDJI Antoine, MANEKENG TADJOUTEU Stella, SOUGA KASSIA Georges Voltaire, YIGUI Lionel, EYA'AN Clément, NGAH Christian, NGATCHEU Christelle** qu'elle trouve ici ma profonde gratitude pour l'ambiance et la collaboration constante tout au long de l'élaboration de ce travail.
- Ma reconnaissance va aussi à l'endroit du **Docteur ABATE Jean Marcel**, Chargé de Recherches à l'Institut de Recherches Géologiques et Minières pour sa sollicitude constante et les multiples remarques constructives.
- J'exprime ma profonde gratitude à l'endroit de mes parents tuteurs, **M. ENGONGODO Dominique** et **Mme ENGONGODO Marie Christiane**, qui m'ont encadré et soutenu durant tout mon cursus universitaire.

- Je remercie mes grands-parents **NDZIE Marthe et AMOUGOU Germain**, pour leur réconfort.
- J'exprime ma reconnaissance à l'endroit de mon grand-frère **MANI AMOUGOU Luc Armand Stève**, pour son soutien multiforme et ses multiples conseils ;
- J'exprime également ma reconnaissance au **Dr MBATSOGO Zacharie** pour ses multiples conseils ;
- Mes remerciements vont également à l'endroit de tous **mes frères et sœurs**, ainsi que tous les membres de ma famille pour le soutien constant et les multiples conseils qu'ils m'ont apporté tout au long de ma carrière universitaire.
- Je ne saurais oublier de remercier tous **mes amis et collègues de service** pour leurs multiples conseils et leur soutien sans faille.

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES SYMBOLES	xiii
LISTE DES ACRONYMES	xv
RESUME.....	xvii
ABSTRACT	xix
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE ET PROBLÉMATIQUE.....	7
INTRODUCTION.....	8
1. CRATONISATION DE LA PLAQUE AFRICAINE ET LE PRECAMBRIEN D'AFRIQUE.....	8
2. CONNAISSANCE DE L'ENSEMBLE PANAFRICAIN L'OROGENESE PANAFRICAIN	10
2.1. La chaîne Panafricaine dans le monde :	10
2.2. La chaîne Panafricaine en Afrique	11
2.3. La Chaîne Panafricaine au Cameroun	13
2.4. Les formations remaniées.....	15
2.5. Formations panafricaines « sensu stricto ».....	15
2.6. Evolution géodynamique de la Chaîne.....	17
2.6.1. Le dispositif archéen et paléoprotérozoïque	17
2.6.2. Le dispositif néoprotérozoïque.....	17

2.7. La couverture sédimentaire	18
2.8. La ligne du Cameroun	18
2.9. Cadre tectonique	19
3. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	20
3.1. Présentation géographique.....	20
3.2. Cadre géologico-tectonique.....	22
3.3. Travaux géologiques et géophysiques antérieurs.....	27
Conclusion.....	30
CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIE D'INTERPRÉTATION DES DONNÉES MAGNÉTIQUES ET GRAVIMÉTRIQUES	31
INTRODUCTION.....	32
1. IMPORTANCE DES METHODES POTENTIELLES	32
1.1. Avantages et inconvénients des méthodes potentielles utilisées.....	32
1.1.1. Les avantages	32
1.1.2. Les inconvénients	33
1.2. Mise en œuvre d'un levé géophysique aéroporté.....	33
1.3. Objectifs des méthodes potentielles	34
2. LA MÉTHODE AÉROMAGNÉTIQUE.....	34
2.1. Généralités.....	34
2.2. Force magnétique	35
2.3. Champ magnétique terrestre	35
2.4. Le champ magnétique de référence (IGRF)	38
2.5. Propriétés magnétiques des roches	39
2.6. Anomalies magnétiques	43
2.7. Levée magnétique	43
2.8. Instruments de mesure utilisés en aéromagnétisme.....	44
2.8.1. Les capteurs scalaires.....	45
2.8.2. Les magnétomètres vectoriels.....	45
2.9. Origine des données magnétiques.....	46

2.10. Organigramme de traitement des données magnétiques	47
3. LA MÉTHODE GRAVIMÉTRIQUE	48
3.1. Principes théoriques de base	48
3.2. La forme de la terre : le géoïde et l'ellipsoïde de référence	49
3.3. Densité des roches.....	50
3.4. Corrections gravimétriques de référence.....	51
3.4.1. Correction à l'air libre où correction de Faye	51
3.4.2. Correction de plateau ou de tranche plate.....	51
3.4.3. Correction de latitude.....	52
3.4.4. Correction topographique ou de relief	52
3.5. Anomalie gravimétrique : anomalie de Bouguer	52
3.6. Origine des données EGM2008.....	53
4. LIEN ENTRE LA GRAVIMÉTRIE ET LE MAGNÉTISME.....	54
5. MÉTHODES D'INTERPRÉTATION ET OPÉRATEURS DE TRANSFORMATIONS.....	56
5.1. Réduction au pôle ou à l'équateur	56
5.2. L'opérateur de prolongement vers le haut	57
5.3. Les dérivées.....	57
5.3.1. Le gradient horizontal.....	57
5.3.2. Le gradient vertical	58
5.4. Le signal analytique	59
5.5. Déconvolution d'Euler.....	59
5.6. L'angle d'inclinaison ou Tilt angle.....	60
5.7. L'analyse multi-échelle des maxima des gradients horizontaux	61
5.8. La modélisation $2^{3/4}$ -D	64
5.9. Organigramme de traitement des données gravimétriques.....	53
6. QUELQUES LOGICIELS UTILES	65
6.1. Geosoft Oasis montaj.....	65
6.2. Le logiciel Arc GIS	66

6.3. Matlab	67
CONCLUSION	68
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION	69
INTRODUCTION.....	70
1. ANALYSE DES DONNEES MAGNETIQUES.....	70
1.1. Carte de l'anomalie du champ magnétique total	70
1.2. Carte de l'anomalie du champ magnétique réduite à l'équateur	74
1.3. Carte résiduelle de la RTE prolongée à 2 km	75
1.4. Cartes du champ magnétique total prolongées vers le haut.....	76
1.4.1. Carte de la RTE réduite à l'équateur prolongée vers le haut à 1km.....	77
1.4.2. Carte de la RTE réduite à l'équateur prolongée vers le haut à 3 km....	78
1.4.3. Carte de la RTE réduite à l'équateur prolongée vers le haut à 5 km....	78
1.5. Carte du signal analytique.....	79
1.6. Gradient horizontaux directionnels.....	81
1.6.1. Gradient horizontal suivant la direction X	81
1.6.2. Gradient horizontal suivant la direction Y	82
1.7. Gradient vertical.....	83
1.8. Carte de l'angle d'inclinaison	85
1.9 Superposition des maxima du gradient vertical, du signal analytique et de l'angle d'inclinaison.....	86
1.10. Analyse multi-échelle	87
1.10.1. Analyse de la carte gradient horizontal total	87
1.10.2. Carte des maxima du gradient horizontal prolongé à 1 km, 2 km et 3km.....	88
1.10.3. Carte des linéaments structuraux de la zone d'étude.....	90
1.11. Analyse quantitative.....	91
1.11.1. Carte des solutions d'Euler	91
1.11.2. Modélisation des données profils aéromagnétiques	93
2. ANALYSE DES DONNEES GRAVIMETRIQUES	101

2.1. Carte d'anomalies de Bouguer.....	101
2.2. Cartes d'anomalies de Bouguer prolongées à plusieurs altitudes.....	103
2.3. Gradients horizontaux directionnels	106
2.3. 1. Carte du gradient horizontal suivant la direction x.....	106
2.3.2. Carte du gradient horizontal suivant la direction Y.....	108
2.4. Carte du gradient vertical.....	109
2.5. Carte du signal analytique.....	111
2.6. Carte de l'angle d'inclinaison	112
2.7. Séparation polynomiale régionale-résiduelle.....	113
2.7.1. Cartes régionales.....	114
2.7.2. Cartes résiduelles	116
2.8. Analyse multi-échelle des maxima des gradients horizontaux.....	119
2.8.1. Carte du gradient horizontal total	119
2.8.2. Superposition des maxima du gradient horizontal	121
2.9. Interprétation quantitative	124
2.9.1. Déconvolution d'Euler.....	124
2.9.2. Modélisation $2.D^{3/4}$	126
3. DISCUSSION DES RESULTATS.....	131
3.1. Validité des résultats	131
3.2. Corrélation des résultats magnétiques et du contexte géologico-tectonique local et régional.....	133
3.3. Corrélation des résultats gravimétriques au contexte géologico-tectonique local et régional.....	135
3.3. Corrélation des linéaments magnétiques et gravimétriques	137
3.4. Superposition des linéaments magnétiques et gravimétriques	139
CONCLUSION	140
.....	142
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....	142

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Schéma structural de l’Afrique indiquant la répartition des Cratons sur le continent d’après Faihead et Okereke (1988) modifié.....	9
Figure 1.2: Supercontinent Gondwana (Oliveira et al, 2006) et chaînes panafricaines (Nédélec et al., 1986 ; Nzenti et al., 1988 ; Affaton, 1998, Caby, et al. 2001).....	12
Figure 1.3. Carte orographique de la zone d’étude.....	22
Figure 1.4: Carte de reconnaissance géologique du Cameroun présentant les foliations et les linéaments, modifiée Toteu et al (2004).....	25
Figure 1.5: Carte géologique de la zone d’étude.....	26
Figure 2.1. Schéma des caractéristiques du champ magnétique principal.....	37
Figure 2.2. Champ magnétique terrestre.....	38
Figure 2.3. Valeurs des susceptibilités.....	42
Figure 2.4. Installation du levé de mesures magnétiques.....	44
Figure 2.5. Organigramme de la méthodologie de traitement des données aéromagnétiques	47
Figure 2.6. Ellipsoïde et géoïde.....	50
Figure 2.7. Levé gravimétrique.....	53

Figure 2.8. Effet de l'inclinaison des structures planaires détectées suivant la profondeur d'enfouissement.....	61
Figure. 2.9 : Méthode du gradient horizontal (a) et analyse des pendages (b) (Vanie et al., 2005).....	62
Figure. 2.10 : Détermination des maxima (d'après Blakely et Simpson, 1986)....	63
Figure 2.11. Organigramme de la méthodologie de traitement des données gravimétriques	65
Figure 3.1. Carte du champ magnétique total.....	71
Figure 3.2. Carte du champ magnétique total réduite à l'équateur.....	75
Figure 3.3. Carte résiduelle de la RTE.....	76
Figure 3.4.a. Carte de la RTE prolongée vers le haut à 1 km.....	77
Figure 3.4.b. Carte de la RTE prolongée vers le haut à 3 km.....	78
Figure 3.4.c. Carte de la RTE prolongée vers le haut à 5 km.....	79
Figure 3.5. Carte du signal analytique.....	80
Figure 3.6. Carte du gradient horizontal suivant la direction X.....	82
Figure 3.7. Carte du gradient horizontal suivant la direction Y.....	83
Figure 3.8. Carte du gradient vertical.....	84
Figure 3.9. Carte de l'angle d'inclinaison Tilt	85
Figure 3.10. Superposition des maxima du gradient vertical, du signal analytique et de l'angle d'inclinaison Tilt.....	86
Figure 3.11. Carte du gradient horizontal total	88
Figure 3.12: Carte des maxima du gradient horizontal.....	89
Figure 3.13.a. Carte structurale de la zone d'étude.....	90
Figure 3.13.b. a) Rosace directionnelle des linéaments majeurs. b) Rosace directionnelle des linéaments mineurs.....	91
Figure 3.14. Carte des solutions Euler	92

Figure 3.15 Carte du champ magnétique total réduite à l'équateur présentant les profils.....	94
Figure 3.16.a. Modèle $2^{3/4}$ D du profil magnétique P1.....	95
Figure 3.16.b. Modèle $2^{3/4}$ D du profil magnétique P2.....	96
Figure 3.16.c. Modèle $2^{3/4}$ D du profil magnétique P3.....	98
Figure 3.16. d. Modèle $2^{3/4}$ D du profil magnétique P4.....	99
Figure 3.16.e. Modèle $2^{3/4}$ D du profile magnétique P5.....	100
Figure 3.17. Carte des anomalies de Bouguer.....	102
Figure 3.18.a. Carte prolongée à 10 km.....	104
Figure 3.18.b. Carte de Bouguer prolongée à 20 km.....	105
Figure 3.18.c. Carte de Bouguer prolongée à 30 km.....	106
Figure 3.19. Carte du gradient horizontal suivant la direction X.....	107
Figure 3.20. Carte du gradient horizontal suivant la direction Y.....	108
Figure 3.21. Carte du gradient vertical.....	110
Figure 3.22. Carte du signal analytique.....	111
Figure 3.23. Carte de l'angle d'inclinaison	112
Figure 3.23. Carte régionale d'ordre 5.....	115
Figure 3.24. b. Carte régionale d'ordre 6.....	116
Figure 3.25.a. Carte résiduelle des anomalies de Bouguer à l'ordre 5.....	117
Figure 3.25.b. Carte résiduelle d'ordre 6.....	118
Figure 3.26. Carte du gradient horizontal total.....	120
Figure 3.27. Carte de superposition des maxima du gradient horizontal.....	122
Figure 3.27.a. Carte des linéaments gravimétriques.....	123
Figure 3.27.b : Rosace directionnelle des linéaments majeurs et mineurs.....	124
Figure 3.28. Carte des solutions d'Euler.....	125
Figure 3.29. Carte des anomalies de Bouguer présentant les profils.....	127
Figure 3.30.a. Modèle $2^{3/4}$ D du profil gravimétrique 1.....	128

Figure 3.30.b. Modèle $2^{3/4}$ D du profil gravimétrique 2.....129
 Figure 3.30.c. Modèle $2^{3/4}$ D du profil gravimétrique 3.....130
 Figure 3.31. Superposition des linéaments magnétiques et gravimétriques.....140

LISTE DES SYMBOLES

Δg_F : Correction de Faye

Δg_B : Correction de Plateau ou de Bouguer simple

Δg_T : Correction topographique

\vec{B} : Champ magnétique

\vec{C} : Anomalie magnétique

D : Déclinaison magnétique

F : Force magnétique/ Force d'attraction

H : Composante horizontale du champ

I : Inclinaison magnétique

G : Constance gravitationnelle universelle

g : Accélération de pesanteur

g_h : Accélération de pesanteur à une hauteur h

$\vec{g}(M)$: Champ de pesanteur total en un point M

g_e : Pesanteur à l'équateur

g_{mes} : Valeur de la Pesanteur mesurée à une station S de la surface topographique

g_P : Pesanteur aux pôles

g_{th} : Valeur de la pesanteur calculée à la surface du globe terrestre

\vec{M} : champ magnétique total

m : Masse d'un corps

m_T : Masse de la Terre

O : Centre de gravité de l'ensemble des masses terrestres

R_T : Rayon moyen de la Terre

\vec{R} : Champ de référence

W : Potentiel magnétostatique

X : Composante Nord du vecteur champ magnétique

Y : Composante Est du vecteur champ magnétique

Z : Composante verticale du vecteur champ magnétique

LISTE DES ACRONYMES

ACDI : Agence Canadienne de Développement International ;

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières ;

CC : Craton du Congo

CK : Craton du Kalahari

CN : Craton Nilotique

COA : Craton Ouest-Africain

EGM 2008: Earth Gravitational Model 2008

E-W: East-West;

ENE: East-North-East;

ESE: East-South-East;

ESRI : Environmental Systems Research Institute

ETM+: Enhanced Thematic Mapper Plus

IGRF : International Geomagnetic Reference Field

MATLAB : Matrix Laboratory

N : Nord

NE : Nord-Est

NGA : National Geospatial-Intelligence Agency

NW : North-West

RCA : République Centrafricaine

SI : Système International

SIG : Système d'Informations Géographiques

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

SE : Sud - Est

SW: South – West

UTM: Universal Transverse Mercator

W: Ouest

WGS: World Geodesic System

WNW: West-North-West

WSW: West-South-West

RESUME

La collision entre le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale a eu de grands impacts sur les points de vue géologique et tectonique, notamment la mise en place de plusieurs accidents tectoniques tels que les failles, fractures, dykes, plissements ou des charriages. La présente étude est basée sur l'interprétation des données aéromagnétiques et des données gravimétriques EGM2008 par le biais de l'utilisation de plusieurs opérateurs mathématiques. Ces données ont été traitées par le logiciel Oasis Montaj de Geosoft. Il a été établi ici des cartes du champ magnétique total et des anomalies de Bouguer. Celles-ci ont subi deux types d'analyses en l'occurrence l'analyse qualitative et l'analyse quantitative. L'analyse qualitative a reposé sur l'interprétation des cartes des gradients horizontaux et verticaux, des cartes du signal analytique, de l'angle d'inclinaison Tilt, des cartes prolongées, des cartes résiduelles et régionales (pour l'analyse gravimétrique). L'analyse quantitative quant à elle s'est appuyée sur l'interprétation des cartes de déconvolution d'Euler et la modélisation $2^{3/4}$ -D à partir des profils magnétiques et gravimétriques.

Ce travail a permis d'établir des cartes structurales interprétatives de la zone d'étude à partir des linéaments magnétiques et gravimétriques. Ces cartes ont permis de mettre en évidence plusieurs accidents tectoniques caractérisés par plusieurs structures linéaires dont les directions principales sont ESE-WNW, ENE-WSW, NE-

SW, NW-SE et des directions secondaires E-W et N-S. Ces structures sont liées aux failles, fractures, dykes, plissements d'une part, et des anomalies circulaires assimilées aux intrusions de matériaux fortement magnétiques ou aux dômes granitiques d'autre part. L'analyse quantitative quant à elle a permis d'évaluer les profondeurs des sources des anomalies causatives de ces accidents. Il en découle que pour l'étude aéromagnétique, les sources perturbatrices les plus profondes ont été évalué à des profondeurs supérieures ou égales à 14 km et elles ont été localisées dans les zones Ouest et Centre de la zone d'étude ; tandis que pour l'étude gravimétrique, les plus profondes se situent à des profondeurs supérieures à 17 km et sont localisées au Sud de la zone d'étude.

Tous ces éléments structuraux mis en évidence dans la présente étude semblent bien corrélés avec les travaux géologiques et géophysiques menés tant dans la zone d'étude qu'au niveau régional. Toute chose qui semble bien confirmer que la zone d'étude a été le théâtre d'intenses mouvements tectoniques résultant de la collision entre le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale.

Mots clés : Craton du Congo, Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale, failles, linéaments ; aéromagnétisme, gravimétrie, anomalie ; analyse qualitative, analyse quantitative.

ABSTRACT

The collision between the Congo Craton and the Central Pan-African Belt produced important geological and tectonic impacts including the setting up of tectonic accidents such as faults, fractures, dykes, folds or thrusting. The present study is based on interpretation of aeromagnetic data and EGM 2008 gravity data using mathematical operators. These data have been processed by the computer program Geosoft Oasis Montaj. Maps of the total magnetic intensity and that of the Bouguer have been established here. Qualitative analysis was based on the interpretation of horizontal and vertical gradient maps, analytical signal and Tilt angle maps, upward continued maps. Residual and regional maps were derived from gravity analysis. Quantitative analysis relied on the interpretation of Euler deconvolution maps and $2^{3/4}$ -D modeling deduced from magnetic and gravity profiles.

This work enables to bring out interpretative structural maps from magnetic and gravity lineaments. These maps highlight some tectonic accidents characterized by linear structures. Their major directions trend ESE-WNW, ENE-WSW, NE-SW, NW-SE while secondary directions follow E-W and N-S. On one hand, these linear structures are related to faults, fractures, dykes and folds; on the other hand, circular anomalies are assimilated to intrusions of high magnetic materials or granite domes.

Quantitative analysis evaluates the depths of causative anomalies sources. Aeromagnetic study reveals that the disturbing sources were estimated at depths greater than or equal to 14 km and located in the western and central zones of the study area; while gravity filtering situated these deepest sources in the south of the study area, at depths greater than 17 km.

The structural elements highlighted in this study seem to correlate with the previous geological and geophysical work carried out both in the study area and at the regional scale. It seems to confirm that the study area was the scene of intense tectonic movements resulting from the collision between the Congo Craton and the Central Pan African Belt.

Key words: Congo Craton, Central Pan African Belt, faults, lineaments, aeromagnetism, gravity, anomaly, qualitative analysis, quantitative analysis.

INTRODUCTION GENERALE

La géophysique est une science qui étudie les propriétés physiques du sous-sol dans le but d'en caractériser la structure et la composition. Elle s'occupe spécialement de la pesanteur, de la gravitation, du magnétisme, de l'électricité terrestre et atmosphérique, de la sismique réflexion et réfraction, des phénomènes de tremblement de terre, de la radioactivité, de la climatologie, du volcanisme, ainsi que de tous les problèmes de l'environnement. Ses investigations vont au-delà de l'observation des affleurements à laquelle se limitent généralement les méthodes géologiques d'exploration. Les investigations géophysiques permettent de gagner en temps dans l'exploration des surfaces à grande échelle et d'avoir, grâce à ses multiples méthodes, des informations géologiques, minières et minérales dans les zones d'accès difficile et non accessibles pour la prospection géologique.

La conception des systèmes d'acquisition et de traitement de données a fait d'elle une science appliquée dont l'importance scientifique et économique n'est plus à démontrer. La prospection géophysique est d'une importance capitale dans la recherche et la détermination des formations géologiques d'intérêt, de celles abritant les hydrocarbures, les substances minérales, des sources d'eau minérales ou géothermales.

Dans le cadre de ce travail, l'étude de la structure de la terre se fera par le biais des méthodes magnétique et gravimétrique reconnues sous le vocable de « méthodes potentielles » et qui reposent respectivement sur la détermination du champ magnétique et du champ de pesanteur.

Contexte et justification

La géologie du Cameroun est marquée par ses grands ensembles litho-structuraux, en l'occurrence le craton du Congo au Sud et la Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale au Nord. Cette Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale est le résultat de la collision entre les cratons du Congo-craton Sao Francisco et le

Craton Ouest Africain (Castaing et al., 1994, Toteu et al., 2004, Penaye et al., 2006). Ce dynamisme tectonique et les évènements géologiques multiformes à l'instar du volcanisme tertiaire actuel responsable de la mise en place de la Ligne Volcanique du Cameroun, ont moulé l'architecture de cette Chaîne Panafricaine. C'est ainsi que des recherches géologiques tant pétrographiques, géochimiques que géochronologiques sont menées pour mieux comprendre son histoire.

Les méthodes potentielles utilisées dans ce travail, apparaissent comme des outils importants pour améliorer l'information géologique dans la zone d'étude. Le choix de celles-ci est adéquat par rapport à l'étendue de la zone d'étude d'une part et d'autre part, au fait qu'elles permettent de localiser facilement les accidents tectoniques d'autre part.

Problématique

Le Cameroun, avec un contexte géologique favorable à l'exploitation des ressources minières, est en phase de devenir un grand pays minier. Pour ce faire, de nombreux travaux y ont été effectués. C'est ainsi que, la partie Est du Cameroun, à l'instar de toutes les régions du pays, a subi plusieurs investigations géologiques et minières. Celles-ci ont permis d'une part, d'établir que le pays est traversé par deux grandes unités, à savoir la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale au Nord et le Craton du Congo au Sud, et d'autre part de découvrir de gîtes des substances minérales telles que les métaux précieux ou de base, les hydrocarbures ou les sources d'eau minérales et thermales. Cependant, le sous-sol reste toujours mal connu. Les résultats issus de l'investigation des données potentielles peuvent donc constituer une réponse à la connaissance de la géométrie structurale de la partie Est-Cameroun, faisant l'objet de cette étude.

Hypothèses de recherche

Le Cameroun a subi une activité tectonique intense marquée par plusieurs phases de déformation accompagnées par des plissements, des cisaillements, des

fractures ou des failles. On y retrouve plusieurs structures d'évolution et d'âges différents réparties du Nord au Sud entre les domaines Panafricain et Cratonique. Les études géologiques et tectoniques menées au Cameroun en général et à l'Est Cameroun en particulier, reposent généralement sur les observations géologiques de surface ou de proche surface qui ne donnent pas toujours assez d'informations sur le substratum. La structuration du sous-sol dans la zone d'étude n'est pas encore bien connue. Plusieurs traits tectoniques ont été mis en évidence dans les travaux menés à l'échelle régionale. Les limites entre la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale et le Craton du Congo restent également mal connues dans cette partie du Cameroun.

Objectifs de l'étude :

Pour mener à bien cette étude, il est nécessaire de fixer un certain nombre d'objectifs.

Objectif général

L'objectif général de cette étude est de procéder à une cartographie aéromagnétique et gravimétrique multi-échelle de la partie Est du Cameroun située entre les latitudes 4° et 5° Est et les longitudes 13° et 14° Nord.

Objectifs spécifiques

De manière spécifique, il sera question :

- ✓ de modéliser les données aéromagnétiques de Paterson et al. (1976) disponibles et gravimétriques EGM 2008 ;
- ✓ de procéder à une analyse qualitative des données magnétiques et gravimétriques ;
- ✓ de réaliser une cartographie des anomalies magnétiques et gravimétriques de la zone d'étude;

- ✓ de localiser et d'identifier les structures géologiques superficielles et profondes de la zone d'étude ;
- ✓ de procéder à l'étude quantitative des données magnétiques et gravimétriques à travers la déconvolution d'Euler et de la modélisation $2^{3/4}$ -D des profils magnétiques et gravimétriques ;
- ✓ d'établir des corrélations avec les observations géologiques et les études géophysiques antérieures.

Résultats attendus

La présente étude devrait permettre d'identifier les discontinuités ou les accidents tectoniques tels que les failles, les fractures, les dykes, les plissements ou des intrusions quelconques qui auraient eu cours dans la zone d'étude. L'analyse quantitative permettra de donner les profondeurs des grands traits structuraux les formes géométriques des anomalies observées.

Importance de l'étude

Le présent travail est d'une importance capitale, tant sur le plan environnemental que sur le plan socio-économique en ceci qu'il permettrait non seulement de détecter et de délimiter les zones potentiellement dangereuses, mais aussi de mieux œuvrer pour l'amélioration de l'information minière du pays à travers l'exploration des substances minérales. Il permettra donc principalement :

- de prévenir les catastrophes naturelles ;
- d'améliorer les connaissances structurales régionales et locales pour une connaissance structurale des formations superficielles et profondes ;
- d'élaborer une cartographie des environnements géométriques et des pièges structuraux susceptibles d'héberger les ressources minérales, et les gîtes des eaux minérales et de sources pour l'amélioration des conditions d'accès à l'eau potable.

Plan du mémoire

Afin de mener cette investigation à terme, le travail a été réparti en trois chapitres dont la quintessence est brièvement indiquée suivant la structuration ci-dessous :

- Le premier chapitre sera consacré à la synthèse bibliographique du Cameroun en général et de sa partie Est en particulier. Celle-ci donnera les principaux résultats géologiques et tectoniques de la région en rappelant les principaux résultats des travaux géologiques antérieurs réalisés à l'échelle tant locale que régionale ;

- Le deuxième chapitre quant à lui présentera les fondements des méthodes de champs potentiels, leurs avantages opérationnels et leurs inconvénients, leurs principes théoriques, les processus d'acquisition desdites données. Il fera ensuite ressortir les bases sur les différents filtres mathématiques desquels découlera le traitement des données magnétiques et gravimétriques ; et présentera le lien qui existe entre les méthodes magnétiques et gravimétriques ;

- Le troisième et dernier chapitre traitera d'une part, de l'interprétation qualitative à travers l'analyse et l'interprétation des cartes (TMI, RTE, gradients, signal analytique, angle d'inclinaison, prolongement vers le haut, régionales résiduelles), et d'autre part, de l'interprétation quantitative principalement basée sur la déconvolution d'Euler et la modélisation $2^{3/4}$ -D des profils préalablement choisis. Une discussion à la fin de ce chapitre, permettra de corrélérer les résultats obtenus dans cette étude avec les travaux géologiques et géophysiques menés à l'échelle locale et régionale. In fine, une conclusion générale résumera l'essentiel des résultats obtenus dans ce travail. Elle sera assortie de perspectives visant à affiner nos conclusions.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, il sera question tout d'abord de situer le Cameroun dans son contexte géologico-tectonique, ensuite de faire une présentation de la zone d'étude. Celle-ci consistera en la présentation géographique d'une part, et en la situation géologique, tectonique et géodynamique, d'autre part.

1. CRATONISATION DE LA PLAQUE AFRICAINE ET LE PRECAMBRIEN D'AFRIQUE

La cratonisation du continent africain a débuté à une époque fort reculée du catarchéen, et elle a été parachevée par l'orogénie mayombienne qui préfigure déjà le régime précambrien moyen et supérieur (Black, 1967 ; Trompette, 1996). Postérieurement aux orogénies du précambrien supérieur et du début du Paléozoïque, l'essentiel de l'histoire géologique africaine se jouera désormais dans les zones mobiles (Penaye, 1989 ; Kennedy, 1964 ; Rocci, 1965 ; Black, 1966, 1967). Elles sont rajeunies par l'épisode thermo-tectonique panafricain et ont été notamment le siège des manifestations volcaniques et tectoniques (Kennedy, 1964). Les zones mobiles ont subi des compressions tangentielles d'une part, et d'autre part elles ont subi des déplacements horizontaux ou verticaux importants (Eno-Belingha, 1984). Dans des cas favorables, ces accidents ont été accompagnés de mouvements d'extension en provoquant la formation de grabens ou rifts accompagnés de volcanisme intense. Ces mouvements sont liés à l'ouverture de l'Atlantique Sud (Eno-Belingha, 1984). Les travaux réalisés par certains auteurs (Rocci, 1965 ; Clifford, 1970) font ressortir quatre cratons à savoir : le Craton du Kalahari, le Craton Nilotique, le Craton Ouest Africain et le Craton du Congo (Figure 1.1). La succession des orogénèses a eu pour effet d'aboutir à une cratonisation progressive du continent à partir de noyaux primitifs. Les études ultérieures, et en particulier les mesures de géochronologie, ont conduit à insister sur l'importance de "l'événement thermotectonique panafricain "de

Kennedy (1964) qui allait très vite être considéré comme un véritable cycle orogénique avec sédimentation, métamorphisme et granitisation (Black, 1966, 1967) aboutissant à une véritable chaîne panafricaine. Les concentrations minérales sont également liées aux zones mobiles. En effet, plusieurs gisements miniers africains se disposent aux contacts des zones mobiles et des cratons stables.

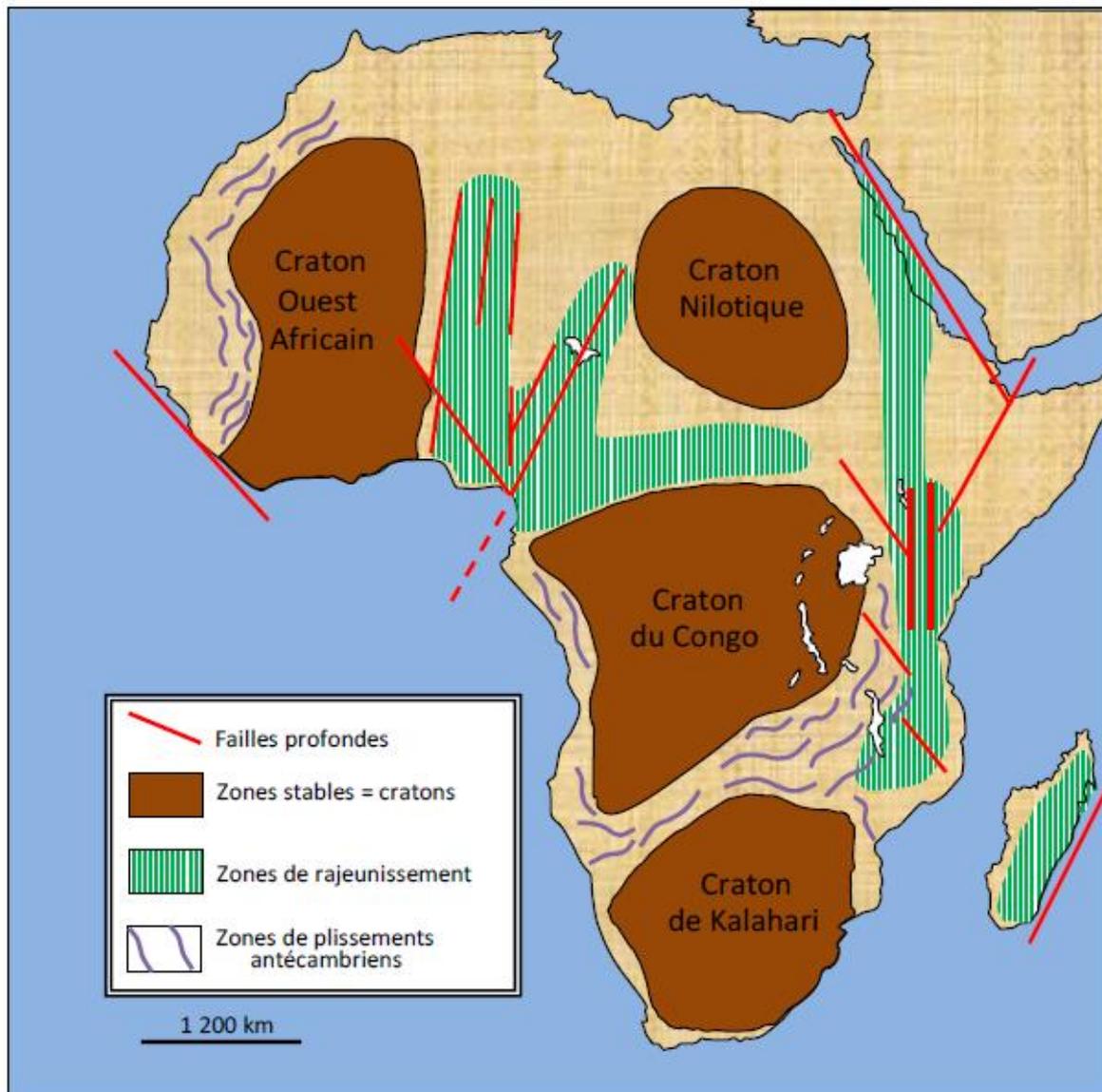


Figure 1.1: Schéma structural de l'Afrique indiquant la répartition des cratons sur le continent d'après Faihead et Okereke (1988) modifié.

2. CONNAISSANCE DE L'ENSEMBLE PANAFRICAIN :

L'OROGENESE PANAFRICAIN

Kennedy (1984) a analysé l'orogénèse panafricaine comme une simple réactivation ou un rajeunissement du socle archéen. La connaissance de cette orogénèse panafricaine est en relation avec les événements ayant marqué l'évolution du Gondwana et celle de la chaîne panafricaine qui borde le Nord du Craton du Congo (Eno-Belinga, 1984).

2.1. La Chaîne Panafricaine dans le monde :

L'assemblage du Gondwana autour de 600 Ma et la double collision entre trois méga-plaques lithosphériques constituent les principaux événements qui caractérisent l'origine de l'orogénèse panafricaine (Trompette, 2000). Le Panafricain couvrant la période allant de 1000 ± 10 Ma à 500 ± 10 Ma est responsable de la constitution et la structure du paléocontinent Gondwanien (Trompette, 1996).

On rencontre les formations panafricaines en Australie, en Antarctique, en Inde, en Amérique Latine, en Afrique où elles forment un vaste et complexe réseau de domaines orogéniques qui soudent les blocs cratoniques antépanafricains. Ainsi le Gondwana s'est constitué au Protérozoïque Supérieur lors de l'orogénèse panafricaine. Plusieurs auteurs (Poidevin, 1985 ; Nédélec, 1986 ; Minyem et al., 1987 ; Trompette, 1994 ; Penaye et al, 1993 ; Toteu et al., 1994) interprètent ces ceintures dans leur grande majorité comme des chaînes de collision. Les zones de collision sub-méridienne à méridienne correspondent à la Chaîne Mozambicaine (à l'Ouest) qui soude les Gondwana Ouest et Centre et une succession de chaînes unissant le Sahara au Cap de Bonne Espérance (Trompette, 1994, 2000 ; Ngako et al., 2007). Ces zones de collision sont d'origine océanique (Meert et al., 2007) (Figure 1.2).

2.2. La Chaîne Panafricaine en Afrique

L'Afrique est le continent le plus touché par l'orogénèse panafricaine. En effet, plus de la moitié des formations panafricaines y affleurent (Goodwin, 1988). En outre, les ceintures orogéniques les plus vastes y sont observées. La chaîne panafricaine couvre plusieurs pays d'Afrique Centrale (Nigéria, Cameroun, Tchad, République Centrafricaine) et se prolonge à l'Est au Soudan, en Ouganda et en Tanzanie (Theunissen et al., 1992). Ce vaste domaine correspond à la Ceinture d'Afrique Centrale (Bessoles & Trompette, 1980) qui s'est formée lors de la convergence entre le Craton Ouest-Africain, les Cratons du Congo et São Francisco, et les métacratons Latea et Saharien (Castaing et al., 1994 ; Abdelsalam et al., 2002; Liégeois et al., 2003 ; Pouclet et al., 2006) (Figure 1.2).

Dans un secteur qui s'étend du Centre-Cameroun au Centre-Nigéria et qui se prolonge au Nord de la chaîne transsaharienne, se trouve le domaine polycyclique Cameroun-Nigéria qui correspond à un craton presque totalement remanié (Trompette, 1994). Au Cameroun, on rencontre du Sud vers le Nord, le Craton du Congo et sa couverture, le domaine Centre-Camerounais et le domaine Nord (Ngako, 1986 ; Penaye, 1988 ; Nzenti, 1994). Dans le cadre général de la ceinture panafricaine-brésilienne, une comparaison entre la cinématique et l'âge de la déformation au nord du craton du Congo et à l'Est du craton de l'Afrique de l'Ouest, suggère que l'évolution tectonique générale du domaine mobile panafricain entre les deux cratons a été contrôlée par leurs mouvements relatifs (Toteu et al., 2004).

Ces zones mobiles représentent des ceintures orogéniques correspondant à des terrains d'âge panafricain entourant les trois cratons africains : le Craton Ouest-Africain est limité à l'Est par les Pharusides et au Sud-Est par les Dohoméyides ; le Craton du Congo est limité au Nord par les Oubanguides et le Craton Sud-Africain ou du Kalahari est limité au Nord par le Damara. La chaîne des Oubanguides correspond à l'extension paléogéographique de la chaîne

brésilienne limitée au Sud par le craton de São-Francisco. Elle est caractérisée par de grands cisaillements E-W et une ceinture trans-subsaharienne ou ceinture de haut grade de métamorphisme qui a subi une poussée vers le Sud (Penaye, 1989 & 2004 ; Ngako et al., 2003).

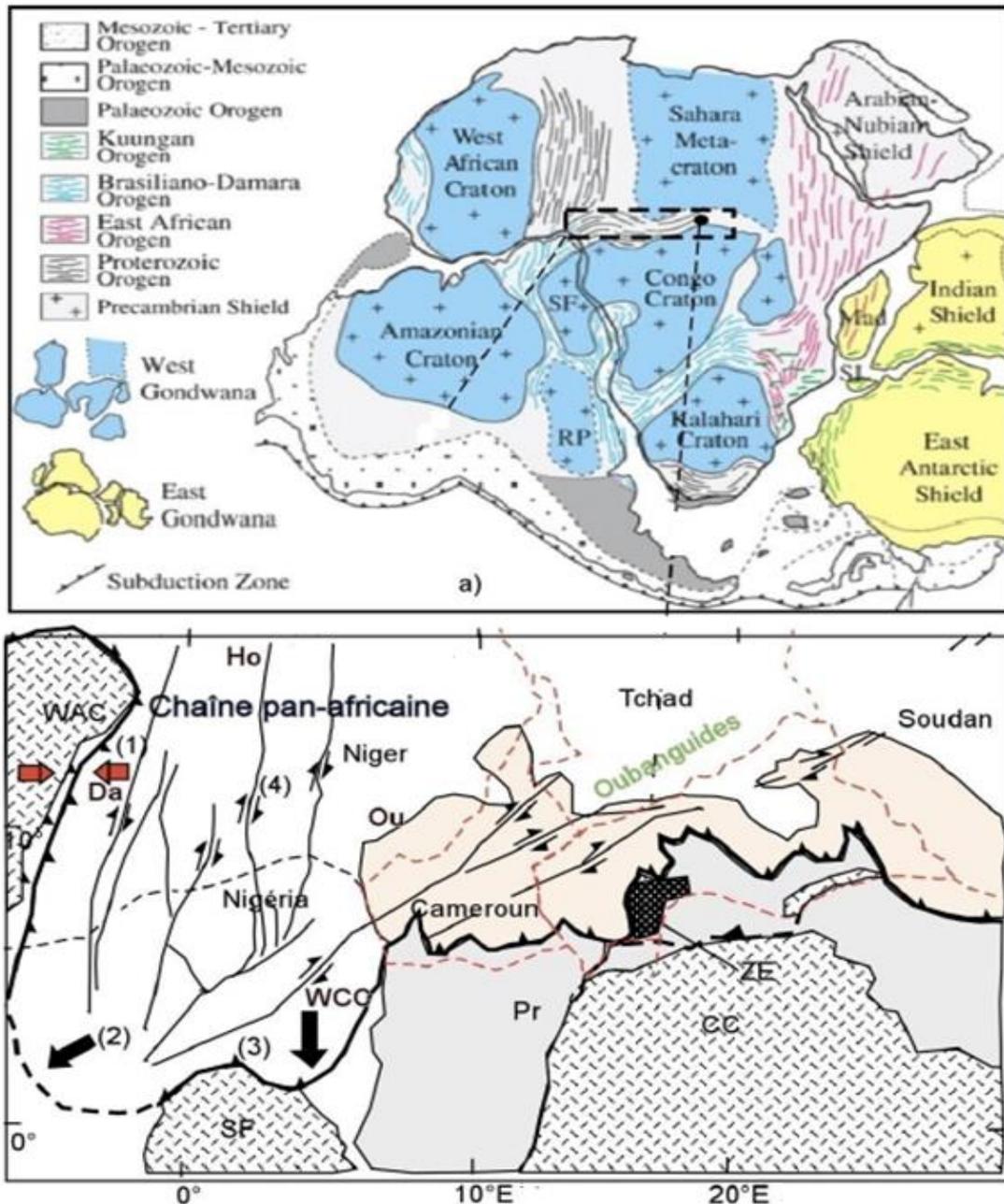


Figure 1.2: Supercontinent Gondwana (Oliveira et al, 2006) et chaînes panafricaines (Nédélec et al., 1986 ; Nzenti et al., 1988 ; Affaton, 1998, Caby, et al., 2001)

(a) Supercontinent Gondwana. Ouest du Gondwana (bleu clair) ; Gondwana oriental (jaune) ; ceintures orogéniques néoprotérozoïques sillonnant le supercontinent ; ceintures orogéniques liées à la fusion finale du supercontinent Afrique de l'Est (rouge), l'orogène Damara-Brasiliano (bleu) et Kuungan orogène (vert).

(b) La chaîne panafricaine d'Afrique Centrale : reconstitution géodynamique à l'échelle continentale (Oliveira et al., 2006) ; Dispositif de zones de cisaillement panafricaines liées au poinçonnement du métacraton Est-saharien ; (1) direction et sens de convergence et de collision ; (2) direction et sens de déplacement des nappes panafricaines ; (3) contact de chevauchement ; (4) sens de déplacement fini-panafricain dans les zones de cisaillement ; cratons archéens (WA=Ouest-africain, SF=São Francisco ; CC=craton du Congo) ; Pr =Protérozoïque; RCA (en pointillé gras rouge).

2.3. La Chaîne Panafricaine au Cameroun

Les formations panafricaines du Cameroun appartiennent à la zone mobile d'Afrique Centrale (Lassere & Soba, 1979 ; Bessole & Trompette, 1980) encore appelée Chaîne Panafricaine Nord-Equatoriale (Nzenti, 1987 ; Nzenti et al., 1988) ou chaîne des Oubanguides (Poidevin, 1985 ; Trompette, 1994). La chaîne des Oubanguides se rattache à l'Est aux formations panafricaines de la ceinture mozambicaine d'orientation subméridienne. A l'Ouest, elle se prolonge au Nord du Brésil par la chaîne Sergipe. Elle est caractérisée par la mise en place des Gbayas (Rolin, 1992), datée d'environ 640 Ma (Pin & Poidevin, 1987) et les grands décrochements N70 au Nord de la Centrafrique (Cornachia & Giorgi, 1986). L'ensemble forme une mégaceinture orogénique de direction E-W et une ceinture trans-subsaharienne ou ceinture de haut grade de métamorphisme qui a subi une poussée vers le Sud (Penaye, 1989, 2004 ; Ngako et al., 2003). Celle-ci a une longueur supérieure à 5000 km et une largeur d'environ 300 km, pincée

entre le Craton du Congo-São Francisco au Sud et le complexe polycyclique brésilo-centrafricain au Nord (Trompette, 1994). Les Oubanguides constituent le socle du territoire camerounais, à l'exception de la partie qui s'étend au Sud du Parallèle 3° Nord, entre 10° et 14° de longitude Est et qui comporte deux sous-ensembles :

- Le complexe archéen du Ntem, bordure septentrionale du Craton du Congo ;
- Les séries éburnéennes de l'Ayina et du Bas-Nyong qui bordent le complexe du Ntem au Sud-Est et au Nord-Ouest respectivement. La géologie de l'Ayina est mal connue. Cependant elle est constituée comme une partie de la bordure Est du Craton du Congo restructurée et mobilisée à l'Eburnéen (Maurizot et al., 1986 ; Feybesse et al., 1987). Les connaissances sur la série du Bas-Nyong sont plus précises. Elle comprend, comme celle de l'Ayina, une partie de la bordure Nord-Ouest du Craton du Congo restructurée et remobilisée à l'Eburnéen (Minyem & Nédélec, 1990 ; Nédélec et al., 1993 ; Minyem, 1994), mais aussi aux formations mises en place lors de l'orogénèse éburnéenne et des formations du vieux bâti archéen remanié (Toteu et al., 1994).

Le Panafricain du Cameroun correspond à un ensemble de métamorphites et de plutonites dont l'âge varie entre 800 ± 50 Ma et 500 ± 50 Ma. Après les travaux géologiques de reconnaissance entrepris depuis les années cinquante, une synthèse a été faite par Regnault (1986), réactualisée par Bertrand et al. (1994). Des données récentes ont été apportées par Tchouankoué (1992), Nzenti (1994), Nzenti (1998), Ngako (1999). Elles permettent de regrouper les formations panafricaines en deux ensembles, sur la base de leur évolution tectonométamorphique et lithologique à savoir :

- Les formations héritées d'un bâti plus ancien mais restructurées et partiellement remaniées au Panafricain ;
- Les formations panafricaines « stricto sensu », mises en place au cours de cette orogénèse.

2.4. Les formations remaniées

Elles portent l'empreinte de l'orogénèse panafricaine. Elles se retrouvent entre le Craton archéen du Sud et le domaine Nord de la Chaîne Panafricaine (Penaye, 1988 ; Ngako, 1991 ; Nzenti et al., 1994). Les bordures Nord-Ouest et Sud-Est de la partie Sud ont été affectées au protérozoïque inférieur (Eno Belinga, 1984). Plusieurs travaux (Manguelle Dicoum et al., 1992 ; Mbom Abane, 1997) montrent que le Craton congolais se poursuit sous la nappe panafricaine jusqu'à une limite ENE-WSW passant par Edéa. Les roches de cette zone portent les marques métamorphiques, structurales et radiochronologiques caractéristiques du Panafricain (Toteu et al., 1984).

Les formations polycycliques sont observées au sein des formations panafricaines au Nord du Lom (Ngako, 1986 ; Penaye, 1988), ainsi que dans le domaine Centre Camerounais (Nzenti et al., 1994 ; Toteu et al., 1994).

2.5. Les formations panafricaines « stricto sensu »

Elles correspondent au groupe de Yaoundé, aux séries du Lom et de Poli, sous-ensemble situé au Sud, à l'Est et au Nord respectivement à un ensemble granito-gneissique de l'Ouest (Eno-Belinga, 1984). On retrouve ainsi, les granitoïdes essentiellement représentés par les granites syn-tectoniques qui soulignent la zone de la faille du Cisaillement Centre Camerounais (Nzenti et al., 1994 ; Nzenti, 1998 ; Njanko, 1999), les gneiss indifférenciés et les roches métasédimentaires constituées de schistes volcano-sédimentaires et graphiteux, de quartzites et de micaschistes (Soba, 1989).

Plusieurs travaux effectués sur le Panafricain du Cameroun permettent de le subdiviser en trois domaines qui sont : le domaine Nord, le domaine Centre et le domaine Sud (Nzenti et al., 1984).

- Le domaine Nord couvre la zone allant de Poli à l'Extrême Nord du Cameroun. Cette zone correspondant à un domaine d'accrétion constitué de granites, métasédiments, métavolcanites, métagranodiorites, métadiorites, même si on note des reliques d'âge Eburnéen (Toteu, 1987).
- Le domaine Centre Camerounais qui est un domaine continental intermédiaire pro-parte d'âge Paléoprotérozoïque repris au Panafricain (Nzenti et al., 1994), est représenté par la région de l'Adamaoua et du Mbam. Il est constitué de sédiments métamorphiques d'âge panafricain, de nombreux granites d'âge panafricains mais aussi de granulites anciennes d'âge Protérozoïque (Penaye, 2004).
- Le domaine Sud qui est un domaine continental ancien, correspond au Craton du Congo et aux séries de Yaoundé. Le Craton apparaît comme un ensemble complexe de formations d'âge Paléoprotérozoïque (Nzenti et al., 1988 ; Nzenti, 1998). La bordure Nord du Craton Congolais est recouverte de sédiments panafricains correspondant aux séries d'Ayos-Mbalmayo-Bengbis et de Yaoundé. La présence dans la série de Yaoundé de niveaux évaporitiques et de volcanites suggère fortement un contexte de dépôt. Cette zone peut être interprétée comme un domaine extensif au Nord du Craton avec amorce d'une fragmentation du Craton ancien et installation de bassin. Les granulites de la région de Yaoundé qui ont cristallisé au cours d'une tectonique tangentielle témoignent d'un épaissement crustal par redoublement de la croûte lié à un chevauchement à vergence Sud (Nzenti, 1987), ce qui évoque un contexte de collision, mais l'absence de suture identifiée (ou de roche s'y rapportant) pourrait indiquer que cette tectonique

tangentielle accompagnée d'un métamorphisme de haute pression, aurait un caractère intercontinental.

2.6. L'évolution géodynamique de la Chaîne

Les synthèses des données géologiques sur la chaîne permettent de mettre en évidence de nombreux caractères communs entre les différents domaines de la chaîne et apportent des éléments pour un modèle géodynamique de celle-ci (Nzenti, 1998 ; Nzenti et al., 1999).

2.6.1. Le dispositif archéen et paléoprotérozoïque

Il comporte un noyau archéen, dans la partie méridionale de la chaîne et des formations fortement métamorphiques d'âges paléoprotérozoïques vers le Nord.

2.6.2. Le dispositif néoprotérozoïque

La succession du Sud vers le Nord dans la chaîne panafricaine Nord-Equatoriale montre :

- Au Sud un domaine continental ancien (roches plutoniques et métamorphiques archéennes et paléoprotérozoïques) sur lequel repose une couverture sédimentaire d'âge panafricain. Cette couverture est préservée dans les séries de Yaoundé, Ayos-Mbalmayo-Bengbis et du Lom.
- Au Nord une zone d'accrétion formée de granodiorites, de diorites et de granites calco-alcalins, de métasédiments, de volcanites.

En dépit de ces deux domaines très contrastés, cette chaîne présente une certaine cohérence :

- L'unicité de la structure avec des directions cinématiques cohérentes (charriage vers le SSW) et un champ de raccourcissement NNE-SSW ;
- L'unicité de l'environnement pré-panafricain marqué par l'omniprésence de reliques granulitiques suggérant d'une part l'existence d'une croûte

ancienne (caractère intracontinental), d'autre part une croûte fortement amincie (granulites anciennes comme substratum des séries panafricaines).

2.7. La couverture sédimentaire

Elle repose sur le socle Précambrien, et est le témoin d'une émergence depuis le Précambrien terminal (Meying, 2011). Le golfe de Guinée reste la région où sont localisées les premières manifestations marines, témoin de l'ébauche d'océanisation de l'Atlantique Sud au cours de l'Albien (Cornachia et al., 1983). 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 inférieur qui couvrent le Golf de Mamfé, le fossé de la Bénoué, le bassin de Bida (Genik, 1992).

2.8. La ligne du Cameroun

La ligne du Cameroun, large d'une centaine de kilomètres, s'étire sur 1 600 kilomètres suivant la direction N30°E (Vicat, 1998). Ce rift se compose de massifs montagneux, volcaniques, océaniques et continentaux qui se suivent du Golfe de Guinée jusqu'au Lac Tchad. La ligne du Cameroun est oblique sur le Cisaillement Centre Camerounais sur lequel se localise le plateau volcanique de l'Adamaoua, et est constituée d'une soixantaine de complexes anorogéniques composés de roches plutoniques variées (granites, diorites, syénites, gabbros), d'origine mantellique, d'affinité alcaline à hyperalcaline et parfois associées à des volcanites. Son extrémité septentrionale est constituée des monts Mandara, au Sud-Ouest du lac Tchad, et se prolonge vers le Sud-Ouest par les monts Atlantika, les monts Shebshi, l'Adamaoua (qui constitue un haut plateau du centre du Cameroun), les hauts plateaux de l'Ouest et le mont Cameroun. À partir de cette montagne, la ligne du Cameroun « plonge » dans le golfe de Guinée et émerge avec les îles Bioko, São Tomé et Príncipe puis Annobón à son extrémité

méridionale. La partie méridionale de la ligne du Cameroun est ponctuée de volcans nés du point chaud du Cameroun. Il s'agit des îles que le rift forme dans le golfe de Guinée, au Mont Cameroun et au Mont Manengouba. La mise en place du magmatisme de la ligne du Cameroun apparaît liée à la réactivation d'anciennes structures panafricaines dans un contexte qui a fait l'objet d'interprétations variées (Déruelle et al., 1991). Un volcanisme trachy-basaltique en relation avec l'ouverture des accidents majeurs préexistants qui a débuté au cours de l'épisode magmatique Eocène dit ultime (Cornachia & Dars, 1983) se poursuit jusqu'à ce jour (mont Cameroun toujours en activité).

2.9. Le cadre tectonique

Plusieurs traits tectoniques caractérisent la zone d'étude, les plus importants sont : la faille de la Sanaga qui constitue un grand linéament méridional et continu d'Afrique Centrale. Il marque au sein du socle remobilisé au Panafricain le glissement dextre d'une partie Nord-Ouest par rapport à une partie Sud-Est restée solidaire au Craton du Congo (Dumont, 1985). Le Cisaillement Centre Camerounais, majeur du faisceau tectonique de l'Adamaoua, qui constitue le décrochement ductile à ductilo-fragile dextre de direction ENE-WSW (Nzenti et al., 1988 ; Ngako et al., 1991). Il s'agit d'un méga linéament de plusieurs kilomètres de long, caractérisant un système conjugué de failles se poursuivant en RCA et en Afrique de l'Est (Dorbath et al., 1986). Le fossé de l'Adamaoua qui est associé aux failles qui bordent la partie méridionale du plateau de l'Adamaoua. Il comprend le fossé crétacé du Mbéré et le bassin du Djérem et correspond à un couloir d'environ 300 km de long sur 200 km de large orienté N60° à N70° (Dumont, 1987), masqué en surface par les basaltes qui constituent la limite géographique entre le fossé du Mbéré et le bassin du Djérem.

3. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

3.1. La présentation géographique

La zone faisant l'objet de la présente étude se situe à l'Est du Cameroun. Ses coordonnées géographiques sont 4° et 5°N de latitude Nord et 13° et 14° E de longitude Est, soit une superficie d'un degré au carré d'environ 111,111 km² (Figure 1.4).

Notre zone d'investigation est arrosée par plusieurs cours d'eau dont les collecteurs sont la Sanaga et la Kadeï. La Sanaga constitue l'histoire tectonique du Cameroun notamment avec la faille de la Sanaga (Dumont, 1986). Le réseau hydrographique est de type dendritique et fait ressortir plusieurs directions notamment NE-SW, NW-SE, ENE-WSW, ESE-WNW et N-S.

C'est une zone intermédiaire entre deux climats : le climat tropical du Nord et le climat équatorial du Sud (Gazel & Gérard, 1954 ; Gazel, 1955). Le climat ici est caractérisé par deux saisons des pluies et deux saisons sèches s'échelonnant comme suit :

- de décembre à mai : la grande saison sèche ;
- de mai à juin, la petite saison de pluie ;
- de juin à juillet, la petite saison sèche
- et enfin d'août à novembre : la grande saison des pluies, avec des averses sporadiques.

Les précipitations se situent à l'ordre de 1569 mm annuellement et la température moyenne annuelle est d'environ 23,7°.

Il en résulte deux zones de végétations nettement tranchées, la savane arbustive et herbacée du Nord et la forêt équatoriale primaire et secondaire comme en témoigne la présence de certaines essences.

Du point de vue orographique, on distingue plusieurs types de relief dans la zone d'étude. Notamment le relief granitique qui montre des dômes se

présentant sous différentes formes telles que les pitons, les collines, les coupoles arrondies. On distingue deux pénéplaines, vers le Nord-Est de zone d'étude, la pénéplaine supérieure dont l'altitude est comprise entre 749 m et 912 m, à l'Est, et la pénéplaine inférieure, dont l'altitude est comprise entre 581 m et 651 m (Figure 1.3). Cette différence d'altitude doit avoir la même origine que le phénomène d'ensemble ayant soulevé l'Adamaoua par un jeu de fractures d'où résulterait ce relief en paliers successifs (Gazel & Gérard, 1954). Ces pénéplaines ont un relief mou et monotone assez caractéristique des formations anciennes. De ce relief aux molles ondulations émergent des collines et des dômes irrégulièrement répartis. Ces dômes sont en général constitués de roches nues. On note aussi la présence d'un relief cristallophyllien caractérisé par des ondulations et des collines basses constituées par des bancs compacts (Gazel, 1955). Ce relief correspond surtout aux zones de migmatites et d'ectinites à faciès profond ou aux séries quartzo-schisteuses.

Les sols de cette zone se divisent en deux groupes classiques, découlant du climat et de la végétation. Il s'agit des sols de forêt : très acides, de couleur rouge et jaune et des sols de savane : faiblement acides, de couleur jaune, grise et rose (Gazel & Gérard, 1954). Néanmoins ces sols ont un caractère éluvial et leur nature dérive de la roche de soubassement. Nous pouvons citer parmi eux : les sols latéritiques, les sols argilo-sableux, les sols gréseux et les sols alluviaux.

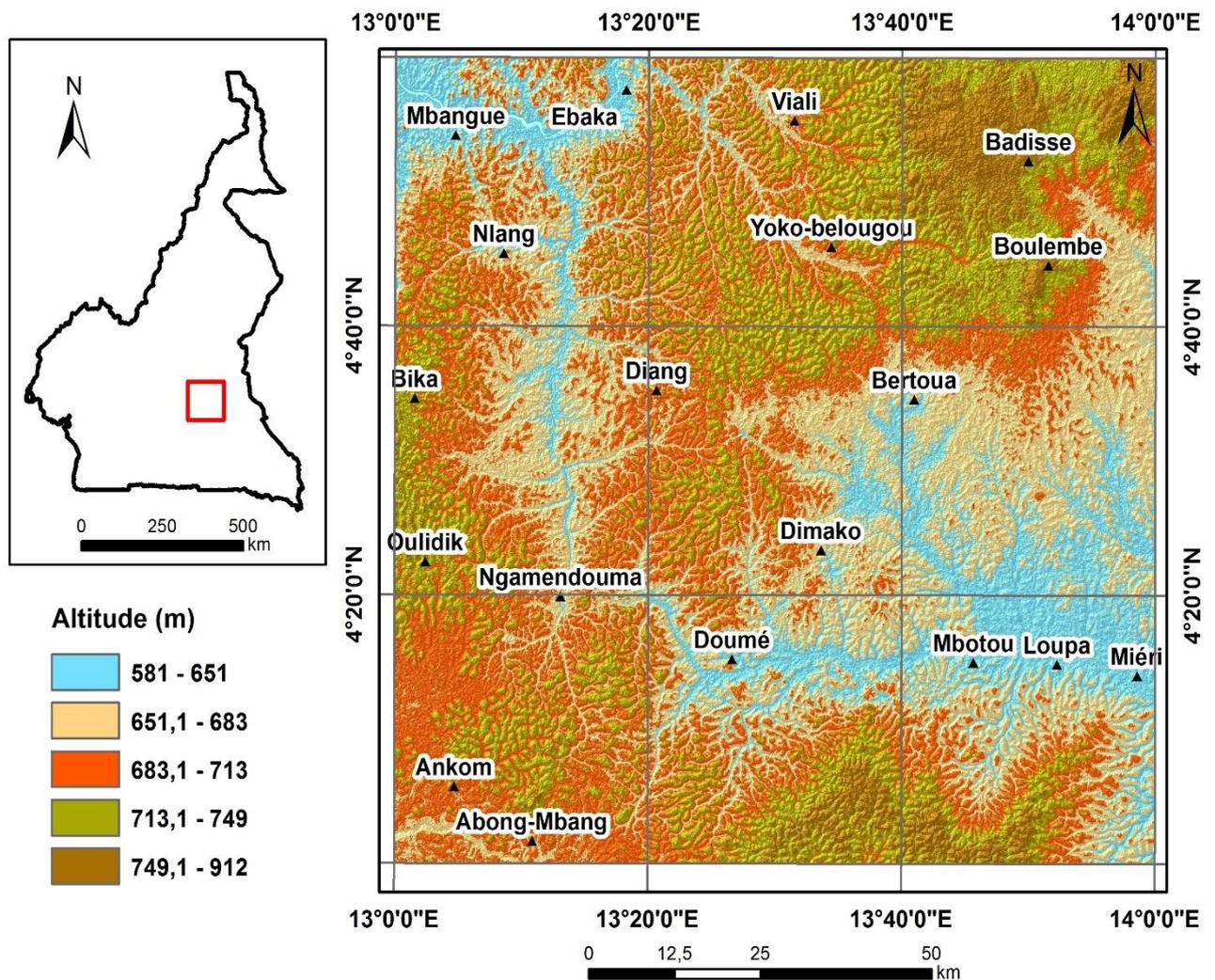


Figure 1.3. Carte orographique de la zone d'étude

3.2. le cadre géologique-tectonique

La zone d'étude appartient au domaine Centre Camerounais, qui est intermédiaire entre les domaines Nord et Sud, et marqué par de grands décrochements dont le principal est la faille de la Sanaga. Les formations géologiques ici sont polycycliques et affectées par trois phases de déformation panafricaines accompagnées de recristallisations métamorphiques dans le faciès amphibolites de degré fort à faible (Mvondo et al., 2007 b). La première phase développe une schistosité S_1 qui porte une linéation minérale L_1 , des plans de cisaillement C_1 , des structures S-C et des plis P_1 . La deuxième phase de déformation met en place les cisaillements C_2 , des plis P_2 admettant S_2 comme

schistosité de plan axial et une linéation L_2 . La troisième phase de déformation est essentiellement cassante et est caractérisée par des cisaillements C_3 accompagnés de grandes ondulations P_3 (Mvondo et al., 2007 b).

Deux grandes zones de cisaillements mylonitiques dextres, la faille de la Sanaga (Dumont, 1986) et le cisaillement Centre Camerounais traversent le Cameroun du Nord-Est au Sud-Ouest. Ces cisaillements majeurs appartiennent à la zone de décrochement des Oubanguides (Rolin, 1995) qui se suit de façon continue du Golfe de Guinée au Golfe d'Aden (Cornachia & Dars, 1983). Cependant, le cisaillement Centre Camerounais est l'élément majeur du faisceau tectonique de l'Adamaoua, c'est un décrochement ductile à ductilo-fragile dextre de direction ENE-WSW (Nzenti et al., 1988 ; Ngako et al., 1991). Il constitue un système conjugué de failles se poursuivant en RCA et en Afrique de l'Est. C'est un méga-linéament de plusieurs centaines de kilomètres de long, représentant des rejeux d'anciennes failles d'échelle lithosphérique. Ces failles ont joué en shear-zones dextres à la fin du Panafricain puis au Crétacé en créant une série de grabens. Cette zone a contrôlé au Néoprotérozoïque la mise en place de nombreux granites dits « syntectoniques ».

Le sous-sol ici est relativement rigide. Cette aptitude engendre une tectonique cassante, où les failles abondent. Des champs de failles ou des flexures se trouvent en bordure des vieux socles (Eno-Belinga, 1984). L'intensité des contraintes a engendré deux types d'accidents : des gonflements issus d'une tectonique moins intense et des failles lorsque les efforts tectoniques sont plus importants (Eno-Belinga, 1984).

Plusieurs travaux montrent la présence dans le domaine centre des gneiss de haut degré d'âge Paléoprotérozoïque (2100 Ma) intrudés par des plutonites d'âge Néoprotérozoïque (550 ± 50 Ma) syntectoniques (Nzenti et al., 1994, 1998, 2007 ; Tanko Njiosseu et al., 2005 ; Ganwa et al., 2008). Ceci indique d'après ces

auteurs que ledit domaine est ancien et continental pro-parte, d'âge Paléoprotérozoïque repris au Panafricain.

La figure ci-dessus (Figure 1.4) présente les différentes foliations et les lignes tectoniques observées au Cameroun dans les travaux de reconnaissance menés par Gazel et al. (1956). Ces foliations résulteraient de deux grandes phases de déformation qui sont le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale. Les travaux de Toteu et al. (2004) ont proposé une évolution tectonométamorphique qui a abouti à un modèle de collision présentant une limite entre ces deux unités comme le montre la figure ci-contre (Figure 1.4).

Les cartes géologiques de Gazel & Gérard (1954) et Gazel (1955), de la figure 1.5 montrent que la région est presque entièrement recouverte de migmatites, de gneiss granitiques et de granites, on retrouve aussi des micaschistes et des quartzites. Les micaschistes et les quartzites reposent en concordance sur un soubassement gneissique et migmatitique. Tout cet ensemble métamorphique est plissé syntectoniquement, avec des pendages qui varient de subhorizontaux à presque verticaux. Toutes ces roches ont été soumises à la tectonique panafricaine, dont les âges géochronologiques montrent un rajeunissement à 500-600 millions d'années.

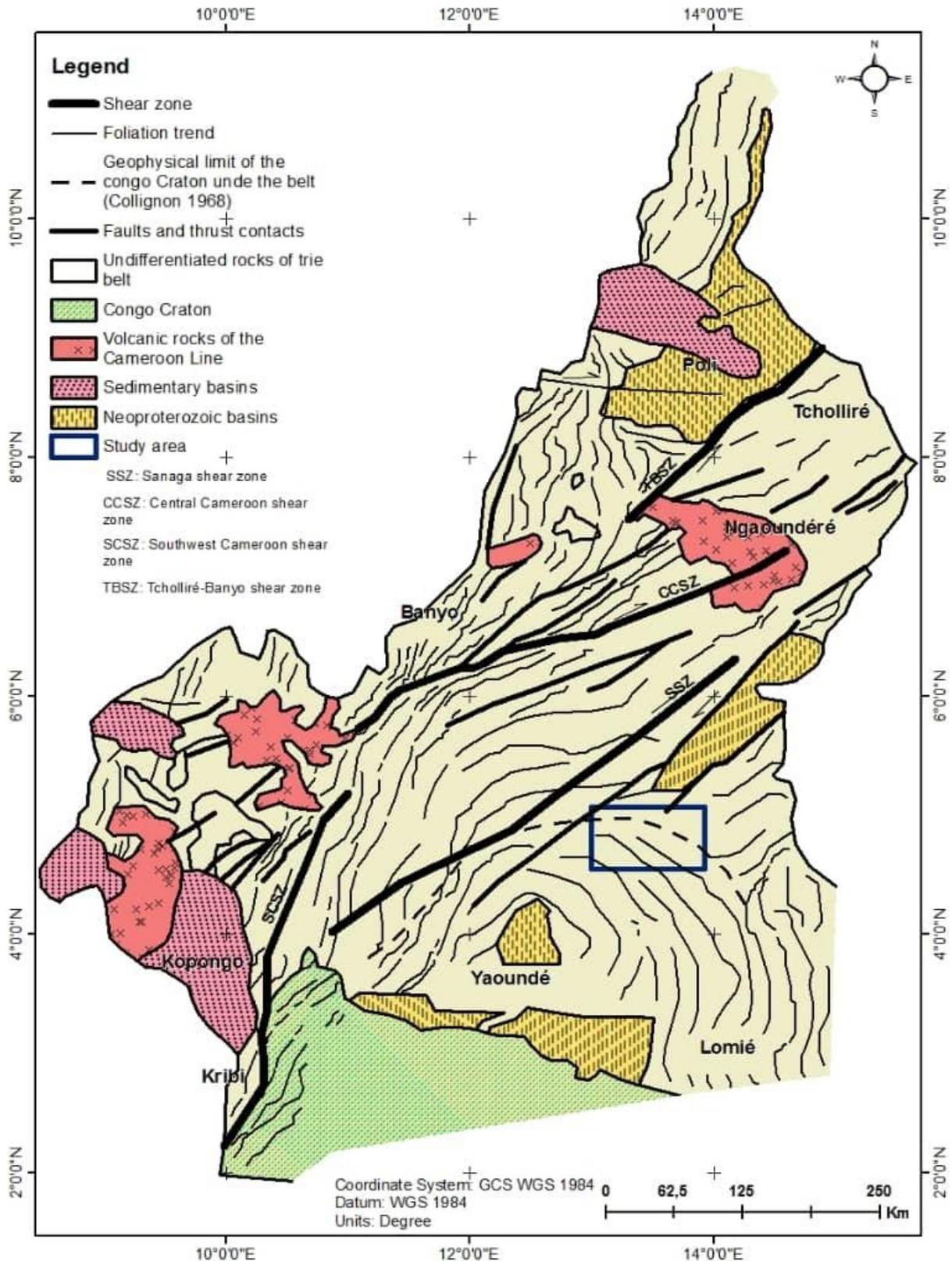


Figure 1.4: Carte de reconnaissance géologique du Cameroun présentant les foliations et les linéaments, modifiée Toteu et al. (2004)

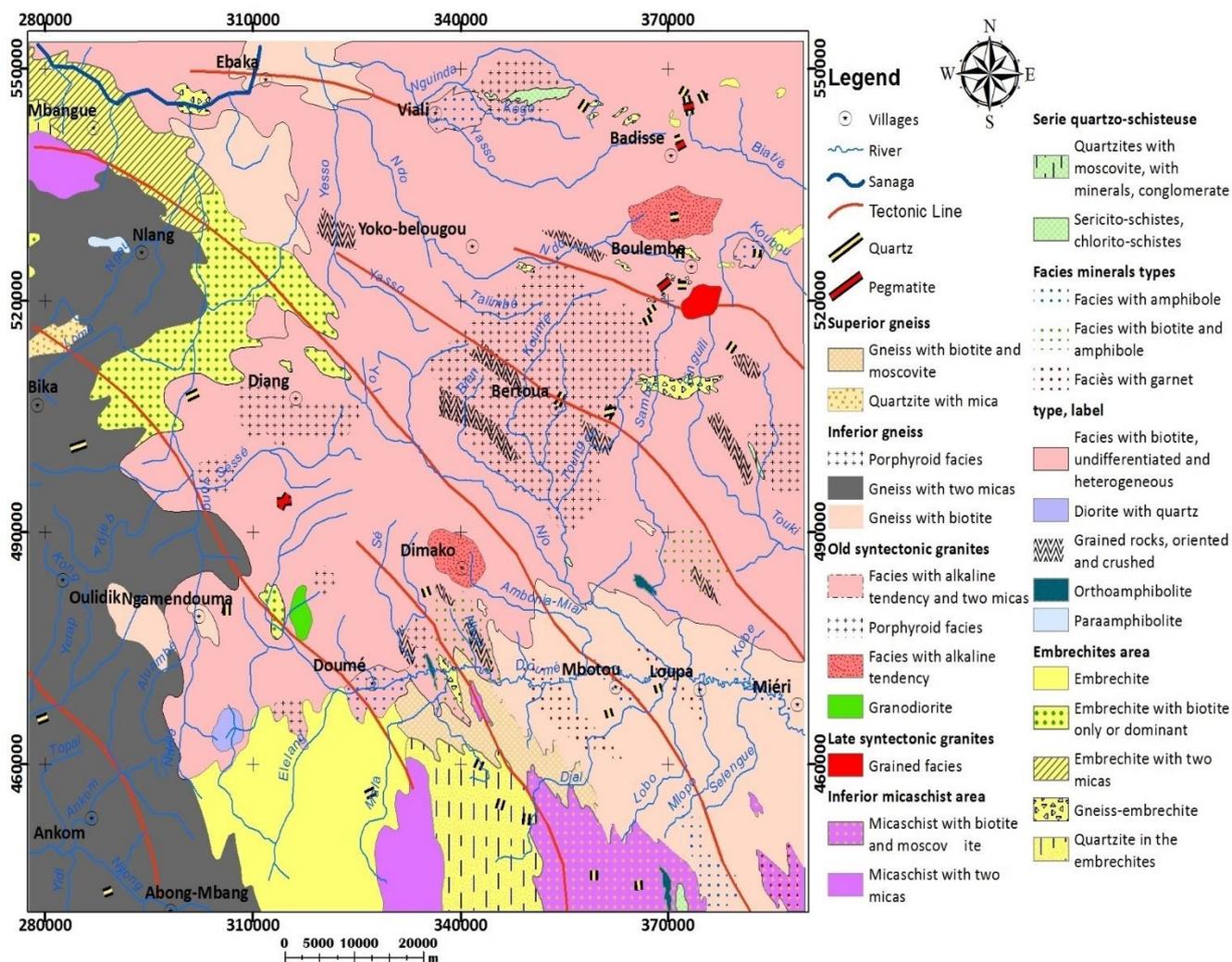


Figure 1.5: Carte géologique de la zone d'étude

Cette zone porte plusieurs empreintes d'un contexte géodynamique lié à la collision entre le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine. Cette collision a donné lieu à une poussée des unités panafricaines sur le Craton (Nédelec et al., 1986 ; Manguelle Dicoum et al., 1992., Shandini et al., 2010). Le Craton se prolonge en profondeur sur plus d'une centaine de kilomètres sous la nappe de Yaoundé (Boukeke, 1994). La limite actuelle est une limite d'érosion et au Panafricain la nappe recouvrait largement le Craton vers le Sud Maurizot et al. (1984).

La zone concernée par cette étude, située dans la partie Est du Cameroun, soulève de nombreux défis géologiques en raison de l'écart important entre les

observations de surface primaires et une pénurie d'observations sous la surface. En effet, la couverture végétale dense rend difficile les études géologiques directes difficiles et les levés géophysiques sur le terrain. Cependant, les données de champ potentielles sont une source primaire d'informations sur la géologie du sous-sol et les caractéristiques tectoniques.

Sur le point de vue hydrogéologique, le niveau hydrostatique est peu profond dans les formations du socle ancien. Ces formations étant essentiellement granitiques et gneissiques, on a le plus souvent des nappes d'arènes classiques lesquelles ne posent pas de problèmes complexes (Gazel, 1955). Dans les formations schisteuses, on observe des intercalations plus ou moins importantes de quartzites qui en s'altérant donnent aussi des arènes. Les granites, les gneiss et les migmatites sont imperméables à partir d'une certaine profondeur. Il n'existe évidemment pas de nappes profondes comme dans certaines formations sédimentaires.

3.3. Les travaux géologiques et géophysiques antérieurs

Plusieurs études géophysiques ont été réalisées à l'échelle régionale dans la partie Sud du Cameroun, correspondant au nord du Craton du Congo. Parmi elles on compte les études audio-magnétotelluriques réalisées par Manguelle-Dicoum et al. (1992), Mbom-Abane (1997) qui ont permis de déterminer la structure souterraine du contact schiste-granite et la limite du Craton Congo.

Les études gravimétriques réalisées à la même échelle régionale par Tadjou et al. (2004), Shandini et al. (2011), Basseka et al. (2011) ont quant à elles permis de définir la densité de la croûte à travers la tectonique et aussi d'identifier la signature importante des structures dans le champ de l'anomalie gravimétrique. Un problème majeur à cet égard est que la structure sous-jacente de la géologie régionale dans le Sud-Est du Cameroun n'est pas encore comprise.

Les travaux réalisés dans une zone située à cheval entre l'Est du Cameroun et l'Ouest de la RCA par Zanga et al. (2013) ont montré une limite

importante entre le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale, caractérisée par une tectonique complexe marquée par un déversement Sud des formations panafricaines sur le Craton du Congo et un amincissement crustal dans cette région.

L'interprétation des données gravimétriques de Noutchogwe et al. (2006) a permis d'avoir une vue plus nette sur le substratum en bordure méridionale du plateau de l'Adamaoua. Les principaux résultats de cette étude ont révélé une grande fracture orientée N70°E, à cisaillement dextre qui affecte le substratum et qui a un caractère lithosphérique. Celle-ci aurait joué en failles inverses et normales entraînant le soulèvement du compartiment Nord ; une remontée magmatique s'étendant latéralement sur la direction N70°E, qui coïncide avec la direction du Cisaillement Centre Camerounais.

Les études aéromagnétiques de Paterson, Grant & Watson (1976) révèlent que l'activité magnétique de cette zone apparaît très douce, et que les contacts magnétiques ne semblent pas faire de distinction entre les roches suscitées, indiquant ainsi que toutes ces unités proviennent des roches qui contiennent peu de magnétite. Les formes des anomalies laissent supposer que ce sont des intrusions ayant la forme de cheminée. Dans le même domaine, les investigations aéromagnétiques menées dans la partie Sud-Est du Cameroun par Feumoé et al. (2012), Ndougsa-Mbarga et al. (2012), ont d'une part relevé des différences d'apparence morphologique et la subdivision du territoire en deux secteurs tectoniques correspondant sur le terrain aux domaines Panafricain au Nord et au Craton du Congo au Sud et d'autre part, permis de localiser par la même occasion la limite tectonique les séparant en profondeur ; il en est de même des structures crustales de cette zone qui seraient issues d'une compression et d'une collision continentale à travers les failles cachées. A l'Est de la zone faisant l'objet de la présente étude, certains auteurs (Yandjimain et al., 2017) ont fait ressortir plusieurs contacts de directions NE-SW, ENE-WSW, mettant en évidence la

subduction entre le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale.

Les travaux de sismicité effectués par Tabod et al. (1992) à l'issue des séismes de 1852 et 1990 qui ont frappé le Cameroun, montrent deux zones sismiques importantes, l'une associée à la faille de Fouban et l'autre à la bordure septentrionale du Craton du Congo. Cette bordure semble être sismiquement très active dans la zone de Kribi et ses environs. Dans le même ordre d'idées, un amincissement crustal de 23 km environ sous l'Adamaoua, région voisine de la présente zone d'étude, a été révélé par les études sismologiques de Stuart et al. (1985), Dorbath et al. (1986). Les séismes enregistrés semblent être associés à la ligne volcanique du Cameroun.

Les travaux menés en géoélectricité par Gouet et al. (2013) dans la zone de Batouri ont permis de mettre en évidence deux zones majeures de faiblesse ou de discontinuités conductrices (fractures, failles ou zones de cisaillement) intra granitiques de directions principales E-W et SW-NE ; les zones majeures de minéralisation potentiellement aurifère d'axes polarisables N-S, E-W et SW-NE qui longent ou entrecoupent les accidents tectoniques majeurs.

Depuis 1978, le Ministère en charge des Mines du Cameroun et le BRGM ont entrepris plusieurs études minières systématiques. Celles-ci ont révélé la présence de plusieurs éléments chimiques (Gazel & Gérard, 1954 ;Gazel, 1955). Dans la zone Est du Cameroun elles visaient la recherche des minéralisations d'or. Il a donc été réalisé une prospection générale du Lom par le biais de prélèvement d'échantillons géochimiques en « stream sediment » et en échantillons alluvionnaires. Le rapport de Vairon et al. (1986) relatif à cette prospection a permis de mettre en évidence des anomalies polymétalliques d'or, de tungstène, de plomb, de cuivre, d'étain, d'argent, de molybdène, d'antimoine, de zinc, de bismuth. Les travaux récents de Bidzang Ndong et al. (2014) sur le sous-bassin hydrographique de Koubou montrent la présence de plusieurs éléments tels que

l'euporium, l'or, l'antimoine, le dysprosium, l'étain, le terbium, le thulium, l'holmium, le vanadium, le néodyme, l'uranium, le cérium, le baryum, le strontium, le rubidium.

Sur le point de vue minier, les gisements d'or primaire au Cameroun se trouvent dans les régions septentrionale, méridionale et les parties orientales du pays. Bétaré Oya, Boden-Colomine et Batouri sont d'importants sites d'exploitation artisanale de l'or à l'Est Cameroun. Or la minéralisation dans ces zones se produit le long d'un cisaillement majeur orienté NE-SW qui traversent les roches méta-volcaniques et métasédimentaires du Néoprotérozoïque, les contacts entre ces roches et les massifs granitoïdes de taille variable du Panafricain sont observés à Boden-Colomine et à Batouri (Suh et al., 2006).

Des gisements de diamant, de bauxite, de cobalt, de minerai de fer, de nickel, cassitérite, uranium, rutile et néphéline ont été trouvés dans de nombreux sites au Cameroun en général et à l'Est Cameroun en particulier.

CONCLUSION

Au regard de ce qui précède, la zone d'étude présente un contexte géologico-tectonique assez complexe, caractérisé par plusieurs accidents tectoniques conséquents à la collision entre la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale au Nord et le Craton du Congo au Sud. Les méthodes potentielles (aéromagnétique et gravimétrique), étant des outils géophysiques polyvalents peuvent à coup sûr, aider à révéler des caractéristiques structurales à grande et à petite échelle, y compris dans les zones superficielles et profondes du sol et du sous-sol.

**CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIE
D'INTERPRÉTATION DES DONNÉES
MAGNÉTIQUES ET GRAVIMÉTRIQUES**

INTRODUCTION

La géophysique appliquée compte plusieurs méthodes selon la nature du sous-sol et l'objectif des études : la sismologie (s'intéresse à l'étude des tremblements de terre), la sismique (principalement utilisée dans la prospection pétrolière), le géomagnétisme (s'intéresse à l'étude du champ magnétique terrestre), la tomographie électrique (imagerie électrique) et le levé électromagnétique, la méthode magnétique (s'intéresse à l'étude des propriétés magnétiques de la croûte terrestre), la gravimétrie (s'intéresse à l'étude des densités des roches). Ces deux dernières constituent le cœur de ce travail. Le but de ce chapitre est de présenter les fondements et les bases théoriques des méthodes magnétique et gravimétrique, de donner leurs avantages et inconvénients, ainsi que de dérouler les fondements mathématiques des différents opérateurs, et enfin de donner les relations qui existent entre ces deux méthodes.

1. IMPORTANCE DES METHODES POTENTIELLES

1.1. Les avantages et inconvénients des méthodes potentielles utilisées

Il est possible de mesurer diverses propriétés physiques (susceptibilité magnétique et densité des roches) du sous-sol en utilisant les méthodes magnétique et gravimétrique. La mise en œuvre de celles-ci reste non-invasive et sans impact sur l'environnement.

1.1.1. Les avantages

Ces méthodes présentent plusieurs avantages. On peut citer, entre autres :

- Une couverture rapide de la zone d'étude ;
- Des profondeurs d'investigation adaptée ;
- L'embarcation de lourdes charges ;

- L'exécution de longs vols ;
- Un coût moins cher au km ;
- Une plateforme stable ;

1.1.2. Les inconvénients

Ces méthodes présentent aussi quelques inconvénients tels que :

- La nécessité d'un aéroport ou une aire d'envol ;
- Les vols à de plus hautes altitudes impliquant une résolution spatiale plus faible ;
- Les terrains accidentés, lesquels posent plus de défis rendant celles-ci plus dures à manœuvrer.

1.2. La mise en œuvre d'un levé géophysique aéroporté

La mise en œuvre d'un levé géophysique aéroporté doit tenir compte des éléments suivants :

- La nature, la dimension et l'orientation des structures géologiques présentes dans la zone de levé ;
- L'espacement des lignes, il va dépendre de la résolution que l'on souhaite et par conséquent de la dimension des structures géologiques que l'on veut imager (généralement la moitié de l'extension de la structure cible et pas plus petit que la hauteur du capteur) ;
- L'altitude de vol, elle devrait en général être aussi faible que possible, et rester constante suivant une surface de vol prédéterminée (drape surface). Elle nécessite en outre la prise en compte des conditions sécuritaires (relief topographique, météo, activité humaine, etc.) ;
- L'orientation des lignes régulières (de traverse), elle devra être perpendiculaire à la direction des structures géologiques et les lignes de

contrôle devraient représenter environ 10% du volume total (c.à.d. 10 fois plus espacés).

Cette méthode fournit aussi une aide précieuse quant à la cartographie du substratum et de la couverture sédimentaire, par le biais de l’empreinte inhérente aux radioéléments contenus dans la majorité des roches et des sols;

- Les discontinuités et/ou les changements brusques et soudain d’un signal normal : ils indiquent la présence d’anomalies et constituent un potentiel et un moyen pour l’exploration;
- Les levés aéromagnétiques : ils renseignent sur les éléments structuraux ainsi que la lithologie des roches distribuées depuis la surface de la terre jusqu’à de grandes profondeurs.

1.3. Les objectifs des méthodes potentielles

Les objectifs principaux des méthodes potentielles :

- cartographie Litho-structurale;
- détection des minéraux magnétiques;
- identification des cibles de minéralisations d’or et de fer;

2. MÉTHODE AÉROMAGNÉTIQUE

2.1. Les généralités

Les propriétés magnétiques de certains matériaux terrestres étaient déjà connues à l’époque de l’Antiquité, il y a environ 2500 ans par les grecs. C’est d’ailleurs à ces derniers que l’on doit les termes actuels dérivant de « Magnes », où on extrayait un minerai aux propriétés naturellement magnétiques du nom antique « Magnesia » dont les alentours étaient naturellement abondants en oxyde de fer (Fe_3O_4) appelé aujourd’hui magnétite. Parmi les méthodes et techniques qui peuvent être effectuées à partir d’un levé aérien, le magnétisme est l’une des plus employées. Dans cette partie, on donnera un aperçu théorique du principe de la

prospection magnétique qui est la méthode aéroportée utilisée dans ce travail (Gavazzi, 2015).

2.2. La force magnétique

D'après la loi de Coulomb pour un pôle magnétique, la force magnétique est donnée par :

$$F = \frac{p_1 p_2}{\mu r^2} r \quad (1)$$

où p_1 et p_2 sont les masses magnétiques ou pôle, r étant la distance entre deux pôles, μ la perméabilité du milieu autour des pôles et r le vecteur unitaire selon la droite joignant les deux masses (Lowrie, 2007). La force est attractive si les deux pôles sont de signes opposés et répulsive s'ils sont de même signe. Par convention, un pôle est positif s'il est attiré par le nord magnétique de la terre et négatif s'il est attiré par le pôle sud (Lowrie, 2007).

2.3. Le champ magnétique terrestre

Le champ magnétique est supposé engendré par la présence des courants électriques qui circulent dans le noyau liquide (composé de Fer et de Nickel) en mouvement grâce à la rotation de la Terre, le rayon de ce noyau varie entre 1300 et 2500 kms (estimée par la sismologie) (Reeves, 2005).

Il résulte de trois principales composantes à savoir :

- Le champ principal, dont la source est interne ;
- Le champ transitoire, dont la source est externe ;
- Le champ anomalique, dont la source est induite.

Le champ magnétique terrestre quant à lui trouve son origine sur le fait qu'en tout point du globe terrestre, l'aiguille d'une boussole prend toujours une direction bien déterminée. Preuve de l'existence d'un champ naturel lié à la terre appelé champ géomagnétique ou champ magnétique terrestre. Les éléments principaux

du champ magnétique sont liés entre eux par des relations simples (Figure 2.1). Ces éléments s'établissent ainsi qu'il suit :

– F : module du vecteur champ = intensité du champ magnétique exprimé en Tesla (T), ou plus couramment en nanotesla (nT), compte tenu des ordres de grandeur du champ magnétique terrestre et de ses variations ;

– H : projection du vecteur champ magnétique dans le plan $\{x, y\}$ = composante horizontale du champ, en nT ;

– D : Déclinaison magnétique ; c'est la direction du Nord magnétique, indiquée par l'aiguille d'une boussole et plus rigoureusement, l'angle entre la composante et la direction du Nord géographique dans le plan horizontal. Par convention, cet angle est compté positivement dans le sens des aiguilles d'une montre, et négativement dans l'autre sens. Ainsi $D = 0^\circ$ si le champ magnétique pointe vers le Nord géographique, $D=90^\circ$ s'il pointe vers l'Est, $D = -90^\circ$ (ou 270°) s'il pointe vers l'Ouest, et $D = \pm 180^\circ$ vers le Sud ;

– I : Inclinaison magnétique ; c'est l'angle entre la composante horizontale du champ et le vecteur champ magnétique lui-même. Par convention également, l'inclinaison est comptée positivement vers le bas de $I = 0^\circ$ (horizontale) à $I = 90^\circ$ (verticale vers le bas) et négativement vers le haut, de $I = 0^\circ$ à $I = -90^\circ$ (verticale vers le haut).

Z : composante verticale du vecteur champ magnétique ; par convention, Z est positif vers le bas

X : composante Nord du vecteur champ magnétique

Y : composante Est du vecteur champ magnétique

Les relations ci-dessous permettent de combiner ces éléments entre eux :

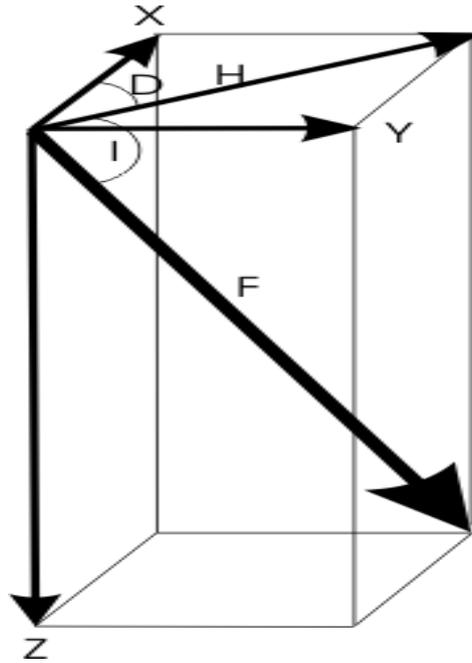


Figure 2.1. Schéma des caractéristiques du champ magnétique principal (Telford et al ; 1990)

$$H = F \cos I, \quad (2)$$

$$Z = T \sin I = \tan I, \quad (3)$$

$$\tan I = \frac{Z}{H}, \quad (4)$$

$$\tan D = \frac{Y}{X}, \quad (5)$$

$$X = H \cos D, \quad (6)$$

$$Y = H \sin D, \quad (7)$$

$$X^2 + Y^2 = H^2, \quad (8)$$

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = H^2 + Z^2 = F^2. \quad (9)$$

Le champ magnétique terrestre a une géométrie principalement dipolaire à celle d'un barreau aimanté (dipôle) situé au centre de la terre et légèrement incliné par rapport à l'axe de rotation. Le pôle nord du dipôle pointe vers le Sud (Figure 2.2).

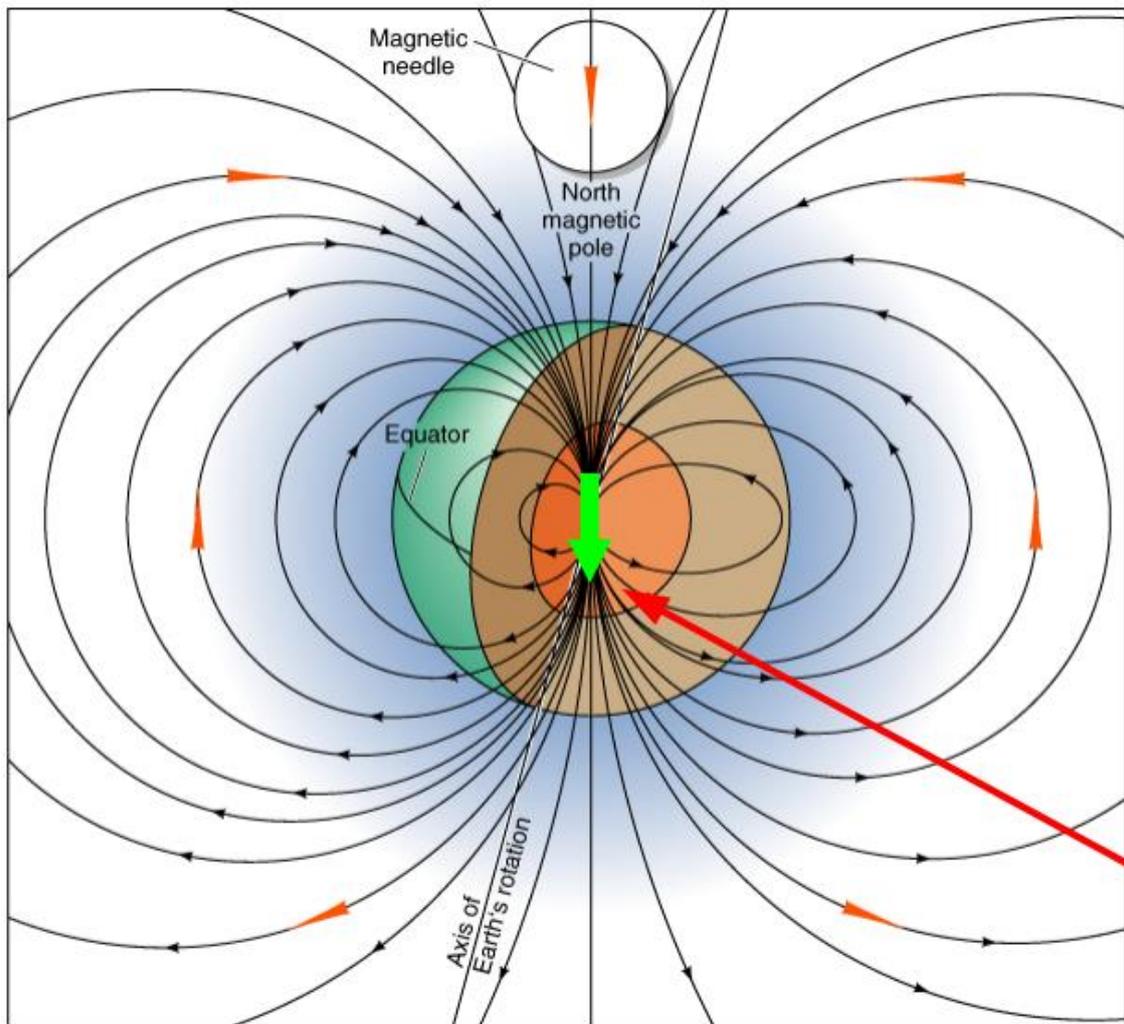


Figure 2.2. Le champ magnétique terrestre

2.4. Le champ magnétique de référence (IGRF)

L'intensité du champ magnétique varie entre 20 000 et 70 000 nT au-dessus de la terre et l'on peut prévoir que ses variations locales puissent prendre des valeurs de l'ordre de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers de nT. Ces variations sont imposées au champ par des effets de magnétisation dû à la croûte terrestre. Les anomalies ont habituellement des ordres de grandeur d'au moins deux fois plus petits que ceux du champ total. L'IGRF fournit, sur une base raisonnable, des moyens de soustraction de la variation prévue du champ principal, pour ainsi laisser des anomalies qui peuvent être comparées, d'une étude à une autre, même lorsque celle-ci est conduite plusieurs décennies après,

et qui amène à observer que, le champ magnétique principal aurait pu être sujet à une variation séculaire considérable. Le retrait de l'IGRF implique la soustraction d'environ 99% de la valeur du champ mesuré ; d'où la nécessité de définir avec précision l'IGRF, afin d'assurer l'exactitude et la crédibilité de la valeur du champ restant (Telford et al., 1990).

L'IGRF est publié après une période de cinq ans par un groupe de travailleurs de l'Association Internationale de Géomagnétisme et d'Aéronomie (IAGA). Un modèle mathématique est mis sur pied, incluant de meilleurs ajustements et prenant en compte des données actuelles provenant des observations géomagnétiques, des satellites et d'autres sources approuvées pour une époque donnée (Reeves et al, 1997). Le modèle est alors défini par un ensemble de coefficients harmoniques sphériques de degré et d'ordre 13. Un logiciel permettant d'utiliser ces coefficients pour le calcul de l'IGRF au-dessus d'une région d'étude bien définie, est désormais rendu disponible. En pratique, lors de la réduction des aperçus aéromagnétiques, il est normal de retrancher l'IGRF après que toutes les corrections ont été appliquées aux données. Du point de vue de l'exploration géophysique, assurément le plus grand avantage de l'IGRF est l'uniformité qu'il offre dans la pratique des études aéromagnétiques, puisque étant partout, librement disponible et universellement admis (Reeves et al., 1997).

2.5. Les propriétés magnétiques des roches

Le champ magnétique modifie les propriétés de la matière qui y est présente. Par exemple, une aiguille non aimantée, si elle est placée dans un champ magnétique acquiert une aimantation et devient elle-même la source d'un champ magnétique. On peut distinguer différents comportements magnétiques, notamment le diamagnétisme, le paramagnétisme, le ferromagnétisme et le ferrimagnétisme.

- Dans le cas du **diamagnétisme**, l'aimantation acquise est inverse par rapport au champ appliqué (Telford et al., 1990) ; ce comportement concerne la plupart des corps solides, liquides ou gazeux, tels que la silice, la calcite, l'eau, l'air, ...

- Le **Paramagnétisme** quant à lui il concerne les atomes à couches électroniques incomplètes comme l'Aluminium. Chaque atome constitue un dipôle magnétique qui s'oriente dans le champ. L'aimantation acquise est dans le même sens que le champ appliqué, mais est plus faible et diminue avec la température (Telford et al., 1990).

- **Le ferromagnétisme** lui c'est la propriété essentielle. Il induit le résultat d'une orientation couplée du moment magnétique de l'ensemble des atomes métalliques. L'aimantation acquise est plus forte et surtout elle se poursuit quand le champ appliqué cesse. On parle d'aimantation rémanente. Elle disparaît quand le corps atteint la température de Curie. Inversement, l'aimantation est acquise et permanente quand le corps refroidit en dessous de la température de Curie (Lowrie, 2007).

Pour le Fer, la température de Curie est de 770°C. Pour la magnétite et l'hématite qui sont des oxydes de fer, elle est respectivement de 585°C et 675°C. Par exemple dans un basalte, l'aimantation portée par la magnétite est acquise après la solidification du basalte à la température de Curie. Il convient de noter que ce n'est pas l'orientation des cristaux qui produit le champ magnétique rémanent, mais l'orientation des moments magnétiques à l'échelle atomique (Telford et al., 1990).

Il existe également une aimantation rémanente dite détritique. Elle est produite dans une roche sédimentaire par l'orientation de minéraux détritiques c'est-à-dire ayant auparavant acquis une aimantation, dans le champ magnétique régnant dans le lieu de dépôt (Lowrie, 2007).

Dans tous les cas, l'aimantation est effacée par une température élevée et ne peut être conservée que dans la croûte. Il n'y a pas d'aimantation rémanente dans le manteau.

La susceptibilité magnétique d'une roche est entièrement dépendante de la quantité de minéraux ferromagnétique qu'elle contient, de la dimension des grains et de leur distribution. C'est donc une propriété très variable et il est pratiquement impossible de prédire la teneur en minéraux à partir de la susceptibilité.

En outre, les valeurs des susceptibilités de divers matériaux comme la chalcopirite et la pyrite sont typiques de certains sulfures qui sont surtout des minéraux amagnétiques. La Figure 2.3 ci-après illustre l'échelle de variation de la susceptibilité des différents minéraux magnétiques (Clark & Emerson, 1990)

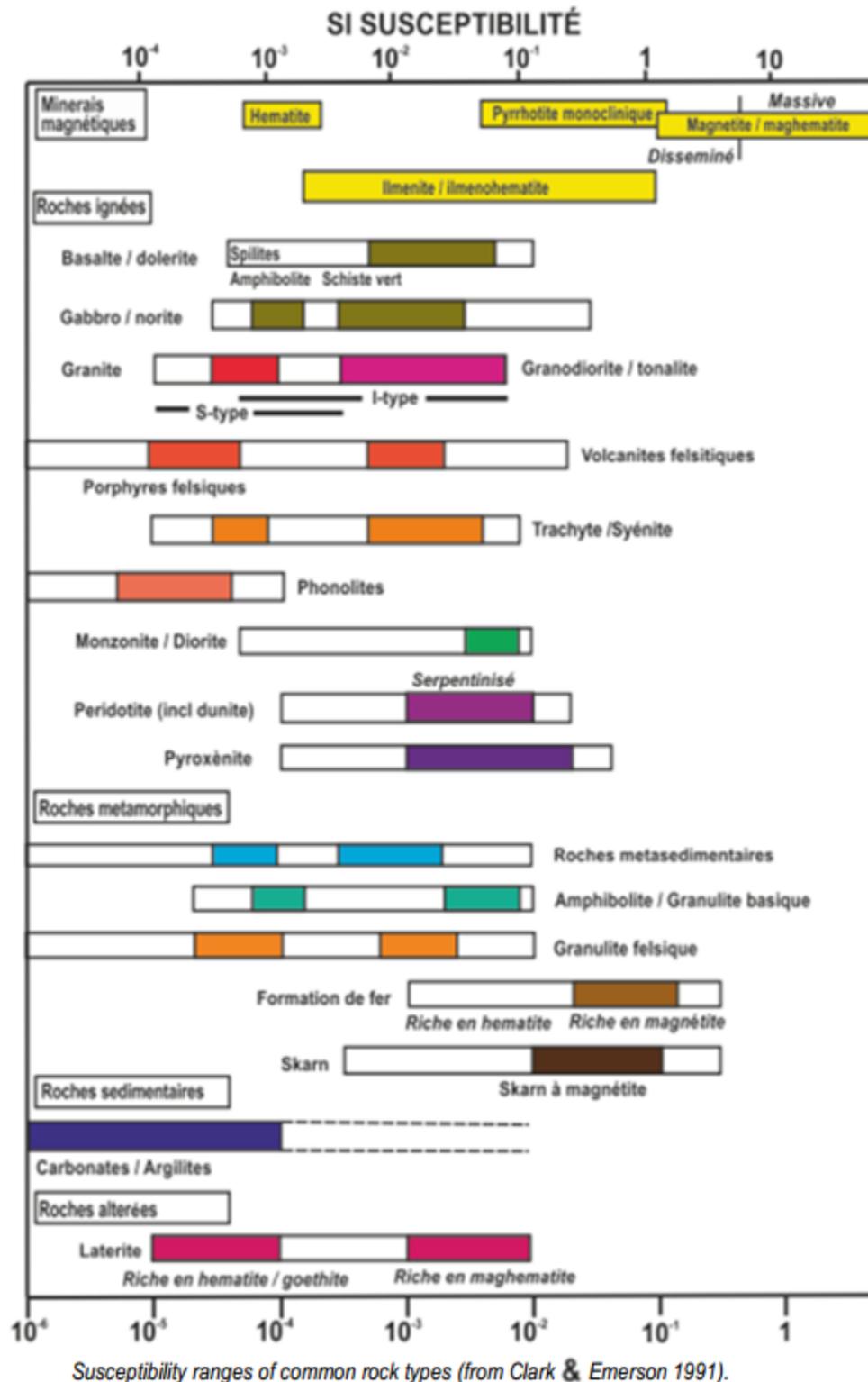


Figure 2.3. Valeurs des susceptibilités et types de roches correspondantes

2.6. Les anomalies magnétiques

Comme toutes les anomalies géophysiques, l'anomalie magnétique ou plus précisément l'anomalie de l'intensité magnétique, correspond à la différence entre une mesure et une référence. A une mesure donnée, on obtient une valeur que l'on compare à l'intensité du champ magnétique au même point, calculée à partir du modèle IGRF. D'après Blakely (1995), pour un champ magnétique terrestre \vec{B} et un champ de référence \vec{R} , l'anomalie magnétique \vec{C} est donnée par :

$$\vec{C} = \vec{B} - \vec{R}. \quad (10)$$

Cette grandeur vectorielle caractérise une modification de l'aimantation rémanente ou induite qui est liée à la présence d'un objet aux propriétés magnétiques intrinsèques localisé dans la zone crustale.

Une anomalie positive correspond donc à un champ magnétique plus intense que prévu par le modèle et marque la présence de roches produisant un champ magnétique de même polarité que le champ actuel ou le renforçant. Inversement, une anomalie négative correspond à un champ magnétique plus faible que prévu par le modèle marquant la présence de roches produisant un champ magnétique de polarité inverse par rapport au champ actuel ou l'atténuant (Telford et al., 1990).

2.7. Le levé magnétique

Les levés aéromagnétiques nous renseignent sur les éléments structuraux ainsi que la lithologie des roches distribuées depuis la surface de la terre jusqu'à de grandes profondeurs (Telford et al., 1998). Cette méthode nous permet de déterminer de la profondeur des sources magnétiques, un élément crucial dans la compréhension de la lithologie et du potentiel minier sous l'épaisse couverture constituée de différentes séquences. Ils permettent en plus d'augmenter la

connaissance de la géologie dans des régions avec peu ou sans informations déjà disponibles.

Les différents profils de mesure (P_i) sont constitués par plusieurs stations (S_i). Le maillage utilisé dans le cadre de la collecte des données magnétiques utilisées dans ce travail a été fait par le biais d'un maillage régulier (Figure 2.4). Il peut être carré ($\Delta X = \Delta Y$) ou rectangulaire ($\Delta X < \Delta Y$).

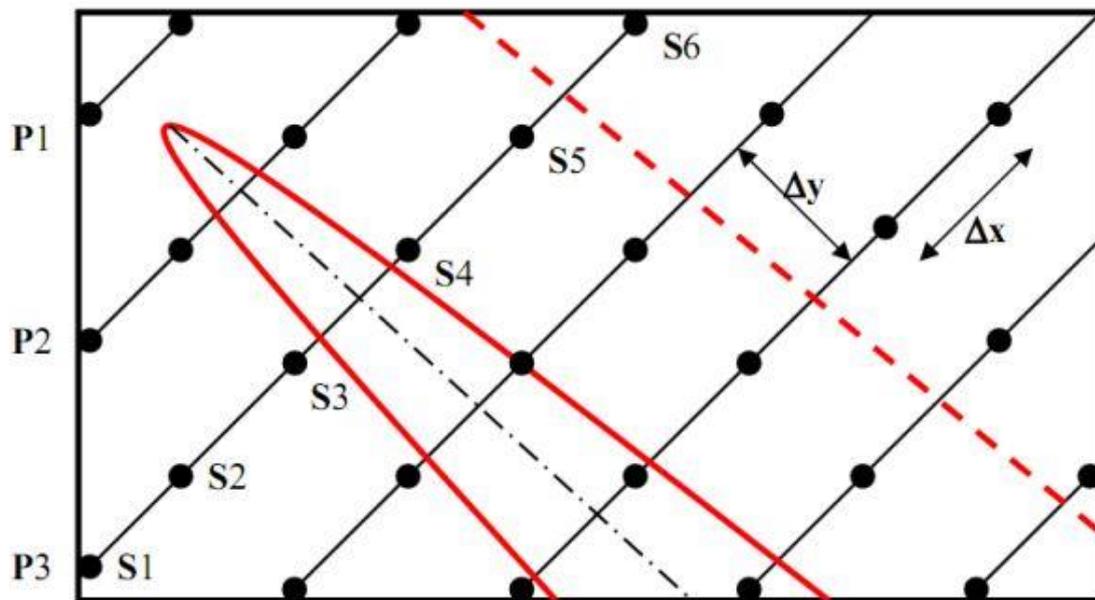


Figure 2.4. Installation du levé de mesures magnétiques (Feumoe, 2014)

2.8. Les instruments de mesure utilisés en aéromagnétisme

Les appareils utilisés pour mesurer le champ magnétique sont les magnétomètres. L'influence de plusieurs roches du sol crée un champ supplémentaire dit champ anomal, que l'on étudie (Le Mouël, 1969).

Il existe deux grands types de capteurs, à savoir les capteurs scalaires et les capteurs vectoriels. Les capteurs scalaires mesurent directement l'intensité du champ magnétique ; alors que les capteurs vectoriels permettent d'obtenir à la fois l'orientation et l'intensité à l'aide de la mesure des composantes directionnelles.

2.8.1. Les capteurs scalaires

On retrouve dans ce type les magnétomètres à précession et les magnétomètres à pompage optique

2.8.1.1. Les Magnétomètres à précession ou magnétomètres à protons

Leur principe de mise en œuvre repose sur la précession des protons. En effet après avoir été alignés à l'aide d'un champ magnétique continu, les protons vont se mettre à précessionner autour du champ magnétique ambiant à une fréquence directionnelle à l'intensité de ce même champ. En mesurant cette dernière, on peut obtenir une valeur de l'intensité du champ magnétique. De tels types de magnétomètres ont une précision de l'ordre de 0,1 nT (Gavazzi, 2015). Ils sont très peu utilisés en cartographie magnétique.

2.8.1.2. Les magnétomètres à pompage optique

Inventés après les magnétomètres à protons, leur principe repose sur la relation entre l'intensité du champ magnétique et l'énergie nécessaire pour faire changer de niveau d'énergie les électrons de valence d'un métal alcalin, en général le potassium ou le césium. Pour cela, on utilise le procédé de pompage optique : après irradiation lumineuse, les électrons vont changer de niveau d'énergie jusqu'à être complètement « pompés » vers le niveau le plus haut. L'avantage de ce type de magnétomètre réside dans leur grande précision (jusqu'à l'ordre de 0,001 nT), ainsi que dans leur rapidité d'acquisition. De plus, ils ne sont pas sujet aux perturbations cinétiques, c'est pourquoi ils sont les plus utilisés à ce jour (Gavazzi, 2015).

2.8.2. Les magnétomètres vectoriels

On distingue les magnétomètres à vanne de flux et les magnétomètres supraconducteurs.

2.8.2.1. Les magnétomètres à vanne de flux (fluxgates)

Ils ont été inventés vers les années 1930. Leur principe est le suivant : la bobine dite primaire est parcourue par un courant alternatif de façon à générer des saturations successives et de sens opposé le long de l'axe du noyau. Ainsi, la composante de tout champ magnétique externe continu dans cette direction vient successivement s'ajouter ou s'opposer à la saturation : il y a donc une variation du flux magnétique (Primdahl, 1979). Ces types de magnétomètres présentent plusieurs avantages, à savoir leur légèreté, leur résistance et leur imperturbation par le mouvement. Ces caractéristiques font d'eux les magnétomètres par excellence pour l'exploration spatiale et pour la prospection minière. Mais ils sont cependant les moins précis de l'ordre de 1 nT Munsch et al. (2007).

2.8.2.2. Les magnétomètres supraconducteurs à interférences quantiques

Ces instruments exploitent les propriétés de la supraconductivité : le courant généré par une boucle de supraconducteur est extrêmement sensible au flux magnétique la traversant. Il est donc possible de mesurer la différence du champ magnétique entre deux points avec une précision de l'ordre 10^{-6} nT/m. Ces dispositifs sont très rarement utilisés du fait de la nécessité d'obtenir et de garder les températures de quelques kelvins (soit environ -270°C), ce qui les rend à la fois extrêmement coûteux, lourds et gourmands en énergie (Gaffney, 2008).

2.9. L'Origine des données magnétiques

Les données aéromagnétiques utilisées ici ont été prises lors d'une mission de vol effectuée au cours de l'année 1970 dans le cadre d'un programme de coopération entre le gouvernement du Canada et celui du Cameroun sous les auspices de l'Agence Canadienne SURVAIR pour le compte de l'Agence Canadienne de Développement International (ACDI).

La couverture aéromagnétique s'est effectuée à une altitude nominale de 235 ± 20 m, suivant les profils de direction N135° et d'espacement nominal de 750 m.

2.10. L'Organigramme de traitement des données magnétiques

Les données magnétiques de Paterson et al. (1976) utilisées ici seront traitées par le logiciel Oasis Montaj 8.0 et la modélisation sera faite par le biais du module GYM SIS du même logiciel. L'organigramme ci-contre (Figure 2.5) résume les différents traitements et analyses effectués.

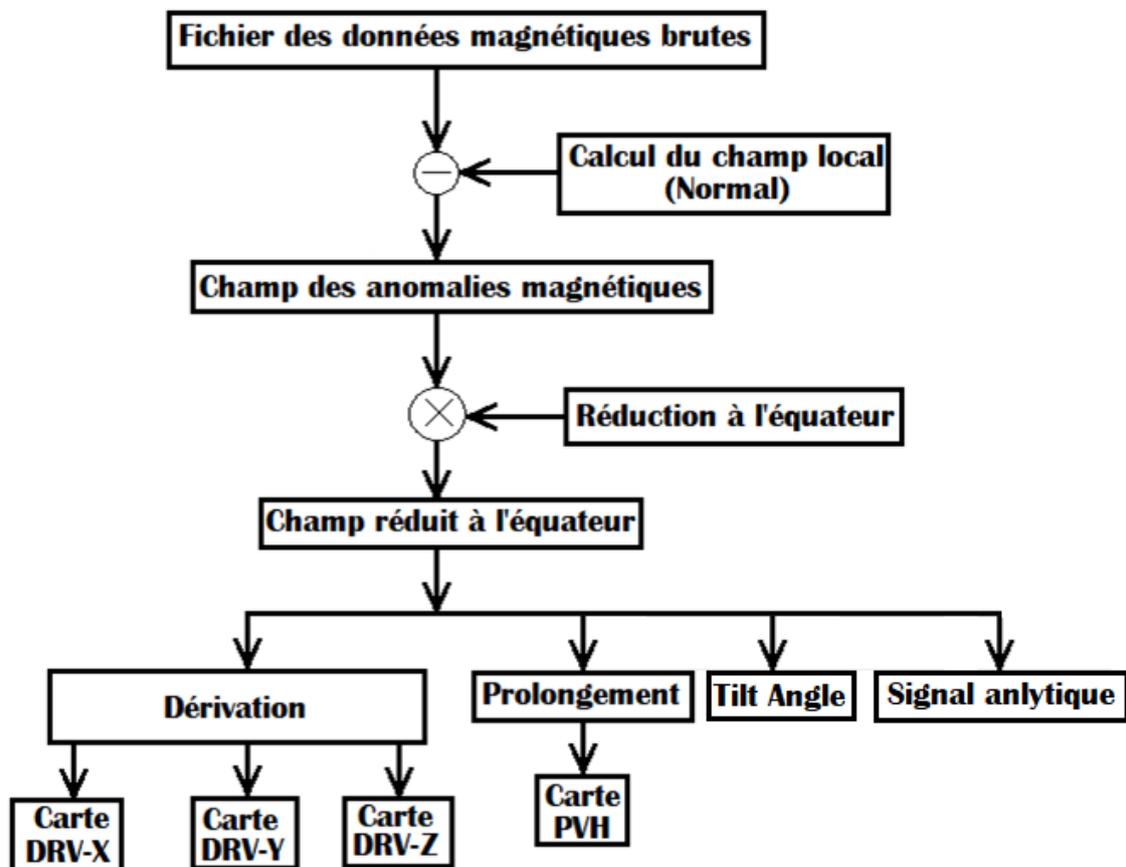


Figure 2.5. Organigramme de la méthodologie de traitement des données aéromagnétiques

3. MÉTHODE GRAVIMÉTRIQUE

La gravimétrie est une méthode géophysique qui permet de faire une reconnaissance des structures du sous-sol en caractérisant d'éventuelles hétérogénéités de masse (Lowrie, 2007). Son principe est basé sur la mesure des variations du champ de pesanteur.

3.1. Les principes théoriques de base

En 1687, Newton a montré que les lois régissant le mouvement des planètes s'expliquaient par l'hypothèse suivante : deux particules de masses m_1 et m_2 séparées d'une distance r sont attirées l'une vers l'autre par une force d'attraction \vec{F} telle que (Telford et al., 1990).

$$\vec{F} = - \frac{G m_1 . m_2}{r^2} \vec{u} \quad (11)$$

où G est la constante gravitationnelle universelle et vaut $6,672 \cdot 10^{-11} N . m^2 kg^{-2}$. Et \vec{u} est le vecteur unitaire.

Le champ de gravitation est toute région de l'espace à l'intérieur duquel tout corps est soumis à une force de gravitation. Il est caractérisé en tout point de l'espace par un vecteur champ de gravitation (Lowrie, 2007). Tout objet de masse m placé en un point de l'espace où règne un champ \vec{g} est soumis à une force gravitationnelle \vec{F} proportionnelle au champ tel que :

$$\vec{F} = m\vec{g} \quad (12)$$

En appliquant une force \vec{F} à une masse m , elle subit une accélération, ce qui se traduit par la relation :

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (13)$$

Ainsi, la pesanteur est l'action sur un corps de toutes les masses qui composent la terre. L'expression de la force de pesanteur F est donnée par : $F = mg$

Où g désigne l'accélération de la pesanteur.

L'accélération subie par la une masse m à la surface de la terre est donnée par :

$$g = G \frac{m_T}{R_T^2} \quad (14)$$

Où m_T et R_T désignent respectivement la masse et le rayon de la terre.

$$g = 980 \text{ mGal}, m_T \approx 5,977 \times 10^{24} \text{ kg} \text{ et } R_T \approx 6370 \text{ km}.$$

Pour un corps situé à une altitude z , l'accélération subie par la masse m est donnée par :

$$g(z) = G \frac{m_T}{(R_T+z)^2} \quad (15)$$

3.2. La forme de la terre : le géoïde et l'ellipsoïde de référence

La pesanteur ou champ de gravitation subit des variations qui sont liées à la densité locale des roches au voisinage de la surface du sol provoquant ainsi de légers changements (Figure 2.6). L'intensité du champ de pesanteur est étroitement liée à celle due à la forme de la terre.

A toute campagne gravimétrique, l'on associe des études régionales dont l'activité de mesure utilisée comme système de référence gravimétrique et géodésique (la forme de la terre) est le géoïde et l'ellipsoïde. Le géoïde ne constitue qu'une forme gravimétrique de la terre. La description géométrique totale de la terre ne peut se faire qu'en tenant compte du relief local. Il représentera donc ce système de référence basé au niveau moyen des océans ou des mers tandis que l'ellipsoïde constituera le modèle désignant la forme de la terre (Ndougsa-Mbarga, 2004). Le géoïde dépend de la densité des matériaux, de la topographie et de l'épaisseur de la croûte.

Sur l'ellipsoïde, la gravité de référence g_0 pour un point de latitude géodésique ϕ est donnée par :

$$g_{th}(\phi) = 9,7803253359 \cdot \frac{1+0,00193185265241\sin^2\phi}{\sqrt{1-0,00669437999014\sin^2\phi}} \quad (16)$$

La valeur de la gravité ainsi obtenue est celle qui serait observée au niveau de la mer sur une terre sphéroïdale et dont la densité ne varie qu'en profondeur et non pas latéralement.

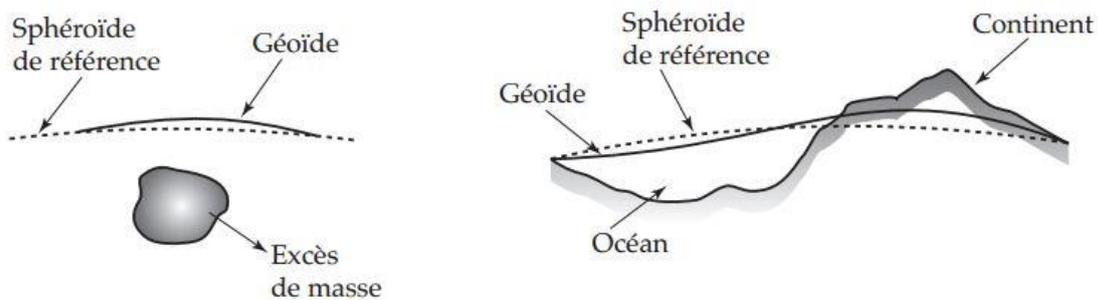


Figure 2.6. Ellipsoïde et géoïde (Telford et al., 1990)

3.3. Les densité des roches

On entend par densité d'un corps homogène, le rapport entre sa masse et son volume. Elle dépend principalement de trois paramètres : la densité de grains des minéraux formant la roche, la porosité qui représente le volume des vides par rapport au volume total de la roche et la densité du fluide remplissant les interstices de la roche. Elle peut être mise en évidence par plusieurs méthodes qui sont :

- La mesure sur l'affleurement qui repose sur les mesures faites sur des échantillons altérés par l'influence des agents météorologiques et libérés des conditions météorologiques de température et pression qui existent en profondeur ;
- La détermination de la densité à partir des vitesses sismiques qui est due au fait que les vitesses de propagation des ondes sismiques et les densités varient dans le même sens ;
- Les mesures dans les forages ;

- Les mesures à l'aide de gravimètres qui nous intéressent plus. Elles reposent sur les corrections effectuées sur les valeurs de “g” mesurées afin d'éliminer l'effet du relief, opération qui nécessite au préalable de connaître la densité des terrains superficiels.

3.4. Les corrections gravimétriques de référence

La gravité dépend de divers facteurs tels que la latitude, l'altitude, la topographie, les structures profondes, etc. Il faut donc les isoler en opérant par certaines corrections. On peut citer entre autres :

3.4.1. La correction à l'air libre où correction de Faye

Elle permet d'éliminer l'influence de l'altitude du point de mesure au-dessus de la surface du géoïde. Les lectures d'un levé gravimétrique ne peuvent pas être prises au-dessus du terrain plat de référence. En sorte que les mesures obtenues présentent donc des variations qui ne sont dues qu'à la position de la station de mesure, il faut donc les corriger (Telford et al., 1990). L'expression de la correction d'air libre est la suivante :

$$\Delta_h = 0,3086h \text{ mGal/m.} \quad (17)$$

Où h est l'altitude entre la station de mesure et un point situé sur le plan vertical de référence à l'aplomb de ladite station ; on l'exprime en mètres.

Δ_h est positif si on est au-dessus du référentiel et négatif dans le cas contraire.

3.4.2. La correction de plateau ou de tranche plate

La correction de plateau tient compte de la masse comprise entre le référentiel et la station de mesure (Lowrie, 2007). Son expression est donnée par

$$\Delta_{gB} = 2\pi G\delta h = 0,04196\delta h \text{ en mGal} \quad (18)$$

Où G est la Constante de gravitation universelle ; δ la densité de la couche de terrain comprise entre la station de mesure et le plan de référence et h l'épaisseur en mètre de cette couche.

3.4.3. La correction de latitude

Cette correction tient compte des variations de g avec la latitude due à la rotation de la Terre et à son aplatissement. A partir de mesures géodésiques mondiales, on sait que la Terre est un ellipsoïde de révolution presque parfait (Meyer, 1991)). Elle est donnée par :

$$\Delta_L = 8,1669 \times 10^{-4} \times l \sin \phi \text{ en mGal.} \quad (19)$$

Où ϕ est la latitude géodésique et l le déplacement suivant le méridien.

3.4.4. La correction topographique ou de relief

Elle est liée aux irrégularités de la surface topographique autour de la station de mesure. La correction de relief est toujours positive et dépend du choix de la densité. La méthode de correction consiste à l'élimination fictive des reliefs et le remplissage fictif des dépressions afin d'avoir un plan horizontal au tour du point de mesure considéré (Telford et al., 1990).

3.5. L'anomalie gravimétrique : anomalie de Bouguer

L'anomalie de Bouguer constitue la réponse gravimétrique causée par les hétérogénéités de la densité du sous-sol (Telford et al., 1990). Plus simplement, elle provient de la différence entre la mesure de la gravité ayant subi la correction de Bouguer (correction de Faye, correction de plateau et de relief) et la valeur de la gravité sur l'ellipsoïde de référence, à la verticale de la station de mesure. Son expression est donnée par :

$$\Delta g_B = [g_{mes} + \Delta g_F - \Delta g_B + \Delta g_T] - g_{th} \quad (20)$$

Δg_B : l'anomalie de Bouguer ;

g_{mes} : la valeur de g mesurée à la station S de la surface topographique ;

Δg_F : la correction de Faye ;

Δg_B : la correction de plateau ou de Bouguer simple ;

Δg_T : la correction topographique ;

g_{th} : la valeur de g calculée sur l'ellipsoïde (E) à l'aplomb de S.

3.6. L'origine des données EGM2008

Les chercheurs de la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) ont mis au point le modèle gravitationnel terrestre dénommé EGM 2008 (Palvis et al., 2008). Ce modèle est une combinaison de données gravimétriques terrestres issues des données satellitaires Champ/Grace. La Figure 2.7 montre le processus utilisé dans la collecte des données gravimétriques. Le maillage utilisé ici est régulier et de forme carrée.

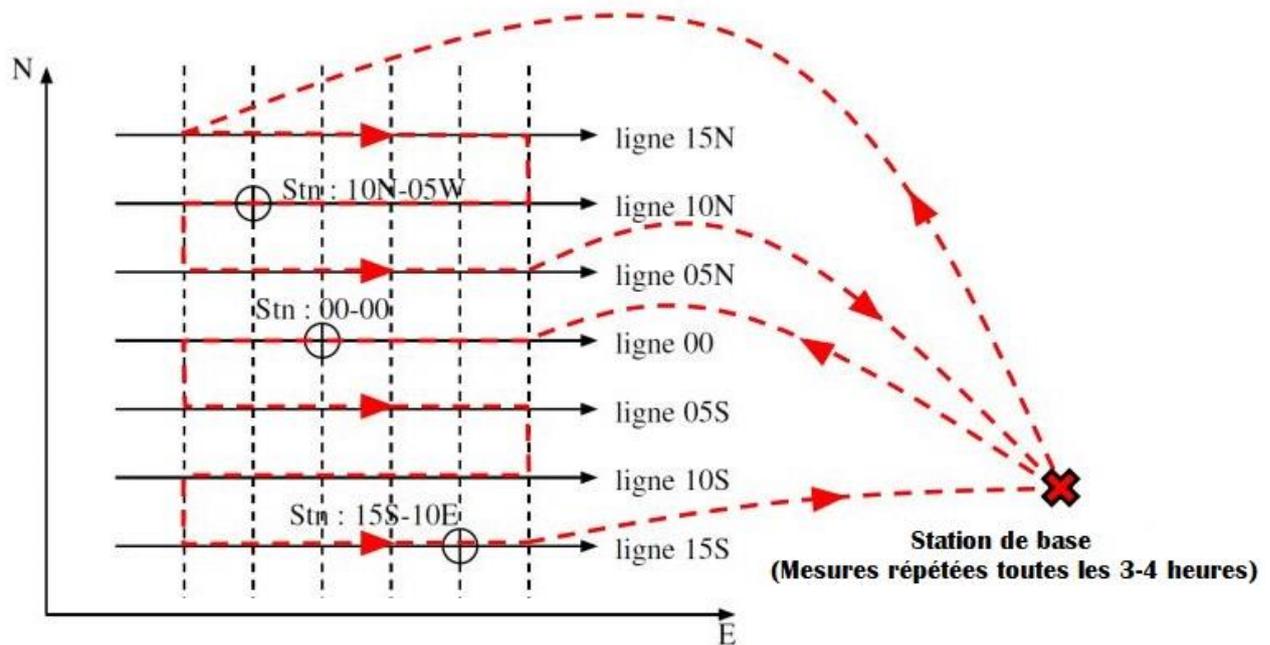


Figure 2.7. Levé gravimétrique

3.7. L'Organigramme de traitement des données gravimétriques

Les données gravimétriques EGM 2008 utilisées ici seront traitées par le logiciel Oasis Montaj 8.0 et la modélisation sera faite par le biais du module GYM SIS du même logiciel. L'organigramme ci-dessous (Figure 2.8) résume les différents traitements et les analyses effectuées.

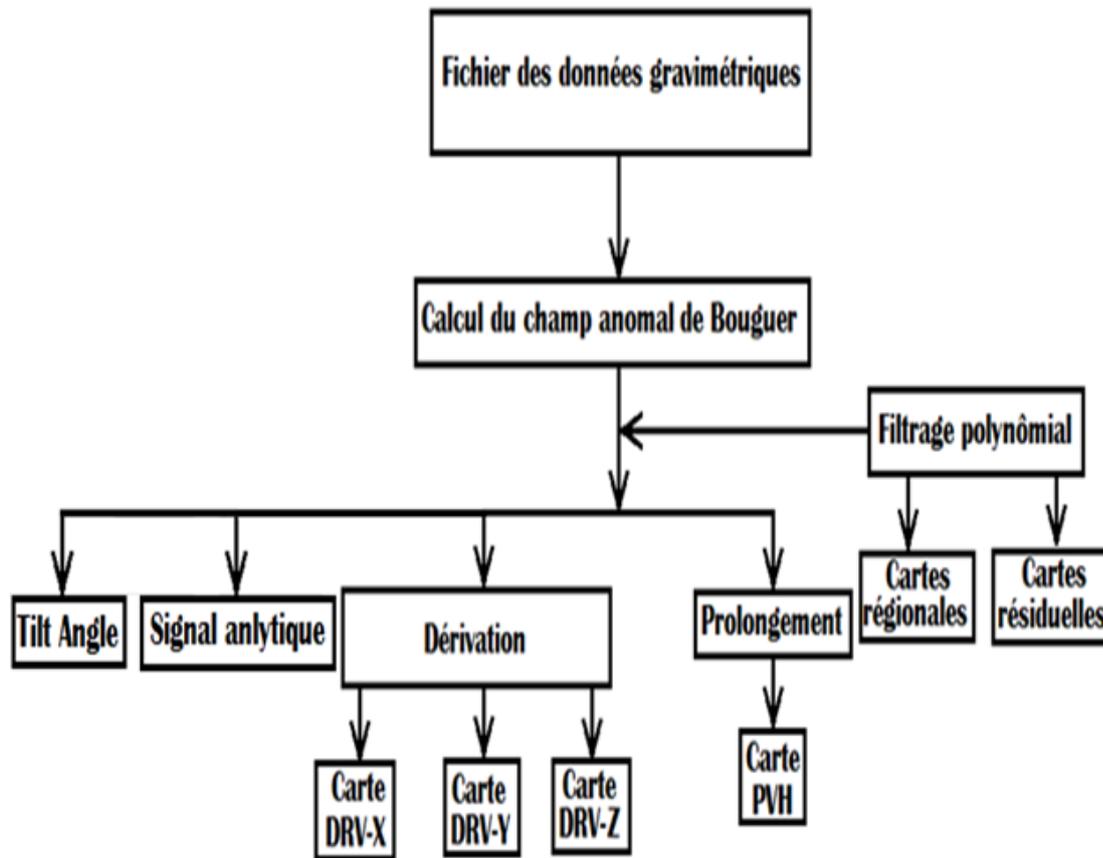


Figure 2.8. Organigramme de la méthodologie de traitement des données gravimétriques

4. LIEN ENTRE LA GRAVIMETRIE ET LE MAGNETISME

Un assemblage de petits aimants peut être perçu comme un corps magnétique, et chacun de ces aimants, un dipôle. De la même manière que la gravité g est une force par unité de masse, on peut concevoir que l'intensité de la magnétisation H est une force par unité de pôle magnétique. Pour un dipôle, cette force unitaire se décompose en deux parties : une due à la force de répulsion du pôle positif et l'autre due à l'attraction du pôle négatif. Ces forces étant inversement proportionnelles à l'inverse du carré de la distance, la force magnétique peut être vue comme la somme vectorielle de deux forces gravitationnelles : une positive, l'autre négative.

Poisson a montré que Si tous les « aimants » d'un corps sont en ligne dans la même direction, l'anomalie magnétique peut être obtenue par différenciation de l'anomalie de gravité. Ainsi, plusieurs formules décrivant les anomalies magnétiques peuvent être obtenues grâce aux formules correspondantes en gravité (Telford et al., 1990). Pour un potentiel magnétostatique W , la relation de Poisson est :

$$W = -\frac{M}{G\rho} \cdot \frac{\partial U}{\partial j} \quad (21)$$

Où U est le potentiel gravitationnel, ρ le contraste de densité, M l'aimantation ($M = kH$) et j la direction de la polarisation.

Si s est la direction dans laquelle on veut calculer le champ magnétique, alors :

$$H_s = -\frac{\partial W}{\partial s} = \frac{M}{G\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\partial U}{\partial j} \right) \quad (22)$$

Si maintenant, on considère les modèles avec une aimantation verticale ($j = z$ et $s = z$), alors on a :

$$Z = \frac{M}{G\sigma} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \quad (23)$$

Les paramètres gravimétriques de la sphère sont : $U = \frac{Gm}{r}$, avec $m = \frac{4}{3}\pi R^3 \sigma$ et $r = (x^2 + z^2)^{1/2}$.

Dans le cas d'une sphère où le champ terrestre F n'est pas vertical, mais a une inclinaison I , on a :

$$Z = \frac{4}{3}\pi \frac{R^3}{z^3} kF \left[\frac{2+3(x/z)\cot I - (x^2/z^2)}{(1+x^2/z^2)^{5/2}} \right] \quad (24)$$

$$H = \frac{4}{3}\pi \frac{R^3}{z^3} kF \left[\frac{(2x^2/z^2 - 1)\cot I + 3(x/z)}{(1+x^2/z^2)^{5/2}} \right] \quad (25)$$

Dans le cas d'un cylindre, on distingue quelques cas :

- Cylindre infini (2D):

$$Z = \frac{2\pi R^2 k}{r^4} [2H_0 x z \sin \beta + Z_0 (z^2 - x^2)], \text{ Telford et al. (1990).} \quad (26)$$

- Si F est vertical, on a :

$$Z = \frac{2\pi R^2 k}{z^2} \left[\frac{1-x^2/z^2}{(1+x^2/z^2)^2} \right] \quad (27)$$

- Si le cylindre a une finie ($L = 2Y$), on a :

$$Z = \frac{2\pi R^2 k Y}{r^4 (r^2 + Y^2)^{3/2}} \cdot [H_0 (3r^2 + 2Y^2) x z \sin \beta + Z_0 (Y^2 (z^2 - x^2) + r^2 (2x^2 - x^2))] \quad (28)$$

(Telford et al., 1990).

L'application de cette transformation permet d'obtenir les champs gravitationnels à partir des champs magnétiques. Ces derniers qui sont d'une grande importance dans la détection des accidents tectoniques.

5. MÉTHODES D'INTERPRÉTATION ET OPÉRATEURS DE TRANSFORMATION

Les méthodes potentielles reposent sur la mesure des champs magnétique et gravimétrique terrestre. L'aéromagnétisme détermine la susceptibilité magnétique des roches, alors que la gravimétrie détermine la densité des roches. Ces méthodes permettent d'établir les cartes structurales à travers l'identification des failles et la localisation des limites de diverses structures géologiques telles que les contacts géologiques. Les traitements de données ont été effectués par le biais de plusieurs filtres et opérateurs qui sont présentés ci-dessous.

5.1. La réduction au pôle ou à l'équateur

C'est une technique qui consiste à tenir compte de l'inclinaison du champ magnétique de la Terre. Son principal effet est de décaler les anomalies magnétiques directement au-dessus de leur source (Baranov & Naudy, 1964; Blakely, 1995). La correction tient compte des effets de l'inclinaison et de la déclinaison, en supposant que la totalité des vecteurs de magnétisation des différentes sources des anomalies s'écarte d'environ 25 degrés de la colinéarité

avec le champ terrestre (champ induit, pas de magnétisme rémanent). La réduction au pôle ou à l'équateur fonctionne mieux si les sources magnétiques plongent verticalement. Cette hypothèse est assez raisonnable pour les formations de fer rubanées, les filons intrusifs obliques et les bords de filons-couches qui comportent la plupart des sources magnétiques, mais ne s'appliquera pas aussi bien aux plutons.

5.2. L'opérateur de prolongement vers le haut

Le prolongement consiste à déplacer artificiellement le plan d'observation et à calculer le champ que l'on observerait en ces nouveaux points à partir des données recueillies sur le terrain. On distingue deux types de prolongement, le prolongement vers le bas et le prolongement vers le haut (Bouiflane, 2008).

Le prolongement vers le haut consiste en une atténuation de l'amplitude et un lissage qui est une transformation qui fait passer l'anomalie de l'altitude $z = 0$ à l'altitude $z > 0$. Cet opérateur correspond à un filtre passe-bas qui permet d'amplifier les anomalies de grande longueur d'onde correspondant aux structures profondes du socle. Il permet également d'avoir une bonne idée sur les anomalies régionales de la zone d'investigation (Burger et al., 2006).

5.3. Les dérivées

Les filtres de dérivations amplifient l'effet des sources superficielles en atténuant l'effet de celles qui sont profondes, focalisent les anomalies et permettent de cerner davantage les limites géométriques des corps.

5.3.1. Le gradient horizontal

Afin d'identifier les contacts qui peuvent représenter des failles, des fractures ou des limites lithologiques dans les données magnétiques ou gravimétriques, on utilise le gradient horizontal. Il ressort les pics au niveau de ces contacts (Blakely & Simpson, 1986; Cordell & Grauch, 1985). L'avantage de cette méthode est qu'elle n'est pas sensible aux bruits provenant des données lors

du levé aéromagnétique ou gravimétrique, car elle dépend uniquement du calcul des dérivées premières du champ magnétique dans le plan horizontal (Phillips, 1998). Pour un champ magnétique ou gravimétrique M , le gradient horizontal de M , noté HGM est donné par la somme des carrés des dérivées horizontales à savoir dans les directions x et y . Ainsi donc, nous avons :

$$HGM(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2} \quad (\text{Phillips, 1998}). \quad (29)$$

Cette fonction donne les maxima au-dessus des contacts géologiques si les assertions suivantes sont réunies (Phillips, 1998) :

- Le champ magnétique régional doit être vertical ou horizontal selon l'endroit où l'on se trouve sur la surface de la terre ;
- La magnétisation doit avoir la même direction que le champ régional ;
- Les contacts géologiques doivent être verticaux ;
- Ces contacts doivent être bien isolés ;
- Les sources magnétiques doivent être épaisses.

La violation des quatre premières assertions conduit à déplacer sur la carte les maxima locaux au-dessus des contacts et la violation de la cinquième crée un second maximum parallèle au contact. Pour résoudre ces problèmes, les données doivent être transformées par l'opérateur de réduction aux pôles et le signal analytique qui ne dépend pas des directions de la magnétisation et du champ magnétique viendra aider dans le choix définitif des contacts géologiques.

5.3.2. Le gradient vertical

La dérivée verticale est utilisée pour amplifier les anomalies de courtes longueurs d'onde et localiser l'effet des structures superficielles dans le sous-sol en atténuant l'effet des anomalies de grandes longueurs d'onde. La carte du gradient vertical revêt une importance capitale quant à l'interprétation structurale de la zone d'étude (Feumoe et al., 2012). L'algorithme de détermination de ce gradient pour un champ magnétique M a été donné par Gunn (1975)

$$M(u, v) = M(u, v)((u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}/n)^n. \quad (30)$$

5.4. Le signal analytique

La méthode du signal analytique est une méthode utilisée pour la détermination des profondeurs et des coordonnées des sources magnétiques telle que développé par Nabighian (1972, 1974, 1984). Le signal analytique a une particularité qui est la suivante : il est indépendant de la direction d'aimantation de la source quand on sait que le champ magnétique est un vecteur dont la direction et l'intensité varient en fonction du temps et du lieu d'observation. L'amplitude du signal analytique est simplement liée à la valeur de l'aimantation (Rasolomanana et al., 2010). Les travaux de Roest et al. (1992) montrent que l'amplitude du signal analytique est la somme des carrés des dérivées du champ magnétique total par rapport aux directions x, y et z . Son expression est donnée par :

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2}, \quad (31)$$

où M est le champ magnétique total.

5.5. La déconvolution d'Euler

C'est une méthode de filtrage qui permet de localiser les sources d'anomalies. Cette méthode a été décrite par Reid (1980) et Thompson (1982). En considérant une source S située à un point P_0 ayant pour coordonnées (x_0, y_0, z_0) . L'intensité du champ magnétique total au point d'observation P est : $M(x, y, z) = f[(x - x_0), (y - y_0), (z - z_0)]$ (Reid et al., 1990, El Goumi, 2010). L'équation d'homogénéité a été mise sur pied par Thompson (1982), elle s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{(x-x_0)\partial M}{\partial x} + \frac{(y-y_0)\partial M}{\partial y} + \frac{(z-z_0)\partial M}{\partial z} = N(B - M), \quad (32)$$

où (x, y, z) représentent les coordonnées du point d'observation, (x_0, y_0, z_0) les coordonnées de la source magnétique, M le champ total au point d'observation, B

la valeur régionale du champ magnétique total et N , l'indice structural qui caractérise le type de source et le taux de variation du champ en fonction de la distance. Le principe de la déconvolution d'Euler repose sur la résolution de l'équation précédente qui comporte quatre inconnues x, y, z et B (Amar et al., 2012). Pour résoudre un système d'équation à quatre inconnues, il faut quatre points de mesure, puis on procède par la méthode des moindres carrés (Feumoe, 2012).

L'indice structural $N = -n$, où n est le degré d'homogénéité. Il dépend de la géométrie de la source. Ainsi pour une source homogène dont l'indice structural $N = 3$, on a affaire à une source linéaire (ligne de dipôles ou de pôles, cylindre homogène, tige, etc.). Pour $N = 2$, on a affaire aux corps intrusifs (dyke, couche mince, etc.). Pour $N = 1$, on a un contact ; et pour $N = 0$, on a un bloc au sommet d'une pyramide.

5.6. L'angle d'inclinaison ou Tilt angle

La transformation de Tilt-angle ou de l'angle incliné calcule l'inverse de la tangente du rapport du module du gradient horizontal avec le gradient vertical du champ magnétique (Miller & Singh 1994 ; Verduzco et al., 2004 ; Salem et al., 2008). L'équation de cette transformation s'écrit :

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\frac{\partial M}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2}}, \quad (33)$$

où M représente le champ magnétique. Les valeurs de l'angle d'inclinaison sont comprises entre $\frac{-\pi}{2}$ et $\frac{\pi}{2}$, cette méthode délimite les variations d'amplitude de l'angle dans une certaine gamme. L'avantage de la transformation est que calculant un angle, toutes les formes seront représentées de manière similaire, que les anomalies soient de faibles ou fortes amplitudes (Bouiflane, 2008). L'amplitude de l'angle d'inclinaison est positive pour des sources magnétiques, presque nulle au bord de ces sources et négative à l'extérieure de ces sources

magnétiques (Muzaffer et Ünal., 2013). L'opérateur est appliqué à la carte du champ magnétique total réduite au pôle ; pour un contact vertical, la valeur nulle correspond à la limite de la structure (Amar et al., 2012).

5.7. L'analyse multi-échelle des maxima des gradients horizontaux

L'analyse multi-échelle est une technique qui combine deux méthodes, à savoir le prolongement vers le haut et le gradient horizontal. L'analyse multi-échelle constitue un excellent moyen de localiser dans le sous-sol les contacts linéaires correspondant aux failles et les contacts de formes circulaires qui sont les limites des corps intrusifs (Vanie et al., 2005) d'une part et déterminer leur tracé, leur pendage et même leur degré d'importance (Khattach et al., 2004, 2006), (Figures. 2.9 et 2.10) d'autre part. En effet la limite entre deux blocs caractérisés par des densités ou des susceptibilités différentes est soulignée par la ligne marquant les maxima locaux des valeurs de ce gradient.

L'anomalie magnétique ou gravimétrique au-dessus d'un contact vertical est matérialisée par une courbe ayant un minimum du côté des roches de faibles densités ou susceptibilités et un maximum du côté des roches ayant des susceptibilités élevées. Le point d'inflexion de la courbe se trouve à l'aplomb de ce contact matérialisant ainsi le maximum du gradient horizontal (Cordell & Grauch, 1985, Blakely & Simpson 1986).

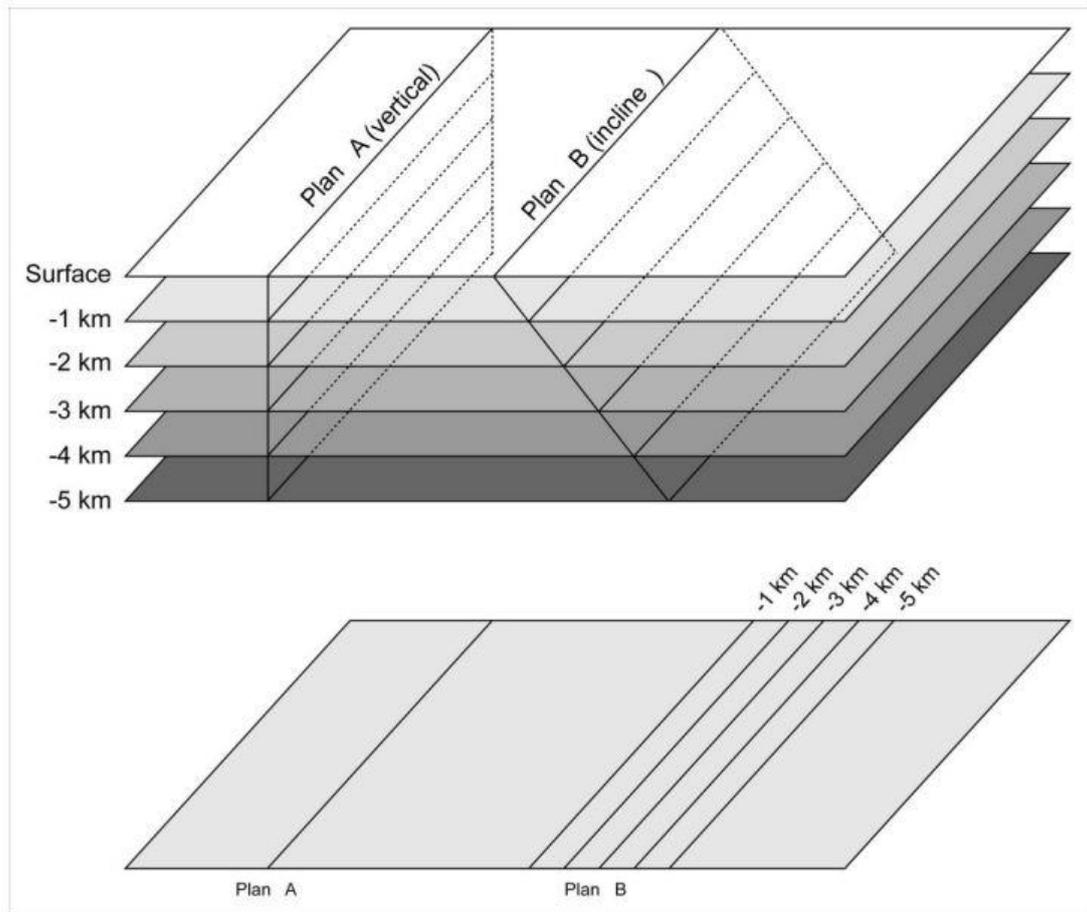


Figure 2.9 : Effet de l'inclinaison des structures planaires détectées suivant la profondeur d'enfouissement.

Les plans (vertical et incliné) sont illustrés en bloc diagramme au-dessus et les traces de leur intersection sur la carte.

La procédure consiste à effectuer un prolongement vers le haut de la carte des anomalies de Bouguer à différentes hauteurs et à déterminer le gradient horizontal de chaque carte prolongée.

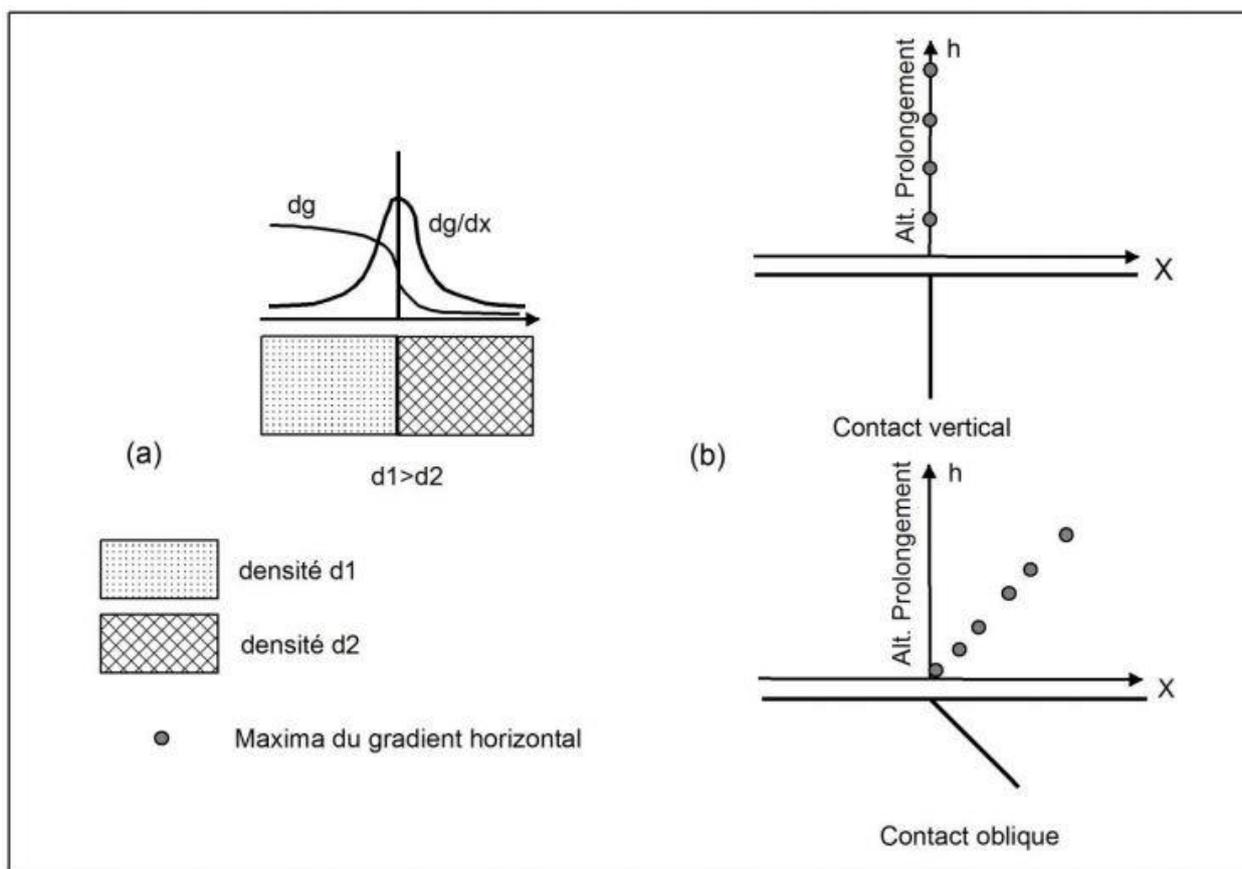


Figure 2.10 : Méthode du gradient horizontal (a) et analyse des pendages (b)
(Vanie et al., 2005).

Blakely & Simpson (1986) ont mis sur pied une méthode pour déterminer de manière automatique les maxima du gradient horizontal à partir d'une grille de valeurs présentées dans une fenêtre 3 x 3 (Fig. 2.11). La procédure consiste à déterminer la position des maxima du gradient horizontal définie sur une grille régulière en comparant la valeur au centre de la fenêtre aux neuf points voisins dans les quatre principales directions : horizontale, verticale et suivant les deux diagonales. Le principe est de superposer les maxima des différentes directions sur une même carte. Les linéaments les plus profonds correspondent aux fractures les plus profondes et vice versa. De même, l'évolution des maxima en fonction de la profondeur déterminera le sens du pendage. Par conséquent, les pendages verticaux présenteront une superposition des maxima tandis que les pendages obliques montreront un décalage des maxima dans la direction du pendage.

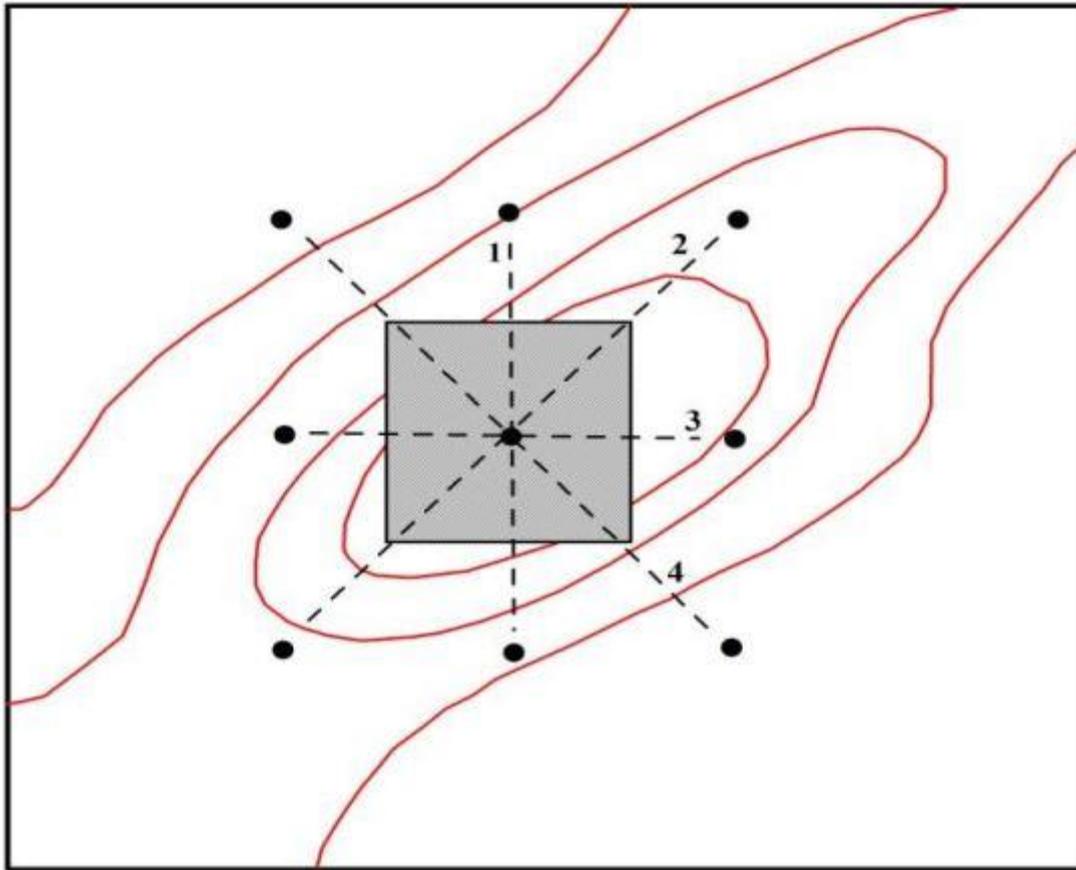


Figure 2.11 : Détermination des maxima (d'après Blakely et Simpson, 1986).

5.8. La modélisation $2^{3/4}$ -D

La modélisation $2^{3/4}$ -D repose sur trois paramètres importants, à savoir le contraste de susceptibilité ou de densité des roches du sous-sol, la profondeur d'enfouissement et la forme des structures géologiques sources d'anomalies observées. Les contraintes sur ces paramètres découlent de la géologie de la zone d'étude et de l'analyse des données magnétiques ou gravimétriques. Le principe de cette méthode de modélisation directe consiste à calculer l'anomalie théorique à partir d'un modèle de structure de forme simple telle qu'un cylindre, une sphère ou un prisme et la comparer à l'anomalie observée. Le meilleur modèle est celui qui correspond à la structure dont l'anomalie calculée se rapproche le plus possible par ajustement de l'anomalie observée. Toutefois, le modèle qui sera retenu devra tenir compte autant que possible des indices géologiques (Talwani

& Heirzler, 1964 ; Visweswara Rao et al., 1994 ; Cooper, 2003). L'avantage de la modélisation 2^{3/4}-D est qu'elle permet un meilleur contrôle de l'extension latérale des structures sources d'anomalies (Cady, 1980). Dans le cadre de ce travail, elle sera réalisée par le module GYM-SYS du logiciel Oasis Montaj 8.0 de Geosoft qui est basé sur les algorithmes décrits par Won & Bevis (1987), Rasmussen & Pedersen (1979). Les réponses calculées varient itérativement avec le changement des paramètres du modèle, en particulier la susceptibilité magnétique ou la densité des roches. Les données magnétiques et gravimétriques seront modélisées le long de cinq profils magnétiques et de trois profils gravimétriques judicieusement choisis dans la zone d'étude.

6. QUELQUES LOGICIELS UTILES

Pour appliquer la méthodologie élaborée ci-dessus, des logiciels spécialisés ont été employés.

6.1. Le logiciel Geosoft Oasis montaj

Le logiciel Geosoft Oasis Montaj est un programme conçu par Geosoft. Il a été développé à Toronto en 1982, et amélioré en 1984. La compagnie Northwest Geophysical Associates a contribué à la réalisation d'un programme de modélisation dénommé GM-SYS. Il est utilisé pour le traitement, l'analyse et le contrôle qualité des données géophysiques et géochimiques, le filtrage gravimétrique et magnétique, la représentation 3D des données géoréférencées à l'instar des trous de forage ainsi que le nivellement ou l'interprétation de données. Dans le cadre de cette thèse, ce logiciel permet de créer et manipuler les bases de données gravimétriques afin de dresser les cartes des anomalies de Bouguer (à partir des données terrestres et des données EGM 2008). Ses extensions permettent de réaliser les filtrages des cartes du champ magnétique total ou de Bouguer pour l'interprétation qualitative et quantitative. Les principales extensions utilisées dans le cadre de ce travail sont :

- MAGMAP qui permet d'obtenir les différentes dérivées, les prolongées et le signal analytique ; l'angle d'inclinaison Tilt angle ;
- SOURCE EDGE DETECTION qui calcule le gradient horizontal total ;
- EULER3D qui a permis d'obtenir les solutions de l'équation homogénéité d'Euler ;
- GYM SYS qui a permis de procéder à la modélisation des profils magnétiques et gravimétriques.

6.2. Le logiciel Arc GIS

C'est une suite de logiciels d'information géographique ou logiciels de SIG développé par ESRI pour la première fois en 1999, est exécutable dans les systèmes d'exploitation Microsoft Windows. Il est composé de différentes plateformes qui permettent aux utilisateurs des Systèmes d'Information géographiques (SIG) de collaborer et de partager les produits des recherches effectuées. La plupart des utilisateurs le connaissent sous la forme de trois produits : ArcView, ArcEditor et ArcInfo. Elle inclut les applications ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox et Model Builder.

- ArcMap permet de créer, afficher, interroger, imprimer des cartes. ArcCatalog, ArcToolbox et ModelBuilder sont accessibles par des fenêtres que l'on peut ouvrir depuis ArcMap.

- ArcCatalog permet d'organiser et de gérer différents types d'informations géographiques.

- ArcToolbox regroupe un ensemble d'outils de conversion de données, de gestion des projections, de géotraitements, etc.

- ModelBuilder permet de créer de nouveaux outils à partir d'outils existants.

Un éditeur de scripts Python est intégré à ArcMap.

Dans le cadre de ce travail, il a permis de digitaliser les courbes des iso-anomales des cartes magnétiques de Patterson afin de procéder à l'analyse et à l'interprétation des données magnétiques. Il a également permis de redessiner les cartes géologiques utilisées dans ce travail.

6.3. Le logiciel Matlab

Développé par la compagnie MathWorks, le logiciel MatLab (Matrix laboratory) est un langage pour l'analyse et la résolution de problème scientifique logiciel. Il intègre à la fois les solutions de calcul, de visualisation et un environnement de développement. Il permet le développement interactif de par l'utilisation d'un langage interprété. La structure de données de base est un tableau qui ne nécessite pas de dimensionnement. Il fournit de nombreuses fonctions préprogrammées regroupées en boîtes à outils pour de nombreux domaines tels que les statistiques, le développement et traitement du signal.

MATLAB utilise deux types de fichier à savoir matlabrc.m et startup.m. Ce logiciel exécute systématiquement le fichier principal matlabrc.m et, s'il existe, le fichier startup.m. Le fichier matlabrc.m est réservé au logiciel et il invoque le fichier startup.m si celui-ci existe dans un des répertoires privilégiés de MATLAB. L'utilisateur individuel peut créer son propre fichier startup dans lequel il inclura des constantes physiques, des facteurs de conversion, l'accès de MATLAB à son répertoire de travail ou toute autre chose qu'il désirera pré définir dans l'espace de travail. Dans le cadre de ce travail, il a permis de procéder à la séparation régionale-résiduelles en vue d'obtenir les cartes régionales et résiduelles des anomalies de Bouguer.

CONCLUSION

Ce chapitre a initialement permis de fixer les bases théoriques sur les méthodes magnétique et gravimétrique ; puis il a établi les notions mathématiques qui seront utilisées dans le traitement des données magnétiques de Paterson et al. (1976) et gravimétriques EGM 2008. Les cartes magnétiques et gravimétriques présentent des contrastes forts qui peuvent être exploités et mis en parallèle à la géologie de la zone d'étude. Ces méthodes dites potentielles sont utilisées ici en vue de la détermination de la structure du sous-sol. Le traitement de ces données potentielles aboutira à plusieurs représentations qui rendront compte de la variabilité de la susceptibilité et de la densité du sous-sol dans la zone faisant l'objet de cette étude.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

INTRODUCTION

Les données magnétiques et gravimétriques sont généralement riches en renseignements sur les formations géologiques. Elles sont notamment très utiles pour l'identification des accidents tectoniques tels que les fractures, dykes, failles, plissements, cisaillements ou des intrusions. Elles permettent également de déterminer leur extension. Seront donc menées ici, les analyses magnétiques et gravimétriques selon l'approche tant qualitative que quantitative et suivant les protocoles de traitement préalablement établis au chapitre précédent.

1. ANALYSE DES DONNEES MAGNETIQUES

1.1. La carte de l'anomalie du champ magnétique total

La carte de l'anomalie du champ magnétique total permet d'interpréter les structures profondes, mais a le désavantage d'avoir un bruit de fond généré par les grandes longueurs d'onde.

Les roches sédimentaires sont souvent peu magnétiques et donnent habituellement une faible réponse magnétique (Clark, 1997 ; Gibson & Milligan, 1998 ; Mork et al., 2002). Par conséquent, les sources principales des anomalies magnétiques sont supposées dépendre des propriétés magnétiques du sous-sol (Feumoe et al., 2012).

La carte ci-dessous (Figure 3.1) présente des anomalies magnétiques variant de -130,85 à 62,61 nT caractérisées par de hautes et basses fréquences. La zone d'étude présente un relief magnétique perturbé par plusieurs anomalies. La carte comprend deux grandes parties suivant la diagonale (direction NW-SE). La partie supérieure est caractérisée par de fortes valeurs d'intensité du champ magnétique ; à l'opposé la partie inférieure est quant à elle caractérisée par de faibles valeurs du champ magnétique. Ces deux parties sont diagonalement séparées par un grand couloir de direction NW-SE à ENE-WSW, constitué des

valeur moyennes du champ magnétique. Ce couloir semble bien correspondre à la ligne tectonique mise en évidence dans la carte géologique. On note également au Nord-Ouest une autre direction structurale ; celle-ci serait bien liée au passage du fleuve Sanaga dans la zone d'étude.

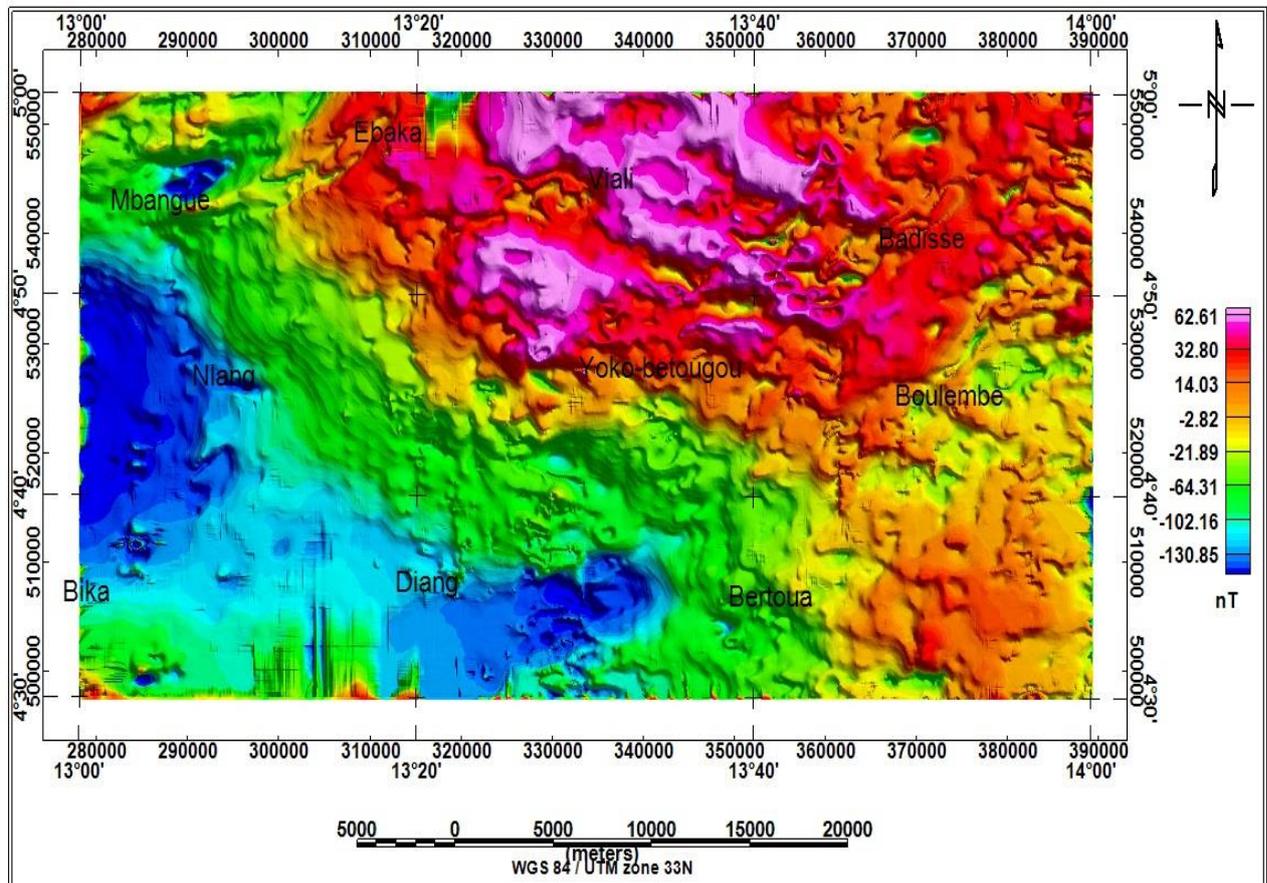


Figure 3.1. Carte du champ magnétique total

Au Centre et au Nord de la carte, on observe un grand bloc de forme pseudo-circulaire constitué d'anomalies positives. Celles-ci sont localisées sur les granites syntectoniques anciens. A l'intérieur de ces anomalies, on note la présence de plusieurs anomalies de valeurs moyennes qui, considérées comme des intrusions, seraient dues au phénomène de granitisation des roches telles que les gneiss, les schistes ou même d'autres types de granites. Les fortes valeurs observées du champ magnétique dans cette zone seraient dues au fort taux d'alumine ou d'oxyde de fer dans les granites. Les pics magnétiques sont observés

dans la zone de Viali, Ebaka, au Nord de Yoko-Betougou et même aux environs de Badissé.

Toujours dans la partie Nord, entre Ebaka et Viali, les anomalies constituées de valeurs moyennes observées seraient dues à la granitisation des gneiss.

A l'Ouest de la zone d'étude, on observe des anomalies négatives formant deux lobes s'étendant vers le Sud et séparés par une bande étranglée, qualifiée d'anomalies intermédiaires. Le lobe centré à l'Ouest est situé sur les gneiss à deux micas et sur les micaschistes ; alors que celui qui s'étend vers le Sud est localisé sur les micaschistes et sur les granites syntectoniques anciens. Ces faibles valeurs du champ seraient dues à une très faible teneur en matériaux ferromagnésiens. On remarque aussi la présence de quelques petites intrusions d'anomalies de valeurs moyennes. Ces intrusions peuvent être liées à la présence dans ces gneiss d'autres roches telles que des para-amphibolites, des quartzites micacés, des minerais de titane ou encore du quartz ou même à un métamorphisme.

La partie Sud-Est est séparée de la partie Nord par un petit couloir dominé de valeurs moyennes du champ magnétique. Celles-ci correspondraient aux granites syntectoniques anciens. Cependant le changement de susceptibilité magnétique peut être lié ici à un alignement de matériaux riches en quartz.

Les parties Ouest et Nord sont séparées par un grand couloir constitué des valeurs moyennes d'anomalies. Elles semblent correspondre aux embréchites. Ces anomalies seraient dues à un métamorphisme des roches granitiques vers les gneiss. Au Nord-Ouest de ce couloir, notamment à Mbangue, on observe un creux magnétique qui serait dû à la présence des gneiss dans les embréchites.

Le sud-ouest quant à lui est caractérisé par des anomalies de valeurs moyennes du champ. Celles-ci sont corrélées aux gneiss et aux granites. Les

variations de susceptibilité magnétique seraient dues à un phénomène de granitisation des gneiss. On note aussi au Nord de Bika la présence d'une anomalie bipolaire qui serait due à la présence de minerai de titane dans cette zone.

Cette carte semble clairement montrer le contraste qui existerait entre la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale et le Craton du Congo. Ainsi, la partie Nord-Est caractérisée par les valeurs positives du champ semble correspondre à la Chaîne Panafricaine ; tandis que la partie Ouest constituée d'anomalies négatives aurait des empreintes du Craton du Congo. Ces deux zones seraient séparées par une zone de transition dominée par des anomalies de valeurs moyennes du champ magnétique.

Cette carte révèle que l'anomalie séparant les parties Nord et Ouest caractérisée par les valeurs moyennes du champ suit la direction NW à WNW. Cette direction est également celle suivie par les lignes tectoniques mises en évidence dans les travaux de Gazel (1955), Gazel & Gérard (1954), elle est aussi reconnue parmi les directions du plateau de l'Adamaoua. Les parties Nord et Sud-Est sont séparées par une anomalie constituée de valeurs moyennes orientée ENE-WSW. Le creux magnétique observé dans la zone de Mbangue coïncide avec le fleuve Sanaga. Il a une tendance NE-SW et semble bien suivre la direction de la Faille de la Sanaga.

Cette carte présente des structures plissées, ce qui nous amène à dire que la zone d'étude aurait subi d'intenses plissements.

La partie Ouest de la carte constituée des micaschistes et des gneiss, caractérisée par les faibles valeurs du champ magnétique correspondrait aux formations panafricaines remaniées. Ces formations seraient des formations paléoprotérozoïques du fait de leur degré de métamorphisme. Le reste de la carte (centre, Est et Nord) couvert en grande partie de granites et caractérisé par de

fortes valeurs du champ magnétique, serait constitué des formations néoprotérozoïques.

1.2. La carte de l'anomalie du champ magnétique réduite à l'équateur

La réduction à l'équateur a été calculée en prenant les valeurs d'inclinaison et de déclinaison magnétique respectivement ($I_m = -13,98^\circ$; $D_m = -5,33^\circ$), à la date du 1^{er} janvier 1970 pour la zone comprise entre les latitudes $4^\circ 30'$ et 5° et les longitudes 13° et $14^\circ E$. Cette carte montre également les grandes anomalies observées sur la carte du champ magnétique total.

En théorie, la réduction à l'équateur transforme une anomalie causée par un corps soumis à une aimantation ayant une inclinaison non nulle, en une autre anomalie qui serait associée au même corps si l'inclinaison de l'aimantation était nulle. Du point de vue de la représentation spatiale, l'anomalie passe d'une forme quelconque à une forme symétrique caractéristique, avec un lobe central latitudinal encadré au Nord et au Sud par deux lobes de signe opposé au premier (Feumoé, 2012).

Sur la figure ci-dessous (Figure 3.2), on observe toujours un domaine fortement magnétique au Nord-Est, et au Nord-Ouest une zone de faibles anomalies magnétiques. Cependant on a un déplacement de l'ouest vers l'Est de l'anomalie faiblement magnétique, alors que les anomalies secondaires ont conservé leurs formes.

Sur cette carte, une assez bonne corrélation est observée entre les anomalies et la géologie de la zone d'étude. Les granites du Nord seraient illustrés ici par de grandes et des moyennes amplitudes atteignant les 43,05 nT. Ce qui correspondrait bien à une granitisation poussée ; les micaschistes quant à eux caractérisés par de faibles amplitudes atteignant -122,77 nT. Ces derniers auraient subi un métamorphisme. Les granites et les micaschistes cités plus haut seraient

séparés par les gneiss marqués par des anomalies aéromagnétiques dont les amplitudes sont comprises entre -60,09 nT et -30,60 nT.

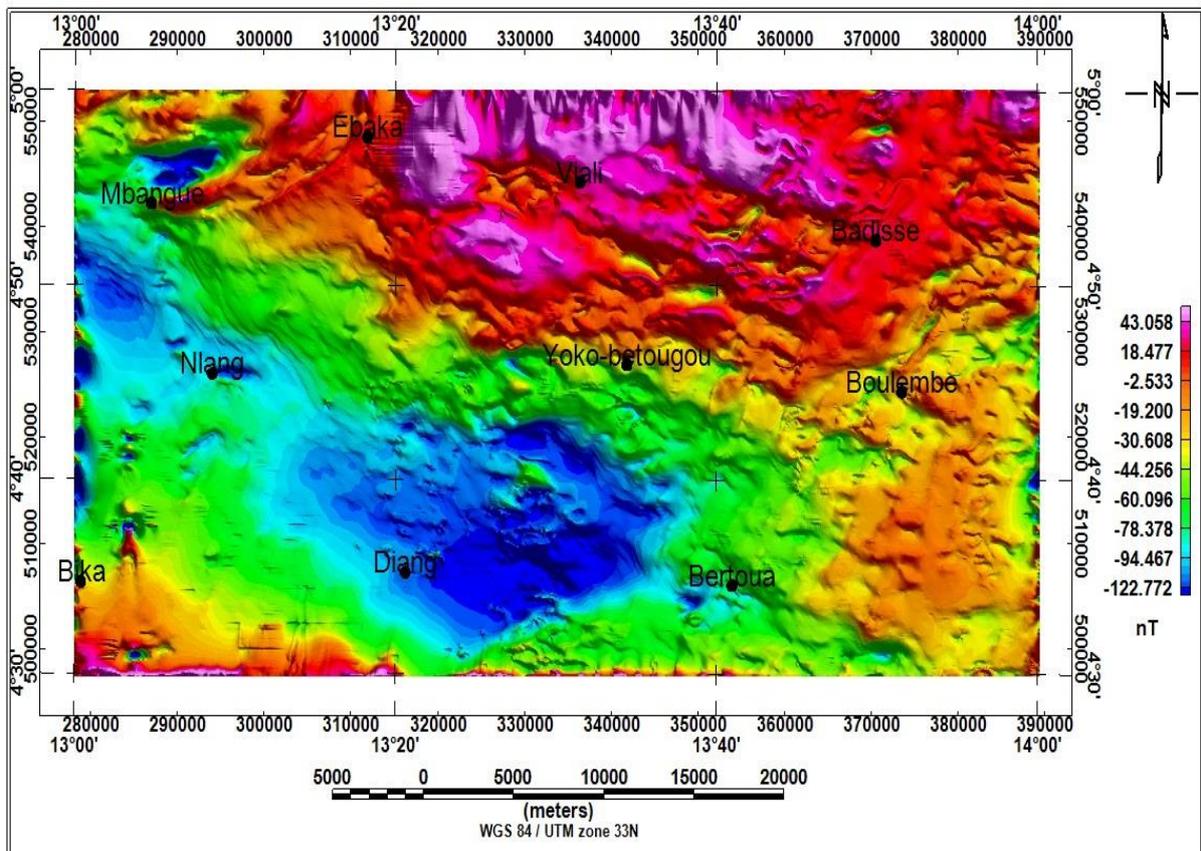


Figure 3.2. Carte du champ magnétique total réduite à l'équateur

La carte d'anomalie du champ magnétique total réduite à l'équateur montre des anomalies quasi-symétriques. Les anomalies négatives se sont déplacées vers le Sud-Est, ce qui suggérerait que ces anomalies seraient probablement associées à des corps ayant bien un comportement induit.

1.3. La carte résiduelle de la RTE prolongée à 2 km

L'anomalie résiduelle en chaque point de la grille régulière est calculée en faisant la différence entre l'anomalie magnétique du champ magnétique total et l'anomalie du champ total prolongée vers le haut à 2 Km. La carte de la Figure 3.3 présente des anomalies maximales qui sont de l'ordre de 31,18 nT,

contrairement aux anomalies maximales du champ magnétique total dont les valeurs tournent aux environs de 43,05 nT. Cette différence montre bien que sur la carte du champ magnétique total réduite à l'équateur, l'effet des structures superficielles est masqué par celui des structures profondes. Sur cette figure, on observe toujours les anomalies fines et allongées qui mettent encore en évidence la direction NW-SE, ESE-WNW. Les zones de grandes susceptibilités magnétiques observées au Nord, à l'Ouest, au Centre de la zone d'étude et à Bertoua sont aussi bien observées ici. On note également la mise en évidence de la direction structurale NE-SW observée à l'Est de la zone d'étude. Toutefois, la direction E-W est aussi observée à plusieurs endroits de notre zone d'étude.

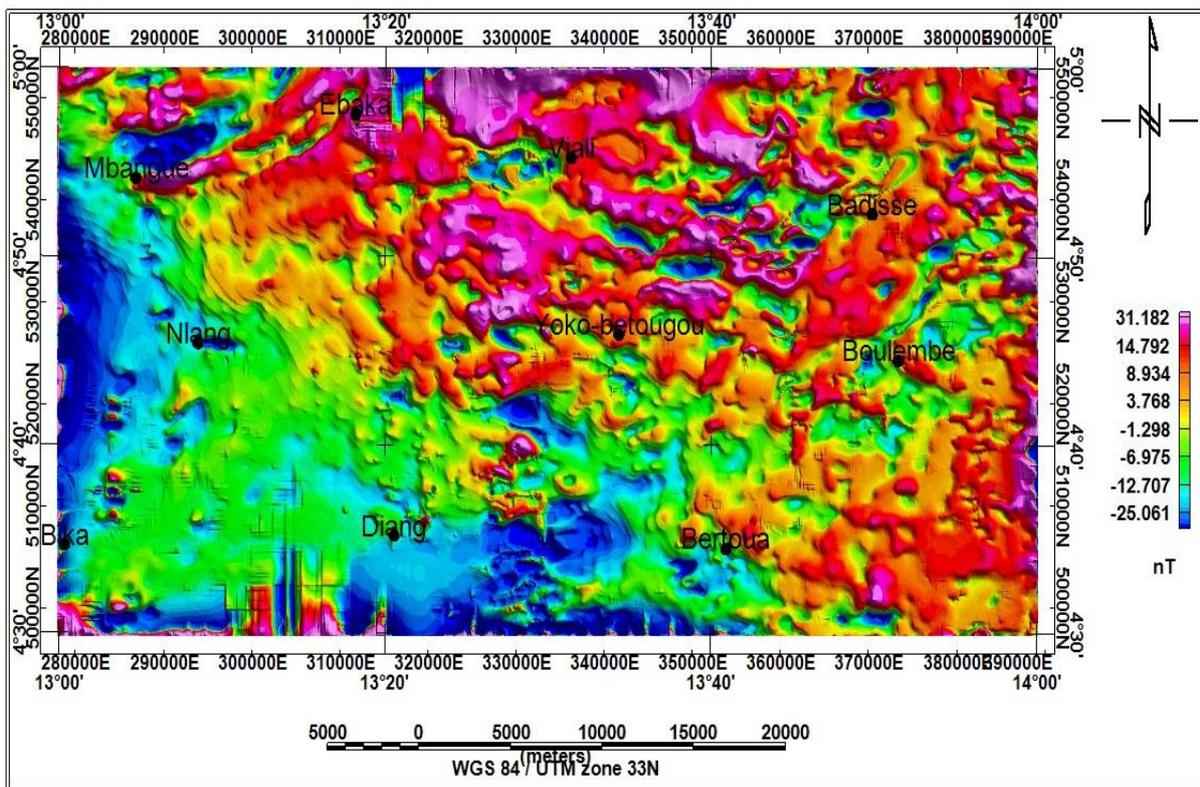


Figure 3.3. Carte du résiduelle de la RTE

1.4. Les cartes du champ magnétique total prolongées vers le haut

Le prolongement vers le haut permet l'atténuation des grandes fréquences se rapportant aux courtes longueurs d'ondes associées aux structures superficielles. Cette atténuation est d'autant plus importante que la distance de prolongement est

grande. L'opération du filtrage de prolongement vers le haut est une opération de lissage ; elle permet d'amplifier les anomalies de grande longueur d'onde (faible fréquence) correspondant aux structures profondes du socle.

1.4.1. La carte de la RTE réduite à l'équateur prolongée vers le haut à 1km

Celle-ci ressemble à la carte du champ magnétique total réduite à l'équateur décrite précédemment, mais avec une légère baisse des anomalies d'amplitude liées aux structures superficielles observées au Sud-Ouest, au Sud-Est de la zone d'étude et dans la zone de Bertoua. De part et d'autre, les parties négatives des anomalies bipolaires observées au Nord et à l'Est ont toutes tendance à disparaître.

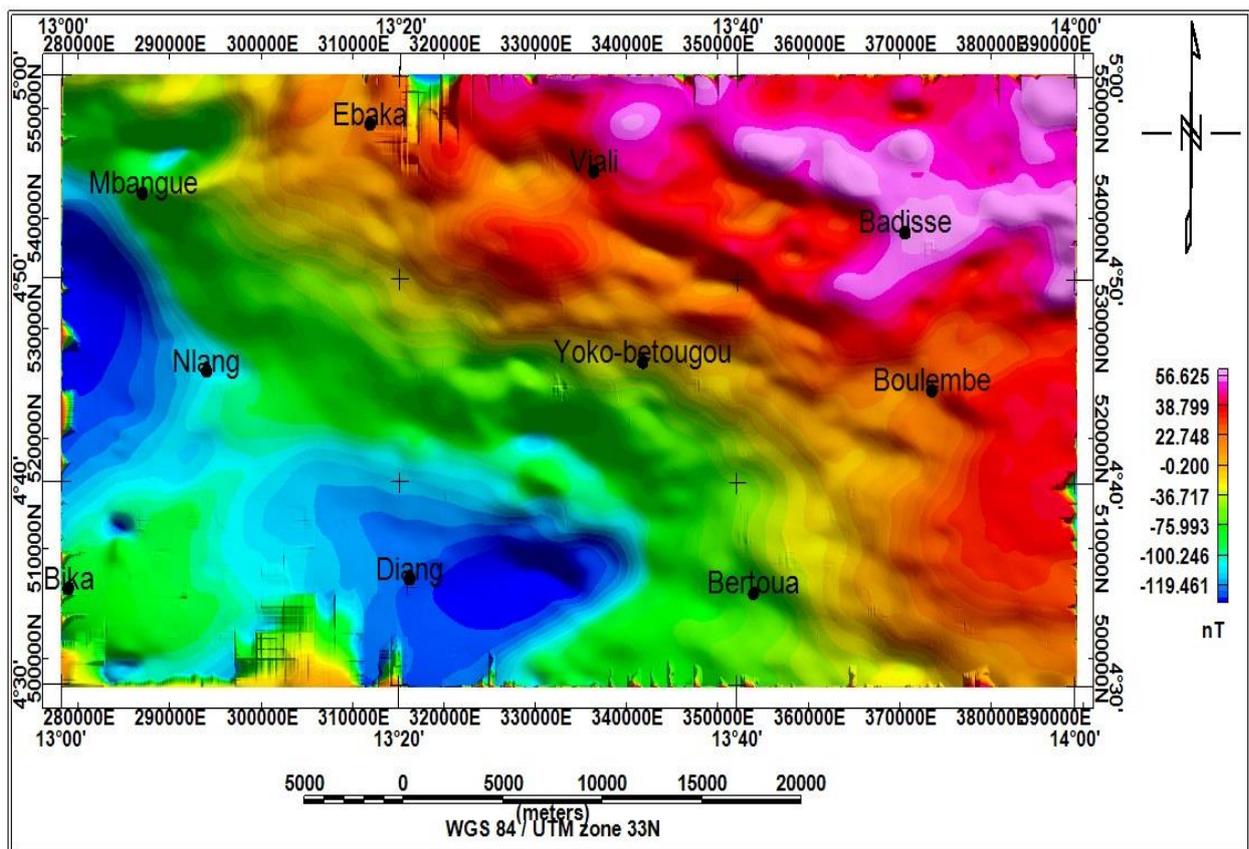


Figure 3.4.a. Carte de la RTE prolongée vers le haut à 1 km

1.4.2. La carte de la RTE réduite à l'équateur prolongée vers le haut à 3 km

On remarque à cette hauteur que les anomalies positives observées dans les zones de Bika, Nlang et au nord de Bertoua disparaissent progressivement de même que les anomalies négatives observées au Nord et à l'Est de la zone d'étude. Ces informations confirment que ces anomalies seraient liées aux structures superficielles.

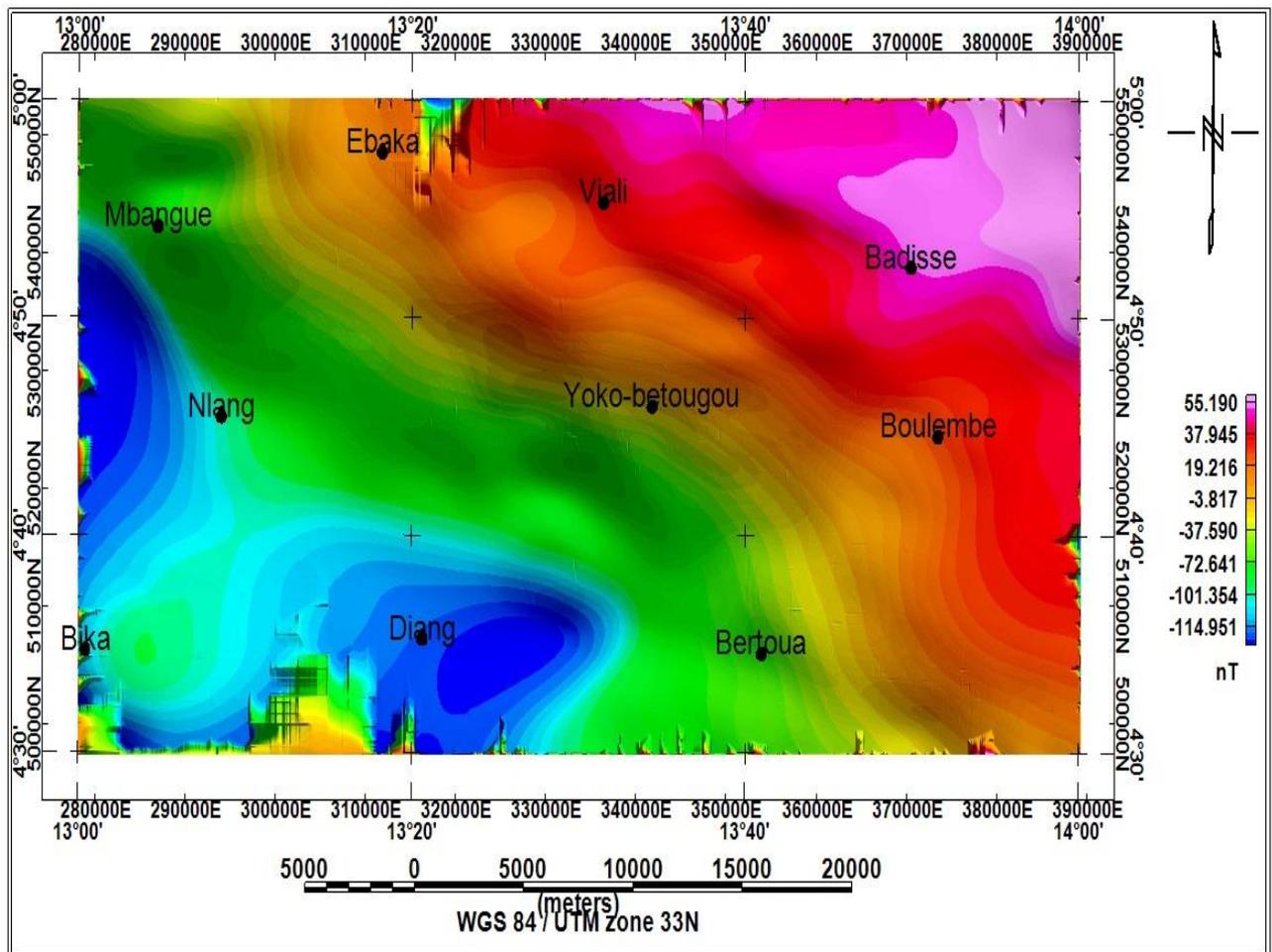


Figure 3.4.b. Carte de la RTE prolongée vers le haut à 3 km

1.4.3. La carte de la RTE réduite à l'équateur prolongée vers le haut à 5 km

À partir de cette hauteur, toutes les anomalies liées aux structures superficielles ont carrément été lissées. La zone d'étude est donc constituée au

Nord des anomalies positives liées aux structures de fortes aimantations et au Sud-Ouest par des anomalies négatives liées aux structures de faibles aimantations.

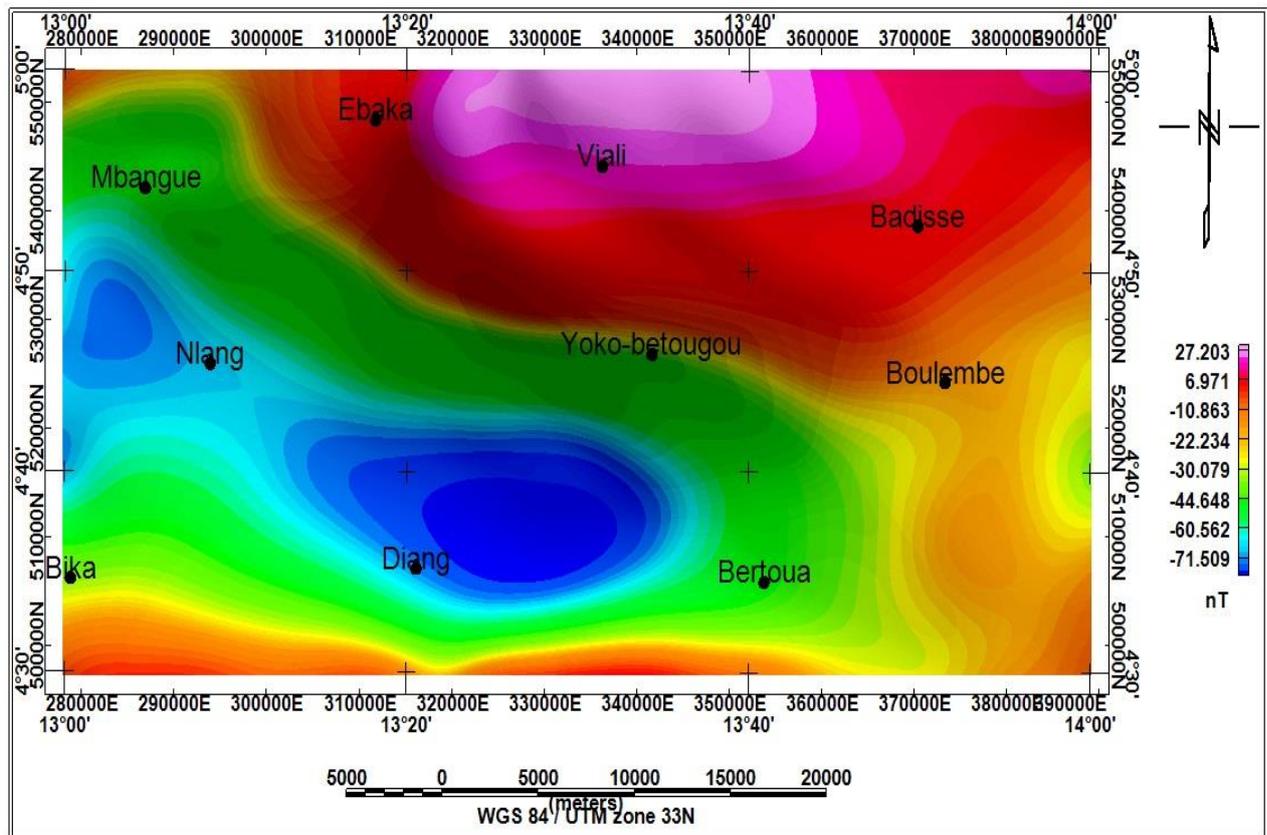


Figure 3.4.c. Carte de la RTE prolongée vers le haut à 5 km

1.5. La carte du signal analytique

Elle nous permet de bien délimiter les contacts des corps géologiques de forte aimantation. De plus, elle met l'accent sur les hautes fréquences, c'est-à-dire des courtes longueurs d'onde. L'appréciation de cette carte (Figure 3.5) du signal analytique laisse apparaître plusieurs constats.

On a plusieurs amas de structures fortement magnétiques dont les plus denses sont observés dans la zone de Mbangue, entre les villages Yoko Betougou et Badissé, au Sud de Bertoua, sur l'axe central Nord-Sud entre Diang et Bertoua. Ces observations confirment bien les hypothèses émises dans l'observation de la carte du champ magnétique total réduite à l'équateur, à savoir qu'on aurait des

anomalies magnétiques liées aux corps fortement magnétiques. Ces anomalies pourraient bien correspondre aux intrusions des corps fortement magnétiques.

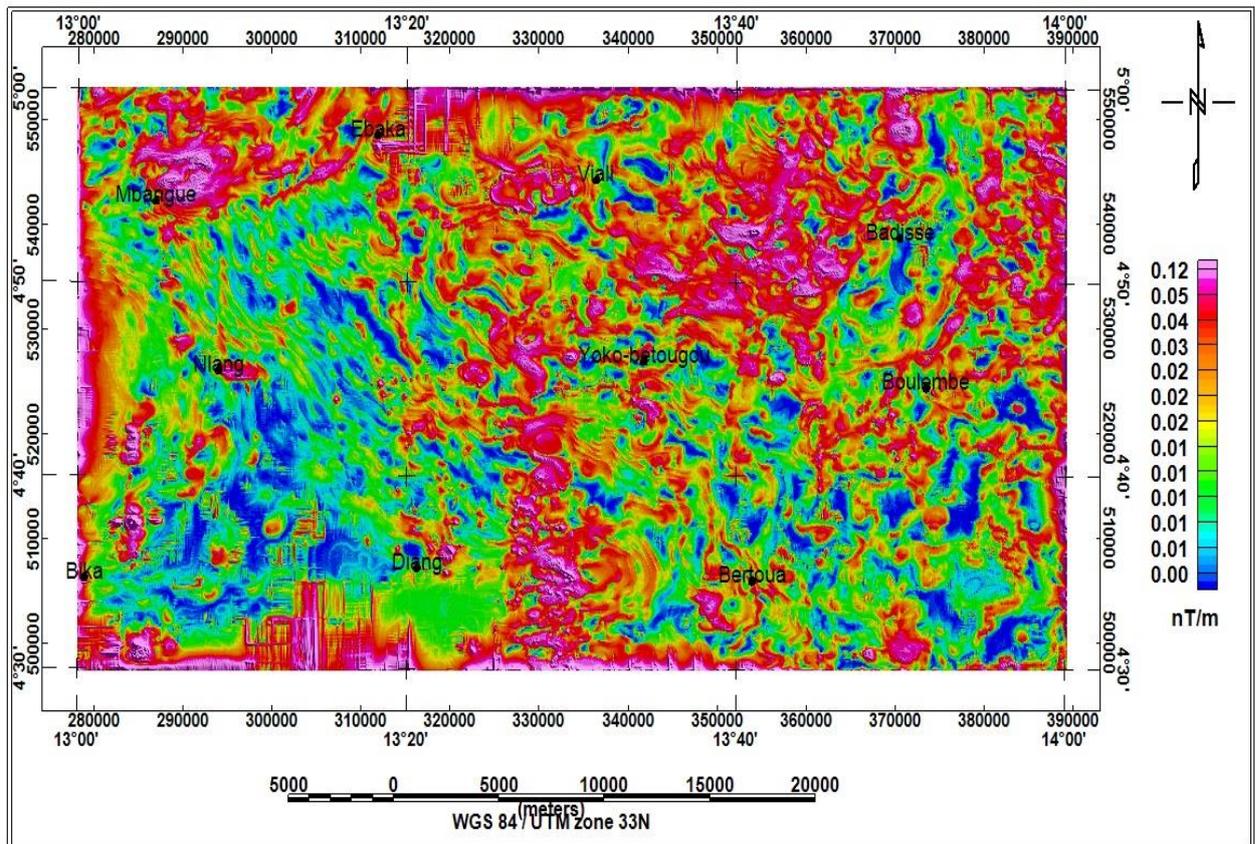


Figure 3.5. Carte du signal analytique

On note également la présence d'anomalies très étroites faiblement magnétiques qui suivent la direction NW-SE, ESE-WNW d'une part, et NE-SW, ENE-WSW, d'autre part. Celles-ci pourraient être assimilées à deux réseaux de failles ou de fractures qui suivraient respectivement ces directions. Ces accidents tectoniques semblent être liés à deux événements tectoniques dus au déversement du Panafricain dans le Craton Congolais.

Ces amas d'anomalies magnétiques semblent avoir des formes subcirculaires qui matérialiseraient ainsi l'intrusion des corps fortement aimantés. On observe également la présence d'anomalies fortement magnétiques fines, légères et de courtes longueurs d'onde, ce qui amène à penser à des structures en forme de filons bien enroulés.

1.6. Les gradients horizontaux directionnels

1.6.1. Le gradient horizontal suivant la direction X

La carte de la dérivée en X est utilisée pour mettre en évidence les contacts lithologiques, structuraux et les accidents tectoniques dans la direction perpendiculaire à l'axe (Ox), c'est-à-dire Nord-Sud. La figure ci-dessous (Figure 3.6) représente la carte de la dérivée horizontale selon la direction X.

Cette carte (Figure 3.6) dévoile plusieurs anomalies de gradients élevés qui sont très étroites, fines, allongées et surtout de courtes longueurs d'onde. Dans les parties Centre, Est et Nord de la zone d'étude, ces anomalies sont perpendiculaires à sub-perpendiculaires entre elles, caractérisant les cisaillements ou des broyages des structures du sous-sol. Elles suivent pour la plupart des directions NW-SE, ESE-WNW, NE-SW et ENE-WSW. Ces anomalies amènent à penser à des structures assimilables aux dykes ou à un réseau de fractures ou de petites failles qui semblent être parallèles aux directions des grands accidents tectoniques régionaux tels que ceux observés dans le Plateau de l'Adamaoua ou des failles telles que celles de la Sanaga, ou le Cisaillement Centre Camerounais. L'accident tectonique de la zone Mbangue est bien individualisé ici.

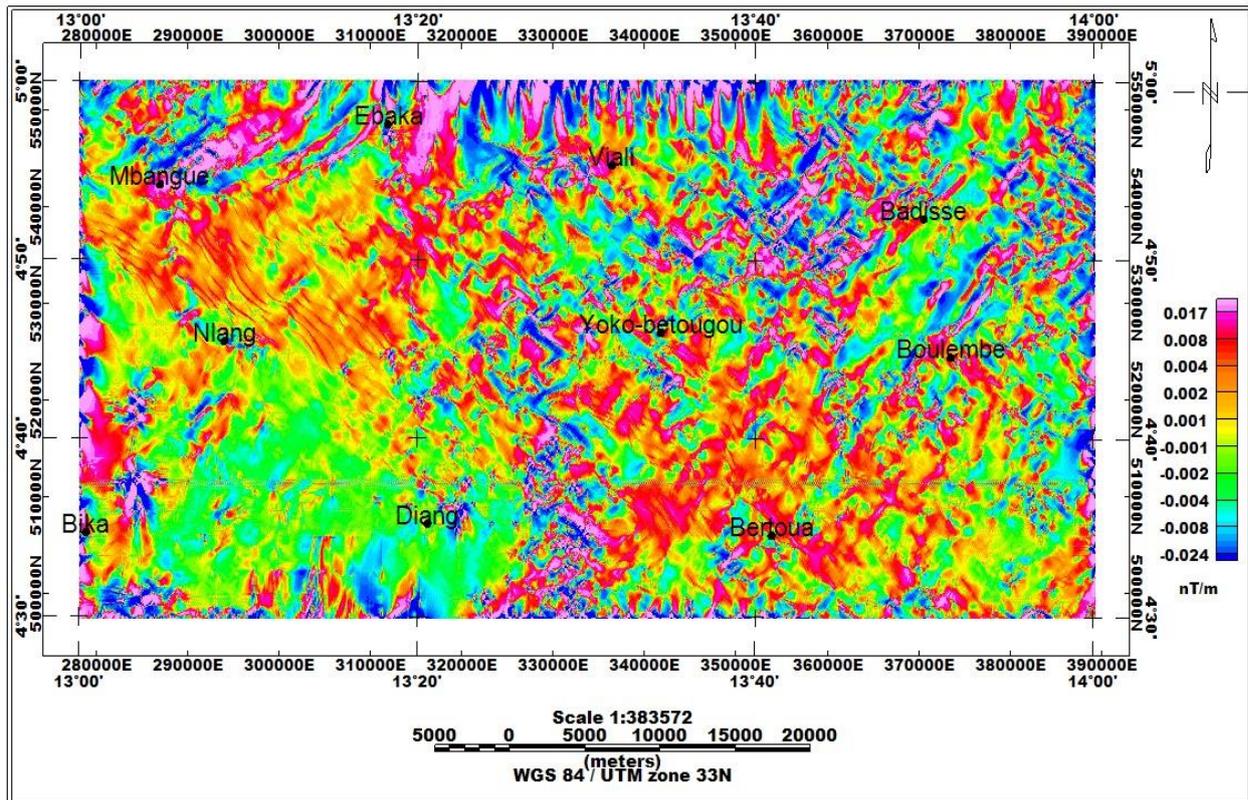


Figure 3.6. Carte du gradient horizontal suivant la direction X

On remarque ici que les directions observées dans les cartes du champ magnétique total et de sa réduction à l'équateur apparaissent toujours bien sur cette carte de même que les amas magnétiques observés dans les cartes du signal analytique.

1.6.2. Le gradient horizontal suivant la direction Y

La carte de la dérivée horizontale suivant la direction Y (Figure 3.7) met en évidence des contacts de direction E-W dans le plan horizontal. On observe toujours des anomalies fines, allongées, étroites et de courte longueur d'ondes qui présentent des formes ondulées. Ces anomalies représenteraient des contacts liés au mélange ou à un broyage de structures analysées par Patterson et al. (1976) comme des contacts gradationnels généralisés. L'aspect ondulatoire des anomalies justifie l'intensité des plissements qui auraient eu cours dans la zone d'étude.

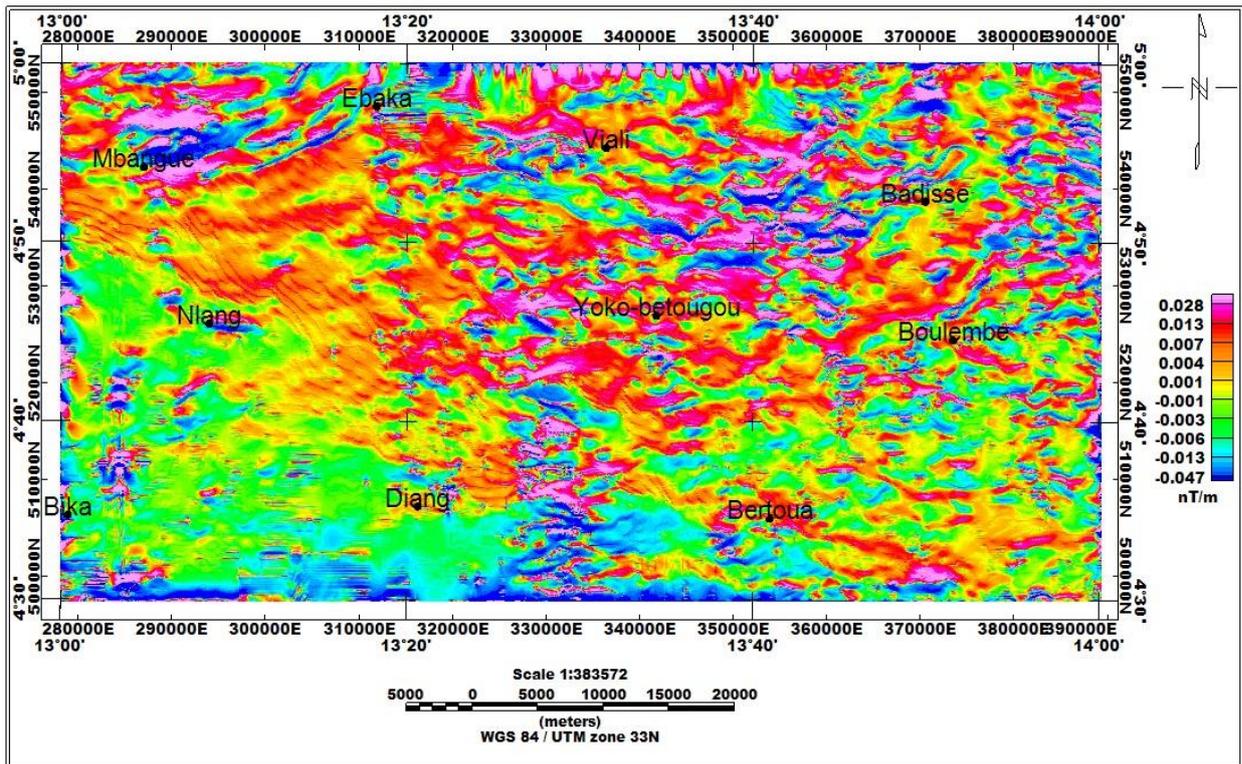


Figure 3.7. Carte du gradient horizontal suivant la direction Y

Les anomalies sus évoquées suivent, outre les directions évoquées sur la carte du gradient en X, la direction E-W qui semble même majoritaire et confirme la théorie. L'accident de Mbangue est toujours bien mis en évidence ici. Les anomalies fines évoquées traduiraient l'existence de petits accidents tectoniques tels que les failles.

1.7. Le gradient vertical

La dérivée verticale (Figure 3.8) est utilisée pour amplifier les anomalies de courte longueur d'onde et focaliser l'effet des structures superficielles dans le sous-sol en atténuant l'effet des anomalies de grande longueur d'onde.

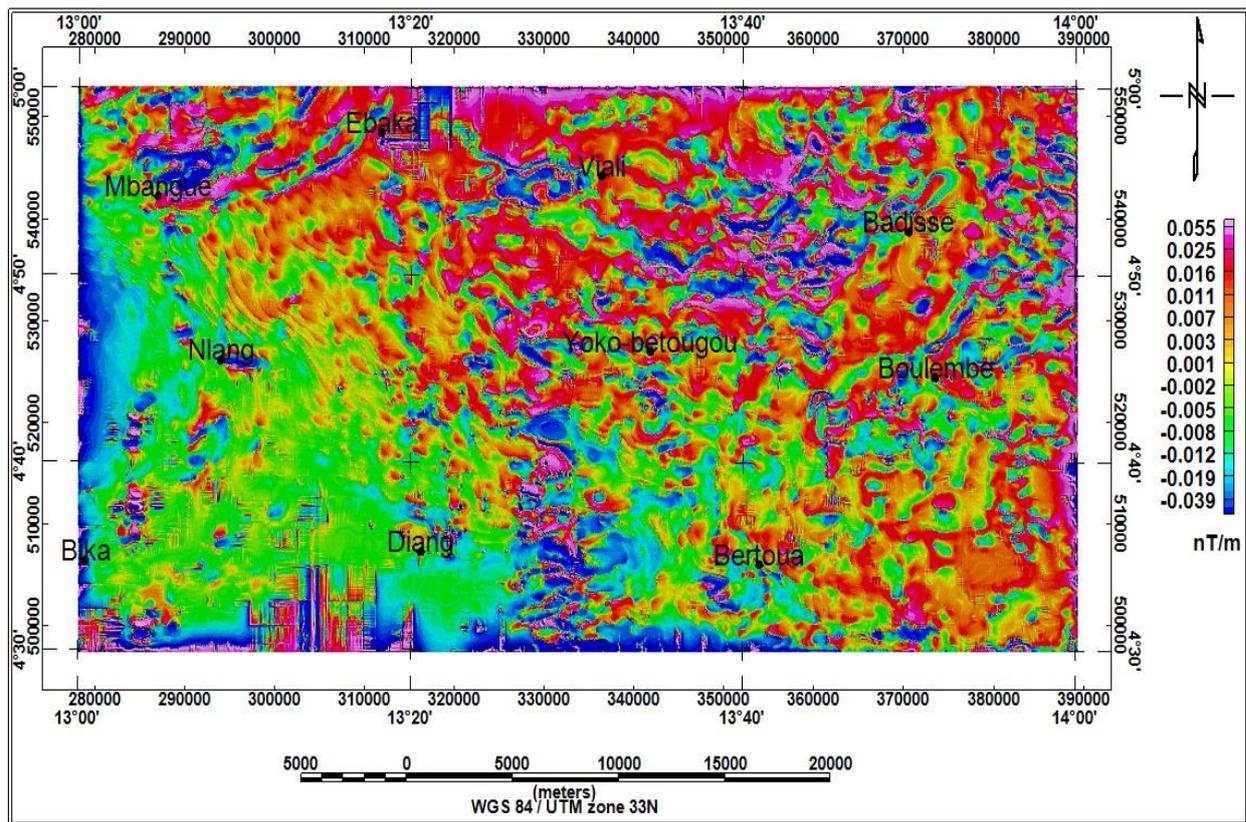


Figure 3.8. Carte du gradient vertical

Cette carte (Figure 3.8) présente également les grands traits observés dans les cartes des gradients horizontaux (X et Y). On observe à l'Est et au Sud-Est de la zone d'étude les anomalies circulaires qui correspondraient aux dômes granitiques ou aux plutons. On observe aussi des linéaments fins, étroits, allongés, plissés et de courte longueur d'ondes de direction NW-SE à ESE-WNW, qui traversent la diagonale de la zone d'étude et qui correspondraient aux linéaments de direction NW-SE à ESE-WNW. Ceux-ci confirment l'existence de la ligne tectonique mise en évidence par la géologie (Gazel, 1954 ; Gazel & Gérard, 1955). Au Nord-Ouest de la carte, l'accident de Mbanga lié au passage du fleuve Sanaga apparaît toujours bien sur cette carte. Dans la partie Nord-Est, on observe également un alignement de structures qui correspondraient aux linéaments suivant la même direction, dénotant l'existence des failles de même direction. On observe également plusieurs structures orientées E-W ; celles-ci traduisent l'existence des linéaments de direction E-W qui dénoteraient également

l'existence de failles. Dans les parties centre et Nord de la zone d'étude, on a plusieurs structures droites, plissées ou allongées de direction ENE-WSW, NE-SW, ESE-WNW et NW-SE, qui traduisent l'existence des plissements, des déformations cassantes et caractérisent le type de tectonique ayant eu lieu dans la zone d'étude.

1.8. La carte de l'angle d'inclinaison

Cette composante souligne les linéaments sécants et les dykes. Cette carte (Figure 3.9) montre que la zone d'étude est divisée en trois parties ; elle présente le même aspect que celui de la carte du champ magnétique total avec les parties Nord-Est et Sud-Ouest caractérisées par les valeurs élevées de l'angle d'inclinaison, ces deux parties étant séparées diagonalement par un axe constitué de faibles valeurs de l'angle d'inclinaison. On observe ici plusieurs linéaments de direction ESE-WNW, NW-SE, ENE-WSW et même E-W.

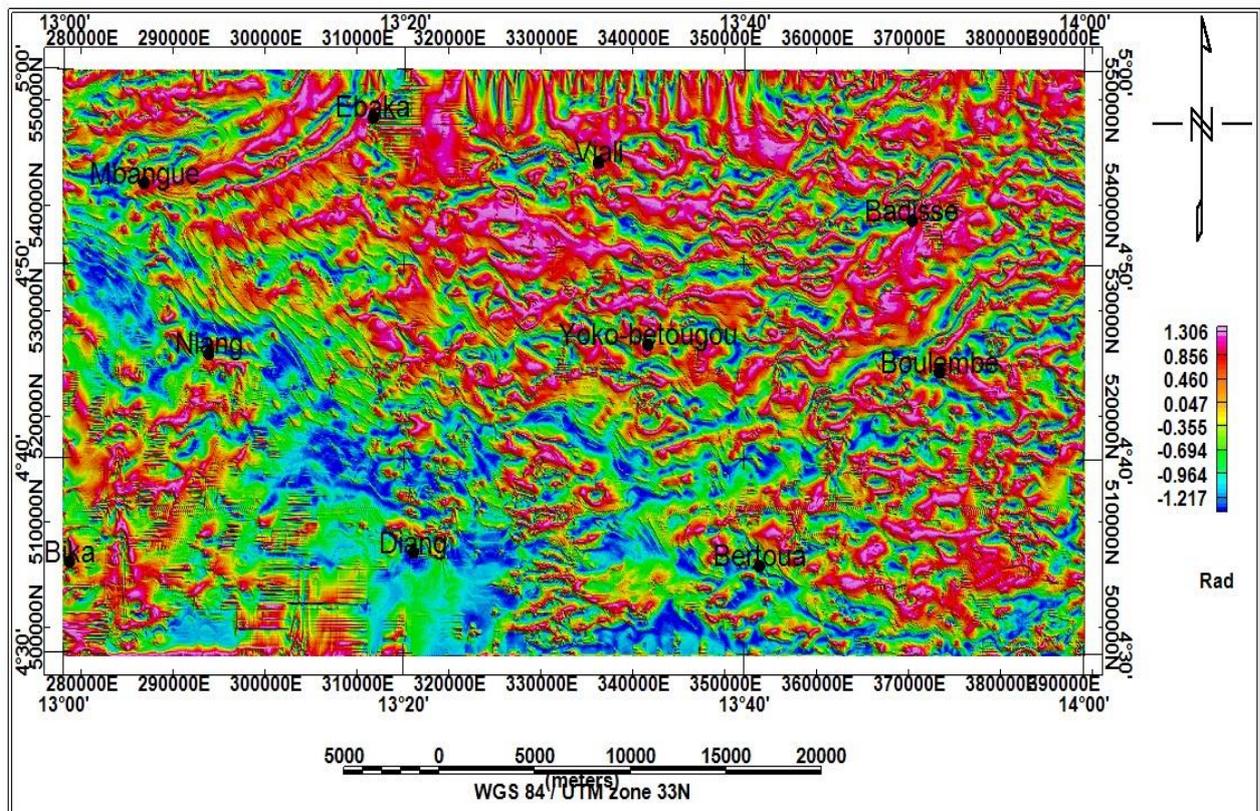


Figure 3.9. Carte de l'angle d'inclinaison

Les linéations en formes de lames caractériseraient des dykes ou une succession de fracturations. Des zones de cisaillements sont aussi observées tout comme des anomalies circulaires ou subcirculaires qui traduiraient la présence des dômes ou des intrusions.

1.9. La superposition des maxima du gradient vertical, du signal analytique et de l'angle d'inclinaison

La carte ci-dessous (Figure 3.10) est la superposition des maxima du gradient vertical, du signal analytique et de l'angle d'inclinaison. Elle donne des renseignements supplémentaires sur l'organisation du sous-sol par rapport à ceux fournis dans les cartes précédentes. Ainsi, elle permet d'individualiser les contacts des différentes structures du socle et de mieux apprécier les accidents géologiques tels que les fractures, les dykes ou les failles qui sont non seulement superficielles, mais aussi profondes.

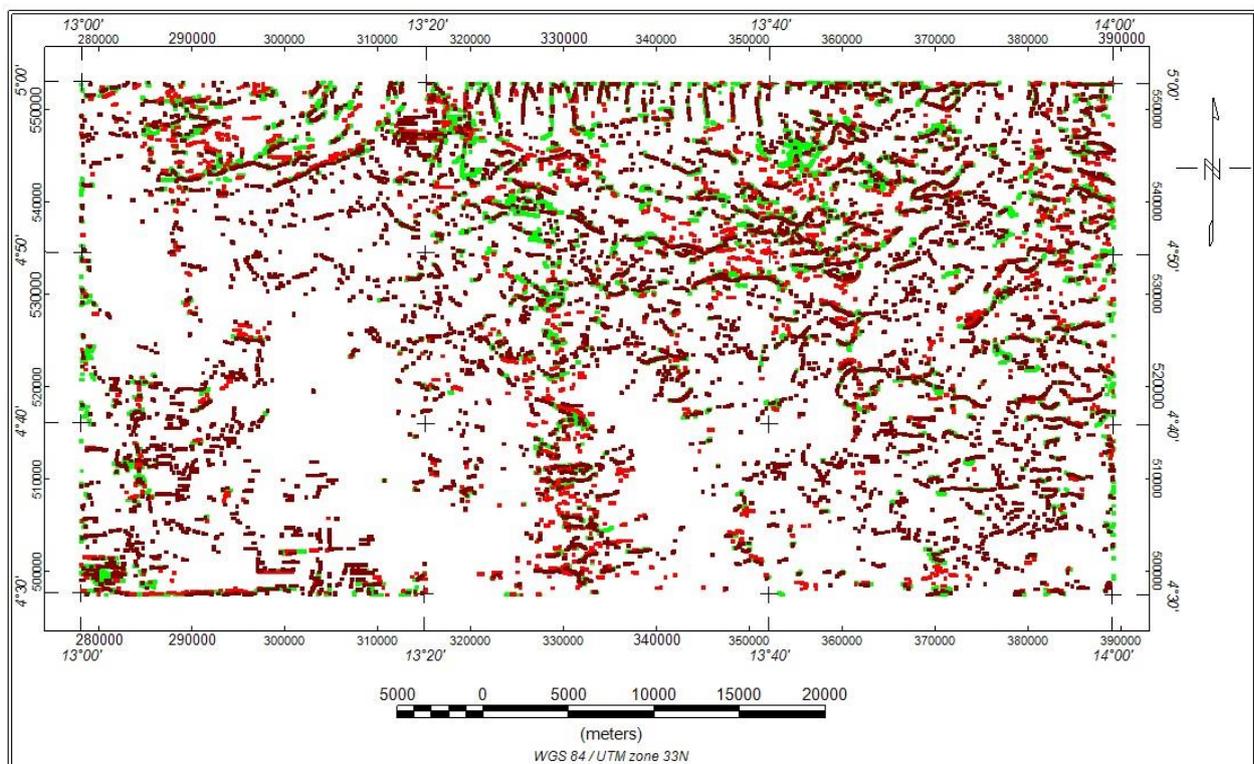


Figure 3.10. Superposition des maxima du gradient vertical, du signal analytique et de l'angle d'inclinaison Tilt

Cette superposition formerait un essaim de solutions qui se superposent dans la partie Nord de la zone d'étude. Elle révèle des signatures qui correspondraient aux failles dans cette zone-là et qui seraient liées à des mouvements dextres et senestres de directions ENE-WSW, ESE-WNW, NW-SE, NE-SW et même E-W.

1.10. L'Analyse multi-échelle

1.10.1. L'Analyse de la carte gradient horizontal total

Les résultats du gradient horizontal de l'anomalie du champ total confirment et précisent le tracé des structures cassantes et plissées, mises en évidence dans les études géologiques antérieures menées dans la zone d'étude. Sur la carte ci-dessous (Figure 3.11), on observe plusieurs anomalies fines, rectilignes, étroites de très courte longueur d'ondes que nous assimilons à une famille de petites failles ou à une succession de fracturations. Celles-ci présentent des formes plissées, caractérisant ainsi l'intensité des plissements ayant eu cours dans la zone. Dans la partie Ouest de la carte, ces anomalies suivent la direction NW-SE, dans la partie Nord-Ouest, elles suivent plus les directions NE-SW et ENE-WSW, alors qu'au centre, à l'Est, au Nord et au Sud, elles sont orientées E-W, NE-SW, NW-SE et ENE-WSW. On observe également plusieurs zones constituées d'anomalies de fortes valeurs du champ magnétique, présentant un grand contraste de susceptibilité magnétique.

Il y a une fracture NE-SW située au Nord de Badissé qui s'étend sur plusieurs kilomètres. Toutefois, cette carte (Figure 3.11) ne nous permet pas de bien résumer les principales limites entre les différents contacts.

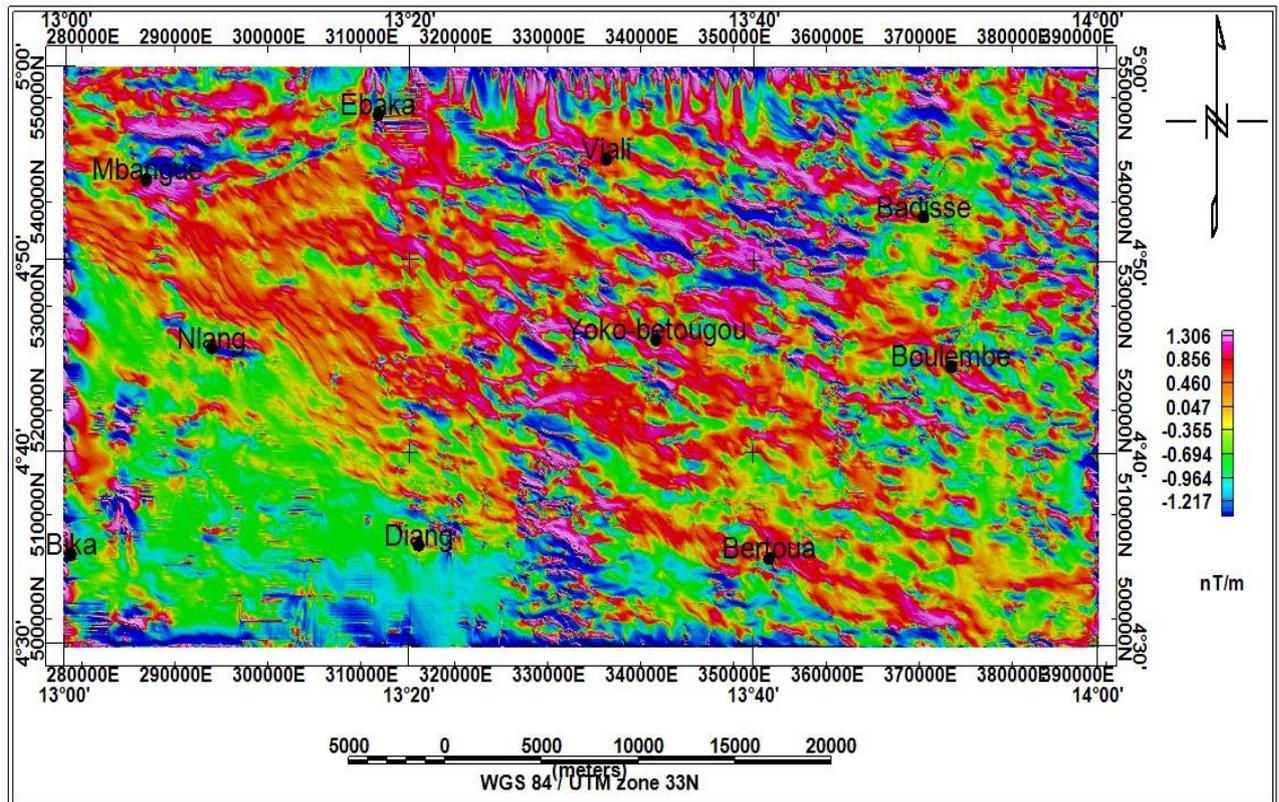


Figure 3.11. Carte du gradient horizontal total

1.10.2. La carte des maxima du gradient horizontal prolongé à 1 km, 2 km et 3km

Le gradient horizontal constitue un excellent moyen de localiser les contacts géologiques dans le sous-sol, notamment des failles et déterminent leur tracé, leur pendage et leur degré d'importance (Khattach et al., 2004, 2006) ; en effet la limite entre deux blocs caractérisés par des susceptibilités différentes est soulignée par la ligne marquant les maxima locaux des valeurs de ce gradient. L'anomalie magnétique au-dessus d'un contact vertical est matérialisée par une courbe ayant un minimum du côté des roches de faible susceptibilité et un maximum du côté des roches ayant une susceptibilité élevée. Le point d'inflexion de la courbe se trouve à l'aplomb de ce contact matérialisant ainsi le maximum du gradient horizontal (Cordell & Grauch, 1982, 1985 ; Blakely & Simpson, 1986).

Pour mettre en évidence les contacts géologiques associés aux failles ou aux fractures suspectées dans les cartes précédentes, nous avons représenté les maxima du gradient horizontal par la méthode de Blakely & Simpson (1986) décrite plus haut. La carte ci-dessous (Figure 3.12) est la superposition des cartes des maxima du gradient horizontal réduits à l'équateur et prolongés vers le haut à 1 km, 2 km et 3 km. On y observe une complexité structurale marquée par l'alignement des maxima, ce qui suggère l'existence de plusieurs structures linéaires ayant affecté le socle. La configuration de ces maxima laisse apparaître plusieurs directions, dont les plus importantes sont NW-SE, NE-SW, E-W, ENE-WSW et même E-W, dénotant ainsi la présence des déformations à l'échelle régionale du socle assimilées aux failles et fractures qui suivent ces directions.

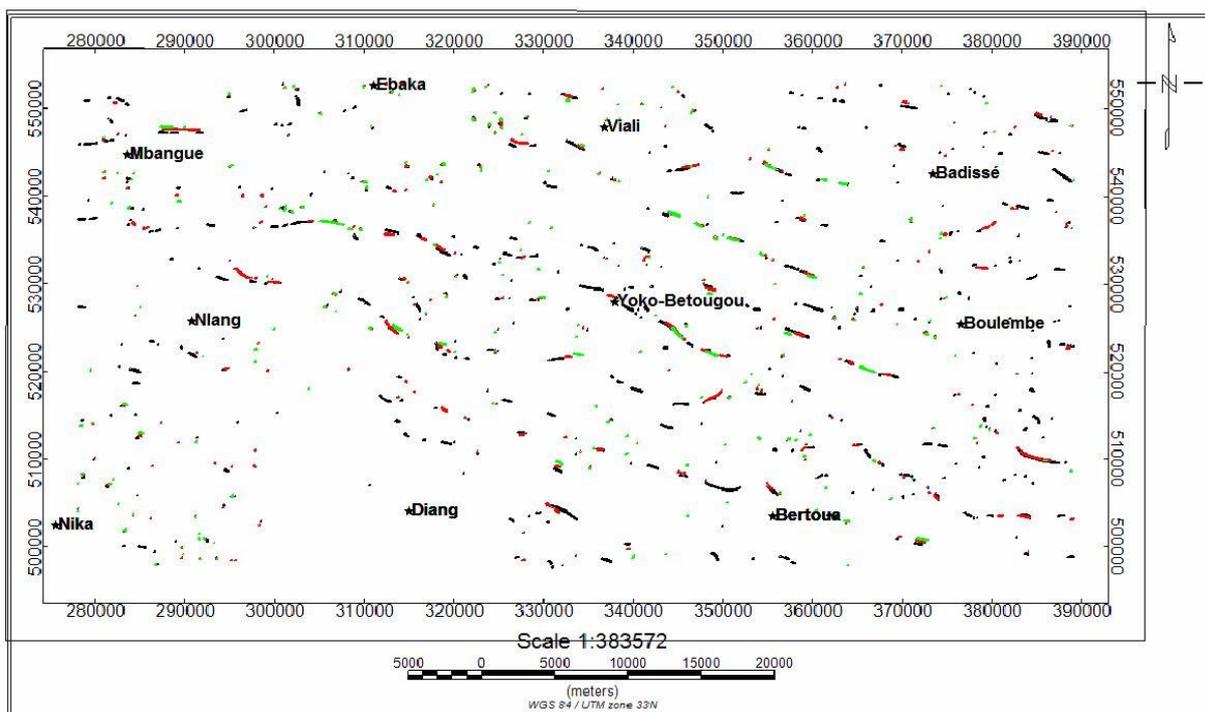


Figure 3.12: Carte des maxima du gradient horizontal

Cette carte (Figure 3.12) montre que les anomalies associées aux contacts géologiques continus sont plus rectilignes que celles observées sur la carte du champ magnétique total. Elle présente également des anomalies selon les directives WNW-ESE, ENE-WSW, NW-SE et E-W. Ces anomalies

correspondent à des zones de contacts magnétiques et seraient caractérisées par des susceptibilités magnétiques divergentes, associées aux failles. Sur cette carte (Figure 3.12), il existe deux grandes catégories de contacts :

- Les contacts rectilignes d'intensité observés sur plusieurs kilomètres et qui représenteraient des signatures de failles ;
- Les contacts circulaires trouvés dans les zones de Viali, Ebaka, Mbangue et au Nord de Bertoua qui caractériseraient des corps intrusifs.

1.10.3. La carte des linéaments structuraux de la zone d'étude

La carte ci-dessous (Figure 3.13.a) est la carte de synthèse des linéaments obtenus à partir de la superposition des cartes des maxima des gradients horizontaux prolongés à 1000m, 2000m et 3000m. Elle résume l'essentiel des linéaments mis en évidence dans la zone d'étude.

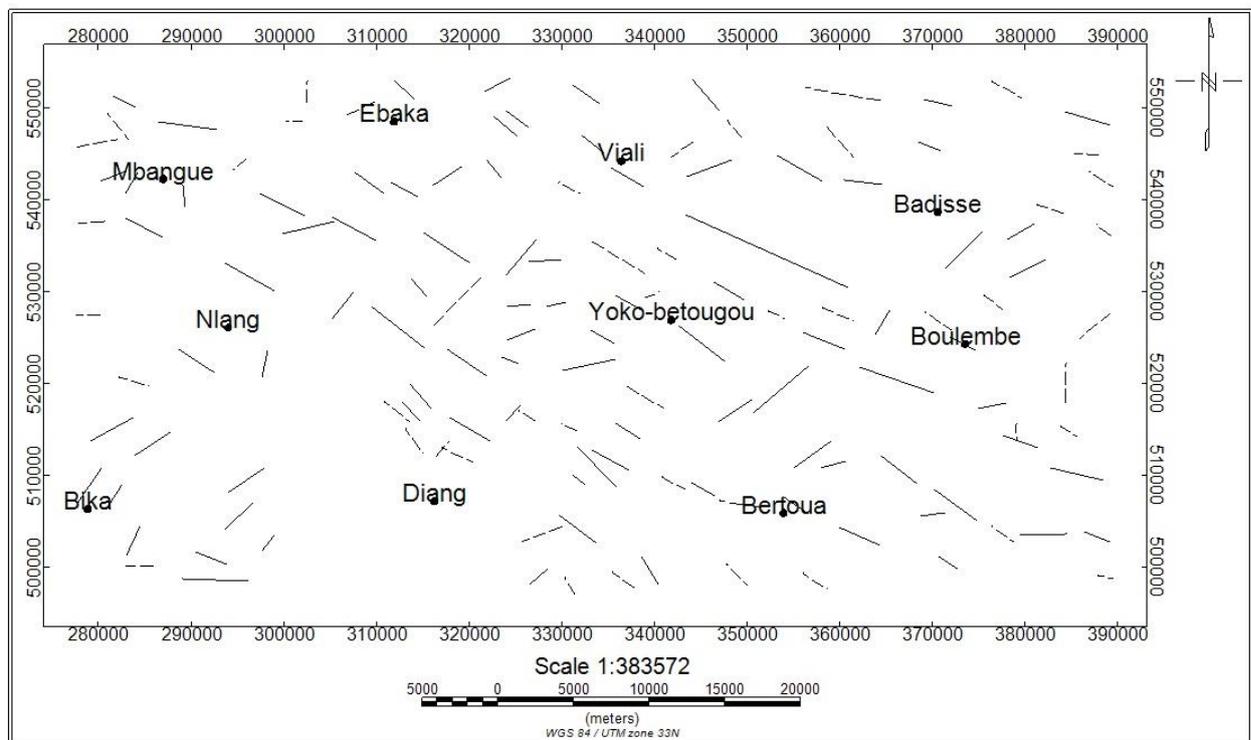


Figure 3.13.a. Carte structurale de la zone d'étude

Cette carte (Figure 3.13.a) récapitule les linéaments obtenus à partir des maxima locaux de l'information contenue dans l'image filtrée du gradient horizontal. Elle révèle quatre grandes familles de linéaments, dont les plus importantes sont : NW-SE, WNW-ESE, NE-SW, ENE-WSW, les familles E-W et N-S étant secondaires.

La carte de la figure (3.13.b) résume l'essentiel des linéaments majeurs et mineurs. Il en ressort que les linéaments suivent les directions majeures WNW-ESE, NW-SE, NE-SW, ENE-WSW et les directions mineures E-W et N-S.

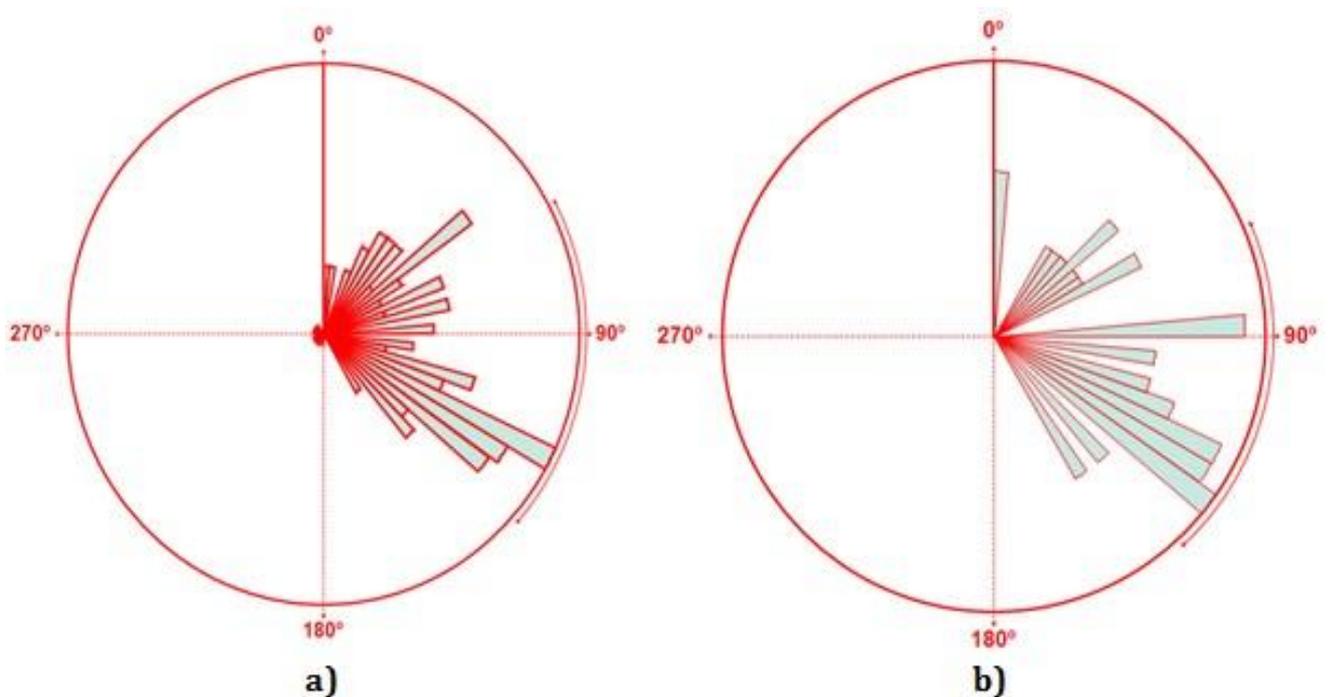


Figure 3.13.b. a) Rosace directionnelle des linéaments majeurs. b) Rosace directionnelle des linéaments mineurs

1.11. L'Analyse quantitative

1.11.1. La carte des solutions d'Euler

Les solutions d'Euler ont été calculées suivant les paramètres ci-après : indice structural 0, tolérance 10 tandis que la taille de la fenêtre est 15. L'indice structural 0 permet de mettre en évidence les contacts magnétiques observés dans la zone d'étude. La Figure 3.14 représente les solutions issues de la résolution de l'équation homogénéité des données magnétiques d'Euler.

On remarque une ressemblance entre les solutions d'Euler et les linéaments magnétiques obtenus sur la carte du gradient horizontal. L'accident observé au Nord-Ouest dans la zone de Mbangue est toujours bien mis en évidence ici avec un regroupement de solutions coïncidant avec les directions des linéaments observés sur la carte structurale. A l'Est, la déchirure mise en évidence dans les cartes précédentes est aussi bien individualisée de même que les solutions observées au Centre et au Nord de la zone d'étude. On peut donc dire que l'orientation des minéraux magnétiques semble épouser la direction des déformations tectoniques régionales.

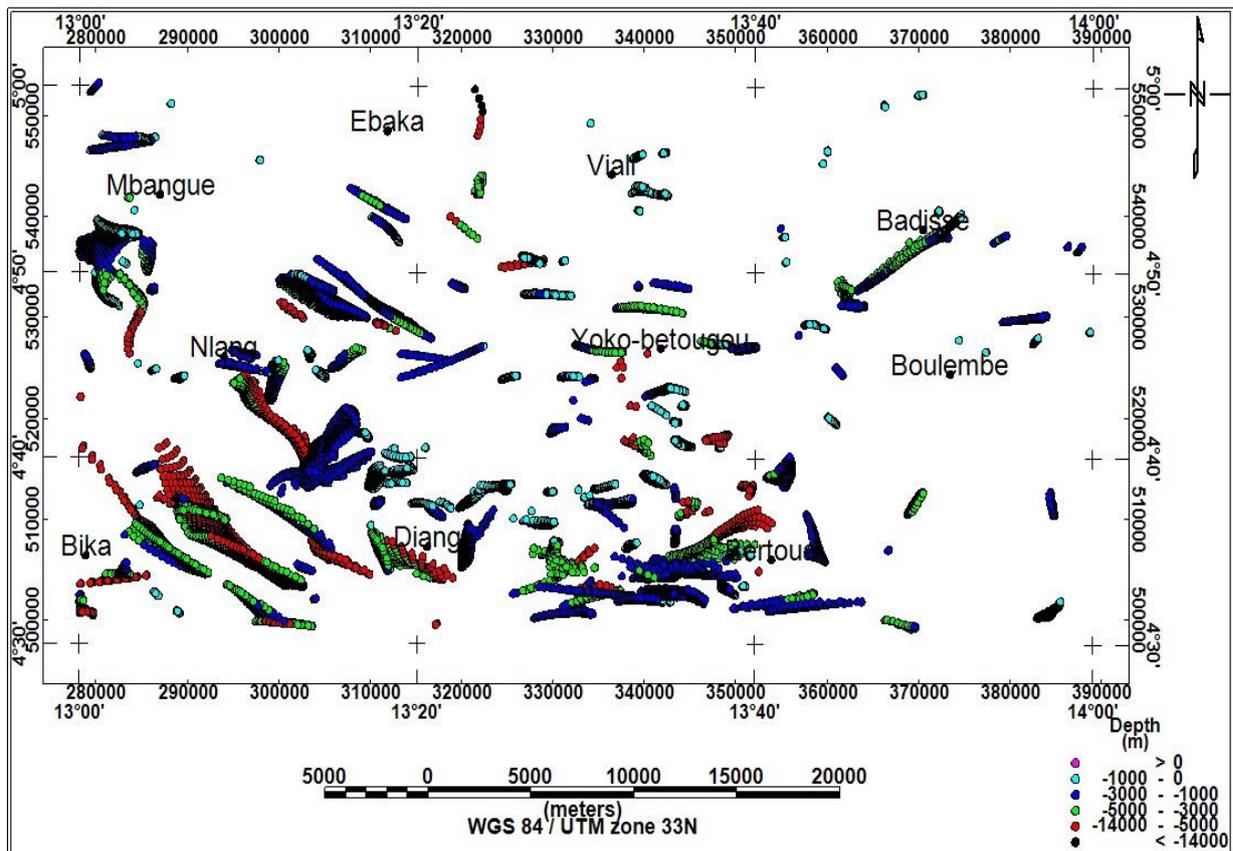


Figure 3.14. Carte des solutions Euler

Sur cette carte (Figure 3.14), on remarque que l'alignement des solutions indique d'autres nouvelles failles au Sud et au Sud-Est de la zone d'étude. Cette carte permet de mieux distinguer les corps intrusifs des failles profondes. Ainsi, la zone Sud-Ouest serait le siège des failles profondes, alors que dans la partie

Sud, on retrouverait des failles de 3000 m de profondeur environ. L'alignement rectiligne et continu des solutions d'Euler caractériserait les failles normales cachées dans le socle cratonique. La direction majeure est WNW-ESE alors que les directions secondaires sont NW-SE, E-W, NE-SW.

Les accidents les plus profonds sont de direction WNW-ESE et NW-SE, avec des profondeurs de plus de 14 kilomètres, et sont localisés au Sud-Ouest de la zone d'étude dans les zones couvertes par les biotites embréchites, les gneiss à deux micas et les granites.

L'absence de ces contacts dans les cartes précédentes justifie bien la nature profonde de ces accidents. La forme compacte des solutions d'Euler aux environs de Mbangue suggère une intrusion de matériaux dont l'enfouissement est d'environ 3000 m de profondeur. Les contacts linéaires observés dans la partie sud de la zone d'étude traduiraient des discontinuités de type faille, dont les profondeurs varient entre 3000 m et 14000 m. Alors que les regroupements de solutions en forme subcirculaire traduiraient des intrusions des matériaux à des profondeurs atteignant 5000m.

1.11.2. La modélisation des données suivants les profils aéromagnétiques

La modélisation s'est faite suivant les cinq profils de mesures sur la carte du champ magnétique total réduite à l'équateur, comme l'indique la figure ci-dessous (Figure 3.15). Les profils ont été tracés sur des anomalies présentant un intérêt particulier.

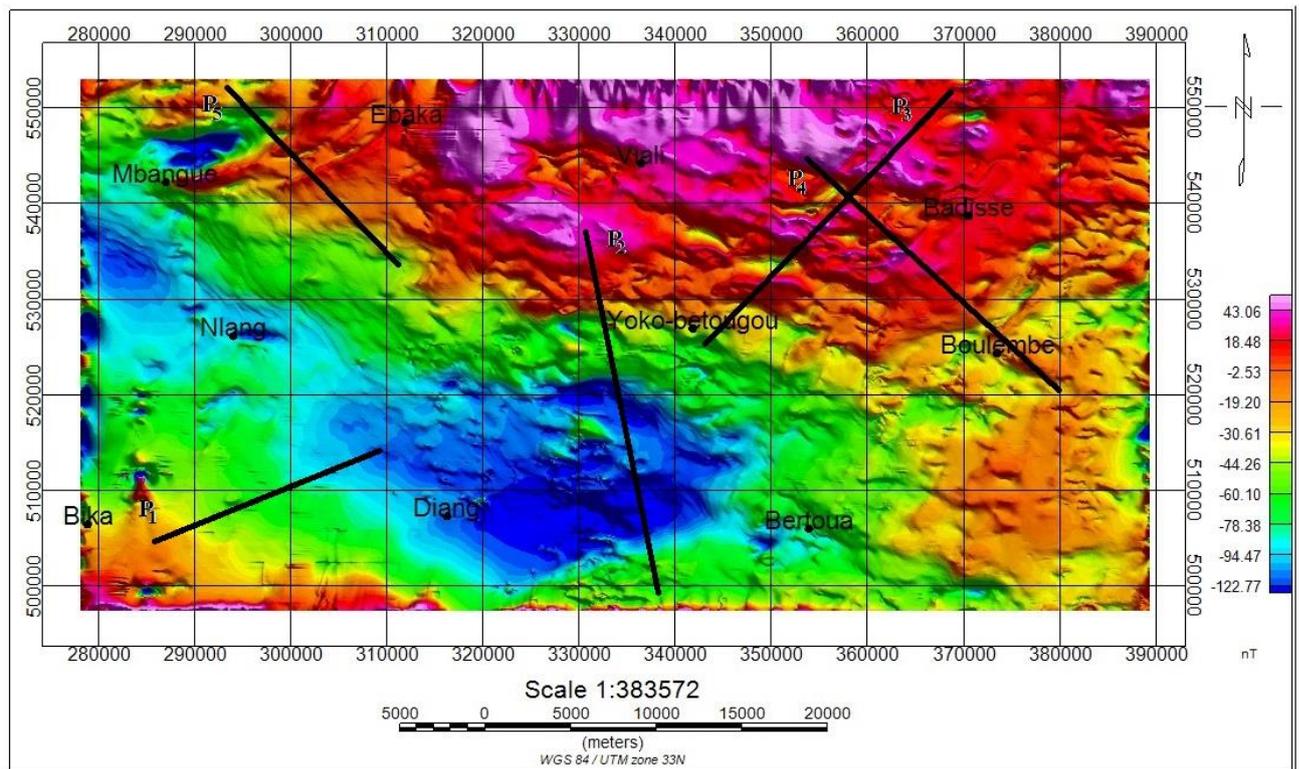


Figure 3.15 Carte du champ magnétique total réduite à l'équateur présentant les profils

1.11.2.1. Analyse du profil magnétique P1

Le profil magnétique P1 (Figure 3.16.a) d'orientation ENE à WSW situé entre Bika et Diang et dont les extrémités sont les points de coordonnées (284667.683481 m ; 503521.871647 m) et (309577.046711 m ; 513826.396501 m), est long d'environ 19 km et est centré sur une zone d'anomalies magnétiques caractérisée par des anomalies de valeurs faibles à élevées.

On observe ici, une nette superposition entre les anomalies calculées et celles mesurées. Le rapprochement du profil P1 avec la géologie montre qu'il traverse successivement du WSW au ENE, les gneiss, les embréchites, les faciès porphyroïdes et les granites. Cette carte montre un modèle structural dans lequel la courbe théorique se superpose à la courbe expérimentale.

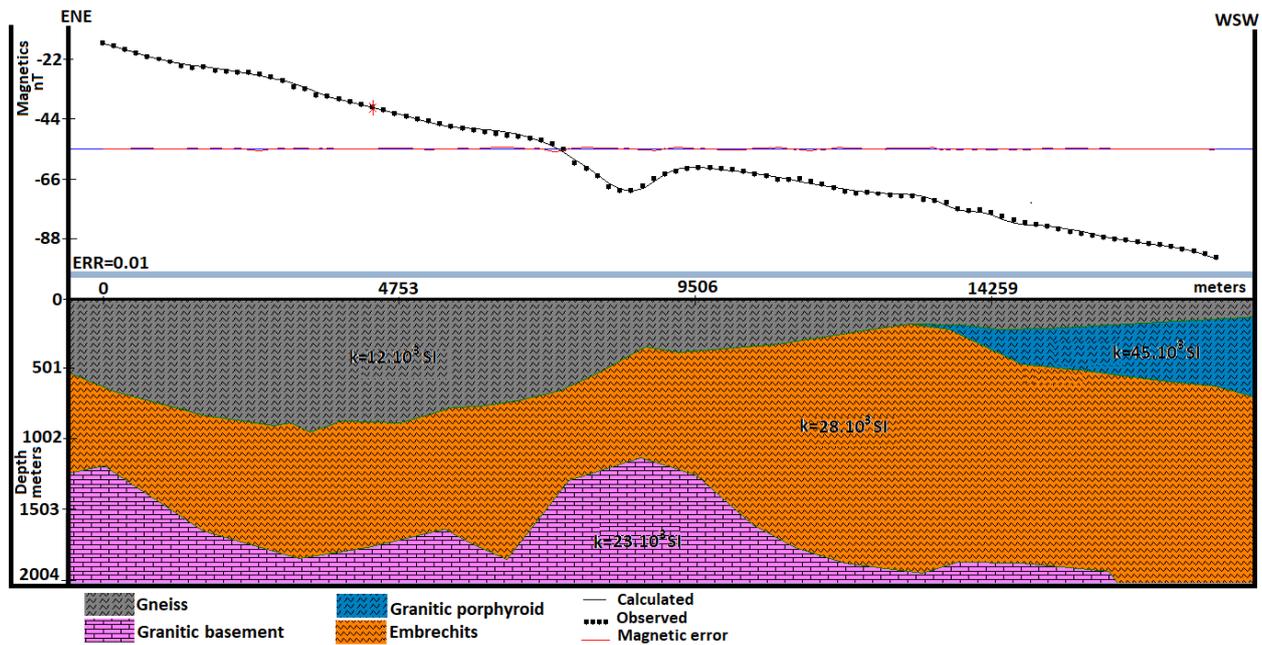


Figure 3.16.a. Modèle 2^{3/4} D du profil magnétique P1

L'analyse du modèle de structure obtenu montre que la zone délimitant le profil est liée à l'effet magnétique des intrusions des gneiss, d'embranchites et de faciès porphyroïdes. Ce modèle comprend un socle granitique ayant une susceptibilité magnétique de $23 \cdot 10^{-3}$ SI. Les intrusions de gneiss, d'embranchites et des faciès porphyroïdes ont des contrastes de susceptibilités respectifs de : $12 \cdot 10^{-3}$ SI, $28 \cdot 10^{-3}$ SI et $45 \cdot 10^{-3}$ SI et sont situées à des profondeurs moyennes respectives de 500m, 300 m et 1800 m. L'analyse du modèle de structure obtenu montre que la zone délimitant le profil est liée à l'effet magnétique des intrusions des gneiss et de micaschistes. Au regard des gammes et valeurs moyennes des susceptibilités magnétiques des roches (Clark & Emerson ; 1990) et en tenant compte de la géologie de la zone, un tel contraste serait attribué aux remontées du socle dans la région au cours de l'orogénèse panafricaine.

1.11.2.2. L'analyse du profil magnétique P2

Le profil magnétique P2 (Figure 3.16.b) d'orientation NNW-SSE situé entre Yoko-Betougou et Bertoua et dont les extrémités sont aux points de coordonnées (330023.820437 m ; 537275.275893 m) et (341342.570178 m ;

498815.86817 m). Il est long d'environ 43 km et est également centré sur des zones d'anomalies magnétiques faibles à élevées.

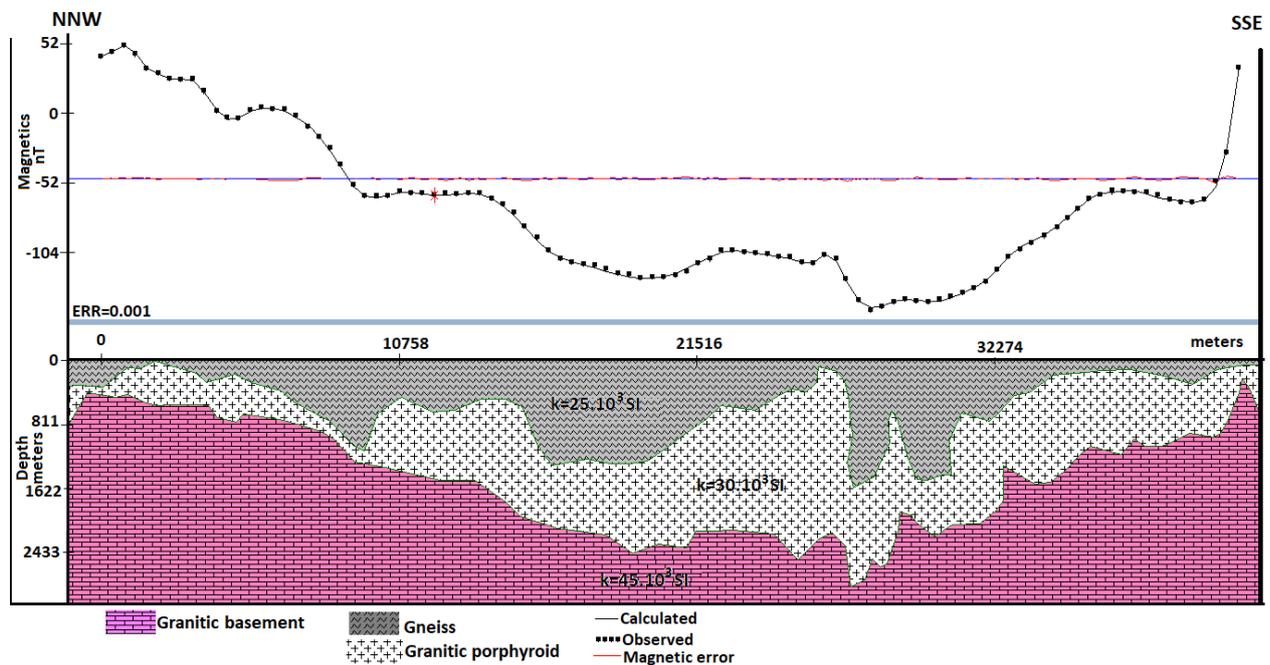


Figure 3.16.b. Modèle $2^{3/4}$ D du profil magnétique P2

On note une nette superposition entre les courbes mesurée et calculée. Le rapprochement du profil P2 avec la géologie montre qu'il traverse successivement du NNW au SSE trois formations géologiques qui sont les gneiss, les faciès porphyroïdes et un socle granitique. La carte ci-dessus montre un modèle structural dans lequel la courbe théorique se superpose à la courbe expérimentale. Ce modèle comprend un socle granitique ayant une susceptibilité magnétique de $45 \cdot 10^{-3} \text{ SI}$. On note des intrusions de gneiss et des faciès porphyroïdes de contraste de susceptibilités respectifs : $25 \cdot 10^{-3} \text{ SI}$ et $30 \cdot 10^{-3} \text{ SI}$, situées à des profondeurs moyennes respectives de 300m et 1000 m. Ce profil présente plusieurs discontinuités marquées par la présence de plusieurs maxima et minima locaux. Celles-ci confirment que le profil est logé sur une zone de transition entre les formations de susceptibilités magnétiques différentes. Au regard des gammes et valeurs moyennes des susceptibilités magnétiques des roches (Clark & Emerson, 1990) et en tenant compte du contexte géologique de la zone d'étude,

ces discontinuités seraient dues aux intrusions des roches suscitées au cours du chevauchement entre le Craton du Congo et la chaîne Panafricaine.

1.11.2.3. L'analyse du Profil magnétique P3

Le profil magnétique P3 (Figure 3.16.c) d'orientation ENE-WSW situé dans les environs de la localité Badisse et dont les extrémités sont les points de coordonnées (368343 m ;551873 m) et (343171 m; 525634 m) est long d'environ 37 km et centré sur une zone d'anomalies élevées. L'erreur assez faible et proche de 0 montre que la modélisation a été bien réalisée sur ce profil. La topographie magnétique le long de ce profil fait ressortir cinq couches notamment avec les granites tectoniques anciens, les granites tectoniques retardés, les gneiss embréchites, séricito-schistes et des sédiments. Le socle ici est granitique. À l'intérieur des différentes couches, on note les intrusions de deux types de corps ayant une réponse magnétique différente. Le moins volumineux présente une forme subcirculaire et est situé vers la fin du profil, alors que le plus dense logé en proche surface autour de 10000 m et de 25000 m de l'origine du profil présente respectivement des formes de marteau aplati et lame. Le modèle 2^{3/4}D dudit profil magnétique montre qu'il traverse un relief magnétique perturbé avec des anomalies magnétiques positives ou négatives.

Le présent profil présente plusieurs discontinuités magnétiques avec la présence de plusieurs extrema locaux. Les valeurs des susceptibilités magnétiques des roches données par ce modèle corréleront bien avec celles présentées dans le tableau de Clark & Emerson (1990). Les corps magnétiques sus-évoqués se retrouvent sur les accidents tectoniques à l'intérieur des formations panafricaines. Ledit domaine est ancien et continental pro-parte, d'âge Paléoprotérozoïque repris au panafricain.

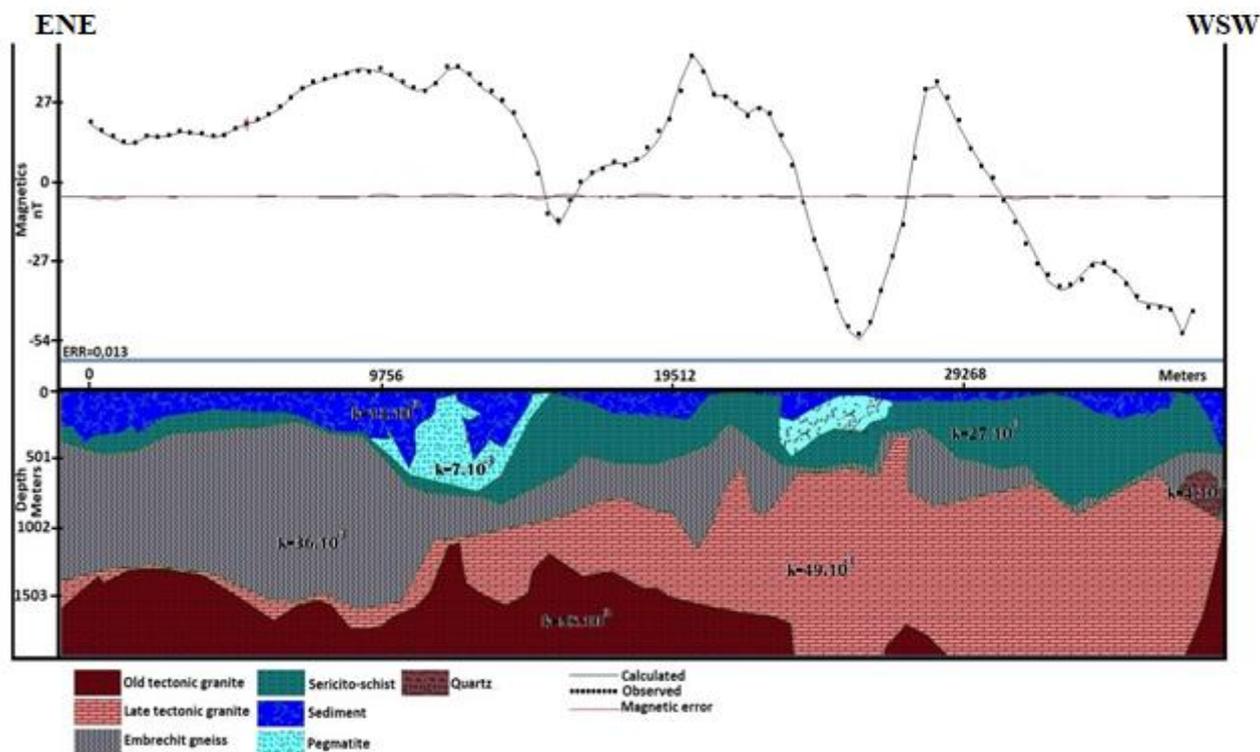


Figure 3.16.c. Modèle 2^{3/4} D du profil magnétique P3

Lesdits corps seraient le résultat des multiples phases de déformation ayant affecté le Panafricain notamment par une tectonique cassante accompagnées de plissements ou de cisaillements (Mvondo et al, 2007).

1.11.2.4. L'analyse du profil magnétique P4

Le profil magnétique P4 (Figure 3.16.d) d'orientation ESE-WNW situé dans les encablures de la localité Badisse et dont les extrémités sont les points de coordonnées (354691 m; 544194m) et (379862 m;520621 m) est long d'environ 34,5 km. Il présente quatre couches constituées des granites tectoniques anciens, des gneiss embréchites, séricito-schistes et des sédiments avec un socle granitique. À l'intérieur des différentes couches, on note les intrusions de trois types de corps ayant une réponse magnétique différente. Ces corps présentent des formes subcirculaires.

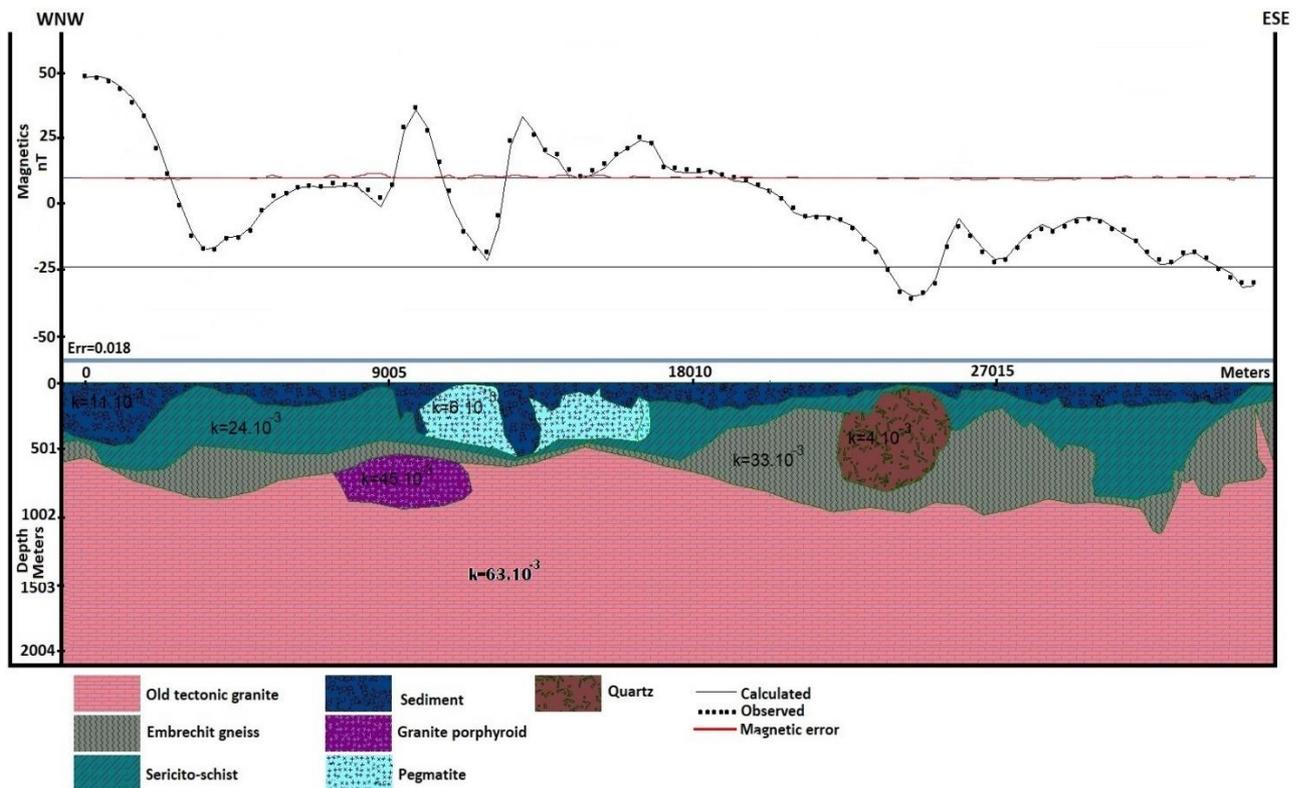


Figure 3.16. d. Modèle 2^{3/4} du profil magnétique P4

Le modèle 2^{3/4} D de ce profil montre qu'il est perturbé par un relief magnétique caractérisé par des anomalies magnétiques positives et négatives. Le profil présente une multitude d'extrema (maxima et minima) qui témoignent qu'il est traversé par plusieurs discontinuités ; parmi lesquelles les corps magnétiques enfouis dans les différentes couches citées plus haut. Ceux-ci se retrouvent sur les accidents tectoniques dans les formations panafricaines. Ce domaine correspond à des structures orogéniques distinctes. Ces accidents seraient le résultat des différentes phases de déformation ayant affecté le Panafricain notamment par une tectonique cassante accompagnée de plissements ou de cisaillements (Mvondo et al, 2007) ; Soit alors d'un métamorphisme de contact ayant eu cours dans la zone d'étude.

1.11.2.5. L'analyse du Profil magnétique P5

Le profil magnétique P5 (Figure 3.16.e) d'orientation ENE-WSW situé dans les environs de la localité Mbangue et dont les extrémités sont les points de

coordonnées (293360 m ;552086 m) et (310959 m; 533528 m) est long d'environ 26 km.

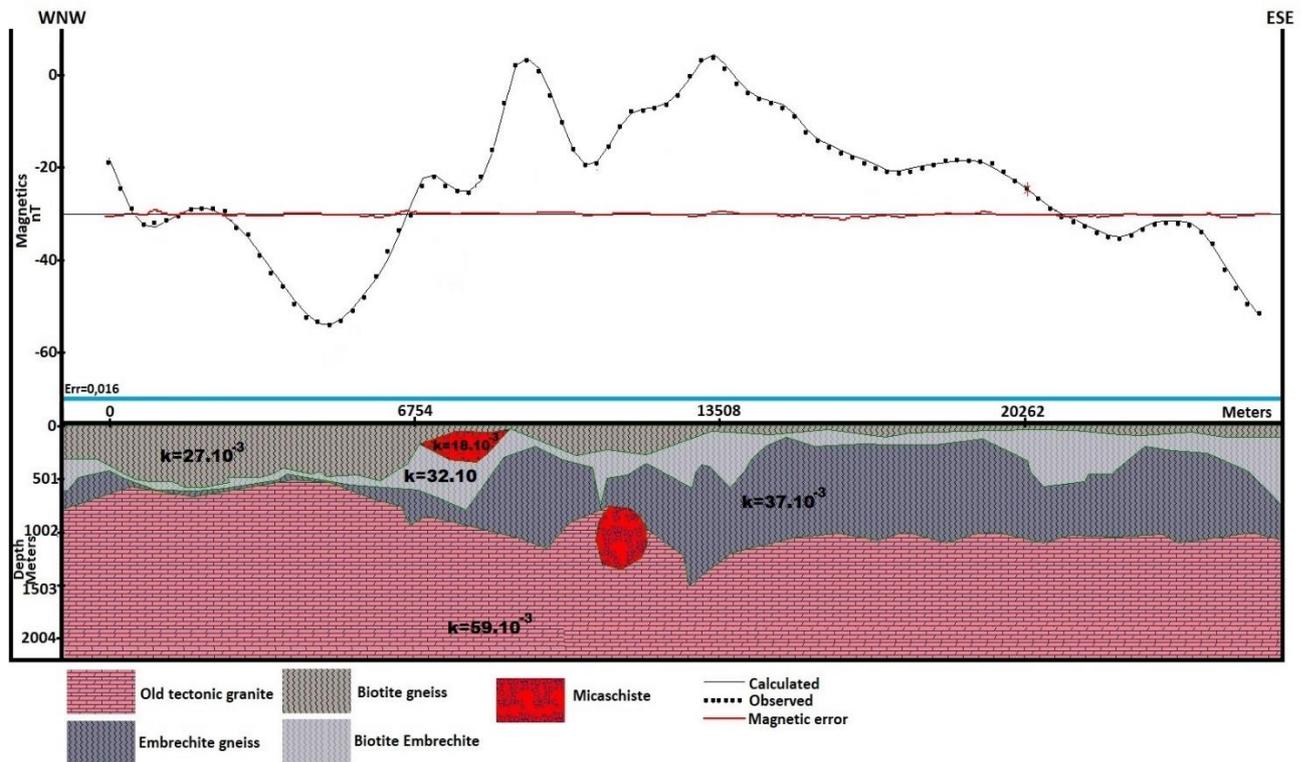


Figure 3.16.e. Modèle 2^{3/4} D du profil magnétique P5

La topographie magnétique le long du profil P3 présente un sous-sol à quatre couches qui sont respectivement des biotites embréchites, des gneiss à biotites, des gneiss embréchites avec un socle granitique et les intrusions de deux corps magnétiques de formes sphérique ou ellipsoïdale de profondeurs, de susceptibilité magnétique différente. Le profil traverse des formations faiblement magnétiques. On observe également la présence de plusieurs extrema qui témoignent de l'existence de plusieurs discontinuités. Les gammes de susceptibilités magnétiques obtenues ici corrélient avec celles évoquées dans le tableau de Clark & Emerson (1990). Les corps sus-évoqués sont logés sur des accidents tectoniques à des profondeurs d'environ 400 m ou même 1000m. Les corps observés sont enfouis dans les granites tectoniques anciens et les gneiss embréchites. Ces corps seraient dus à la subduction du Craton du Congo sur la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale.

2. ANALYSE DES DONNEES GRAVIMETRIQUES

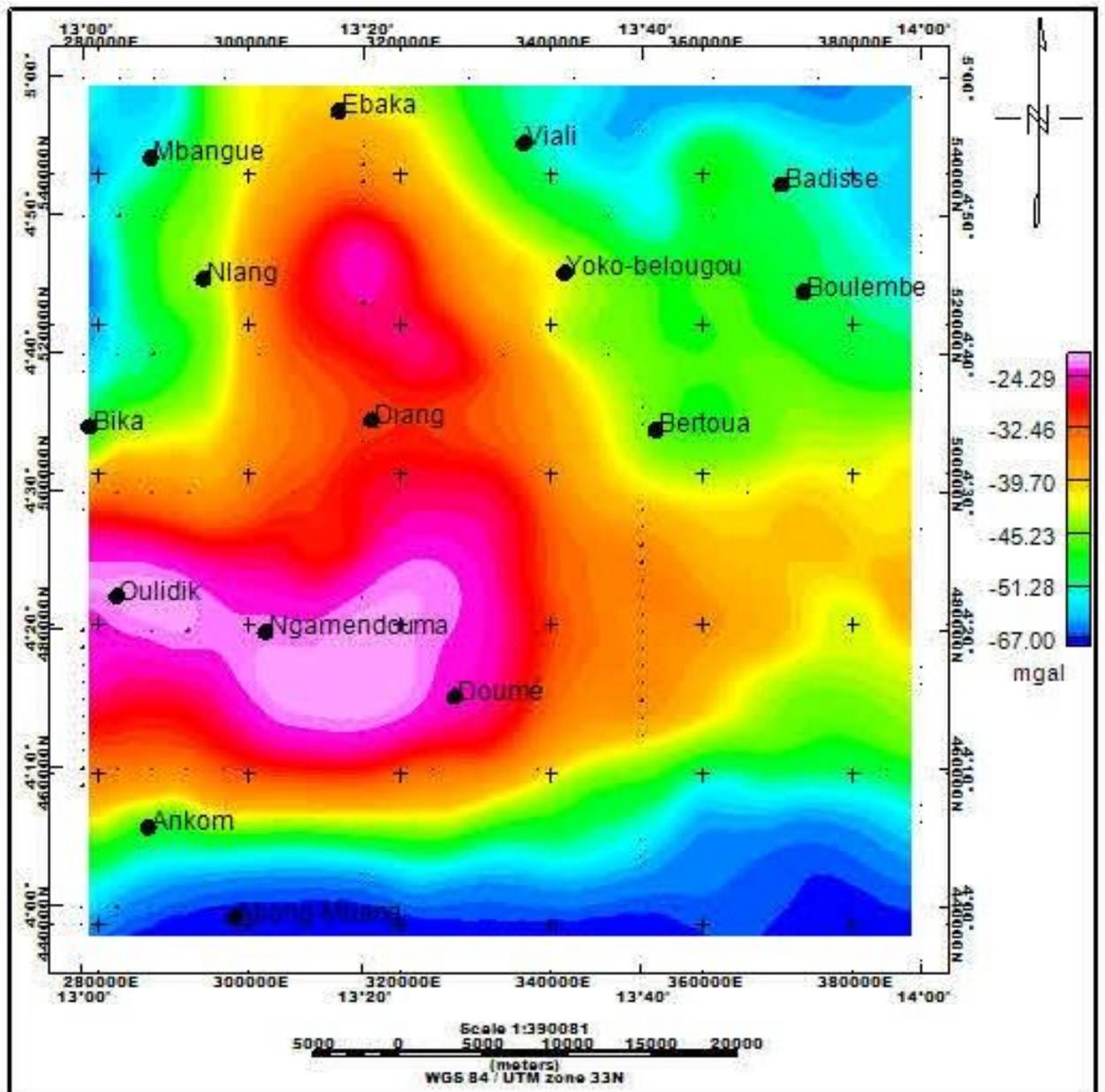
2.1. La carte d'anomalies de Bouguer

Les différentes anomalies gravimétriques mises en évidence sont séparées par des zones à forts gradients ; ce qui indique la présence de discontinuités de densité matérialisant généralement des accidents tectoniques (Diab, 2016).

La carte ci-dessous (Figure 3.17) est celle des anomalies de Bouguer obtenues avec les données EGM 2008. Elle présente plusieurs formes d'anomalies. Cette carte est caractérisée par une anomalie lourde (de valeur supérieure à la moyenne des anomalies soit -32 mGal) qui couvre la partie Sud-Ouest et Centre (de Oulidik vers Doumé) avec un démembrement vers le Nord de Diang. Cette anomalie a une direction E-W à ESE-WNW dans la partie Ouest-Centre et une direction N-S vers Diang. Elle a une grande longueur d'onde et semble présenter une forme de cuvette dans la partie Sud-Ouest, alors que dans la partie Nord elle présente une forme ellipsoïdale. Cette zone d'anomalies lourdes indique évidemment la présence dans le sous-sol des matériaux à forte densité tels que les granulites. Cette anomalie représenterait la signature gravimétrique d'une faille dans la zone d'étude, laquelle semble être parallèle à celles observées à l'échelle régionale et serait la conséquence des failles ayant jouées en zones de cisaillement à la fin du Panafricain, puis au Crétacé.

- Elle est séparée au Nord-Ouest (Est de Mbangue) par une anomalie légère marquée par des valeurs très faibles et inférieures à -51 mGal. Celle-ci semble être allongée et présente une direction N-S. La nette variation des gradients amène à penser à un contact géologique entre plusieurs formations géologiques. Cette anomalie gravimétrique semble avoir un lien avec la discontinuité mise en évidence dans les travaux de Owono et al. (2019).

-



- **Figure 3.17. Carte des anomalies de Bouguer**

- La partie Nord-Est (la zone allant de Viali à Badissé) est aussi constituée d'anomalies légères inférieures à -51 mGals ; elle est séparée de l'anomalie lourde citée plus haut par des anomalies intermédiaires. Sa direction semble être E-W. Cette anomalie correspondrait à un épaissement local des structures engendrées par des dépressions du socle granitique.
- La partie centrale de la carte (partie Sud de Bertoua) est constituée des anomalies moyennes dont les valeurs sont comprises entre -32 mGals et -

45 mGals. Cette anomalie est la continuité de l'anomalie lourde précédente et subirait les répercussions des failles observées dans le Panafricain.

- Toute la partie Sud est caractérisée par une anomalie légère de valeurs inférieures à -51 mGals. Elle semble être subcirculaire et orientée E-W. Cette anomalie traduirait l'effet des formations qui bordent le Craton du Congo.

La succession anomalies positives-anomalies négatives observée, permet de supposer des accidents et/ou des contacts francs entre des unités lithologiques qui semblent être indépendantes les unes des autres.

2.2. Les cartes d'anomalies de Bouguer prolongées à plusieurs altitudes

Le prolongement vers le haut permet l'atténuation des grandes fréquences correspondant aux courtes longueurs d'ondes associées aux structures superficielles en amplifiant les anomalies de grande longueur d'onde correspondant aux structures profondes du socle.

Ces différentes cartes ressemblent (Figure 3.18. a, b, c) à la carte des anomalies de Bouguer décrite précédemment, mais avec une considérable atténuation des anomalies d'amplitude liées aux structures superficielles observées dans les zones de Badissé et Mbangue. L'anomalie lourde précédemment décrite s'est bien amplifiée, preuve qu'elle est liée aux structures profondes ; elle semble avoir une extension de direction E-W à ENE-WSW ou E-W à N-S ; de même l'anomalie légère observée au Sud de la zone d'étude reste bien perceptible, confirmant qu'elle est due à une source profonde, qui semble avoir une orientation E-W à ENE-WSW.

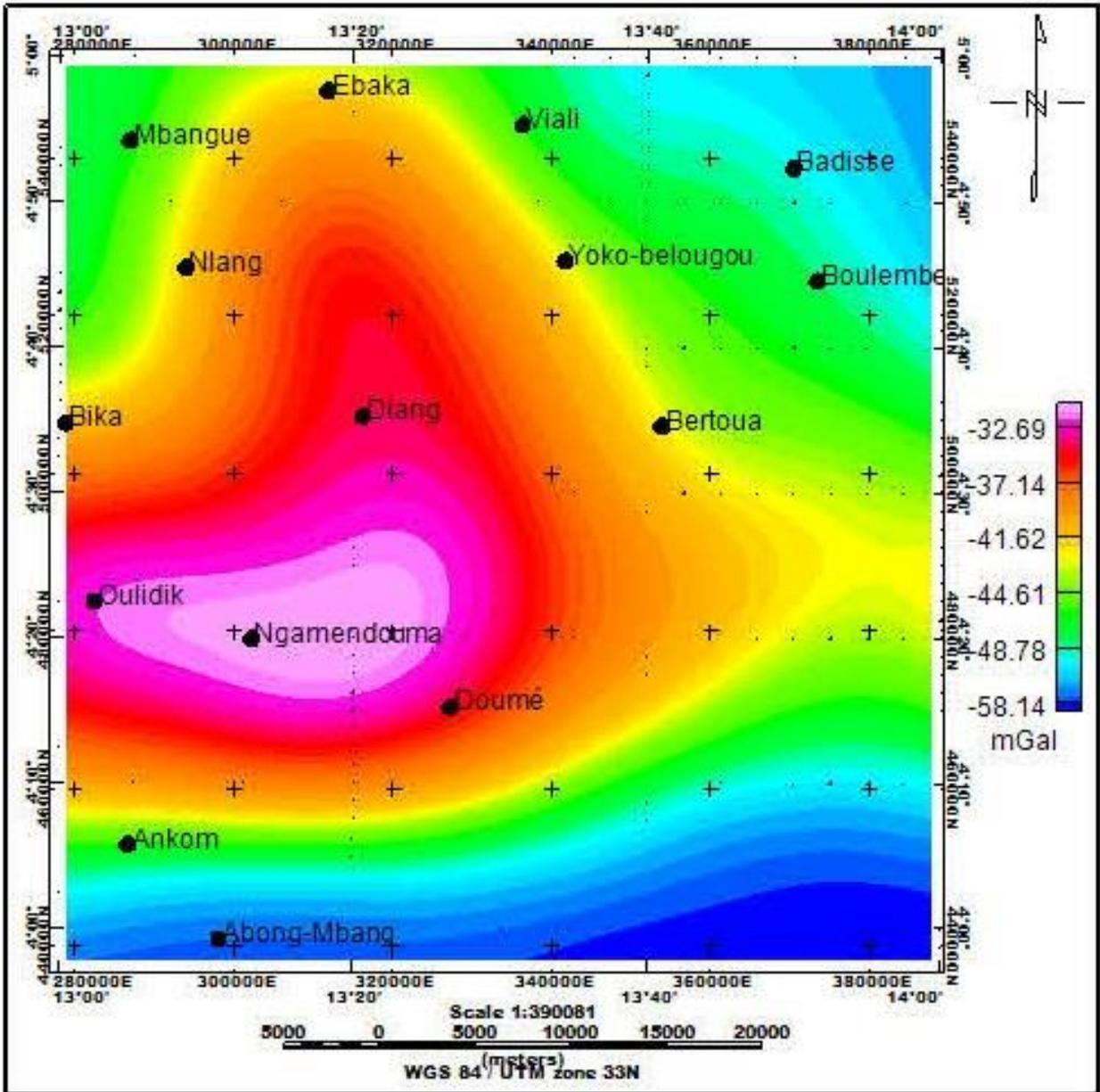


Figure 3.18.a. Carte prolongée à 10 km

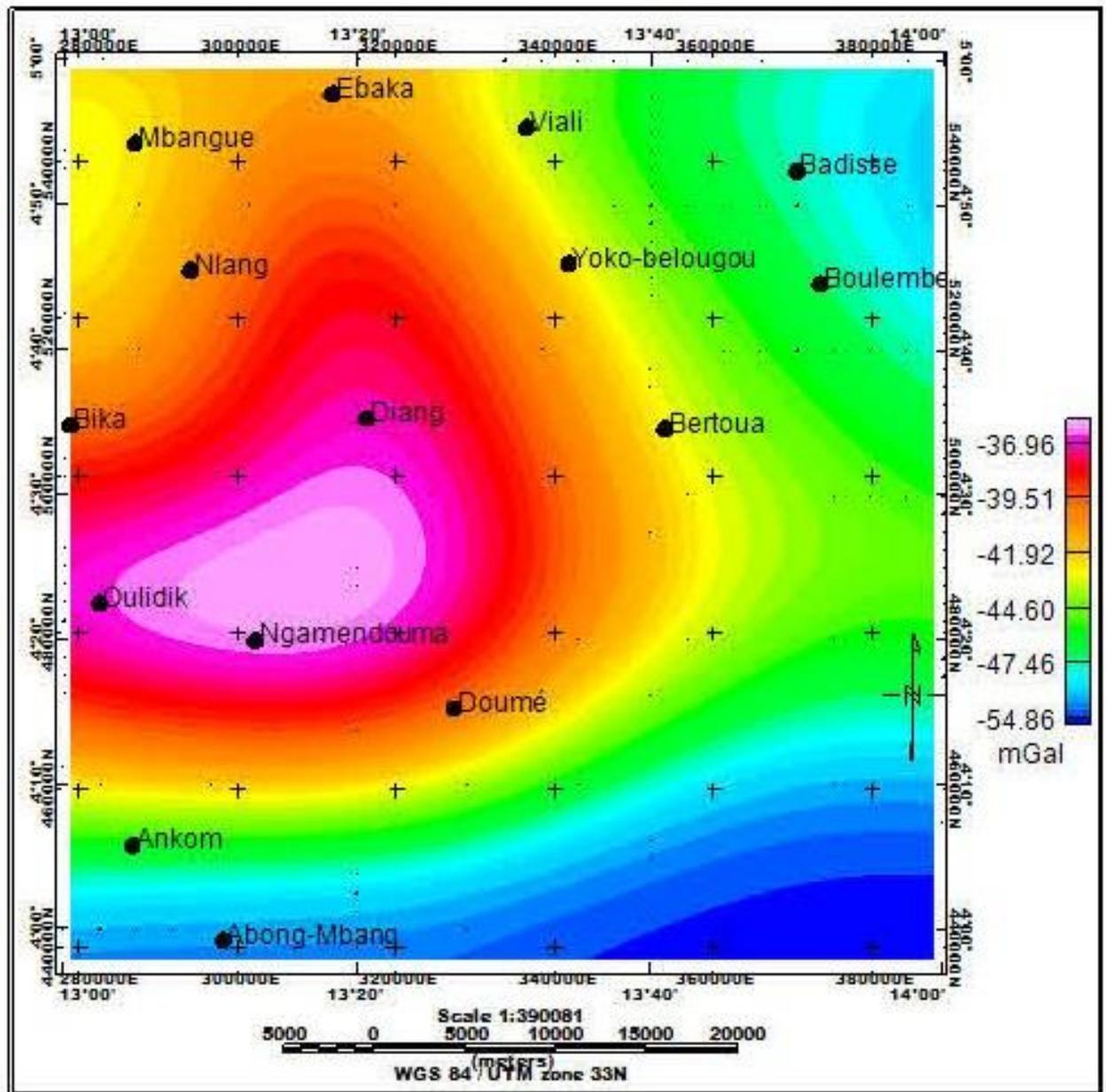


Figure 3.18.b. Carte Bouguer prolongée à 20 km

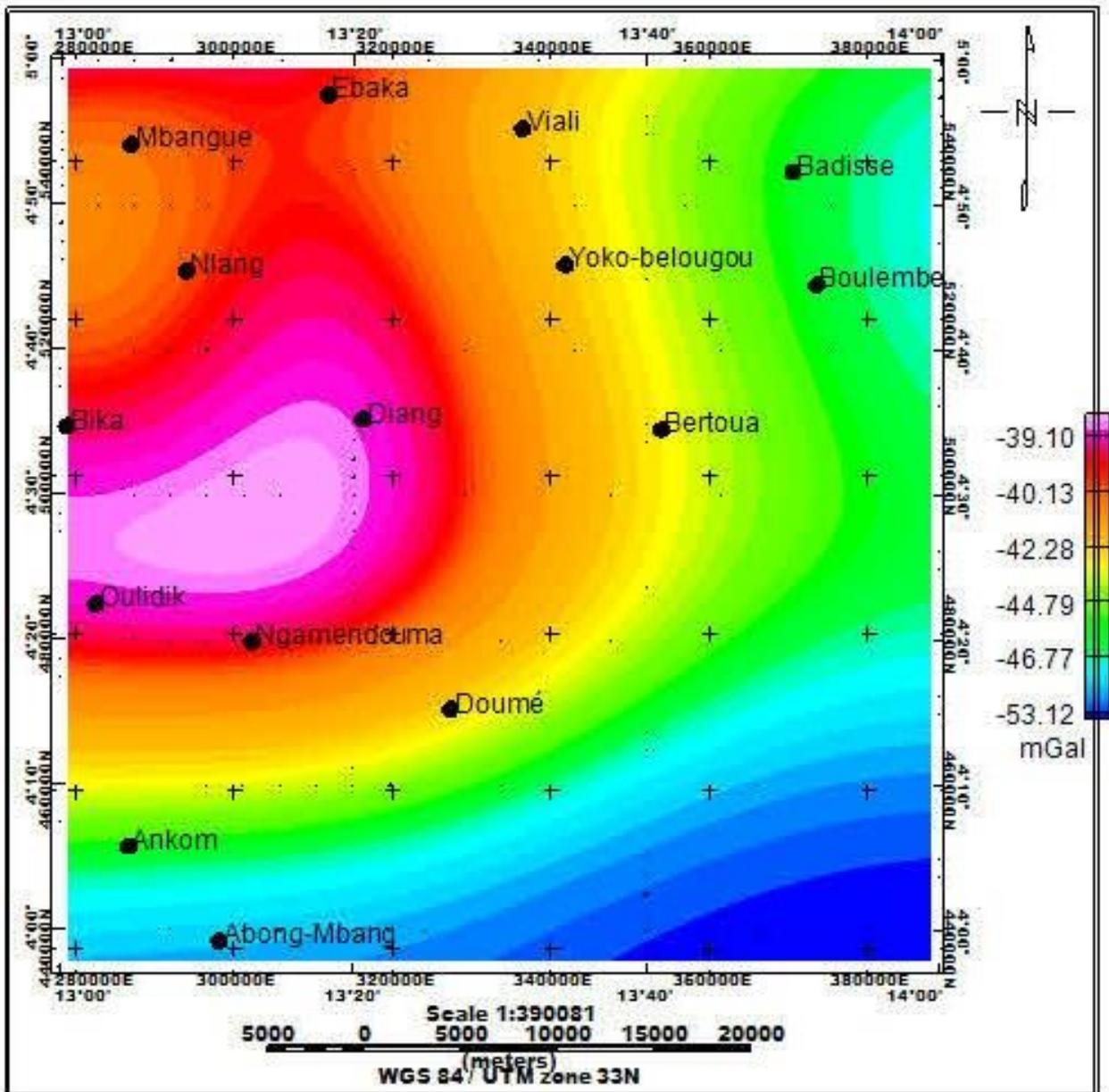


Figure 3.18.c. Carte de Bouguer prolongée à 30 km

2.3. Les gradients horizontaux directionnels

2.3. 1. La carte du gradient horizontal suivant la direction X

La carte de la dérivée en X (Figure 3.19) est utilisée pour mettre en évidence les contacts lithologiques, structuraux et les accidents tectoniques dans la direction perpendiculaire à l'axe (Ox) c'est-à-dire Nord-Sud. Ainsi, on observe des anomalies qui s'individualisent bien. Notamment, celle qui part de Doumé à Oulidik en suivant la direction ESE-WNW et celle qui borde les zones de Diang-

Nlang. De même à l'Ouest de Badissé on note aussi la présence d'une anomalie à fort gradient. Les anomalies à forts gradients ci-dessus citées présentent des formes circulaires, elles seraient en relation avec des intrusions de matériaux à forte densité.

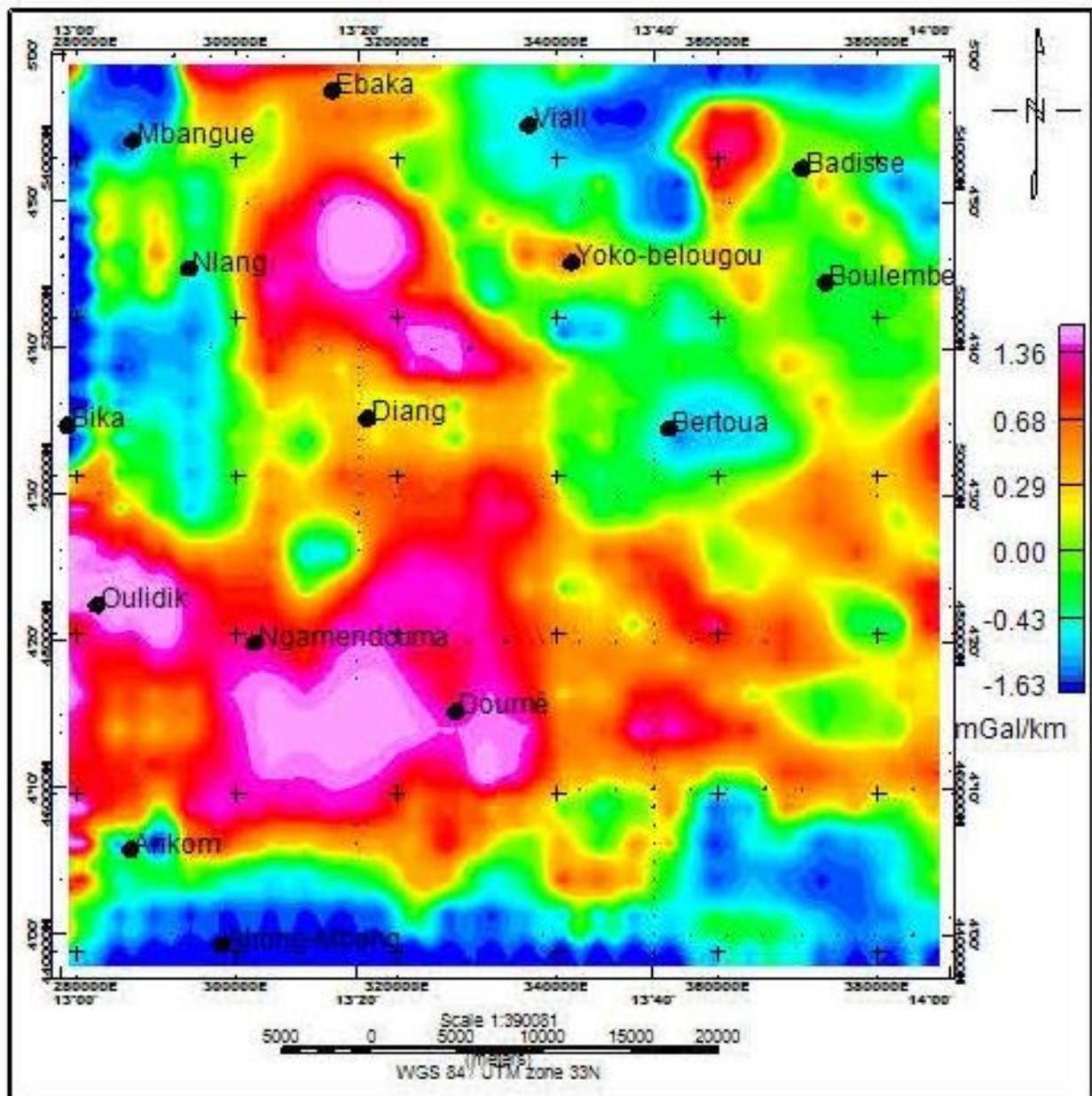


Figure 3.19. Carte du gradient horizontal suivant la direction X

La zone Sud, la zone de Viali et l'Est de Mbangue s'illustrent ici avec des anomalies à faibles gradients.

2.3.2. La carte du gradient horizontal suivant la direction Y

La carte de la dérivée horizontale suivant Y (Figure 3.20) met en évidence des contacts de direction E-W dans le plan horizontal.

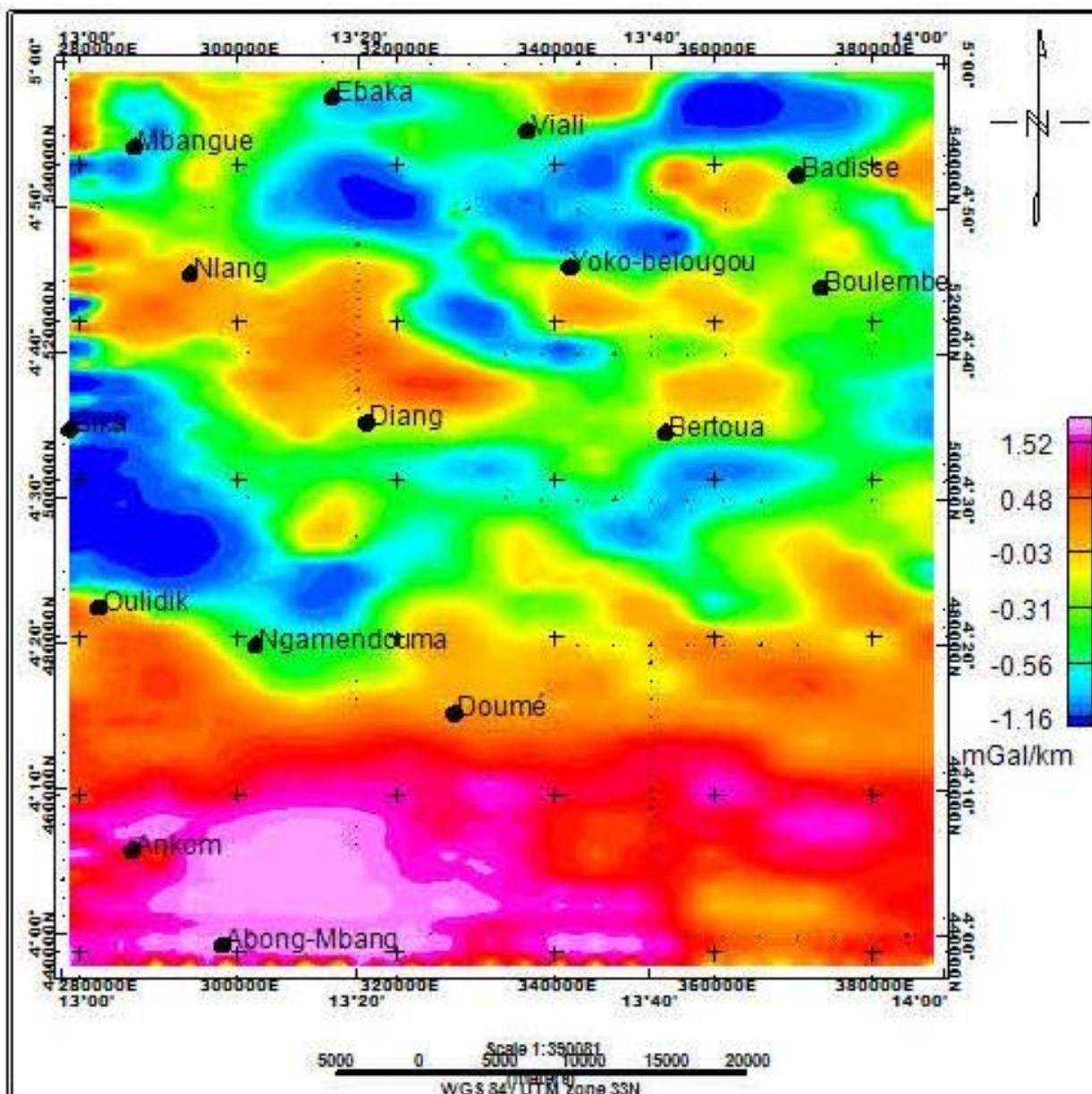


Figure 3.20. Carte du gradient horizontal suivant la direction Y

Elle a relevé que la zone Sud est constituée d'anomalies à fort gradient. Les zones Oulidik, l'axe Nlang-Viali et Ebaka Bertoua sont quant à elles caractérisées par de faibles gradients. Les anomalies négatives suivent les directions ESE-WNW, ENE-WSW et E-W. Ces directions sont bien reconnues dans la zone

d'étude par les filtres précédents et sont perpendiculaires aux accidents tectoniques reconnus à l'échelle régionale.

2.4. La carte du gradient vertical

La dérivée verticale permet de rehausser les traits des structures superficielles en amplifiant les anomalies de courtes longueurs d'ondes et en atténuant l'effet des anomalies de grandes longueurs d'ondes (basse fréquence). Ce filtre montre une séparation latérale des anomalies et une amplification de l'effet gravimétrique des contrastes de densité superficielle au détriment des contrastes de profondeur.

La carte ci-après (Figure 3.21) montre des anomalies de l'axe Oulidik-Doumé qui s'individualisent de l'Est vers le Centre et se caractérisent par un gradient vertical positif supérieur à 1,36 mGal/km. Elles suivent la direction ESE-WNW. On note aussi dans la même zone l'anomalie à gradient positif qui traverse l'axe Ankom-Ngamendouma en suivant la direction ENE-WSW. Cette zone d'anomalie serait due à une remontée de masse dense qui a été observée sur la carte des anomalies de Bouguer. De même au Nord de Diang, on observe une anomalie à gradient supérieur à 1,36 mGal/km de direction ESE-WNW, direction reconnue par les structures du plateau de l'Adamaoua et suivie par les lignes tectoniques observées dans la carte géologique de la zone d'étude. La zone située entre Viali et Badissé au Nord est aussi parcourue par une anomalie de même type.

La partie Sud est constituée d'une anomalie à très faible gradient (moins de -1,63 mGal/km) de direction E-W caractérisant la présence des structures faiblement denses, qui sont en concordance avec les résultats obtenus dans la carte des anomalies de Bouguer. La zone de Mbangue présente aussi une anomalie ayant un gradient très faible (moins de -1,63 mGal/km) suivant la direction NE-SW. Cela pourrait avoir un lien avec le passage du fleuve Sanaga dans cette zone.

La dépression observée dans la zone de Viali dans la carte des anomalies de Bouguer est bien individualisée dans la présente carte. Elle suit la direction ENE-WSW.

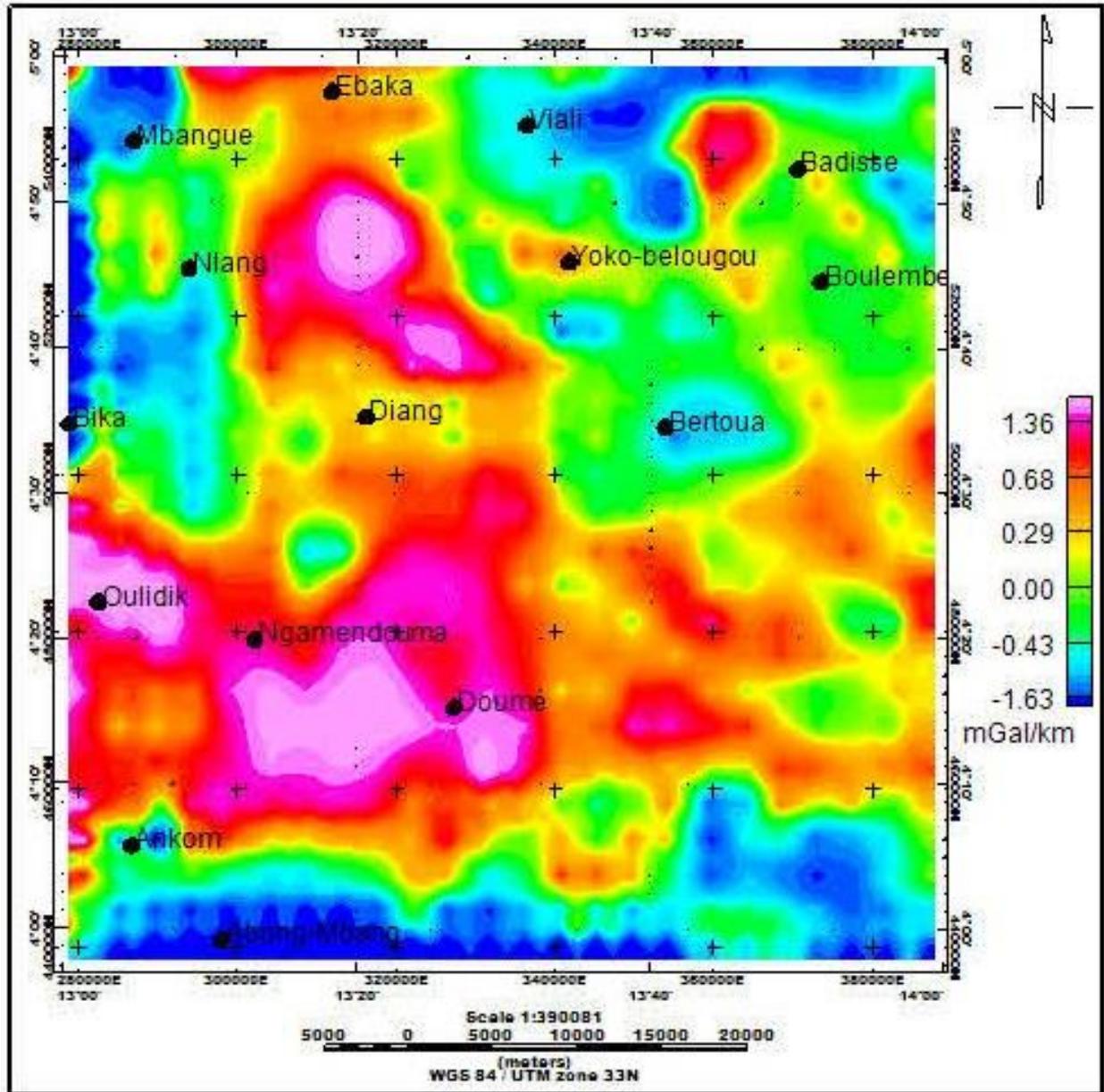


Figure 3.21. Carte du gradient vertical

De plus cette carte met en évidence deux grands couloirs constitués d'anomalie à gradients positifs de directions sub-verticale et subhorizontale qui passent presque par le centre de la zone d'étude. Ces anomalies pourraient traduire

la transition entre les deux principales unités à savoir le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale.

2.5. La carte du signal analytique

Le signal analytique est une transformation qui permet de mettre en évidence des anomalies peu profondes. Il met en relief les grandes directions tectoniques et permet de limiter les contacts entre les formations géologiques par leur contraste de densité et d'exposer les corps intrusifs (Ndougsa-Mbarga et al., 2012).

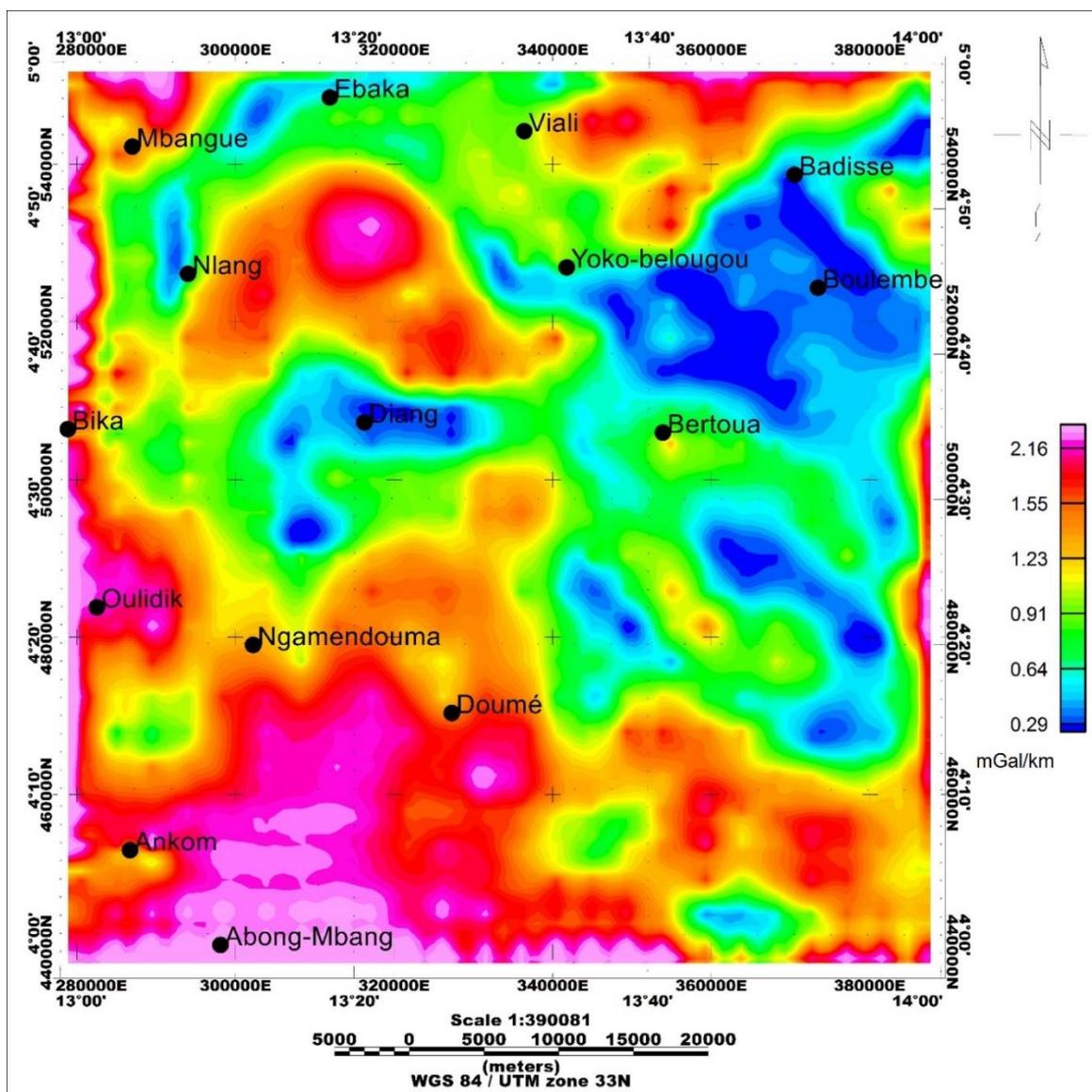


Figure 3.22. Carte du signal analytique

La carte du signal analytique ci-dessus (Figure 3.22) fait ressortir trois secteurs importants à forts gradients, notamment le secteur Sud-Ouest (les localités Oulidick, Ankom, Abong-Mbang, Doumé), ceux de Nlang et de Viali.

Le secteur Sud-Ouest présente une direction E-W à ENE-WSW, caractéristique des anomalies régionales. Les zones magnétiques Vilali-Nlang sont séparés par des anomalies à gradients intermédiaires, elles ont une direction ENE-WSW. On a l'impression qu'elles formaient un seul et même bloc qui aurait été séparé par un évènement tectonique d'âge panafricain.

2.6. La carte de l'angle d'inclinaison

La carte de la Figure 3.23 est celle de l'anomalie de l'angle d'inclinaison, qui souligne les linéaments sécants et les dykes. On observe bien les orientations des structures évoquées dans les cartes précédentes, ce qui vient seulement confirmer les résultats émis plus haut.

La faille Oulidik-Doumé ressort toujours, de même que les anomalies régionales d'orientation E-W et N-S qui ont été identifiées sur la carte du gradient vertical, preuve que ces anomalies représenteraient des accidents géologiques à caractère régional associés probablement à la subduction du Panafricain dans le Craton Congolais.

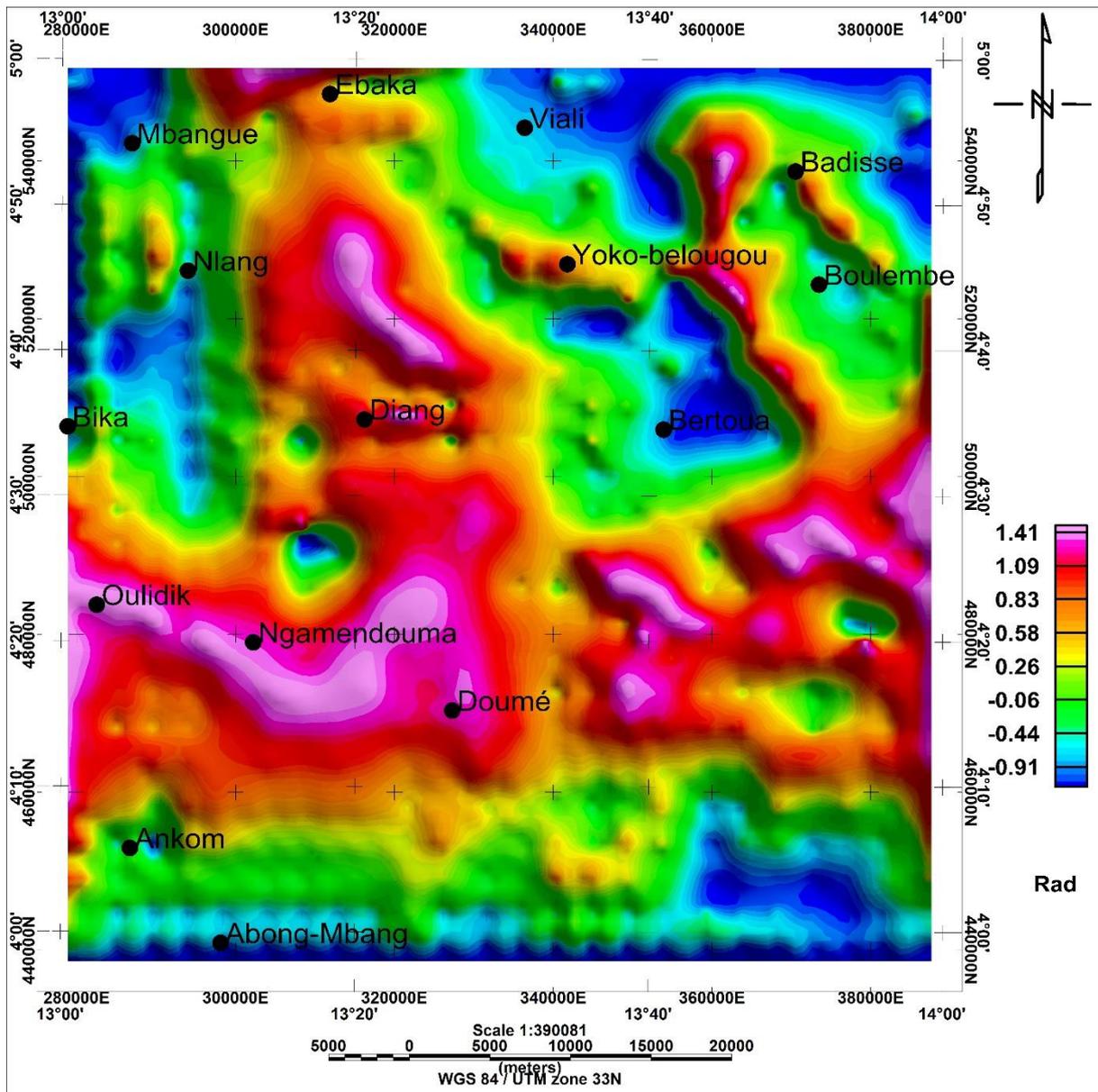


Figure 3.23. Carte d'anomalies de l'angle d'inclinaison

2.7. La séparation polynomiale régionale-résiduelle

Les cartes d'anomalies régionales et résiduelles sont obtenues à partir de la carte des anomalies de Bouguer. Si le retrait de la régionale est analogue aux opérations de filtrage, la solution n'est cependant pas aussi simple que le fait d'appliquer un filtre aux anomalies pour enlever les faibles fréquences. En général, il est plus réaliste de considérer les anomalies résiduelles comme du bruit et extraire la régionale (Poudjom, 1993).

Ainsi, le choix de la régionale est fonction d'une connaissance a priori de la géologie de la région, mais aussi des anomalies dont on veut rendre compte. La meilleure définition de la régionale est qu'elle correspond aux effets des masses qu'on ne veut pas interpréter. La résiduelle, dans ce cas, correspond aux anomalies dont on désire connaître les sources (Poudjom, 1993).

2.7.1. Les cartes régionales

Pour obtenir les anomalies régionales, un ajustement des données de la carte des anomalies de Bouguer à une surface polynomiale d'ordre n a été appliqué. Cet ajustement a été réalisé par le biais de la méthode des moindres carrés. Dans ce travail, c'est ce programme de séparation polynomiale élaboré par Radhakrishna et Krishnamacharyulu (1990) qui a été utilisé.

Le choix de la surface régionale est effectué sur la base du modèle lithosphérique de Poudjom (1993). Pour ce faire, nous avons initialement établi les cartes d'anomalies régionales pour différents degrés du polynôme ($n= 2, 3, 4, 5, 6, 7$ et 8). La régionale de degré 1 a été d'emblée éliminée pour la simple raison qu'au Sud de l'Adamaoua, les couches profondes présentent une structuration consécutive à l'amincissement lithosphérique conjugué à la remontée du Moho.

La surface représentant la régionale doit donc présenter une courbure, puisqu'elle doit au moins rendre compte de l'allure du Moho. Cette contrainte suggère un polynôme de degré $n \geq 2$. Les cartes d'anomalies régionales retenues sont celles présentant la meilleure ressemblance avec la Bouguer prolongée vers le haut à l'altitude optimale. Dans le cadre de ce travail, les cartes régionales d'ordre 5 et 6 ont été retenues.

Les cartes des figures (Figure 3.24 a & b) représentent, des cartes régionales des anomalies de Bouguer respectivement aux ordres 5 et 6. Elles ont la même allure que les cartes des anomalies de Bouguer prolongées vers le haut à 10 ou à 20 km. Les anomalies liées aux structures superficielles et de courtes longueurs

d'onde ont été suffisamment affinées. Seulement l'anomalie légère de l'Est de Mbangue reste toujours perceptible et n'est pas suffisamment affinée.

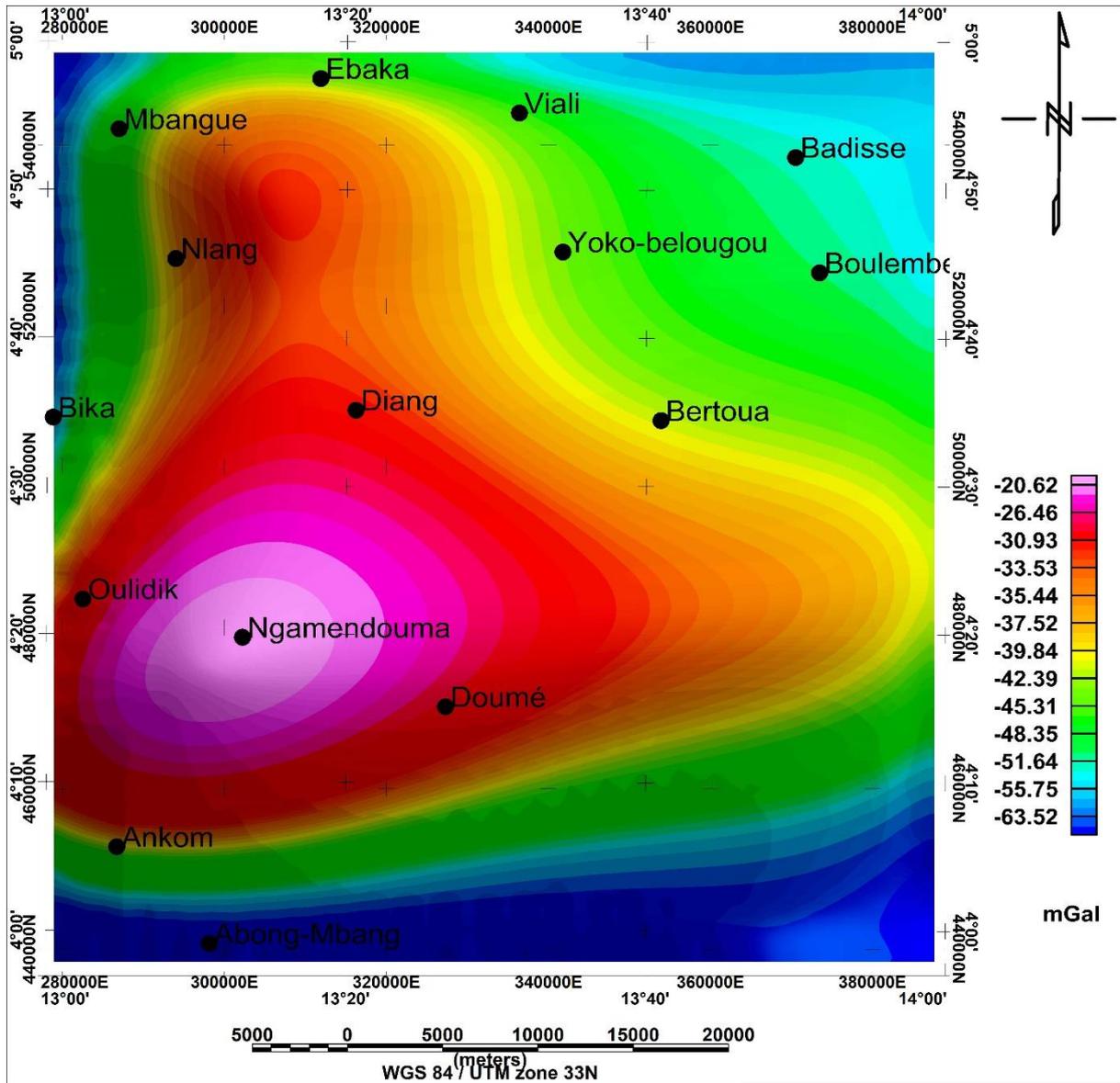


Figure 3.24.a. Carte de régionale d'ordre 5

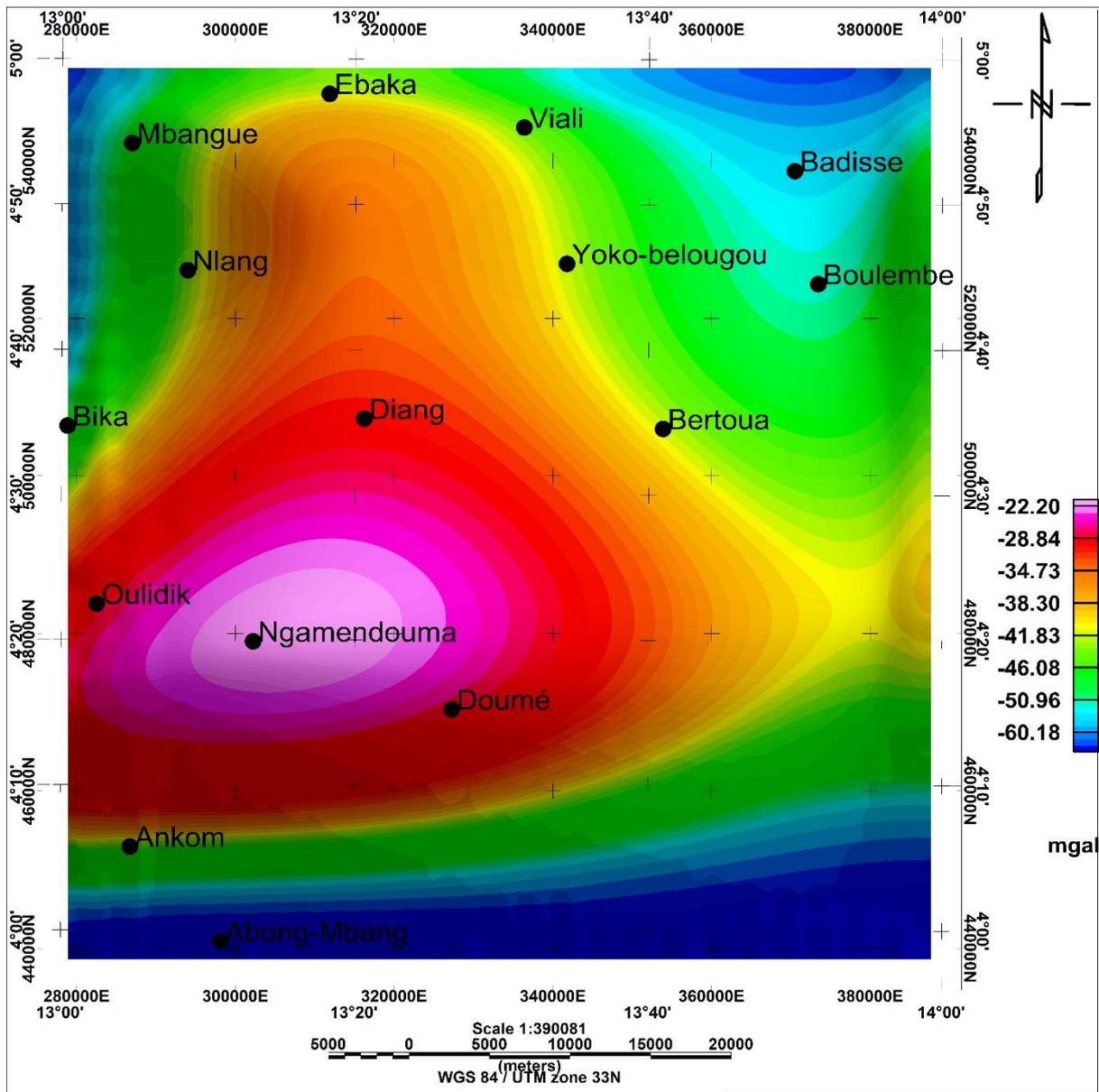


Figure 3.24. b. Carte régionale d'ordre 6

En l'absence d'hétérogénéités intra-crustales, l'anomalie de Bouguer peut être considérée comme la résultante d'anomalies dues principalement à trois discontinuités de densité situées à des profondeurs distinctes : le Moho (croûte/manteau), la discontinuité de Conrad (croûte supérieure /croûte inférieure) et la base de la partie superficielle de la croûte, ou toit du socle.

2.7.2. Les cartes résiduelles

L'anomalie résiduelle en chaque nœud de la grille régulière est calculée en faisant la différence entre l'anomalie de Bouguer et l'anomalie régionale. Les

anomalies résiduelles obtenues ici représentent l'effet des masses perturbatrices superficielles. Elles représentent les variations de densité au niveau de la croûte supérieure et les contrastes de densité induits par les corps intrusifs.

Les cartes (Figure 3.25. a & b) sont les cartes résiduelles d'ordre 5 et 6 respectivement. Les anomalies observées ici sont similaires sur toutes les cartes résiduelles.

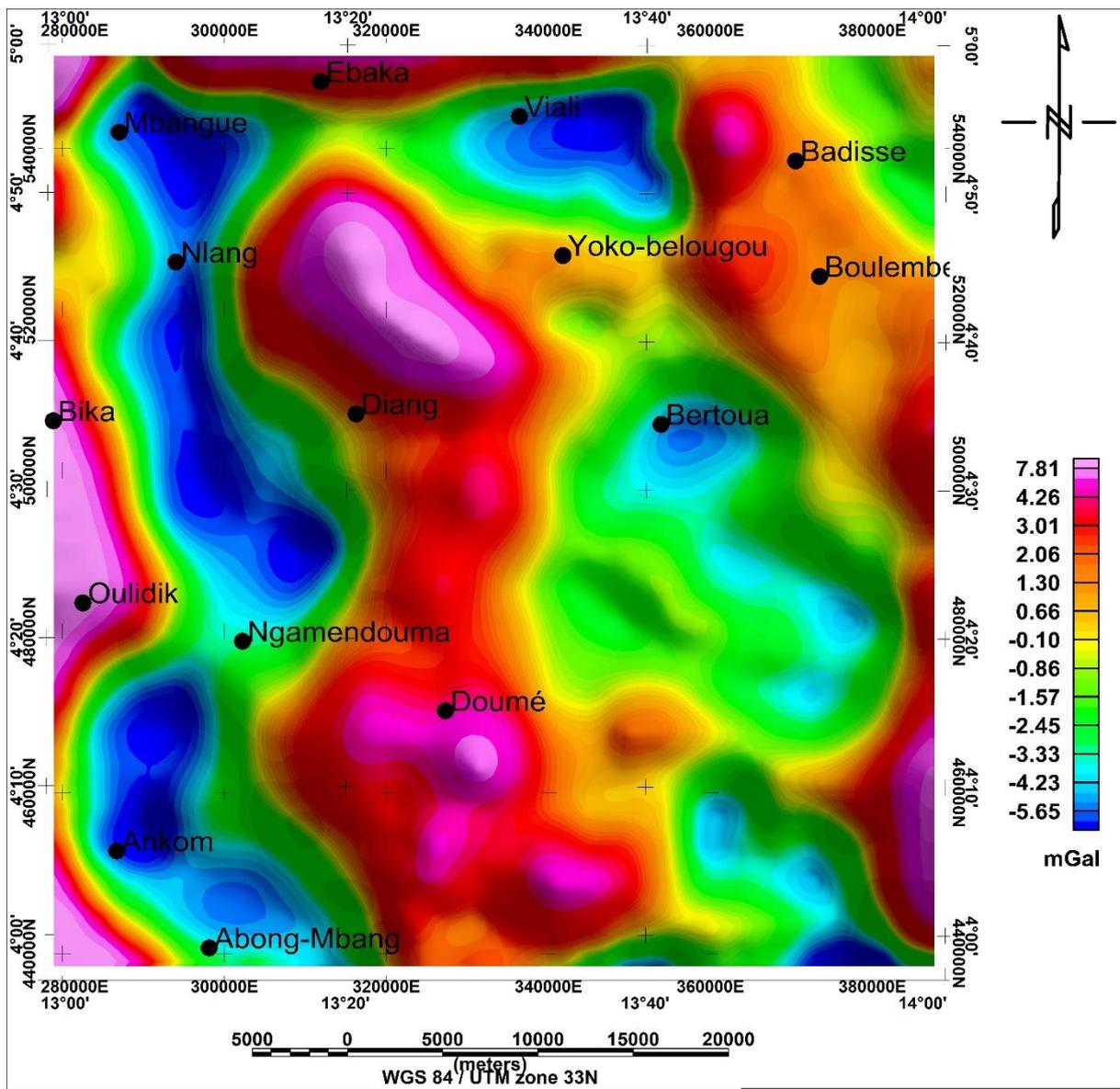


Figure 3.25.a. Carte résiduelle des anomalies de Bouguer d'ordre 5

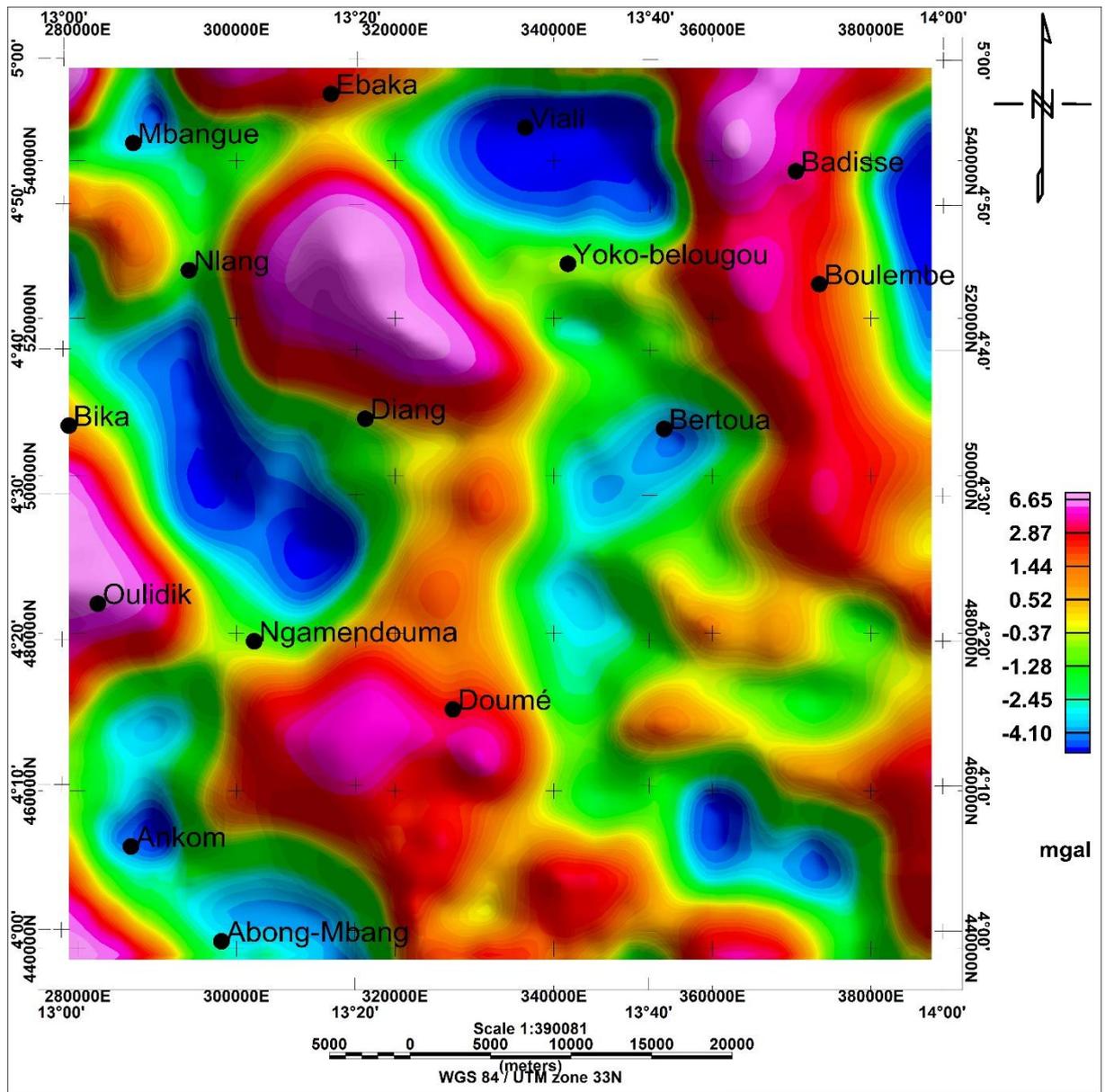


Figure 3.25.b. Carte résiduelle d'ordre 6

On observe ici des anomalies positives sur les axes Doumé-Diang et Boulembe-Badissé. Ces anomalies sont interprétées comme des remontées du socle panafricain. Les anomalies négatives quant à elles sont sur les axes Ankom-Mbangué et Bertoua-Viali. Ces anomalies seraient situées sur des formations géologiques de faible densité. L'orientation de ces différentes anomalies permet d'identifier les directions structurales majeures de la région d'étude. On a notamment la direction N-S à NW-SE qui est bien reconnue à l'échelle régionale

et aussi parallèle à la direction des lignes tectoniques mises en évidence par Gazel (1955), Gazel & Gérard (1954).

On observe des anomalies positives sur les axes Doumé-Diang et Boulembe-Badissé. Ces anomalies sont interprétées comme des remontées du socle Panafricain. Les anomalies négatives quant à elles sont sur les axes Ankom-Mbangue et Bertoua-Viali. Ces anomalies seraient situées sur des formations géologiques de faible densité. L'orientation de ces différentes anomalies permet d'identifier les directions structurales majeures de la zone d'étude. On a la direction N-S à NW-SE qui est bien reconnue à l'échelle régionale et aussi parallèle à la direction des lignes tectoniques mises en évidence par Gazel (1955), Gazel & Gérard (1954).

2.8. L'analyse multi-échelle des maxima des gradients horizontaux

2.8.1. La carte du gradient horizontal total

La carte ci-contre (Figure 3.26) met en évidence des zones de gradients avec des amplitudes et des formes variées, dominées par les directions ESE-WNW, ENE-WSW, E-W, N-S. On distingue des zones de gradients correspondants aux structures et types contact/failles et celles correspondantes à la présence des structures intrusives.

Les anomalies de forts gradients de Nlang et Mbangue orientées N-S, ayant des formes allongées et de courtes longueurs d'onde traduiraient la présence des contacts gravimétriques à ces endroits et auraient un lien avec le passage du fleuve Sanaga. La zone séparant Viali à Badissé au Nord, présente une anomalie à fort gradient qui peut être interprétée comme une intrusion de matériau.

La partie Sud (la zone Ankom/Abong-Mbang) est, constituée des anomalies à fort gradient, de forme circulaire qui traduiraient la présence d'une intrusion de matériau dans le socle. Celle-ci serait liée au broyage des structures dans le socle

pendant les mouvements tectoniques intenses observés lors de la transition du Panafricain sur le Craton Congolais.

L'anomalie de l'axe Oulidik-Doumé évoquée dans la carte des anomalies de Bouguer est aussi individualisée ici, mais avec un faible gradient. Elle suit bien la direction ESE-WNW. Elle serait un contact gravimétrique.

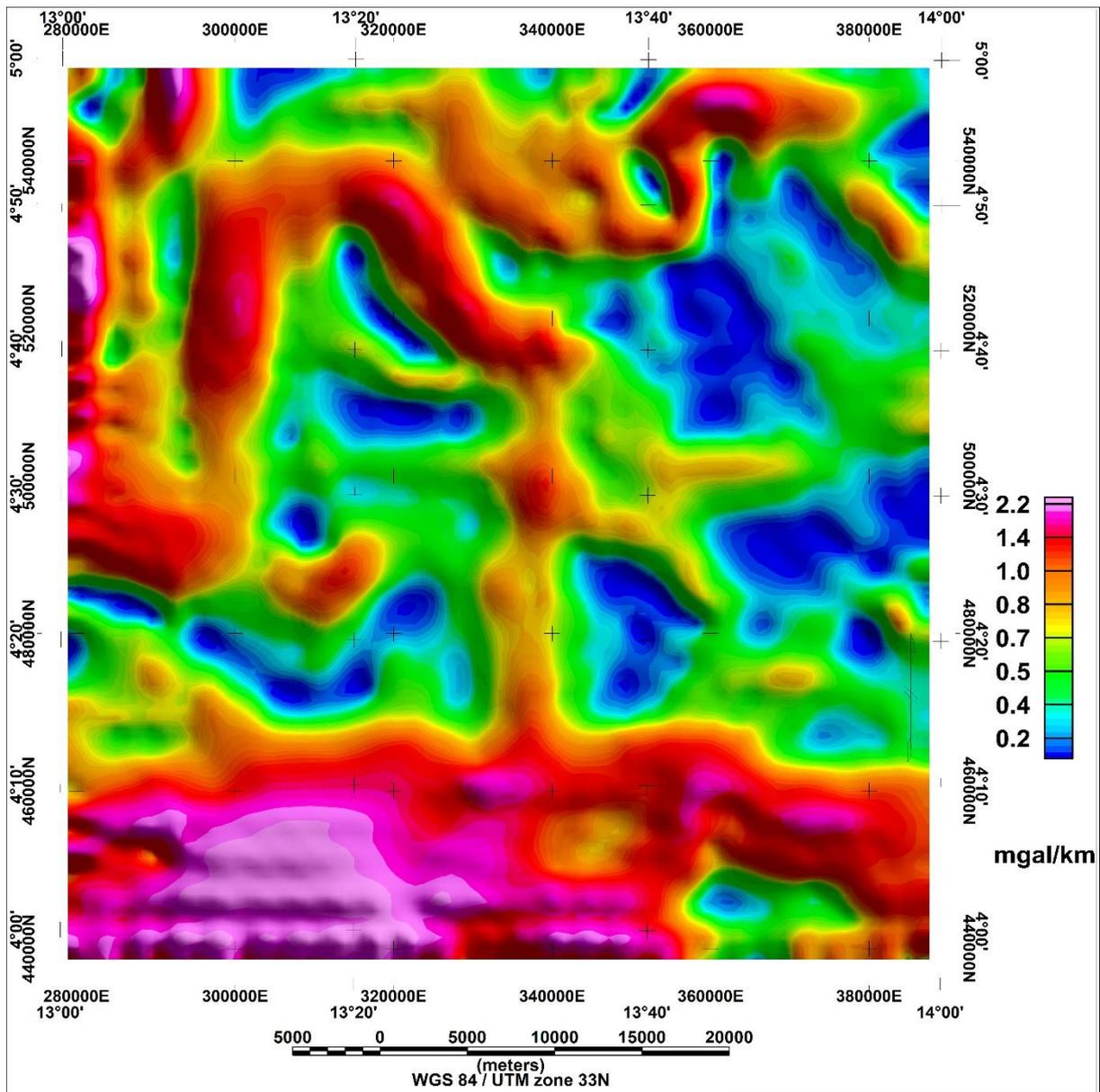


Figure 3.26. Carte du gradient horizontal total

La présente carte fait également ressortir une anomalie allongée au centre de la zone d'étude qui prendrait son origine dans la zone de Doumé et qui est

orientée vers le Nord. Celle-ci traverse plusieurs kilomètres et serait interprétée comme une faille traversant la zone d'étude du Nord au Sud.

2.8.2. La superposition des maxima du gradient horizontal

La carte ci-dessous (Figure 3.27) est celle des maxima locaux du gradient horizontal prolongé vers le haut à plusieurs altitudes, notamment à 10 km, 20 km et 30 km. D'après Blakely & Simpson (1986), cette superposition des maxima permet de mettre en évidence les contacts géologiques associés aux failles ou aux fractures suspectées dans les cartes précédentes. Cette méthode permet également de ressortir le sens des pendages. Ainsi, les pendages verticaux présenteront une superposition de maxima tandis que les pendages obliques présenteront un décalage des maxima suivant la direction des pendages. Elle ressort ici une complexité structurale marquée par l'alignement des maxima, ce qui dénote l'existence de plusieurs structures linéaires ayant affecté le socle. De ceci, on note les accidents à pendages verticaux :

- au Sud de la zone d'étude d'Ankom, suivant l'axe E-W ;
- entre Viali et Doumé, de direction N-S ;
- entre Bika et Nlang de direction NE-SW ;
- et enfin entre Nlang et Mbangue de direction NW-SE.

Outre ces accidents à pendages verticaux, on a ceux qui ont des pendages obliques. On les observe :

- au Sud entre Abong-Mbang et Ankom, de direction ENE-WSW ;
- entre Bika et Oudilik, on a un accident de direction NW-SE ;
- au Sud de Boulembe, on a un accident de direction ESE-WNW ;
- de même qu'entre Boulembe et Badissé, où se trouve un accident de direction ESE-WNW ;
- et de Yoko Betougou à Ebaka, avec un accident de direction ESE-WNW.

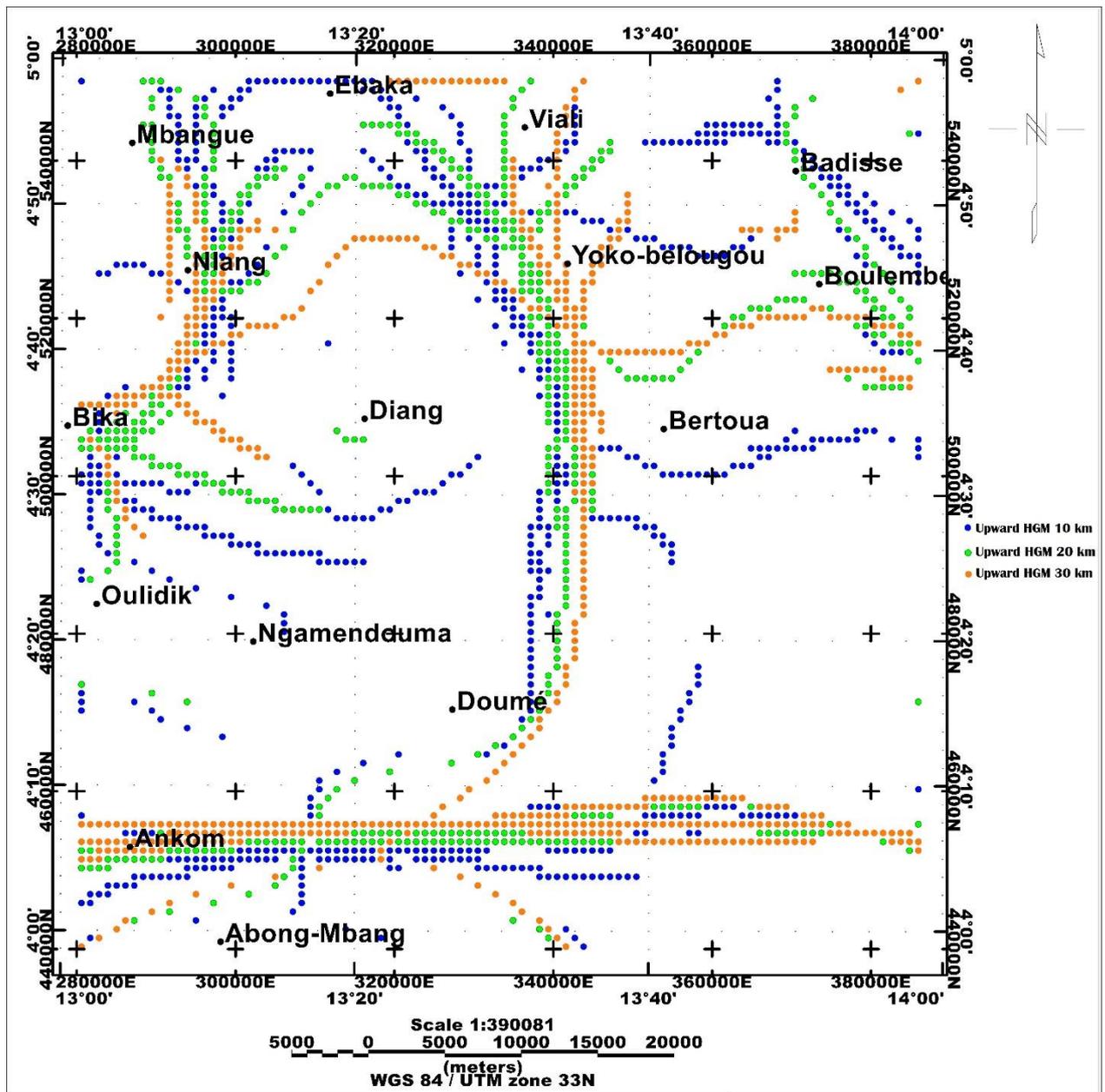


Figure 3.27. Carte de superposition des maxima du gradient horizontal

La carte des linéaments (Figure 3.27.a) est obtenue par le tracé des linéaments issus de la superposition des maxima des gradients horizontaux de la Figure (Figure 3.26). Ces linéaments suivent plusieurs directions structurales, notamment ESE-WNW, ENE-WSW, NW-SE, NE-SW, N-S et E-W. Ces directions sont bien en concordance, d'une part avec celles observées dans l'analyse des données magnétiques, et d'autre part avec les déformations observées à l'échelle régionale telles que les fractures, les dykes ou les failles.

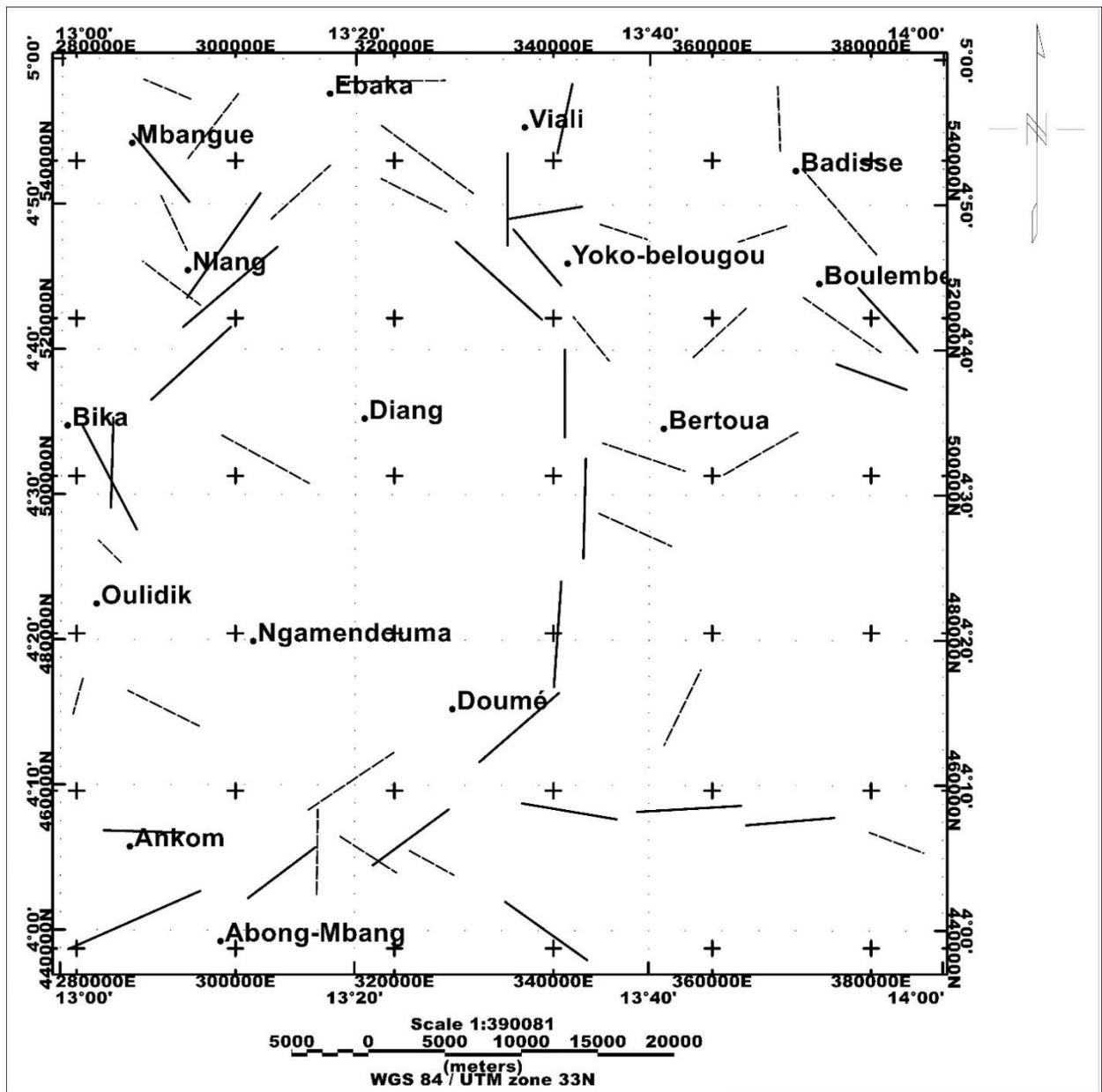


Figure 3.27.a. Carte des linéaments gravimétriques

La carte ci-dessous (Figure 3.27.b) représente la rosace directionnelle des différents linéaments gravimétriques. Elle montre que les linéaments suivent préférentiellement les directions NW-SE, ESE-WNW, NE-SW, ENE-WSW et minoritairement les directions E-W et N-S.

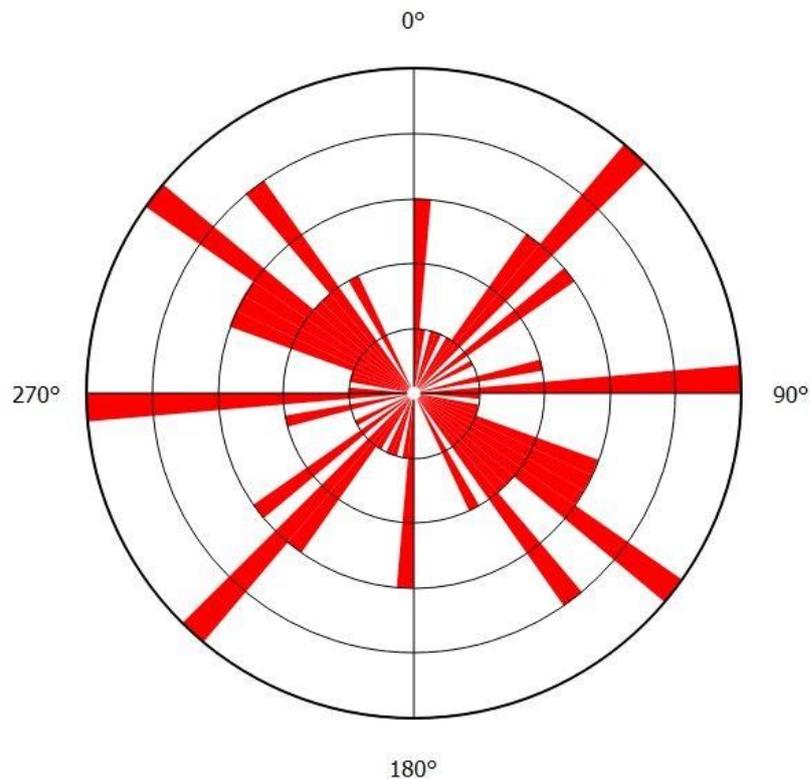


Figure 3.27.b : Rosace directionnelle des linéaments majeurs et mineurs

2.9. L'interprétation quantitative

Elle permet d'avoir une idée sur les profondeurs des accidents tectoniques d'une part, et d'autre part d'avoir une idée sur le comportement et les variations latérales et verticales des susceptibilités et de densités des roches du sous-sol.

2.9.1. La déconvolution d'Euler

Les solutions d'Euler ont été calculées suivant les paramètres ci-après : indice structural 0, tolérance 10 tandis que la taille de la fenêtre est 15. L'indice structural 0 utilisé ici permet de mettre en évidence les contacts magnétiques observés dans la zone d'étude.

L'analyse de la carte des solutions d'Euler (Figure 3.28) fait ressortir plusieurs accidents tectoniques. Elle permet de différencier les corps intrusifs des failles profondes. La forme des regroupements des solutions d'Euler confirme les

accidents tectoniques évoqués dans les cartes précédentes d'une part, et révèle de nouveaux accidents d'autre part.

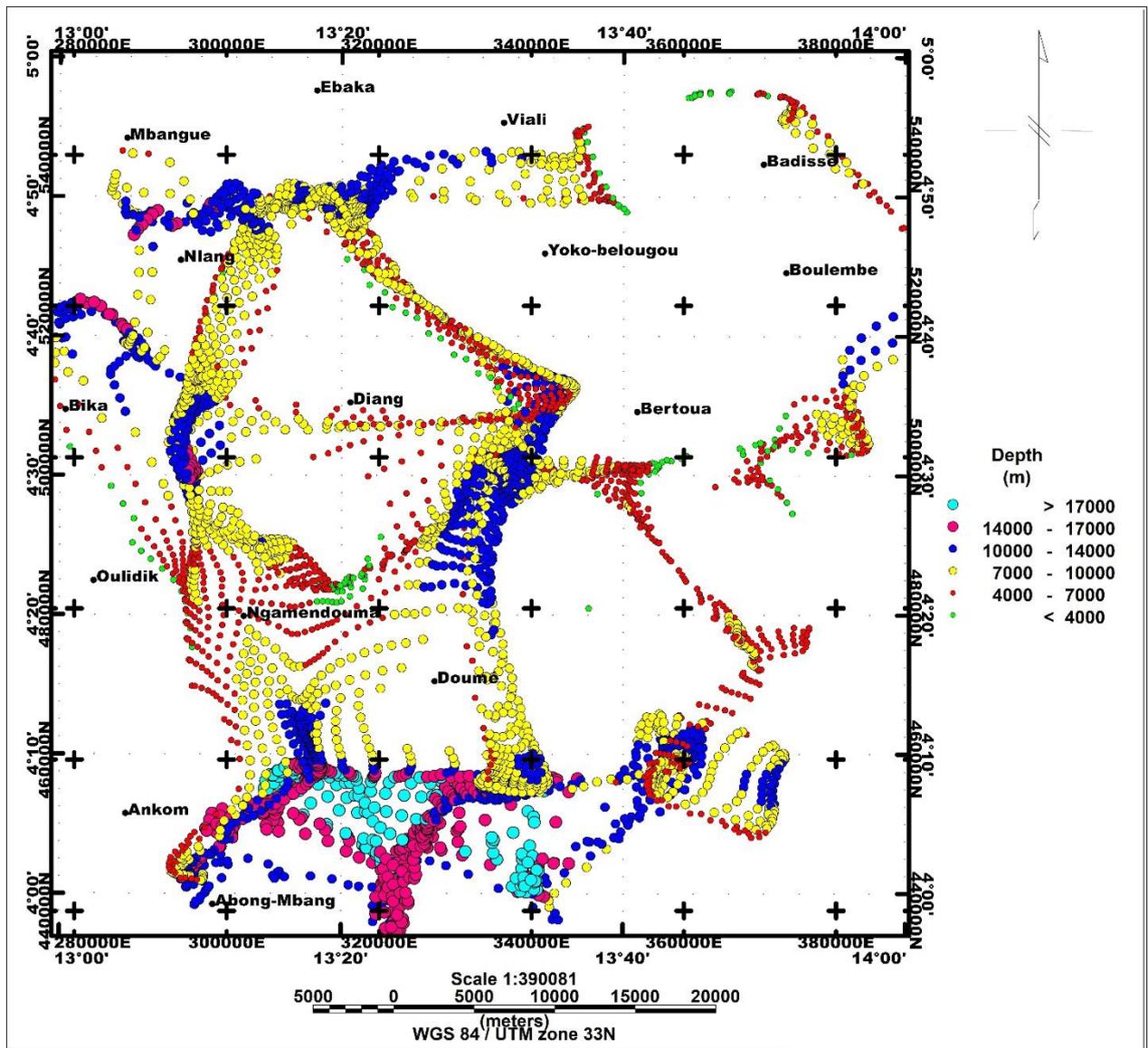


Figure 3.28. Carte des solutions d'Euler

Au Sud de la zone d'étude, notamment aux environs d'Abong-Mbang, on note la présence des faille profondes localisées à des profondeurs supérieures à 14 km et orientées ENE-WSW, ESE-WNW et NE-SW. Les zones Ouidik-Ngamendouma sont caractérisées par un essaim de solutions peu profondes qui seraient assimilées à des intrusions.

L'accident tectonique de direction N-S évoqué dans les cartes précédentes entre Doumé et Diang est toujours bien individualisé ici. Il serait localisé à des profondeurs supérieures à 7 km.

On note la présence d'un linéament orienté NW-SE entre Bertoua et Mbangue qui traduirait la présence d'une faille de profondeur 7 km, celle-ci s'étend vers le Sud-Est de la zone d'étude en suivant la même direction. Elle semble bien corrélérer avec l'accident tectonique divisant diagonalement la zone d'étude dans l'analyse des données magnétiques précédentes.

Entre les villages Nlang et Viali, on observe un accident de direction ENE-WSW dont la profondeur est de 10 km. Cet accident n'a pas été évoqué dans l'étude aéromagnétique. La zone de Badissé est traversée par un accident tectonique de direction NW-SE qui peut être assimilé à une fracture.

2.8.2. La modélisation 2^{3/4}.D

Les modèles permettent d'observer les variations latérales et verticales des densités des roches dans le sous-sol. Ils permettent également de localiser les discontinuités majeures dans le sous-sol. Les trois modèles gravimétriques tracés ici présentent chacun des contours très déformés, témoins des plissements intenses, des cisaillements et des fractures, preuve que la zone porte l'empreinte de la collision de deux grands ensembles géologiques à savoir les formations panafricaines et celles du Craton du Congo. La figure ci-contre (Figure 3.29) est la carte des anomalies de Bouguer présentant les profils.

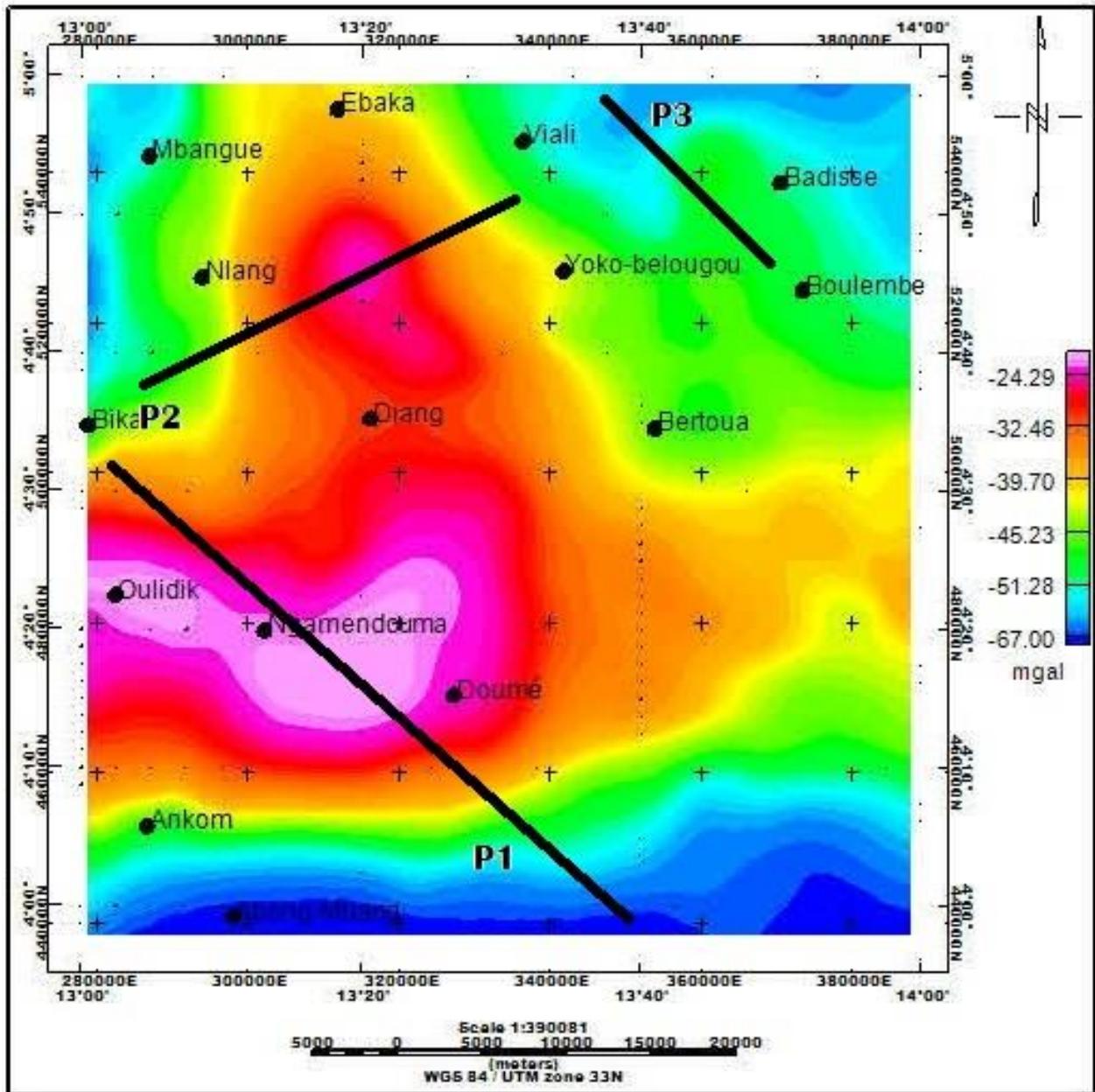


Figure 3.29. Carte des anomalies de Bouguer présentant les profils

2.8.2.1. L'analyse du profil gravimétrique P1

Le profil gravimétrique P1 (Figure 3.30.a) d'orientation NW-SE part de la localité de Bika jusqu'au Sud de la zone d'étude en traversant la localité de Ngamendouma les extrémités sont les points de coordonnées (283316 m ; 512299 m) et (341004 m; 440446 m). il est long d'environ 92 km et centré sur une zone d'anomalies élevées. La topographie gravimétrique le long de ce profil fait ressortir quatre couches, notamment avec les granites tectoniques anciens et

retardés, les gneiss embréchites, les gneiss à deux micas et les micaschistes. Le socle ici est granitique. Le modèle 2^{3/4} D dudit profil gravimétrique montre qu'il traverse un relief gravimétrique perturbé avec des anomalies gravimétriques lourdes à légères (les densités des roches oscillent ici entre -60 et -15 mGals). Les granites présentent une densité de 2,88g/cm³, les gneiss embréchites ont une densité de 2,71 g/cm³, les gneiss à deux micas s'individualisent avec une densité de 2,38 g/cm³, tandis que les micaschistes ont une densité 2,18 g/cm³.

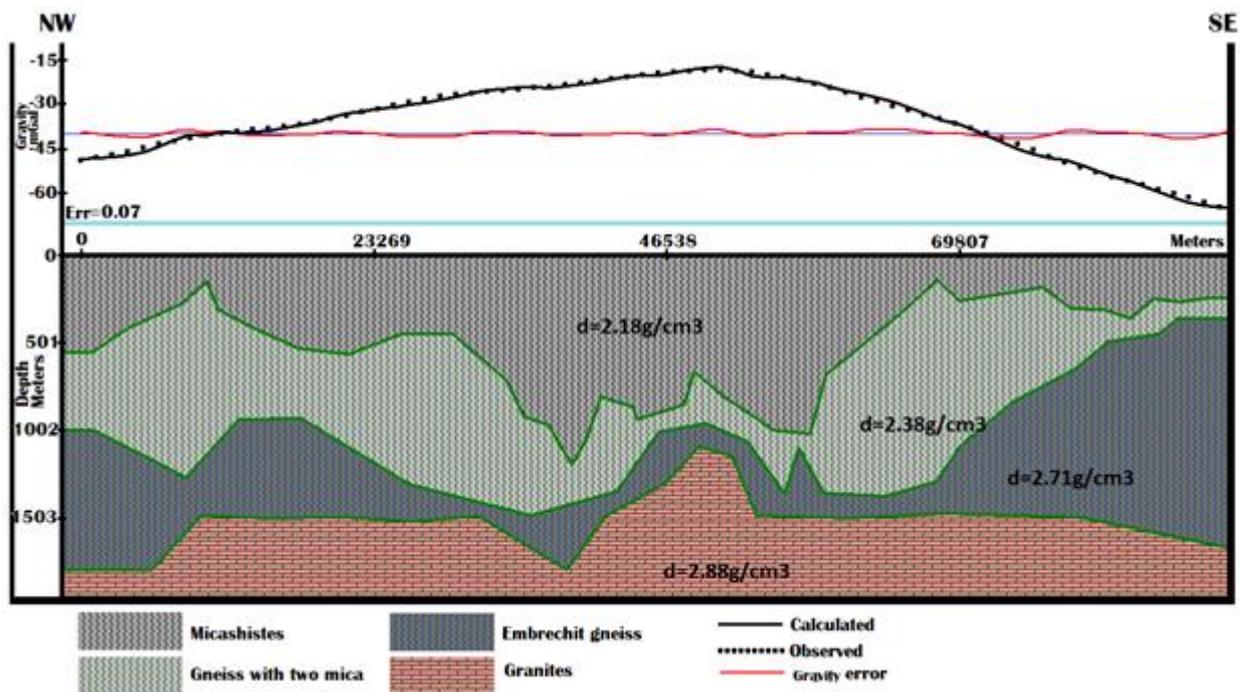


Figure 3.30.a. Modèle 2^{3/4} D du profil gravimétrique 1

On remarque la présence d'un maximum localisé aux environs de 46538 m de l'origine du profil. Les différentes couches constituant le profil présentent des formes très irrégulières qui correspondraient à des plissements ou des cisaillements intenses avec broyage des structures caractéristiques d'une collision.

2.8.2.2. L'analyse du profil gravimétrique P2

Le profil gravimétrique P2 (Figure 3.30.b) part de la localité de Bika vers celle de Viali avec une orientation ENE-WSW ; les extrémités sont les points de coordonnées (286651 m; 522869 m) et (344052 m; 532547 m). Il est long

d'environ 58 km et centré sur une zone d'anomalies élevées. La topographie gravimétrique le long de ce profil fait ressortir quatre couches constituées des granites syntectoniques, embréchites à biotite, des gneiss à deux micas et des gneiss à biotite. Le socle ici est granitique. Le modèle $2^{3/4}$ D de ce profil gravimétrique montre qu'il traverse un relief gravimétrique perturbé avec des anomalies gravimétriques lourdes à légères (les densités des roches oscillent ici entre -49 et -21 mGals). Les granites ont une densité de $2,99\text{g/cm}^3$; les embréchites à biotites présentent une densité de $2,85\text{ g/cm}^3$; les gneiss à deux micas se distinguent avec une densité de $1,63\text{ g/cm}^3$, alors que les biotites gneiss ont une densité $1,43\text{ g/cm}^3$.

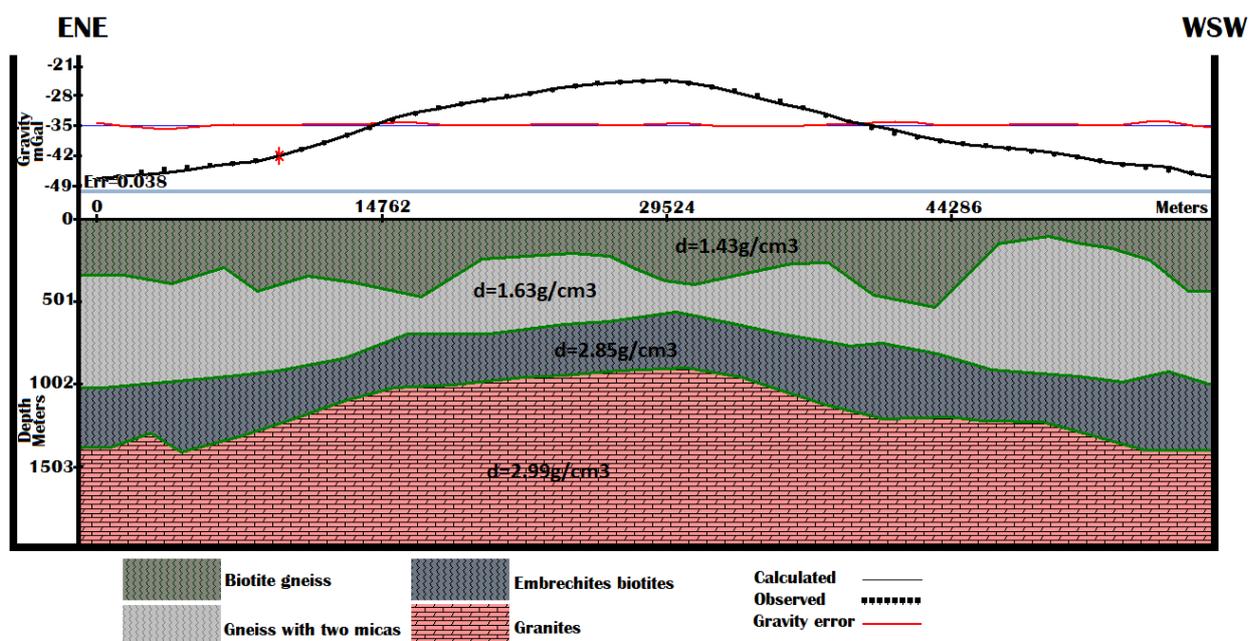


Figure 3.3.b. Modèle $2^{3/4}$ du profil gravimétrique 2

Ce profil présente également un maximum situé aux environs de 29524 m de l'origine du profil. Les couches tabulaires ayant des formes très irrégulières ressemblant à des sinusoides déformées, caractériseraient l'intensité des plissements ayant affecté la zone d'étude.

2.8.2.3. L'analyse du profil gravimétrique P3

Le profil gravimétrique P3 (Figure 3.30.c) part de la localité de Boulembe vers celle de Viali avec une orientation NW-SE, les extrémités sont les points de coordonnées (369182 m; 520120 m) et (350770m ; 550307m). Il est long d'environ 35 km et centré sur une zone d'anomalies élevées. La topographie gravimétrique le long de ce profil fait ressortir cinq couches notamment avec les granites syntectoniques anciens, les granites syntectoniques tardifs, les granites tardifs à tendance alcaline, les séricito-gneiss et les embréchites. Le socle ici est granitique. Le modèle $2^{3/4}$ D de ce profil gravimétrique montre qu'il traverse un relief gravimétrique perturbé avec des anomalies gravimétriques moyennes à légères (les densités des roches oscillent ici entre -60 et -45 mGals). Les granites syntectoniques anciens ont une densité moyennes de $2,96\text{g/cm}^3$, les granites syntectoniques tardifs ont une densité de $2,92\text{g/cm}^3$, les granites tardifs à tendance alcaline présentent une densité moyenne de $2,82\text{g/cm}^3$, les séricito-gneiss quant à eux se distinguent avec une densité moyenne $2,07\text{g/cm}^3$, tandis que les embréchites ont une densité de $1,85\text{g/cm}^3$.

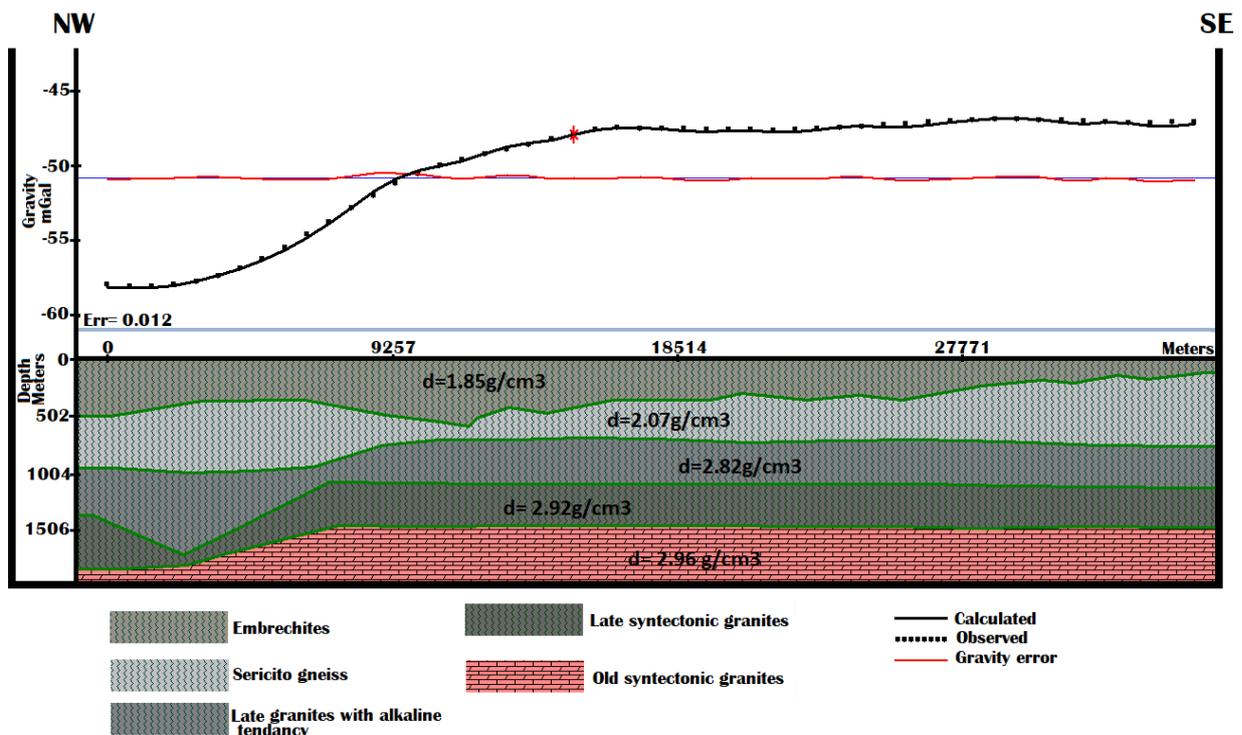


Figure 3.30.c. Modèle $2^{3/4}$ du profil gravimétrique 3

Ce profil présente une tabulation des couches. La zone proche de Viali serait la plus touchée par les mouvements tectoniques ayant affecté le socle ; elle caractériserait un contact entre des formations géologiques aux densités différentes. Elle serait le siège d'une discontinuité importante assimilée à une fracturation.

3. DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats obtenus au cours des interprétations magnétiques et gravimétriques sont assujettis d'une part aux techniques utilisées pour le traitement des données, et d'autre part aux contraintes apportées dans le choix des paramètres physiques intervenant dans l'élaboration des modèles. Dans cette partie, il sera question premièrement de justifier la validité de l'ensemble des résultats obtenus dans cette étude, et deuxièmement de procéder à une corrélation géologico-tectonique tant à l'échelle locale que régionale avec les travaux antérieurs menés dans le domaine de la géologie ou de la géophysique.

3.1. La validité des résultats

Les résultats de la présente investigation des données magnétiques et gravimétriques dépendent, premièrement de la méthodologie utilisée, et deuxièmement des techniques de traitement des dites données. Ainsi, la fiabilité des conclusions dépend de la précision avec laquelle les résultats ont été obtenus. L'investigation magnétique a été faite par utilisation des données aéromagnétiques de Paterson et al. (1976), tandis que l'investigation gravimétrique a été menée par le biais des données EGM 2008 mises au point par la NGA dans le modèle du champ géopotential EGM 2008. Cette analyse a donné des résultats satisfaisants et confirme la fiabilité des différentes opérations mathématiques utilisées ici.

Les différentes corrections gravimétriques citées plus haut ont été effectuées pour les données gravimétriques EGM 2008 utilisées ici. Pour les

données magnétiques, les vols ont été effectués à une altitude de 235 mètres du sol surveillés par un altimètre à radar. Dans les régions où la topographie était nulle ou modérée, l'altitude réelle a varié de moins de 30 mètres par rapport à la valeur théorique. Dans les régions où la topographie était très rugueuse, la variation était par endroit de ± 100 mètres. L'espacement des lignes de vol était de 750 mètres. Les lignes de contrôle pour le nivellement des données ont été effectuées à des intervalles de 10 kilomètres. La sensibilité d'enregistrement du magnétomètre utilisé dans la collecte de données était de $\pm 0,5$ gammas. Les intensités magnétiques étaient enregistrées toutes les secondes. Les cartes de base utilisées pour faire le plan des données magnétiques pendant la campagne étaient construites à partir des photomosaïques qui présentent une précision qui ne dépasse pas ± 100 mètres. Ainsi, la densité, la régularité et la précision des données magnétométriques sont suffisantes pour assurer une représentation correcte des contours magnétiques.

Certaines précautions ont été prises lors du traitement des données magnétiques et gravimétriques dans le logiciel oasis Montaj. En effet les données ont à chaque fois subi un contrôle qualité qui consistait à tracer les profils permettant, d'une part, d'éliminer les bruits et d'autre part de voir les différentes variations des données brutes issues de la digitalisation, avant d'appliquer les différentes opérations mathématiques qui ont été utilisées pour la production des cartes magnétiques et gravimétriques ci-dessus.

Les cartes du champ magnétique total (TMI) et des anomalies de Bouguer ont permis d'observer globalement les anomalies magnétiques et gravimétriques, respectivement, lesquelles corrélerent avec celles observées dans les travaux magnétiques et gravimétriques réalisés à l'échelle régionale d'une part, et avec les données géologiques Gazel (1955), Gazel & Gérard (1954) d'autre part ; preuve qu'elles sont fiables. La carte des anomalies de Bouguer obtenue a une ressemblance avec celle obtenue dans les travaux de Noutchogwe et al. (2006).

Dans l'étude quantitative, les modèles 2^{3/4}-D ont été obtenus avec des erreurs très faibles inférieures à 0,1%, ce qui signifie que les résultats des modèles gravimétriques et magnétiques sont fiables.

3.2. La corrélation des résultats magnétiques et du contexte géologico-tectonique local et régional

Les résultats majeurs obtenus ici permettent d'améliorer l'information géologique de l'Est Cameroun. La carte du champ magnétique total et sa carte réduite à l'équateur présentent trois secteurs assez importants, à savoir la partie Nord-Est marquée par les anomalies magnétiques de grandes amplitudes du champ magnétique ; la partie Sud- Ouest caractérisée par de très faibles valeurs du champ magnétique ; et une partie séparant diagonalement les deux secteurs cités plus haut constituée des valeurs moyennes du champ magnétique. Cette répartition des anomalies magnétiques corrèle bien avec les observations géologiques faites par Gazel (1955) et Gazel & Gérard (1954), qui présentent au Nord-Est des granites, au Sud – Ouest, les migmatites, tandis que le grand couloir les séparant est constitué des gneiss. Le grand couloir séparant les deux domaines semble bien correspondre à la ligne tectonique mise en évidence sur la carte de Gazel (1955). Les structures responsables de ces anomalies seraient situées en profondeur dans la croûte et constituent des corps intrusifs de forte magnétisation.

Du point de vue tectonique, les cartes des gradients horizontal et vertical ainsi que du signal analytique ont permis d'observer des plissements intenses du socle, qui sont dus à l'orogénèse huronienne. Ainsi, la zone d'étude est un ensemble métamorphique qui a été plissé syntectoniquement (Gazel & Gérard, 1954), avec des pendages qui varient de subhorizontaux à presque verticaux. On distingue deux phases ou séries de plissements ayant affecté le socle, à savoir : la série métamorphique ancienne et la série épimétamorphique. La direction de ces plis est, ENE-WSW, WNW-ESE, NW-SE, NE-SW, E-W, N-S et même E-W. A

l'échelle régionale, Les plissements de direction NE-SW et NW-SE semblent suivre les mêmes directions que ceux mis en évidence dans la partie Sud Cameroun par Mvondo et al. (2007) dans leurs travaux sur l'historique de la déformation de la ceinture orogénique néoprotérozoïques. Pendant et après ces phénomènes orogéniques, l'ensemble du socle a joué à plusieurs reprises, ce qui a donné de nombreuses fractures ou cassures plus ou moins importantes.

L'observation des cartes des gradients montre quatre grandes familles principales de linéaments caractérisées par les directions ENE-WSW, WNW-ESE, NW-SE et NE-SW et deux familles secondaires caractérisées par les directions E-W et N-S. La direction structurale NE-SW observée ici serait le résultat d'efforts de compression qui ont agi selon l'axe NW-SE et qui ont accompagné le métamorphisme régional. Elle est conséquente à la zone de transition entre la chaîne Panafricaine et le Craton du Congo proposée dans les travaux de Toteu et al. (2004) et Ngako et al. (2008), et caractériserait également les structures sous le Craton dans la zone d'étude. Tandis que la direction NE-SW est celle qui caractériserait les grandes structures panafricaines du Cameroun à savoir le cisaillement Centre Camerounais et la faille de la Sanaga.

La carte des solutions d'Euler présente une gamme de solutions au Sud de la zone d'étude. La densité de groupement de ces solutions est observée à l'Ouest de Bertoua, ce qui peut suggérer qu'elles peuvent être associées à des anomalies à petite échelle ou à des déformations structurelles. Cette carte montre également de nouvelles failles avec des profondeurs supérieures à 5000 m. Les corrélations observées dans la partie Sud-Ouest seraient mises en place au cours de l'orogénèse panafricaine et pourraient correspondre aux structures de sous-sol liées à la transition entre le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale.

La modélisation $2^{3/4}$ -D des données magnétiques a permis d'observer le comportement des structures géologiques du sous-sol tel qu'observé dans les

profils magnétiques tracés plus haut. Les différents profils ont présenté des reliefs magnétiques assez perturbés qui ont montré les différents aspects des anomalies. Ceux-ci ont aussi révélé l'effet d'un métamorphisme de contact observé dans la zone d'étude. Ces profils ont été tracés sur des domaines présentant des marques de multiples phases de déformations ayant affecté le Panafricain et sont caractérisés par une tectonique cassante accompagnée de plissements ou de cisaillements. Ils ont révélé la présence des corps ou des intrusions dans le sous-sol. Ces corps seraient logés sur les accidents tectoniques sus-évoqués. Ils résulteraient de la subduction du Craton du Congo sur la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale. Ces résultats sont en concordance avec les analyses faites par Manguelle Dicoum et al. (1992), Mbom Abane (1997), Toteu et al. (2004) et Mvondo et al. (2007 b).

Ainsi ces profils ont permis d'observer des plissements et cisaillements intenses dans le sous-sol, accompagnés de broyage des structures caractéristiques avec empreinte de subduction du domaine Panafricain dans le Craton Congolais. Ces analyses ont bien corrélé avec celles qui ont été menées tant dans les travaux géologiques (Toteu et al., 2004 ; Mvondo et al., 2007 a et b) que dans les travaux géophysiques menés par Zanga et al. (2013) et Owono-Amougou et al. (2019).

3.3. La corrélation des résultats gravimétriques avec le contexte géologico-tectonique local et régional

La carte des anomalies de Bouguer obtenue ici provient des données EGM (2008). Elle a permis de déterminer les formations géologiques tant locales que régionales. Elle semble avoir une assez bonne corrélation avec celle obtenue d'une part dans l'étude menée par Poudjom et al. (1996) et, d'autre part dans les travaux de Gazel (1955), Gazel & Gérard (1954). Cette carte a mis en évidence plusieurs types d'anomalies qui ont permis de supposer des accidents témoignant de la subduction de la Chaîne Panafricaine sur le Craton du Congo. Ce résultat a

bien corrélé avec les travaux menés à l'échelle tant locale que régionale (Noutchogwe et al., 2006 ; Zanga et al. 2013).

Les cartes prolongées vers le haut à 10 km, 20 km et 30 km ont permis d'atténuer les anomalies gravimétriques liées aux structures superficielles, qui ont disparu au fur et à mesure que l'altitude devenait importante, cela en conformité avec plusieurs travaux (Burger et al., 2006 ; Bouiflane, 2008). Ainsi les anomalies superficielles observées dans les zones de Badissé et de Mbangue ont considérablement diminué, de même que l'anomalie lourde couvrant les parties Ouest, Centre et Nord s'est considérablement amplifiée.

La carte du gradient vertical permet de mettre en évidence les discontinuités des formations superficielles (Feumoé et al., 2012). On remarque la présence de plusieurs zones de gradients qui dénotent l'existence de quelques discontinuités liées soit à la remontée des masses lourdes, soit au passage de la faille de la Sanaga. Les discontinuités observées dans cette carte suivent les directions reconnues dans les travaux menés en aéromagnétisme par Owono-Amogou et al. (2019) à l'échelle locale et par plusieurs auteurs à l'échelle régionale (Noutchogwe et al., 2006 ; Ndougsa-Mbarga et al., 2012 ; Feumoé et al., 2012 ; Zanga et al., 2013).

Les cartes des gradients horizontaux permettent d'identifier les contacts, les failles, les fractures ou les limites lithologiques (Cordell & Grauch, 1985 ; Blakely & Simpson., 1986 ; Phillips, 1998). Ainsi elles ont mis en évidence plusieurs accidents tectoniques tels que les contacts/failles et les intrusions des matériaux. Ces accidents tectoniques semblent bien résulter de la collision entre le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale. Ces analyses sont corrélables à plusieurs travaux géophysiques menés tant à l'échelle locale que régionale (Manguelle Dicoum et al., 1992 ; Noutchogwe et al., 2006 ; Feumoé et al., 2012 ; Ndougsa-Mbarga et al., 2012 ; Meying et al., 2013; Zanga et al., 2013).

La carte des solutions d'Euler établie a permis de confirmer la présence dans le sous-sol des fractures, des failles, des intrusions qui sont localisées à des profondeurs variables et qui sont liées aux déformations cisailantes, reflétant l'aspect structural et tectonique de la zone d'étude. La partie Sud de la zone d'étude se démarquerait avec la présence des failles dont la profondeur est supérieure à 17 km. Ces profondeurs sont localisées sous le Craton au niveau d'un contact entre plusieurs formations géologiques. Les différentes failles et fractures observées ici semblent bien corrélées avec le faisceau tectonique constituant le décrochement ductile à ductilo-fragile dextre, évoqué dans les travaux géologiques de Nzenti et al. (1988) et de Ngako et al. (1991).

La modélisation 2^{3/4}-D des données gravimétriques a permis d'observer le comportement des structures géologiques en profondeur tel qu'observé dans les profils gravimétriques tracés. Les différents profils ont présenté des topographies gravimétriques assez perturbées montrant différents aspects des anomalies. Ainsi ces profils ont permis de mettre en évidence des plissements et cisaillements intenses dans le sous-sol, accompagnés de broyage des structures caractéristiques avec empreinte de subduction du domaine Panafricain sur le Craton Congolais. Ces analyses ont bien corrélé avec celles qui ont été menées tant dans les travaux géologiques (Toteu et al., 2004 ; Mvondo et al., 2007 a et b) que dans les travaux géophysiques (Zanga et al., 2011 ; Owono-Amougou et al., 2019).

3.3. La corrélation des linéaments magnétiques et gravimétriques

Les opérations de filtrage ayant abouti à l'analyse multi-échelle des données magnétiques et gravimétriques ont permis de mettre en évidence les linéaments géophysiques majeurs et mineurs. Les résultats obtenus dans ce travail ont permis de confirmer les déformations connues, mais aussi mis en exergue de nouveaux accidents tectoniques. En effet plusieurs travaux (Owona et al., 2013 ; Koumetio et al., 2012) interprètent les linéaments géophysiques comme des

failles, des fractures ou des contacts géologiques. Les différentes cartes structurales ressortent plusieurs familles de linéaments caractérisées par plusieurs directions structurales, notamment ESE-WNW, ENE-WSW, NW-SE, NE-SW, E-W, N-S.

A l'échelle régionale, les linéaments de direction NW-SE, semblent corrélés avec la faille crustale mise en place pendant l'orogénèse panafricaine et qui correspondraient à la limite entre la chaîne panafricaine de l'Afrique Centrale et le Craton du Congo comme observé dans les travaux de Basseka et al. (2011). Les anomalies de direction ENE-WSW semblent corrélés avec les directions du Cisaillement Centre Camerounais telles que décrites par les travaux antérieurs effectués par Noutchogowe et al. (2006) ; celles-ci respectent également la direction de l'axe gravimétrique correspondant au grand accident du Cisaillement Centre Camerounais. De manière générale, les directions principales observées dans cette étude semblent bien corrélés avec les systèmes de failles NE-SW, NW-SE et les multiples déformations telles que les plissements, les fractures ou les failles proposées dans les études géophysiques (Ndougssa-Mbarga et al., 2003, 2010 & 2011 ; Meying et al., 2009 & 2013) dans les zones d'Akonolinga, Ayos et Abong-Mbang ; Feumoé et al. (2012) dans la partie Sud du Cameroun d'une part et dans les études géologiques faites par Mvondo et al. (2007 a & 2007 b) dans le Sud Cameroun, puis Olinga et al. (2010) dans la zone d'Awaé-Ayos, d'autre part.

Les accidents E-W sont parallèles d'une part à la ceinture orogénique pincée entre le Craton du Congo et le complexe polycyclique brésilio-centrafricain (Eno Belinga, 1984), et d'autre part à l'une des phases de déformation panafricaine, notamment la phase de cisaillement dextre C₃ mise en évidence dans les travaux de Mvondo et al. (2007 b).

Les linéaments de directions N-S également bien réhaussés dans l'étude gravimétrique semblent être conséquents aux lignes tectoniques mises en évidence dans les travaux de Gazel (1955), Gazel & Gérard (1954) et aux directions des multiples foliations mises en évidence dans les travaux de Toteu et al. (2004).

3.4. La superposition des linéaments magnétiques et gravimétriques

La carte ci-dessous (Figure 3.31) est celle de la superposition des linéaments magnétiques et gravimétriques sur la carte géologique. L'étude magnétique s'est faite entre les latitudes Nord 4°30 et 5°00 et les longitudes Est 13°00 et 14°00, tandis que l'étude gravimétrique s'est faite entre les latitudes Nord 4°00 et 5°00 et les longitudes Est 13°00 et 14°00. On constate une abondance des linéaments magnétiques par rapport aux linéaments gravimétriques. Cela se justifie par le fait que l'étude magnétique ressort plus les éléments structuraux de proche surface alors que l'analyse gravimétrique a plus mis en exergue les accidents structuraux qui se situent à des profondeurs plus importantes. Les directions majeures des linéaments demeurent les mêmes que celles évoquées dans les analyses magnétique et gravimétrique.

Cette carte (Figure 3.31) résume les limites entre les zones présentant des contrastes de susceptibilités et des densités des formations du sous-sol. Ces limites assimilées à des contacts linéaires ou à des failles, ont permis de révéler de nouveaux accidents structuraux (failles, fractures ou dykes) non évoqués dans les études géologiques et géophysiques précédentes et qui témoigneraient de l'intensité de la collision entre le Craton et le Panafricain.

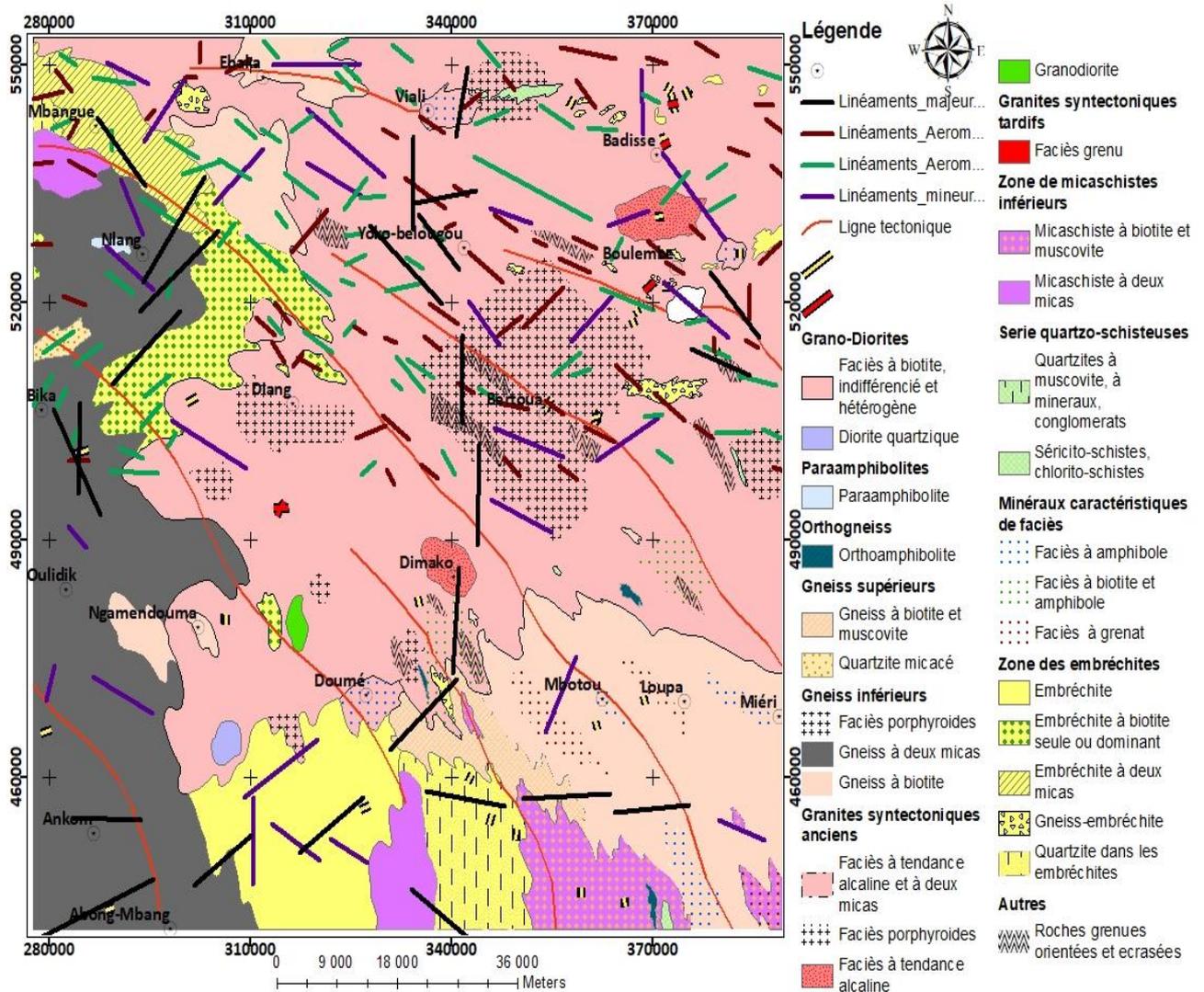


Figure 3.31. Superposition des linéaments magnétiques et gravimétriques

CONCLUSION

Le présent chapitre a permis de procéder à l'analyse et à l'interprétation des données magnétiques et gravimétriques de la zone d'étude. Il en découle que celle-ci est sujette à plusieurs discontinuités ou accidents tectoniques tels que les failles, les fractures, les dykes, les dômes ou les intrusions. L'analyse des solutions d'Euler a permis d'avoir des précisions sur les profondeurs des anomalies causatives de ces accidents. En outre, La modélisation des données magnétiques et gravimétriques a relevé la présence des corps dans le sous-sol, qui seraient le résultat du broyage des structures entre le Craton du Congo et le

Panafricain. Tous ces éléments mis ensemble, montre bien que la zone circonscrite par cette étude a été le théâtre d'une intense activité tectonique marquée par la subduction de la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale dans le Craton Congolais.

**CONCLUSION GÉNÉRALE ET
PERSPECTIVES**

L'étude géophysique par utilisation des méthodes potentielles menées ici avait pour objectif général de procéder à une cartographie aéromagnétique et gravimétrique multi-échelle de l'Est-Cameroun. Spécifiquement, il s'agissait d'établir les cartes du champ magnétique total et celle de la Bouguer. De celles-ci, ont découlé l'analyse qualitative avec l'interprétation des cartes des gradients horizontaux et verticaux, des cartes du signal analytique, de l'angle d'inclinaison Tilt, des cartes prolongées, des cartes résiduelles et régionales (pour l'analyse gravimétrique); une analyse quantitative avec l'interprétation des cartes de déconvolution d'Euler et la modélisation 2^{3/4}-D des profils magnétiques et gravimétriques.

L'analyse qualitative a abouti aux cartes structurales des linéaments magnétiques et gravimétriques respectivement. Ceux-ci ont été interprétés comme des zones de contacts, des fractures, des dykes et même des failles. L'analyse quantitative quant à elle a permis d'évaluer les profondeurs des sources des anomalies. Il en découle que pour l'étude aéromagnétique, les sources perturbatrices les plus profondes ont été évaluées à des profondeurs supérieures ou égales à 14 km avec pour localisation les zones Ouest et Centre de la zone d'étude. Tandis que pour l'étude gravimétrique, les plus profondes se situent à des profondeurs supérieures à 17 km, elles sont localisées au Sud de la zone d'étude.

Les cartes des anomalies du champ magnétique total et des anomalies de Bouguer ont mis en évidence plusieurs anomalies régionales qui ont bien corrélé avec les formations géologiques tant locales que régionales, mais aussi plusieurs discontinuités.

Les principaux résultats obtenus dans cette étude ont permis à coup sûr d'améliorer l'information géologique et géophysique de la zone d'étude. Ainsi, la zone d'étude aurait été le théâtre d'intenses mouvements tectoniques caractérisés par plusieurs structures linéaires présentant les directions principales ESE-WNW, ENE-WSW, NE-SW, NW-SE, puis les directions secondaires E-W et N-S, qui

sont liées aux failles, fractures et différentes déformations d'une part ; et des anomalies circulaires assimilées aux intrusions de matériaux fortement magnétiques ou aux dômes granitiques d'autre part. Tous ces éléments mis en évidence dans la présente étude corréleront bien avec les travaux géologiques et géophysiques menés tant dans la zone d'étude qu'au niveau régional. La zone d'étude bien que théoriquement située sur la chaîne panafricaine porterait des empreintes du Craton du Congo. L'hypothèse de subduction de la plaque du Craton semble donc être confirmée par les failles profondes cartographiées dans ce travail.

Perspectives

L'analyse et l'interprétation des données magnétiques et gravimétriques ayant suggéré l'existence de plusieurs accidents tectoniques, il y a donc à présent de nombreuses possibilités impliquant d'autres méthodes d'investigation. Pour ce faire, plusieurs perspectives s'ouvrent pour les travaux ultérieurs, pouvant s'intéresser entre autres :

- à l'investigation magnétotellurique qui donnerait à coup sûr, d'autres informations sur les structures crustales, ce qui permettrait de localiser d'autres failles dans la région et même d'identifier les pièges des minéraux.
- aux études sismiques qui exposeraient la séquence sismostratigraphique qui permettrait d'améliorer les modèles géodynamiques du sous-sol et donnerait d'autres précisions sur des corps intrusifs non affleurant suspectés dans la zone d'étude ;
- aux mesures de densités et à une étude géochimique pouvant permettre de connaître avec plus de précision la nature des corps ignés ce qui améliorerait la modélisation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Abdelsalam, M. G., Liegeois, J. P., Stern, R.J. (2002). The Saharan Metacraton. *Journal of African Earth Sciences*, 34, 119-136.

Affaton, P. (1998). Geology of Western Gondwana (2000 – 500 Ma). Pan African Brasiliano aggregation of South America and Africa. Essay Review. *American Journal of Science*, 298, 611-615.

Amar, M., Manar, A., Boualoul. M. (2012). Apport de la cartographie aéromagnétique à l'identification structurale du système aquifère des sources de l'Oasis de Figuig (Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 34, 29-40 ;

B

Ball, E., Bard, J.P., Soba, D. (1984). Tectonique tangentielle dans la catazone du Cameroun : les gneiss de Yaoundé. *Journal of African Earth Science*, 2, 91-95.

Baranov, V., and Naudy, H., (1964). Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, 29, 67-79, 1964.

Basseka, C.A., Shandini, Y., Tadjou, J.M. (2011). Subsurface structural mapping using gravity data of the Northern edge of the Congo Craton, South Cameroun. *Geofizika*, 28(2), 229-245;

Bertrand, J. M., Barbey, P., Latouche, L., Macaudiere, J. (1994). Le socle précambrien du Cameroun, une revue partielle des travaux récents. *Pangea* 21, 33-41.

Bessoles, B. and M. Trompette. (1980). Géologie de l'Afrique : la chaîne Panafricaine, « Zone mobile d'Afrique centrale (partie sud) et Zone mobile soudanaise ». *Mémoire du BRGM*, 92, 19-80.

- Bidzang Ndong, F., Ntomba, S. M., Messi, E. J., Okia, D. (2014).** Géochimie comparative des sédiments de ruisseaux des rives droite et gauche du sous-bassin hydrographique de Koubou (Est-Cameroun), *Afrique Science*, 10(3), 171-181.
- Black R. (1966).** Sur l'existence d'une orogénie riphéenne en Afrique occidentale. *Comptes Rendus. Académies des Sciences Paris*, 262 (D), 1046-1049.
- Black, R. (1967).** Sur l'ordonnance des chaînes métamorphiques en Afrique occidentale. *Chrono Min. Rech. min.*, Paris, 364,225-238.
- Blakely R.J. & Simpson R.W. (1986).** Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51, 1494-1498 ;
- Blakely, R.J. (1995).** *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications.* Cambridge University Press, London 441 pages.
- Bouiflane, M. (2008).** Cartographie aéromagnétique et magnétique multi-échelles : Etude structurale d'une région du Fossé Rhénan. Thèse de Doctorat de Géophysique, Université Louis Pasteur-Strasbourg I. 206 pages.
- Boukeke, D.B. (1994).** Structures crustales d'Afrique Centrale déduites des anomalies magnétiques et gravimétriques : Le domaine Précambrien et du Sud-Cameroun. Thèse de Doctorat de Géophysique, Université Paris Sud, 263 pages.
- Burger, H., Sheehan, A.F., Craig, H.J. (2006).** *Introduction to Applied Geophysics (Exploring the shallow subsurface).* W.W. Norton & Company, New York, 554 pages.

C

-
- Caby, R., Boessé, J.M. (2001).** Pan-African nappe system in Southwest Nigeria: the Ife-Ilesha schist belt. *Journal of African Earth Sciences* 33, 211–225.
- Cady, J. W. (1980).** Calculation of gravity and magnetic anomalies of finite-length right polygonal prism. *Geophysics*, 45, 1507 – 1512.
- Castaing, C., Feybesse, J. L., Thieblemont, D., Triboulet, C., Chevrement, P. (1994).** Paleogeographical reconstructions of the Pan-African/Brasiliano orogen:

closure of an oceanic domain or intracontinental convergence between major blocks. *Precambrian Research* 69, 327-344.

Clark, D.A., et Emerson D.W. (1991). Notes on rock magnetisation characteristics in applied geophysical studies. *Exploration Geophysics* vol. 22, pp. 547-555.

Clark, D. A. (1997). Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys, *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2), 83-103.

Clifford, T. N. (1970). The structural framework of Africa. In Clifford and Gass I. G. (Eds). *African Magmatism and Tectonics*. Oliver & Boyds, Edinburgh: 1-26.

Cooper, G. R. J. (2003). Grav2dc. 2.10. An interactive Gravity Modeling Program for Microsoft Windows, School of Geosciences University of the Witwatersrand, Johannesburg 2050 South Africa.

Cooper, G.R.J., (2009). Balancing images of potential field data. *Geophysics* 74, 17-20.

Cornachia, M. et Dars, R. (1983). Un trait structural majeur du continent africain : Les linéaments centrafricains du Cameroun au Golfe d'Aden. *Bulletin de la Société Géologique de France*. 25 (1), 101-109.

Cornacchia M. et Giorgi. (1986). Les séries précambriennes d'origine sédimentaire et volcano-sédimentaire de la République Centrafricaine. *Annale du Musée Royal de l'Afrique Centrale, Science-Géologie.*, 51 p.

Cordell L. & Grauch V.J.S. (1985). Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. In: Hinze W.J. (ed.) – *The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps*. Society Exploration. *Geophysics*, 181-197;

D

Déruelle, B., Moreau, C., Nkombou, C., Kambou, R., Lissom, J., Njonfang, E., Ghogumu, R.T. and Nono, A. (1991). The Cameroon Line: review. In A. B. Kmapunzu and R.T. Lubala (eds), *Magmatism in extensional structural settings*. Springer-Verlag, 274-327.

Diab, D. A. (2016). Apport de la gravimétrie à la connaissance de la région du Ouaddai (Est du Tchad) Thèse de Doctorat Ph.D, Université de Yaoundé I, 120 pages.

Dorbath, L., Dorbath, C., Fairhead, J. D. and Stuart, G. W. (1986). A tele seismic delay time study across the Central African Shear Zone in the Adamawa region of Cameroon, West Africa. *Geophysical Journal Royal Astronomical Society* 86, 751-766.

Dumont, J.F., Toteu, S. F., et Penaye, J. (1985). Ensembles structuraux et principales phases de déformations panafricaines dans la zone mobile du Nord Cameroun, Région de Poli. *Revue des Sciences et Techniques, Série Sciences de la Terre, Yaoundé*, 1, 9-23.

Dumont, J.F. (1986). Identification par télédétection de l'accident de la Sanaga (Cameroun). Sa position dans les grands accidents d'Afrique Centrale et de la limite Nord du Craton du Congolais. *Géodynamique*, 1(1), 13-19.

Dumont J. F. (1987). Etude structurale des bordures Nord et Sud du plateau de l'Adarnaoua : influence du contexte atlantique. *Géodynamique* 2 (1), 55-68.

E

El Goumi, N., Jaffal. M., Kchikach. A., Manar. A. (2010). Contribution of the gravimetry to the structural study of the Haouz (Morocco). *Estudios Geologicos*. 66 (2), 181-191.

Eno Belinga, S.M. (1984). *Géologie du Cameroun*. Librairie Universitaire de Yaoundé, République Unie du Cameroun. 307 pages.

F

Fairhead, J. D. and Okereke, C. S. (1988). Depth to major density contrast beneath the West African rift system in Nigeria and Cameroon based on the spectral analysis of gravity data. *Journal of African Earth Sciences*, 7, 769 – 777.

Feumoe. A. N. S., Ndougsa Mbarga. T., Manguelle-Dicoum. E., Derek-Fairhead. J. (2012). Delineation of tectonic lineaments using aeromagnetic data for the South-East Cameroon area. *Geofizika*, 29, 175-192 ;

Feumoe, S. N. (2014). Apport des filtrages et inversions 2D1/2 des anomalies aéromagnétiques dans la détermination des accidents tectoniques majeurs au Sud-Est Cameroun. Thèse de Doctorat Ph.D ès sciences, Université de Yaoundé I, Fac. Sciences, 143 pages.

Feybesse J.L., Johan V., Maurizot ,P. & Abessolo A. (1987). Evolution tectonométamorphique libérienne et eburnéenne de la partie NW du craton zairois (SW Cameroun). In *Current Research in African Earth Sciences*, Matheis & Schandelmeier (eds), Balkema, Rotterdam, 9-12.

G

Gaffney, C. (2008). Detecting trends in the prediction of the buried past, *Review of Geophysical Techniques in Archeology, Archaeometry*, 50 (2), 313-336.

Ganwa, A.A., Frisch, W., Siebel, W., Shang, C.K., Mvondo Ondoa, J., Satir, M., Tchakounte, N.J. (2008). Zircon $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ evaporation ages of panafrikan metasedimentary rocks in the Kombe-II area (Bafia Group, Cameroon): Constraints on protolith age and provenance. *Journal of Africa Earth Sciences* 51, 77-88.

Gavazzi, B. (2015). Méthode magnétique multi-échelle à trois dimensions appliquée à l'étude archéologique du site de Qasr Allam, oasis de Bahariya, Egypte. Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, spécialité Géophysique Archéologie, 229 pages.

Gazel. J., Gérard. G. (1954). Notice explicative sur la feuille Batouri-Est. Direction des Mines. Cameroun, Yaoundé, 43 pages.

Gazel. J. (1955). Notice explicative sur la feuille Batouri-Ouest. Direction des Mines. Cameroun, Yaoundé, 44 pages.

Gazel, J., Houreq, C.Q.V, et Nickles, M. (1956). Notice explicative de la carte géologique au 1/1.000.000 du Cameroun. Bulletin Direction des Mines et de la Géologie Cameroun, 2, 62 Pages.

Genick, G. J. (1992). Regional framework, structural and petroleum aspects of rift basins in Niger, Chad and the Central African Republic (C.A.R.). Tectonophysics, 213, 169-185.

Gibson, R. I. and Millegan, P. S. (1998). Geology applications of gravity and magnetic: Case histories. Society of Exploration Geophysicist, 171 pages.

Goodwin, A. M. (1988). Aspect of Precambrian cyclic growth in the Atlantic region. Journal of African Earth Sciences, 7, 499-505.

Gouet, D. H., Ndougsa Mbarga, T., Meying, A., Assembe, S. P., Man-Mvele Pepogo, A. P. (2013). Gold Mineralization Channels Identification in the Tindikala-Boutou Area (Eastern-Cameroon) Using Geoelectrical (DC & IP) Methods: A Case Study. International Journal of Geosciences, 4, 643-655.

Gunn, P.J (1975). Linear Transformation of Gravity and Magnetic Fields. Geophysical Prospecting, 23 (2), 300-312.

K

Kennedy, W.Q. (1964). The structural differentiation of Africa in the Pan-African (500 m. y) tectonic episode 8th Annual Report of Research Institute of African Geology, University. Leeds: 48.

Keating, P., Pilkington, M., (2004). Euler Deconvolution of the analytic signal and its application to magnetic interpretation. *Geophysics. Prospect.* 52, 165-182.

Koumetio F., Njomo D., Tabod C.T., Noutchogwe T.C. and Manguelle-Dicoum E (2012). Structural interpretation of gravity anomalies from the Kribi–Edea zone, South Cameroon: a case study. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9: 664–673.

Khattach D., Keating P., Mili E.M., Chennouf T., Andrieux P & Milhi A. (2004). Apport de gravimétrie à l'étude de la structure du basiffa (Maroc nord-oriental) : implications hydrogéologiques. *Géoscience*, 336, 1427-1432.

Khattach D., Mraoui, H.D., Sbilih, T., Chennouf. (2006). Analyse multi-échelle par ondelettes des contacts géologiques : application à la gravimétrie du Maroc nord-oriental, *C. R. Géoscience*, 338, 521–526.

L

Lasserre, M., Soba, D. (1979). Migmatization d'âge panafricain au sein des formations Camerounaises appartenant à la zone mobile d'Afrique Centrale. *Compte Rendu Sommaire Société Géologique de France* 2, 64-68.

Liegeois, J.P., Latouche, L., Boughara, M., Navez, J., Guiraud, M. (2003). The Latea metacraton, (central Hoggar, Tuareg shield, Algeria): behaviour of an old passive margin during the Pan-African orogeny. *Journal of African Earth Sciences* 37, 161-190.

Lowrie, W. (2007). *Fundamentals geophysics*, second Edition, Cambridge University Press, 381 pages.

M

Manguelle-Dicoum, E. (1988). Etude géophysique des structures superficielles et profondes de la région de Mbalmayo (Cameroun). Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences, Spécialité Géophysique, Université de Yaoundé, 202 pages.

Manguelle-Dicoum, E., Bokosah, A.S., and Kwende-Mbanwi, T.E. (1992). Geophysical evidence for a major Precambrian Schist-Granite boundary in southern Cameroon. *Tectonophysics*, 205, 437-446.

Maurizot, P., Abessolo, A., Feybesse, J., Johan, L. & Lecomte, P. (1986). Etude et prospection minière du Sud-Ouest du Cameroun. Synthèse des travaux de 1978 à 1985. Rapport BRGM CMR 066, 274 pages.

Mbom-Abane, S. (1997). Investigation géophysique en bordure du Craton du Congo (région d'Abong-Mbang / Akonolinga, Cameroun) et implications structurales. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences, Université de Yaoundé I, 187 pages.

Meert J.G., Lieberman B.S. (2007). The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran–Cambrian radiation; *Gondwana Research*, 14, 5–21.

Meying, A. Ndougsa-Mbarga, T. and Manguelle-Dicoum, E. (2009). Evidence of fractures from the image of the subsurface in the Akonolinga-Ayos area (Cameroun) 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.

Meying, A. (2011). Investigations crustales profondes et superficielles par la méthode audio-magnétotellurique (AMT) dans la région Ayos-Nguelendouka (Cameroun). Thèse de Doctorat Ph.D ès sciences, Université de Yaoundé I, 139 pages.

Meying, A., Ndougsa Mbarga, T., Gouet, D., Assembe, S.P. (2013). Near surface fractures evidence from Audio-Magnetotelluric (AMT) investigation in

Ayos-Nguelemdouka area (Eastern Cameroon). *International Journal of Geosciences*, 4, 480-493.

Miller, H.G and Singh, V. (1994). Potential field tilt- a new concept for location of potential field sources. *Journal of applied Geophysics*, 32, 213-217.

Minyem, D., Njounde, E. S., Nédélec, A. (1987). Métamorphisme et déformation dans le secteur d'Obout (bordure méridionale de la zone mobile panafricaine au Sud-Est de Yaoundé). *Annuaire Facultés des Sciences*, 3(4), 93-101.

Minyem, D. et Nédélec, A. (1990). Origin and evolution of the Eseka gneisses (Cameroon) Archean TTG reworked in the Pan-African Mobile Belt. *Géologie Africaine. Nancy-Etudes récentes sur la géologie de l'Afrique, CIFEG*, 2(15), 21-24.

Minyem, D. (1990). Contribution à l'évolution métamorphique et structurale du secteur d'Eseka-Makak (Cameroun, Département du Nyong et Kellé). Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Yaoundé I, 166 pages.

Mork, M. B. E., Mc Enroe, S. A. and Olesen, O. (2002). Magnetic susceptibility of Mesozoic and Cenozoic sediments off Mid Norway and the role of siderite: Implications for interpretation of high-resolution aeromagnetic anomalies *Mar. Petrology and Geology*, 19, 1115–1126.

Muzaffer, Ö., Ünal, D. (2013). Edge Detection of Magnetic Sources Using Enhanced Total Horizontal Derivative of the Tilt Angle. *Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University, Yerbilimleri*, 34 (1), 73-82.

Mvondo, H. Owona, S. Mvondo-Ondoa, J. Essono, J. and Yene-Atangana, J. Q. (2007a). Comment on U-Pb dating of plutonic rocks involved in the nappe tectonic in southern Cameroon: consequence for the Pan-African orogenic evolution of the Central African fold belt, *Journal of African Earth Sciences*, 44, 479-493.

Mvondo, H. Owona, S. Mvondo-Ondoa, J. and Essono, J. (2007b). Tectonic evolution of the Yaoundé segment of the Neoproterozoic Central African Orogenic Belt in southern Cameroon, *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 44, 433-444.

N

Nabighian, M. N. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*, 37: 507-517.

Nabighian, M. N. (1974). Additional comments on the analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section, *Geophysics*, 39, 85-92.

Nabighian, M. N. (1984). Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations, *Geophysics*, 49: 780-786.

Ndougsa Mbarga, T. Manguelle-Dicoum, E. Tabod, C.T. and Mbom-Abane, S. (2003). Modélisation d'anomalies gravimétriques dans la région de Mengueme-Akonolinga (Cameroun), *Science, Technologie et Développement*, 10, 67-74.

Ndougsa Mbarga, T. (2004). Etude géophysique par méthode gravimétrique des structures profondes et superficielles de la région de Manfé. Thèse de Doctorat Ph.D, Université de Yaoundé I, 265 pages.

Ndougsa Mbarga, T., Njilah, I.K. Nni, J. and Nana, J. (2010). Note on the review of Earthquakes on Cameroon Territory, *Journal of Civil Protection*, Ministry of Territorial Administration, 3, 65-67.

Ndougsa Mbarga, T., Meying, A., Bisso, D., Layu D., Y., Sharma K.K. and 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 Geophysics Union*, 15(3), 145-159.

Ndougsa Mbarga, T., Feumoe, A. N., Eliezer Manguelle-Dicoum, E., James Derek Fairhead, J. (2012). Aeromagnetic Data Interpretation to Locate Buried Faults in South-East Cameroon. *Geophysica*, 48(1–2), 49–63;

Nedelec, A., Macaudiere, J., Nzenti, J.P., Barbey, P. (1986). Evolution structurale et métamorphisme des schistes de Mbalmayo (Cameroun). Information pour la structure de la zone mobile panafricaine d’Afrique Centrale au contact du Craton du Congo. *Comptes rendus Académie des Sciences, Paris*, 303(2), 75-80.

Nedelec, A., Minyem, D and Barbey, P. (1993). High-P-High-T anatexis of Archean tonalitic grey gneisses: the Eseka migmatites, Cameroon. *Precambrian Research*, 62, 191-205.

Ngako, V. (1986). Evolution métamorphique et structurale de la bordure Sud-Ouest de la « série de Poli » : segment camerounais de la chaîne Panafricaine. *Mémoires et documents du CAESS 5*, 185 pages.

Ngako, V., Jegouzo, P. and Nzenti, J. P. (1991). Le cisaillement Centre Camerounais. Rôle structural et géodynamique dans l’orogénèse panafricaine. *Compte Rendu Académie des Sciences, Paris*, 313 (2), 457-463.

Ngako, V. (1999). Les déformations continentales Panafricaines en Afrique Centrale : résultat d’un poinçonnement de type himalayen. Thèse de Doctorat d’Etat, Université Yaoundé I, 299 pages + annexes.

Ngako, V., Affaton, P., Nnangue, J.M., Njanko, T. (2003). Pan-African tectonic evolution in central and Southern Cameroon: transpression and transtension during sinistral shear movements. *Journal of Africa Earth Sciences*. 36, 207–214.

Ngako V. (2007). Geology and mineral resources. In *Atlas of Cameroon* (eds. N. Houstin and C. Seignobos), Les Éditions Jeune Afrique, Paris, 60-61.

- Ngako, V., Affaton, P., Njonfang, E., (2008).** Pan-African tectonics in northwestern Cameroon: Implication for history of western Gondwana. *Gondwana Research*, 14, 509-522.
- Njanko, T. (1999).** Les granitoïdes calco-alcalinsyn-cisaillement de la région de Tibati (Domaine central de la chaîne Panafricaine). Leur signification géodynamique par rapport à la tectonique Panafricaine. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université Yaoundé I, 158 pages + annexes.
- Noutchogwe, C., Tabod, C. and Manguelle-Dicoum, E. (2006).** A gravity study of the Crustal beneath the Adamawa Fault Zone, West Central Africa. *Journal of Geophysics and Engineering*, 3, 82-89.
- Nzenti, J. P., Barbey, P., Jegouzo, P., Moreau, C. (1984).** Un nouvel exemple de ceinture granulitique dans une chaîne protérozoïque de collision : les migmatites de Yaoundé au Cameroun. *Compte Rendu Académie des Sciences Paris* 299, 1197-1199.
- Nzenti, J.P. (1987).** Pétrogenèse des migmatites de Yaoundé (Cameroun) : éléments pour un modèle géodynamique de la chaîne panafricaine Nord Equatoriale. Thèse de Doctorat Université de Nancy I, 147 pages.
- Nzenti, J.P., Barbey, P., Macaudiere, J., Soba. (1988).** Origin and evolution of the late Precambrian high-grade Yaoundé gneisses (Cameroon). *Precambrian Research*, 38, 91-109.
- Nzenti, J. P., Ngako, V., Kombou, R., Penaye, J., Bassahak J. and Njel, O. U. (1992).** Structures régionales de la Chaîne Panafricaine du Nord Cameroun. *Compte Rendu Académie des Sciences, Paris*, 315 (2), 209-215.
- Nzenti, J.P., Barbey., Bertrand, J.M.L, P., Macaudiere, J. (1994).** La Chaîne Panafricaine au Cameroun : Cherchons suture et modèle. In : S.G.F. Edition. 15^{ème} réunion des Sciences de la Terre, Nancy, France, 99 pages.

Nzenti, J. P. (1998). Neoproterozoic alkaline meta-igneous rocks from the Pan-African North Equatorial Fold belt (Yaoundé, Cameroon): biotite and magnetite rich pyroxenites. *Journal of African Earth Sciences* 26, 37-47.

Nzenti, J. P., Njiosseu, E. L. T., Nzina, N. A. (2007). The metamorphic evolution of the Paleoproterozoic high grade Banyo Gneisses (Adamawa, Cameroon, Central Africa). *Journal of African Earth Sciences*, 7(2), 95-109.

O

Okereke, C. S. (1988). Contrasting modes of rifting: the Benue trough and the Cameroon volcanic line, West Africa. *Tectonics*, 7, (4), 775-784.

Oliveira E.P., Toteu S.F., Araujo M.N.C., Carvalho M.J., Nascimento R.S, Bueno J.F., McNaughton N., Basilici G. (2006). Geologic correlation between the Neoproterozoic Sergipano belt (NE Brazil) and the Yaounde belt (Cameroon, Africa), *Journal of Africa Earth Sciences*. 44, 470–478.

Olinga, J. B. Mpesse, J. E. Minyem, D. Ngako, V. Ndougsa-Mbarga, T. and Ekodeck, G. E. (2010). The Awaé-Ayos strike-slip shear zones (Southern-Cameroon): Geometry, kinematics and significance in the late Panafrican tectonics, *Nueus Jahrebrück Geologische Paläont. Abh*, 257(1), 1-11.

Owono Amougou, O. U. I., Ndougsa-Mbarga T., Meying A, Assembe, S. P, Ngoh., J. D, Ngoumou., P. C, Yandjimain, J. (2019). Evidence of major structural features over the Panafrican domain in the Bertoua-Mbangue area (East Cameroon) from a multiscale approach of modeling and interpretation of aeromagnetic data. *International Journal of Geophysics*, 12 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/9148678>;

P

Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J.K. (2008). An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008. Presented at the EGU General Assembly, Vienna Austria, April, 13-18.

Paterson, Grant and Watson Ltd. (1976). Aeromagnetic study on certain regions of the Republic of Cameroon. Interpretation report. Canadian International Development Agency. Toronto, Canada, 192 pages.

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 panafricaine. Thèse de Doctorat, Université de Nancy, 196 pages.

Penaye, J., Toteu, S. F., Michard, A., Bertrand, J.M., et Dautel, D. (1989). Reliques granulitiques d'âge protérozoïque inférieur dans la zone mobile d'Afrique Centrale au Cameroun ; Géochronologie U-Pb sur zircons. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 309, 315-318.

Penaye, J., Toteu, S. F., Van Schmus, W. R., Nzenti, J. P. (1993). U-Pb and Sm-Nd preliminary geochronologic data on the Yaoundé Series, Cameroon: re-interpretation of the granulitic rocks as the suture of a collision in the 'Centrafrican' belt. Comptes Rendus Académie des Sciences Paris, 317, 789-794.

Penaye, J., Toteu, S.F., Tchameni, R., VanSchmus, W.R., Tchakounte, J., Ganwa, A., Minyem, D., Nsifa, E.N. (2004). The 2.1 Ga West Central African Belt in Cameroon: extension and evolution. Journal of African Earth Sciences 39, 159–164.

Penaye J., Kröner A., Toteu S.F., Van Schmus W.R., Doumnang Mbaiggane J.C. (2006). Evolution of the Mayo Kebbi region as revealed by zircon dating: an early (ca. 740 Ma) Pan-African magmatic arc in Southwestern Chad. Journal of African Earth Sciences, 44, 530-542.

Pin, C., Poidevin, J.L. (1987). U-Pb zircon evidence for a Pan-African granulite faciès metamorphism in the Central Africa Republic. A new interpretation of

high-grade series of the Northern border of the Congo Craton. *Precambrian Research* 36, 303-312.

Pinna, P., Calvez, J.Y., Abessolo, A., Angel, J.M., Mekoulou-Mekoulou, T., Mananga, G., and Vemhet, Y. (1994). Neoproterozoic events in the Tcholliré area: Pan-African Crustal growth and geodynamics in Central-Northern Cameroon (Adamawa and North Provinces). *Journal of African Earth Sciences*, 18, 347-353.

Phillips, J.D. (1998). Processing and Interpretation of Aeromagnetic Data for the Santa Cruz Basin- Patahonia Mountains Area, South-Central Arizona: U.S. Geological Survey Open-File Report 02-98.

Poidevin, J. L. (1985). Le Protérozoïque Supérieur de la République Centrafricaine. *Mus. Roy. Afrique Centrale. Tervuren (Belgique), Annuaire. Série n°8, Sciences Géologie*, 91, 75 p.

Poucllet, A., Vidal, M., Doumnang, J.C., Vicat, J.-P., Tchameni, R. (2006). Neoproterozoic evolution in the Southern Chad: Pan-African ocean basin closing, arc accretion and late- to post-orogenic granitic intrusion. *Journal of African Earth Sciences* 44, 543-560.

Poudjom Djomani Y.H. (1993). Apport de la gravimétrie à l'étude de la lithosphère continentale et implications géodynamiques. Etude d'un bombement intraplaque : le massif de l'Adamaoua (Cameroun). Thèse de doctorat, Université de Paris XI Orsay, 229 pages.

R

Radhakrishna I. V. and Krishnamacharyulu S. K. G. (1990). Polyfit: A Fortran 77 Program to fit a Polynomial of any order to Potential Field Anomalies. *Journal- Association of Exploration. Geophysicists*, 11(2): 99-105.

Rasmussen, R., and L.B. Pedersen., (1979) End Corrections in Potential Field Modeling: *Geophysical Prospecting*, 27, 749-760.

- Rasolomanana, E., Andriamirado, L. C., Randrianja, R., Ratefiarimino, A. (2010).** Analyse et interprétation des données aéromagnétiques et spectrométriques de la région d'Andriamena. *Madamines*, 1, 1-14;
- Reeves, C (2005).** Aeromagnetic surveys, Principles, practice and interpretation. Published by Geosoft, 155 pages.
- Regnault, J. M. (1986).** Synthèse géologique du Cameroun. 119 pages.
- Reid, A. B., Allsop, J.M. Granser, H., Millett, A. J., and Somerton. I. W. (1990).** Magnetic interpretation in three dimensions using Euler Deconvolution: *Geophysics*, 55, 80-90;
- Rocci, G. (1965).** Essai d'interprétation des mesures géochronologiques. La structure de l'Ouest Africain. *Sciences de la Terre, France*, 10, 461-479 ;
- Roest W. R., Verhoef J., Pilkington M. (1992).** Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal, *Geophysics*, 57(1): 116–125.
- 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 (2), 467-470.
- Rolin. P. (1995).** La zone de décrochement panafricain des Oubanguides en République Centrafricaine. *Comptes Rendus Académie des Sciences*, 320(2A), 63-69.

S

-
- Salem, A., William, S., Fairhead, D., Smith, R., Ravat, D. (2008).** Interpretation of magnetic data using tilt angle derivatives, *Geophysics*, 73, 1-10.
- Shandini, N. Y., Tadjou, J. M., Tabod C. T. and Fairhead, J. D., 2010.** Gravity data interpretation in the Northern edge of the Congo Craton, South-Cameroon. *Anuário do Instituto de Geociências*, 33(1), 73 – 82.

Shandini, N.Y., Tadjou, J.M., Basseka, C.A. (2011). Delineating deep basement faults in South Cameroon area, *World Applied Sciences Journal*, 14 (4), 611-615.

Shandini, Y. and Tadjou, J.M. (2012). Interpreting gravity anomalies in South Cameroon, Central Africa. *Earth Sciences Research Journal*. 16 (1), 5 – 9.

Soba, D. (1989). La série du Lom: étude géologique et géochronologique d'un bassin volcano-sédimentaire de la chaîne panafricaine à l'Est du Cameroun. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 198 pages.

Stuart G. W., Fairhead J. D., Dorbath L., Dorbath C. (1985). A seismic refraction study of the crustal structure associated with the Adamawa plateau and Garoua rift, Cameroon, West Africa. *Geophysics. J. R. Asti. Soc* 81, 1- 12.

Suh C. E., Lehmann B., and Mafany G. T. (2006). Geology and geochemical aspects of lode gold mineralization at Dimako-Mboscorro, SE Cameroon. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 6(4), 295-309.

T

Tabod, C. T., Fairhead, J. D., Stuart, G. W., Ateba, B. and Ntepe N. (1992). Seismicity of the Cameroon Volcanic Line, 1982-1990. *Tectonophysics*, 212, 303– 320.

Tadjou, J. M.; Manguelle-Dicoum, E.; Tabod, C. T., Nouayou, R., Kamguia, J., Njandjock, N. P. and Ndougsa, M. T. (2004). Gravity modelling along the Northern margin of the Congo craton, South-Cameroon, *Journal. Cameroon Académie des Sciences*, 4, 51–60.

Talwani, M. and Heirzler, J. R. (1964). Computation of magnetic anomalies caused by two-dimensional bodies or arbitrary shape. *Computers in the mineral industry*, School of Earth Sciences, Standford University, 210 pages.

Tanko Njiosseu, E. L., Nzenti, J.P., Njanko, T., Kapajika, B., Nedelec, A., (2005). New U-Pb Zircon ages from Tonga (Cameroon): Coexisting Eburnean

Transamazonian (2.1 Ga) and Pan-African (0,6 Ga) imprints. *Compte Rendu Géosciences*, 337, 551-562 ;

Tchouankoué, J.P. (1992). La syenite de Bangangté: un complexe panafricain à caractère intermédiaire. *Pétrologie-Géochimie*. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Yaoundé I, 160 pages.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sherriff, R.E., Keys, D.A. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University. Press, Cambridge, 860 pages.

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff, R.E., (1998). *Applied Geophysics*, second edition, Cambridge University Press, 770 pages.

Theunissen, K., Lenoir, J.L., Liegeois, J.P., Delvaux, D., Murma, A. (1992). Empreinte Panafricaine majeure dans la chaîne rubendienne de Tanzanie sud occidentale : géochronologie U-Pb sur zircon et contexte structural. *Compte Rendu Académie des Sciences Paris* 314: 1355-1362.

Thompson D.T. (1982). A new technique for making computer-assisted depth estimates from Magnetic data. *Geophysics*, 47, 31-37;

Toteu, S.F., Penaye, J. and Djomani Poudjom, Y. (2004). Geodynamic evolution of the Pan-African Belt in Central Africa with special reference to Cameroon. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 41, 73-85.

Toteu, S.F., Dumont, J.F., Bassahak, J., Penaye, J. (1984). "Complexes de base" et "séries intermédiaires" dans la zone mobile panafricaine de la région de Poli au Cameroun. *C. R. Académie des Sciences Paris* 299, 561-564.

Toteu, S.F., Michard, A., Bertrand., Rocci, G. (1987). U/Pb of Precambrian rock from North Cameroon, Orogenic evolution and chronology of the Pan-African belt of Central African. *Precambrian Research*, 37, 71-87.

Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., Penaye, J., 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.

Trompette R. (1994). Geology of Western Gondwana (1000–600 Ma), Balkema, Rotterdam, 350 pages.

Trompette, R. (2000). Gondwana evolution; its assembly at around 600 Ma. Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris 330, 305–315.

Trompette, R. (1996). Neoproterozoic (600 Ma) aggregation of Western Gondwana. A tentative model, Precambrian Res. 82 (1996) 101–112.

V

Vairon, J., Edimo, A., Simeon, Y., Vadala, P. (1986). Protocole d'accord pour la recherche des minéralisations d'or dans la région aurifère de l'Est Cameroun. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Direction des Mines et de la Géologie, République du Cameroun, 251 pages.

Vanié, L. T. A., Khattach D., Houari M. R. (2005). Apport des filtrages des anomalies gravimétriques à l'étude des structures profondes du Maroc oriental. Bulletin Institut des Sciences de Rabat, section Sciences de la Terre, 27, 29-40.

Verduzco, B., Fairhead, J.D, Green, C.M, Mackenzie, C. (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. The Leading Edge, SEG February, 116-119.

Visweswara Rao, C., Chakravarthi, V. and Raju, M. L. (1994). Gravity modeling of an interface above which the density contrast decreases hyperbolically with depth. Geophysics, 34, 63 – 67.

Vicat, J.P. (1998). Esquisse géologique du Cameroun. Géosciences au Cameroun. GEOCAM, 1, 3–11.

W

Won, I.J., and M. Bevis. (1987). Computing the Gravitational Magnetic Anomalies due to a Polygon: Algorithm and FORTRAN Subroutines. Geophysics, 52, 232-238.

Y

Yandjimain, J., Ndougsa Mbarga, T., Meying, A., Marcelin Bikoro Bi-Alou, M., Ngoumou, P. C., Assembe, S. P., Ngoh, J. D, Owono Amougou, O. U. I. (2017). Combination of Tilt-Angle and Euler Deconvolution Approaches to Determine Structural Features from Aeromagnetic Data Modeling over Akonolinga-Loum Area (Centre-East, Cameroon). *International Journal of Geosciences*, 8, 925-947.

Z

Zanga Amougou, A., Ndougsa Mbarga, T., Meying. A., Layu Yufenyu. D., Bikoro Bi Alou. M., Manguelle Dicoum. E. (2013). 2.5 D Modeling of crustal structures along the Eastern Cameroon and Western Central African Republic derived from finite element and spectral analysis methods, *Geophysica*, 49(1-2), 75-97.