

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix- Travail- Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
SCIENCES TECHNOLOGIE ET
GEOSCIENCES

UNITE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE
PHYSIQUE ET APPLICATIONS

B.P 812 Yaoundé

Email : crfd_stg@uy1.uninet.cm



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace- Work- Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCE TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES

RESEARCH AND POSTGRADUATE
TRAINING UNIT FOR PHYSICS
AND APPLICATIONS

P.O Box 812 Yaoundé

Email : crfd_stg@uy1.uninet.cm

Laboratoire de Physique de l'Environnement Terrestre

Laboratory of Earth's Environment Physics

**CONTRIBUTION DE LA GEOPHYSIQUE A
L'INVESTIGATION STRUCTURALE ET TECTONIQUE
SUPERFICIELLE ET PROFONDE DU CAMEROUN :
AFRIQUE CENTRALE**

Thèse présentée et soutenue en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat / PhD en Physique

Option : Géophysique et Géoexploration

Par :

CHEUNTEU FANTAH Cyrille Armel

Master en Physique

Matricule : 12W1774

Sous la direction de :

NGUIYA Séverin

Maître de Conférences

Université de Douala

NOUAYOU Robert

Professeur

Université de Yaoundé 1



Année académique: 2022 - 2023

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I

FACULTÉ DES SCIENCES

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

B.P.: 812 Yaoundé, Tel/Fax: 222 234 496



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace-Work-Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDÉ I

FACULTY OF SCIENCE

DEPARTMENT OF PHYSICS

P.O. Box: 812 Yaoundé, Tel/Fax: 222 234 496

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

Nous, Professeur **NJANDJOCK NOUCK Philippe** et Professeur **TABOD Charles Tabod**, respectivement Examineur et Président du jury de la thèse de Doctorat/Ph.D de Monsieur **CHEUNTEU FANTAH Cyrille Armel**, matricule 12W1774, préparée sous la co-direction du Professeur **NOUAYOU Robert** et du Professeur **NGUIYA Sévérin** intitulée : «**CONTRIBUTION DE LA GEOPHYSIQUE A L'INVESTIGATION STRUCTURALE ET TECTONIQUE, SUPERFICIELLE ET PROFONDE DU CAMEROUN : AFRIQUE CENTRALE**», soutenue le **Mardi 9 Mai 2023**, 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.

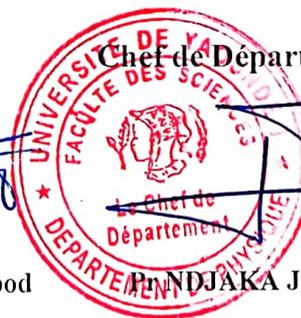
Fait à Yaoundé le... **22 JUIN 2023**

Examineur

Pr NJANDJOCK NOUCK Philippe

Président du jury

Pr TABOD Charles Tabod



Pr NDJAKA Jean-Marie Bienvenu

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mon père TIABOU FANTAH Pierre,

Ma maman chérie NGUEPLEU Pauline

ainsi qu'à tous mes frères et sœurs.

Remerciements

L'élaboration de ce travail de thèse a été rendue possible grâce au soutien des uns et des autres. L'occasion m'est ici offerte afin de leur exprimer en toute sincérité ma gratitude.

Ainsi, je tiens tout d'abord à remercier le **Professeur NOUAYOU Robert** pour avoir accepté de superviser ce travail. Ses remarques et conseils exceptionnelles avisés ont apporté un climat favorable à ma recherche. Huit années passées d'échange depuis le Master avec lui ont sans doute permis que je puisse bénéficier de ses qualités d'homme de Science, son grand humanisme et son affection paternelle.

Je remercie particulièrement le **Professeur NGUIYA Sévérin**, pour avoir accepté de diriger ce travail de thèse et de m'initier à la recherche dans le cadre de mes travaux de Master. Je le remercie pour cette confiance qu'il m'a accordée tout au long de mes travaux. Nos séances de discussions scientifiques ont été très enrichissantes et suffisamment efficaces pour la finalisation de cette thèse. Sa grande disponibilité, ses conseils avisés, son suivi et ses encouragements ont été pour moi sources d'inspiration et je lui en suis profondément reconnaissant.

Je remercie le **Professeur Emérite MANGUELLE-DICOUM Eliézer** qui m'a accueilli au Laboratoire de Géophysique. Nos échanges et ses conseils m'ont aidé tout au long de ce travail de recherche ; je lui en suis profondément reconnaissant.

Je remercie le **Professeur RANDRIANJA Roger** Vice-Président de l'Université d'Antananarivo pour les échanges que nous avons eus dans le cadre de ce travail, ces motivations et conseils m'ont beaucoup aidé pour finaliser ce projet de thèse.

Je suis profondément reconnaissant vis-vis du **Pr NJANDJOCK NOUCK Philippe** pour ses enseignements, ses conseils et son encouragement depuis mon arrivée au Laboratoire de Géophysique et Géoexploration.

J'adresse toute ma reconnaissance au **Pr KOFANE Timoléon Crépin** et au **Pr OWONA ANGUE Marie- Louise** qui ont été mes enseignant(e)s en Master pour leurs conseils avisés et les enseignements qu'ils m'ont transmis.

Je tiens également à remercier le **Pr TABOD Charles TABOD** pour ses enseignements, ses orientations, ses conseils scientifiques au sein du Laboratoire de Géophysique et Géoexploration.

Je tiens à remercier le **Pr MOUANGUE Ruben** Directeur de l'ENSPD pour son soutien financier et pour m'avoir prodigué les conseils au regard de ce travail.

Je tiens à remercier le **Dr TOKAM KAMGA Alain Pierre** pour sa disponibilité, ses conseils et ses remarques, ses critiques et sa vision apportées dans ce travail m'ont permis de mieux le structurer.

Je ne saurais oublier le **Dr MOUZONG Pemi Marcelin** pour avoir su apporté des remarques et son intervention dans mes projets d'article pour ce travail et aussi pour son soutien financier.

J'adresse un grand merci au **Dr NGATCHOU Evariste** pour tous les conseils, la pédagogie, la rigueur, la disponibilité et les interventions au regard de ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance au **Dr NJANKOUO Yves Shandini** pour m'être venu en aide dans ce travail ; nos échanges m'ont beaucoup aidé à finaliser cette recherche.

Je suis profondément reconnaissant au **Dr Diab Ahmad Diab** du Tchad pour les différents échanges que nous avons eu lors de son séjour au Cameroun dans le cadre de ce travail car il m'a toujours apporté son soutien physique, moral et intellectuel.

Que le **Dr MEZOUÉ Cyrille Adiang** trouve ici l'expression de ma gratitude pour son soutien et le temps qu'il a consacré à la lecture de ce travail ; ses remarques ont été d'une grande utilité.

Je remercie tout le personnel enseignant du Département de Physique de l'Université de Yaoundé 1 pour les enseignements transmis, sans oublier le **Pr VONDOU DEBERTINI Appolinaire** pour ses enseignements et ses conseils scientifiques au regard de ce travail.

Je tiens à remercier également les enseignants de la Faculté des Sciences de l'Université de Douala pour les enseignements qu'ils m'ont transmis tout le long de mon cursus de formation en cycle Licence, qui ont été pour moi une source de connaissance très enrichissante, en particulier le **Pr LENOUE André** pour ses conseils et orientations avisés.

Les mots me manquent pour exprimer ma profonde reconnaissance à mes grands frères **MONKAM FANTAH Emmanuel** et **TIEMEBOU Martial** pour leur orientation, leur soutien moral et spirituel tout au long de mon parcours universitaire. Je leur adresse mes sincères remerciements.

Je ne saurais finir sans remercier mes oncles **Ing. SITCHEPING Justin** et le colonel **TEMTCHE Roger** pour leur soutien moral et leur aide financière qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Mes remerciements vont à mes camarades de promotion pour nos discussions animées, et leurs multiples encouragements à mon égard.

Ma reconnaissance va enfin à tous ceux qui ne sont pas cités ici, mais qui ont manifesté leur disponibilité pour l'achèvement de ce travail ; qu'ils ne se sentent pas oubliés.

Table des matières

Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Table des matières.....	iv
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	xi
Index des abréviations et symboles.....	xii
Résumé.....	xv
Abstract.....	xvi
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Revue de la littérature et problématique.....	4
1.1. Présentation géographique de la zone d'étude.....	4
1.1.1. Situation géographique.....	4
1.1.2. Les grandes unités géomorphologiques.....	4
1.1.3. Réseaux routiers et ferroviaires du Cameroun.	6
1.1.4. Climat et végétation du Cameroun.....	8
1.1.5. L'hydrographie du Cameroun.....	8
1.2. Contexte géologique et tectonique	10
1.2.1. Le socle précambrien.....	10
1.2.2. Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale au Cameroun.....	11
1.2.3. Géodynamique de la Chaîne Panafricaine du Cameroun.....	15
1.2.4. Le Craton du Congo (CC).....	15
1.2.5. La Ligne Volcanique du Cameroun (LVC).....	16
1.2.6. Origine de la Ligne Volcanique du Cameroun.....	16
1.3. Travaux géophysiques antérieurs	17
1.4. Problématique	21
1.5. Objectifs de l'étude	23
1.5.1. Objectif principal.....	24
1.5.2. Objectifs spécifiques.....	24

1.6. Conclusion partielle	25
Chapitre 2 : Données, méthodes et matériel	26
2.1. Densités des roches	26
2.2. Susceptibilité magnétique	28
2.3. Données géophysiques	30
2.3.1. Données gravimétriques terrestres.....	30
2.3.2. Données du Modèle Gravitationnel Global (XGM2019e_2159).....	31
2.3.3. Données magnétiques.....	32
2.4. Anomalies des données géophysiques	32
2.4.1. Anomalies gravimétriques.....	32
2.4.2. Anomalies du champ magnétique.....	34
2.4.3. Représentation analytique du champ géomagnétique.....	35
2.5. Les méthodes d'analyse	37
2.5.1. Analyse géostatistique des données.....	38
2.5.2. Analyse qualitative des données	39
2.5.3. Analyse quantitative des données	42
2.6. Modélisation gravimétrique	46
2.6.1. Modélisation 2D et $2D^{1/2}$	46
2.7. Inversion des anomalies gravimétriques	46
2.8. Modèles des vitesses sismiques	47
2.9. Organigramme pour la méthodologie de l'étude.....	50
2.9.1. Organigrammes pour la cartographie des traits structuraux.....	50
2.9.2. Organigrammes pour l'inversion et la modélisation des anomalies gravimétriques.....	52
2.10. Conclusion partielle	53
Chapitre 3 : Résultats et discussion	54
3.1. Cartographie des anomalies de Bouguer et du champ magnétique total	54
3.2. Analyse qualitative et interprétation des données gravimétriques.....	61
3.2.1. Interprétation qualitative des anomalies de Bouguer.....	61
3.2.2. Transformation des anomalies gravimétriques.....	62
3.2.3. Cartographie des linéaments gravimétriques.....	68
3.3. Analyse qualitative et interprétation des données magnétiques	72

3.3.1. Interprétation qualitative des anomalies du champ magnétique total.....	72
3.3.2. Transformation des anomalies du champ magnétique total.....	73
3.3.3. Interprétation qualitative des anomalies du champ magnétique total réduit au pôle.....	75
3.3.4. Cartographie des linéaments magnétiques.....	80
3.4. Analyse quantitative et interprétation des données gravimétriques et magnétiques	84
3.5. Inversion 3D des anomalies gravimétriques.....	91
3.5.1. Choix de la grille des anomalies de Bouguer.....	91
3.5.2. Analyse du spectre de puissance des anomalies de Bouguer.....	92
3.5.3. Cartographie et validation des profondeurs moyennes du Moho estimées	94
3.5.4. Choix des profils d'inversion 3D et la modélisation $2D^{1/2}$	97
3.5.5. Paramètre du modèle initial de l'inversion 3D.....	99
3.5.6. Méthode d'inversion 3D des densités et analyse statistique	99
3.6. Modélisation gravimétrique des structures géologiques	104
3.6.1. Modèle gravimétrique $2D^{1/2}$ du profil 1.....	105
3.6.2. Modèle gravimétrique $2D^{1/2}$ du profil 2.....	106
3.6.3. Modèle gravimétrique $2D^{1/2}$ du profil 3.....	108
3.6.4. Modèles gravimétriques $2D^{1/2}$ des profils 4 et 5.....	109
3.7. Synthèse des résultats	112
3.7.1. Cartographie des accidents tectoniques.....	112
3.7.2. Modélisation gravimétrique $2D^{1/2}$	113
3.8. Discussion et validation des résultats.....	118
3.8.1. Structuration globale du sous-sol camerounais.....	118
3.8.2. Origine de la Ligne Volcanique du Cameroun.....	120
3.8.3. Inversion 3D des anomalies gravimétriques.....	122
3.9. Conclusion partielle	126
Conclusion générale et perspectives	127
Références bibliographiques	130

Liste des figures

Figure 1.1 : Carte topographique du Cameroun	6
Figure 1.2 : Carte routière et ferroviaire du Cameroun.	7
Figure 1.3 : Les grands cours d’eaux du Cameroun.	10
Figure 1.4 : Les grands ensembles structuraux du Cameroun.	12
Figure 1.5 : a) Supercontinent Gondwana ; b) La Chaîne Panafricaine d’Afrique Centrale : reconstitution géodynamique à l’échelle continentale ; c) Illustration des domaines panafricains du Cameroun	13
Figure 1.6 : Les Cratons d’Afrique ; A) les Cratons et Métacraton Précambrien d’Afrique ; B) carte tectonique de la Chaîne Orogénique de l’Afrique Centrale (COAC) et les éléments tectoniques environnants ; C) Carte géologique du Cameroun.	14
Figure 2.1 : Illustration des stations de mesures des données gravimétriques.	31
Figure 2.2 : Schéma des caractéristiques du champ magnétique principal.	35
Figure 2.3 : Représentation dans l’espace du vecteur champ d’anomalie magnétique.	37
Figure 2.4 : Modèle du block d’inversion 3D des densités.	47
Figure 2.5 : Modèles des vitesses de cisaillement des ondes sismiques a) à f) pour 18 stations localisées dans la région d’étude	49
Figure 2.6 : Organigramme du processus de cartographie des linéaments gravimétriques.....	50
Figure 2.7 : Organigramme du processus de cartographie des linéaments magnétiques.	51
Figure 2.8 : Organigramme du processus de modélisation des données avec GMSYS du logiciel GEOSOFT (phase I)	52
Figure 2.9 : Organigramme du processus de modélisation des données avec GMSYS du logiciel GEOSOFT (phase II).....	53
Figure 3.1 : Carte d’anomalies : a) Bouguer non maillée ; b) champ magnétique total de la région d’étude.....	55
Figure 3.2 : Illustration des variogrammes théoriques pour différents modèles d’interpolation appliqués aux variogrammes expérimentaux des données d’anomalies gravimétriques du Cameroun...56	
Figure 3.3 : Illustration des variogrammes théoriques pour différents modèles d’interpolation appliqués aux variogrammes expérimentaux des données d’anomalies magnétiques du Cameroun	56
Figure 3.4 : Illustration des anomalies de Bouguer de la région d’étude obtenues après interpolation des données gravimétrique in situ	58
Figure 3.5 : Illustration des anomalies du champ magnétique total de la région d’étude obtenue après	

interpolation.	59
Figure 3.6 : Illustration des anomalies de Bouguer du Modèle Gravitationnel Global (XGM 2019e_2159) de la région d'étude.	60
Figure 3.7: Illustration des anomalies de Bouguer de la zone d'étude ; a) données gravimétriques in situ ; b) Modèle Gravitationnel Global (XGM 2019e_2159).....	61
Figure 3.8 : Cartes des anomalies de Bouguer des données gravimétriques in situ respectivement PVH à 10, 30, 50, 80 et 100 km.	64
Figure 3.9 : Cartes de PVH des anomalies de Bouguer du Modèle Gravitationnel Global (XGM 2019e_2159) respectivement PVH à 10, 30, 50, 80 et 100 km	65
Figure 3.10 : Carte de gradient horizontal des anomalies de Bouguer de la région d'étude.	67
Figure 3.11 : Carte de gradient vertical des anomalies de Bouguer de la zone d'étude	67
Figure 3.12 : Illustration carte de superposition des maxima de gradient horizontal : a) des anomalies de Bouguer ; b) de la dérivée verticale du 1er ordre des anomalies de Bouguer.....	69
Figure 3.13 : Carte de la superposition des maxima de gradient horizontal des anomalies de Bouguer et la dérivée verticale du 1er ordre.	70
Figure 3.14 : Carte des linéaments gravimétriques du Cameroun.	71
Figure 3.15 : Illustration : a) des anomalies du champ magnétique total de la région d'étude ; b) topographie de la zone d'étude	73
Figure 3.16 : Carte d'anomalies du champ magnétique total : a) réduite au pôle ; b) réduite à l'équateur de la zone d'étude	74
Figure 3.17 : Cartes de PVH des anomalies du champ magnétique réduit à l'équateur.	77
Figure 3.18 : Carte de gradient horizontal des anomalies du champ magnétique réduit à l'équateur.....	79
Figure 3.19 : Carte de gradient vertical des anomalies du champ magnétique réduite à l'équateur.....	79
Figure 3.20 : Carte de superposition des maxima de gradient horizontal : a) de l'anomalie du CMT-RE ; b) du gradient vertical de l'anomalie du CMT-RE.....	81
Figure 3.21 : Carte de superposition des maxima de gradient horizontal des anomalies du champ magnétique réduit à l'équateur et gradient horizontal de la dérivée verticale du 1er ordre prolongés vers le haut aux altitudes de 5 km à 35 km à pas constants de 5 km.....	82
Figure 3.22 : Carte des linéaments magnétiques de la zone d'étude.	83
Figure 3.23 : Carte de déconvolution d'Euler des anomalies de Bouguer.	85
Figure 3.24 : Carte de déconvolution d'Euler des anomalies du champ magnétique réduit à l'équateur...	86
Figure 3.25 : Rose des diagrammes ; (a) orientation générale des linéaments gravimétriques de la zone d'étude ; (b) orientation générale des linéaments magnétiques de la zone d'étude ; (c) orientation des linéaments gravimétriques du Cameroun ; (d) orientation des linéaments	

magnétiques du Cameroun.....	89
Figure 3.26 : Carte structurale interprétative des accidents tectoniques de la zone d'étude.	90
Figure 3.27 : Illustration : a) anomalies de Bouguer du Cameroun ; b) anomalies de Bouguer pour la grille prise sur la LVC incluant la zone de transition et le CC ; c) carte topographique correspondant au choix de la grille.....	91
Figure 3.28: Illustration : a) anomalies de Bouguer du Cameroun ; b) anomalies de Bouguer présentant les subdivisions de la grille des données gravimétriques choisie ; c) carte topographique correspondant au choix de la grille subdivisée.....	92
Figure 3.29 : Spectre de puissance des anomalies gravimétriques pour une fenêtre de $1^\circ \times 1^\circ \approx (110 \text{ km} * 110 \text{ km})$ cas des grilles de 1 à 8.....	93
Figure 3.30 : Spectre de puissance des anomalies gravimétriques pour une fenêtre de $1^\circ \times 1^\circ \approx (110 \text{ km} * 110 \text{ km})$ cas des grilles de 9 à 16.....	93
Figure 3.31 : Carte de profondeur de la croûte couvrant la LVC et le CC.....	94
Figure 3.32 : Carte d'anomalies du Cameroun ; b) Carte des anomalies de Bouguer présentant les profils choisis prise sur la LVC incluant la zone de transition et le Craton du Congo ; c) Carte topographique correspondante de la grille des données et les profils choisis..	97
Figure 3.33 : Profils P1 à P5 respectivement pour les champs gravimétriques pris sur la LVC incluant le CC suivant la direction unique Nord - Sud.....	98
Figure 3.34 : Données gravimétriques prises sur la Ligne Volcanique du Cameroun et le Craton du Congo : a) Anomalies mesurées ; b) Anomalies calculées.....	100
Figure 3.35 : Histogramme des anomalies ; c) de Bouguer mesurées ; d) des anomalies de Bouguer calculées	100
Figure 3.36 : Illustration a) Carte de la différence entre anomalies calculées et mesurées ; b) Histogramme différences entre anomalies de Bouguer calculées et mesurées.	100
Figure 3.37 : Carte d'inversion des sections gravimétriques 2D du profil 1.	102
Figure 3.38: Carte d'inversion des sections gravimétriques 2D du profil 2.	102
Figure 3.39 : Carte d'inversion des sections gravimétriques 2D du profil 3	103
Figure 3.40 : Carte d'inversion des sections gravimétriques 2D du profil 4.....	103
Figure 3.41 : Carte d'inversion des sections gravimétriques 2D du profil 5.....	104
Figure 3.42 : Illustration de la modélisation gravimétrique $2D^{1/2}$ du profil P1.....	106
Figure 3.43 : Illustration de la modélisation gravimétrique $2D^{1/2}$ du profil P2.....	107
Figure 3.44 : Illustration de la modélisation gravimétrique $2D^{1/2}$ du profil P3.....	108
Figure 3.45 : Illustration de la modélisation gravimétrique $2D^{1/2}$ du profil P4.....	110
Figure 3.46 : Illustration de la modélisation gravimétrique $2D^{1/2}$ du profil P5.....	111

- Figure 3.47 :** Illustration : a) Carte d'anomalies de Bouguer de la région d'étude avec la grille circonscrite pour la modélisation ; b) Carte topographique 3D de la partie Sud-Ouest du Cameroun avec cinq profils N-S ; c) Illustration des modèles inversion 3D des densités superposées.....114
- Figure 3.48 :** Illustration 3D de la superposition des modèles 2D ^{1/2}.....116
- Figure 3.49 :** Modèle géophysique synthétique 3D des structures géologiques de la région d'étude.....118
- Figure 3.50 :** Illustration : a) Topographie du Cameroun ; b) Anomalies à l'air libre du Cameroun ; c) Anomalies de Bouguer du Cameroun ; d) Anomalies du champ magnétique total réduit à l'équateur.....122
- Figure 3.51 :** Illustration : a) Carte topographique 3D de la LVC et le Craton du Congo sur laquelle cinq profils de direction N-S ont été tracés dans la partie Sud-Cameroun ; b) Superposition 3D des modèles 2D ^{1/2} des profils choisis sur la LVC et le CC ; c) Modèle géophysique 3D des structures géologiques de la région d'étude.....125

Liste des tableaux

Tableau 2.1: Densité de sédiments et roches sédimentaires avec pour unité g/cm^3	27
Tableau 2.2: Densité des roches ignées avec pour unité g/cm^3	27
Tableau 2.3: Densités des roches métamorphiques avec pour unité g/cm^3	28
Tableau 2.4: Quelques valeurs de susceptibilités magnétiques des roches métamorphiques.....	29
Tableau 2.5: Quelques valeurs de susceptibilités magnétiques des roches ignées.....	29
Tableau 2.6: Quelques valeurs de susceptibilités magnétiques des roches sédimentaires.....	29
Tableau 2.7: Indices structuraux pour les sources magnétiques.....	44
Tableau 3.1: Comparaison statistique des modèles d'interpolation géostatistique des données d'anomalies gravimétriques de la zone d'étude	57
Tableau 3.2: Comparaison statistique des modèles d'interpolation géostatistique des données d'anomalies magnétiques de la zone d'étude	57
Tableau 3.3: Profondeurs et orientations des différents segments de linéaments gravimétriques.....	87
Tableau 3.4: Profondeurs et orientations des différents segments de linéaments magnétiques.....	88
Tableau 3.5: Analyse et comparaison statistiques des profondeurs moyennes estimées du Moho	96
Tableau 3.6: Comparaison statistique des anomalies de Bouguer calculées et mesurées pour l'inversion... 3D.....	101

Index des abréviations et symboles

Symboles

\int :	Intégrale
∂ :	Dérivée partielle
Δ :	Variation
∇ :	Opérateur nabla ou gradient
Σ :	Somme

Méthode gravimétrique

B (G) :	Anomalie de Bouguer	(mGal)
g :	Pesanteur	(mGal)
g_{mes} :	Valeur observée de la pesanteur	(mGal)
g_{th} :	Valeur théorique de la pesanteur sur l'Ellipsoïde de référence	(mGal)
V_C :	Correction de la dérive de l'appareil	(mGal)
A_f :	Correction à l'air libre	(mGal)
Δg_p :	Correction de plateau	(mGal)
Δg_t :	Correction topographique	(mGal)
ρ :	Densité volumique de masse	(g. s ⁻²)
ϕ :	Latitude	(radians)
Z_h :	Altitude	(km)
ρ_B :	Densité moyenne de la croûte	(g/cm ³)
h :	Hauteur	(m)
G_{DH} et G_{DV} :	Gradient de dérivée horizontale et verticale des données gravimétriques	(mGal/m)
F_{DH} et F_{DV} :	Gradient de dérivée horizontale et verticale des données magnétiques	(nT/m)

Méthode magnétique

\vec{M} :	Champ magnétique	(nT)
\vec{C} :	Champ d'anomalie magnétique	(nT)
\vec{R} :	Vecteur champ de référence	(nT)
F :	Intensité du champ magnétique terrestre	(nT)

D :	Déclinaison du champ magnétique terrestre	(°)
I :	Inclinaison du champ magnétique terrestre	(°)
U :	Potentiel magnétique /	(kg.c ⁻¹ .m.s ⁻¹)
J :	Intensité d'aimantation	(A/m)
μ :	Perméabilité magnétique	(H/m)
χ :	Susceptibilité magnétique	(SI)
a :	Rayon terrestre moyen	(km)
g_n^m, h_n^m et $q_n^{m'}, s_n^{m'}$:	Coefficients de Gauss de degré (resp.) (n et n') et d'ordre (m et m')	
P_n^m et $P_n^{m'}$:	Polynômes associés de Legendre (resp.) de degré (n et n') et d'ordre (m et m')	
X :	Projection du vecteur \vec{F} sur le méridien géographique (vers le Nord géographique)	
Y :	Projection du vecteur \vec{F} sur le parallèle géographique (vers l'Est géographique)	
Z :	Projection du vecteur \vec{F} sur la verticale descendante (vers le centre de la terre)	
H :	Composante horizontale, projection de \vec{F} sur le plan horizontal (o, x, y)	
(r, θ, φ) :	Coordonnées géocentriques	
(x, y, z) :	Coordonnées cartésiennes	

Abréviations

BGI :	Bureau Gravimétrique International
CC :	Craton du Congo
CCC :	Cisaillement Centre Camerounais
CGM :	Cameroonian Geoid Model
CHAMP :	CHALLENGING Minisatellite Payload
CMT :	Champ Magnétique Total
COAC :	Chaîne Orogénique de l'Afrique Centrale
CPAC :	Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale
DH :	Dérivée horizontale
DV :	Dérivée verticale
D.ST:	Déviation standard
EMAG:	Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution)
FKC :	Faille de Kribi-Campo
FS :	Faille de la Sanaga
FFT :	Fast Fourier Transform
FTB :	Faille de Tcholliré Banyo

ICGEM:	International Centre for Global Earth Models
IGRF :	International Geomagnetic Reference Field
IRD :	Institut de Recherche pour le Développement
IRGM :	Institut de Recherche Géologique et Minière
LVC :	Ligne Volcanique du Cameroun
MA :	Million d'années
N et E :	Resp. Nord (North) et Est (East)
NGDC :	Centre National de Données Géophysiques
NOAA:	National Oceanic and Atmospheric Administration
NO (NW):	Nord - Ouest (North - West)
ORSTOM :	Office de Recherche Scientifique des Territoires d'Outre-Mer
PVH :	Prolongement vers le haut
R.C.A. :	République Centrafricaine
RE :	Réduction à l'équateur
RMSE :	Root mean square error
RP :	Réduction au pôle
SE :	Sud - Est (South - East)
SO (SW):	Sud - Ouest (South - West)
TFR :	Transformée de Fourier Rapide
TTG :	Tonalite trondhjémite granodiorite
XGM :	Global gravitational model

Résumé

Ce travail porte sur l'investigation géophysique de la lithosphère du Cameroun à partir des données gravimétriques et magnétiques. Le but est de déterminer les paramètres géométriques de la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC) à partir des modèles géophysiques afin de comprendre davantage son origine, son implication tectonique sur la Chaîne Panafricaine et son interaction géodynamique avec le Craton du Congo (CC) puis, de mettre en évidence les accidents tectoniques du Cameroun en incluant ceux ayant favorisé sa mise en forme. L'approche méthodique simple, basée sur l'exploitation des filtres numériques pour les analyses qualitatives et quantitatives des anomalies de Bouguer et du champ magnétique total a permis d'étudier le comportement des structures géologiques sur la LVC et le CC et de révéler que ces deux mégastructures sont non seulement d'origine mantellique mais ont une interconnexion également mantellique. L'analyse multi-échelle de ces anomalies a permis de proposer une carte de linéaments géophysiques précise afin d'obtenir une vision précise de l'identité d'un contexte tectonique complexe et multi-fracturé de la lithosphère du Cameroun. La modélisation $2D^{1/2}$ des anomalies gravimétriques suivant cinq profils choisis a permis de dégager l'hypothèse de l'existence de plusieurs points chauds dans la lithosphère répartis probablement à des profondeurs différentes, déclenchés par les flux convectifs en provenance du manteau inférieur pour expliquer l'origine de la LVC et de ressortir la géométrie des structures géologiques de la région. Nos modèles montrent que la poussée et la remontée de la croûte profonde à la frontière Nord du CC aurait contraint les fragments de block du domaine Sud panafricain associés au métamorphisme granulitique à basculer en direction des granitoïdes de la croûte juvénile Néoprotérozoïque du domaine Nord panafricain et les structures volcano-plutoniques (datant du Cénozoïque) du domaine Ouest panafricain de la LVC. Ainsi, si notre interprétation est correcte, elle pourra expliquer l'interaction géodynamique entre la LVC et le CC comme contrainte mécanique de compression des structures volcaniques et volcano-plutoniques de la LVC par les structures lithosphériques du manteau froid du CC, des structures denses du Plateau de l'Adamaoua et du Fossé de la Bénoué.

Mots clés : Ligne Volcanique du Cameroun, Craton du Congo, anomalies, filtres, linéaments, modélisation géophysique.

Abstract

This work concerns at geophysical investigation of the Cameroon lithosphere from gravity and magnetic data. The aim is to determine the geometric parameters of the Cameroon Volcanic Line (CVL) from geophysical models in order to better understand its origin, its tectonic implication on the Pan-African Chain and its geodynamic interaction with the Congo Craton (CC). The simple methodical approach, based on the exploitation of numerical filters for qualitative and quantitative analyses of Bouguer anomalies and total magnetic field, allowed to study the behavior of geological structures on the CVL, CC and to reveal that these two megastructures are not only of mantle origin but also have a mantle interconnection. The multiscale analysis of these anomalies allowed us to propose a precise geophysical lineament map in order to obtain a synoptic view for identity of a complex and multi-fractured tectonic context of the Cameroon lithosphere. The $2D^{1/2}$ modeling of gravity anomalies along five selected profiles allowed us to hypothesize the existence of several hot spots in the lithosphere, probably at different depths, triggered by convective flows from the lower mantle to explain the origin of the CVL and to highlight the geometry of the geological structures in the region. Our models show that thrusting and uplift of the deep crust at the northern boundary of CC would have forced the South Pan-African domain block fragments associated with granulite metamorphism to tilt towards the Neoproterozoic juvenile crustal granitoids of the North Pan-African domain and the Cenozoic volcanic-plutonic structures of the West Pan-African domain of the CVL. Thus, if our interpretation is correct, it may explain the geodynamic interaction between the CVL and CC as a mechanical compressional constraint of the volcanic and volcano-plutonic structures of the CVL by the lithospheric structures of the cold mantle of CC, the dense structures of the Adamawa Plateau and the Benue Trough.

Keywords: Anomalies, filters, lineaments, geophysical modeling, Cameroon Volcanic Line, Congo Craton.

Introduction générale

L'analyse et la compréhension des structures de la lithosphère représentent de nos jours l'une des préoccupations majeures pour la recherche scientifique et en particulier dans le domaine des géosciences. En ce sens, les différents centres d'intérêt dont deux nous semblent essentiels, à savoir sont : 1) la maîtrise quasi-parfaite du sous-sol au regard des défis énergétiques, de la prévention et de la gestion des catastrophes et autres risques naturels ; 2) la connaissance des potentialités économiques du sous-sol. En Afrique, la structure lithosphérique est marquée par une ère géologique appelée le Précambrien. Son évolution va donc de l'Archéen jusqu'au Néoprotérozoïque. Au Cameroun son évolution a subi des déplacements complexes dans diverses directions (Kennedy, 1964). Les études antérieures et en particulier les mesures de géochronologie, ont conduit à insister sur l'importance de l'événement thermo-tectonique Panafricain évoqué par Kennedy, 1964 considéré comme un véritable cycle orogénique avec sédimentation, métamorphisme et granitisation ayant abouti à deux véritables structures à savoir Chaîne Panafricaine et Cratons d'Afrique (Black, 1966, 1967). Des exemples d'accidents tectoniques majeurs mis en évidence suite à cet événement et qui caractérisent la région de l'ancien Achéen au Cameroun sont : le Cisaillement Centre du Cameroun (CCC), la zone de cisaillement de Foumban (ZCF), la faille de Tibati-Banyo (FTB) représentant un accident ductile (Nzenti et al., 1988 ; Dumont, 1986) ; la faille de la Sanaga (FS) et la faille de Kribi-Campo (FKC) (Toteu et al., 2004). Ces travaux ont permis de comprendre que les structures géologiques du sous-sol au Cameroun sont affectées par des activités tectoniques où les processus qui en sont responsables restent encore mal compris.

Cependant, les grands traits structuraux caractéristiques et intracrustales au Cameroun ont été mis en évidence par les investigations géologiques (Toteu al., 2001 et 2004 ; Njonfang et al. 2006) la direction, l'orientation et la distance de ces discontinuités ont été localisées grâce à la méthode d'extrapolation afin de mettre en évidence certains linéaments que nous présentent les cartes géologiques (Toteu al., 2001 et 2004). Ainsi, le tracé et l'extension des accidents qui affectent la région, la géométrie des bassins qu'ils délimitent ne peuvent être approchés uniquement par les données de surface ou plus ou moins visibles sur le terrain. A cause du fait que les observations géologiques ne se limitent qu'à l'affleurement, il subsiste alors des imprécisions dans la connaissance de la structure du sous-sol de la région. C'est grâce aux méthodes géophysiques, qui, par mesure en surface des paramètres physiques

et leurs variations, vont permettre de déterminer des formes structurales profondes et d'avoir une meilleure compréhension de l'évolution de la géodynamique des structures géologiques.

D'autre part, au cours des dernières décennies, d'importants efforts ont été orientés vers la modélisation de la Ligne Volcanique du Cameroun visant à comprendre sa géodynamique et son origine. Plusieurs modèles ont été proposés pour expliquer sa formation (Fairhead et Okereke, 1987 ; Ebinger et Sleep, 1998 ; Nnange et al., 2000 ; Ngako et al., 2006 ; Reusch et al., 2010 ; Elsheikh, et al., 2014 ; Adams et al., 2015). Certains modèles ont évoqué un ou plusieurs panaches mantelliques (Ngako et al., 2006), d'autres ont suggéré que les structures lithosphériques préexistantes contrôlent la formation de la Ligne Volcanique du Cameroun (Ebinger et Sleep, 1998 ; Reusch et al., 2010) et une grande classe de modèles pour le phénomène de convection conduisant à la formation de la LVC ont été proposés (King et Anderson, 1995, 1998 ; Meyers et al., 1998 ; King et Ritsema, 2000). Ainsi, l'origine de la Ligne Volcanique du Cameroun reste encore un sujet de discussion. De plus, la question sur son interaction avec le Craton du Congo fait partie des principales préoccupations.

Le travail effectué et présenté dans cette thèse consiste à utiliser les données gravimétriques et magnétiques disponibles pour apporter une contribution à la connaissance de la géologie et la tectonique de la lithosphère au Cameroun. Plus précisément, l'étude consiste à :

- cartographier les signatures des anomalies gravimétriques et magnétiques du Cameroun,
- étudier le comportement spatial de ces anomalies avec la profondeur,
- établir une carte synthétique des linéaments géophysiques à partir des données gravimétriques et magnétiques,
- proposer des modèles structuraux du sous-sol de la lithosphère sous la LVC et le Craton du Congo en rapport avec la géologie ainsi que le processus de mise en place.

Comme méthodologie utilisée, nous exploitons les filtres numériques pour les analyses qualitatives et quantitatives des anomalies gravimétriques et magnétiques. Les filtres passe-bas et de gradients sont utilisés afin de comprendre d'avantage l'origine de la LVC, de mettre en évidence les zones de contraste entre les structures géologiques sous la base des données gravimétriques et la grille des anomalies magnétiques couplées aux modèles de vitesses des ondes sismiques de cisaillement et d'identifier les accidents tectoniques du sous-sol de la lithosphère du Cameroun. L'inversion 3D et la modélisation $2D^{1/2}$ des données gravimétriques permettront de ressortir la géométrie des structures géologiques du sous-sol lithosphérique de la Ligne Volcanique du Cameroun et le Craton du Congo et de proposer une hypothèse pour expliquer leur interaction.

Afin d'atteindre les objectifs fixés, le travail est subdivisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, une brève revue de la littérature concernant les généralités sur la géologie du Cameroun et une présentation de la zone d'étude ont été réalisées. Ce chapitre s'achève par le développement de la problématique suivi des objectifs et une conclusion partielle.

Dans le deuxième chapitre les données et méthodes de l'étude sont présentées. Les principes fondamentaux des prospections gravimétriques et magnétiques sont détaillés à la suite de la description des données. Une attention particulière est portée sur les méthodes qui sont prises en compte dans l'interprétation des données.

Le troisième chapitre est réservé à la présentation des résultats et l'interprétation suivies d'une discussion pour la validation. Ici, les résultats qualitatifs sont représentés par les analyses des cartes d'anomalies gravimétriques et magnétiques afin d'étudier les structures géologiques importantes de la lithosphère du sous-sol du Cameroun et proposer une carte des linéaments géophysiques par une analyse multi-échelle. Les résultats quantitatifs conduisent à l'établissement des modèles géophysiques pour cartographier la géométrie de la lithosphère sous la LVC et le CC et enfin, les résultats obtenus et interprétés sont discutés. Dans cette partie, un examen critique des résultats obtenus est présenté afin de dégager les résultats essentiels de ce travail. Ici il est surtout question de faire le point sur nos résultats par référence aux travaux antérieurs afin de valider les résultats obtenus dans ce travail.

Nous terminons par une conclusion générale pour un bilan du travail effectué, suivi d'une perspective qui vise à apporter d'autres solutions dans le but d'améliorer davantage les résultats obtenus dans ce travail.

Chapitre 1

Revue de la littérature et problématique

Ce chapitre présente, une brève revue de la littérature de la zone d'étude. En amont, la situation géographique, les grandes unités géomorphologiques, les réseaux routiers, ferroviaires, le climat, l'hydrologie du Cameroun sont évoqués. Ce chapitre présente également une synthèse des travaux géologiques et géophysiques antérieurs et s'achève par le développement d'une problématique suivie des objectifs et une conclusion partielle.

1.1. Présentation géographique de la zone d'étude

1.1.1. Situation géographique

La zone concernée par la présente étude couvre l'ensemble du territoire camerounais et certaines parties des pays voisins et est située en Afrique Centrale. Les limites de la région d'étude s'étendent entre les latitudes 1° et 14° N et les longitudes 8° et 17°E (Figure 1.1). D'une superficie totale de 475650 km², dont 466050 km² de superficie continentale et 9600 km² de superficie maritime, le Cameroun est limité au Nord par le Lac Tchad, au Nord-Est par la République du Tchad, à l'Est par la République Centrafricaine, au Sud par la République du Congo, le Gabon et la Guinée Équatoriale, à l'Ouest par la République Fédérale du Nigéria. Le Cameroun partage 4700 km de frontières avec le Nigéria, le Tchad, la R.C.A, le Congo, le Gabon et la Guinée Équatoriale et à 400 km de côtes sur l'Océan Atlantique.

1.1.2. Les grandes unités géomorphologiques

L'orographie variée du Cameroun tient d'une part aux régions montagneuses, dont l'origine est généralement volcanique mais pour l'essentiel aux vastes surfaces aplanies (Ségalen, 1967). La caractéristique principale des surfaces aplanies est de ne présenter chacune que de très faibles variations d'altitude sur d'immenses étendues. Le relief du Cameroun est dans son ensemble contrasté avec :

a. Les régions de hautes altitudes

Les surfaces les plus hautes correspondent aux :

- monts Mandara au Nord (massif montagneux volcanique situé à la frontière entre le Cameroun et le Nigéria) ;

- Plateau de l'Adamaoua au Centre (massif montagneux d'Afrique Centrale qui s'étend du Sud-Est du Nigéria au travers le Centre-Nord du Cameroun jusqu'à la R.C.A.) ;
- Hauts plateaux à l'Ouest qui se prolongent vers le Sud-Ouest jusqu'à l'Océan Atlantique par une succession de chaînes montagneuses à savoir : le Mont Oku (3 008 m), le Mont Bamboutos (2 740 m), et le Mont Manengouba (2 396 m) parmi lesquels le principal sommet est le Mont Cameroun avec une altitude maximale d'environ 4 070 m (Segalen, 1967).

b. Les régions de basses altitudes

Les surfaces les plus basses correspondent aux plaines côtières et aux cuvettes. Ce sont en fait des zones mixtes comprenant surfaces d'érosion et plaines alluviales. Au Cameroun, les régions de basses terres sont observées dans deux parties à savoir :

Les régions basses du Sud Cameroun avec une morphologie montrant de nombreuses petites collines dont le profil est reconnu par les géographes comme assez classique en région équatoriale (Olivry, 1986). Ce type de paysage concerne la majeure partie des plaines sédimentaires de la façade maritime (Olivry, 1986).

Les régions basses du Nord Cameroun parmi lesquelles nous avons les vallées de la Bénoué et de ses affluents Faro et Mayo Kébi puis la Cuvette tchadienne. Cette dernière constitue une vaste zone d'épandage d'alluvion datant du Tertiaire, Quaternaire et l'ère actuelle centrée sur le lac Tchad et variant de 350 à 280 m d'altitude (Olivry, 1986). Elle est en particulier caractérisée par les vastes plaines du Chari inférieur et du Bas-Logone (Segalen, 1967). Les surfaces les plus basses du Nord Cameroun correspondent à : – la plaine du Tchad, – la plaine du Logone, – la cuvette de la Bénoué, – la plaine du Diamaré autour de Maroua.

c. La surface côtière

Elle est occupée dans sa presque totalité par la forêt dense ombrophile et soumise à un climat à forte nébulosité. L'ensemble de la surface s'étend de l'Océan vers l'intérieur sur environ 150 km en direction de l'Est et sur 200 km vers le Nord. L'altitude s'élève régulièrement depuis le niveau de la mer jusqu'à vers 350 m ; cette altitude avait été signalée par Champetier de Ribes, et Aubague (1956). Les roches sont successivement des sédiments datant du Tertiaire puis du Crétacé passant, sans accident topographique particulier, aux roches métamorphiques du socle. La surface est plane dans son ensemble mais elle est découpée à l'infini, en une multitude de petites collines séparées par des ruisseaux à écoulement lent.

d. Les surfaces du Centre et de l'Ouest

Tout le Centre du Cameroun est situé à une altitude encore plus élevée que la partie méridionale du pays (Figure 1.1.). Il correspond à l'appellation de Plateau de l'Adamaoua. Cette zone se poursuit au Nigéria à

l'Ouest, et en République Centrafricaine à l'Est. Au Centre, le Plateau de l'Adamaoua est affecté par une double cassure orientée SW-NE dans laquelle coulent actuellement les rivières Mbéré et Djérem (Olivry, 1986). Dans le Centre, l'ensemble de la surface présente, au niveau du socle, une altitude de 800 à 1000 m par rapport au niveau de la mer.

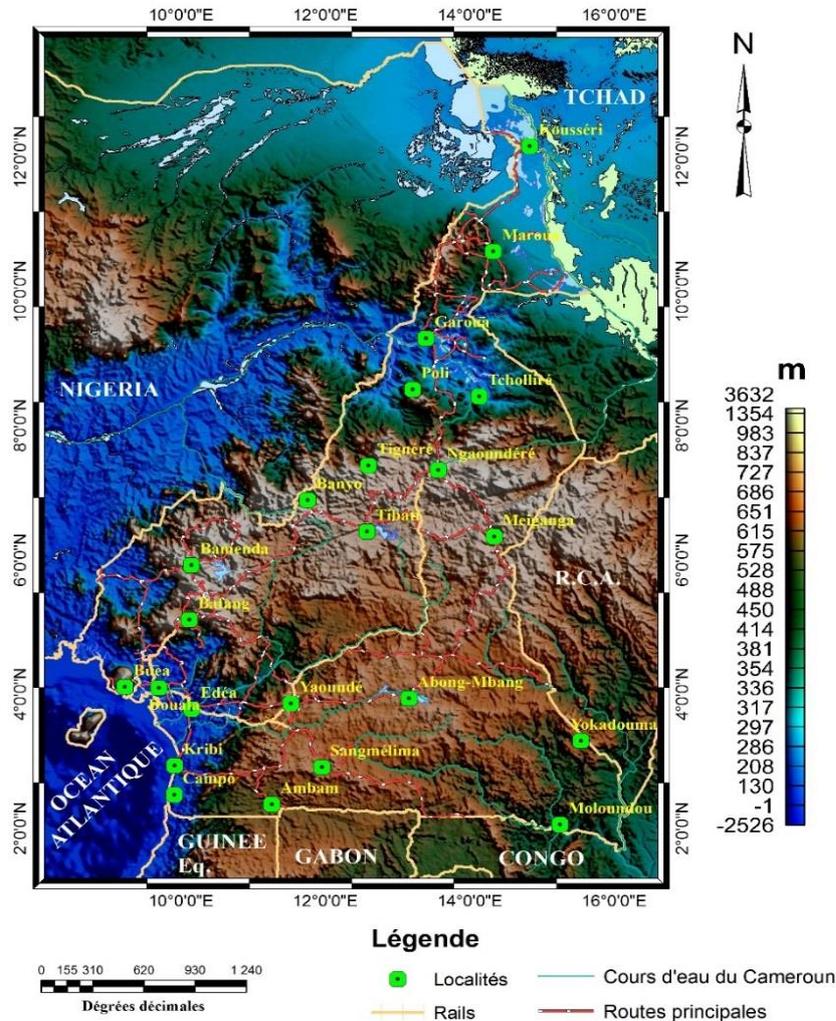


Figure 1.1. : Carte topographique du Cameroun.

1.1.3. Réseaux routiers et ferroviaires du Cameroun

Le Cameroun compte près de 51350 km de routes principales dont environ 6760 km de routes bitumées selon le Ministère des Travaux Publics et 47 242 km non bitumées (www.fondsrouciercameroun.org/fr). Ces routes ont été d'une grande importance pour les campagnes de reconnaissance de prise des données gravimétriques par l'ORSTOM exploitées dans ce travail. Suivant la classification, le réseau routier camerounais dispose de quatre catégories de routes (Figure 1.2) :

- a. **Les routes nationales** qui relient essentiellement les chefs-lieux de Région à la capitale Yaoundé et le Cameroun au pays voisins. Elles constituent l'ossature du réseau. La longueur de cette catégorie de routes est de 7241 km.
- b. **Les routes régionales** qui relient, à l'intérieur d'une Région, les chefs-lieux de Département, à la capitale. Leur longueur est de 5841 km.
- c. **Les routes départementales** qui relient à l'intérieur d'un département, les arrondissements aux chefs-lieux de Département avec une longueur de 8075 km. (Source Ministère des Travaux Publics).
- d. **Les routes rurales** ; qui desservent les campagnes, les plantations, les zones industrielles locales... Elles permettent de relier les zones de production aux marchés locaux ou aux centres de commercialisation. La longueur du réseau des routes rurales classées pris en charge par le Ministère des Travaux Publics est de 12843 km.

Les routes principales et secondaires ainsi que la voie ferroviaire sont représentées sur la figure 1.2.

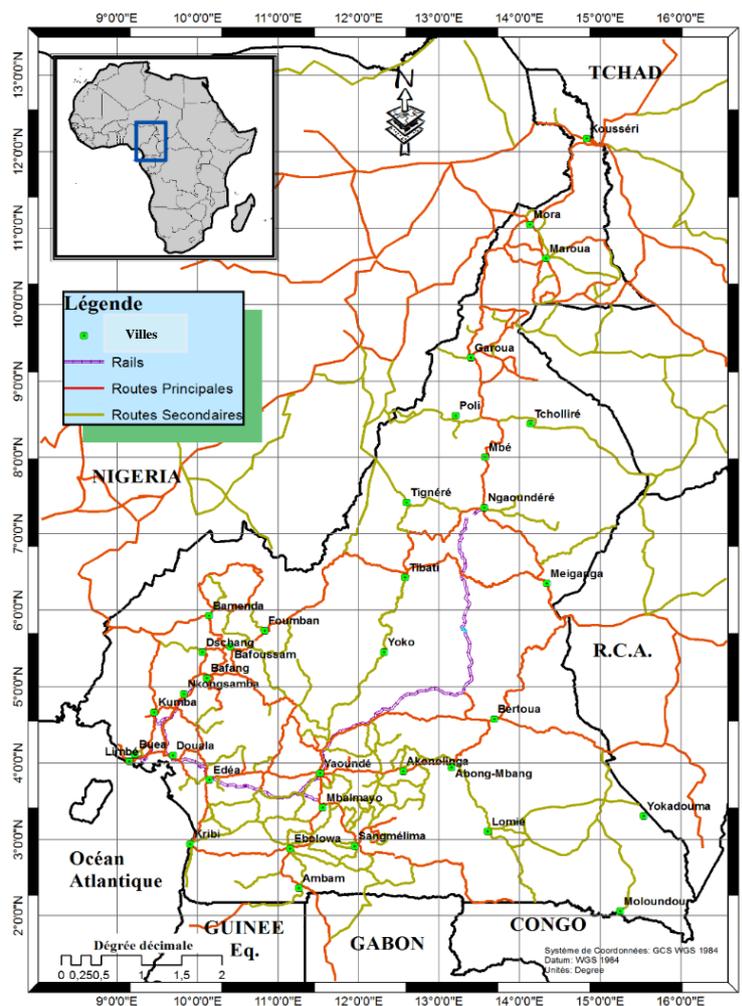


Figure 1.2: Carte routière et ferroviaire du Cameroun (source Ministère des Travaux Publics).

1.1.4. Climat et végétation du Cameroun

Le climat est l'ensemble des phénomènes atmosphériques et météorologiques propre à une région. La caractéristique principale du climat camerounais est la diversité. On y retrouve toute la gamme des climats africains marqués par la constance thermique. La différenciation provient essentiellement des précipitations. Le Cameroun est soumis à deux grands domaines climatiques :

- a. Le domaine équatorial :** il s'étend jusqu'au 6^e parallèle et se partage entre deux types de climats :
 - Le climat guinéen, il règne sur l'ensemble du Plateau Sud-Cameroun et est caractérisé par des pluies abondantes (environ 1500 mm) d'eau par an. Il existe quatre saisons : deux saisons de pluie et deux saisons sèches ;
 - Le climat camerounais, il règne sur le plateau de l'Ouest et la région du Mont Cameroun et est caractérisé par deux saisons (une longue saison de pluie de 9 mois et une courte saison sèche) avec une température moyenne et une amplitude thermique faibles.
- b. Le domaine tropical :** il s'étend du 6^e au 13^e degré de latitude Nord c.-à-d. de l'Adamaoua au lac Tchad. On note deux variantes :
 - Le climat tropical soudanien : il règne sur l'Adamaoua et sur la cuvette de la Bénoué et il est caractérisé par l'existence de deux saisons de pluie peu abondantes entre 900 et 1500 mm et une température assez élevée autour de 28^e ;
 - Le climat tropical sahélien : il règne au nord de la cuvette de la Bénoué et se caractérise par l'existence de deux saisons avec une longue et vigoureuse saison sèche supérieure à 7 mois, ainsi que des précipitations très faibles (inférieures à 900 mm).

La végétation constitue avec le relief l'élément le plus déterminant des paysages. La végétation camerounaise représente un condensé de celle de l'Afrique intertropicale avec la forêt dense humide et méridionale (Sud), une savane arborée au Centre dans l'Adamaoua, la steppe dans le Nord avec les sols aussi variés.

1.1.5. L'hydrographie du Cameroun

L'hydrographie est l'ensemble des cours d'eau d'une région. La grande variété des régions géographiques confère au Cameroun une diversité hydrographique à travers le réseau hydrographique et les régions hydrologiques (Olivry, 1986). La plupart de nos rivières naissent dans l'Adamaoua et dans le plateau Sud Cameroun. Ces cours d'eau sont répartis en cinq bassins (Figure 1.3) :

- **Le bassin de la Sanaga :** la Sanaga est le plus grand fleuve du Cameroun. Elle prend son nom après la confluence du Djerem et du Lom. Vu l'importance de la superficie de son bassin versant et de ses apports, le Djerem est considéré comme étant la haute-Sanaga. Le bassin de la Sanaga est dans sa quasi-

totalité localisé sur le territoire camerounais. Une infime partie environ 200 m², à l'Est se trouve en République Centrafricaine. L'ensemble du bassin couvre les localités telles que Yaoundé, Abong-Mbang, Bafoussam, Batouri, Ngaoundéré... La Sanaga draine une succession de plateaux limités à l'Ouest par la dorsale camerounaise et au Nord par l'Adamaoua (Dubreuil et al., 1975).

- **Le bassin des fleuves côtiers** : ce bassin regroupe deux types fleuves à savoir : 1) les fleuves côtiers de l'Ouest, qui descendent de la dorsale camerounaise et se jettent dans l'Atlantique, les plus importants sont le Moungo, le Wouri encore appelé Nkam dans sa partie supérieure c.-à-d. après Yabassi et la Manyu encore appelée Cross River à son entrée au Nigéria et la Dibamba ; 2) les fleuves côtiers du Sud qui prennent naissance dans le plateau du Sud Cameroun. On peut citer le Nyong qui prend sa source à l'est d'Abong-Mbang, le Ntem qui vient du Gabon pour se jeter dans la mer (Olivry, 1986).

- **Le bassin du Congo** : il représente le bassin versant du fleuve Congo en Afrique localisé au Cameroun dans sa partie Sud-Est. Il regroupe les fleuves les plus importants de la localité tels que le Dja et la Boumba.

- **Le bassin du Niger** : ce bassin est localisé au Cameroun dans la partie Nord sous le nom de Bassin septentrional du Niger et prend sa source dans le massif de l'Adamaoua puis se dirige à l'ouest du Nigéria et à l'Ouest sous le nom de bassin méridional du Niger qui prend sa source dans la Bénoué à l'est du Nigéria (Olivry, 1986).

- **Le bassin du Lac Tchad** : représente un bassin versant centré sur le Lac Tchad ; il couvre une grande partie du Tchad, la moitié occidentale du Niger et une partie de l'Algérie, de la Libye, du Soudan, la R.C.A., le Nigéria et enfin le Cameroun. Au Cameroun, deux parties de ce bassin sont localisées ; la première dans la partie Centre-Est avec pour fleuve principal la Vina et la deuxième à l'Extrême Nord largement occupé par une vaste plaine d'inondation appelée le Grand Yayré.

Les rivières et fleuves du Cameroun se répartissent en plusieurs unités hydrographiques (Figure 1.3). Ainsi le réseau de cours d'eau du Cameroun participe au drainage d'un vaste ensemble couvrant environ le tiers de la superficie du continent africain, partagé par 23 Etats.

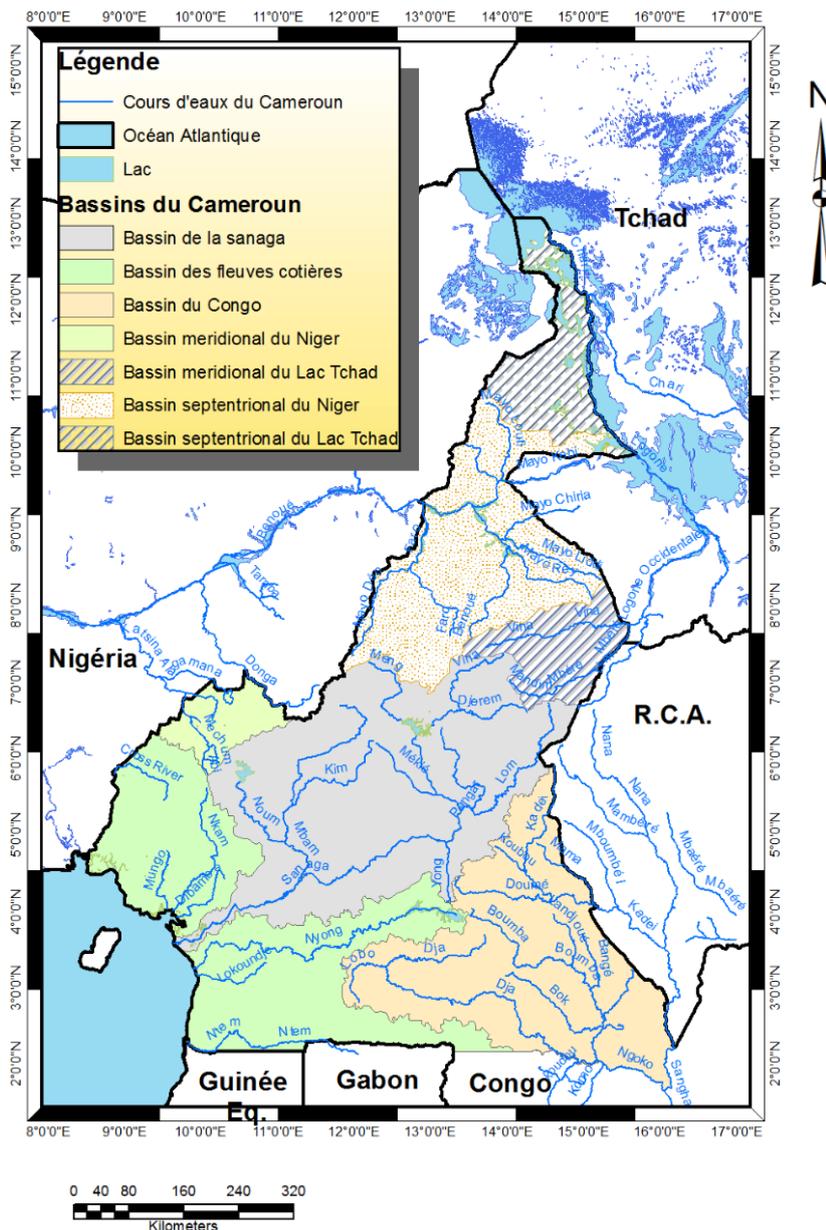


Figure 1.3 : Les grands cours d’eaux du Cameroun (Olivry, 1986).

1.2. Contexte géologique et tectonique

1.2.1. Le socle Précambrien

Les études géologiques en Afrique Centrale ont commencé au début de la période coloniale et se sont intensifiées après 1945. Au Cameroun, les recherches géologiques ont démarré avec les travaux de Korableff (1937) et de Haugou et Koretzky (1943), qui ont conduit à la réalisation d’une carte de reconnaissance. A la suite des travaux de Kornprobst et al., (1976), Lasserre et Soba (1976), Bessoles et Lasserre (1977), Lasserre et Soba (1979) et Bessoles et Trompette (1980), le socle Précambrien camerounais a été subdivisé en deux grands ensembles : le complexe du Ntem et une ceinture mobile. A la

même période, Rocci (1965) et Clifford (1970) montraient que le Panafricain ne résultait pas seulement d'un simple phénomène de réactivation thermique et de rajeunissement du socle Précambrien, mais correspondait bien à un cycle Orogénique complet. Clifford et Gass (1970) ont aussi montré que certains fragments de ce socle Précambrien n'ont pas été repris par l'Orogenèse Panafricaine. Restés stables depuis l'Orogenèse Kibarienne (1200 Ma), ces ensembles ont été nommés Cratons. C'est ainsi qu'ont été définis le Craton Ouest-Africain, le Craton du Congo, le Craton du Kalahari et un supposé Craton nommé récemment « Métacraton saharien » (Figure 1.6A) car considéré comme un ensemble recyclé au cours de l'Orogenèse Panafricaine (Abdelsalam et al., 2011).

Les travaux sur la tectonique, la géochronologie et la géochimie menés ces quinze dernières années ont conduit à une vision globale de la géologie du Cameroun à l'échelle de la plaque africaine et du Gondwana (Vicat et Bilong, 1998). C'est ainsi que cinq ensembles structuraux ont également été mis en évidence (Figure 1.4) : les bassins phanérozoïques, la Chaîne panafricaine, la couverture du Craton, le complexe du Ntem et la Ligne Volcanique du Cameroun.

1.2.2. Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale au Cameroun

La Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale est une vaste portion d'un ensemble qui comprend les ceintures tectoniques Panafricaines d'Afrique Centrale, les ceintures brasiliano du NE du Brésil et la Chaîne Panafricaine transsaharienne (Feybesse et al., 1998 ; Toteu et al., 2001 ; Ngako et al., 2008 ; Oliveira et al., 2006). Cette Chaîne couvre plusieurs pays d'Afrique Centrale (Nigéria, Cameroun, Tchad, République Centrafricaine) et se poursuit vers l'Est au Soudan, en Ouganda et en Tanzanie (Theunissen et al., 1992).

Au Cameroun, trois principaux domaines litho-structuraux de la Chaîne Panafricaine sont connus (Figures 1.5c et 1.6c) : le domaine Sud-Cameroun, le domaine Centre-Cameroun et le domaine Nord Cameroun (Toteu et al., 2004).

a. Le domaine Panafricain Nord Cameroun

Le domaine Nord Cameroun, aussi appelé domaine Nord-Ouest Cameroun (Toteu et al., 2004 ; Penaye et al., 2006), en relation avec sa localisation au Nord-Ouest de la faille Tcholliré-Banyo (Figures 1.5c et 1.6c). Au Sud et Sud-Ouest, il est séparé du domaine Centre-Cameroun par la faille Tcholliré-Banyo, et à l'Est, il est rattaché au domaine Mayo Kébbi (Figures 1.5c et 1.6c). Sa limite Ouest reste encore floue. Toutefois, les études antérieures (Ferré et al., 1996, 2002 ; Ekwueme et Kröner, 1998 ; Toteu et al., 2004) considèrent ce domaine comme un prolongement Nord-Est du domaine Nord-Est au Nigéria (Figure 1.5c).

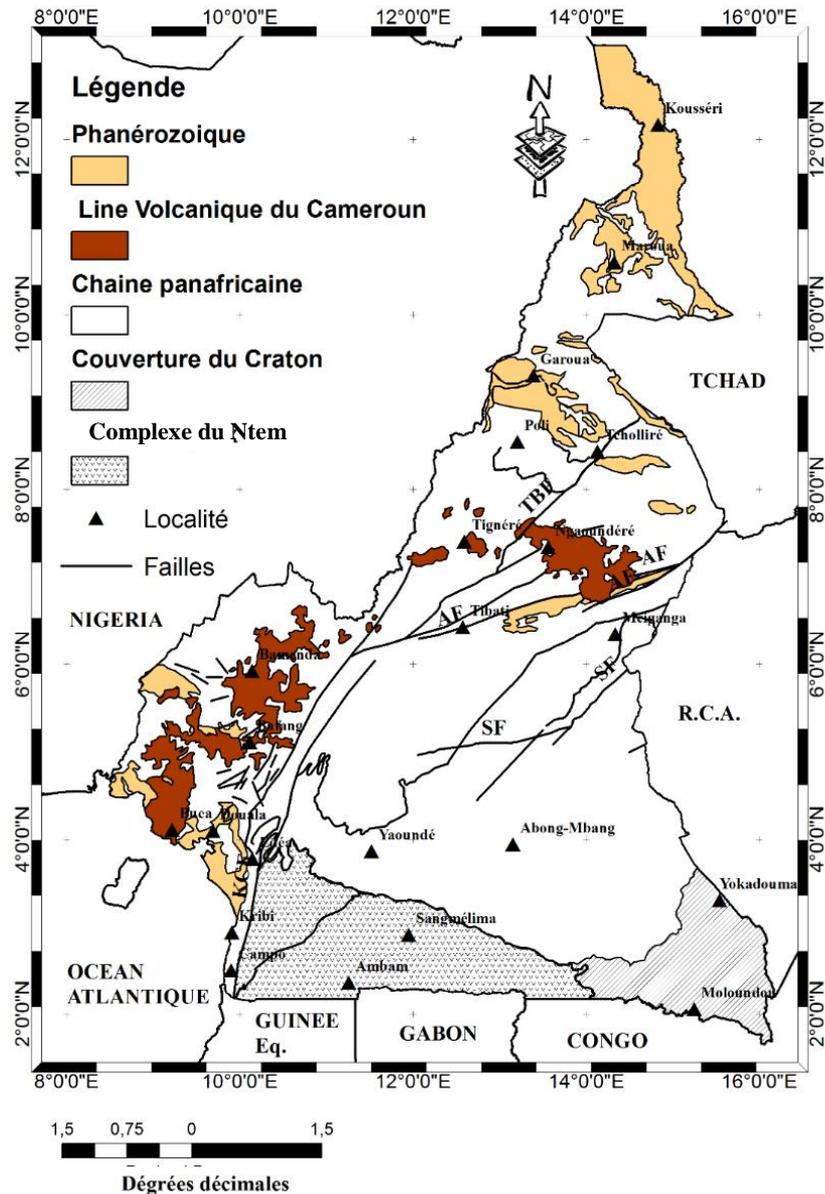


Figure 1.4 : Les grands ensembles structuraux du Cameroun (Vicat et Bilong, 1998).

Les travaux menés dans ce domaine permettent de distinguer quelques unités (Toteu, 1990 ; Montes-Lauar et al., 1997 ; Penaye et al., 2006 ; Bouyo Houketchang et al., 2009) : 1) le groupe de Poli, 2) les granitoïdes pré-à-syn-tectoniques, 3) les granitoïdes syn-à-tardi-tectoniques et 4) les granitoïdes post-tectoniques. Les granitoïdes syn-à-tardi-tectoniques constituent la plus grande majorité des roches plutoniques panafricaines du domaine Nord-Cameroun.

b. Le domaine Panafricain Centre Cameroun

Le domaine Centre-Cameroun, encore dénommé domaine Adamaoua, s'étend entre le domaine Sud-Cameroun au Sud et le domaine Nord-Cameroun Panafricain (Dumont, 1986). Dans la partie Sud, la

transition entre le domaine Centre-Cameroun et le domaine Sud se fait par le groupe de Bafia alors qu'au Nord, ce domaine est limité du domaine Nord par la faille de Tcholliré-Banyo (Yonta Ngouné, C., 2010). Ce domaine se poursuit en République Centrafricaine où il est connu sous le nom de domaine Yadé, d'où l'appellation « domaine Adamaoua -Yadé » souvent employée. Il correspond à un socle Paléoproterozoïque démembré au cours de l'Orogenèse Panafricaine (Toteu et al., 2004 ; Van Schmus et al., 2008) avec la formation des bassins sédimentaires (série de Lom ; Soba, 1989 ; Toteu et al., 2006a) et l'intrusion de plusieurs générations de granitoïdes d'âge Panafricain (Njanko, 1999 ; Tchameni et al., 2006 ; Ganwa et al., 2008b). Ces formations sont recoupées par le Cisaillement Centre Camerounais (CCC) (Ngako et al., 1991). Sur le plan structural le domaine Centre-Cameroun est affecté par deux phases de déformation ductile (Toteu et al., 2004 ; Njanko, 1999 ; Tchameni et al., 2006).

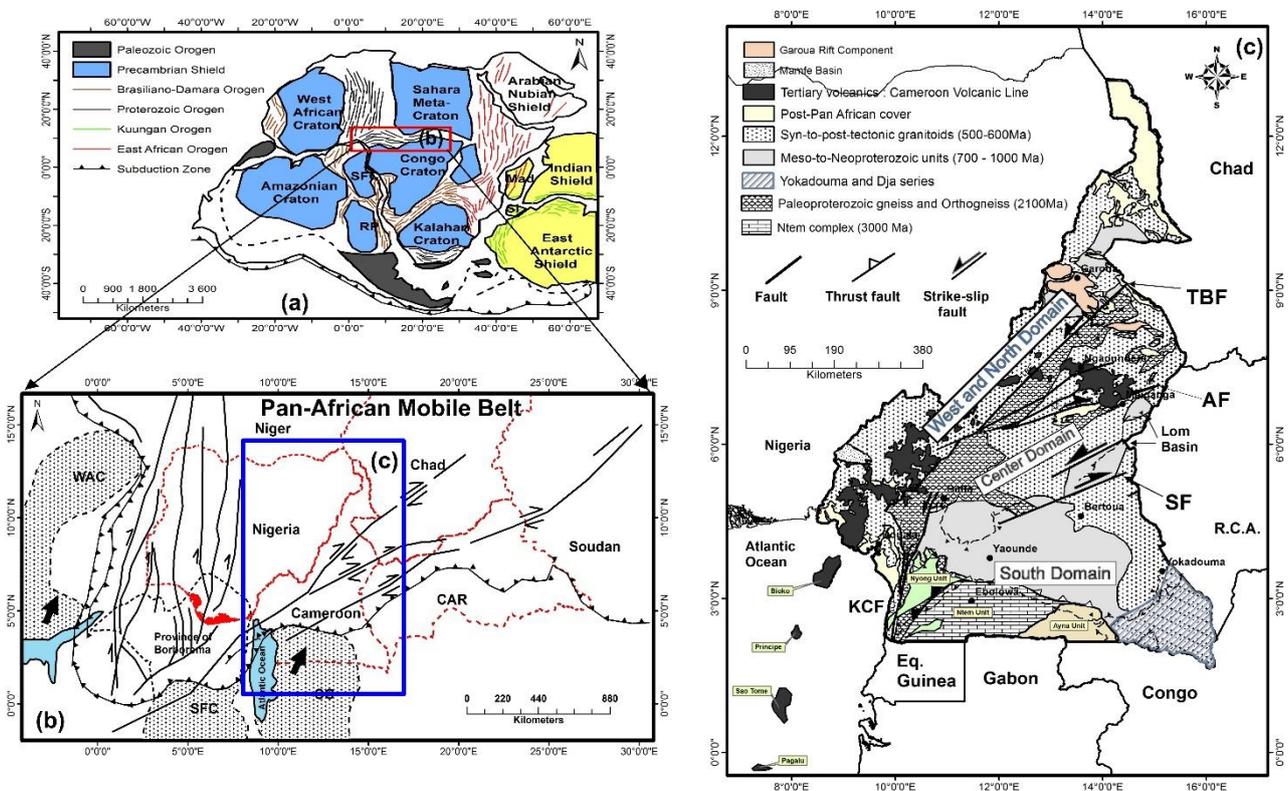


Figure 1.5 : a) Supercontinent Gondwana (Oliveira et al., 2006). Ouest du Gondwana (bleu clair), Est du Gondwana (Jaune), ceintures orogéniques liées à la fusion finale du supercontinent Afrique de l'Est (rouge), l'orogène Damara-Brasiliano (bleu) et Kuungan orogène (vert). b) La Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale : reconstitution géodynamique à l'échelle continentale (Nédélec et al., 1986 ; Nzenti et al., 1988 ; Caby et Boessé 2001 ; Oliveira et al., 2006). c) Illustration des domaines Panafricains du Cameroun : domaine Sud Cameroun, domaine Centre Cameroun et le domaine Ouest et Nord Cameroun (Toteu et al., 2001 et 2004).

c. Le domaine Panafricain Sud Cameroun

Le domaine Sud-Cameroun s'étend du Craton du Congo jusqu'au domaine Adamaoua-Yadé et se prolonge en République Centrafricaine où il est connu sous le nom des Oubanguides qui, pour certains auteurs désigne toute la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale (CPAC) (Poidevin, 1991), et au Nord-Est du Brésil par la Chaîne Sergipano (Toteu et al., 2001 ; Oliveira et al., 2006). Il correspond à une nappe de charriage allochtone posée sur le complexe du Ntem et les séries de Dja et Yokadouma (Nédélec et al., 1986 ; Nzenti et al., 1994 ; Toteu et al., 2004). Sa particularité lithologique est l'absence de granitoïdes tardi à post-tectoniques, formations très abondantes dans les autres domaines de la Chaîne Panafricaine au Cameroun (Toteu et al., 2001 et 2004). Dans ce domaine on distingue quatre groupes : le groupe de Mbalmayo, le groupe de Yaoundé, le groupe de Bafia et les séries de Dja inférieur, Yokadouma, Nola et Mintom.

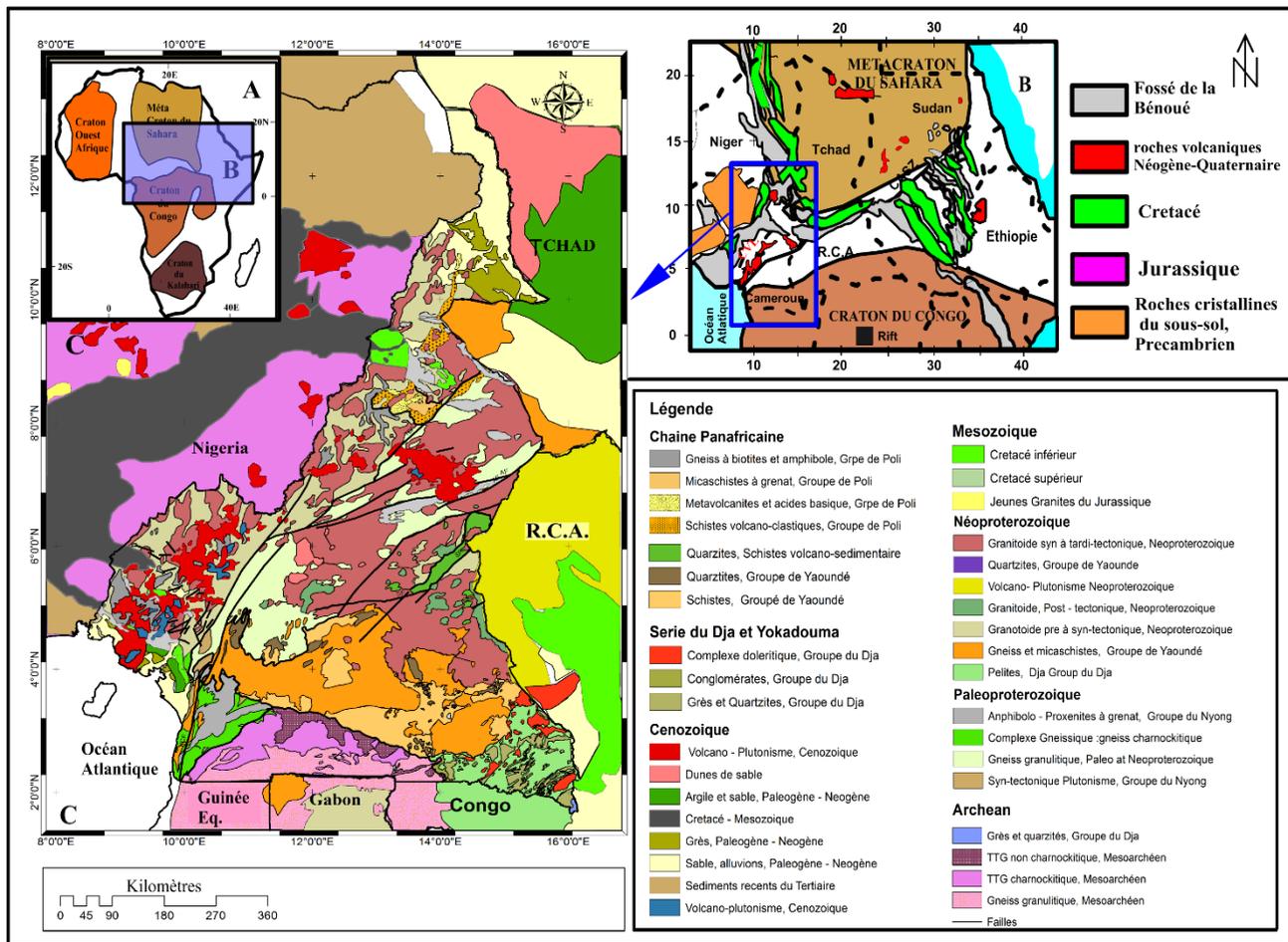


Figure 1.6: Les Cratons d’Afrique ; A) les Cratons et Métacraton Précambrien d’Afrique (dessinés d’après Abdelsalam et al., 2011) ; B) carte tectonique de la Chaîne Orogénique de l’Afrique Centrale (COAC) et les éléments tectoniques environnants à partir de la carte tectonique de l’Afrique. L’échelle 1 : 10.000.000 ; C) carte géologique du Cameroun (dessinée d’après Toteu et al., 2008).

1.2.3. Géodynamique de la Chaîne Panafricaine du Cameroun

La portion camerounaise de la Chaîne Panafricaine souvent qualifiée de “ Chaîne Panafricaine Nord-équatoriale”, constitue la plus grande partie des affleurements au Cameroun. Elle appartient à la Chaîne Panafricaine des Oubanguides qui borde le Craton du Congo au Nord (Poidevin, 1983).

La Chaîne Panafricaine Nord-équatoriale (Nzenti et al., 1988 ; Barbey et al., 1990) est considérée comme le résultat d'une convergence et d'une collision entre le Craton du Congo et la ceinture mobile (Poidevin, 1983 ; Nzenti et al., 1988 ; Rolin, 1995 ; Toteu et al., 2001 ; Abdelsalam et al., 2002 ; Penaye et al., 2006), ou comme une collision entre différents blocs de la ceinture mobile (Castaing et al., 1994). Les traits caractéristiques d'une chaîne de collision sont : les nappes externes d'extension régionale, le métamorphisme granulitique de haute pression, le plutonisme intense, les failles cisailantes régionales et la présence probable de molasse (Toteu et al., 2004). Dans la partie Nord de la Chaîne Panafricaine, les auteurs considèrent que la structure actuelle résulte de la collision de plusieurs arcs avec le domaine Adamaoua-Yadé (Penaye et al., 2006).

1.2.4. Le Craton du Congo (CC)

Au Cameroun, la terminaison septentrionale du Craton du Congo, encore appelée complexe du Ntem, a été subdivisée en trois unités en fonction de l'âge et de la lithologie qui occupe la plus grande partie de l'Afrique Centrale :

- **l'unité du Ntem**, ensemble de gneiss granulitiques comprenant un complexe plutonique intrusif qui forme la série rubanée et des sillons ferrifères qui sont des ceintures de roches vertes contenant des quartzites ferrifères. Ce complexe plutonique intrusif est composé de granitoïdes charnokitiques datant de 2,90 Ga (Delhal et Ledent, 1975 ; Lasserre et Soba, 1976 ; Cahen et al., 1984 ; Toteu et al., 1994 ; Tchameni, 1997) ;
- **l'unité du Nyong**, considérée comme l'équivalent de l'Unité archéenne du Ntem restructurée au Panafricain (Lasserre et Soba 1976 ; Cahen et al., 1984 ou à l'Eburnéen (Feybesse et al., 1986). Elle est en fait en grande partie composée de métasédiments et de metabasites Paléoproterozoïques (Toteu et al., 2001) ;
- **l'unité de l'Ayina**, située à l'est de l'Unité du Ntem, les séries volcano-sédimentaires constituent probablement un sillon Paléoproterozoïque. Cette unité est composée de granodiorites datant de 2Ga (Maurizot et al., 1986).

Ces unités constituent le socle des ensembles Panafricains. Plus au Nord, d'autres unités Paléoproterozoïques se présentent en lames à l'intérieur du Panafricain et rappellent des écailles de socle mises en place au cours d'une tectonique tangentielle (Ngako, 1999). Des ceintures de roches vertes sont reconnues dans chacune des trois unités précédentes.

1.2.5. La Ligne Volcanique du Cameroun (LVC)

La Ligne Volcanique du Cameroun est un alignement N 30° E de complexes plutoniques et de massifs volcaniques océaniques et continentaux qui s'étire sur plus de 1 600 km, pour une largeur d'environ 100 km par endroits du golfe de Guinée jusqu'au Lac Tchad (Ngounouno et al., 2006). Elle est étendue de manière oblique sur le domaine Panafricain Nord-Ouest du Cameroun et le domaine Centre Cameroun sur lequel se localise le Plateau volcanique de l'Adamaoua. La LVC est composée de roches plutoniques variées (granites, diorites, syénites, gabbros). Elle comporte deux segments : i) un segment océanique, qui comprend les îles Pagalu, Sao Tomé et Príncipe, Bioko (ex Fernando Poo) ; ii) un segment continental, constitué par une succession de volcans (Mt. Cameroun, Mt. Manengouba, le Mt Bamboutos, le Mt Oku, ...). La mise en place du magmatisme de la LVC apparaît liée à la réactivation d'anciennes structures Panafricaines dans un contexte qui a fait l'objet d'interprétations variées (Déruelle et al., 1991).

1.2.6. Origine de la Ligne Volcanique du Cameroun

Le mécanisme de formation du volcanisme intra-plaque tel que celui de la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC) est l'un des problèmes controversés de la tectonique mondiale. Les modèles proposés par des études antérieures incluent la réactivation d'anciennes zones de suture, l'amincissement de la lithosphère dans les régions très chaudes du manteau et la convection du manteau par les bords.

Le modèle de panache mantellique a été utilisé pour expliquer l'origine de la LVC (Morgan, 1983) ; Lee et al., 1994 et Burke, 2001), ont noté que son orientation coïncide presque avec le sens absolu du mouvement des plaques. Cependant, la datation des roches volcaniques montre un volcanisme sporadique sur toute la longueur de la LVC au cours des 42 derniers Ma, contrairement à ce à quoi on pourrait s'attendre d'une plaque se déplaçant au-dessus d'un chalumeau unique et stationnaire (Adams et al., 2015). Ceci a conduit à plusieurs études qui ont proposé une variété de modèles impliquant le réservoir magmatique comme source pour expliquer l'origine de la LVC.

Pour contourner cette critique, certains ont suggéré qu'une convection à petite échelle dans la tête du panache pourrait avoir causé l'absence de progression de d'ordre chronologique. Par exemple, Burke (2001) stipule qu'un changement de mouvement de la plaque autour de 30 Ma a généré de nouvelles cellules de convection à petite échelle dans le manteau supérieur focalisées dans la bordure occidentale de la marge continentale au Cameroun. Une autre possibilité est que la LVC se soit formée à partir d'un volcanisme le long d'une zone de cisaillement créée lors de l'ouverture de l'Océan Atlantique (Fairhead, 1988). Fairhead et Binks (1991) suggèrent que l'ouverture des zones de cisaillement réactivées de l'Atlantique dans la région Cameroun / Nigéria, accompagnée d'une extension de la lithosphère à l'intérieur du continent est liée au mouvement différentiel entre l'ouverture de l'Atlantique central et l'Atlantique équatorial (Adams et al., 2015). Ce modèle a essayé d'expliquer l'éruption sporadique du volcanisme le long de l'ensemble de la

LVC, mais le moment du volcanisme prédit par ce modèle est problématique car l'Atlantique a commencé à s'ouvrir dans cette région au cours du Crétacé précoce (Nzenti et al., 1988).

Au Cameroun, le Craton du Congo est délimité au Sud et possède une structure lithosphérique plus dense que sur la LVC. Il a été suggéré que la différence d'épaisseur lithosphérique entre le CC et la lithosphère Protérozoïque au nord du dit Craton pouvait avoir généré une convection dirigée par les bords (King et Anderson, 1995, 1998 ; King et Ritsema, 2000). Les effets isolants de la lithosphère cratonique plus épaisse contrairement à la lithosphère plus mince de la Ceinture mobile Panafricaine entraînent des variations de température du manteau sub-lithosphérique et lithosphérique conduisant à deux types de régimes d'écoulement convectif (King et Anderson 1995, 1998). Ainsi donc, un matériau plus chaud sous la lithosphère cratonique épaisse et isolante s'écoule vers la lithosphère plus mince située sous la ceinture mobile. De plus, les études sismiques plus récentes, grâce à l'inversion conjointe des vitesses de groupes des ondes de Rayleigh et des fonctions récepteurs pour 32 stations sismiques déployées entre janvier 2005 et février 2007 pour calculer l'épaisseur de la croûte, ont permis de mettre en évidence des profondeurs de Moho variant entre 35 et 39 km le long de la LVC (Tokam Kamga et al., 2010).

1.3. Travaux géophysiques antérieurs

Les premiers travaux de prospection géophysique au Cameroun étaient des travaux de reconnaissance. La première campagne gravimétrique a été menée sur l'ensemble du territoire du Cameroun entre 1960 et 1967 par l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer) aujourd'hui dénommé Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et a conduit à l'établissement des cartes d'anomalies gravimétriques de reconnaissance du Cameroun. Le levé gravimétrique de Collignon (1968) révèle un gradient particulièrement important des anomalies gravimétriques dans la partie Sud-Ouest de la région. Ce gradient suggère l'existence de mouvements tectoniques importants.

Par la suite, plusieurs autres travaux géophysiques se sont déroulés avec une diversité de méthodes. Ces méthodes géophysiques ont permis d'appréhender un certain nombre de problèmes à grande échelle, relatifs à la structure interne de la Terre et à son comportement dynamique.

L'investigation géophysique de la zone de transition entre le Craton du Congo et le bassin sédimentaire de Kribi-Campo dans le Sud-Cameroun par Owona Angue et al. (2011) à partir de trois méthodes géophysiques combinées (sismique, gravimétrique et magnétotellurique) a permis de mettre en évidence des différentes épaisseurs respectives (28 km et 45,5 km) sous les deux régions tectoniques et de suggérer également à partir de la modélisation 2D^{1/2} que la faille de Kribi-Campo (FKC) résulte de l'intrusion des roches magmatiques qui aurait été provoquée par la collision continentale ou plus tard, se sont métamorphosées dans des granulites. Mais seulement ces travaux n'ont pas pu étendre la zone

d'investigation au-delà de la bordure Nord du Craton du Congo dans le but de voir l'implication des structures de la Chaîne Panafricaine sur toute la bordure Ouest du Craton du Congo.

L'investigation géophysique par combinaison des méthodes magnétotellurique et gravimétrique dans la région d'Abong-Mbang (Mbom Abane, 1997) a permis de mettre en évidence les traits structuraux parmi lesquels l'accident majeur E-W passant par Abong-Mbang et traduisant un mouvement vertical ayant entraîné l'effondrement du socle cratonique au sud du parallèle 4°N dont la localisation conduit à l'identification de la limite septentrionale géophysique du Craton du Congo. Ces travaux ne se sont pas appesantis sur les phénomènes qui en étaient responsables.

Les résultats de l'investigation pour la délimitation des linéaments dans le Sud-Cameroun à partir des données gravimétriques plus précisément au Sud-Ouest (Owona Angue et al., 2013), ont permis d'établir une carte des linéaments dans cette localité, montrant les principaux accidents tectoniques caractéristiques de la région. Ces travaux se sont limités à la cartographie des linéaments de la localité sans toutefois essayer d'inverser les données gravimétriques dans le but de voir comment se comporte la densité des structures géologiques avec la profondeur dans la croûte. De plus ces auteurs auraient couplé également les données gravimétriques aux données magnétiques afin de recenser avec plus d'affinité les accidents tectoniques du Sud-Ouest Cameroun.

L'analyse gravimétrique sous le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine du Cameroun (Tadjou et al., 2009) a permis d'estimer la profondeur du Moho à 47 km dans la partie centrale du Craton du Congo ; de plus, ces mêmes auteurs ont montré que le Craton du Congo dans sa partie centrale est caractérisé par les signatures gravimétriques de faibles amplitudes. Ils ont également expliqué que la présence des anomalies de faibles amplitudes observées au Centre du CC est due à un affaissement des structures du domaine cratonique.

L'imagerie gravimétrique des structures sous la croûte dans le sud-Cameroun et son implication tectonique (Nguia et al., 2018) a permis de mettre en évidence les accidents tectoniques de la partie septentrionale du Craton du Congo localisée au Cameroun et de retracer son évolution grâce à l'analyse multi-échelle puis conclure que cette dernière pourrait avoir une origine mantellique. Cependant, malgré la localisation des accidents tectoniques dans cette localité, ces auteurs ne se sont pas penchés sur l'analyse des structures intracrustales de la Chaîne Panafricaine dans son ensemble pour essayer de voir leurs implications sur sa bordure Nord avec le Craton du Congo et l'origine de la LVC.

L'étude gravimétrique du comportement de la lithosphère sous le Plateau de l'Adamaoua (Poudjom et al., 1992) a permis de suggérer une remontée de l'asthénosphère dans le manteau supérieur. Ils suggèrent également la variation de l'épaisseur de la croûte au nord et au sud du Plateau de l'Adamaoua.

Plus tard, l'étude de la lithosphère continentale et son implication géodynamique sur le Cameroun (Poudjom, 1994) a montré que la lithosphère des Cratons d'Afrique est plus dense que celle des zones de rift et de bombements volcaniques et un amincissement crustal et lithosphérique sous le massif de l'Adamaoua.

L'étude de la structure dans la croûte de la LVC et les régions limitrophes par Tokam Kanga et al. (2010) en utilisant les modèles 1D des vitesses des ondes de cisaillement à partir de 32 stations sismiques à bande large déployées entre janvier 2005 et février 2007 a constaté que l'épaisseur dans la croûte est comprise entre 35 km et 39 km dans la LVC. Ils ont également montré que la croûte est plus épaisse (43 - 48 km) sous la marge Nord du CC et plus mince dans le rift de Garoua et la plaine côtière (26-31 km). Ces auteurs ne se sont pas intéressés sur l'origine de la LVC et son interaction avec le CC.

L'étude de la structure du manteau supérieur sous le Cameroun d'après la tomographie sismique et l'origine de la LVC (Reusch et al., 2010) a suggéré que la LVC, bien qu'elle soit alignée, présente des structures géologiques sans progression d'âges qui traversent la frontière Océan-Continent en Afrique. Ces auteurs, pour expliquer l'origine de la LVC, évoquent la fusion par décompression réactivée sous la zone de cisaillement suivie d'un écoulement le long de la limite Nord de la lithosphère du CC.

L'utilisation de l'ensemble des données du modèle gravimétrique terrestre (EGM2008) pour analyser les anomalies gravimétriques régionales et étudier les structures souterraines du Cameroun a permis de créer une base de données des anomalies à l'air libre de haute résolution, puis de corriger le champ gravimétrique des effets topographiques en utilisant les données ETOPO1 pour une résolution de 0,01° de l'anomalie de Bouguer (Ngatchou et al., 2014). Ces mêmes auteurs ont appliqué la technique d'analyse des ondelettes pour séparer les composantes du champ gravimétrique, superficielles, moyennes et profondes puis ont utilisé la technique du spectre de puissance logarithmique pour obtenir des images détaillées et des profondeurs de sources correspondantes au Cameroun.

L'étude de l'instabilité lithosphérique et la source de la LVC comme preuve de la tomographie par les vitesses de phases des ondes de Rayleigh (Adams et al., 2015) a permis de démontrer une infiltration ou une érosion généralisée de la lithosphère continentale sous la LVC. Ces auteurs suggèrent que cette infiltration aurait très probablement été causée par une remontée du manteau associée à la convection de flux de bord induite par le CC ou par des instabilités lithosphériques qui se développent en raison de la bordure proche du continent africain.

L'étude de la tomographie du bruit ambiant de la LVC, le CC et les nouvelles contraintes sur la structure de la lithosphère (Guidarelli, et Aoudia, 2016), grâce aux mesures de la dispersion de vitesse de groupe à partir des ondes de Rayleigh a permis de fournir une cartographie des propriétés des différentes unités

crustales et leurs corrélations avec la géologie de surface. Ils révèlent également que la croûte sous la zone de cisaillement d'Afrique Centrale présente une anomalie de faible vitesse et que la lithosphère sous le Cameroun est caractérisée par une croûte hétérogène avec une épaisseur relativement constante et un manteau supérieur à faible vitesse au bord du Craton du Congo. Ils proposent aussi que le Mt Cameroun soit une zone à risque et est caractérisé par une activité magmatique importante.

L'étude de la structure lithosphérique sous les champs orogéniques de l'Afrique Centrale dans le Cameroun par l'analyse des données gravimétriques satellitaire et sismique passive a permis d'estimer la profondeur du Moho de l'ensemble de la lithosphère du Cameroun (Goussi Ngalamo et al., 2018). De plus ces mêmes auteurs ont également estimé les profondeurs des limites entre la lithosphère et l'asthénosphère du Cameroun sous les Champs Orologéniques de l'Afrique Centrale. Cette étude montre que le Champ Orologénique de l'Afrique Centrale est localisé au Cameroun sur la bordure Nord du CC et représenté par les domaines Ouest Cameroun, Adamaoua–Yadé et Yaoundé. Ils ont interprété la limite lithosphère – asthénosphère sous le Champ Orologénique de l'Afrique Centrale comme une zone de délamination du manteau lithosphérique sous continental le long de la bordure Nord du CC. Ils considèrent que ce phénomène a permis la canalisation de l'écoulement du manteau au cours du Cénozoïque et a entraîné la formation de la LVC. Ces auteurs auraient dû faire l'inversion des anomalies gravimétriques et une analyse multi-échelle pour affiner cette hypothèse.

La configuration de la croûte du Cameroun à partir de la gravimétrie globale et les modèles topographiques et données sismiques (Kemgang Ghomsi et al., 2019), en utilisant les informations gravimétriques obtenues à partir des données XGM2016, ainsi que les données topographiques, bathymétriques et sismiques, ont interprété la structure crustale sous la Cameroun en appliquant l'inversion gravimétrique non linéaire régularisée pour déterminer la profondeur du Moho. Les modèles proposés ont reflété la configuration tectonique régionale et la structure géologique du Cameroun principalement constituée de deux unités majeures à savoir la LVC et le CC. Ils ont également analysé la corrélation spatiale entre la géométrie du Moho et la topographie en indiquant un état isostatique des unités géologiques particulières tout en suggérant leurs stades de compensation.

Cependant, la majeure partie de ces études, pour expliquer l'origine de la LVC a évoqué la notion de convection de bord qui se serait produit à la bordure de la partie septentrionale du Craton du Congo localisée au Cameroun (King et Anderson, 1995 ; King et Ritsema, 2000 ; Reusch et al., 2010 ; Adams et al., 2015), mais seulement, ces études n'ont pas cherché à comprendre s'il pourrait y exister une quelconque interaction entre le CC et la LVC.

Les travaux sur la cartographie des linéaments tectoniques majeurs au Cameroun à partir des données gravimétriques in situ et la grille du modèle magnétique terrestre ont permis de proposer une carte

structurale des accidents caractéristiques du sous-sol camerounais (Cheunteu Fantah et al., 2022). La carte des linéaments géophysiques mis en évidence par ces auteurs a montré que la structure du sous-sol intracrustal au Cameroun est fortement accidentée. Ces mêmes auteurs ont suggéré que la plupart de ces linéaments peuvent être liés à des failles, certaines à des failles majeures et que la majorité pourrait être encore actives compte tenu des tremblements de terre enregistrés dans la majeure partie du pays.

Ces différents travaux géophysiques effectués dans la région ont été d'un grand apport pour les travaux de reconnaissance, l'étude des structures profondes et superficielles et une avancée significative sur la tectonique régionale et la géodynamique. Malgré les résultats de ces multiples travaux, la connaissance de la région demeure toujours insuffisante, notamment sur le plan structural, tectonique et la modélisation des structures géologiques. Dans ce travail nous allons exploiter les méthodes magnétiques et gravimétriques combinées afin de contribuer davantage à la compréhension du comportement des structures géologiques du sous-sol au Cameroun et résoudre les problèmes géologiques qui se posent dans la région. Il s'agira ici d'interpréter les anomalies de Bouguer et du champ magnétique total, caractérisées par la superposition de l'influence des structures superficielles et profondes. Cette interprétation conduira à la mise en évidence et la compréhension des structures particulières encore mal connues.

1.4. Problématique

La structure de la lithosphère terrestre a subi au cours de son évolution d'énormes modifications. L'analyse et la compréhension des déformations subies par les roches, les processus thermo-mécaniques responsables de ces déformations de la lithosphère, les formations des nappes, des plis et l'étude de l'histoire des mouvements qui ont formé les régions et les montagnes sont les préoccupations des chercheurs dans le domaine de la Physique de l'Environnement Terrestre. Dans le cadre de ce travail, trois questions sont soulevées ; il s'agit entre autres de :

- la question sur la structuration globale des accidents tectoniques qui caractérisent la structure de la lithosphère du Cameroun représentant des véritables enjeux environnementaux, énergétiques et socio-économiques,
- la question sur l'origine et la mise en place de la Ligne Volcanique du Cameroun,
- la question sur l'interaction entre la Ligne Volcanique du Cameroun et le Craton du Congo.

Le Cameroun, dans son ensemble est traversé par un certain nombre de traits et ensembles structuraux à savoir : la faille de la Sanaga (FS), le Cisaillement Centre du Camerounais (CCC), la faille de Tcholliré Banyo (FTB), la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC) et la faille de Kribi-Campo (FKC). Ces grands traits structuraux caractéristiques du Cameroun ont été mis en évidence par les investigations géologiques (Toteu et al., 2001, 2004 ; Njonfang et al., 2006). Les directions, les orientations et les distances de ces discontinuités ont été localisées grâce à la méthode d'extrapolation afin de mettre en évidence les accidents

tectoniques que nous présentent les cartes géologiques. Ces accidents tectoniques mis en évidence par les travaux géologiques antérieurs se distinguent par leurs formes et leurs ères géologiques. La présence des accidents tectoniques est généralement l'expression des processus plus complexes se produisant dans le sous-sol et qui peuvent être déclenchés par la convection dans le manteau terrestre ou par des activités chimiques et thermo-mécaniques dans la lithosphère. Ces accidents tectoniques sont la preuve que la lithosphère sous le Cameroun est dynamique.

Ainsi, le tracé et l'extension des accidents qui affectent le Cameroun, la géométrie des bassins qu'ils délimitent ne peuvent être approchés uniquement par les données de surface ou plus ou moins visibles sur le terrain. A cause du fait que les observations géologiques ne se limitent qu'à l'affleurement, il subsiste alors des imprécisions dans la connaissance de la structure du sous-sol de la région. C'est grâce aux méthodes géophysiques qui, par les mesures en surface des paramètres physiques et leurs variations, vont permettre de déterminer des formes structurales profondes et d'avoir une meilleure compréhension de l'évolution de la géodynamique des structures géologiques. Jusqu'ici, certains auteurs ont pu mettre en évidence les linéaments géophysiques caractéristiques du Cameroun sans toutefois procéder à sa structuration globale (Noutchogwe Tatchum, 2010 ; Ndougssa-Mbarga et al., 2012 ; Owona Angue et al., 2013 ; Jean Marcel et al., 2018 ; Nguiya et al., 2018 ; Mouzong et al., 2018 ; Som Mbang et al., 2018).

En ce sens, la carte qui illustre les accidents tectoniques globaux des linéaments à partir des méthodes géophysiques combinées à savoir gravimétriques et magnétiques sur l'ensemble de la lithosphère du Cameroun n'a pas encore été proposée, suscitant dans ce travail une attention particulière.

De plus, au cours des dernières décennies, d'importants efforts ont été orientés vers la modélisation de la LVC visant à comprendre sa géodynamique et son origine. A l'issue de ces efforts, plusieurs modèles ont été proposés. Certains modèles ont évoqué l'existence d'une ou plusieurs panaches mantelliques (Ngako et al., 2006), d'autres ont suggéré que les structures lithosphériques préexistantes contrôlent la formation de la Ligne Volcanique du Cameroun (Reusch et al., 2010; Ebinger and Sleep, 1998), et une grande classe de modèles pour le phénomène de convection par une variété de forces conduisant à la formation de la Ligne Volcanique ont été proposés (King et Anderson, 1995, 1998; Meyers et al., 1998; King et Ritsema, 2000). De ces modèles, deux grandes hypothèses sur la Ligne Volcanique du Cameroun et les modèles de convection ont été proposés :

1) l'hypothèse d'un point chaud (« hot spot ») pour expliquer l'origine de la LVC, suggérant que sa lithosphère se sera déplacée dans le temps au-dessus d'un chalumeau (Lee et al., 1994). Cette théorie du point chaud est discutable car, la tomographie sismique et les datations effectuées jusqu'à présent le long de la Ligne du Cameroun ne mettent nullement en évidence une éventuelle migration spatio-temporelle des activités volcaniques (Reusch et al., 2010) ;

2) l'hypothèse d'une ligne chaude (« hot line »), qui considère un réservoir magmatique linéaire profond, situé sur une succession de fractures en zone de faiblesse de la lithosphère et qui fonctionne par intermittence (Fairhead et Okereke, 1987 ; Nnange et al., 2000), nous apparaît plus plausible.

Les résultats des études géophysiques et géologiques effectuées dans la partie méridionale du Cameroun ont permis de localiser la terminaison septentrionale Nord et Ouest du CC avec la Chaîne Panafricaine. La zone de transition Nord qui est bien matérialisée dans le Sud Cameroun, a une progression presque horizontale en direction de l'Ouest et qui finit par se diviser en deux bras ; un en direction du Sud (connu comme étant la faille de Kribi – Campo) et l'autre bras en direction du Nord-Ouest traversant la LVC pour progresser vers le Fossé de la Bénoué dont l'origine et la caractéristique restent encore inconnues. Cette dernière nous amène à croire qu'il pourrait y avoir une interaction entre la LVC et le Craton du Congo.

Les méthodes géophysiques dites potentielles étant assez efficaces pour une investigation structurale et tectonique, les résultats de cette étude régionale de la structure du sous-sol du Cameroun pourront nous aider à répondre aux questions posées dans ce travail. Ces questions représentent d'une part, les enjeux majeurs d'intérêt socio-économiques compte tenu des défis énergétiques et la lutte contre les catastrophes naturelles et d'autre part de contribuer davantage à la compréhension de l'origine de la LVC et la préoccupation sur son interaction avec le Craton du Congo.

1.5. Objectif de l'étude

Dans ce travail nous faisons une investigation géophysique à partir des données gravimétriques et magnétiques du Cameroun afin de contribuer davantage à la compréhension de la géodynamique des structures intracrustales de la lithosphère du Cameroun. Pour y parvenir, nous avons en amont procédé à une revue de la littérature afin de :

- présenter la zone d'étude dans son contexte géographique et géologique,
- recenser l'essentiel des travaux géophysiques ayant traité de la structure de la lithosphère du Cameroun en faisant ressortir les principaux résultats en rapport avec le thème de notre travail et suivi des critiques,
- présenter en suite la problématique autour de laquelle s'articuleront nos objectifs.

Ainsi, afin d'apporter des solutions à notre problématique, il convient de définir l'objectif de recherche à suivre pour mener à bien ce travail. Ainsi notre objectif a été réparti de la manière suivante :

- les objectifs principaux visant à faire ressortir la contribution globale que nous espérons apporter compte tenu du problème posé dans ce travail,
- les objectifs opérationnels ou spécifiques qui concernent les activités que nous comptons mener en vue d'atteindre les objectifs principaux.

1.5.1. Objectif principal

L'objectif principal de ce travail consiste à proposer une carte des linéaments gravimétriques et magnétiques pour la structuration globale du sous-sol camerounais afin d'essayer de comprendre l'implication de la géodynamique de la Chaîne Panafricaine sur l'origine de la Ligne Volcanique du Cameroun et son interaction avec le Craton du Congo.

1.5.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- faire le choix des données géophysiques à utiliser pour l'investigation à savoir : les données gravimétriques et magnétiques du Cameroun,
- appliquer les techniques de filtrage numérique adéquat aux données pour produire des cartes d'anomalies gravimétriques et magnétiques du sous-sol au Cameroun,
- produire également les cartes de gradients des anomalies gravimétriques et magnétiques afin de localiser les zones probables des accidents tectoniques,
- établir une carte des linéaments géophysiques mettant en évidence les traits structuraux du sous-sol camerounais et qui pourraient avoir un intérêt pour le développement socio-économique et servir également d'indicateur pour des zones à risques,
- appliquer le filtre passe-bas aux anomalies des signatures gravimétriques et magnétiques dont le but principal est d'étudier le comportement et la variation des structures géologiques de la lithosphère avec la profondeur afin d'essayer de comprendre d'avantage l'origine de la LVC,
- procéder à l'analyse quantitative à partir des méthodes spectrales et la déconvolution d'Euler des anomalies gravimétriques et magnétiques pour l'estimation respective de la profondeur moyenne des anomalies des structures géologiques à investiguer sous la LVC et le Craton du Congo et la distribution spatiale des profondeurs des anomalies des structures géologiques au Cameroun,
- faire l'inversion des anomalies gravimétriques pour étudier le comportement des blocs de densités dans la lithosphère sous la LVC et le Craton du Congo,
- pour certaines structures bien spécifiques (LVC et CC), proposer des modèles 2D $\frac{1}{2}$ et 3D grâce aux profils convenablement choisis afin d'essayer de comprendre davantage l'origine de la LVC et son interaction avec le CC dans la partie méridionale du Cameroun ;

1.6. Conclusion

Il était question dans ce chapitre de présenter la zone d'étude qui couvre tout le Cameroun dans son contexte géographique, géologique et tectonique, de présenter également les travaux géophysiques antérieurs et de dégager la problématique et les objectifs. Il ressort de ce chapitre que bon nombre de travaux géologiques et géophysiques ont déjà été effectués dans la région d'investigation et ont pu mettre en évidence un certain nombre de traits structuraux dans le sous-sol du Cameroun et proposer quelques modèles dont le but était de comprendre d'avantage l'origine de la LVC. Sous la base de notre thème et la revue de la littérature de notre étude, quelques questions ont été soulevées : la question sur la structuration globale des accidents tectoniques qui caractérisent la structure lithosphérique du Cameroun (représentant un véritable enjeu environnemental et socio-économique) et la question sur l'origine de la LVC et son interaction avec le Craton du Congo, suite à laquelle les objectifs principaux et spécifiques ont été définis. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les données utilisées dans ce travail ainsi que la méthodologie adoptée pour l'interprétation. Un rappel sur les principes théoriques des méthodes gravimétriques et magnétiques sera présenté en aval.

Chapitre 2

Données, méthodes et matériel

En Géophysique, le but de l'interprétation est généralement de déterminer les structures géologiques à partir des anomalies du champ géophysique observé à la surface de la Terre. Il s'agit donc d'accéder à la structure du sous-sol en estimant les paramètres physiques tels que la densité, la susceptibilité magnétique...) et la géométrie des formations géologiques à partir de leurs signatures géophysiques en surface. En ce sens, l'étude, à la surface de la Terre, du champ de pesanteur et du champ magnétique constitue deux des nombreuses applications de la physique des champs de potentiels. En Géophysique, elles sont réunies sous le vocable de méthodes potentielles qui se déclinent en deux disciplines étudiant les variations de chacun de ces deux champs : les méthodes gravimétriques et les méthodes magnétiques. Nous présentons dans ce chapitre, ces deux méthodes géophysiques exploitées pour l'investigation et la méthodologie de l'étude.

2.1. Densités des roches

Les roches sont des matériaux naturels généralement solides formés essentiellement ou en totalité par un assemblage de minéraux et caractérisées par un marqueur appelé densité. Ainsi, du fait de leurs hétérogénéités, il est nécessaire de distinguer entre les différentes densités relatives aux divers composants qui constituent le matériau appelé roche (Telford et al., 1990). Les mesures de densité sont souvent effectuées en laboratoire sur de petits affleurements ou des échantillons de carottes de forage (Telford et al., 1990). Cependant, les résultats de laboratoire donnent rarement la vraie densité car les échantillons peuvent être altérés. La densité des roches est fonction de la nature des minéraux les composants, et de la porosité. Les tableaux suivants donnent des valeurs de densité pour un grand nombre d'entre elles. Elles peuvent également être estimées à partir de la vitesse sismique. Par conséquent, la densité est souvent mal connue dans des situations de terrain spécifiques. Les tableaux 2.1, 2.2 et 2.3 mettent en évidence les valeurs des gammes et moyennes des densités des structures du sous-sol. De ces tableaux, il est connu que les roches sédimentaires sont généralement moins denses que les roches ignées et métamorphiques, altérées au cours du processus de densification. La large gamme de densité des roches sédimentaires est principalement due aux variations de porosité. La densité des roches sédimentaires est également influencée par l'âge, les antécédents et la profondeur d'enfouissement. Évidemment, une roche poreuse sera compactée lorsqu'elle sera enterrée. En général, la densité augmente avec la profondeur (Telford et al., 1990).

Tableau 2.1: Densité des sédiments et roches sédimentaires avec pour unité g/cm^3 d'après (Telford et al., 1990 ; Burger et al., 2006).

Roches	Intervalle	Moyenne (humide)	Intervalle	Moyenne (sec)
Alluvions	1,96-2,00	1,98	1,50-1,60	1,54
Argiles	1,63-2,60	2,21	1,30-2,40	1,70
Graviers	1,70-2,40	2,00	1,40-2,20	1,95
Loess	1,40-1,93	1,64	0,75-1,60	1,20
Sables	1,70-2,30	2,00	1,40-1,80	1,60
Sables et argiles	1,70-2,50	2,10	-	-
Limon	1,80-2,20	1,93	1,20-1,80	1,43
Terre	1,20-2,40	1,92	1,00-2,00	1,46
Grès	1,61-2,76	2,35	1,60-2,68	2,24
Marnes	1,77-3,20	2,40	1,56-3,20	2,10
Calcaires	1,93-2,90	2,55	1,74-2,76	2,11
Dolomies	2,28-2,90	2,70	2,04-2,54	2,30

Tableau 2.2: Densité des roches ignées avec pour unité g/cm^3 (Telford et al., 1990, Burger et al., 2006).

Roches	Intervalle	Moyenne	Roches	Intervalle	Moyenne
Obsidienne	2,20-2,40	2,30	Quartz à diorite	2,62-2,96	2,79
Rhyolite	2,35-2,70	2,52	Diorite	2,72-2,99	2,85
Dacite	2,35-2,80	2,58	Laves	2,80-3,00	2,90
Phonolite	2,45-2,71	2,59	Diabase	2,50-3,20	2,91
Trachyte	2,42-2,80	2,60	Basalte	2,70-3,30	2,99
Andésite	2,40-2,80	2,61	Gabbro	2,70-3,50	3,03
Granite	2,50-2,81	2,64	Péridotite	2,78-3,37	3,15
Granodiorite	2,67-2,79	2,73	Piroxène	2,93-3,34	3,17
Porphyre	2,60-2,89	2,74	Ignées acides	2,30-3,11	2,61
Syénite	2,60-2,95	2,77	Ignées basiques	2,09-3,17	2,79
Anorthose	2,64-2,94	2,78			

Tableau 2.3: Densités des roches métamorphiques avec pour unité g/cm³ (Telford et al., 1990).

Roches	Intervalle	Moyenne	Roches	Intervalle	Moyenne
Quartzite	2,50-2,70	2,90	Serpentine	2,40-3,10	2,78
Schiste	2,39-2,90	2,64	Ardoise	2,70-2,90	2,79
Grauwacke	2,60-2,70	2,65	Gneiss	2,59-3,10	2,80
Granulite	2,52-2,73	2,65	Schiste à chlorite	2,75-2,98	2,87
Phyllite	2,68-2,80	2,74	Amphibolite	2,90-3,04	2,96
Marbre	2,60-2,90	2,75	Eclogite	3,20-3,54	3,37
Ardoise quartzique	2,63-2,91	2,77	Métamorphique	2,40-3,10	2,74

2.2. Susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique est la variable importante du magnétisme. Elle joue le même rôle que la densité dans l'interprétation gravimétrique. Les échantillons, et de telles mesures ne donnent pas nécessairement la susceptibilité globale de la formation (Telford et al., 1990). La susceptibilité magnétique κ n'est pas constante pour une substance magnétique. Dans un volume de roche, elle caractérise l'attitude ou la possibilité qu'a cette roche à s'orienter sous l'influence d'un champ ambiant c.à.d. s'aimanter en présence d'un champ magnétique ambiant et mesure le degré auquel un matériau peut être magnétisé. Elle est cependant définie par la relation (2.1) :

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad \Rightarrow \quad \chi = \vec{J} / \vec{H} \quad (2.1)$$

où J : est l'aimantation ou l'intensité d'aimantation ; κ : la susceptibilité magnétique et H : champ inducteur.

Plus la susceptibilité augmente, plus grande serait l'intensité de la magnétisation induite J. La susceptibilité magnétique d'un volume de roche est une fonction de la quantité de minéraux magnétiques (surtout la magnétite et la pyrrhotite) qu'elle contient (Poisson, 1938). Les tableaux 2.4, 2.5, 2.6 ci-dessous présentent les valeurs de susceptibilités magnétiques k de quelques roches et minéraux (Thellier, 1938). Bien qu'il existe une grande variation, même pour une roche particulière, et un large chevauchement entre les différents types, les roches sédimentaires ont les plus faibles susceptibilités moyennes contrairement aux roches ignées basiques où les valeurs sont les plus élevées.

Tableau 2.4: Quelques valeurs de susceptibilités magnétiques des roches métamorphiques (Telford et al., 1990).

Roches métamorphiques	Susceptibilités magnétiques $\times 10^3$ (SI)	
	Gammes	Valeurs moyennes
Amphibolite	0 – 0,9	0,7
Schistes	0,3 – 3	1,4
Gneiss	0,1 – 25	–
Quartzite	–	4
Serpentite	3 – 17	–
Ardoises	0 – 35	6

Tableau 2.5: Quelques valeurs de susceptibilités magnétiques des roches ignées (Telford et al., 1990).

Roches ignées	Susceptibilités magnétiques $\times 10^3$ (SI)	
	Gammes	Valeurs moyennes
Granites	0 – 50	2,5
Ryolites	0,2 – 35	–
Dolorites	1 – 35	17
Gabbro	1 – 90	70
Basaltes	0,2 – 175	70
Diorites	0,6 – 120	85
Pyroxénites	–	125
Péridotite	90 – 200	150
Andésites	–	160

Tableau 2.6: Quelques valeurs de susceptibilités magnétiques des roches sédimentaires (Telford et al., 1990).

Roches sédimentaires	Susceptibilités magnétiques $\times 10^3$ (SI)	
	Gammes	Valeurs moyennes
Dolomite	0 – 0,9	0,1
Calcaires	0 – 3	0,3
Grès	0 – 20	0,4
Shales	0,01 – 18	0,6

2.3. Données géophysiques

2.3.1. Données gravimétriques terrestres

Les données gravimétriques (Figure 2.1) utilisées dans cette étude proviennent du Bureau Gravimétrique International (BGI) extraite sur la base de données gravimétriques mondiales et comprises entre les coordonnées 1° et 14° N de latitude et 8° et 17° E de longitude ; elles représentent une banque de données prises lors de levées réalisées par l'ORSTOM (Office de Recherche Scientifique des Territoires d'Outre-Mer). Pour dresser la carte des anomalies, il a été nécessaire de compiler l'ensemble des données disponibles au Cameroun avec une autre partie disponible sur les six autres états de l'Afrique Centrale et de l'Ouest : ORSTOM, (1960 – 1967), l'Université de Princeton (1968), Université de Leeds (1982) et l'IRGM – Université de Leeds (1984 – 1988).

Les mesures ont été faites selon les méthodes utilisées dans tous les levés gravimétriques de reconnaissance de l'ORSTOM en Afrique Centrale (Crenn, 1957) et occidentale (Crenn et Rechenman, 1965). Les campagnes ont été réalisées en voiture, le long des pistes ou des routes. Les mesures ORSTOM ont été effectuées tous les quatre kilomètres d'intervalle entre les stations gravimétriques. Les coordonnées ont été déterminées d'après les cartes topographiques et par cheminement à la boussole et les altitudes obtenues par nivellement barométrique au moyen des altimètres Wallace et Tiernan ou Thommen (type 3B4). Les gravimètres utilisés sont des Lacoste & Romberg (modèle G, n° 471 et 823), des Worden (n° 69, 135, 313, 1152), un Word Wide (n° 36), un Canadian Scintrex (n° 305G) et des North American (n° 124 et 165).

L'erreur sur les coordonnées d'une station peut varier de 0,1 à 1' (≈ 200 à 2000 m). Cette erreur est inférieure à deux cents mètres lorsque les coordonnées sont déterminées par GPS. L'erreur maximale sur l'altitude déterminée par nivellement barométrique peut atteindre dix mètres. Les valeurs de la pesanteur sont mesurées avec une précision de l'ordre de 0,2 mGal. La détermination des bases gravimétriques secondaires depuis les stations du réseau Martin a été réalisée avec une précision inférieure ou égale à 0,05 mGal.

2.3.2. Données du Modèle Gravitationnel Global (XGM2019e_2159)

Dans ce travail, nous utilisons également les données du modèle gravitationnel global (XGM19e_2159). Les ensembles de données utilisées dans le développement du modèle sont l'altimétrie, les données terrestres embarquées et aéroportées et la topographie (Zingerle, et al., 2019). Les satellites déployés pour la prise des données sont GRACE, GOCE, et LAGEOS). Les modèles de potentiel topographiques inclus représentent le potentiel gravitationnel généré par l'attraction des masses topographiques de la terre. Etant donné que la gravité dans les modèles n'est pas réelle, la valeur obtenue est celle prédite par les modèles

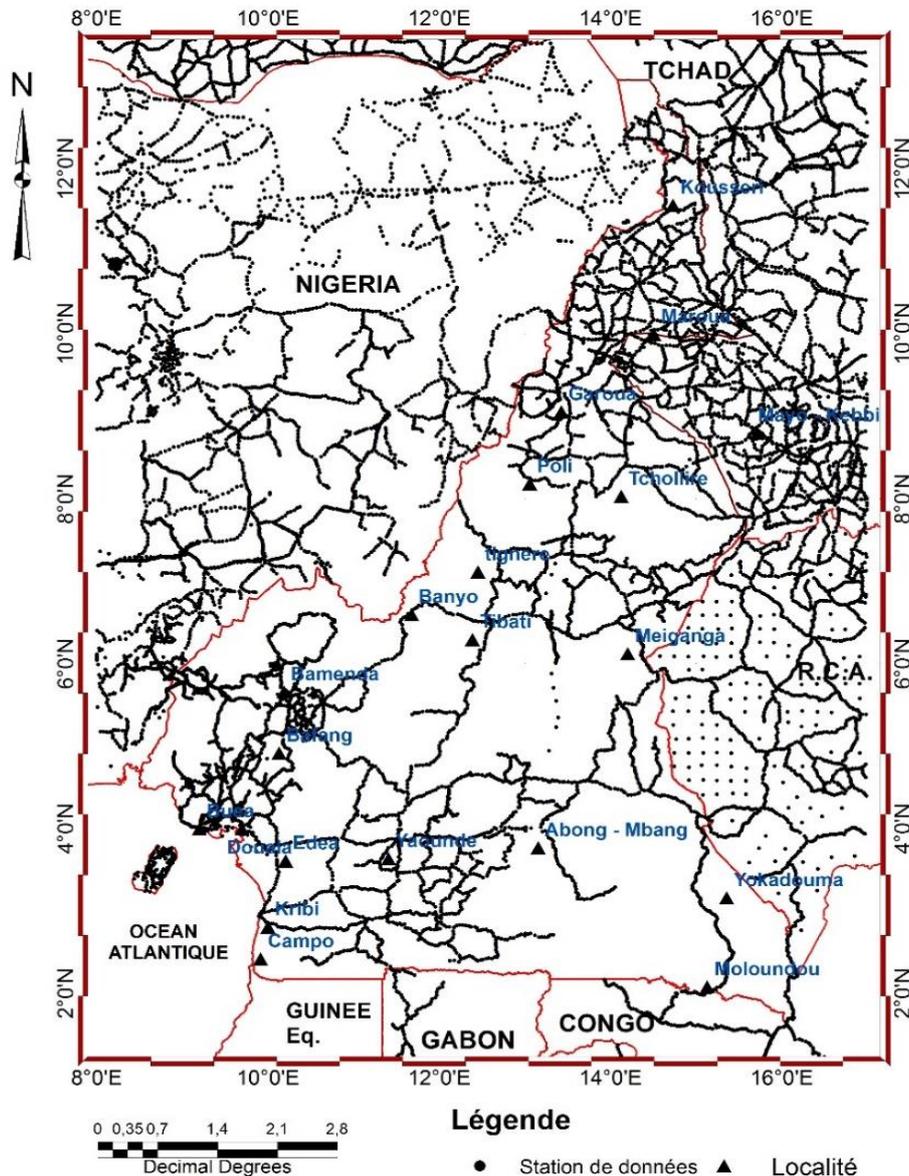


Figure 2.1 : Illustration des stations de mesures des données gravimétriques (Collignon, 1968).

La précision de la prédiction est principalement affectée par : la résolution et la précision (erreurs) du modèle numérique. Ce modèle gravimétrique a été extrait du site Web de l'ICGEM (International Centre for Global Earth Models) avec une résolution de $0,1^\circ$. Ces données ont été corrigées à partir de la méthode des tesséroïdes (Uieda et Barbosa, 2017) avec une distribution de densité homogène. Pour le calcul, 2670 kg.m^{-3} ont été utilisés comme valeur moyenne de la densité de la croûte continentale supérieure (Hinze, 2003) les corrections de gravité et bathymétriques ont été calculées pour un modèle de densité de l'eau de mer (Tenzer et al., 2010, 2011, 2012 ; Gladkikh et Tenzer, 2012) en fonction de la profondeur.

2.3.3. Données magnétiques

Les données magnétiques utilisées dans ce travail sont la grille des anomalies magnétiques des structures géologiques du sous-sol au Cameroun ; EMAG2 (Earth Magnetic Anomaly Grid). Ces données ont été mises à notre disposition par la National Oceanic and Atmospheric Administration l'Agence (NOAA) et extraites sur une grille globale d'anomalies magnétiques terrestres compilées à partir de mesures magnétiques satellitaires, navales et aéroportées. Il s'agit d'une mise à jour significative de la grille d'anomalies magnétiques numériques mondiale EMAG3 (Maus, et al., 2009). La résolution a été améliorée passant de 3 minutes d'arc à 2 minutes d'arc avec pour référence prise sur le géoïde. Des données supplémentaires sur la grille globale et les lignes de route ont été incluses, à la fois sur Terre et sur les Océans. L'interpolation entre les lignes de voie éparses dans les Océans a été améliorée grâce au quadrillage directionnel et à l'extrapolation, basé sur le modèle d'âge de la croûte océanique (Grauch et al., 2001). La mise à jour de cette base de données a été effectuée le 31 Août 2015. Ces données ont été utilisées et couplées avec les données gravimétriques pour l'investigation de la structure lithosphérique du Cameroun.

2.4. Anomalies des données géophysiques

2.4.1. Anomalies gravimétriques

La gravimétrie se fonde sur l'étude des anomalies du champ de pesanteur à la structure terrestre. L'inégale distribution des masses de la Terre restant la cause de ces variations, la localisation des zones structurales sur la base de données gravimétriques ne s'avère possible que grâce à l'inégalité de densités de ces structures. La différence d'enfouissement des discontinuités de densités, c'est-à-dire la surface de séparation entre les masses de roches hétérogènes est suffisamment grande, a engendré cela. Ceci signifie que l'intensité de la pesanteur est directement liée à l'attraction subie par l'instrument de la part de diverses parties de la Terre, compte tenu de la force centrifuge due à la rotation.

a. Anomalies de Bouguer et principe

– L'ellipsoïde de référence et la pesanteur théorique

La Terre n'étant pas sphérique à cause de sa rotation autour de l'axe polaire, sa forme peut être approximée par un ellipsoïde de révolution appelée ellipsoïde de référence, qui est une approximation du géoïde, surface équipotentielle de pesanteur coïncidant avec le niveau moyen des Océans lorsqu'on néglige l'effet des marées, des vents et des courants marins.

La pesanteur théorique en un point de latitude ϕ sur l'ellipsoïde de référence, adoptée en 1930 par l'U.I.G.G. (Union Internationale de Géodésie et de Géophysique) est calculée par la formule (2.2) :

$$g_{th} = 978049 [1 + 0,0052884 \sin^2\phi - 0,0000059 \sin^2(2\phi)] \quad (2.2)$$

où g est exprimée en mGals ($1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$) et ϕ en radians.

Depuis 1967, l'Association Internationale de Géodésie (A.I.G.) a adopté la formule (2.3) :

$$g_{th} = 978031,85 [1 + 0,005278895 \sin^2\phi - 0,0000023462 \sin^4\phi] \quad (2.3)$$

– L'anomalie de Bouguer

L'anomalie de Bouguer est la différence entre le champ de pesanteur terrestre mesuré en un point de la surface de la Terre ramenée au niveau de référence qui correspond au niveau moyen de la mer (géoïde) et le champ de pesanteur théorique calculé au même point sur le modèle théorique du globe terrestre et ce en tenant compte de l'altitude du point de mesure, du relief, du voisinage de la mesure et enfin, de la forme de la Terre elle-même qui présente un aplatissement aux deux pôles (Naudy et Newmann, 1965).

L'anomalie de Bouguer est égale à la mesure de g , corrigée des effets de dérive, d'altitude, de la latitude, des masses situées au-dessus du niveau de référence (plateau et topographie), moins la valeur de g_{th} du géoïde à la latitude du point de référence. Elle est définie par la relation (2.4) :

$$B = [g_{mes} + (V_C + A_f + \Delta g_L + \Delta g_P + \Delta g_t)] - g_{th} \quad (2.4)$$

avec :

g_{mes} : la valeur observée de la pesanteur en chaque station, préalablement corrigée de la marée luni-solaire et de la dérive instrumentale;

V_C : la correction de la dérive de l'appareil.

A_f : $0,3086 \cdot h$; la correction d'altitude ou correction à l'air libre, exprimée en (mGal), h étant l'altitude de la station en mètres.

Δg_L : $6,14 \cdot 10^{41}$ mGal (N => S) ; la correction de latitude qui tient compte des variations de g avec la latitude dues à la rotation de la Terre et à son aplatissement.

Δg_P : $- 0,0419 \cdot \rho_B \cdot h$; la correction de Plateau, exprimée en (mGal), ρ_B étant la densité moyenne de la croûte terrestre ;

Δg_t : la correction topographique qui élimine l'effet de l'attraction des reliefs autour de la station de mesure. Elle est toujours positive.

g_{th} : la valeur théorique de la pesanteur sur l'ellipsoïde de référence ;

Puisque l'anomalie de Bouguer compare le champ gravimétrique réel au champ d'un modèle homogène de la Terre, elle est la réponse gravimétrique de toutes les hétérogénéités situées à diverses profondeurs de la Terre. Les effets d'altitude, de terrains superficiels et de relief ayant été éliminés dans la Bouguer, une

anomalie positive traduit l'attraction des roches souterraines de densités plus grandes que la normale tandis qu'une anomalie négative traduit la perte d'attraction due à des roches de densités plus faibles que la normale. Dans la pratique, les anomalies gravimétriques de Bouguer sont présentées sous forme de cartes constituées de courbes joignant les points de même anomalies appelées iso-anomales.

2.4.2. Anomalies du champ magnétique

a. Champ magnétique terrestre

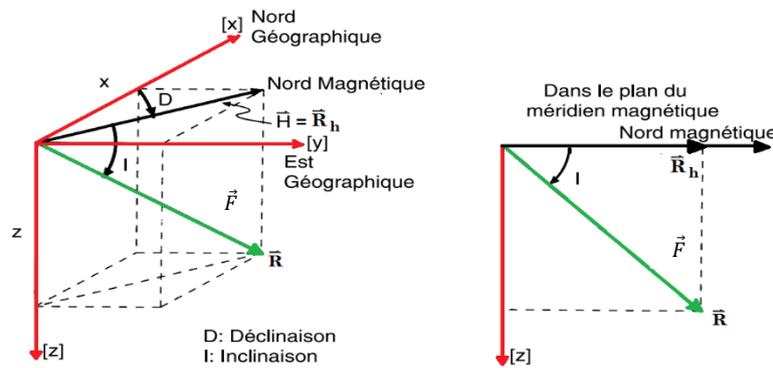
Le champ total observé en un point O de la surface terrestre est la somme de deux champs : un champ d'origine interne et un autre d'origine externe (Le Mouël, 1969). La contribution du champ magnétique d'origine interne se traduit par la superposition du champ généré par le géodynamo dans le noyau externe liquide d'origine profonde, appelé champ principal dominé par les grandes longueurs d'onde et d'un champ des roches magnétisées dans la croûte et le manteau supérieur d'origine superficielle. Ainsi, le champ crustal est dominé par les longueurs d'onde inférieures à 2500 km (Le Mouël, 1969).

b. Composantes du champ magnétique terrestre.

Dans un repère orthonormé à la surface de la terre, le champ total \vec{F} est défini par ses trois composantes (X, Y, Z), où X est la composante du champ suivant l'axe horizontal orienté positivement vers le Nord géographique, Y la composante suivant l'axe horizontal orienté positivement vers l'Est géographique et Z la composante du champ magnétique terrestre suivant l'axe vertical orienté positivement vers le bas (Figure 2.2). La projection horizontale du champ est notée \vec{H} et sa direction est déterminée par :

- **l'inclinaison magnétique** : l'angle que fait la direction du champ magnétique terrestre et le plan horizontal, compté positivement vers le bas. Elle présente globalement une symétrie par rapport à l'équateur ;
- **la déclinaison magnétique** : l'angle que fait la composante horizontale du champ magnétique terrestre avec le Nord géographique, compté positivement vers l'Est. Elle présente une certaine symétrie Nord / Sud ;

Le champ magnétique est considéré comme une grandeur quantitative des lignes de force. Il est représenté en chaque point du globe comme un vecteur caractérisant le module du champ et sa direction appelée intensité totale. L'intensité totale du champ magnétique est considérée comme une force agissante.



Source : Géophysique – cours et exercices corrigés ;

Figure 2.2: Schéma des caractéristiques du champ magnétique principal (Dubois et al., 2011).

avec :

F : Intensité du champ magnétique total ;

X : Projection du vecteur \vec{F} sur le méridien géographique (vers le Nord géographique) ;

Y : Projection du vecteur \vec{F} sur le parallèle géographique (vers l'Est géographique) ;

Z : Projection du vecteur \vec{F} sur la verticale descendante (vers le centre de la terre) ;

H : Composante horizontale, projection de \vec{F} sur le plan horizontal ;

D : Déclinaison magnétique, angle entre X et \vec{H} ;

I : Inclinaison magnétique, angle entre \vec{F} et \vec{H} ;

Le plan passant entre \vec{F} et \vec{H} est appelé : « méridien magnétique ».

2.4.3. Représentation analytique du champ géomagnétique

Grâce à l'avancée significative de la science, il a été possible à partir des données des observatoires d'établir une représentation analytique du champ géomagnétique sur le globe terrestre. En tout point du globe on peut calculer à partir de la latitude, de la longitude et de l'altitude une valeur théorique du champ à un instant donné à partir des modèles mathématiques du champ géomagnétique. Les modèles de champ géomagnétique conventionnellement représentés comme expansions harmoniques sphériques d'un potentiel magnétique scalaire peuvent être évalués en n'importe quel emplacement souhaité pour fournir le vecteur de champ magnétique, sa direction et son intensité (Cain et al., 1965). Cette valeur théorique (vectorielle) est donnée par les développements en harmoniques sphériques du potentiel géomagnétique (Cain et al., 1965). Ainsi, en dehors de sources locales de champ, entre la surface de la Terre et l'ionosphère, le potentiel géomagnétique s'écrit sous la forme :

$$V(r, \theta, \varphi) = a \sum_{n=1}^{n_{Max}} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi) P_n^m(\theta) \text{ (champ d'origine interne)}$$

$$+ a \sum_{n'=1}^{n'_{Max}} \left(\frac{r}{a}\right)^{n'} \sum_{m'=0}^{n'} (q_{n'}^{m'} \cos m'\varphi + s_{n'}^{m'} \sin m'\varphi) P_{n'}^{m'}(\theta) \text{ (champ d'origine externe)} \quad (2.5)$$

avec :

(r, θ, φ) : coordonnées géocentriques

n (resp, n') : degré du développement pour le champ d'origine interne (resp, externe),

m (resp, m') : ordre du développement pour le champ d'origine interne (resp, externe),

a : rayon terrestre moyen,

$P_n^m(\theta)$ et $P_{n'}^{m'}(\theta)$: polynômes associés de Legendre,

g_n^m, h_n^m et $q_{n'}^{m'}, s_{n'}^{m'}$: coefficients de Gauss, en nT.

Cette relation (équation 2.5) est la représentation mathématique du champ magnétique de référence mondial IGRF (International Geomagnetic Reference Field) adoptée selon un protocole d'accord international sous l'égide de l'Association Internationale de Géomagnétisme et d'Aéronomie (IAGA).

Ces IGRF sont établis à partir de différents modèles proposés par différentes équipes. Ils sont construits à partir de données disponibles à une certaine époque puis prolongées par un modèle de variations séculaires à l'époque du modèle de référence. Du fait qu'il est impossible de prédire exactement les variations dans le temps du champ magnétique, on note des écarts entre le vrai champ et le modèle IGRF prolongé à cette époque.

Dans la suite, on ne s'intéressera qu'au champ d'origine interne. Notons que le champ \vec{B} dérive de ce potentiel, et ses 3 composantes (X, Y, Z) peuvent être calculées en tout point P (r, θ, φ) par :

$$\vec{B} = -\overrightarrow{grad}V(r, \theta, \varphi) \quad (2.6)$$

$$\vec{B} = -\overrightarrow{\nabla}V(r, \theta, \varphi) \left\{ \begin{array}{l} X = \frac{1}{r} \frac{\delta V}{\delta \theta} \\ Y = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\delta V}{\delta \varphi} \\ Z = \frac{\delta V}{\delta r} \end{array} \right. \quad (2.7)$$

– l'anomalie du champ total

En prospection magnétique c'est la mise en évidence des anomalies qui nous intéresse. Les magnétomètres permettent de mesurer le champ total tandis que le développement des harmoniques sphériques nous permet

de calculer une valeur théorique du champ magnétique terrestre en n'importe quel point. Sous l'influence des roches du sous-sol, il se crée un champ supplémentaire dit champ anomal que l'on étudie (Le Mouél, 1969 ; 1970).

Par définition, une anomalie magnétique est la différence entre le champ observé (mesuré) et celui théorique (calculé). Cette grandeur est l'intensité du champ mesurée sur le terrain, à laquelle l'on soustrait l'intensité du champ de référence au même point de mesure.

En géophysique, le champ d'anomalie magnétique \vec{C} (Figure 2.3) est défini en toute rigueur comme la différence entre le vecteur champ magnétique terrestre mesuré \vec{B} et le vecteur champ de référence \vec{R} calculé d'après un des modèles globaux (Blakely, 1995) :

$$\vec{C} = \vec{B} - \vec{R} \quad (2.8)$$

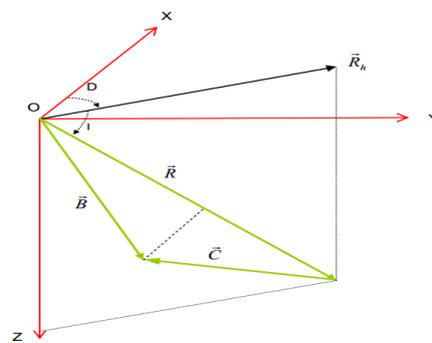


Figure 2.3 : Représentation dans l'espace du vecteur champ d'anomalie magnétique.

2.5. Les méthodes d'analyse

Le but de l'interprétation géophysique est d'essayer de fournir des modèles qui expriment l'idée que l'on se fait de la structure du sous-sol. Dans ce travail, nous interprétons les anomalies des données gravimétriques et magnétiques, afin de rendre compréhensives ces dernières et leurs donner un sens du point de vue géologique par la traduction des cartes gravimétriques et magnétiques en carte géologique et donner ainsi aux résultats des mesures un sens géologique. Quelques méthodes d'interprétation ont été adoptées afin d'interpréter les données de champs de potentiel de la structure du sous-sol au Cameroun.

Dans ce travail, nous avons adopté trois types de méthodes d'analyse des anomalies gravimétriques et magnétiques :

- l'analyse géostatistique ;
- l'analyse qualitative;
- l'analyse quantitative.

2.5.1. Analyse géostatistique des données

a. Le variogramme

En géostatistique, l'interpolation spatiale est une procédure qui consiste à estimer la valeur d'une variable aléatoire pour des sites non échantillonnés. Il existe plusieurs méthodes d'interpolation parmi lesquelles :

- la méthode d'interpolation classique basée sur des algorithmes purement déterministes ;
- la méthode d'interpolation géostatistique qui s'appuie sur une modélisation probabiliste du phénomène étudié.

Dans ce travail, nous nous sommes proposé d'exploiter la deuxième méthode pour l'interpolation des données gravimétriques et magnétiques. Ainsi, pour analyser la continuité spatiale des teneurs dans notre zone d'étude, nous avons utilisé le variogramme afin de mesurer le degré de dissimilarité entre les valeurs en fonction de leur éloignement. Il a permis d'analyser la dépendance spatiale d'observations (Matheron, 1965). Pour ce type d'interpolation, deux variogrammes sont considérés : il s'agit entre autres des variogrammes théoriques et expérimentaux. La technique d'interpolation consiste ici à analyser l'allure du variogramme expérimental tout en ajustant au mieux le variogramme théorique à ce dernier. La recherche de cette fonction informe sur les différents paramètres qui caractérisent ce variogramme. C'est en quelque sorte le comportement de ce dernier aux faibles distances et également aux grandes distances. Le variogramme expérimental est donné par la relation suivante :

$$\gamma(\mathbf{h})^* = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} ((Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h}))^2 \quad (2.9)$$

avec :

- $Z(\mathbf{x}_i)$, la valeur de Z au point \mathbf{x}_i , les \mathbf{x}_i sont des points pour lesquels les données sont disponibles à la fois en \mathbf{x}_i et en $\mathbf{x}_i + \mathbf{h}$.
- $N(\mathbf{h})$ est le nombre de couples de points distants de \mathbf{h} .

b. Le krigeage

Pour quantifier la structure spatiale et estimer les valeurs inconnues basées sur le "variogramme", nous avons utilisé le krigeage. Il utilise également une combinaison linéaire des données observées, mais à la différence des méthodes classiques d'interpolation, il tient compte à la fois de l'information relative à leur position et du caractère aléatoire du phénomène étudié. Ces avantages font considérablement améliorer les estimations dans le contexte spatial représentant le champ d'observation des données gravimétriques et magnétiques du Cameroun.

C'est ainsi que le krigeage ordinaire linéaire sans biais des données, est défini à partir des relations 2.10 :

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma(x_j, x_i) + \mu = \gamma(x_0, x_i) & i = 1, 2, 3, \dots, N \\ \sum_{j=1}^N \lambda_j = 1 & i = 1, 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (2.10)$$

L'estimateur est calculé par la relation suivante :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.11)$$

c. Caractéristiques du krigeage

Le krigeage est, en géostatistique, la méthode d'estimation linéaire garantissant le minimum de variance (Matheron, 1965). Il réalise l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interprétation et la modélisation du variogramme expérimental, lui conférant les caractéristiques suivantes :

- linéaire, sans biais, à variance minimale, par construction,
- interpolateur exact : si l'on estime un point connu, on retrouve la valeur connue,
- présente un effet d'écran : les points les plus près reçoivent les poids les plus importants ; cet effet d'écran varie selon la configuration et selon le modèle de variogramme utilisé pour le krigeage. Plus l'effet de pépité est important, moins il y a d'effet d'écran,
- tient compte de la taille du champ à estimer et de la position des points entre eux,
- par l'utilisation du variogramme, on tient compte de la continuité du phénomène étudié (effet de pépité, anisotropie, etc...),
- effectue généralement un lissage, c'est-à-dire les estimations sont moins variables que les valeurs réelles que l'on cherche à estimer.

2.5.2. Analyse qualitative des données

L'interprétation qualitative est la phase initiale de l'interprétation ; elle nécessite non seulement une certaine habileté et une certaine expérience afin d'interpréter les données gravimétriques et magnétiques mais également un fond documentaire indispensable, comprenant les diverses études réalisées auparavant : géologiques, géophysiques, hydrogéologiques etc...

L'interprétation qualitative dans notre cas a un caractère descriptif ; elle s'occupe de l'étude de l'allure et de l'intensité des anomalies enregistrées. L'examen des cartes gravimétriques et magnétiques donne une idée respectivement sur la densité et l'aimantation, l'identification des différentes entités géologiques, les zones de discontinuités et les directions structurales, en s'appuyant sur les connaissances géologiques de la région (localisation des noyaux denses, la position, la forme et la dimension des corps perturbateurs, l'influence de l'inclinaison, l'influence de la susceptibilité).

Ainsi, l'interprétation qualitative des anomalies permet d'étudier la répartition et la distribution spatiale des anomalies afin de distinguer leurs comportements qui sont généralement portés par les contrastes d'anomalies à amplitude variable dans la structure du sous-sol.

a. Les opérateurs de réduction au pôle et à l'équateur

Contrairement à la gravimétrie où l'anomalie est directement interprétée à la verticale des sources causatives, en magnétisme et à cause du caractère bipolaire du champ magnétique les anomalies magnétiques montrent une dépendance fondamentale vis-à-vis de la direction des vectrices aimantations et champ régional. Ce problème engendre une difficulté dans la recherche d'une corrélation entre les anomalies magnétiques observées et les structures géologiques causatives.

Pour résoudre ce problème et ramener l'anomalie magnétique à l'aplomb de sa source, on procède à la réduction au pôle ou à l'équateur. La transformation est réalisée dans le domaine spectral ou de Fourier au moyen d'un filtre dans le but d'étudier la nouvelle projection donnant l'anomalie maximale à l'aplomb de la source (Baranov, 1957 ; Baranov et Naudy, 1964). Il s'agit de voir ce que serait le champ si l'aimantation et le champ géomagnétique ambiant étaient dirigés verticalement lorsque $I = 90^\circ$ c'est-à-dire que ces nouvelles anomalies seraient celles que l'on observerait si le champ était vertical dans la zone d'étude (Baranov, 1957 ; Baranov et Naudy, 1964 ; Bhattacharyya, 1965 ; Shuey, 1972 ; Hildenbrand, 1983 ; Noutchogwe Tatchum 2010).

Cependant, dans les régions de basses latitudes comprises entre -15° et 15° comme c'est le cas de cette étude, les directions N-S sont amplifiées par la réduction au pôle et il y a un grand risque d'un renforcement exagéré par amplification d'un bruit préexistant. Dans ce cas la carte réduite au pôle est illisible et instable. Pour pallier à ce problème dans ces régions, il est préférable d'appliquer la réduction à l'équateur.

b. L'opérateur de prolongement vers le haut (PVH)

L'opérateur de prolongement consiste à déplacer artificiellement le plan d'observation des anomalies et à calculer le champ que l'on observerait en ces nouveaux points à partir des données recueillies sur le terrain ou par satellite.

Le prolongement peut se faire vers le haut ou vers le bas. Cependant, le prolongement vers le haut fait passer l'anomalie de l'altitude $Z_h = 0$ à une altitude $Z_h > 0$. Cet opérateur agit comme un filtre électronique passe-bas en atténuant les hautes fréquences du champ associées aux effets des structures gravimétriques superficielles, mettant ainsi en évidence les anomalies des structures de plus en plus profondes, en fonction de l'altitude du prolongement tandis que le prolongement vers le bas amplifiera au contraire les hautes fréquences du champ associées aux effets des structures gravimétriques superficielles. En se basant sur les

identités de Green, le potentiel U peut être calculé en tout point P de l'espace. La fonction U vérifie l'expression (2.12) suivante (Blakely et Simpson, 1986).

$$U(x, y, z_o - \Delta z) = \iint \frac{U(x, y, z_o)}{[(x-x')+(y-y')+\Delta z^2]^{\frac{3}{2}}} dx' dy' \quad \Delta z > 0 \quad (2.12)$$

Le passage du domaine temporel au domaine de Fourier permet de simplifier l'expression du prolongement vers le haut en utilisant les propriétés de la transformée de Fourier et la théorie de convolution. Dans le domaine fréquentiel, l'expression de l'opérateur de prolongement vers le haut pour une carte est définie par la relation (2.13) :

$$L(r) = \exp(-k\Delta z) \quad (2.13)$$

où z : distance en km et k : le nombre d'onde

Dans ce travail, nous appliquons l'opérateur de prolongement vers le haut sur les données gravimétriques et magnétiques afin d'étudier le comportement des anomalies observées avec la profondeur jusqu'au manteau dans le but de retracer l'évolution géodynamique des structures géologiques de la lithosphère au Cameroun et d'essayer de comprendre d'avantage l'origine de la Ligne Volcanique du Cameroun.

c. L'opérateur de dérivée horizontale

La méthode du gradient horizontal est l'approche la plus simple pour localiser les contacts géologiques des corps dans le sol. L'avantage de cette méthode est qu'elle n'est pas sensible aux bruits provenant des données lors des investigations gravimétrique et magnétique car elle dépend uniquement du calcul des dérivées premières des champs de potentiel dans le plan horizontal (Phillips, 1998).

Si G et M représentent respectivement les champs gravimétrique et magnétique en un lieu de la terre, alors l'amplitude de leurs gradients horizontaux sera donnée dans le domaine spatial suivant le plan x et y par les relations (2.14) suivantes (Blakely, 1995) :

$$G_{DH} = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2} \quad \text{et} \quad M_{DH} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2} \quad (2.14)$$

où $\left(\frac{\partial G}{\partial x}, \frac{\partial M}{\partial x}\right)$ et $\left(\frac{\partial G}{\partial y}, \frac{\partial M}{\partial y}\right)$ sont respectivement les dérivées suivant x et suivant y des champs G et M .

Le gradient horizontal permet de mettre en évidence des zones à fort contraste latéraux de gradient gravimétrique et de susceptibilité magnétique (Cordell et Grauch, 1985).

Nous avons fait appel à cet opérateur gradient horizontal afin de localiser les contacts latéraux des structures géologiques dans le sous-sol intracrustal au Cameroun dans le but de mettre en évidence les grands traits

structuraux de la lithosphère pouvant être considérés comme étant des zones de failles, les contacts géologiques ou des roches intrusives.

d. L'opérateur de dérivée vertical

En général, les opérateurs de dérivations effectuées sur les cartes d'anomalies ont pour but d'atténuer ou au contraire d'amplifier certaines informations contenues dans les données de champs potentiels. L'opérateur de dérivation selon la verticale agit comme un filtre électronique passe-haut en amplifiant les courtes longueurs d'onde, mettant ainsi en exergue les anomalies associées à des structures superficielles au détriment de celles associées aux structures profondes.

Si G et M représentent respectivement les champs gravimétrique et magnétique en un lieu de la terre, alors l'amplitude de leurs gradients verticaux sera donnée dans le domaine spatial suivant le plan x et y par les relations (2.15) suivantes (Blakely, 1995) :

$$G_{DV} = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial z}\right)^n} \quad \text{et} \quad M_{DV} = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^n} \quad (2.15)$$

où $\left(\frac{\partial G}{\partial z}\right)$ et $\left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)$ sont respectivement les dérivées suivant z des champs G et F .

n : l'ordre de la dérivée ; DV : Dérivée Verticale.

Le gradient horizontal permet de mettre en évidence des zones à fort contraste de gradient gravimétrique et de susceptibilité magnétique (Cordell et Grauch, 1985).

2.5.3. Analyse quantitative des données

a. L'interprétation quantitative

L'interprétation quantitative des données gravimétriques et magnétiques fournit un modèle de structure du sous-sol étudié. Elle permet de préciser les éléments géométriques (extension, profondeur d'enfouissement) et physiques (contraste de densité) des structures géologiques, sources des anomalies observées dans la zone d'étude et les diverses propriétés gravimétriques et magnétiques des corps perturbateurs.

➤ La déconvolution d'Euler.

La méthode de la déconvolution d'Euler, appliquée aux données magnétiques et gravimétriques, permet de localiser et de déterminer les paramètres des sources magnétiques et gravimétriques. Elle est basée sur un procédé mathématique représenté par l'équation d'homogénéité d'Euler (Thompson, 1982) introduite dans la littérature au XVIII^{ème} siècle.

Hood (1965) était le premier à appliquer l'équation d'homogénéité d'Euler dans le cas des données magnétiques. Par la suite, Thompson, (1982) a introduit l'indice comme paramètre pour caractériser les

sources et a développé une technique automatisée (EULDPH) pour l'estimation des profondeurs des sources et leurs localisations à partir des profils magnétiques. Puis Barongo (1984) utilisa cette même technique pour identifier le type de source.

Enfin, l'application de la déconvolution d'Euler sur les données magnétiques et gravimétriques a été étendue à des sources à 3D par Reid et al. (1990) qui ont introduit le concept de l'indice structural nul et qui, dans leurs conclusions ont préconisé l'application de cette technique pour l'interprétation rapide de grands volumes des données magnétiques.

Selon la définition d'Euler, toute fonction $f(x, y, z)$ qui répond à la condition suivante :

$f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z)$ est une fonction homogène de degré n , et satisfait l'équation (2.16) (Thompson, 1982) :

$$x \frac{\partial F}{\partial x} + y \frac{\partial F}{\partial y} + z \frac{\partial F}{\partial z} = nF \quad (2.16)$$

avec F l'intensité du champ en chaque point $(x, y, z = \text{cte})$ d'une grille de données.

Cette équation est appelée : Equation d'homogénéité d'Euler ou Equation d'Euler.

L'expression (2.16) peut être réécrite sous la forme suivante (Blakely, 1995) :

$$\vec{r} \cdot \vec{\nabla} F = nF \quad (2.17)$$

Si on considère une source gravimétrique ou magnétique située au point $P_0(x_0, y_0, z_0)$, l'intensité du champ d'anomalies au point $P(x, y, z)$ peut s'écrire sous la forme :

$$M = F(x-x_0, y-y_0, z-z_0) \quad (2.18)$$

L'équation d'Euler est donnée par l'expression suivante (Reid et al., 1990) :

$$(x - x_0) \frac{\partial M}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial M}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial M}{\partial z} = -N(M - T) \quad (2.19)$$

où N est appelé Indice Structural et T représente une constante locale qui caractérise le champ régional (Thompson, 1982).

La déconvolution d'Euler permet la localisation précise des sources d'anomalies dans le plan horizontal ainsi que l'estimation de leurs profondeurs avec peu d'a priori sur le vecteur d'aimantation.

Les différents paramètres d'Euler sont les suivants :

– **l'indice structural « N »**

C'est un paramètre qui dépend de la géométrie de la source et caractérise le taux de variation de l'intensité de l'anomalie avec la distance. Il caractérise le type de source. Dans le cas des données gravimétriques et magnétiques, l'indice structural N prend les valeurs allant de (0 à 3 suivant les structures considérées (Thompson, 1982 et Reid et al., 1990). Le tableau 2.7 illustre les différentes valeurs de l'indice structural N correspondant à des sources bien précises.

Tableau 2.7: Indices structuraux pour les sources magnétiques (Thompson, 1982 ; Reid et al., 1990).

Sources	Indice structural	Sources	Indice structural
Contact	0	Cylindre vertical	2
Dyke vertical	1	Sphère	3

Ainsi, les faibles indices structuraux allant de (0 à 1) fournissent les meilleures estimations des profondeurs (Reid et al., 1990).

– **les dimensions de la fenêtre**

Un autre paramètre rentre en jeu pour la détermination des solutions adéquates, c'est le choix de la dimension de la fenêtre. Le choix approprié de la taille d'une fenêtre dépend de la longueur d'onde de l'anomalie examinée et du pas de la grille (Marson et Klingele, 1993).

– **la tolérance**

La tolérance « Z » représente l'erreur sur la profondeur, c'est-à-dire le taux d'acceptation des solutions. Les tests effectués sur la tolérance montrent qu'un niveau d'erreur d'estimation sur la profondeur compris entre 5 et 15% ($0,05 \leq Z \leq 0,15$) en fonction des structures géologiques donne des meilleurs résultats.

Dans ce travail, nous nous sommes fixés de mettre en évidence les traits structuraux caractéristiques du sous-sol de la lithosphère du Cameroun. En ce sens, la méthode de déconvolution d'Euler est utilisée pour deux raisons : i) estimer et cartographier la distribution les profondeurs des structures géologiques dans la croûte du Cameroun afin d'orienter d'avantage le tracé des linéaments gravimétriques et magnétiques, après avoir superposé aux maximas et gradients des anomalies ; ii) en déduire également les valeurs des profondeurs moyennes pour chaque linéament mise en évidence.

➤ **Méthode de l'analyse spectrale**

L'analyse spectrale est une méthode quantitative qui permet d'estimer les profondeurs moyennes des masses perturbatrices des structures géologiques. Elle a dans le passé été utilisée pour l'estimation de la profondeur

de Moho à partir des données gravimétriques (Maden, 2010 ; Hussein et al., 2013 ; Leseane et al., 2015 ; Goussi Ngalamo et al., 2017). Ainsi, la profondeur moyenne d'une source d'anomalie gravimétrique est estimée à partir du spectre d'énergie du signal correspondant (Bhattacharyya, 1966 ; Spector et Grant, 1970 ; Bhattacharyya et Leu, 1975).

La méthode consiste à exploiter un filtre numérique pour transformer les anomalies de Bouguer du domaine spatial vers le domaine fréquentiel afin d'établir le spectre de fréquence correspondant. Cependant, ces profondeurs sont obtenues à partir des pentes observées sur la distribution du spectre d'énergie. La méthode est basée sur l'hypothèse que chaque unité géologique peut-être associée à une distribution de blocs non-corrélée, de profondeurs, d'épaisseurs, de largeurs de densité ou de magnétisation variables. Sur le spectre d'énergie (dont les axes sont logarithmiques), chaque groupement de blocs présentant des profondeurs similaires sera représenté par une droite de pente constante. Les différentes unités géologiques pourront alors être identifiées sur ce spectre en fonction de leur profondeur. De plus, la valeur de chaque pente nous donnera la profondeur moyenne d'un ensemble de blocs (Spector et Grant, 1970).

Pour l'estimation des profondeurs des structures géologiques, on trace convenablement les pentes de droite sur la distribution spatiale du spectre de puissance des anomalies. Ces segments représentent les différentes discontinuités de densités (Fairhead et Okereke, 1987 ; Tselentis et al., 1988 ; Gómez-Ortiz et al., 2005). Le succès de cette technique dépend du bon choix de la longueur d'onde de coupure utilisée dans la conception du filtre (Tselentis et al., 1988 ; Sanchez-Rojas et Palma, 2014). Les longueurs d'onde de coupure et les informations sur la contribution des courtes et faibles longueurs d'onde dans le spectre peuvent être obtenues à partir du spectre de fréquence calculé.

Une anomalie peu étendue avec une amplitude qui décroît rapidement sera caractérisée par des grandes fréquences. Par contre, une large anomalie dont l'amplitude diminue faiblement sera caractérisée par des spectres plus ou moins concentrés vers les basses fréquences.

Au final, le spectre d'énergie est donc représenté sur un graphe semi-logarithmique en fonction de la fréquence et met en évidence la variation linéaire du spectre avec les fréquences. Ces variations linéaires du spectre avec les fréquences sont exploitées pour définir des plans de séparation entre deux milieux de densités différentes. Les pentes des droites obtenues sont proportionnelles à la profondeur moyenne des masses perturbatrices.

Si $\Delta \text{Log}E$ est la variation du logarithme de l'énergie dans l'intervalle de fréquence Δf , la profondeur d du toit du corps est donnée par la relation :

$$d = \frac{\Delta \text{Log}E}{2\Delta k} \quad \text{avec } k = \frac{2\pi}{l} \quad \text{le nombre d'onde.} \quad (2.20)$$

Cette méthode est utilisée dans ce travail afin de séparer grossièrement les différentes unités présentes en fonction de leurs profondeurs moyennes.

2.6. Modélisation gravimétrique.

La modélisation des données gravimétriques a été réalisée à l'aide du programme informatique Oasis Montaj (Geosoft, 2007) sous la base des profils choisis. Le long des profils sélectionnés, les modèles initiaux sont définis à l'aide des observations géologiques de surface, de méthodes inverses et / ou des profils sismiques. Les modèles finaux se composent de polygones adjacents de densité constante pour lesquels les effets de la gravité produisent une courbe modélisée qui devrait correspondre aux valeurs observées.

2.6.1. Modélisations 2D et 2D^{1/2}.

La modélisation 2D des anomalies de Bouguer des données du modèle gravitationnel global (XGM19e_2159) sur la Ligne Volcanique du Cameroun et le Craton du Congo a été faite dans ce travail. Elle consiste en la décomposition de la structure initialement préconçue en prismes de section polygonale et d'allongement infini ; le calcul de l'effet de ces prismes est ensuite additionné. L'anomalie théorique est calculée en faisant varier les paramètres physiques de la structure perturbatrice, notamment sa forme, sa profondeur et sa densité. Le meilleur modèle est celui qui correspond à la structure dont l'anomalie calculée coïncide “au mieux” avec l'anomalie observée.

Pour des rapports allongement principal/extension transversale moins importants, la modélisation directe tient compte de la longueur limitée du corps. Elle est dans ce cas dite de type 2D^{1/2} (Shuey et Pasquale, 1973).

2.7. Inversion des anomalies gravimétriques.

L'inversion tridimensionnelle 3D des données gravimétriques est réalisée afin de mettre en évidence la distribution des blocs de densité avec la profondeur sous la LVC et le Craton du Congo. L'utilisation des problèmes inverses permet de choisir parmi toutes les solutions possibles celle qui rend bien compte du problème posé. En gravimétrie, le calcul inverse comprend deux étapes essentielles : la linéarisation du problème et la recherche de la solution particulière (corps idéal).

En ce sens, nous utilisons le logiciel Grablox2 développé par Pirttijärvi, 2014b pour l'inversion tridimensionnelle 3D des données gravimétriques. L'objectif principal est d'étudier le comportement des contrastes de densité avec la profondeur sous la LVC et le Craton du Congo. GRABLOX calcule l'anomalie gravimétrique synthétique d'un grand super bloc rectangulaire, divisé en éléments de volume plus petits semblables à des briques dont la taille peut varier (Figure 2.4).

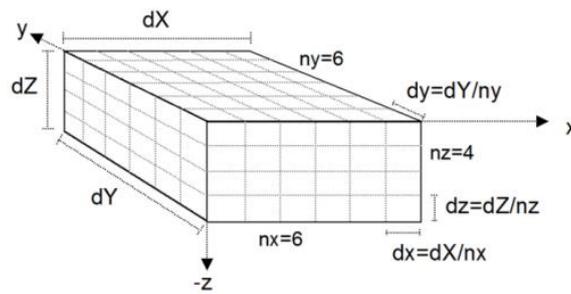


Figure 2.4 : Modèle du block d'inversion 3D des densités de taille $dX \times dY \times dZ$ (unité de distance) divisé en $N = n_x \times n_y \times n_z$ blocks miroirs de taille $dx \times dy \times dz$ (unité de distance) alignés avec le système de coordonnées géographiques (Pirttijärvi, 2013 et Pirttijärvi, 2014b).

Chaque bloc mineur se voit attribuer une valeur de densité individuelle (Pirttijärvi, 2013 et Pirttijärvi, 2014b). Le long du profil sélectionné, nous avons défini le modèle initial à l'aide d'observations géologiques de surface. Le modèle final se compose de polygones adjacents de densité constante pour lesquels les effets de la gravité produisent une courbe modélisée qui devrait correspondre aux valeurs observées.

A la fin nous utilisons les profondeurs moyennes du Moho estimées par l'analyse spectrale pour contraindre la profondeur du Moho de nos modèles $2D^{1/2}$ et d'inversion 3D. De plus, les contraintes géologiques (valeurs des densités) ont été déduites des valeurs de densités (Telford et al., 1990 ; Burger et al., 2006 ; Tokam Kamga et al., 2010).

2.8. Modèles des vitesses sismiques

Ondes sismiques : définition et vitesses

La sismologie est la branche qui étudie des tremblements de terre pour déterminer les causes et les effets de ce phénomène naturel catastrophique (Tokam Kamga et al., 2010). Elle repose sur le principe de la propagation des ondes (déformation du milieu) dans un milieu élastique. Les ondes sismiques se propagent dans les matériaux comme des patrons de déformation des particules à travers les matériaux avec des vitesses qui dépendent de leurs propriétés élastiques (Adams et al., 2015 ; Guidarelli et Aoudia 2016). La nature de cette dépendance a été démontrée en décrivant les déformations en termes des forces qui les causent, définissant deux concepts importants, la contrainte et la déformation (stress et strain en anglais) (Hawkins, 1961). Les relations entre contrainte et déformation pour un matériau particulier permettent de décrire les propriétés élastiques de ce matériau, ainsi que les caractéristiques (tel que la vitesse) des ondes qui s'y propagent. En sismologie il existe deux types d'ondes à savoir ; les ondes de volume (P et S) se propageant à l'intérieur d'un milieu et les ondes de surface (Love et Rayleigh) se propageant à la surface. De plus, les ondes sismiques de volume P et S sont connues comme étant les ondes se déplaçant à des vitesses différentes et qui dépendent de la densité et la rigidité de la roche qu'elles traversent (Adams et al.,

2015). Les équations qui régissent les vitesses des ondes P et S sont données respectivement par les relations (2.22) et (2.23) :

$$V = \sqrt{\frac{\text{Rigidité}}{\text{Densité}}} \quad (2.21)$$

telles que :

$$V_P = \sqrt{\frac{k+4\mu'/3}{\rho}} \quad (2.22)$$

et

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu'}{\rho}} \quad (2.23)$$

avec :

k : module de compressibilité

μ' : module de cisaillement

ρ : densité

Modèles des vitesses de cisaillement des ondes sismiques

32 stations sismiques ont été déployées au Cameroun entre 2005 et 2007 réparties sur la Chaîne Panafricaine et le Craton du Congo. Ces stations sismiques ont servi pour tant de travaux géophysiques (Fairhead et Okereke, 1987 ; Ebinger et Sleep, 1998b ; Nnange et al., 2000 ; Ngako et al., 2006 ; Reusch et al., 2010 ; Tokam Kanga et al., 2010 ; Elsheikh, et al., 2014 ; Adams et al., 2015 ; Ojo et al., 2018). Ces travaux ont permis d'établir les profils et modèles de vitesses des ondes de cisaillement et de Rayleigh de la lithosphère au Cameroun. De ces travaux, il est aujourd'hui connu que la lithosphère du CC et le Plateau de l'Adamaoua est plus dense que celle de la LVC. Tokam Kanga et al., (2010) ont également pu estimer la profondeur du Moho en chacune de ces 32 stations à partir des profils de vitesses de cisaillement. Dans ce travail, nous modélisons la lithosphère de la partie Ouest du Sud Cameroun afin d'essayer de répondre à la question sur l'interaction entre la LVC et le CC. Pour la réalisation de nos modèles $2D^{1/2}$, cinq profils ont été choisis, entre 18 stations sismiques tous suivant la même direction Nord-Sud. Les profondeurs du Moho mises en évidence à partir de ces 18 stations (Figure 2.5) ont été utilisées afin de contraindre la profondeur de la croûte dans nos modèles $2D^{1/2}$ répartis sur le CC et la Chaîne Panafricaine incluant la LVC. Les lignes interrompues verticales correspondent aux valeurs de coupure utilisées pour indiquer la composition de chaque couche du manteau. Les lignes horizontales en pointillés représentent les interfaces des couches de

la croûte estimées dans la région d'étude. D'après la nomenclature, nous avons les profils des vitesses sismiques : a) de la bordure Ouest et Nord-Ouest du CC ; b) localisés sur le CC ; c) localisés sur la Chaîne Panafricaine ; d) localisés sur le Mont Cameroun ; e) prises sur le Graben de Kumba et le bassin de Mamfé ; f) prises sur la partie Sud de la LVC.

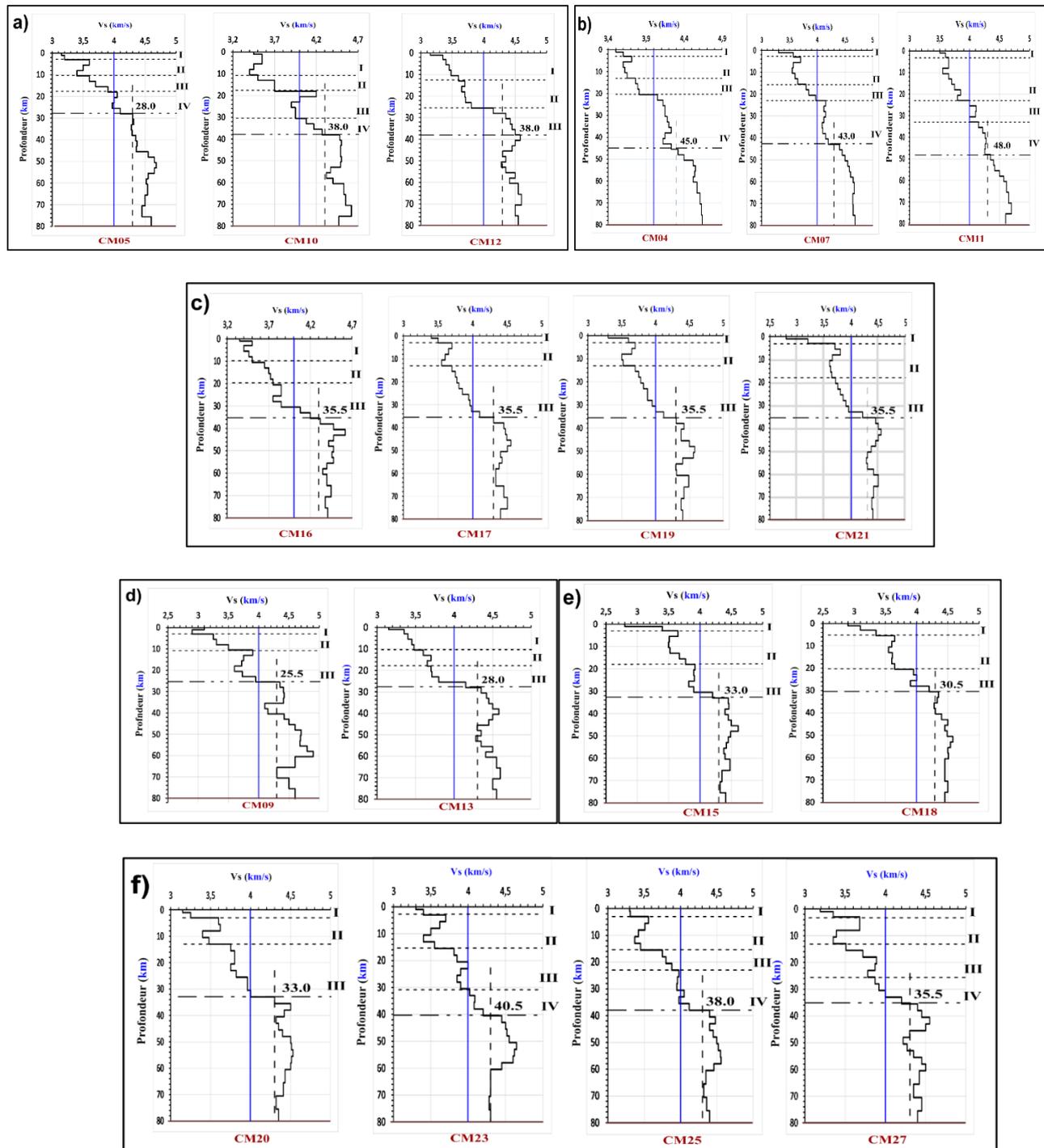


Figure 2.5: Modèles des vitesses de cisaillement des ondes sismiques a) à f) pour 18 stations localisées dans la région d'étude (d'après Tokam Kamga et al., 2010).

2.9. Organigramme pour la méthodologie de l'étude

Dans cette partie, nous présentons l'organigramme de notre méthodologie d'étude. L'idée est de ressortir un schéma qui résume et présente la structure générale des étapes suivies pour l'élaboration de ce travail. Compte tenu des objectifs de cette étude, nous présentons deux organigrammes tels qu'illustrés ci-dessous ; il s'agit de :

- l'organigramme pour le processus de cartographie des traits structuraux dans la lithosphère au Cameroun (Figures 2.6 et 2.7) ;
- l'organigramme pour les processus d'inversion et la modélisation des anomalies gravimétriques (Figures 2.8 et 2.9).

2.9.1. Organigrammes pour la cartographie des traits structuraux

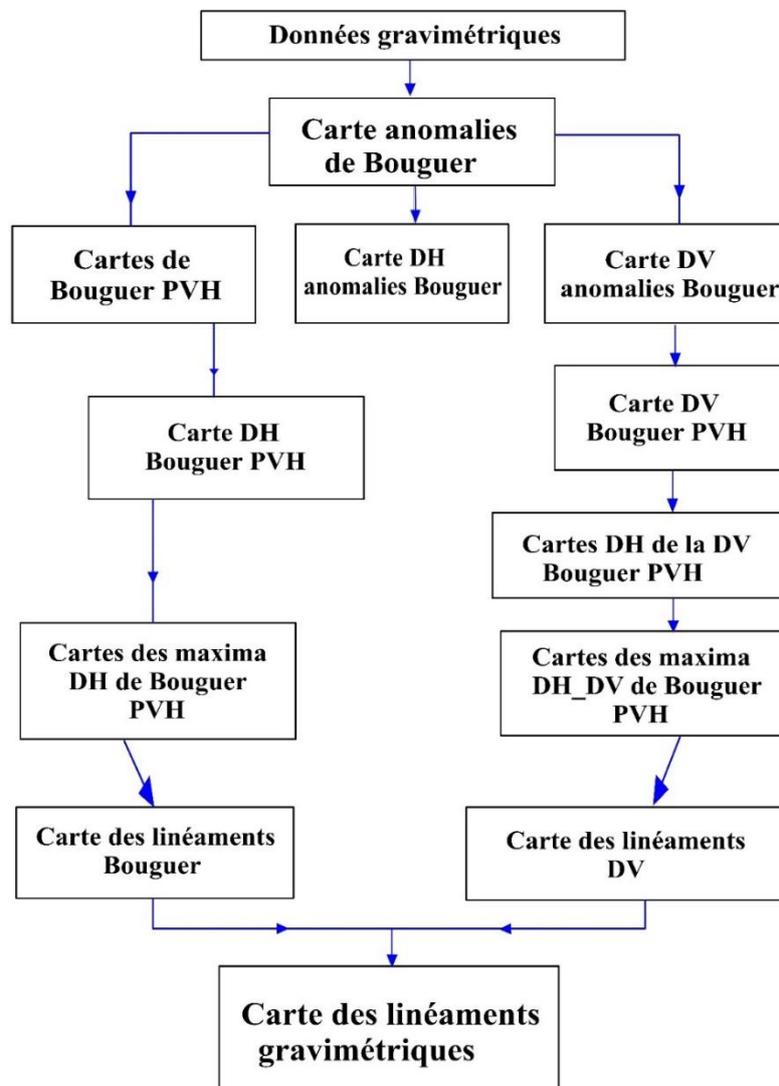


Figure 2.6: Organigramme du processus de cartographie des linéaments gravimétriques. PVH : prolongement vers le haut ; DH : dérivée horizontale ; DV : dérivée verticale.

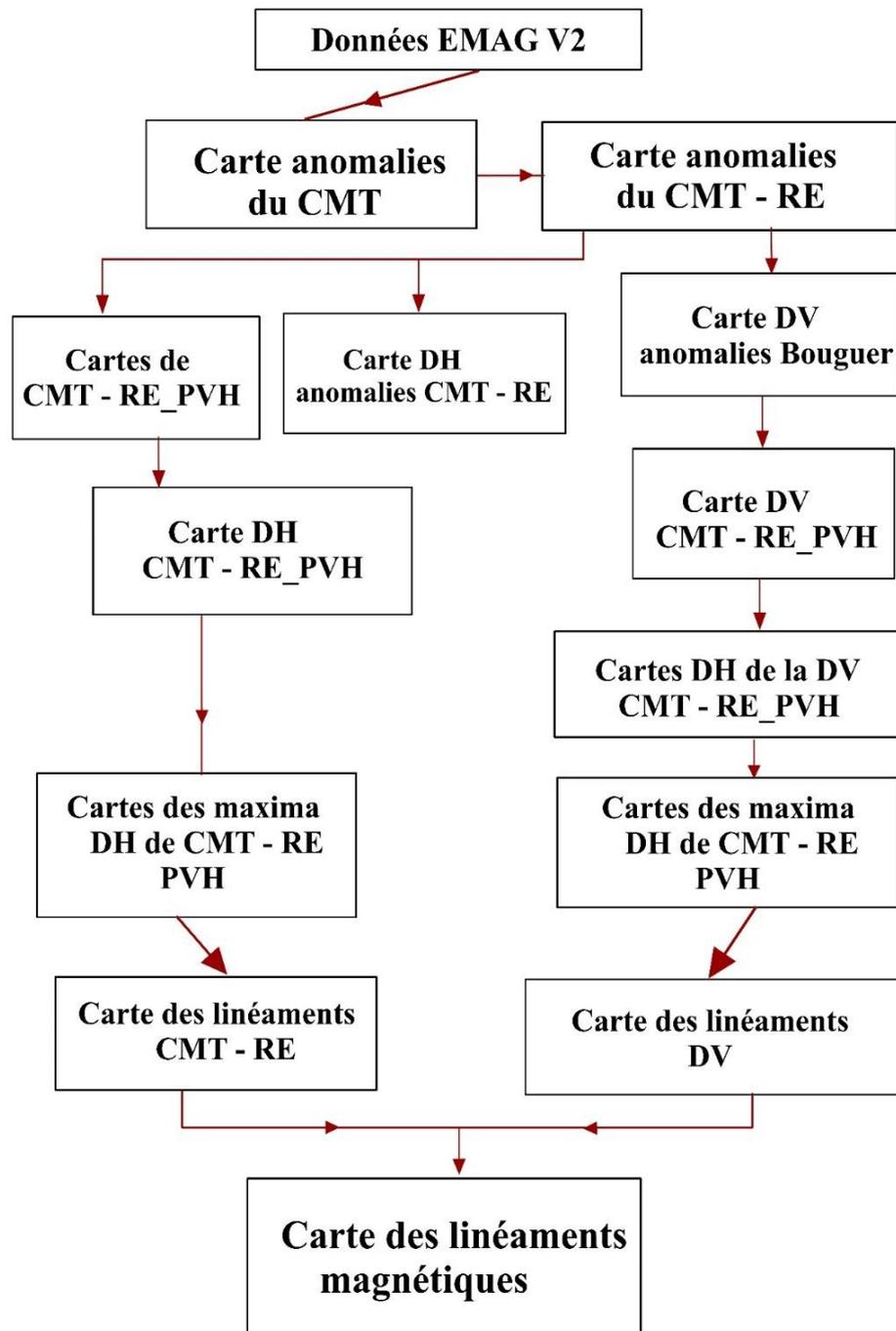


Figure 2.7: Organigramme du processus de cartographie des linéaments magnétiques. CMT : champ magnétique total ; RE : réduction à l'équateur ; PVH : prolongement vers le haut ; DH : dérivée horizontale ; DV : dérivée verticale.

Les linéaments gravimétriques et magnétiques sont superposés, puis couplés à la géologie pour obtenir des traits structuraux du Cameroun.

2.9.2. Organigrammes pour l'inversion et la modélisation des anomalies gravimétriques

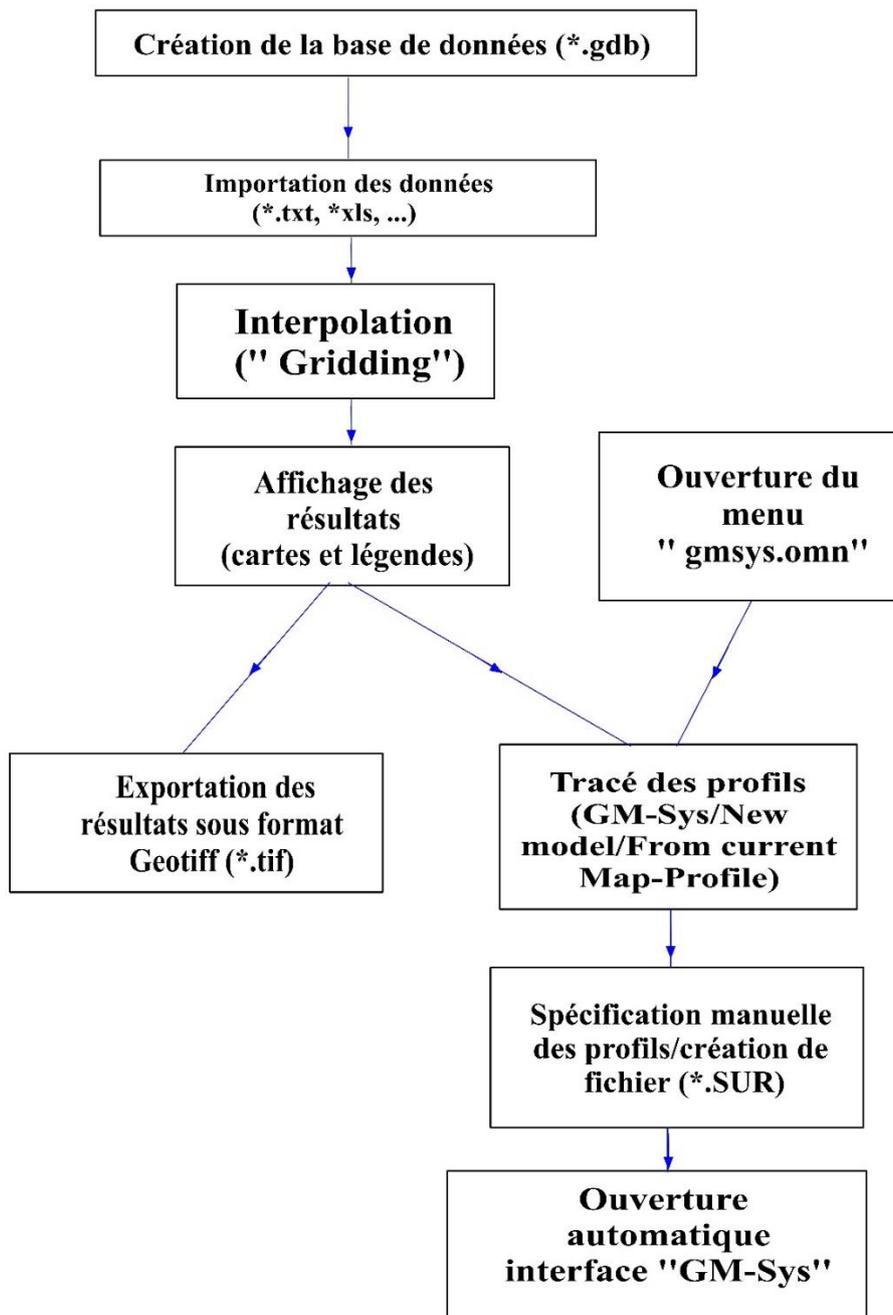


Figure 2.8: Organigramme du processus de modélisation des données avec GMSYS de logiciel GEOSOFT (phase I).

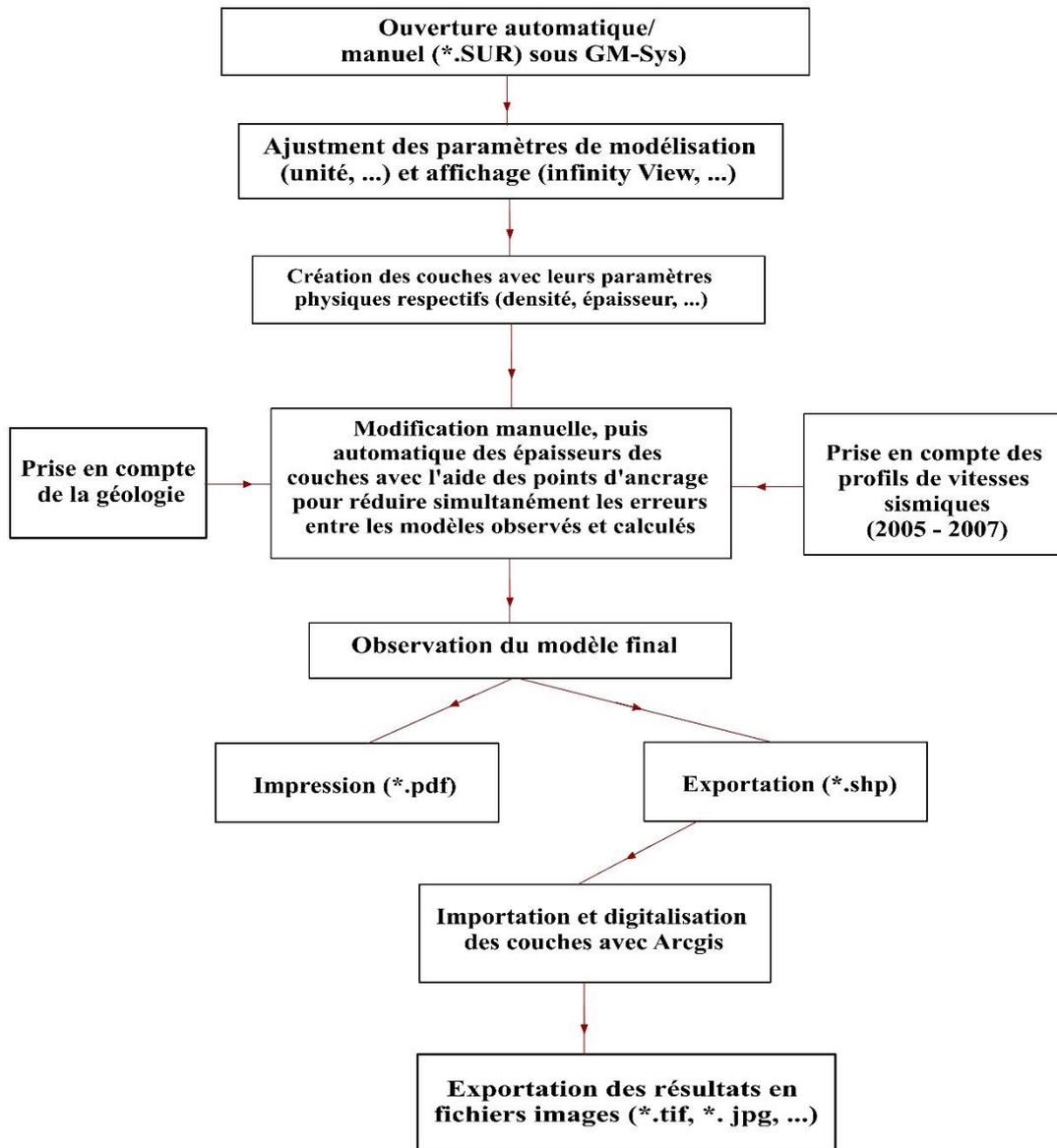


Figure 2.9: Organigramme du processus de modélisation des données avec GMSYS de logiciel GEOSOFT (phase II).

2.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les données ainsi que la méthodologie adoptée pour étude. Pour notre investigation géophysique, nous utilisons les données gravimétriques in situ, le modèle gravitationnel Global (XGM2019e_2159) et la grille des anomalies magnétiques (EMAG) pour explorer l'environnement souterrain au Cameroun afin de comprendre son processus de formation. En ce sens, quelques filtres numériques sont exploités dans ce travail pour l'investigation. Ces filtres sont basés sur des principes physiques bien précis pour le traitement des données gravimétriques et magnétiques. Dans le chapitre suivant nous présenterons les résultats obtenus dans le cadre de ce travail suivis d'une discussion.

Chapitre 3

Résultats et discussion

Dans ce chapitre, les résultats obtenus à partir des données gravimétriques in situ, du modèle gravitationnel global (XGM 2019e_2159) et la grille des anomalies magnétiques disponibles sont interprétés. Le traitement des données met en évidence les cartes d'anomalies de Bouguer et de champ magnétique total du Cameroun exploitées pour cartographier les linéaments gravimétriques et magnétiques. L'analyse quantitative des trois bases de données est faite pour mettre en exergue la distribution spatiale des profondeurs des structures géologiques dans la croûte. Ce chapitre présente également les résultats issus de l'inversion 3D des densités et des modèles gravimétriques 2D^{1/2} des structures géologiques du sous-sol de la Ligne Volcanique du Cameroun et le Craton du Congo puis s'achève par une discussion des résultats ainsi obtenus.

3.1. Cartographie des anomalies de Bouguer et du champ magnétique total

Globalement en Géophysique, peu importe les méthodes utilisées, les campagnes commencent toujours par les prises de mesures. Il arrive souvent que, certaines zones soient dépourvues des informations sur les données à traitées. Cependant, il est possible de procéder à une estimation des données manquantes en utilisant un outil géophysique appelé géostatistique. Ce dernier permet d'estimer la teneur d'une variable manquante dans un champ spatial d'observation et ceci grâce à un modèle convenablement choisi.

Dans ce travail, nous avons exploité les données gravimétriques et magnétiques pour l'investigation de la lithosphère du Cameroun. Elles ont permis d'établir respectivement les signatures des anomalies de Bouguer et du champ magnétique total (Figure 3.1). L'observation des cartes permet de remarquer qu'à certains endroits, il n'existe pratiquement pas d'information sur les anomalies en question. Pour la mise en évidence des signatures des anomalies observées, l'interpolation des données dans l'intervalle de profilage a été faite (Figure 3.1). Ceci peut donc expliquer les vides observés au-delà de 4 km. Pour remédier à ce problème, nous avons estimé la teneur des variables manquantes au-delà de 4 km à partir de l'analyse géostatistique.

Interpolation géostatistique des données gravimétriques et magnétiques

Les figures (3.2 et 3.3) ci-dessous mettent en évidence les différents types de modèles obtenus dans le cadre de l'étude géostatistique visant à estimer les données gravimétriques et magnétiques manquantes. Afin de trouver le modèle théorique le plus fidèle au modèle expérimental des données observées, nous avons appliqué aux variogrammes expérimentaux, plusieurs modèles de krigeage afin de choisir celui qui collera

le mieux aux modèles expérimentaux des données initiales (constituées de 15694 et 87071 points respectivement pour de données gravimétriques et magnétiques).

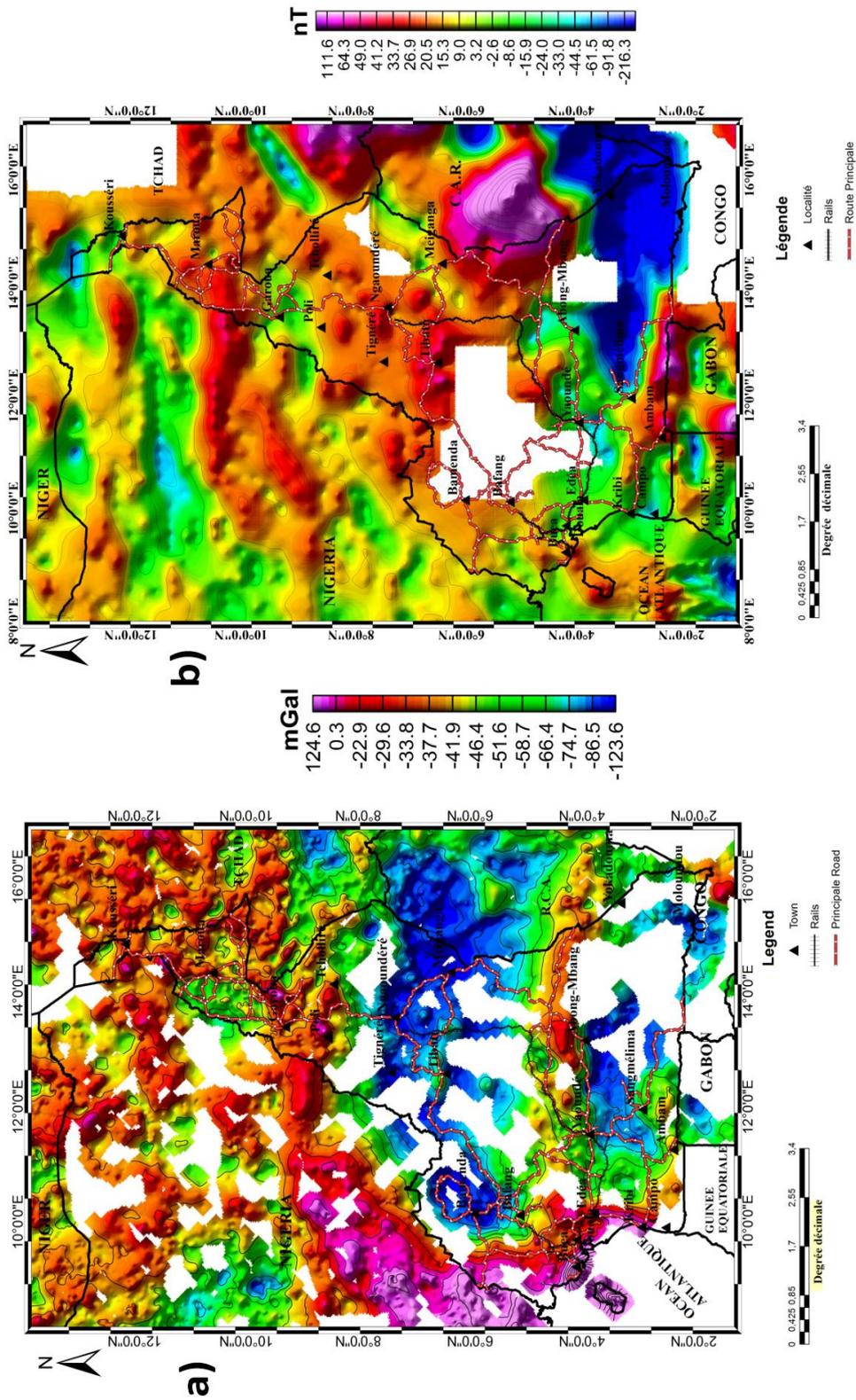


Figure 3.1: Carte d'anomalies : a) Bouguer non maillée ; b) champ magnétique total de la région d'étude.

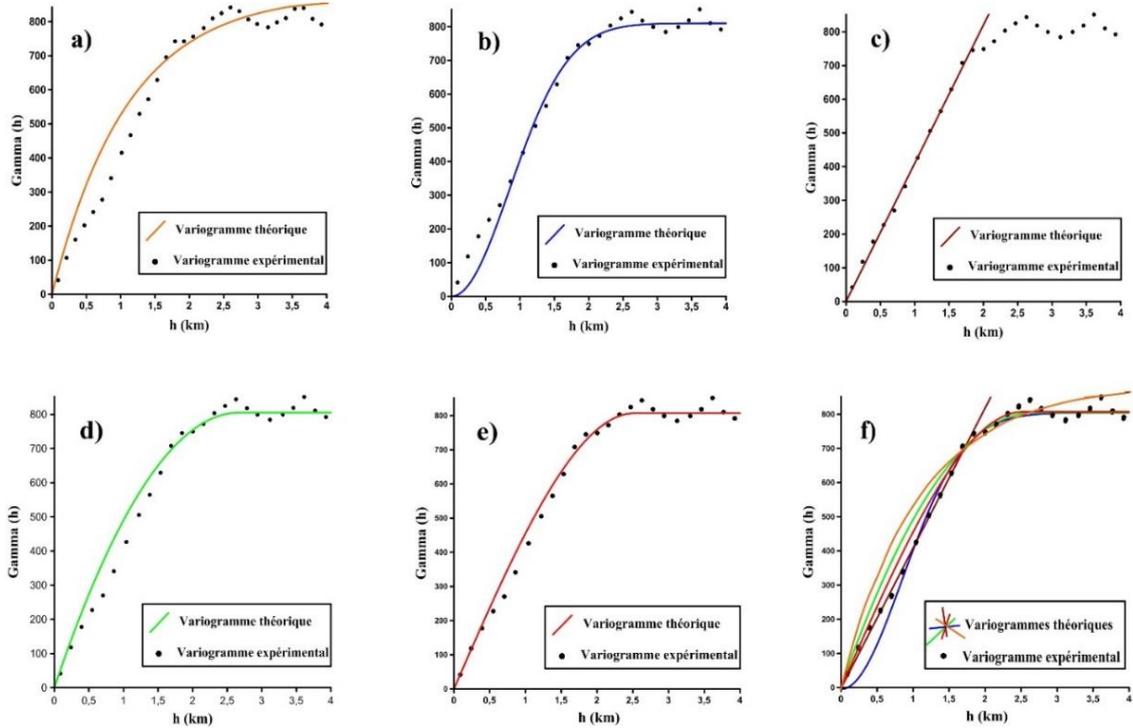


Figure 3.2: Illustration des variogrammes théoriques pour différents modèles d'interpolation appliqués aux variogrammes expérimentaux des données d'anomalies gravimétriques du Cameroun.

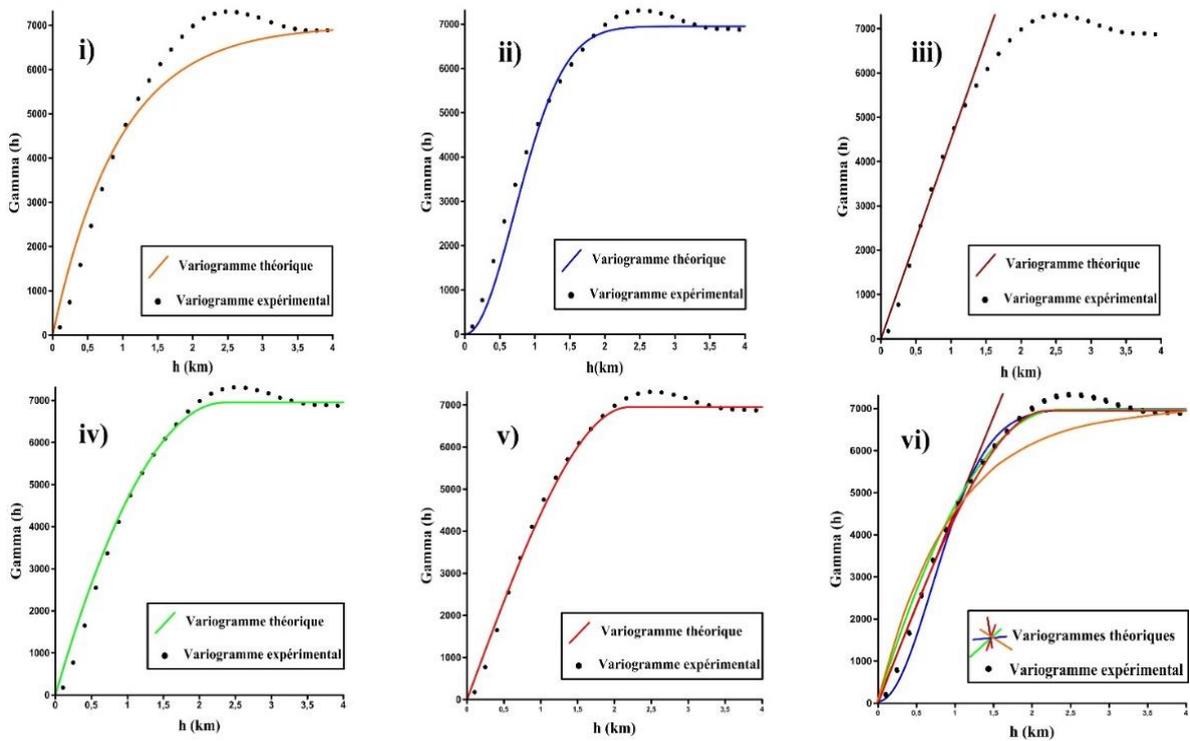


Figure 3.3: Illustration des variogrammes théoriques pour différents modèles d'interpolation appliqués aux variogrammes expérimentaux des données d'anomalies magnétiques du Cameroun.

De ces différents modèles obtenus, seul le modèle sphérique a pu se rapprocher le mieux aux variogrammes des données expérimentales avec les erreurs standards respectives de 0,24 mGal et 0,289 n Teslas sur chaque point interpolé respectivement pour des données gravimétriques et magnétiques (Tableau 3.1).

Au final, avec un pas de $0,036^\circ$ (environ $3,996 \text{ km} \approx 4 \text{ km}$), nous avons obtenu respectivement des maillages de 352 lignes x 244 colonnes (85888 points) et 343 lignes x 257 colonnes (88151 points) pour les données gravimétriques et magnétiques respectivement. Les nouvelles bases de données obtenues ont donc été exploitées pour établir les cartes des anomalies de Bouguer (Figure 3.4) et du champ magnétique total du Cameroun (Figure 3.5) avec des contours aux intervalles respectifs de 5mGal et 20 nT.

Tableau 3.1: Comparaison statistique des modèles d'interpolation géostatistique des données d'anomalies gravimétriques de la zone d'étude.

Différents modèles	Variance	Déviati on Standard	l'Erreur Standard
Modèle (a) : Exponentiel	881,638915	29,6924050	0,27099590
Modèle (b) : Gaussienne	893,218740	29,8867653	0,23865159
Modèle (c) : Linéaire	881,715620	29,6936966	0,23710990
Modèle (d) : Quadratique	881,554988	29,6882870	0,23706670
Modèle (e) : Sphérique	881,527198	29,6735113	0,23705923

Tableau 3.2: Comparaison statistique des modèles d'interpolation géostatistique des données d'anomalies magnétiques de la zone d'étude.

Différents modèles	Variance	Déviati on Standard	l'Erreur Standard
Modèle (i) : Exponentiel	8410,733786	91,7100528	0,30371563
Modèle (ii) : Gaussienne	8594,771550	92,7079907	0,30702050
Modèle (iii) : Linéaire	8588,595769	92,6746770	0,30691017
Modèle (iv) : Quadratique	8588,598868	92,6746937	0,30691023
Modèle (v) : Sphérique	8108,644804	88,4160956	0,28975925

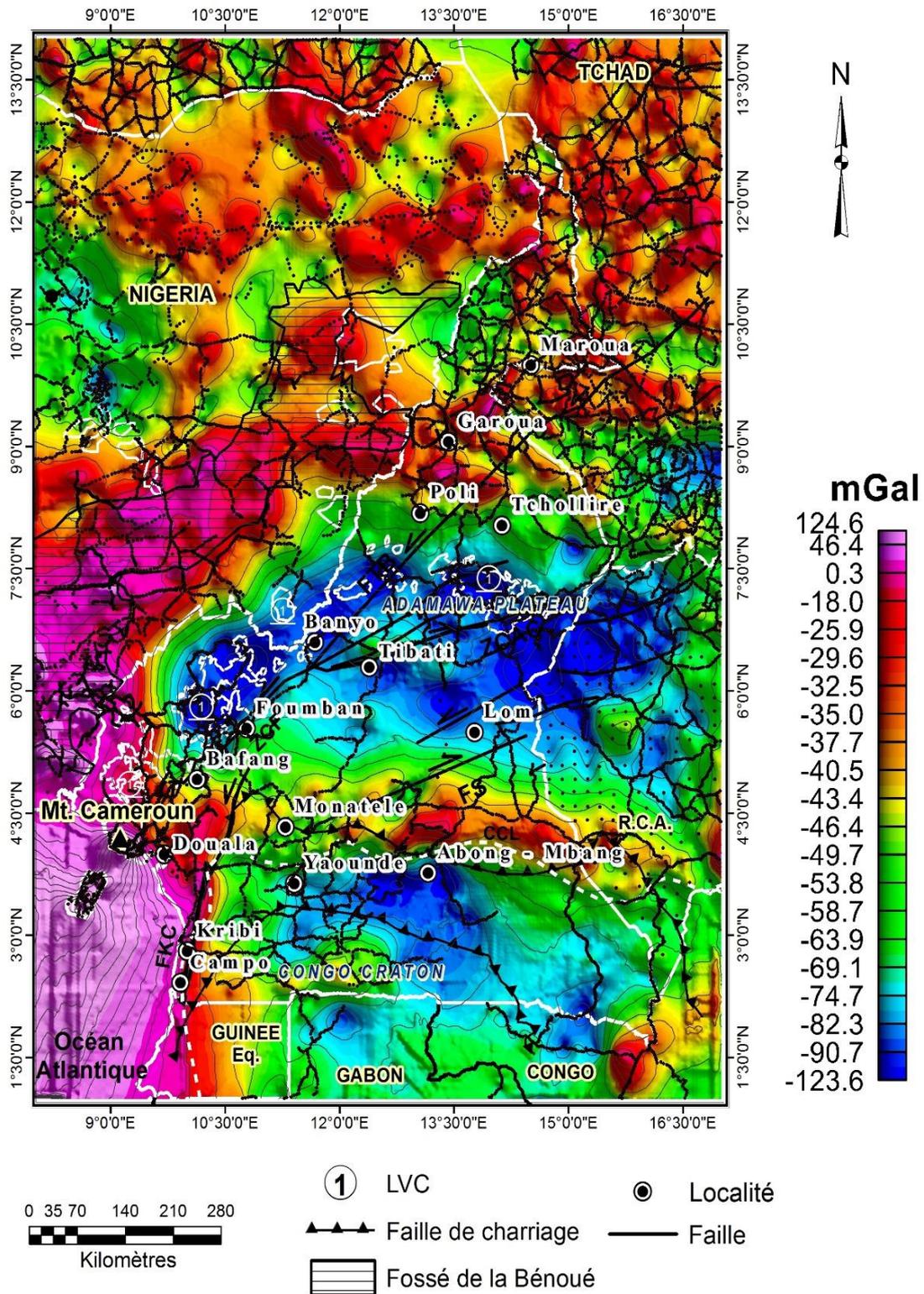


Figure 3.4: Illustration des anomalies de Bouguer de la région d'étude obtenues après interpolation des données gravimétriques in situ.

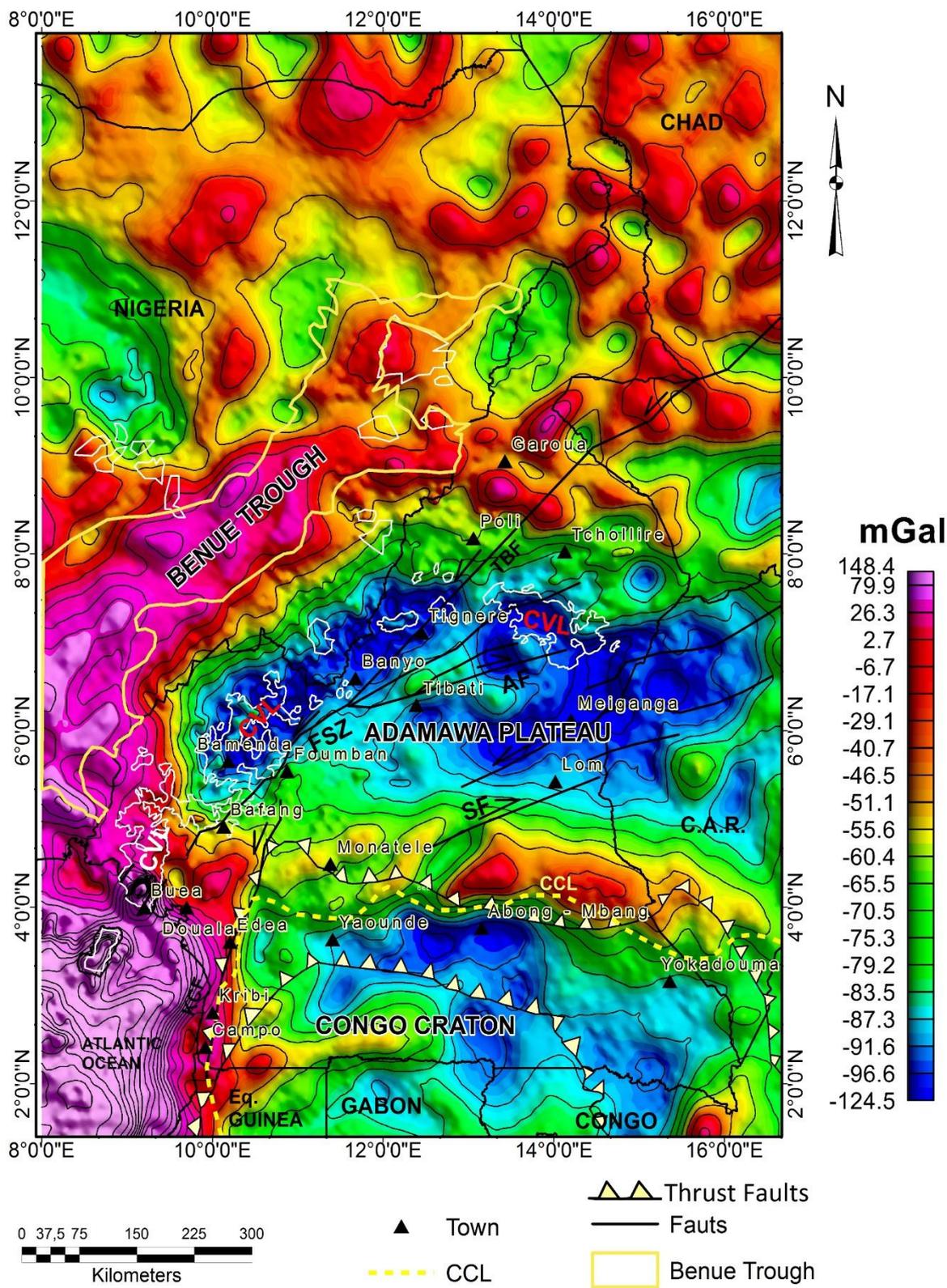


Figure 3.6: Illustration des anomalies de Bouguer du Modèle Gravitationnel Global (XGM 2019e_2159) de la région d'étude.

Les deux cartes ainsi obtenues (Figures 3.4, 3.5 et 3.6) sont analysées et interprétées pour l’investigation du sous-sol Camerounais.

3.2. Analyse qualitative et interprétation des données gravimétriques

3.2.1. Interprétation qualitative des anomalies de Bouguer

La carte des anomalies de Bouguer est le résultat de la superposition des effets des structures géologiques régionales et de structures locales de faible extension (Figures 3.4 3.6 et 3.7). Elle met en évidence la distribution des anomalies des densités des structures géologiques et des informations sur les discontinuités présentes dans le sous-sol, qui peuvent être extraites en analysant les gradients des anomalies.

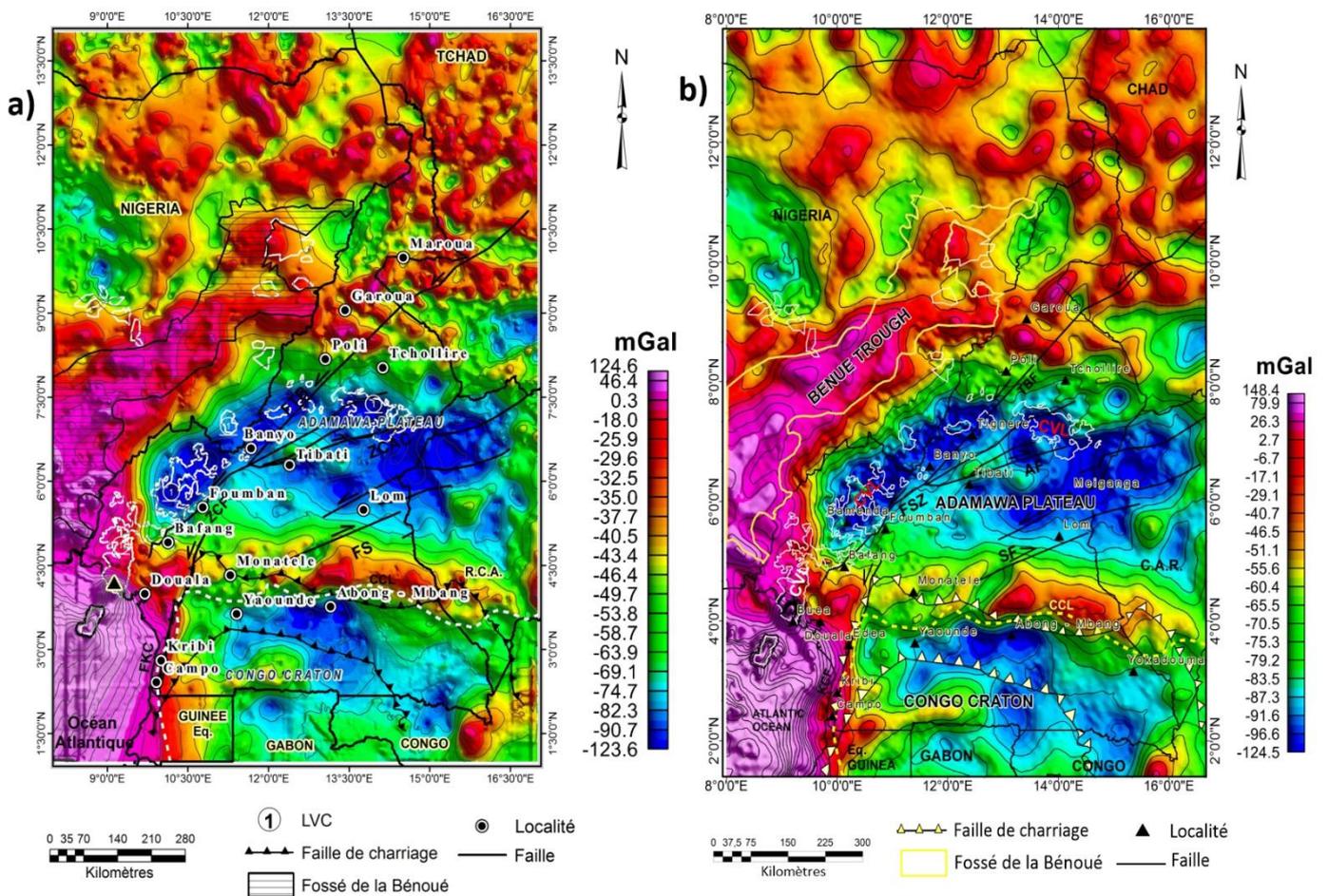


Figure 3.7: Illustration des d’anomalies de Bouguer de la zone d’étude ; a) données gravimétriques in situ ; b) Modèle Gravitationnel Global (XGM 2019e_2159).

L’interprétation qualitative de la carte d’anomalies de Bouguer (Figure 3.7) en relation avec la géologie de la région d’étude permet de localiser trois zones d’anomalies à savoir :

- **Les zones d'anomalies positives.** Elles sont localisées au Nord-Est de la zone d'étude et peuvent correspondre à la couverture des bassins sédimentaires ou des structures intrusives d'anomalies de Bouguer d'environ -34 mGal, au Sud-Ouest entre la bordure Ouest de la Chaîne Panafricaine avec l'Océan Atlantique d'environ 124 mGal. A la frontière entre le Cameroun et le Nigéria au Sud-Ouest, les anomalies positives correspondent aux structures géologiques du Fossé Crétacé de la Bénoué et au Sud - Cameroun approximativement vers la latitude 4°N d'orientation EW près de la localité d'Abong-Mbang sur la zone de transition entre le CC et la CP.
- **Les zones d'anomalies négatives.** Elles sont localisées dans le Plateau de l'Adamaoua, le Craton du Congo et la LVC. Ces anomalies sont caractérisées par des iso-anomales de grandes longueurs d'onde avec des amplitudes d'environ - 98 mGal au Sud-Est de Yaoundé et pourraient être dues à l'intrusion de matériaux légers dans la croûte.
- **Les zones de gradient.** localisées depuis l'axe Yaoundé-Abong-Mbang jusqu'en RCA elles dénotent une structure tectonique majeure pénétrant la croûte et marquent la transition entre le Craton du Congo au Sud et la Chaîne Panafricaine. Ce contraste de gradient est également observé près des localités telles que Kribi et Campo suivant la direction NS avec un prolongement vers le Fossé de la Bénoué et traversant la LVC entre le Mt. Cameroun et la localité de Bafang.

A l'Ouest, sur la LVC, une zone de gradient gravimétrique est observée. Un peu plus loin au Centre Sud-Cameroun, les gradients linéaires de direction presque E-O à environ 4°N de latitude sont considérés comme étant la zone de transition entre le Craton du Congo avec la Chaîne Panafricaine. Ces gradients ont une progression linéaire qui à l'Ouest, se divise en deux bras : un évoluant vers le Sud de direction N-S et l'autre progressant vers le Nord-Ouest considéré dans ce travail comme étant la zone de transition séparant les anomalies positives et négatives localisées sur la LVC, suscitant une attention particulière dans ce travail.

3.2.2. Transformation des anomalies gravimétriques

a. Prolongement vers le haut des anomalies de Bouguer

Nous appliquons dans cette partie, le filtre numérique passe-bas aux anomalies de Bouguer des données in situ (Figures 3.4 et 3.7a) et le Modèle Gravitationnel Global (XGM 2019e_.2159) (Figures 3.6 et 3.7b) pour une analyse qualitative par l'approche géodynamique des structures géologiques du sous-sol camerounais. L'approche adoptée est l'analyse multi-échelle qui consiste à atténuer les hautes fréquences des structures superficielles des anomalies observées jusqu'au-delà du Moho (Figures 3.8 et 3.9).

D'abord, grâce à l'analyse qualitative des signatures gravimétriques deux zones d'anomalies de Bouguer bien distinctes sur la LVC sont localisées (Figure 3.7), séparées à l'Ouest de la zone d'étude par les contrastes d'anomalies de Bouguer entre le Mt. Cameroun et Bafang qui laissent apparaître un contraste de gradient en direction de l'Est du Nigéria. De plus, les contrastes linéaires d'anomalies observée approximativement à la

latitude 4°N (Figure 3.7) progressent vers l'Ouest et se divisent en deux bras ; l'un en direction du Sud représentant la bordure Ouest du CC avec la Chaîne Panafricaine et l'autre en direction du NO, traversant la LVC et qui longe la bordure des anomalies de Bouguer positives des structures géologiques du Fossé de la Bénoué jusqu'au Nord Cameroun. Ce bras représente la zone de transition séparant des anomalies de Bouguer positives et négatives localisées sur la LVC. Nous suggérons dans cette étude que ces contrastes d'anomalies pourraient être le prolongement de la bordure Nord du CC et que sa présence aurait un lien avec l'origine de la LVC ainsi que son interaction avec le LVC-CC.

En ce sens, pour retracer l'évolution des anomalies des structures géologiques au Cameroun et en particulier sur la LVC, la méthode de PVH est appliquée aux anomalies de Bouguer (Figure 3.7) à des profondeurs respectives 10 km, 30 km, 50 km, 80 km et 100 km (Figures 3.8 et 3.9). Il ressort de cette analyse que : 1) les anomalies fortement négatives localisées sur la LVC à l'Ouest s'estompent progressivement avec la profondeur et disparaissent totalement à 50 km contrairement à celles du plateau de l'Adamaoua qui semblent persister jusqu'à 100 km ; 2) les anomalies positives localisées à Buea sur la Mont Cameroun et le bras Nord-Ouest traversant la LVC s'amplifient avec la profondeur jusqu'à 100 km.

L'analyse ainsi faite nous amène à nous interroger sur l'hypothèse du point chaud évoquée pour expliquer son origine au Cameroun. De plus les régions volcaniques du Cameroun sont caractérisées par des anomalies à l'air libre de très forte amplitude réparties sur toute sa longueur de la LVC. Cette analyse nous montre que la structure de la LVC a subi de grands mouvements verticaux tels qu'en témoignent les anomalies à l'air libre et son relief.

Dans la partie septentrionale du Craton du Congo : 1) les anomalies positives de fortes amplitudes observées sur sa bordure Nord avec la Chaîne Panafricaine s'estompent également puis disparaissent à environ 50 km (Figures 3.8 et 3.9) ; 2) quant à sa bordure Ouest avec la zone mobile panafricaine, les contrastes de gradients des anomalies positives se montrent également persistants jusqu'à 100 km de profondeur (Figure 3.8 et 3.9). La forte amplification des anomalies de la bordure Ouest du Craton du Congo ainsi que celles observées sur la zone de transition NO de la LVC avec la profondeur en direction du NE pourraient témoigner l'existence d'une forte poussée de la structure lithosphérique océanique sur les structures de la Chaîne Panafricaine à l'Ouest du Craton du Congo.

A partir de cette approche d'analyses nous pensons que la LVC pourrait avoir une origine mantellique. Nous suggérons que plusieurs phénomènes géodynamiques différents dans le sous-sol en différents points seraient responsables de la formation de la LVC et que l'origine de la LVC offshore et onshore ne se saurait provenir d'un point chaud. C'est ainsi que notre hypothèse semble être logique pour essayer d'expliquer d'avantage l'origine de la LVC puisqu'elle ne tient pas compte de la chronologie de formation des structures géologiques sur la LVC et que la LVC et le CC ont une interaction mantellique.

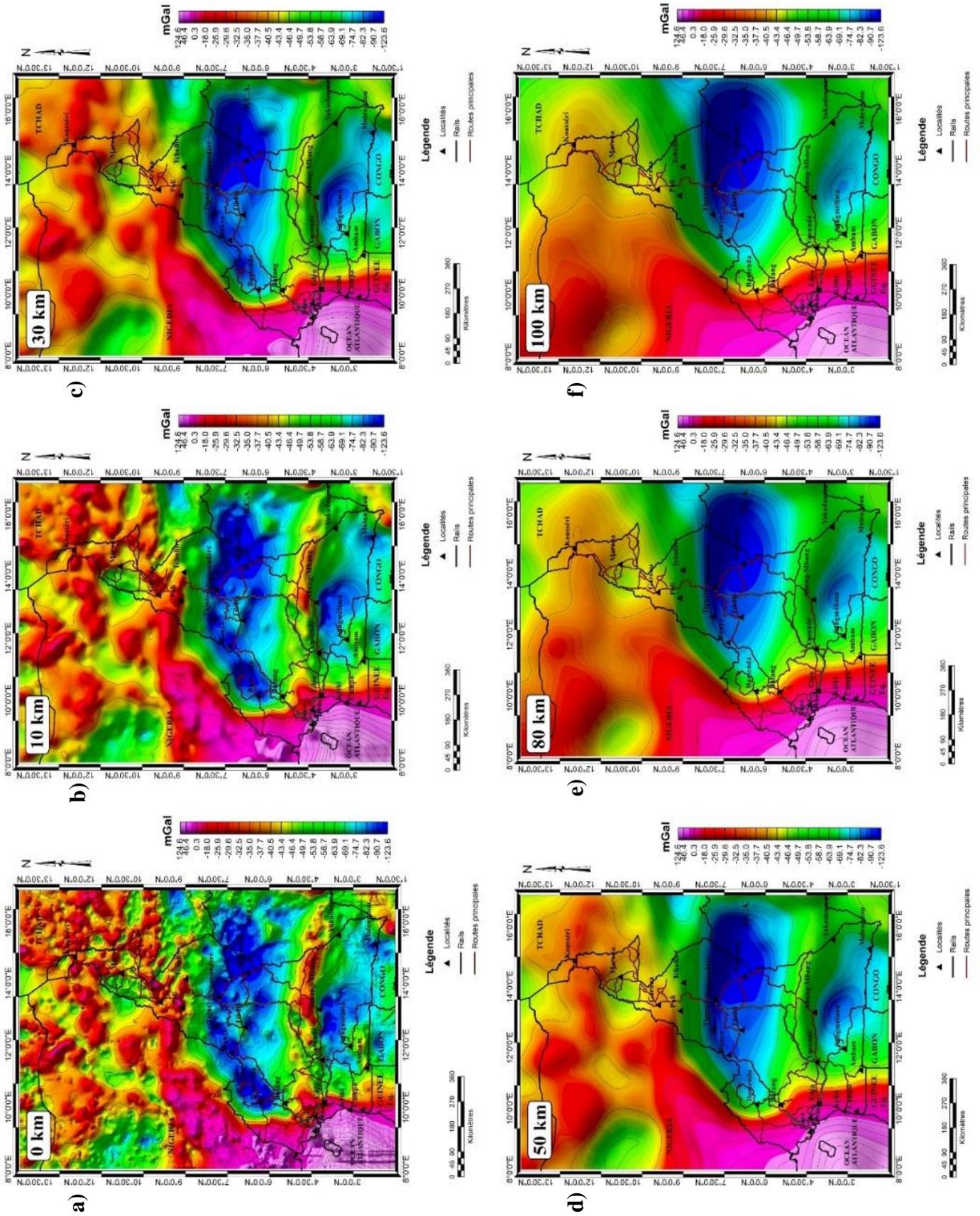


Figure 3.8: Cartes des anomalies de Bouguer des données gravimétrique in situ respectivement PVH à 10, 30, 50, 80 et 100 km.

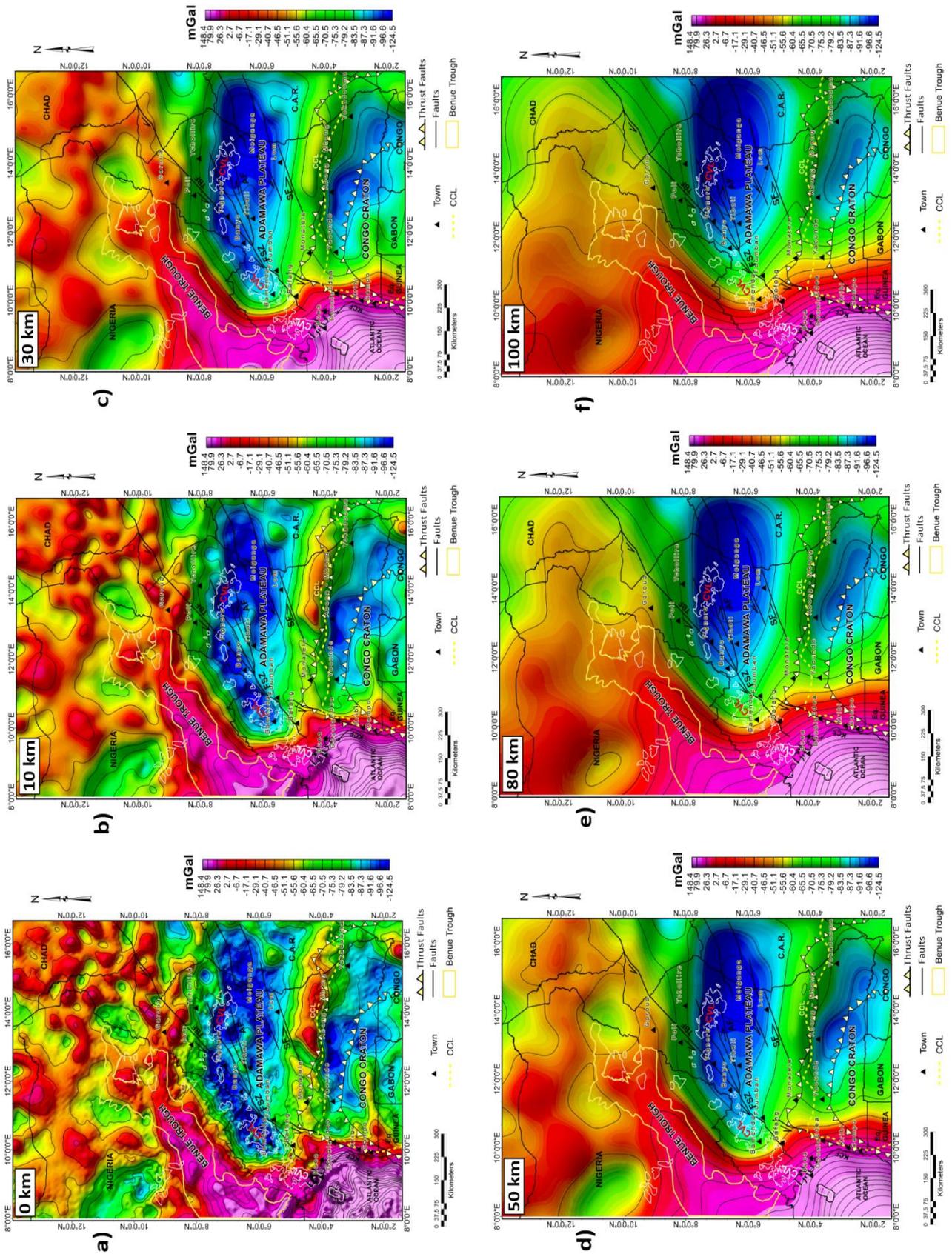


Figure 3.9: Cartes de PVH des anomalies de Bouguer du Modèle Gravitationnel Global (XGM 2019e_2159) respectivement PVH à 10, 30, 50, 80 et 100 km.

b. Gradient horizontal d'anomalies de Bouguer

La carte des gradients horizontaux des anomalies du champ gravimétrique de la région d'étude est mise en évidence (Figure 3.10). Elle nous renseigne sur les contacts lithologiques latéraux des accidents tectoniques. Les gradients horizontaux de la région d'étude sont orientés suivant plusieurs directions. Les directions majoritaires sont localisées sur les zones à forts gradients ; ainsi :

- les forts gradients de direction Nord–Sud localisés à Edéa, Kribi, et Campo ;
- les forts gradients de directions respectives ONO-ESE et ENE-OSO localisés à Yaoundé et Abong-Mbang;
- les forts gradients sous forme de contour localisés à Buéa, Bafang et Bamenda dans le Nord-Ouest et le Sud-Ouest Cameroun. D'après la géologie de la région d'étude, ces gradients gravimétriques à fortes amplitudes sont localisés sur la LVC. L'interprétation des gradients qui longent la LVC témoignent que cette dernière est fortement accidentée dans cette zone sur le continent ; il en est de même pour la partie océanique ;
- dans l'Extrême Nord, une série de contours de gradients positifs étendus sur presque toute la majorité de cette région et également localisée pouvant être interprétée comme étant les intrusions des structures géologiques. Cette partie est d'après les travaux géologiques le siège d'une structure métacratonisée.

Dans l'ensemble, au Cameroun, la structure lithosphérique est fortement accidentée au Centre Sud Cameroun, à l'Ouest, Sud-Ouest et dans la partie septentrionale. Celle-ci nous révèle à quel point la structure de la lithosphère au Cameroun et ses environs est caractérisée par des processus géodynamiques complexes qui restent encore mal compris.

c. Gradient vertical d'anomalies de Bouguer

La figure 3.11 montre la carte du gradient vertical de la zone d'étude. Cette carte, dépourvue de traits régionaux, met en évidence la distribution spatiale des zones de gradient positif qui se prononcent nettement des zones de gradient négatif. Sur cette carte, l'amplification de l'effet gravimétrique des contrastes de densité superficiels au détriment des contrastes profonds est observée. Elle met en exergue les zones de gradients suivant la verticale, et dérive des anomalies de Bouguer. L'analyse comparative des anomalies de Bouguer avec les gradients verticaux nous laisse savoir qu'au Cameroun, les gradients verticaux à fortes amplitudes de gradients sont très majoritairement localisés sur les anomalies positives dans l'Extrême-Nord du Cameroun, les zones de transitions entre le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine. Dans l'ensemble, vue la distribution spatiale des gradients verticaux de la figure 3.11, on peut voir comment la structure intracrustale du Cameroun est fortement accidentée.

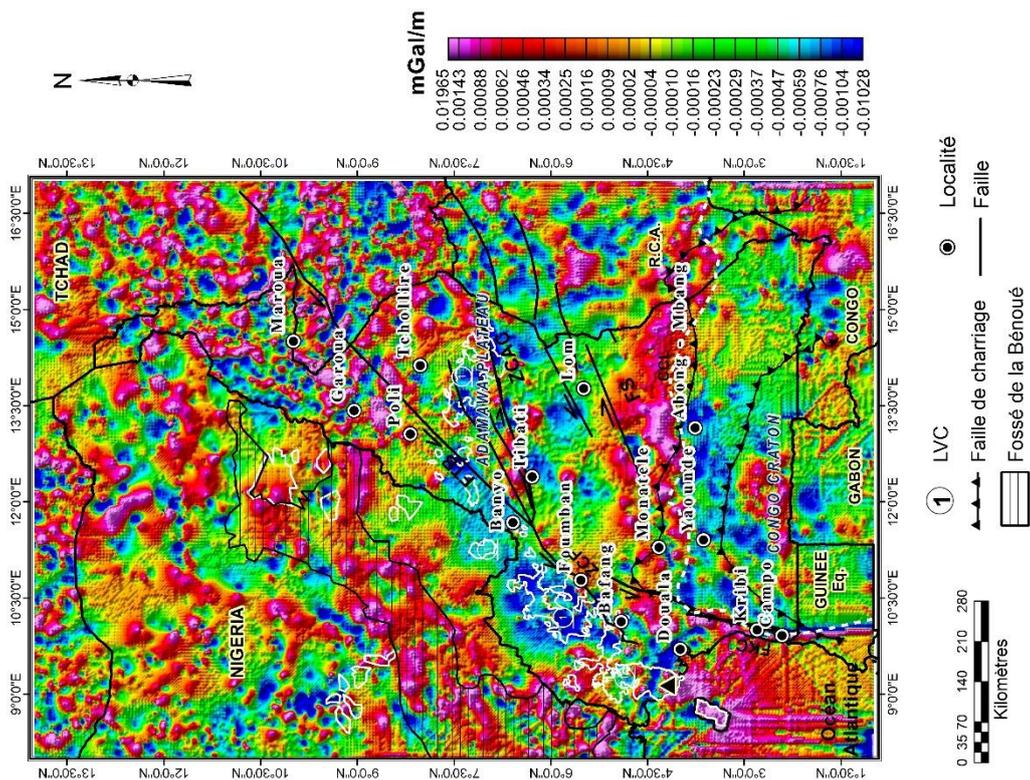


Figure 3.10: Carte de gradient horizontal des anomalies de Bouguer de la région d'étude.

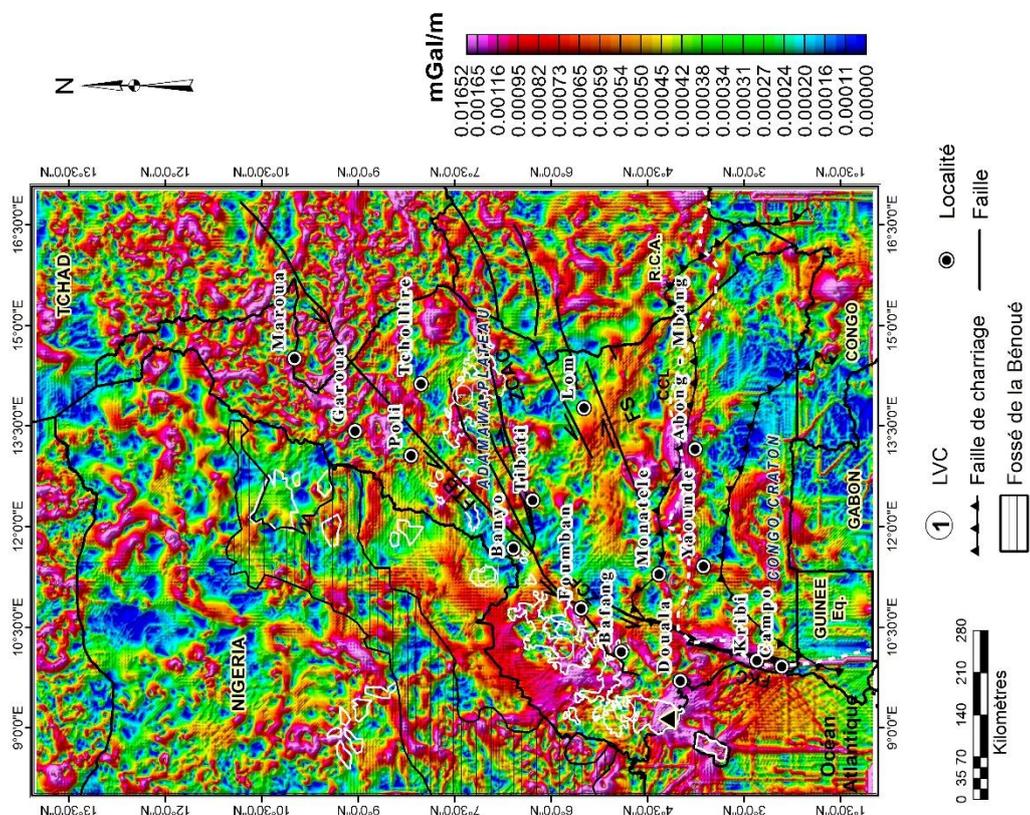


Figure 3.11: Carte de gradient vertical des anomalies de Bouguer de la zone d'étude.

3.2.3. Cartographie des linéaments gravimétriques

a. Analyse multi-échelle des maxima de gradient horizontal des anomalies de Bouguer et gradients verticaux

Les cartes des anomalies de Bouguer (Figure 3.4) et de gradients verticaux (Figure 3.11) sont exploitées pour localiser les maxima des gradients horizontaux dans la présente zone d'étude. Ainsi, pour la localisation, une analyse multi-échelle de ces anomalies et gradients ont été faite. Pour cette approche, il a été question dans un premier temps de PVH de 5 km à 35 km de profondeurs à des pas constants de 5 km les anomalies de Bouguer et gradients verticaux à différentes profondeurs afin de différencier les anomalies et gradients liées aux structures superficielles moyennes et profondes. Par la suite, pour chaque carte obtenue, le gradient horizontal a été calculé ainsi que leurs maxima correspondants. Les maxima de gradients ainsi mis en évidence pour chaque niveau de profondeur ont été superposés pour obtenir les cartes de superposition des maxima de gradients pour anomalies considérées (Figure 3.12). Le gradient horizontal est ainsi couplé au PVH pour différentes profondeurs afin de caractériser l'extension latérale des structures sources d'anomalies et de déterminer le sens de pendage des contacts/failles ainsi localisés. Pour un contact qui présente un pendage, les maxima des gradients horizontaux se déplacent du côté du pendage au fur et à mesure qu'on augmente la profondeur de prolongement, cependant ces maxima restent pratiquement à l'aplomb des contacts pour des contacts subverticaux.

Le calcul des maxima s'est fait à l'aide du programme Oasis Montaj de Geosoft par la méthode de Blakely et Simpson, 1986. Pour qualifier les différents maxima retenus, Blakely et Simpson, (1986) ont utilisé un critère s'appuyant sur la valeur du maximum et un indice N qui dépend du nombre de maxima valides rencontrés dans la fenêtre 3 X 3. L'indice N ($1 \leq N \leq 4$) donne une indication de la linéarité d'un maximum ; ainsi lorsque N = 1, le gradient horizontal d'anomalies est linéaire et lorsque N = 4 le maximum est un pic local. A partir des tests effectués sur des cartes aussi bien à l'échelle locale qu'à l'échelle régionale, ces auteurs ont trouvé que les indices 2 et 3 conduisaient aux meilleurs résultats. Cette méthode avait été utilisée avec succès pour caractériser quelques linéaments liés aux accidents tectoniques majeurs du Maroc (Khattach et al., 2006 ; Vanié et al., 2005).

L'étude comparative des maxima de gradient horizontal des anomalies de Bouguer (Figure 3.12a) à la carte des maxima de gradient horizontal de la dérivée verticale du 1^{er} ordre (Figure 3.12b), nous révèle que les maxima des gradients horizontaux (Figure 3.12b) soulignent plus nettement les différentes traces structurales présentes dans la zone d'étude que sur la figure 3.12a.

Cette technique a également été utilisée pour la cartographie des linéaments magnétiques et gravimétriques dans l'Adamaoua (Noutchogwe, 2010).

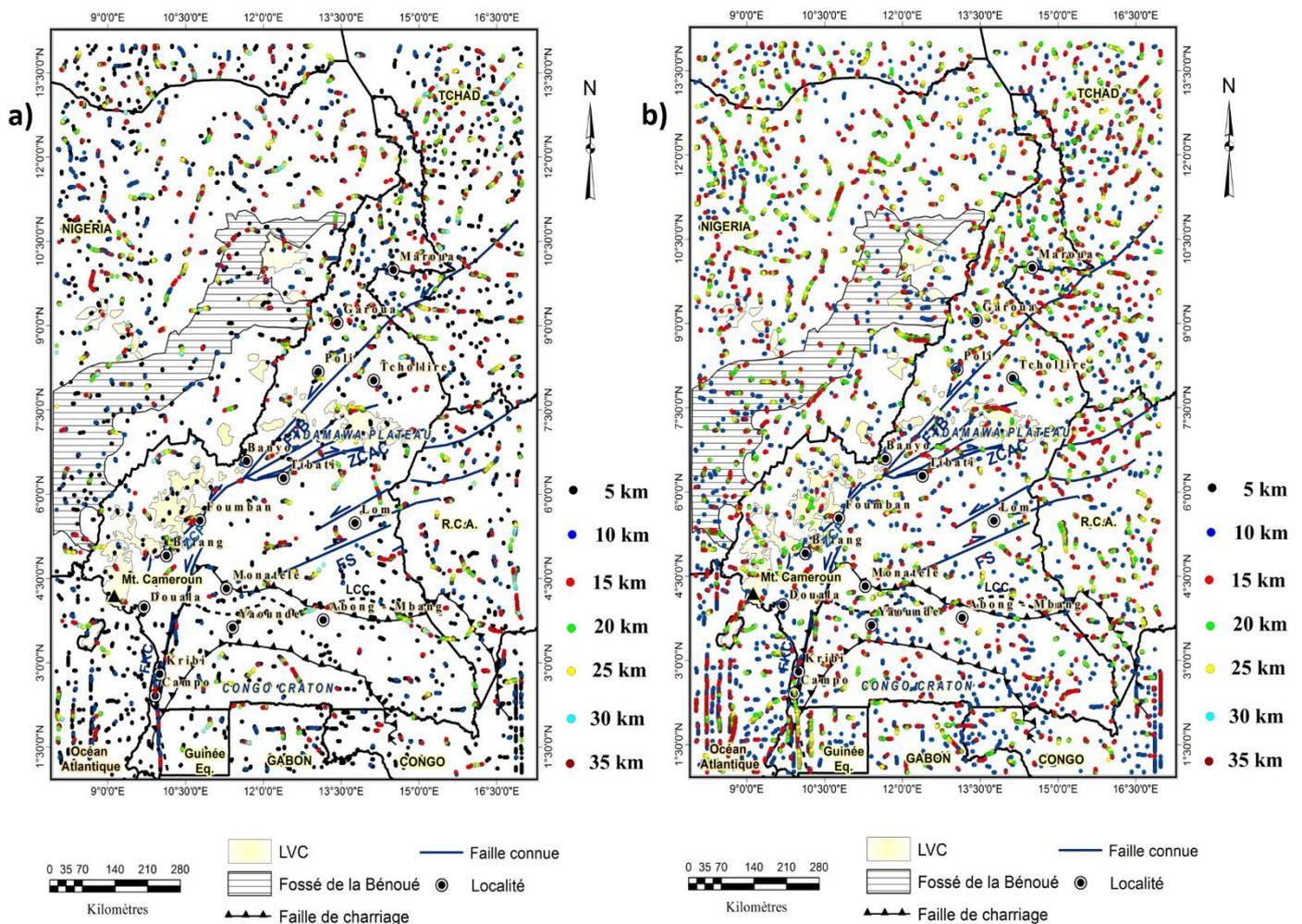


Figure 3.12: Illustration de la carte de superposition des maxima de gradient horizontal : a) des anomalies de Bouguer ; b) de la dérivée verticale du 1^{er} ordre des anomalies de Bouguer.

b. Les linéaments gravimétriques interprétatifs

Pour la cartographie des linéaments gravimétriques, les maxima de gradients horizontaux (Figures 12a et 12b) ont été couplés pour obtenir la carte de superposition des maxima de gradient horizontal des anomalies de Bouguer et la dérivée verticale du 1^{er} ordre combinés (Figure 3.13). Cette dernière a été exploitée pour tracer suivant la disposition et l’orientation des maxima, les traits structuraux caractéristiques du sous-sol de la région d’étude (Figure 3.14).

Dans l’ensemble, la zone d’étude, de par la complexité des structures géologiques et le relief très accidenté, révèle que la structure du sous-sol de la région d’investigation est portée par un très grand nombre d’accidents tectoniques qui pourraient d’une part avoir des avantages pour les projets de prospection minière et minérale et d’autre part pour certaines régions d’instabilité lithosphérique.

Ainsi, la gravité associée aux linéaments peut être interprétée comme des contacts géologiques (connus ou cachés), des failles existantes ou structures intrusives dans la zone d'étude.

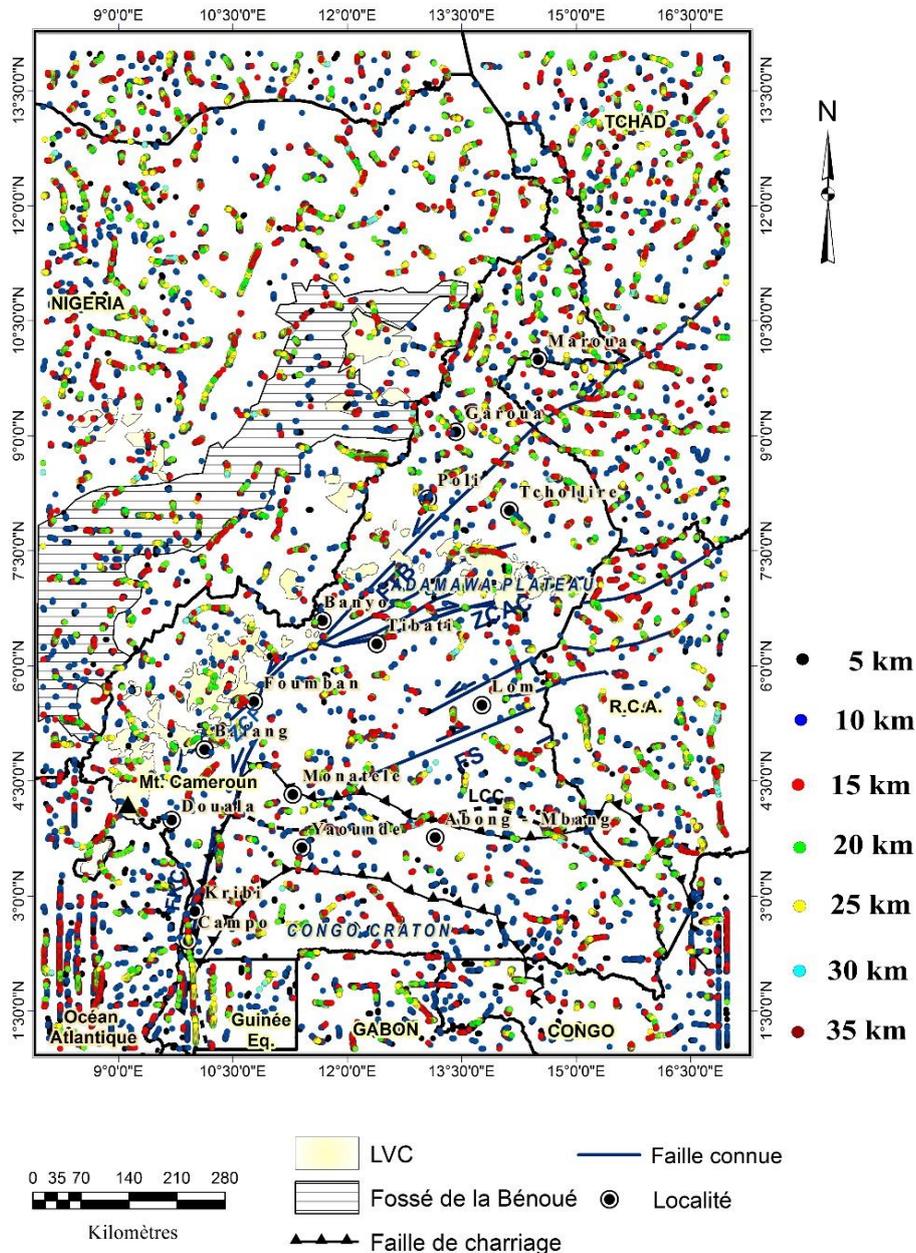


Figure 3.13: Carte de la superposition des maxima de gradient horizontal des anomalies de Bouguer et la dérivée verticale du 1^{er} ordre.

La carte des linéaments gravimétriques (Figure 3.14) obtenue à partir des anomalies de Bouguer met en évidence 217 traits structuraux caractérisant les accidents tectoniques que renferme le sous-sol intracrustal de la lithosphère de la zone d'étude. Ses orientations ont été répertoriées dans le tableau 3.2. Les résultats viennent confirmer non seulement les grands traits structuraux déjà mis en évidence par les travaux

géologiques (Toteu et al., 2001 et 2004) mais aussi révéler la présence des nouveaux accidents tectoniques non cartographiés.

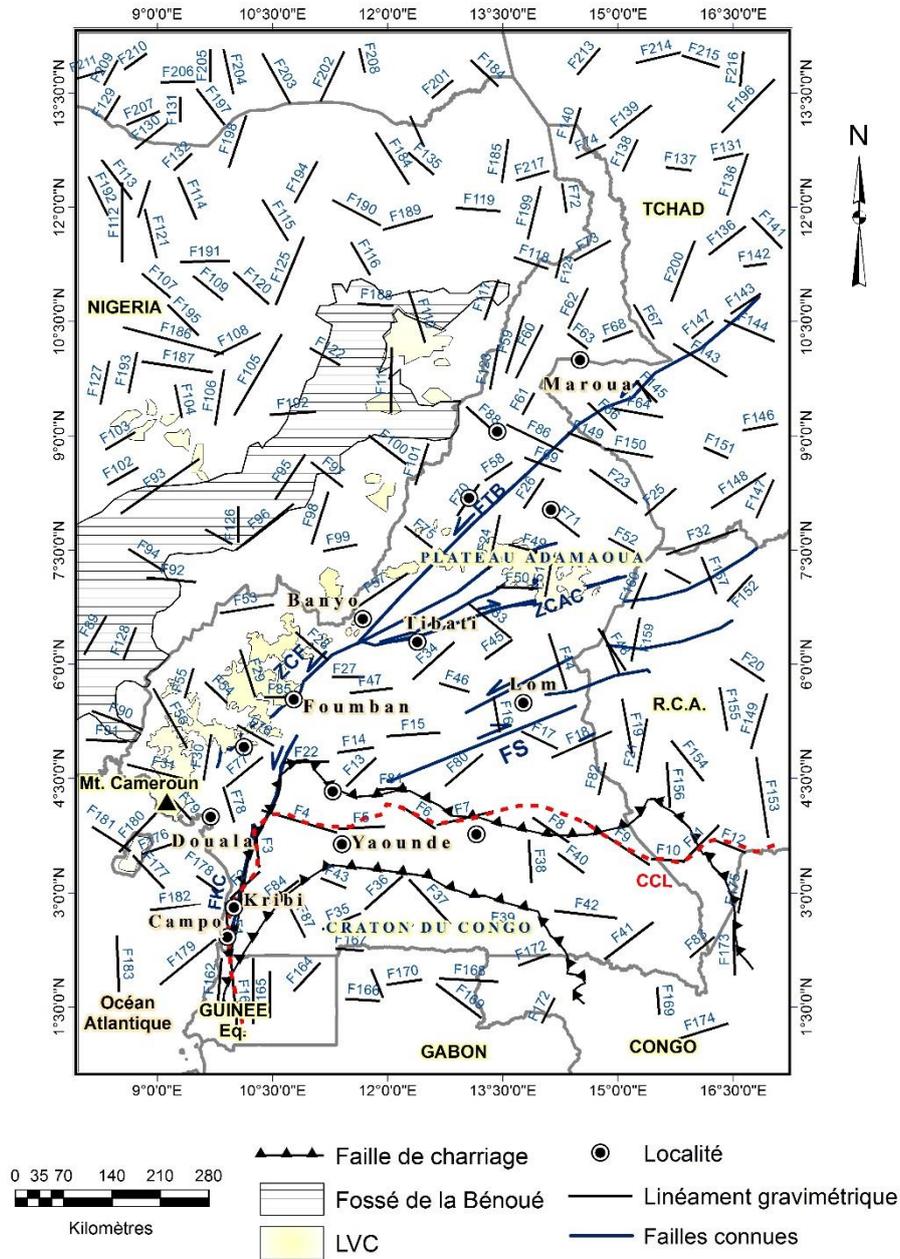


Figure 3.14: Carte des linéaments gravimétriques du Cameroun.

Parmi ces segments d’accidents tectoniques identifiés on peut citer :

Les accidents (F1, F2 et F3) passant par Kribi-Campo avec un prolongement vers Edéa localisés sur la bordure Ouest entre le Craton du Congo et la Chaîne panafricaine Cette bordure Ouest du Craton du Congo a été considérée comme étant la faille de Kribi-Campo (Toteu et al., 2001 et 2004 ; Owona Angue et al., 2013 ; Nguiya et al., 2018);

Les accidents (F5, F6, F7, F8, F9, F10, F11 et F12) localisés dans la partie méridionale du Cameroun (Figure 3.14) sont identifiés comme étant la limite géophysique Nord du Craton du Congo. Cette Limite avait également été proposée par Tadjou et al., 2009, Ngatchou et al., 2014 et Nguiya et al., 2018 qui l'ont considérée comme étant la zone de transition Nord entre la Chaîne panafricaine et la partie Nord du Craton du Congo qui borde la partie méridionale du Cameroun ;

Le réseau de linéaments (F181, F180, F30, F76, F85, F57, F75, F70, F58, F69, F149, F66, F64, F145, F147 et F143) considéré comme étant les traits structuraux délimitant le domaine (Nord et Nord-Ouest) et le domaine Centre panafricaine ou domaine de l'Adamaoua-Yadé . Ce domaine au Nord a été mis en évidence par Dumont (1986). Cependant, certains de ces segments de linéaments (F57, F75, F70, F58, F69, F149, F66, F64, F145, F147 et F143) pourraient être considérés comme étant le réseau d'accidents tectoniques constituant la faille de Tcholliré-Banyo mise en évidence par (Toteu et al., 2006) et qui se prolonge jusqu'au Mayo-Kebbi à l'Ouest au Tchad (F80, F1, F82, F165, F180 et F184) ;

Les traits structuraux (F81, F80, F17 et F18) correspondants à la zone de délimitation du domaine central (domaine de l'Adamaoua-Yadé) avec le domaine méridional comprenant le groupe de Yaoundé au Cameroun. Ces domaines ont été mis en évidence par Nédélec et al. (1986) ; Nzenti et al. (1988). Ces mêmes auteurs y compris Toteu et al. (2004) ont considéré cette zone de transition comme étant la faille de la Sanaga (FS).

Les linéaments (F27, F47, F34, F44, F45, F33, F32 et F147) constituent le réseau de linéaments qui pourrait délimiter la zone de Cisaillement Centre du Cameroun (CCC) ou la faille de l'Adamaoua (FA) dans le Centre Cameroun. L'existence de ce CCC avait été proposée par Toteu et al. (2004).

3.3. Analyse et interprétation des données magnétiques

3.3.1. Interprétation qualitative des anomalies du champ magnétique total

La figure 3.15 met en évidence respectivement les anomalies du champ magnétique total et la topographie du Cameroun. Les anomalies du champ magnétique total représentent la somme des effets de tous les corps aimantés, quelles que soient l'orientation, l'intensité d'aimantation. Les anomalies positives de direction majeure sont localisées sur la LVC suivant la direction NE-SO partant de l'Océan Atlantique jusqu'à l'Ouest du Tchad, le Fossé de la Bénoué, à l'Est du Nigéria (Figure 3.15a). Ceci représente l'une des directions structurales suggérant ainsi que les anomalies magnétiques du champ total sont largement influencées par la tectonique régionale caractéristique. Comparativement à la carte topographique (Figure 3.15b), les anomalies de forte amplitude magnétique au Cameroun sont dans leur majorité localisées dans les régions fortement accidentées contrairement à celles localisées sur la Fossé de la Bénoué et dans le Tchad.

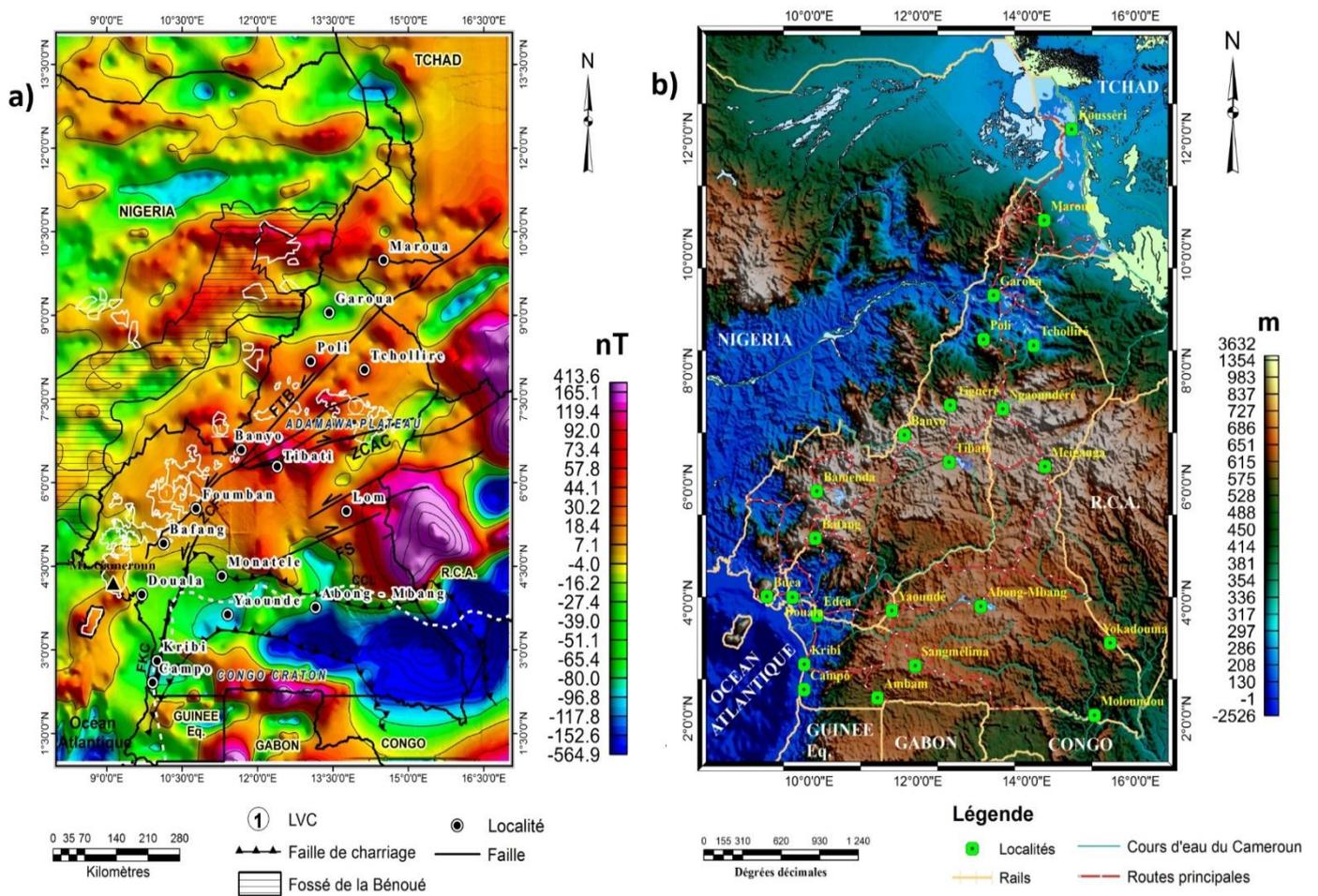


Figure 3.15: Illustration : a) des anomalies du champ magnétique total de la région d'étude ; b) topographie de la zone d'étude.

3.3.2. Transformation des anomalies du champ magnétique total

a. Réduction au pôle des anomalies du champ magnétique total (CMT-RP)

Le champ magnétique est défini par trois composantes principales :

- l'inclinaison magnétique ;
- la déclinaison magnétique ;
- l'intensité totale du champ magnétique.

Pour le calcul de l'opérateur de la réduction au pôle, nous avons tenu compte de ces composantes. Les valeurs de l'inclinaison et la déclinaison magnétique ont été respectivement estimées : $I = -19,3^\circ$ et $D = -1,34^\circ$. Ces valeurs correspondent à l'inclinaison et déclinaison de la zone d'étude durant l'année où les mesures ont été prises.

La carte de l'anomalie du champ magnétique total réduit au pôle (Figure 3.16a) montre comme c'est le cas dans les régions de basses latitudes, des changements importants par rapport à la carte de l'anomalie

magnétique du champ total (Figure 3.15a). Ainsi, l'orientation NE-SO majeure qui caractérise la carte du champ total n'est plus visible. Dans cette région, la réduction au pôle amplifie les directions Nord-Sud et il y a un grand risque d'un renforcement exagéré par amplification d'un bruit préexistant. Dans notre cas, la carte réduite au pôle ne montre pas l'importance de l'anomalie magnétique positive centrale caractérisant la LVC et la FTB à cause d'un renforcement exagéré des bruits qui ne sont pas ceux des structures géologiques de la zone dans sa globalité, d'où l'intérêt d'appliquer la réduction à l'équateur.

b. Réduction à l'équateur des anomalies du champ magnétique total (CMT-RE)

Dans notre étude, comme le cas de la réduction au pôle, nous avons utilisé pour inclinaison et déclinaison magnétique les valeurs respectives : $I = -19,3^\circ$ et $D = -1,34^\circ$. La carte réduite à l'équateur mise en évidence (Figure 3.16b) montre les grandes anomalies positives dont les amplitudes et les longueurs d'onde sont presque égales à celles observées sur la carte de l'anomalie du champ total (Figure 3.15a). On peut également constater que sur cette carte, les anomalies positives se sont légèrement atténuées dans les régions volcaniques à l'Ouest Cameroun et que la grande majorité des anomalies dans sa globalité a pu conserver leur forme.

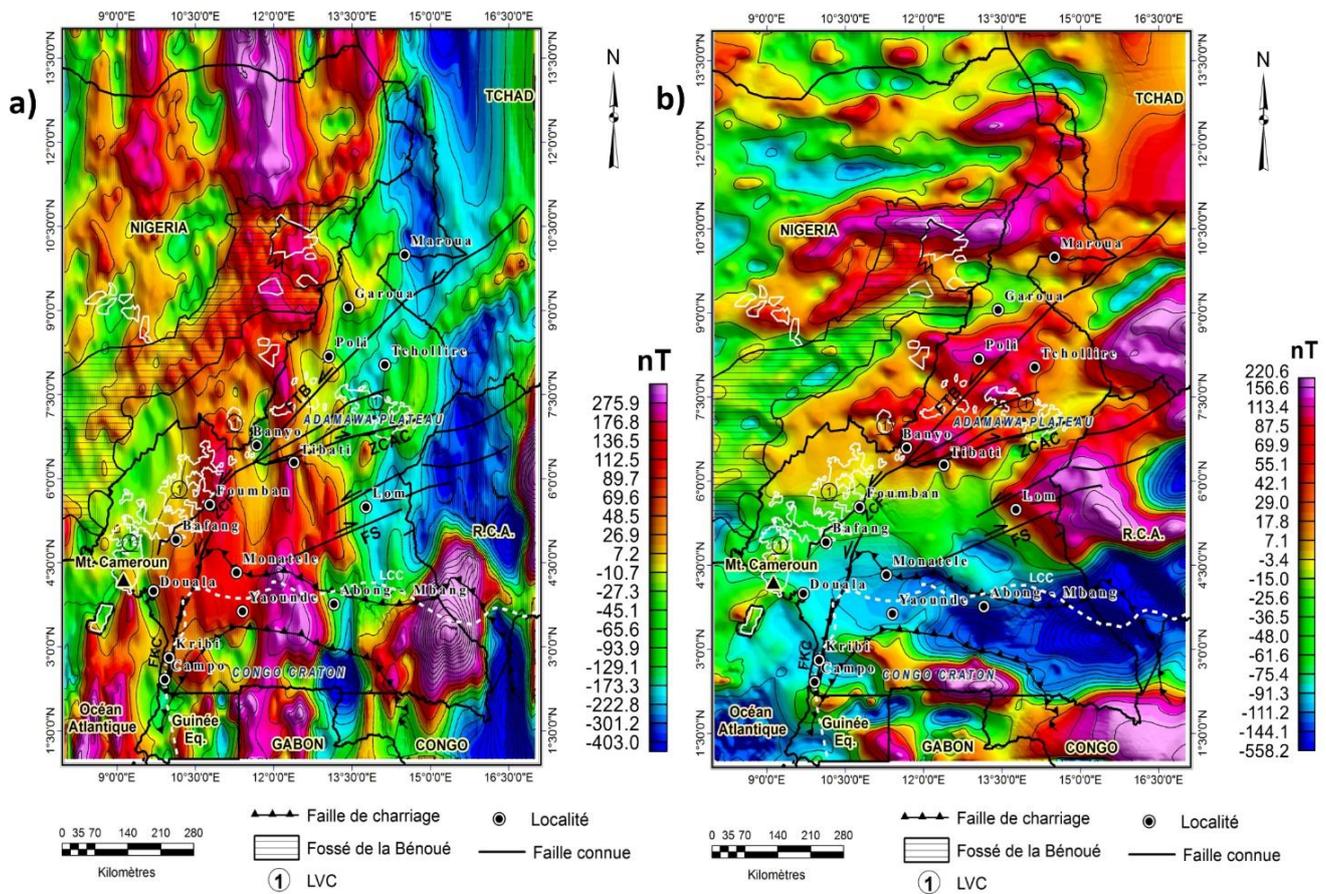


Figure. 3.16 : Carte d'anomalies du champ magnétique total : a) réduit au pôle ; b) réduit à l'équateur de la zone d'étude.

3.3.3. Interprétation qualitative des anomalies du champ magnétique total réduit à l'équateur

La carte des anomalies du champ magnétique total réduit à l'équateur (Figures 3.16b), met en évidence la somme des effets de tous les corps aimantés, quelles que soient l'orientation, la nature et l'intensité d'aimantation. Elle est également la superposition du champ magnétique des structures géologiques. Cette carte (Figures 3.16b) nous révèle que la région d'étude est caractérisée par une très grande variété d'anomalies magnétiques étendues dans la structure du sous-sol au Cameroun et ses environs (Nigéria, Tchad, République Centrafricaine, Congo, Gabon et Guinée Equatoriale). Dans sa globalité, les anomalies magnétiques observées au Cameroun sont largement dominées dans sa partie septentrionale par de fortes amplitudes. Ces fortes amplitudes d'anomalies positives de champ magnétique linéaire témoigneraient de l'existence des processus thermodynamiques responsables de la présence des failles localisées par les travaux géologiques où le plus dominant est la présence de la faille de Tcholliré – Banyo (FTB).

Dans la partie septentrionale du Craton du Congo localisée au Cameroun, une forte dominance d'anomalies magnétiques négatives est observée. Bien que cette zone soit localisée sur les régions dont les altitudes sont importantes, ceci signifie que les structures géologiques de forte densité que renferme le sous-sol du Craton du Congo sont dans leur globalité dominées par les anomalies de très faibles amplitudes et pourraient témoigner de l'absence des phénomènes de convection des structures géologiques dans le Craton du Congo.

Dans l'Extrême Nord du Cameroun, bien que le relief soit faiblement accidenté, une forte dominance des anomalies magnétiques positives est observée. Cette zone présente les secteurs fortement déformés qui pourraient témoigner de l'existence des phénomènes géodynamiques et thermiques dans le sous-sol au Cameroun où d'après la géologie serait le siège des structures sédimentaires et volcano-métamorphiques localisées avec une dominance des granitoïdes datant du Néoprotérozoïque.

De plus, comparativement à la carte topographique (Figure 3.15b), la figure 3.16b révèle que la LVC, bien que possédant un relief fortement accidenté, est caractérisée par une extension des anomalies magnétiques différentes à l'Ouest dans les régions volcaniques et au Nord dans le Plateau de l'Adamaoua. Ainsi, les anomalies positives localisées sur la LVC se superposent sur les structures volcano-plutoniques datant du Cénozoïque d'après la géologie.

a. Prolongement vers le haut (PVH) des anomalies du champ magnétique total (CMT) réduit à l'équateur (RE)

De même que les anomalies de Bouguer pour le cas de la gravimétrie, le PVH a été appliqué aux anomalies du CMT-RE afin d'étudier leur comportement avec la profondeur et essayer de comprendre d'avantage l'origine de la LVC. Ainsi, les anomalies des signatures magnétiques ont été prolongées vers le haut à des profondeurs respectives 10 km, 30 km, 50 km, 80 km et 100 km (Figure 3.17). La superposition des

anomalies du CMT-RE aux structures géologiques nous montre que la LVC (onshore et offshore) est localisée sur les zones anomalies positives à amplitude moyenne dans la partie Ouest et sur des zones d'anomalies de fortes amplitudes dans les localités telles que Banyo, Tibati, jusqu'à Tcholliré au Nord Cameroun. Ces anomalies du CMT-RE PVH s'estompent progressivement avec la profondeur. On remarque nettement que les anomalies négatives de courtes longueurs d'onde s'atténuent avec une forte persistance jusqu'à 100 km de profondeur. Leur présence à cette profondeur confirme le fait qu'elles soient liées aux structures profondes.

De plus, l'analyse de la distribution spatiale et le comportement des anomalies magnétiques positives localisées au Cameroun plus précisément dans l'Adamaoua, l'Extrême Nord, l'Est du Nigéria et l'Ouest de la R.C.A. avec la profondeur nous laissent penser que celles-ci proviendraient du Tchad dans sa partie Ouest. Il est important de remarquer que les anomalies magnétiques localisées dans la région d'étude sont d'une grande complexité et que leurs distributions dans le sous-sol de la lithosphère du Cameroun seraient dues à la présence d'une grande variété de structures géologiques de nature différente.

Cependant, en plus de la structuration globale du sous-sol du Cameroun, il est également question d'essayer de comprendre d'avantage l'origine de la LVC. En ce sens, cette dernière a été superposée aux anomalies du CMT-RE ; ainsi on peut remarquer que l'amplitude des anomalies se montre plus importante sur la LVC localisée sur le Plateau de l'Adamaoua contrairement à celles localisées dans la partie Ouest. L'analyse des cartes PVH permet d'observer une forte persistance avec la profondeur des anomalies positives de la LVC localisées sur le Plateau de l'Adamaoua au-delà de la croûte et une forte atténuation dans la partie Ouest. Les anomalies PVH ne nous montrent nullement et ne permettent pas de retracer son évolution en accord avec l'hypothèse du point chaud. Toutefois, nous pouvons admettre l'existence de plusieurs points chauds connus comme étant la conséquence d'une série d'événements géodynamiques qui auraient été déclenchés suite à la collision de la Chaîne panafricaine avec les Cratons en Afrique.

Du point de vue gravimétrique, l'analyse qualitative des anomalies de Bouguer nous a révélé que la LVC (de la partie continentale et Océanique) est portée par deux types d'anomalies et bien séparées par une zone de contraste de gradient laissant croire dans ce travail au phénomènes thermo-géodynamique pour expliquer son origine. En ce sens, grâce à nos analyses qualitatives des anomalies gravimétriques et magnétiques, nous pensons également que les processus responsables de la formation de la Ligne Volcanique offshore et onshore proviendraient respectivement de l'Océan Atlantique et des structures lithosphériques du Continent.

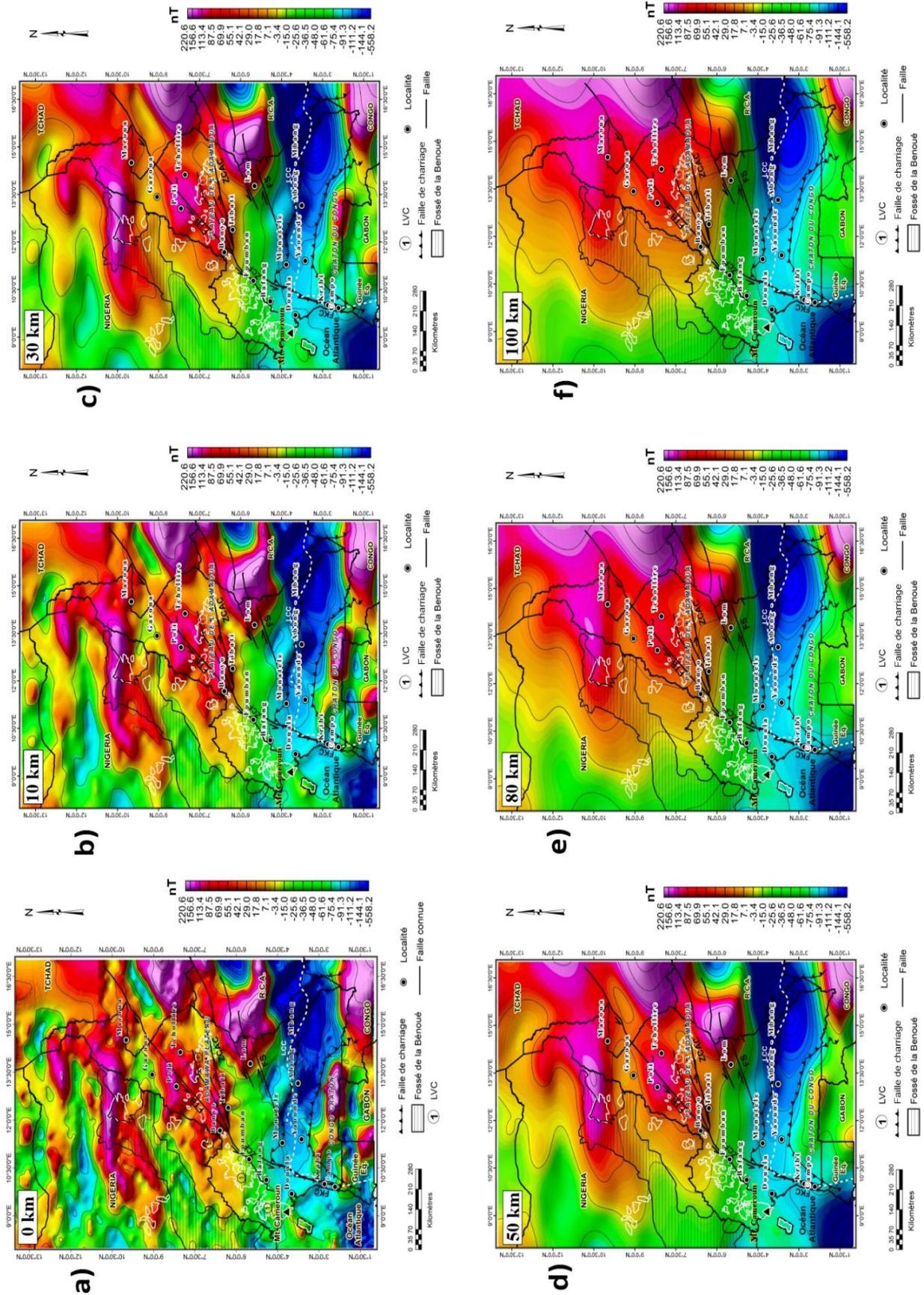


Figure 3.17: Cartes de PVH des anomalies du champ magnétique total réduit à l'équateur.

b. Gradient horizontal des anomalies du champ magnétique total réduit à l'équateur

De même que les anomalies de Bouguer, le gradient horizontal ou dérivée horizontale (DH) du CMT-RE est mise en évidence (Figure 3.18). La distribution spatiale des gradients horizontaux positifs et négatifs renseigne sur les contacts latéraux dans le sous-sol du Cameroun et ses environs.

A l'Ouest, les gradients horizontaux négatifs sont observés à Bafang et Foumban. D'après la géologie, ces gradients négatifs sont localisés sur la LVC. Dans cette zone, on peut se rendre compte que la partie de la LVC située sur le continent est dominée par les gradients horizontaux négatifs. Une analyse poussée de la carte permet de voir que les gradients horizontaux localisés sur la LVC Offshore se montrent plus importants par rapport à ceux localisés à Bafang et Foumban.

Dans le Plateau de l'Adamaoua, le prolongement de la LVC y est localisé. Dans cette région, les gradients horizontaux se montrent importants. De plus, en observant la LVC, on peut remarquer que cette dernière est caractérisée par une distribution complexe de gradients non identiques dans le Plateau de l'Adamaoua, à l'Ouest et à l'Océan Atlantique. Ainsi, ces gradients observés sur la LVC ne témoignent en aucun cas l'existence d'un point chaud unique responsable de la formation de la LVC pour expliquer son origine. Dans son ensemble, les gradients horizontaux localisés au Cameroun sont majoritairement dominés par les gradients positifs au Sud et Sud-Est de la zone d'étude. Ainsi les gradients de ces anomalies pourraient nous renseigner sur la caractéristique structurale des structures géologiques du sous-sol.

c. Gradient vertical des anomalies du champ magnétique total réduit à l'équateur

Dans ce travail, le filtre de gradient vertical ou dérivée verticale (DV) est appliqué aux anomalies du champ magnétique total réduit à l'équateur. La carte du gradient vertical des anomalies totales réduit à l'équateur (Figure 3.19) fait successivement apparaître des anomalies que l'on ne voyait quasiment pas sur les cartes d'anomalies du champ magnétique total et du champ total réduit à l'équateur. Elle est d'une importance capitale quant à l'interprétation structurale de la zone d'étude.

On peut voir que les gradients verticaux des anomalies associées à des sources superficielles sont très bien individualisés et se prononcent dans l'ensemble un peu différemment des gradients horizontaux (Figure 3.18). Les anomalies de la carte du gradient vertical sont de taille, de forme et d'amplitude variables. Les plus importantes apparaissent dans la partie méridionale avec une amplitude maximale de $1991 \cdot 10^{-5}$ nT/m. Cependant on remarque que la LVC est portée par des gradients verticaux très variés.

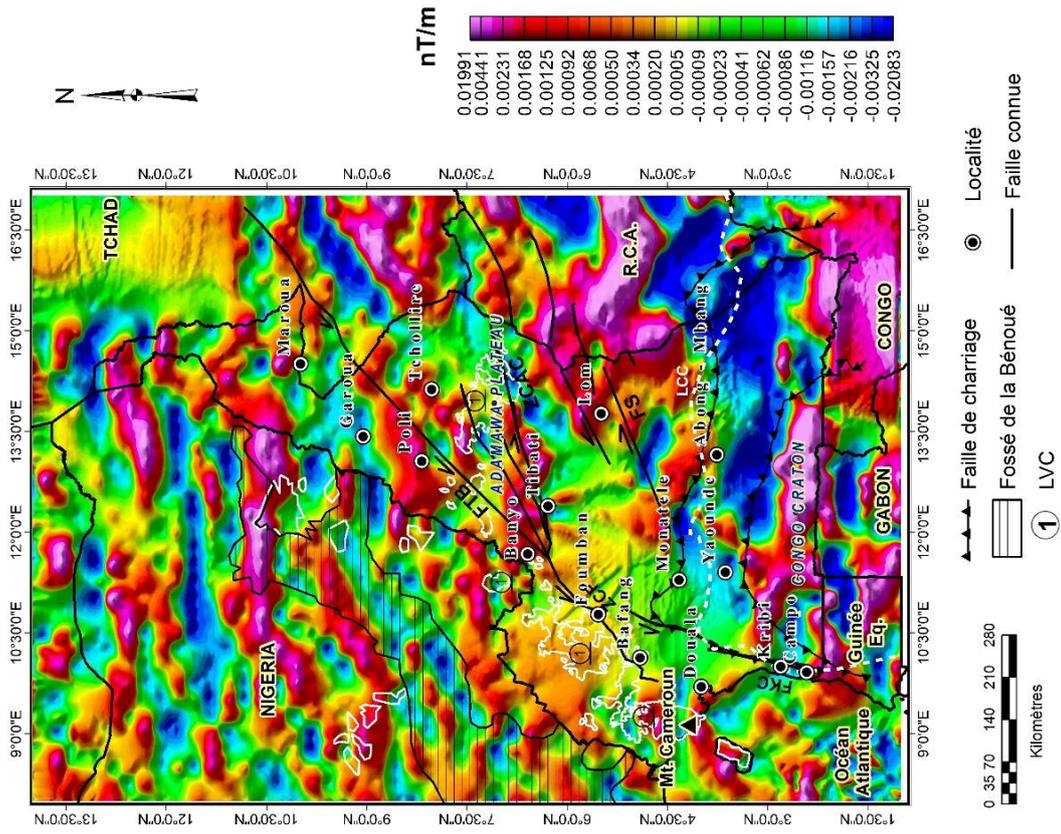


Figure 3.18: Carte de gradient horizontal des anomalies du champ magnétique total réduit à l'équateur.

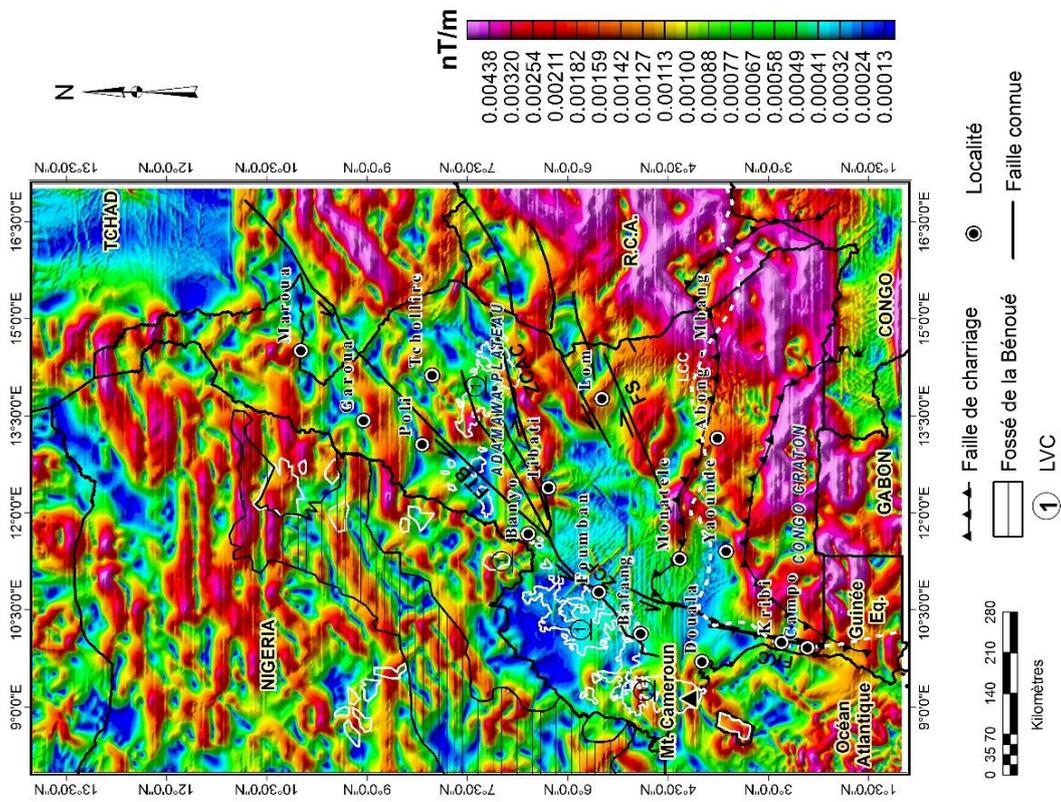


Figure 3.19: Carte de gradient vertical des anomalies du champ magnétique total réduit à l'équateur.

De plus, dans l'Océan Atlantique, le sous-sol est également caractérisé par les gradients verticaux de fortes amplitudes. Ainsi, la carte du gradient vertical (Figure 3.19) met en évidence les signatures des contrastes de gradients verticaux pouvant être interprétées comme un remplissage de fracture, de plis et/ou de zones de contacts horizontaux d'origine intracrustale.

Au nord de la région d'étude, la présence de gradients verticaux positifs majeurs dans la localité de Tibati est notée. D'après la géologie (Figure 1.7), ce gradient est localisé dans la zone de cisaillement Centre Camerounais (ZCCC). De plus, les gradients horizontaux sont également localisés à Tcholliré.

3.3.4. Cartographie des linéaments magnétiques

a. Analyse multi-échelle de la DV du CMT-RE et de la DV du CMT-RE.

La figure 3.20a illustre la superposition des maxima des gradients horizontaux du champ magnétique total réduit à l'équateur. On remarque que les maxima superposés jusqu'à 35 km de profondeur se prononcent moins dans la partie Sud-Est contrairement aux maxima localisés dans le grand Nord et à l'Ouest du Cameroun. Ces maxima sont considérés comme étant les pics maximums des régions fortement accidentées pouvant être des failles, plis, intrusions ou contacts entre structures géologiques. Afin d'apprécier davantage la distribution spatiale des maxima superposés, nous avons exploité la carte de gradients verticaux comme étant la carte d'anomalies principale et calculé par la suite leurs gradients horizontaux. Noutchogwe, (2010) avait montré que le calcul du maxima s'avère plus fiable lorsque le calcul du gradient horizontal est appliqué sur la dérivée verticale. Ainsi dans le cadre de cette étude, les maxima mises en évidence s'avèrent être plus denses sur la carte de dérivée verticale du 1^{er} ordre du CMT-RE (Figure 3.20b) que sur les anomalies du CMT-RE (Figure 3.20a).

c. Les linéaments magnétiques interprétatifs.

Au final, les maxima de la figure 3.20 ont été superposés afin d'obtenir une carte de maxima de la figure 3.21 pour le tracé des linéaments magnétiques.

Comme pour la gravimétrie, les maxima de la figure 3.20 obtenus pour les profondeurs allant de 5 km à 35 km avec un pas constant de 5 km ont été superposés (Figure 3.21) et exploités pour le tracé des linéaments. La figure 3.21 montre en général que les maxima superposés sont quasi-linéaires pour les maxima des anomalies prolongées jusqu'à 35 km de profondeur.

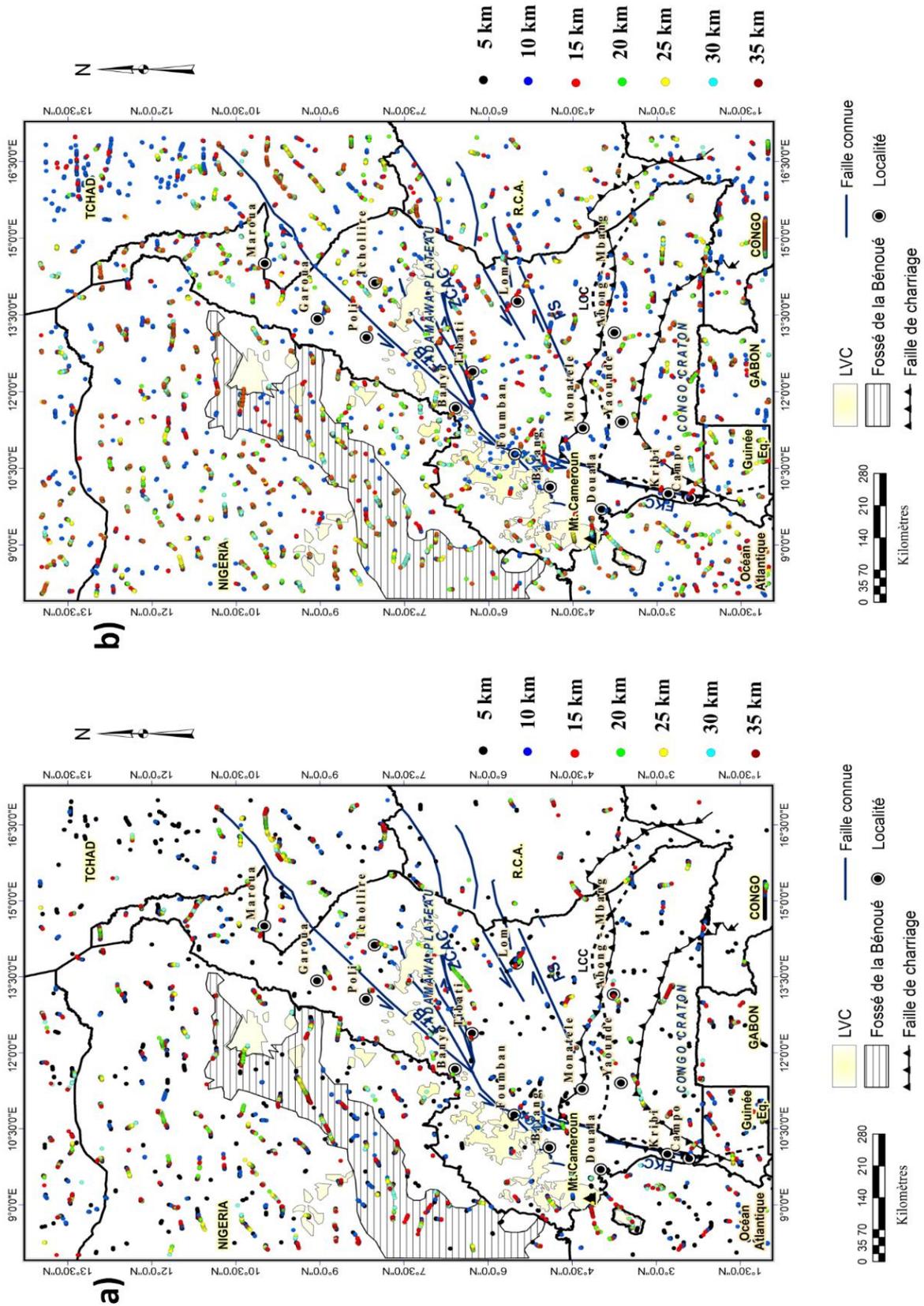


Figure 3.20: Carte de superposition des maxima de gradient horizontal : a) de l'anomalie du CMT-RE ; b) du gradient vertical de l'anomalie du CMT-RE.

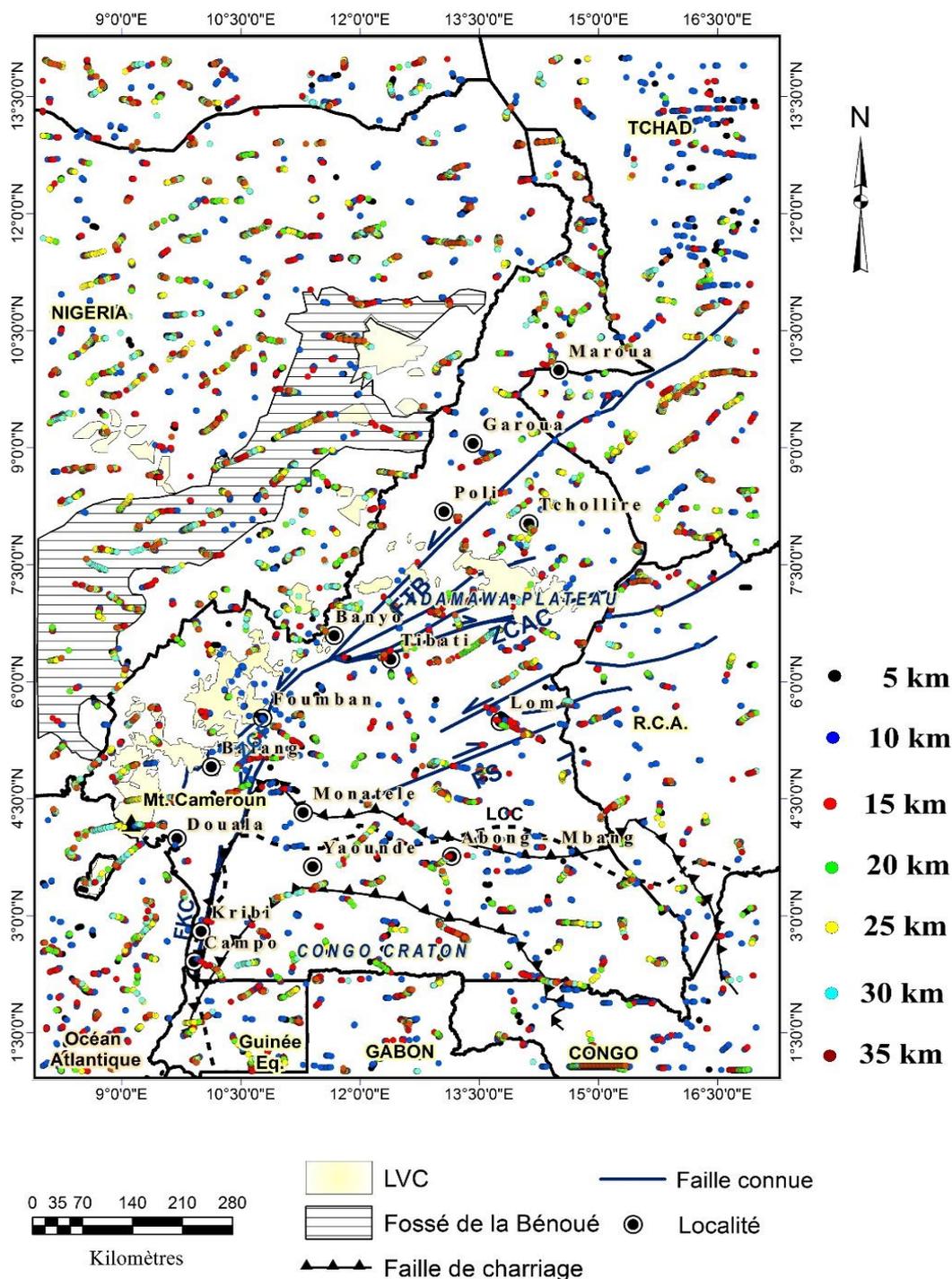


Figure 3.21: Carte de superposition des maxima de gradient horizontal des anomalies du champ magnétique réduit à l'équateur et gradient horizontal de la dérivée verticale du 1^{er} ordre prolongés vers le haut aux altitudes de 5 km à 35 km à pas constants de 5 km.

Les linéaments ainsi mis en évidence (Figure 3.22) peuvent être interprétés comme des failles, intrusions ou contacts géologiques intracrustaux. La figure 3.22 illustre les principales limites entre des zones présentant un contraste important de susceptibilité dont plusieurs correspondent à des accidents non cartographiés.

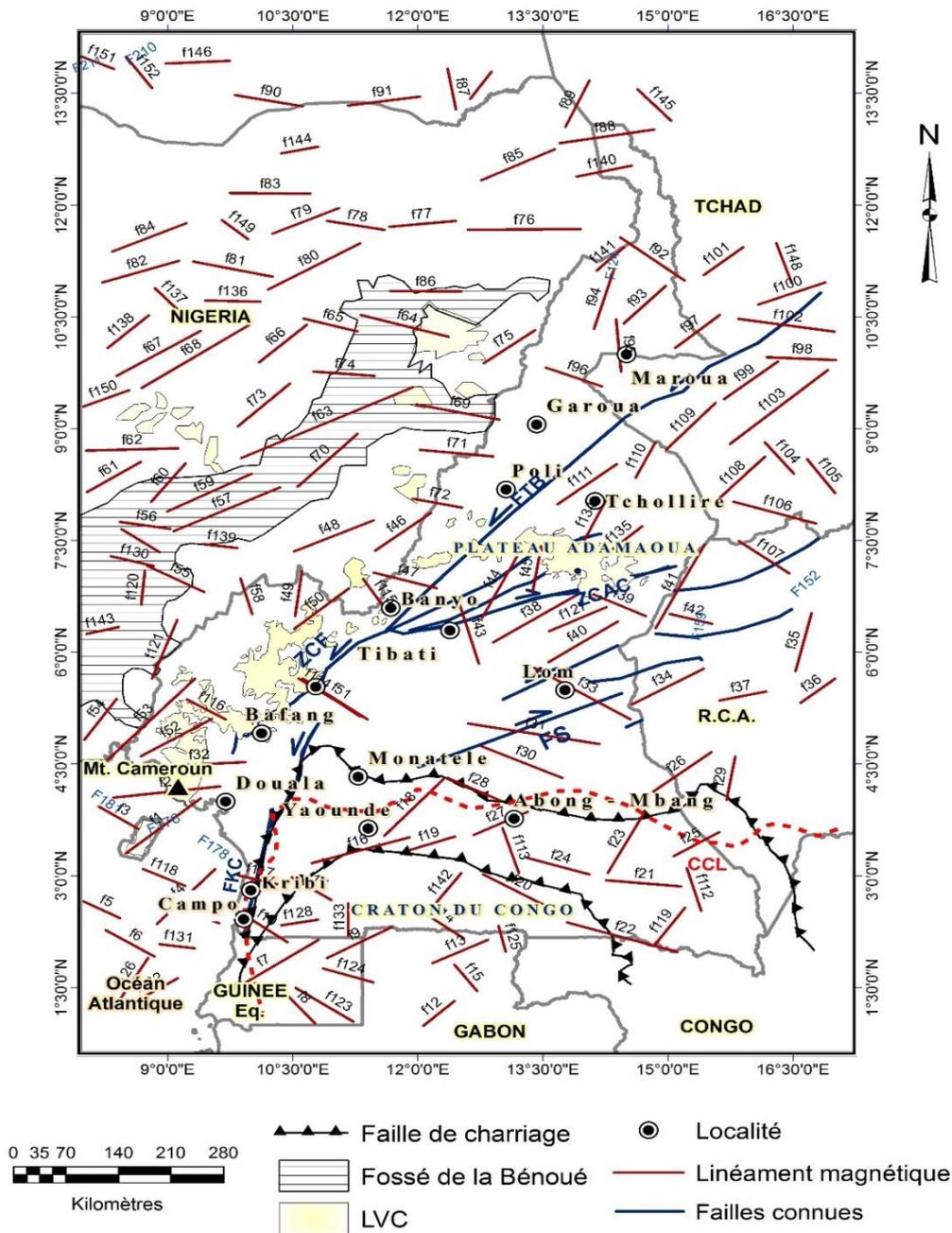


Figure 3.22: Carte des linéaments magnétiques de la zone d'étude.

Cette carte de synthèse des linéaments magnétiques (Figure 3.22) représente l'ensemble des segments uniques résultant des maxima locaux de l'information contenue à partir de la grille des anomalies magnétiques EMAG du sous-sol de la région d'investigation.

Ainsi, la figure 3.22 nous révèle au total un groupement de 152 linéaments d'orientations différentes ; ces orientations ont été répertoriées dans le tableau 3.3.

Cependant, on relève ici un groupe de linéaments (f44, f45, f134 et f110) dans le Plateau de l'Adamaoua au Nord du Cameroun. Comparativement à la carte géologique, ce groupement de linéaments pourrait être assimilé à la faille de Tcholliré-Banyo (FTB). De plus, le groupement de linéaments (f109, f99 et f98) de direction NE-SO au Sud-Ouest du Tchad serait considéré comme étant le prolongement de la FTB dans ce pays.

A l'ouest de la zone d'étude, on recense quelques groupements de linéaments (f2, f52, f116, f50 et f115) représentant les directions des accidents tectoniques de la LVC ainsi que son prolongement par le linéament f1 dans l'Océan Atlantique en direction de Bioko.

Au Sud-Est nous avons le groupement de linéaments (f30, f31 f33 et f34) qui se trouve d'après la géologie coupée par la faille de la Sanaga.

Les linéaments caractéristiques intracrustaux du Cameroun mis en évidence par le biais des données gravimétriques et la grille des données magnétiques EMAG2 viennent témoigner que le sous-sol du Cameroun a fortement été affecté par les phénomènes thermo-géodynamiques dont la majeure partie reste encore inconnue.

3.4. Analyse quantitative et interprétation des données gravimétriques et magnétiques

a. Déconvolution d'Euler des données gravimétriques et magnétiques

La méthode de déconvolution d'Euler a été utilisée afin de déterminer la profondeur moyenne des traits structuraux du sous-sol au Cameroun précédemment mis en évidence (Figures 3.14 et 3.22). Ces linéaments ont été obtenus grâce à l'analyse multi-échelle des contrastes des gradients d'anomalies de Bouguer et du champ magnétique total réduit à l'équateur.

En ce sens, le filtre passe-bas a été appliqué aux anomalies de Bouguer et CMT-RE afin d'atténuer les hautes fréquences dues aux sources superficielles jusqu'à 35 km de profondeur. Les anomalies au-delà de cette profondeur ont été considérées dans cette étude comme les anomalies régionales. Nous avons par la suite soustrait ces anomalies régionales des anomalies de Bouguer et CMT-RE et obtenu les cartes résiduelles. Ces dernières ont été exploitées pour établir les cartes de déconvolution d'Euler (Figure 3.23 et Figure 3.24).

Nous avons attribué plusieurs valeurs d'indice structural pour le choix du regroupement et l'extension adéquat des sources d'Euler intracrustales, paramètre qui dépend de la géométrie de la source et caractérise le taux de variation de l'intensité de l'anomalie avec la distance. Nous avons constaté que, pour un indice structural $N = 0$, on obtenait un regroupement significatif des solutions d'Euler. A la même occasion, le choix approprié de la fenêtre pour la détermination des solutions adéquates a été fixé pour une taille de

20 x 20 km compte tenu de la longueur d'onde des signatures d'anomalies gravimétriques et magnétiques utilisées dans ce travail. Quand à la tolérance, elle représente l'erreur sur la profondeur estimée après plusieurs tests, elle a été fixée à 5 %.

En outre, les cartes de déconvolution d'Euler mises en évidence révèlent les contacts des structures géologiques intracrustale et définies clairement les solutions des profondeurs allant de 0 km à 35 km et 0 km à 34,7 km respectivement pour les anomalies gravimétriques et magnétiques. Les résultats obtenus ont permis d'identifier les profondeurs des linéaments précédemment localisés à partir des données gravimétriques et magnétiques au Cameroun.

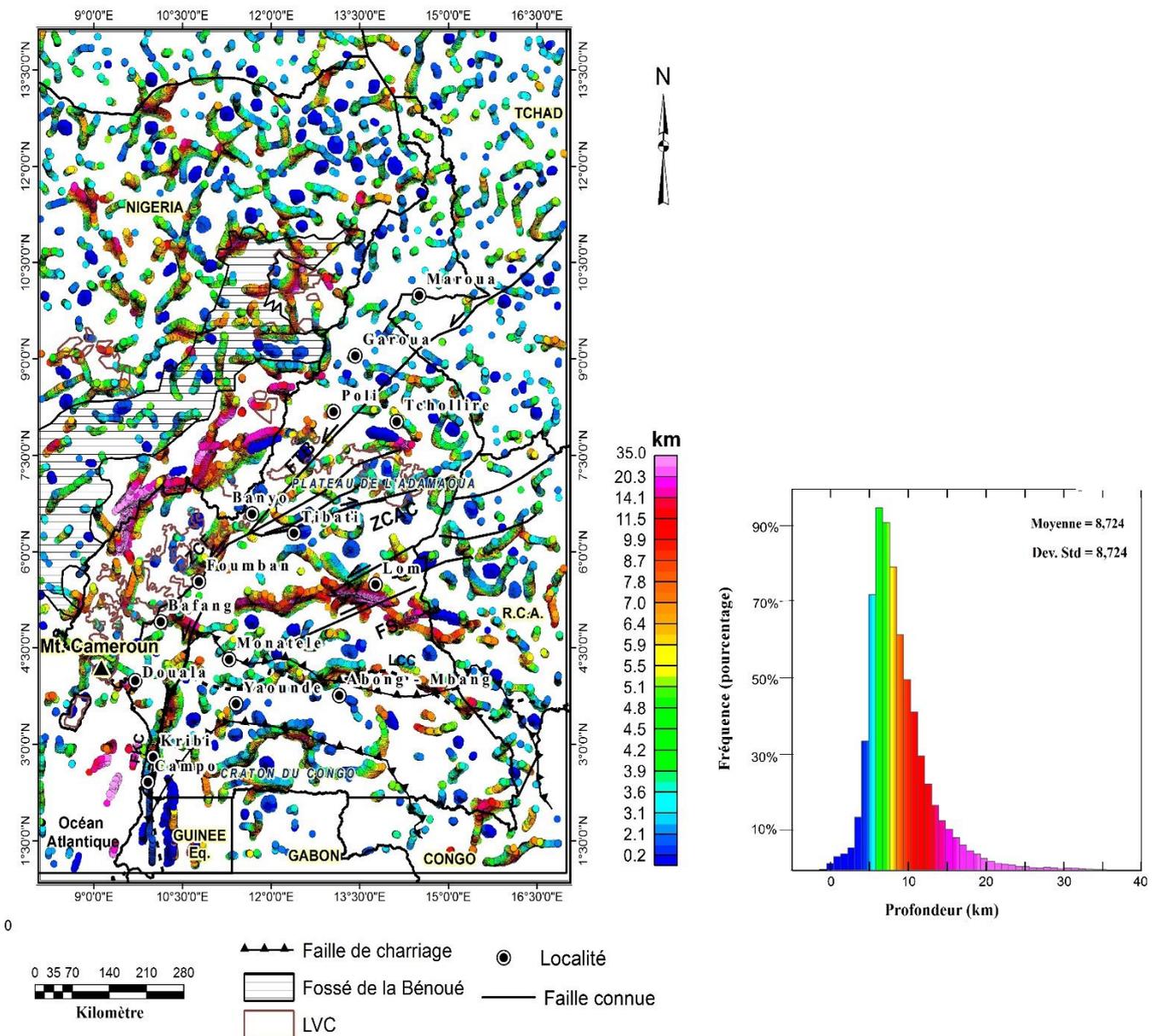


Figure 3.23: Carte de déconvolution d'Euler des anomalies de Bouguer.

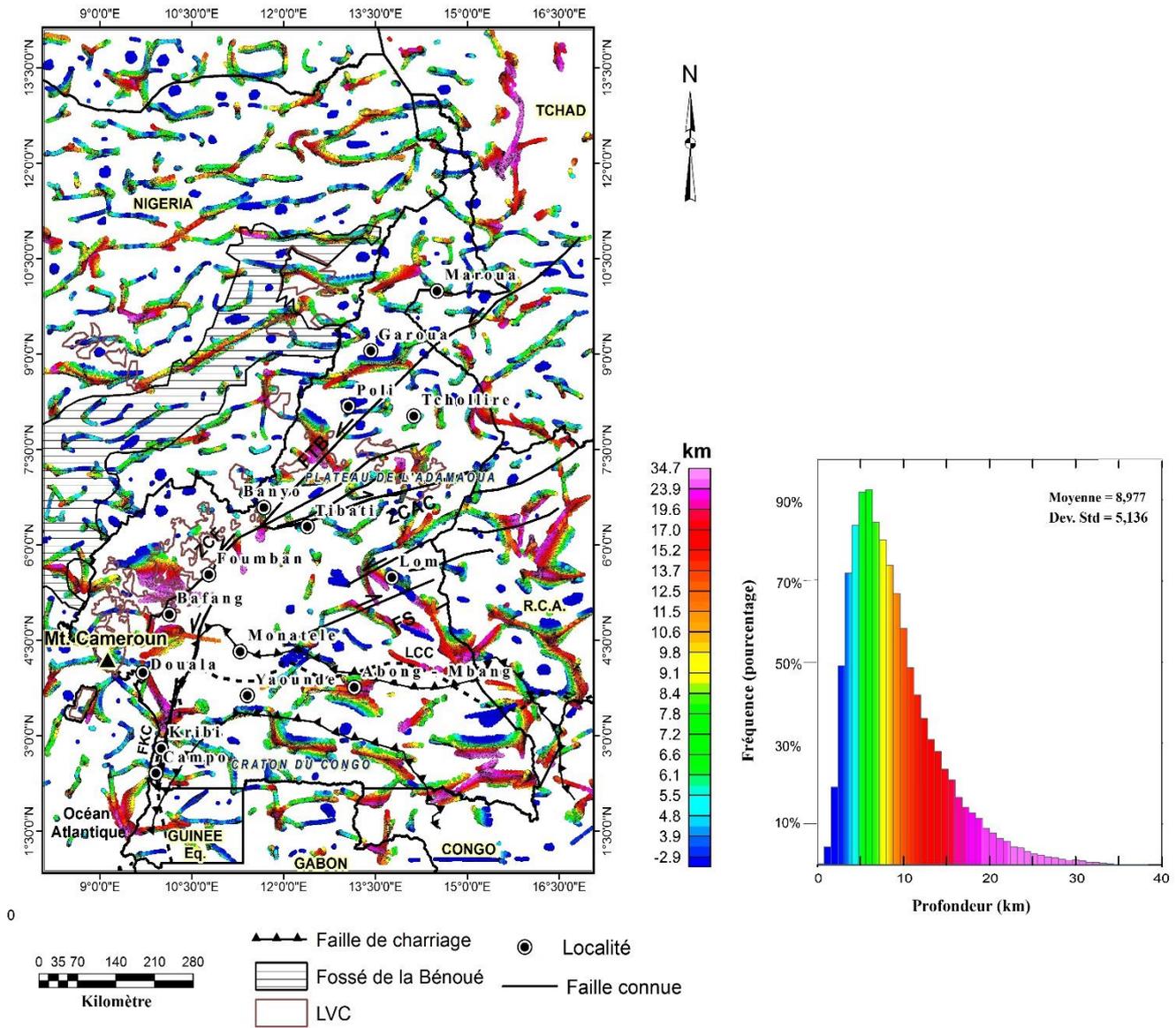


Figure 3.24: Carte de déconvolution d’Euler des anomalies du champ magnétique réduit à l’équateur.

Dans ce travail, 217 et 157 linéaments ont été mis en évidence respectivement en utilisant les données gravimétriques et magnétiques. Pour déterminer les profondeurs des linéaments gravimétriques et magnétiques (Figures 3.14 et 3.22), les traits structuraux ont été superposés aux cartes de déconvolution d’Euler (Figure 3.23 et Figure 3.24). Par la suite, nous avons extrait l’ensemble de toutes les valeurs des profondeurs pour chaque trait structural. A partir donc de l’ensemble de ces valeurs de profondeurs, nous avons statistiquement calculé la moyenne (Tableaux 3.3 et 3.4). L’analyse statistique grâce à l’utilisation des indicateurs de la rose des diagrammes (Figure 3.25) montre que les linéaments sont principalement orientés dans les directions N67,5°E (26%), N45°E (24%) N112,5°E (15%), N157,5°E (11%), N0°E (10%), N135°E (7%) and N90°E (6%). Ces linéaments ont été superposés à la carte géologique pour obtenir une carte de géologie structurale (Figure 3.26).

Tableau 3.3: Profondeurs et orientations des différents segments de linéaments gravimétriques.

<i>Linéaments</i>	<i>Directions</i>	<i>Prof. (km)</i>	<i>Lineaments</i>	<i>Directions</i>	<i>Prof. (km)</i>	<i>Lineaments</i>	<i>Directions</i>	<i>Prof. (km)</i>
F1	N169°E	11,45	F48	N157.5°E	5,2	F95	N22.5°E	3,61
F2	N56°E	7,35	F49	N95°E	6	F96	N45°E	6,95
F3	N173°E	7,5	F50	N90°E	4,54	F97	N135°E	5,1
F4	N112,5°E	11,76	F51	N5.6°E	1,01	F98	N22.5°E	5,3
F5	N135°E	6,75	F52	N124°E	4,05	F99	N84°E	0,5
F6	N124°E	12,7	F53	N84°E	5,52	F100	N135°E	7
F7	N67,5°E	15,45	F54	N135°E	5,5	F101	N11°E	8,95
F8	N124°E	5,25	F55	N22.5°E	4,61	F102	N67.5°E	0,5
F9	N124°E	6,2	F56	N157.5°E	5,7	F103	N56°E	6,1
F10	N90°E	5,35	F57	N45°E	–	F104	N169°E	12,43
F11	N45°E	2,71	F58	N56°E	4,09	F105	N22.5°E	11,81
F12	N112,5°E	2,13	F59	N22.5°E	5,38	F106	N11°E	4
F13	N39°E	1,75	F60	N22.5°E	11,51	F107	N135°E	5
F14	N90°E	20,5	F61	N22.5°E	3,82	F108	N67.5°E	5,17
F15	N90°E	11,7	F62	N22.5°E	–	F109	N135°E	2,2
F16	N170°E	–	F63	N135°E	–	F110	N139°E	3
F17	N112,5°E	33,5	F64	N101°E	–	F111	N0°E	4,75
F18	N67,5°E	15,7	F65	N135°E	6,75	F112	N0°E	–
F19	N169°E	1,15	F66	N135°E	5,63	F113	N135°E	17,85
F20	N135°E	13,8	F67	N157.5°E	5,35	F114	N168°E	13
F21	N6°E	12,75	F68	N67.5°E	6,1	F115	N146°E	20
F22	N86°E	7,25	F69	N112.5°E	1,05	F116	N157°E	8,75
F23	N135°E	2,65	F70	N22.5°E	5,17	F117	N22.5°E	9
F24	N6°E	5,9	F71	N135°E	3,67	F118	N112.5°E	–
F25	N45°E	4,8	F72	N169°E	5,19	F119	N91°E	2,6
F26	N45°E	6,1	F73	N67.5°E	4,87	F120	N135°E	3,95
F27	N90°E	1,12	F74	N67.5°E	4,91	F121	N168°E	4
F28	N135°E	2,92	F75	N135°E	3,1	F122	N112.5°E	3,25
F29	N157,5°E	4,2	F76	N124°E	5,1	F123	N5.6°E	3,15
F30	N5.6°E	5,5	F77	N39°E	4,72	F124	N22.5°E	4,015
F31	N101°E	4,23	F78	N168.5°E	–	F125	N22.5°E	9,75
F32	N67,5°E	2,63	F79	N135°E	2,92	F126	N0°E	1,85
F33	N135°E	–	F80	N45°E	–	F127	N6°E	5,72
F34	N45°E	4,85	F81	N90°E	4	F128	N22,5°E	8
F35	N67,5°E	5,72	F82	N7°E	3,98	F129	N45°E	7,85
F36	N39°E	2,05	F83	N56°E	2,91	F130	N45°E	5,01
F37	N135°E	4,8	F84	N56°E	2,92	F131	N0°E	6,42
F38	N0°E	4,91	F85	N90°E	2,82	F132	N56°E	–
F39	N90°E	5,82	F86	N112,5°E	3,9	F133	N11°E	1
F40	N135°E	5,25	F87	N157,5°E	4,2	F134	N157,5°E	0,87
F41	N56°E	4,95	F88	N135°E	1,9	F135	N135°E	4,57
F42	N95°E	5,7	F89	N22,5°E	31,75	F136	N22,5°E	1,33
F43	N112,5°E	3,4	F90	N112,5°E	3	F131	N45°E	1,88
F44	N160°E	5,4	F91	N90°E	9,9	F137	N94°E	4,51
F45	N56°E	3,7	F92	N95°E	3	F138	N22,5°E	3,62
F46	N95°E	6,2	F93	N56°E	7,24	F139	N56°E	3
F47	N85°E	5,68	F94	N123°E	5,75	F140	N22,5°E	2,03
F141	N135°E	5,2	F166	N92,5°E	2,3	F192	N90°E	–

F142	N0°E	6	F167	N92°E	–	F193	N5,6°E	5
F143	N56°E	4,54	F168	N90°E	1,3	F194	N22,5°E	–
F144	N112,5°E	0,18	F169	N112,5°E	0,9	F195	N135°E	–
F145	N135°E	0,9	F170	N79°E	6,2	F196	N45°E	3,45
F146	N67,5°E	3,15	F171	N157,5°E	4,5	F197	N135°E	0,96
F147	N45°E	7	F172	N45°E	3	F198	N11°E	–
F143	N22,5°E	4,81	F173	N0°E	1	F199	N5,6°E	7,8
F148	N56°E	4,53	F174	N675°E	3,4	F200	N22,5°E	5,58
F149	N112,5°E	2,78	F175	N6°E	1,78	F201	N56°E	5,7
F150	N96°E	3,91	F176	N45°E	3,5	F202	N45°E	–
F151	N112,5°E	3,64	F177	N135°E	–	F203	N135°E	3,12
F152	N45°E	0,52	F178	N135°E	4,1	F204	N169°E	3,69
F153	N170°E	–	F179	N45°E	–	F205	N0°E	–
F154	N135°E	3,22	F180	N45°E	4,81	F206	N90°E	6,41
F155	N169°E	15	F181	N135°E	4,52	F207	N67,5°E	10,01
F156	N0°E	0,9	F182	N86°E	4,91	F208	N169°E	–
F157	N157,5°E	3,8	F183	N0°E	4	F209	N22,5°E	2,56
F158	N157,5°E	3,96	F184	N135°E	–	F210	N45°E	5,98
F159	N11°E	2,8	F185	N6°E	4,3	F211	N67,5°E	13,45
F160	N22,5°E	3,99	F186	N101°E	4,23	F212	N135°E	–
F161	N175°E	4,6	F187	N96°E	3,02	F213	N45°E	3
F162	N0°E	2,7	F188	N91°E	1,06	F214	N78°E	3,5
F163	N0°E	2,7	F189	N67,5°E	1,04	F215	N101°E	–
F164	N45°E	–	F190	N112,5°E	0,8	F216	N5,6°E	–
F165	N0°E	2,9	F191	N90°E	4,32	F217	N67,5°E	–

Tableau 3.4: Profondeurs et orientations des différents segments de linéaments magnétiques.

<i>Linéa- ments</i>	<i>Directions</i>	<i>Prof. (km)</i>	<i>Linea- ments</i>	<i>Directions</i>	<i>Prof. (km)</i>	<i>Linea- ments</i>	<i>Directions</i>	<i>Prof. (km)</i>
f1	N45°E	11	f48	N67,5°E	1,7	f96	N101°E	4,77
f2	N84°E	2,5	f49	N5,6°E	1	f97	N45°E	6,71
f3	N135°E	5	f50	N124°E	–	f98	N90°E	5,01
f4	N45°E	3	f51	N5,6°E	–	f99	N45°E	3,68
f5	N112,5°E	0,5	f52	N56°E	7,2	f100	N67.5°E	1,8
f6	N101°E	7	f53	N45°E	0,2	f101	N45°E	1,25
f7	N56°E	6,5	f54	N40°E	19,8	f102	N96°E	7,05
f8	N135°E	15,7	f56	N112,5°E	0,15	f103	N45°E	0,97
f9	N56°E	10,5	f57	N95°E	20	f104	N135°E	0,95
f10	N124°E	4,2	f58	N67,5°E	6	f105	N135°E	6,34
f11	N101°E	12,1	f59	N168°E	5	f106	N101°E	13,75
f12	N34°E	6	f60	N67,5°E	7,35	f107	N124°E	12,65
f13	N67,5°E	1	f61	N41°E	6,61	f108	N45°E	–
f14	N112°E	8,75	f62	N67,5°E	10,55	f109	N45°E	5,25
f15	N124°E	1,85	f63	N90°E	2,5	f110	N22.5°E	3,61
f16	N78°E	0,4	f64	N67,5°E	3,9	f111	N56°E	4,22
f17	N124°E	5,75	f65	N101°E	4,5	f112	N157.5°E	3,78
f18	N45°E	6,1	f66	N112.5°E	3,75	f113	N135°E	10,25
f19	N67,5°E	4,86	f67	N45°E	5,56	f114	N124°E	6,67
f20	N112,5°E	8	f68	N56,5°E	5,59	f115	N135°E	3,85
f21	N93°E	5,2	f69	N56,5°E	9,95	f116	N124°E	1,02
f22	N112,5°E	7,4	f70	N101°E	1,2	f117	N112.5°E	2,76
f23	N22,5°E	7,8	f71	N45°E	–	f118	N112.5°E	–
f24	N96°E	10,75	f72	N96°E	7	f119	N40°E	1,18

f25	N67,5°E	1,6	f73	N169°E	9,4	f120	N4,5°E	7,45
f26	N45°E	0,35	f74	N45°E	–	f121	N22,5°E	2,74
f27	N67,5°E	3,1	f75	N95°E	0,55	f122	N124°E	6,85
f28	N112,5°E	1	f76	N45°E	0,12	f123	N124°E	5
f29	N22,5°E	0,2	f77	N90°E	7,2	f124	N94,5°E	5,79
f30	N112,5°E	19,5	f78	N90°E	6	f125	N168°E	11
f31	N95°E	9	f79	N101°E	3	f126	N34°E	1,5
f32	N88°E	2,2	f80	N79°E	11	f127	N67,5°E	–
f33	N112,5°E	3,35	f81	N56°E	1,05	f128	N86°E	3
f34	N67,5°E	9,78	f82	N101°E	5,45	f129	N124°E	1,2
f35	N22,5°E	4,7	f83	N67,5°E	–	f130	N101°E	12
f36	N56°E	4,75	f84	N90°E	1,26	f131	N97°E	2
f37	N85°E	6,91	f85	N67,5°E	6,7	f132	N56°E	–
f38	N67,5°E	5,56	f86	N67,5°E	0,8	f133	N0°E	0,1
f39	N112,5°E	6,15	f87	N90°E	5,2	f134	N22,5°E	7
f40	N56°E	3	f88	N169,5°E	4,01	f135	N45°E	0
f41	N34°E	2,56	f89	N85°E	1,86	f136	N90°E	10,4
f42	N101°E	2	f90	N22,5°E	0,85	f137	N135°E	1,41
f43	N169°E	6,1	f91	N95,5°E	2,02	f138	N56°E	6,12
f44	N22,5°E	5,4	f92	N84°E	2,08	f139	N96°E	7,83
f45	N22,5°E	3,2	f93	N123,5°E	4,75	f140	N84°E	7,02
f46	N56°E	2,78	f94	N45°E	5,42	f141	N45°E	11,57
f47	N101°E	3,05	f95	N11°E	2,85	f142	N45°E	2,45
f143	N86°E	2,45	f147	N45°E	2	f151	N112,5°E	5,5
f144	N78°E	3,2	f148	N169°E	3,7	f152	N135°E	9,14
f145	N124°E	2,1	f149	N135°E	4,5			
f146	N90°E	–	f150	N67,5°E	8			

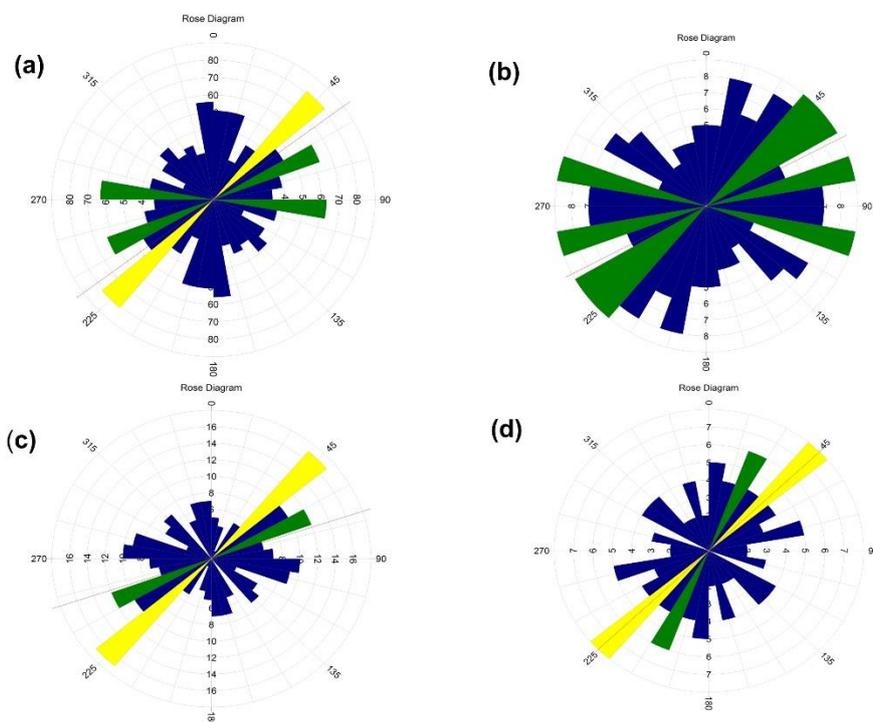


Figure 3.25 : Rose des diagrammes ; (a) orientation générale des linéaments gravimétriques de la zone d'étude ; (b) orientation générale des linéaments magnétiques de la zone d'étude ; (c) orientation des linéaments gravimétriques du Cameroun ; (d) orientation des linéaments magnétiques du Cameroun.

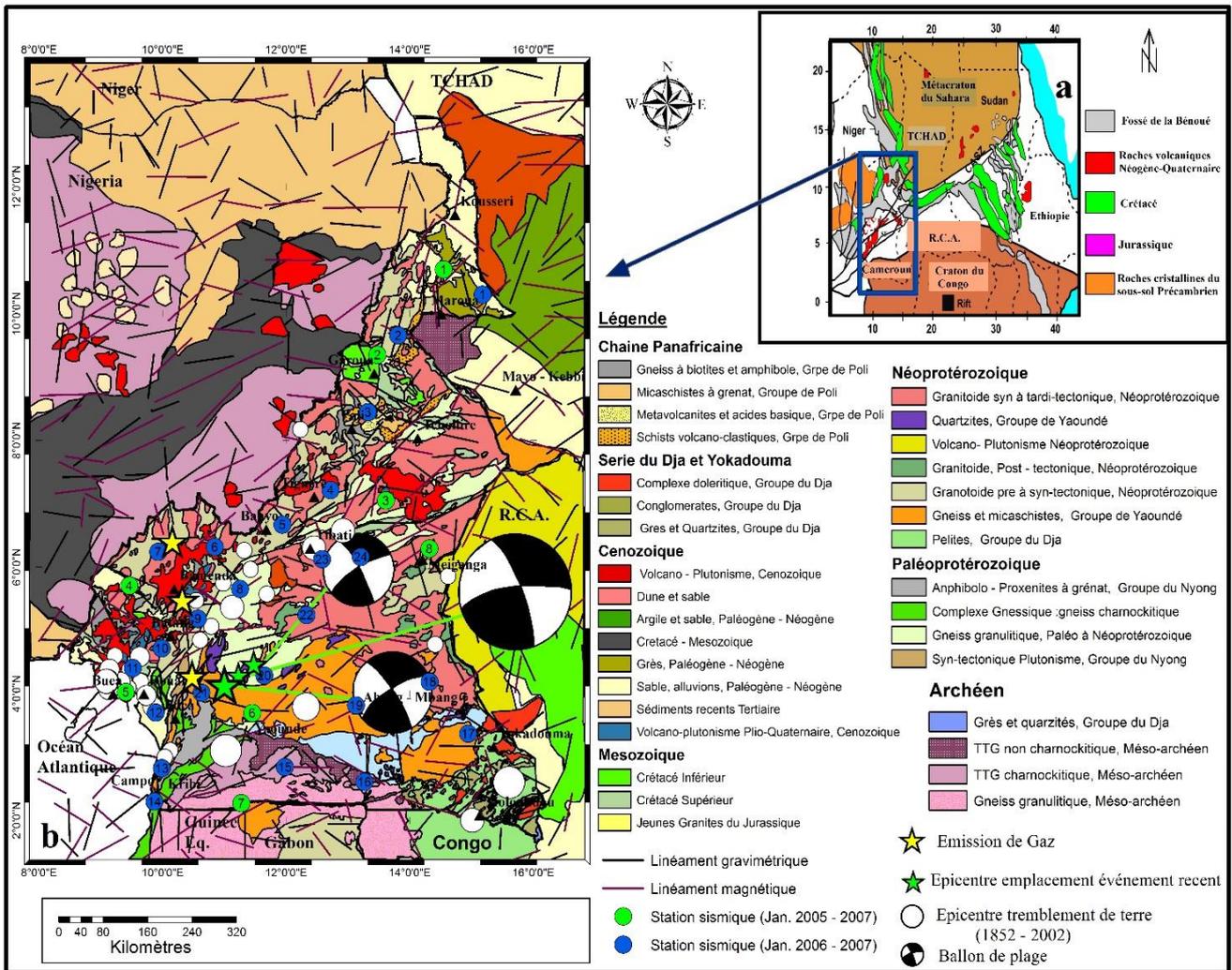


Figure 3.26 : Carte structurale interprétative des accidents tectoniques de la zone d'étude.

La figure 3.26 montre à quel point l'ensemble de la structure intracrustale du Cameroun est fortement caractérisé par des accidents tectoniques. La cartographie des linéaments est notamment importante dans les domaines de l'exploration minière et/ou pétrolière, l'étude des risques et catastrophes naturelles. Une part importante de l'activité économique dépend de façon significative de la valorisation des ressources du sous-sol. Il est dès lors impératif de pouvoir continuer d'identifier et localiser ces différentes ressources.

La carte de géologie structurale mise en évidence dans ce travail (Figure 3.26) illustre donc de manière significative ces linéaments et permet non seulement de confirmer l'existence des grands traits structuraux localisés par les travaux géologiques et géophysiques antérieurs mais aussi d'en ressortir les nouveaux linéaments. Ainsi, cette carte géologique structurale synthétique mise au point avec soin à partir des données gravimétriques et magnétiques pourrait orienter les futures investigations géophysiques qui pourront se faire à l'échelle locale à de très hautes fréquences d'anomalies pour les projets d'exploration des ressources naturelles du sous-sol du Cameroun et la recherche des indices pour la prévention et la lutte contre les catastrophes naturelles.

3.5. Inversion 3D des anomalies gravimétriques

3.5.1. Choix de la grille des anomalies de Bouguer

Dans ce travail, au-delà de la structuration globale du sous-sol camerounais, nous nous intéressons également à l'origine de la LVC et son interaction avec le Craton du Congo (CC). Ainsi, l'analyse structurale du Craton du Congo fait partie des objectifs fixés dans ce travail. Localisée dans la partie méridionale du Cameroun, sa limite géophysique a été mise en évidence grâce aux travaux géophysiques antérieurs. Cependant, sa bordure Nord avec la Chaîne Panafricaine est marquée par les anomalies ayant un fort contraste (Figure 3.6) et des gradients caractérisés par les amplitudes élevées (Figures 3.8 et 3.9). Ces forts contrastes progressent horizontalement en direction de l'Ouest puis se divisent en deux bras : le premier suivant la direction presque Nord – Sud à Kribi - Campo et le deuxième suivant la direction NO-SE et Sud – Ouest, traversant la LVC en direction du Fossé de la Bénoué dans la partie Est du Nigéria (Figure 3.7a). Ce deuxième bras nous laisse à croire à l'existence d'une interaction entre le Craton du Congo et la LVC, justifiant le choix de la grille (Figure 3.27b-c) qui a été exploitée pour l'inversion 3D et la modélisation 2D1/2 des anomalies gravimétriques. Ce choix est fait dans le but de répondre davantage à la préoccupation sur l'origine de la LVC et son interaction avec le Craton du Congo.

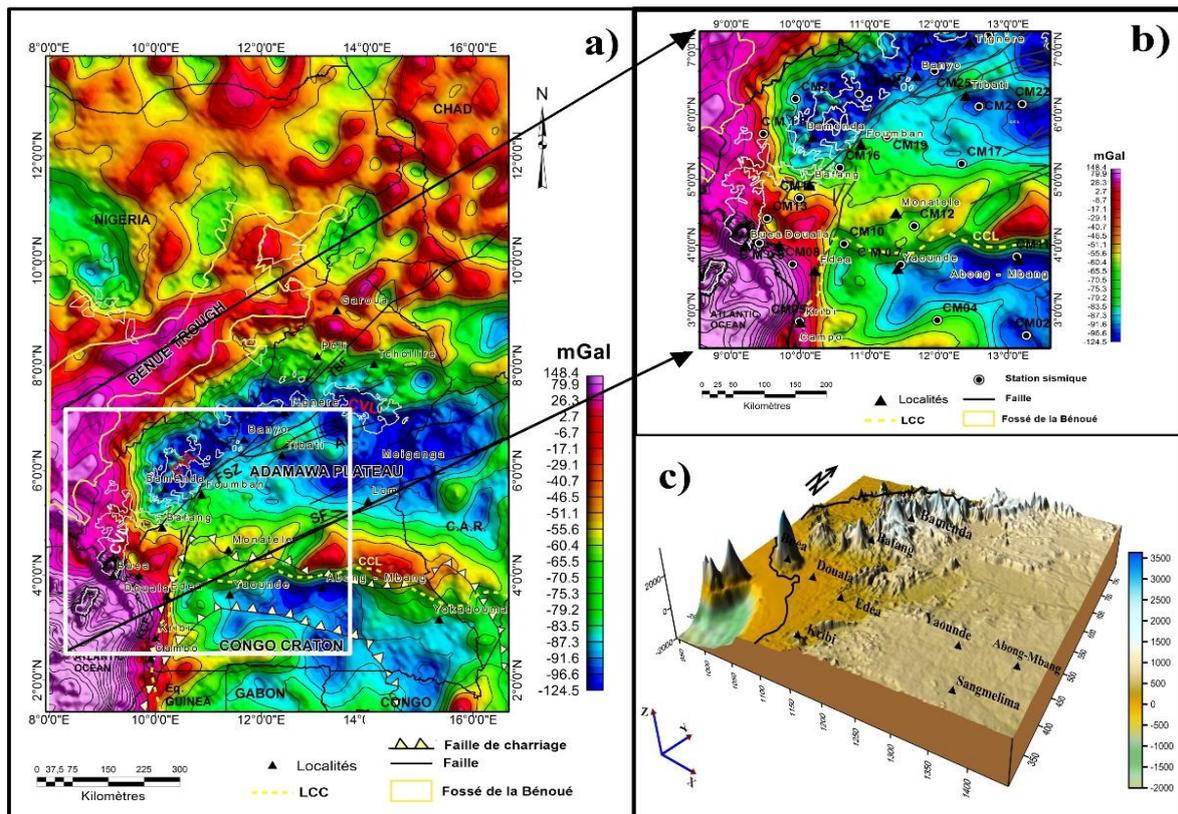


Figure 3.27: Illustration : a) anomalies de Bouguer du Cameroun ; b) anomalies de Bouguer pour la grille prise sur la LVC incluant la zone de transition et le CC ; c) carte topographique correspondant au choix de la grille.

3.5.2. Analyse du spectre de puissance des anomalies de Bouguer

a. Subdivision de la grille des anomalies de Bouguer

Les anomalies de la figure 3.28b-c ont été exploitées pour l’analyse spectrale afin de pouvoir estimer la profondeur du Moho dans la grille choisie. Maillée suivant les coordonnées 8,86° à 12,86° de longitudes Est et de 3° à 4° de latitudes Nord ($\approx 440 \text{ km} * 440 \text{ km}$), elle est d’ailleurs trop grande pour effectuer une analyse spectrale dans un environnement qui présente une extension complexe des signatures gravimétriques. La fenêtre a donc été subdivisée en plusieurs sous fenêtres de $1^\circ \times 1^\circ \approx (110 \text{ km} * 110 \text{ km})$ chacune (Figure 3.30b).

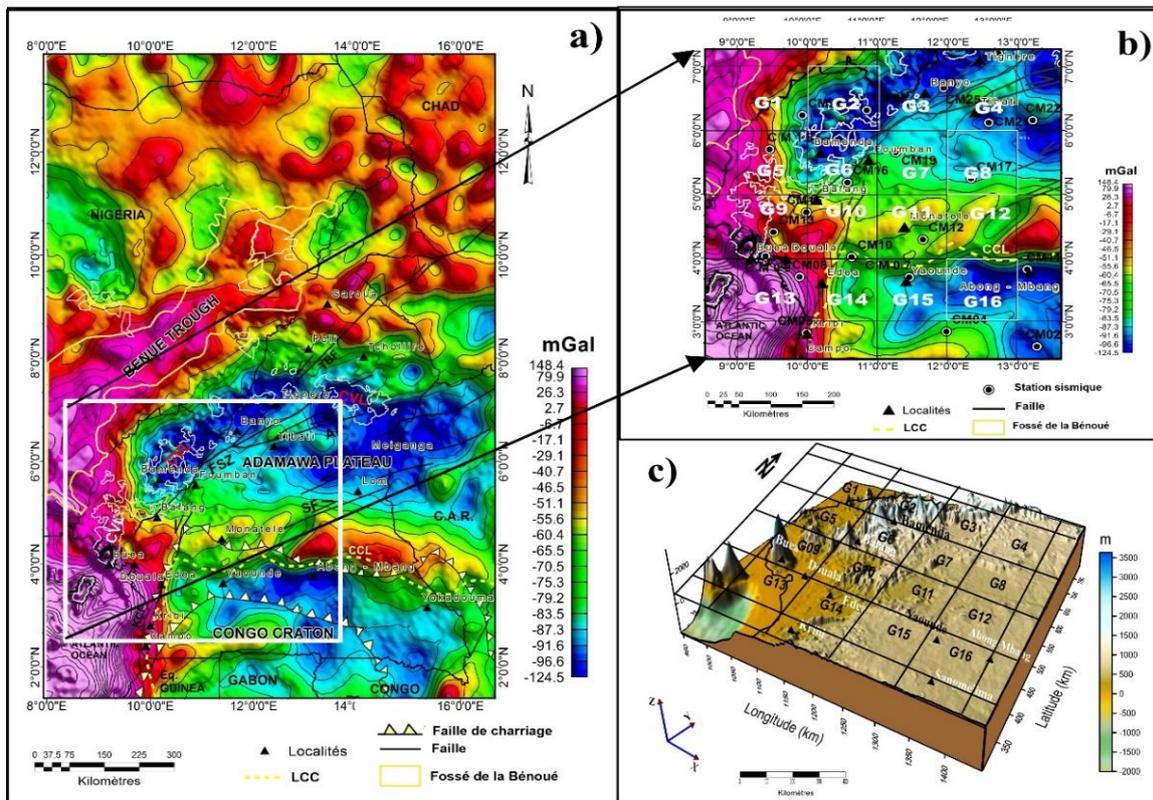


Figure 3.28 : Illustration : a) anomalies de Bouguer du Cameroun ; b) anomalies de Bouguer présentant les subdivisions de la grille des données gravimétriques choisie ; c) carte topographique correspondant au choix de la grille subdivisée.

b. Résultats de l’analyse du spectre de puissance

Dans ce travail l’analyse spectrale des anomalies est faite dans le but d’estimer la discontinuité et l’ondulation du Moho puis combinée avec celle mise en évidence par les travaux sismiques afin de contraindre la profondeur de l’interface croûte - manteau du sous-sol de la LVC et le Craton du Congo de nos modèles.

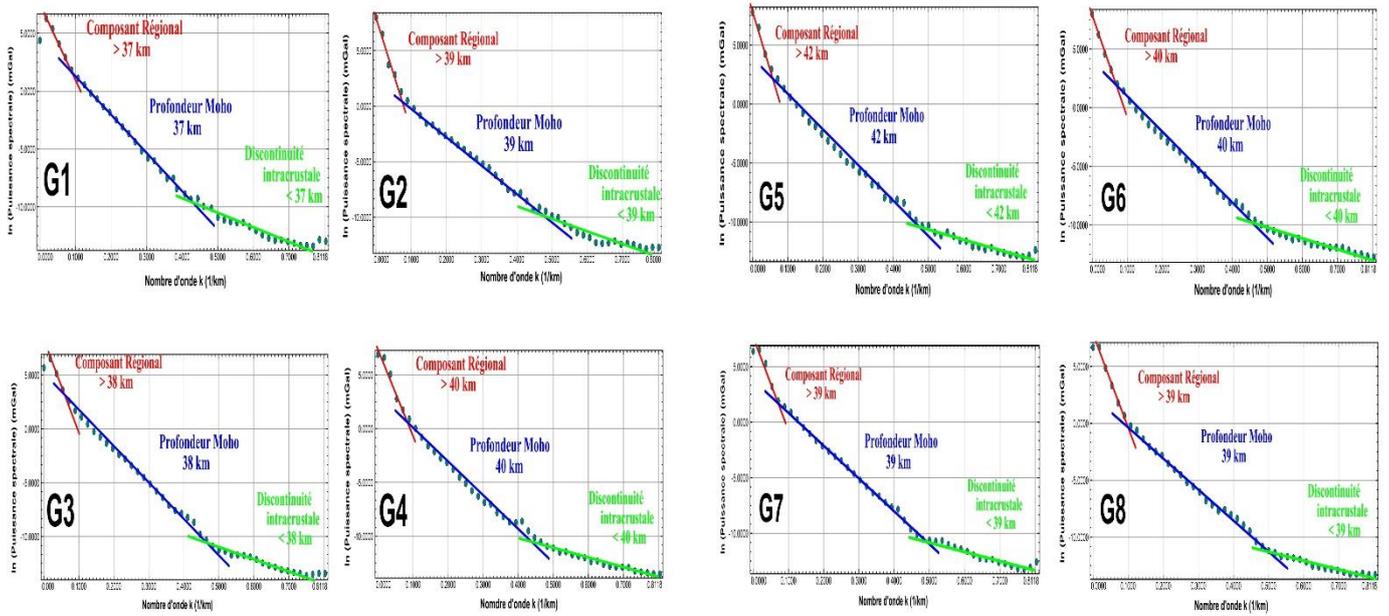


Figure 3.29: Spectre de puissance des anomalies gravimétriques pour une fenêtre de $1^\circ \times 1^\circ \approx (110 \text{ km} * 110 \text{ km})$ cas des grilles de 1 à 8.

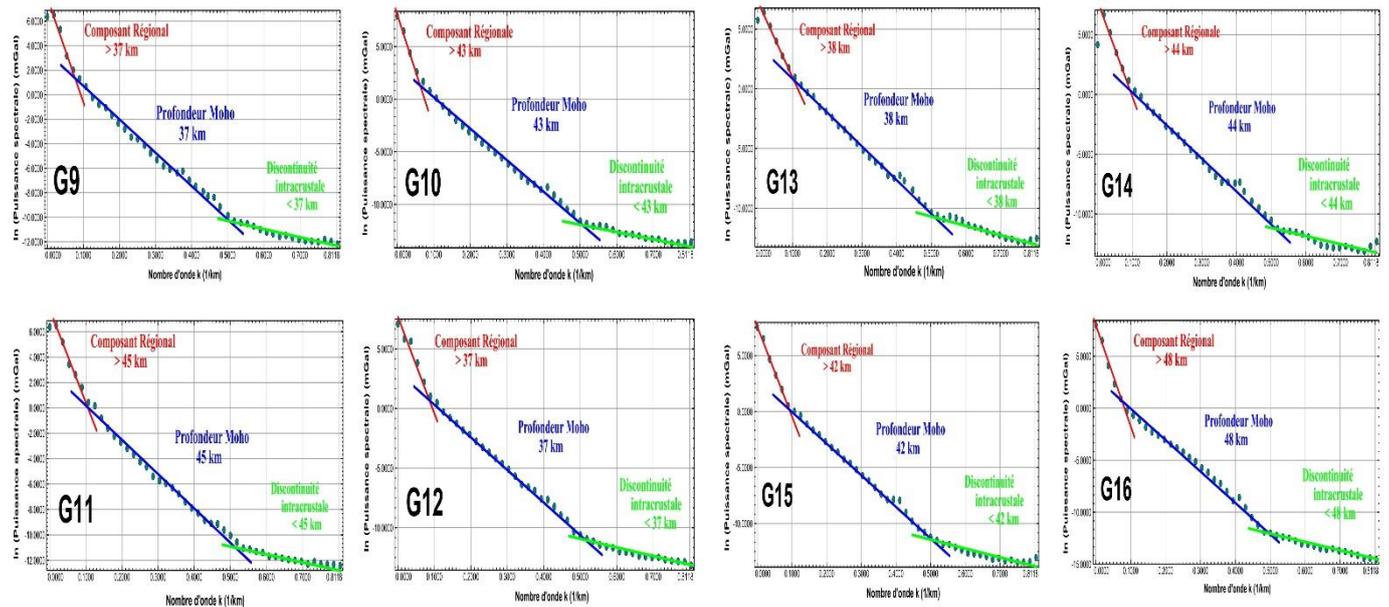


Figure 3.30: Spectre de puissance des anomalies gravimétriques pour une fenêtre de $1^\circ \times 1^\circ \approx (110 \text{ km} * 110 \text{ km})$ cas des grilles de 9 à 16.

Les figures 3.29 et 3.30 illustrent trois segments de droite tracés sur le spectre de puissance des anomalies pour les grilles de $1^\circ \times 1^\circ \approx (110 \text{ km} * 110 \text{ km})$. Ces segments de droite représentent les pentes des bandes spectrales des anomalies. Ainsi le segment de droite de couleur verte représente la pente de la profondeur moyenne des différentes discontinuités des structures géologiques intracrustales. Le segment de droite de couleur bleue représente la pente pour la profondeur moyenne du Moho et le segment de droite rouge la

penne pour la profondeur moyenne des structures au-delà du Moho. Sur la LVC et le CC, les profondeurs moyennes du Moho sont estimées respectivement à environ 38 km et 49 km. Ne s'intéressant pas à la discontinuité au-delà du Moho, les composants régionaux dans cette région ont été considérés comme étant ceux des structures mantelliques avec une densité constante. Le calcul des erreurs de profondeurs jusqu'au Moho s'est fait comme écart type de l'ajustement linéaire des segments. Ces erreurs sont comprises entre 0,6 et 2,8 km. Pour l'estimation des profondeurs, le spectre de puissance d'amplitude radiale a été calculé en fonction du nombre d'onde radial kr . Les valeurs des champs gravimétriques ont été transformées du domaine spatial au domaine fréquentiel par la Transformée de Fourier Rapide (TFR/FFT). Elle a donc permis de séparer grossièrement les différentes unités présentes en fonction de leurs profondeurs moyennes.

3.5.3. Cartographie et validation des profondeurs moyennes estimées du Moho

Les profondeurs de la croûte sont estimées dans ce travail près des 18 stations sismiques déployées entre 2005 et 2007. Les résultats de calcul pour chaque sous-région (Figure 3.28b-c) sont illustrés sur la figure 3.31. Afin d'apprécier la distribution spatiale de la profondeur moyenne du Moho dans la fenêtre choisie, la version "krigée" de ces résultats a été superposée en arrière-plan (Figure 3.31). L'une des caractéristiques de cette profondeur est la présence d'une croûte moins épaisse de la LVC et plus épaisse dans le Craton du Congo. En dehors de l'Océan Atlantique, nous avons trouvé une profondeur moins épaisse du Moho au niveau du Fossé de la Bénoué.

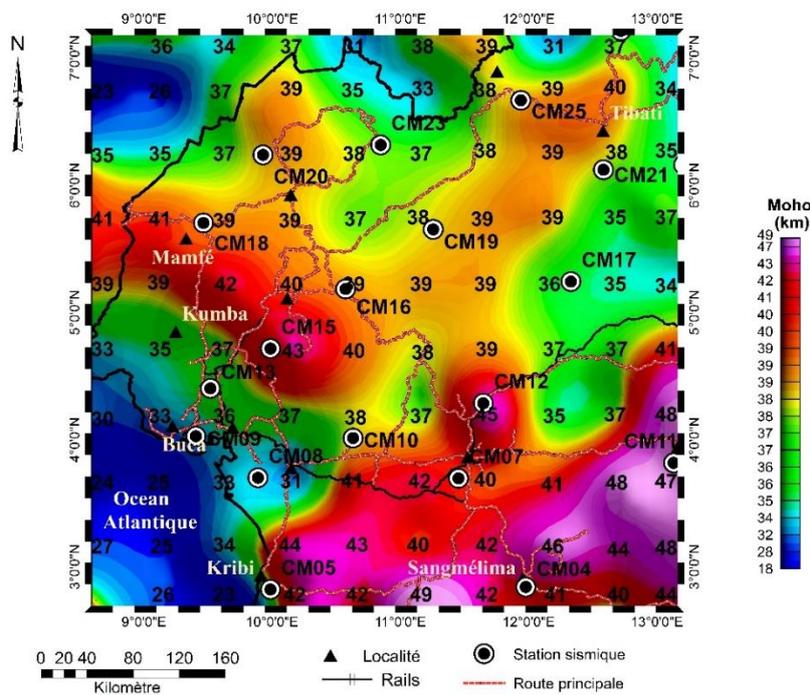


Figure 3.31: Carte de profondeur de la croûte couvrant la LVC et le CC ; les cercles blancs et noirs superposés représentent les stations sismiques de Tokam Kamga et al. (2010) et (Gallacher et Bastow, 2012).

L'analyse spectrale a été appliquée aux anomalies de Bouguer du Modèle Gravitationnel Global (XGM 2019e_2159). Dans le passé, les quelques travaux d'investigations sismiques passives et actives (Tokam Kamga et al., 2010 et Gallacher et Bastow, 2012) ainsi que les études gravimétriques (Poudjom Djomani et al., 1995 ; Goussi Ngalamao et al., 2017, 2018) ont été réalisés et ont pu estimer la profondeur du Moho au Cameroun. Pour l'investigation sismique, Tokam Kamga et al. (2010) ont établi un modèle unidimensionnel (1D) de vitesse des ondes S obtenu à partir de l'inversion conjointe des fonctions de réception vectorielle et P du groupe d'ondes de Rayleigh pour 32 stations sismiques à large bande déployées au Cameroun entre 2005 et 2007. Ainsi, sur la LVC, le Plateau de l'Adamaoua et le Craton du Congo, grâce aux stations CM23, CM17 et CM10 respectivement, les profondeurs estimées du Moho par ces auteurs sont de 40,5 km, 35,5 km et 38 km (Tableau 3.5). Nos estimations de la profondeur du Moho dans cette même zone par analyse spectrale de puissance moyenne radiale 2D sont de 38 km, 36 km et 38 km.

Tout de même, ces données ont été utilisées par Gallacher et al. (2012) pour estimer la profondeur du Moho en utilisant la fonction de réception télé-sismique et ont obtenu pour ces mêmes stations (CM23, CM17 et CM10) les valeurs respectives de 38,3 km, 37,8 km et 35,8 km (Tableau 3.4). Ils ont donc rapporté des estimations de la profondeur du Moho pour toutes ces stations à l'exception des stations 8, 9, 14, 18 et 19 (voir Tableau 3.5). Une analyse comparative des profondeurs estimées du Moho dans cette étude avec les résultats des travaux sismiques (Tokam Kamga et al., 2010 et Gallacher et al., 2012) nous a montré une différence de 4 à 10 et de -6,5 à 7,2 respectivement (Tableau 3.5).

Dans le même ordre d'idées, Goussi Ngalamo et al. (2017) ont utilisé les données de la World Gravity Map (WGM 2012) pour étudier le Craton archéen du Congo et la ceinture orogénique des Oubanguides au Cameroun. Dans leurs travaux, ils ont appliqué l'analyse spectrale de puissance bidimensionnelle (2D aux données WGM 2012 pour estimer la profondeur moyenne du Moho ; parmi lesquelles les stations (CM23, CM17 et CM10) et ont obtenu 37 km pour toutes les stations. Pour une estimation de la profondeur du Moho sur les 18 stations utilisées dans cette étude, une analyse comparative de l'estimation de la profondeur du Moho avec celle de Goussi Ngalamo et al. (2017) a montré une différence de -8 à +8. Kemgang Ghomsi et al. (2019) ont utilisé le modèle gravimétrique global XGM2016 pour étudier la structure du sous-sol du Cameroun et ont estimé les profondeurs du Moho à 37,4 km, 36,4 km et 40,02 km respectivement pour les stations (CM23, CM17 et CM10). Une analyse comparative avec nos profondeurs de Moho montre une différence de -2,02 à +10,67.

Nos résultats sont les plus proches de la profondeur du Moho estimée par Poudjom Djomani et al. (1995) qui ont montré que la croûte sous le Craton du Congo peut atteindre 50 km d'épaisseur. Les résultats de la profondeur du Moho de Guidarelli et Aoudia (2016) montrent que l'épaisseur de la croûte sous le Craton du Congo varie entre 40 et 48 km. Nos résultats sont également en accord avec la profondeur du Moho estimée

à partir des données gravimétriques par Goussi Ngalamo et al. (2017) qui ont mis en évidence une distribution spatiale 2D de la profondeur du Moho, avec une profondeur maximale de 49 km pour le Craton du Congo et 37 km pour le CVL (Figure 3.31).

De plus, à titre de comparaison cumulative, l'erreur quadratique moyenne entre nos résultats et ceux de Tokam Kamga et al. (2010), Gallacher et Bastow (2012), Goussi Ngalamo et al. (2017) et Kemgang Ghomsi et al. (2019) a été calculée. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) de nos résultats et ceux de Tokam Kamga et al. (2010) a été trouvé à 6,0286 km, entre nos résultats et ceux de Gallacher et Bastow (2012) à 4,0053 km, Goussi Ngalamo et al. (2017) à 3,5434 km et Kemgang Ghomsi et al. (2019) à 5,7703 km. Les résultats des profondeurs crustales estimées dans ce travail à proximité des 18 stations sismiques déployées entre 2005 et 2007 ont été repris dans le tableau ci-dessous pour une étude comparative avec ceux mis en évidence par Tokam Kamga et al. (2010), Gallacher et Bastow (2012) Goussi Ngalamo et al. (2017) et Kemgang Ghomsi et al. (2019).

Tableau 3.5. : Analyse et comparaison statistiques des profondeurs moyennes estimées du Moho.

Station	XGM 2019 ^a	Seism. ^b	Seism. ^c	WGM 2012 ^d	XGM 2016 ^e	Diff. ^f	Diff. ^g	Diff. ^h	Diff. ⁱ	Diff. ^j	Diff. ^k
CM04	41	45	47,5	39	35,34	-2,5	6	-4	-6,5	+2	+5,66
CM05	42	28	37,4	43	28,4	-9,4	-15	+14	-4,6	-1	+13,6
CM07	40	43	41,8	37	36,47	1,2	6	-3	-1,8	+3	+3,53
CM08	38	-	-	38	-	-	-	-	-	0	-
CM09	36	25,5 (?)	-	30	34,24	-	-4,5	-	-	+6	+1,76
CM10	38	38	35,8	37	37,42	2,2	1	0	+2,2	+1	+0,58
CM11	47	48	43,3	44	40,34	4,7	4	-1	+3,7	+3	+6,66
CM12	45	38	37,8	37	34,33	0,2	1	+7	+7,2	+8	+10,67
CM13	36	28	36,5	44	32,28	-8,5	-16	+8	0,5	-8	+3,72
CM15	43	33	7 (?)	40	34,99	-	-7	+10	-	+3	+8,01
CM16	39	35,5	34,1	40	40,3	1,4	-4,5	+3,5	4,9	-1	-1,3
CM17	36	35,5	37,8	37	36,41	-2,3	-1,5	+0,5	-1,8	-1	-0,41
CM18	39	30,5	-	39	36,15	-	-8,5	+9,5	-	0	+2,85
CM19	39	35,5	-	38	31,53	-	-2,5	+4,5	-	+1	+7,47
CM20	39	33	33,7	36	37,75	-0,7	-3	+6	5,3	+3	+1,25
CM21	38	35,5	34,1	34	39,31	1,4	1,5	3,5	3,9	+4	-1,31
CM23	38	40,5	38,3	37	40,02	2,2	3,5	-2,5	-0,3	+1	-2,02
CM25	39	38	38,2	39	34,12	-0,2	-1	+1	+1,2	0	+4,88

XGM/MGG : Modèle Gravitationnel Global (XGM 2019)

WGM/MGM : Modèle Gravimétrique Modial (WGM)

Diff.: différence

a. Profondeur du Moho estimée dans cette étude.

b. Profondeur du Moho estimée à partir de l'étude sismique passive (Tokam Kamga et al., 2010).

c. Profondeur du Moho estimée à partir de l'étude sismique passive (Gallacher et Bastow, 2012).

d. Profondeur du Moho estimée à partir du Modèle Gravimétrique Modial (MGM/WGM 2012) par Goussi Ngalamo et al. (2017).

- d. Profondeur du Moho estimée à partir du Modèle Gravimétrique Global (MGG/XGM2016) par Kemgang Ghomsi et al. (2019).
- f. Différence entre profondeur estimée du Moho (Tokam Kamga et al., 2010) et Gallacher et Bastow (2012).
- g. Différence entre profondeur estimée du Moho (Tokam et al., 2010) et Goussi Ngalamo et al. (2017).
- h. Différence entre profondeur estimée du Moho dans cette étude et Tokam Kamga et al. (2010).
- i. Différence entre profondeur estimée du Moho dans cette étude et Gallacher et Bastow (2012).
- j. Différence entre profondeur estimée du Moho dans cette étude et Goussi Ngalamo et al. (2017).
- k. Différence entre profondeur du Moho estimée dans cette étude et Kemgang Ghomsi et al. (2019).

3.5.4. Choix des profils d'inversion 3D et la modélisation 2D^{1/2}

a. Choix des profils d'inversion et la modélisation 2D^{1/2}

Le choix de la grille étant fait, cinq profils ont été retenus sur la carte des anomalies gravimétriques à des positions convenablement identifiées pour l'inversion 3D des densités et la modélisation 2D^{1/2} dans ce travail (Figure 3.32). Ainsi, la direction des profils (Figure 3.33) a été choisie dans le but d'étudier et de mettre en évidence de manière simultanée le comportement des blocs de densités dans la croûte de la LVC et le CC afin de mieux comprendre l'interaction entre ces deux structures géologiques.

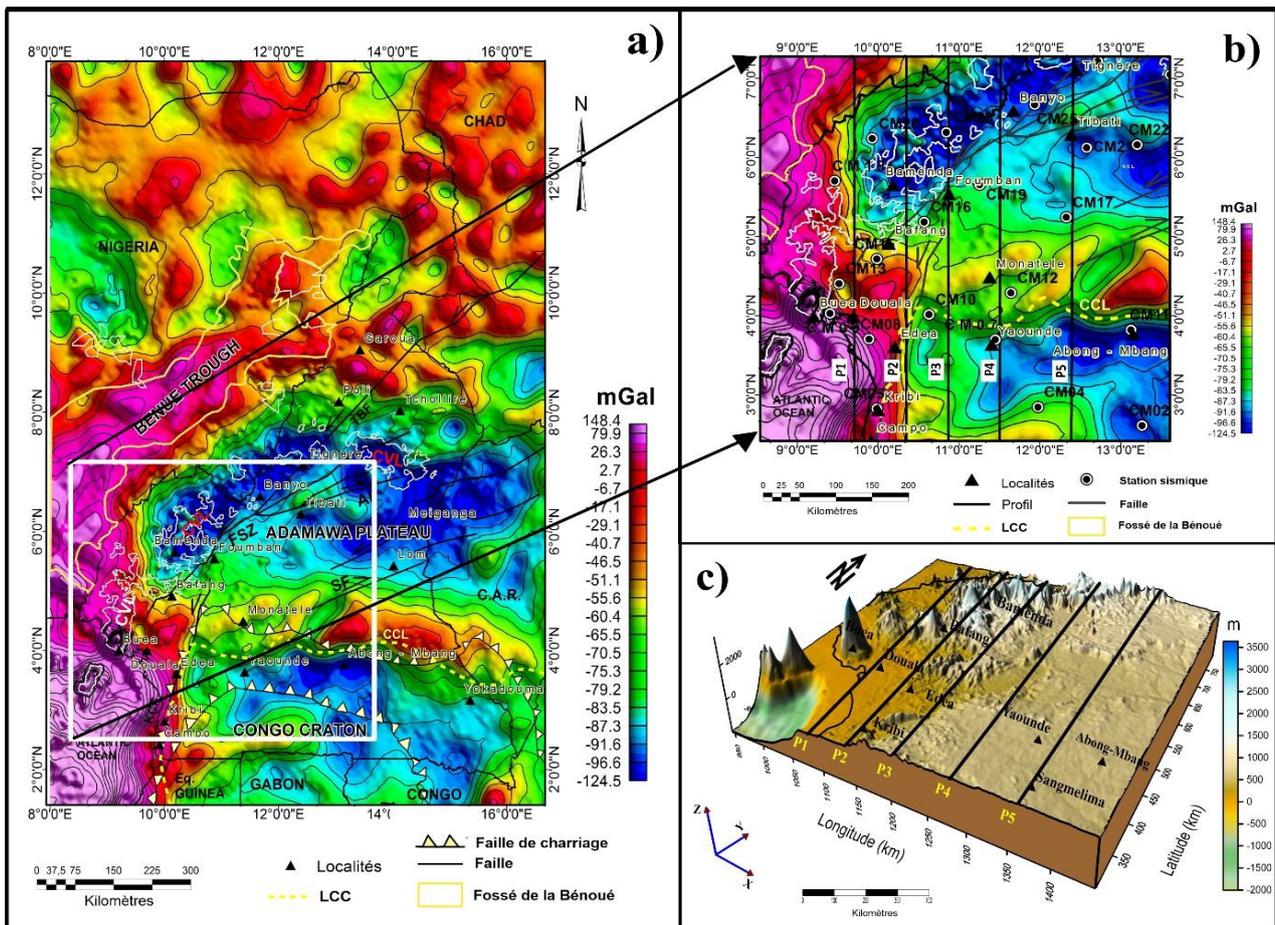


Figure 3.32: a) Carte d'anomalies du Cameroun ; b) Carte des anomalies de Bouguer présentant les profils choisis pris sur la LVC incluant la zone de transition et le Craton du Congo ; c) Carte topographique correspondante de la grille des données et les profils choisis ;

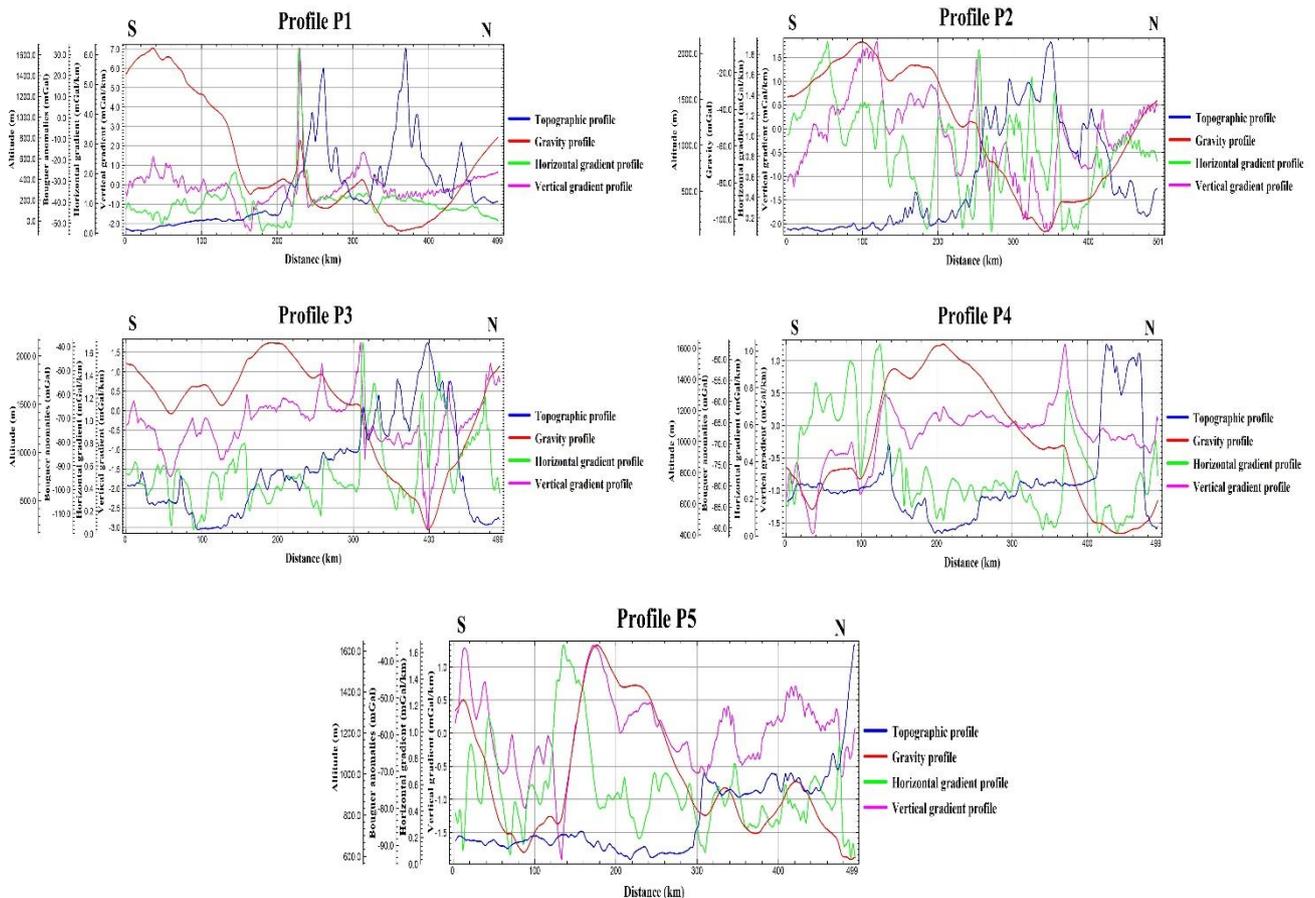


Figure 3.33: Profils P1 à P5 respectivement pour les champs gravimétriques pris sur la LVC incluant le CC suivant la direction unique Nord - Sud.

b. Profondeur moyenne d’investigation

Dans ce travail, l’inversion 3D des densités et la modélisation $2D^{1/2}$ font partie des objectifs fixés. Il est surtout question d’étudier le comportement des structures géologiques intracrustales de la LVC et la CC. Cependant, que ce soit pour l’inversion 3D ou la modélisation $2D^{1/2}$, nous nous concentrons à l’étude des structures géologiques de la croûte en considérant uniforme la valeur moyenne de la densité au-delà du Moho. En ce sens, la profondeur d’investigation de nos modèles a été choisie de manière arbitraire au-delà du Moho. C’est ainsi que dans ce travail, nous nous sommes proposé d’adopter 70 km comme profondeur. Si nous adoptons une approche directe, la profondeur 70 km pourrait être considérée comme la profondeur moyenne d’investigation de la lithosphère dans cette étude.

3.5.5. Paramètre du modèle initial

Le modèle initial de taille $dX \times dY \times dZ$ a été construit en sélectionnant selon la taille de la grille les valeurs $510 \text{ km} \times 495 \text{ km} \times 70 \text{ km}$ correspondant respectivement à la longitude, la latitude et la profondeur d'investigation. Le modèle initial a été divisé en petites briques de taille $dx \times dy \times dz$ tel que $dX \times dY \times dZ = n_x dx \times n_y dy \times n_z dz$; n_x , n_y et n_z représentant respectivement le nombre de sous blocs suivant les directions x , y et z . Dans ce travail, compte tenu de la résolution des données initiales nous avons choisi $n_x = n_y = n = 30$ et $n_z = 15$. Le modèle a donc été discrétisé par des blocs de dimensions $dx = 17 \text{ km}$ et $dy = 16,5 \text{ km}$ suivant les directions respectives E-O et N-S avec une épaisseur $dz = 4,6 \text{ km}$. Les valeurs de densité constante ont été attribuées à chaque bloc individuel mineur.

3.5.6. Méthode d'inversion 3D des densités et analyse statistique

a. Méthode d'inversion 3D des densités

Le programme utilise deux méthodes : l'inversion Occam et la décomposition en valeurs singulières (DVS) (Hjelt, 1992). Pour chaque méthode, il existe trois options pour définir le modèle (densité, hauteur et densité + hauteur) (Shandini, et al., 2010 ; Basseka, et al., 2011). L'inversion Occam doit résoudre un système matriciel beaucoup plus grand que le DVS. L'inversion DVS crée un modèle lisse et continu si les données gravimétriques sont denses. Pour notre modèle, le calcul direct a été appliqué aux données mesurées (Figure 3.34a) pour obtenir le modèle calculé (Figure 3.34b), puis la méthode d'inversion Occam a été appliquée afin d'optimiser le modèle de contraste de densité pour un modèle rigoureux résultant avec des densités allant de $2,00$ à $3,30 \text{ g/cm}^3$.

b. Analyse statistique des anomalies mesurées et calculées

L'étude de comparaison statistique à partir des histogrammes a permis de déterminer les déviations standards et leurs moyennes (Figures 3.35c et 3.35d). La déviation standard sur l'ensemble des données gravimétriques mesurées et calculées vaut respectivement $44,817 \text{ mGal}$ et $44,848 \text{ mGal}$ (Figure 3.35). La différence maximale entre les données de Bouguer observées et calculées est de $1,0779 \text{ mGal}$ (Figure 3.36). L'erreur quadratique moyenne pour la différence entre les données mesurées et calculées ainsi que la corrélation vaut respectivement $1,1623$ et $0,995$ (Tableau 3.6). Le tableau 3.6 résume cette étude de comparaison statistique entre les anomalies mesurées et calculées.

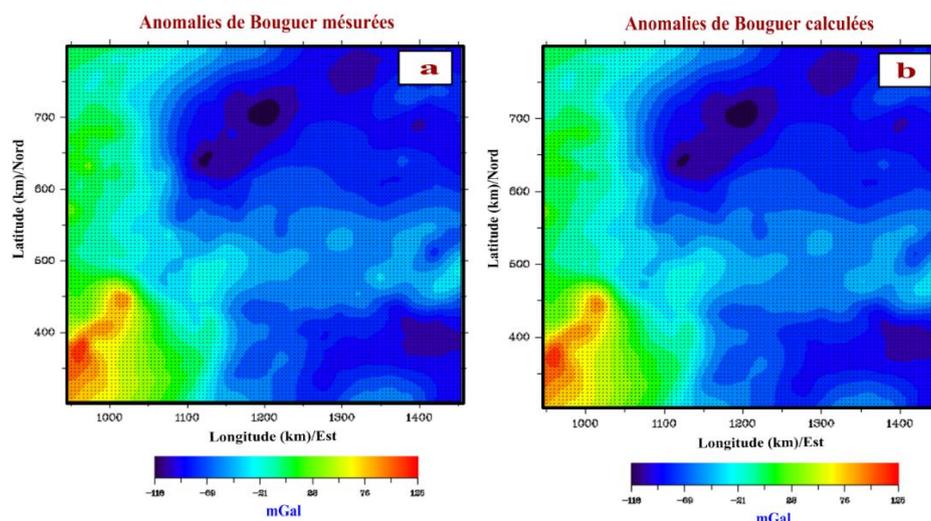


Figure 3.34 : Données gravimétriques prises sur la Ligne Volcanique du Cameroun et le Craton du Congo : a) Anomalies mesurées ; b) Anomalies calculées.

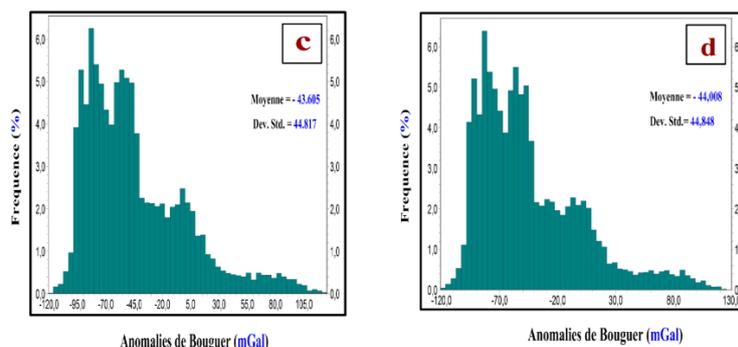


Figure 3.35 : Histogramme des anomalies : c) de Bouguer mesurées ; d) des anomalies de Bouguer calculées.

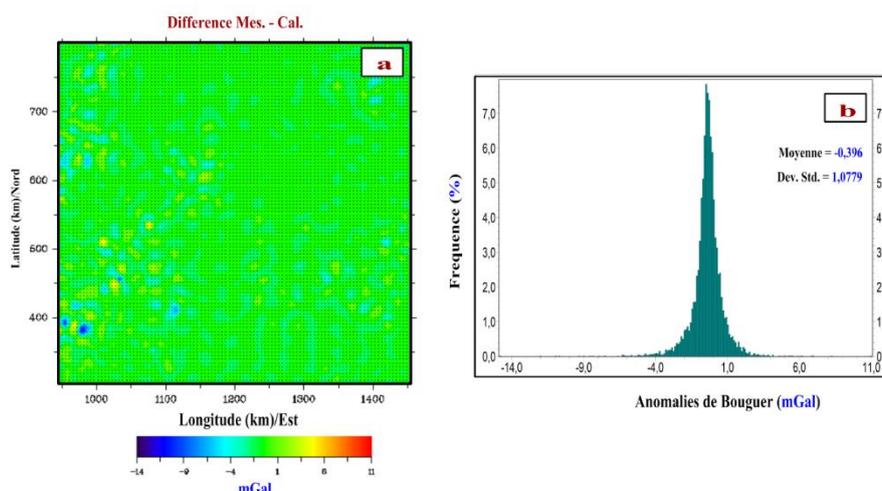


Figure 3.36 : Illustration a) Carte de la différence entre anomalies calculées et mesurées ; b) Histogramme différences entre anomalies de Bouguer calculées et mesurées.

Tableau 3.6: Comparaison statistique des anomalies de Bouguer calculées et mesurées pour l'inversion 3D.

	<i>Min</i> (mGal)	<i>Max</i> (mGal)	<i>Moyenne</i> (mGal)	<i>D.ST</i> (mGal)	<i>RMSE</i> (mGal)	<i>Corrélation</i>
<i>Anomalies</i> (Mesurées)	- 116	124	- 43,605	44,817	-	-
<i>Anomalies</i> (Calculées)	- 118	124	- 44,008	44,848	-	-
<i>Différences</i>	- 14,843	10,964	- 0,396	1,0779	1,1623	0,995

c. Interprétation profils d'inversion gravimétrique 3D

Les modèles de densités résultant obtenus après 15 itérations sont représentés en plusieurs couches par cinq profils P1, P2, P3, P4 et P5 orientés N-S (Figures 3.37 à 3.41). Nos résultats révèlent la distribution et la croissance irrégulière de densités des blocs avec la profondeur sous la LVC et le Craton du Congo. Pour chacun des blocks, correspond une valeur de densité ; cette valeur est considérée comme étant la valeur moyenne de densité pour un ensemble de structures géologiques considérées dans ce block. Les principales caractéristiques des modèles obtenus sont la variation et l'amplification des densités avec la profondeur ainsi que les variations latérales en ligne des densités des anomalies observées suivant la direction Nord-Sud. La géométrie du Moho comme contrainte et la définition de la densité du manteau sur une valeur constante ont été établies afin d'inverser les densités crustales et les utiliser comme informations à priori pour la modélisation 2D½.

De nos modèles d'inversion 3D, les points correspondant aux discontinuités sismiques du Moho sont localisés par des étoiles réparties le long de chaque profil (Figures 3.37 à 3.41). Le profilage d'une ligne en trait interrompu blanc est représenté sur nos modèles comme étant l'interface croûte – manteau proposé dans ce travail donc la profondeur intracrustale peut atteindre 49 km environ sur le Craton du Congo et environ 37 km sur la Ligne Volcanique du Cameroun.

Nos résultats sont en accord avec les résultats de (Tokam Kamga et al., 2010 ; Gallacher et Bastow, 2012) qui ont montré à partir de la sismique passive que le Moho est plus profond sous le Craton du Congo et le domaine de Yaoundé atteignant -48 km. De toute évidence, à cause des processus géodynamiques pouvant affecté la structure du sous-sol intracrustal, il est possible d'avoir une géologie assez complexe caractérisée par l'hétérogénéité des structures géologiques telle qu'observée au Cameroun (Figure 1.1), et les densités variables avec la profondeur.

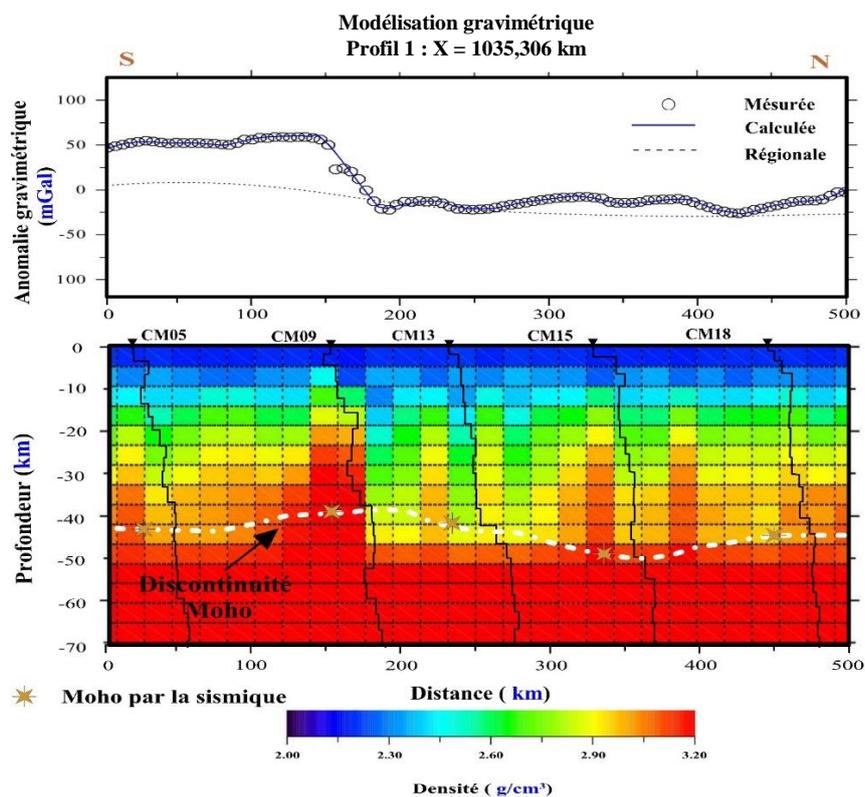


Figure 3.37 : Carte d'inversion des sections gravimétriques 2D du profil 1.

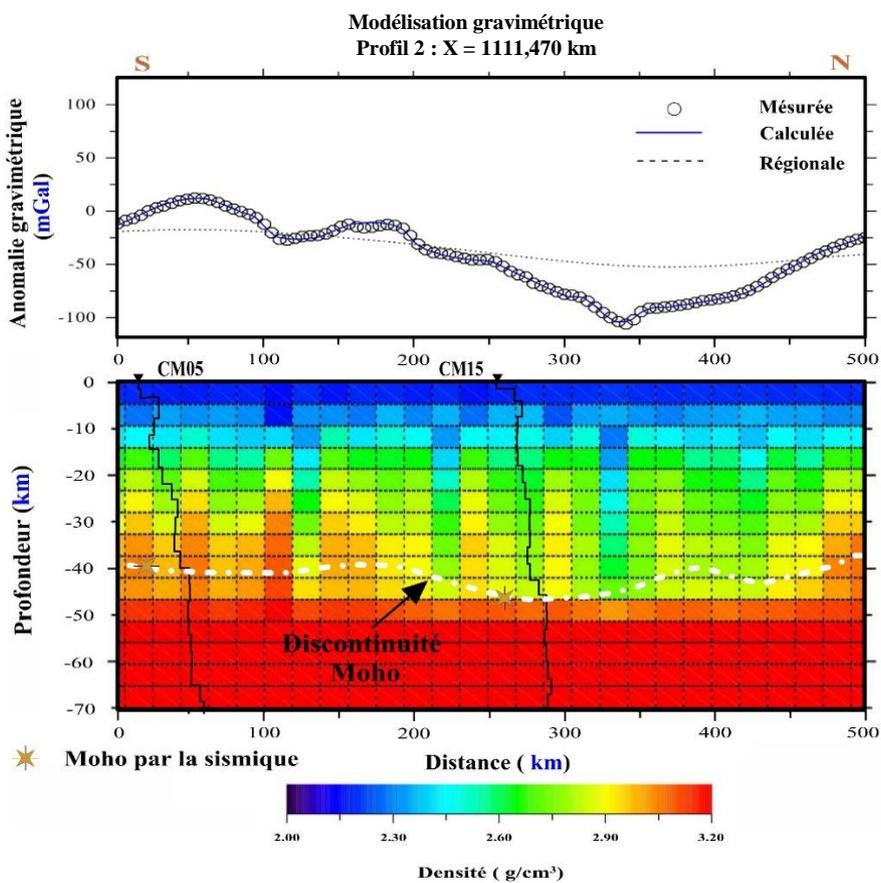


Figure 3.38 : Carte d'inversion des sections gravimétriques 2D du profil 2.

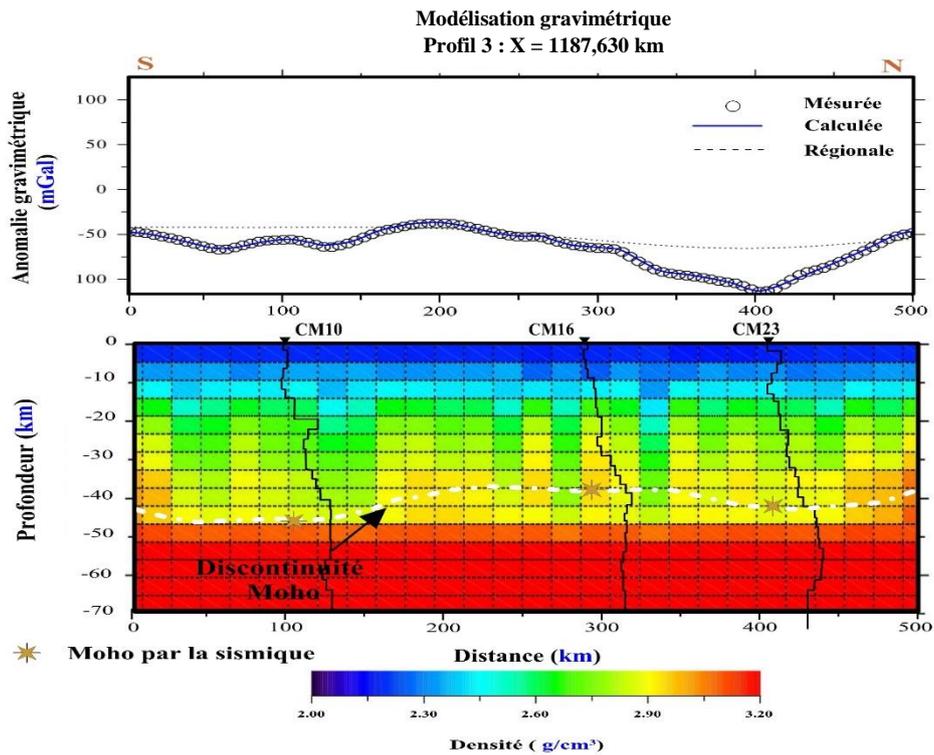


Figure 3.39 : Carte d'inversion des sections gravimétriques 2D du profil 3.

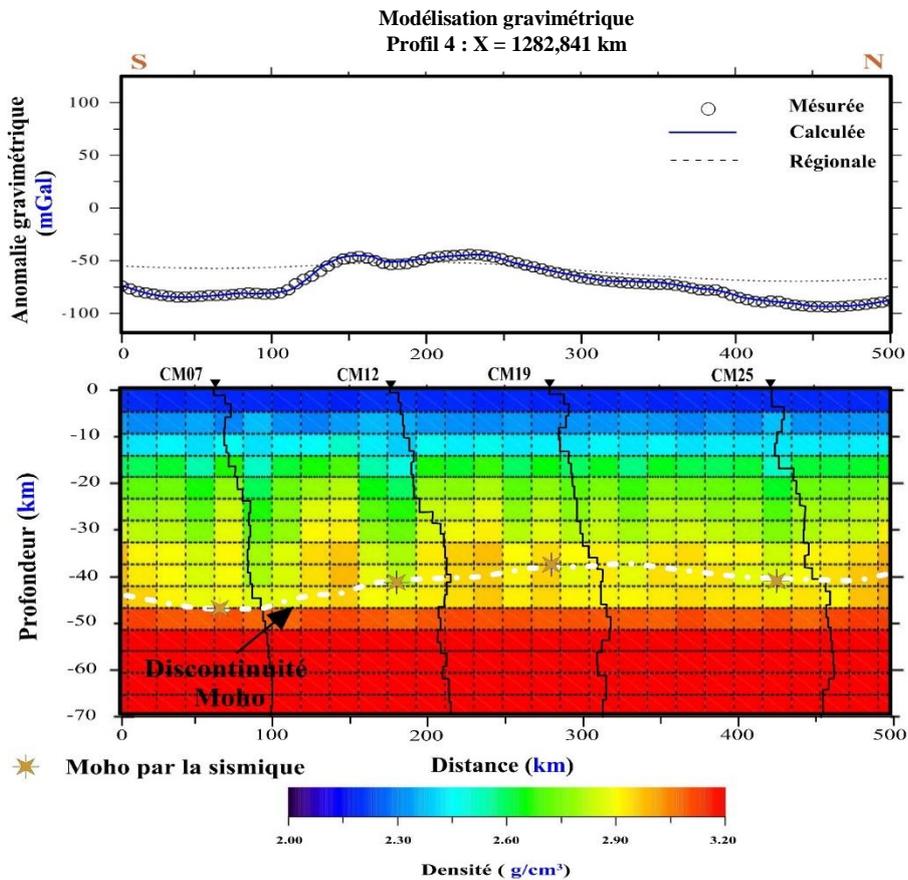


Figure 3.40 : Carte d'inversion des sections gravimétriques 2D du profil 4.

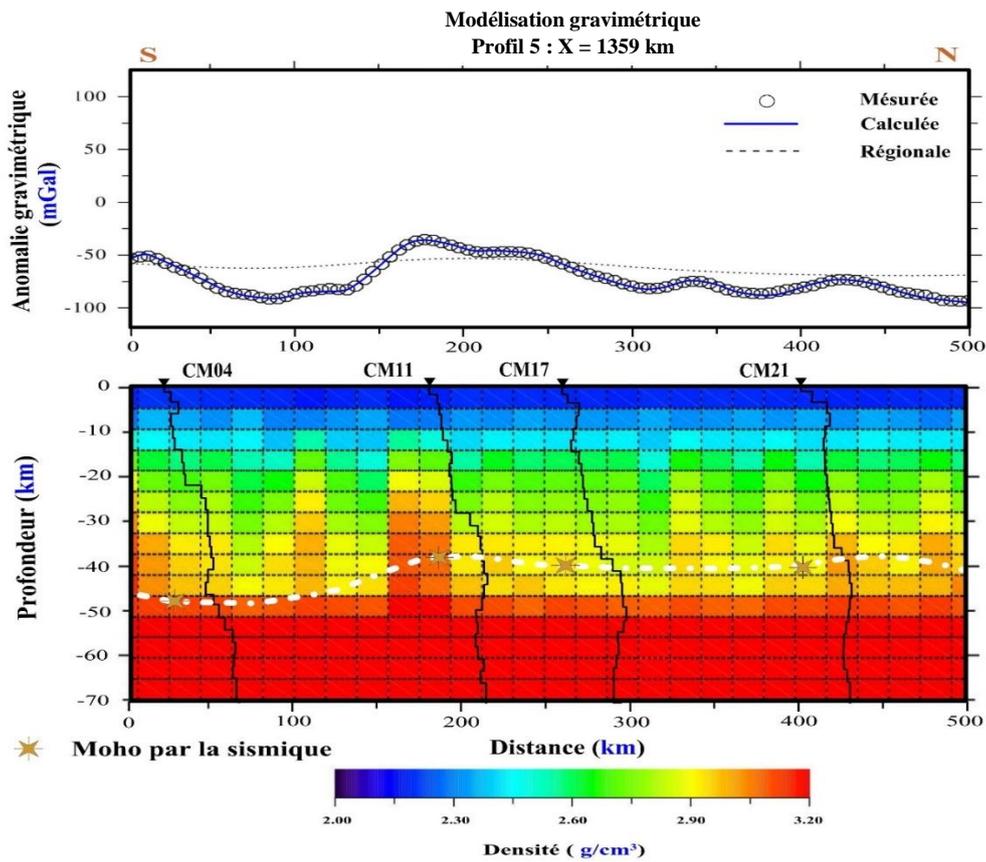


Figure 3.41 : Carte d'inversion des sections gravimétriques 2D du profil 5.

Nos inversions 3D nous renseignent sur le comportement des densités des structures géologiques sous la LVC et le Craton du Congo incluant la zone de transition tout en nous donnant une idée sur l'ondulation du Moho. L'inversion 3D étant faite, nous élaborons par la suite des modèles des structures géologiques afin de mettre en évidence la répartition intra-crustale des structures géologiques de la LVC et le Craton du Congo.

3.6. Modélisation gravimétrique des structures géologiques

La modélisation des données gravimétriques a été réalisée à l'aide du programme informatique GYMSYS de Geosoft. Ce programme calcule l'anomalie due à diverses structures souterraines le long d'un profil (Talwani et al., 1959). Le long des profils sélectionnés, les modèles initiaux sont définis à l'aide d'observations géologiques de surface, profils sismiques et la profondeur de l'ondulation du Moho estimée à partir de l'analyse spectrale. Les modèles finaux ajustés se composent de polygones adjacents de densités constantes pour lesquels les effets de la gravité produisent des courbes modélisées qui devront correspondre aux valeurs observées.

Les modèles obtenus sont présentés par les figures 3.42 à 3.46. Ils mettent en évidence les modèles (panneaux inférieurs), les effets gravimétriques modélisés et observés le long du profil (panneaux

supérieurs). Les profils étant d'environ 800 km de long sont localisés sur la LVC et le Craton du Congo incluant la zone de transition de cette dernière avec la Chaîne Panafricaine dans le Sud-Cameroun.

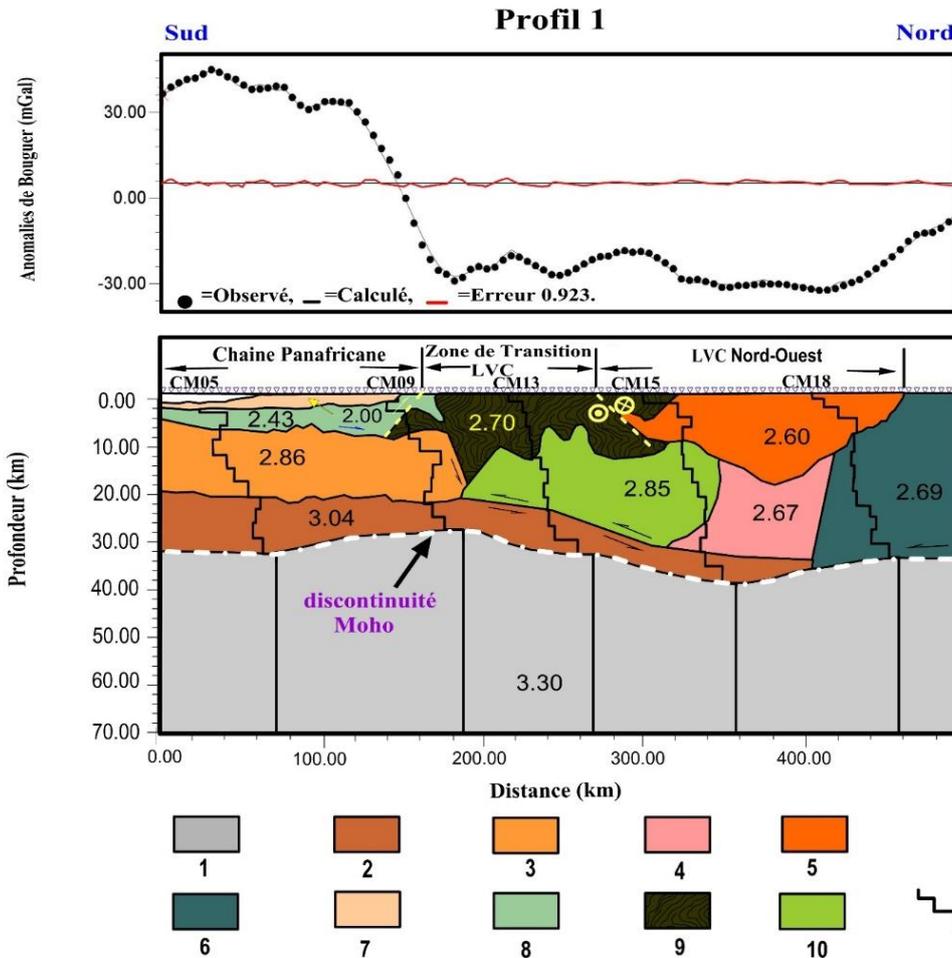
C'est ainsi que les modèles ont été mis en évidence. De plus, nous avons exploité les profils des vitesses des ondes sismiques mises en évidence par les travaux de Tokam Kamga et al. (2010) de 18 stations déployées au Cameroun entre 2005 et 2007 et les profondeurs des ondulations du Moho estimées dans cette étude pour contraindre la profondeur du Moho de nos modèles.

Les courbes des données théoriques ont été ajustées au mieux aux données expérimentales ayant des minimums (-31 mGal, -87 mGal, -102 mGal, -84 mGal et -88 mGal) et des maximums (-35 mGal, 1 mGal, -45 mGal, -44 mGal et -42 mGal) respectivement pour les profils P1, P2, P3, P4 et P5 (Figures 3.42 à 3.46). Les premiers corps de masse volumique $3,30 \text{ g/cm}^3$ au bas des modèles représentent les couches supérieures du manteau. Sa limite supérieure représente les ondulations de discontinuité Moho dans notre région d'étude. Une couche mafique de densité $3,04 \text{ g/cm}^3$ est également mise en évidence, très épaisse sous le Craton du Congo et moins épaisse sur la Chaîne panafricaine.

3.6.1. Modèles gravimétriques 2D^{1/2} du profil 1

Les résultats de la modélisation 2D^{1/2} grâce au profil 1 sont illustrés par la figure 3.42. Ce modèle met en évidence dix blocs de structures géologiques. L'ensemble de tous ces blocs représente dans cette étude les structures de la plaque lithosphérique de la zone considérée dont l'une d'elles représente une partie du manteau supérieur et l'autre la croûte. Dans ce modèle, comme tous les autres modèles (Figures 3.43 à 3.46), nous avons considéré uniformes les structures du manteau supérieur avec une densité moyenne de $3,30 \text{ g/cm}^3$.

Pris suivant la direction NS, le profil 1 coupe les contrastes de signatures gravimétriques localisés sur la LVC. Nos résultats révèlent que les contrastes de gradients d'anomalies gravimétriques de direction Nord-Ouest traversant la LVC sont caractérisés par les formations de structures volcaniques et métamorphiques des domaines néoprotérozoïque et paléoprotérozoïque de la LVC pour la zone mobile Ouest Panafricaine. Ce modèle révèle à partir de la forme des structures géologiques que la zone de contraste des gradients des anomalies gravimétriques serait en permanence soumise à plusieurs contraintes mécaniques de compression.



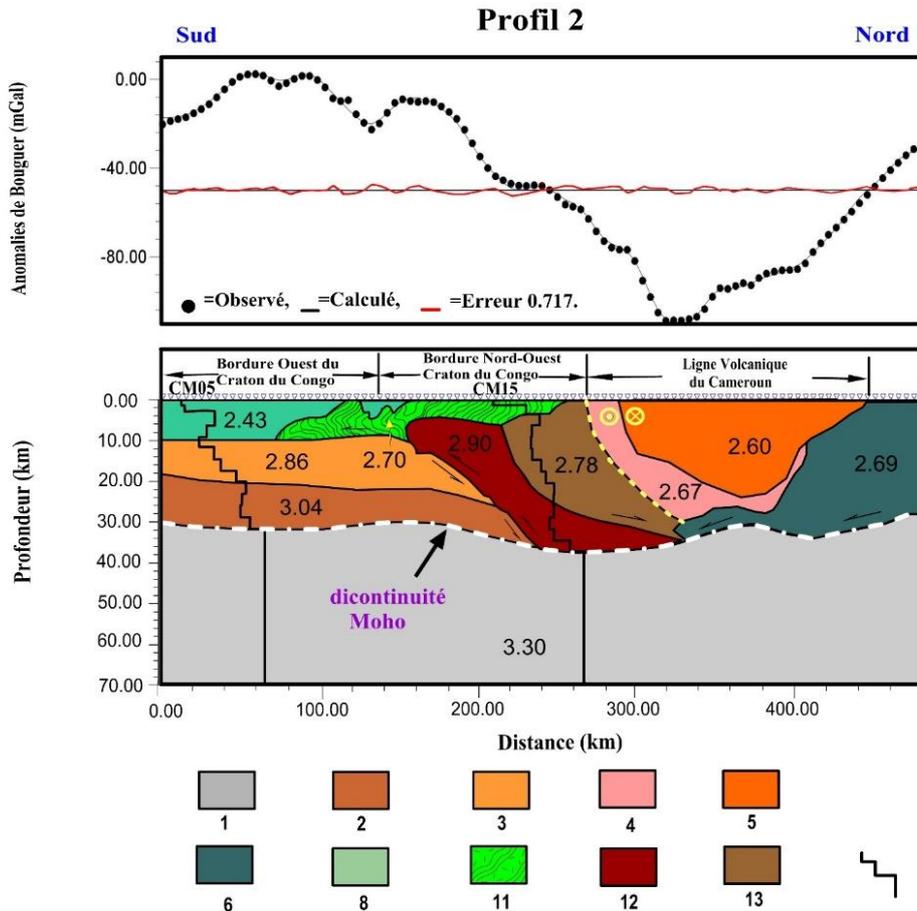
1. Manteau supérieur $d_1 = 3,30 \text{ g/cm}^3$; 2. Couche de la croûte mafique $d_2 = 3,04 \text{ g/cm}^3$; 3. Granulites (courroie Panafricane) $d_3 = 2,86 \text{ g/cm}^3$; 4. Granitoïde de la croûte juvénile néoprotérozoïque (domaine Nord-Ouest Panafricain) $d_4 = 2,67 \text{ g/cm}^3$; 5. Structures volcano-plutoniques de la LVC datant du Cénozoïque (domaine Nord-Ouest Panafricain) $d_5 = 2,6 \text{ g/cm}^3$; 6. TTG charnockite datant du Méso-Archéen (sous-sol précambrien) $d_6 = 2,69 \text{ g/cm}^3$; 7. Sables et argiles (Chaîne Panafricane) $d_7 = 2,00 \text{ g/cm}^3$; 8. Couverture Phanérozoïque $d_8 = 2,43 \text{ g/cm}^3$; 9. Formation volcano-métamorphique du Néoprotérozoïque avec relique de la LVC (domaine Ouest Panafricain) $d_9 = 2,7 \text{ g/cm}^3$; 10. Structures basaltique et gneiss-granulitique de la LVC (zone mobile Nord-Ouest Panafricaine) $d_{10} = 2,85 \text{ g/cm}^3$.

Figure 3.42 : Illustration de la modélisation gravimétrique $2D^{1/2}$ du profil P1.

3.6.2. Modèles gravimétriques $2D^{1/2}$ du profil 2

Le profil 2 de direction NS (Figure 3.43) met en évidence la présence de dix blocs de structures géologiques parmi lesquelles neuf des blocs sont localisés dans le sous-sol de la croûte. Ce profil passe sur la LVC, la bordure Nord-Ouest du CC et la zone de transition Ouest de cette dernière avec la CP. Dans le sous-sol de la bordure Ouest du CC une structure géologique dite couche mafique dont l'existence avait été révélée par Tokam Kamga et al. (2010), est mise en évidence avec une densité de $3,04 \text{ g/cm}^3$. Cette couche est également

localisée dans les autres modèles des profils 2, 3, 4 et 5. En amont de cette couche mafique, sont localisées les structures granulitiques et la couverture phanérozoïque considérées respectivement comme étant les croûtes inférieures et supérieures. Dans le sous-sol de la bordure Nord-Ouest du CC, l'exhumation et la poussée d'une croûte profonde du domaine Sud Panafricain sont observées. Cette poussée par une structure dont la densité moyenne est de $2,9 \text{ g/cm}^3$, serait à l'origine du déversement de la nappe tectonique de charriage sur la bordure Ouest du CC en provenance du domaine Sud Panafricain.



1. Manteau supérieur $d1 = 3,30 \text{ g/cm}^3$; 2. Couche de la croûte mafique $d2 = 3,04 \text{ g/cm}^3$; 3. Granulites (courroie Panafricaine) $d3 = 2,86 \text{ g/cm}^3$; 4. Granitoïde de la croûte juvénile néoprotozoïque (domaine Nord-Ouest Panafricain) $d4 = 2,67 \text{ g/cm}^3$; 5. Structures volcano-plutoniques de la LVC datant du Cénozoïque (domaine Nord-Ouest Panafricain) $d5 = 2,6 \text{ g/cm}^3$; 6. TTG charnockite datant du Méso-Archéen (sous-sol précambrien) $d6 = 2,69 \text{ g/cm}^3$; 8. Couverture Phanérozoïque $d8 = 2,43 \text{ g/cm}^3$; 11. Nappe tectonique de charriage et déversement (domaine Sud Panafricain) sur le Craton du Congo $d11 = 2,70 \text{ g/cm}^3$; 12. Exhumation et poussée de la croûte profonde sur le Craton du Congo $d12 = 2,9 \text{ g/cm}^3$; 13. Croûte de la zone mobile panafricaine associée au métamorphisme granulitique $d13 = 2,78 \text{ g/cm}^3$.

Figure 3.43 : Illustration de la modélisation gravimétrique 2D^{1/2} du profil P2.

3.6.3. Modèles gravimétriques 2D^{1/2} du profil 3

Sous le profil 3, les résultats de notre modélisation 2D^{1/2} sont mis en évidence (Figure 3.44). Pris suivant la direction NS, ce profil passe sur la LVC, la partie Ouest et la bordure Nord-Ouest du Craton du Congo. Quinze blocs de structures géologiques sont proposés parmi lesquels quatorze sont localisés dans la croûte. La couche mafique est également mise en évidence dans la lithosphère du CC sur laquelle repose une croûte composée de deux structures principales à savoir : la croûte inférieure de l'Unité du Nyong du CC et la croûte supérieure composée de gneiss de densité 2,75 g/cm³, de granites de densité 2,57 g/cm³ et la nappe de Yaoundé associée à un métamorphisme granulitique de densité 2,84 g/cm³ sous laquelle se déverse une nappe tectonique en provenance du domaine Sud Panafricain sur le CC. Ce modèle révèle que le déversement de la nappe est dû à l'exhumation et la poussée par une croûte profonde de densité 2,9 g/cm³, des structures de la zone mobile panafricaine associées au métamorphisme granulitique de densité 2,78 g/cm³.

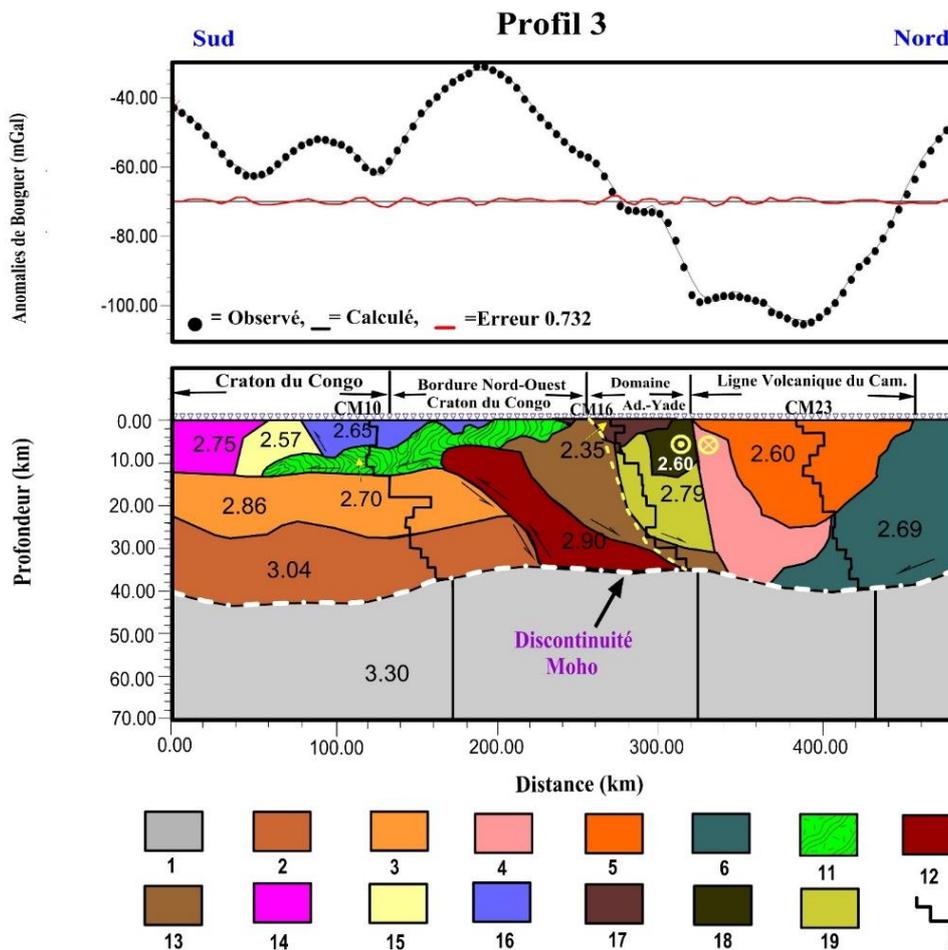


Figure 3.44 : Illustration de la modélisation gravimétrique 2D^{1/2} du profil P3.

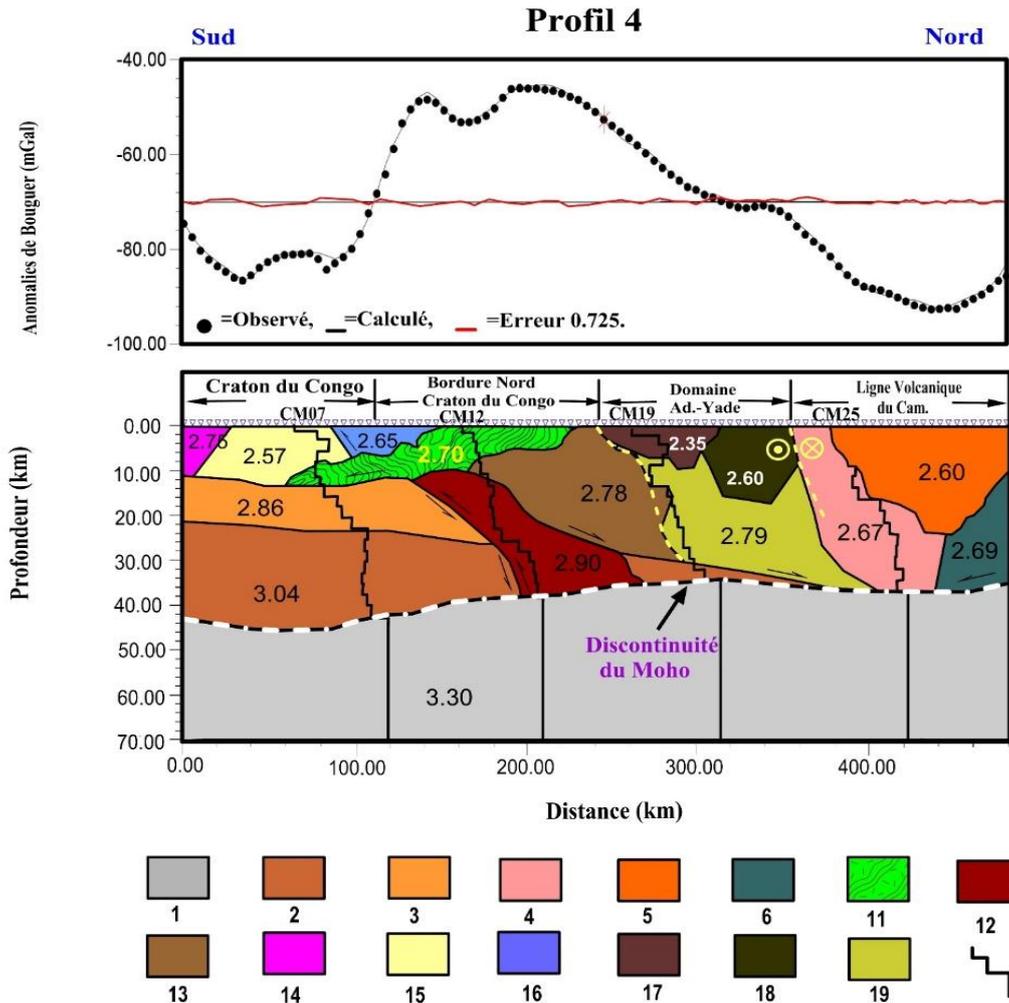
1. Manteau supérieur $d_1 = 3,30 \text{ g/cm}^3$;
2. Couche de la croûte mafique $d_2 = 3,04 \text{ g/cm}^3$;
3. Granulites (courroie Panafricain) $d_3 = 2,86 \text{ g/cm}^3$;
4. Granitoïde de la croûte juvénile néoprotérozoïque (domaine Nord-Ouest Panafricain) $d_4 = 2,67 \text{ g/cm}^3$;
5. Structures volcano-plutoniques de la LVC datant du Cénozoïque (domaine Nord-

Ouest Panafricain) $d_5 = 2,6 \text{ g/cm}^3$; 6. TTG charnockite datant du Méso-Archéen (sous-sol précambrien) $d_6 = 2,69 \text{ g/cm}^3$; 11. Nappe tectonique de charriage et déversement (domaine Sud Panafricain) sur le Craton du Congo $d_{11} = 2,70 \text{ g/cm}^3$; 12. Exhumation et poussée de la croûte profonde sur le Craton du Congo $d_{12} = 2,9 \text{ g/cm}^3$; 13. Croûte de la zone mobile panafricaine associée au métamorphisme granulitique $d_{13} = 2,78 \text{ g/cm}^3$; 14. Gneiss intrusive (Craton du Congo) $d_{14} = 2,75 \text{ g/cm}^3$; 15. Granites (Craton du Congo) $d_{15} = 2,57 \text{ g/cm}^3$; 16. Nappe de Yaoundé associée au métamorphisme granulitique $d_{16} = 2,65 \text{ g/cm}^3$; 17. Méta-sédiment du paléoprotérozoïque (domaine centrale panafricain) $d_{17} = 2,35 \text{ g/cm}^3$; 18. Granitoïde Syn-à-post tectonique intrusif (zone mobile Centre Panafricaine) reposant sur le socle paléoprotérozoïque $d_{18} = 2,60 \text{ g/cm}^3$; 19. Socle de la zone centrale de la Chaîne Panafricaine du paléoprotérozoïque $d_{19} = 2,79 \text{ g/cm}^3$.

3.6.4. Modèles gravimétriques $2D^{1/2}$ des profils 4 et 5

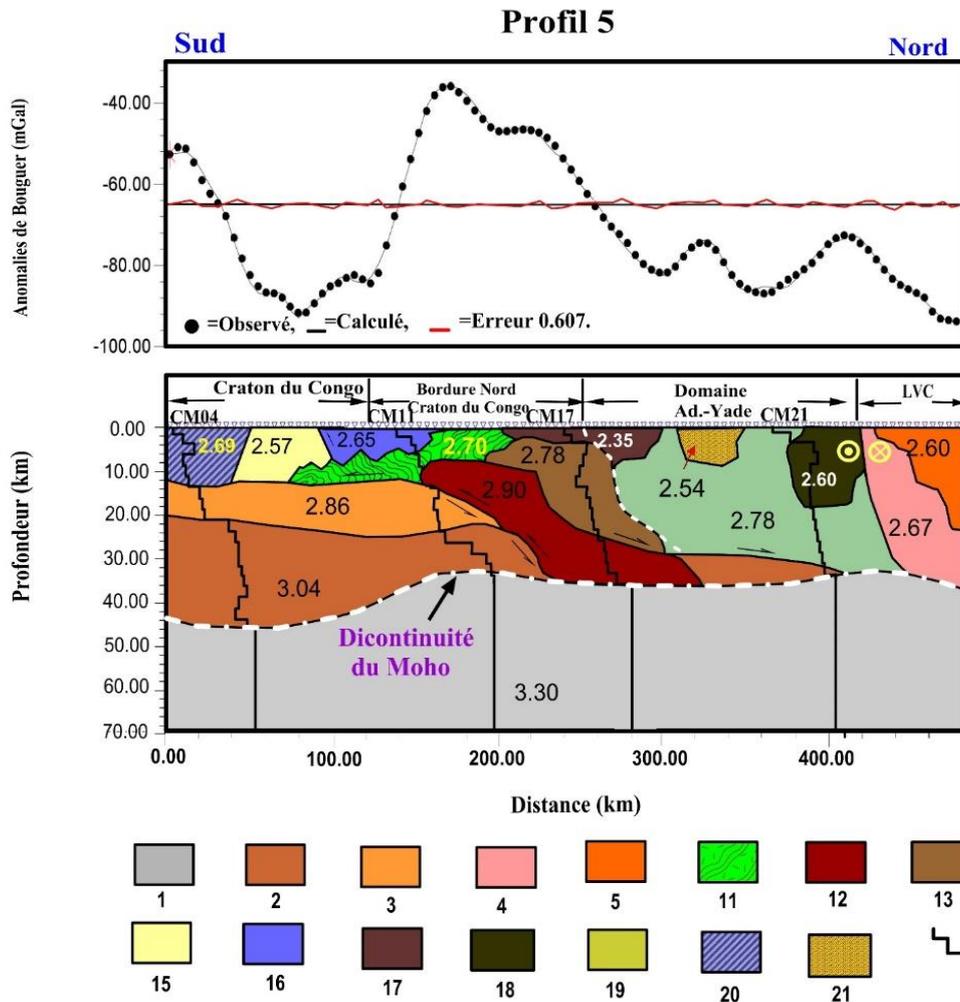
Les figures 3.45 et 3.46 illustrent les résultats de la modélisation effectuée grâce aux profils 4 et 5. Ayant la même direction que les profils 1, 2 et 3, ces derniers coupent les signatures des anomalies de Bouguer de la LVC, du domaine Adamaoua-Yadé, le CC et sa bordure Nord. De même que les modèles précédents, la couche mafique est également mise en évidence dans la partie septentrionale du CC. Toujours dans le CC, deux structures intrusives sont mises en évidence ; il s'agit des gneiss de densité $2,8 \text{ g/cm}^3$ localisés sur le profil 4 et TTG charnockites de densité $2,65 \text{ g/cm}^3$ localisés sur le profil 5. Contrairement aux profils 1 et 2, un socle paléoprotérozoïque du domaine Centre Panafricain de densité $2,79 \text{ g/cm}^3$ est mis en évidence et interposé entre la croûte de la zone mobile du domaine Sud Panafricain et les granitoïdes d'une croûte juvénile du domaine Nord-Ouest Panafricain. A l'intérieur de ce socle, on peut observer l'intrusion de quelques structures géologiques.

De plus, les modèles des profils 2, 3, 4 et 5 illustrent le phénomène d'exhumation et d'une poussée par une croûte profonde qui aurait provoqué le déversement d'une nappe tectonique sur le Craton du Congo, puis aurait par la suite engendré le basculement d'un bloc de structures géologiques de la zone mobile Sud Panafricaine associée au métamorphisme granulitique. Nous pensons que le déplacement du domaine continental de la Chaîne Panafricaine aurait provoqué la collision dite continentale évoquée par Toteu et al. (2001) et Toteu et al. (2004) à la bordure Nord du Craton Congo avec la Chaîne Panafricaine représentant un phénomène géodynamique se produisant à la limite convergente de deux plaques tectoniques où deux lithosphères continentales se rencontrent.



1. Manteau supérieur $d_1 = 3,30 \text{ g/cm}^3$; 2. Couche de la croûte mafique $d_2 = 3,04 \text{ g/cm}^3$; 3. Granulites (courroie Panafricain) $d_3 = 2,86 \text{ g/cm}^3$; 4. Granitoïde de la croûte juvénile néoprotérozoïque (domaine Nord-Ouest Panafricain) $d_4 = 2,67 \text{ g/cm}^3$; 5. Structures volcano-plutoniques de la LVC datant du Cénozoïque (domaine Nord-Ouest Panafricain) $d_5 = 2,6 \text{ g/cm}^3$; 6. TTG charnockite datant du Méso-Archéen (sous-sol précambrien) $d_6 = 2,69 \text{ g/cm}^3$; 11. Nappe tectonique de charriage et déversement (domaine Sud Panafricain) sur le Craton du Congo $d_{11} = 2,70 \text{ g/cm}^3$; 12. Exhumation et poussée de la croûte profonde sur le Craton du Congo $d_{12} = 2,9 \text{ g/cm}^3$; 13. Croûte de la zone mobile panafricaine associée au métamorphisme granulitique $d_{13} = 2,78 \text{ g/cm}^3$; 14. Gneiss intrusif 'Craton du Congo) $d_{14} = 2,75 \text{ g/cm}^3$; 15. Granites (Craton du Congo) $d_{15} = 2,57 \text{ g/cm}^3$; 16. Nappe de Yaoundé associée au métamorphisme granulitique $d_{16} = 2,65 \text{ g/cm}^3$; 17. Méta-sédiment du Paléoprotérozoïque (domaine central Panafricain) $d_{17} = 2,35 \text{ g/cm}^3$; 18. Granitoïde Syn-à-post tectonique intrusif (zone mobile Centre Panafricaine) reposant sur le socle paléoprotérozoïque $d_{18} = 2,60 \text{ g/cm}^3$; 19. Socle de la zone centrale de la Chaîne Panafricaine du paléoprotérozoïque $d_{19} = 2,79 \text{ g/cm}^3$.

Figure 3.45 : Illustration de la modélisation gravimétrique $2D^{1/2}$ du profil P4.



1. Manteau supérieur $d1 = 3,30 \text{ g/cm}^3$; 2. Couche de la croûte mafique $d2 = 3,04 \text{ g/cm}^3$; 3. Granulites (courroie Panafricaine) $d3 = 2,86 \text{ g/cm}^3$; 4. Granitoïde de la croûte juvénile néoprotérozoïque (domaine Nord-Ouest Panafricain) $d4 = 2,67 \text{ g/cm}^3$; 5. Structures volcano-plutoniques de la LVC datant du Cénozoïque (domaine Nord-Ouest Panafricain) $d5 = 2,6 \text{ g/cm}^3$; 6. TTG charnockite datant du Méso-Archéen (sous-sol précambrien) $d6 = 2,69 \text{ g/cm}^3$; 11. Nappe tectonique de charriage et déversement (domaine Sud Panafricain) sur le Craton du Congo $d11 = 2,70 \text{ g/cm}^3$; 12. Exhumation et poussée de la croûte profonde sur le Craton du Congo $d12 = 2,9 \text{ g/cm}^3$; 13. Croûte de la zone mobile panafricaine associée au métamorphisme granulitique $d13 = 2,78 \text{ g/cm}^3$; 15. Granites (Craton du Congo) $d15 = 2,57 \text{ g/cm}^3$; 16. Nappe de Yaoundé associée au métamorphisme granulitique $d16 = 2,65 \text{ g/cm}^3$; 17. Méta-sédiment du paléoprotérozoïque (domaine central panafricain) $d17 = 2,35 \text{ g/cm}^3$; 18. Granitoïde Syn-à-post tectonique intrusif (zone mobile Centre Panafricain) reposant sur le socle paléoprotérozoïque $d18 = 2,60 \text{ g/cm}^3$; 19. Socle de la zone centrale de la Chaîne Panafricaine du paléoprotérozoïque $d19 = 2,79 \text{ g/cm}^3$; 20. Intrusion TTG charnockite du Craton du Congo $d20 = 2,69 \text{ g/cm}^3$; 21. Roches volcanique : rhyolite (zone mobile centre Panafricain) $d21 = 2,54 \text{ g/cm}^3$.

Figure 3.46 : Illustration de la modélisation gravimétrique $2D^{1/2}$ du profil P5.

Nous pensons aussi que cette collision continentale serait la cause ayant déclenché plusieurs phénomènes géodynamiques dans le sous-sol de la Chaîne Panafricaine. En ce sens, nos modèles établis grâce aux profils 2, 3, 4 et 5 présentent un événement de subduction sur les bordures Nord et Nord-Ouest du Craton du Congo avec la Chaîne Panafricaine déclenché probablement après la collision continentale de cette dernière sur la bordure septentrionale du Craton du Congo localisée au Cameroun. Cet événement se manifeste par le chevauchement d'une croûte profonde sur les structures de la croûte inférieure du CC.

Dans le domaine Nord-Ouest Panafricain, plus précisément dans le sous-sol de la LVC, nos modèles mettent en évidence la présence de deux blocs de structures géologiques. Il s'agit du granitoïde de la croûte juvénile néoprotozoïque de densité $2,67 \text{ g/cm}^3$ et la dominance des structures volcano-plutoniques datant du Cénozoïque. Ces structures sont interposées entre le socle paléoprotozoïque du domaine Centre Panafricain et les structures du sous-sol précambrien de densité $2,68 \text{ g/cm}^3$. Nous pensons que ces structures datant du Précambrien localisées sous la LVC pourraient être le prolongement des structures denses en provenance du Fossé de la Bénoué dans l'Est du Nigéria.

Cependant, un bon nombre de déformations intracrustales qui s'exprime par la présence de nappes tectoniques de charriage, de failles et de plis mis en évidence dans ce travail seraient la conséquence d'une série d'événements géodynamiques dans le sous-sol de la zone mobile panafricaine. Ainsi, le chevauchement observé sous les bordures Nord et Nord-Ouest du CC serait responsable du basculement de la croûte dans la zone mobile Sud Panafricaine ; qui aurait à son tour provoqué une série de contraintes mécaniques comprimant les structures du socle paléoprotozoïque des domaines Centre et Nord Panafricains. Ceci nous laisse croire que ces séries de contraintes de compression pourraient être à l'origine de l'existence de plusieurs zones de fracturation à partir desquelles il serait possible de localiser plusieurs points chauds répartis sur ces zones sous la LVC.

Dans l'ensemble, les profils traversent le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine. Cette Chaîne est délimitée par trois domaines à savoir : domaine Sud panafricain (dans lequel est localisé la bordure Nord du Craton du Congo), domaine Centre Panafricain (dans lequel est localisé le domaine dite Adamaoua – Yadé) et le domaine Nord-Ouest Panafricain (dans lequel est localisé la LVC).

3.7. Synthèse des résultats

3.7.1. Cartographie des accidents tectoniques

Dans ce travail, les données gravimétriques et magnétiques ont été couplées afin de procéder à la cartographie des accidents tectoniques des structures géologiques intracrustales de la lithosphère au Cameroun.

Premièrement, les données gravimétriques in situ, le modèle gravitationnel global (XGM2019e_2159) et la grille des anomalies magnétiques ont permis d'établir respectivement les cartes des anomalies de Bouguer et de champ magnétique total réduit à l'équateur. La distribution spatiale des anomalies des structures géologiques est mise en évidence pour les trois bases de données. L'interprétation qualitative des anomalies de Bouguer nous a permis de constater que les signatures à fortes amplitudes d'anomalies sont localisées sur les zones de transition Ouest et Nord entre le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine, dans la partie océanique, le Fossé de la Bénoué et dans l'Extrême nord, contrairement aux anomalies magnétiques où les signatures à fortes amplitudes sont localisées majoritairement au centre de la zone d'étude incluant la LVC.

Deuxièmement, les gradients horizontaux des anomalies de Bouguer et champ magnétique total réduit à l'équateur sont mis en évidence afin de localiser les contrastes de gradients abrupts des anomalies des structures géologiques interprétées comme étant les contacts latéraux entre les structures géologiques sur l'ensemble du territoire camerounais.

Les cartes d'anomalies de Bouguer (Figures 3.4 et 3.6) et du champ magnétique total réduit à l'équateur (Figure 3.5) ainsi que leurs gradients horizontaux (Figure 3.10 et Figure 3.18) et verticaux (Figure 3.11 et Figure 3.19) sont exploitées pour une analyse multi-échelles des signatures gravimétriques et magnétiques afin de localiser les maximas des gradients avec la profondeur, puis superposées pour obtenir la carte de superposition des maximas pour les deux bases de données (Figure 3.13 et Figure 3.21).

Les maximas de gradients ainsi obtenus pour les deux bases de données ont été combinés aux cartes de gradients horizontaux et de déconvolution d'Euler (Figure 3.23 et Figure 3.24) pour le tracé des linéaments gravimétriques et magnétiques afin d'estimer leurs profondeurs moyennes.

Enfin, les linéaments gravimétriques et magnétiques ont été superposés sur les structures géologiques pour proposer une carte de géologie structurale du Cameroun (Figure 3.26).

La cartographie des grands traits structuraux au Cameroun (Figure 3.26) a permis non seulement d'identifier les accidents tectoniques localisés par les travaux géologiques mais aussi de mettre en évidence la présence d'un bon nombre de linéaments nouveaux que renferme le sous-sol intracrustal de la lithosphère du Cameroun.

3.7.2. Modélisation gravimétrique $2D^{1/2}$

Dans ce travail, les données gravimétriques de terrain sont exploitées, pour faire l'inversion 3D des densités et la modélisation $2D^{1/2}$ des structures géologiques. Ces deux types de modèles sont établis pour deux raisons : 1) premièrement l'inversion 3D, pour se faire une idée du comportement de la matrice des blocs de densités volumiques dans le sous-sol de la région d'étude avec un accent particulier sur la profondeur et l'ondulation

du Moho ; 2) deuxièmement la modélisation $2D^{1/2}$, pour proposer un modèle qui illustre la disposition et la distribution des structures géologiques dans le sous-sol de la croûte sous la LVC et le Craton du Congo en fonction de leurs densités moyennes. Pour la modélisation $2D^{1/2}$ processus géodynamiques existants et leurs implications sur l'origine de la LVC et son interaction avec le Craton du Congo sont pris en compte.

Sous la base de cinq profils convenablement choisis, l'inversion tridimensionnelle 3D des données gravimétriques est réalisée puis superposée afin d'apprécier dans son ensemble le comportement des blocs de densité avec la profondeur pour la zone d'investigation (Figure 3.47).

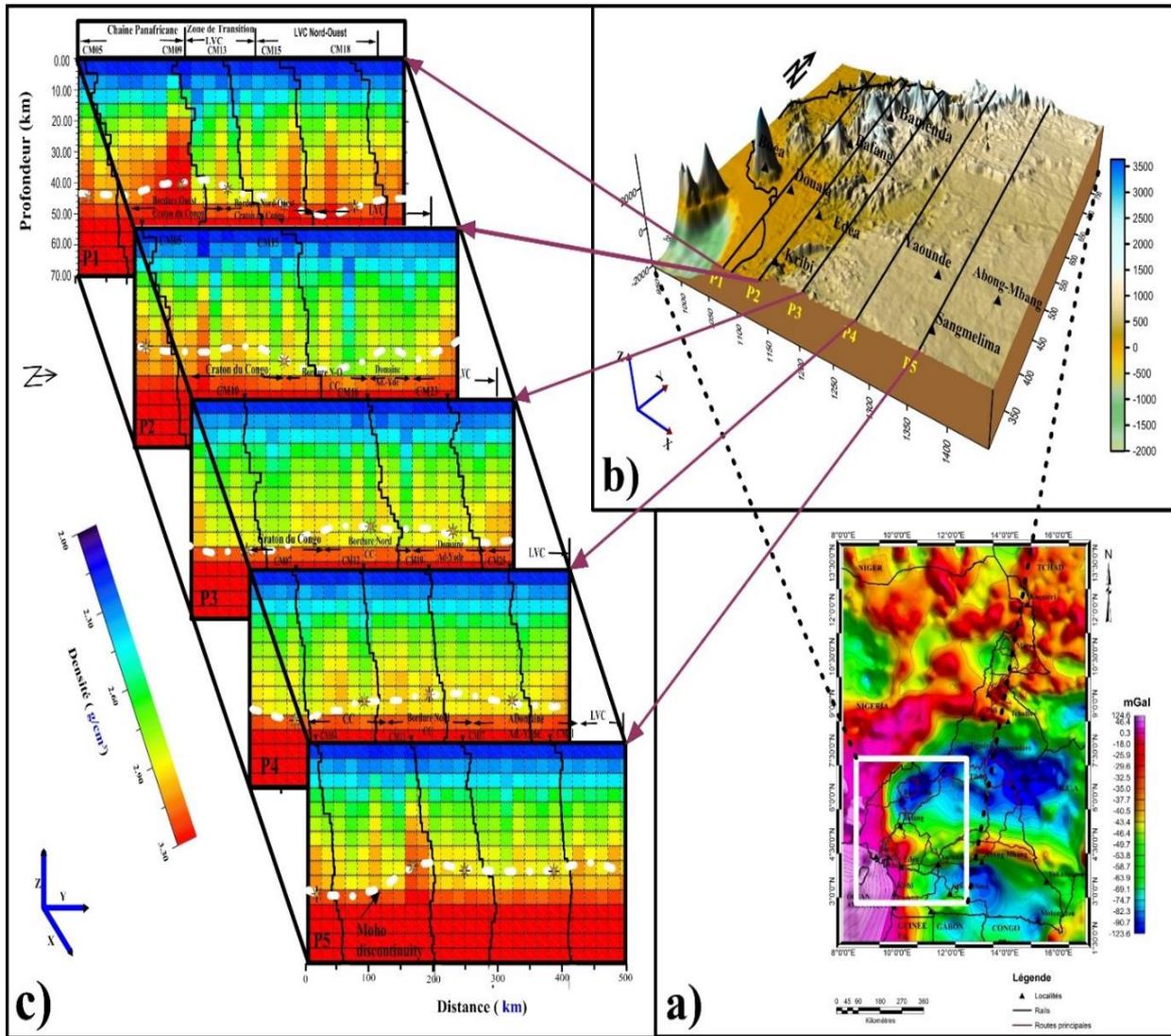


Figure 3.47 : Illustration : a) Carte d’anomalies de Bouguer de la région d’étude avec la grille circonscrite pour la modélisation ; b) Carte topographique 3D de la partie Sud-Ouest du Cameroun avec cinq profils de direction N-S ; c) Illustration des modèles inversion 3D des densités superposées.

Pour l'inversion 3D des densités, les valeurs des densités moyennes exploitées sont issues des travaux de Telford et al. (1990) et Toteu et al. (2008) ainsi que les résultats des modèles géologiques mises en évidence par les travaux géophysiques antérieurs (Tadjou et al., 2009 ; Owona Angue et al., 2011).

Ayant une idée sur la distribution spatiale des blocs de densités avec la profondeur grâce à l'inversion 3D réalisée dans la lithosphère de la LVC et le Craton du Congo, nous avons exploité les informations de la géologie de surface (Toteu et al., 2004, 2006 et 2008) qui ont identifié la Chaîne Panafricaine comme un ensemble subdivisé en trois domaines panafricains et les résultats sur la l'évolution géodynamique de la Chaîne Panafricaine en Afrique Centrale (Toteu et al., 2004) pour réaliser nos modèles 2D^{1/2} des structures géologiques (Figures 3.42 à 3.46).

Pour la réalisation des modèles géophysiques, les profils des vitesses des ondes sismiques de cisaillement pour les stations déployées au Cameroun entre 2005 et 2007 (Tokam Kanga et al., 2010 et Gallacher et Bastow 2012) ont été exploités pour contraindre la profondeur et l'ondulation du Moho et certaines discontinuités des couches géologiques des modèles. De plus, nous avons également exploité les résultats des profondeurs du Moho estimés dans ce travail à partir de l'analyse spectrale appliquée sur les données gravimétriques de terrain pour contraindre la profondeur du Moho des modèles. Les résultats permettent ainsi de mieux apprécier les ondulations du Moho dans nos modèles 2D^{1/2}.

Tous les modèles 2D^{1/2} établis dans la présente étude mettent en évidences les structures géologiques de formations distinctes (Figure 3.42 à 3.46). Les courbes théoriques finales obtenues sont les résultats d'une étude géostatistique en faisant corrélérer au mieux le modèle théorique au modèle expérimental des données gravimétriques pour chaque profil.

La modélisation des structures intracrustales de la lithosphère du sous-sol de la LVC et le Craton du Congo incluant sa zone de transition permet de voir que la bordure Nord du Craton du Congo est caractérisée par le soulèvement et la poussée de la Croûte profonde suivis du charriage d'une nappe tectonique qui se déverse sur le Craton du Congo (Figure 3.48). De plus, nos modèles montrent que la poussée et la remontée de la croûte profonde à la frontière Nord du Craton du Congo auraient contraint les fragments de block du domaine Sud Panafricain associés au métamorphisme granulitique à basculer en direction des granitoïdes de la croûte juvénile néoprotérozoïque du domaine Nord Panafricain et les structures volcano-plutoniques datant du Cénozoïque du domaine Ouest Panafricain de la LVC.

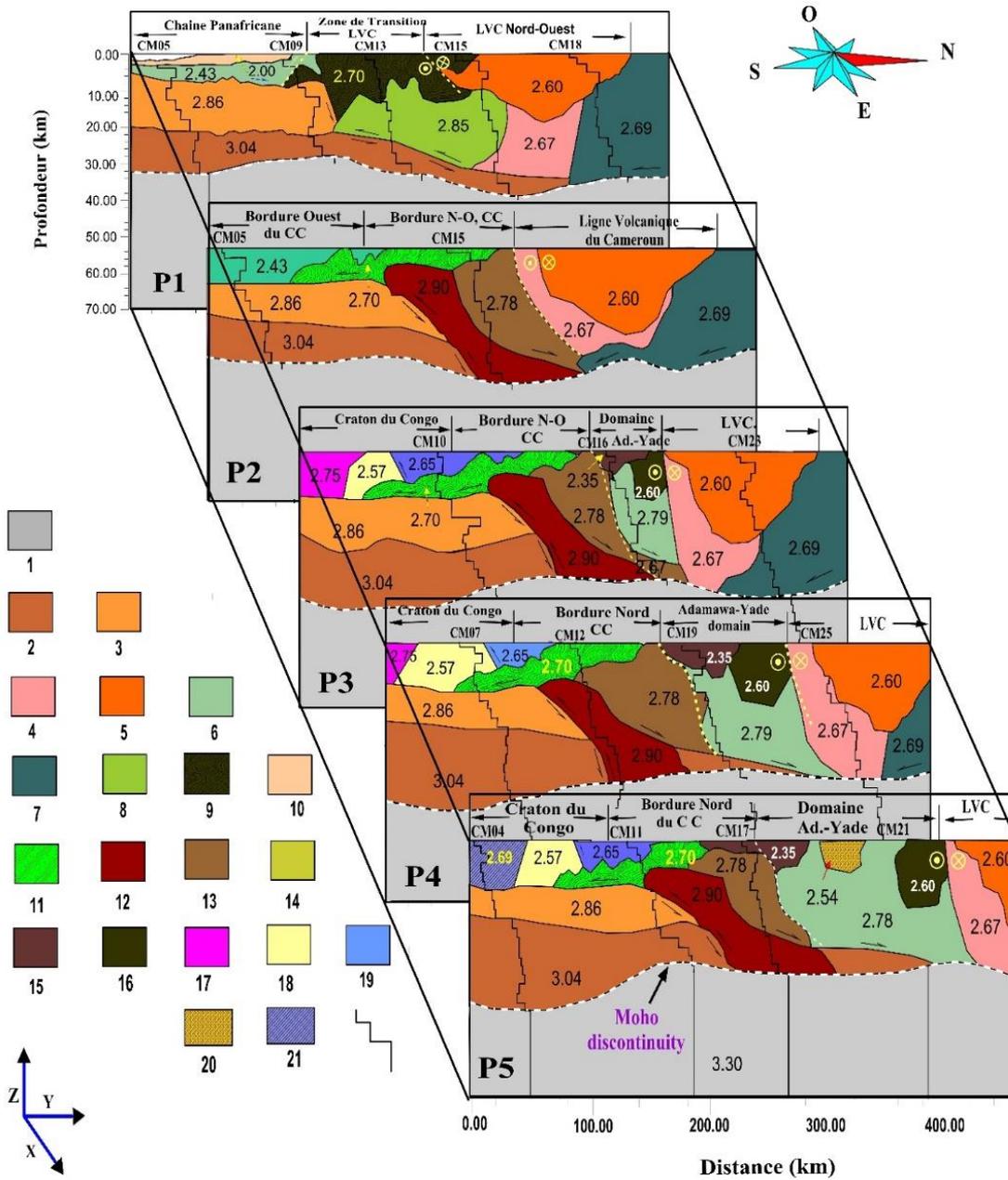


Figure 3.48 : Illustration 3D de la superposition des modèles 2D ^{1/2}.

1. Manteau supérieur $d_1 = 3,30 \text{ g/cm}^3$; 2. Couche de la croûte mafique $d_2 = 3,04 \text{ g/cm}^3$; 3. Granulites (courroie Panafricaine) $d_3 = 2,86 \text{ g/cm}^3$; 4. Granitoïde de la croûte juvénile néoprotérozoïque (domaine Nord-Ouest Panafricain) $d_4 = 2,67 \text{ g/cm}^3$; 5. Structures volcano-plutoniques de la LVC datant du Cénozoïque (domaine Nord-Ouest Panafricain) $d_5 = 2,6 \text{ g/cm}^3$; 6. TTG charnockite datant du Méso-Archéen (sous-sol précambrien) $d_6 = 2,69 \text{ g/cm}^3$; 7. Sables et argiles (Chaîne Panafricaine) $d_7 = 2,00 \text{ g/cm}^3$; 8. Couverture phanérozoïque $d_8 = 2,43 \text{ g/cm}^3$; 9. Formation volcano-métamorphique du Néoprotérozoïque avec relique de la LVC (domaine Ouest Panafricain) $d_9 = 2,7 \text{ g/cm}^3$; 10. Structures basaltiques et Gneiss-granulitique de la LVC (zone mobile Nord-Ouest Panafricaine) $d_{10} = 2,85 \text{ g/cm}^3$; 11. Nappe tectonique de charriage et déversement (domaine Sud panafricain) sur le

Craton du Congon $d_{11} = 2,70 \text{ g/cm}^3$; 12. Exhumation et poussée de la croûte profonde sur le Craton du Congo $d_{12} = 2,9 \text{ g/cm}^3$; 13. Croûte de la zone mobile panafricaine associée au métamorphisme granulitique $d_{13} = 2,78 \text{ g/cm}^3$; 14. Gneiss intrusive (Craton du Congo) $d_{14} = 2,75 \text{ g/cm}^3$; 15. Granites (Craton du Congo) $d_{15} = 2,57 \text{ g/cm}^3$; 16. Nappe de Yaoundé associée au métamorphisme granulitique $d_{16} = 2,65 \text{ g/cm}^3$; 17. Méta-sédiment du paléoprotérozoïque (domaine central Panafricain) $d_{17} = 2,35 \text{ g/cm}^3$; 18. Granitoïde Syn-à-post tectonique intrusif (zone mobile Centre Panafricain) reposant sur le socle paléoprotérozoïque $d_{18} = 2,60 \text{ g/cm}^3$; 19. Socle de la zone centrale de la Chaîne panafricaine du paléoprotérozoïque $d_{19} = 2,79 \text{ g/cm}^3$; 20. Intrusion TTG chanockite du Craton du Congo $d_{20} = 2,69 \text{ g/cm}^3$; 21. Roches volcaniques : rhyolite (zone mobile centre Panafricaine) $d_{21} = 2,54 \text{ g/cm}^3$.

De plus, des cinq profils tracés, nous constatons que seul le profil 1 (P1) met en évidence la Chaîne Panafricaine localisée près de la bordure Nord-Ouest du CC et s'étend suivant la direction Nord-Sud en coupant les contrastes de gradients du bras Nord-Ouest traversant la LVC. Pour ce qui est de la bordure Nord-Ouest du CC, sur laquelle passe le profil 2 (P2), cette dernière semble être plus proche de la LVC et en contact avec la couche géologique d'origine volcanique qui aurait été modifiée par la variation de la pression et de la température due au métamorphisme dans cette localité (Figure 3.43), contrairement aux profils P3, P4, et P5 où la bordure Nord du Craton du Congo se montre beaucoup plus éloignée de la LVC. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'après la collision continentale évoquée par Toteu et al. (2004) à la bordure Nord du Craton du Congo, le soulèvement et la poussée de la croûte profonde de forte densité se seraient montrés plus importants au point où les fragments de blocks ont pu basculer en direction du Plateau de l'Adamaoua et auraient contraint cette dernière à presser d'avantage les structures volcano-plutoniques pour éloigner la LVC du CC.

En ce sens, au vue des résultats qu'illustrent nos modèles, nous arrivons à la conclusion qu'il existe une interaction entre le Craton du Congo et la Ligne Volcanique du Cameroun telle que la contrainte semble beaucoup plus importante au Nord-Ouest du Craton du Congo.

Ainsi, si notre interprétation est correcte, elle pourra expliquer l'interaction entre la LVC et le Craton du Congo comme contrainte mécanique de compression des structures volcano-plutoniques de la LVC par les structures lithosphériques du manteau froid du Craton du Congo, les structures denses du Plateau de l'Adamaoua et du Fossé de la Bénoué. Un modèle géophysique synthétique 3D des structures géologiques incluant la LVC et le CC est proposé (Figure 3.49) afin de ressortir de manière plus précise la géométrie des structures géologiques du sous-sol de la lithosphère de la LVC et le CC.

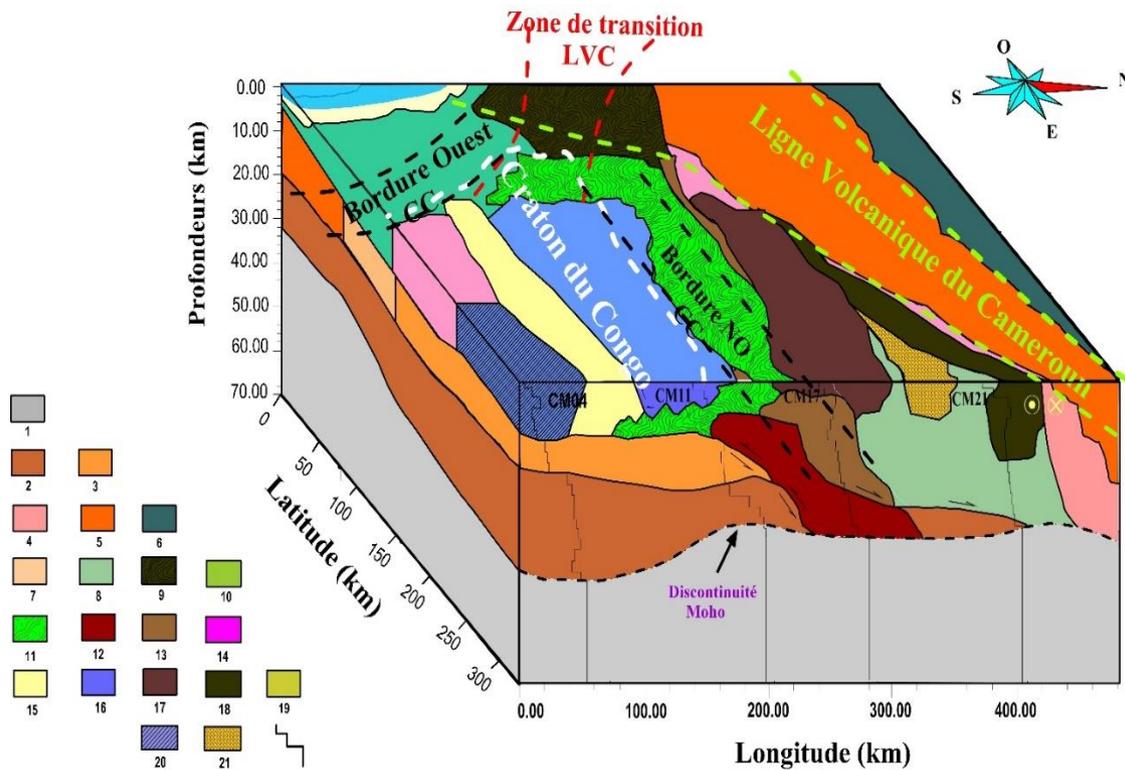


Figure 3.49 : Modèle géophysique synthétique 3D des structures géologiques de la région d'étude.

3.8. Discussion et validation des résultats

Dans ce travail, l'investigation de la lithosphère du sous-sol au Cameroun et ses environs est faite ; ainsi : 1) nous avons procédé à sa structuration globale afin de mettre en évidence les accidents tectoniques que regorge le sous-sol de la région d'étude ; 2) nous avons appliqué un filtre passe-bas sur les anomalies gravimétriques et magnétiques dans le but d'essayer de comprendre davantage l'origine de la LVC ; 3) les modèles gravimétriques du sous-sol de la lithosphère de la LVC et le Craton du Congo sont établis dans le but de comprendre leur interaction.

3.8.1. Structuration globale du sous-sol camerounais

Dans ce travail, les données gravimétriques et magnétiques sont exploitées pour la cartographie des linéaments du Cameroun. Les résultats obtenus reposent sur un processus que nous avons adopté dans ce travail. Ainsi, les filtres numériques tels que le prolongement vers le haut, les gradients verticaux et horizontaux ont été utilisés pour transformer, analyser les anomalies gravimétriques et magnétiques afin de localiser les grands traits structuraux de la lithosphère du sous-sol du Cameroun ; suite à laquelle le filtre de déconvolution d'Euler a été exploité pour déterminer la profondeur moyenne de chaque trait structural localisé.

La carte structurale (Figure 3.26) établie dans ce travail nous montre un sous-sol camerounais fortement accidenté dans son ensemble. Les traits structuraux localisés représentent la conséquence des phénomènes géodynamiques dans la lithosphère terrestre au Cameroun.

Au Cameroun, les résultats des études structurales ont déjà conduit à la structuration d'un ensemble et principales unités litho-tectoniques sur la Chaîne Panafricaine et la partie cratonique. Il s'agit : du Cisaillement Centre camerounais (CCC), la faille de Fouban-Tibati-Banyo (FFTB) qui sont des accidents ductiles (Nzenti et al., 1988 ; Ngako et al., 2003 ; Dumont, 1986). Les travaux de Dumont (1986) ont montré que le Cisaillement Centre Camerounais (CCC) traverse le Cameroun du Nord-Est au Sud-Ouest.

Les travaux sur l'imagerie des structures de la croûte du sous-sol du Sud-Cameroun et leurs implications sur la tectonique à partir des approches qualitatives et quantitatives ont permis de caractériser les structures de la croûte dans cette région et de retracer l'évolution du CC et la localisation des traits structuraux caractérisant les bordures Nord et Ouest du Craton du Congo (Nguiya et al., 2018). Cette étude, vient confirmer la présence des failles localisées dans la partie méridionale par ces auteurs et qui marquent donc les zones de transition Nord et Ouest entre la Chaîne panafricaine et le CC.

Dans le passé, l'hypothèse de collision continentale qui implique le Craton du Congo et la bordure active du Centre-Nord du Cameroun, avait été proposée (Toteu et al., 2004). Ce phénomène de collision pourrait être la cause principale ayant déclenché plusieurs séries d'évènements géodynamiques qui ont affecté la Chaîne Panafricaine dans le passé. La présence des linéaments gravimétriques et discontinuités localisées dans le sous-sol de la croûte au Cameroun en particulier les zones de transition Nord et Ouest entre le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine au Cameroun incluant la LVC est la preuve de l'existence d'un tel évènement.

Les résultats de l'investigation pour la délimitation des linéaments dans le Sud-Cameroun à partir des données gravimétriques plus précisément au Sud-Ouest (Owona Angue et al., 2013), ont permis d'établir une carte des linéaments montrant les principaux évènements tectoniques et révélant principalement que la zone est marquée par la faille de Kribi- Campo à l'Ouest du CC. Ce travail a pu confirmer la présence de ces accidents tectoniques localisés par ces auteurs.

Jean Marcel et al. (2018) dans leurs travaux d'investigation géophysique de la LVC dont le but était de faire une validation des modèles EGM 2008, ont pu recenser un certain nombre d'accidents tectoniques caractéristiques du sous-sol de cette région. Tout de même, dans ce travail, nous avons procédé à la structuration globale du sous-sol camerounais afin de proposer une vision synoptique des traits structuraux caractéristiques du Cameroun sous la base des données gravimétriques terrestres et magnétiques couplées. Ainsi, les accidents tectoniques localisés par ces auteurs ont permis de confirmer la présence de ces traits

structuraux et de localiser les nouveaux linéaments sur la dite LVC (Cheunteu Fantah et al., 2022). Nos résultats nous montrent à quel point la LVC est marquée par un grand nombre d'accidents tectoniques qui pourraient avoir des origines différentes. A l'échelle régionale, notre analyse structurale effectuée dans la région d'étude permet de voir que le Cameroun a un sous-sol intracrustal fortement accidenté.

Nous rappelons que les grands traits structuraux localisés au Cameroun (la faille de Tcholliré – Banyo (FTB), la faille de Kribi-Campo (FKC), la zone de Cisaillement Centre camerounais (CCC), la faille de la Sanaga (FS), ont été localisés par les investigations géologiques (Toteu al., 2001 et 2004 ; Njanko et al., 1999 ; Njonfang et al., 2006). Ainsi, la direction, l'orientation et la distance de certaines discontinuités ont été localisées grâce à la méthode d'extrapolation afin de localiser certains linéaments que nous présentent les cartes géologiques (Toteu al., 2001 et 2004 ; Meert et Lieberman, 2008). En ce sens, nous avons adopté les méthodes géophysiques pour la structuration globale de la région d'étude avec une approche scientifique s'appuyant sur les marqueurs tels que la densité et la susceptibilité magnétique des roches. C'est ainsi que cette étude vient confirmer les traits structuraux mis en évidence par ces travaux géologiques et améliorer la connaissance des directions structurales. De plus, de nouveaux linéaments ont été identifiés, venant compléter ceux déjà été localisés dans les travaux antérieurs.

Toutefois, les formations des structures de très forte densité sont d'autant plus grandes avec la profondeur. Compte tenu des phénomènes de convection mantellique, connus comme étant les causes de la tectonique des plaques lithosphériques, il devient pratiquement impossible d'observer une stratification horizontale plus nette c.-à-d. un arrangement uniforme et des couches horizontales sur toute l'environnement souterrain. Les conséquences de ces phénomènes peuvent s'expliquer par la présence des failles, des zones de contact et des structures intrusives dans le sous-sol.

3.8.2. Origine de la Ligne Volcanique du Cameroun

D'après les travaux géologiques antérieurs il est aujourd'hui connu que la LVC est d'une linéarité remarquable suscitant l'attention des chercheurs afin de s'interroger sur son origine. Cette préoccupation est un sujet qui a fait et continue de faire l'objet des travaux de recherche en physique de l'environnement terrestre. En ce sens, deux grandes hypothèses avaient été établies : l'hypothèse d'un point chaud proposée par Lee et al. (1994) et l'hypothèse d'une ligne chaude d'après (Fairhead et Okereke, 1987 ; Nnange et al., 2000, Adams et al., 2015). Ces différents travaux avaient un objectif commun celui de comprendre d'avantage l'origine de la LVC avec des procédés différents.

Dans le même esprit, et sous la base des données gravimétriques, l'analyse de sa structure a été faite. Dans un premier temps, l'interprétation qualitative des anomalies de Bouguer a permis de constater que la LVC est localisée sur deux zones d'anomalies gravimétriques à savoir :

- les anomalies positives localisées sur le Mont Cameroun et les localités frontalières avec le Nigéria et l’Océan Atlantique entre les longitudes 8° E à 10,5° E et les latitudes 4,5° N à 6° N ;
- les anomalies négatives, de direction NE-SW dans les localités de Bafang, et Tignère, entre les longitudes 10° E à 14° E et les latitudes 5,5° N à 8° N (Figures 3.4 et 3.6).

De plus, la portion Ouest de notre région d’étude est caractérisée par des variations abruptes des anomalies et de gradients gravimétriques qui migrent en direction de l’Ouest pour se diviser en deux bras : 1) un bras en direction du Sud passant par Kribi et Campo. Elle a autrefois été considérée comme étant la faille de Kribi-Campo qui traverse ces deux localités (Toteu et al., 1994 ; Tadjou et al., 2009 ; Owona et al., 2011, 2013 ; Ngatchou et al., 2014) ; 2) le second bras suivant la direction NO évolue et traverse la LVC en couissant le long de la bordure des anomalies positives du Fossé de la Bénoué jusqu’au nord du Cameroun. Cette zone de contraste de gradients d’anomalies gravimétriques NO traversant la LVC est considérée dans ce travail comme une zone de transition des anomalies positives et négatives observées sur la LVC. Nous pensons que la présence de ce gradient pourrait expliquer l’interaction entre la LVC et le CC que nous considérons être la conséquence due à la contrainte de poussée de la lithosphère océanique vers la bordure continentale de la Chaîne Panafricaine, suivie d’une collision qui aurait provoqué l’enfouissement de la plaque océanique sous les structures de la lithosphère continentale de ladite Chaîne Panafricaine (Cheunteu Fantah et al., 2023). Ainsi, ce phénomène aurait probablement provoqué par la suite la remontée de la lithosphère telle qu’elle est observée autour et sur le Mont Cameroun et engendré cette zone de contraste de gradients qui traverse la LVC.

Puisque nous nous intéressons dans cette partie à la LVC, sa structure continentale, est caractérisée par les anomalies de Bouguer négatives (Figure 3.52c). Ainsi, compte tenu du fait que la LVC est localisée dans les régions à très hautes altitudes (Figure 3.52a), engendrant des excédents de masse sur sa croûte, elle serait tout de même caractérisée par le phénomène d’isostasie qui se prononce plus important au Nord-Ouest et dans la partie Nord de l’Adamaoua. De plus, connue comme étant une région volcanique, les effets thermiques caractéristiques de sa zone, associés à sa masse pourraient contribuer davantage à créer une surcharge locale sur sa lithosphère. Ceci peut s’expliquer par la présence des anomalies à l’air libre positives. Au Cameroun, on observe deux grandes tendances linéaires de perturbation gravimétrique des anomalies à l’air libre (Figure 3.50b) localisées sur la LVC et les limites géophysiques du CC avec la CP qui viennent expliquer cette notion de compensation isostasie. La LVC est caractérisée par les anomalies magnétiques qui se montrent plus importantes que celles localisées sur le Craton du Congo (Figure 3.50d).

La LVC bien qu’elle soit une région volcanique, est le siège de plusieurs volcans parmi lesquels le plus actif est celui du Mt. Cameroun. Le Mt Cameroun, de par sa position géographique, est localisé dans la Région du Sud-Ouest au Cameroun. Etant un volcan actif, il a déjà fait l’objet de plusieurs éruptions volcaniques

dans le passé (7^e fois au cours du 20^e siècles) dont la première a débuté en 1909 et la plus récente du 28 Mai au 19 Juin 2000. Cependant, le Mt Cameroun est entièrement couvert par les anomalies de Bouguer positives (Figure 3.50c), nous laissant croire qu’il est situé au-dessus d’une zone de subduction dans laquelle la plaque océanique s’enfonce sous la plaque continentale. En admettant l’hypothèse que le Mt. Cameroun est situé sur une zone de subduction, nous pensons également que l’enfouissement de la lithosphère océanique sous la lithosphère continentale du Mt. Cameroun serait à l’origine de l’existence des effets thermiques constamment actifs sous le Mt. Cameroun.

Quant aux anomalies du champ magnétique total réduit à l’équateur, ces dernières se montrent plus intéressantes sur la LVC continentale contrairement aux anomalies de Bouguer dans cette région (Figure 3.50d). La disposition des anomalies des champs gravimétriques, magnétiques, à l’air libre et la topographie du Cameroun permettent de mieux apprécier leurs ondulations (Figure 3.50).

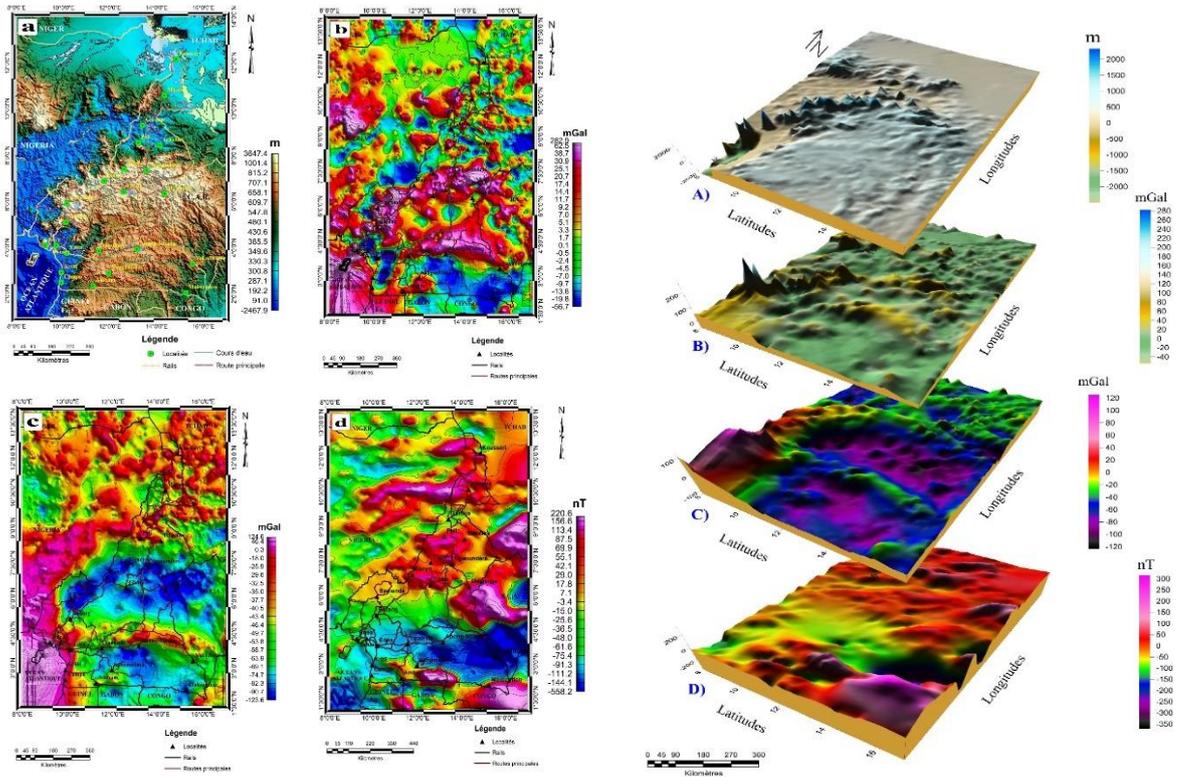


Figure 3.50 : Illustration : a) Topographie du Cameroun ; b) Anomalies à l’air libre du Cameroun ; c) Anomalies de Bouguer du Cameroun ; d) Anomalies du champ magnétique total réduit à l’équateur.

3.8.3. Inversion 3D des anomalies gravimétriques

a. Paramètres d’inversion 3D

Afin de répondre à la préoccupation sur l’existence d’une quelconque interaction entre la Ligne Volcanique du Cameroun et le Craton du Congo, nous nous sommes proposé dans un premier temps d’effectuer

l'inversion 3D des données gravimétriques de la LVC et le Craton du Congo. Pour l'inversion, quelques paramètres ou données d'entrée ont été pris en compte ; il s'agit entre autre :

- la grille contenant les anomalies gravimétriques de la LVC et le Craton du Congo,
- les densités des structures géologiques de la zone choisie pour l'inversion 3D,
- la topographie de la LVC, et le Craton du Congo incluant la zone de transition,
- les gradients horizontaux correspondant aux contacts latéraux des structures géologiques,
- la profondeur d'investigation estimée.

La disposition progressive des cinq profils de direction N-S pris sur la LVC et le CC pour les résultats de l'inversion 3D des anomalies gravimétriques (Figure 3.32a) permet d'établir la distribution spatiale et verticale des blocs de densités et de montrer que la LVC est associée à des structures géologiques de faibles densités sur des grandes profondeurs. Nos résultats sont en corrélation avec les résultats des travaux sismiques de (Tokam Kamga et al., 2010 ; Fishwick, 2010) puisqu'ils avaient également montré que la lithosphère est plus dense sur le CC et le Plateau de l'Adamaoua contrairement à celle de la LVC.

b. Modélisation des structures de la lithosphère du sous-sol camerounais

– Contraintes et paramètres à l'élaboration des modèles

Pour la réalisation des modèles dans cette étude, les anomalies de Bouguer du Modèle Gravitationnel Global (XGM 2019e_2159) ont été exploitées (Figure 3.28a). L'analyse qualitative de ces anomalies a permis d'observer : 1) les zones d'anomalies positives localisées sur les bordures Nord et Ouest du CC, la LVC (Mont Cameroun et dans l'Océan Atlantique), le Fossé de la Bénoué et dans l'Extrême Nord ; 2) les zones d'anomalies négatives localisées au centre du Craton du Congo, la LVC à Bafang, suivant la direction NE-SO, dans le Plateau de l'Adamaoua et les zones de discontinuités majeures matérialisant les fractures intracrustales de la lithosphère.

Concernant le choix des profils ayant servi pour la réalisation des modèles, celui-ci repose sur l'un de nos objectifs visant à étudier l'interaction entre la LVC et le CC. Ainsi, nous nous sommes intéressés à la partie de la LVC se rapprochant au maximum du CC puis les profils ont été tracés de telle sorte qu'ils puissent passer simultanément sur ces deux structures. De plus le marqueur d'onde en gravimétrie étant la densité des masses, les contrastes de densité des modèles sont fonction du choix convenable des densités des structures géologiques suivant leurs chronologies. Cette phase est très délicate et voire même la plus convaincante.

Dans la pratique, ces contrastes sont le plus souvent calculés à partir des procédés bien précis, sur la base des échantillons prélevés au cours des campagnes de terrain. Dans ce travail, ne disposant pas des facilités techniques pour évaluer nos densités, le choix a été fait sur la base des abaques (gammes de valeurs) disponibles dans la littérature scientifique (Telford et al., 1990 ; Burger et al., 2006).

Une autre difficulté dans la modélisation géophysique est l'estimation de la profondeur d'investigation et les horizons des sources perturbatrices du champ de gravité terrestre observé à la surface. Cette donnée est parfois fixée de manière arbitraire à l'issue de nombreux tests. Ainsi, lorsque les connaissances géologiques sont abondantes et précises, elles peuvent également aider à l'estimation de cette valeur. Bien que les méthodes d'estimation des profondeurs soient parfois acceptées, elles ne s'inscrivent pas dans le registre des méthodes géophysiques classiques permettant de calculer ou d'estimer les profondeurs des sources perturbatrices.

Dans le cadre de ce travail, puisque nous nous intéressons à la modélisation dans la croûte en faisant ressortir l'ondulation du Moho, la profondeur d'investigation a été fixée à 70 km. Cette profondeur permet de se maintenir près de l'objectif.

– **Modèles gravimétriques des structures géologiques**

La modélisation gravimétrique 2D^{1/2} des anomalies gravimétriques sous la LVC et le Craton du Congo montre une distribution complexe des blocs de structures de densités (Cheunteu Fantah et al., 2023), d'origine et de processus de formation différents dans la croûte (Figure 3.51). Sur la Chaîne Panafricaine, on peut voir que le domaine Sud Panafricain est associé au métamorphisme granulitique par l'exhumation et la poussée de la croûte profonde suivies du déversement de la nappe tectonique sur le Craton du Congo. Dans le passé, les travaux géologiques de Toteu et al., 2004 ont révélé que la bordure Nord du CC avec la Chaîne Panafricaine est le résultat d'une collision entre ces deux grandes structures géologiques. Nguiya et al., 2018 ont pu montrer grâce à l'analyse des signatures gravimétriques avec la profondeur que cette collision était suivie par l'enfouissement des structures du CC sous la Chaîne Panafricaine. Cette hypothèse avait également été proposée par Tadjou et al. (2009) et Owona Angue et al. (2013). Cette étude a été réalisée dans le but de confirmer ces résultats en proposant des modèles géophysiques qui viennent proposés une géométrie de son sous-sol sous la LVC et le CC.

Ce soulèvement suivi du déversement est la conséquence du phénomène de collision continentale de la Chaîne Panafricaine avec le CC évoqué par Toteu et al. (2004). L'exhumation et la poussée de la croûte profonde observées dans la bordure Nord du Craton du Congo avec la Chaîne Panafricaine auraient probablement été déclenchées par les processus thermo-métamorphiques des flux convectifs en provenance du manteau inférieur. De plus, nos modèles 2D^{1/2} montrent que la poussée et la remontée de la croûte profonde à la frontière Nord du Craton du Congo auraient contraint les fragments de block du domaine Sud Panafricain associé au métamorphisme granulitique à basculer en direction des granitoïdes de la croûte juvénile néoprotérozoïque du domaine Nord Panafricain et les structures volcano-plutoniques datant du Cénozoïque du domaine Ouest Panafricain de la LVC.

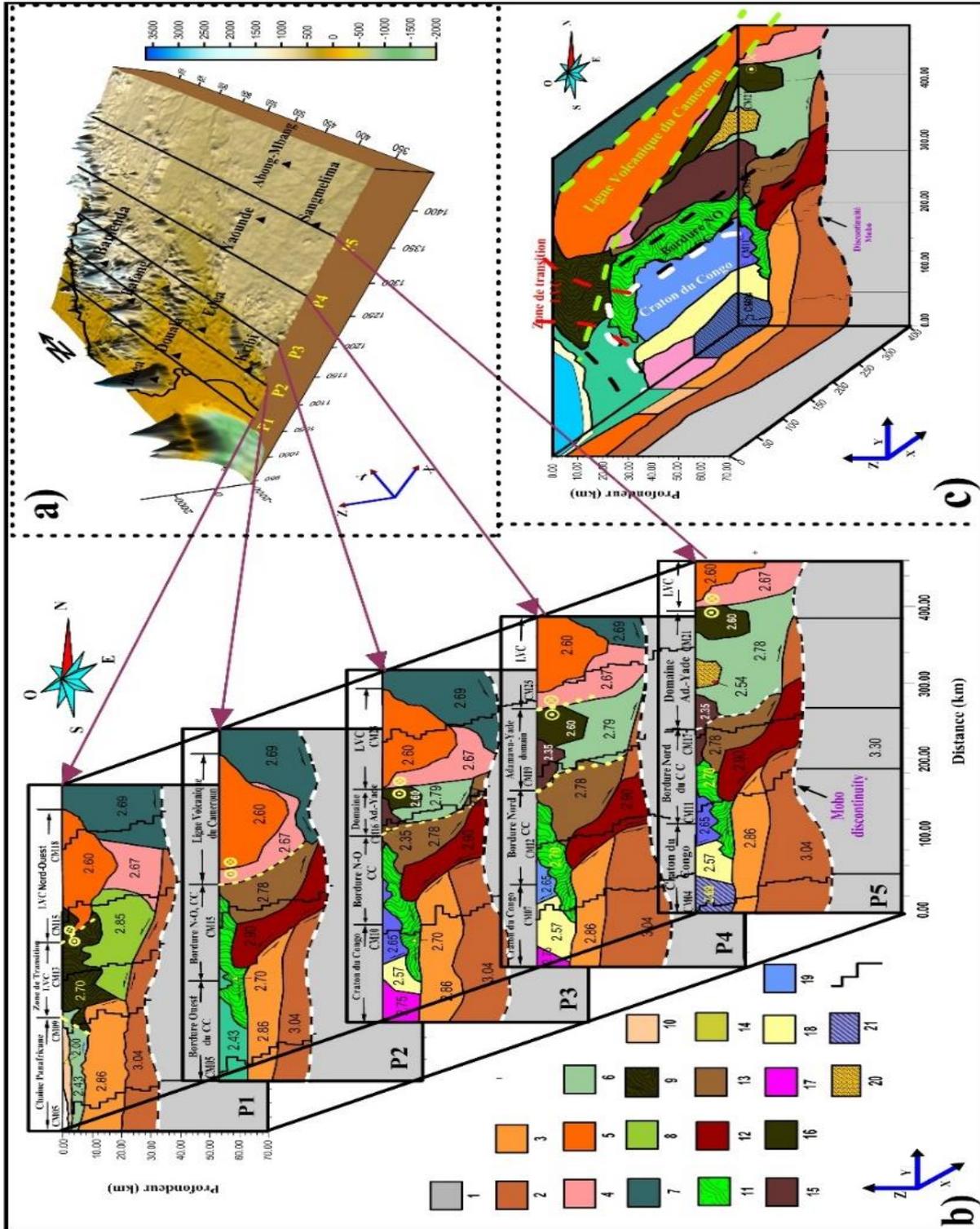


Figure 3.51 : Illustration : a) Carte topographique 3D de la LVC et le Craton du Congo sur laquelle cinq profils de direction N-S ont été tracés dans la partie Sud-Cameroun ; b) Superposition 3D des modèles 2D ½ des profils choisis sur la LVC et le CC ; c) Modèle géophysique synthétique 3D des structures géologiques de la région d’étude.

3.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, interprété, discuté et validé les résultats obtenus dans ce travail réalisé à partir des données gravimétriques terrestres, le Modèle Gravitationnel Global (XGM 2019e_2159) et la grille des anomalies magnétiques du Cameroun.

Dans la première partie, nous avons procédé à la structuration globale des accidents tectoniques du sous-sol intracrustal au Cameroun. Ce résultat a permis de proposer une carte de linéaments géophysique précise afin d'obtenir une vision synoptique de l'identité d'un contexte tectonique complexe et multi fracturé de la lithosphère du Cameroun.

Dans la deuxième partie, l'inversion 3D et la modélisation 2D^{1/2} ont été réalisées dans le but de contribuer davantage à la compréhension de l'origine de la LVC et son interaction avec le Craton du Congo. Ainsi, nos résultats nous amènent à suggérer que les mouvements des plaques tectoniques au niveau de l'Océan Atlantique dûs à l'extension des plaques océaniques auraient pu avoir un impact significatif sur la lithosphère du Mt. Cameroun et celle froide du Craton du Congo et que cette dernière aurait à son tour basculé en direction du Nord et NO en s'enfouissant sous la lithosphère de la zone mobile Sud Panafricaine.

Par la même occasion, nous suggérons également que la collision continentale (d'après Toteu et al., 2004) de la lithosphère du CC avec la Chaîne Panafricaine sur la bordure Nord aurait provoqué le basculement de la croûte mobile panafricaine associée au métamorphisme et les structures denses du Plateau de l'Adamaoua pour presser d'avantage les structures volcano-plutoniques de la LVC. C'est donc après cette phase que les structures des roches volcaniques et plutoniques de la LVC auraient été canalisées par les structures denses du Plateau de l'Adamaoua et le Craton du Congo lors de leur formation. C'est ainsi que notre hypothèse semble être logique pour essayer d'expliquer davantage l'origine de la LVC, puisqu'elle ne tient pas compte de la chronologie de formation des structures géologiques sur la LVC.

Nos analyses qualitatives à partir du filtre passe-bas et quantitatives via nos modèles 2D1/2 nous révèlent que la LVC et le CC sont non seulement d'origine mantellique mais ont une interconnexion également mantellique.

Conclusion générale et perspectives

L'investigation géophysique du sous-sol camerounais par les méthodes gravimétriques et magnétiques a été faite dans cette étude.

Nous avons étudié la lithosphère du Cameroun afin de contribuer davantage à la compréhension de son sous-sol. Notre travail s'est articulé autour d'une problématique à savoir : 1) la structuration globale de la lithosphère du Cameroun ; 2) la question sur l'origine de la Ligne Volcanique du Cameroun ; 3) et la préoccupation sur l'interaction entre la LVC et le Craton du Congo.

Pour cette problématique, les objectifs dégagés au début de cette étude étaient :

- d'identifier les signatures gravimétriques et magnétiques du Cameroun,
- d'appliquer le filtre numérique adéquat aux anomalies des signatures gravimétriques et magnétiques afin d'étudier le comportement des anomalies avec la profondeur dont le but principal est de contribuer davantage à la compréhension de l'origine de la LVC,
- établir une carte structurale interprétative mettant en évidence les traits structuraux du sous-sol du Cameroun,
- de faire l'inversion 3D des anomalies gravimétriques afin de modéliser les blocks de densité dans le sous-sol de la LVC et le Craton du Congo,
- de caractériser sa structure géométrique en proposant les modèles 2D^{1/2} et 3D du sous-sol de la LVC et du Craton du Congo à partir des anomalies gravimétriques.

Pour atteindre ces objectifs nous nous sommes proposés d'exploiter les données gravimétriques et la grille des anomalies magnétiques EMAG V2 (Earth Magnetic Anomaly Grid). Celles-ci ont ensuite été numérisées afin de dresser respectivement des cartes d'anomalies de Bouguer et de champ magnétique total du Cameroun. Ces cartes des anomalies ont été exploitées pour l'analyse structurale de la lithosphère du Cameroun. Compte tenu de notre problématique et les objectifs fixés, nous avons tout d'abord procédé à la structuration globale de la lithosphère du Cameroun.

Dans cette partie, nous avons proposé une carte de linéaments géophysiques précise. L'apport des données gravimétriques et la grille des anomalies magnétiques EMAG V2 s'est avérées efficace en ce sens que nous avons obtenu une vision synoptique d'un nombre important d'accidents tectoniques répartis sur tout l'ensemble de la lithosphère du Cameroun. Les résultats obtenus ont permis de confirmer les traits structuraux localisés dans les travaux géologiques antérieurs et d'identifier de nouveaux accidents qui jusqu'à présent restaient encore inconnus.

L'approche méthodologique simple basée sur l'utilisation des filtres numériques appliqués aux anomalies et leurs gradients a contribué à l'élaboration d'une carte de linéaments gravimétriques et magnétiques que renferme le sous-sol intracrustal du Cameroun. C'est ainsi que nous avons localisé :

- les linéaments qui caractérisent la faille du Cisaillement Centre camerounais ou faille de l'Adamaoua,
- les linéaments qui caractérisent la faille de Tcholiré-Banyo,
- les linéaments de la faille de la Sanaga,
- les linéaments des failles qui délimitent les bordures Nord et Ouest du Craton du Congo avec la Chaîne Panafricaine.

Dans la deuxième partie de cette étude nous avons attaqué la question sur l'origine de la LVC pour essayer d'apporter notre contribution concernant son origine. Le filtre passe-bas a été exploité et appliqué aux anomalies des données utilisées dans ce travail afin d'étudier le comportement des anomalies avec la profondeur au-delà du Moho. Les résultats de notre analyse qualitative nous ont amené à la conclusion que les processus géodynamiques responsables de sa formation semblent être complexes et diversifiés. De plus, ces mêmes processus géodynamiques responsables de sa formation seraient répartis sous la LVC en différents points et à des profondeurs différentes dans la lithosphère.

Les résultats de l'inversion gravimétrique 3D réalisée avec le logiciel Grablox 2.0 nous montrent une distribution et une augmentation des densités avec la profondeur. Ces résultats ont également montré des faibles densités sur la LVC.

Les résultats de la modélisation $2D^{1/2}$ ont montré l'exhumation et la poussée de la croûte profonde des structures du domaine Sud Panafricain, suivi d'un déversement de la nappe tectonique sur le Craton du Congo. La topographie à haute altitude observée de nos jours sur la Ligne Volcanique du Cameroun est la preuve de l'existence des phénomènes géodynamiques dans le manteau dans ces zones. Le contraste de gradient d'anomalies observé à l'Ouest et traversant la LVC nous témoigne qu'il pourrait y avoir une interaction entre le Craton du Congo avec la LVC. Ainsi, cette interaction peut être interprétée d'après nos modèles comme étant une contrainte mécanique de compression des structures volcaniques et volcano-plutoniques de la LVC par les structures lithosphériques denses du Craton du Congo et celle du Fossé de la Bénoué.

Les objectifs étant atteints, dans la mesure où d'une part, les grands traits structuraux caractéristiques du sous-sol de la lithosphère du Cameroun ont été localisés, et d'autre part grâce aux profils pris sur la LVC et le CC, les modèles $2D^{1/2}$ ont été proposés afin de caractériser la géométrie des structures du sous-sol de cette portion d'étude. Il a donc été possible de proposer une hypothèse visant à expliquer

davantage l'origine de la Ligne Volcanique du Cameroun. Puisque que la Ligne Volcanique sans progression d'âge remet en question bon nombre de nos connaissances actuelles sur la dynamique du manteau et les moteurs de l'activité volcanique, des études récentes ont donné un aperçu de la sismicité et de la structure de la croûte puis du manteau supérieur de la LVC. Ceci suggère que cette dernière ne se forme pas principalement à partir d'un panache du manteau ou de plusieurs panaches mantellique comme suggéré pour les lignes volcaniques progressives sans âge dans le Pacifique sud. Ce pendant la LVC est probablement influencé par l'interaction entre la convection du manteau et les structures lithosphériques préexistantes uniques dans la région. Des questions demeurent sur les contributions relatives des différentes structures préexistantes et sur la nature des portions offshore de la LVC. Nous pensons que des études plus approfondies axées sur le secteur océanique et les structures à plus petite échelle du secteur continental sont nécessaires pour apporter une lumière assez édifiante sur l'origine de la LVC.

Toutefois, il est important de savoir que les données utilisées dans le cadre de ce travail respectivement pour la structuration globale et la modélisation ont été prises avec un pas variant de 3 km à 4 km et un maillage de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (11 x11 km). Il est par conséquent envisageable, pour améliorer la résolution de ces données et accroître la qualité des résultats par les travaux suivants :

- les campagnes de densification des points et de prise de mesures pour générer une nouvelle base de données gravimétriques du Cameroun en adoptant des mailles plus serrées afin de déceler avec plus de précision les structures géologiques du sous-sol,
- l'application de nouvelles corrections sur les données à collecter en utilisant comme modèle de géoïde, récent du Cameroun CGM05 (Cameroonian Geoid Model 2005, Kamguia et al., 2005), afin d'évaluer avec précision les anomalies de Bouguer et de champ magnétique total,
- comme les linéaments sont des structures rectilignes et faisant partie des objectifs de ce travail, une perspective de développement intéressante serait de poursuivre ce projet afin de mettre au point un algorithme de détection des accidents tectoniques pour de courtes longueurs d'onde des anomalies,
- coupler d'avantage d'autres méthodes géophysiques dites de résistivités telles que les méthodes géoélectriques et magnétotelluriques pour une bonne compréhension de la lithosphère.

Références bibliographiques

- Abdelsalam, M. G., Gao, S. S. and Liegeois, J. P., 2011.** Upper mantle structure of the Saharan metacraton. *J. Afr. Earth Sci.* 60, 328 - 336.
- Abdelsalam, M. G., Liegeois, J. P. and Stern, R. J., 2002.** The Saharan Metacraton. *Journal of African Earth Sciences* 34, 119–136.
- Adams, A. N., Wiens, D. A., Nyblade, A. A., Euler, G. G., Shore, P. J. and Rigobert, T., 2015.** Lithospheric instability and the source of the Cameroon Volcanic Line: Evidence for Rayleigh wave phase velocity tomography. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120, 1708 - 1727.
- Baranov, V., 1957.** A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo gravimetric anomalies. *Geophysics* 22: 359-383.
- Baranov, V. and Naudy, H., 1964.** Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics* 29, 67-71.
- Barbey, P., Macaudiere, J. and Nzenti, J. P., 1990.** High pressure dehydration melting of metapelites. Evidence from the migmatites of Yaoundé (Cameroon). *Journal of Petrology* 31: 401- 427.
- Barongo, J. O., 1984.** Euler's differential equation and identification of the magnetic point-pole and point-dipole source, *Geophysics*, 49.1549-1553.
- Basseka, C. A., Shandini, Y. and Tadjou, J. M., 2011.** Subsurface Structural Mapping using Gravity data of the Northern Edge of the Congo Craton, South Cameroon. *Geofisica*, 28, 229-245
- Bessoles, B. et Lasserre, M., 1977.** Le complexe de base du Cameroun. *Bulletin de la Société géologique de France*, 7 : 1085-1092.
- Bessoles, B. et Trompette, R., 1980.** Géologie d'Afrique. La Chaîne Panafricaine, zone mobile d'Afrique Centrale (partie sud) et zone soudanaise. *Mémoire BRGM, Orléans* 92: 394p.
- Bhattacharyya, B. K., 1965.** Reduction of magnetic and gravity data on an arbitrary surface acquired in a region of high topographic relief. *Geophysics*, 42, 1411-1430.
- Bhattacharyya, B. K. and Leu, L. K., 1975.** Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to two-dimensional structures. *Geophysics*, 40(6), P.993-1013.
- Black, R., 1967.** Sur l'ordonnance des chaînes métamorphiques en Afrique occidentale. *Chrono Min. Rech. min, Paris*, 364,225-238.
- Black, R., 1966.** Sur l'existence d'une orogénie riphéenne en Afrique Occidentale. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 262, sér. D, 1046 -1049.
- Blakely, R. J., 1995.** Potential theory in gravity and magnetic applications. *Cambridge Univ. Press, Cambridge*. 175p.

- Blakely, R. J. and Simpson, R. W., 1986.** Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51, pp. 1494-1498.
- Bouyo Houketchang, Toteu, S. F., Deloule, E., Penaye, J. and Van Schmus, W. R., 2009.** U-Pb and Sm-Nd dating of high pressure granulites from Tcholliré and Banyo regions: evidence of a Pan-African granulite facies metamorphism in north-central Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 54: 144-154.
- Burger, H., Anne, F. C. and Craig, H. J., 2006.** Introduction to apply Geophysics-Exploring the shallow subsurface. W.W. Norton and Company, New York, USA.
- Burke, K., 2001.** Origin of the Cameroon line of volcano-capped swells. *J. Geol.* 109, 349–362.
- Cady, J. W., 1980.** Calculation of gravity and magnetic anomalies of finite-length right polygone prism. *Geophys, prospect*, 45 (10), 1507-1512.
- Caby, R. and Boessé, J. M. 2001.** Pan-African nappe system in southwest Nigeria: the Ife-Ilesha schist belt. *Journal of African Earth Sciences*, 33: 211-225.
- Cahen, L., Snelling, N. J. and Delhal, J. R., 1984.** The Geochronology and Evolution of Africa. Clarendon Press, Oxford, 512p.
- Cain, J. C., Daniels, W. E., Hendricks, S. J. and Jensen, D. C., 1965.** An evaluation of the main geomagnetic field, 1940-1962. *J. Geophys. Res.*, 70, 3647-3674.
- Cara, M., 1989.** Géophysique. In : Géosciences, (Ed.), Dunod Université, 186 p.
- Casting, C., Feybesse, J. L., Thieblemont, D., Triboulet, C. and 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.
- Cheunteu Fantah, C. A., Mezoue, C. A., Mouzong, M. P., Tokam Kamga, A. P., Nouayou, R. and Nguiya, S., 2022.** Mapping of major tectonic lineaments across Cameroon using potential field data. *Earth, Planets and Space*. 74 (1), 1-19.
- Cheunteu Fantah, C. A., Tokam Kamga, A. P., Mouzong, M. P., Nouayou, R. and Nguiya, S., 2023.** Structure of lithosphere beneath Cameroon using global gravity model data: implications for the setting of the Cameroon Volcanic Line. *Acta Geophysica*. N° 1106, p 22. <https://doi.org/10.1007/s11600-023-1106-4>.
- Clifford, T. N., 1970.** The structural framework of Africa. In Clifford and Gass I. G. (Eds). *African Magmatism and Tectonics*. Oliver and Boyds, Edinburgh: 1-26.
- Clifford, T. N. and Gass, I. G., 1970.** *African Magmatism and Tectonics*. Oliver and Boyds, Edinburg pp. 1-26.
- Collignon, F., 1968.** Gravimétrie de reconnaissance de la République Fédérale du Cameroun, ORSTOM, Paris, p 35.

- Cordell, L. and 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 of Exploration Geophysicists, 181-197.
- Crenn, Y., 1957.** Mesures gravimétriques et magnétiques dans la partie centre de l'A.O.F. Interprétation géologique. Publi, série géophys. ORSTOM ? Paris ? Fr., 43 p.
- Crenn, Y. and Rechenman, J., 1965.** Mesures gravimétriques et magnétiques du Sénégal et en Mauritanie occidentale. Cah. ORSTOM, Paris 6, 1-59.
- Delhal, J. et Ledent, D., 1975.** Données géochronologiques sur le complexe calcomagnésien du Sud-Cameroun. Mus. roy. Afr. centr. Tervuren (Belg.). Rapp. Ann. 1974. 71-76.
- Déruelle, B., Moreau, C., Nkoumbou, C. Kambou, R., Lissom, J., Njonfang, E., Chogomu, R. T. and Nono, A., 1991.** The Cameroon Line: A review. In; A.D. Kampunzu et R.T. Lubala édés., Magmatism in extensional structural setting. Springer-Verlag, p. 274-327.
- Dubois, J., Diament, M., Cogné, J. P. et Mocquet, A., 2001.** Géophysique : cours et exercices corrigés. Dunod 5^e édition, 11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff. ISBN 978-2-10-075293-5, 179-183.
- Dubreuil, P., Guicafre, J., Nouvelot, F. J. et Olivry, C. J., 1975.** Le bassin de la rivière Sanaga. Collection, Monographies hydrologiques ORSTOM. Paris, ISBN 2 – 7099 – 0361 –X.
- Dumont, J. F., 1986.** Identification par télédétection de l'accident de la Sanaga (Cameroun). Sa position dans le contexte des grands accidents d'Afrique Centrale et de la limite nord du craton congolais. Géodynamique 1: 13-19.
- Ebinger, C. J. and Sleep, N. H., 1998.** Cenozoic magmatism throughout east Africa resulting from impact of a single plume. Nature 395, 788–791.
- Ekwueme, B. N. and Kröner, A., 1998.** Single zircon evaporation ages from the Oban Massif, southeastern Nigeria. Journal of African Earth Sciences, 26: 195-205.
- Elsheikh, A. A., Gao, S. S. and Liu K. H., 2014.** Formation of the Cameroon Volcanic Line by lithospheric basal erosion: Insight from mantle seismic anisotropy. Journal of African Earth Sciences 100 (2014) 96–108.
- Fairhead, J. D., 1988.** Mesozoic plate tectonic reconstructions of the central South Atlantic Ocean: the role of the West and Central African rift system. Tectonophysics 155, 181–191.
- Fairhead, J. D. and Binks, R., 1991.** Differential opening of the Central and South Atlantic oceans and the opening of the West African Rift System. Tectonophysics 187, 191–203.
- Fairhead, J. D. and Okereke, C. S., 1987.** A regional gravity study of the West African rift system in Nigeria and Cameroon and its tectonic interpretation. Tectonophysics 143, 141–159.

- Ferré, E. C., Deresis, J., Bouchet, J. L., Lar, A. U. and Peucat, J. J., 1996.** The Pan-African reactivation of Eburnean and Archean provinces in Nigeria: structural and isotopic data. *Journal of the Geological Society London* 153: 719-728.
- Ferré, E. C., Gleizes, G. and Caby, R., 2002.** Obliquely convergent tectonics and granite emplacement in the Trans-Saharan belts of Eastern Nigeria: a synthesis. *Precambrian Research* 114 : 199-219.
- Feybesse, J. L., Johan, V., Maurizot, P. et Abessolo, A., 1986.** Mise en évidence d'une nappe syn-métamorphe d'âge éburnéen dans la partie Nord-Ouest du craton zairois, Sud-Ouest Cameroun. In : Les formations birrimiennes en Afrique de l'Ouest. *Compte rendu de conférences. Occasional Publications-CIFEG.* 105-111.
- Feybesse, J. L., Johan, V., Triboulet, C., Guerrot, C., Mayaga-Mikolo, F., Bouchot, V., Eekondong, J., 1998.** The west Central Africa belts: a model of 2.5-2.0 Ga accretion and two-phase orogenic evolution. *Precambrian Research* 87: 161-216.
- Fishwic, S., 2010.** Surface wave tomography: Imaging of the lithosphere–asthenosphere boundary beneath central and southern Africa. *Lithos* 120 (1-2), 63-73.
- Gallacher, R. J. and Bastow, I. D., 2012.** The development of the Cameroon Volcanic Line: Evidence from teleseismic receiver functions. *Tectonics* 31.
- Ganwa, A. A., Frisch, W., Siebel, W., Ekodeck, G. A., Shang, C. K. and Ngako, V., 2008b.** Archean inheritances in the pyroxene-amphibole bearing gneiss of the Méiganga area (Central North Cameroun): Geochemical and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age imprints. *C.R. Geoscience* 340: 211-222
- Geosoft Inc., 2007.** Oasis Montaj 7.0, Toronto, Canada.
- Gladkikh, V. and Tenzer, R., 2012.** A mathematical model of the global ocean saltwater density distribution. *Pure Appl. Geophys.* 169 (1–2), 249–257.
- Gomez-Ortiz, D., Tejero-Lopez, R., Babín-Vich, R. and Rivas-Ponce, A., 2005.** Crustal density structure in the Spanish Central System derived from gravity data analysis (Central Spain). *Tectonophysics* 403, 131-149.
- Goussi Ngalamo, J. F. G., Sobh, M., Bisso, D., Abdelsalam, A. G., Atekwana, E. and Ekodeck, G.E., 2018.** Lithospheric structure beneath the Central Africa Orogenic Belt in Cameroon from the analysis of satellite gravity and passive seismic data. *Tectonophysics* 745 (2018) 326–337.
- Goussi Ngalamo, J. F. G., Bisso, D., Abdelsalam, M. G., Atekwana, E. A., Katumwehe, A. B. and Ekodeck, G. E., 2017.** Geophysical imaging of metacratonization in the northern edge of the Congo craton in Cameroon. *J. Afr. Earth Sci.* 129, 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.12.010>.
- Grauch, V. J. S., Hudson, M. R. and Minor, S. A., 2001.** Aeromagnetic expression of faults that offset basing fill, Albuquerque basin, New Mexico. *Geophysics* 66, 707-720.

- Guidarelli, M. and Aoudia, A., 2016.** Ambient noise tomography of the Cameroon Volcanic Line and Northern Congo Craton: new constraints on the structure of the lithosphere. *Geophys. J. Int.* 204 (3), 1756–1765.
- Haugou, P. et Koretzky, N., 1943.** Carte géologique du Cameroun N°3 à 1/1500.000 avec notice explicative. Serv. Mines Cameroun, Yaoundé, 3-60.
- Hawkins, L., 1961.** The reciprocal method of interpreting seismic refraction lines. *Geophysics*, 26, 806-819.
- Hildenbrand, T. G., 1983.** FFTFIL: A filtering program based on two dimensional Fourier analysis, U.S. Geol. Survey, Open-File Report 83, 237- 268.
- Hinze, W. J., 2003.** Bouguer reduction density, why 2.67? *Geophysics* 68 (5), 1559–1560.
- Hjelt, S. E., 1992.** Pragmatic Inversion of Geophysical Data. Springer-Verlag, Germany, p 262.
- Hood, J. P., 1965.** Gradient measurements in aeromagnetic surveying, *Geophysics*, 30. 891-902.
- Hussein, M., Mickus, K. and Serpa, L. F., 2013.** Curie point depth estimates from aeromagnetic data from Death Valley and surrounding regions, California. *Pure Appl. Geophys.* 170, 617e632.
- Jean Marcel, Abate, Essi, J. M., Njandjock Nouck, P., Oumarou, S. and Manguelle-Dicoum, E., 2018.** Validation of gravity data from the geopotential field model for subsurface investigation of the Cameroon Volcanic Line (Western Africa). *Earth Planets Space* 66:158.
- Kemgang Ghomsi, F. E., Nguiya S., Mandal, A., Enyegue, F., Nyam, A., Tenzer, R., Tokam Kamga, A. P. and Nouayou, R., 2020.** Cameroon's crustal configuration from global gravity and topographic models and seismic data. *Journal of African Earth Sciences* 161, 103657.
- Kennedy, W. Q., 1964.** The structural differentiation of Africa in the Pan-African tectonic episode. 8th Ann. Rep. Res. Inst. African geol. Univ. Leeds: 48.
- Khattach, D., Mraoui, H., Sbibih, D. et Chennouf, T., 2006.** Analyse multi-échelle par ondelettes des contacts géologiques : application à la carte gravimétrique du Maroc nord-oriental. *C. R. Geoscience* 338, 521-526.
- King, S. D. and Anderson, D. L., 1995.** An alternative mechanism of flood basalt formation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 136, 269–279.
- King, S. D. and Anderson, D. L., 1998.** Edge-driven convection. *Earth Planet. Sci. Lett.* 160, 289-296.
- King, S. D. and Ritsema, J., 2000.** African Hot Spot Volcanism: small-scale convection in the upper mantle beneath Cratons. *Science* 290, 1137–1140.
- Korableff, 1937.** Carte géologique, Cameroun Oubangui Chari à 1/400 000. *Chronique des Mines Paris*, 60 : 926-1028.

- Kornprobst, J. Lasserre, M., Rollet, M. et Soba D., 1976.** Existence au Cameroun d'un magmatisme alcalin Panafricain ou plus ancien : la syénite néphélinique de Nkonglong. Comparaison avec les roches alcalines connues dans la même région. Bulletin de la Société Géologique de France XVIII : 1295-1305.
- Lassere, M. et Soba, D., 1979.** Migmatization d'âge panafricain au sein des formations Camerounaises appartenant à la zone mobile d'Afrique Centrale. C. R. Sommaire Société Géologique de France 2 : 64-68.
- Lassere, M. et Soba, D., 1976.** Age libérien des granodiorites et des gneiss à pyroxène du Cameroun méridional. BuLL B.R.G.M., Fr., (2), sect. IV, no 1, 17-32.
- Lee, D. C., Halliday, A. N., Fitton, J. G. and Poli, G., 1994.** Isotopic variations with distance and time in the volcanic islands of the Cameroon line: evidence for a mantle plume origin. Earth Planet. Sci. Lett. 123, 119-138.
- Le Mouël, J. L., 1970.** Le levé aéromagnétique de la France. Calcul des composantes du champ à partir des mesures de l'intensité. Ann. Geophysics., 26, 299-258.
- Le Mouël, J. L., 1969.** Sur la distribution des éléments magnétiques de France, Thèse de Doctorat de physique. Institut de Physique du Globe de Paris VII, 154p.
- Leseane, K., Atekwana, E. A., Mickus, K. L., Abdelsalam, M. G., Shemang, E. M. and Atekwana, E. A., 2015.** Thermal perturbations beneath the incipient Okavango rift zone, northwest Botswana. J. Geophys. Res. Solid Earth 120, 1210e1228. <http://dx.doi.org/10.1002/2014JB011029>.
- Maden, N., 2010.** Curie-point depth from spectral analysis of magnetic data in Erciyes stratovolcano (Central Turkey). Pure Appl. Geophys. 167, 349-358.
- Marson, I. and Klingele, E. E., 1993.** Advantages of using the vertical gradient of gravity for 3-D interpretation, Geophysics, 58, 1588-1595.
- Matheron G., 1965.** Les variables régionalisées et leurs estimations : une application de la théorie de fonctions aléatoires aux sciences de la nature. Masson et CIE ; Paris, p 362.
- Maurizot, P., Abessolo, A., Feybesse, J. L., Johan, V. et Lecomte, P., 1986.** Etude et prospection minière du sud-ouest Cameroun. Synthèse des travaux de 1978 à 1985. B.R.G.M. Report 85 CMR 066.
- Maus, S., Barckhausen, U., Berkenbosch, H., Bournas, N., Brozena, J., Childers, V., Dostaler, F., Fairhead, J. D., Finn C., Von Frese, R. R. B., Gaina, C., Golynsky, S. b., Kucks, R., Hermann, L., Milligan, P., Morgren, S., Muuler, R. D., Olesen, O., Pilkington, M., Saltus, R., Schreckenberger, B., Thébault, F. and Caratori Tontini, F., 2009.** EMAG2: 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements, Geochemistry, Geophysics, Geosystems. Volume 10, Number 8, ISSN: 1525-2027, Q08005.
- Mbom Abane, S., 1997.** Investigations géophysiques en bordure du Craton du Congo et implications structurales. Thèse de Doctorat d'état ès Sciences. Université de Yaoundé, Cameroun, 180 p.

- Meert, J. G. and Lieberman, B. S., 2008.** The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran-Cambrian radiation. *Gondwana Research* 14 (1-2), 5-21.
- Meyers, J. B., Rosendahl, B. R., Harrison, C. G. A. and Ding, Z. D., 1998.** Deep-imaging seismic and gravity results from the offshore Cameroon Volcanic Line, and speculation of African hotlines. *Tectonophysics* 284, 31–63.
- Montes Lauer, C. R., Trompette, R., Melfli, A. J., Bellieni, G., Demin, A., Bea, A., Piccirillo, E. M., Affaton, P. and Pacca, I. G., 1997.** Panafrican Rb-Sr ages of magmatic rocks from northern Cameroon. Preliminary results. *South-American Symposium on Isotope Geology-Brazil*, June 1997.
- Morgan, W. J., 1983.** Hotspot tracks and the early rifting of the Atlantic. *Tectonophysics* 94, 123–139.
- Mouzung Pemi, M., Kamguia, J., Nguiya, S. and Manguelle-Dicoum, E., 2018.** Depth and lineament maps derived from north Cameroon gravity computed by artificial neural network. *International Journal of Geophysics*, Article ID1298087, p 13.
- Naudy, H. et Newmann, R., 1965.** Sur la définition de l'anomalie de Bouguer. *Geophysical Prospecting*, vol. XIII, 1-11.
- Ndougsa-Mbarga, T., Feumoe, A., Manguelle-Dicoum, E. and Fairhead, J. D., 2012.** “Aeromagnetic data interpretation to locate Buried fault in South-East Cameroon,” *Geophysica*. vol.48, n°.1-2, pp. 49–63.
- Nédelec, A., Macaudière, J., Nzenti, J. P. et Barbey, P., 1986.** Evolution structurale et métamorphique de la série de Mbalmayo (Cameroun) : implications pour la structure de la zone mobile panafricaine au contact du Craton du Congo. *C.R. Académie des Sciences Paris* 303 : pp.75-80.
- Ngako, V., 1999.** Les déformations continentales Panafricaines en Afrique Centrale : résultat d’un poinçonnement de type himalayen. Thèse Doctorat d’Etat, Université Yaoundé I : 299p + annexes.
- Ngako, V., Affaton, P., Njonfang, E., (2008).** Pan-African tectonics in northwestern Cameroon: Implication for the history of western Gondwana. *Gondwana Research*, 14: 509-522.
- Ngako, V., Njonfang, E., Tongwa, A. F., Affaton, P. and Nnange, J. M., 2006.** The north-south paleozoic to quaternary trend of alkaline magmatism from Niger-Nigeria to Cameroon: complex interaction between hotspots and Precambrian faults. *J. Afr. Earth Sci.* 45, 241–256.
- Ngako, V., Jegouzo, P. et Nzenti, J. P., 1991.** Le Cisaillement Centre Camerounais : Rôle structural et géodynamique dans l’orogénèse panafricaine. *C.R. Académie des Sciences Paris* 313 : 457-463.
- Ngatchou, H. E., Liu Genyou, Tabod, C. T., Kamguia, J., Nguiya, S., Tiedeu, A. and Xiaoping, K. E., 2014.** Crustal structure beneath Cameroon from EGM2008. *Geodesy and Geodynamics*, 5, 1 -7.
- Ngounouno, I., Deruelle, B. et Demaiffe, D., 2006.** Les camptonites du Mont Cameroun. *Comptes Rendus Géosciences* 338 : 537-544.

- Nguiya, S., Cheunteu Fantah, C. A. and Nouayou, R., 2018.** "Gravity Imaging of the Crustal Structures Beneath Southern Cameroon and Its Tectonic Implications. "The International Journal of Engineering and Science (IJES) 7.8 (2018): 08-23.
- Njanko, T., 1999.** Les granitoïdes calco-alcalin syn-cisaillement de la région de Tibati (Domaine central de la Chaîne Panafricaine). Leur signification géodynamique par rapport à la tectonique Panafricaine. Thèse de Doct. 3ème cycle, Université Yaoundé I: 158p + annexes.
- Njonfang, E., Ngako, V., Kwekam, M. et Affaton, P., 2006.** Les orthogneiss calco-alcalins de Fouban-Bankim: témoins d'une zone interne de marge active panafricaine en cisaillement. C.R. Géosciences 338: 606-616.
- Nnange, J. M., Ngako, V., Fairhead, J. D. and Ebinger, C. J., 2000.** Depths to density discontinuities beneath the Adamawa Plateau region, Central Africa, from spectral analyses of new and existing gravity data. J. Afr. Earth Sc. 30, 887–901.
- Noutchogwe Tatchum, C. B., 2010.** Investigation géophysique dans la région de l'Adamaoua par les méthodes gravimétriques et magnétiques : implications structurales et hydrologiques. Thèse de Doctoral/PhD Université de Yaoundé I, 171p.
- Nzenti, J. P., Barbey, P., Bertrand, J. M. L. et Macaudiere, J., 1994.** La Chaîne Panafricaine au Cameroun : Cherchons suture et modèle. In Société géologique de France (Ed), 15ème Réunion des Sciences de la Terre, Nancy, France p99.
- Nzenti, J. P., Barbey, P., Macaudière, J. and Soba, D., 1988.** Origin and evolution of the late Precambrian high-grade Yaounde gneisses (Cameroon). Precambrian Research 38, 91-109.
- Oliveira, E. P., Toteu, S. F., Araujo, M. N. C., Carvalho, M. J., Nascimento, R. S., Bueno, J. F., Mc Naughton, N. and Basilici, G., 2006.** Geologic correlation between the Neoproterozoic Sergipano belt (NE Brazil) and the Yaoundé Belt (Cameroon, Africa). Journal of African Earth Sciences 44: 470-478.
- Ojo, A. O., Sidao Ni, Haopeng, C. and Jun Xie, 2018.** Crust-mantle coupling mechanism in Cameroon, West Africa, revealed by 3D S-wave velocity and azimuthal anisotropy. Physics of the Earth and Planetary Interiors 274: 195-213.
- Olivry, J. C., 1986.** Fleuves et rivières du Cameroun. Collection, Monographies hydrologiques, ORSTOM, N° 9, Paris, 3-31.
- Owona Angue, M. L. C., Tabod, C. T., Nguiya, S., Kenfack, J. V. and Tokam Kamga, A. P., 2013.** Delineation of Lineaments in South Cameroon (Central Africa) Using Gravity Data. Open Journal of Geology, 2013, 3, 331-339.
- Owona Angue, M. L. C., Nguiya, S., Nouayou, R. Tokam Kamga, A. P. and Manguelle-Dicoum, E., 2011.** "Geophysical Investigation of the Transition Zone between the Congo Craton and the Kribi-Campo

Sedimentary Basin (South West Cameroon),” *South African Journal of Geology*, Vol. 114, No. 2, 2011, pp. 145-158.

Penaye, J., Kroner, A., Toteu, S. F., Van Schmus, W. R. and 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.

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.

Pirttijärvi M., 2014b. GRABLOX2-Gravity interpretation and modelling using 2-D Fourier transform; User’s guide to version 1.3a, University of Oulu, 63 pp. <https://wiki oulu.fi/x/YU7AQ>

Pirttijärvi, M., 2013. Numerical modeling and inversion of geophysical electromagnetic measurements using a thin plate model. PhD thesis, Acta Univ. Oul. A403, University of Oulu.

Poidevin, J. L., 1991. Les ceintures de roches vertes de la République Centrafricaine (Mbomu, Bandas, Boufoyo, Bogoin). Contribution à la connaissance du Précambrien du Nord du craton de Congo. Thèse Dct. Sci. Université de Clermont-Ferrand II : 440p + annexes.

Poidevin, J. L., 1983. La tectonique panafricaine à la bordure Nord du craton congolais. L’orogénèse des "Oubanguides". Abstracts 12th Afr. Geol. Tervuren : 75.

Poisson, C., 1938. Quelques données numériques sur le magnétisme des roches de Madagascar (Extrait de fascicule IX des annales géologiques du service des Mines, Antananarivo 1938).

Poucllet, A., Tchameni, R. Mezger, K., Vidal, M., Nsifa, E. N., Shang, C.K. and Penaye, J., 2007. Archaean crustal accretion at the northern border of the Congo craton (South Cameroon). The charnockite-TTG link. *Bulletin de la Société Géologique de France*, t. 178, 331-342.

Poudjom Djomani, Y., 1994. Apport de la gravimétrie à l’étude de la lithosphère continentale et implications géodynamiques : étude d’un bombardement intraplaque : le massif de l’Adamaoua (Cameroun). Thèse Université de Paris Sud ; Centre Orsay : No d’ordre : 2798.

Poudjom-Djomani, Y. H., Diament, M. and Albouy, Y., 1992. Mechanical behaviour of the lithosphere beneath the Adamawa uplift (Cameroon, West Africa) based on gravity data. *Journal of African Earth Sciences* 15(1), 81-90.

Primdhal, F., 1979. The fluxgate magnetometer, *J. Phys. E: Scientific Instruments*, 12, 241-253.

Rasmussen, R. and Pedersen, L. B., 1979. End corrections in potential field modeling. *Geophys. Prospect.* 27, 749 –760.

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

- Reusch, A. M., Nyblade, A. A., Wiens, D. A., Shore, P. J., Ateba, B., Tabod, C. and Nnange, J. M., 2010.** Upper mantle structure beneath Camerron from body wave tomography and the origin of the Cameroon Volcanic Line. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 11, Q10W07. ISSN : 1525-2027.
- Rocci, G., 1965.** Essai d'interprétation de mesures géochronologiques. La structure de l'Ouest africain. Colloque International de Géochronologie, Nancy, Sciences de la Terre, X : 461-478.
- Rolin, P., 1995.** La zone de décrochements Panafricains des Oubanguides en République Centrafricaine. *C.R. Académie des Sciences Paris* 320 : 63-69.
- Sanchez-Rojas, J. and Palma, M., 2014.** Crustal density structure in northwestern South America derived from analysis and 3-D modeling of gravity and seismicity data. *Tectonophysics* 634, 97-115.
- Segalen, P., 1967.** Les sols et géomorphologies du Cameroun. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, 5 (2), 137-187. ISSN 0029.
- 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 does Instituto de Geociências*, 33, 73-82.
- Shuey, R. T., 1972.** Application of Hilbert transforms to magnetic profiles. *Geophysics*, 37, 1043-1045.
- Shuey, R. T. and Pasquale, Q. S., 1973.** End corrections in magnetic profiles interpretation. *Geophysics*, 38, 507-512.
- 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, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris 6, 198p.
- Som Mbang, C. M., Basseka, C. A., Kamguia, J., Etamé, J., Njiteu Tchoukeu, C. D. and Mouzong, P. M., 2018.** Mapping of Deep Tectonic Structures of Central and Southern Cameroon by an Interpretation of Surface and Satellite Magnetic Data. *Hindawi. International Journal of Geophysics*, Volume 2018, Article ID 5845670, 11 pages.
- Spector, N. and Grant, F. S., 1970.** Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophys.* 35, p. 293-302.
- 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., Nouayou, R., Kamguia, J., Kande, H. L. and Manguelle-Dicoum, E., 2009.** Gravity analysis of the boundary between the Congo craton and the Pan African belt of Cameroon, *Austrian J. Earth Sci.*, 102, pp.71-79.
- Tchameni, R., 1997.** Géochimie et géochronologie des formations de l'Archéen et du Paléoprotozoïque du Sud-Cameroun (Groupe du Ntem, Craton du Congo). Thèse Doctorat Université d'Orléans, France 356p + annexes.

- Tchameni, R., Pouclet, A., Penaye, J., Ganwa, A. A. and Toteu, S. F., 2006.** Petrography and geochemistry of the NgaoundéréPan-African granitoids in Central North Cameroon: Implications for sources and geological setting. *Journal of African Earth Sciences* 44: 511-529.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E., 1990.** *Applied Geophysics* Second Edition, Former Canadian International Development Agency Program, Cambridge Univ. Press, 770 p.
- Tenzer, R., Pavel, N. and Vladislav, G., 2012.** The bathymetric stripping corrections to gravity field quantities for a depth-dependent model of seawater density. *Mar. Geod.* 35 (2), 198–220.
- Tenzer, R., Novák, P. and Gladkikh, V., 2011.** On the accuracy of the bathymetry-generated gravitational field quantities for a depth-dependent seawater density distribution. *Studia Geophys. Geod.* 55 (4), 609.
- Tenzer, R., Vajda, P. and Hamayun, P., 2010.** A mathematical model of the bathymetry generated external gravitational field. *Contrib. Geophys. Geodes.* 40 (1), 31–44.
- Thellier, E., 1938.** Sur l'aimantation des terres cultes et ses applications géophysiques, *Ann. Inst. Phys. Globe, Univ. Paris, Bur. Central Magnétisme Terrestre*, 16, pp. 157-302.
- Theunissen, K., Lenoir, J. L., Liegeois, J. P., Delvaux, D. et Murma, A., 1992.** Empreinte Panafricaine majeure dans la chaîne ubendienne de Tanzanie sud-occidentale : géochronologie U-Pb sur zircon et contexte structural. *C. R. 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
- Tokam, K. A. P., Tabod, C. T., Nyblade, A. A., Julia, J., Wiens, D. A. and Pasyanos, M., 2010.** “Structure of the Crust Beneath Cameroon, West Africa, from the Joint Inversion of Rayleigh Wave Group Velocities and Receiver Functions Geophysical,” *Geophysical Journal International*, Vol.1183, pp. 1061-1076.
- Toteu, S. F., Penaye, J., Maldan, F., Nyama Atibagoua, B., Bouyo Houketchang, Mr. Sep Nlomgan, J. P., Nbola Dzana, S. P., 2008.** Géologie et ressource minérales du Cameroun, 3rd International Geological Congress Oslo, Norway, 6-14.
- Toteu, S. F., Penaye, J. and Poudjom Djomani, 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., Van Schmus, W. R., Penaye, J. and Michard, A., 2001.** New U-Pb and Sm-Nd data from north-central Cameroon and its bearing on the pre-Pan African history of central Africa. *Precambrian Research* 108: 45-73.
- Toteu, S. F., Yongue Fouateu, R., Penaye, J., Tchakounte, J., Seme Mouangue, A. C., Van Schmus, W. R., Deloule, E. and Stendal, H., 2006a.** 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.

- Toteu, S. F., Van Schmus, W. R., Penaye, J. and Nyobe, J. B., 1994.** U-Pb and Sm-Nd evidence for Eburnean and Pan-African high-grade metamorphism in cratonic rocks of Southern-Cameroon. *Precambrian Research* 67: 321-347.
- Toteu, S. F., Bertrand, J. M. L., Penaye, J., Macaudiere, J., Angoua, S. and Barbey, P., 1990.** Cameroon: a tectonic keystone in the Pan-African network. In: J.F. Lewry and M.R. Stauffer (Editors). *The Early Proterozoic Trans-Hudson Orogen of North America*. Geological Association of Canada Special Paper 37: 483-496.
- Tselentis, G. A., Drakopoulos, J. and Dimtriads, K., 1988.** A spectral approach to Moho depths estimation from gravity measurement in Epirus (NW Greece). *Journal of the Physics of the Earth* 36, 255-266.
- Uieda, L. and Barbosa, V.C., 2017.** Fast nonlinear gravity inversion in spherical coordinates with application to the South American Moho. *Geophys. J. Int.* 208 (1), 162–176.
- Van Schmus, W., Oliveira, E., Filho, A. F., Toteu, S. F., Penaye, J. and Guimaraes, I., 2008.** Proterozoic links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African Fold Belt; 294, 10.1144/SP294.5; *Journal of the Geological Society*.
- Vanié, L. T. A., Khattach D. et Houari, M. R., 2005.** Apport des filtrages des anomalies gravimétriques à l'étude des structures profondes du Maroc oriental. *Bull. Inst Sci., Rabat, section Sci. Terre*, 27, 29-40.
- Vicat, J. P. et Billong, P., 1998.** Esquisse géologie du Cameroun. *Géosciences au Cameroun* 1. Press. Univ. Yaoundé 1, 3-11.
- Yonta Ngouné, 2010.** Contexte géologique des indices de talc de la région de Boumnyebel (Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale, Cameroun) Thèse Doctorat/Ph.D en Science de la Terre, Option: Pétrologie - Géologie Structurale. Yaoundé I, 305 p.
- Won, I. J., Bevis, M., 1987.** Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon. *Algorithm Fortran Subroutines: Geophys.* 52, 232–238.
- Zingerle, P., Brockmann, J. M., Pail, R., Gruber, T., Willerg, M., 2019.** The polar extended gravity field model TIM_R6e. GZF Data Services. <https://doi.org/10.5880/ICGEM.2019.005>.



Structure of the lithosphere beneath Cameroon using global gravity model data: implications for the setting of the Cameroon Volcanic Line

Cyrille Armel Cheunteu Fantah¹ · Alain Pierre Tokam Kamga² · Marcelin Pemi Mouzong³ · Robert Nouayou¹ · Severin Nguiya²

Received: 7 July 2022 / Accepted: 26 April 2023

© The Author(s) under exclusive licence to Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences & Polish Academy of Sciences 2023

Abstract

In this study, XGM2019e_2159 global gravitational model data are used to investigate the intracrustal structure beneath Cameroon. The work focuses on the mantle region that promoted the formation of the Cameroon Volcanic Line (CVL) and above all, appreciates the geodynamic interaction between these two particular geological entities. The approach is based on the use of digital filters for qualitative and quantitative interpretations. The data were first processed using the upward continuation filter that reveals several zones of gravity gradients, which are persistent at various depths and that can be interpreted as the vertical extension of major geological feature limits. The (2D) analysis of the frequency spectrum of the global gravity model anomalies (XGM2019e_2159) was performed to estimate the crustal thickness of the aligned volcanic regions located in Cameroon and Congo Craton (CC). The use of 2D1/2 modelling applied on 5 profiles reveals the lateral and vertical extension of the discordance of geological structures. The presence of a mafic layer with thicknesses ranging between 6 and 22 km is persistent beneath the Kribi-Campo area, the Congo Craton and the Pan-African chain. Models also suggest a crustal thinning process at the northern border of Congo Craton which may have provoked the sliding of some fragments of the crust in the Pan-African domain migrating towards the CVL. The results obtained also reveal the identity of a complex and multi-fractured tectonic context and that the CVL and the CC are not only of mantle origin but also have a mantle interconnection.

Keywords Gravity · Cameroon Volcanic Line · Congo Craton · Pan-African chain · Geodynamic · Modelling

Introduction

The measurements of geophysical parameters at the surface of the Earth to investigate its internal structure are the most invasive methods used in recent decades. The lithosphere beneath Cameroon is characterized by the Precambrian orogeny ranging from Archean to Neoproterozoic (Toteu et al. 2001, 2004). Its structure underwent complex displacements in various directions during its evolution (Kennedy 1964). Geochronological measurements have highlighted the importance of the Pan-African thermo-tectonic event described by Kennedy (1964) as a true orogenic process with sedimentation, metamorphism and granitization that preceded the emplacement of the Pan-African chain and the various African Cratons (Black 1966, 1967). Examples of extensive tectonic structures which characterize the ancient Archean zone of Cameroon, (1) the Congo Craton and the Pan-African mobile chain that are carrying the imprints of various shear

Edited by Prof. Ivana Vasiljević (ASSOCIATE EDITOR) / Prof. Gabriela Fernández Viejo (CO-EDITOR-IN-CHIEF).

✉ Cyrille Armel Cheunteu Fantah
cheunteu91cfa@gmail.com

¹ Laboratory of Geophysics and Geoprospection, Department of Physics, The University of Yaoundé I, P.O. Box 812, Yaoundé, Cameroon

² Laboratory of Energy, Materials, Modeling and Method, National Higher Polytechnic School of Douala, University of Douala, Douala, Cameroon

³ Technology and Applied Sciences Laboratory, University Institute of Technology, University of Douala, P.O. Box 8698, Douala, Cameroon

zones, (2) the Mamfe Basin and the Garoua Rift known as the extension in Cameroon of the Benue Trough (Toteu et al. 2001, 2004; Kwékam et al. 2010; Goussi Ngalamo et al. 2017; Kemgang Ghomsi et al. 2019; Cheunteu Fantah et al. 2022). Another particular feature of the Cameroon geology is the presence of the Cameroon Volcanic Line (CVL) that has been the centre of interest of many international research projects over decades.

Several models have been proposed to explain the origin of the CVL, including the plume models (Halliday et al. 1990; Ebinger and Sleep 1998), or models illustrating the release of a constraining action and reactivation under shear areas (Fairhead and Binks 1991). Some of the models suggested small-scale mantle convection processes based on the edge flow along the northern border of the CC with the Pan-African mobile chain (King and Anderson 1995, 1998; King and Ritsema 2000; Reusch et al. 2010, 2011). The low mantle velocity zone (LVZ) was revealed below the CVL beyond the crust in the upper mantle using body wave tomographic images (Reusch et al. 2010). Tomographic images also support the edge-flow convection model, introduced earlier by King and Ritsema (2000), as the most viable process for the origin of the line, and Reusch et al. (2011) later argued from a receiver functions study that the effect of the convection process is revealed only in the upper mantle, and no effect is apparent on the 410 km discontinuity. Tomographic images from Rayleigh phase velocities (Adams et al. 2015) later confirmed the edge-flow convection but also extended the debate to the possibility of another mechanism of upwelling flow perpendicular to the ocean-continent boundary as pointed out earlier by Milelli et al. (2012) from a study of lithospheric instability of the CVL. This possibility invokes a better knowledge of the north-western margin of the CC.

This study aims to contribute more to the knowledge of the structure of the lithosphere under Cameroon using new models derived from the global gravitational model data that can explain the geodynamics behind the setting of the CVL and its probable interaction with the Congo Craton. To improve our understanding of the origin of the CVL in an environment where the geology is quite complex with a multi-fractured tectonic setting (Cheunteu Fantah et al. 2022), we will exploit recent geophysical and geodetic data to characterize the geometry of the CVL basement. As a methodological approach, the anomaly signatures of the global gravity model XGM2019e_2159 will be highlighted. Then, the numerical filters will be exploited for the transformation of the gravity anomalies, then interpreted in a qualitative and quantitative way in order to finally propose geophysical models of the LVC basement involving the Congo Craton and to study the implication of the geodynamics of the Pan-African chain on its origin.

Geological and tectonic background

Pan-African mobile belt

The structure of the African continent is characterized by a good number of fragments of the Precambrian basement (Cratons of Africa) which remained stable during the past Pan-African orogeny (Clifford and Gass 1970) (Fig. 1A). The chain covers several Central African countries (Cameroon, Nigeria, Central African Republic and Chad) and continues east to Sudan, Uganda and Tanzania (Theunissen et al. 1992) (Fig. 1B). In Cameroon, several geological eras ranging from the Archean to the Cenozoic are observed with Pan-African mobile chain characterized by a large variety of geological structures (Fig. 1C). Long before the separation of continents, these Cratons belonged to a single block called Gondwana supercontinent (Oliveira et al. 2006) (Fig. 2a).

The Pan-African mobile belt (PMB) also known as the Pan-African chain of Central Africa is a large portion of a set that includes the Pan African tectonic belts, the Brasiliano Belts (NE Brazil) (Fig. 2b) and the Pan-African trans-Saharan chain (Feybesse et al. 1987; Toteu et al. 2001; Oliveira et al. 2006; Ngako et al. 2008). In Cameroon, three main litho-structural areas of the PMB are known: the Southern Cameroon Domain, Center Cameroon Domain and the Northern Cameroon Domain (Toteu et al. 2004) (Fig. 2c).

Congo Craton

In Southern Cameroon, the north-western border of the CC, also known as Ntem complex, is subdivided into three units according to their age and their lithology which occupies most of Central Africa (Fig. 2c): Ntem, Nyong and Ayna units (Vicat et al. 1996; Nsifa 2006). The Ntem complex is mainly composed of Precambrian rocks represented mainly by granulites formed during the Archean and rejuvenated during the Eburnean orogeny. The Ntem complex also bears traces of magmatic activities characterized by the presence of several dense rocks such as gabbros (Vicat et al. 1996; Nsifa 2006; Owona Angue et al. 2011; Nsifa et al. 2013). Further in the north, other Paleoproterozoic units appear in blades inside the Pan-African and remind of basement scales put in place during tangential tectonics (Ngako 1999). Greenstone belts are recognized in each of the previous three units.

Cameroon Volcanic Line

The CVL is a N30°E alignment of anorogenic plutonic complex stretching over 1600 km from the Gulf of Guinea to the Lake Chad with a width of 100 km in some places

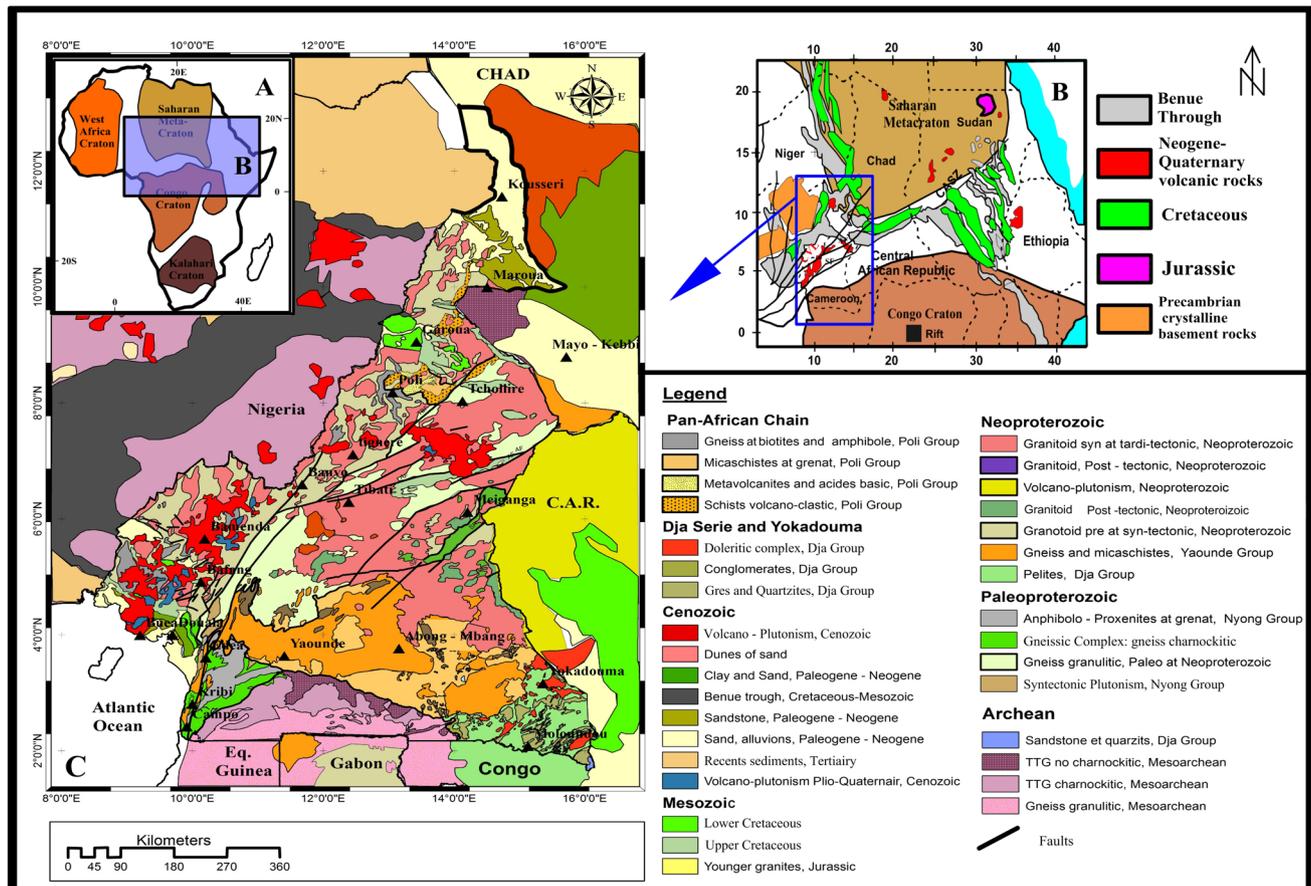


Fig. 1 A African Precambrian cratons, metacratons and orogenic belts (drawn after Meert and Lieberman 2007). B Tectonic map for the Central African Orogenic Belt (CAOB) and surrounding tectonic

fragments. Modified from the Tectonic Map of Africa. 1:10,000,000 scale. C Geological map of Cameroon and neighbouring countries modified from (Toteu et al. 2008)

(Ngounouno 1998). It has a W-E branch in the Cameroon territory centre known as the Adamawa Volcanic Plateau. The CVL includes about sixty anorogenic complexes composed of various plutonic rocks (granites, diorites, syenites, gabbros). It shows two sections: (i) an oceanic section, which contains the islands of Pagalu, Sao Tome and Principe and Bioko; and (ii) a continental section, which is outlined by a series of volcanoes (e.g. Mt. Cameroon, Mt. Manengouba, Mt. Bamboutos and Mt. Oku). The intra-plate volcanic mechanism such as the one of the CVL is among the most controversial problems of the world tectonics. The hotspot theory, which suggests that some linear volcanic chains in the world were formed by the progression of a lithospheric plate moving through a magma reservoir (Morgan 1983; Van Houten 1983; Fairhead and Okereke 1987; Fairhead 1988; Lee et al. 1994; Burke 2001), fails to explain the setting of the CVL. In fact, geochemical studies have indicated a lack of age progression from the magma samples collected along the line (Grant et al. 1972; Grunau et al. 1975; Dunlop and Fitton 1979; Fitton and Dunlop 1985; Marzoli et al. 2000; Ngounouno et al. 2003; Njilah et al. 1999, 2004; Aka et al. 2009; Kamgang et al. 2010).

The particularity of the CVL can be observed from its crustal structure. In fact, Tokam et al. (2010) suggested through the joint inversion of Rayleigh surface waves and receiver functions that the presence of CVL has few impact on the regional intracrustal structure in comparison with similar features in other regions of Africa. In addition, moderate seismic activity ($M_{0.5-4.0}$) along the line is mainly located near the active Mt Cameroon volcano (Tabod et al. 1992).

The Cameroon lithospheric structures

Plomerová et al. (1993) provided the first estimates of the lithosphere–asthenosphere boundary (LAB) at local scale along the continental CVL. Using gravity data and teleseismic P and PKP arrival times collected from a network of 40 seismic stations arranged along the length of a 300 km profile that crossed the Adamawa Plateau and Garoua Rift, they estimated the LAB to be located approximately 120 km beneath the Adamawa Plateau in the central part of the studied profiles and thicker elsewhere. From

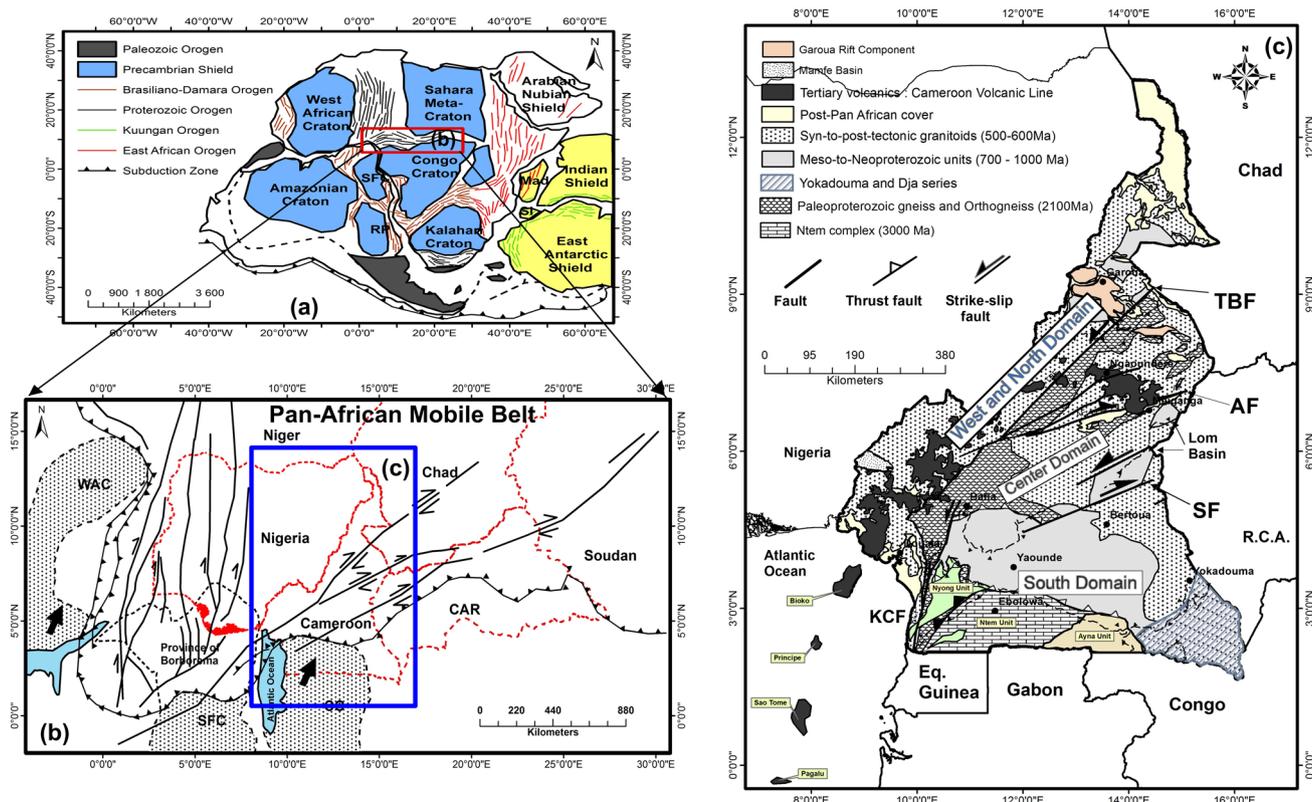


Fig. 2 a Supercontinent Gondwana (Oliveira et al. 2006). Supercontinent Gondwana. Western Gondwana (light blue), Eastern Gondwana (yellow), Orogenic belts linked to the final fusion of the East African supercontinent (red), the Damara-Brasiliano orogen (blue) and orogen Kuungan (green). b The Pan-African belt of Central Africa, geody-

namic reconstruction at the continental scale (Nédélec et al. 1986; Nzenti et al. 1988; Affaton 1998; Caby and Boessé 2001; Oliveira et al. 2006). c Litho-structural of the Pan-African chain are known: South Cameroon domain, Center Cameroon domain and the West-North Cameroon domain (Toteu et al. 2004)

the azimuthal variations in P-wave velocities, they also revealed the differences in composition of the lithosphere to the north and south of the Northern Boundary Fault (fault belonging to the Cameroon Shear Zone), which could be linked to the reopening of the African plateau along an old accretion junction zone, as previously proposed by Fairhead and Binks (1991).

At the country scale, the investigation on the structure of the lithosphere beneath Cameroon started more than two decades ago using available gravity data that covered the Cameroon territory. For example, Poudjom Djomani et al. (1995) used gravity data to infer some difference in the mechanical action of the lithosphere under the CVL and the CC, although the base of the lithospheric structure could not be properly mapped from the data.

At a continental scale, the lithospheric structure of Cameroon has been deduced from various tomographic studies, including the works of Pasyanos and Nyblade (2007), Reusch et al. (2010, 2011) and Fishwick (2010). These studies generally show a thicker lithosphere (around 200 km) under the CC and a thinner one beneath the Pan-African belt and CVL, with moderate (~2%) low velocity anomalies

between 100 and 200 km beneath the CVL (Pasyanos and Nyblade 2007; Fishwick 2010; Reusch et al. 2010, 2011).

In the northeast portion of the Adamawa-Yade area, low velocity anomalies were also observed and used to suggest a thinning of the lithosphere (Guidarelli and Aoudia 2016) which can explain a rise of the asthenospheric mantle that contributed to the setting of the Adamawa Plateau. Analysis of the dispersion of Love and Rayleigh waves highlighted the negative radial anisotropy in the Upper Crust (Ojo et al. 2017) associated with the location of the mantle plum (Lee et al. 1994).

Data acquisition

Bouguer gravity data

In the present study, data of the global gravitational model (XGM2019e_2159) were used for the investigation. These data were extracted from the platform of ICGEM (International Center for Global Earth Models) from the calculation of functionals service for gravity fields on ellipsoidal grids

following a regular mesh with a resolution of $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ($\sim 11 \text{ km} \times \sim 11 \text{ km}$). Data from the global gravitational model (XGM2019e_2159) represent a coupled global gravitational field model, taken only from just the GOCO06 satellite (Kvas et al. 2019) and is represented by spheroidal harmonics up to degree and order (d/o) 2190 (Zingerle et al. 2019). In order to optimally merge the satellite-only models with terrestrial gravity, altimetry and topographic information and thus, add value to the data, the combined high-resolution gravitational model XGM2019e_2159 was developed preserving important quality information independent of other models (Zingerle et al. 2019). For these data, corrections by the tesseroïd method were made with a homogeneous density distribution following Uieda and Barbosa (2017).

The same model in the previous version (XGM2016) has been used by Kemgang Ghomsi et al. (2019) for work on the configuration of the crust of Cameroon by combining the topographic model and seismic data. With these data, computed topographic heights from the spherical harmonic topography model (ETOPO1) used at the maximum degree identical to the gravity field model (Amante and Eakins 2009; Kemgang Ghomsi et al. 2019). Similar to the XGM2016 model, the XGM2019e_2159 data were calculated with a density of 2670 kg/m^3 considered as the average value of the upper continental crust (Hinze 2003; Kemgang Ghomsi et al. 2019). However, the calculation of the seawater density model with depth as a constraint provided a gravity correction. (Tenzer et al. 2010, 2011, 2012; Gladkikh and Tenzer 2012). The XGM2019e_2159 data therefore represent the series of XGM models at high resolution and considered as an improvement of the XGM2019e model also as a spherical harmonic model (Zingerle et al. 2019). These data made it possible to map the Bouguer anomalies of our study region (Fig. 3).

Free-air gravity data

In this work, in addition to the Bouguer anomalies of the global gravitational model XGM2019e_2159, free-air gravitational disturbances were also used to study the effect of gravity on the isostasis compensation of the CVL basement. Extracted from the ICGEM website (<http://icgem.gfz-potsdam.de/calgrid>), these anomalies were calculated for regular grids of spherical harmonic degree of 2190; with a resolution of $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ geographical grid (Fig. 4) and a height of 50 km on top of the ellipsoid (Kemgang Ghomsi et al. 2019). This height of 50 km remains a compromise between the computational qualities of the detailed instruction quality for processing (Kemgang Ghomsi et al. 2019). Chikondi and Jianguo (2019) showed that the reason for this compromised height is that the direct modelling algorithm would be less accurate while taking longer when used to compute points at

lower elevations, thus allowing to maintain the geotectonic characteristics and intracrustal structures of the lithospheric plate during the modelling (Sebera et al. 2014; Uieda and Barbosa 2017; Pitoňák et al. 2017).

In the present study area, the free-air anomalies vary between -24 and more than 45 mGal . In Cameroon, the observed negative and positive free-air gravity disturbances are a consequence of overcompensated topography due to compressive tectonics and generally undercompensated topography with crustal thinning, respectively (Kemgang Ghomsi et al. 2019). Interested in the study of the structures of the basement of the CVL, these same authors revealed that in the highlands of the CVL, the gravity disturbances in the free-air are characterized by strongly positive anomalies and that small disturbances are found on the CC in Southern Cameroon (Kemgang Ghomsi et al. 2019).

Method

Upward continuation of gravity data

The upward continuation extension is an operator to artificially shift the observation plane and calculate the localized geopotential field at new station of points with the data taken in the field (Jacobsen 1987). In this work, we applied the upward continuation to the global gravitational model XGM2019e_2159 for a qualitative analysis of Bouguer anomalies with depth. The methodical approach is based on the use of the low-pass digital filter to study the behaviour of anomalies of subsoil structures in Cameroon with particular emphasis on CVL and CC.

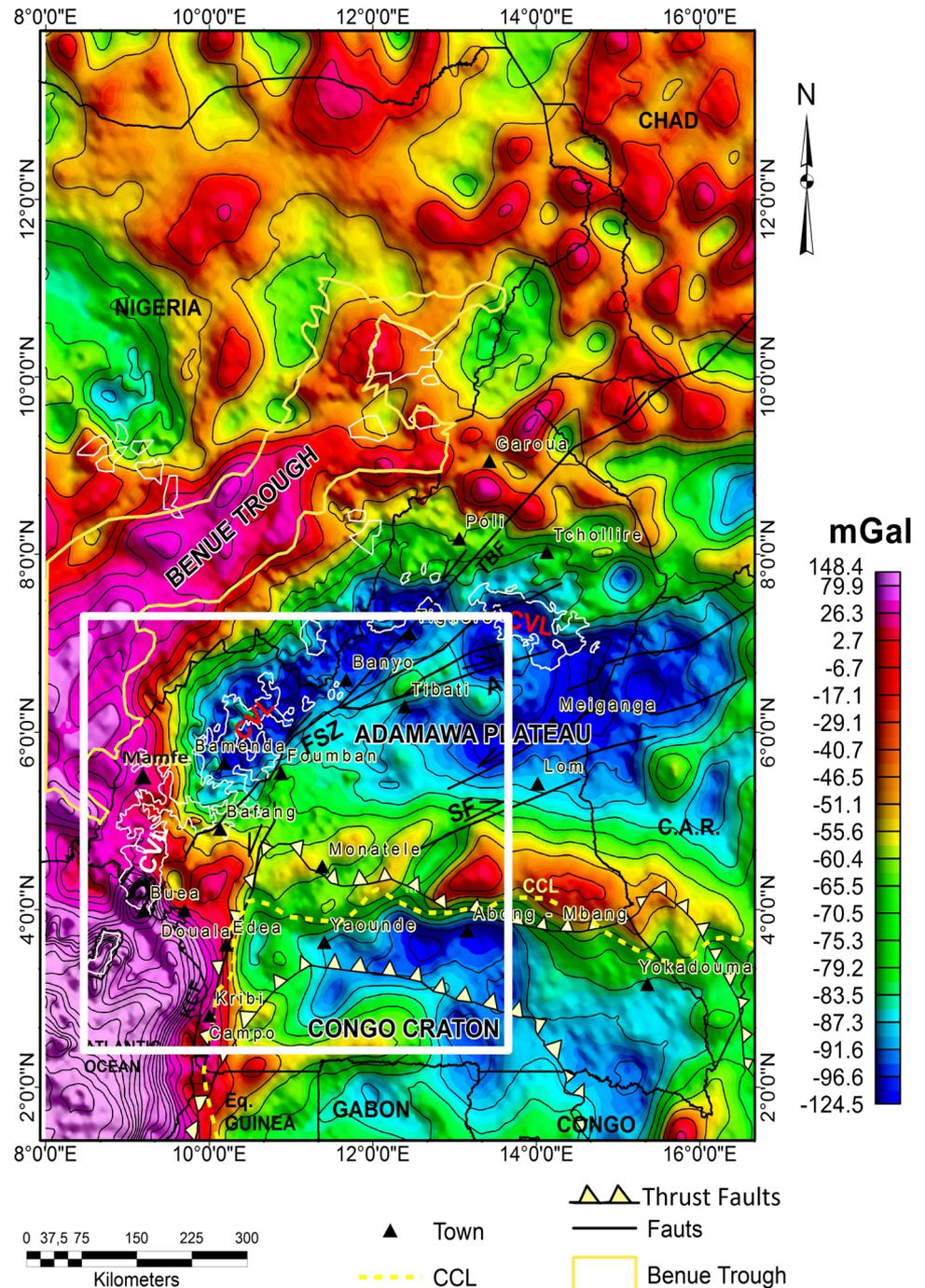
Practically, the digital filter was applied on the Bouguer data at the various levels 10, 30, 50, 80 and 100 km in order to observe the variation of strong density contrasts with depth. Previous studies have shown the capacity of this technique in delineating the extension of various geological structures (e.g. Cheunteu Fantah et al. 2022; Kemgang Ghomsi et al. 2019; Koumetio et al. 2012) beneath Cameroon.

Power spectrum analysis

2D frequency spectrum analysis was applied on the global gravitational model XGM2019e_2159 in order to estimate the crustal thicknesses beneath CVL and CC. This method has been exploited by other researchers to estimate crustal thickness over Bouguer gravity anomaly sources (Spector and Grant 1970; Dimitriadis et al. 1987).

The power spectrum analysis is a powerful tool used in gravimetric investigations to estimate the depth of causative sources of gravity anomaly within the lithosphere (Spector and Grant 1970; Dimitriadis et al. 1987). For estimation, the power spectrum has wavenumber intervals in which

Fig. 3 Bouguer anomaly map of the study area showing the gravity signals from the major geological structures beneath Cameroon computed from the XGM2019 e_2159 for geographical grid $0.1^\circ \times 0.1^\circ$

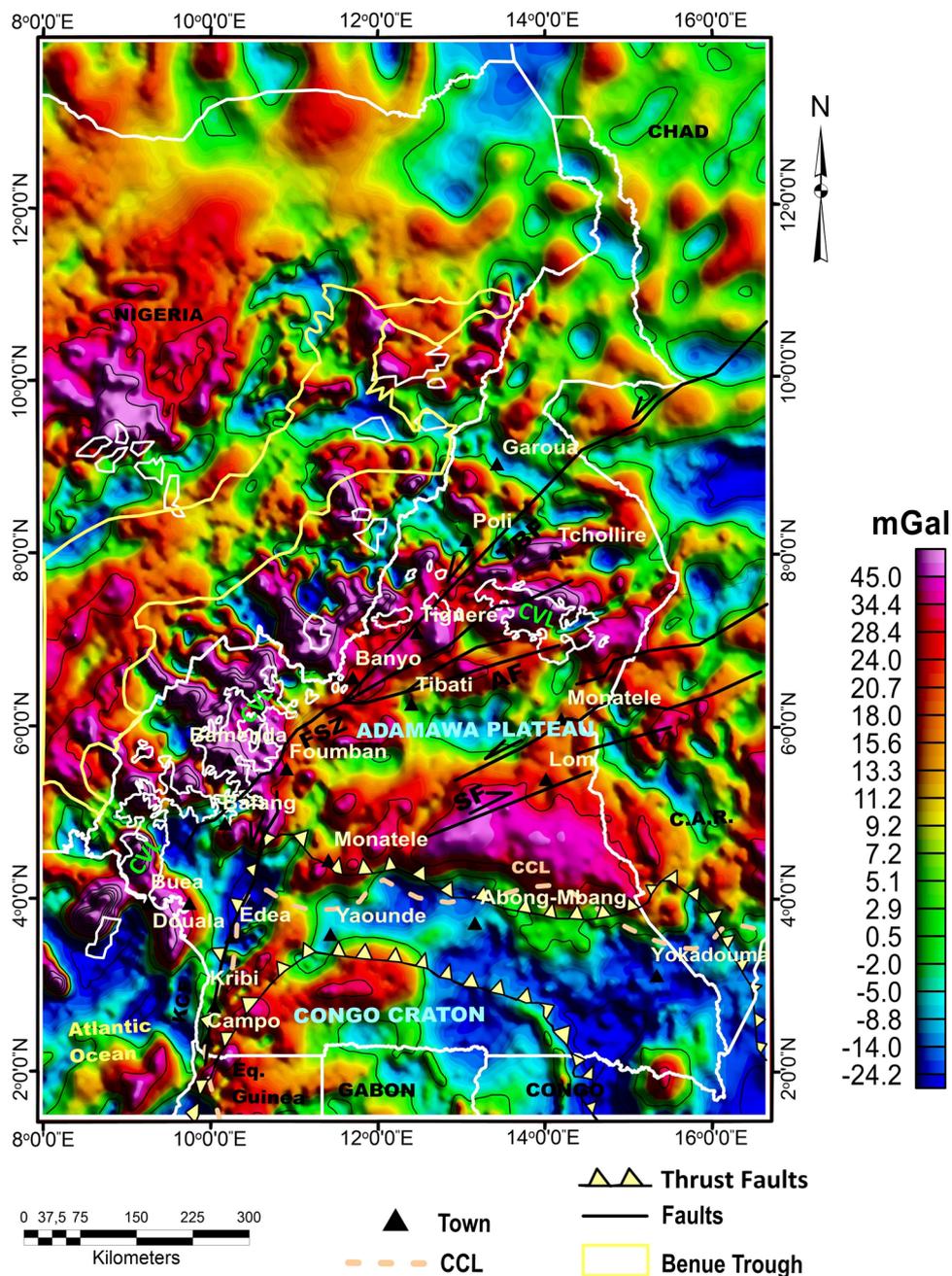


the logarithm of the power approximately varies linearly with wavenumber. The amplitude of the spectrum at any wavenumber is finite and approaches zero exponentially with increasing wavenumber in discrete segments of the spectrum.

In practice, the investigated area can be subdivided into grids in which we can determine the depths of the various anomalous sources within each single grid. In the present study, the power spectrum analysis was applied

on the global gravitational model XGM2019e_2159 in order to estimate the crustal thicknesses beneath CVL and CC. Therefore, the target area enclosing CVL and CC was chosen, and then divided into $1^\circ \times 1^\circ$ (110×110 km) grids for a 50% overlap as in Goussi Ngalamo et al. (2017, 2018). The depth of causal ground distributions can be obtained by analysing a graph of the logarithm of the power spectrum as a function of wavenumber or frequency (Dimitriadis et al. 1987). Hence, the depth of the various

Fig. 4 Free-air gravity map of Cameroon as computed from the XGM2019 e_2159 on a 0.1°×0.1° geographical grid



anomalous sources within each grid is given by the following Eq. (1):

$$h = \frac{\Delta \text{Log}(E)}{4\pi \Delta k}, \tag{1}$$

where E is the power spectrum, k is the wavelength in cycles/km, and h is the depth in km.

Therefore, a graph representing the logarithm of the power spectrum is plotted function of the radial frequency. Hence, the average depths of the causative sources of the anomalies can be estimated from the graph (Cianciara and

Marcak 1976; Tselentis et al. 1988; Maden 2010; Hussein et al. 2013; Leseane et al. 2015; Goussi Ngalamo et al. 2017, 2018).

Results and interpretations

Analysis of the gravity anomalies map

The Bouguer anomalies map of the study area is highlighted in Fig. 4. The map illustrates numerous zones of alternating positive and negative anomalies spaced by gradient zones

that probably correlate with the main geological structures of the region investigated (Fig. 1). These anomalies vary from -124 to 148 mGal with a majority distribution of negative anomalies on CVL between Bafang and Tignere following the NE-SW direction, in Adamawa and CC. According to the geology, the negative anomalies located along the CVL are mainly dominated by volcano-plutonic structures dating from the Cenozoic and on the Congo Craton by Gneiss and micaschist of the Yaounde group (Toteu et al. 2008). In the southern part of Cameroon, a linear distribution of positive anomalies following the E-W direction runs along the limit of the CC. These positive anomalies were considered as the boundary between CC and PMB (Nguia et al. 2018; Cheunteu Fantah et al. 2022).

This work suggests that this transition zone could have been created after the continental collision between the PMB and the CC as mentioned by Toteu et al. (2004). All the same, the negative anomalies south of the CC whose geophysical limits are parallel to latitude 4°N disappear under the PMB through intercontinental impact (Tadjou et al. 2009). These variations of the Bouguer anomalies are, however, due to the heterogeneity of the geological structures in the basement of the study region. In Cameroon, the CVL is localized in high altitude regions and is characterized by anomalies in the open air (Fig. 4) of very high amplitude starting over its entire length; very similar to those located on the transition zone between the CC and the PMB. This analysis shows that the structure of the CVL undergoes strong vertical movements. These positive anomalies in the open air could suggest that the gravity anomalies are partially controlled by the topography.

Further north, negative anomalies are localized with low intensity. This is consistent with the topography of our study zone, which is generally composed of high and low lands with an altitude of less than 300 m. This explanation supports well the isostatic compensation hypothesis (Airy 1826; Pratt 1855), suggesting that the high zones are generally related to the mass deficit either by a thickening of the crust (Airy model) or by lower densities (Pratt's model).

Upward continuation of gravity data

The Bouguer anomalies were measured upward and continuously at altitudes of 10, 30, 50, 80 and 100 km, respectively (Fig. 5), in order to delete high frequency signals from superficial sources (see Jacobsen 1987). It can be observed from the maps that the Bouguer anomalies have a strong regional component because the effect of shallow structures vanishes with the increase in altitudes. Three major features can be observed (Fig. 5): (1) zones of positive gravity anomalies geographically associated with the positions of the Benue Trough and the continent border; (2) zones of negative anomalies associated with the positions of the

northern extension of CC and the Adamawa Plateau; (3) areas of strong anomaly gradients that can be associated with the transition between these major features. The observed features suggest that sources of negative anomalies beneath the Adamawa Plateau may have different compositions compared to the ones beneath Congo Craton. They also reflect the changes in crustal thicknesses under the two geological features. In addition, the persistence of gradients between these major structures after suppression of higher frequency signals suggest the existence of a geodynamic interaction between the CVL and the Congo Craton structures at greater depths.

Along the geographical location of the CVL, the negative anomalies around the Adamawa Plateau gradually fade with depth, while the amplitude of the positive anomalies found around Mt. Cameroon increases with depth. This suggests that the geodynamic processes at the origin of CVL have different mechanism at different places along the line and therefore, supports the fact that the hotspot theory fails to explain the setting of the line.

Choice of grid and profiles for modelling gravity data

The Congo Craton Limit (CCL) (Fig. 3) that is interpreted as the boundary between the CC and the Pan-African chain in Cameroon is characterized by lines of gravity gradients extending along latitude 4°N towards the continental coast (Tadjou et al. 2009; Nguia et al. 2018; Owona Angue et al. 2011; Cheunteu Fantah et al. 2022). These gradients extend towards the North-West direction along the geographical location of the CVL. The extension of these abnormal gradients around Mt. Cameroon therefore suggests a possible interaction between the structures of the CVL and the CC. Consequently, we focussed the investigation in the reduced area shown in Figs. 3 (white rectangle) and 6A, B. Five NS parallel profiles have been drawn over the area (Fig. 6B). The profiles are selected taking into account the location of the gradients contrast of the anomalies around Mt. Cameroon and approximation of the gravity signatures located on the CVL and the CC, and the lateral distribution of the main geological features found in the restricted area.

The Moho depth estimation from 2D frequency spectrum analysis

Figure 6C–E shows graphics of the frequency spectrum of Bouguer anomalies as a function of wavenumber for the restricted study area. The area is selected because it contains the signal from the main geological features of interest. The area is divided into 16 grids of $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (110×110 km) (Fig. 6A). For each grid, the average depths of the causative sources are estimated. The error on the

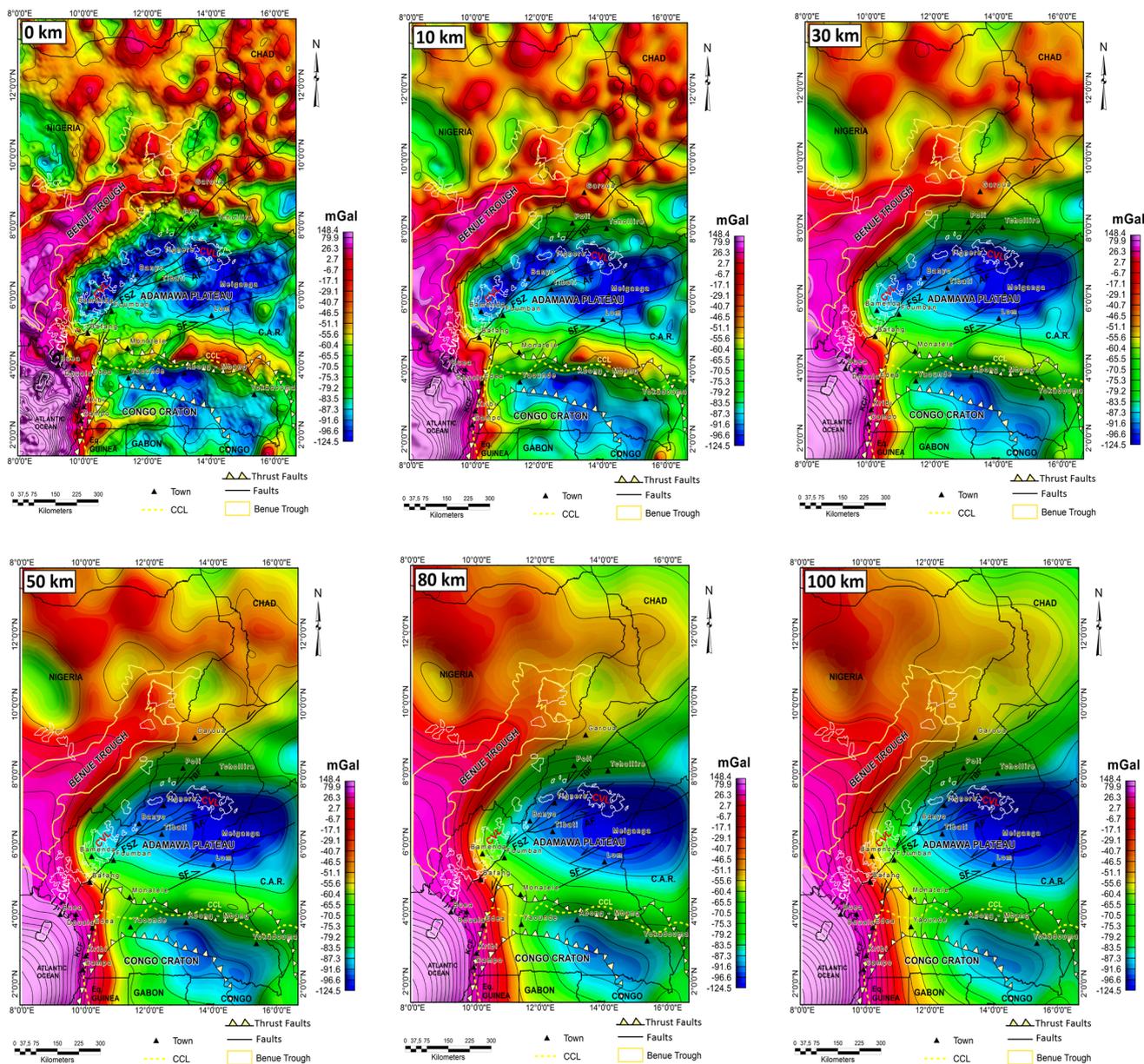


Fig. 5 Upward continuation maps of Bouguer anomalies at the depths of 10 km, 30 km, 50 km, 80 km and 100 km

estimated depths of the Moho is calculated. This error is taken as the standard deviation by the linear fit of the blue segment (Goussi Ngalamo et al. 2017, 2018). This error should be in the interval 0.65 and 1.85 km. The results of the estimation of the Moho depth calculated for each sub-area are shown in Fig. 7.

The red segment corresponds to the lowest wavenumbers in the interval (0.00 and 0.05) used to represent the slope of the depths of the geological structures beyond the Moho (Fig. 6C–D). The blue segment on the 2D frequency spectrum corresponds to the average Moho depth in the range

(0.25 and 0.55) while the green can be associated with sources of intracrustal discontinuity (between 0.25 and 0.40) or random noise.

They reveal that the crustal thickness is greater beneath the CC (49 km; Grid 15), and thinner beneath the PMB (35–39 km; Grids 2 and 8). However, it has a minimum thickness of 34 km under the Adamawa-Yade domain between latitudes 5° and 6°. At the level of the Atlantic Ocean, the Moho is shallower (24 km minimum thickness). On the CVL, the average depth of the Moho is about 37 km. In addition, a linear depth column running NW–SE is found

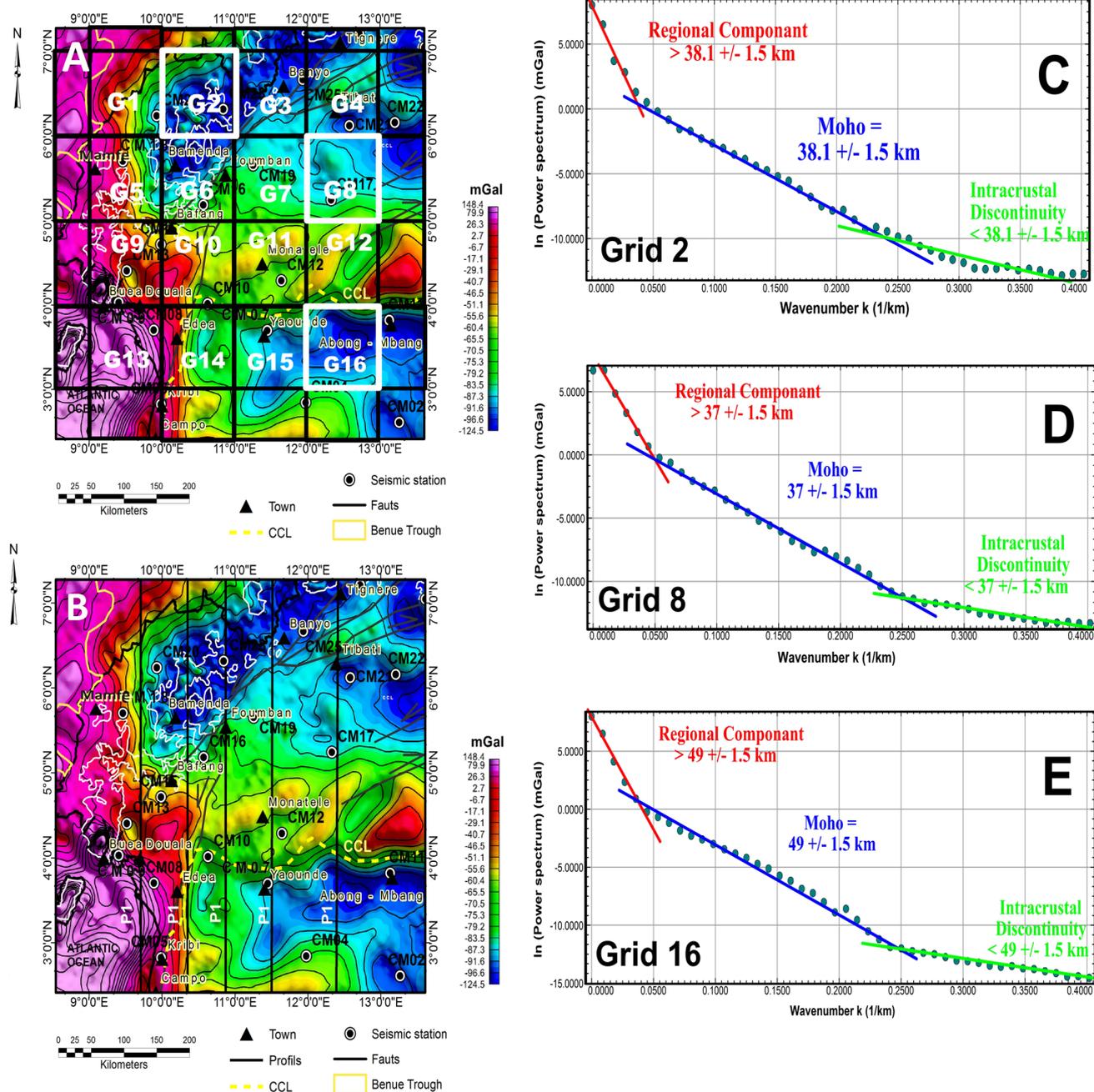


Fig. 6 A Bouguer gravity anomaly map derived from the global gravitational model extract from Fig. 3 for spectral analysis; illustrated the black cells sub-windows on Bouguer anomalies map divided into 16 grids of $1^\circ \times 1^\circ$ ($\sim 110 \text{ km} \times \sim 110 \text{ km}$). The white cells represent an example the location of the $1^\circ \times 1^\circ$ sub-region exploited for the gen-

eration 2D frequency spectrum curve shown in Fig. 6. B Represent the positions of the profiles used for the modelling. C–E Spectral curves extracted from $1^\circ \times 1^\circ$ ($\sim 110 \text{ km} \times \sim 110 \text{ km}$) sub-windows form the Bouguer gravity anomaly map for portions of the CVL (C), the Adamawa Plateau (D) and the Congo Craton (E)

the CVL under the localities of Bafang and Mamfe with a minimum thickness of 40 km. The spectral analysis therefore reveals the great disparity in the crustal structure of the study area.

Validation of the Moho depth estimates

The Moho depth of CVL and CC is estimated in this study. The 2D frequency spectrum analysis of the Bouguer anomalies of the global gravity model data is adopted. In the past, the few passive and active seismic investigation works and

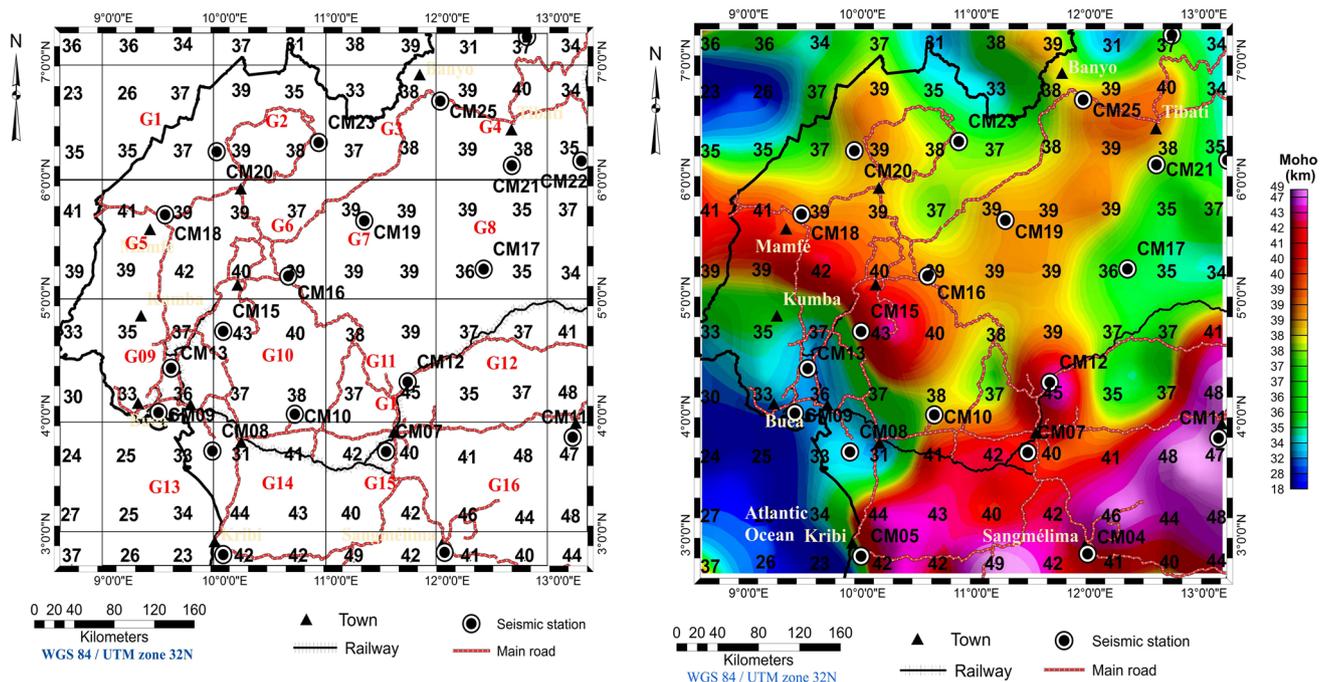


Fig. 7 Moho depth maps: On the left a map that shows the values of crustal thicknesses (in km) generated for the sub-regions $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ in the 2D frequency spectrum analysis of the global gravitational model data from south Cameroon. To left, the map shows the estimated

ground gravity survey studies were carried out with also the aim to estimate the Moho depth beneath Cameroon. As a seismic investigation, S-wave velocity profiles generated from the joint inversion of the Rayleigh wave group P-receiver functions for the 32 broadband seismic stations deployed in Cameroon between 2005 and 2007 were established (Tokam et al. 2010). In this study, 18 of these seismic stations located on the CVL and Congo Craton are exploited. These same authors have reported the results of crustal thickness estimates beneath Cameroon. Thus, on the CVL, Adamawa Plateau and Congo Craton, thanks to the CM23 CM17 and CM10 stations, respectively, the Moho depth estimated by these authors are 40.5, 35.5 and 38 km (Table 1). The Moho depths estimated in the same area by 2D radial mean power spectral analysis are 38, 36 and 38 km.

Subsequently, these same data were exploited by Gallacher and Bastow (2012) to calculate the average Moho depth using the teleseismic receiver function and they obtained for this same station (CM23, CM17 and CM10) the respective values 38.3, 37.8 and 35.8 km (Table 1). They thus reported depth estimates of the Moho for these stations (See Table 1). Similarly, Goussi Ngalamo et al. (2017) used global gravity data (WGM 2012) to study the geological structures of the Congo Craton dating from the Archean and the Oubangides orogenic belt in Cameroon. In their work, they studied the anomaly power spectra for the 2012 WGM

Moho depths values for CVL and CC from the global gravitational model data. To right, mapping of spatial distribution of crustal thickness estimates for CVL and CC

data to estimate the depth of Moho near the stations (CM23, CM17 and CM10) and obtained 37 km. A comparative analysis of the depths estimated in this work from the global gravitational model data with the results of seismic work (Tokam et al. 2010; Gallacher and Bastow 2012) then WGM 2012 data used by Goussi Ngalamo et al. (2017) shows a respective majority difference between -4 to $+10$, -6.5 to 7.2 and -1 to $+8$.

The results obtained are in agreement with the estimated Moho depth by Poudjom Djomani et al. (1995) who showed that the Congo craton is up to 50 km in depth. All the same, Guidarelli and Aoudia (2016) estimated the depth of Moho under the Congo Craton to be in the range of 40 and 48 km. The results of this study are also in agreement with the depth of Moho estimated from gravity data in the work of Goussi Ngalamo et al. (2017) which highlighted a 2D spatial distribution of the depth of Moho, with a maximum depth of the Congo Craton at 49 km and for the CVL at 37 km.

Thus, as a cumulative comparative study, the root mean square error (RMSE) between this work's results with those of Tokam et al. (2010), Gallacher and Bastow (2012), Goussi Ngalamo et al. (2017) and Kemgang Ghomsi et al. (2019) are determined. The RMSE between the results of this work with those of Tokam et al. (2010) is 6.0286 km, Gallacher and Bastow (2012) is 4.0053 km, Goussi Ngalamo et al. (2017) is 3.5434 km, and Kemgang Ghomsi et al. (2019) is

Table 1 Moho depth estimates in this study compared to literature estimates

Seismic stations	Long	Lat	Gravity Moho depths (Km) ^a	Seismic Moho depths (km) ^b	Seismic Moho depths (km) ^c	Gravity Moho depths (Km) ^d	Gravity Moho depth (km) ^e	Diff. ^f	Diff. ^g	Diff. ^h	Diff. ⁱ	Diff. ^j	Diff. ^k
CM04	11.96	2.98	41	45	47.5	39	35.34	-2.5	6	-4	-6.5	+2	+5.66
CM05	9.91	2.94	42	28	37.4	43	28.40	-9.4	-15	+14	-4.6	-1	+13.6
CM07	11.46	3.87	40	43	41.8	37	36.47	1.2	6	-3	-1.8	+3	+3.53
CM08	10.01	3.76	38	-	-	38	-	-	-	-	-	0	-
CM09	9.33	4.23	36	25.5 (?)	-	30	34.24	-	-4.5	-	-	+6	+1.76
CM10	10.62	4.22	38	38	35.8	37	37.42	2.2	1	0	+2.2	+1	+0.58
CM11	13.19	3.98	47	48	43.3	44	40.34	4.7	4	-1	+3.7	+3	+6.66
CM12	12.63	4.48	45	38	37.8	37	34.33	0.2	1	+7	+7.2	+8	+10.67
CM13	9.46	4.59	36	28	36.5	44	32.28	-8.5	-16	+8	0.5	-8	+3.72
CM15	9.93	5.03	43	33	7 (?)	40	34.99	-	-7	+10	-	+3	+8.01
CM16	10.57	5.48	39	35.5	34.1	40	40.3	1.4	-4.5	+3.5	4.9	-1	-1.3
CM17	12.31	5.55	36	35.5	37.8	37	36.41	-2.3	-1.5	+0.5	-1.8	-1	-0.41
CM18	9.36	5.72	39	30.5	-	39	36.15	-	-8.5	+9.5	-	0	+2.85
CM19	11.23	5.96	39	35.5	-	38	31.53	-	-2.5	+4.5	-	+1	+7.47
CM20	10.05	6.23	39	33	33.7	36	37.75	-0.7	-3	+6	5.3	+3	+1.25
CM21	12.62	6.67	38	35.5	34.1	34	39.31	1.4	1.5	3.5	3.9	+4	-1.31
CM23	10.79	6.37	38	40.5	38.3	37	40.02	2.2	3.5	-2.5	-0.3	+1	-2.02
CM25	11.81	6.76	39	38	38.2	39	34.12	-0.2	-1	+1	+1.2	0	+4.88

Long. Longitude, Lat. latitude, Diff. difference

^aEstimated Moho depth in this work using data from XGM2019e_2159 model

^bEstimated Moho depth by Tokam et al. (2010)

^cEstimated Moho depth by Gallacher and Bastow (2012)

^dEstimated Moho depth by Goussi Ngalamo et al. (2017) using data from WGM2012 model

^eEstimated Moho depth by Kemgang Ghomsi et al. (2019) using data from XGM2016 model

^fDifference Estimated Moho depth between b and c

^gDifference Estimated Moho depth between c and d

^hDifference Estimated Moho depth between a and b

ⁱDifference Estimated Moho depth between a and c

^jDifference Estimated Moho depth between a and d

^kDifference Estimated Moho depth between a and e

5.7703 km. The results of the crustal depths estimated in this work near the 18 seismic stations deployed between 2005 and 2007 have been listed in the table below for a comparative study with those highlighted by Tokam et al. (2010), Gallacher and Bastow (2012), Goussi Ngalamo et al. (2017) and Kemgang Ghomsi et al. (2019).

2D1/2 modelling of gravity data

For the 2D1/2 classical modelling, five NS profiles were chosen in the west of the study area (Fig. 6B) with the objective of modelling the subsurface structures using both constraints from surface geology (Fig. 1) and the distribution of velocity contrasts obtained from 1D shear velocity models by Tokam et al. (2010) (Fig. 7).

The 2D1/2 modelling of the gravity data was done using the GM-SYS computer program integrated into the Geosoft software, which is based on the works of Rasmussen and Pedersen (1979) and the algorithm of Won and Bevis (1987). Along the selected N–S profile, the initial model is defined using geological surface observations and velocity contrasts from seismic profiles by Tokam et al. (2010). The velocity profiles are used to set the Moho boundary while the geological observations are used to propose the initial shapes for the polygons. The final model consists of adjacent polygons of constant density for which the effects of gravity produce a modelled curve which should fit the observed values. The valid model is the one whose theoretical curve best correlates to the model of the observed data and taking into account the geological constraints.

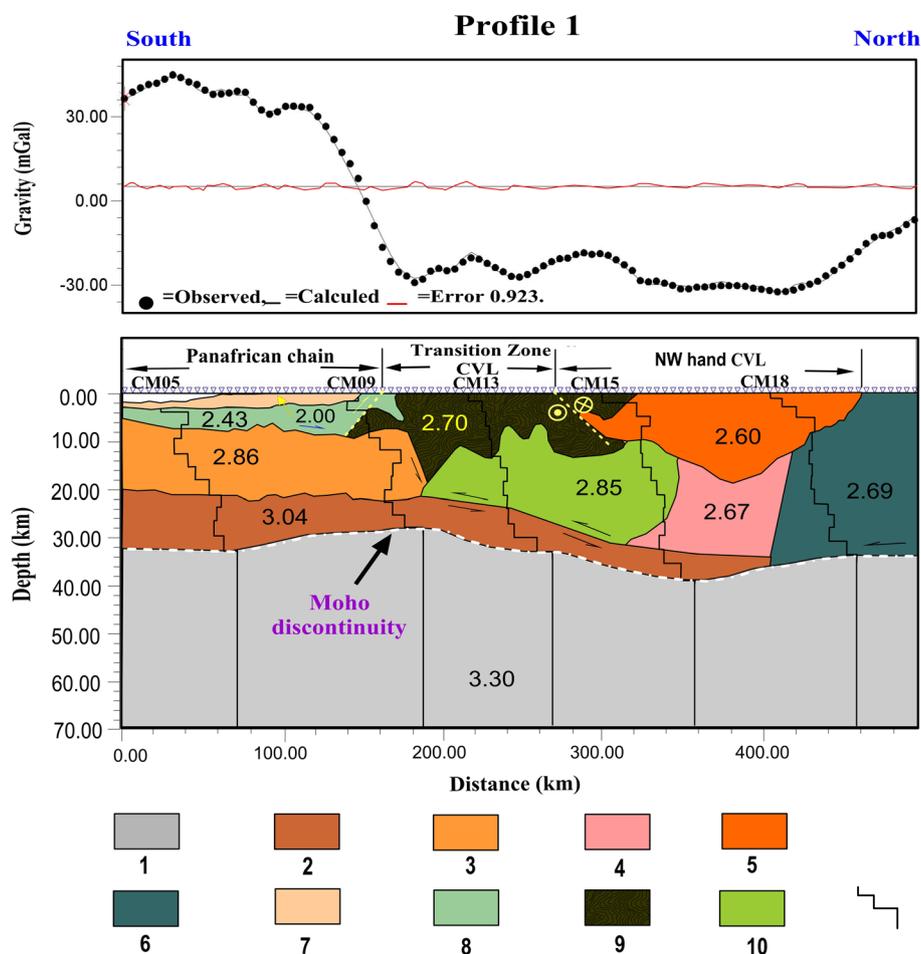


Fig. 8 2D1/2 gravity model along profile 1 along. The shear wave velocity (redrawn from Tokam et al. 2010) is plotted over the 2D1/2 model for comparison. The vertical dashed lines correspond to the cut-off values used to indicate the composition of each layer of the mantle. The horizontal dotted lines represent the interfaces of the crust layers estimated in the Study Region. Densities of the structures are as follow: (1) upper mantle $d_1=3.30 \text{ g/cm}^3$. (2) Layer of mafic crust $d_2=3.04 \text{ g/cm}^3$. (3) Granulites (Pan-African belt) $d_3=2.86 \text{ g/cm}^3$. (4) Granitoid of the Neoproterozoic juvenile crust (North-West

Pan-African domain) $d_4=2.67 \text{ g/cm}^3$. (5) Volcano-plutonic structure dating from the CVL Cenozoic (West Pan-African domain) $d_5=2.6 \text{ g/cm}^3$. (6) TTG charnockite dating from the Meso-Archean (Precambrian basement) $d_6=2.69 \text{ g/cm}^3$. (7) Clay and sand (Pan-African belt) $d_7=2.00 \text{ g/cm}^3$. (8) Phanerozoic cover $d_8=2.43 \text{ g/cm}^3$. (9) Neoproterozoic volcano-metamorphic formation with paleoproterozoic relics of the CVL (West Pan-African domain) $d_9=2.7 \text{ g/cm}^3$. (10) Gneiss-granulitic-Basaltic structure of the CVL part (North-West Pan-African mobile zone) $d_{10}=2.85 \text{ g/cm}^3$

The density values of structures were chosen based on geological information and average rock density from Telford et al. (1990).

Results of the 2D1/2 modelling are shown on Figs. 8, 9, 10, 11 and 12. Each model consists of two panels; (1) an upper panel where the curves of observed and computed data are represented as well as the error on data adjustment, and (2) a lower panel showing the distribution with depth of geological structures in the form of polygons along the NS profiles. The depths of investigation was set to 70 km. For modelling, since we seek to characterize the geometry of basement geological structures in the crust, the average value of the density beyond the Moho was taken uniformly. Thus, the depth of investigation was chosen arbitrarily in the mantle.

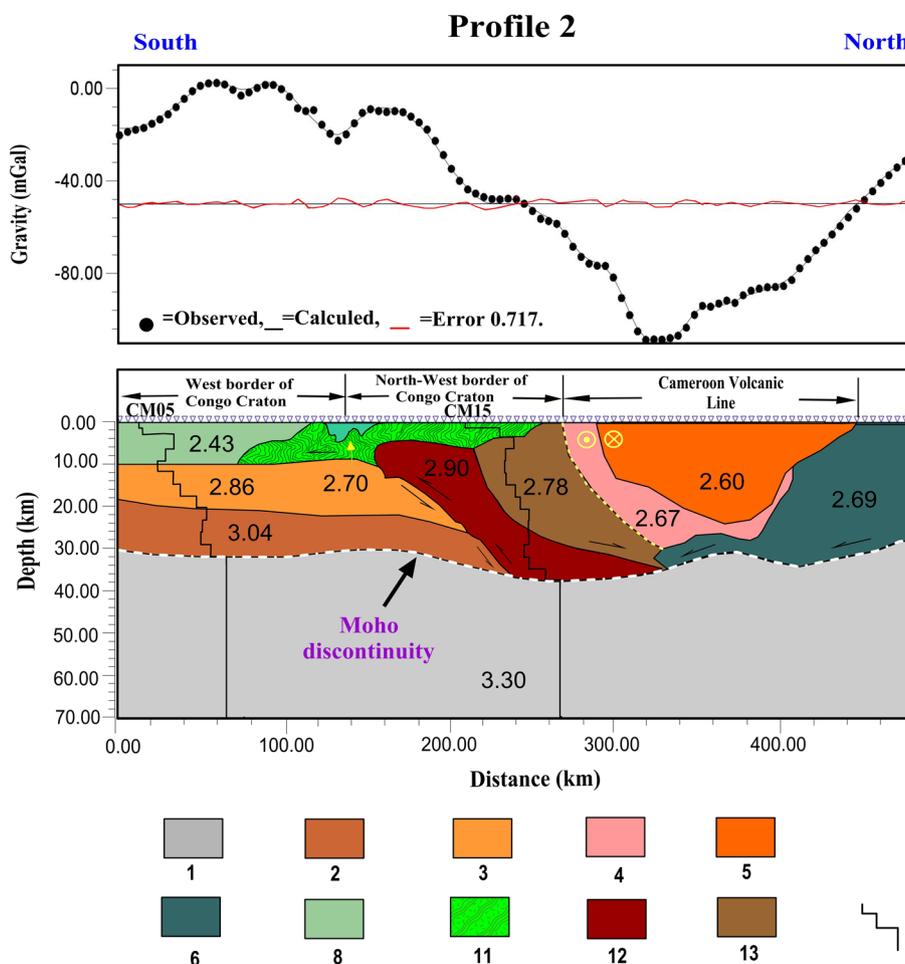
The final 2D1/2 models include a minimum number of nine layers for profile 1, ten layers for profile 2, and fifteen layers for profiles 3, 4 and 5, taking into account the geology. The density of the uppermost mantle layer has been set to 3.3 g/cm^3 for all the profile. The shear velocity profiles are plotted on the 2D1/2 models in order to control the vertical extension of the various polygons. Results show a crust

thickness varying from 28 km beneath the coastal area to about 33 km beneath the Pan-African chain on profiles 1 and 2. The crust appears to be thicker under the CC where the Moho is found at depth of $\sim 46 \text{ km}$ (profiles 3–5). In general, the undulations of the Moho topography do not follow the variations in experimental data curves, suggesting that the gravity anomalies are not only controlled by the tectonics.

At the bottom of the crust, a layer with density of about 3.04 g/cm^3 is found with a varying thickness along all the profiles. The presence of this layer composed of mafic rocks has been proposed previously using seismic data (Tokam et al. 2010) and Owona Angue et al. (2011) using $2\text{D}^{1/2}$ modelling of gravity data. The layer is thicker under the CC, and becomes thinner beneath the Pan-African chain and disappears within the CVL area. The presence of this layer is in good correlation with the observations of Rudnick and Gao (2003) who suspected the global presence of a mafic structure in the lower crust of the Precambrian layers.

Profile 1 crosses from South to North, the Pan-African chain west coast of Congo Craton, the positive anomalies of CVL to the North-West of the CC, the areas of anomalies contrast on the CVL and part of the Benue Trough (Fig. 8). The corresponding

Fig. 9 2D1/2 gravity model along profile 2. See Fig. 8 for details on structures 1–6 and 8. (11) Tectonic sheet of allochthonous thrust and spill (South Pan-African domain) on Congo Craton $d_{11} = 2.7 \text{ g/cm}^3$. (12) Exhumation and pushing of the deep crust (Congo Craton) $d_{12} = 2.9 \text{ g/cm}^3$. (13) Crust of the Pan-African mobile zone associated with granulitic metamorphism $d_{13} = 2.78 \text{ g/cm}^3$.



2D^{1/2} model shows the volcano-metamorphic structures dating from the Neoproterozoic including Paleoproterozoic relics of the CVL and the Pan-African West domain whose deformation has a variable volume with the depth of about 16 km. This deformation could be due to the geodynamic compression between the granulite and Tonalite–Trondhjemite–Granodiorite (TTG) charnockite structures of the Pan-African chain with the Basaltic and volcano-plutonic structure of the CVL.

Profile 2 crosses successively the western border of the Congo Craton, its north-western transition zone with the Pan-African belt, the CVL and part of the Benue Trough (Fig. 9). The granulite structures of the Pan-African belt (2.86 g/cm³ density) are highlighted on the Kribi-Campo fault as previously located by Tadjou et al. (2009) and Owona Angue et al. (2011). This model also shows the dumping of structures from the Pan-African belt on the Congo Craton. The model also reveals the extension of the granulitic metamorphic structures of the Pan-African mobile zone as evoked earlier by Toteu et al. (2004).

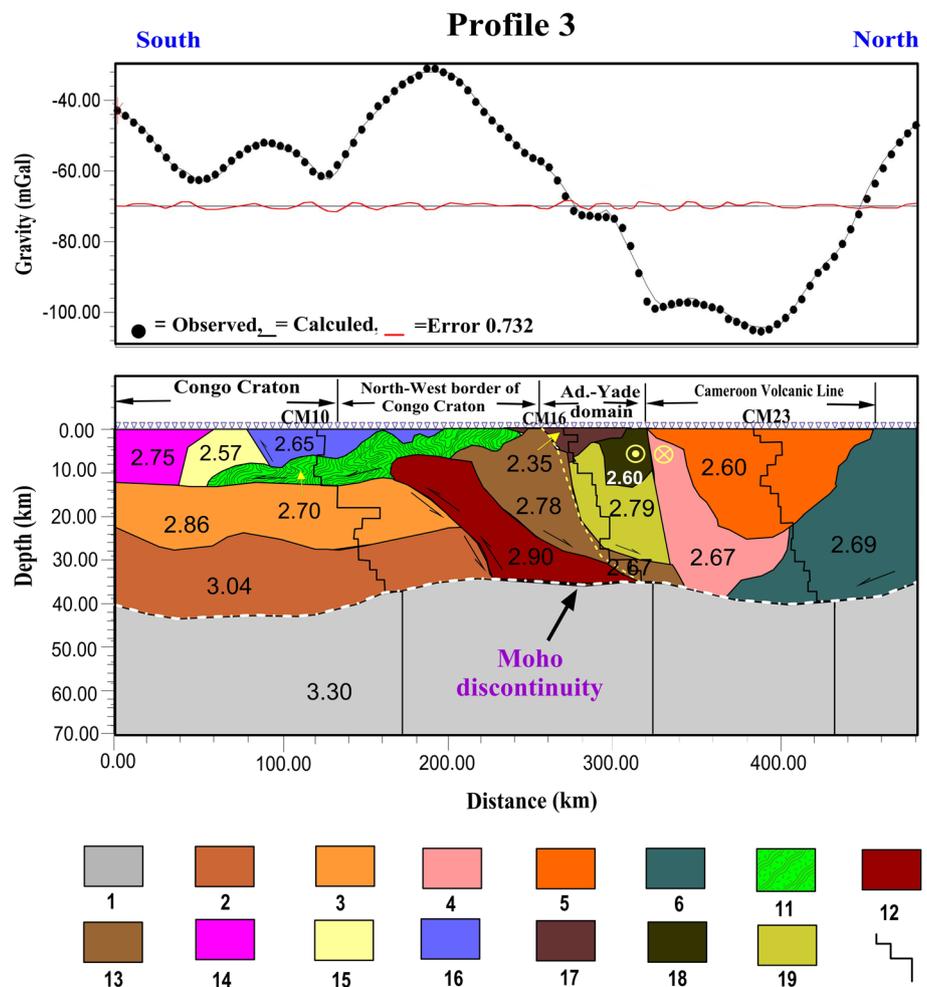
Profiles 3 to 5 pass through the Congo Craton, its northern limit with the Pan-African chain (Figs. 10, 11, 12). The 2D^{1/2} models indicate the presence of gneiss intrusion with

density 2.75 g/cm³ beneath the Congo Craton with a thickness of ~12 km and an intrusion of granitoids with density 2.6 g/cm³ in the Pan-African mobile belt domain.

In general, profiles 2 to 5 reveal the uplift of the South Pan-African domain associated with granulitic metamorphism by displacement and the thrust of the deep crust followed by the spillage of the tectonic sheet of allochthonous thrusting on the Congo Craton; this uprising followed by the spill are the consequence of continental collision of the Pan-African chain with the Congo Craton evoked by Toteu et al. (2004). The exhumation and the thrust of the deep crust observed in the northern boundary of the CC with the Pan-African chain would probably have been triggered by the thermo-metamorphic processes of convective flows from the lower mantle thus deforming the upper mantle.

The perspective drawing of the five profiles resulting from the 2D^{1/2} models provides an overview of the distribution of the geological structures in the CVL and Congo Craton crust (Fig. 13).

Fig. 10 2D^{1/2} gravity model along profile 3. Figures 8 and 9 for details on 1–13 structures. (14) Intrusive Gneiss (Congo Craton) d14 = 2.75 g/cm³. (15) Granites (Craton Congo) d15 = 2.57 g/cm³. (16) Yaounde sheet associated with granulitic metamorphism d16 = 2.65 g/cm³. (17) Paleoproterozoic meta-sediment (Pan-African Center domain) d17 = 2.35 g/cm³. (18) Intrusive Syn-to-post-tectonic granitoid (Pan-African Center mobile zone) resting on the Paleoproterozoic base d18 = 2.60 g/cm³. (19) Paleoproterozoic base of Pan-African Center d19 = 2.79 g/cm³



Discussion

In this work, gravity data correlated to 1D shear wave velocity profiles were used to investigate the lithospheric structures beneath Cameroon. After interpreting the gravity maps, a detailed examination has been carried out over a reduced area which contains the gravity signals of the geological structures under geodynamic interactions. Here, we are particularly interested on the tectonic settings of the following structures: the CVL, the CC and the limit between the two. The Congo Craton represents one of three major older Precambrian rock masses that remained stable throughout the development of the late Precambrian and early Paleozoic fold belt system (Kennedy 1964; Read and Watson 1975). It is overlain by fairly extensive late Precambrian or Phanerozoic cover sequences (Read and Watson 1975). In its north-western edge, convection affects the formation of the LVC (Roi and Anderson 1995). Reusch et al. (2010) had suggested that it is convection at the edge of the Congo Craton and associated upwelling beneath the CVL. North of the Congo Craton, heat flow contrasts are created leading to hot material beneath the Craton to flow laterally and upward beneath the CVL

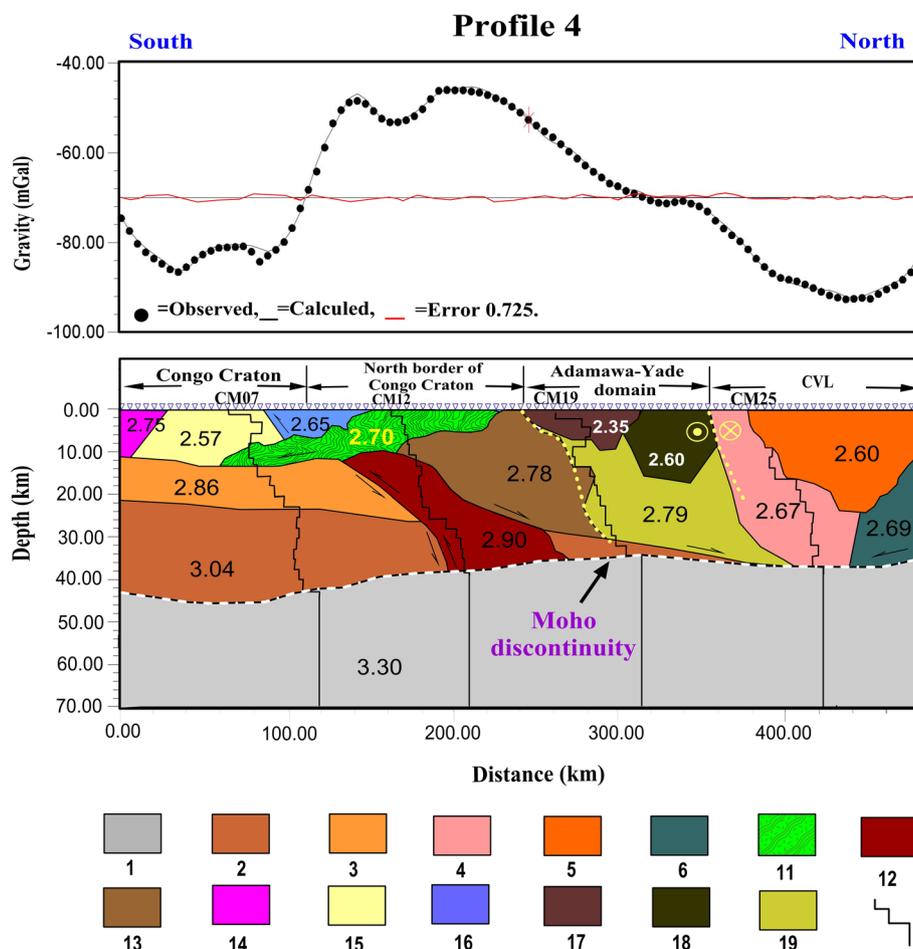
(Adams et al. 2015). This part of the Congo craton located south of Cameroon would have played an important role in the origin of the CVL (Table 2).

Origin of Cameroon volcanic line

The CVL represents one of the greatest geological structures which arouses the curiosity of researchers in the world in order to understand its origin, formation and evolution (Tabod et al. 1992; Lee et al. 1994; Pasyanos and Nyblade 2007; Priestley et al. 2018; Fishwick 2010; Reusch et al. 2010, 2011; Elsheikh et al. 2014; Adams et al. 2015; Ojo et al. 2017). Previous study on the mapping of major tectonic lineaments from potential field data has made it possible to highlight the major structural characteristic of Cameroon and its surroundings (Cheunteu Fantah et al. 2022). These tectonic features suggest that the subsurface of the study region is perpetually active. The main purpose of this work is to better understand the geodynamic origin of the CVL.

The application of the upward continuation filter on the Bouguer anomaly data allowed distinguishing different thicknesses and compositions of the crust beneath the Congo Craton, the PMB and the CVL. For example, we noticed that

Fig. 11 2D1/2 gravity model along profile 4. Structures along the profile are similar to those on profile 3



the gravity anomaly patterns are not homogeneously distributed along the line. In fact, the positive anomalies observed around Mt. Cameroon are not observed elsewhere along the line. This is consistent with the lack of age progression and various magmatic compositions found along the line (Grant et al. 1972; Grunau et al. 1975; Dunlop and Fitton 1979; Fitton and Dunlop 1985; Marzoli et al. 2000; Ngounouno et al. 2003; Njilah et al. 2004; Aka et al. 2009; Kamgang et al. 2010), thus confirming that the setting of the CVL cannot be interpreted with the hotspot theory (Ebinger and Sleep 1998; King and Ritsema 2000; Reusch et al. 2010, 2011; Adams et al. 2015; Guidarelli and Aoudia 2016). Therefore, another form of geodynamic interaction can be proposed for the setting of the line from the existence of several zones of gravity gradients observed on the gravity anomalies (Figs. 3 and 5).

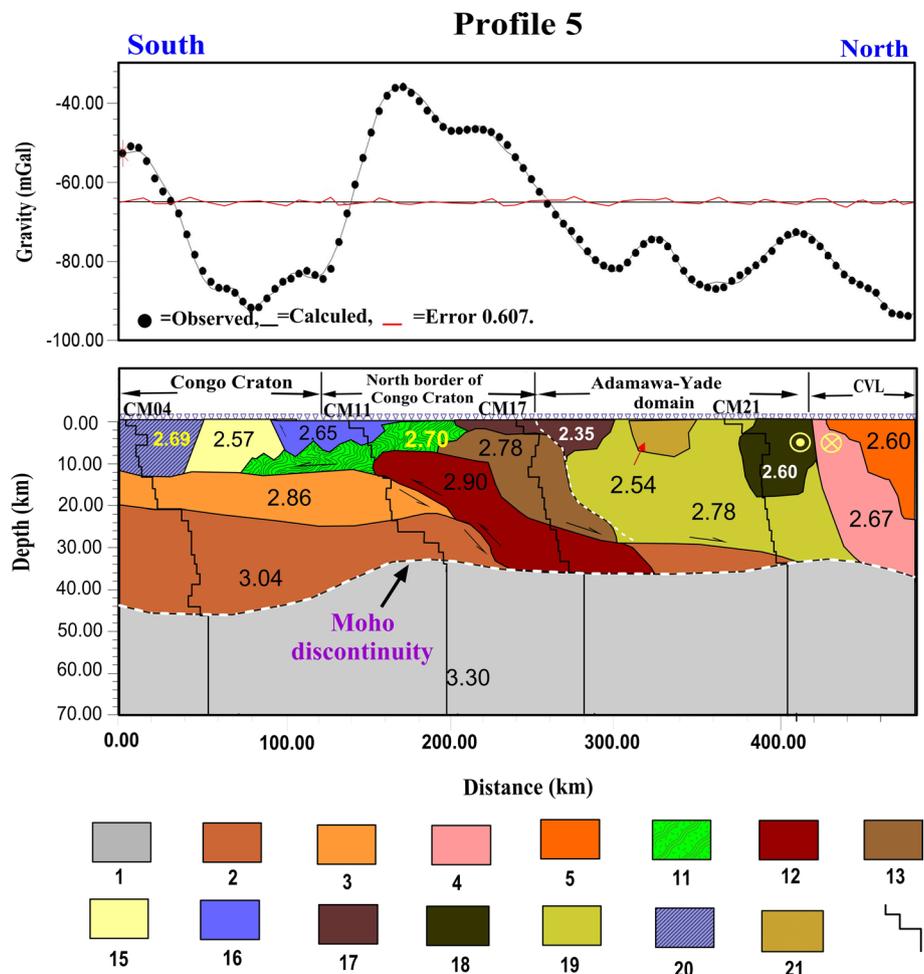
The gravity gradient along latitude 4°N has been interpreted as the northern border of the CC with the Pan-African mobile chain. (Tadjou et al. 2009; Owona Angue et al. 2013; Ngatchou et al. 2014; Nguiya et al. 2018; Cheunteu Fantah et al. 2022). This gravity gradient vanishes on the upward continued maps for altitude above 50 km where the amplitude of the gradient is reduced while the structures within

the Benue Trough maintain a strong anomaly contrast with those of PMB and Congo Craton. This feature confirms the geodynamic processes in the mantle that contributed on the setting of the CVL that can be linked to the opening of the South Atlantic Ocean. Fairhead (1988) speculated that the CVL may be the result of a rifting motion including changes in the geometry and spreading rates of the equatorial and South Atlantic ridge over the last 10 Ma. During this time, there have been ridge jumps and anomalous seafloor spreading events in this region (Bonatti and Crane 1984; Brozena 1986).

Interaction between the Cameroon Volcanic Line and the Congo Craton

In order to discover what kind of interaction exists between the CVL and the CC, 2D1/2 modelling was performed along five NS profiles taken on these large structures. The results of the 2D1/2 classical modelling are an alternate way to simulate the densities distribution of the rocks within the lithosphere of the study area. The modelling is somehow well correlated between the

Fig. 12 2D1/2 gravity model along profile 5. Figure 11 for details on structures 1–5, 11–13 and 15–19. (20) TTG charnockite intrusive Congo Craton $d_{20} = 2.69 \text{ g/cm}^3$. (21) Volcanic rocks: rhyolite (Pan-African Center mobile zone) $d_{21} = 2.54 \text{ g/cm}^3$



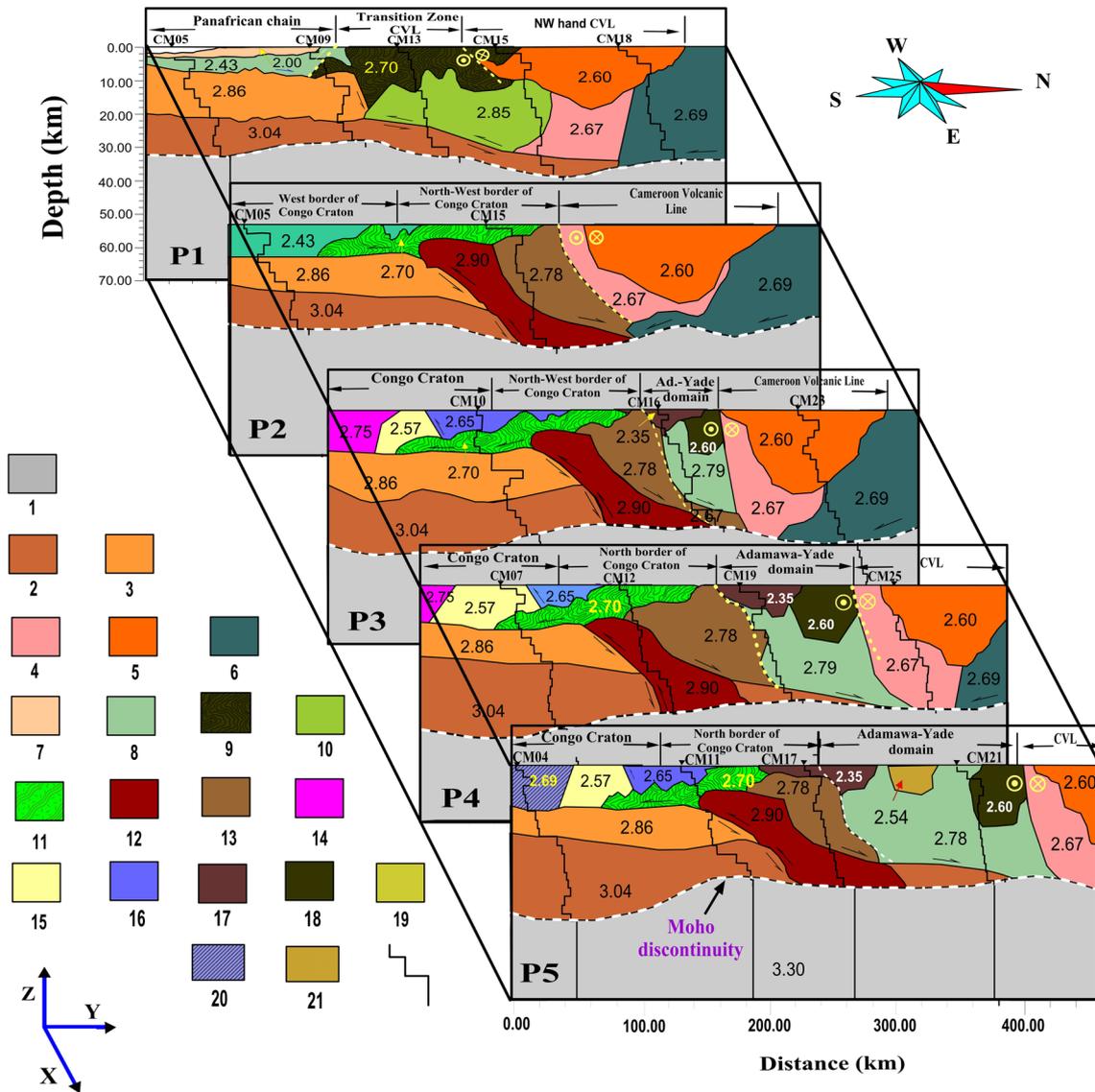


Fig. 13 3D representation of the five 2D1/2 models showing the lateral alignment of similar structures over the various profiles

Table 2 Average densities of the rocks (Telford et al. 1990)

Rocks	Range	Mean density (g/cm ³)	Rocks	Range	Mean density (g/cm ³)
Quartzite	2.50–2.70	2.90	Clay and sand	1.70–2.30	2.00
Schists	2.39–2.90	2.64	Syenite	2.60–2.95	2.77
Granite	2.60–2.70	2.65	Gneiss	2.59–3.10	2.80
Granulite	2.52–2.73	2.65	Igneous basics	2.09–3.17	2.79
Basalts	2.70–3.30	2.99	Metamorphic	2.40–3.10	2.74
Migmatites	2.40–3.10	2.75	TTG charnockite	–	2.69
Gneiss	2.59–3.10	2.80	Rhyolite	2.35–2.70	2.54

experimental and computed Bouguer anomalies. In general, the crust is thicker in the southern part of the five profiles and thinner northwards. From the models, an intrusive rock ($d_{12} = 2.9 \text{ g/cm}^3$) is depicted on the profiles 2–5 with a source from the mantle. The presence of this rock which appears as a plutonic rock may be associated with the small-scale convective processes resulting from edge flow along the northern rim of the Congo Craton as evoked earlier by King and Ritsema (2000), Reusch et al. (2010) and Reusch et al. (2011). The results of the crustal thrust of the CC under the PMB rocks may have triggered the defragmentation of certain blocks of the Pan-African mobile zone associated with the granulitic metamorphism. Hence, several slides may have exerted strong pressure on the Paleoproterozoic basement of the Pan-African Center domain to affect the less dense juvenile crust beneath the CVL. However, our 2D_{1/2} gravity models were performed assuming a constant density for the mantle along all the profiles and therefore, cannot help in discriminating changes within the mantle. In addition, the 2D_{1/2} models are consistent with the 1D velocity models proposed by Tokam et al. (2010) who suggested after Reusch et al. (2010) that the small-scale convection remains the most viable model at the origin of the line.

In addition, the models also reveal an inhomogeneous crust in term of density. Although the variation of densities can explain the heterogeneity of the crustal structures beneath the CVL and the Congo Craton, this parameter alone cannot be sufficient in explaining the setting of the CVL. In fact, a number of parameters can influence density and seismic velocity, including temperature, composition and partial melting (Sobolev et al. 1996; Karato and Karki 2001).

Conclusion

The present work had as aim to investigate the structure of the lithosphere beneath Cameroon to further contribute to the understanding of the origin of CVL and its interaction with the CC. The upward continuation analysis of the gravity data suggests that the processes behind the setting of the CVL originate from small-scale mantle convection. However, strong lateral discontinuities exist along some profiles and correlated well with the hypothesis of a high-density lower crust at the location of the Congo Craton. The 2D frequency spectrum analysis has been used to estimate the crustal thickness and Moho depth on the CVL and Congo Craton. In order to validate our results, a statistical analysis was carried after comparing the Moho depths results from the present study to those obtained by seismic and gravity studies of Tokam et al. (2010), Gallacher and Bastow (2012)

and Goussi Ngalamo et al. (2017). The results of the 2D_{1/2} modelling show the exhumation and the thrust of the deep crust of the South Pan-African domain on the CC followed by a spill of the Pan-African tectonic sheet on the CC. The high topography observed over the CVL could be the consequence of the small-scale mantle convection processes phenomena in the mantle in these areas. The high contrast of gravity anomalies observed in the West and across the CVL suggests a possible interaction between the Congo Craton and the CVL and can be associated with the compression of the volcanic and volcano-plutonic structures of the CVL by the dense lithospheric structures of the Congo Craton and Benue Trough. It is far from having unravelled this mystery on the interaction between these two large geological structures; therefore, our results are still hypothetical. Thus, a further study combining new seismic models, magnetotelluric and geoelectric data, and geological field works will bring additional light in the comprehension of the interaction between the Craton of Congo and the CVL.

Acknowledgements We would like to thank ICGEM (International Centre for Global Earth Model) for the availability of the global gravity model gravity data (XGM2019e_2159). We also thank: Ian Macleod and Tim Dobush for developing the Geosoft software for geophysical exploration; Paterson, Grant and Watson Limited for providing the executable programs in Geosoft for specialized processing needs in Oasis Montaj. We are especially grateful to the two anonymous reviewers who greatly contributed to the achievement of this work.

Declarations

Conflict of interest On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

References

- Adams AN, Wiens DA, Nyblade AA, Euler GG, Shore PJ, Rigobert T (2015) Lithospheric instability and the source of the Cameroon Volcanic Line: evidence for Rayleigh wave phase velocity tomography. *J Geophys Res Solid Earth* 120:1708–1727
- Affaton P (1998) Geology of western Gondwana (2000–500 Ma). Pan African Brasiliano aggregation of south America and Africa. Essay review. *Am J Sci* 298(7):611–615
- Airy GB (1826) Mathematical tracts on the lunar and planetary theories, the figure of earth, precession, nutation and the calculus of variations. Deighton, Cambridge
- Aka FT, Nagao K, Kusakabe M, Nfomou N (2009) Cosmogenic helium and neon in mantle xenoliths from the Cameroon Volcanic Line (West Africa): Preliminary observations. *J Afr Earth Sci* 55:175–184
- Amante C, Eakins BW (2009) ETOPO1 1 Arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis. NOAA, Tech. Memo. NESDIS, NGDC 24, 19
- Black R (1966) Sur l'existence d'une orogénie riphéenne en Afrique occidentale. *C R Acad Sci Paris* 262(C):1046–1049
- Black R (1967) Sur l'ordonnance des chaînes métamorphiques en Afrique occidentale. *Chrono Min. Rech. Min. Paris* 364:225–238
- Bonatti E, Crane K (1984) Ocean fracture zones. *Sci Am* 250(5):36–47

- Brozena JM (1986) Temporal and spatial variability of seafloor spreading processes in the northern South Atlantic. *J Geophys Res* 91:497–510
- Burke K (2001) Origin of the Cameroon line of volcano-capped swells. *J Geol* 109:349–362. <https://doi.org/10.1086/319977>
- Caby R, Boessé JM (2001) Pan-African nappe system in southwest Nigeria: the Ife-Ilesha schist belt. *J Afr Earth Sc* 33:211–225
- Cheunteu Fantah CA, Mezoue CA, Mouzong MP, Tokam Kamga AP, Nouayou R, Nguiya S (2022) Mapping of major tectonic lineaments across Cameroon using potential field data. *Earth, Planets Sp* 74:59. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01612-7>
- Chikondi Ch, Jianguo Y (2019) A new crustal thickness model for mainland China derived from EIGEN-6C4 gravity data. *J Asian Earth Sci* 179:430–442
- Cianciara B, Marcak H (1976) Interpretation of gravity anomalies by means of local power spectra. *Geophys Prospect* 24:273–286
- Clifford TN, Gass TG (1970) African Magmatism and Tectonics. Oliver and Boyd, Edinburgh pp 1–26
- Dimitriadis K, Tselentis GA, Thanassoulas K (1987) A basic program for 2-D spectral analysis of gravity data and source depth estimation. *Comput Geosci* 13(5):549–560
- Dunlop HM, Fitton JG (1979) K-Ar and Sr-isotopic study of the volcanic-rocks of the island of Principe, West Africa Evidence for mantle heterogeneity beneath the Gulf of Guinea. *Contrib Miner Pet* 71(2):125–131
- Ebinger CJ, Sleep NH (1998) Cenozoic magmatism throughout east Africa resulting from impact of a single plume. *Nature* 395:788–791. <https://doi.org/10.1038/27417>
- Elsheikh AA, Gao SS, Liu KH (2014) Formation of the Cameroon Volcanic Line by lithospheric basal erosion: insight from mantle seismic anisotropy. *J Afr Earth Sc* 100(2014):96–108. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.06.011>
- Fairhead JD, Okereke CS (1987) A regional gravity study of the West African Rift System in Nigeria and Cameroon and its tectonic interpretation. *Tectonophysics* 143:141–159
- Fairhead JD (1988) Mesozoic plate tectonic reconstructions of the central South Atlantic Ocean: the role of the West and Central African rift system. *Tectonophysics* 155:181–191. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90265-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90265-X)
- Fairhead JD, Binks R (1991) Differential opening of the Central and South Atlantic oceans and the opening of the West African Rift System. *Tectonophysics* 187:191–203
- Feybesse JL, Johan V, Maurizot P, Abessolo A (1987) Evolution tectono-métamorphique libérienne et éburnéenne de la partie NW du craton zairois (SW Cameroun). In: Matheis and Schandelmeier (eds) Current research in African earth sciences. Balkema, Rotterdam, pp 9–13
- Fishwick S (2010) Surface wave tomography: imaging of the lithosphere–asthenosphere boundary beneath central and southern Africa? *Lithos* 120:63–73
- Fitton JG, Dunlop HM (1985) The Cameroon Line, West Africa, and its bearing on the origin of oceanic and continental alkali basalt. *Earth Planet Sci Lett* 72:123038. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(85\)90114-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90114-1)
- Gallacher RJ, Bastow ID (2012) The développement of magmatism along the Cameroon Volcanic Line: evidence from teleseismic receiver finition. *Tectonics* 31(3). <https://doi.org/10.1029/2011TC003028>
- Gladkikh V, Tenzer R (2012) A mathematical model of the global ocean saltwater density distribution. *Pure Appl Geophys* 169(1–2):249–257. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0275-5>
- Grant NK, Rex DC, Freeth SJ (1972) Potassium-argon ages and strontium isotope ratiom measurements from volcanic rocks in north-eastern Nigeria. *Contrib Mineral Petrol* 35(4):277–292. <https://doi.org/10.1007/BF00371310>
- Grunau H, Lehner P, Cleintuar M, Allenbach P and Bakker G (1975) New radiometric ages and seismic data from Fuerteventura (Canary Islands), Maio (Cape Verde Islands), and São Tomé (Gulf of Guinea). In: Borradaile GJ, et al. (eds) Progress in geodynamics: proceedings of the national symposium on geodynamics held in Amsterdam, April 3–4, pp 90–118
- Guidarelli M, Aoudia A (2016) Ambient noise tomography of the Cameroon Volcanic Line and Northern Congo craton: new constraints on the structure of the lithosphere. *Geophys J Int* 204(3):1756–1765. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv561>
- Goussi Ngalamo JFG, Bisso D, Abdelsalam MG, Atekwana EA, Katumwehe AB, Ekodeck GE (2017) Geophysical imaging of metacratonization in the northern edge of the Congo craton in Cameroon. *J Afr Earth Sci* 129:94–107
- Goussi Ngalamo JFG, Sobh M, Bisso D, Abdelsalam AG, Atekwana E, Ekodeck GE (2018) Lithospheric structure beneath the Central Africa Orogenic Belt in Cameroon from the analysis of satellite gravity and passive seismic data. *Tectonophysics* 745:326–337. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.08.015>
- Halliday AN, Davidson JP, Holden P, DeWolf C, Lee DC, Fitton JG (1990) Trace-element fractionation in plumes and the origin of HIMU mantle beneath the Cameroon line. *Nature* 347:523–528
- Hinze WJ (2003) Bouguer reduction density, why 2.67? *Geophysics* 68(5):1559–1560. <https://doi.org/10.1190/1.1620629>
- Hussein M, Mickus K, Serpa LF (2013) Curie point depth estimates from aeromagnetic data from Death Valley and surrounding regions, California. *Pure Appl Geophys* 170:617–632. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0557-6>
- Jacobsen BH (1987) A case for upward continuation as a standard separation filter for potential field maps. *Geophysics* 52:390–398. <https://doi.org/10.1190/1.1442378>
- Karato S, Karki BB (2001) Origin of lateral variation of seismic wave velocities and density in the deep mantle. *J Geophys Res* 106(B10):21771–21783
- Kamgang P, Njonfang E, Nono A, Gountie D, Tchoua F (2010) Petrogenesis of a silicic magma system: geochemical evidence from Bamenda Mountains, NW Cameroon, Cameroon Volcanic Line. *J Afr Earth Sci* 58:285–304
- Kemgang Ghomsi FE, Nguiya S, Mandal A, Enyegue F, Nyam A, Tenzer R, Tokam KAP, Nouayou R (2019) Cameroon’s crustal configuration from global gravity and topographic models and seismic data. *J Afr Earth Sc* 161:103657
- Kennedy WQ (1964) The structural differentiation of Africa in the Pan-African (500 m. y) tectonic episode. In: 8th ann. rep. res. inst. african geol. Univ. Leeds, vol 48
- King SD, Anderson DL (1995) An alternative mechanism of flood basalt formation. *Earth Planet Sci Lett* 136:269–279. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00205-Q](https://doi.org/10.1016/0012-821X(95)00205-Q)
- King SD, Anderson DL (1998) Edge-driven convection. *Earth Planet Sci Lett* 160(289):296. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00089-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00089-2)
- King SD, Ritsema J (2000) African Hot Spot Volcanism: small-scale convection in the upper mantle beneath cratons. *Science* 290:1137–1140
- Koumetio F, Njomo D, Tabod CT, Noutchogwe TC, Manguelle-Dicoum E (2012) Structural interpretation of gravity anomalies from the Kribi-Edea zone, South Cameroon: a case study. *J Geophys Eng* 9:664–673. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/9/6/664>
- Kvas A, Behzadpour S, Ellmer M, Klinger B, Strasser S, Zehentner N, Mayer-Gurr T (2019) ITSG-GRACE-only gravity field time series. *J Geophys Res: Solid Earth* 124:9332–9344. <https://doi.org/10.1029/2019JB017415>
- Kwékam M, Liégeois JP, Njonfang E, Affaton P, Hartmann G, Tchoua F (2010) Nature, origin and significance of the Fomopéa Pan-African high-K calc-alkaline plutonic complex in the Central African fold belt (Cameroon). *J Afr Earth Sci* 57(1–2):79–95

- Lee DC, Halliday AN, Fitton JG, Poli G (1994) Isotopic variations with distance and time in the volcanic islands of the Cameroon line: evidence for a mantle plume origin. *Earth Planet Sci Lett* 123:119–138. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90262-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)90262-3)
- Leseane K, Atekwana EA, Mickus KL, Abdelsalam MG, Shemang EM, Atekwana EA (2015) Thermal perturbations beneath the incipient Okavango rift zone, northwest Botswana. *J Geophys Res Solid Earth* 120:1210–1228. <https://doi.org/10.1002/2014J B011029>
- Maden N (2010) Curie-point depth from spectral analysis of magnetic data in Erciyes stratovolcano (Central Turkey). *Pure Appl Geophys* 167:349–358
- Marzoli A, Piccirillo E, Renne P, Bellieni G, Iacumin M, Nyobe J, Tongwa A (2000) The Cameroon Volcanic Line revisited: Petrogenesis of continental basaltic magmas from lithospheric and asthenospheric mantle sources. *J Pet* 41:87–109
- Meert JG, Lieberman BS (2007) The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran–Cambrian radiation. *Gondwana Res* 14(1–2):5–21. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2007.06.007>
- Milelli L, Foutel L, Jaupart C (2012) A lithospheric instability origin for the Cameroon Volcanic Line. *Earth Planet Sci Lett* 335–336:80–87. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.04.028>
- Morgan WJ (1983) Hotspot tracks and the early rifting of the Atlantic. *Tectonophysics* 94:123–139. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90013-6)
- Nédélec A, Macaudière J, Nzenti JP, Barbey P (1986) Evolution structurale et métamorphique des schistes de Mbalmayo (Cameroun). Implications pour la structure de la zone mobile panafricaine d’Afrique Centrale, au contact du craton du Congo. *C R Acad Sci Paris* 303:75–80
- Ngako V (1999) Les déformations continentales panafricaines en Afrique centrale: résultat d’un poinçonnement de type himalayen. Thèse Doctorat Etat, Université Yaoundé I, 301p
- Ngako V, Affaton P, Njonfang E (2008) Pan-African tectonics in north western Cameroon: implication for the history of western Gondwana. *Gondwana Res* 14:509–522
- Ngatchou HE, Liu G, Tabod CT, Kamguia J, Nguiya S, Tiedeu A, Xiaoping KE (2014) Crustal structure beneath Cameroon from EGM2008. *Geod Geodyn* 5(1):1–7. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1246.2014.01001>
- Ngounouno I (1998) Chronologie pétrologie et cadre géodynamique du magmatisme du cenezoïque de la Ligne du Cameroun. *GEO-CAM* 1, pp 169–184
- Ngounouno I, Déruelle B, Demaiffe D, Montigny R (2003) The monchiquites from Tchircotche, Upper Benue valley (northern Cameroon). *C R Geosci* 335(3):289–296. [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(03\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(03)00047-6)
- Nguiya S, Cheunteu Fantah CA, Nouayou R (2018) Gravity imaging of the crustal structures beneath Southern Cameroon and its tectonic implications. *Int J Eng Sci* 78:08–23
- Njilah IK, Ndikontar MK, Eno Belinga SM (1999) The Cameroon line volcanoes *Géologie et Environnements au Cameroun. Collect. Géocam* 2, pp 295–303
- Njilah I, Ajonina H, Kamgang D, Tchindjang M (2004) K-Ar ages, mineralogy, major and trace element geochemistry of the Tertiary-Quaternary lavas from the Ndu Volcanic Ridge N.W. Cameroon. *Afr J Sci Technol* 5(1):47–56
- Nsifa NE (2006) Magmatisme et evolution géodynamique de l’Archéen au Protérozoïque de la bordure nord-ouest du Craton du Congo (Complexe du Ntem) au Sud-Ouest Cameroun. Thèse de Doctorat d’Etat, Université de Yaoundé, Cameroon, 1, 248pp
- Nsifa NE, Tchameni R, Nédélec A, Siqueira R, Pouclet A, Bascou J (2013) Structure and petrology of Pan-African nepheline syenites from the South West Cameroon; Implications for their emplacement mode, petrogenesis and geodynamic significance. *J Afr Earth Sc* 87(2013):44–58
- Nzenti JP, Barbey P, Macaudière J, Soba D (1988) Origin and evolution of the late Precambrian high-grade Yaounde gneisses (Cameroon). *Precamb Res* 38:91–109
- Ojo AO, Ni S, Li Z (2017) Crustal radial anisotropy beneath Cameroon from ambient noise tomography. *Tectonophysics* 696–697:37–51
- Oliveira EP, Toteu SF, Araujo MNC, Carvalho MJ, Nascimento RS, Bueno JF, McNaughton N, Basilici G (2006) Geologic correlation between the Neoproterozoic Sergipano belt (NE Brazil) and the Yaoundé Belt (Cameroon, Africa). *J Afr Earth Sc* 44:470–478
- Owona Angue MLC, Nguiya S, Nouayou R, Tokam Kanga AP, Manguelle-Dicoum E (2011) Geophysical investigation of the transition zone between the Congo Craton and the Kribi-Campo sedimentary basin (South–West Cameroon). *South Afr J Geol* 114(2):145–158
- Owona Angue MLC, Tabod CT, Nguiya S, Kenfack JV, Tokam Kanga AP (2013) Delineation of lineaments in South Cameroon (Central Africa) using gravity Data. *Open J Geol* 3:331–339
- Pasyanos ME, Nyblade AA (2007) A top to bottom lithospheric study of Africa and Arabia. *Tectonophysics* 444(1–4):27–44
- Pitoňák M, Šprlák M, Novák P, Tenzer R (2017) Regional gravity field modelling from GOCE observables. *Adv Space Res* 59(1):114–127
- Plomerová JV, Babuska C, Dorbath L, Dorbath and Lillie RJ, (1993) Deep lithospheric structure across the Central African Shear Zone in Cameroon. *Geophys J Int* 115:381–390
- Poudjom Djomani Y, Nnange J, Diament M, Ebinger C, Fairhead J (1995) Effective elastic thickness and crustal thickness variations in west central Africa inferred from gravity data. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 100:22047–22070. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00280-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00280-6)
- Pratt JH (1855) On the attraction of the Himalayan mountains and of the elevated regions beyond upon the plumb line in India. *Philos Trans R Soc London* 145:53–67
- Priestley K, McKenzie D, Ho T (2018) A lithosphere-asthenosphere boundary – A global mode derived from multimode surface-wave tomography and petrology. In: Yuan H, Romanowicz B (eds) *Lithospheric discontinuities, AGU geophysical monograph*, pp 111–123. <https://doi.org/10.1002/9781119249740.ch6>
- Rasmussen R, Pedersen LB (1979) End corrections in potential field modeling. *Geophys Prospect* 27:749–760
- Read HH, Watson J (1975) *The African Cratons. In: Introduction to geology*. Palgrave, London. https://doi.org/10.1007/978-1-349-15609-2_6
- Reusch AM, Nyblade AA, Wiens DA, Shore PJ, Ateba B, Tabod CT, Nnange JM (2010) Upper mantle structure beneath Cameroon from body wave tomography and the origin of the Cameroon Volcanic Line. *Geochem Geophys Geosyst* 11(10):1–17
- Reusch AM, Nyblade AA, Wiens DA, Shore PJ, Ateba B, Tabod CT, Nnange JM (2011) Mantle transition zone thickness beneath Cameroon: evidence for an upper mantle origin for the Cameroon Volcanic Line. *Geophys J Int* 187:1146–1150
- Rudnick RL and Gao S (2003) The composition of the continental crust. In: Holland HD, Turekian KK (eds) *Treatise on geochemistry*, vol 3. The Crust, Elsevier-Pergamon, Oxford, pp 1–64. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>
- Sebera J, Šprlák M, Novák P, Bezděk A, Vařko M (2014) Iterative spherical downward continuation applied to magnetic and gravitational data from satellite. *Surv Geophys* 35(4):941–958
- Sobolev SV, Zeyen H, Stoll G, Werling F, Altherr R, Fuchs K (1996) Upper mantle temperatures from teleseismic tomography of French Massif Central including effects of composition, mineral reactions, anharmonicity, anelasticity and partial melt, Earth planet. *Sci Lett* 139:147–163

- Spector A, Grant FS (1970) Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics* 35:293–302
- Tabod CT, Fairhead JD, Stuart GW, Ateba B, Ntepe N (1992) Seismicity of the Cameroon Volcanic Line, 1982–1990. *Tectonophysics* 212:303–320
- Tadjou JM, Nouayou R, Kamguia J, Kande HL, Manguelle-Dicoum E (2009) Gravity analysis of the boundary between the Congo Craton and the Panafrican belt of Cameroon. *Aust J Earth Sci* 102:71–79
- Telford WM, Geldart LP, Sheriff RE (1990) *Applied geophysics*, 2nd edn. Cambridge University Press, 770pp
- Tenzen R, Vajda P, Hamayun P (2010) A mathematical model of the bathymetry generated external gravitational field. *Contrib Geophys Geodes* 40(1):31–44
- Tenzen R, Novák P, Gladkikh V (2011) On the accuracy of the bathymetry-generated gravitational field quantities for a depth-dependent seawater density distribution. *Studia Geophys Geod* 55(4):609. <https://doi.org/10.1007/s11200-010-0074-y>
- Tenzen R, Pavel N, Vladislav G (2012) The bathymetric stripping corrections to gravity field quantities for a depth-dependent model of seawater density. *Mar Geod* 35(2):198–220. <https://doi.org/10.1080/01490419.2012.670592>
- Theunissen K, Lenoir JL, Liegeois JP, Delvaux D, Murma A (1992) Empreinte Panafricaine majeure dans la chaîne ubendienne de Tanzanie sud-occidentale : géochronologie U-Pb sur zircon et contexte structural. *C R Acad Des Sci Paris* 314:1355–1362
- Tokam KAP, Tabod CT, Nyblade AA, Julia J, Wiens DA, Pasyanos M (2010) Structure of the Crust beneath Cameroon, West Africa, from the Joint Inversion of Rayleigh Wave Group velocities and receiver functions geophysical. *Geophys J Int* 1183:1061–1076
- Toteu SF, Van Schmus WR, Penaye J, Michard A (2001) New U-Pb and Sm-Nd data from north-central Cameroon and its bearing on the pre-Pan African history of central Africa. *Precamb Res* 108:45–73
- Toteu SF, Penaye J, Poudjom Djomani Y (2004) Geodynamic evolution of the Pan-African belt in central Africa with special reference to Cameroon. *Can J Earth Sci* 41:73–85
- Toteu SF, Penaye J, Maldan F, Nyama Atibagoua B, Bouyo Houketchang M, Sep Nlomgan JP (2008) Géologie et ressources minérales du Cameroun, 33^{ème} congrès International de la Géologie. OSLO, Norway, pp 6–14
- Tselentis GA, Drakopoulos J, Dimtriads K (1988) A spectral approach to Moho depths estimation from gravity measurement in Epirus (NW Greece). *J Phys Earth* 36:255–266. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.36.255>
- Uieda L, Barbosa VC (2017) Fast nonlinear gravity inversion in spherical coordinates with application to the South American Moho. *Geophys J Int* 208(1):162–176
- Vicat JP, Leger JM, Nsifa E, Piguet P, Nzenti JP, Tchameni R, Pouchet A (1996) Distinction au sein du craton congolais du Sud-Ouest du Cameroun, de deux épisodes doléritiques initiant les cycles orogéniques éburnéen (Paléoprotérozoïque) et Pan-Africain (Néoprotérozoïque). *Compt Rendu L'acad Sci Sér IIA* 323:575–582
- Van Houten FB (1983) Sirte Basin, north-central Libya: Cretaceous rifting above affixed mantle hotspot? *Geology* 11:115–118
- Won IJ, Bevis M (1987) Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: algorithm Fortran subroutines. *Geophys* 52:232–238
- Zingerle P, Pail R, Gruber T, Oikonomidou X (2019) The experimental gravity field model XGM2019e. GFZ Data Serv. <https://doi.org/10.5880/ICGEM.2019.007>

Springer Nature or its licensor (e.g. a society or other partner) holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.

FULL PAPER

Open Access



Mapping of major tectonic lineaments across Cameroon using potential field data

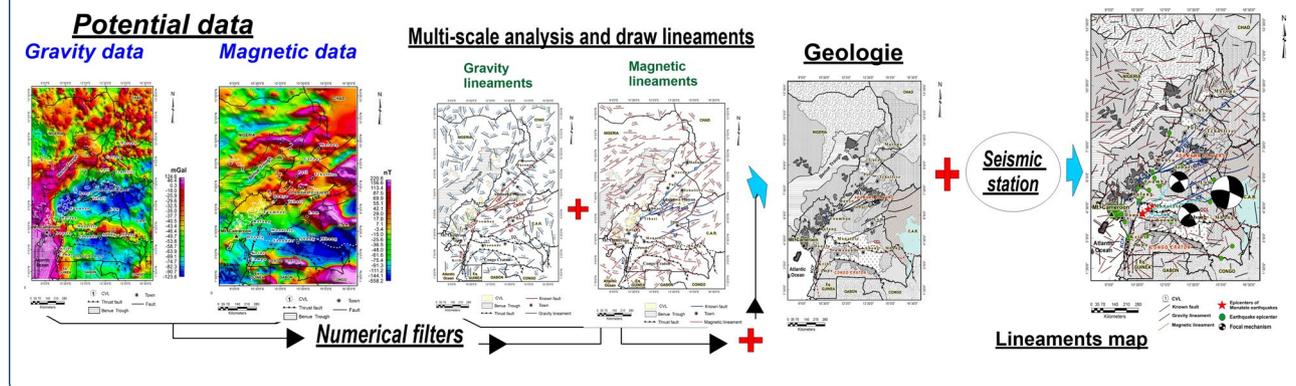
Cyrille Armel Cheunteu Fantah^{1*}, Cyrille Adiang Mezoue², Marcelin Pemi Mouzong³, Alain Pierre Tokam Kamga², Robert Nouayou² and Severin Nguiya²

Abstract

The cartography of lineaments across a territory can be optimized using geophysical potential field data. In this study, land gravity and EMAG2 (Earth Magnetic Anomaly Grid) data were simultaneously used to identify and characterize the major lineaments that spread across Cameroon. The data were filtered using a multi-scale approach including horizontal and vertical gradient analyses. The Euler Deconvolution method was later applied to the filtered data to estimate the extension and depth of the identified lineaments. Results show that the main lineaments across Cameroon are laterally extended with a dominant N45°E orientation. Some of these lineaments correlated well with the geographical location of some known major tectonic structures found across the country. The depth of these lineaments varies between 1 and 35 km. Some of the identified faults are still active as their location correlated with the location of some recent earthquakes that occurred in Cameroon. This work, therefore, highlights some hidden tectonic features which knowledge generally precedes exploration for subsurface resources.

Keywords: Gravity anomaly, Magnetic anomaly, Filter, Lineaments, Depth

Graphical Abstract



*Correspondence: cheunteu91cfa@gmail.com

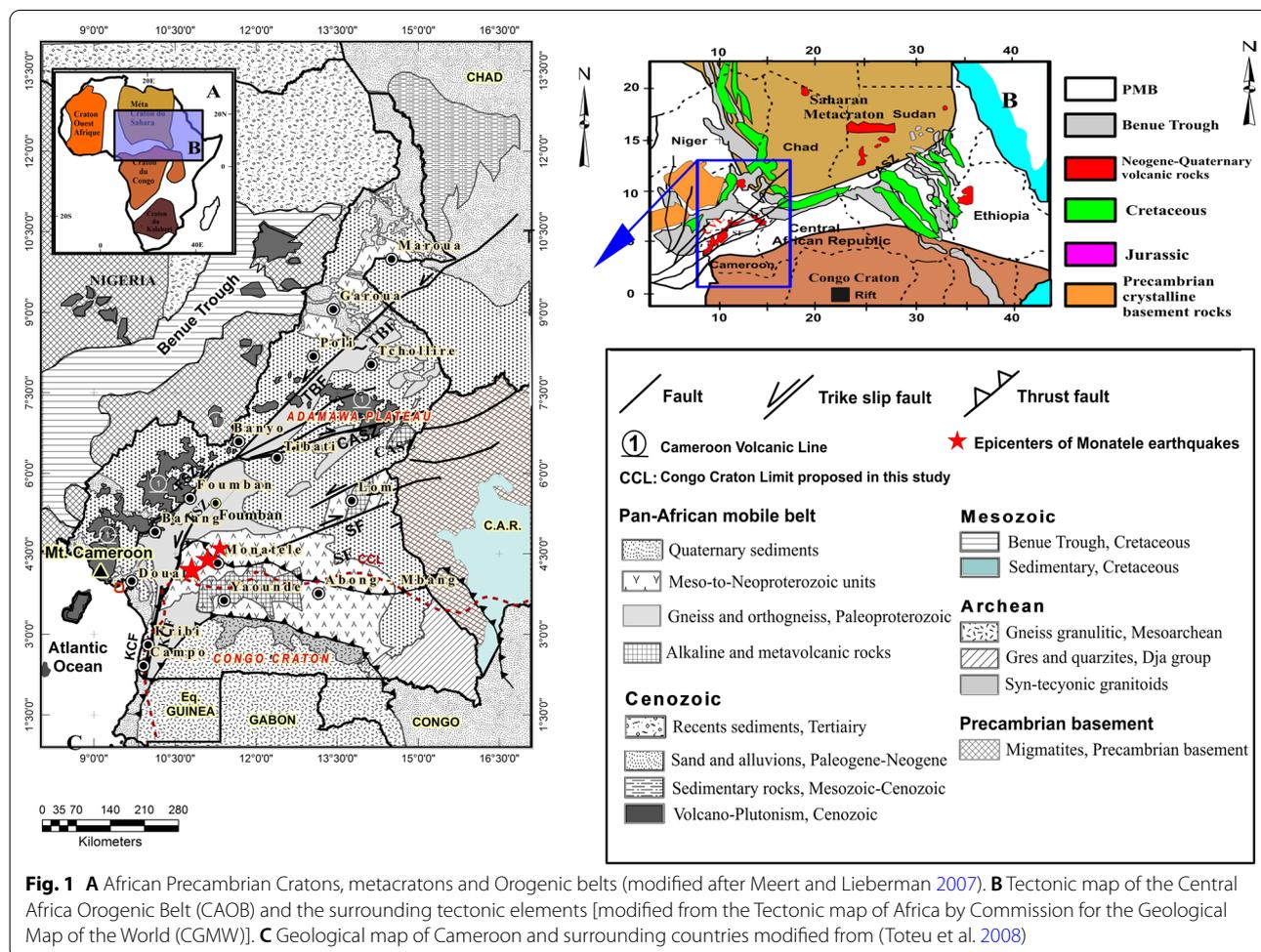
¹ Laboratory of Geophysics and Geoexploration, Department of Physics, The University of Yaoundé I, P.O. Box 812, Yaoundé, Cameroon
Full list of author information is available at the end of the article

Introduction

The presence of lineaments on the continental landscape is generally a surface expression of more complicated processes occurring under the subsurface. These processes can be triggered by convection in the Earth mantle or chemical and thermo-mechanical activities within the crust. The Precambrian rocks in Central Africa consist of geological structures whose ages range from Paleoproterozoic to Neoproterozoic. In Cameroon, the crust is characterized by two main geological structures, namely, the Pan-African Mobile Belt (PMB) in the north and the Congo Craton (CC) in the south (Poidevin 1983; Nzenti et al. 1988; Fig. 1). The PMB is affected by a certain structural features such as: the Sanaga Fault (SF), Central African Shear Zones (CASZ), the Tchollire Banyo Fault (TBF), the Cameroon Volcanic Line (CVL), the Kribi Campo Fault (KCF) and the Adamawa Plateau (Koch 1959; Le Fur 1971; Toteu et al. 1984). These main features have been partially modeled using gravity (Kamguia et al. 2005; Tadjou et al. 2009; Koumetio et al. 2012; Owona Angue et al. 2013; Nguiya et al. 2018), magnetic

(Ndougsa-Mbarga et al. 2011) and seismic (Fairhead and Okereke 1987; Reusch et al. 2010; Tokam et al. 2010). However, the extension and geometry of these tectonic features as well as the processes behind the setting of these structures are still to be fully investigated.

Magnetic and gravity data are commonly used in exploration geophysics as preliminary techniques for large scale cartography of contacts between rocks composing the basement of the crust. The land gravity or magnetic data usually provides the best resolution for mapping. However, with the advent of the airborne technology, large areas can be surveyed at lower cost. The cartography of the lineaments in Cameroon is in progress with several projects conducted around mineral wealth potential areas. In this study, we use the available gravity and magnetic data to provide at regional scales, the cartography of the major lineaments that can be recovered in the potential field data. By simultaneously analyzing both gravity and magnetic data, we expect to reduce the non-uniqueness of solutions inherent for each method and,



therefore, provide more details on the structure of the lithosphere and its related tectonics.

Background

The geology of Cameroon is mainly characterized by the following structures: the Cameroon Volcanic Line (CVL) of about 1600 km long; the sedimentary basins in the northern part; the Adamawa Plateau; the Central African Shear Zone (CASZ); the northern boundary between the Congo Craton and the Pan-African Mobile belt (PMB) (Fig. 1). In the southern part of the country, the major tectonic units are the Congo Craton margin and the Sanaga Fault. The active boundary between the PMB and the Congo Craton occupies part of southern Cameroon and progresses towards the Central African Republic (Tadjou et al. 2009). The Congo Craton consists predominantly of Archean rocks with some resedimented materials formed in the Paleoproterozoic (Tchameni et al. 2001). In this region (Fig. 1), the Congo Craton underthrusts the PMB in the North. At depth, there is E–W striking dense bodies corresponding to lower crustal and/or upper mantle rock setting by tectonic compression (Bouekeke 1994). The main Precambrian boundary between the Congo Craton and the PMB consists of meta-sedimentary rocks (Nzenti et al. 1994). These are presumed to have been deposited in a continental rift environment, based on the presence of alkaline and metavolcanic rocks of the Yaoundé and Lom successions (Nzenti et al. 1988). Further north, the Adamawa Plateau is surrounded by the CASZ which is parallel to the Sanaga Fault (SF), extending from the Cameroon coast to the Central African Republic and beyond (Dumont 1986). The Sanaga Fault has been characterized as a left-lateral deformation (Dumont 1986).

Several earthquakes of low to moderate magnitudes have been reported in Cameroon since the seventeenth century (Ambraseys and Adams 1986). In the southern part, three moderate earthquakes with a maximum intensity of IV were felt in the Kribi region in September 1987 (Ateba et al. 1992). Though there were no major damages reported, 2 years later, in July 1989 another moderate earthquake was felt in the area (Ateba et al. 1992). Two high-seismicity areas were identified from the past studies: (1) A seismic zone associated with the CVL and the CASZ. In this zone, the predominant and recent activities are located around Mt. Cameroon. (2) A seismic zone associated with the Foubam Shear Zone (FSZ) and the northern margin of the Congo Craton. The Monatele earthquake of magnitude 4.5, occurred within this zone and was felt in Yaounde the nation's Capital (Ngatchou et al. 2018). In general, Cameroon can be considered as aseismic on a global scale (Tabod et al. 1992). However, with the occurrence of earthquakes, the identification

and mapping of lineaments appear as a necessity in mitigating future catastrophe. It is also a necessity in understanding the general tectonics governing the setting of the Cameroon crust.

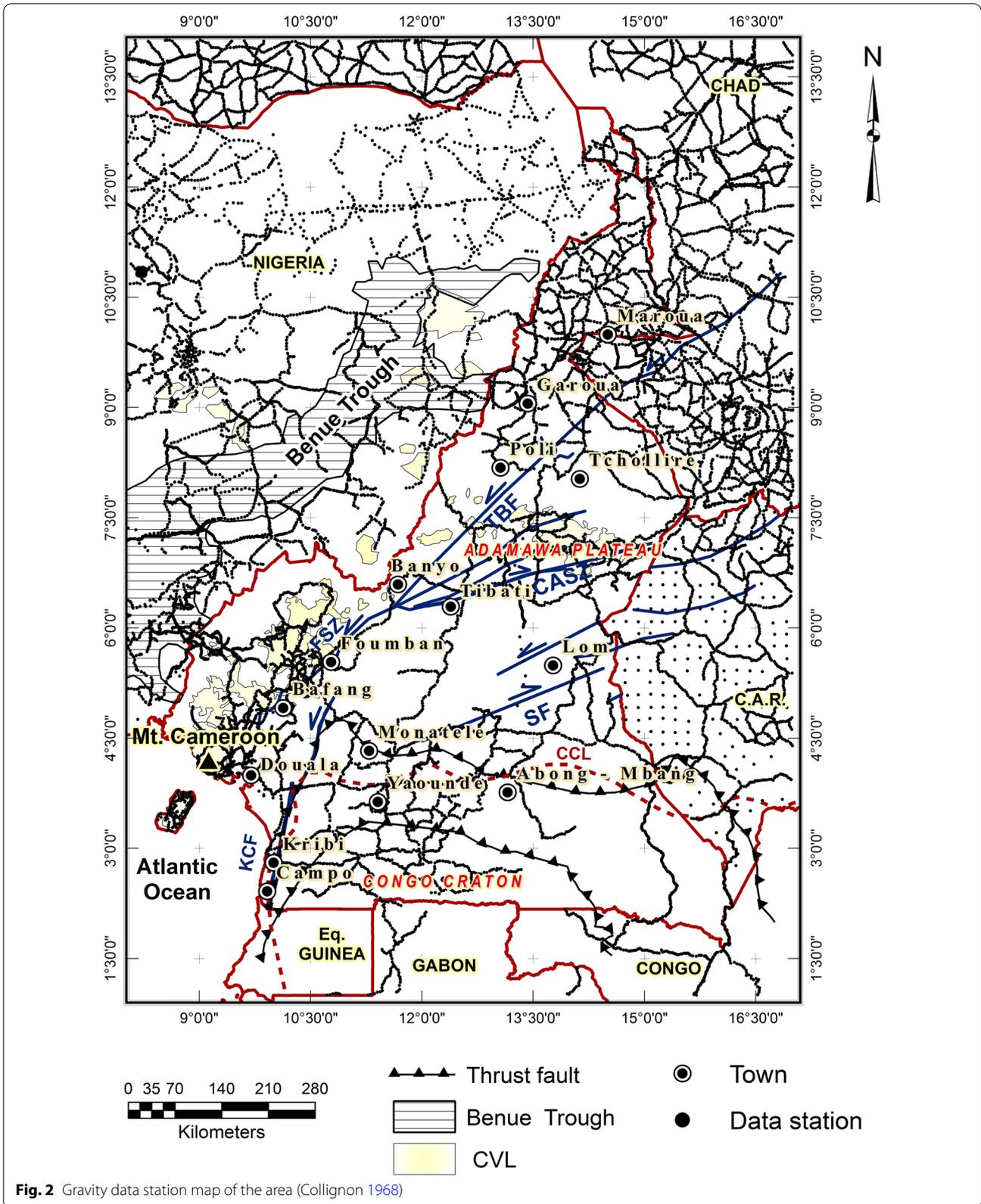
Data and methods

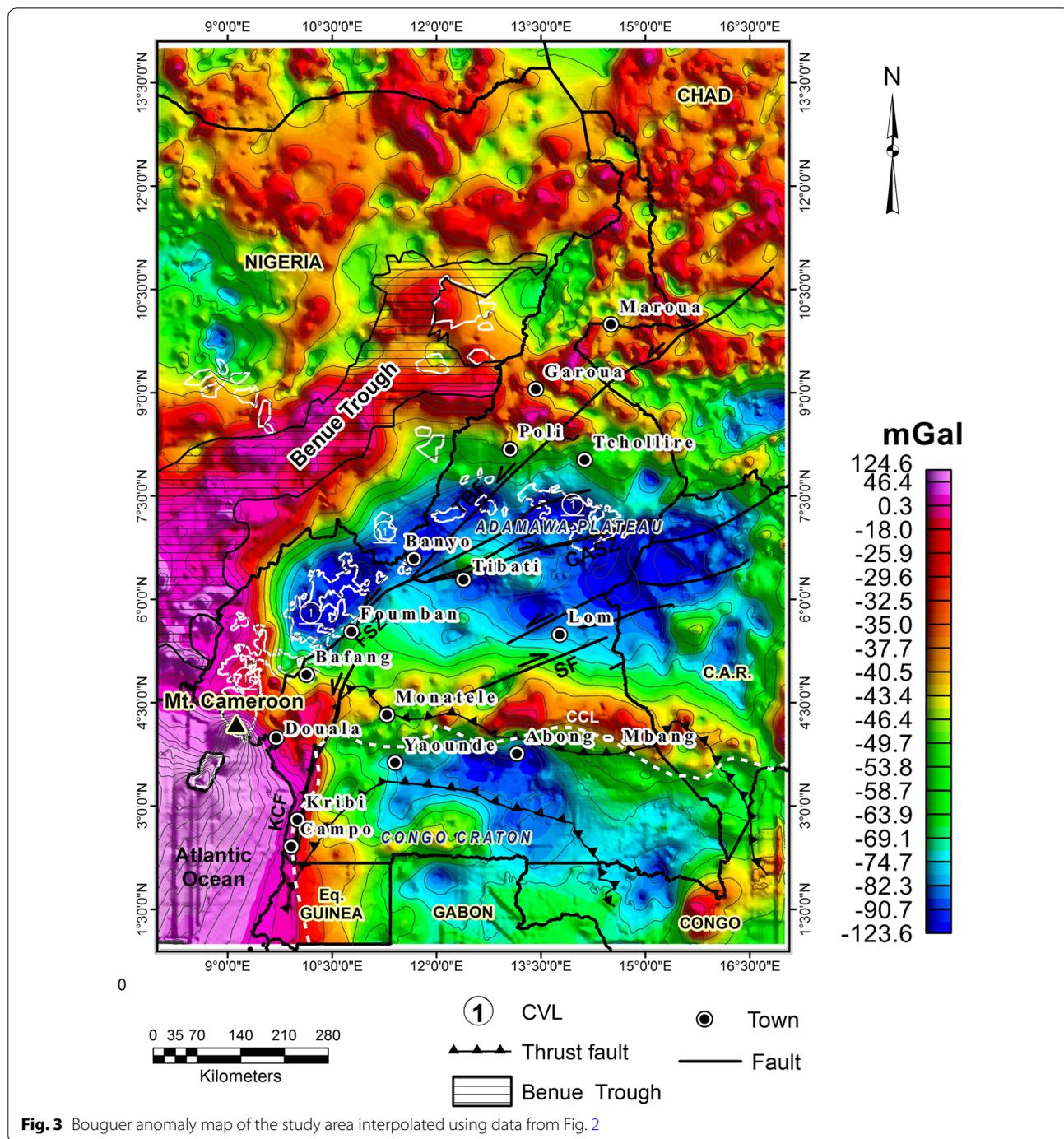
Gravity data

The gravity data used in this work consists of 15,742 irregularly spaced gravity stations (Fig. 2) collected between longitudes 8° and 17° East, and latitudes 1° and 14° North by many organizations and researchers during various field experiments (see Tadjou et al. 2009; Ngatchou et al. 2014; and references therein). We analyzed the data from irregularly distributed stations. Some remote areas are lacking data due to difficulty to access. They were collected at ~4 to 5 km intervals between gravity stations including base stations, along available roads and tracks using Worden gravimeters (n° 313, 600, 69 and 135) and the Lacoste and Romberg (model G, n° 471 and 828). The gravimeters readings were corrected for drift and the gravity anomalies were computed assuming mean crustal density of 2.67 g/cm³. The accuracy of the gravity measurement is about 0.2 mGal. After interpolation with a kriging method developed in Surfer software for a 4 km grid (0.036°), the Bouguer anomaly map was created. The final Bouguer anomalies vary from – 123.6 to 124.6 mGal, with computed uncertainties of roughly 2 mGal and between 3 and 4 mGal in the worst cases (Poudjom-Djomani et al. 1996) (Fig. 3). Previous estimation of gravity anomalies using IGSN71 reference revealed maximum errors from merged data across Cameroon to 1.3 mGal (Fairhead and Binks 1991) or 2.52 mGal (Fairhead and Okereke 1987). The Kriging method has been proven efficient in predicting Bouguer anomalies in areas with low coverage of data (Kamguia et al. 2007).

Earth magnetic Anomalies Grid (EMAG2)

The second set of data consists of the Earth magnetic Anomalies Grid EMAG2 with a grid resolution of 2-arc-minute (~3.7 km) at the reference altitude above the geoid which was released following an international collaboration between various organizations including NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) and CIRES (Cooperative Institute for Research in Environment Science). The original data set is a compilation of data from satellite, ship and airborne magnetic measurements (Maus et al. 2009). Some sections of the study area were lacking data in the original data set, since no data were collected there (Fig. 4a). These gaps were filled by interpolating the original data using Kriging method.

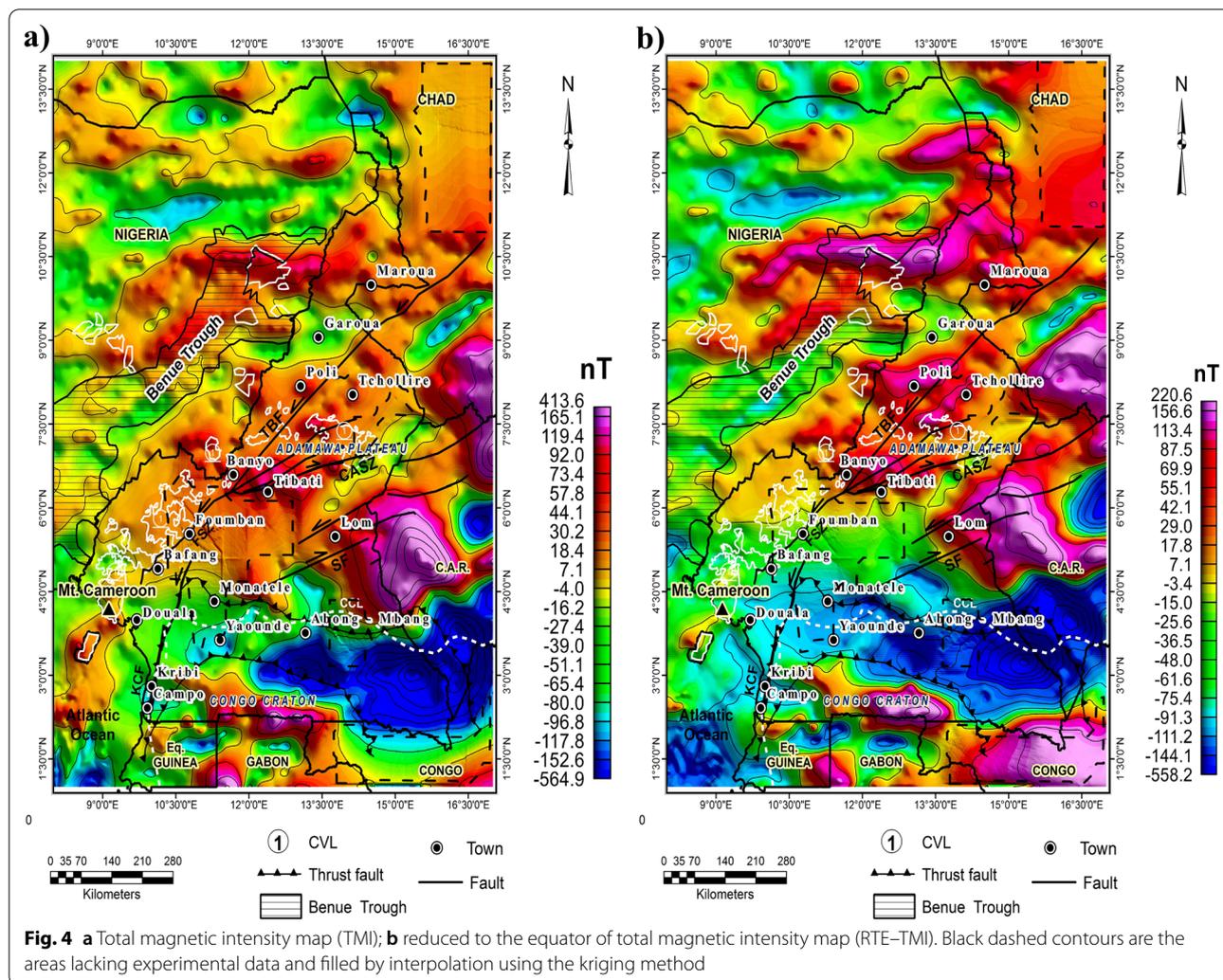




Methods

The data used for this study are derived from potential fields; therefore, most of the various processing techniques can be applied simultaneously on both data sets to reduce the non-uniqueness of solutions inherent to each method taken apart.

The methodology used in this work involves a combination of techniques comprising upward continuation, horizontal derivative, maxima of horizontal gradient coupled to upward continuation technique and Euler Deconvolution. This combination of techniques has



the particularity in studying gravity signatures of sub-surface geological features (Marcel et al. 2018).

Reduction to the Equator (RTE) of total magnetic intensity data.

The Reduction to the Equator is the operation which consists of enhancing the signal of the observed magnetic anomalies around the equator. This can be done using an algorithm that has been proven to be stable at low latitudes (Macleod et al. 1993). The RTE is efficient in correcting the asymmetry and lateral shift of measured total magnetic field (Aina 1986).

In this study, the following average values were used for inclination and magnetic declination, $I = -19.3^\circ$ and $D = -1.34^\circ$, respectively. The RTE data are further interpolated using kriging method to produce the magnetic RTE map (Fig. 4b).

Upward continuation

The upward continuation consists of artificially displacing the observation plane and calculating the field that would be observed at these new points from the data collected in the field (Jacobsen 1987). This operator was, therefore, applied in this work on the Bouguer and total magnetic intensity field reduce to equator anomaly map to observe the variation of the strong densities and susceptibilities contrasts with depth. These data were upward-continued at different levels 5 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km, 30 km and 35 km to locate the anomalies of gravity and magnetic fields seen in these depths in the crust and understand the evolution of structure basement of Cameroon. The upward continuation is considered as the low pass filter, because it attenuates the high frequencies due the sources of superficial anomalies. Thus, this method is suitable to study deeper and major

crustal structure of the regions of interest for multi-scale analysis.

Horizontal derivative

The horizontal derivative (HD) or horizontal gradient is efficient for the location of lateral contacts between structures with different densities and susceptibilities (Cordell and Grauch 1985) and delineate subsurface geological features. One of the greatest advantages of this technique is that it is least susceptible to noise in potential field data (Phillips 1998). In the spatial domain, the amplitude of the Horizontal Derivative (HD) for a field $g(x, y)$ (resp. $H(x, y)$) at a point (x, y) is given by the below relations; Eqs. (1 and 2):

$$HD_g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

$$HD_H = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

where $\frac{\partial g}{\partial x}$ and $\frac{\partial g}{\partial y}$ are the horizontal derivatives of the gravity field following x and y ; $\frac{\partial H}{\partial x}$ and $\frac{\partial H}{\partial y}$ the horizontal derivatives of the magnetic field in the x and y directions, respectively.

First vertical derivative (VD)

The first vertical derivative applied to potential field data is useful in enhancing the effects of shallow features (Blakely and Simpson 1986; Jacobsen 1987). It is more responsive to local influences than to regional effects and is efficient in highlighting high frequency features that are sometimes shadowed by large amplitude anomalies.

Using upward continuation differences, the vertical derivative (VD) of a potential field at the height h is defined as Eq. (3):

$$VD_P = \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_h = \frac{P_{h+\Delta h}^{up} - P_h^{up}}{\Delta h} \quad (3)$$

where P is the potential field (g or H), P_h^{up} is the field upward continued at the height h , $P_{h+\Delta h}^{up}$ is the field continued at the height $h + \Delta h$, and Δh is a small difference lying between 1/10 and 1/100 of the data sampling interval (Florio et al. 2006).

To obtain the first vertical derivative map, the Bouguer gravity and RTE magnetic data were gridded to about 4 km interval with a blanking radius of 20 km. The latter was converted to the frequency domain using a Fast Fourier Transform (FFT). The first vertical derivative operation was applied in the frequency domain following

an upward continuation of the data by 2 km, and then returned to the spatial domain using inverse Fourier transform.

Edge detection using maxima on HD maps

To easily map lineaments, Blakely and Simpson (1986) developed an automated method based on the work of Cordell and Grauch (1985) which compare the value at a center point of a 3×3 grid window to the surrounding 8 points. Each of the four point triplets (central point + pair of points) is fitted with a parabola. This parabola's maximum is approved if it is inside the middle grid cell and has a value greater than the two outer points. Blakely and Simpson (1986) utilized a criterion based on the maximum value and an index I_d that depends on the number of legitimate maxima discovered in the 3×3 frame to qualify the various maxima employed. The index I_d ($1 \leq I_d \leq 4$) gives an indication of the linearity of a maximum; when $I_d = 1$, the horizontal gradient of anomalies is linear, when $I_d = 4$ the maximum is a local peak. These authors discovered that indices 2 and 3 produced the greatest results when tested on maps at both local and regional scales. This method was successfully employed by Khattach et al. (2004, 2006) and Vanié et al. (2005, 2006) to classify several lineaments associated to important tectonic catastrophes in Morocco. We use it in our research area.

This method provides the maxima of horizontal gradient for each upward continued depth which are later plotted on a synthetic map (Blakely and Simpson 1986; Everaerts and Mansy 2001; Jafal et al. 2010; Hadhemi et al. 2016). Therefore, the dip orientation can be viewed as an alignment of maxima on the map, while a vertical dip is viewed as superimposed maxima from the different upward continued depths. Since gravity and magnetic data are considered to be potential field data, this method has also been applied to anomalies of the total magnetic intensity field reduced to the equator. The horizontal gradient method coupled to the upward continuation filter was used on both gravity and magnetic data at several upward continuation heights up to 35 km with 5 km steps. The overlay of the horizontal derivative maxima provides the location of the various contacts or faults, as well as their dips. In case the contacts are shown as circular shapes, it could indicate the presence of intrusive bodies.

Euler Deconvolution

Euler's Deconvolution filter is a method to estimate the depth of some linear subsurface structures from the gridded potential field data. It uses first-order derivatives x , y and z to determine the location and depth of various

targets (sphere, cylinder, dyke and contact); each characterized by a specific structural index. The Euler homogeneity relationship for gravity or magnetic field data is defined by the following equation (Thompson, 1982; Reid et al. 1990) shown for potential field g , Eq. (4):

$$(x - x_0) \frac{\partial P}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial P}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial P}{\partial z} = N(B - P) \quad (4)$$

where (x_0, y_0, z_0) the coordinates of the gravity or magnetic source, P is the field intensity measured at position (x, y, z) , B the regional potential field, N is the structural index also refers to the geometry of the source and is the measure of the fall-off rate of the gravity field. (Thompson 1982; Reid et al. 1990; Ndougsa-Mbarga et al. 2011; Marcel et al. 2018). Another important parameter that follows when seeking for the appropriate solutions is the choice of window size; Marson and Klingele (1993) noted that the appropriate choice of the window size depends on the wavelength of the anomaly under investigation and the grid pitch. Good solutions are considered to be those that cluster well and have small standard deviations (Thompson 1982; Reid et al. 1990). Selection of the appropriate structural index is very important to obtain the correct depth solutions. However, the estimated horizontal location is independent of the structural index (Barbosa et al. 1999), which means that there is no ambiguity with regard to the structural location. In this paper, we applied the method using the structural index ($N \approx 0$) of contact or step (Thompson 1982; Reid et al. 1990), since the main objective is to map the faults and contacts. Despite generating scattered solutions, using a structural index very near to zero leads to a better estimation of depth and location of the contact/fault (Hatem and Mostafa 2013). The Euler deconvolution approach, which is applied to each solution, consists of defining an acceptable value of structural index N and then solving the equation for the initial parameters x_0, y_0, z_0 , and the optimal regional B potential field using least squares inversion. A square window size which consists of the number of cells in the gridded data set to be used in the inversion for each selected solution location must also be specified. The window is centered on each of the solution slots. As a result, the points in this window are utilized to solve Euler's equation for the depth of the solution, with the distance from the window's center inversely weighted. In the gravity grid or magnetic field, the window should be big enough to include every solution anomaly of interest. Euler depths are the stratigraphic alterations of several formations of geological structures in terms of geology.

Results and discussion

Analysis and interpretation of gravity map

The Bouguer anomaly map of the study area (Fig. 3) shows the combined effects of shallower and deeper lithosphere structures, consequence of the difference in density and composition of the subsurface materials. Many zones of anomalies alternately positive or negative are observed, separated by areas of gradients that can be correlated to the main geologic features shown on the geologic map (Fig. 1). Previous studies generally associated the negative anomaly gradients along the latitude 4°N to the transition zone between the CC and PMB, leading to the conclusion that CC disappear beneath PMB structures through a continental collision (Tadjou et al. 2009 and references therein). The large zone of negative anomalies north of latitude 4°N is associated to the setting of the Adamawa Plateau. At the west, the Benue trough is linked to the large zone of positive anomalies. Further north, in the area surrounded by the cities Garoua, Poli and Tchollire, the anomalies are negative but with lower negative amplitude. This correlates well with the topography of the area which consists in general of plains and hills of altitude below 300 m. This explanation corroborates well with the isostasy theory that suggest elevated area are generally linked to the low anomaly sources constituting the crust. The zone of gradients between the Benue Trough (see Fig. 1) and the large anomalies can be associated to the setting of the CVL.

Analysis and Interpretation of magnetic map

The interpolated map obtained using RTE provides a more accurate estimate of the positions of the magnetic sources compared to the total magnetic intensity map (Fig. 4a). The RTE magnetic map (Fig. 4b) shows in the south of Cameroon, areas of low magnetic anomaly (less than -15 nT). The presence of some spots of high anomalies within the area can be associated to localized features within the CC or edge effects. Between latitudes 4°N and 7°N, there is large band of high magnetic anomalies (above 20 nT). It can be associated to the presence of the Adamawa Plateau. This band extends southeastwards to Central African Republic (CAR) with higher amplitude (up to 150 nT). This sector at the border of Cameroon-CAR is known as a potential mining area with several ongoing mining operations. Further north, the positive anomalies are dominant, with the presence of a maximum at the geological location of the Benue Trough. The alignment of spots of positive anomalies in the approximate N90°E direction is an indication that the magnetization is influenced potentially by the tectonics.

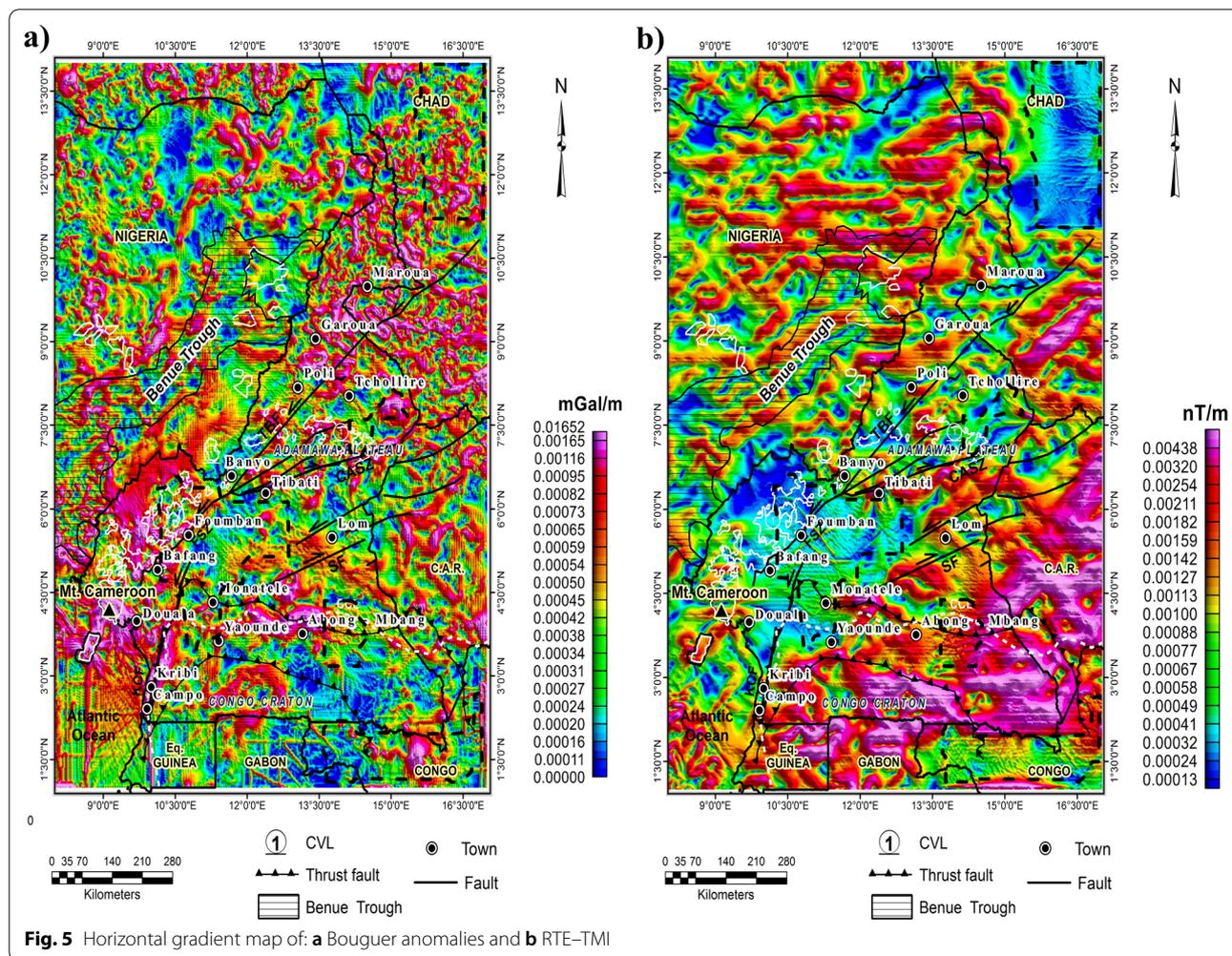


Fig. 5 Horizontal gradient map of: **a** Bouguer anomalies and **b** RTE-TMI

At first view, there is little similitude between gravity anomalies and magnetic anomalies in terms of shapes and locations of anomalous features (including gradients and concentric shapes). This suggests that magnetic method will provide additional resolution to the geologic features that could have been not identified from density contrasts.

Horizontal derivatives and lateral discontinuities

The HD map (Fig. 5a) for the Bouguer gravity data suggests that the Cameroon basement is globally affected by tectonic activities, since areas of high amplitude gradients are present all over the study area, assuming high amplitudes of HD are usually correlated to contacts or faults. This map also suggests that the most stable part of the crust can be found below latitude 4°N, where we can observe larger areas with lower amplitude of gradients. This is in agreement with the presence of the CC which is generally known as the most stable part of the crust. The high amplitude of gradient along the latitude

4°N, therefore, marks the northern limit of the CC, while high amplitude of gradient appearing as spots within the CC might be attributed to intracrustal discontinuities or intrusions. However, the fact that the high gradients are correlated to some of the main geologic units of the study area is an indication that the HD map can reveal the imprints of other hidden discontinuities within the crust.

The HD map from RTE magnetic anomalies (Fig. 5b) shows globally that the study area is divided into two areas: a zone of higher amplitudes of gradients located to the south and southeast characterized by large bands amplitude above 0.00438 nT/m which is adjacent to a much larger area in the north with gradient amplitude below 0.00438 nT/m. Assuming HD is the change of magnetization in the lateral direction, the high gradients observed in the areas suggested a concentration of magnetic rocks that could have been settled during the Pan-African orogeny by a volcano-plutonic process. Further north, the lines of gradients are observed in Nigeria can be linked to the setting of the Benue trough during

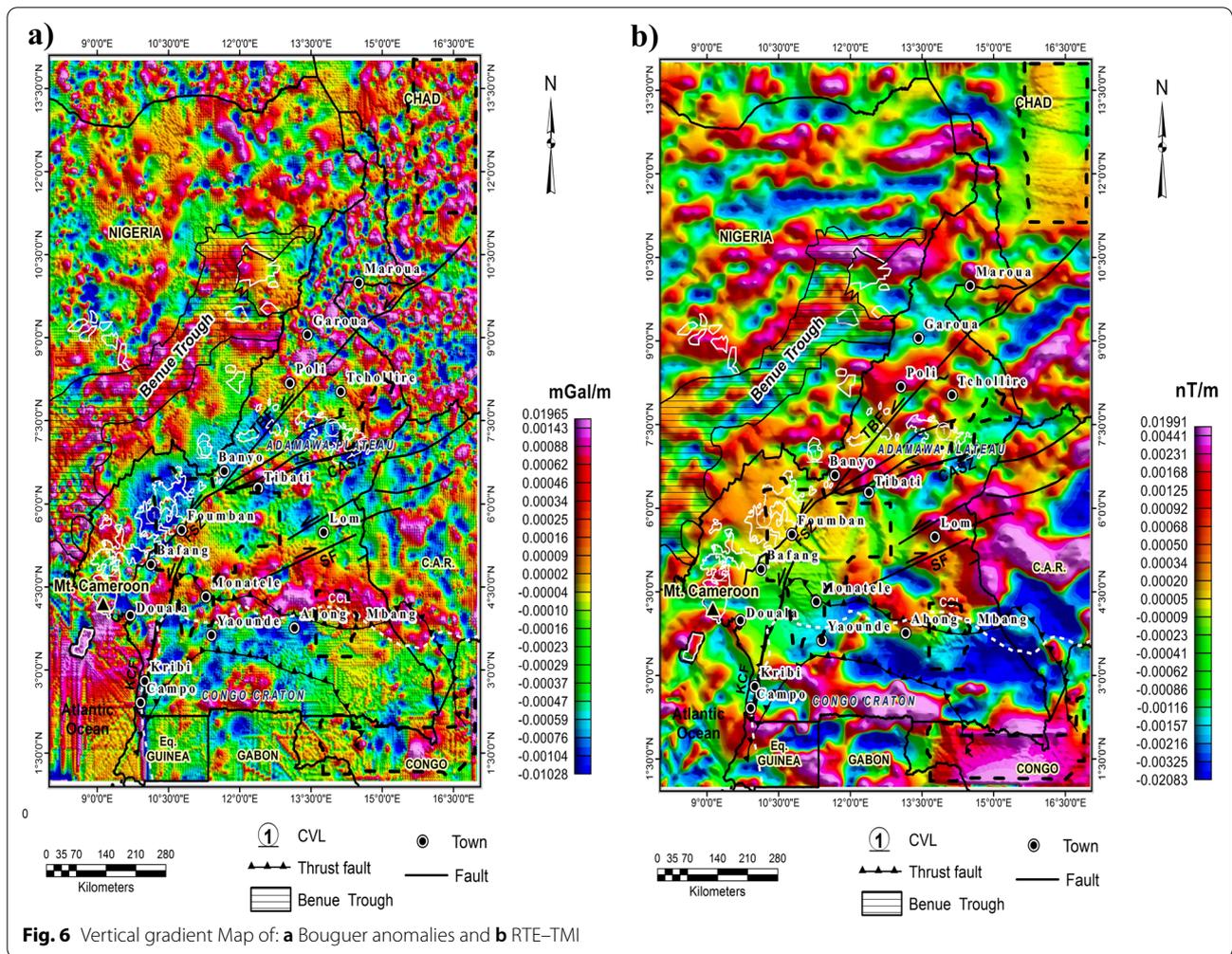


Fig. 6 Vertical gradient Map of: **a** Bouguer anomalies and **b** RTE-TMI

the Cenozoic resulting from some volcanic and plutonic activities. The linearity of the lineaments can be interpreted as dykes.

First vertical derivative and dipping layers

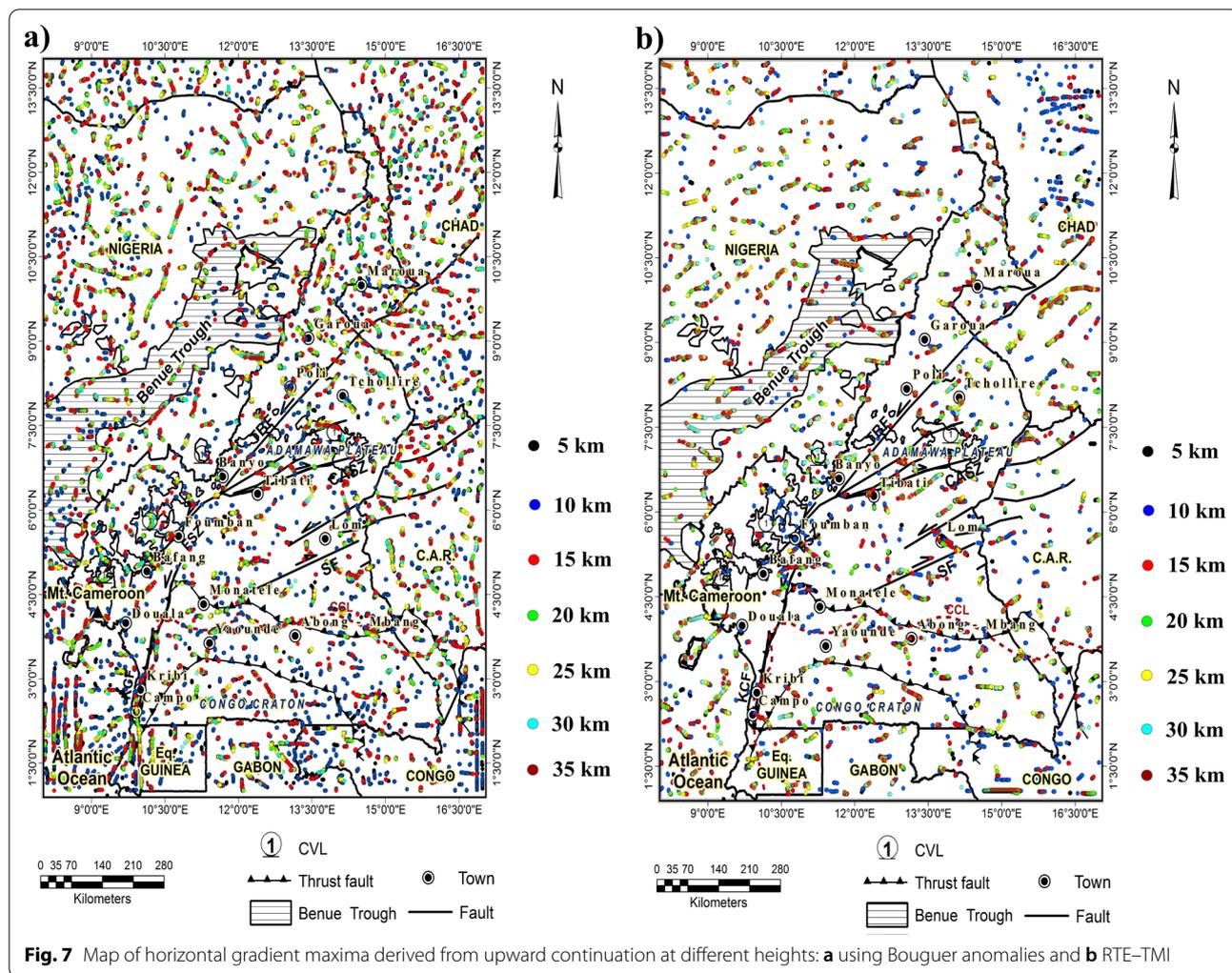
First vertical derivative of gravity data

The first vertical derivative of the gravity field (Fig. 6a) usually depicts high frequency anomalies caused by shallow structures (contacts of rocks) having significant difference in densities. In general, the shallow crust of Cameroon and neighboring countries consists of various rocks settled with various tectonic activities. The map of the first vertical reveals a vertical derivative high along the latitude 4°N which is known as the geophysical boundary between CC and PMB. At that boundary, higher density rocks of the CC are overlain by rocks of the PMB. Other areas associated with short wavelength anomalies could be interpreted as dipping contacts or

dykes, while longer wavelength can be associated to the effect of variation in crustal thickness.

First vertical derivative of magnetic data

The first vertical derivative of the magnetic field (Fig. 6b) can be viewed as the rate of change of the magnetic field in the vertical direction. Unlike the vertical derivative of the gravity data, it can help to locate areas of potential magnetized mineral concentration within the shallower structures. In this perspective, the map suggests that part of the shallow structures in the south and southeastern part of the investigated areas have a high potential of magnetization. Several bands of high vertical magnetic gradients extending approximately in the N90°E direction can be observed in the northern part of the map (in Nigeria) right above the latitude 7°N. These lineaments can be interpreted as swarm of dykes. In fact, Ngoh et al. (2017) have identified similar lineament features in the northern



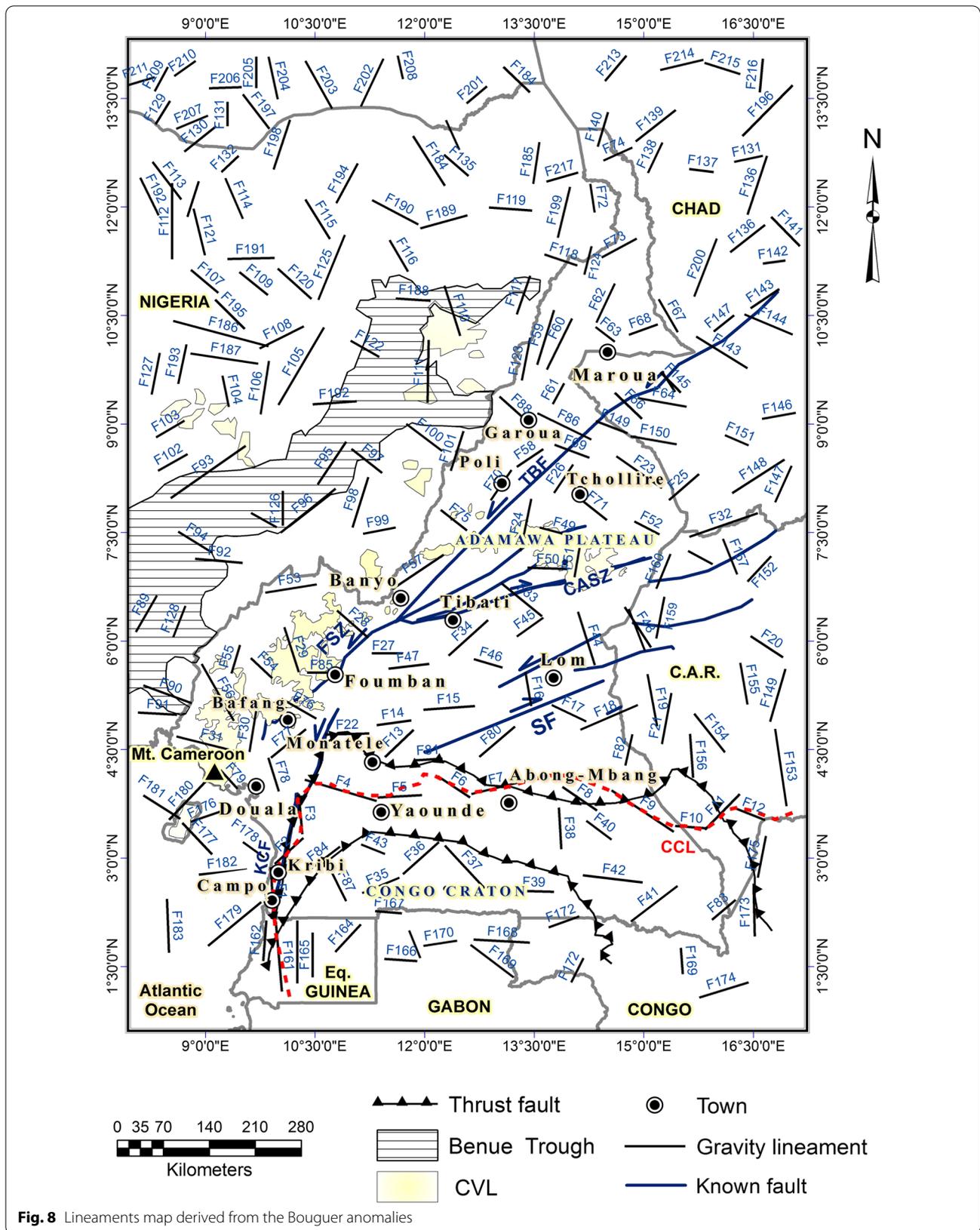
Cameroon using aeromagnetic data that have been interpreted as faults or dykes oriented roughly NE and NW.

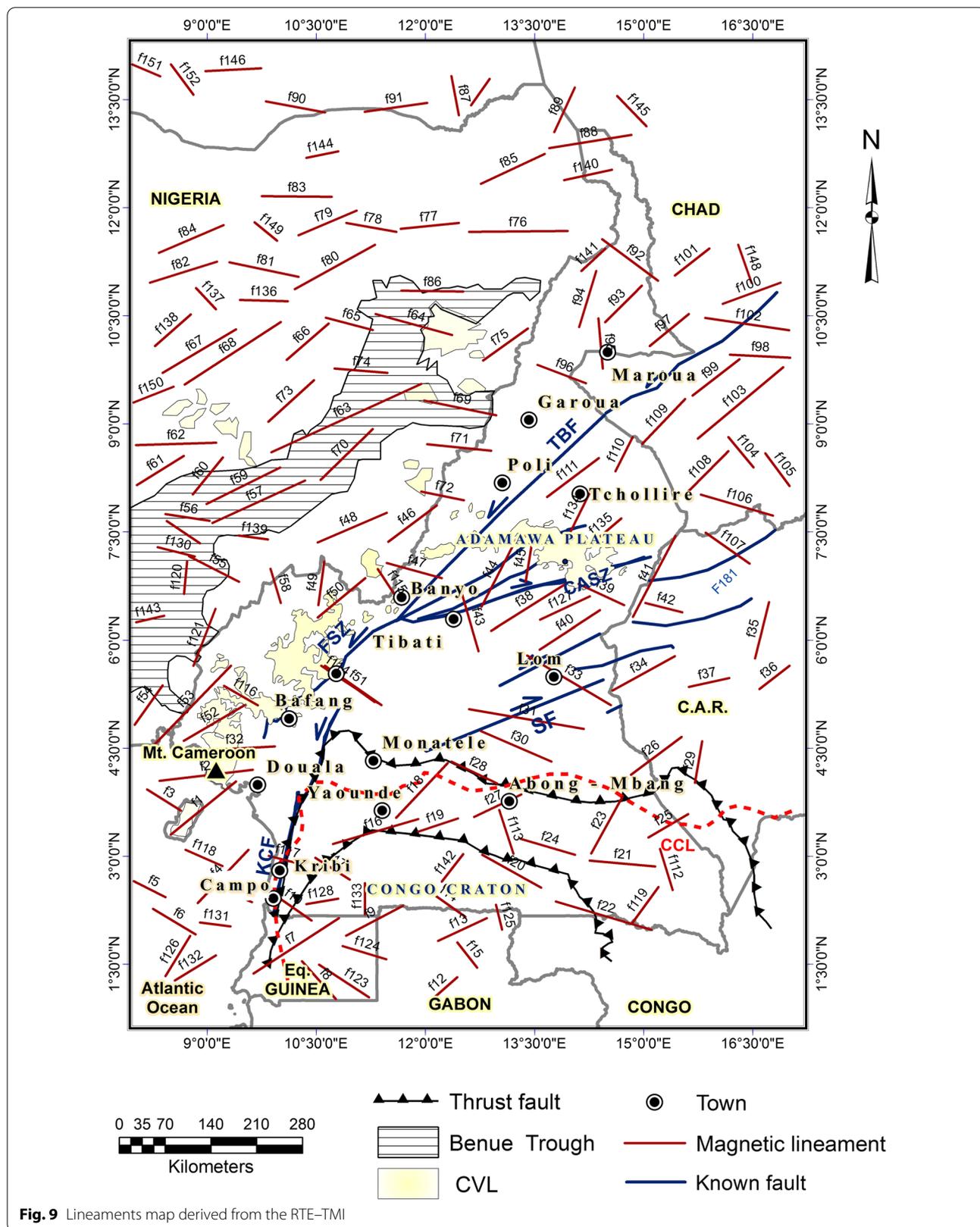
Detection and mapping of lineaments

The maps obtained from the overlay of HD maxima computed on the various upward continued gravity and magnetic data at height 5 km to 35 km at steps of 5 km, are presented in Fig. 7a, b, respectively. The maps show in general that the maxima are distributed in a quasi-linear gradient shape that can be interpreted as the change in the density and magnetization within the crust. These changes were found to occur on the upward continued maps up to depth of 35 km. Therefore, lineaments can be viewed as a succession of linear features (HD maxima) that can be related to the trend of the existing faults in the study area as suggested by Koumetio et al. (2012) and Shandini et al. (2018). The gravity and magnetic lineaments detected here are traced out in Figs. 8 and 9, respectively. The tracing and

highlighting of its lineaments is based on the multi-scale analysis of horizontal gradients maps of the anomalies (Blakely and Simpson 1986) (Fig. 5). These gradients are exploited to calculate and automatically detect the maxima for different depths (Fig. 7). The detected maxima are then superimposed to identify their directions and orientations (Fig. 7). Finally, the lineaments are plotted by following the spatial behavior of the superimposed maxima with depth.

Thus, the lineaments brought to light bear witness to the extent to which intracrustal basement of Cameroon is strongly characterized by major tectonic accidents. In addition to localized structural features, this study allowed us to highlight the lineaments which coincide with those located by geological work, namely: the Adamawa Fault (AF), the Tchollire-Banyo Fault (TBF), the Sanaga (SF) and Kribi-Campo Fault (KCF) and Northern of Congo Craton limit (CCL). Lineaments associated to gravity can be interpreted as known or





hidden geologic contacts or existing faults in the study area, while those associated to magnetic anomalies can in addition be viewed as dykes or intrusions.

Estimation of depths of lineaments using Euler deconvolution

The Euler Deconvolution method was applied successively on both gravity and RTE magnetic data. The method is based around three parameters: (1) the structural index (N), who takes values ranging (from 0 to 3) depending on the structures considered and characterizes the rate of variation of the anomaly intensity with the distance, so the optimal value corresponds to a grouping of solutions obtained for different values (Thompson 1982 and Reid et al. 1990). However, low structural index ranging from (0 to 1) provide the best depth estimates (Reid et al. 1990); (2) the size of the

window, so its size depends on the wavelength of the anomaly examined and the pitch of the grid (Marson and Klingele (1993); (3) and the tolerance (Z) defined as the acceptance rate of Euler solutions for geological structures. It representing the error on the depth. The tests carried out on the tolerance show that a level of estimation error on the depth between 5 and 15% ($0.05 \leq Z \leq 0.15$) depending on the geological structures gives the best results (Thompson 1982). As part of this study, the structural index ($N=0$) was adopted with a window of $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$. The Euler solution calculated with a tolerance $Z=10\%$ error on the depth and more, shows no overload on the solutions, which makes interpretation unnecessary. The Euler solution for a tolerance $Z=4\%$ and less shows an insufficiency explained by the solutions absence at the level of the majority anomalies related to the different geological structures

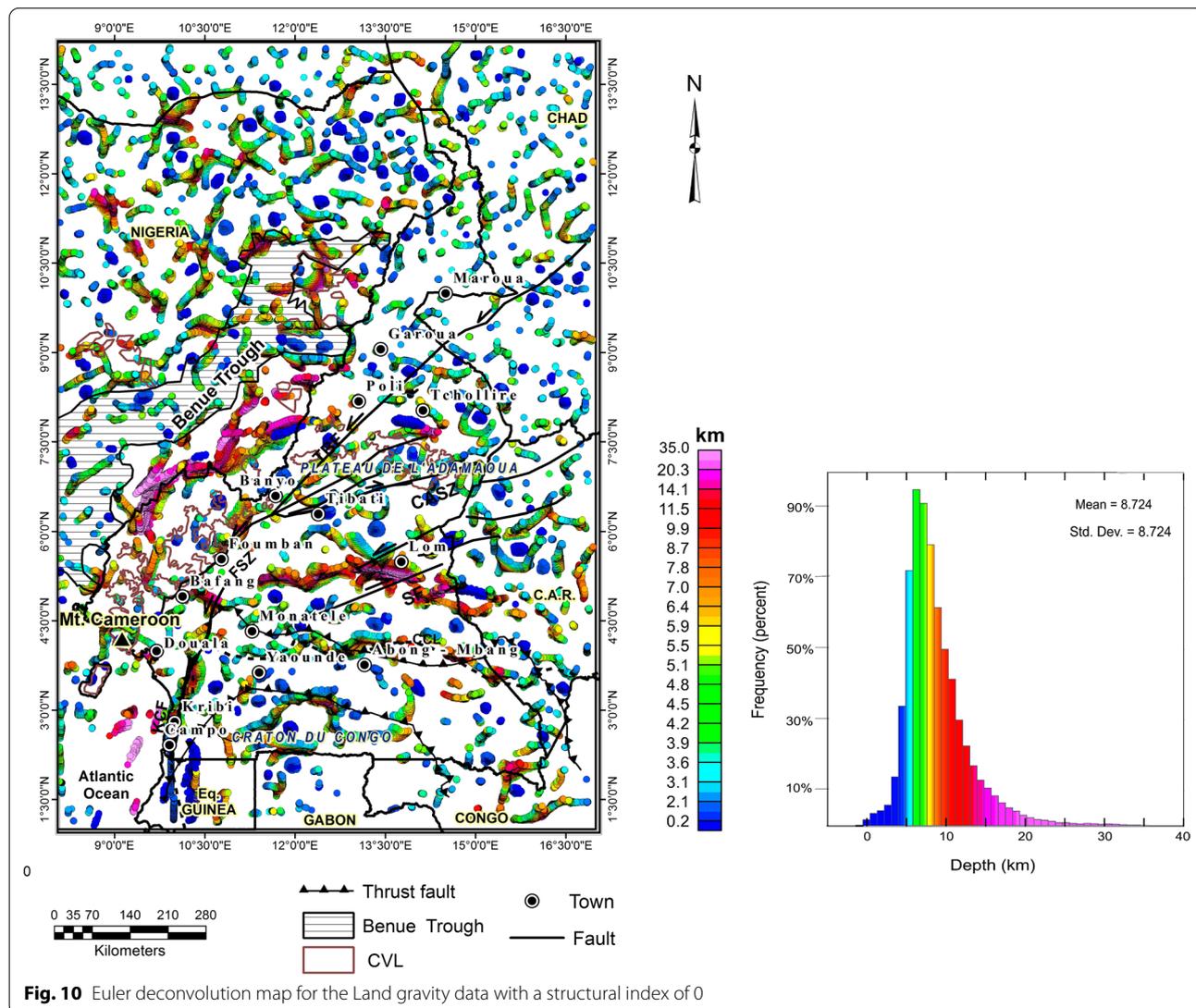
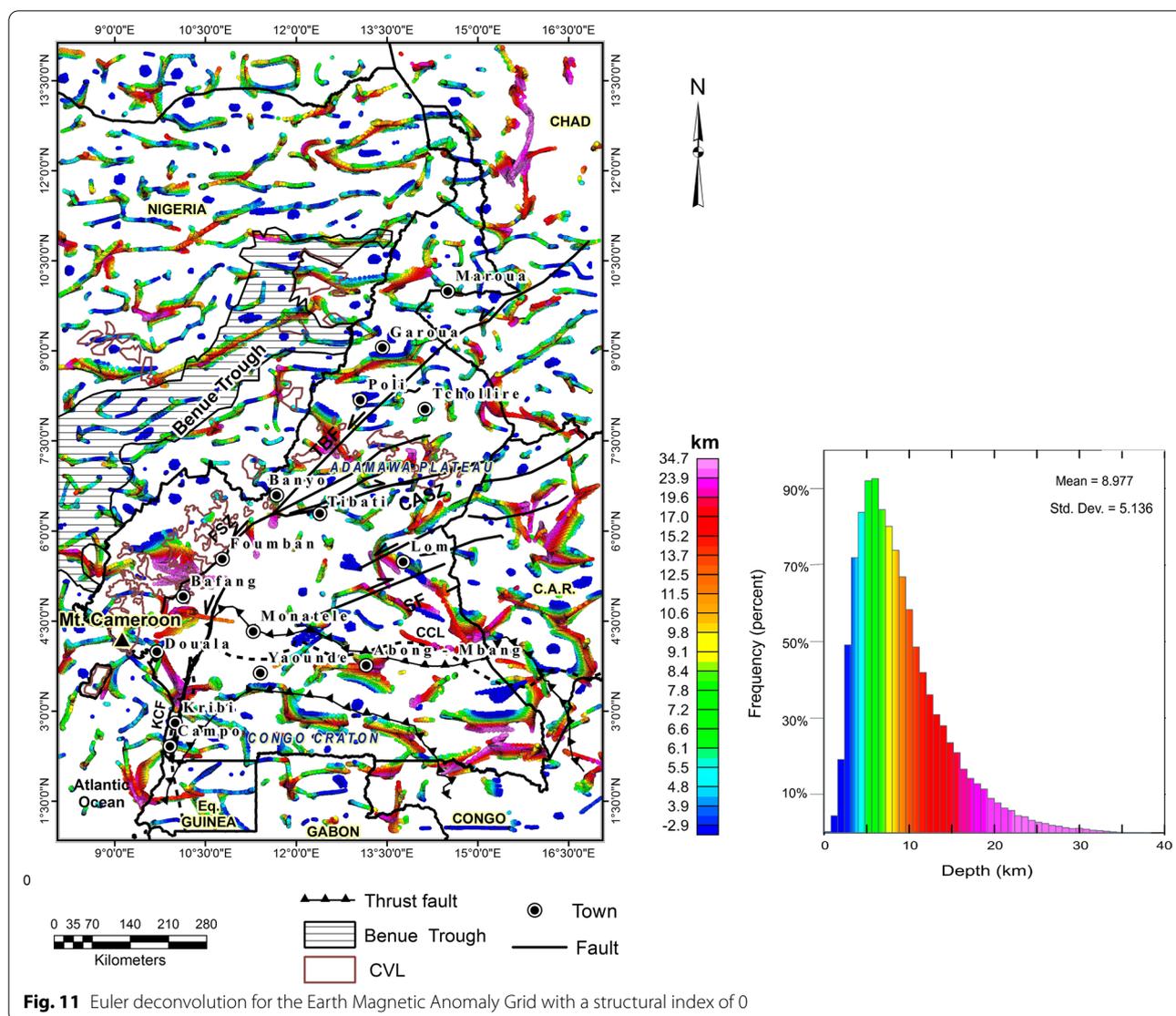


Fig. 10 Euler deconvolution map for the Land gravity data with a structural index of 0



of this study area. With a tolerance of 5%, we observe a strong agreement of positions of the solutions and their depths with the majority of the anomalies of short and long wavelengths. Which coincides with those of the horizontal gradients.

The best solutions were obtained for the structural index $N=0$, since the data are unevenly distributed all over the study area using a window of 20×20 km. 217 and 152 lineaments were identified using gravity and magnetic anomalies data, respectively. Subsequently, we extracted the set of all depths values for each structural feature and then statistically calculated the average from a series of depth values extracted on each lineament. the principle consists of summing the values of the Euler depths over which each lineament passes and dividing by

the number of depth points in the data series. (Additional file 1: Tables S1 and S2).

Figures 10 and 11 show a summary of depths estimated from the Euler’s method. For both data sets, the solutions show that the depths of the source of the linear features are located between 1 and 35 km. These depths fall in the similar range as the epicenters of most recorded earthquakes in Cameroon. In fact, most of the recent activities were qualified as shallow earthquakes (Tabod et al. 1992; Ateba et al. 2009), since their epicenters are generally located at depth < 50 km.

The statistical analysis using the Rose Diagram indicates that the lineaments are mainly oriented in the N67.5°E (26%), N45°E (24%) N112.5°E (15%), N157.5°E (11%), N0°E (10%), N135°E (7%) and N90°E (6%)

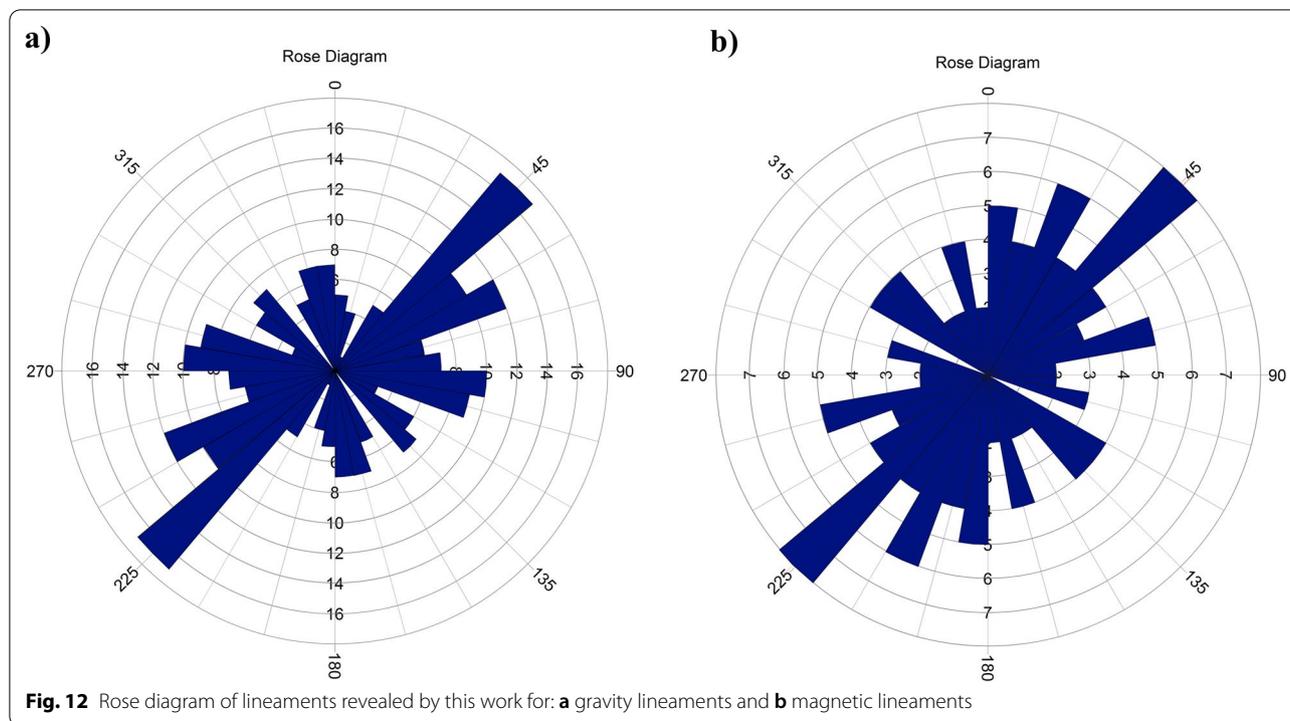


Fig. 12 Rose diagram of lineaments revealed by this work for: **a** gravity lineaments and **b** magnetic lineaments

directions (Fig. 12). The lineaments highlighted in this study show that the study area is very fractured. For gravity and magnetic anomalies, they also reveal that structural features in Cameroon have a strong dominance along the NE–SW direction. The results of this study provide an opportunity for more research on the characteristic tectonic accidents of the basement in Cameroon. Some of the previous lineaments were not highlighted in this study. This may be due to the pitch and the resolution of the data of around 4 km which may not be suitable for locating and detecting more detailed information on the basement; requiring in-depth investigation.

Conclusions and discussion

The derivative methods applied to potential field data have shown in previous studies their capacities in detecting some geologic features as well as their geometrical parameters (Cordell and Grauch, 1985; Koumetio et al. 2012). In this study, the derivative methods have allowed to identify several lineaments across the whole study area. Few of the identified lineaments are both resolved simultaneously by gravity and magnetic anomalies data. The two data sets are, therefore, complementary. The results are consistent with the location of some recent earthquakes recorded, by a network of temporary broadband stations in 2005–2007 (Tokam et al. 2010; Ngatchou et al. 2018). It can be noted that all the recorded seismic events are located within the vicinity of detected

lineaments from this study (Fig. 13). Therefore, in areas, where geology is poorly known, using both gravity and magnetic data can be a first step settling target for future exploration as generally indicate in mining exploration.

Figure 13 also provides a synthesis of identified lineaments associated to the existing geology map. Compared to Fig. 1 which is the synthesis of known geology (Toteu et al. 2008), it can be inferred that most of the lineaments are related to geologic contacts within the Cameroon territory. In this work, the gravity and magnetic lineaments are located under the basis of the multi-scale analysis of the gradient maxima of Bouguer anomalies and the total magnetic field reduced to the equator. All the same, the spatial distribution of the depths for geological structures that can be associated with these lineaments are also highlighted from the Euler deconvolution. In addition, the Euler deconvolution method also provides a spatial distribution of depths for geological structures beyond the areas of contrasting gradients of gravity and magnetic anomalies. Furthermore, Euler deconvolution and horizontal gradient maxima derived from upward continuation at different heights enable to characterize some structural linear features. Therefore, these estimated of lineaments depth do not necessarily correspond to the lineaments which may be due to the different filters used for the transformation of data anomalies. However, this work present approximately similar limit depth of features at 35 km for this two last techniques.

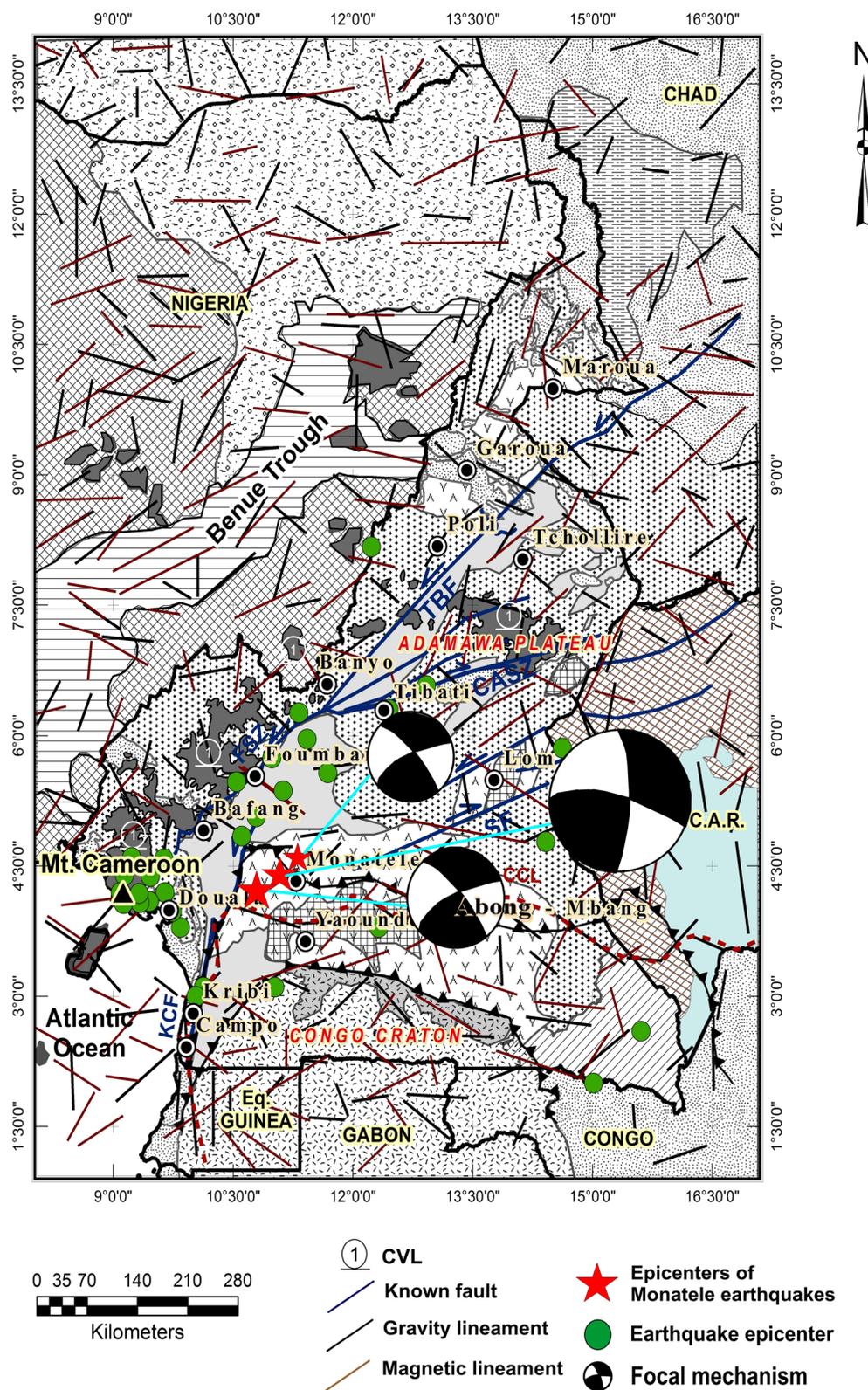


Fig. 13 Cartography of lineaments correlated to some tectonic earthquakes that occurred recently in Cameroon; Green circles are the earthquakes recorded by the network of temporary broadband stations; Red stars represent the epicenters of the Monatele event. Spheres are the focal mechanism for main and aftershocks. Black and white quadrants represent the compression and dilatation, respectively

The orientations of lineaments vary with approximately 50% of lineaments following roughly the directions N90°E and N67.5°E which is quite parallel to the direction N30°E generally pointed in geology as the direction of the lineaments of Cenezoic volcanism extended from the Gulf of Guinea to Benue through in Nigeria (Deruelle et al. 2007). This suggests the setting of the CVL has probably played a major role in the development of other tectonic activity during the Cenezoic.

Assuming that most of the lineaments can be related to faults, some of these major faults if not all might be still active, since earthquakes have been recorded in most part of the country, the quiet places being quiet because of the lack of a monitoring system.

Abbreviations

EMAG2: Earth Magnetic Anomaly Grid; PMB: The Pan-African Mobile Belt; CC: Congo Craton; CASZ: Central African Shear Zones; TBF: Tchollire Banyo Fault; KCF: Kribi Campo Fault; SF: Sanaga Fault; FSZ: Foubam Shear Zone; CVL: Cameroon Volcanic Line; CCL: Congo Craton limit; CIRES: Cooperative Institute for Research in Environment Science; NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration; TMI: Total Magnetic Intensity anomalies; RTE: Reduce to equator; HD: Horizontal Derivative; VD: Vertical Derivative; FFT: Fast Fourier Transform; CAR: Central Africa Republic; NS: North–South; E–W: East–West; SW–NE: South–West–North–East; NE and NW: North–East and North–West.

Supplementary Information

The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01612-7>.

Additional file 1: Table S1. Orientation and depths of the various segments of lineaments derived from gravity data. **Table S2.** Characteristic orientation and depths of different segments of magnetic lineaments.

Acknowledgements

The authors are grateful to the NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) and BGI (Bureau Gravimétrique international) for their kind collaboration in providing, respectively, Earth Magnetic Anomaly Grid (EMAG2) and gravity data used in this paper.

Author contributions

CACF established the objective, conceived of the methodology of gravity and magnetic data analyses and interpreted geophysical maps. SN and CACF contributed to the geological aspect of the paper and generated maps. APTK contributed by integrating the seismic analyses in relation to the tectonic lineaments highlighted. CACF and CAM wrote the first draft of the paper. MPM, APTK and SN performed critics and improved the interpretation of results. RN supervised the work and revised the paper. All authors read and approved the final manuscript.

Funding

Funding information is not applicable.

Availability of data and materials

The gravity and magnetic data use in this study are available, respectively, at the BGI (Bureau Gravimétrique International): <https://bgi.obs-mip.fr/data-products/> and NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration): <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/emag2.html>.

Declarations

Ethics approval and consent to participate

Not applicable.

Consent for publication

Not applicable.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Author details

¹Laboratory of Geophysics and Geoexploration, Department of Physics, The University of Yaoundé I, P.O. Box 812, Yaoundé, Cameroon. ²Laboratory of Energy, Materials, Modeling and Method of the University of Douala; National Higher Polytechnic School of Douala, University of Douala, Douala, Cameroon. ³Higher Teacher Technical Training College, University of Buea, Buea, Cameroon.

Received: 13 September 2021 Accepted: 23 March 2022

Published online: 24 April 2022

References

- Aina A (1986) Reduction to equator, reduction to pole and orthogonal reduction of magnetic profiles. *Explor Geophys* 17:141–145
- Ambraseys NN, Adams RB (1986) Seismicity of West Africa. *Ann Geophys* 4(B6):679–708
- Ateba B, Ntepe N, Ekodeck GE, Soba D, Farhead JD (1992) The recent earthquakes of South Cameroon and their possible relationship with main geological features of Central Africa. *J Afr Earth Sc* 14(3):365–369
- Ateba B, Dorbath C, Dorbath L, Ntepe N, Frogneux M, Aka FT, Hell JV, Delmond JC, Manguelle DE (2009) Eruptive and earthquake activities related to the 2000 eruption of Mount Cameroon volcano (West Africa). *J Volcanol Geoth Res* 179:206–216
- Barbosa VCF, Silva JBC, Medeiros WE (1999) Stability analysis and improvement of structural index estimation in Euler deconvolution. *Geophysics* 64:48–60
- Blakely RJ, Simpson RW (1986) Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics* 51:1494–1498
- Bouekeke DB (1994) Structures Crustales d'Afrique Centrale Déduites des Anomalies Gravimétriques et Magnétiques : Le Domaine Précambrien de la République Centrafricaine et du Sud Cameroun, Ph.D. Thesis, Université de Paris Sud : p 263
- Collignon F (1968) Gravimétrie de reconnaissance de la République Fédérale du Cameroun. ORSTOM, Paris
- Cordell L, Grauch VJS (1985) Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. In: Hinze WJ (ed) The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps. Society Exploration Geophysicists, Tulsa, pp 181–197
- Déruelle B, Ngounouno I, Demaiffe D (2007) The Cameroon Hot Line (CHL): a unique example of active alkaline intraplate structure in both oceanic and continental lithospheres. *C R Geosci* 339:589–600
- Dumont JF (1986) Identification par télédétection de l'accident de la Sanaga (Cameroun); sa position dans le contexte des grands accidents d'Afrique centrale et de la limite nord du craton congolais. *Géodynamique* 1:13–19
- Everaerts M, Mansy JL (2001) Le filtrage des anomalies gravimétriques, une clé pour une compréhension des structures tectoniques du Boulonnais et de l'Artois (France). *Bull Soc Géol* 172(3):267–274
- Fairhead JD, Binks R (1991) Differential opening of the Central and South Atlantic oceans and the opening of the West African Rift System. *Tectonophysics* 187:191–203
- Fairhead JD, Okereke CS (1987) A regional gravity study of the West African Rift System in Nigeria and Cameroon and its tectonic interpretation. *Tectonophysics* 143:141–159
- Florio G, Fedi M, Pasteka R (2006) On the application of Euler deconvolution to the analytic signal. *Geophysics* 71:L87–L93

- Hadhemi B, Fatma H, Ali K, Mohamed G (2016) Subsurface structure of Tebour-souk and El Krib plains (dome zone, northern Tunisia) by gravity analysis. *J Afr Earth Sci* 119:78–93. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.03.015>
- Hatem A, Mostafa R (2013) Delineation of the subsurface structures and basement surface of the Abu-Rodaym area, South western Sinai, using ground magnetic data. *Earth Planets Space* 65:749–757
- Jacobsen BH (1987) A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps. *Geophysics* 52:390–398. <https://doi.org/10.1190/1.1442378>
- Jafal M, El Goumi N, Kchikach A, Tahar A, Khattach D, Manar A (2010) Gravity and magnetic investigations in the Haouz basin, Morocco: interpretation and mining implications. *J Afr Earth Sci* 58:331–340. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.03.012>
- Kamguia J, Manguelle-Dicoum E, Tabod CT, Tadjou JM (2005) Geological models deduced from gravity data in the Garoua basin, Cameroon. *J Geophys Eng* 2:147–152
- Kamguia J, Tabod CT, Nouayou R, Tadjou JM, Manguelle-Dicoum E, Kande HL (2007) The Local Geoid model of Cameroon CGM05. *Nord J Surv RealEstate Res* 4:7–23
- Khattach D, Keating P, Mostafa ML, Chennouf T, Andrieux P, Milhi A (2004) Apport de la gravimétrie à l'étude de la structure du bassin des Triffa (Maroc nord-oriental): implications hydrogéologiques. *CR Geosci* 336:1427–1432
- Khattach D, Mraoui H, Sbibih D, Chennouf T (2006) Analyse multi-échelle par ondlettes des contacts géologiques : application à la carte gravimétrique du Maroc nord-oriental. *C.R. Geoscience* 338:521–526
- Koch P (1959) Carte géologique du Cameroun au 1/500000, coupure GAROUA-Ouest, Dir. Gkol. Mines Cameroun
- Koumetio F, Njomo D, Tabod CT, Noutchogwe TC, Manguelle-Dicoum E (2012) Structural interpretation of gravity anomalies from the Kribi-Edea zone, South Cameroon: a case study. *J Geophys Eng* 9:664–673. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/9/6/664>
- Le Fur Y (1971) Les indices de cuivre du groupe volcano sédimentaire de Poli (Cameroun). *Bull Du BRGM* 6:79–91
- Macleod IN, Jones K, Ting Fan D (1993) 3D analytical signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. *Explor Geophys* 24:679–688
- Marcel J, Abate Essi JM, Njandjock NP, Oumarou S, Manguelle-Dicoum E (2018) Validation of gravity data from the geopotential field model for subsurface investigation of the Cameroon Volcanic Line (Western Africa). *Earth Planets Space* 66:158
- Marson I, Klingele EE (1993) Advantages of using the vertical gradient of gravity for 3-D interpretation. *Geophysics* 58:1588–1595
- Maus S, Barckhausen U, Berkenbosch H, Bournas N, Brozena J, Childers V, Dostaler F, Fairhead JD, Finn C, Von Frese RRB, Gaina C, Golynsky SB (2009) EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *AGU Geochem Soc* 10(8):Q08005
- Meert JG, Lieberman BS (2007) The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran-Cambrian radiation. *Gondwana Res.* <https://doi.org/10.1016/j.gr.2007.06.007>
- Ndougsa-Mbarga T, Feumoe ANS, Manguelle-Dicoum E, Fairhead JD (2011) Aeromagnetic data interpretation to locate buried faults in South East Cameroon. *Geophysica* 48(1–2):49–63
- Ngatchou HE, Liu G, Tabod CT, Kamguia J, Nguia S, Tiedeu A, Xiaoping KE (2014) Crustal structure beneath Cameroon from EGM2008. *Geod Geodyn* 5(1):1–7. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1246.2014.01001>
- Ngatchou HE, Nguia S, OwonaAngue MLC, Mouzong PM, Tokam Kamga AP (2018) Source characterization and tectonic implications of the M4.6 Monatele (Cameroon) earthquake of 19 Marth (2005). *S Afr J Geol* 121(2):191–200
- Ngoh JD, Ndougsa-Mbarga T, Assembe SP, Meying A, Owono OU, Tabod CT (2017) Evidence of structural facts inferred from aeromagnetic data analysis over the Guider-Maroua area (Northern Cameroon). *Int J Geosci* 8(6):781
- Nguia S, Cheunteu Fantah CA, Nouayou R (2018) Gravity imaging of the crustal structures beneath Southern Cameroon and its tectonic implications. *Int J Eng Sci* 78:08–23
- Nzenti JP, Barbey P, Macaudière J, Soba D (1988) Origin and evolution of the late Precambrian high-grade Yaounde gneisses (Cameroon). *Precambrian Res* 38:91–109
- Nzenti JP, Barbey P, Bertrand JM, Macaudière J (1994) La Chaîne Panafricaine au Cameroun : cherchons suture et modèle ! In *SGF édit, 15e Réunion des sciences de la Terre, Nancy, France*, p 99
- Owona Angue MLC, Tabod CT, Nguia S, Kenfack JV, Tokam Kamga AP (2013) Delineation of lineaments in South Cameroon (Central Africa) using gravity Data. *Open J Geol* 3:331–339
- Philips JD (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 Arizona, p 02–98
- Poidevin JL (1983) La tectonique panafricaine à la bordure Nord du craton du congolais. L'orogénèse des "Oubanguides". *Abstracts 12th Afr. Geol. Teruren.* p 75
- Poudjom-Djomani YH, Boukeke DB, Legeley-Padovani A, Nnange JM, Ateba-Bekoa Albouy Y, Fairhead JD (1996) Levés gravimétriques de reconnaissance du Cameroun. ORSTOM, Paris
- Reid AB, Allsop JM, Granser H, Millett AJ, Somerton IW (1990) Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics* 55:80–90
- Reusch AM, Nyblade AA, Wiens DA, Shore PJ, Ateba B, Tabod CT, Nnange JM (2010) Upper mantle structure beneath Cameroon from body wave tomography and the origin of the Cameroon volcanic line. *Geochem Geophys Geosyst* 11(10):1–17
- Shandini Y, Kouske AP, Nguia S, Mouzong PM (2018) Structural setting of the Koum sedimentary basin (north Cameroon) derived from EGM2008 gravity field interpretation. *Contrib Geophys Geod* 48(4):281–298
- Tabod CT, Fairhead JD, Stuart GW, Ateba B, Ntepe N (1992) Seismicity of the Cameroon volcanic line, 1982–1992. *Tectonophysics* 212:303–320
- Tadjou JM, Nouayou R, Kamguia J, Kande HL, Manguelle-Dicoum E (2009) Gravity analysis of the boundary between the Congo Craton and the Panafrican belt of Cameroon. *Austrian J Earth Sci* 102:71–79
- Tchameni R, Mezger K, Nsifa N, Pouclet A (2001) Crustal origin of early proterozoic syenites in the Congo Craton (Ntem complex), south Cameroon. *Lithos* 57:23–42
- Thompson DT (1982) "EULDPH" A new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics* 47:31–37
- Tokam KAP, Tabod CT, Nyblade AA, Julia J, Wiens DA, Pasyanos M (2010) Structure of the Crust beneath Cameroon, West Africa, from the Joint Inversion of Rayleigh Wave Group velocities and receiver functions geophysical. *Geophys J Int* 1183:1061–1076
- Toteu SF, Dumont JF, Bassahak J, Penaye J (1984) "Complexes de base" et "séries intermédiaires" dans la zone mobile panafricaine de la région de Poli au Cameroun, vol 299. *CR Académie des Sciences, Paris*, pp 561–564
- Toteu SF, Penaye J, Maldan F, Nyama Atibagoua B, Bouyo Houketchang M, Sep Nlomgan JP (2008) Géologie et ressources minérales du Cameroun, 33eme congrès International de la Géologie, OSLO, Norway, p 6–14
- Vanié LTA, Khattach D, Houari MR (2005) Apport des filtrages des anomalies gravimétriques à l'étude des structures profondes du Maroc oriental. *Bull. Inst Sci., Rabat, section Sci. Terre* 27:29–40
- Vanié LTA, Khattach D, Houari MR, Chourack M, Corchette V (2006) Apport des filtrages des anomalies gravimétriques dans la détermination des accidents tectoniques majeurs de l'Anti-Atlas (Maroc). In : *Actes du 3e Colloque Maghrébin de Géophysique appliquée*, p 23–30

Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Gravity Imaging Of the Crustal Structures beneath Southern Cameroon and Its Tectonic Implications

Severin Nguiya¹, Cyrille A. F. Cheunteu², Robert Nouayou³

¹Faculty of Industrial Engineering, University of Douala

²Department of Physique, University of Yaoundé 1

³Department of Physique, University of Yaoundé 1

Corresponding Author: Severin Nguiya

ABSTRACT

In the present study, digital filters have been applied to gravity data in order to better understand and characterize the crustal structure of the Southern Cameroon. The approach is based on the qualitative and quantitative analysis of the Bouguer anomalies. Different filtering techniques (regional-residual separation, horizontal gradient method, vertical and tilt derivative, upward continuation and Euler deconvolution) were applied to the Bouguer anomalies. The quantitative interpretation of the Bouguer anomalies using the Euler deconvolution allowed to estimate the maximum depth of geological structures source of gravity anomalies beneath the study area at about 18 km. Furthermore, we identified lineaments mainly oriented East-West that allow to figure out the tectonic settings of the area. The interpretation of the extended Bouguer anomalies using upward continuation method for 5, 15, 25, 50 and 80 km depth helped to highlight the spatial distribution of anomalies in the deeper structures, and retrace the evolution of the Congo Craton as well as concluding that it has a mantle root underthrusting the Pan-African belt.

KEYWORDS -Bouguer anomaly, Congo Craton, filter, Pan-African chain, tectonics

Date of Submission: 27-07-2018

Date of acceptance: 11-08-2018

I. INTRODUCTION

The southern part of Cameroon is predominantly covered by the geological structure called Congo Craton. The Congo Craton was formed during the Precambrian and is one of the three main cratons found in Africa, the West African Craton and the Kalahari Craton being the other ones. In Cameroon, the northern edge of the Congo Craton has been identified and located by many studies [1, 2] and it is limited by the structures of the Panafrican Mobile Belt. Because of the potential mineral wealth of the southern Cameroon, the region continues to arouse the interest of many geologists and geophysicists. However, the layout and extension of the tectonic accidents that affect the region, as well as the geometry of the relevant basins cannot only be approached by the direct analysis. Therefore, we performed gravity investigations in order to identify the faults, their limits and their spatial distribution under the soil cover. To achieve this, we used the multi-scale analysis based on the coupling of the horizontal gradient method with the upward continuation [3, 4]. This approach, which has been proved effective in studies by [4], allowed highlighting the major geological structures and mapping the main structural lines that affect the study area. We are particularly interested in the transition zone between the Congo Craton and the Pan-African Chain. This area has been the subject of several previous investigations which all contributed to the understanding of the geological structures of the subsoil and delineating the Congo Craton limit. However, the majority of these works were conducted only on the western part of our present study area making the concluding statements about the structure of the northern margin of the Congo Craton incomplete. In fact, there is no definitive model for the evolution of the transition zone between the Congo Craton and the Panafrican Mobile Belt. Moreover, the major structural lines have not yet been characterized at the present scale. Therefore, a better knowledge of the crustal structure and the evolution of this transition will contribute to understand the setting of this major feature of the Cameroon geology.

II. GEOLOGICAL AND TECTONIC SETTINGS

The African continent crust is carrying the imprints of the various tectonic activities that affected it throughout the time. Most of the rocks of the continent are from the Precambrian period. In Cameroon, the geological exposures are dominated by Archean to Neoproterozoic rocks of the Congo Craton [5, 6] in the south, and the Panafrican Mobile Belt in the north. The major tectonic features identified across the country are: The Adamawa plateau (AF), the Kribi-Campo fault (KCF), the Sanaga fault (SF), the Tcholliré-Banyo fault (TBF), Cameroon Volcanic Line (CVL) and the Benue Through [7]. The present study area cover the

transition zone between the Congo Craton and the Pan-African Mobile Belt where structural domains can be identified as Ntem complex (Congo Craton) and Yaoundé group (Pan African chain) as shown on the figure 1. The Congo Craton is represented by three units constituting the Ntem complex. These are the Ntem unit in the center, the Ayina unit in the east and the Nyong unit to the west; [8, 9]. The Ntem unit (Archean) includes a tapered series, relics greenstone belts and intrusive complex. The intrusive complex is set up to 2.9 Ga [10–14]. The Nyong unit (Paleoproterozoic) corresponds to the western edge of the Congo Craton and is characterized by regional foliation plane and composite. It includes metasediments and meta-volcano sediments that could match the greenstone belts of relics, to gray gneiss migmatic composition [15]. The Ayna unit in the southeastern part of the Ntem complex is thought to represent a Paleoproterozoic sedimentary cover on the Congo craton. It consists of Yokadouma and Dja series [9].

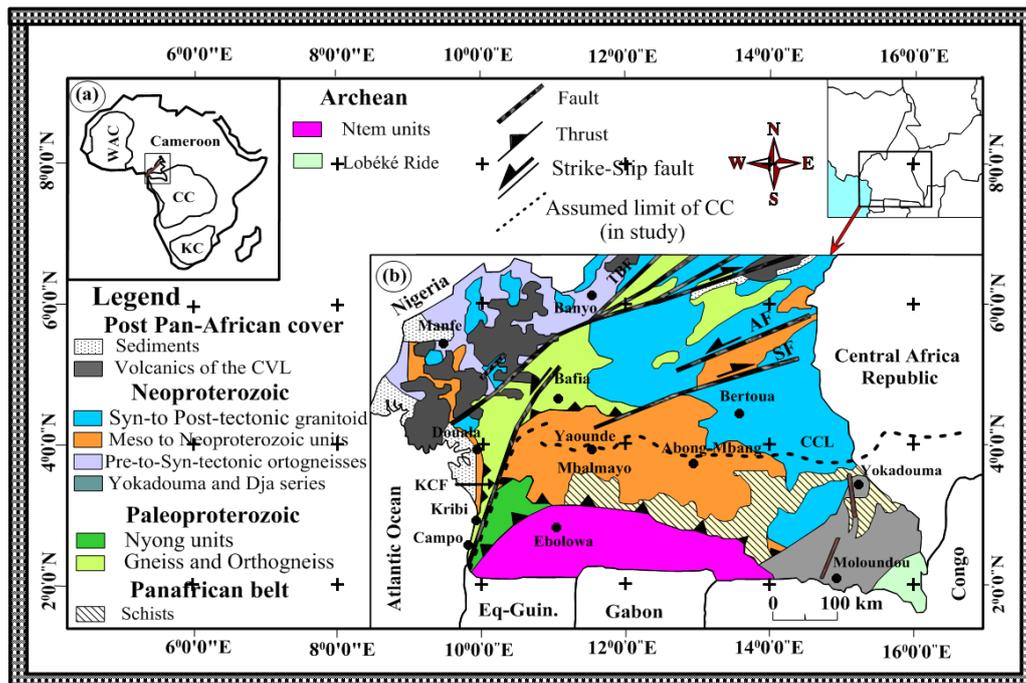


Fig. 1. Geological map of the southern part of Cameroon and surrounding zones showing major tectonic elements of the Precambrian basement.

III. DATA AND METHOD

3.1. Gravity data

The gravity data used in this work were collected between the longitudes $9,5^{\circ}$ and 17° East, and the latitudes 2° and $4,5^{\circ}$ North. The data were acquired during campaigns carried out by different organizations and researchers: ORSTOM (1960-1967), Hegberg (1968), and the ELF Company (1980). The dataset consisted of gravity measurements from 1173 stations irregularly distributed in the study area. Some areas are lacking data due to inaccessibility. They were collected at 4 km intervals from all gravity stations including base stations, on all available roads and tracks in the area using Worden gravimeters ($n^{\circ}313$ and 600) with a precision of 0,2 mGal. The gravimeter readings were corrected for drift and the gravity anomalies were computed assuming a mean crustal density of $2,67 \text{ g/cm}^3$. The maximum error in the Bouguer anomaly value for any of the stations due to the error in height determination is not expected to exceed 0,15 mGal.

3.2.Method

The digital filters are mathematical tools used to modify the frequency distribution of a digital signal. They allow extracting from the raw data, useful information that can be processed to generate appropriate maps that can be useful for the geological interpretation. Several different filters were successively applied to the gravity data.

3.2.1. Regional and residual separation of gravity anomalies.

The Bouguer map superimposes the effects of both deep and shallow density contrasts, extensive and local (anomaly). Sometime the deep structure is masked by the effect of less interesting shallow structures. At each station, the magnitude of the observed gravity signal represents the sum of contributions from all shallow and deep structures including noises. Using band-pass filter coupled with the examination of the averaged power spectrum. In this regard, the features produced by the near-surface density variations are separated from those produced by more deep-seated ones.

3.2.2. Upward continuation method

The upward continuation process is applied to progressively remove the contribution of high-frequency, near-surface, shallow causative bodies from the gravity field, resulting in a smooth field reflecting the deeper causative bodies and/or density structures. We applied this operator on the Bouguer anomaly data to observe the variation of the high densities contrasts with the depth. The upward continuation acts as a low-pass filter that attenuates the high frequencies of the sources of superficial anomalies. It helps to observe, analyze and explain the geodynamics of main tectonic structures.

3.2.3. Horizontal gradient

The horizontal gradient allows to identify the lateral contacts between the media of different densities. It promotes the study of different areas of deep discontinuities in order to give their implications on tectonics. In the spatial domain, the horizontal or gradient derived horizontal (DH) of a field $g(x, y)$ defined at different points (x, y) of the horizontal plane measurement, is given by the relation (1) [16]:

$$g_{DH} = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

where $\frac{\partial g}{\partial x}$ and $\frac{\partial g}{\partial y}$ are respectively the derivatives x and y of the field g .

The horizontal gradient is a good way to locate geological contacts in the basement, including the flaws by determining their path, dip and importance [4, 17]. The gravimetric anomaly over a vertical contact is represented by a curve having a minimum of side rocks low densities and the maximum of the rock side having high densities. It shows the anomaly created by a contact and the horizontal gradient corresponding to a profile perpendicular to this contact as illustrated on figure 2 below.

3.2.4. Vertical derivative

The first vertical derivative applied to the potential field data is a useful method to distinguish the effects related to the presence of local masses included in regional data [18, 19]. It helps to identify the presence of regional anomalies while the second derivative can locate and accentuate the presence of anomalies related to relatively shallow sources [20]. The vertical derivative map, devoid of regional features, highlights positive gradient zones that stand out clearly from negative gradient zones. It also shows a lateral separation of the anomalies and an amplification of the gravimetric effect of the superficial density contrasts to the detriment of the deep contrasts.

3.2.5. Multi-scale Analysis of the horizontal gradient of Bouguer anomalies and vertical derivative.

The application of the horizontal gradient method coupled to the upward continuation allows the location of faults and the determination of their dip [21]. The method consists in creating series of analytical upward continuation of gravity data followed by the computation of the horizontal gradient for each step and their maxima. The maxima are superimposed to determine the dipping direction of the gravimetric lineaments as shown in figure 2 (b) below.

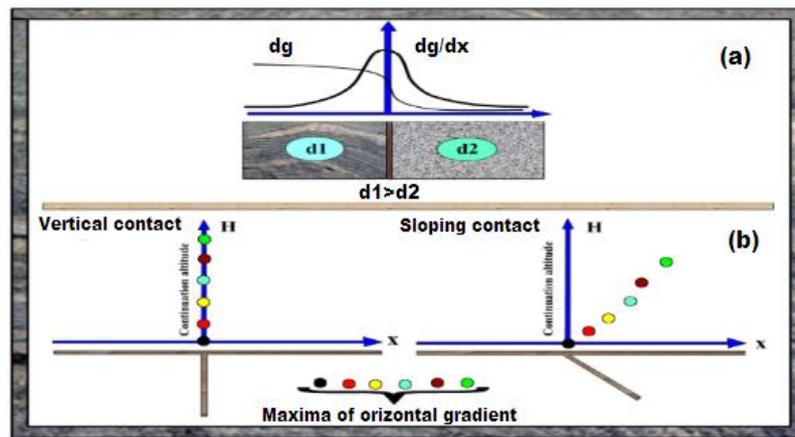


Fig. 2. (a) Map showing the variation of gravity data and horizontal derivative curve function of the distance to a contact; d_1 and d_2 are densities. (b) Maxima obtained for vertical, dipping and horizontal contacts. H is the vertical axis while X is the horizontal axis.

3.2.6. Tilt derivative

The tilt derivative technique is a data transformation method useful to highlight shallow bedrock structures and for some exploration purposes [24]. This transformation relates the ratio between the first vertical derivative (Z) and the total of horizontal derivatives (X and Y).

3.2.7. Euler deconvolution filter

The apparent depth to the gravity source is derived from Euler's homogeneity equation (Euler deconvolution). This process relates the gravity field and its gradient components to the location of the source of an anomaly, with the degree of homogeneity expressed as a "structural index". Euler's homogeneity relationship for gravity data can be written in the form given the equation (2) [21].

$$(x - x_0) \frac{\partial M}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial M}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial M}{\partial z} = N(B - M) \quad (2)$$

where $(x_0, y_0$ and $z_0)$ is the position of the gravity source whose total field (M) is detected at position (x, y, z) and B is the regional gravity field.

The Euler method has been applied to the Bouguer anomaly map using a $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ grid. This was done on the study area using the standard Euler 3D method of the Geosoft software package. The system uses the least squares method to solve the anomaly position, depth, and base level for a specific gravity source.

IV. RESULTS

4.1. Bouguer anomaly map

Figure 3 below displays the Bouguer anomaly map obtained from the gravity measurements. On this map, the interpolation process is done while limiting the confidence area around the points of measurements to a radius of about 20 km away from them.

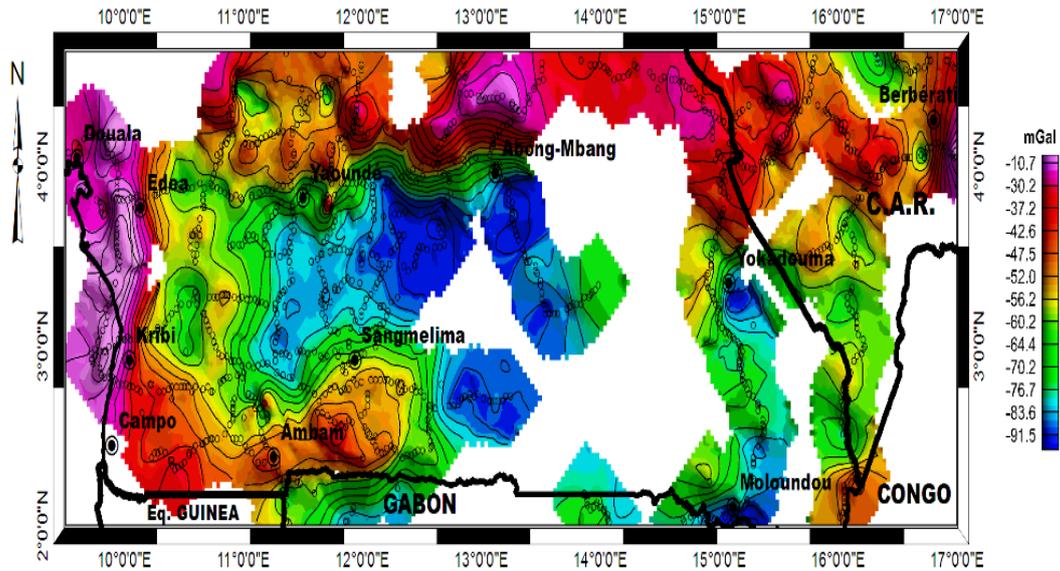


Fig. 3. Bouguer anomaly map of the study area. Small circles represent gravity measurement points.

Due to the irregular distribution of the gravity measurements, some areas of investigation do not have enough data, triggering lack of information as elucidated by white spaces on figure 3. To overcome this, a geostatistical tool (Kriging) is used to estimate data in blank areas. Therefore, a new Bouguer anomaly map made from 10260 regularly spaced points is obtained for the studied area with 5 mGal contour intervals as shown on figure 4. The new Bouguer dataset will be the basis of all subsequent interpretation in the following stages.

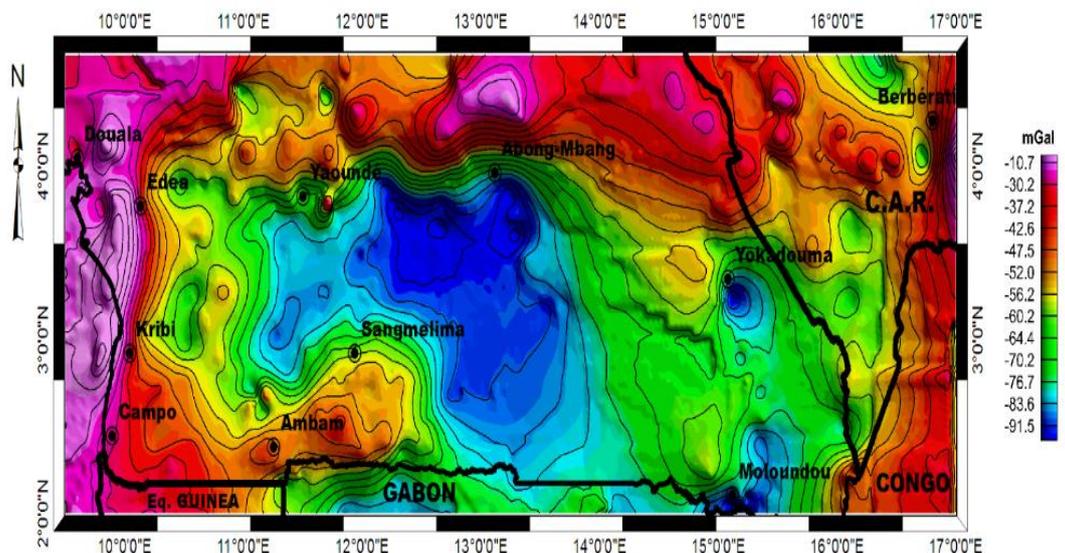


Fig. 4. Bouguer anomaly map obtained after the kriging interpolation.

4.2. Regional-residual separation of anomalies.

The separation of the anomalies into regional and residual is done after the gravity data have been transformed into the frequency domain. In this regard, the averaged power spectrum of the data is computed and the frequency window for the separation is interactively selected as illustrated on the figure 5 below.

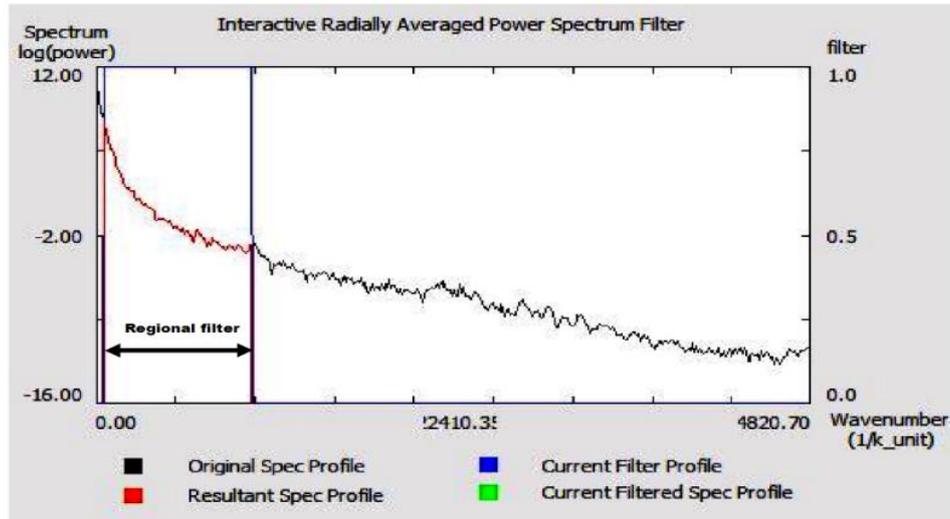


Fig. 5. Radially Averaged power spectrum of Bouguer gravity data.

The obtained regional anomalies (figure 6) are characterized by large negative anomalies center around Sangmelima with value reaching -91.5 mGal. At latitude 4°N , there is a gradient corresponding to the highest value of the anomalies in the area. This gradient corresponds to the transition zone between the Congo Craton and the Pan-African chain; these observations can be interpreted as the crust thinning towards the northern and western margins of the Congo Craton.

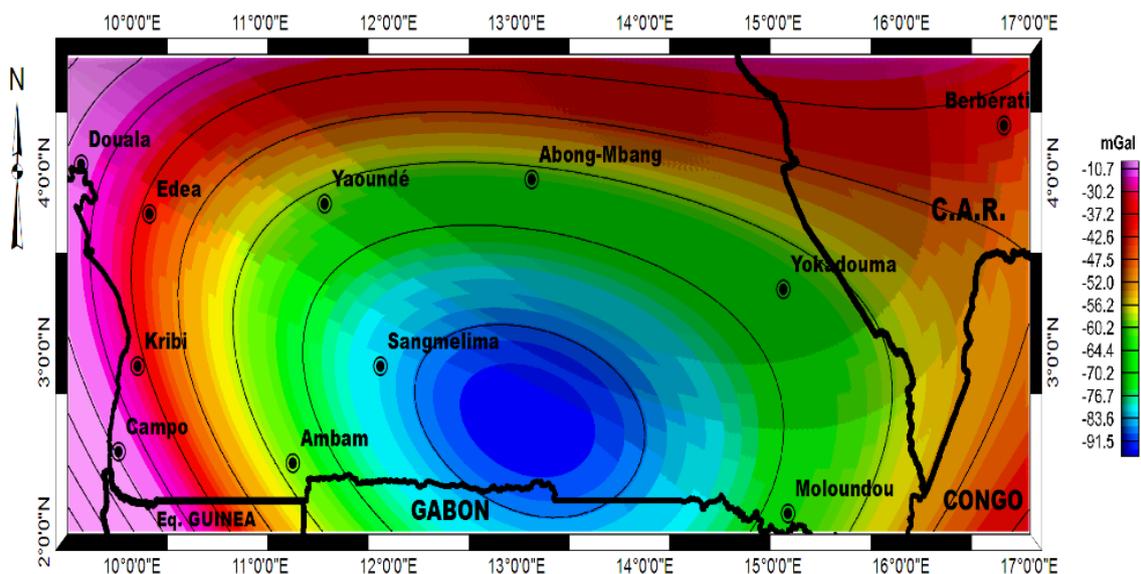


Fig. 6. Map of the regional Bouguer anomalies.

The residual anomaly map of the study area in the other hand was obtained by subtracting the regional anomalies from the Bouguer anomalies. They represent the effect of shallower features. Figure 7 shows the overall distribution of the residual anomalies along the study area. The map shows that the center of the study area is dominated by negative anomalies ranging from -90 to -60 mGal surrounding by zones of positive anomalies. We can observe shapes of contour lines on the residual map that are quite similar to the ones observed on the Bouguer anomaly map (figure 4). However, the amplitude of the anomalies is not comparable. The comparison of the residual anomaly map to the geological map reveals that the negative anomalies correlate with the location of geological units ranging from mesoproterozoic to neoproterozoic. The positive anomaly trending SW-NE around Sangmelima, on the basis of geological considerations, can be interpreted in terms of the intrusion of igneous charnockites of the Ntem Unit.

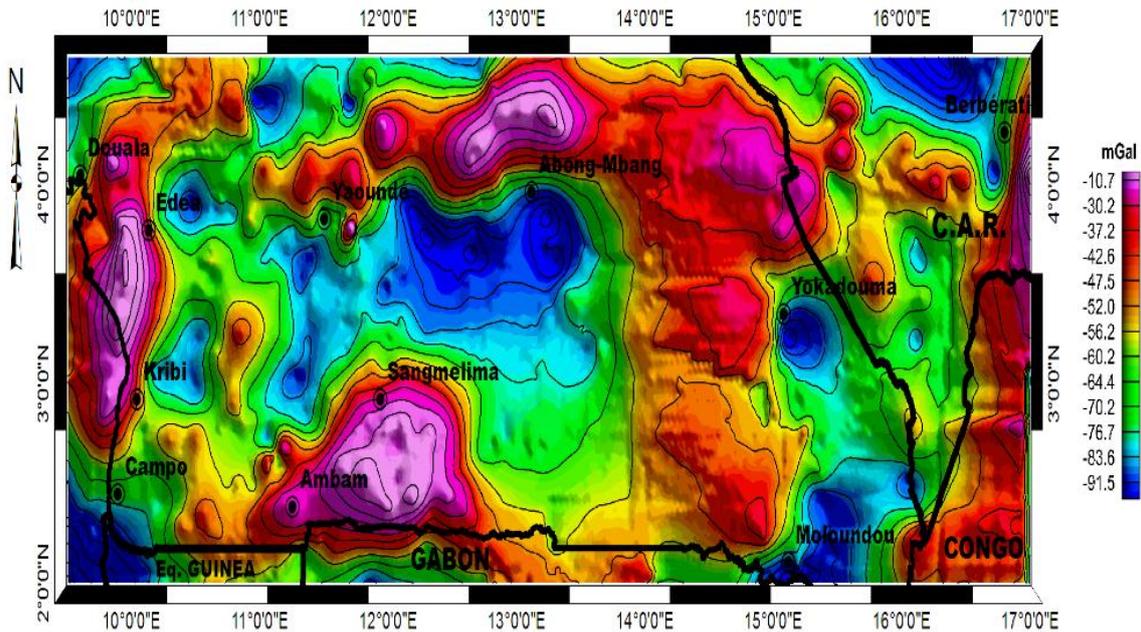


Fig. 7. Residual anomalies map of the study area.

In order to simultaneously interpret the signification of the Bouguer, Regional and Residual anomalies, the 3D representation of each anomaly map is placed on top of the corresponding 2D map, all displayed in three panels on figure 8. The large negative anomaly observed on the Bouguer, the regional, and slightly on the residual can be interpreted as the subsidence of the cratonic crust in the study area. The subsidence is probably resulting from the interaction between the Congo Craton and the Panafrican Mobile Belt.

4.3. Horizontal Gradient of Bouguer anomalies

The horizontal gradient map computed for the study area is shown on Figure 9. The map shows areas with high gradients that correspond to contact or fault structures [22]. The most relevant gradients are those observed at the western and Northern margins between the Congo Craton and the Pan-African mobile belt. The gradients around Ambam and Sangmelima may result to the presence of intrusive bodies [23].

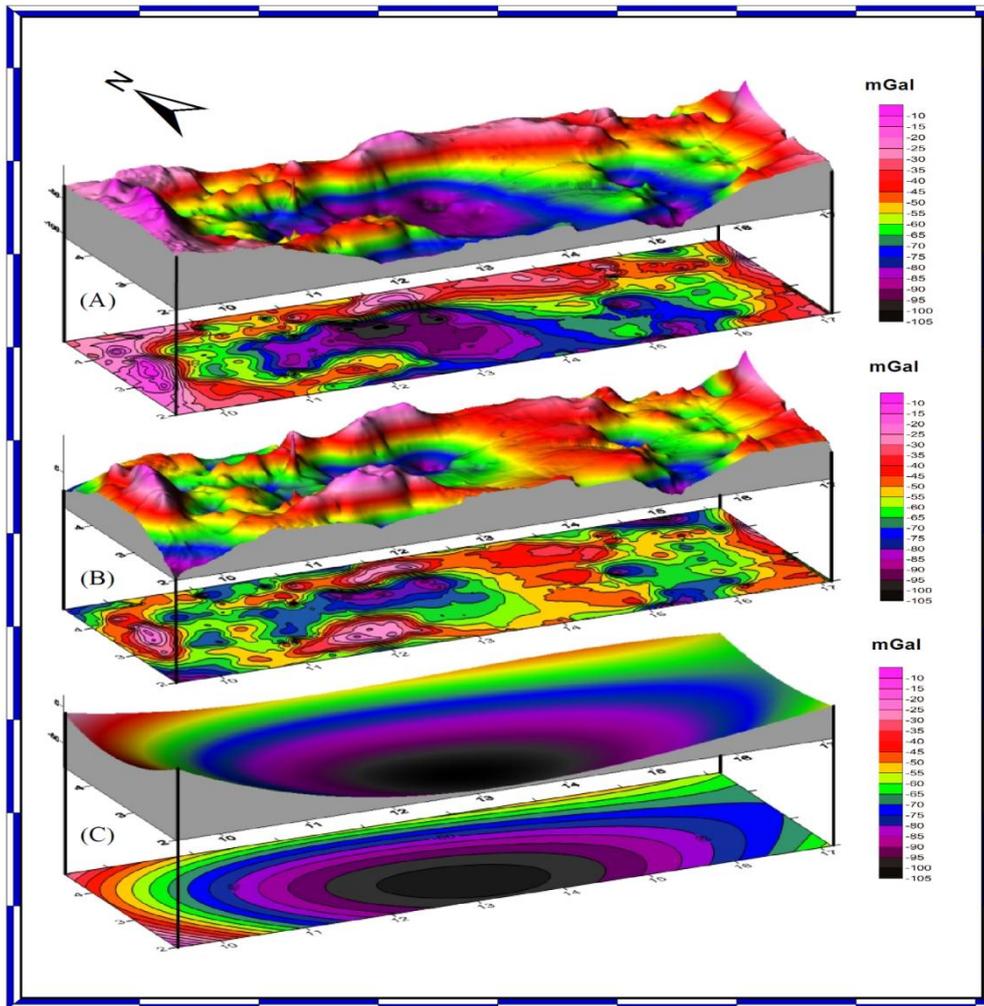


Fig. 8. Representation of Bouguer anomalies (Panel A), residual anomalies (Panel B), and regional anomalies (Panel C). In each panel, the upper part represents the 3D while the lower one is the 2D representation of the same anomalies.

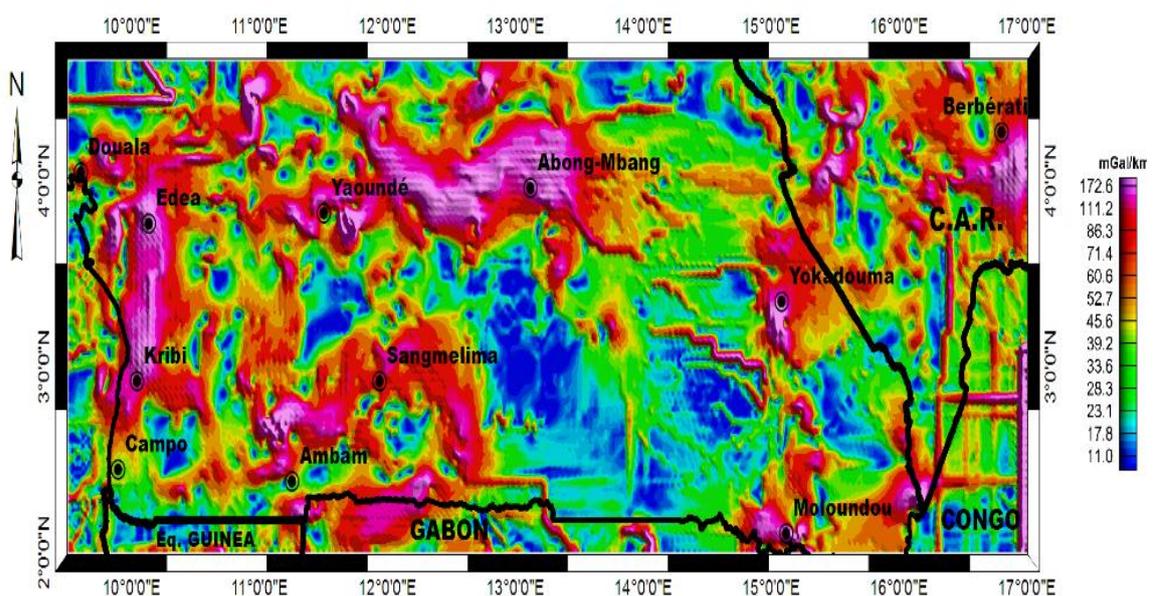


Fig. 9. Map of the horizontal gradient of Bouguer anomalies.

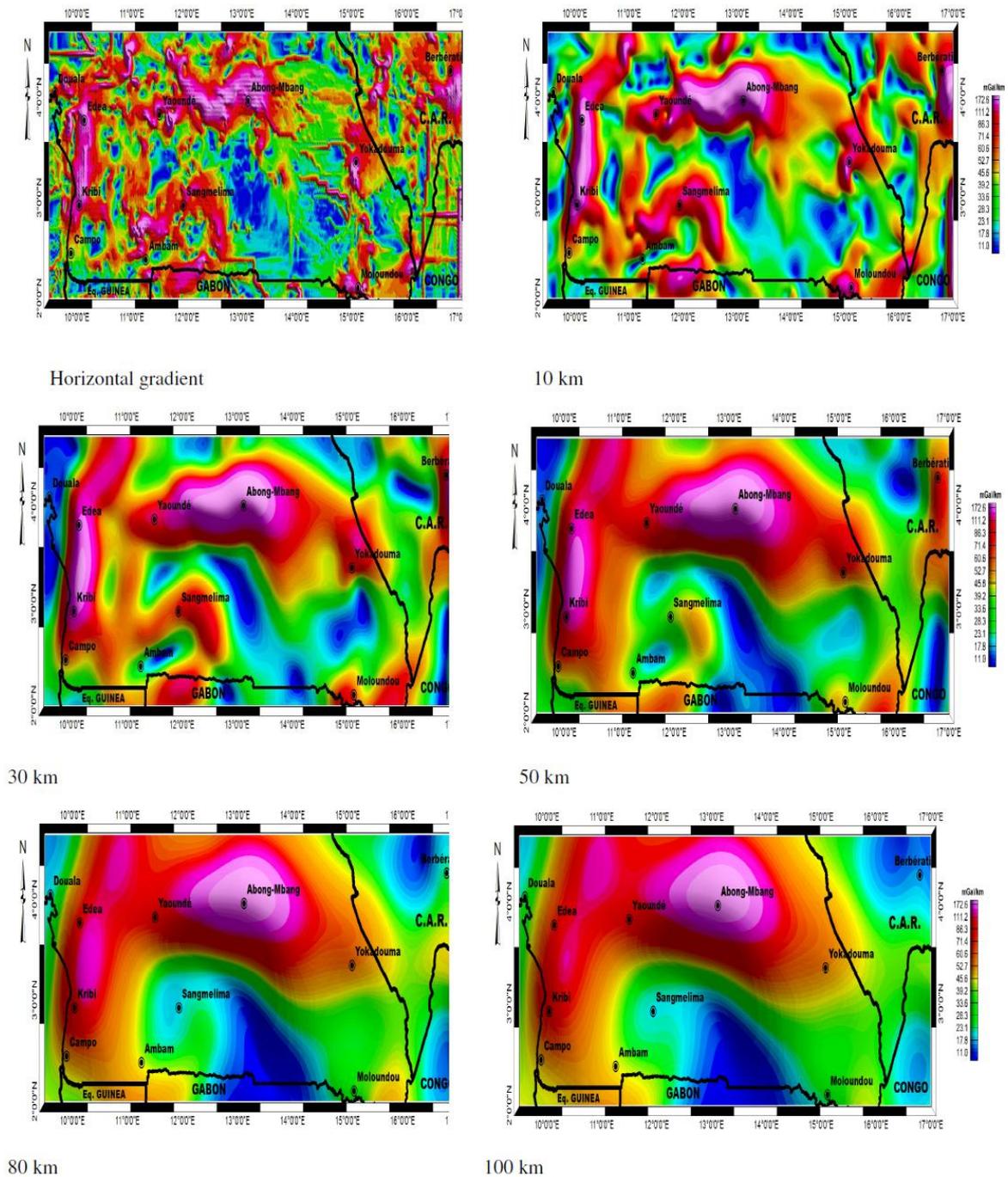


Fig. 10. Horizontal gradient maps of the upward continuation data for depths 0, 10, 30, 50, 80 and 100 km.

4.4. Upward continuation of the Bouguer anomalies

The upward continuation of the Bouguer anomalies has been performed for the depths 10, 30, 50, 80 and 100 km (figure 11). The effect of shallow structures are progressively vanishing with depth as the shape of the contour lines are becoming smooth and highlights regional features. We can deduce from the figure that the transition zone between the Congo Craton and the Pan African belt is covered by structures with high densities that are deeply seated up to depth 100 km.

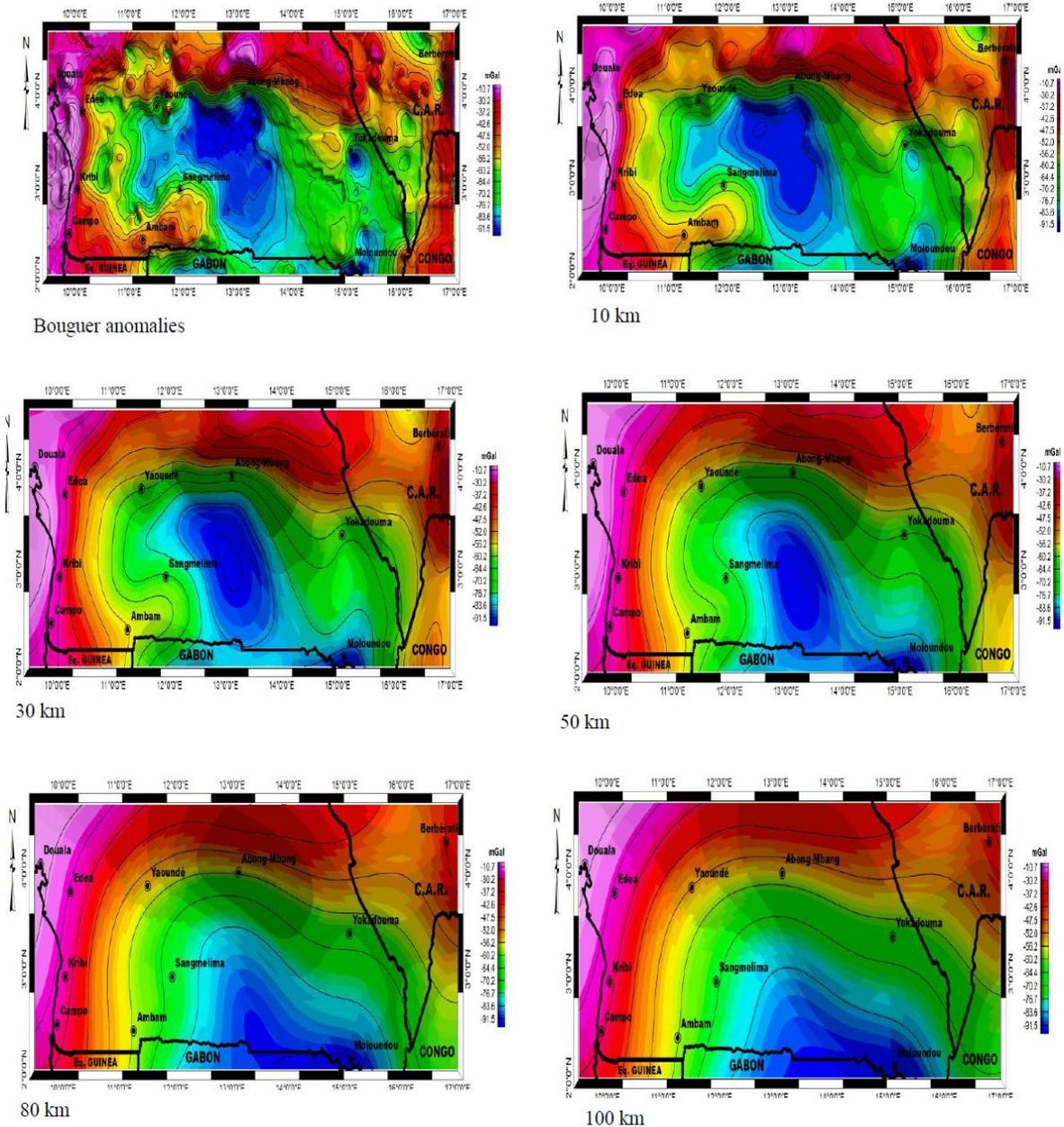


Fig. 11. Maps of the Bouguer (a) and the upward continuation of the Bouguer anomalies for depths 10, 30, 50, 80 and 100 km.

4.5 Vertical derivative map

Figure 12 shows the vertical derivative map of the studied area. The analysis of this map reveals a sharp contrast between area of positive and negative vertical gradients. The positive gradients are mainly located along the northern margin of the Congo Craton surrounding a large area of negative gradients. We can also notice the proposed intrusion around Sangmelima and Ambam marked by the positive vertical gradients around these areas.

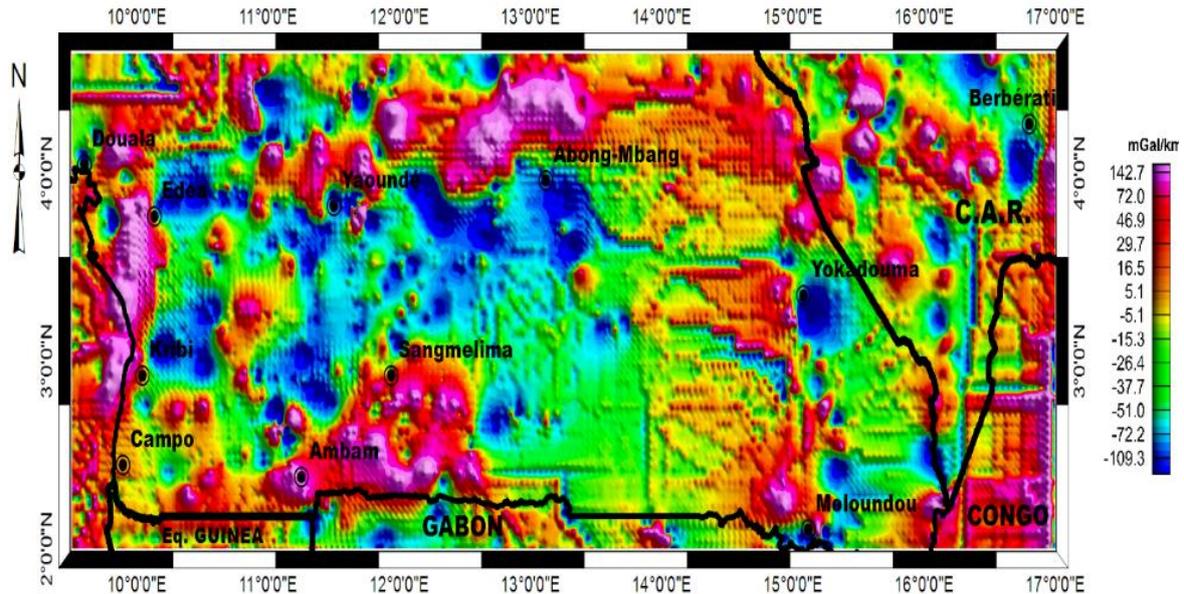


Fig. 12. First derivative map of the Bouguer anomalies.

4.6. Tilt derivative result

The tilt derivative map (figure 13) shows several features similar to those observed on the first vertical derivative map of the Bouguer anomaly (figure 12). Compared to the first vertical derivative, the anisotropies on the tilt derivative indicated from the high value tilt angle that the source of the causative bodies are deepest around the Congo Craton northern margin and some other areas as Ambam, Sangmelima and Yokadouma.

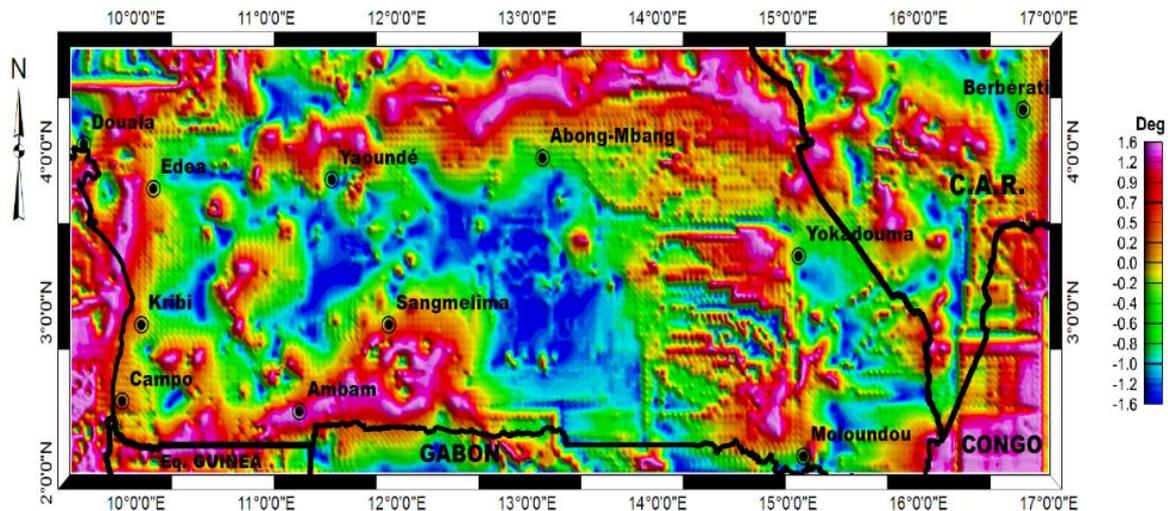


Fig. 13. map of the tilt derivative of Bouguer anomaly.

4.7. Depth of structures using Euler's Deconvolution

Several structural indexes have been tested for the Euler's deconvolution method. For the structural index $N=1.0$, the Euler solution has been found to provide the best solution for the present study. The map obtained from the deconvolution reveals new deep contacts and show that the solution are ranging from depth 2 to 20 km. The Euler deconvolution map (figure 14) shows that the geological structures worn by great depths are located on the western borders and between North Congo Craton and the Pan African chain, leading to the conclusion that the transition zone would be increased by abrupt variations of geological structures and high depth.

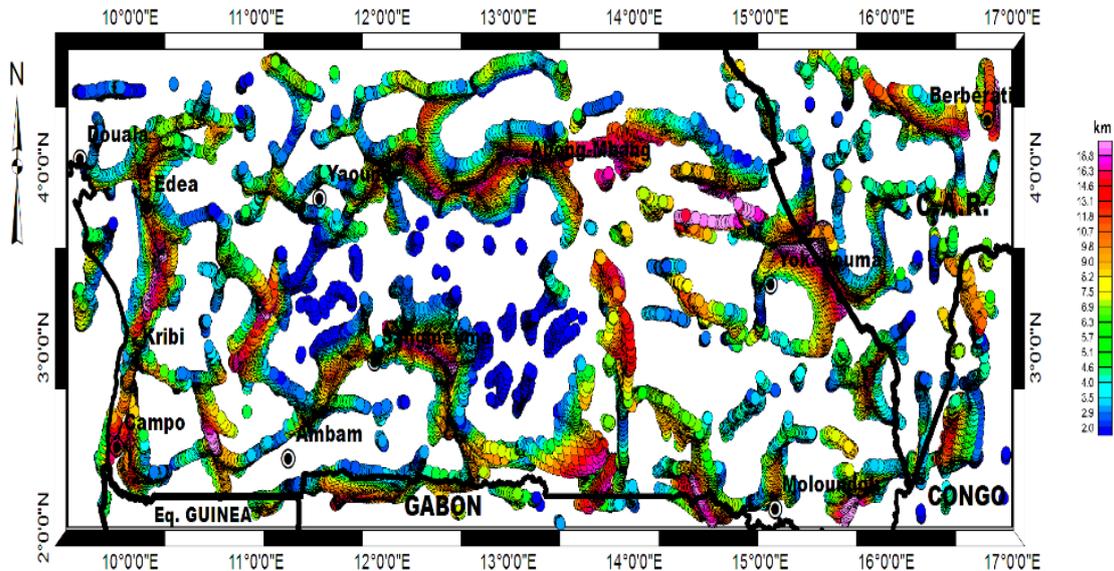


Fig. 14. 2D Map of Euler deconvolution.

4.8 Mapping lineaments

The superposition of the local maxima of the horizontal gradient determined on the Bouguer and vertical derivative extended a series of depth to 50 km, with a constant step of 5km is shown on Figure 15 and 16 below. A close look to the maxima horizontal map shows that the densification of maxima is a low over the study area, which may be the consequence of the irregular distribution of the gravity measurements as shown on figure 3. The alternate solution is to apply the vertical gradient technique to produce the map of the maxima of vertical gradients (figure 16).

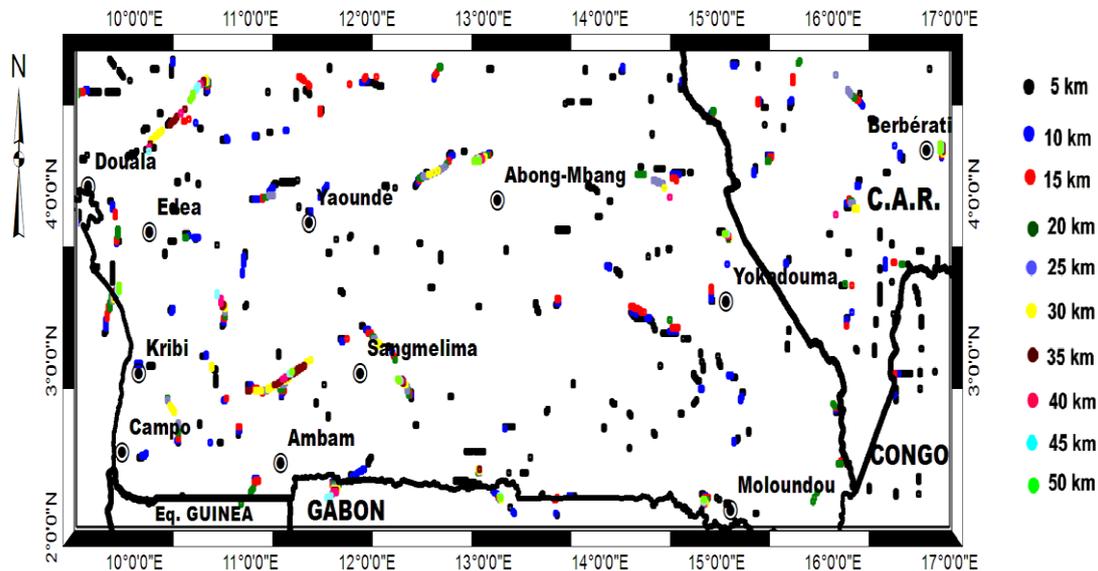


Fig. 15. Maxima horizontal gradient Bouguer anomalies map.

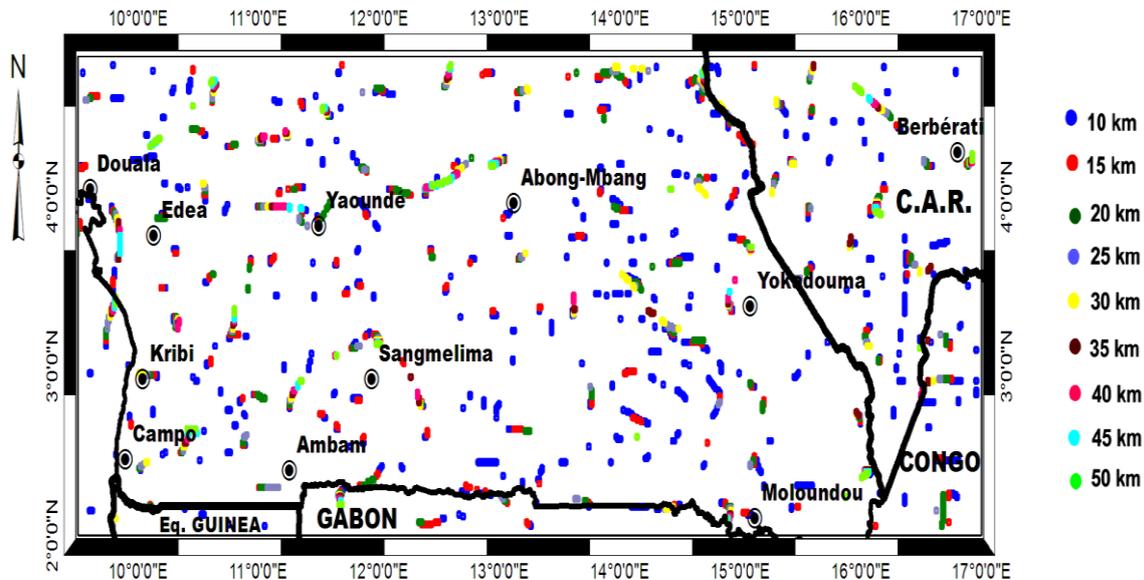


Fig. 16 Map of the maxima of the horizontal gradient of the vertical derivative of Bouguer anomaly.

We can observe on figure 16 that the densification of maxima is stronger in the northern and western parts of the study area. They can be considered as the fault veins and therefore are illustrative of the transition zone between the Congo Craton and the Panafrican Belt. The maxima points located near Sangmelima and Ambam are considered to be the zones of intrusion of geological structures. Therefore, the map highlights different structural features present in the area such as faults and intrusive structures. Another advantage of this representation is that it easily helps to determine the dipping direction of the contacts.

4.9. Lineaments map

The overlying of the main structural features observed on figures 14, 15 and 16 to the ones shown on horizontal gradient map of Bouguer anomaly (figure 9) is a way to identify the outlines of the geological structures in the study area as shown on figure 17. Black lines (numbered 1 to 45) are linear contacts corresponding to the lineaments of the major structural lines in the study area. From the Euler deconvolution analysis, these geological structures are buried up to depth of 18 km.

In addition, based on the multi-scale analysis carried out on the horizontal gradient map, it is evident that contrast gradient lineaments (13), (3), (44) and (45) become blurred on the extended horizontal gradient map at 50 km ; This may allow to conclude that these structural lines do not have an original mantle but crustal. Structural lines (2), (25), (4), (42) (40) (14) (17) (1), and (20). Illustrate the north and west borders between and the Pan-African Chain. The orientations of the 45 structural features have been determined as presented in the table 1 below.

Table 1. Identified faults and their orientation

N°	Orientation	N°	Orientation	N°	orientation	N°	orientation	N°	Orientation
1	N61°E	10	N128°E	19	N88°E	28	N118°E	37	N32°E
2	N09°E	11	N113°E	20	N73°E	29	N96°E	38	N72°E
3	N134°E	12	N83°E	21	N29°E	30	N126°E	39	N169°E
4	N49°E	13	N64°E	22	N52°E	31	N81°E	40	N0°E
5	N135°E	14	N78°E	23	N79°E	32	N163°E	41	N45°E
6	N109°E	15	N152°E	24	N151°E	33	N73°E	42	N178°E
7	N71°E	16	N25°E	25	N160°E	34	N25°E	43	N18°E
8	N83°E	17	N105°E	26	N106°E	35	N94°E	44	N04°E
9	N85°E	18	N13°E	27	N45°E	36	N45°E	45	N59°E

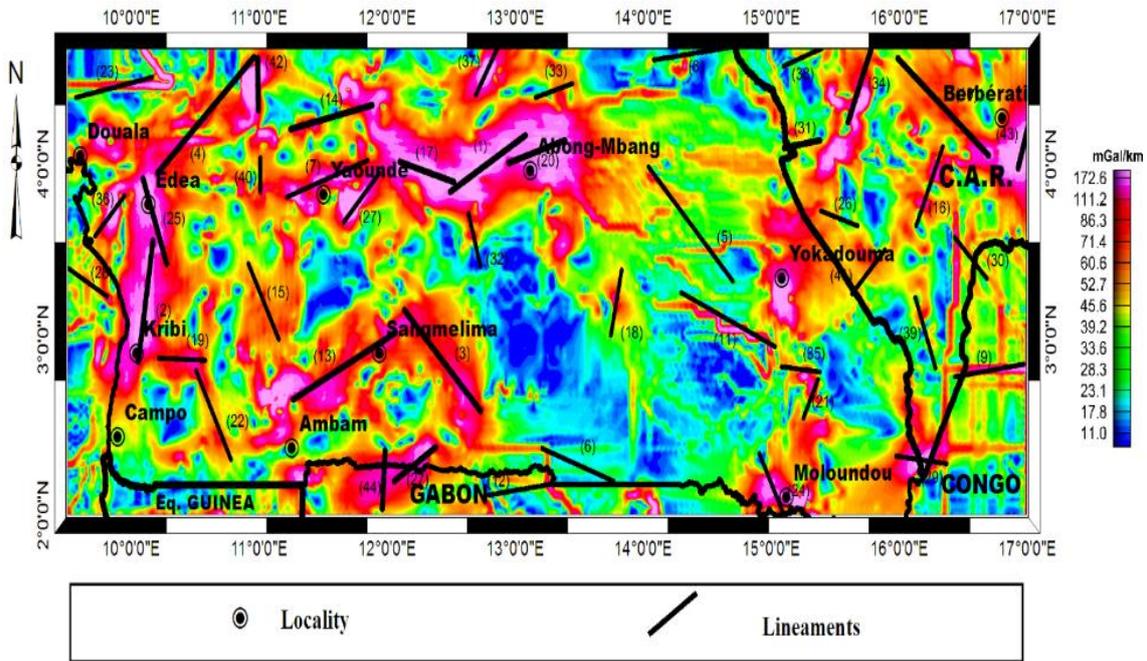


Fig. 17. Map of structural lineaments in the study area.

The rose of representative diagrams figure 18 below, show the directions of the large structural lines. The regional field stress associated with the predominant trending of gravity lineaments (figure 17) is in agreement with Eburnean orogeny trend [25] and would have played an essential role in the control of the geodynamic evolution of the region.

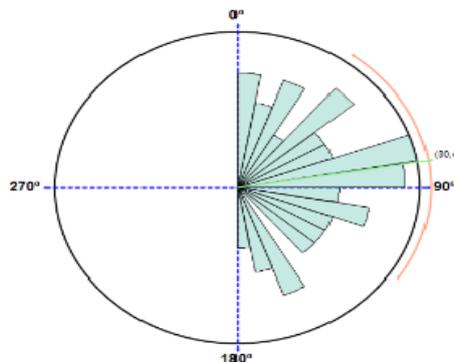


Fig. 18: Rose Diagram of identified lineaments.

V. DISCUSSION AND CONCLUSION

The Congo Craton has been subject of many past geophysical studies [22, 27–29]. In this work, we brought new elements for the characterization of large structural lines in the northern part of Congo Craton located in southern Cameroon and tried a new approach to understand the distribution of the gravity gradients at the transition zones between the Congo Craton and the Panafrican belt. The analysis of the map of lineaments in southern Cameroon by [22] helped to identify a number of structural features only in the western edge of the study area specifically in the NW margin of the Congo Craton where the interest of an extension much further east in this work.

The main results obtained in this study provide new insights thereby improving our understanding of the geological structure of southern Cameroon. The results provided by this work are as follows: 1) the collapse of the basement in the center characterized by negative anomalies and a rise of the basement to the east, west and south characterized by positive anomalies. 2) Strong gravity anomalies gradient contrasts located at the transition zones between the Congo Craton and Pan-African belt with mantle origins. 3) The gravimetric lineaments suggest that the area has been subjected to a major regional constraints. This could have played a key role in controlling the geodynamic evolution of the region.

The basis of variations in anomalies and high gradients localized, we can approach the geodynamic study hypothesis to admit that high gradients of contrasts at the transition zone between Congo Craton and Pan-African would have a mantle origin. The accidents highlighted to the north of the map are proof of the existence of a tectonic zone with a thrust zone through which the Congo Craton strikes under the Pan-African belt. The quantitative interpretation of the map of Bouguer anomalies from Euler deconvolution has allowed to estimate the depths of geological structures distributed throughout the study area where the depth can reach about 18 km. The deepest geological structures are located in the transition zones between the Congo Craton and the Pan-African Chain.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank BGI-France (International Gravimetric Bureau) for acquiring and for allowing us to use the gravity data. We have a recognition to Ian Macleod and Tim Dobush Canadian scientists for having developed the Geosoft software for Exploration Geophysics. We also thank Paterson, Grant and Watson Limited for having developed a number of Geosoft Executables (GX) for specialized processing and interpretation needs within Geosoft Oasis montaj.

REFERENCES

- [1]. J. Kamguia, R. Nouayou, C. T. Tabod, J. M. Tadjou, E. Manguelle-Dicoum and H. L. Kande, Geophysical signature of geological units inferred from the analysis of geoid maps in Cameroon and its surroundings, *Journal of African Earth Sciences*, 52, 2008, 1-8.
- [2]. J. M. Tadjou, R. Nouayou, J. Kamguia, H. L. Kande and E. Manguelle-Dicoum, Gravity analysis of the boundary between the Congo craton and the Panafrican belt of Cameroon, *Austrian J. Earth Sci.*, 102, 2009, 71-79.
- [3]. N. Archibald, J. P. Gow and F. Boschetti, Multiscale Edge Analysis of Potential Field Data Exploration, *Geophysics*, 30, 1999, 38-44.
- [4]. D. Khattach, P. Keating, M. L. Mostafa, T. Chennouf, P. Andrieux and A. Milhi, Contribution of gravity to the study of the structure of Triffa basin (northeastern Morocco): hydrogeological implications, *C.R. Geoscience*, 336, 2004, 1427-1432.
- [5]. J. L. Feybesse, V. Johan, C. Triboulet, C. Guerrot, F. Mayaga-Mikolo, V. Bouchot and J. Eko Ndong, The west Central Africa belts: a model of 2.5-2.0 Ga accretion and two-phase orogenic evolution, *Precambrian Research*, 87, 1998, 161-216.
- [6]. J. Penaye, A. Kroner, S.F. Toteu, W.R. Van schmus, J. C. Doumang Mbaiggane, Evolution of the Mayo Kebbi region as revealed by zircon dating: an early (740 Ma) Pan-African magmatic arc in south-western Chad, *Journal of African Earth Sciences*, 44, 2006, 530-542.
- [7]. S. F. Toteu, W. R. Van Schmus, J. Penaye and A. Michard, New U-Pb and Sm-Nd data from north-central Cameroon and its bearing on the pre-Pan African history of central Africa, *Precambrian Research*, 108, 2001, 45-73.
- [8]. A. Nédelec, J. Macaudière, J. P. Nzenti and P. Barbey, Evolution structural et métamorphique de la série de Mbalmayo (Cameroon) : implications pour la structure de la zone mobile panafricaine au contact du craton du Congo, *C.R. Académie des Sciences Paris*, 303 (Série II), 1986, 75-80.
- [9]. J. Vicat, J. Leger, E. Nsifa, J. Nzenti, R. Tchameni and A., Pouclet, Distinction au sein du Craton Congolais du Sud-Ouest du Cameroun, de deux épisodes doléritiques initiant les cycles orogéniques Eburnéen (Paléoprotérozoïque) et Panafricain (Néoprotérozoïque), *C.R. Académie des Sciences Paris*, 323 (série IIa), 1996, 575-582.
- [10]. J. Delhal and D. Ledent, Data on the complex calcomagnésien geochronology of southern Cameroon, *Mus. Roy. Afr. heat. Tervuren (Belg.)*, Rapp. Ann., 1974, 71-76.
- [11]. M. Lassere et D. Soba, Age libérien des granodiorites et des gneiss à pyroxène du Cameroun méridional, *Bulletin BRGM France*, 2(1), sect. IV, 1976, 17-32.
- [12]. S. F. Toteu, W. R. Van Schmus, J. Penaye and J. B. Nyobe, U-Pb and Sm-Nd evidence for Eburnean and Pan-African high-grade metamorphism in cratonic rocks of Southern-Cameroon, *Precambrian Research*, 67, 1994, 321-347.
- [13]. C. Shang, M. Satir, W. Siebel, E. N. Nsifa, H. Taubald, J. P. Liegeois and F. M. Tchoua, TTG magmatism in the Congo Craton; a view of major and trace element geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd systematics: case of the Sangmelima region, Ntem complex, Southern Cameroon, *Journal of African Earth Sciences*, 40, 2004, 61-79.
- [14]. C. Shang, M. Satir, E. N. Nsifa, J. P. Liegeois, W. Siebel and H. Taubald, Archean high-K granitoids produced by remelting of earlier Tonalite-Trondhjemite-Graodiorite (TTG) in the Sangmelima region of the Ntem complex of the Congo craton, southern Cameroon, *International Journal of Earth Science (Geol Rundsch)*, 96, 2007, 817-841.
- [15]. R. Tchameni, Géochimie et géochronologie des formations de l'Archéen et du Paléoprotérozoïque du Sud-Cameroun (Groupe du Ntem, craton du Congo), Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, France, 1997.
- [16]. R. J. Blakely, Potential theory in gravity and magnetic applications, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1995.
- [17]. D. Khattach, H. Mraoui, D. Sbibih and T. Chennouf, Analyse multi-échelle par ondelettes des contacts géologiques: application à la carte gravimétrique du Maroc nord-oriental, *C. R Geoscience*, 338, 2006, 521-526.
- [18]. R. J. Blakely and R.W. Simpson, Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies, *Geophysics*, 51, 1986, 1494-1498.
- [19]. B. H. Jacobsen, A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps, *Geophysics*, 52, 1987, 390-398.
- [20]. E. A. Robinson and M. T. Silvia, Digital Foundation of Times Series Analysis, Holden Day, San Francisco, California, 1981.
- [21]. A. B. Reid, J. M. Allsop, H. Granser, A. J. Millett and I. W. Somerton, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler Deconvolution, *Geophysics*, 55, 1990, 80-90.
- [22]. A. Eshaghzadeh, Depth estimation using the tilt angle of gravity field due to the semi-infinite vertical cylindrical source, *Journal of Geological Research*, volume 2017, 2017, 1-10.
- [23]. Owona Angue, M. L. C., Tabod, C. T., Nguiya, S., Kenfack, J. V. and Tokam Kamga, A. P. 2013. Delineation of Lineaments in South Cameroon (Central Africa) Using Gravity Data. *Open Journal of Geology*, 2013, 3, 331-339.
- [24]. G. R. J. Cooper and D. R. Cowan, Enhancing Potential Field Data using filters based on the local phase, *Computers and Geosciences*, 32(10), 2006, 1585-1591.
- [25]. D. B. Boukeke, Structures Crustales d'Afrique Centrale Déduites des Anomalies Gravimétriques et Magnétiques: Le Domaine Précambrien de la République Centrafricaine et du Sud Cameroun, Ph.D. Thesis, Université de Paris Sud, 1994.

- [26]. J. P. Vicat, *Esquisse Géologique du Cameroun*: In *Géosciences au Cameroun*, Collection GEOCAM1, 1998, 3-11.
- [27]. A. P Tokam, C. T. Tabod, A. A. Nyblade, J. Julia, D. A. Wiens and M. Pasyanos, Structure of the Crust Beneath Cameroon, West Africa, from the Joint Inversion of Rayleigh Wave Group Velocities and Receiver Functions Geophysical, *Geophysical Journal International*, 1183, 2010, 1061-1076. doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04776.x
- [28]. M. L. C Owona Angue, S. Nguiya, R. Nouayou, A. P. Tokam Kanga and E. Manguelle-Dicoum, Geophysical Investigation of the Transition Zone between the Congo Craton and the Kribi-Campo Sedimentary Basin (South - West Cameroon), *South African Journal of Geology*, 114 (2),2011, 145-158.

Severin Nguiya "Gravity Imaging Of the Crustal Structures beneath Southern Cameroon and Its Tectonic Implications. "The International Journal of Engineering and Science (IJES) 7.8 (2018): 08-23