

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

*Paix - Travail - Patrie*

\*\*\*\*\*

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

FACULTE DES SCIENCES

\*\*\*\*\*

CENTRE DE RECHERCHE ET DE  
FORMATION DOCTORALE EN  
SCIENCES, TECHNOLOGIES ET  
GEOSCIENCES

\*\*\*\*\*

UNITE DE RECHERCHE ET DE  
DOCTORALE EN PHYSIQUES ET  
APPLICATIONS

\*\*\*\*\*

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

\*\*\*\*\*

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  
SCIENCES, TECHNOLOGY AND  
GEOSCIENCES

\*\*\*\*\*

RESEARCH AND POSTGRADUATE  
TRAINING UNIT FOR PHYSICS  
APPLICATIONS

\*\*\*\*\*

DEPARTMENT OF PHYSICS

\*\*\*\*\*

B.P. : 812 Yaoundé

Email : crfd\_stg@uy1.uninet.cm

Laboratoire de Physique de l'Environnement Terrestre  
*Laboratory of Earth's Environment Physics*

**INVESTIGATION CRUSTALE DANS LA  
SERIE DU LOM (BETARE-OYA, EST-  
CAMEROUN) POUR L'IDENTIFICATION  
DES CIBLES MINIERES PAR  
COMBINAISON DES METHODES  
POTENTIELLES**

Thèse rédigée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat/Ph D en Physique

**Spécialité** : Physique de l'Environnement Terrestre

**Option** : Géophysique et Géo-exploration

Par :

**NYABAN Christian Emile,**

*Master ès Sciences*

Matricule : 10Y724

Sous la direction de :

**NDOUGSA MBARGA Théophile, Ph D**

*Professeur (U.Y.I, Cameroun)*



Année académique 2022/2023

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE  
DEPARTMENT OF PHYSICS

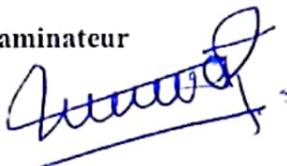
## ATTESTATION DE CORRECTION DE LA THESE DE DOCTORAT/PhD

Nous soussignés, Professeur OWONO OWONO Luc Calvin et Professeur NOUAYOU Robert, respectivement Président et Examineur du jury de la Thèse de Doctorat/PhD de Monsieur NYABAN Christian Emile, Matricule 10Y724, préparée sous la direction du Professeur NDOUGSA MBARGA Théophile intitulée : «INVESTIGATION CRUSTALE DANS LA SERIE DU LOM (BETARE-OYA, EST- CAMEROUN) POUR L'IDENTIFICATION DES CIBLES MINIERES PAR COMBINAISON DES METHODES POTENTIELLES)», soutenue le mercredi, 19 Avril 2023, en vue de l'obtention du grade de Docteur/PhD en Physique, Spécialité Physique de l'environnement Terrestre, Option Géophysique et Géo-exploration, 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 ....0.8. JUIN 2023.....

Examineur



NOUAYOU Robert  
Professeur

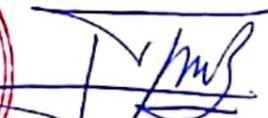
Le Président du jury



OWONO OWONO Luc Calvin  
Professeur



Le Chef de Département de Physique



NDJAKA Jean-Marie  
Professeur

**DEDICACE**

*À ma famille :*

- *Mon feu papa AMIS BIDIAS Jérôme ;*
- *Ma maman chérie MELING Henriette ;*
- *Mon épouse TIOGO MATSE Saurelle Sandra ;*
- *Mes enfants NYABAN ATIADJO Reine Gracia et AMIS NYABAN Paul Eden*

**REMERCIEMENTS**

Un bout de papier ne pourrait jamais suffire pour que toutes les personnes auxquelles je pense soient nommément citées. Néanmoins je tenais à témoigner ma profonde gratitude :

- Au **Professeur OWONO OWONO Luc Calvin**, Coordonnateur de l'Unité de Recherche et de Formation Doctorale de Physique et Applications de l'Université de Yaoundé I ;
- Au **Professeur NDJAKA Jean Marie**, Chef du Département de Physique à la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé, ainsi que tous les enseignants de ce Département pour la formation reçue depuis mon admission à l'Université de Yaoundé I ;
- Au **Professeur NDOUGSA MBARGA Théophile**, qui a bien voulu diriger ce travail, malgré ses multiples occupations. Il a toujours cru en moi et m'a encadré comme un parent. Quelques lignes ne suffiraient pas pour vous signifier tout le soutien que vous m'avez toujours accordé tout au long de ce travail, vivement que Dieu vous récompense pour cela ;
- Au **Professeur Emérite MANGUELLE-DICOUM Eliézer** un véritable modèle, un doyen dans les domaines social, de l'enseignement et de la recherche ;
- Aux membres du jury pour tout le temps précieux qu'ils ont bien voulu sacrifier afin d'examiner le présent travail ;
- A l'endroit du **Professeur BEN BOLIE Hubert Germain**, enseignant au Département de Physique de la faculté des sciences de l'Université de Yaoundé I pour la qualité des enseignements reçus et surtout sa grande disponibilité ;
- Aux enseignants du Laboratoire de Physique de l'Environnement, notamment **les Professeurs NJANDJOCK NOUCK Philippe, TABOD Charles TABOD, NOUAYOU Robert, ENYEGUE A NYAM Françoise** et **OWONA ANGUE Marie Louise** pour la qualité des enseignements reçus et pour leur disponibilité à répondre à toutes mes sollicitations ;
- Ma reconnaissance va aussi à l'endroit de mes aînés académiques qui m'ont accueilli dans l'équipe de recherche de Géophysique et Géo-exploration et ont facilité mon insertion, tout en m'inculquant les grandes qualités scientifiques. Je pense

particulièrement au **Professeur MEYING Arsène** et aux **Docteurs : BIKORO BI ALOU Marcellin, GOUET Daniel Hervé, ZANGA AMOUGOU Alain, FEUMOE Alain Narcisse, NGOUMOU Paul Claude, MONO Jean, OWONO AMOUGOU Olivier Ulrich Igor, PEPOGO Didier Augustin, YANDJIMAIN Justine, TEIKEU ASSATSE William ; NGOH Jean Daniel, ASSEMBE Stéphane Patrick ;**

- A mes compagnons de route au laboratoire : **ENEME Ostwald Gaëtan, NGOA EMGBENG Stève, BIDICHAEL WAHILE Elvis, WANDJI KAMWA Joseph Antoine, MANEKENG TADJOUTEU Stella Amina, SOUGA KASSIA George, YIGUI Lionel, NGAH Christian, NGATCHEU Christelle ;**
- Enfin, je remercie mon épouse, **TIOGO MATSE Saurelle Sandra**, ma fille **NYABAN ATIADJO Reine Gracia**, mon fils **AMIS NYABAN Paul Eden**, mes parents **AMIS BIDIAS Jérôme** et **MELING Henriette** ainsi que, tous les membres de ma famille (**BELIAS Désiré, ADONG Petit Jean et son épouse BANDOLO Ursule, ASSEN Amis, BELING Amis, KAMANDO Emilienne**) et ma belle-famille pour la contribution de chacun dans l’accomplissement de ce travail ;
- A mes amis et tous ceux, qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail et dont la mention n’a point été faite ici.

**TABLE DES MATIERES**

<b>DEDICACES.....</b>	<b>i</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>ii</b>
<b>TABLE DES MATIERES.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTE DES SYMBOLES.....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTE DES ACRONYMES.....</b>	<b>xiii</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xvi</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE .....</b>	<b>10</b>
1. Introduction .....	10
2. Contexte géologique et tectonique .....	10
2.1. Généralités sur la tectonique africaine .....	10
2.2. Généralités sur la géologie et la tectonique du Cameroun.....	13
3. Présentation de la zone d'étude .....	18
3.1. Localisation géographique .....	18
3.2. Climat et végétation .....	19
3.3. Orographie, hydrographie et sols .....	21
3.4. Cadre géologique.....	23
3.5. Ressources minières .....	27
3.6. Cadre tectonique.....	29
4. Travaux régionaux antérieurs.....	29
4.1. Etudes géologiques.....	29
4.2. Etudes géophysiques .....	31
5. Conclusion.....	37

<b>CHAPITRE II : METHODOLOGIE D'INTERPRETATION ET ORIGINE DES DONNEES.....</b>	<b>39</b>
1. Introduction .....	39
2. Méthodes géophysiques .....	39
2.1 Généralités sur les méthodes de prospection géophysique .....	39
2.2. Objet de la prospection géophysique .....	40
3. Cas des méthodes investiguées : Aéromagnétique et gravimétrie .....	41
3.1. Méthode aéromagnétique .....	41
3.2. Méthode gravimétrie .....	56
3.3. Opérateurs de transformation et de traitement des données magnétiques et gravimétriques .....	68
4. Conclusion.....	78
<b>CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>80</b>
1. Introduction.....	80
2. Résultats et analyses des données magnétiques .....	80
2.1. Interprétation du champ total aéromagnétique réduit à l'équateur (RTE) .....	80
2.2. Angle d'inclinaison sur la carte résiduelle.....	83
2.3. Carte structurale .....	85
2.4. Extension 3D des anomalies .....	87
2.5. Analyse quantitative .....	89
2.6. Conclusion partielle.....	96
3. Résultats et analyses des données gravimétriques .....	98
3.1. Interprétation de la carte de bouguer.....	98
3.2. Prolongement vers le haut des cartes gravimétriques résiduelles .....	102
3.3. Interprétation de la carte des données résiduelles .....	103
3.4. Gradient horizontal total des données gravimétriques résiduelles.....	105
3.5. Superposition des maximas du gradient horizontal des cartes prolongées à différentes hauteurs de prolongement.....	107

3.6. Déconvolution d'Euler .....	<b>109</b>
3.7. Modélisation 2.75D .....	<b>110</b>
3.8. Conclusion partielle.....	<b>114</b>
4. Synthèse et discussion des résultats issus des différentes méthodes potentielles.....	<b>115</b>
4.1. Méthode de séparation des anomalies aéromagnétiques et gravimétriques.....	<b>115</b>
4.2. Corrélation des linéaments magnétiques et gravimétriques.....	<b>116</b>
4.3. Analyse régionale des modèles 2.75D issus des méthodes potentielles .....	<b>117</b>
4.4. Corrélation entre les linéaments structuraux et la cartographie des sites miniers aurifères .....	<b>122</b>
4.5. Discussion .....	<b>123</b>
4.6. Conclusion.....	<b>125</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE.....</b>	<b>128</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>130</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>157</b>

**LISTE DES FIGURES**

Figure 1 : Les cratons stables et les zones mobiles d’Afrique. D’après Faihead et Okereke, (1988) modifiée.....12

Figure 2 : Carte géologique du Cameroun, modifiée d'après Kankeu et al. (2009).....17

Figure 3 : Carte de localisation du secteur d’étude.....19

Figure 4 : Carte topographique 3D de la zone d'étude.....23

Figure 5 : Carte géologique de la zone d’étude (Gazel & Gérard, 1954) modifiée.....27

Figure 6 : Géologie du Sud-Est Cameroun.....28

Figure 7 : Caractéristiques du champ magnétique principal.....42

Figure 8 : Le champ magnétique terrestre.....44

Figure 9 : Synthèse des susceptibilités magnétiques typiques de certaines roches et minéraux communs.....46

Figure 10 : Installation du levé de mesures magnétiques (Feumoé, 2014).....51

Figure 11 : Organigramme de traitement des données aéromagnétiques.....54

Figure 12 : Ellipsoïde et géoïde.....57

Figure 13 : Mouvement de rotation d’un point M à la surface de la Terre.....60

Figure 14 : Corps autogravitant de forme quelconque ; le champ de gravité étant calculé en un point extérieur P (Cara, 1989).....	61
Figure 15. Organigramme de la méthodologie de traitement des données gravimétriques.....	66
Figure 16 : Représentation géométrique de l'opérateur Tilt-angle ( $\theta$ ).....	72
Figure 17 : Demi-plaque infinie (Salem et al., 2007).....	73
Figure 18 : Carte d'intensité magnétique totale (TMI) réduite à l'équateur.....	80
Figure 19 : Nombre d'extrema par rapport à la hauteur de prolongement vers le haut.....	82
Figure 20 : Angle d'inclinaison sur la carte résiduelle.....	83
Figure 21 : Carte structurale de la zone d'étude. ....	84
Figure 22 : Carte des failles majeures superposées aux contours des angles d'inclinaison. ....	86
Figure 23 : La superposition des contours ( $\Theta = 0^\circ$ ) de l'angle d'inclinaison de RTE.....	88
Figure 24 : Solution d'Euler (N=1; W=25; Z=10%).....	89
Figure 25 : Solution d'Euler (N=2 ; W=20 ; Z=10%).....	90
Figure 26 : Modèle 2.75D obtenu à partir du profil P1.....	94
Figure 27 : Modèle 2.75D obtenu à partir du profil P2.....	95
Figure 28 : Carte d'anomalie de Bourguer.....	100
Figure 29 : (a) Carte de superposition des isogales de l'anomalie résiduelle avec la topographie et (b) de superposition des isogales avec la géologie.....	101
Figure 30 : Cartes des anomalies de Bourguer prolongées a 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 km.....	102

Figure 31 : Nombre d'extrema par rapport à la hauteur de prolongement vers le haut.....	104
Figure 32 : Carte d'anomalies résiduelles. P1, P2, P3 représentent les profils de modélisation.....	105
Figure 33 : Gradient horizontal total des anomalies résiduelles.....	106
Figure 34 : Superposition des maximas du gradient horizontal des cartes résiduelles prolongées à 1, 2 et 3 km.....	108
Figure 35 : Carte structural des données gravimétriques résiduelles.....	108
Figure 36 : Carte des solutions d'Euler (N=0.1 ; W=10 ; Z=15%).....	110
Figure 37 : Modèle 2.75D obtenu à partir du profil P1.....	111
Figure 38 : Modèle 2.75D obtenu à partir du profil P2.....	112
Figure 39 : Modèle 2.75D obtenu à partir du profil P3.....	114
Figure 40 : Carte géologique montrant quelques failles souterraines mises en évidence dans ce travail (traits continus forts).....	119
Figure 41 : Croquis amélioré du profil lithologique du bassin de Bétaré-Oya.....	122
Figure 42 : Le domaine mobile panafricain (PMD) entre le craton d'Afrique de l'Ouest (WAC) et les cratons de São Francisco (SFC) et du Congo (CC) montrant deux sous-domaines, ouest et est, séparés par la Raghane Shear Zone (R.S.Z.). Toteu et al., (2004) modifié.....	123

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Quelques matériaux et minéraux diamagnétiques (Borradaile, 1994).....	47
Tableau 2 : Quelques minéraux ferromagnétiques (Dunlop et al., 1997).....	48
Tableau 3 : Maxima et altitudes du prolongement vers le haut.....	82
Tableau 4 : Principaux défauts de la série Lom. ....	91
Tableau 5 : Maxima et altitudes du prolongement vers le haut.....	106
Tableau 6 : Nature des formations.....	121

**LISTE DES SYMBOLES**

$G$  : Constance Universelle de la gravité ( $\text{N} \cdot \text{m}^2 \text{kg}^{-2}$ )

$F$  : Force de pesanteur (N)

$m$  : Masse d'un corps (kg)

$g$  : Accélération de pesanteur (mGals)

$m_T$  : Masse de la Terre (kg)

$R_T$  : Rayon moyen de la Terre (m)

$g_h$  : Accélération de pesanteur à une hauteur  $h$  (mGals)

$\vec{A}_T(M)$  : Champ gravifique créé par les masses terrestres en un point  $M$

$\vec{F}_T$  : Force due au champ gravifique créé par les masses terrestres

$\vec{A}_u(M)$  : Champ gravifique créé en un point  $M$  par les masses de l'Univers autre que la Terre

$\vec{\gamma}(M)$  : Accélération subie par un point  $M$

$\omega$  : Vitesse angulaire de rotation de la Terre autour d'elle même

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

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

$\vec{Q}(M)$  : Accélération centrifuge au point  $M$  due à la rotation de la Terre

$\lambda$  : Latitude géocentrique (en degré)

$U$  : Potentiel scalaire dont dérive le champ gravifique créé par les masses terrestres

$U'$  : Potentiel scalaire dont dérive l'accélération axipète due à la rotation

$W$  : Potentiel scalaire dont dérive le champ de pesanteur total

$(M)$  : Masse volumique de la Terre au point  $M$

## *Liste des symboles*

---

---

$C$  : Moment d'inertie de la Terre autour de son axe de rotation

$A$  : Moment d'inertie de la Terre autour d'un axe situé dans le plan équatorial

$M$  : Masse totale de la Terre

$(\lambda)$  : Rayon de l'ellipsoïde en fonction de la latitude géocentrique

$g_e$  : Pesanteur à l'équateur

$g_P$  : Pesanteur aux pôles

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

$B$  : Anomalie de Bouguer

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

$\Delta g_F$  : Correction de Faye

$\Delta g_B$  : Correction de Plateau ou de Bouguer simple

$\Delta g_T$  : Correction topographique

$r()$  : Anomalie régionale

$res()$  : Anomalie résiduelle

$(\ )$  : Anomalie de Bouguer

$H$  : Profondeur moyenne d'une source responsable d'une anomalie

**LISTE DES ACRONYMES**

E : Est ;

ENE : Est Nord-Est ;

Fig : Figure ;

GPS : Global Positioning System ;

m : mètre ;

IGRF: International Geomagnetic Reference Field ;

km : Kilomètre ;

Ma : Millions d'années ;

MNT : Modèle numérique de terrain ;

N : Nord ;

NE : Nord-Est ;

NW : Nord-Ouest ;

S : Sud ;

SE : Sud-Est

SW : Sud-Ouest ;

W : Ouest ;

WSW : Ouest Sud-Ouest ;

nT : Nano Tesla ;

WGS : World Geodesic System ;

UTM : Universal Transverse Mercator ;

RTE : Reduce to Equator ;

B.R.G.M: Bureau de Recherche Géologique et Minière.

**RESUME**

Cette étude est réalisée dans la série Lom au Cameroun, à la frontière avec la République Centrafricaine, située entre les latitudes 5°30' – 6° N et les longitudes 13°30' - 14°45' E. Une analyse multi-échelle des données potentielles (aéromagnétiques et gravimétriques) combinant la variation de l'angle d'inclinaison (tilt derivative), le gradient horizontal, la déconvolution d'Euler, le prolongement vers le haut, et la modélisation 2.75D est utilisée. Les conclusions suivantes en découlent. (1) Plusieurs grandes familles des failles ont été cartographiées. Leurs orientations sont ENE-WSW, E-W, NW-SE et N-S avec une prédominance de la famille NE-SW. Ces failles sont majoritairement subverticales avec des pendages NW et SW et semblent être prospectives pour de futures campagnes minières. (2) La preuve de l'axe de compression, de pliage et de cisaillement est conclue à partir de la superposition des contours nuls de l'angle d'inclinaison et de la déconvolution d'Euler. La mise en évidence de la tectonique locale due aux épisodes de déformation (D1, D2 et D4) associés aux événements NE-SW, E-W et NW-SE. (3) La plage des profondeurs des accidents de proche surface est évaluée entre 1000 m et 4800 m. (4) Plusieurs structures linéaires corrélées avec des veines mylonitiques connues sont identifiées. Celles-ci sont associées aux failles du Lom et représentent des contacts entre la série du Lom et les roches granito-gneissiques. Ce résultat permet de conclure sur l'existence d'un plissement intense des couches du sous-sol causé par des déplacements dextres et senestres NE-SW et NW-SE. (5) Un modèle structural du sommet de la croûte (schistes, gneiss, granites) qui délimite les principales intrusions (granite porphyrique, gneiss grenat, syénites, micaschistes, graphite, granites alcalins, gneiss embréchites) responsables des anomalies observées est proposé. (6) La modélisation 2.75D révèle de nombreuses failles d'une profondeur supérieure à 1200 m et confirme les

## ***Résumé***

---

---

observations des cartes résiduelles, de la variation de l'angle d'inclinaison, du gradient horizontal et de la déconvolution d'Euler. (7) Un profil lithologique du bassin de Bétaré-Oya.

**Mots clés** : Aéromagnétique, gravimétrique, direction structurale, variation de l'angle d'inclinaison, déconvolution d'Euler, faille, plissement.

**ABSTRACT**

This study was carried out in the Lom series in Cameroon, at the border with Central African Republic, located between the latitudes 5°30'–6° N and the longitudes 13°30'–14°45' E. A multi-scale analysis of potential data (aeromagnetic and gravimetric) combining tilt-derivative, horizontal gradient, Euler deconvolution, upward continuation, and 2.75D modelling was used. The following conclusions were drawn. (1) Several major families of faults were mapped. Their orientations are ENE–WSW, E–W, NW–SE, and N–S with a NE–SW prevalence. The latter are predominantly sub-vertical with NW and SW dips and appear to be prospective for future mining investigations. (2) The evidence of compression, folding, and shearing axis was concluded from superposition of null contours of the tilt derivative and Euler deconvolution. The principal evidence of the local tectonics was due to several deformation episodes (D1, D2, and D4) associated with NE–SW, E–W, and NW–SE events, respectively. (3) Depths of interpreted faults range from 1000 to 4800 m. (4) Several linear structures correlating with known mylonitic veins were identified. These are associated with the Lom faults and represent the contacts between the Lom series and the granito-gneissic rocks; we concluded the intense folding was caused by sinistral and dextral NE–SW and NW–SE stumps. (5) We propose a structural model of the top of the crust (schists, gneisses, granites) that delineates principal intrusions (porphyroid granite, garnet gneiss, syenites, micaschists, graphite, alkaline granite, embrechites gneiss) responsible for the observed anomalies. (6) The 2.75D modelling revealed many faults with a depth greater than 1200 m and confirmed the observations from residual map, tilt derivative, horizontal gradient and Euler deconvolution. (7) We developed a lithologic profile of the Bétaré-Oya basin.

**Key words:** Aeromagnetic, gravimetric, structural direction, tilt-derivative, Euler deconvolution, Fault, Folding.

**INTRODUCTION GENERALE**

La géophysique est la science qui étudie les phénomènes physiques dont la terre et l'univers en sont le siège. Elle est née de l'interaction entre ces phénomènes physiques et les paramètres pétro-physiques liés aux caractéristiques des roches.

Les principaux champs de forces physiques qui assurent cette interaction sont la pesanteur, la gravitation, l'électricité terrestre et atmosphérique, le champ magnétique (naturel de la terre et induit), le champ électromagnétique naturel ou artificiel, la vibration (ondes vibratoires), la radioactivité et les radiations (naturelle et artificielle), le champ thermique (énergie solaire, géothermie). Les propriétés physiques de la roche sont la densité, la résistivité électrique, la susceptibilité magnétique, la vitesse de propagation des ondes élastiques, la permittivité électrique ou diélectrique. Ainsi à chaque relation établie entre propriété physique de la roche et champ physique se construit une méthode géophysique, c'est notamment le cas de la méthode magnétique qui est construite à partir de la relation entre « la susceptibilité magnétique » et « le champ magnétique terrestre ». Cependant le choix d'une méthode géophysique dépend de l'objectif à atteindre (objectif très profond, profond, ou superficiel).

Les investigations géophysiques permettent de gagner en temps dans l'exploration des surfaces à grande échelle et d'avoir, grâce à ses multiples méthodes, des informations géologiques, minières et minérales dans les zones d'accès difficile et non accessibles pour la prospection géologique. La conception des systèmes d'acquisition et de traitement de données a fait d'elle une science appliquée dont l'importance scientifique et économique n'est plus à démontrer. La prospection géophysique est d'une importance capitale dans la recherche et la détermination des formations géologiques d'intérêt, des hydrocarbures, des substances minérales, des sources d'eau minérales ou géothermales.

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

## **1. Contexte et justification**

Le Cameroun a un fort potentiel géologique pour un certain nombre de minerais. Une meilleure gestion de ce potentiel pourrait contribuer à sa croissance économique. On identifie d'importants gisements de minerai de fer, de bauxite, de diamant, de calcaire, de rutile, de cobalt nickel et des indices d'or dont l'exploitation particulièrement artisanale est connue depuis les années d'indépendance. Cependant, en dépit de l'existence de ce fort potentiel, l'industrie minière ne joue pas encore un rôle majeur dans le développement du Cameroun, et le secteur minier reste en marge de l'économie. Le Cameroun est actuellement à un tournant important en ce qui concerne le développement du secteur minier. Une bonne maîtrise du cycle des opérations minières et des techniques d'exploration permettrait une connaissance plus poussée du potentiel minier à travers une meilleure compréhension de la métallogénie et des modèles de mise place de ces minéralisations qui sont une source de provision économique dont la gestion des bénéfices qui en découleraient contribuerait à accroître la participation de l'industrie minière au produit intérieur brut (PIB) qui se situe à l'heure actuel à 1%.

Un constat montre que les opérateurs du secteur minier camerounais bien que sollicitant les permis de recherche, optent plus pour les activités d'exploitation semi-mécanisée qui se limitent aux dépôts superficiels de type alluvionnaire et éluvionnaire, qui dans le contexte géologique reconnu aux pays de la zone intertropicale sont caractérisés par un fort couvert latéritique qui atteint parfois les 30 mètres de profondeurs, au détriment de la recherche des sources

primaires plus profondes qui présentent une valeur économique plus importante sur le long terme. Un certain nombre de faits pourrait justifier ce constat. Le manque d'expertise avérée, l'absence d'une méthodologie d'exploration reconnue dans les standards internationaux (JORC, CRIRSCO, etc.) qui consacrent les bonnes pratiques gouvernant le secteur des industries extractives, l'absence des équipements adéquats, l'absence d'infrastructures routières et énergétiques conséquentes.

Le Cameroun est reconnu comme ayant une géologie favorable minière » pour une mise en place d'une variété d'indices (Regnault, 1986). Le contexte géologique minier est caractérisé par des accidents tectoniques majeurs orientés E-W, NE-SW, ENE-WSW. Ces accidents tectoniques peuvent être des couloirs ou zones à forts indices de minéralisation en substances naturelles (or, fer, uranium, etc.), notamment dans la région de l'Est, connue comme le district aurifère du Cameroun.

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

## **2. Problématique**

La cartographie structurale est l'identification et la caractérisation de l'expression structurale en surface. Ces structures comprennent les plis, les failles, les filons regroupés sous le terme linéaments. La compréhension des structures est la clé de l'interprétation des mouvements de la croûte qui ont formé le terrain actuel. Les couches des structures géologiques indiquent les sites potentiels de réserves de métaux, de pétrole et de gaz, car elles caractérisent la géométrie des

unités de roches du substratum et le niveau de déformation et de stress survenu dans une région géologique bien donnée.

La série du Lom (vers 700 Ma), interprétée comme un substratum d'âge Archéen à Paléoproterozoïque démantelé pendant l'orogénèse panafricaine et intrudé de batholites panafricains (Penaye et al., 2004 ; Toteu et al., 2004 ; Ganwa et al., 2008b), est le lieu de notre étude et appartient au domaine central ou domaine de l'Adamaoua-Yadé (Tchakounté et al., 2007 ; Ganwa et al., 2008).

Le contexte ayant motivé le choix de cette étude est :

- Cette zone renfermerait l'un des plus grands potentiels miniers du Cameroun (Suh et al., 2006) ;
- L'exploitation de l'or dans cette zone demeurant artisanale cause non seulement des pertes en vie humaine dans les cours d'eau mais, également des pertes financières ;
- La politique d'émergence du Cameroun à l'horizon 2035 nécessite une exploitation optimale et rentable de tous les secteurs économiques.

Les études minières effectuées dans la série du Lom et ses environs révèlent la présence des minerais mésothermals (Orogéniques) composés essentiellement des sulfures, à savoir : pyrite, sphalérite, arsenopyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, galène et tetrahedrite (Asaah, 2010 ; Nih Fon et al., 2012). Étant donné la nature ferromagnétique de ces minerais, une investigation géophysique à partir des méthodes potentielles permettrait donc de situer les zones d'indices ou de gisements susceptibles d'être le lieu des minéralisations en or primaire. De plus, cette étude permettrait l'établissement des modèles géologiques du sous-sol terrestre tant au niveau local que régionale, et ce à partir de l'analyse des propriétés magnétiques et gravimétriques des roches constituant la croûte terrestre.

Le problème de cette étude est la mise sur pied d'un modèle géologique fiable en accord avec les études antérieures dans la zone de Bétaré-Oya (Est-Cameroun) à partir des signatures magnétiques et gravimétriques obtenues.

### **3. Hypothèses de recherche**

Les hypothèses principales qui accompagnent cette étude sont :

- Le contact entre la série du Lom et la série métamorphique aurait provoqué des failles ou zones de fractures NE-SW dans les couvertures (Coyne et Bellier, 2010 ; Gazel et Gérard, 1954) ;
- La zone d'étude serait une immense réserve d'or localisé dans les veines de Quartz de direction NE-SW le long des cisaillements.

### **4. Objectifs de l'étude**

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

#### **4.1. Objectif général**

L'objectif principal de ce travail est de combiner les méthodes gravimétriques et aéromagnétiques pour une évaluation des structures crustales de la série du Lom, afin de caractériser les couches du sous-sol suivant leur propriété physique (susceptibilité magnétique ; champ de pesanteur). Il en résulte ainsi, la mise en évidence si possible de son potentiel en ressources naturelles, mais également des zones à risques pour les travaux de génie civil.

#### **4.2. Objectifs spécifiques**

Il sera question :

- Un filtrage et modélisation des données potentielles ;
- Une mise en évidence des traits structuraux et de la détermination de la carte structurale ;

- Une mise en évidence des potentielles zones de minéralisation ;
- Une étude quantitative des données magnétiques et gravimétriques à travers la déconvolution d'Euler et la modélisation  $2^{3/4}$  D des profils magnétiques et gravimétriques ;
- Une corrélation des résultats obtenus avec les données géologiques, tectoniques et géophysiques ;
- Une proposition d'un modèle de structuration de la croûte terrestre dans la zone.

## **5. Résultats attendus**

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

## **6. Importance de l'étude**

Cette investigation géophysique présente une importance sur les plans économique, scientifique et de protection de l'environnement.

### **- Sur le plan économique**

Les structures indiquent les potentiels sites de réserve de métaux précieux (or, plomb, aluminium etc.), de pétrole et de gaz. Car, aucune exploitation minière sérieuse n'est entreprise sans au préalable une étude structurale qui permettra de caractériser et de quantifier ce gisement.

### **- Sur le plan scientifique**

Ces structures permettent de comprendre la géodynamique de mise en place et de formation des couches terrestres à partir de la détermination du degré de déformation et de stress subi par cette zone ainsi que les contraintes en jeu et leur origine.

## **- Sur le plan social**

Protection des personnes et des biens. Le présent travail est subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre porte sur la synthèse bibliographique en rappelant les principaux résultats des travaux géologiques et géophysiques antérieurs réalisés tant à l'échelle locale que régionale.

Le deuxième chapitre quant à lui présentera les fondements des méthodes géophysiques dites « potentielles », leurs avantages opérationnels et leurs inconvénients, leurs principes théoriques, les processus d'acquisition des dites données. Il donnera ensuite les bases sur les différents filtres mathématiques desquels découleront le traitement des données magnétiques et gravimétriques ; et présentera le lien qui existe entre les méthodes magnétiques et gravimétriques.

Le troisième chapitre présente les résultats issus de l'analyse qualitative et quantitative des données aéromagnétiques et gravimétriques d'une part et d'autre part une synthèse des résultats de ces différentes méthodes puis, une discussion en vue de corrélérer les résultats obtenus dans cette étude avec les travaux géologiques et géophysiques menés à l'échelle locale et régionale. Enfin une conclusion générale et perspective résumera l'essentiel des résultats obtenus dans ce travail.

REVUE DE LA LITTERATURE

## **CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE**

### **1. Introduction**

Ce chapitre met en relief l'ensemble des connaissances géologiques et tectoniques qui permettent de comprendre les mécanismes qui ont présidé à la mise en place des structures qui constituent l'architecture du sous-sol africain. Il restitue la zone étudiée dans son contexte à la fois géographique et géologico-tectonique.

### **2. Contexte géologique et tectonique**

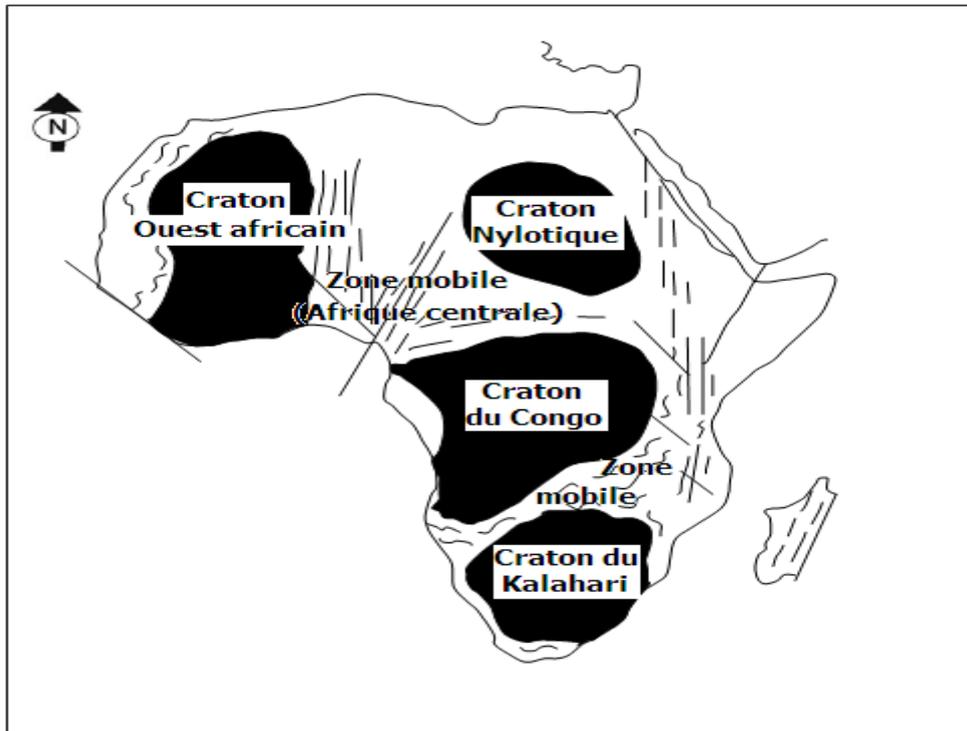
#### **2.1. Généralités sur la tectonique africaine**

La compréhension de la géodynamique actuelle de la plaque africaine est fondée sur un ensemble de travaux qui vont de l'observation de la similitude des tracés des limites continentales de part et d'autre de l'Atlantique à la théorie de la tectonique des plaques, en passant par la théorie de la dérive des Continents. La dérive des Continents émet l'idée de l'existence d'un supercontinent (la Pangée) entouré d'un océan unique (la Panthalassa), qui s'est disloqué en deux autres supercontinents (le Gondwana et la Laurasia) vers la fin du Paléozoïque. Le Gondwana s'est finalement fracturé en plusieurs morceaux (Amérique du Sud, Afrique, Madagascar, Inde, Australie, Antarctique, etc) depuis le début du Crétacé et la Laurasia a donné lieu plus tard à l'Amérique du Nord et l'Eurasie (Foucault et Raoult, 1988). La Théorie des plaques quant à elle, élaborée vers 1968, par l'Américain Jason Morgan, le Britannique Dan McKenzie et le Français Xavier Le Pichon permet de comprendre à suffisance la disposition de l'ensemble des plaques et permet d'établir une meilleure liaison entre la géologie et la géophysique, et de comprendre ainsi la grande variété des phénomènes de la Terre (Mbom-Abane, 1997). En effet elle stipule que, les continents se déplacent de concert avec les fonds océaniques, de telle sorte que l'ensemble flotte sur l'Asthénosphère. La plaque africaine provient donc de la dislocation d'un supercontinent (Gondwana) et se situe entre les plaques sud-américaine,

antarctique, des somalies, arabique et eurasiatique. Ces mouvements ont eu pour conséquences la naissance sur la partie continentale de la plaque africaine des zones relativement stables au cours des ères géologiques appelées Cratons et des zones instables qualifiées des zones mobiles qui séparent les Cratons appelées Panafricain (Regnault, 1986).

### **2.1.1. Les cratons africains**

Les cratons sont des zones stables (Fig.1) constituées de roches vieilles d'au moins 2500 Ma (Regnault, 1986). Ce sont des zones qui n'ont pas subi de déformations importantes au cours des ères géologiques. Elles forment des éléments anciens de la croûte qui ont survécu à la fusion et à la séparation des continents et supercontinents. En Afrique, on distingue : le craton ouest-africain, le craton du Kalahari, le craton nylotique et le craton du Congo. Les zones cratoniques sont formées par des roches d'âge ancien métamorphisées et migmatisées du continent, durant l'Archéen et le Protérozoïque récent, qui se sont assemblées plus tard au cours de plusieurs phases orogéniques avant 800 Ma (Cahen et al., 1984).



**Figure 1: Les cratons stables et les zones mobiles d’Afrique. D’après Faihead et Okereke (1988) modifiée.**

### 2.1.2. Les zones mobiles africaines

Les zones mobiles sont des chaînes plissées et rajeunies pendant l’orogénèse protérozoïque (Ndougsa Mbarga, 2004). Les zones mobiles constituent les foyers où se joue l’essentiel de l’histoire géologique africaine après le Protérozoïque. Elles ont connu des compressions tangentielles et des accidents longitudinaux plus ou moins verticaux (Eno Belinga, 1984). La tectonique dans les zones mobiles africaines comprend trois phases principales (Cornachia et Dars, 1983) :

- La première phase s’étend jusqu’au Crétacé inférieur (Aptien) de l’ère secondaire. Au cours de cette phase, la dorsale médio-océanique développe une composante horizontale de direction Est sur le compartiment septentrional du continent. Il en résulte une distorsion importante de la partie médiane du continent qui devient une zone de cisaillement ou de décrochement potentiel dextre. Cette

zone de cisaillement facilite notamment la réactivation au Cameroun et en République Centrafricaine ;

- La deuxième phase commence à l'Albien (Crétacé inférieur). Elle se caractérise par la réduction du champ de tensions sur l'Afrique Centrale, suite à l'ouverture de l'Atlantique sud. On note néanmoins que, la persistance des tensions génère une translation du continent africain vers le nord-est, sous l'effet discordant des deux pôles eulériens contrôlant l'ouverture de l'Atlantique. Après l'ébauche d'océanisation de l'Atlantique sud, au cours duquel se sont formés les bassins sédimentaires côtiers (côte ouest-africaine, golfe de Guinée) et continentaux (bassins sédimentaires du Nigéria, de Mamfé, du Nord-Cameroun, du Bénin et du Tchad), le relâchement des contraintes a entraîné l'affaissement du couloir instable du Nord-Cameroun et du Tchad méridional ;

- La troisième phase commence au Cénozoïque. Elle est celle des accidents Est-Ouest, affectant l'Afrique de l'Est avec une persistance des mouvements à décrochements dextres liés au rifting Est-africain, contrairement à ceux, ayant affecté l'Afrique Centrale, liés à l'ouverture de l'Atlantique.

## **2.2. Généralités sur la géologie et la tectonique du Cameroun**

D'après les travaux de Vicat (1998), on distingue au Cameroun plusieurs grands ensembles géotectoniques, résumés en deux principaux à savoir : le craton du Congo et la Chaîne panafricaine.

### **2.2.1. Le Craton du Congo**

Encore appelé groupe du Ntem, le craton est situé à l'extrême Sud du pays et représente la partie septentrionale du craton du Congo. Il est constitué de trois unités tectoniques qui sont :

- L'unité du Ntem comprend un complexe plutonique intrusif (môles ou noyaux grenus, charnohitiques, datés vers 2,90 Ga, et granitoïdes intrusifs potassiques,

datés vers 2,6 Ga) (Toteu et al., 1994 ; Tchameni, 1997), un ensemble gneissique catazonal ortho et paradérivé, composé essentiellement de gneiss charnokitiques, dont la déformation est attribuée à une phase ultime libérienne (2,6 Ga). Cette déformation est responsable de la mise en place des granites potassiques et des sillons ferrifères ou ceintures de roches vertes (Vicat, 1998).

- L'unité du Nyong qui est constituée des anciennes structures E-W libériennes (D1) et d'une phase de déformation (D2) attribuée à l'orogénèse éburnéenne, datée vers 2 Ga (Toteu et al., 1994), caractérisée par une foliation NE-SW associée à des cisaillements blastomylonitiques senestres subverticaux de direction N-S à N 40°E. Une tectonique tangentielle de vergence sud-est provoque le chevauchement de cette unité sur l'unité du Ntem.

- L'unité de l'Ayina montre également la reprise de la foliation libérienne N 130°E par des plis et de grands couloirs blastomylonitiques senestres N 40°E attribués à l'orogénèse éburnéenne (Maurizot et al., 1986). Elle est remarquable par sa ceinture de roches vertes de Mbalam, qui encaisse le gisement de fer d'itabirites du même nom et des indices aurifères actuellement orpaillés.

### **2.2.2. La Chaîne panafricaine**

La chaîne Panafricaine occupe environ les 2/3 des formations du socle du Cameroun. Cette chaîne est identifiée comme étant l'épicentre des événements tectonophysiques ayant affecté le Cameroun (Meying, 2009 ; Gouet, 2013), et le lieu idéal pour la concentration des substances minérales utiles (Gouet, 2013). Quatre modèles globaux d'évolution tectonique de la chaîne Panafricaine au Cameroun sont proposés (Ngako et al., 2003 ; Kankeu et Geiling, 2006, Kankeu, 2008). Il ressort de ces modèles que, l'orogénèse panafricaine au Cameroun a pour origine la convergence et collision entre le Craton du Congo d'âge Archéen au sud et une ou deux plaques d'âge Paléoproterozoïque incluant le Hoggar (Plaque du Sahara Central). La Chaîne Panafricaine au Cameroun est marquée par des

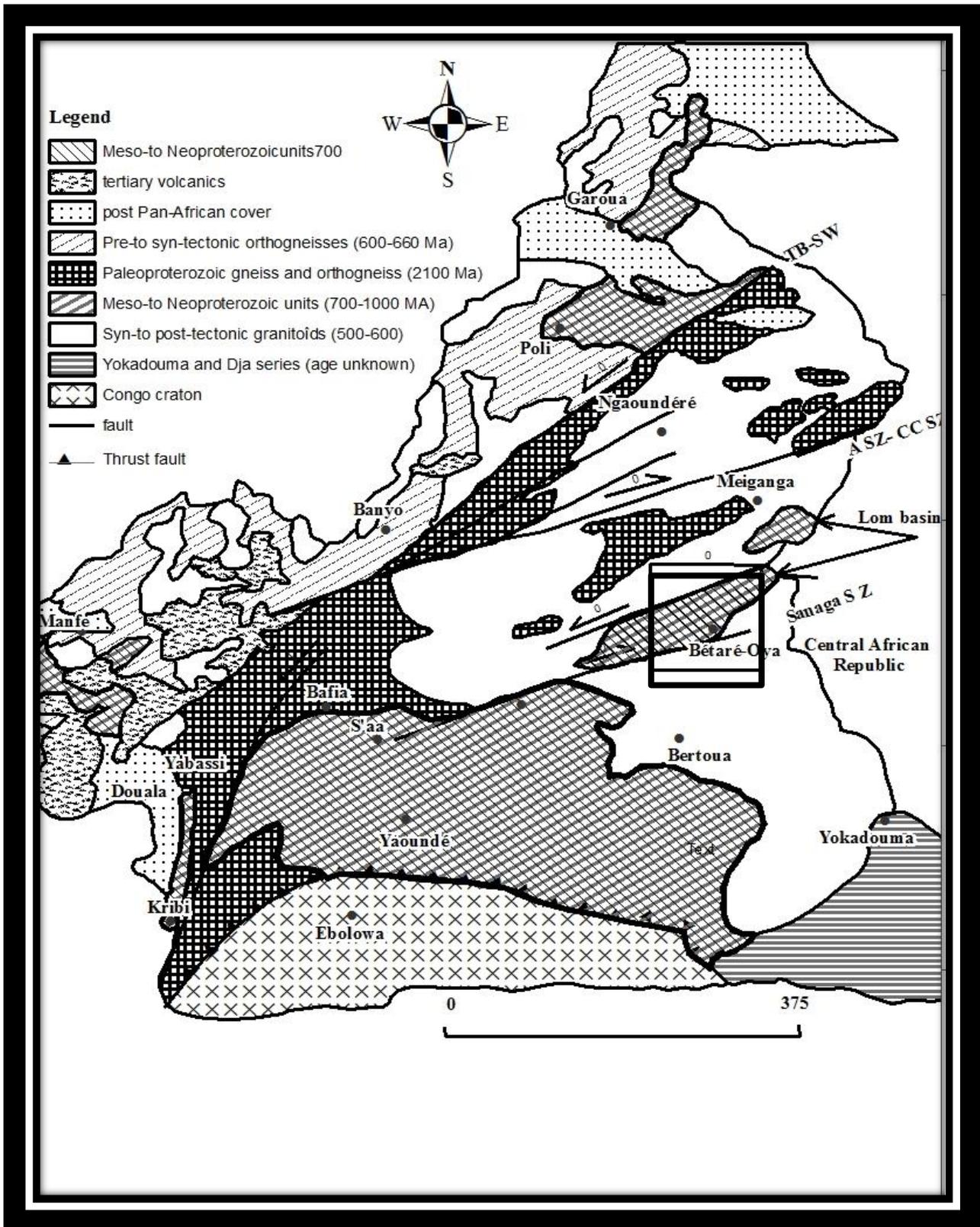
structures tectoniques majeures connues comme étant les grandes zones de cisaillements centre-camerounais d'orientation NE-SW (Fig.2). Ces structures marquent le changement de directions structurales entre les chaînes trans-sahariennes orientées N-S et la chaîne des Oubanguides orientée E-W. Trois grands ensembles ont été distingués dans la chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale au nord du craton du Congo (Toteu et al., 2004):

- Le domaine septentrional (Ouest et Nord Cameroun) ou domaine de magmatisme calcoalcalin mettant en évidence son origine très profonde. Il est situé à l'Ouest de la zone de cisaillement Tcholliré-Banyo et s'étend le long de la bordure Ouest du Cameroun. Il se poursuit dans les régions de Poli (Toteu et al., 2006) et du Mayo Kebbi au Sud-Ouest du Tchad. L'évolution tectono-métamorphique de ce domaine se caractérise par la succession de trois phases de déformation: La première phase D1, en grande partie oblitérée par les phases ultérieures, est soulignée par une foliation horizontale, des plis isoclinaux et une linéation d'étirement orientée N110°E-N140°E (Ferré et al., 1996). La seconde phase D2 se caractérise par des plis serrés associés à une foliation de plan axial verticale. Cette foliation porte une linéation minérale parallèle aux axes de plis, orientés NNE-SSW à NE-SW et plongeant de 0 à 50° vers le Sud ou le Nord (Toteu et al., 2004). Cette phase s'accompagne d'assemblages minéraux caractéristiques d'un métamorphisme allant du faciès schiste vert au faciès amphibolite (Toteu et al., 2004) avec la présence de migmatites (Ngako, 1986 ; Njel, 1988). Enfin, la dernière phase de déformation comprend des décrochements E-W contemporains de la mise en place de granitoïdes autour de 545 Ma (Toteu et al., 1987) ;

- Le domaine central ou domaine de l'Adamaoua - Yadé. Il s'étend au nord de la faille de la Sanaga (Dumont, 1986) jusqu'au cisaillement de Tcholliré-Banyo. Il est constitué : (i) de larges reliques d'orthoigneiss et de métasédiments d'âge paléoprotérozoïque ; (ii) de métasédiments et de roches volcanoclastiques acides

; (iii) de granitoïdes syn- à tardi-tectoniques panafricains (Soba et al., 1991 ; Toteu et al., 1994 ; Tchameni et al., 2006). Les zones de cisaillement de la phase D2 ici sont principalement représentées par le cisaillement de Tcholliré-Banyo, le cisaillement Sud-Ouest Camerounais, le cisaillement Centre-Camerounais et la faille de la Sanaga (Toteu et al., 2004). D'abondants granitoïdes (leucogranites, granites et syénites) syn-D2 sont observés dans ce domaine, où ils forment des plutons allongés parallèlement au Cisaillement Centre-Camerounais (NE-SW) ;

- Le domaine méridional. Il comprend le groupe de Yaoundé (Nédélec et al., 1986 ; Nzenti et al., 1988) qui est limité vers l'Ouest par la faille de Kribi-Campo, mais se poursuit vers l'Est en RCA dans les séries de Bolé et de Gbaya (Pin et al., 1987 ; Poidevin, 1991). Ce domaine est représenté par les séries métamorphiques du groupe de Yaoundé charriées vers le sud sur le craton du Congo. Les formations du groupe de Yaoundé sont constituées (Nzenti et al., 1984 ; Nédélec et al., 1986 ; Nzenti, 1987 ; Nzenti et al., 1988, Penaye et al., 1993) : (i) des roches métamorphiques de la série d'Ayos-Mbalmayo-Bengbis au Sud, (ii) la série de Yaoundé au Centre, (iii) la série de Yokaduma à l'Est, (iv) et la série de Bafia au Nord. Ces séries sont principalement constituées de roches paradérivées (métapélites et métagrauwackes) ainsi que des migmatites.



**Figure 2:** Carte géologique du Cameroun, modifiée d'après Kankeu et al. (2009), montrant les principales unités litho-tectoniques. ASZ, Adamaoua shear zone; CCSZ, Central Cameroon shear zone; TBSZ, Tcholliré- Banyo shear zone.

### **2.2.3. Contexte métallogénique de la chaîne panafricaine au Cameroun**

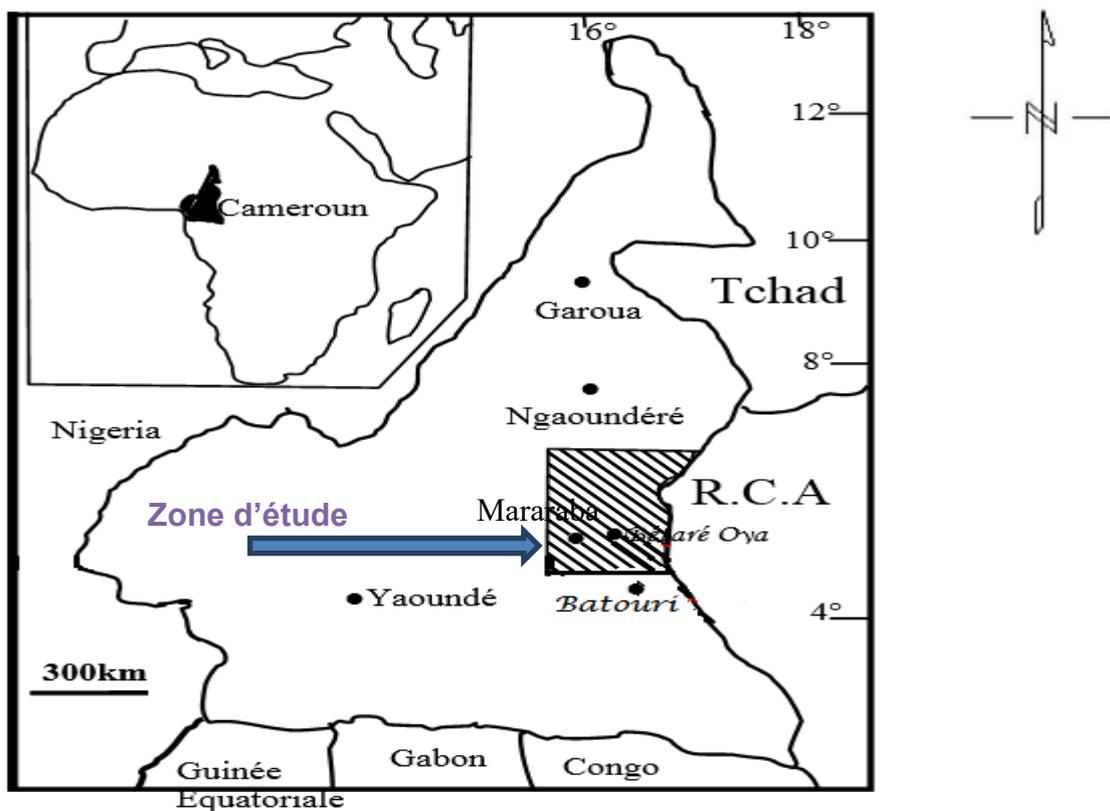
Les travaux de Regnault (1986) démontreront que les formations de la chaîne panafricaine contiennent des concentrations de substances utiles de forte valeur économique. À titre d'exemple, on peut citer du Sud au Nord, le fer (Mbalam, Djoum, Essong, Ntem, Sangmélina) ; le diamant (Mobilong, Yokadouma, etc.) ; l'or (Akom II, Sangmelima, Bétaré-Oya, Batouri, Colomines, Tcholliré, Rey Bouba, etc.) ; la bauxite (Minim Martap, Ngaoundal, Fongo Tongo) ; le Nickel/Cobalt (Lomié) ; le manganèse (Nkamouna) ; le titane (Mayo Darlé), le rutile (Akonolinga) ; le calcaire (Mintom) ; l'uranium (Poli, Lolodorf). Tous ces indices ont la particularité de se retrouver non loin et parfois au sein du réseau tectonique de la Chaîne Panafricaine au Cameroun. La connaissance de l'architecture ayant favorisée la mise en place des minéralisations aurifères dans la région de l'Est reste peu ou mal connue. Toutefois, il existe une très forte activité d'exploitation artisanale le long des cours d'eau, ce qui témoigne de la présence des indices. Les sites d'orpaillage répertoriés à Bétaré-Oya et ses environs sont rencontrés au niveau des cours d'eau en majorité et sur les flancs de collines où sont identifiés des veines de quartz minéralisées orientées NE-SW. Les gisements orogéniques (primaires) sont définis comme étant des gisements qui se trouvent généralement en bordure de grande faille, où l'or a été déplacé et précipité à partir de fluides produits au cours des déformations survenues à de grandes profondeurs dans la croûte terrestre. D'où la grande portée économique de cette étude qui consisterait à localiser et proposer les cibles potentiellement riches en minéraux aurifères dans la zone.

## **3. Présentation de la zone d'étude**

### **3.1. Localisation géographique**

Notre zone d'étude est située dans la région de l'Est Cameroun dont le chef lieu est Bertoua, au-delà de la partie septentrionale du craton du Congo et appartient à la chaîne panafricaine d'Afrique centrale (Fig.3). Elle est comprise

entre la latitude Nord  $5^{\circ}30'$  à  $6^{\circ}$  et la longitude Est  $13^{\circ}30'$  à  $14^{\circ}45'$ . Elle couvre plusieurs localités (Mararaba, Bétaré-Oya, Garoua Bouläi, Ndokayo, Kissi, Badzéré, Mborguéné, Kassa, Kongola, Dang Haouss etc.) et contient le bassin méta-sédimentaire du Lom. A partir de Yaoundé l'accès à la zone d'étude peut se faire par (Nih-Fon et al., 2012) : Yaoundé – Ayos – Bertoua – Gado – Badzéré – Mborguéné ou par chemin de fer de (Yaoundé – Bélabo) ensuite on emprunte un axe routier (Bélabo- Bertoua –Ndokayo- Bétaré – Oya). Il existe aussi un aéroport abandonné à Ndokayo.



**Figure 3 : Carte de localisation du secteur d'étude (Nih-Fon et al., 2012).**

### **3.2. Climat et végétation**

Les données climatiques de la zone d'étude sont celles de la station météorologique de Bétaré-Oya (804 mètres d'altitude, latitude  $05^{\circ}36'$  N, longitude  $14^{\circ}06'$  E). La station possède au moment de cette étude 38 années de mesures des précipitations et neuf (09) années d'enregistrements de la température. Le climat est de type équatorial guinéen forestier avec une tendance

soudanienne vers le Nord. Il est caractérisé par l'alternance de quatre (04) saisons (Pepogo, 2020) :

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

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

En ce qui concerne la végétation, le bassin du Lom est un sous-bassin du bassin de la Sanaga. Il est pour l'essentiel couvert par les savanes périforestières (Letouzey, 1986) et est composé de deux zones phytogéographiques. La végétation dans cette zone présente des alternances de savane herbeuse, de savane arbustive et arborées par endroit. De nombreuses forêts de galerie sont identifiées, surtout le long des cours d'eau et des marécages. Les espèces herbeuses dominantes sont *Pennisetumpurpleum*, *Hyparhényarufa*, *Chromolaenaodorata* (Bocassa), *Mimosa* sp et de nombreuses graminées. Les principales formations végétales rencontrées sont (Letouzey, 1986) :

- La plaine herbacée parsemée d'arbustes ;
- La forêt marécageuse (zones périodiquement inondées dans le voisinage des cours d'eau, les bas-fonds et les vallées) ;
- La raphide marécageuse (raphia) zones marécageuses ;
- Les jachères autour des maisons ;
- Les galeries forestières.

### **3.3. Orographie, hydrographie et sols**

Quelques traits morphologiques mettent en évidence l'uniformité régionale de la foliation dont la direction est NE-SW avec un pendage vers le Nord-Ouest (Soba, 1989 ; Coyne et Bellier, 2010 ; Gazel et Gérard, 1954). Les linéaments régionaux soulignent deux directions structurales majeures qui résultent de la phase tectonique de réajustement du socle, au Panafricain. Sur ces directions qui sont NW-SE (N 130° à N 170° E) et NE-SW, se sont alignés certains tronçons des cours d'eau principaux (Lom, Pangar) et de leurs principaux affluents. Dans certains secteurs, ces alignements structuraux anciens ont induit un réseau d'effondrements en panneaux. Ceux-ci sont identifiables à l'analyse photogéologique dans la série métamorphique en amont du Lom (Coyne et Bellier, 2010). D'après Soba (1989), les différentes entités lithologiques (quartzites et schistes) génèrent des structures en horsts et grabens dans la région du Lom. Les vallées sont à fond plat avec des versants plus ou moins abrupts. Ce sont des vallées en "U". Le chenal d'écoulement des eaux est unique et le lit est tantôt méandrique tantôt rectiligne.

Dans l'ensemble, l'orographie et le réseau hydrographique ont deux directions majeures, NE - SW et NW- SE. Il est dense et de type dendritique (Kouske, 2006), subdivisés en trois unités morphologiques majeures (Fig.4) :

- L'unité de haute altitude (800-1092 m) qui est une vaste pénéplaine émaillée par des interfluves à multiples sommets d'alignement orienté NW-SE ; N-S et NE-SW ;
- L'unité de basse altitude (652-760 m) qui est une grande dépression à fond plat, au centre de laquelle se trouve une vallée en forme de U, orientée NE-SW à l'intérieur de laquelle coule la rivière Lom ;
- L'unité intermédiaire (760-860 m) qui correspond à une longue falaise orientée NE-SW reliant l'unité de haute altitude à celle de basse altitude. Dans sa partie Nord, l'unité intermédiaire a une orientation E-W.

Dans la pénéplaine supérieure, on observe un relief assez caractéristique, lié aux formations schisteuses (petites collines plus ou moins arrondies) et celui des quartzites (plateaux aux pentes abruptes appelées "falaises"). L'une des principales falaises est celle du Mari, située au sud de la zone d'étude. Elle possède des chutes spectaculaires du Mari d'une dénivellation d'environ 80 m.

S'agissant des sols, de manière générale ils sont ferralitiques et occupent la quasi-totalité du bassin. Quelque soit l'altitude, la ferrallitisation est le processus dominant. En certains points, l'ensemble des caractéristiques propres à la ferrallitisation n'est pas réuni et l'on aura des sols faiblement ferralitiques. On distingue donc dans le bassin du Lom les types de sols suivants :

- Sols ferralitiques indurés sur roches diverses. Ils sont largement développés dans la partie septentrionale du bassin ;
- Sols ferralitiques typiques brun jaune sur roches diverses. Ils sont retrouvés dans divers secteurs du bassin ;
- Sols ferralitiques typiques rouges sur roches acides. On les rencontre surtout au sud et au sud-est du bassin. Ceux-ci se trouvent aussi bien en forêt qu'en savane ;
- Sols ferralitiques indurés sur roches acides. Ils sont particulièrement bien représentés dans la partie Est du bassin ;
- Sols à sesquioxydes faiblement ferralitiques sur roches schisteuses. Ils occupent une bande globalement orientée NE-SW.

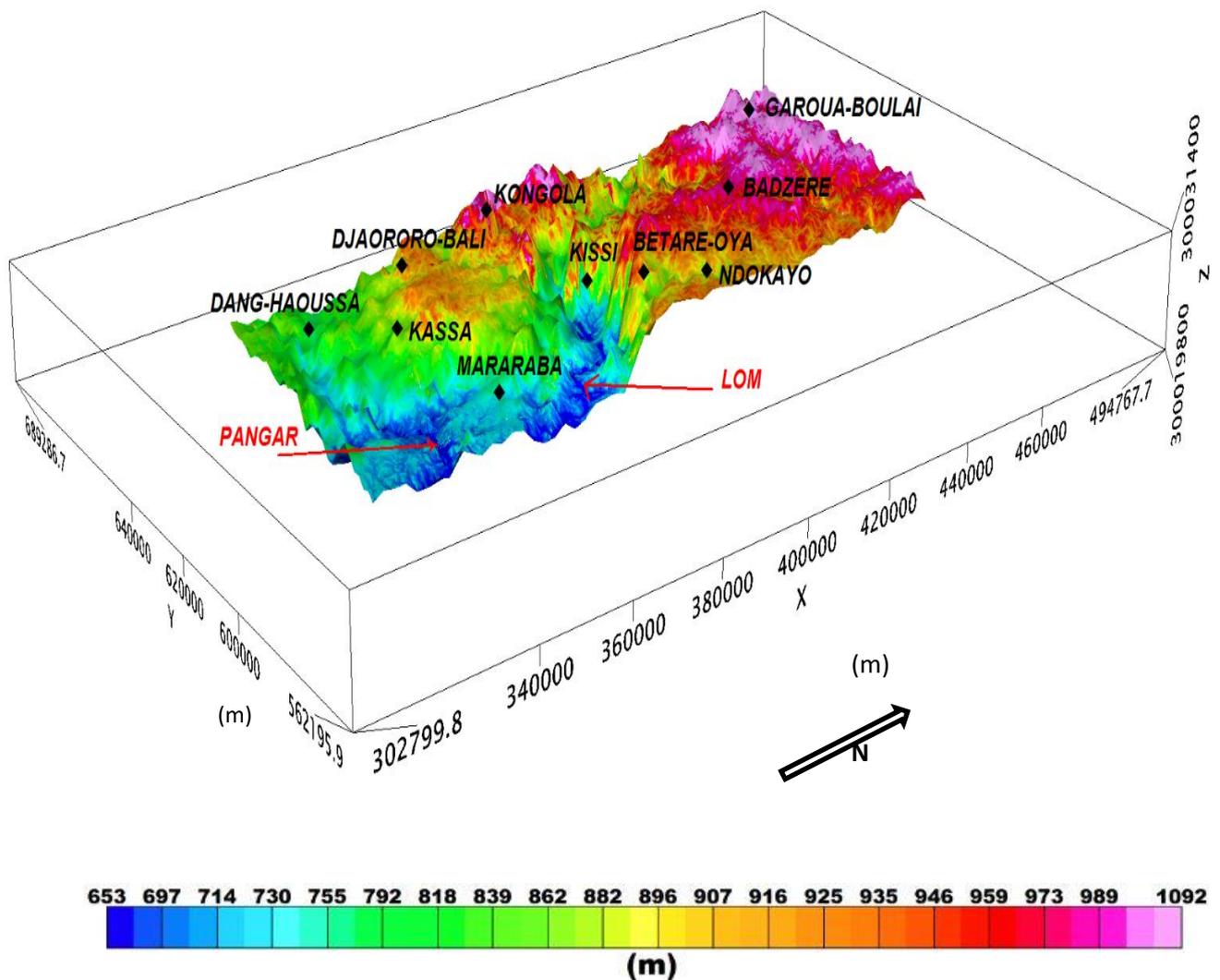


Figure 4 : Carte topographique 3D de la zone d'étude.

### 3.4. Cadre Géologique

Le secteur soumis à notre étude se trouve dans la série du Lom qui est une formation volcanosédimentaire d'une superficie d'environ 2500 km<sup>2</sup> (allant du centre Est du Cameroun jusqu'en Centrafrique), qui a pris le nom du fleuve qui la traverse. Cette dernière est en discordance structurale probable sur un socle granito-gneissique rajeuni au Panafricain, et présente trois grandes unités lithologiques (Vairon, 1986) : Le vieux socle, le complexe de bordure et la formation du Lom au sens large. Le secteur d'étude est constitué principalement

d'une série de roches néoprotérozoïques composées de métasédiments, de métavolcanites et des intrusions granitiques collectivement appelée série du Lom.

La formation du Bas Lom présente une structure monoclinale suivant une direction N50 avec des pendages de 40 à 90° généralement vers le Nord-Ouest sauf sur le bord du bassin du Lom où ils sont SE. Bien que les discontinuités des affleurements et les failles ne permettent pas d'établir une lithostratigraphie précise, on note cependant l'apparition d'une nette polarité dans le bassin : la rive droite a un caractère davantage volcanique que la rive gauche, à dominante franchement détritique. Le Lom coule alors sur des schistes variés au milieu de ces trois domaines (Regnault, 1986) :

### **Les métasédiments**

Sur le plan pétrographique, le secteur comprend des roches métamorphiques subdivisées en trois ensembles à savoir : les gneiss (les orthogneiss en majorité), des rocheuses quartzieuses (quartzites, métaconglomérats et des méga filons de quartz) et des roches schisteuses. Les métasédiments se répartissent en deux principaux faciès : phylliteux et siliceux, qui sont peu magnétiques et par conséquent offrent peu de contrastes sur les cartes aéromagnétiques (Paterson et Watson, 1976). Le faciès phylliteux est le plus dominant. Il regroupe des schistes, des séricitoschistes, et chloritoschistes gris, bleus, verdâtres prenant ainsi à l'altération une teinte rouge ou jaune et un aspect luisant et ductile. Il est composé de :

- Schistes quartzitiques (schistes gréseux, « grauwackes », « quartzophyllades », au centre du bassin. Leur paragenèse est à biotite, amphibole verte et de grenat (almandin) ;
- Rares schistes noirs, des schistes graphiteux, parfois très siliceux et des schistes à galets. Ces niveaux sont toujours en bordure du socle ou à proximité des quartzites dont ils peuvent constituer des équivalents latéraux ;

- Rares talcschistes. Sur les bords du bassin, dans le complexe de bordure, notamment à l'est de Bétaré-Oya, les schistes passent à des micaschistes à biotite dont le caractère très alumineux atteste de leur origine sédimentaire (Regnault, 1986).

Le faciès siliceux est essentiellement représenté par des quartzites interstratifiés dans la série schisteuse sous forme de lentilles de taille variable; par suite de la tectonique plicative importante, voire cassante, leur puissance et leur position stratigraphiques restent difficiles à évaluer. Cependant les légères polarités observées dans les quartzites (par exemple, stratifications entrecroisées) présentent toujours la base de la série vers le Nord-Ouest (Vairon, 1986). Les quartzites affleurent en bancs compacts, résistants à l'érosion, parfois larges de plusieurs dizaines de mètres, qui forment de petites crêtes de quelques dizaines de mètres de long, dominant les schistes environnants. On y distingue des quartzites de granulométrie variable allant des conglomérats (galets centimétriques quartzeux) à des roches finement grenues. La proportion de la matrice schisteuse est également variable et de nature semblable à celle des schistes précédemment décrits. Ceci est d'ailleurs justifié par l'existence des passages latéraux entre les différentes formations sédimentaires.

### **Les métavolcanites**

Elles affleurent surtout dans la partie NW du bassin du Lom. Ce sont, pour la plupart, des métalaves ayant une composition rhyodacitique à andésito-dacitique, parfois récurrentes au sein de la série schisteuse (Regnault, 1986).

### **Les intrusions granitiques**

Les massifs plutoniques intrusifs dans la formation du Lom sont essentiellement des granitoïdes circonscrits et généralement discordants, ayant créé un métamorphisme de contact à silicates d'alumine dans les schistes encaissants. Ils affleurent préférentiellement aux limites des formations Lom.

Leur caractère chimique est plus ou moins alcalin (fortes teneurs en Ba, Sr et K<sub>2</sub>O) et leur faciès est soit leucocrate, soit mésocrate (à biotite-amphibole). Les fluides hydrothermaux sont en général fréquents dans leur voisinage.

Lorsqu'on se déplace vers les bordures de la formation schisteuse du Lom, on constate que les granites deviennent de plus en plus hydrothermalisés et mylonitisés. Les travaux de Gazel et Gérard (1954), Lasserre (1962) distinguent trois types d'intrusions granitiques à savoir :

- Des granites syntectoniques anciens à structure et composition souvent hétérogènes, fréquemment orientés et dont les contours sont concordants avec les formations encaissantes ;
- Des granites syntectoniques tardifs plus homogènes et de compositions voisines aux précédentes ;
- Des granites post-tectoniques discordants, très homogènes et de composition plus alcaline.

En outre, les travaux de Gazel et Gérard (1954), révèlent que la zone d'étude est constituée de roches métamorphiques regroupées en un complexe de base, où elles affleurent dans le sud de la zone, dans la périphérie de la vallée du Lom et proviendraient des dépôts sédimentaires d'origine marine (Fig. 5). Ceci est d'un métamorphisme avec plissements intenses accompagnés de certaines intrusions acides transformées en orthogneiss ; et en une série épimétamorphique qui affleure dans la direction NE-SW sur environ 200 km de long et 20 km de large s'étalant de Deng-Deng jusqu'à Garoua-Boulai et essentiellement localisée dans la vallée du Lom.

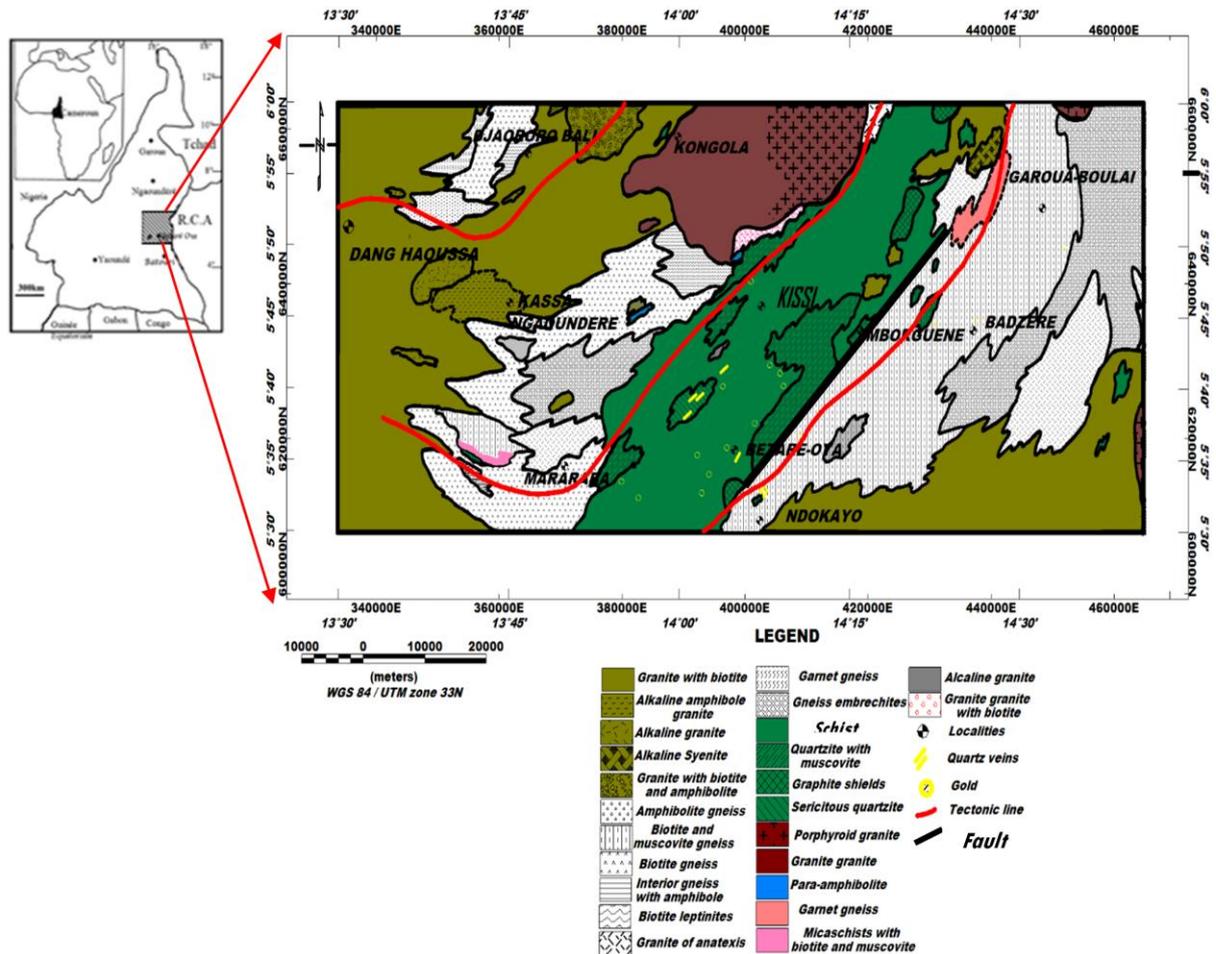
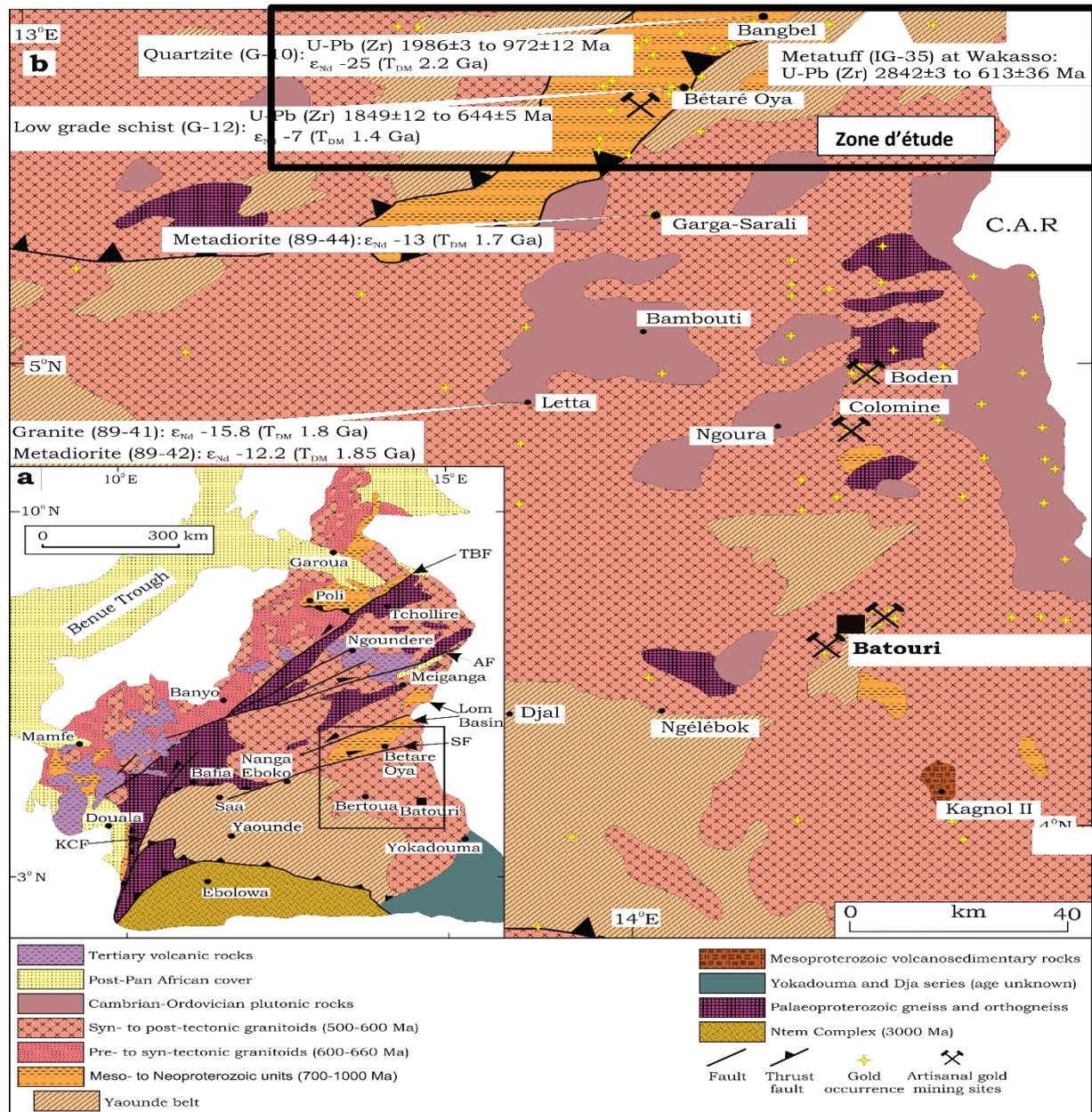


Figure 5 : Carte géologique de la zone d'étude (Gazel et Gérard, 1954) modifiée.

### 3.5. Ressources minières

Les gisements alluvionnaires d'or au Cameroun sont présents dans les parties nordiques, méridionales et orientales du pays (Fig. 6). Bétaré-Oya, Boden-Colomine et Batouri sont les sites miniers importants d'or d'artisanal dans l'Est. A Bétaré-Oya, la minéralisation d'or se retrouverait principalement le long des zones principales de cisaillements orientés NE-SW dus au contact entre les roches métavolcaniques et métasédimentaires Néoprotérozoïques. Dans la localité de Boden-Colomine ces cisaillements sont dus aux contacts entre ces roches

Néoprotérozoïques et les massifs granitoïdes Panafricains de taille variable (Suh et al., 2006). A Batouri, ils sont plutôt dûs aux contacts avec des corps granitoïdes.



**Figure 6: Geology of south-eastern Cameroon. (a) Geological map of Cameroon (modified after Toteu et al., 2001). The Central African Shear Zone is defined by a system of NE-trending faults comprising Tchollire-Banyo Fault (TBF), Adamawa Fault (AF), Sanaga Fault (SF) and Kribi-Campo Fault (KCF). (b) Regional geological map of southeastern Cameroon, showing geochronological and model ages, artisanal gold mining sites and other reported gold indications.**

### **3.6. Cadre tectonique**

Les données lithostratigraphiques de la zone mettent en évidence plusieurs phases de déformations marquées chacune par la mise en place d'une structure de la zone d'étude qui sont :

- Les structures aplaties  $D_1$  résultant de la collision entre le craton archéen stable au sud et l'un des deux blocs paléoprotérozoïques au Nord, suivie du plutonisme calcoalcalin entre 620-630 Ma (Toteu et al., 2001, 2006) ;
- la déformation  $D_2$  qui voit la mise en place de la schistosité régionale de direction NE-SW ( $N35^\circ-40^\circ E$ ) à fort pendage ( $50-90^\circ$ ), puis également la foliation magmatique fine des biotites d'orientation E-W (Kankeu et al., 2009) ;
- La phase  $D_3$  qui est marquée par la mise en place de la foliation mylonitique orientée ENE-WSW ( $N60-70^\circ$ ) de fort pendage ( $>50^\circ$ ). Elle est reliée à la zone de cisaillement de Bétaré-Oya (Kankeu et al., 2009) ;
- La phase  $D_4$  marquée par une déformation fragile qui se manifeste par des décrochements sénestres et dextres. Elle est caractérisée par plusieurs familles de fractures à remplissage filonien ou non, sans déplacement apparent de leurs contacts. Il s'agit des familles NE-SW ( $N141E$   $74^\circ NE$  et  $N151E$   $80^\circ NW$ ) et NW-SE à sens de pendage opposé.

## **4. Travaux régionaux antérieurs**

La science évoluant de manière progressive, il convient de donner un bref aperçu général de ce qui a déjà été fait dans la zone et ses environs.

### **4.1. Etudes géologiques**

Plusieurs études géologiques ont été faites à l'Est-Cameroun concernant la chaîne panafricaine d'Afrique centrale parmi lesquelles : Cornachia et Dars., 1983 ; Ngako et al., 1991 ; Penaye et al., 1993 ; Mvondo et al., 2007a et 2007b ; Olinga et al., 2010. Plus récemment, les travaux du B.R.G.M (Vairon, 1986 ; Koch et al., 1988), dans le cadre du protocole d'accord "pour la recherche des minéralisations

aurifères dans la province de l'Est", ceux de Regnault (1986), ceux de Soba (1989) et ceux de Ngako (1999) ont permis de mieux préciser la lithologie de la série du Lom et le cadre géodynamique du secteur. Il ressort de ces différents travaux que, la série de Lom correspond à une ceinture étroite et discontinue, orientée NE-SW et constituée d'une unité inférieure et d'une unité supérieure (Soba, 1989). Cette série a subi d'après Regnault (1986), un métamorphisme régional épi à fini-mésozonal, et un métamorphisme thermique lié aux intrusions qui correspondent à deux phases majeures de structuration à savoir : la phase N40- 60 conforme à la foliation des schistes et des accidents mylonitisés et la phase N110-140, matérialisée par des effondrements visibles en photogéologie. Aussi, les formations de cette série seraient discordantes sur les formations antérieures du Complexe de base, qui seraient affectées par un léger métamorphisme et rajeunies au Panafricain.

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

Kankeu et al., (2006 ; 2009) suggèrent que les zones de cisaillement (NE-SW) et les méga plis sont contemporains et qu'elles s'intègrent dans un régime régional de transpression dans la zone panafricaine d'Afrique Centrale,

impliquant un cisaillement dextre le long des couloirs mylonitiques de direction NE-SW, synchrone d'un serrage de direction perpendiculaire orienté NW-SE.

Ces études demeurant superficielles, nécessitent des travaux géophysiques plus approfondis.

## **4.2. Etudes géophysiques**

Très peu d'études géophysiques ont été réalisées dans la zone d'étude mais, à l'échelle régionale on note de nombreux travaux. Ces travaux apportent des éléments nouveaux pour la connaissance des structures superficielles et profondes du sous-sol camerounais.

### **4.2.1. Travaux aéromagnétiques**

La carte d'anomalies aéromagnétiques de la zone d'étude a été établie à partir des levées aéromagnétiques de Paterson et Watson. (1976). L'analyse de cette carte montre la présence des granites à pyroxène plus actifs magnétiquement, ainsi que des granites calco-alcalins très peu magnétiques. La transition granite-schistes est notamment marquée par une diminution de l'activité magnétique. En général, les anomalies magnétiques sont peu marquées dans les formations métamorphiques, contrairement au socle plus ancien du complexe calco-magnésien. Ce fait a été attribué à la prédominance des effets structuraux sur les variations des composantes du champ magnétique (Corpel et Debeglia, 1978). Ces derniers auteurs estiment que la présence dominante de formations peu magnétiques pourrait traduire l'insuffisance de l'interprétation magnétique.

Feumoé et al. (2012), dans la partie Sud-Est du Cameroun relèvent des différences d'apparence morphologique et la subdivision du territoire en deux secteurs tectoniques correspondant sur le terrain aux domaines Panafricain au Nord et au Craton du Congo au Sud et localisent par la même occasion la limite tectonique les séparant en profondeur.

Ndougsa-Mbarga et al. (2013) au sud de la zone d'étude révèlent l'existence d'un vaste système de failles de directions majeures E-W et NEE-SWW, différentes zones d'intrusions granitiques sont également identifiées. Les résultats de ces travaux situent la limite géophysique du Craton du Congo autour du parallèle 4° N.

Yandjimain et al. (2017) mettent en évidence un réseau de failles de direction prédominante SW-NE et déterminent la limite du craton du Congo. D'après ces travaux, la limite entre le Craton du Congo et la zone panafricaine se situerait entre les parallèles 3°47'N et 3°75'N. Sa profondeur varie entre 2,6 km pour la partie la plus profonde et 0,1 km pour la moins profonde, sa direction est WSW-ENE, tandis que le pendage (NW) varie de 30° à 60°.

Basseka et al. (2017) révèlent l'existence d'un corps ayant une haute susceptibilité à la limite du Craton du Congo et de la Chaîne Panafricaine. Le toit de ce corps est situé à une profondeur moyenne de 4148 m avec une extension latérale d'environ 10 km. Les résultats de ces travaux soutiennent l'existence d'une collision continent-continent impliquant le Craton du Congo et la ceinture panafricaine en Afrique Centrale.

Mono et al. (2018) font ressortir plusieurs contacts de directions NE-SW, ENE-WSW, mettant en évidence la subduction entre le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale.

Owono Amougou et al., (2019) ont permis de mettre en évidence plusieurs accidents tectoniques caractérisés par des structures linéaires dont les directions principales sont ESE-WNW, ENE-WSW, NE-SW, NW-SE et des directions secondaires E-W et N-S. Ces directions sont liées à celles des failles, fractures, dykes, plissements alors que les anomalies circulaires sont assimilées aux intrusions de matériaux fortement magnétiques ou aux dômes granitiques.

#### **4.2.2. Travaux gravimétriques**

La première campagne gravimétrique a été menée sur l'ensemble du territoire du Cameroun entre 1962 et 1967 par l'ORSTOM et conduit à l'établissement des cartes d'anomalies gravimétriques du Cameroun. Ces cartes présentent dans l'ensemble, de grandes variations régionales et des irrégularités bien localisées marquées par des gradients élevés, suggérant ainsi l'existence d'accidents tectoniques majeurs.

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

Collignon (1968) distingue au sud du parallèle 4° N, une anomalie légère, d'orientation W-E, s'étendant sur 150 km de large et plus de 500 km de long, qu'il interprète comme la partie affaissée des formations précambriennes du Sud-Cameroun. Cette anomalie semble liée à l'existence d'un massif ancien comparable à l'Adamaoua, dont les limites auraient été déplacées par la tectonique. Il distingue au seuil d'Abong Mbang une zone lourde, caractérisée par des anomalies gravimétriques positives, et qui séparerait la zone légère de l'Adamaoua au Nord, de la zone légère du massif Sud-Cameroun au Sud. Le seuil d'Abong Mbang traduirait un mouvement vertical à grande profondeur survenu au milieu d'un vaste synforme précambrien.

Dumont (1986) compare l'alignement E-W d'Edéa à Yaoundé à la limite géophysique du Craton du Congo. Une limite qui se poursuit suivant la même direction le long du parallèle 4°N dans tout le Sud Cameroun.

Boukéké (1994) a permis de préciser le contexte géodynamique de la Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale, qui selon cet auteur serait une chaîne de collision entre le Craton du Congo au sud et la Chaîne Panafricaine au Nord. La limite entre les deux unités géologiques est encore mal connue. D'après cet auteur, le craton se prolongerait en profondeur sur plus d'une centaine de kilomètres.

Mbom-Abane (1997) révèlent l'existence d'un accident tectonique majeur de direction E-W le long du parallèle 4°N, non identifié par la géologie en raison probablement de sa profondeur d'enfouissement.

Tadjou et al. (2009) mettent en évidence les zones où les gradients gravimétriques sont élevés et qui séparent différentes anomalies. Ces anomalies sont situées sur la bordure septentrionale du Craton du Congo.

Zanga Amougou et al. (2013) réalisent des travaux à cheval entre l'Est du Cameroun et l'Ouest du Tchad qui montrent une limite importante entre le Craton du Congo et la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale. Cette limite est caractérisée par une tectonique complexe marquée elle-même par un déversement Sud des formations panafricaines sur le Craton du Congo et un amincissement crustal dans cette région.

Goussi Ngalamo et al. (2017) révèlent que : les anomalies gravimétriques sont de faible intensité dans le Craton du Congo, le domaine de Yaoundé, la partie sud-est du domaine Ouest Cameroun et la partie nord du domaine Adamawa-Yade. Ces anomalies gravimétriques de grande intensité ont une tendance E-W dans la partie sud du domaine Adamawa-Yade et la Croûte est plus épaisse sous le craton du Congo, le domaine de Yaoundé et la partie méridionale du domaine

Adamawa-Yade ; les matériaux de la croûte inférieure sont plus denses sous la partie sud du domaine Adamawa-Yade.

#### **4.2.3. Travaux géoélectriques**

Gouet et al. (2013) dans la zone de Batouri mettent en évidence deux zones majeures de faiblesse ou de discontinuités conductrices (fractures, failles ou zones de cisaillement) intra granitiques de directions principales E-W et SW-NE, les zones majeures de minéralisation potentiellement aurifères d'axes polarisables N-S, E-W et SW-NE qui longent ou entrecoupent les accidents majeurs.

Nih-Fon et al., (2012) identifient à partir des données de (polarisation provoquée (pp) de chargeabilité et de résistivité combinée, des zones anormales irrégulières d'orientation NE-SW. Cette tendance est conforme à la plupart des veines aurifères de quartz, parallèles au système et aux foliations régionaux de la zone de cisaillement de Bétaré-Oya. Les anomalies élevées de résistivité correspondent aux veines de quartz tandis que les anomalies relativement élevées de polarisation provoquée correspondent à de basses concentrations en or ayant plus ou moins de sulfure dans les veines de quartz.

#### **4.2.4. Travaux sismiques**

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

#### **4.2.5. Travaux magnétotelluriques**

Manguelle-Dicoum (1988) dans la région de Mbalmayo au Cameroun a permis d'établir que la ligne de failles d'Eséka au Dja inférieur, qui est assimilée au contact entre les schistes et les granites est située dans le socle granitique (Complexe du Ntem) et reste distinct du contact métamorphique.

En magnétotellurique Meying, (2011) révèle un réseau de failles de direction E -W qui s'étend d'Akonolinga jusqu'à Abong-Mbang. Il serait la zone de transition entre le Craton du Congo et le Panafricain, qui, selon les travaux antérieurs passe par Edea à l'intersection de l'accident NE-SW de la Sanaga et de la faille NNE-SSE de Kribi.

Les travaux de Pepogo et al., (2018) compris entre  $13^{\circ}53'56''$  et  $14^{\circ}23'24''$  de longitude Est, puis  $5^{\circ}13'13''$  et  $5^{\circ}42'42''$  de latitude Nord ont permis d'identifier quatre (04) prospects des zones prédictives marquées par des teneurs aurifères assez considérables. Ces zones qui correspondent aux intersections de fractures métallogènes représentées par les cours d'eau Lom, Guingé, Sara sont les signatures de fractures profondes et métallotectes qui sont des structures pièges à métaux. Ils suggèrent que dans le corridor Garga-Sarali – Bétaré Oya, les minéralisations aurifères observées et faisant l'objet de l'intense activité d'exploitation artisanale sont contrôlées par des structures géologiques qui sont les marqueurs d'une déformation intense reconnue aux évènements panafricains, ayant affecté les formations du domaine de l'Adamaoua – Yadé (ADY).

#### **5. Conclusion**

Globalement, notre zone d'étude est marquée par le vieux socle Précambrien datant de l'Archéen. Ce socle a été modifié et rajeuni par les évènements thermotectoniques panafricains survenus pendant le Protérozoïque. La majeure partie des formations rencontrées ici sont : les granites syntectoniques,

le gneiss, les quartzites, les schistes et les micaschistes (Fig. 5). La zone est également le siège d'un accident majeur au niveau du Lom de direction NE-SW, qui serait en fait le prolongement de la faille de la Sanaga et une zone des minéralisations d'or. Ces connaissances demeurent toujours très insuffisantes, notamment au niveau de la profondeur des structures ; de plus, elles subissent des améliorations au fil des travaux menés dans la zone, d'où la nécessité de l'investigation combinée des méthodes potentielles menées dans le cadre du présent travail et dont nous donnerons les détails au chapitre 2.

METHODOLOGIE D'INTERPRETATION ET ORIGINE DES DONNEES

## **CHAPITRE II : METHODOLOGIE D'INTERPRETATION ET ORIGINE DES DONNEES**

### **1. Introduction**

Les méthodes potentielles (magnétique et gravimétrique) sont sans doute les premières des méthodes géophysiques. Les plus anciennes observations d'aimantations mises en évidence remontent au philosophe grecque Thalès, six siècles avant Jésus Christ (Nabighian et al., 2005). Le mot « magnétisme » vient du grec « magnes », qui a son origine en Thessalie dans l'ancienne cité grecque de « Magnésie », où l'on extrayait un minerai aux propriétés naturellement magnétiques, appelé pierre d'aimant. C'est cette pierre citée par Lucrèce qui aujourd'hui est connue sur le nom d'oxyde de fer ( $Fe_3O_4$ ), appelée « magnétite ». Jusqu'au début du XIX<sup>e</sup> siècle, la seule source pratique de magnétisme était cette pierre noire de magnétite. Jusqu'à ce qu'en 1820, Oersted découvre par hasard que des charges électriques en mouvement produisent aussi des champs magnétiques : c'est la naissance de l'électromagnétisme. Dans ce chapitre, nous allons présenter de façon succincte et brève les éléments de base des méthodes magnétiques et gravimétriques. Ensuite, nous parlerons de quelques opérateurs de transformation du champ potentiel notamment les opérateurs de réduction à l'équateur, de prolongement et de dérivées etc. Puis nous donnerons leurs avantages et inconvénients et enfin les relations qui existent entre ces deux méthodes géophysiques.

### **2. Méthodes géophysiques**

#### **2.1 Généralités sur les méthodes de prospection géophysique**

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

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

## **2.2. Objet de la prospection géophysique**

Plusieurs auteurs utilisant les méthodes de prospection géophysique (Parasnis, 1997 ; Ndougsa-Mbarga et al., 2011 ; Meying et al., 2009 ; Pepogo et al., 2018) s'accordent sur le fait que la prospection géophysique consiste en :

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

### **3. Cas des méthodes investiguées : Aéromagnétique et gravimétrique**

#### **3.1. Méthode aéromagnétique**

##### **3.1.1. Le champ géomagnétique**

Le champ magnétique terrestre ou champ géomagnétique est un phénomène variable dans l'espace et le temps, caractérisé par sa direction et son intensité en chaque point de la surface du globe terrestre (Feumoe, 2014). Il a fait et continue de faire l'objet de nombreuses études parmi lesquelles les travaux de Lowrie (2007) ; Telford (1990), etc. Il est la résultante de toutes les sources magnétiques environnantes : noyau, croûte, objets géologiques ou anthropiques, ionosphère, magnétosphère, etc. Ces sources se distinguent par un magnétisme de type rémanent ou de type induit, c'est-à-dire engendré par un flux de courant, respectivement, interne ou externe à la source magnétique (Simon, 2012). Ainsi on distingue :

Le champ interne dont les sources sont intérieures à la terre et qui est la somme de deux champs :

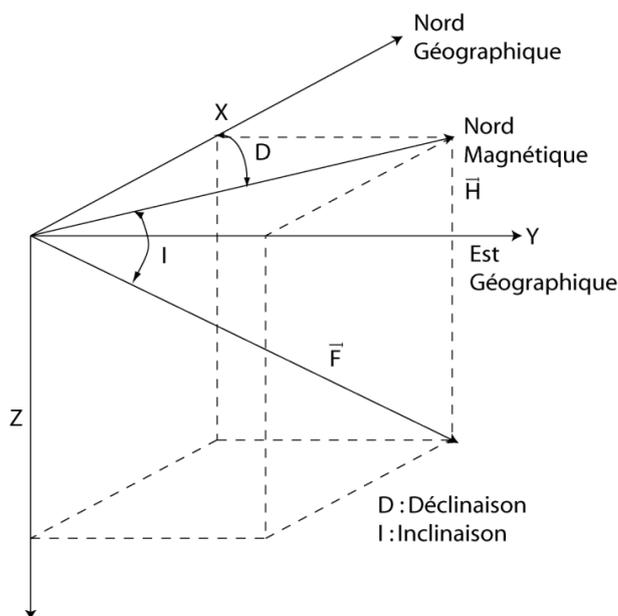
- Un champ magnétique créé par le noyau encore appelé champ principal qui représente à lui seul plus de 80 % du champ magnétique total mesuré à la surface de la Terre (Campbell, 1997 ; Roy, 2008). Son origine a fait l'objet de nombreuses théories dont la plus plausible actuellement est celle de la Dynamo qui stipule que ce champ est créé et entretenu par un processus d'induction. Des courants électriques intenses circuleraient dans le noyau extérieur situé entre 2800 et 5000 km de profondeur qui possèdent une forte conductivité électrique due à la présence en son sein d'une combinaison de fer (Fe) et de nickel (Ni) qui sont de bons conducteurs électriques.
- Un champ crustal d'anomalies locales, engendré par les roches aimantées situées au-dessus de la surface isotherme dite surface de Curie. La contribution crustale au champ magnétique total, mesuré en surface, est estimée à 19 % (Roy, 2008),

dépassant rarement une intensité de 5000 nT. Au-delà, les propriétés magnétiques intrinsèques des matériaux disparaissent en raison de l'augmentation de température.

Le champ externe quant à lui, trouve ses sources en haute atmosphère et au-delà. Des mesures magnétiques satellitaires ont montré ces dernières années que le champ magnétique d'origine externe contribue à hauteur du pourcent au champ total mesuré à la surface de la Terre (Sabaka et al., 2002). Il est caractérisé par:

- Des fluctuations périodiques résultant des distorsions du champ magnétique terrestre par les vents solaires ;
- Des pulsations aléatoires rapides et faibles causées par des oscillations dans l'ionosphère et la magnétosphère ;
- Des orages magnétiques dûs à l'arrivée d'une bouffée de plasma émise par le soleil et qui provoque des aurores polaires.

Les trois principaux éléments du champ géomagnétique sont l'inclinaison, la déclinaison et son intensité.



**Figure 7 : caractéristiques du champ magnétique principal (Telford et al., 1990).**

(X, Y, Z) est un repère orthonormé, avec Z la composante verticale positive vers le bas. X et Y sont les composantes horizontales respectivement positives vers le Nord et vers l'Est géographique (Fig. 7). Les deux angles donnant la direction de B sont I et D :

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

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

La projection horizontale du champ est notée H. F est l'intensité du champ magnétique total. Les relations entre les composantes et les angles sont :

$$X = F \cos D \cos I \quad (1)$$

$$Y = F \sin D \cos I \quad (2)$$

$$Z = F \sin I \quad (3)$$

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

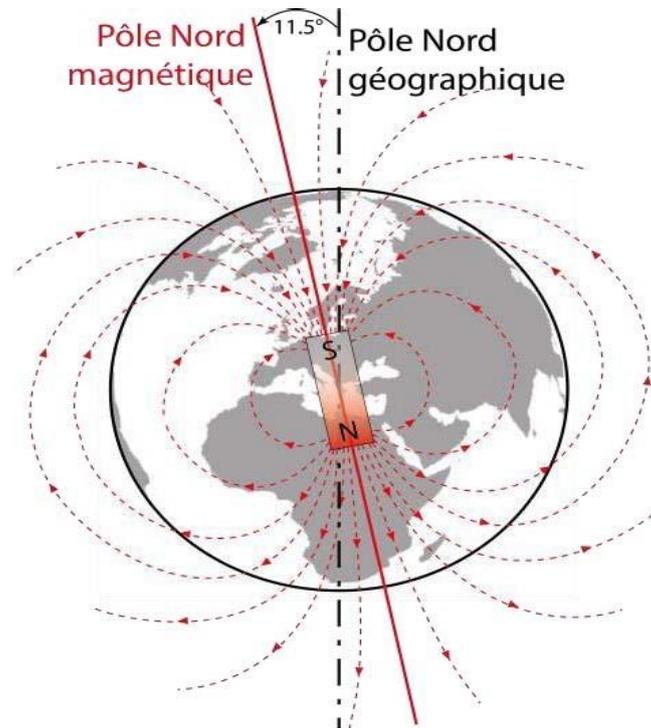
$$\tan D = \frac{Y}{X} \quad (5)$$

$$X^2 + Y^2 = H^2 \quad (6)$$

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = H^2 + Z^2 = F^2 \quad (7)$$

Le champ magnétique terrestre a une géométrie principalement dipolaire semblable à celle d'un barreau aimanté (dipôle) situé au centre de la terre et

légèrement incliné par rapport à l'axe de rotation. Le pôle nord du dipôle pointe vers le Sud (Fig. 8).



**Figure 8 : Le champ magnétique terrestre représenté par des lignes de champ issues d'une source située au centre de la Terre (Owono Amougou, 2020).**

### **3.1.2. Le champ magnétique de référence (IGRF)**

Le champ magnétique de référence (International Geomagnetic Reference Field (IGRF)), est un modèle mathématique dont les paramètres sont issus d'une analyse par harmoniques sphériques des mesures magnétiques. Celles-ci sont menées depuis des satellites ou bien en certains points de la surface du globe, par exemple, dans le réseau international d'observatoires magnétiques (Langel, 1992). Ces modèles, dits aussi « globaux », fournissent à une date donnée des valeurs vectorielles de la contribution interne du champ appelé « champ de référence », partout hors de la Terre et jusqu'à la base de l'ionosphère. Il est mis à jour tous les cinq ans par l'Association Internationale de Géomagnétisme et d'Aéronomie (Finlay et al., 2010).

### **3.1.3. Propriétés magnétiques des matériaux de la croûte terrestre**

#### **3.1.3.1. La susceptibilité magnétique**

Notée  $\chi$ , la susceptibilité magnétique (Fig. 9) qui est définie comme étant la faculté d'un échantillon à s'aimanter sous l'application d'un champ magnétique (Tremolet, 1999 ; Kaufman et al., 2009), représente la constante de proportionnalité dans l'expression de la loi d'aimantation donnée par :

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad (8)$$

où J est l'aimantation et H l'intensité du champ.

Notons que les roches ignées basiques possèdent les susceptibilités les plus élevées alors que les roches sédimentaires les plus faibles.

#### **3.1.3.2. L'aimantation**

Les aimantations à l'origine des anomalies magnétiques que nous mesurons sont des vecteurs. Selon la nature de la roche, du sédiment ou du sol, deux grandes classes d'aimantation peuvent se manifester : l'aimantation rémanente et l'aimantation induite (Bouiflane, 2008).

- L'aimantation rémanente ( $J_r$ ) : c'est une aimantation permanente acquise par la roche au moment de sa formation (cristallisation, dépôt sédimentaire). Elle dépend fortement de la proportion de minéraux ferromagnétiques présente dans la roche. On la retrouve chez les roches ignées et sédimentaires.

- L'aimantation induite ( $J_i$ ) : elle correspond à la variation réversible de l'aimantation en fonction du champ inducteur, le champ géomagnétique  $\vec{H}$ . Par sa susceptibilité magnétique ( $\chi$ ), elle est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique :  $J = \chi H$  (9)

Son orientation est dans la direction du champ normal.

On classe les matériaux en fonction de leur susceptibilité magnétique. Ainsi, on distingue (Tremolet, 1999 ; Kaufman et al., 2009) :

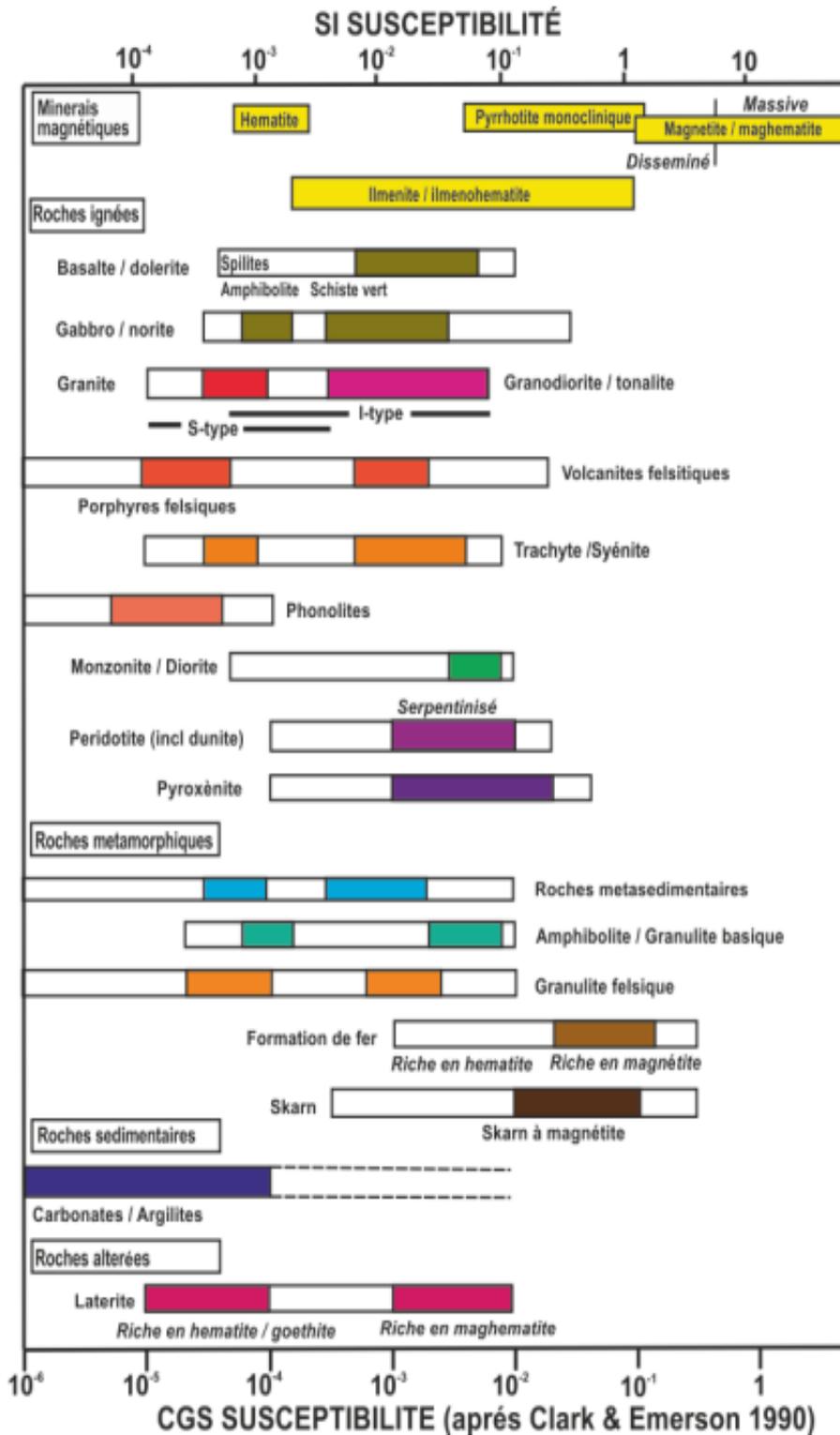


Figure 9 : Synthèse des susceptibilités magnétiques typiques de certaines roches et minéraux communs.

- **Les matériaux diamagnétiques** caractérisés par leur susceptibilité négative ( $\chi < 0$ ), ils ne contiennent aucun élément magnétique.

**Tableau 1** : Quelques matériaux et minéraux diamagnétiques (Dunlop et Özdemir, 1997).

L'eau	L'or	Mercure	Bismuth	Calcite	Quartz	Feldspaths
$-9,05.10^{-6}$	$-166.10^{-6}$	$-166.10^{-6}$	$-166.10^{-6}$	$-13,8.10^{-6}$	$-14,5.10^{-6}$	$-12,4. 10^{-6}$

- **Les matériaux paramagnétiques** caractérisés par leur susceptibilité positive ( $\chi > 0$ ) de l'ordre de  $10^{-5}$  à  $10^{-3}$ SI, ils peuvent contenir du fer (ou du manganèse) mais en quantité insuffisante pour être ordonnés à température ambiante (Tableau 1). Ils acquièrent une aimantation uniquement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur et celle-ci disparaît lorsque le champ extérieur est annulé. Leur susceptibilité est alors décrite par l'équation de Curie-Weiss (Simon, 2012):

$$\chi = \frac{k}{T-T_p} \quad (10)$$

avec k la constante de Curie et  $T_p$  la température de Curie.

Parmi les minéraux terrestres, la plupart sont paramagnétiques ou diamagnétiques à température ambiante et ne peuvent conserver une aimantation rémanente ; exemples : les oxydes pauvres en Fe, Mn ou Cr comme l'ilménite  $FeTiO_3$ , la sidérite  $FeCO_3$ ; les silicates ferromagnésiens. Il s'agit, essentiellement, de l'olivine  $(Fe, Mg)_2 SiO_4$ , des pyroxènes –silicates en chaînes de formule  $(Fe, Mg) SiO_3$  ou bien  $(Fe, Mg) Ca(SiO_3)_2$  et des amphiboles, voisines des pyroxènes mais hydratées.

- **Les matériaux ferromagnétiques** : Riches en fer ou en manganèse sous formes d'oxydes, de sulfures ou d'hydroxydes. À température ambiante, ils présentent une aimantation spontanée même en l'absence de champ magnétique extérieur car à l'intérieur de domaines, appelés domaines de Weiss, leurs spins restent

ordonnés. On les caractérise par leur température de Curie  $T_c$ , leur susceptibilité magnétique et leur cycle d'hystérésis.

**Tableau 2** : Quelques minéraux ferromagnétiques (Dunlop et Özdemir, 1997).

Magnétite	Pyrrhotite	Hématite	Ilménite	Maghemite
$Fe_3O_4$	FeS	$Fe_2O_3$	$Fe^{2+}TiO_3$	$Fe_2O_3$

À l'échelle macroscopique, la présence de ces minéraux dans les roches magmatiques et métamorphiques confère à ces matériaux de fortes aimantations tant que la température ambiante reste inférieure à la température de Curie (variant de 200 à 700°C). Ainsi, l'effet d'un gradient géothermique positif entraîne une disparition des propriétés magnétiques de ces matériaux au-delà d'une certaine profondeur (Tableau 2).

### 3.1.3.3. La perméabilité magnétique $\mu$

Elle représente la capacité des roches à changer d'induction sous l'influence d'un champ externe. C'est la constante de proportionnalité dans l'expression de de l'induction magnétique (Feumoe, 2014) :

$$\text{Dans le vide : } B_0 = \mu_0 H \quad (11)$$

avec  $\mu_0$  la perméabilité magnétique du vide.

$$\text{Dans un milieu quelconque : } \mu = (1+\chi) \mu_0 \quad (12)$$

$$\text{La perméabilité relative est donnée par : } \mu_r = B/B_0 \quad (13)$$

### 3.1.4. Notion d'anomalie magnétique

Le champ d'anomalie magnétique  $\vec{C}$  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, 1996).

$$\vec{C} = \vec{B} - \vec{R} \quad (14)$$

Cette grandeur vectorielle caractérise une modification de l'aimantation rémanente et/ou induite non prévue par les modèles globaux. Celle-ci est liée à la présence d'un objet aux propriétés magnétiques intrinsèques, que nous supposons localisé dans la zone crustale.

Cependant, il n'existe pas de capteurs, faciles à mettre en œuvre, en prospection magnétique permettant une mesure précise et continue des trois composantes du champ magnétique par rapport à un référentiel connu comme le référentiel géographique local. C'est ainsi que les capteurs magnétométriques nous donnerons uniquement la norme du champ total B.

Ces limitations liées à l'instrumentation nous contraignent à définir une grandeur scalaire d'anomalie appelée Anomalie de l'Intensité du Champ Magnétique terrestre (AICM) ou anomalie du champ total (Blakely, 1996).

$$F = B - R \quad (15)$$

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. Cependant, le fait qu'elle puisse être positive ou négative suppose qu'elle peut être interprétée comme une propriété directionnelle donc angulaire. Il devient donc important d'établir une relation entre F et  $\vec{C}$  qui porte les informations sur la source. Ainsi on a :

$$F = \|\vec{R} + \vec{C}\| - R \quad (16)$$

En faisant intervenir un produit scalaire :

$$\|\vec{R} + \vec{C}\| = \sqrt{\vec{R} \cdot \vec{R} + 2(\vec{C} \cdot \vec{R}) + \vec{C} \cdot \vec{C}} \quad (17)$$

$$\|\vec{R} + \vec{C}\| = R \sqrt{1 + 2 \cos \alpha \frac{C}{R} + \frac{C^2}{R^2}} \quad (18)$$

avec  $\alpha$  l'angle entre les vecteurs  $\vec{C}$  et  $\vec{R}$ .

$$\text{On pose } P = \frac{C}{R} \text{ et } a = 2 \cos \alpha \quad (19)$$

Il vient :

$$\frac{\|\bar{R} + \bar{C}\|}{R} = (1 + ap + p^2)^{1/2} \quad (20)$$

On suppose pour la suite que l'intensité du champ d'anomalie magnétique est très faible par rapport au champ de référence. Il devient alors possible de faire un développement limité de l'équation en considérant  $p$  très petit devant un. (Sailhac, 1999)

À l'ordre 1 on a :

$$\frac{\|\bar{R} + \bar{C}\|}{R} = 1 + \frac{1}{2}ap \quad (21)$$

Remplaçons  $p$  et  $a$  par leurs valeurs :

$$\frac{\|\bar{R} + \bar{C}\|}{R} = 1 + \frac{C}{R} \cos \alpha \quad (22)$$

$$\text{On obtient alors :} \quad F_1 = C \cos \alpha \quad (23)$$

Ce premier terme du développement limité, noté  $F_1$  et nommé AICM1, est assimilé à  $F$  (Blakely, 1996).

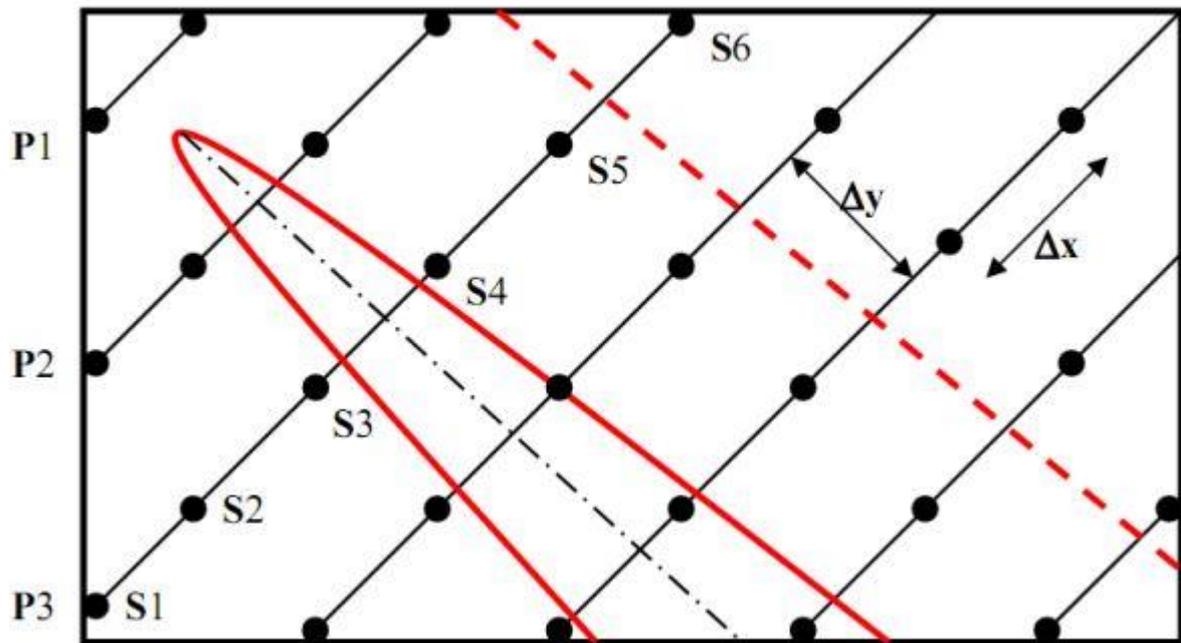
$$F \approx F_1 \quad (24)$$

On remarque donc que  $F$  est un scalaire positif ou négatif, son signe dépend de la valeur de  $\alpha$  compris dans l'intervalle  $[0, 2\pi]$ .

### **3.1.5. Levée magnétique**

Les levés aéromagnétiques nous renseignent sur les éléments structuraux ainsi que la lithologie des roches distribuées depuis la surface de la terre jusqu'à de grandes profondeurs (Telford et al., 1998). Cette méthode nous permet de déterminer la profondeur des sources magnétiques, un élément crucial dans la compréhension de la lithologie et du potentiel minier sous l'épaisse couverture constituée de différentes séquences. Elle permet en plus d'augmenter la connaissance de la géologie dans des régions avec peu ou sans informations déjà disponibles (Fig. 10).

Les différents profils de mesure, ( $P_i$ ) sont constitués par plusieurs stations ( $S_i$ ). Le maillage utilisé dans le cadre de la collecte des données magnétiques utilisées dans ce travail a été faite par le billet d'un maillage régulier (Figure 10). Il peut être carré ( $\Delta X = \Delta Y$ ) ou rectangulaire ( $\Delta X < \Delta Y$ ).



**Figure 10 : Installation du levé de mesures magnétiques (Feumoé, 2014).**

### **3.1.6. Instruments de mesure utilisés en aéromagnétisme**

Les appareils utilisés pour mesurer le champ magnétique sont les magnétomètres. Les roches de la croûte terrestre créent un champ magnétique supplémentaire dit champ anomal, qui fait l'objet de notre étude (Le Mouél, 1969 ; Owono Amougou., 2020).

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

### **3.1.6.1. Les capteurs scalaires**

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

#### **- Magnétomètres à précession ou magnétomètres à protons**

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

#### **- Les magnétomètres à pompage optique**

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

### **3.1.6.2. Les magnétomètres vectoriels**

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

#### **- Les magnétomètres à vanne de flux (fluxgates)**

Ils ont été inventés vers les années 1930. Leur principe est le suivant : la bobine dite primaire est parcourue par un courant alternatif de façon à générer des

saturation successives et de sens opposé le long de l'axe du noyau. Ainsi, la composante de tout champ magnétique externe continu dans cette direction vient successivement s'ajouter ou s'opposer à la saturation : il y a donc une variation du flux magnétique. Ces types de magnétomètres présentent plusieurs avantages à savoir, leur légèreté, leur résistance et leur imperturbation par le mouvement. Ces caractéristiques font d'eux les magnétomètres par excellence pour l'exploration spatiale et pour la prospection minière. Mais ils sont cependant les moins précis de l'ordre de 1 nT.

### **- Les magnétomètres supraconducteurs à interférences quantiques**

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

### **3.1.7. Nature et origine des données magnétiques**

Les données utilisées sont aéromagnétiques et proviennent des différentes campagnes de levés magnétiques réalisées au Cameroun par différents organismes entre 1970 et 1976. Celles de notre zone d'étude ont été prises en 1970 dans le cadre des programmes de coopération entre le Canada et la République Fédérale du Cameroun sous les auspices de l'Agence Canadienne de Développement International (ACDI). Le magnétomètre et la mise en carte ont été assemblés par l'Institut Géographique National à Paris (IGNP). L'aspect technique du travail a été supervisé conjointement par la Commission Géologique du Canada et la direction des Ressources Naturelles du Cameroun. La couverture aéromagnétique s'est effectuée à une altitude de vol de 235 m suivant les profils de direction  $\text{N}135^{\circ}$  et espacés de 750 m. Ces données ont ensuite été traitées grâce au logiciel

MapInfo Professional 7.5 dans le système de coordonnées WGS 84 / UTM Zone 33 Nord, puis introduites dans le logiciel Oasis Montaj 8.4 pour extraire les différentes cartes dérivées.

### 3.1.8. Organigramme de traitement des données magnétiques

Les données magnétiques de Paterson et al., (1976) utilisées ici seront traitées par le logiciel Oasis Montaj 8.0 et la modélisation sera faite par le biais du module GYM SIS du même logiciel (Fig. 11).

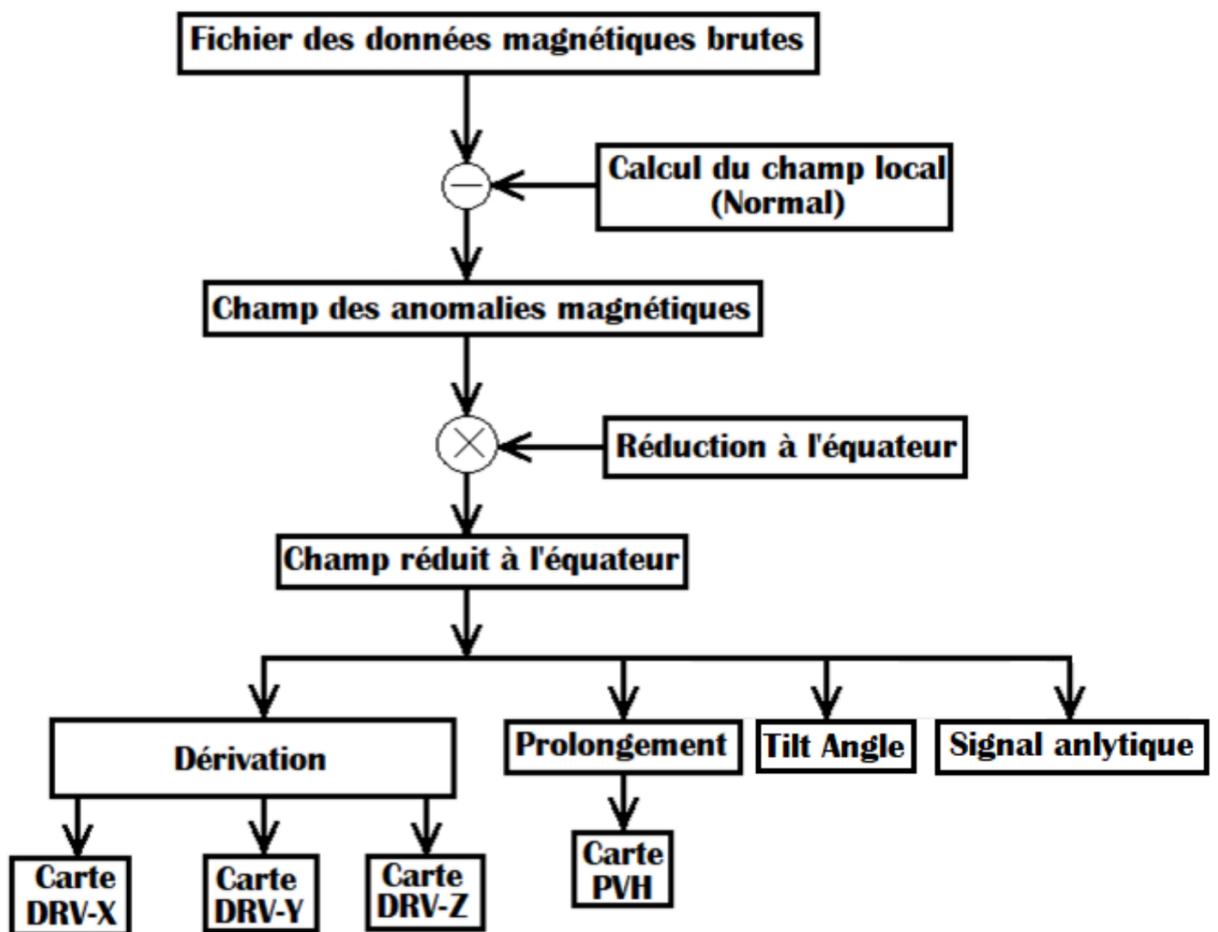


Figure 11 : Organigramme de traitement des données aéromagnétiques.

### **3.1.9. Avantages et inconvénients de la méthode aéromagnétique**

Bien que regorgeant d'innombrables avantages, on note néanmoins quelques inconvénients à cette méthode (Lacomblez et Cornet, 1973 ; Groune, 2009 ; Feumoe, 2014).

#### **3.1.9.1. Avantages opérationnels**

- Opération de terrain peu dépendante des conditions locales et des moyens logistiques très simplifiés ;
- Couverture systématique de grande surface en un temps très court ;
- Main d'œuvre certes spécialisée mais réduite ;
- Discrétion de l'échelon d'opérations.

#### **3.1.9.2. Avantages techniques**

- Couverture systématique par maillage régulier adapté au problème posé ;
- Mesure en continu ou semi continu le long des profils ;
- Atténuation ou élimination des effets parasites superficiels ;
- Technique et sensibilité accrues des équipements embarqués ;
- Délimitation de zones d'intérêts sans être obligé de parcourir de vastes surfaces, d'où un gain appréciable de temps et une meilleure utilisation des budgets et des moyens.

#### **3.1.9.3. Inconvénients de la méthode**

Les principaux inconvénients de cette méthode sont les suivants :

- Localisation et délimitation plus imprécises des points d'intérêts ;
- Pouvoir séparateur réduit ;
- Grille de mesure systématique qui, ne peut atteindre la densité d'un maillage de prospection au sol.

## **3.2. Méthode gravimétrique**

Nous donnons les outils nécessaires à la compréhension de certaines notions telles que le champ de pesanteur, les mesures de la gravité et l'anomalie gravimétrique (anomalie de Bouguer) qui sont indispensables dans la prospection gravimétrique.

### **3.2.1. Les principes de base**

La gravimétrie est une méthode géophysique basée sur l'étude du champ de gravité. La méthode consiste à mesurer les variations de l'accélération de la pesanteur à l'aide d'un gravimètre, puis à appliquer aux valeurs brutes, des corrections (correction de Faye ou à l'air libre, correction de plateau, correction topographique ou de relief, correction de latitude, correction luni-solaire) pour éliminer l'influence des autres corps célestes, de la rotation et de la forme de la terre afin de faire ressortir les anomalies imputables aux variations de la densité du sous-sol (Lacomblez et Cornet, 1973).

#### **3.2.1.1. La forme de la Terre : le géoïde et l'ellipsoïde de référence**

##### **Le géoïde**

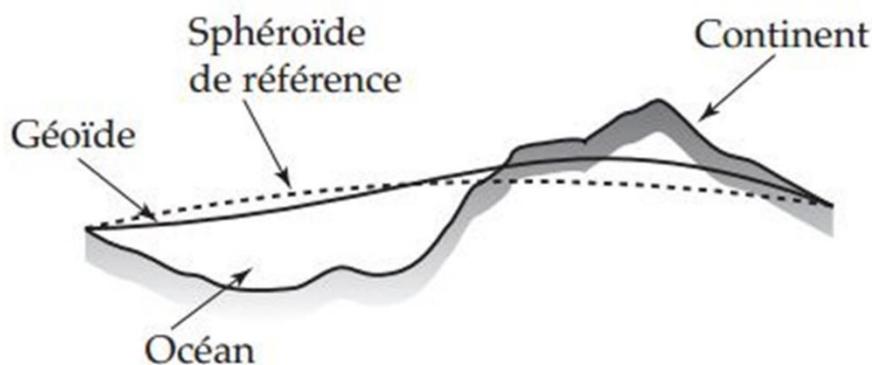
Le géoïde représente la surface de niveau moyen des mers et des océans au repos. Cette surface de référence est une équipotentielle de la pesanteur ; c'est à partir d'elle que sont évaluées les altitudes en altimétrie. La forme du géoïde n'est pas simple et ne peut être obtenue que de façon expérimentale ceci dû au fait que le géoïde n'est pas permanentement une équipotentielle, à cause de plusieurs facteurs parmi lesquels nous pouvons citer :

- L'interface "air/eau" qui n'est pas en équilibre, ceci à cause de l'irrégularité de la surface des océans due aux marées, à l'évaporation, aux mouvements de convection, etc ;

- La surface équipotentielle n'est pas isotherme car, la température varie des pôles à l'équateur ;
- La surface équipotentielle n'est pas isobare. Les océans sont caractérisés par des zones dépressionnaires et d'anticyclones quasi-permanents ;
- Le fluide considéré n'est pas homogène. La salinité d'un océan ne peut pas être uniforme ;
- La forme complexe et irrégulière de la terre.

### **L'ellipsoïde de référence**

Le géoïde n'étant pas parfaitement connu et faisant l'objet des retouches, on a donc préféré rechercher un modèle dont la surface mathématique simple l'approche au mieux. Ce modèle est appelé l'ellipsoïde de référence. Les paramètres définissant ce modèle ont été calculés à partir des mesures de la pesanteur  $g$  à la surface de la Terre et des mesures satellitaires. Le géoïde et l'ellipsoïde de référence ne coïncident pas en tous leurs points : le géoïde est déformé vers le haut sous les continents, par l'attraction des masses situées au-dessus, et vers le bas sur les bassins océaniques. Toutefois, la distance entre les deux surfaces ne dépasse pas 50 m (Fig. 12).



**Figure 12 : Ellipsoïde et géoïde.**

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

$$g_{th}(\phi) = 9,7803253359 \cdot \frac{1+0,00193185265241\sin^2\phi}{\sqrt{1-0,00669437999014\sin^2\phi}} \quad (25)$$

Pour calculer le réseau géodésique dont dépend sa cartographie, chaque pays a naturellement choisi un ellipsoïde propre aussi voisin que possible du géoïde sur l'étendue de son territoire national (Mechler, 1982 ; Mbom-Abane, 1997 ; Ndougsa, 2004 ; Hofmann-Welenhorf et Moritz, 2005 ; Nguimbous-Kouoh et al., 2010 ; Zanga Amougou et al., 2013). Dans le cas du Cameroun, l'ellipsoïde choisi pour la mesure du champ de pesanteur à l'intérieur des masses continentales camerounaises est l'ellipsoïde de Clarke 1880 (Nguimbous-Kouoh et al., 2010) dont le méridien central est 13°E et le système de référence est l'IGSN71 (International Gravity Standardization Network 1971). Les caractéristiques de cet ellipsoïde sont les suivantes (Poudjom et al., 1996) :

$$a = 6378249,20 \text{ m (demi-grand axe)}$$

$$c = 6356515 \text{ m (demi-petit axe)}$$

$$\alpha = (a - c)/a = 1/293,5 \text{ (aplatissement)}. \quad (26)$$

### **3.2.1.2. Loi de la pesanteur**

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

$$\vec{F} = - \frac{G m_1 \cdot m_2}{r^2} \vec{u} \quad (27)$$

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

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

$$\vec{F} = m\vec{g} \quad (28)$$

avec  $m$  : la masse du corps et  $g$  : l'accélération de pesanteur. L'accélération subie par la masse  $m$  à la surface de la terre s'exprime par :

$$g = G \frac{m_T}{R_T^2} \quad (29)$$

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

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

Pour un corps situé à une altitude  $z$ , l'accélération de pesanteur  $g(z)$  subie par la masse  $m_T$  de la terre sera donnée par la relation :

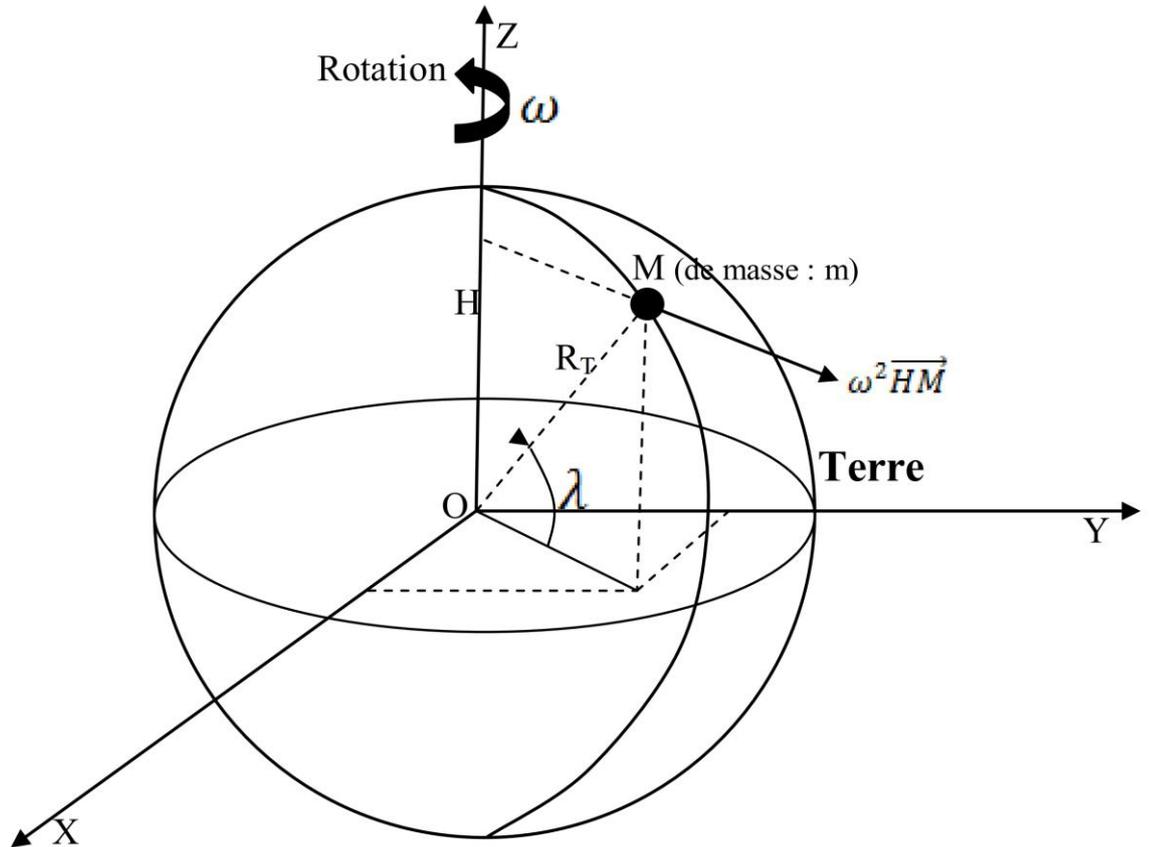
$$g(z) = G \frac{m_T}{(R_T+z)^2} \quad (30)$$

L'accélération gravitationnelle a pour unité le Gal en hommage à Galilée.  $1\text{Gal} = 1\text{cm/s}^2 = 10^{-2} \text{m/s}^2$  ;  $1\text{mGal} = 10^{-3}\text{Gal}$ .

### **3.2.1.3. Champ de pesanteur**

En considérant que les autres astres sont infiniment loin de la Terre (c'est-à-dire que le rayon de la Terre est négligeable devant les distances qui les séparent de la Terre), l'expression du champ de pesanteur en un point  $M$  quelconque de la Terre se résume à la pesanteur vulgaire en ce point, en d'autres termes (Fig.13) :

$$\overrightarrow{g(M)} = \overrightarrow{AT} (M) - \omega^2 \overrightarrow{HM} \quad (31)$$



**Figure 13 : Mouvement de rotation d'un point M à la surface de la Terre.**

- O représente le centre de gravité de l'ensemble des masses terrestres ;
- $\omega$  est la vitesse de rotation de la Terre ;
- H est le pied de la normale à l'axe de rotation de la Terre ;
- $\overrightarrow{HM}$  est un vecteur géocentrique ;
- $A_T(M)$  : masses terrestres au point M.

$$\text{Or, } HM = R_T \cos \lambda \quad (32)$$

Il vient que, lorsque l'influence de l'attraction des autres masses de l'Univers est négligée au point M, l'intensité du champ de pesanteur peut être représentée par l'expression ci-dessous (Mechler, 1982 ; Chouteau, 2005 ; Zanga Amougou et al., 2013) :

$$g(M) = AT(M) - \omega^2 RT \cos \lambda \quad (33)$$

avec  $\lambda$  : latitude géocentrique.

### 3.2.1.4. Potentiel de pesanteur

La pesanteur terrestre est la combinaison des effets de l'attraction newtonienne (gravité due à la masse de la Terre) et de l'accélération axipète due à la rotation de la Terre (Fig. 14). Ces deux champs, qui sont représentés par  $\overrightarrow{AT}$  (attraction terrestre) et  $\vec{\Gamma}$  (accélération axipète due à la rotation), dérivent respectivement d'un potentiel scalaire  $U$  et  $U'$  (Mechler, 1982) :

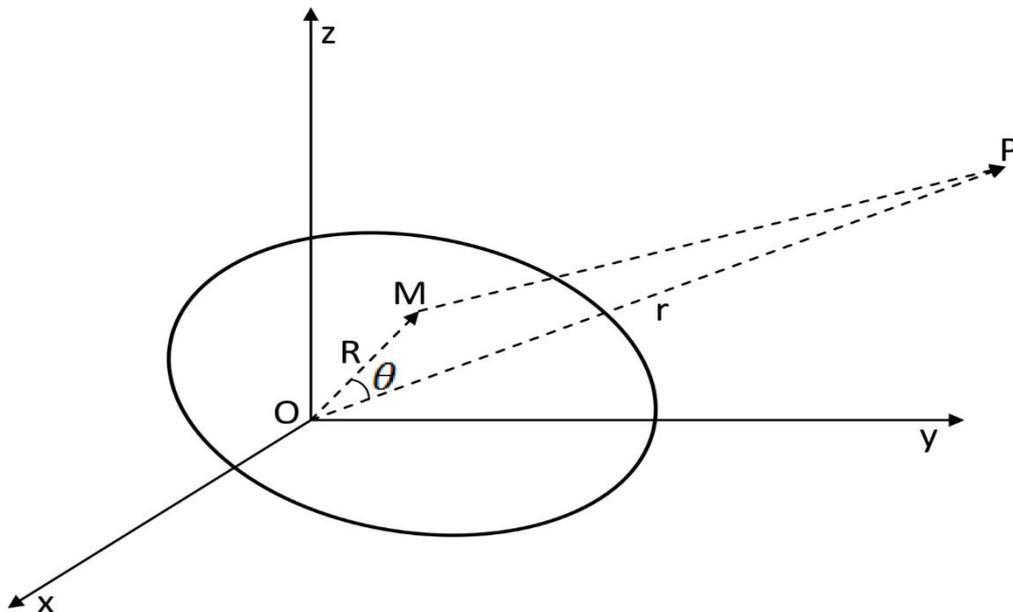
$$\overrightarrow{AT} = \overrightarrow{grad} U \quad (34)$$

$$\text{et } \vec{\Gamma} = \overrightarrow{grad} U' \quad (35)$$

$$\text{avec } \vec{\Gamma} = \omega^2 HM \quad (36)$$

Ainsi, le champ de pesanteur total dérive d'un potentiel total  $W$  tel que :

$$W = U + U' \quad (37)$$



**Figure 14 : Corps autogravitant de forme quelconque ; le champ de gravité étant calculé en un point extérieur P (Cara, 1989).**

On montre que :

$$U = \frac{G}{R} \sum_{n=0}^{\infty} \iiint_{\tau} \left(\frac{r}{R}\right)^n P_n(\cos \theta) \delta(Q) d\tau \quad (38)$$

Et

$$U' = \frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \lambda \quad (39)$$

où  $P_n(\cos \theta)$  est le polynôme de Legendre de degré n donné par :

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n \quad (40)$$

G est la constante de gravitation universelle,  $\delta(Q)$  la masse volumique de la terre au point Q et d'un élément de volume centré en Q ;

$r < R$  (point d'observation extérieure à la masse terrestre).

La connaissance de l'expression du potentiel à l'extérieur des masses attirantes permet de retrouver de façon directe, l'expression du champ gravitationnel donné par :

$$\vec{g} = \overrightarrow{\text{grad}} W \quad (41)$$

### **3.2.1.5. Les mesures de la gravité**

La mesure de la gravité se fait à l'aide des gravimètres dont le principe de fonctionnement équilibre l'action de la pesanteur sur une masse par une force indépendante telle que la force électrostatique, la tension d'un ressort, la pression d'un gaz ou la torsion d'un fil. Ici une variation de la pesanteur g correspond à une variation mesurable du phénomène antagoniste (Telford et al., 1990 ; Nabighian et al., 2005, Zanga Amougou et al., 2013). Les mesures de la gravité sont largement influencées par un certain nombre de paramètres parmi lesquels :

- La forme ellipsoïdale et à la rotation de la Terre ;
- La localisation de la station de mesure, et le relief environnant ;
- L'existence des autres planètes et la dynamique interne de la Terre.

Pour rendre comparables entre elles les mesures de la gravité effectuées à la surface de la Terre, on les ramène aux valeurs qu'elles auraient dû avoir sur le géoïde ou tout simplement sur l'ellipsoïde de référence. Cette opération nécessite qu'on impose un ensemble de corrections à la mesure à la station. Les corrections courantes sont : la correction de la dérive instrumentale, la correction de Faye, la correction de plateau, la correction topographique, la correction de latitude, la correction luni-solaire et les corrections isostatiques.

### **3.2.1.6. L'anomalie de Bouguer**

L'anomalie de Bouguer est la différence entre la mesure de la gravité ayant subi la correction de Bouguer (correction de Faye, correction de plateau et de relief) et la valeur de la gravité sur l'ellipsoïde de référence, à la verticale de la station de mesure. Elle représente l'hétérogénéité de la densité du sous-sol. Son expression est donnée par (Telford et al., 1990, Owono Amougou, 2020):

$$\Delta g_B = [g_{mes} + \Delta g_F - \Delta g_B + \Delta g_T] - g_{th} \quad (42)$$

$\Delta g_B$  : L'anomalie de Bouguer ;

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

$\Delta g_F$  : La correction de Faye ;

$\Delta g_B$  : La correction de plateau ou de Bouguer simple ;

$\Delta g_T$  : La correction topographique ;

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

Soit B l'anomalie de Bouguer, on a :

$$B = \Delta g_B = \Delta g_{\text{observé}} \pm \text{les 5 corrections} \quad (43)$$

#### **- Correction à l'air libre ou correction de Faye**

Les mesures obtenues présentent des variations qui ne sont dues qu'à la position de la station de mesure, il faut donc les corriger en éliminant l'influence de l'altitude du point de mesure au-dessus de la surface du géoïde. L'expression de la correction d'air libre est donc la suivante (Telford et al., 1990) :

$$\Delta_h = 0,3086h \text{ mGal/m} \quad (44)$$

où h (mètres) est l'altitude entre la station de mesure et un point situé à la vertical, à l'aplomb de ladite station.

#### **- Correction de plateau ou de tranche plate**

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

$$\Delta_{g_B} = 2\pi G\delta h = 0,04196\delta h \text{ en mGal} \quad (45)$$

où G est la Constante de gravitation universelle ;

$\delta$ : La densité de la couche de terrain comprise entre la station de mesure et le plan de référence ;

h: L'épaisseur en mètre de cette couche.

#### **- Correction de latitude**

Cette correction tient compte des variations de g avec la latitude due à la rotation de la Terre et à son aplatissement. Elle est donnée par :

$$\Delta_L = 8,1669 \times 10^{-4} \times l \sin\phi \text{ en mGal} \quad (46)$$

où  $\phi$  est la latitude géodésique et l le déplacement suivant le méridien.

### **- Correction de relief**

La méthode de correction consiste à l'élimination des reliefs attractifs autour de la station de mesure (Telford et al., 1990).

$$\Delta h = 0,3086h \text{ (mGals)} \quad (47)$$

### **- Correction de dérive**

Cette correction élimine l'influence apportée sur les mesures par les marées et la fatigue de l'instrument. Elle est faite en supposant que la dérive est linéaire dans le temps. Ainsi, toute valeur  $v$  prise au temps  $t$  (où  $t_2 \leq t \leq t_1$ ) est corrigée par la formule :

$$v_{cor} = v_{lu} - \Delta_d \times (t - t_1) \quad (48)$$

avec  $\Delta_d$  le taux de dérive donné par :

$$\Delta_d = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad (49)$$

$v_1$  et  $v_2$  les vitesses mesurées à une station aux temps  $t_1$  et  $t_2$  respectivement.

## **3.2.2. Les données gravimétriques**

### **3.2.2.1. Nature et origine des données**

Les données utilisées dans le cadre de ce travail sont obtenues grâce au partenariat entre le bureau de gravimétrie international (BGI) et les chercheurs de la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) ont mis au point le modèle gravitationnel terrestre dénommé EGM2008 (Palvis et al., 2008). Ce modèle est une combinaison de données gravimétriques terrestres issues des campagnes de reconnaissance menées sur presque l'ensemble du territoire camerounais respectivement par le groupe de recherche OSRTOM entre 1963, 1967 et 1996 et des données satellitaires. Les anomalies de Bouguer ainsi obtenues ont été séparées en anomalies régionales et résiduelles dans le but de mieux différencier les sources superficielles des sources profondes génératrices d'anomalies.

### 3.2.2.2. Organigramme de traitement des données gravimétriques

Les données gravimétriques EGM 2008 utilisées ici seront traitées par le logiciel Oasis Montaj 8.4 et la modélisation sera faite par le biais du module GYM SIS du même logiciel (Fig. 15).

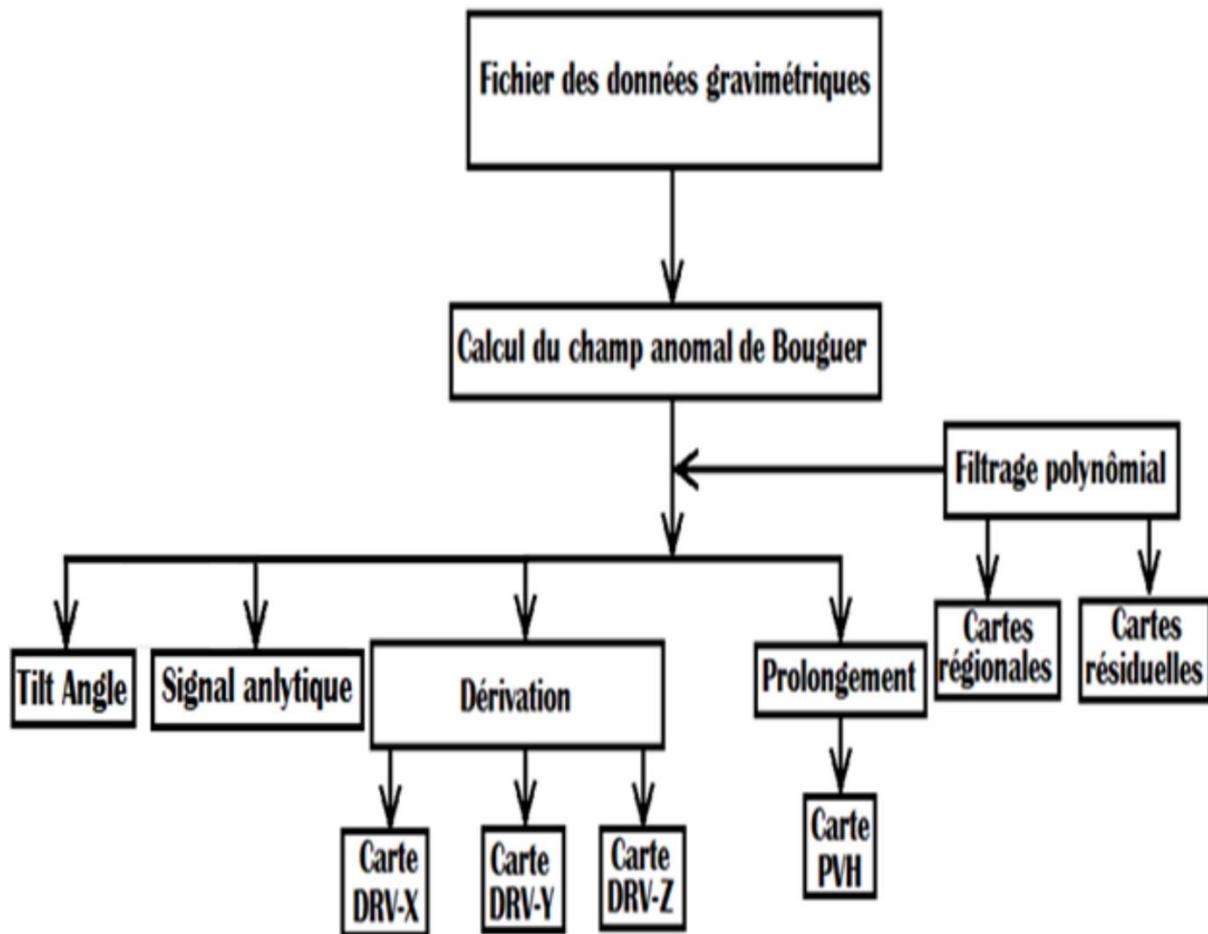


Figure 15 : Organigramme de la méthodologie de traitement des données gravimétriques.

### 3.2.3. Avantages et inconvénients de la méthode

#### 3.2.3.1. Avantages techniques et opérationnels

- Mesures précises ;
- Aucune limitation d'utilisation (zone urbaine, relief accidenté) ;

- La prise de données sur le terrain est peu dépendante des conditions locales et nécessite des moyens logistiques très simplifiés ;
- Les équipements embarqués ont une sensibilité accrue ;
- Les zones d'intérêt sont délimitées sans être obligé de parcourir de grandes surfaces entraînant par conséquent un gain appréciable en temps et une meilleure utilisation des budgets, des moyens et une grande couverture de terrain.

### **3.2.3.2. Inconvénients de la méthode**

- Corrections fastidieuses ;
- Appareillage et interprétation délicate.

## **3.3. Opérateurs de transformation et de traitement des données magnétiques et gravimétriques**

Dans cette section, nous allons rappeler les principaux opérateurs utilisés pour l'interprétation des données magnétiques et gravimétriques. Nous donnerons de façon succincte leur formulation et leur domaine d'application.

### **3.3.1. Filtrage des données**

Les filtres numériques sont des outils mathématiques qui permettent de réaliser une transformation des cartes des données brutes permettant d'obtenir des cartes appropriées qui facilitent la tâche d'interprétation. Plusieurs filtres sont utilisés dans le traitement des données potentielles, parmi lesquels : les filtres de réduction à l'équateur et aux pôles, le filtre de dérivée, le prolongement vers le haut et vers le bas et le gradient horizontal.

### **3.3.2. La réduction aux pôles et à l'équateur**

La principale difficulté pour l'interprétation des anomalies magnétiques réside dans le fait qu'elles sont rarement à l'aplomb des sources causatrices, ce

qui n'est pas le cas avec les données gravimétriques. Ce problème engendre une difficulté dans la recherche d'une corrélation entre les anomalies magnétiques observées et les structures géologiques causatives. Pour faire face à cette difficulté, l'idée du changement de phase a été formulée par l'intermédiaire de la technique de la réduction au pôle (Baranov, 1957 ; Baranov et Naudy 1964). Elle est le résultat d'une double projection du superpotentiel magnétique dans la direction du champ et dans la direction de l'aimantation. On suppose ici que, l'aimantation de la source est purement induite, par conséquent elle possède une direction identique à la direction du champ magnétique supposé connu, par exemple grâce aux modèles géomagnétiques globaux comme IGRF. Sa fonction dans la direction du champ et de l'aimantation s'écrit (Feumoe, 2014) :

$$\overrightarrow{\text{Orp}} = - \frac{(i\sqrt{u^2+v^2})(i\sqrt{u^2+v^2})}{(lu+mv+in\sqrt{u^2+v^2})(l'u+m'v+in'\sqrt{u^2+v^2})} \quad (50)$$

avec  $(l, m, n)$ , les cosinus directeurs de la direction du champ magnétique régional et  $(l', m', n')$  les cosinus directeurs de l'aimantation.

Dans les régions de basses latitudes ( $-15^\circ$  à  $15^\circ$ ) comme c'est le cas pour notre zone d'étude, il est préférable d'effectuer une réduction à l'équateur afin, de minimiser le bruit dû à l'amplification de la direction N-S. Elle transforme une anomalie causée par un corps soumis à une aimantation ayant une inclinaison non nulle, en une autre anomalie qui serait associée au même corps si l'inclinaison de l'aimantation était nulle. Ainsi, plus la forme des anomalies obtenues est symétrique, plus les paramètres d'inclinaison et de déclinaison de l'aimantation choisis seront dits corrects.

### **3.3.3. Opérateurs de dérivées**

Ils sont utilisés lorsque plusieurs structures sont assez proches et situées à des profondeurs comparables, le signal magnétique mesuré montre l'existence d'une seule anomalie. Une dérivation verticale permet d'amplifier les courtes

longueurs d'onde de manière à mieux distinguer les différentes anomalies dont la source est différente. Il est donné par la fonction (Feumoe, 2014) :

$$O_{Pprofil} = [-2\pi i(lu \pm in|U|)]^P \quad (51)$$

On distingue trois types de dérivées :

- La dérivée horizontale -x : Elle permet la mise en évidence des contacts lithologiques de direction Nord-Sud. L'opérateur de la dérivée horizontale -X est :

$$O_{dx} = [-2\pi i(lu \pm in|U|)]^P \quad (52)$$

- La dérivée horizontale - Y : Elle permet la mise en évidence des contacts lithologiques de direction Est-Ouest. L'opérateur de la dérivée horizontale -Y est :

$$O_{dy} = [-2\pi i(mv \pm in|v|)]^P \quad (53)$$

- La dérivée verticale - Z : Elle est utilisée pour amplifier les courtes longueurs d'ondes et individualiser les corps géologiques dans le proche sous-sol. L'opérateur de la dérivée verticale -Z est :

$$O_{dz} = [2\pi n\sqrt{u^2 + v^2}]^P \quad (54)$$

### **3.3.4. Opérateur de prolongement**

Le prolongement consiste à déplacer artificiellement le plan d'observation et à calculer le champ que l'on observerait en ces nouveaux points à partir des données recueillies sur le terrain. Sa fonction est la suivante :

$$O_{Pprofil} = e^{-2\pi|U|h} \quad (55)$$

On distingue deux types de prolongement : le prolongement vers le haut et le prolongement vers le bas (Simon, 2011).

- Le prolongement vers le haut : Si  $h > 0$ , l'opérateur permet de calculer l'anomalie à la hauteur  $z$  au-dessus du plan d'acquisition : le prolongement est dit vers le « haut ». Il joue le rôle de filtre passe-bas analogue à l'opérateur d'intégration.

- Le prolongement vers le bas : Si  $h < 0$ , l'opérateur permet de calculer l'anomalie à la hauteur  $z$  au-dessous du plan d'acquisition : le prolongement est dit vers le « bas ». Il joue le rôle de filtre passe-haut analogue à l'opérateur de dérivation. Il est donc instable en présence de bruit haute fréquence, son utilisation se limite à l'estimation de profondeur du toit des sources. Plus profond, l'anomalie prolongée diverge car ne vérifie plus l'équation de Laplace et perd ses propriétés harmoniques.

### **3.3.5. Méthode analytique**

Une fois générées les cartes magnétiques et gravimétriques, on procède alors au traitement, puis à l'analyse. On distingue ainsi l'analyse qualitative et l'analyse quantitative.

L'analyse qualitative : Elle a un caractère descriptif ; elle s'occupe de l'étude de l'allure et de l'intensité des anomalies. Les iso-anomales orientées dans une direction, peuvent être associées aux directions de failles et des structures prolongées telles que les anticlinaux, les synclinaux, les filons etc. Les filtres sont d'une importance capitale dans cette étape. Dans le cas particulier des données gravimétriques :

- Les anomalies positives ou lourdes sont associées soit à des intrusions de roches lourdes dans la croûte, soit à un relèvement du socle, soit à des roches sédimentaires ;

- Les anomalies négatives ou légères sont associées soit à des intrusions de roches légères dans la croûte, soit à un amaïnissement dans la croûte, soit à un relèvement ou un effondrement du socle.

L'analyse quantitative : elle sous-entend les calculs à réaliser pour déterminer la profondeur, l'étendue, le pendage et les diverses propriétés

magnétiques des corps perturbateurs. C'est ici qu'interviennent, les méthodes dites analytiques et celles graphiques (on réalise l'interprétation par la comparaison des courbes des composantes mesurées du champ géomagnétique mesurées avec celles calculées d'avance sur la base de formes géométriques simples).

Ces méthodes permettent une meilleure approche pour appréhender le modèle géologique. Selon la procédure d'interprétation, on distingue deux types de raisonnement : le problème direct et celui inverse.

### **3.3.5.1. Problème direct**

Ici, on définit un modèle géologique en choisissant des paramètres physiques avec lesquels on va estimer l'effet de ce modèle en surface du sol. La comparaison de ce résultat avec le signal de terrain, si elle est différente, nous oblige à changer la valeur de ces paramètres pour obtenir un autre effet en surface, par itérations successives, nous minimisons la différence entre les anomalies calculées et celles mesurées jusqu'à ce que, cette différence soit négligeable.

### **3.3.5.2. Problème inverse**

On prend comme base de départ l'effet mesuré sur le terrain et à partir de là, grâce à des méthodes appropriées, on essaye de nous rapprocher le mieux possible du modèle réel, plusieurs méthodes ont été développées pour la localisation des sources perturbatrices. Dans ce chapitre, nous étudierons la méthode de variation de l'angle d'inclinaison ou tilt angle, la déconvolution d'Euler, l'analyse spectrale utilisée dans l'interprétation des données potentielles pour la localisation des corps souterrains, l'identification des lignes structurales, ainsi que la détermination de leurs profondeurs.

### **3.3.6. Variation de l'angle d'inclinaison (Tilt-angle)**

L'opérateur de tilt-angle ou inclinaison de l'angle (Miller et Singh, 1994 ; Verduzco et al., 2004 ; Salem et al., 2008 ; Bouiflane, 2008 ; Simon, 2012) est

défini comme l'arc tangente du rapport de la dérivée verticale de l'anomalie du champ total avec le module de son gradient horizontal. Il est donné par la relation :

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\frac{\partial T}{\partial h}} \quad (56)$$

Où

$$\frac{\partial T}{\partial h} = \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (57)$$

avec  $\frac{\partial T}{\partial z}$  ;  $\frac{\partial T}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial T}{\partial y}$  qui sont les dérivées premières du champ de potentiel (anomalie)

T suivant les directions x, y et z respectivement et  $\frac{\partial T}{\partial h}$  est la dérivée horizontale totale (Fig. 16).

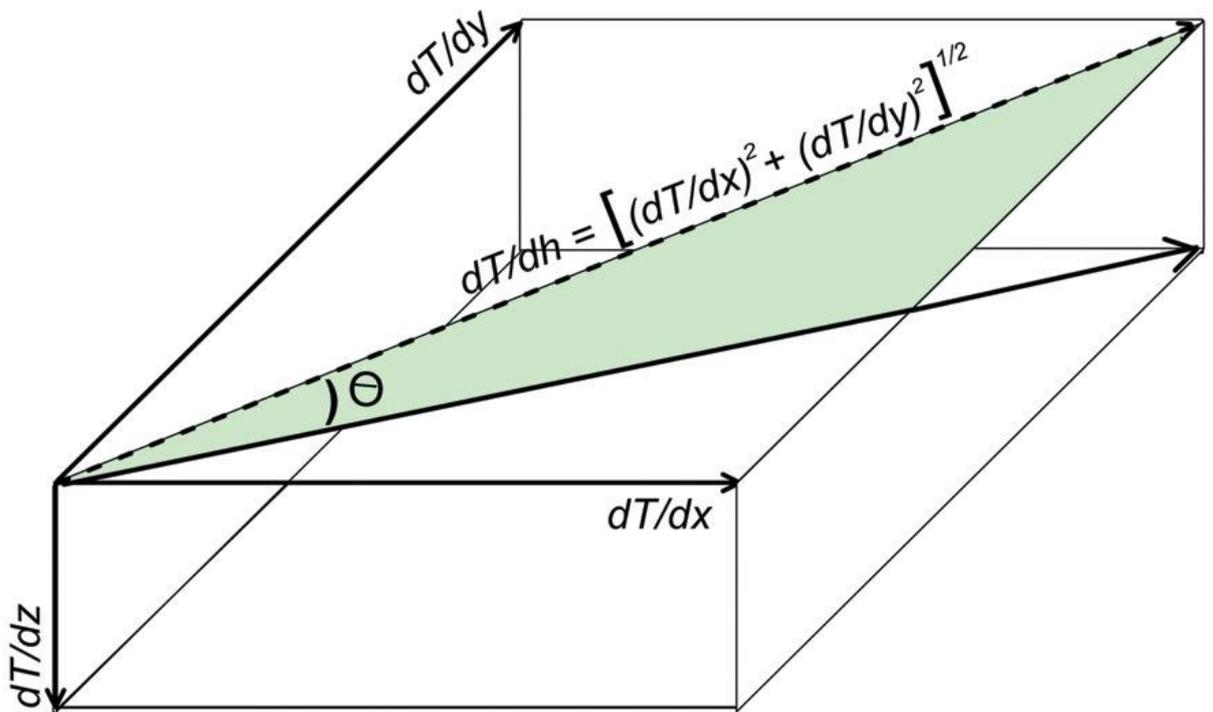


Figure 16 : Représentation géométrique de l'opérateur Tilt-angle ( $\theta$ ).

L'avantage du tilt-angle est que, comparé aux autres méthodes, elle ne nécessite pas la connaissance des paramètres tels que la densité, la susceptibilité magnétique, l'indice structural etc. et l'estimation des profondeurs se fait uniquement à partir des contours de la carte de tilt-angle. Elle permet également

de donner une importance égale aux anomalies quelle que soit leur amplitude. En effet, la fonction arc tangente a pour effet de répartir le signal calculé entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$  (Verduzco et al., 2004).

Miller et Singh (1994) ont montré que le tilt-angle permettait de délimiter les contours de la source. La zone où le tilt-angle est positif, représente l'intérieur de la source : celle où il est négatif, représente la zone externe à la source et enfin les contours nuls représentent les zones de contacts verticaux avec la source.

En 2007, Salem et al., parviennent à exprimer la relation qui existe entre la profondeur  $Z_c$  de la source et l'horizontalité  $h$  par un schéma très simple (Fig. 17) :

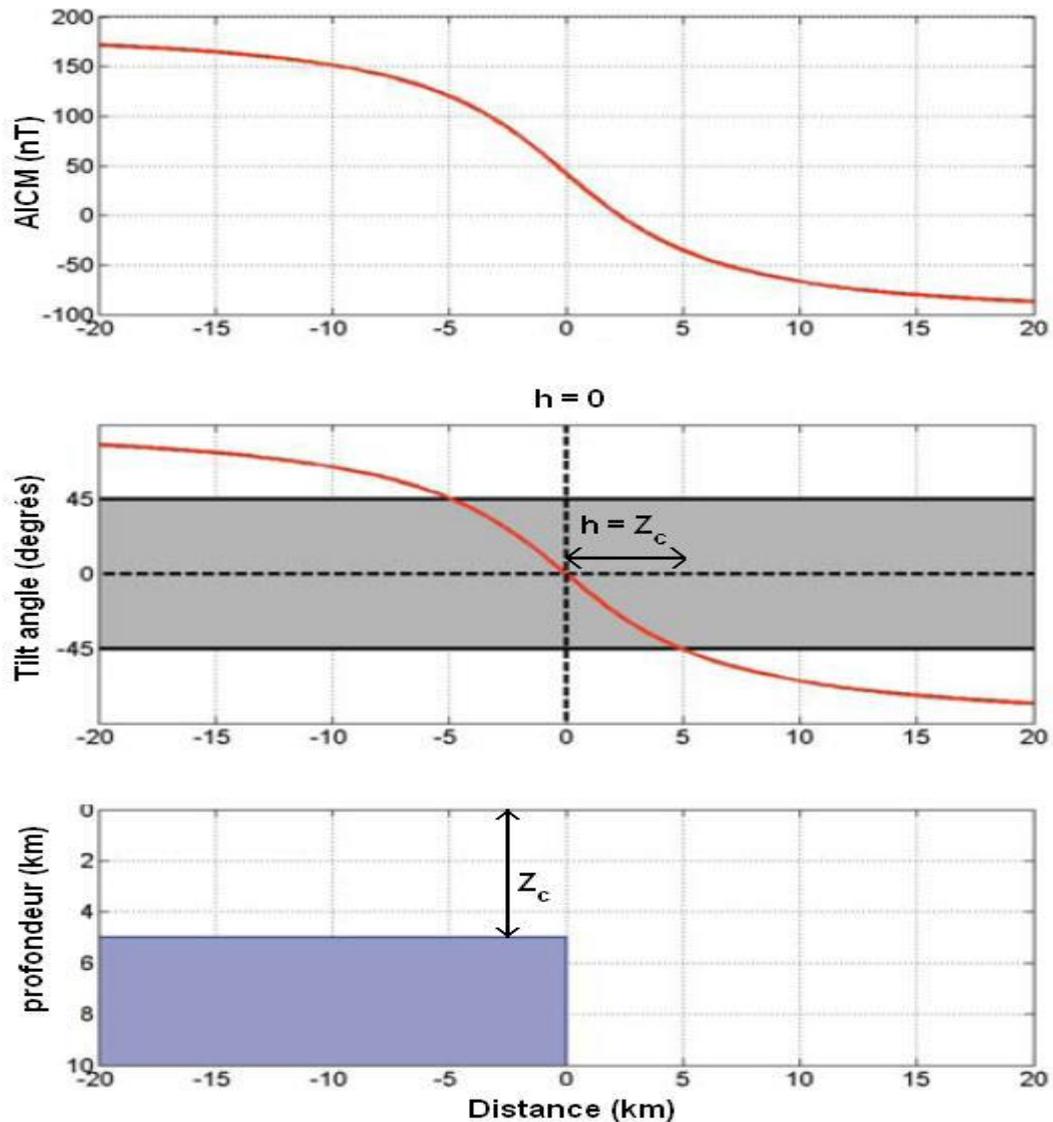
$$\theta = \tan^{-1} \frac{h}{Z_c} \quad (58)$$

Cette équation indique alors que la valeur du tilt-angle au lieu des points à l'aplomb du contact avec la source est  $0^\circ$  ( $h=0$ ) et égale à  $45^\circ$  lorsque  $h=Z_c$  et  $-45^\circ$  lorsque  $h=-Z_c$ , d'où la moitié de la distance entre les contours  $\pm 45^\circ$  donne la profondeur de la source.

La carte du tilt permet donc une analyse combinée des limites des structures 2D et de leur profondeur.

### **- Analyse qualitative 3D par la variation de l'angle d'inclinaison**

L'opérateur d'angle d'inclinaison peut être utilisé pour cartographier les structures géologiques, car il permet de localiser les contacts et délimiter les formes de ces dernières (Miller et Singh, 1994). En le couplant au prolongement vers le haut, cela devient plus intéressant car on obtient l'extension latérale du corps mais aussi de profondeur et donc sa forme tridimensionnelle.



**Figure 17 : Demi-plaque infinie. En haut, l'anomalie magnétique, au milieu le tilt-angle de l'anomalie réduite au pôle (les valeurs du tilt-angle sont comprises entre  $\pm 90^\circ$ ). La valeur nulle de l'angle correspond à la limite de la structure et la distance entre la valeur  $\pm 45^\circ$  et la valeur nulle est égale à la profondeur de la structure (Salem et al., 2007).**

Salem et al. (2007) ont proposé l'utilisation de l'angle d'inclinaison pour la localisation des contacts verticaux, sachant que l'opérateur de prolongement vers le haut peut atténuer les courtes longueurs d'onde et permettre de visualiser de grandes longueurs d'onde (Henderson et Zietz, 1949). On peut donc l'utiliser pour

une meilleure visualisation du comportement des contacts avec la profondeur. Ainsi, nous avons :

- Généré les cartes d'intensité magnétique totale (TMI) ramenées à l'équateur, puis appliquée le prolongement vers le haut sur 1 et 2 km ;
- Ensuite déterminé la position des contacts considérés comme verticaux de ces trois cartes différentes à l'aide de l'approche de Salem et al., (2007) ;
- Et enfin superposé les différentes cartes de contact obtenues pour évaluer la continuité des sources. Nous avons proposé cette approche pour l'analyse qualitative 3D des anomalies des cartes magnétiques à partir de la variation de l'angle d'inclinaison.

### **3.3.7. Déconvolution d'Euler**

Cette méthode a été décrite par Thompson (1982) puis, Reid et al., (1990) et permet de localiser les sources d'anomalies. En considérant une source S située à un point  $P_0$  ayant pour coordonnées  $(x_0, y_0, z_0)$ . L'intensité du champ magnétique total au point d'observation P est (Reid et al., 1990) :

$$M(x, y, z) = f[(x - x_0), (y - y_0), (z - z_0)] \quad (59)$$

L'équation d'homogénéité s'écrit (Thompson, 1982) :

$$\frac{(x-x_0) \partial M}{\partial x} + \frac{(y-y_0) \partial M}{\partial y} + \frac{(z-z_0) \partial M}{\partial z} = N(B - M) \quad (60)$$

où  $(x, y, z)$  représentent les coordonnées du point d'observation,  $(x_0, y_0, z_0)$  les coordonnées de la source magnétique, M le champ total au point d'observation, B la valeur régionale du champ magnétique total et N, est appelé indice structural et caractérise le type de source et le taux de variation du champ en fonction de la distance.

L'indice structural  $N = -n$ , où n est le degré d'homogénéité. L'indice structural dépend de la géométrie de la source. Ainsi pour une source homogène dont l'indice structural  $N = 3$ , on a affaire à une source linéaire (ligne de dipôles ou de pôles, cylindre homogène, tige, etc.). Pour  $N = 2$ , on a affaire aux corps

intrusifs (dyke, couche mince, etc.). Pour  $N = 1$ , on a un contact, et pour  $N = 0$ , on a un bloc sommet d'une pyramide.

### **3.3.8. La modélisation 2.75 D**

Une variante particulièrement utile du modèle 2D, qui supprime la restriction de longueur de l'extension infinie est plus facile à définir que le modèle 3D plus complexe. C'est un modèle à section transversale constante s'étendant sur une longueur de direction finie : c'est le modèle 2.5D.

Lorsque la source peut avoir différentes extensions de chaque côté du profil modélisé, ou que l'extension du corps n'est pas perpendiculaire au profil, on parle de modèle 2.75D. Le modèle 2.75D représente le sous-sol comme une série de prismes polygonaux avec des axes de profils (X) et (Z) et une étendue finie dans le sens de l'axe (y). Cette méthode a été décrite par Skalbeck et al., (2005). Les modèles géologiques sont construits avec un opérateur GM-SYS de Geosoft en utilisant l'algorithme de modélisation 2.75D de Won et Bevis (1987), basé sur les analyses de Rasmussen et Pedersen (1979). Le modèle 2.75D donne à l'interpréteur le contrôle de la troisième dimension sans la complexité de définir et de manipuler un modèle 3D complet.

La modélisation 2.75 D repose sur trois paramètres importants à savoir : le contraste de susceptibilité ou de densité des roches du sous-sol, la profondeur d'enfouissement et la forme des structures géologiques sources d'anomalies observées. Les contraintes sur ces paramètres découlent de la géologie de la zone d'étude et de l'analyse des données magnétiques ou gravimétriques. Le principe de cette méthode de modélisation directe consiste à calculer l'anomalie théorique à partir d'un modèle de structure de forme simple telle qu'un cylindre, une sphère ou un prisme et la comparer à l'anomalie observée.

### **3.4. Conclusion**

Les méthodes aéromagnétiques et gravimétriques sont les approches les plus aisées pour l'identification des structures géologiques et la prospection minière de reconnaissance. Mais, les sources causatrices de l'anomalie n'étant pas directement superposables au champ obtenu dans le cas de la méthode aéromagnétique, ceci est dû au fait que, l'aimantation est un vecteur et que l'on s'intéresse à la projection du champ magnétique anomal dans la direction du champ magnétique régional. On a donc recouru au filtre de réduction à l'équateur ou aux pôles. Pour ce qui est de l'analyse et l'interprétation, l'opérateur tilt angle et la déconvolution d'Euler nous permettront non seulement de mieux identifier nos directions structurales donc, d'établir une carte structurale fiable de la zone et en accord avec le modèle géologique mais, également d'estimer la profondeur de certaines structures remarquables en supposant leur forme connue. Enfin la superposition des modèles 2.75D issus des anomalies magnétiques et gravimétriques permet d'avoir une imagerie précise du sous-sol de notre zone d'étude.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

## **CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION**

### **1. Introduction**

Après avoir présenté le thème, la problématique et les méthodes géophysiques adoptées à savoir l'aéromagnétisme et la gravimétrie, ce chapitre est consacré à l'interprétation des résultats obtenus. L'objectif est de caractériser le mieux possible les sources potentielles qui sont à l'origine des anomalies observées et de ressortir une corrélation des modèles obtenus avec la synthèse des données géologiques et des autres méthodes géophysiques existantes. Pour cela, nous allons générer les cartes de l'intensité du champ total (TMI ; TGI) puis, nous ferons appel aux différents opérateurs mathématiques pour générer les cartes transformées (réduction à l'équateur, dérivée, prolongement etc). Les opérateurs tilt-angle, de maxima locaux et la déconvolution d'Euler seront appliqués à la carte résiduelle, pour nous permettre d'établir une carte structurale fiable de notre zone d'étude, de localiser les potentielles zones de dépôts des minéraux et d'estimer leurs profondeurs. Enfin, des interprétations seront faites par rapport à la géologie locale et régionale.

### **2. Résultats et analyses des données magnétiques**

#### **2.1. Interprétation du champ total aéromagnétique réduit à l'équateur (RTE)**

Le champ magnétique sur la zone Bétaré-Oya présente un schéma magnétique complexe (Fig. 18). Pour une meilleure caractérisation des structures géologiques, nous avons subdivisé la zone en différentes unités :

#### **Unité A**

La principale singularité observable est au centre où une grande anomalie d'environ 5 km de large de valeur allant jusqu'à 100 nT est observée. Elle est orientée NE-SW le long du trait tectonique majeur de la région, à savoir la ligne tectonique de la Sanaga (Fig. 2). En comparaison avec la carte géologique de la

figure 5, ce signal est principalement dû aux schistes volcano-clastiques (avec gisement d'or) aussi appelés schistes de Lom associés à des quartzites conglomératiques avec des intrusions de granitoïdes (Kankeu et al., 2009). Ainsi, la présence d'anomalies avec des signatures similaires pourrait être liée à la circulation de fluides hydrothermaux riches en minéraux magnétiques le long de la zone de cisaillement Betaré-Oya (BOSZ).

### **Unité B-C**

Dans la partie nord-est de Bétaré-Oya, particulièrement autour de Badzéré, deux anomalies hétérogènes sont observées. Elles se situent au sud de la zone de Ndokayo, avec une très grande longueur d'onde d'environ 22 km. L'amplitude est assez élevée et atteint 120 nT. Elles sont alignées avec l'une des foliations majeures de cette zone de tendance E-W. La forme et l'amplitude de ces anomalies suggèrent une forte magnétisation des corps en cause, tels que les granitoïdes ignés connus dans cette zone (Fig. 18).

### **Unité D-E**

À Mararaba et Kassa, il y a une grande anomalie magnétique. Elle est caractérisée par une grande longueur d'onde avec une amplitude variable atteignant 150 nT ; sa direction approximative est ENE-WSW. On peut également observer des anomalies d'intensité respectivement 100 nT et 20 nT, ayant des formes allongées, circulaires et semi-circulaires, orientées en courte longueur d'onde ENE-WSW, NW-SE, NE-SW, qui correspond aux directions structurales dans la zone d'étude qui sont (Kankeu et al., 2009, Nih-Fon et al., 2012).

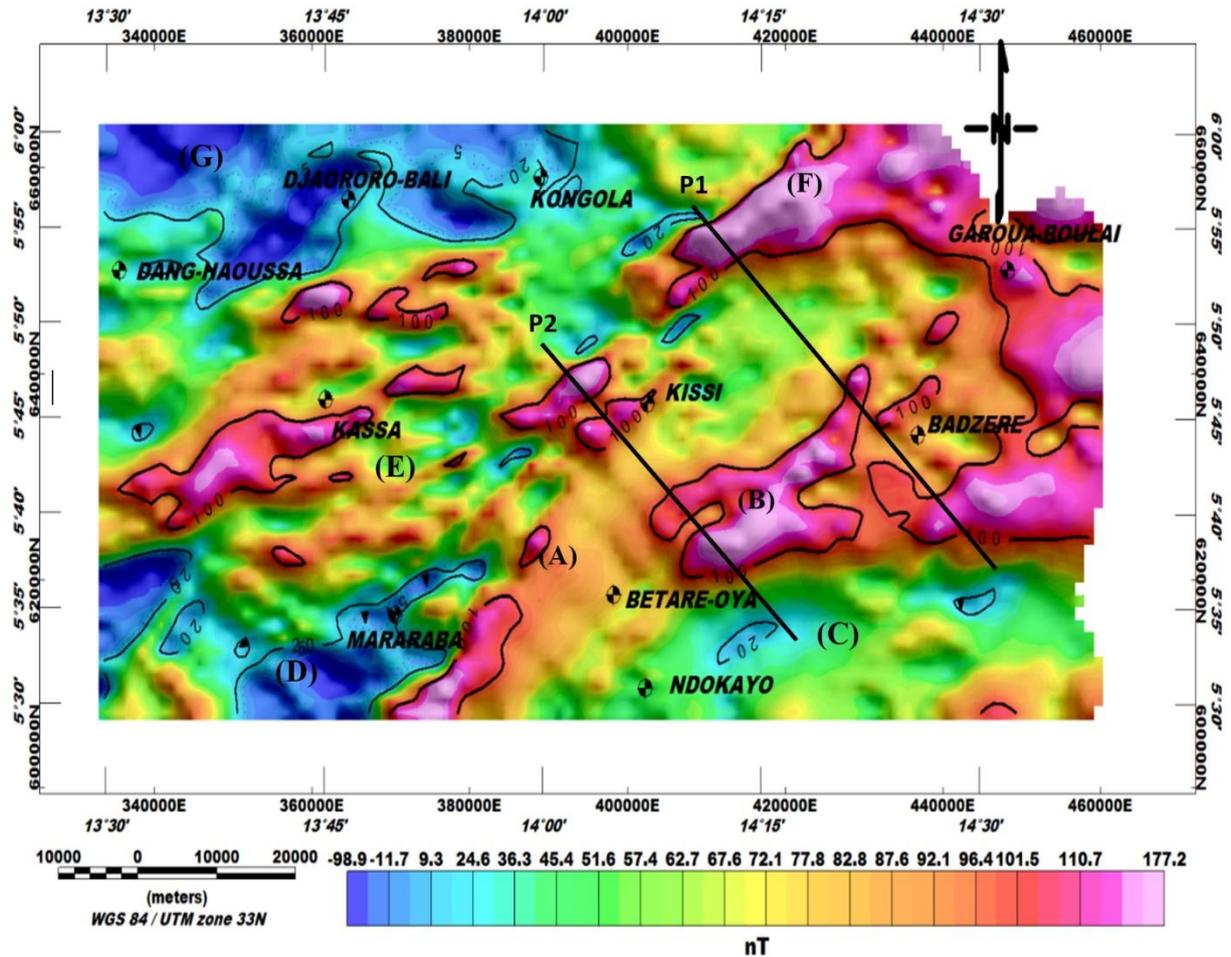


Figure 18 : Carte d'intensité magnétique totale (TMI) réduite à l'équateur.

### Unité F

Dans la partie nord-ouest de Garoua-Boulai, une anomalie hétérogène avec des formes irrégulières et une très grande longueur d'onde d'environ 22 km est observée. Son amplitude est assez élevée et atteint 177 nT. Sa direction approximative est ENE-WSW. Elle est probablement associée aux affleurements méta-volcaniques de la méta-lave au sein de la série schisteuse du Lom (Regnault, 1986).

### Unité G

Les intensités magnétiques les plus faibles sont enregistrées dans le nord-ouest près de Djaororo-Bali où des anomalies avec des amplitudes allant jusqu'à

-98,9 nT sont associées à des méta-sédiments de surface tels que, des gneiss à biotite modifiés recouvrant l'ancien socle métamorphique.

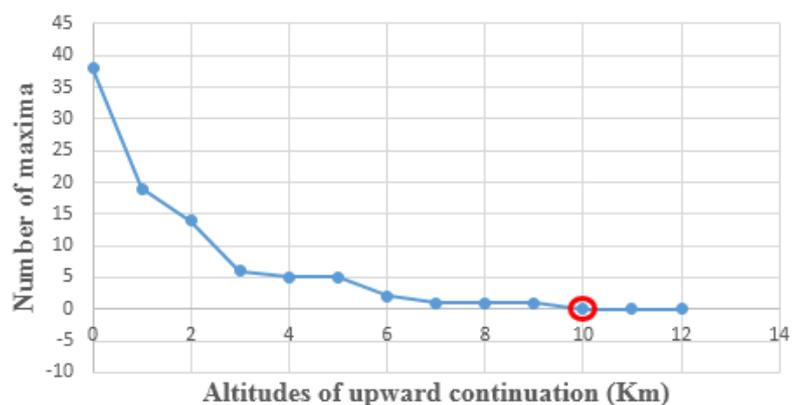
## 2.2. Angle d'inclinaison sur la carte résiduelle

La carte résiduelle est obtenue en soustrayant la carte de champ magnétique total réduit à l'équateur de la carte régionale. La détermination de la carte d'anomalies régionales optimales pour la zone d'étude repose sur la méthode de Zeng (1989).

Cette méthode consiste à déterminer une altitude appropriée pour la poursuite vers le haut dans la zone d'étude. Les extrêma de chaque altitude de continuité vers le haut sont alors comptés (tableau 3). Ce sont des points où le gradient est nul. En outre, un graphique des extrêma en fonction des altitudes de continuité vers le haut est tracé (Fig. 19). Enfin, l'altitude convenable ( $h = 10$  km) nécessaire à la technique de continuité vers le haut est déterminée graphiquement (Jacobsen, 1987 ; Jean et al., 2016).

**Tableau 3** Maxima et altitudes du prolongement vers le haut.

Nombre de maximum	Altitudes de prolongement vers le haut (Km)
38	0
19	1
14	2
6	3



**Figure 19** : Nombre d'extrema par rapport à la hauteur de prolongement vers le haut. A partir de  $h = 10$  km (cercle en rouge), le nombre de maxima devient constant.

5	4
5	5
2	6
1	7
1	8
1	9
0	10

La carte d'angle d'inclinaison générée (Fig. 20) représente les linéaments possibles de la zone d'étude. Sur cette carte, on peut clairement voir que le signal est uniformément distribué dans des intervalles de -1,6 rad à 1,6 rad ; qui permet de cartographier les linéaments avec une résolution extrêmement élevée. La présence de plusieurs accidents marque l'hétérogénéité du socle dans cette zone ainsi que l'intense déformation subie par son sous-sol. Les linéaments et les modèles spatiaux des attributs géophysiques sont des informations importantes, qui peuvent être obtenues à partir des interprétations magnétiques. Les caractéristiques escarpées et les failles droites sont généralement exprimées comme des linéaments subtils du champ de potentiel. Cette expression peut être des zones de gradient, des alignements d'anomalies locales de différents types et formes, des cassures alignées ou des discontinuités dans le modèle d'anomalie.

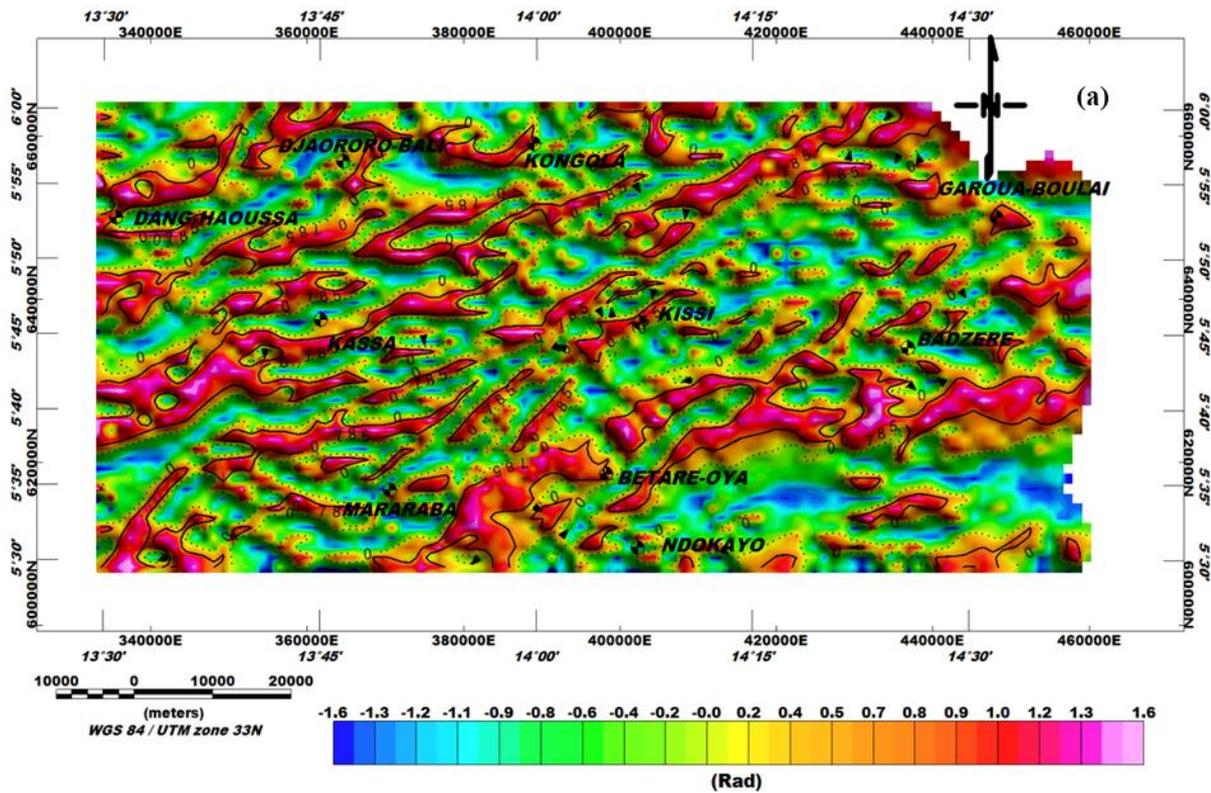


Figure 20 : Angle d'inclinaison sur la carte résiduelle.

### 2.3. Carte structurale

Pour caractériser l'information, nous nous sommes intéressés aux pics d'anomalies dérivés de la dérivée de l'angle d'inclinaison (Fig. 20). Nous avons dénombré 111 linéaments parmi lesquels : 45 ont des longueurs variant entre 2,5 à 10,8 km ; 37 linéaments mineurs variant entre 1,2 à 2,3 km et 29 linéaments majeurs (2,4 - 15,6) km. Cinq principales familles structurales NE-SW ; ENE-WSW ; E-W ; NW-SE ; N-S, sont observées, la direction structurale principale étant NE-SW (Fig. 21).

Les failles les plus longues sont présentes à la limite orientale de la série du Lom avec des longueurs de plus de 15 km (F1, F3, F7). A l'Ouest on note également la faille NE-SW (F4) de plus de 10 km de long, qui marque la limite de la série du Lom (Fig. 22). La signature la plus remarquable est le changement de direction des axes de compression ou de déformation.

Les événements E-W marqués par les failles F15, F16, F19, F25, F26 à la bordure orientale du Lom et par les failles F5, F9, F10 à l'Ouest, semblent avoir

été repris par les accidents tectoniques F1, F2, F3, F4, F7, F8, F12, F23, ponctués par la zone de cisaillement Bétaré-Oya (BOSZ).

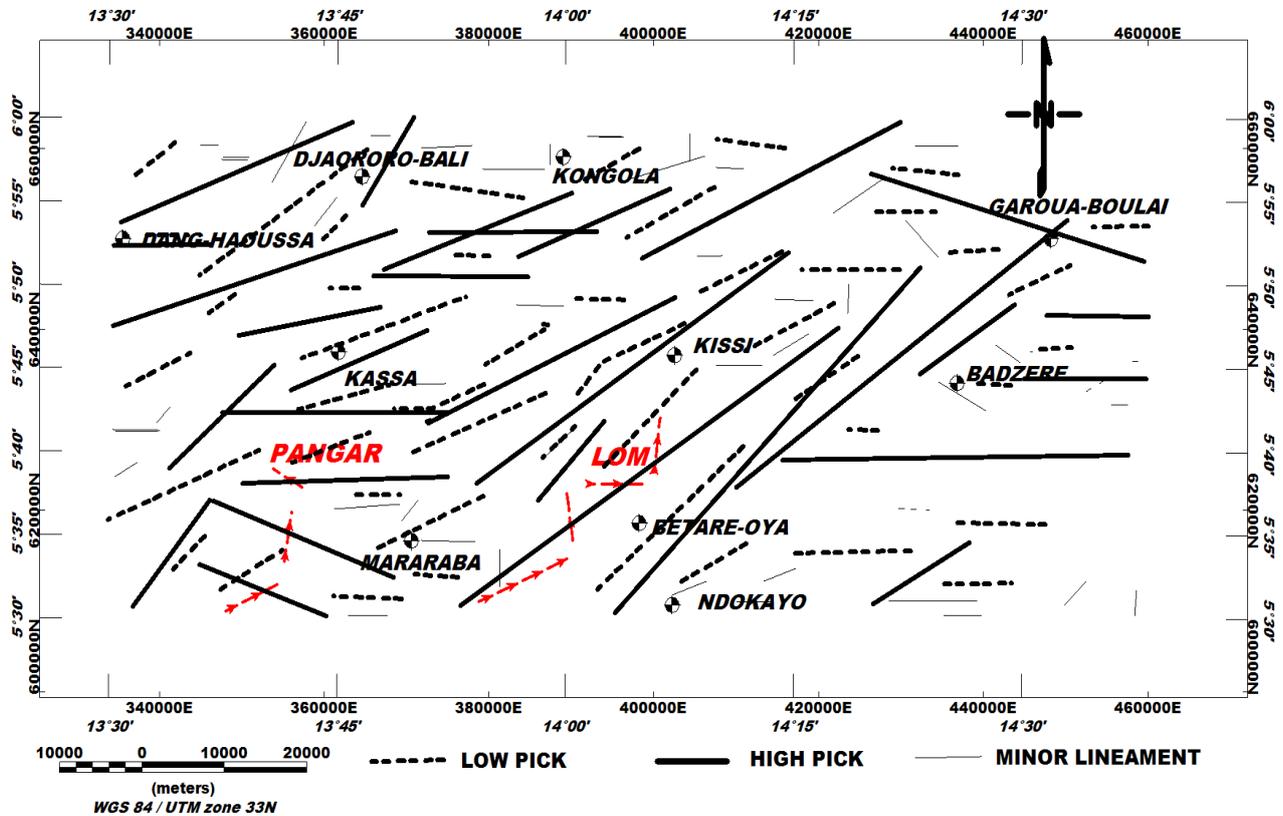
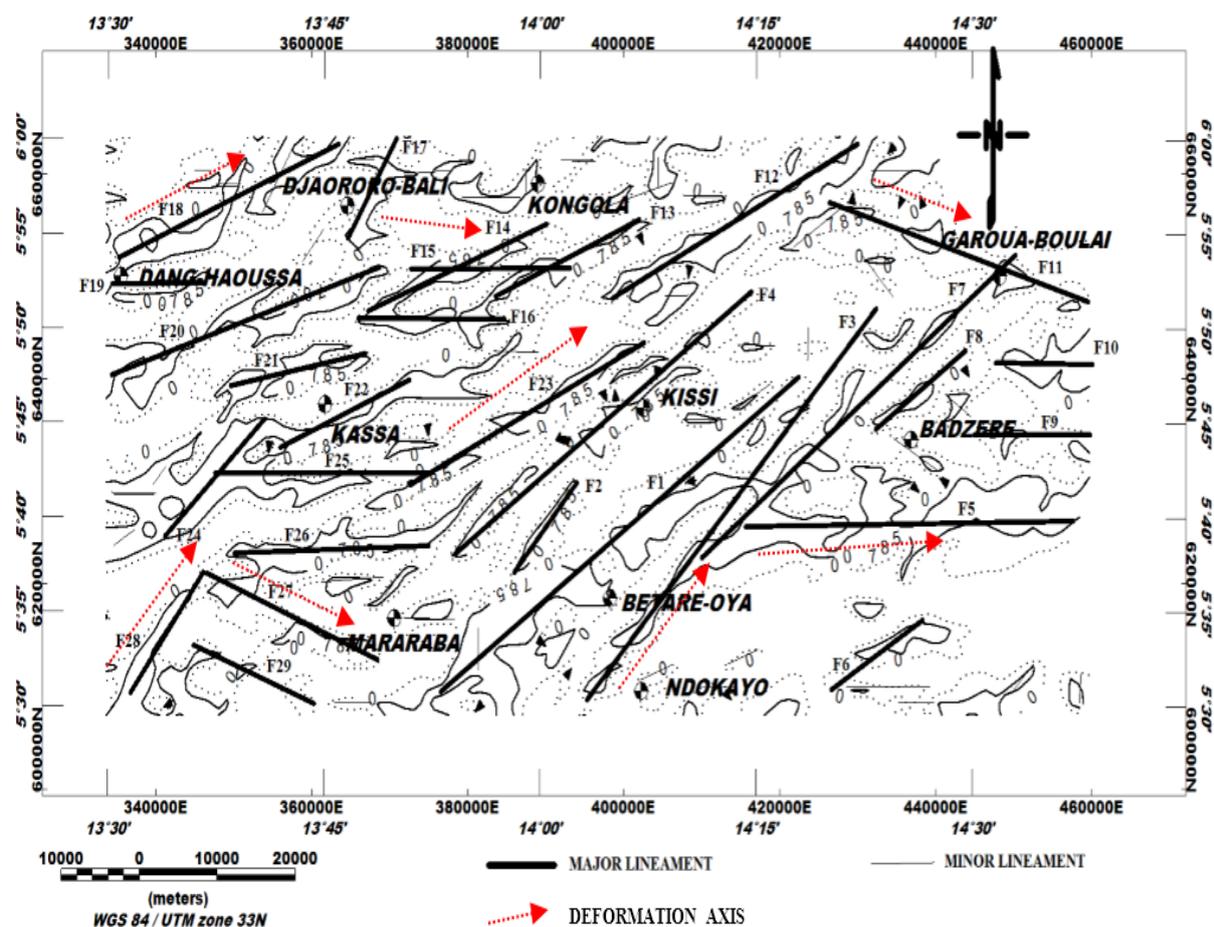


Figure 21 : Carte structurale de la zone d'étude. En rouge nous avons les cours d'eau majeurs de la zone d'étude.

Le même phénomène se produit à l'extrême ouest de la zone d'étude autour de Dang Haoussa et Mararaba avec les accidents ENE-WSW (F13, F14, F18, F20, F21, F22) et NW-SE (F27, F29) respectivement. Ces écarts suggèrent le passage de failles de cisaillement. Les structures de courbure (type II) correspondant aux foliations induisent l'essentiel du réseau de failles majeures présent dans la région de Bétaré-Oya. Afin de confirmer les résultats obtenus par la dérivée d'inclinaison, nous appliquons la méthode de déconvolution d'Euler.



**Figure 22 :** Carte des failles majeures superposées aux contours des angles d'inclinaison. Sur cette carte on observe les grands axes régionaux de déformations (NE-SW, E-W, ENE-WSW et NW-SE) ainsi que les failles associées (F1 à F29).

#### 2.4. Extension 3D des anomalies

En superposant les contours nuls de l'angle d'inclinaison de la carte résiduelle, on obtient la figure 23. L'hétérogénéité du socle observée montre l'existence des mouvements ayant affecté les formations souterraines. Le resserrement crustal profond des roches volcano-clastiques aux alentours de Betaré - Oya confirme que le site est affecté par la tectonique de cisaillement (Soba, 1989), provoquant des failles profondes et peu profondes. Le contact entre les roches granito-gneissiques et les schistes de Lom constitue son élément témoin

(Fig. 5). Ces contours délimitant les bords de la source magnétique, leur superposition en profondeur permet donc d'avoir une idée sur la disposition, l'étendue, le pendage et la forme des sources géologiques responsables des anomalies magnétiques observées.

En appliquant les principes mentionnés dans la sous-section 3.3.6, nous avons observé à partir de la carte obtenue (Fig. 23) les faits suivants :

- i)- Une grande hétérogénéité des contacts, qui pourrait signifier que les contacts situés en proche surface pourraient être masqués par ceux situés en moyenne surface ou en profondeur.
- ii)- Il y a des contacts verticaux qui se retrécissent avec la profondeur. Cela pourrait être interprété comme un signe d'amincissement crustal de la source de l'anomalie avec la profondeur.
- iii)- A certains endroits, un déplacement latéral du contact est identifié. Il pourrait suggérer ici, un plongeon de la source dans le sens concerné.

Par exemple, à l'est de Ndokayo, Kassa et au sud-est de Mborguene, plusieurs structures perdent de l'extension en profondeur, prenant la forme d'un cône de révolution basique situé en surface (cercle interrompu).

La présence de ce système de plis à l'échelle régionale, qui contrôle tous les mouvements dans la zone (BOSZ), suggère une interconnexion des structures géologiques crustales par des lignes de failles et des foliations. Ainsi, les éléments structuraux mis en évidence dans cette étude (plis, failles, dykes, etc.) appartiennent globalement à la tectonique panafricaine.

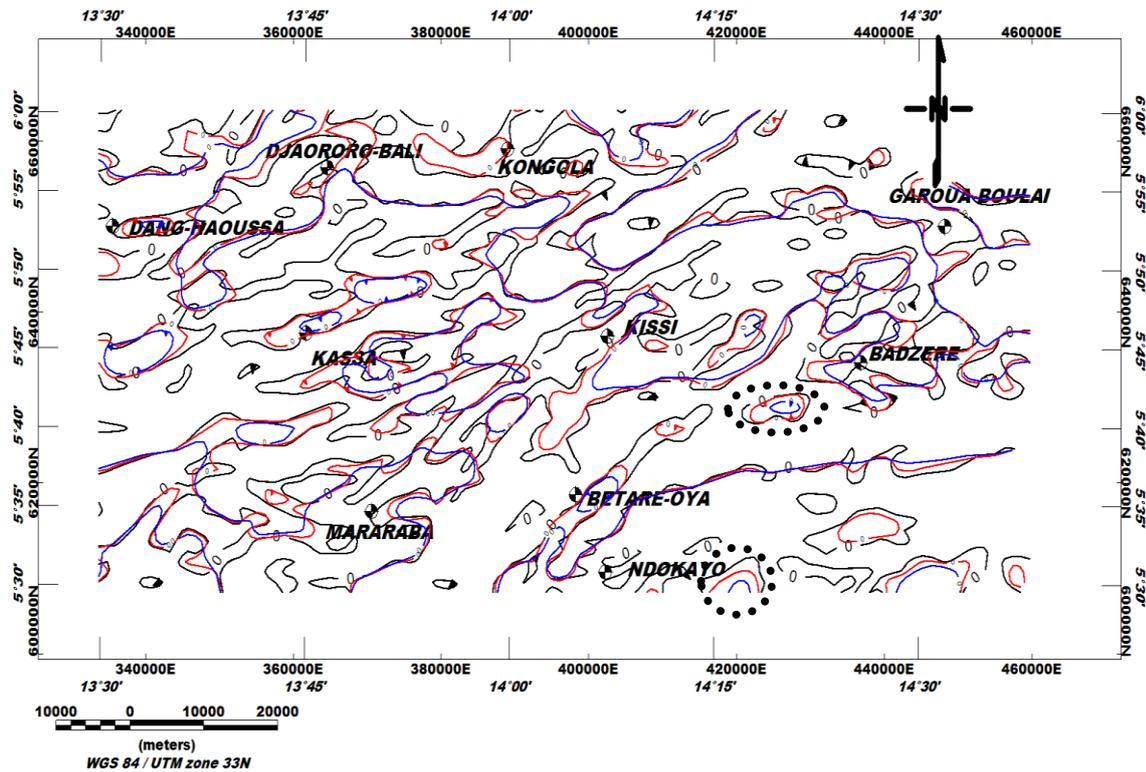


Figure 23 : La superposition des contours ( $\Theta = 0^\circ$ ) de l'angle d'inclinaison de RTE vers le haut s'est poursuivie à 1 km (rouge) et 2 km (bleu).

## 2.5. Analyse quantitative

### 2.5.1. Angle d'inclinaison

L'opérateur d'inclinaison permet de déterminer facilement la profondeur des contacts verticaux (Salem et al., 2007) en estimant la distance entre les contours à angle nul et ceux correspondant aux valeurs  $\pm 45^\circ$  (Fig. 22). Nous avons déterminé que l'intervalle de profondeur moyen varie de 1 à 3 kilomètres pour les principaux linéaments.

### 2.5.2. Déconvolution d'Euler

Les solutions d'Euler nous ont permis de vérifier la position des contacts obtenus par la méthode de l'angle d'inclinaison ainsi que leur profondeur.

La superposition de la carte structurale avec les solutions d'Euler nous a permis de délimiter les failles profondes et superficielles, les dykes et les veines ; et les lignes tectoniques établies par des études géologiques antérieures (Gazel et Gérard, 1954). Ces résultats ont été comparés avec ceux obtenus de la méthode de l'angle d'inclinaison (Fig. 24).

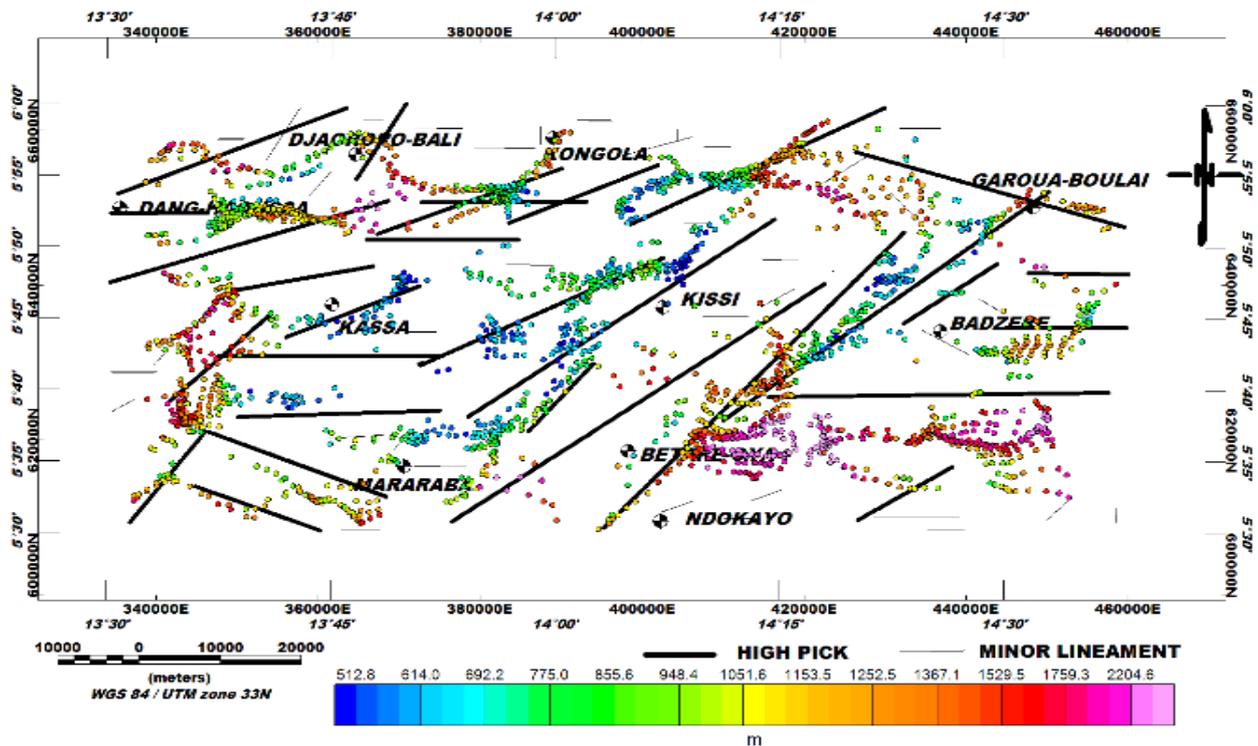


Figure 24 : Solution d'Euler (N=1 ; W=25 ; Z=10%).

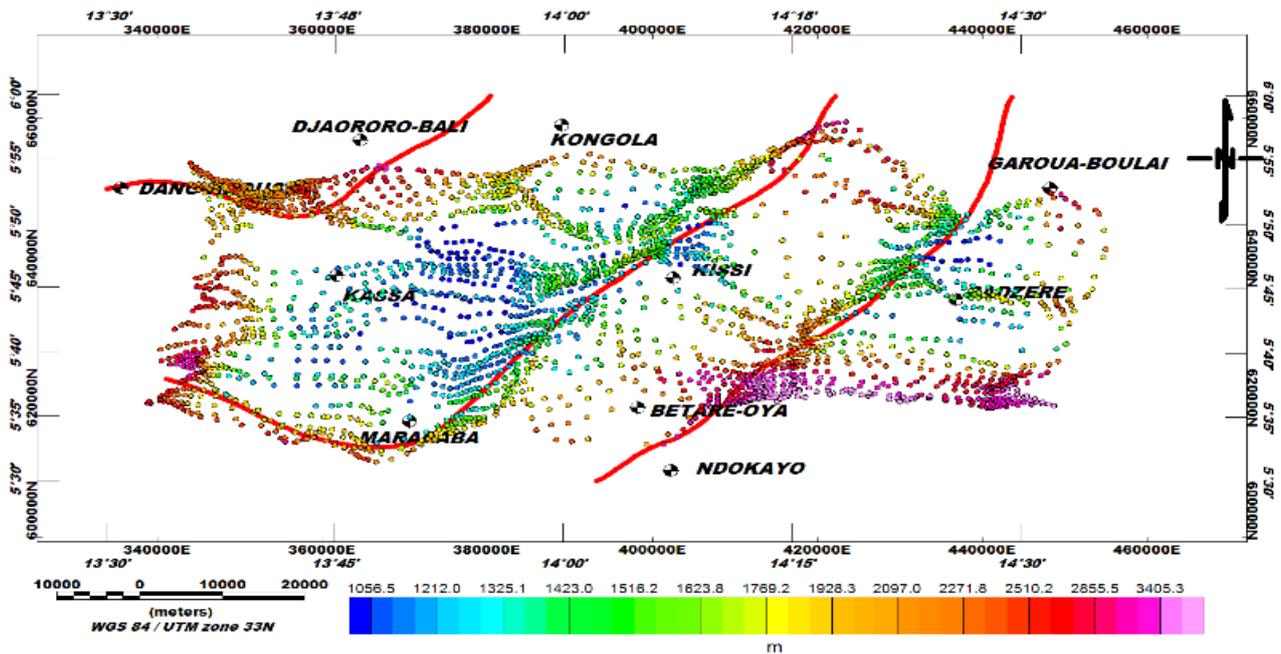


Figure 25 : Solution d'Euler (N=2 ; W=20 ; Z=10%).

Les cartes d'Euler ci-dessus permettent une étude comparative avec les résultats obtenus à partir de la dérivée de l'angle d'inclinaison. Ils permettent également de confirmer les lignes tectoniques de la zone (en rouge) mises en évidence dans les travaux de Gazel et Gérard, (1954) et d'estimer leurs profondeurs.

Sur la carte des solutions d'Euler, nous avons parfaitement distingué les limites des corps intrusifs et des failles plus profondes (tableau 4). Sur ces cartes, on observe cinq directions principales des structures à savoir : NE-SW ; ENE-WSW ; E-W ; NW-SE ; N-S (Fig. 25). De plus, les contacts verticaux sont bien visibles sur la carte des solutions d'Euler et s'étendent sur une longueur de 15 km.

Les accidents les plus profonds sont principalement orientés NE-SW à E-W avec des profondeurs de plus de 3500 m et sont bien localisés aux limites Est dans la série du Lom et la zone de contact des gneiss de Badzéré et autour de la faille Est de Bétaré-Oya. Au sud-ouest de la carte, à Mararaba, les solutions d'Euler permettent de détecter des failles approximativement NW-SE résultant de

la ligne tectonique mise en évidence (Fig. 24) et dont les profondeurs sont estimées à 3000 m. On obtient des profondeurs allant de 0,5 à 3,6 km.

**Tableau 4 : Principaux défauts de la série du Lom. Ce tableau récapitulatif est obtenu après comparaison des résultats de la méthode de déconvolution d'Euler et de la dérivée de l'inclinaison.**

<b>Failles</b>	<b>Directions</b>	<b>Pendages</b>	<b>Profondeurs (km)</b>
F1	N56°E	Vertical	3,6
F2	N44°E	NW	2,1
F3	N44°E	NE	2,9
F4	N56°E	Vertical	1,3
F5	N90°E	Vertical	2,6
F6	N60°E	NE	2,1
F7	N56°E	Vertical	2,9
F8	N56°E	Vertical	1,6
F9	N90°E	Vertical	2,3
F10	N90°E	Nord	3,5
F11	N107°E	NW	2,6
F12	N65°E	NW	3,5
F13	N65°E	Vertical	1,5
F14	N70°E	Vertical	2,5

F15	N90°E	Nord	2,3
F16	N90°E	Nord	1,2
F17	N32°E	Vertical	2,3
F18	N70°E	Vertical	2,6
F19	N90°E	NW	2,6
F20	N70°E	Vertical	3,6
F21	N80°E	NW	3,6
F22	N65°E	Vertical	1,5
F23	N65°E	Vertical	2,3
F24	N47°E	Vertical	3,6
F25	N90°E	Vertical	3,5
F26	N90°E	Vertical	1,3
F27	N110°E	Vertical	2,3
F28	N40°E	Vertical	2,3
F29	N110°E	Vertical	2,5

### **2.5.3. Modélisation 2.75D**

#### **Profil 1**

Ce profil s'étend sur 48,8 km NW-SE à travers Badzere et Mborguene. Il traverse 6 formations géologiques du NW au SE, à savoir : granite porphyrique, granite à biotite, gneiss embréchites, granite d'anatexie, schistes, biotite et gneiss à muscovite. Les anomalies les plus fortes sont localisées au NW du profil avec une intensité de 177 nT. Le socle obtenu est constitué de granites Anatexis qui sont d'anciennes roches magmatiques formant l'ancien complexe du socle et mis en place durant la première moitié du Précambrien (Fig. 26). Sa profondeur maximale est  $h = 3,608$  km, qui concorde avec les profondeurs obtenues par la convolution d'Euler. Sa susceptibilité est  $S = 0,05$  SI. Au-dessus, on peut observer les gneiss à embréchite ( $S = 0,025$  SI), les schistes volcano-clastiques ( $S = 0,019$  SI). Ce contact entre les roches granito-gneissiques et les schistes de Lom a donc provoqué plusieurs fractures et failles, représentées ici par plusieurs intrusions : granite porphyrique ( $S = 0,029$  SI), gneiss à grenat ( $S = 0,026$  SI), syénites ( $S = 0,035$  SI). Notre modèle est en accord avec les précédentes études géologiques (Gazel et Gérard, 1954 ; Poidevin, 1985 ; Ngako et al., 2003 ; Kouske, 2006) et géophysiques (Koch et al., 2012 ; Owono Amougou et al., 2019). Ces intrusions se sont mises en place lors de l'orogénèse panafricaine (Eno Belinga, 1984) et sont présentes sur notre carte géologique (Fig. 5).

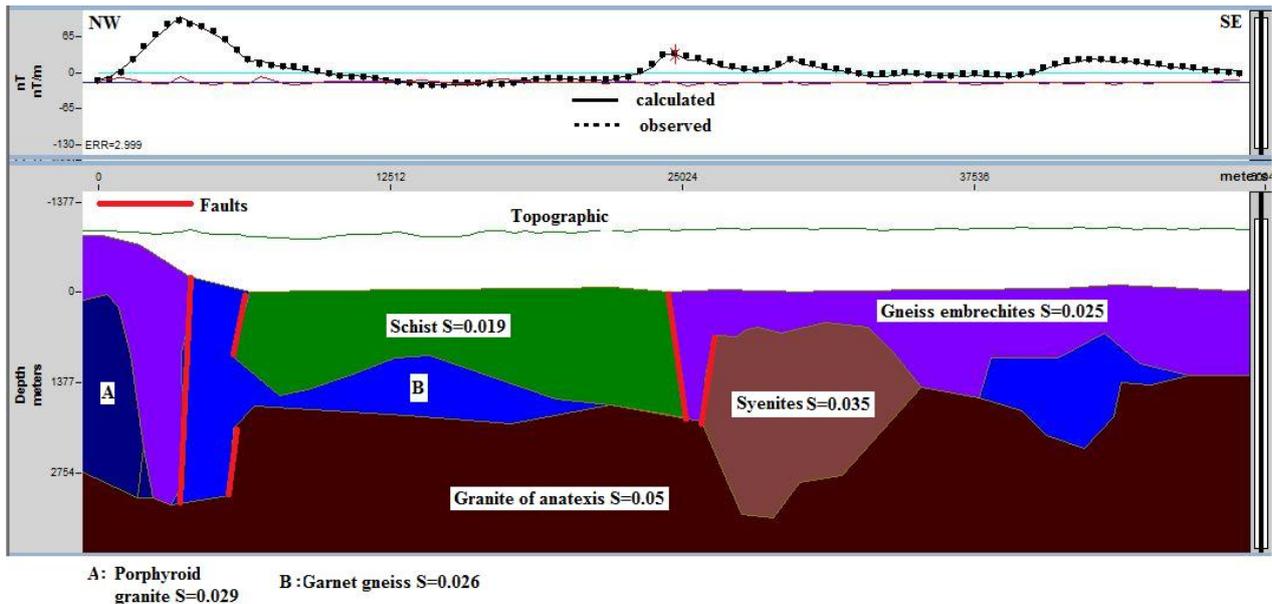


Figure 26 : Modèle 2.75D obtenu à partir du profil P1.

## Profil 2

Le profil 2 s'étend sur 46 km dans la direction NW-SE en passant par Bétaré-Oya et Kissi. Il traverse 5 formations géologiques : gneiss à biotite et à leptinites, quartzite à schistes et à muscovite, schistes, gneiss à biotite et muscovite, granite alcalin. Les anomalies les plus faibles sont localisées au NW du profil avec une intensité de -43,4 nT, tandis que les plus fortes se situent en bordure des schistes de Lom avec une valeur maximale de 65,6 nT. Le sous-sol obtenu est constitué de granites anatexites ( $S = 0,05$  SI), recoupés par des roches fortement magnétisées telles que la syénite ( $S = 0,044$  SI), la rhyolite ( $S = 0,037$  SI) et les biotites anatexiques ( $S = 0,048$  SI). En amont, on peut noter les gneiss à embrechite ( $S = 0,025$  SI) discordants aux schistes volcano-clastiques ( $S = 0,023$  SI) situés au-dessus des roches du métasédiment ( $S = 0,003$  SI). On peut également observer plusieurs intrusions de micaschistes ( $S = 0,0186$  SI), de graphite ( $S = 0,00012$  SI) et de gneiss grenat ( $S = 0,027$  SI). Les couches géologiques obtenues sont situées sous la topographie et la profondeur maximale

est  $h = 3,419$  km (Fig. 27), en accord avec les données issues de la déconvolution d'Euler. Le modèle de ce profil est conforme aux études antérieures (Gazel of Gérard, 1954 ; Eno Belinga, 1984 ; Poidevin, 1985 ; Ngako et al., 2003 ; Kouske, 2006 ; Koch et al., 2012 ; Owono Amougou et al., 2019). On note des intrusions issues de l'orogénèse panafricaine, situé dans notre carte géologique (Fig. 5). La figure 25 montre clairement les directions tectoniques qui dominent tous les mouvements souterrains de la zone d'étude et leurs profondeurs allant de 1 à 3,4 km.

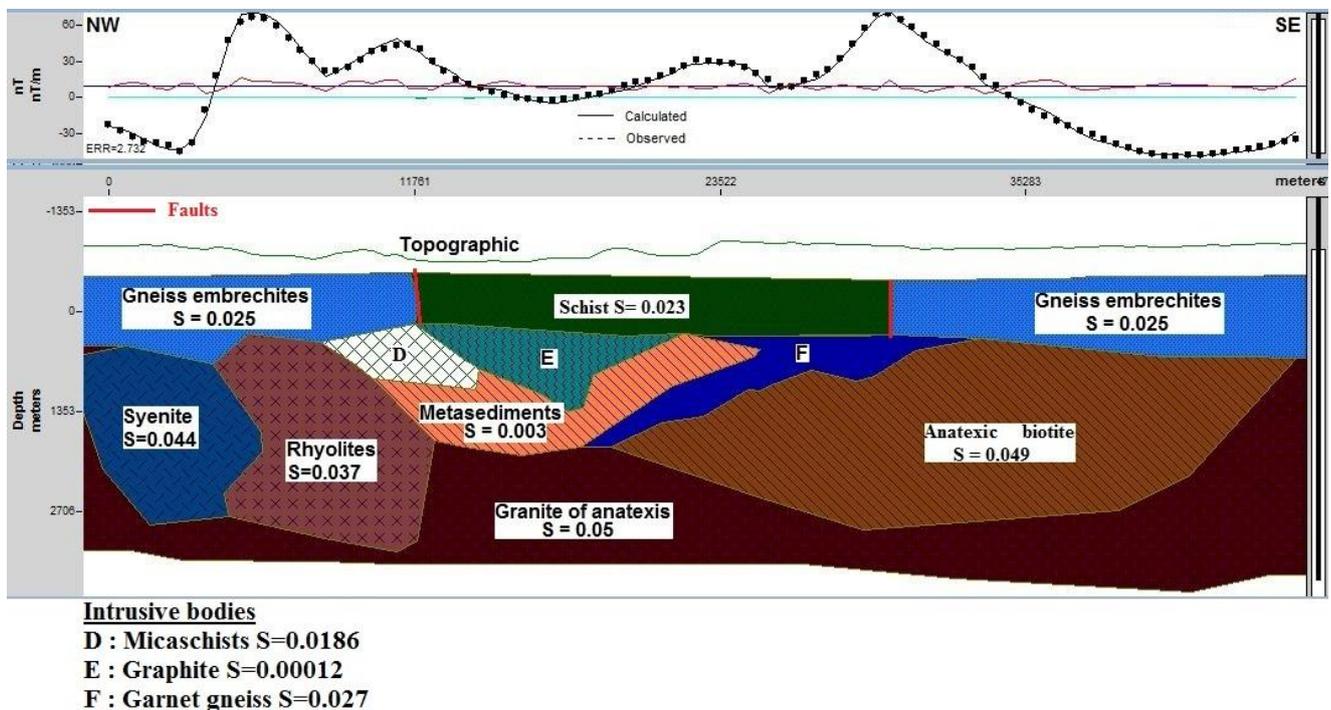


Figure 27 : Modèle 2.75D obtenu à partir du profil P2.

## 2.6. Conclusion partielle

Les nouvelles techniques d'analyse ont été appliquées sur des données aéromagnétiques pour délimiter les structures souterraines. Les résultats obtenus mettent en évidence les axes de compression, de pliage et de cisaillement ainsi

que, les veines mylonitiques (les veines sont à l'échelle de l'affleurement) de plusieurs kilomètres de long et orienté NE–SW. Les paramètres structuraux régionaux et locaux de la zone sont caractérisés par des failles majeures et d'autres éléments structuraux orientés principalement suivant les directions NE–SW, NW–SE, ENE–WSW, N–S, et les directions E–W.

Une tendance majeure dans le sens NE-SW matérialise la tectonique dominante qui est le prolongement de la zone de cisaillement centrale du Cameroun (CCSZ) dans la zone d'étude. Plusieurs plis et failles mis en évidence par cette étude sont en corrélation avec des études antérieures tandis que d'autres sont des éléments nouveaux mis en évidences. Les profondeurs des accidents majeurs dans la région ont été estimés entre 1,2 et 3,6 km, et les structures NE-SW sur notre carte structurale sont proposées ici pour une éventuelle exploration aurifère.

Les modèles des profils P1 et P2 nous ont permis de proposer une structuration de la croûte superficielle du Lom qui met en évidence les principales roches et intrusions responsables des anomalies observées (granite porphyritique, gneiss à grenat, syénites, micaschistes, graphite), et l'identification des fractures peu profondes, ainsi que la détermination de leurs profondeurs. On note également que l'angle d'inclinaison couplé à la continuation vers le haut est un outil intéressant pour la modélisation 2.75D.

Malgré les résultats obtenus, certaines limites sont observées concernant l'application de la dérivée d'inclinaison sur les données RTE car, les données RTE utilisées obéissent à l'hypothèse d'une anomalie induite, qui a la même direction que le champ géomagnétique, donné par les modèles géomagnétiques globaux de terrain (IGRF), et la partie rémanente dans la roche qui est à l'origine de l'anomalie semble être négligée. Ceci a suggéré l'usage d'une autre méthode géophysique de prospection qui est la méthode gravimétrique.

### **3. Résultats et analyses des données gravimétriques**

Cette partie est consacré à l'interprétation des données gravimétriques. L'objectif est de caractériser le mieux possible les sources gravimétriques qui sont à l'origine des anomalies observées et de ressortir une corrélation des modèles obtenus avec la synthèse des données géologiques et les résultats issus de l'interprétation d'autres données géophysiques.

#### **3.1. Interprétation de la carte de Bouguer**

De manière générale, la carte de Bouguer (Fig. 28) présente une hétérogénéité de la réponse gravimétrique du socle. Ceci traduit la nature accidentée des couches qui constituent la croûte de notre zone d'étude. On y retrouve des anomalies légères à l'extrême ouest de la zone d'étude, les zones de gradients et d'anomalies moyennes, enfin les zones d'anomalies lourdes au sud-est de la zone d'étude.

La zone de DJaororo-Bali - Kongola est caractérisée par une anomalie minimale de  $-109,4$  mGals d'axe orienté E-W. Cette anomalie suit un contour plus évasé dans sa partie Est que dans sa partie Ouest. Au nord de Dang-Haoussa elle se rétrécit et ceci serait dû à la présence d'une anomalie superficielle à cet endroit mais, qui demeure masquée par la réponse gravimétrique profonde. En observant la carte topographique et géologique, cette anomalie peut s'expliquer par le processus de compensation isostasique et serait le résultat d'un amincissement de la croûte dû à la présence à cet endroit de massifs granitiques et gneissiques tels que les granites porphyroïdes et les gneiss à biotite et à amphibolite.

Au sud de Dang-Haoussa on retrouve une anomalie légère d'amplitude minimale  $-109,4$  mGals, orientée N-S. On observe des contours filiformes et allongés, qui seraient dûs au fossé d'effondrement que l'on retrouve le long du

cours d'eau Pangar dans les granites à biotite sur la partie superficielle de la croûte de la zone d'étude.

Au nord de Kassa on note une zone de gradient d'amplitude variant entre -100 à -88,7 mGals, dont les contours traversent toute la zone d'étude jusqu'au sud de Garoua-Boulai. Elle marque la signature gravimétrique régionale de roches granitiques profondes présentes en ce lieu.

À l'ouest de Bétaré-Oya jusqu'au nord de Garoua-Boulai, on note quelques anomalies légères et moyennes d'amplitudes comprises entre -103,9 et -92 mGals. On identifie des contours circulaires et semi-circulaires orientés NE-SW pour certains. Ces anomalies seraient dues aux schistes volcano-clastiques avec dépôt d'or appelés schistes du Lom. A Kissi on observe des anomalies circulaires d'amplitude maximale -84,7 mGals et -90,2 mGals plus au Nord due aux intrusions de massifs granitiques dans les schistes du Lom. Ces anomalies demeurent masquées par les structures régionales (Kankeu et al., 2009 ; Nyaban et al., 2021).

Dans la zone de Mararaba, on note plusieurs anomalies lourdes orientées N-S, NW-SE et NE-SW d'intensité maximale -84,7 mGals et plusieurs anomalies moyennes de forme arrondie orientées N-S et E-W d'intensité variant entre -99,3 et -90,2 mGals. Ces anomalies seraient dues à des failles de sub-surface créées par le contact entre les roches granito-gneissiques et les schistes de la série du Lom (Kankeu et al., 2009 ; Nih Fon et al., 2012, Nyaban et al., 2021). Ces anomalies demeurent masquées par la réponse gravimétrique régionale.

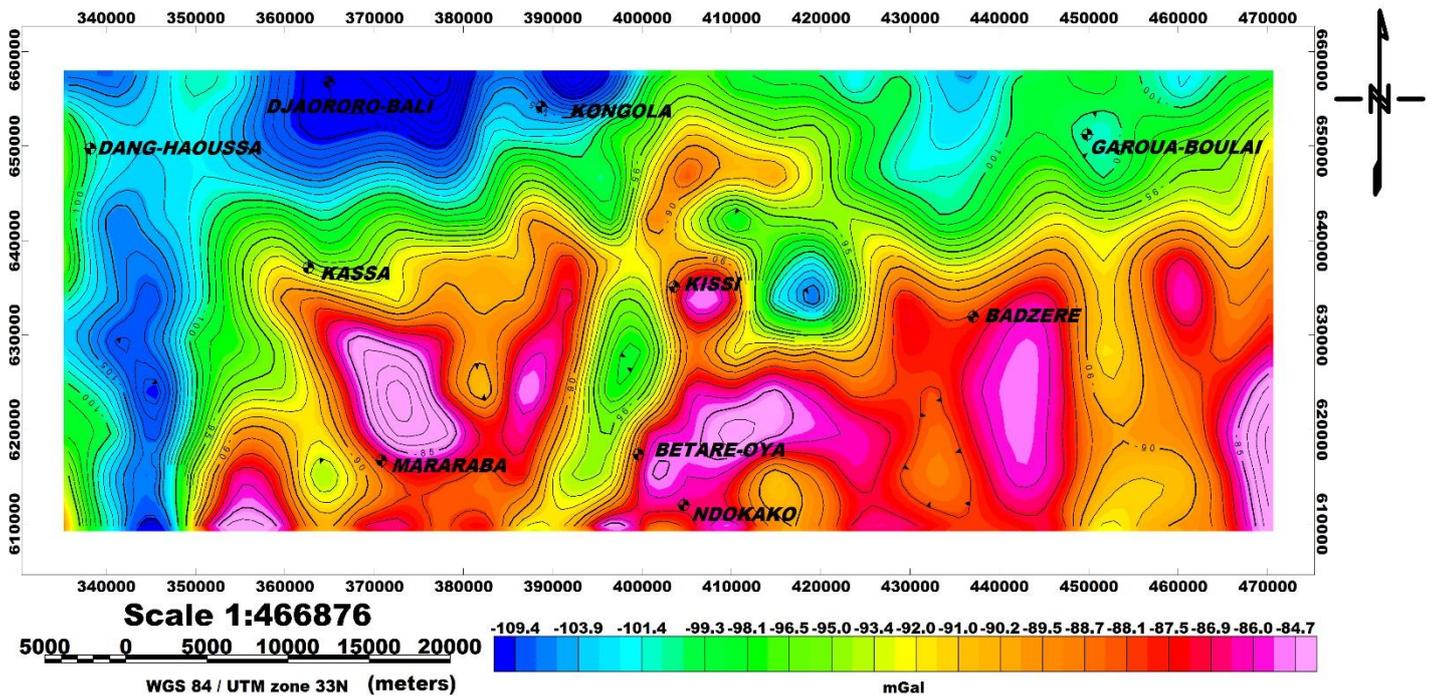


Figure 28 : Carte d'anomalie de Bouguer.

A l'est de Bétaré-Oya et au sud-est de Badzéré, on observe trois anomalies lourdes E-W à N-S, d'amplitude maximale -84,7 mGals. Elles seraient dues aux foliations magmatiques profondes créées par des volcanismes anciens tels que les roches ignées basiques de fortes susceptibilités magnetiques mises en évidence par les travaux de Nyaban et al., (2021). Ces anomalies masqueraient certaines intrusions à l'est de Ndokayo de formes circulaires et semi-circulaires et d'amplitude moyenne -91 mGals créées par des roches méta-sédimentaires de surface (Fig. 29).

La Figure 29.a présente le relief topographique des anomalies de Bouguer dû aux masses superficielles et profondes directement en dessous de la zone d'étude. Cette carte a été obtenue à partir de la superposition des isogales de Bouguer avec la topographie. De manière générale, lorsqu'on observe cette carte de près, on remarque que les anomalies de Bouguer suivent le réseau orographique et hydrographique.

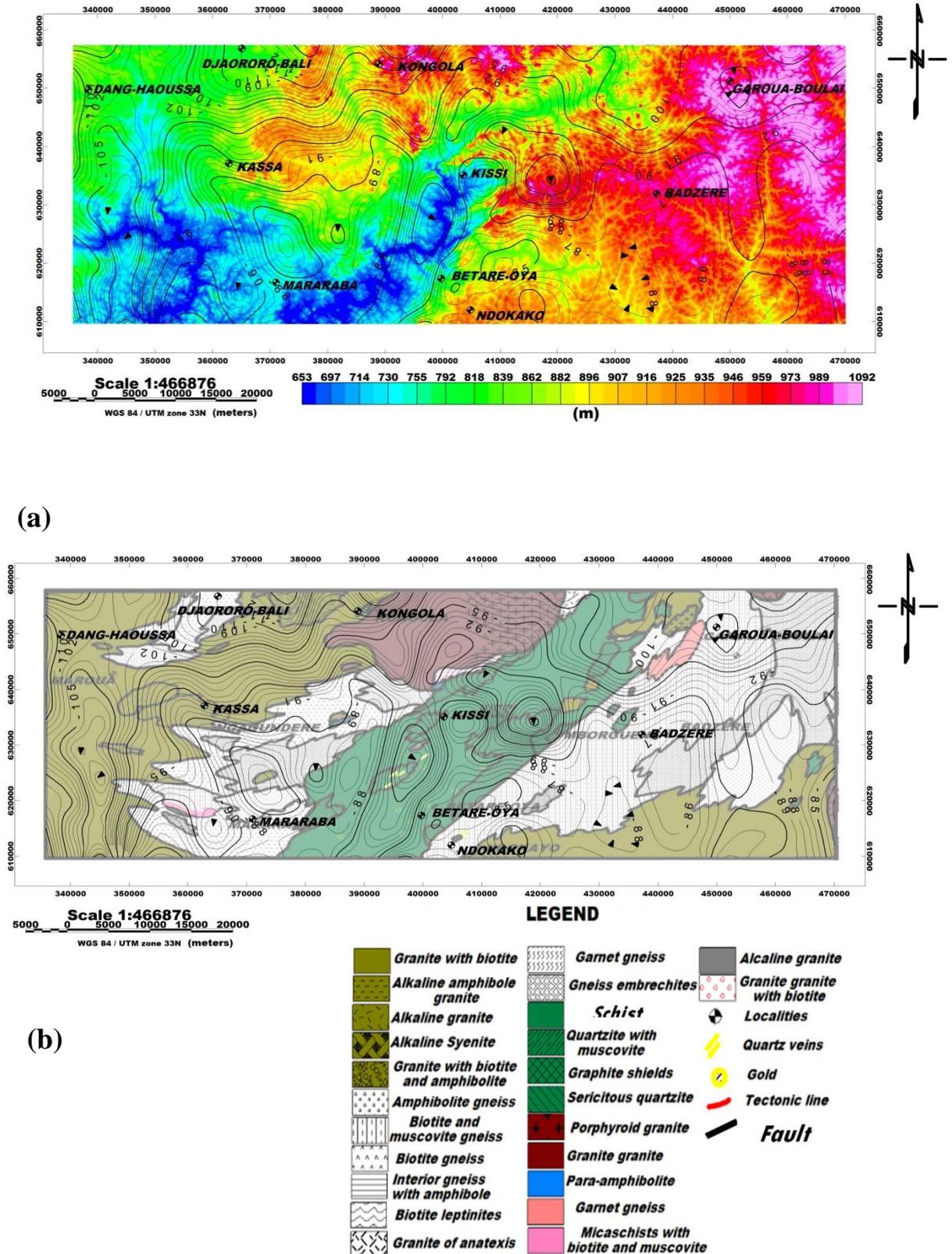
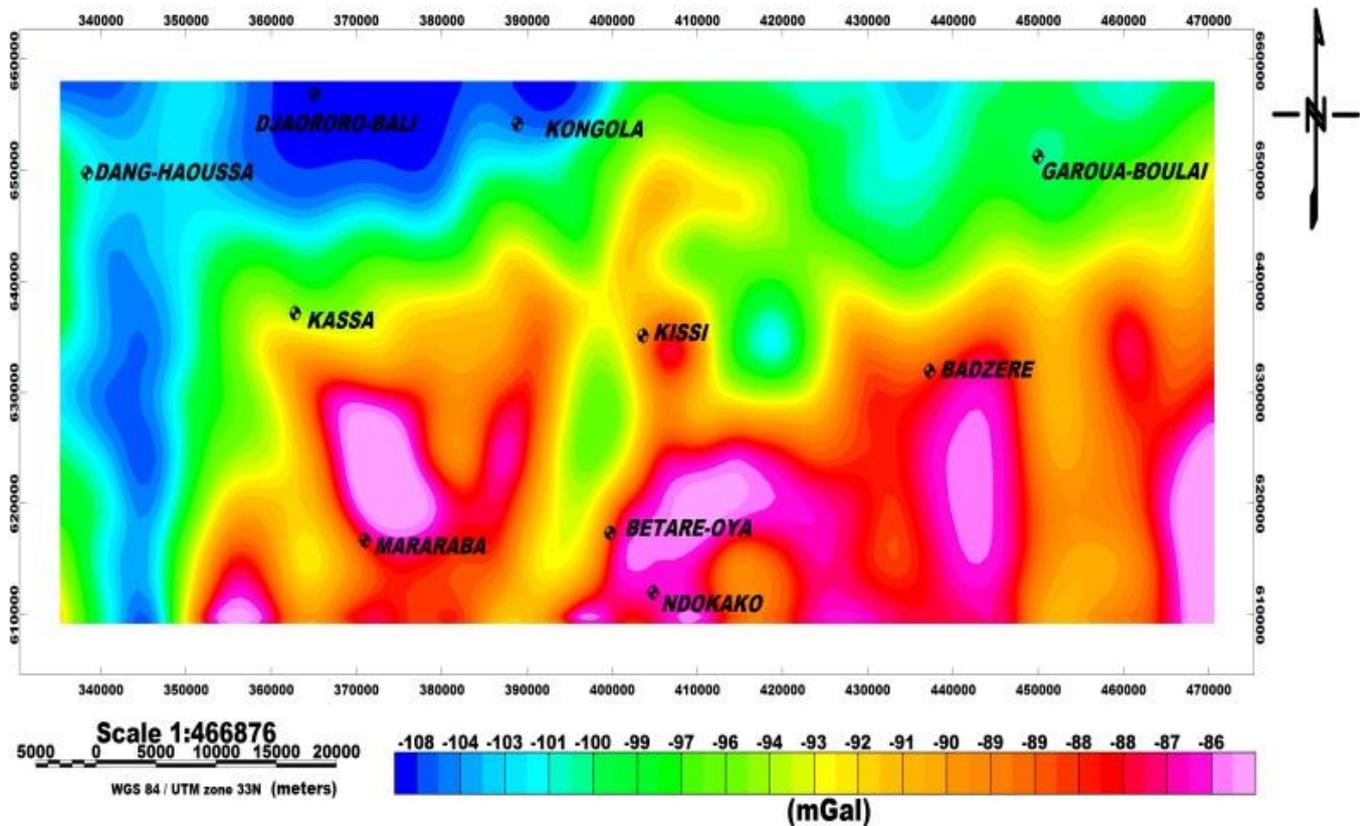


Figure 29 : (a) Carte de superposition des isogales de Bouguer avec la topographie et (b) de superposition des isogales avec la géologie.

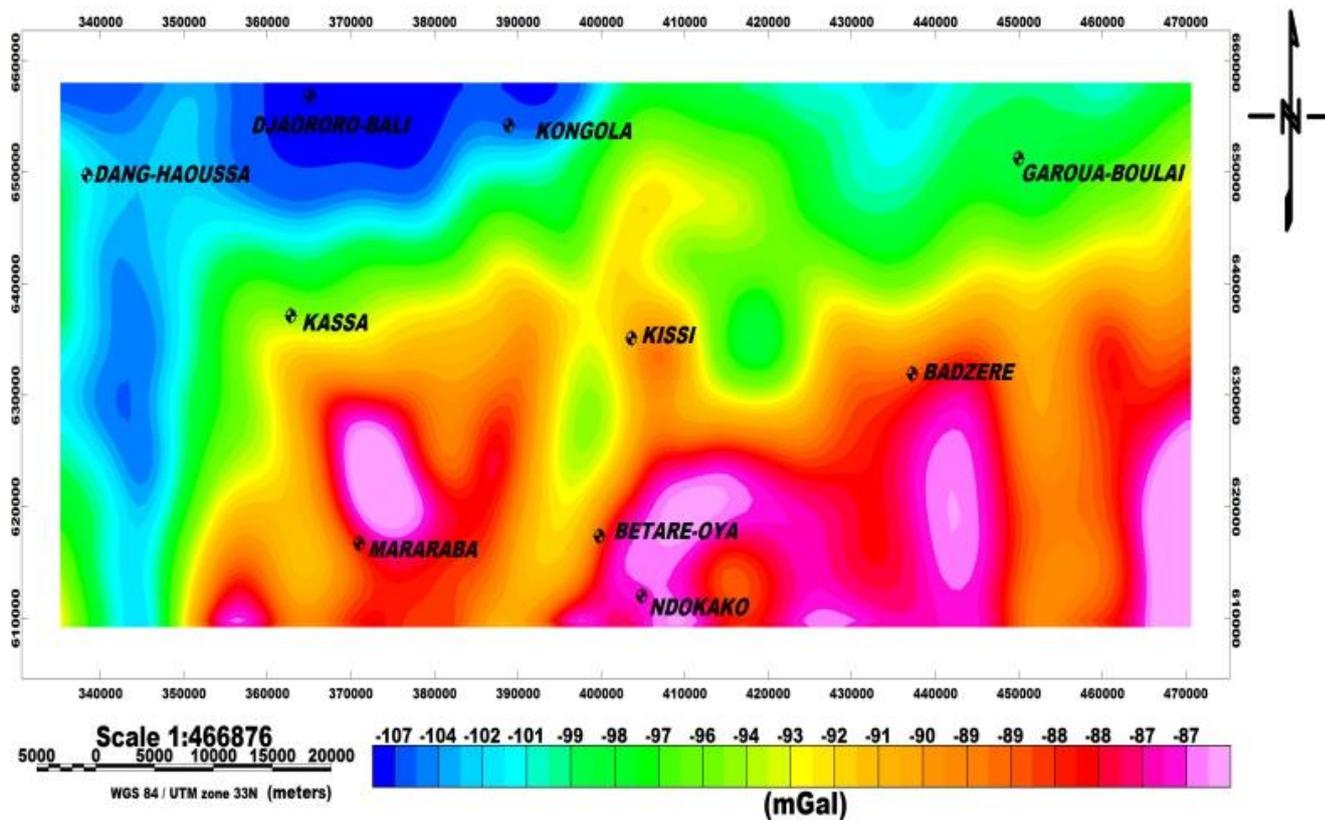
Par exemple, de l'ouest de Bétaré-Oya jusqu'au nord de Garoua-Boulai, les anomalies de légères et moyennes amplitudes comprises entre -103,9 et -92 mGals sont orientées NE-SW suivant le cours d'eau Lom et celles de la zone de Mararaba d'intensité maximale -84,7 mGals, orientées NW-SE et N-S suivant le cours d'eau Pangar. Ce constat peut s'expliquer en partie par les travaux de Soba (1989) et Kouske (2006) qui stipulent que le réseau orographique et hydrographique serait à guidage structural.

### 3.2. Prolongement vers le haut des cartes gravimétriques de Bouguer

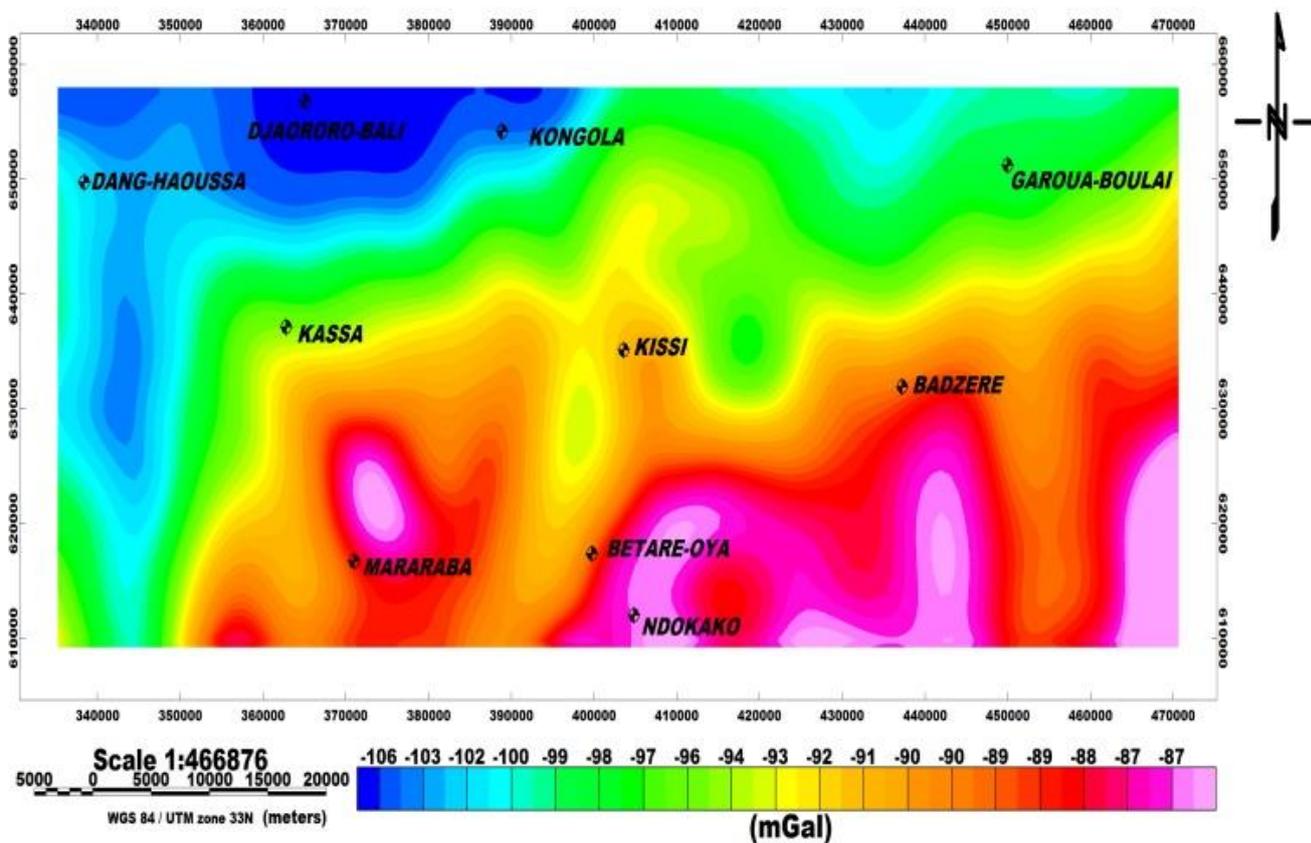
Dans le but d'étudier la continuité des anomalies avec la profondeur et de déterminer la régionale optimale, nous avons procédé au prolongement vers le haut des cartes gravimétriques de Bouguer à 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 km (Figs. 30a, 30b, 30c, 30d, 30e, 30f, 30g).



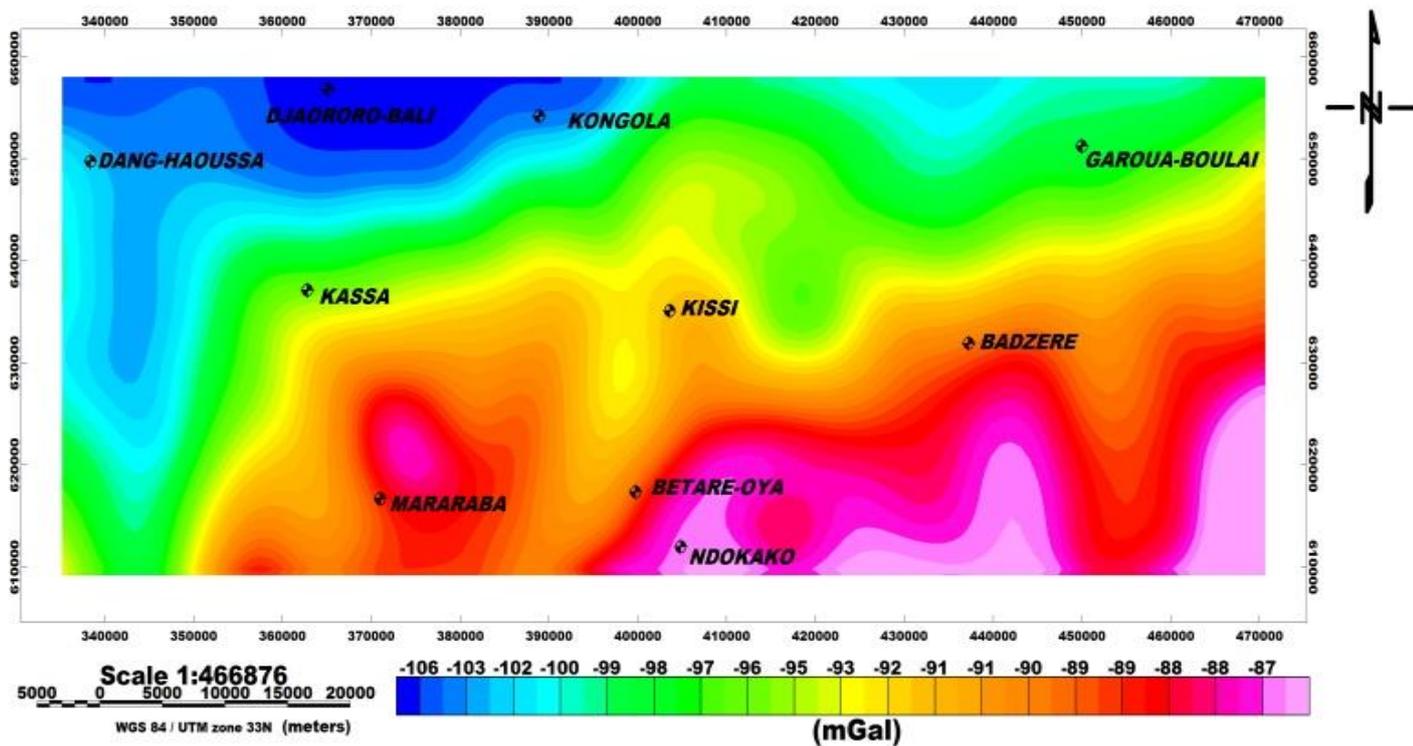
30.a



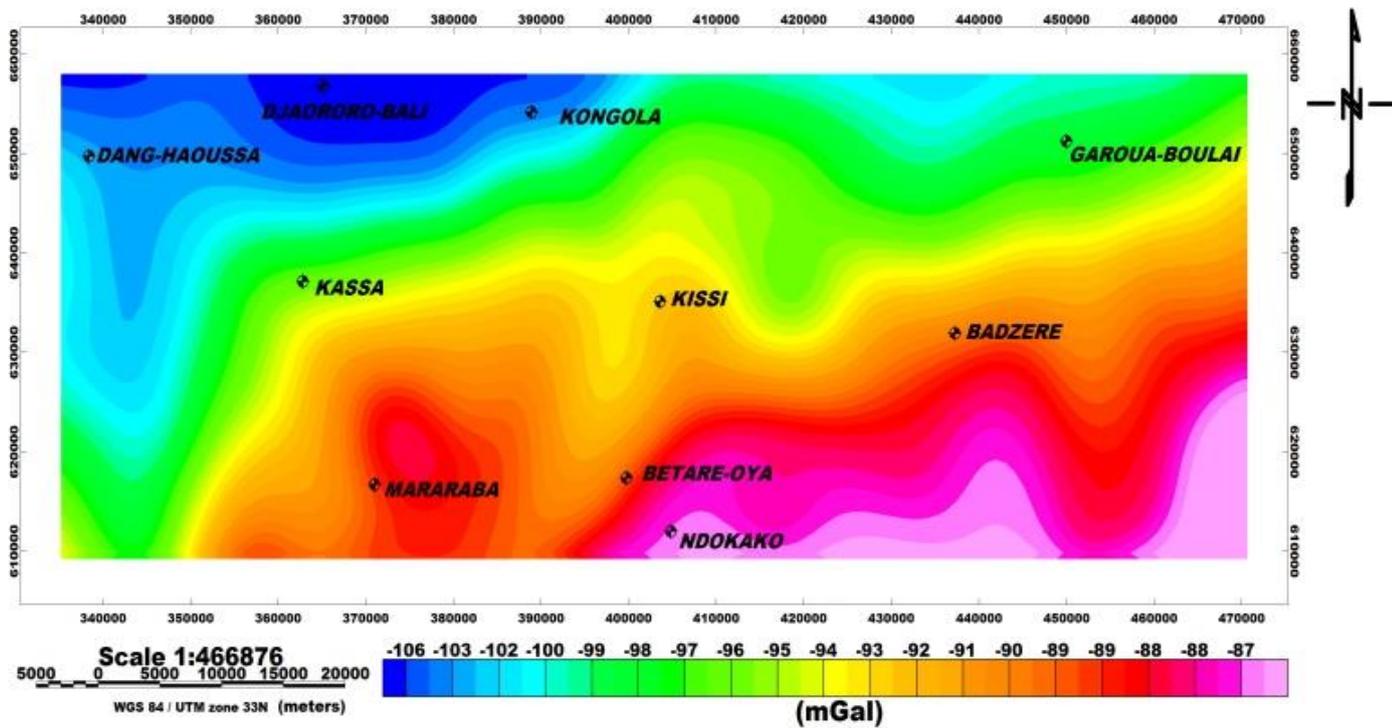
30.b



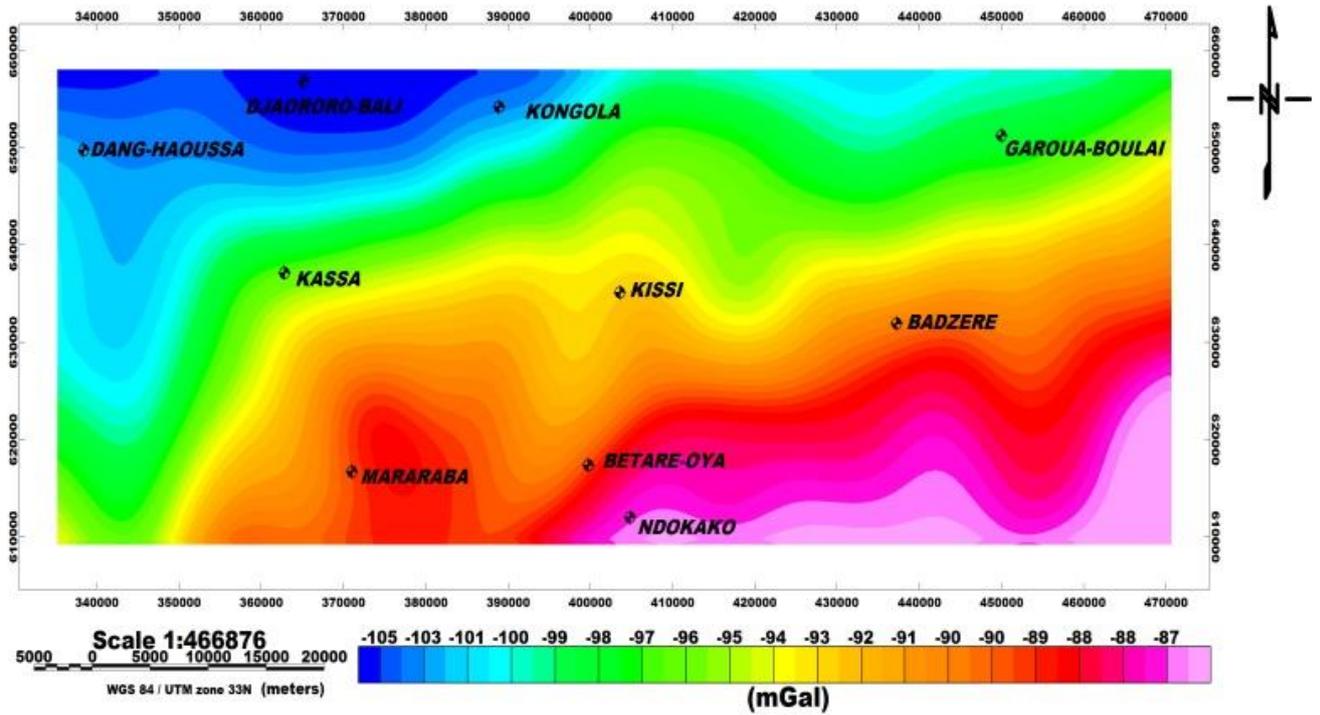
30.c



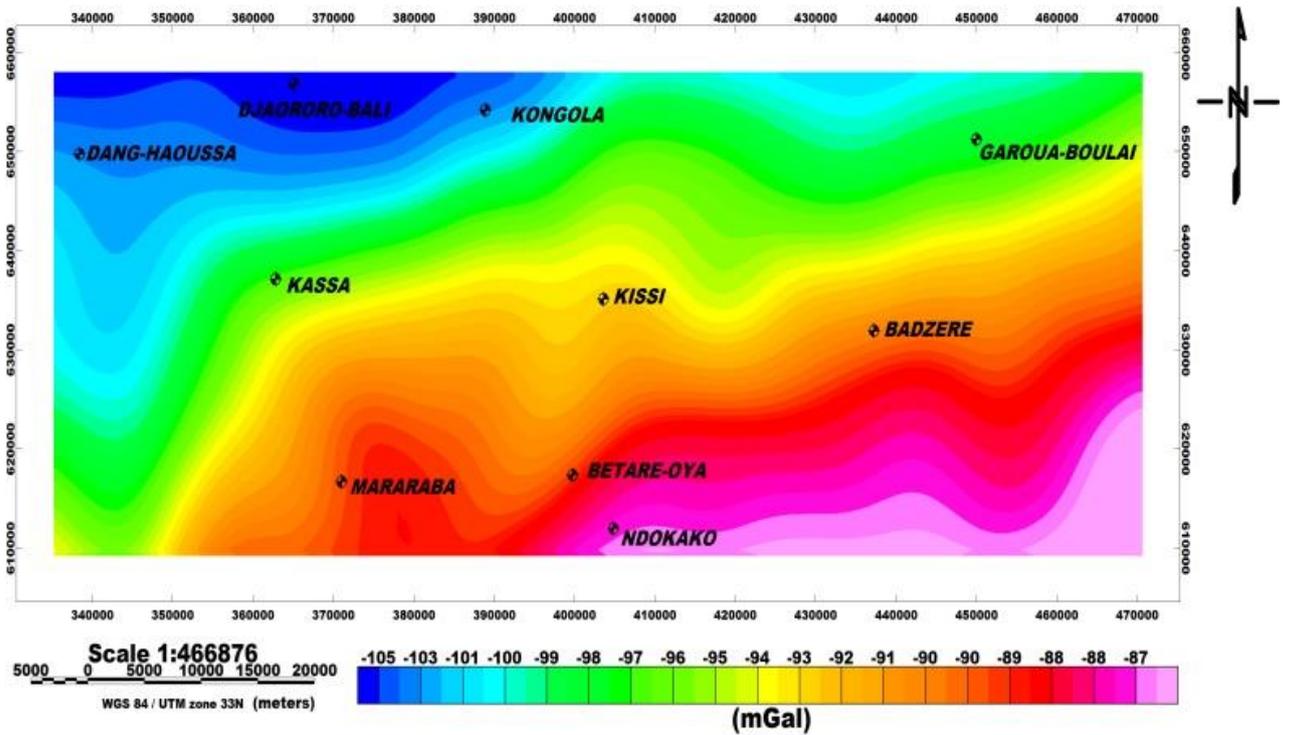
30.d



30.e



30.f



30.g

Figure 30 : Cartes des anomalies de Bouguer prolongées a 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 km.

On observe sur ces cartes une atténuation progressive des anomalies de courtes longueurs d'onde dues aux sources superficielles et l'apparition des anomalies profondes, de très grandes longueurs d'onde (Fig. 30).

Les anomalies les plus légères d'intensité inférieure à -105 mGals de DJaororo-Bali et ses environs sont clairement visibles sur la carte régionale, confirmant ainsi l'hypothèse qu'elles seraient dues à un amincissement de la croûte à cet endroit.

Les anomalies les plus lourdes se trouvent au sud-est de la zone d'étude avec des intensités supérieures à -87 mGals. Elles seraient causées par des foliations magmatiques profondes mises en place pendant le Protérozoïque.

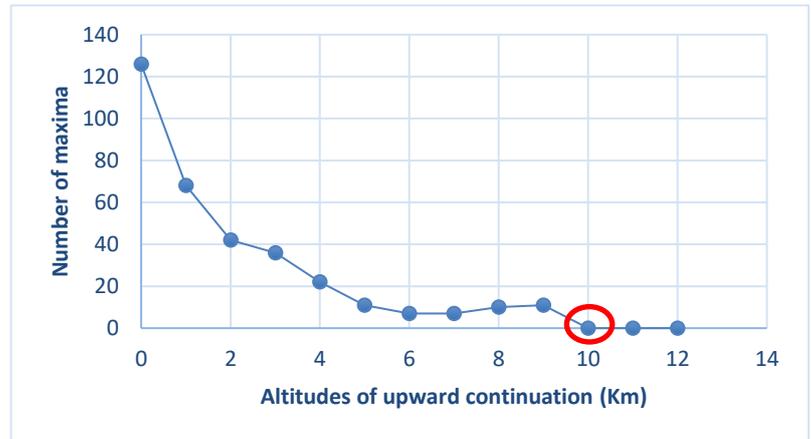
Les anomalies de proche surface qui se trouvent sur les zones de gradients intermédiaires compris entre -100 et -88 mGals ont totalement disparu, preuve qu'elles étaient causées par des sources superficielles.

### **3.3. Interprétation de la carte des données résiduelles**

L'orientation donnée à notre étude est la prospection minière, raison pour laquelle, nous devons isoler la réponse gravimétrique superficielle qui demeure masquée par la densité des roches profondes. Pour cela, nous avons recours à la démarche de Zeng (1989). Ainsi, on constate qu'au-delà de 10 km (Tableau 5) les maximas s'annulent et ne varient plus. Nous pouvons donc l'utiliser comme régionale optimale (Fig. 31). Par soustraction avec la Bouguer, on obtient donc la carte d'anomalies résiduelles.

**Tableau 5 Maxima et altitudes du prolongement vers le haut.**

Nombre de maxima	Altitudes de prolongement vers le haut (Km)
38	0
19	1
14	2
6	3
5	4
5	5
2	6
1	7
1	8
1	9
0	10



**Figure 31 : Nombre d'extrema par rapport à la hauteur de prolongement vers le haut. A partir de  $h = 10$  km (cercle en rouge), le nombre de maxima devient constant et ne varie plus.**

Sur cette carte, nous constatons l'atténuation des anomalies situées à l'est de Bétaré-Oya et de Badzéré, car elles proviennent des masses issues des profondeurs du socle. Cependant on note un réhaussement de l'amplitude des anomalies superficielles sur les schistes du Lom, à l'est de Ndokayo. Au niveau de Mararaba, la réponse des structures faillées apparaît clairement et l'on note

l'apparition de nouvelles intrusions des granitoïdes superficielles qui étaient masquées jusqu'ici par les structures profondes.

C'est le cas par exemple au niveau de Dang-Haoussa où l'on constate l'apparition de nouvelles anomalies lourdes d'amplitudes maximales supérieures à 4,9 mGals. Les zones de limites des corps sont clairement repérables par leur densité nulle sur la carte résiduelle (Fig. 32).

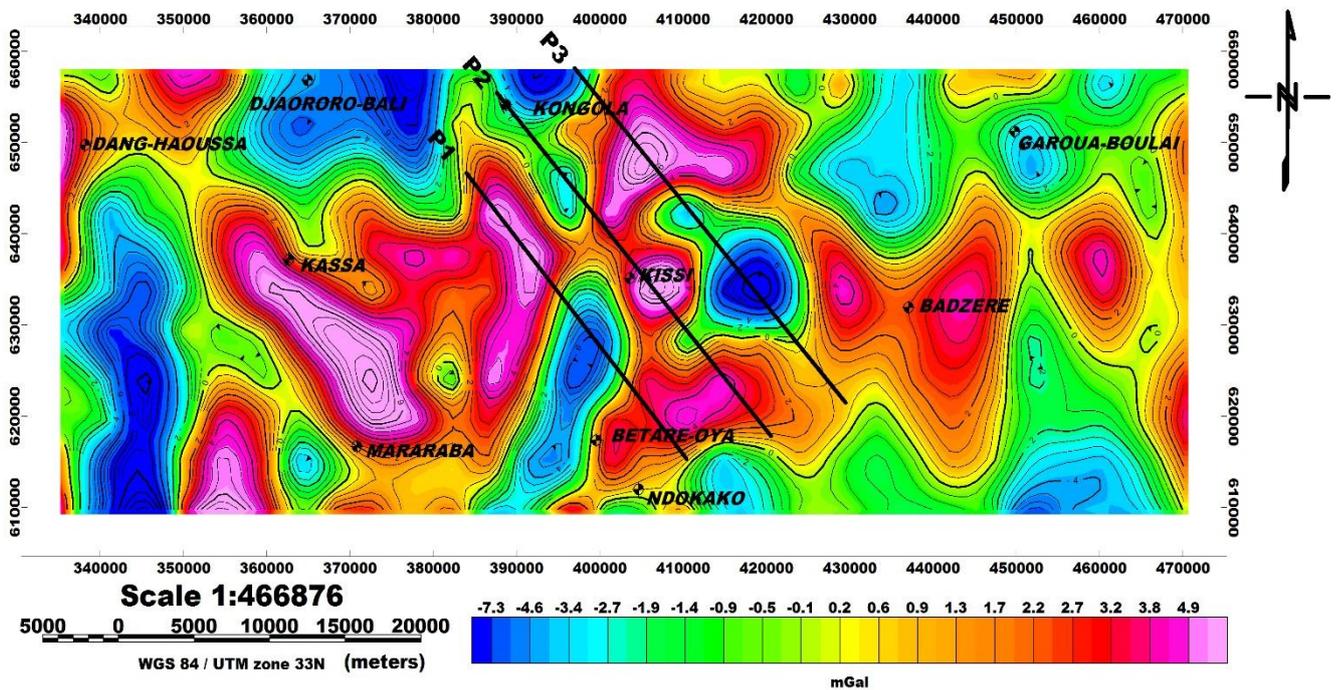


Figure 32 : Carte d'anomalies résiduelles. P1, P2, P3 représentent les profils de modélisation.

### 3.4. Gradient horizontal total des données gravimétriques résiduelles

La gravimétrie joue un rôle important dans l'identification des fractures, leurs limites et leurs ramifications afin de se munir des informations sur la structuration du sous-sol. En effet, ces accidents assimilés ici à des failles résulteraient des contrastes de densité liées aux structures enfouies. Afin de réaliser la cartographie des failles du socle qui affecteraient la surface de la région,

il a été appliqué aux données de la carte résiduelle (Fig. 32) le gradient horizontal associé aux maxima et la déconvolution d'Euler.

La carte ci-dessous (Fig. 33) met en évidence des zones de gradients avec des amplitudes et des formes variées, dominées par les directions ENE–WSW, E–W, NW–SE, N–S, NE–SW, qui correspondent aux contacts lithologiques associés à des failles et celles correspondant à la présence des corps intrusifs tels qu'aux environs de Kongola, à l'est de Kissi et de Bétaré-Oya.

Les failles majeures du Lom orientées NE-SW sont repérables ici au centre de la carte avec des valeurs maximales d'anomalies allant jusqu'à 0,0051 mGal/m. Elles seraient dues au contact entre les roches granito-gneissiques et la série schisteuse du Lom.

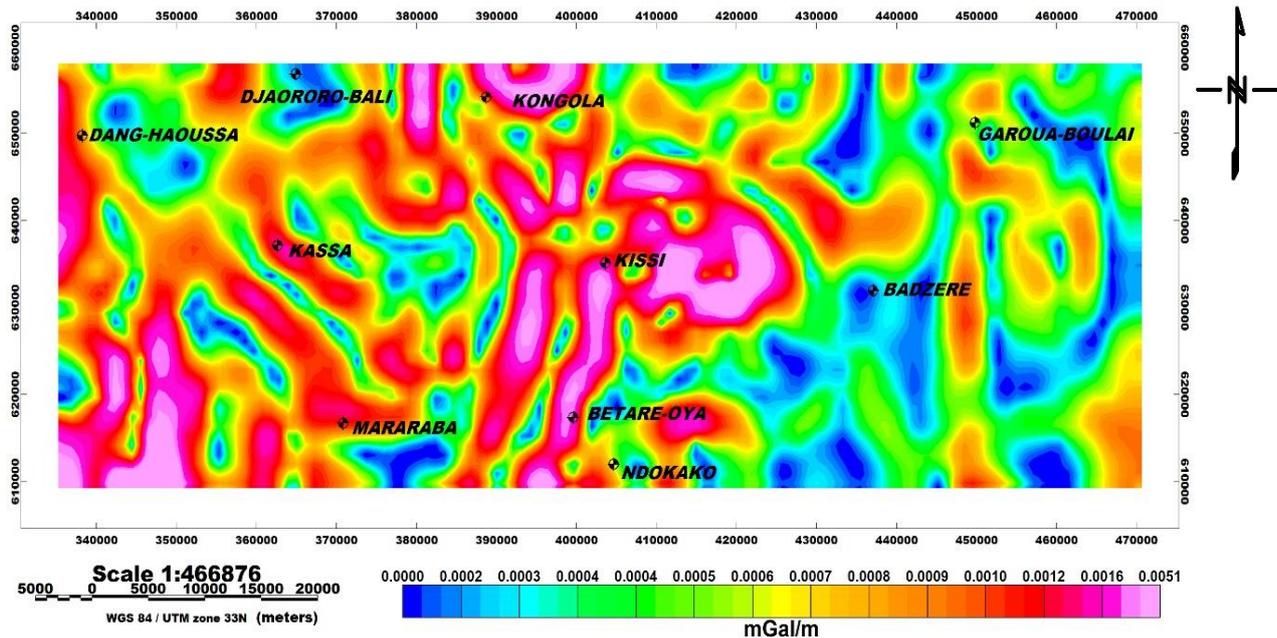


Figure 33 : Gradient horizontal total des anomalies résiduelles.

### **3.5. Superposition des maxima du gradient horizontal des cartes prolongées à différentes hauteurs de prolongement**

Dans la présente étude, nous avons utilisé une technique de localisation automatique des maxima du gradient horizontal basée sur la méthode de Blakely et Simpson (1986). Elle est basée sur l'utilisation conjointe du gradient horizontal et du prolongement vers le haut. Les maxima locaux du gradient horizontal déterminés à partir de la carte résiduelle et de ses prolongements vers le haut à différentes altitudes, permettent de déterminer les différents contacts. En outre, l'examen de la migration des maxima locaux des gradients horizontaux déterminés sur les cartes prolongées vers le haut, permet de préciser le sens des pendages des contacts mis en évidence (Fig. 34). Cette carte permet d'isoler les contacts géologiques associés aux failles ou aux fractures précédemment soupçonnées sur la carte du gradient horizontal et de dresser ainsi la carte structurale issue des données gravimétriques. On met ainsi en évidence les principaux accidents de notre zone d'étude orientés majoritairement ENE–WSW, E–W, NW–SE, N–S, NE–SW. Par ailleurs, l'analyse détaillée de la carte des maxima du gradient horizontal des anomalies résiduelles prolongées à ces différentes altitudes vers le haut, donnent précisément le sens du pendage de ces linéaments. La zone d'étude se caractérise par des linéaments dont le pendage est majoritairement sub-vertical, NW et SW respectivement. La plupart de ses structures se seraient mises en place pendant des événements thermo-tectoniques qui ont affecté le socle de notre zone d'étude lors de la mise en place du Panafricain.

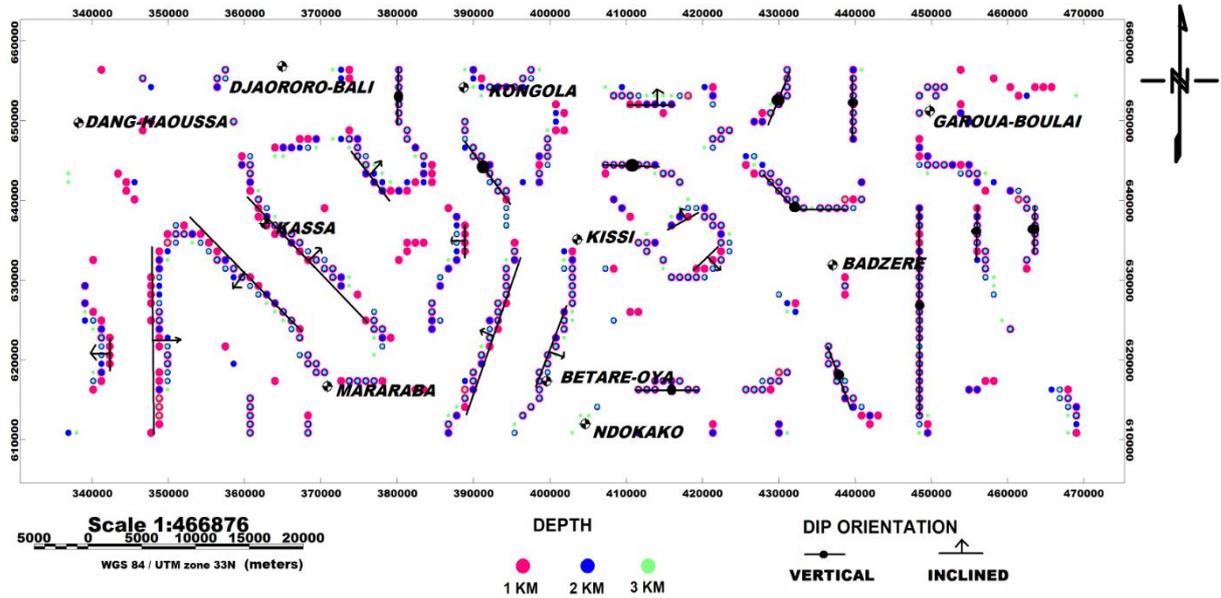


Figure 34 : Superposition des maxima du gradient horizontal des cartes résiduelles prolongées à 1, 2 et 3 km.

Ces directions sont bien en accord d'une part avec celles observées dans l'analyse des données magnétiques, et d'autre part, avec les déformations observées à l'échelle régionale telles que les fractures, les dykes ou les failles. La figure 35 ci-dessous représente la synthèse des linéaments associés.

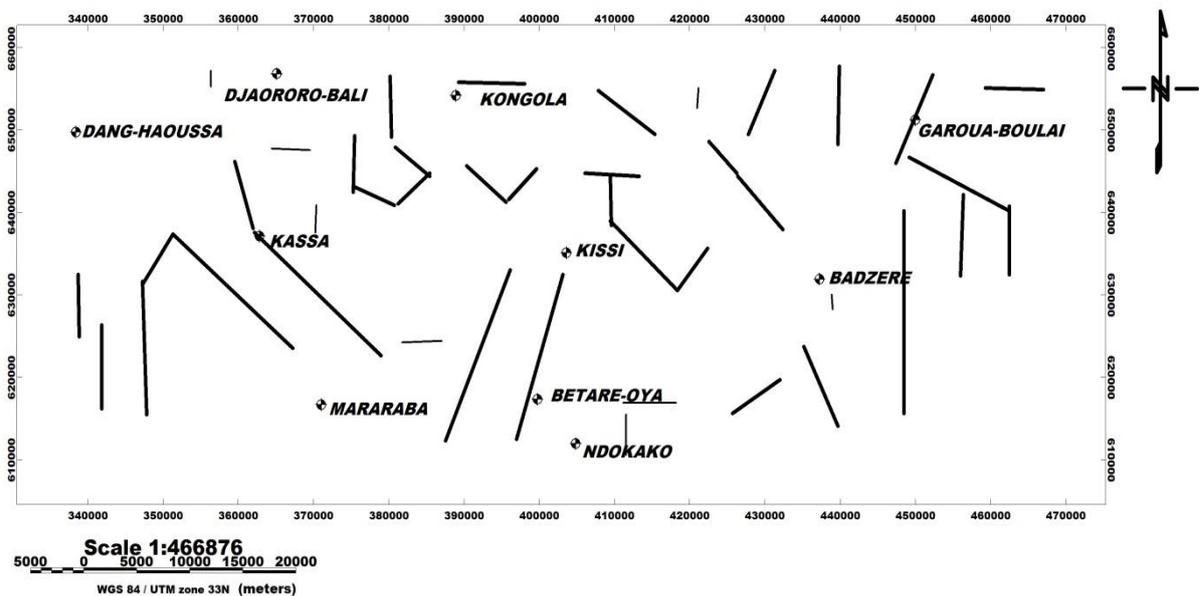


Figure 35 : Carte structurale des données gravimétriques résiduelles.

### **3.6. Déconvolution d'Euler**

Dans le but de confronter les accidents tectoniques mis en évidence par la méthode des maxima du gradient horizontal, nous avons eu recours à la déconvolution d'Euler. La particularité de cette méthode est qu'elle permet d'être situé sur les profondeurs des accidents tectoniques du sous-sol. Sachant que les failles repertoriées (Fig. 35) sont des structures qui affectent la proche surface, la méthode d'Euler a été appliquée à l'anomalie du champ résiduel avec les paramètres suivants :

- un indice structural de  $N= 0,1$  ;
- une fenêtre mobile de  $10 \text{ km} * 10 \text{ km}$  ;
- un pas de tolérance sur estimation de la profondeur  $Z = 15\%$  ;

Nous obtenons ainsi la carte des profondeurs des failles des anomalies résiduelles (Fig 36). L'analyse de cette carte nous permet de ressortir les principales familles de failles mises en évidence par la méthode de superposition des maxima du gradient horizontal total à savoir : les accidents majeurs de notre zone d'étude orientés majoritairement ENE–WSW, E–W, NW–SE, N–S, NE–SW. En particulier au niveau de Bétaré-Oya, les deux failles majeures orientées NE-SW de la série du Lom dues au contact entre les roches granito-gneissiques et les schistes du Lom sont clairement visibles. Le contact semi-circulaire situé à l'est de Kissi dû à l'intrusion de roches granitiques dans les schistes du Lom au niveau des zones de failles, est également représenté. Les profondeurs des structures superficielles repertoriées se situent entre 1 et 4,8 km.

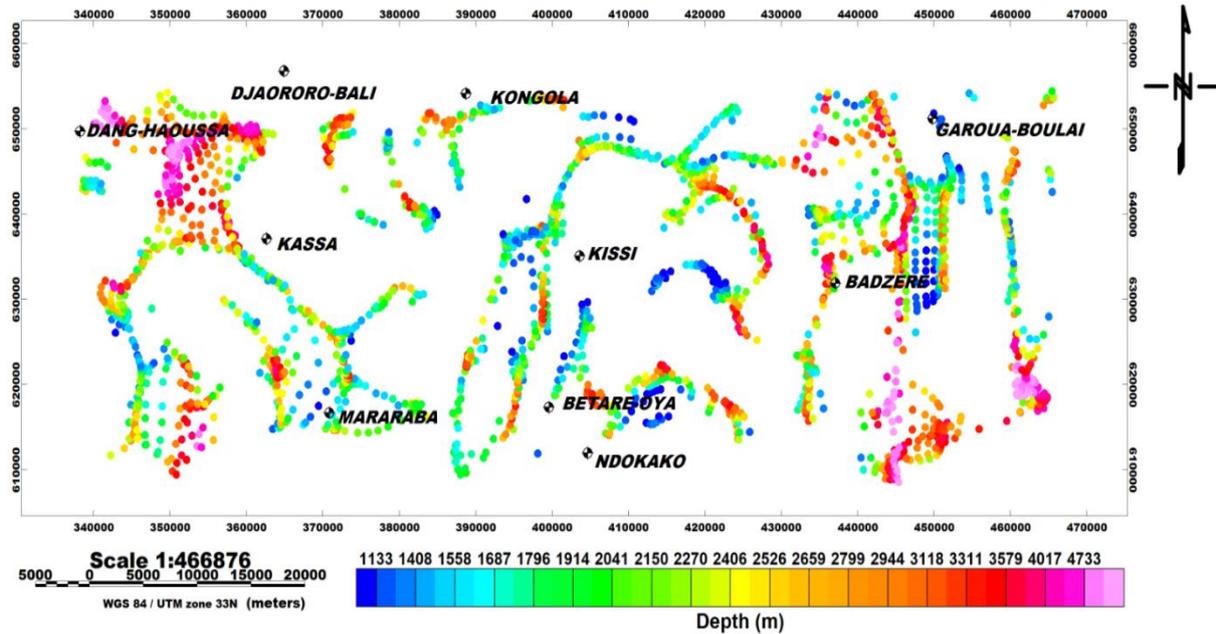


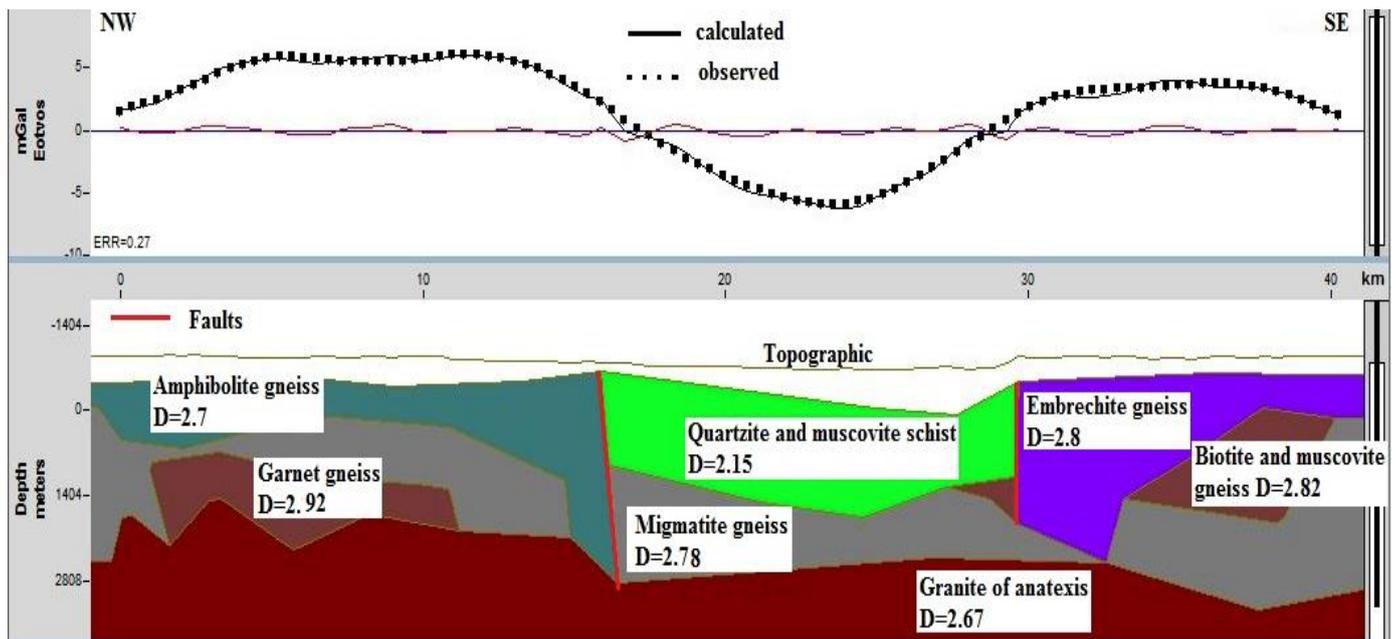
Figure 36 : Carte des solutions d'Euler ( $N = 0.1$  ;  $W=10$  ;  $Z=15\%$ ).

### 3.7. Modélisation 2.75D

#### Profil 1

Le profil 1 s'étend sur 40,8 km dans la direction NW-SE en passant au nord de Bétaré-Oya. Il traverse 4 formations géologiques : gneiss à biotite à leptinites, quartzite à schistes à muscovite, schistes, gneiss à biotite et à muscovite. Les anomalies les plus faibles sont localisées au centre du profil dans la série du Lom, avec une intensité de -6,03 mGals, tandis que les plus fortes se situent en bordure NW des schistes de Lom avec une valeur maximale de 5,98 mGals. Le sous-sol obtenu est constitué de granites anatectiques ( $d = 2,67$ ), au dessus duquel se trouvent des intrusions de roches de fortes densités telles que : les gneiss migmatisés ( $d = 2,78$ ), gneiss à grenat ( $S = 2,92$ ), les gneiss à biotite et muscovite ( $d = 2,82$ ). En amont, on peut noter les gneiss à embréchite ( $d = 2,8$ ), les schistes riches en filons de quartz et de muscovites ( $d = 2,15$ ) et les gneiss à amphiboles ( $d = 2,7$ ). Les failles majeures du Lom sont observables sur ce modèle. Les couches géologiques obtenues sont situées sous la topographie et la profondeur maximale est d'environ  $h = 3,28$  km (Fig. 37), en accord avec les données issues de la déconvolution

d'Euler. Le modèle de ce profil est conforme aux études antérieures (Gazel et Gérard, 1954 ; Eno Belinga, 1984 ; Poidevin, 1985 ; Ngako et al., 2003 ; Kouske, 2006 ; Njandjock et al., 2006 ; Koch et al., 2012 ; Owono Amougou et al., 2019 ; Nyaban et al., 2021). On note des intrusions issues de l'orogénèse panafricaine, mentionnées sur notre carte géologique (Fig. 5).



**Figure 37 : Modèle 2.75D obtenu à partir du profil P1. Au dessus en trait interrompu nous avons le champ gravimétrique calculé et en trait continu le champ observé.**

## Profil 2

Le profil 2 s'étend sur 50,3 km dans la direction NW-SE en passant par Kissi. Il traverse 4 formations géologiques : les granites porphyritique, schistes à muscovite et à quartzite, schistes, gneiss à biotite et à muscovite. Les anomalies les plus faibles sont localisées au NW du profil avec une intensité de -3,6 mGals, tandis que les plus fortes se situent en bordure des schistes de Lom avec une valeur maximale de 6,99 mGals aux environs de Kissi. Le sous-sol obtenu est constitué de granites anatexites ( $d = 2,67$ ), au dessus duquel se trouvent des roches

métarmorphiques telles que les gneiss à amphiboles ( $d = 2,7$ ), les schistes volcano-clastiques du Lom ( $d = 2,4$ ) et les gneiss embrechites ( $d = 2,8$ ). En amont, on peut noter les granites porphyritique ( $d = 2,66$ ). On observe également plusieurs intrusions de granite a biotite ( $d=2,74$ ), de Gneiss embrechites ( $d=2,8$ ) et de syénite alcalin ( $d=2,63$ ). Les failles majeures du Lom sont également observables sur ce modèle. Les couches géologiques obtenues sont situées sous la topographie et la profondeur maximale est d'environ  $h = 4,1$  km (Fig. 38), en accord avec les données issues de la déconvolution d'Euler. Le modèle de ce profil est conforme aux études antérieures (Gazel et Gérard, 1954 ; Eno Belinga 1984, Poidevin, 1985 ; Ngako et al., 2003 ; Kouske, 2006 ; Njandjock et al., 2006 ; Koch et al., 2012 ; Owono Amougou et al., 2019 ; Nyaban et al., 2021). On note des intrusions issues de l'orogénèse panafricaine, conforme à notre carte géologique (Fig. 5).

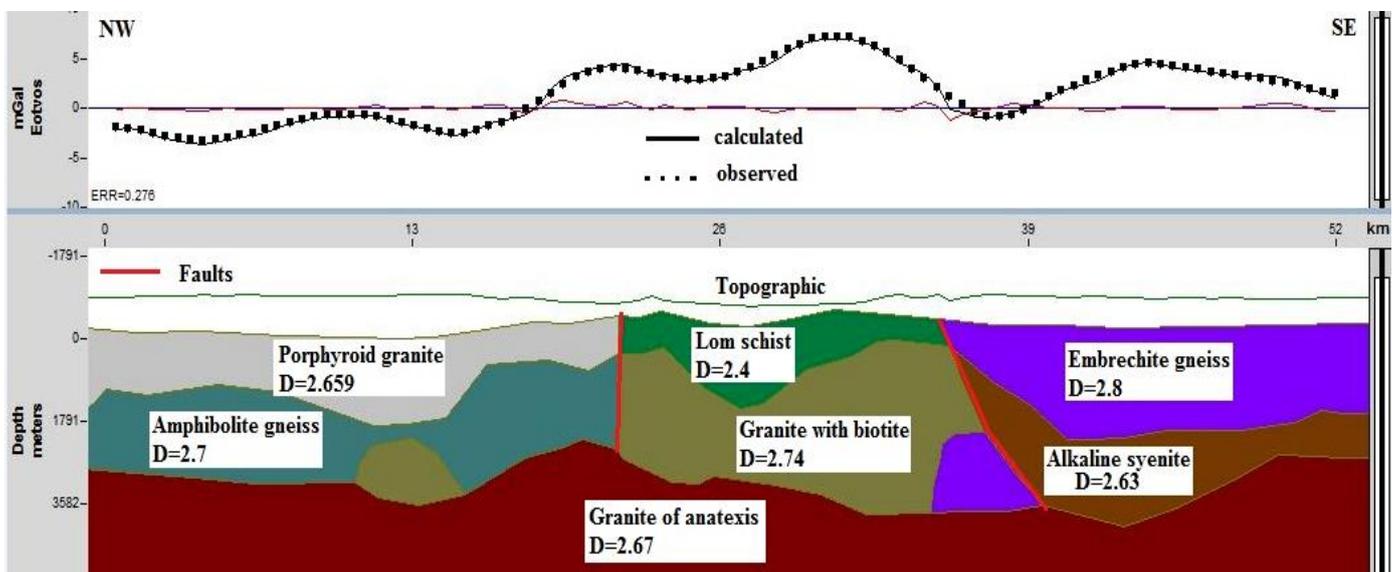
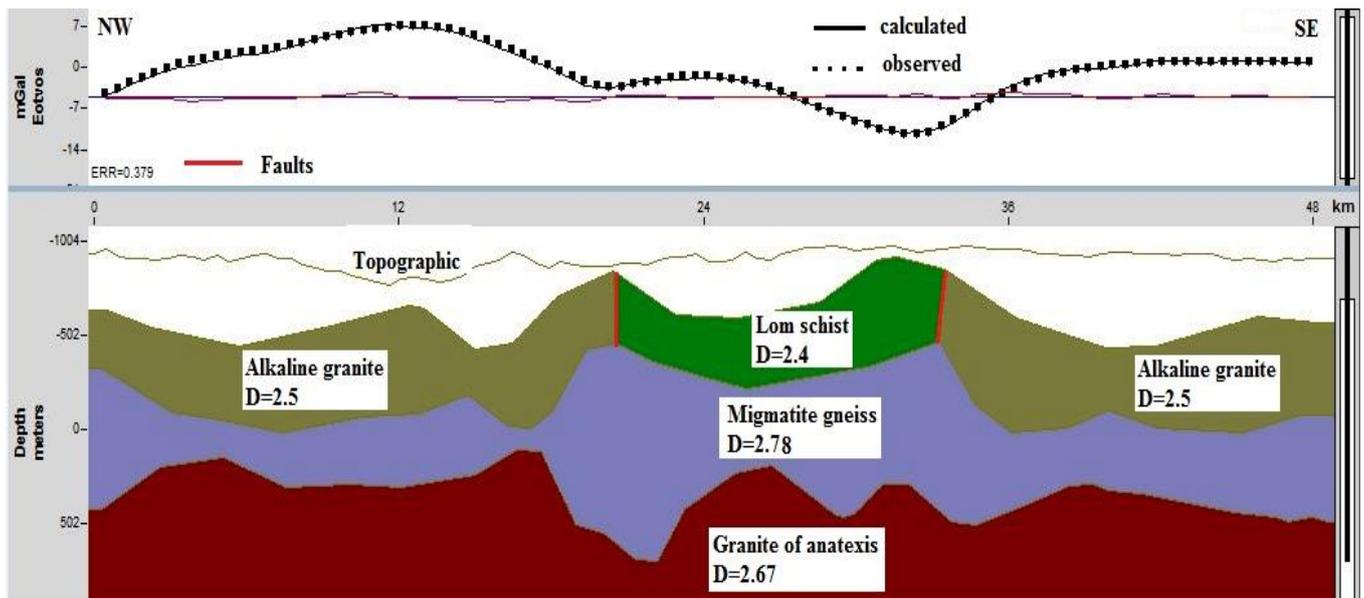


Figure 38 : Modèle 2.75D obtenu à partir du profil P2. Au dessus en trait interrompu nous avons le champ gravimétrique calculé et en trait continu le champ observé.

### **Profil 3**

Le profil 3 s'étend sur environ 49 km dans la direction NW-SE en passant à l'est de Kongola et au sud de Badzéré. Il traverse 5 formations géologiques : granite à grenat, granite à biotite et alcalin, schistes à muscovite et quartzite, schistes, gneiss à biotite et à muscovite. Les anomalies les plus faibles sont localisées en bordure SE des schistes du Lom avec une intensité de -11,54 mGal, tandis que les plus fortes se situent en bordure NW des schistes du Lom avec une valeur maximale de 6,9 mGals. Le sous-sol obtenu est constitué de granites anatexites ( $d = 2,67$ ), au dessus duquel se trouvent les gneiss migmatisés ( $d = 2,78$ ) et en amont nous avons, les granites alcalins ( $d = 2,5$ ) et les schistes volcano-clastiques ( $d = 2,4$ ). Les couches géologiques obtenues sont situées sous la topographie et la profondeur maximale est d'environ  $h = 1,2$  km (Fig. 39), en accord avec les données issues de la déconvolution d'Euler. Le modèle de ce profil est conforme aux études antérieures (Gazel et Gérard, 1954 ; Eno Belinga, 1984 ; Poidevin, 1985 ; Ngako et al., 2003 ; Kouske, 2006 ; Njandjock et al., 2006 ; Koch et al., 2012 ; Owono et al., 2019 ; Nyaban et al., 2021). On note des intrusions issues de l'orogénèse panafricaine, situées sur notre carte géologique (Fig. 5).



**Figure 39 : Modèle 2.75D obtenu à partir du profil P3. Au dessus en trait interrompu nous avons le champ gravimétrique calculé et en trait continu le champ observé.**

### 3.8. Conclusion partielle

Des techniques efficaces d'analyse ont été appliquées sur les données gravimétriques pour délimiter les structures souterraines. Les résultats obtenus mettent en évidence plusieurs axes de compression, de pliage et de cisaillement parmi lesquels les failles majeures et d'autres éléments structuraux respectivement, orientés principalement NE–SW, NW–SE, ENE–WSW, N–S, et E–W. Une tendance majeure dans le sens NE–SW représente la tendance tectonique dominante qui est le prolongement de la zone de cisaillement centrale du Cameroun (CCSZ) dans la zone d'étude. Plusieurs plis et failles mis en évidence par cette étude sont en corrélation avec des études antérieures tandis que d'autres sont des éléments nouveaux. Les profondeurs des accidents superficiels majeurs dans la région ont été estimées entre 1 et 4,8 km, et les structures NE–SW sur notre carte structurale sont proposées ici pour une éventuelle exploration aurifère. Les modèles des profils P1, P2 et P3 nous ont permis de proposer une structuration de la croûte superficielle du Lom qui met en évidence les principales

roches et intrusions responsables des anomalies observées (les gneiss à biotite et à muscovite, gneiss à grenat, syénites, gneiss migmatisés, granite à biotite et gneiss embrechites), identifier les fractures peu profondes, et leurs profondeurs. Cependant, il convient maintenant de faire une synthèse des résultats obtenus à partir des deux approches et de les confronter avec les travaux géologiques et géophysiques antérieurs.

#### **4. Synthèse et discussion des résultats issus des différentes méthodes potentielles**

Les résultats obtenus au cours des interprétations aéromagnétique et gravimétrique sont fonction d'une part, de la technique utilisée pour le traitement des données, et d'autre part, des contraintes apportées dans le choix des paramètres physiques intervenant dans l'élaboration des modèles. Dans ce chapitre, nous confrontons les résultats issus des deux méthodes et justifions la validité de l'ensemble des résultats que nous avons produits dans ce travail, partant de l'établissement des cartes gravimétriques et aéromagnétiques à la modélisation des sources responsables des différentes anomalies en passant par les profondeurs d'investigation. Certains aspects tectoniques non indiqués sur les modèles peuvent également faire surface dans cette partie. Ainsi, les profondeurs d'investigation, les formations géologiques et les structures tectoniques resteront les leviers sur lesquels cette discussion va s'appuyer.

##### **4.1. Méthode de séparation des anomalies aéromagnétiques et gravimétriques**

La détermination de la régionale optimale s'est faite par la méthode de Zeng, (1989), reprise par Jean Marcel et al. (2016). Le constat majeur que nous pouvons observer ici c'est la précision des résultats obtenus. On remarque que, la régionale optimale a été obtenue pour une altitude de prolongement de 10 km avec les

données aéromagnétiques et gravimétriques, confirmant ainsi la fiabilité de cette méthode de séparation et par conséquent la résiduelle obtenue dans la suite de notre travail. D'autre part, on remarque également sur nos cartes résiduelles un rehaussement de l'amplitude des anomalies causées par des sources superficielles, preuve que celles-ci demeureraient masquées par les anomalies de profondeurs. L'intérêt majeur pour nous de faire cette séparation est la recherche des sources géologiques superficielles qui sont dignes d'intérêt pour une éventuelle prospection minière.

#### **4.2. Corrélation des linéaments magnétiques et gravimétriques**

La carte de linéaments issue de la méthode tilt-angle représente la totalité des accidents enregistrés sur la partie superficielle de la croûte de notre zone d'étude. Celle issue des maximas du gradient horizontal des données gravimétriques prolongées ressort les principales directions que nous retrouvons également sur la carte tilt-angle des données aéromagnétiques et que nous avons pu caractérisée en 29 failles regroupées en cinq familles orientées NE-SW (F1, F2, F3, F4, F7, F8, F12, F23), E-W (F15, F16, F19, F25, F26 à la bordure ouest du Lom et F5, F9, F10 à l'Est), ENE-WSW (F13, F14, F18, F20, F21, F22), NW-SE (F27, F29) et les failles N-S mises en évidence sur la carte gravimétrique à l'est de Badzéré. Ces accidents majeurs correspondent aux structures régionales mises en place pendant l'orogénèse panafricaine.

Nous pouvons donc proposer une nouvelle carte pour le faciès de notre zone d'étude faisant mention de quelques accidents majeurs nouveaux mis en évidence lors de ce travail. Cette carte traduit mieux les événements thermotectoniques subis par cette partie du socle lors de l'orogénèse panafricaine (Fig. 40).

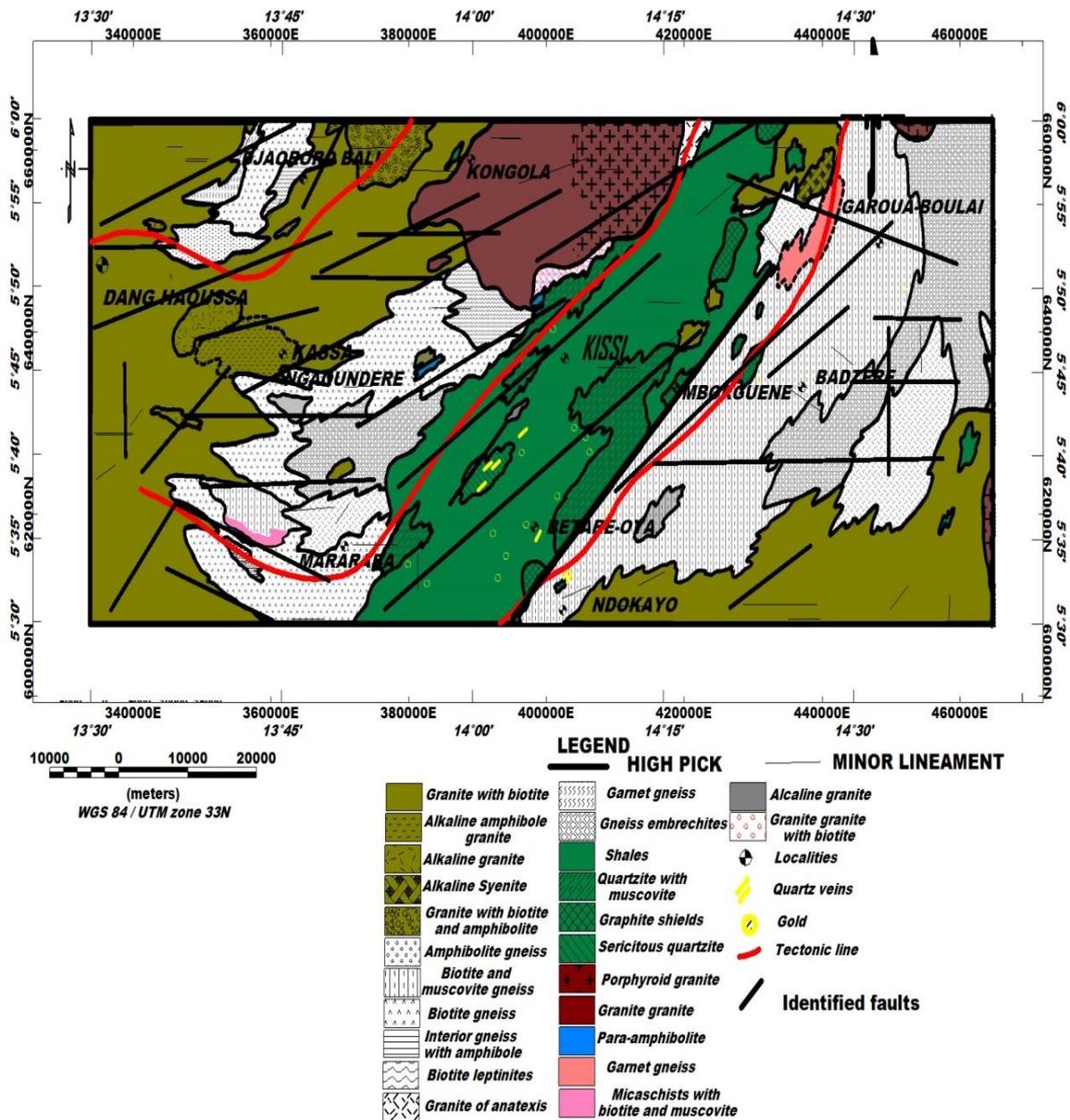


Figure 40 : Carte géologique montrant quelques failles souterraines mises en évidence dans ce travail (traits continus forts).

#### 4.3. Analyse régionale des modèles 2.75D issus des méthodes potentielles

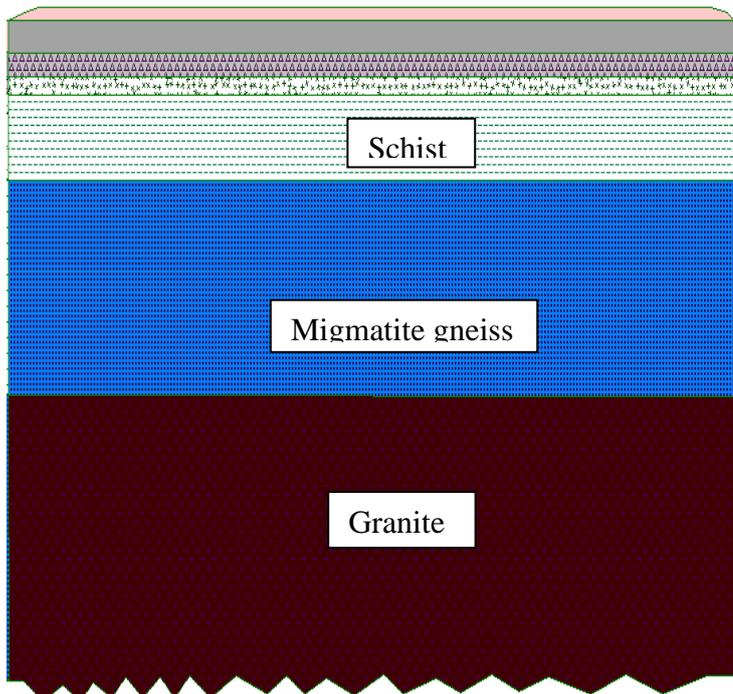
Notre choix s'est porté dans cette étude sur le modèle 2.75D car, il donne à l'interprète le contrôle de la troisième dimension sans la complexité de définir et de manipuler un modèle 3D complet. Les résultats obtenus de la modélisation 2.75D ont permis de constater de multiples similarités entre les modèles de

subsurface qui correspondent aux profils P1, P2, P3 des données gravimétriques et aéromagnétiques. De manière générale, on retrouve quasiment les mêmes formations géologiques avec des signatures similaires, situées à des profondeurs qui n'excèdent pas 4,8 km.

La modélisation des structures gravimétriques superficielles s'est faite sous un ensemble de contraintes qui ont permis de considérer la densité moyenne du socle à 2,67 g/cm<sup>3</sup>. En effet, cette valeur est conforme à la littérature qui indique que ladite valeur correspond à la densité moyenne de la croûte continentale. Les études géophysiques effectuées dans des régions environnantes (Mbom-Abane, 1997 ; Tadjou et al., 2009 ; Shandini et al., 2011, Zanga Amougou et al., 2013) ont également retenu cette valeur comme étant la valeur moyenne du socle. Les principales roches identifiées dans le domaine d'étude sont les gneiss migmatisés, les granites, les syénites et les schistes. Les gammes de densités retenues pour chacune d'elles sont conformes non seulement à la littérature (Telford et al., 1990 ; Parasnis, 1997), mais aussi aux études géophysiques et géologiques réalisées dans la région (Mbom-Abane, 1997, Nouthogwe Tatchium, 2004 ; Shandini et al., 2011, Zanga Amougou et al., 2013). Le socle a été jugé de granito-gneissique d'après les travaux antérieurs de Mbom-Abane (1997) et les travaux de Bayer et Lesquer (1978) réalisés dans la bordure occidentale de la Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale, qui est en accord avec les résultats obtenus de nos différents modèles. Les erreurs commises sur nos modèles issus des profils de données gravimétriques et aéromagnétique sont comprises entre ]0.2 ; 3[ est acceptable.

La synthèse géologique du Cameroun permet d'avoir une esquisse lithostratigraphique de la formation de Lom. Récemment, le travail de proche surface de Mboudou et al. (2017) à Bétaré-Oya propose le modèle lithologique avec des formations de terre végétale, de saprolites, de couche sableuse, de sable conglomératique et de schiste.

Sur notre modèle du profil 2 issu des données aéromagnétiques qui passe par la localité de Bétaré-Oya, nous observons que les premières couches de roches rencontrées sont bien en dessous de la topographie cela s'explique par le fait que la méthode utilisée permet de mettre en évidence la structuration des formations profondes. Cela aurait pour effet de masquer les anomalies superficielles (sédiments) d'où le décalage observé. Ainsi, la première formation détectée sur nos modèles à Bétaré-Oya est le schiste. Nous pouvons donc compléter ce modèle lithologique avec les formations du socle panafricain mises en évidence par nos méthodes géophysiques (Fig. 41) et proposer le modèle lithostratigraphique mis à jour ci-dessous (tableau 6). Les formations crustales dans notre modèle sont conformes à celles obtenues par Benkhelil et al. (2002) à partir des données sismiques du sud Cameroun et l'étude géologique de Mboudou et al. (2017).



**Figure 41 : Esquisse du profil lithologique du bassin de Bétaré-Oya. La carte à l'échelle est au 2/1000**

**Tableau 6 : Nature des formations**

Roches	Profondeurs (m)
Terre végétale	< 1,5
Saprolites	2
Couche sableuse	1,5
Sable conglomératique	1,4
Schistes	227, 18
Gneiss migmatite	699,83
Granites	> 1600

Ce modèle confirme la nature granito-gneissique du socle panafricain. Les failles majeures mises en évidence dans ce travail contrôlées par la zone de cisaillement Bétaré - Oya (BOSZ) appartiennent en fait à un réseau plus large de failles trouvées sur le Panafricain et qui s'étendraient jusqu'au craton de São Francisco (SFC) par la zone de cisaillement centre Camerounais (ZCCS). En effet, les travaux de Toteu et al. (2004) suggèrent que la zone de cisaillement de Reghane, qui durant toute l'évolution panafricaine (650-580 Ma) n'a enregistré qu'un mouvement d'arrachement dextre, peut être considérée comme une frontière majeure séparant le domaine mobile en deux (Fig. 42) : une partie Ouest où la tectonique est contrôlée par le mouvement du craton d'Afrique de l'Ouest et une partie Est contrôlée par le mouvement du craton du Congo.

#### **4.4. Corrélation entre les linéaments structuraux et la cartographie des sites miniers aurifères**

La zone d'étude est marquée par une activité minière artisanale et semi-mécanisée poussées. Cette dernière est soit alluvionnaire (au niveau des lits de cours d'eau), soit éluvionnaire (sur les flancs de collines) et primaire (sur les veines de quartz identifiées). L'exploration est rendue assez difficile à cause de la forte épaisseur du couvert latéritique et la rareté des affleurements. La corrélation entre les éléments structuraux et la cartographie des sites d'orpaillage peut constituer un outil d'orientation pour l'exploration. Les corrélations des occurrences aurifères le long des couloirs de failles coulissantes ont été identifiées dans la région de l'Est du Cameroun (Vishiti et al., 2015 ; Rakotondrabe et al., 2018 ; Pepogo et al., 2018).

Les travaux de collecte des informations sur la production des sites miniers auprès des propriétaires et à travers des tests de lavage à la bâteau dans la zone de Garga Sarali - Bétaré - Oya mené par Pepogo et al. (2018) ont permis de réaliser la carte de cibles potentielles du secteur à savoir :

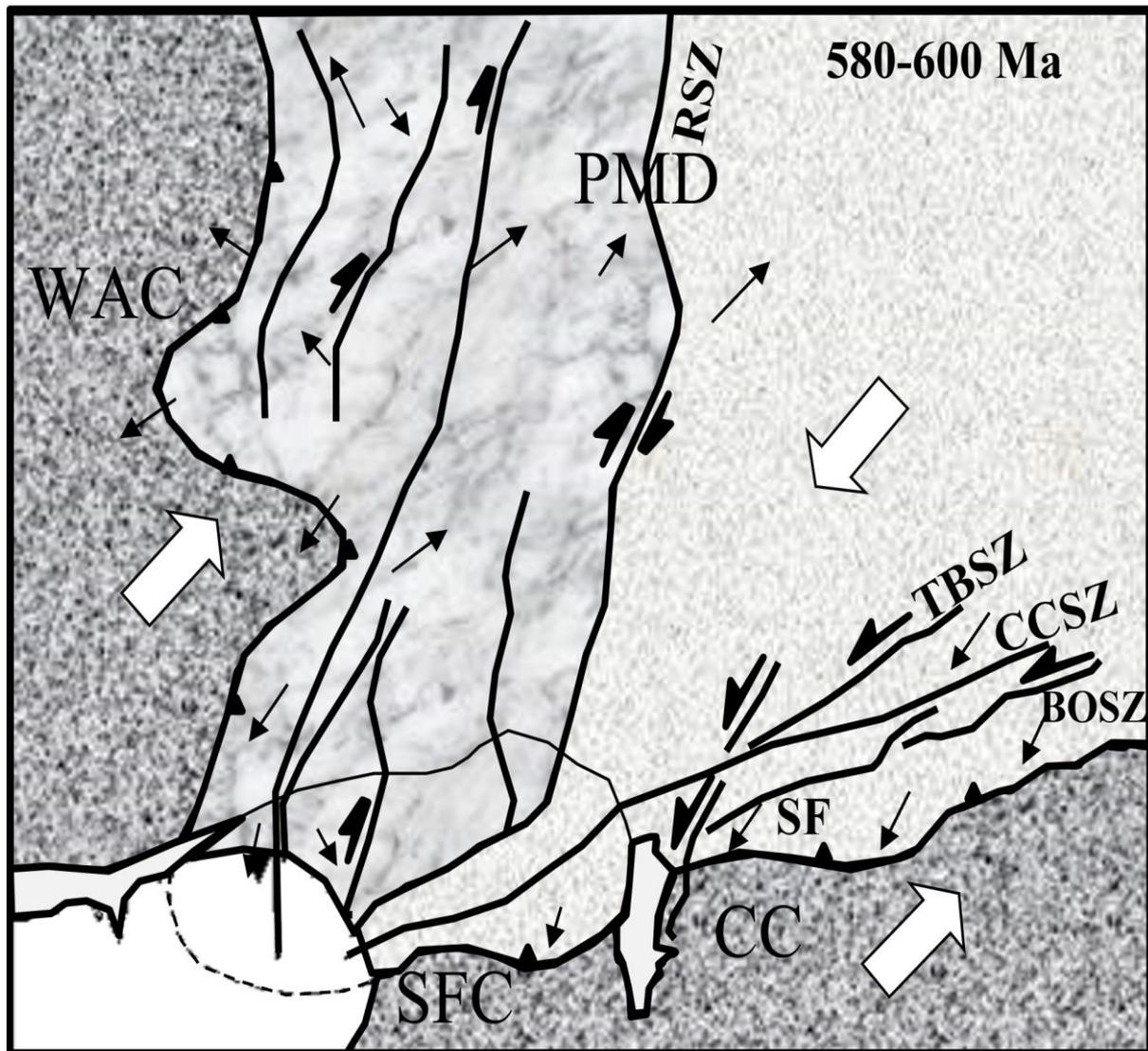


Figure 42 : Le domaine mobile panafricain (PMD) entre le craton d'Afrique de l'Ouest (WAC) et les cratons de São Francisco (SFC) et du Congo (CC) montrant deux sous-domaines, Ouest et Est, séparés par la Raghane Shear Zone (R.S.Z.). Les lignes horizontales représentent la zone de cisaillement Tcholliré-Banyo (T.B.S.Z) ; zone de cisaillement du centre du Cameroun (C.C.S.Z) ; faille de la Sanaga (SF) ; Zone de cisaillement Bétaré-Oya (BOSZ). Les petites flèches correspondent aux linéations d'étirement et les grandes flèches aux directions de mouvement des blocs pendant D3 (600-580 Ma). Toteu et al., (2004) modifié (le document initial est disponible dans le domaine public).

- les teneurs comprises entre 1,051 g/t et 2,83 g/t suivent les cours d'eau orientés NE-SW, correspondant à la foliation régionale affectant les formations géologiques de la zone ;

- les teneurs comprises entre 0,251 g/t - 1,05 g/t et 1,05 g/t – 1,50 g/t sont rencontrées tant au niveau des éluvions qu'au niveau des cours d'eau orientés NW-SE.

Du point de vue lithologique, les minéralisations aurifères liées au type pétrographique sont : (i) les formations schisteuses du Lom qui constituent le type pétrographique de concentration aurifère maximale au niveau des intrusions de réseaux de veines de quartz aurifères fortement fragmentés (Nih Fon et al., 2012) ; (ii) les granitoïdes dont le lien génétique avec les minéralisations aurifères est lié à l'orogénèse panafricaine (640 – 620 Ma) (Suh et al., 2006).

Les minéralisations aurifères de type « *contact* » entre les faciès observés à l'est du Cameroun sont au contact entre (i) les gneiss et les granites porphyroïdes (0,251 – 1,05 g/t, 1,501 – 2,83 g/t et 2,831 – 5,02 g/t), (ii) les gneiss et les granites calcoalcalins (0,251 – 1,05 g/t) reconnus pour être le type pétrographique favorable à la minéralisation Cu-Au (Assah, 2010 ; Pepogo, 2020) et (iii) les reliques de schistes et les gneiss au niveau du village Kongolo.

Le réseau hydrographique dendritique qui est en fait la signature structurale des fractures profondes constitue les structures métallogènes à travers lesquelles les fluides riches en métaux ont circulé. Cette observation est confortée par la concentration des sites d'exploitation artisanale sur les flags et dans les environs immédiats desdits cours d'eau, abritant les fractures secondaires qui sont des structures métallotectes ou pièges à métaux (Pepogo, 2020).

Cette hétérogénéité ressort le caractère fortement fracturé de la zone d'étude qui a été mis en place à la suite de nombreux événements tectoniques ductiles et

fragiles pendant l'orogénèse panafricaine (Njonfang et al., 2008 ; Meying et al., 2009) dont les empreintes visibles font de la zone d'étude l'endroit idéal pour l'exploration des gisements aurifères (Gouet et al., 2013).

#### **4.5. Discussion**

Les cartes structurales obtenues montrent une grande disparité dans la distribution des linéaments qui s'explique en partie par la tectonique générale de la zone. Ainsi, la collision entre le craton archéen stable au Sud et l'un des deux blocs paléoprotérozoïques au Nord au cours de l'orogénèse panafricaine (700 Ma), aurait provoqué un aplatissement du socle et des intrusions dans l'ancien socle Précambrien, provoquant des linéaments orientés NE-SW liés aux schistes de Lom. D'après la synthèse géologique camerounaise, ces intrusions sont identifiées comme des batholites granitiques placés lors des déformations régionales D1 et D2.

De part et d'autre de la série du Lom, il existe des linéaments majeurs NE-SW représentant les failles limitantes de la série du Lom avec les roches granito-gneissiques. Les linéaments E-W, NE-SW et N-S peuvent représenter des structures tectoniques majeures marquant le changement de direction structurale entre les chaînes transsahariennes (N-S) et les guides de l'Oubanguides (E-W).

A l'échelle locale, la déformation D2 est caractérisée par des linéations L2 représentant ici des tronçons de minéraux de quartz orientés E-W. Les linéaments orientés ENE-WSW semblent être en corrélation avec les déformations mylonitiques se produisant au cours de la phase D3 tandis que ceux orientés NW-SE sont liés aux déplacements senestres et dextres et représentent des fractures avec ou sans filon. Ces structures beaucoup plus abondantes près de Mararaba pourraient être la cible de futures études minières.

L'étude géoélectrique de Nih Fon et al. (2012) dans notre zone d'étude a identifié des zones d'anomalies irrégulières orientées NE-SW. Celles-ci sont en

corrélation avec les veines de quartz connues dans la région et sont alignées avec la zone de cisaillement régionale. Les unités morphologiques identifiées présentent également des directions NW-SE, N-S, NE-SW et E-W. De plus, Kouske (2006) révèle que le réseau hydrographique de la zone d'étude a deux directions principales, NE-SW et NW-SE et qu'il est de type dense et dendritique.

Les modèles P1, P2 et P3 obtenus peuvent être utilisés comme pseudo imagerie 3D du socle du Lom. Des études géologiques antérieures indiquent que la région a fait l'objet d'une activité métamorphique intense au cours du Néoprotérozoïque qui a entraîné la formation de schistes (Coyne et Bellier, 2010). Le contact entre cette série schisteuse et les roches gneissiques et granitiques du socle a entraîné de multiples fractures et failles (Gazel et al., 1954 ; Soba, 1989). L'esquisse litho-stratigraphique proposée par nos modèles issus des profils magnétiques et des travaux de Mboudou et al., (2017) est cohérente avec les travaux géologiques antérieurs qui affirment que le socle panafricain serait constitué de migmatites et granites riches en gneiss et biotite (Gazel et Gérard, 1954 ; Eno Belinga, 1984 ; Poidevin, 1985 ; Ngako et al., 2003 ; Kouske, 2006 ; Koch et al., 2012 ; Owono Amougou et al., 2019).

Du point de vue minier, les indices aurifères artisanaux sont des lieux situés à proximité des rivières Lom et Pangar (Nih Fon et al., 2012). Ces alluvions sont en corrélation avec les tendances NE-SW de notre carte structurale. Les cours d'eau de notre zone d'étude étant structurellement guidés, on peut conclure que les alluvions observés et exploités par les riverains sont des indices qui ont été lessivés et transportés par les cours d'eau. Globalement, les structures géologiques obtenues à partir du traitement des données correspondent aux structures ductiles-fragiles telles que les zones de cisaillement et les failles. Ces structures constituent des voies de passage pour les fluides minéralisateurs et les eaux souterraines. Étant donné que plusieurs mines à petite échelle d'or existent dans la zone de Bétaré-Oya, les résultats structuraux apportés par cette étude pourraient être un

guide important pour l'identification des cibles qui contrôlent la minéralisation aurifère dans la région.

#### **4.6. Conclusion**

La discussion des résultats obtenus par les investigations gravimétriques et aéromagnétiques effectuées. Il en découle que la présente zone d'étude est sujette à plusieurs discontinuités ou accidents tectoniques tels que les failles, les fractures, les dômes ou les intrusions. Preuve qu'elle a été le théâtre d'une intense activité tectonique ayant affecté la Chaîne Panafricaine de l'Afrique Centrale. Ces éléments structuraux mis en évidence sont d'une importance capitale non seulement pour la compréhension de la géodynamique de mise en place des terrains constituant le socle de cette région mais, également pour les futures campagnes de prospection minière dans la zone de Bétaré-Oya et ses environs.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

## **CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES**

Le traitement des données provenant des différentes campagnes de levés magnétiques et gravimétriques réalisées au Cameroun a permis de réaliser une étude gravimétrique dans la zone d'étude qui se trouve à l'Est Cameroun dans la série du Lom. La séparation des anomalies de Bouguer en anomalies régionales et résiduelles s'est faite à travers la méthode de Zeng, (1989). Dans cette étude dont l'objectif principal visait à faire l'analyse des structures superficielles de la série du Lom et ses environs, en vue de dégager les éléments importants pour une éventuelle prospection minière sur le terrain. Il convient de souligner que, de nouvelles techniques d'analyse ont été appliquées sur des données aéromagnétiques et gravimétriques pour délimiter les structures souterraines. Les résultats obtenus mettent en évidence les axes de compression, de pliage et de cisaillement ainsi que les veines mylonitiques (les veines sont à l'échelle de l'affleurement) de plusieurs kilomètres de long et orienté NE-SW. Les paramètres structuraux régionaux et locaux de la zone sont caractérisés par des failles majeures et d'autres éléments structuraux orientés principalement NE-SW, NW-SE, ENE-WSW, N-S et E-W. Une tendance majeure dans le sens NE-SW représente la tendance tectonique dominante qui est le prolongement de la zone de cisaillement centrale du Cameroun (CCSZ) dans la zone d'étude. Plusieurs plis et failles mis en évidence par cette étude sont en corrélation avec des études régionales antérieures tandis que d'autres sont des éléments nouveaux apportés. Les profondeurs des accidents majeurs dans la région ont été estimés entre 1 et 4,8 km et les structures NE-SW, NW-SE sur notre carte structurale sont proposées ici pour une éventuelle exploration aurifère. Les modèles des profils P1, P2 et P3 nous ont permis de proposer une structuration de la croûte superficielle du Lom qui met en évidence les principales roches et intrusions responsables des anomalies observées (granite porphyrique, gneiss à grenat, syénites, micaschistes, graphite et gneiss à grenat, les granites alcalins, gneiss embréchites) ; d'identifier

les fractures peu profondes, leurs profondeurs, et proposer un modèle lithostratigraphique en accord avec les travaux précédents. Pour terminer, on note que l'angle d'inclinaison couplé au prolongement vers le haut est un outil intéressant pour la modélisation 2.75D. Sachant qu'avec les données RTE, nous faisons l'hypothèse d'une anomalie induite magnétiquement, qui a la même direction que le champ géomagnétique, donné par le géomagnétique global modèles de terrain (IGRF), nous avons associé les données gravimétriques et noté une concordance entre les différentes approches. Toutefois, ces réponses ont ouvert des axes de recherche qui permettront d'améliorer la compréhension sur le contrôle structural de la minéralisation dans les formations géologiques de la région de l'Est. Raison pour laquelle nous proposons pour des futures investigations :

- Une cartographie géologique détaillée des zones prédictives prioritaires suivant l'orientation qui contrôle la minéralisation ;
- Une cartographie géophysique additive par la méthode géoélectrique à maille serrée, afin d'affiner notre modèle de structuration des couches et de distribution des minéralisations ;
- Une étude sismique qui exposerait la séquence sismostratigraphique, qui permettrait d'améliorer les modèles géodynamiques du sous-sol et donnerait d'autres précisions sur les corps intrusifs non affleurants suspectés dans la zone d'étude.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Asaah, V. A.: Lode gold mineralization in the Neoproterozoic granitoids of Batouri, southeastern Cameroon. Faculty of Energy and Economic Sciences, Clausthal University of Technology, Doctorat/PhD Thesis, 187, 2010.
- Baranov, V. and Naudy, H. : Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, 29, 67-79, 1964.
- Baranov, V. : A new method for interpretation of aeromagnetic maps : Pseudogravimetric anomalies. *Geophysics* 22, 359-383, 1957.
- Basseka, A.C., Eyiké Yomba, A., Kenfack, J.V., Njiteu Tchoukeu, C.D., Som Mbang, M.C., and Shandini Njankouo, Y.S.: Magnetic Anomaly Interpretation of the Northern Congo Craton Boundary: Results from Depth Estimation and 2.5D Modeling. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 5, 90-101. <https://doi.org/10.4236/gep.2017.512007>, 2017.
- Bayer, R. et Lesquer, A. : Les anomalies gravimétriques de la bordure orientale du Craton Ouest Africain: géométrie d'une suture Panafricaine. *Bul. Soc. Géol. Fr.*, XX, 863 – 876, 1978.
- Benkhelil, J., Pierre, G., Claude, P. and Ngueutchoua, G.: Lithostratigraphic, geophysical and morpho-tectonic studies of the South Cameroon shelf. *Marine and Petroleum Geology*, 19, 499-517, [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(02\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(02)00002-8), 2002.

Blakely, R. J.: Potential theory applied in gravity and magnetism. Cambridge University Press, Cambridge, 441, 1996.

Blakely, R.J. and Simpson, R.W.: Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies *Geophysics*, vol.51, 1494-1498, 1986.

Bouiflane, M. : Cartographie aéromagnétique et magnétique multi-échelles: étude structurale d'une région du fossé Rhénan. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg 1, 209, 2008.

Boukéké, D.B. : Structures crustales d'Afrique Centrale déduites des anomalies gravimétriques et magnétiques : le domaine précambrien de la République Centrafricaine et du Sud Cameroun. Thèse, Univ, Université de Paris Sud, 278, 1994.

Cahen, L., Sneling, N. J., Delhal, J. and Vail, J. R.: The geochronology and evolution of Africa. Clarendon Press, OXFORD, 169, 1984.

Campbell, W. C.: Introduction to geomagnetic fields, Cambridge University Press, New York, 1997.

Cara, M.: Géophysique. Collection Géosciences, Bordas, Paris, 184, 1989.

Chouteau, M.: Géophysique appliquée. Gravimétrie. Ecole polytechnique Montréal, 189, 2005.

Collignon, F.: Gravimétrie de reconnaissance de la République Fédérale du Cameroun. Orstorm Paris, 35, 1968.

Cornacchia, M. et Dars, R.: “Un trait structural majeur du continent africain: Les linéaments centrafricains du Cameroun au Golfe d’Aden,” Bulletin de la Société Géographique de France, vol. 25, 101–109, <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-XXV.1.101>, 1983.

Corpel, J. et Debeglia, N. : Réinterprétation aéromagnétique Cameroun : Yaoundé-Akonolinga, Ebolowa-Djoum. BRGM/GPH, 120, 1978.

Coyne et Bellier : Aménagement hydroélectrique de Lom Pangar, doc. No 10108-RP-400-B, 57-58, 2010.

Dunlop, D. J. and Özdemir, Ö. : Rock magnetism : Fundamentals and frontiers, Cambridge University Press, New York, 120, 1997.

Dorbath, L., Dorbath, C., Fairhead, J. D. and Stuart, G. W. : A teleseismic delay time study across the central African Shear Zone in the Adamawa region of 83, West Africa. Geophysical Journal, Royal Astronomical Society, 86, 751 – 766, 1986.

Dumont, J. F. : “Identification par télédétection de l’accident de la Sanaga (Cameroun). Sa position dans les grands accidents d’Afrique Centrale et de la limite Nord du Craton du Congo,” Géodynamique, vol. 1, no. 1, 13–19, <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:23608>, 1986.

- Eno Belinga, S. M. : Géologie du Cameroun, Librairie Universitaire de Yaoundé, République Unie du Cameroun, 150, 1984.
- Fairhead, J. D. and Okereke, C. S.: Depth to major density contrast beneath the West African rift system in Nigeria and Cameroon based on the spectral analysis of gravity data. *Journal of African Earth Sciences*, 7, 769 – 777, 1988.
- Ferré, E. C., Déléris, J., Bouchez, J. L., Lar, A. U. and Peucat, J. : The Pan-African reactivation of Eburnean and Archaean provinces in Nigeria: structural and isotopic data. *Journal of the Geological Society, London*, 153, 719-728, 1996.
- Feumoe, S., N. : Apport des filtrages et inversions 2D1/2 des anomalies aeromagnetiques dans la détermination des accidents tectoniques majeurs au Sud-est Cameroun. Thèse de Doctorat/Ph D es sciences, Université de Yaoundé I, Fac. Sciences, 143, 2014.
- Feumoe, N. S., Ndougssa-Mbarga. T., Manguelle-Dicoum, E., and Fairhead, J. : Delineation of tectonic lineaments using aeromagnetic data for the south-east Cameroon area. *Geofizika*, vol. 29, 175-192, 2012.
- Feybesse, J.L., Johan, V., Triboulet, C., Guerrot, C., Mayaga-Mikolo, F., Bouchot, V., and Eko N'dong, J. : The west Central Africa belts: a model of 2.5-2.0 Ga accretion and two-phase orogenic evolution. *Precambrian Research* 87, 161-216, 1998.

Finlay, C. C., Maus, S., Beggan, C. D., Bondar, T. N., Chambodut, A., Chernova, T.A., Chulliat, A., Golovkov, V. P., Hamilton, B., Hamoudi, M., Holme, R., Hulot, G., Kuang, W., Langlais, B., Lesur, V., Lowes, F.J., Luhr, H., Macmillan, S., Manda, M., McLean S., Manoj, C., Menvielle, M., Michaelis, I., Olsen, N., Rauberg, J., Rother, M., Sabaka, T. J., Tangborn, A., Toner-Clausen, L., Thebaud, E., Thomson, A. W. P., Wardinski, I., Wei, Z., and Zverera, T. I. : International Geomagnetic Reference Field : the eleven generation, *Geophysical Journal International*, 183, 1216-1230, 2010.

Foucault, A. et Raoult, J. F. : *Dictionnaire de géologie*. 3<sup>e</sup> Edition. Masson, Paris, 352, 1988.

Ganwa, A. A., Frisch, W., Siebel, W., Ekodeck, G.A., Shang, C.K., and Ngako, V. : Archean inheritances in the pyroxeneamphibole 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, 2008b.

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

Gazel J. and Gérard, G.: Geological map of Cameroon recognition at the scale 1/500 000, 27, 1954.

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

Goussi Ngalamo, J. F., Bisso D., Abdelsalam M. G., Atekwana E. A., Katumwehe A. B. and Ekodeck, G.E.: Geophysical imaging of metacratonization in the northern edge of the Congo craton in Cameroon. Journal of African Earth Sciences, 129, 94-107, 2017.

Groune, D. : Analyse Magnéto-Spectrométrique des données Aérogéophysiques du Grand Fossé Pharusien (Hoggar Occidental), Mémoire présenté en vue de l'obtention du titre de Magister en Géophysique, Université M'hamed Bougara en Algérie, 142, 2009.

Henderson, R.G. and Zietz, I.: The Upward Continuation of Anomalies in Total Magnetic Intensity Fields. Geophysics, 14, 517-534, <https://doi.org/10.1190/1.1437560>, 1949.

Hoffmann-Welenhorf, B. and Moritz, H.: Physical geodesy. Springer, 10, 10 – 21, 2005.

Jacobsen, B.H.: A Case for Upward Continuation as a Standard Separation Filter for Potential-Field Maps. *Geophysics*, 52, 390-398, <http://dx.doi.org/10.1190/1.1442378>, 1987.

Jean, Marcel, E. J. M. Abate, P. Njandjock Nouck, H. E. Ngatchou, V. Oyoa, C. T. Tabod and E. Manguelle-Dicoum: Structure of the Crust Beneath the South Western Cameroon from Gravity Data Analysis. *International Journal of Geosciences*, 7, 991-1008, 2016.

KanKeu, B. and Greiling, R. O. and Nzenti, J. P.: Pan-African strike slip tectonics in eastern Cameroon -Magnetic fabrics (AMS) and structures in the Lom basin and its gneissic basement. - *Precambrian Research*, 174, 258-272, <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.08.001>, 2009.

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

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

- Kaufman, A. A., Hansen, R. O. and Kleinberg, R. L. : Principles of the Magnetic Methods in Geophysics, 42, chap.6, Elsevier, Oxford, 2009.
- Koch, M. J., Wiens, D., Nyblade, A., Shore, P., Tibi, R., Ateba, B., Tabod, C. and Nnange, J.: Upper Mantle Anisotropy beneath the Cameroon Volcanic Line and Congo Craton from Shear Wave Splitting Measurements. *Geophysical Journal International*, 190, 75-86, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05497.x>, 2012.
- Koch, M. J., Edimo, A., Kouokam, E. et Njoh, R. : Protocole d'accord pour la recherche des minéralisations d'or dans la province aurifère de l'Est (Cameroun). Rapport B.R.G.M. 88CMR.028, 88, 1988.
- Kouske, A.P.: Geological and environmental study of the artisanal gold mining sector of Bangbel-Mborguéné (East Cameroon), DEA dissertation in earth sciences, University of Yaounde I, Cameroon, 89, 2006.
- Lacomblez, P. et Cornet, M.: Méthodes Aéroportées, (rapport) Colloque de Géophysique Minière, revue de la société de l'industrie minérale, Compagnie Générale de Géophysique, vol. 1, 29-34, 1973.
- Langel, R. A.: International Geomagnetic Reference Field : The sixth generation, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 44, 679-707, 1992.

Le Mouël, J. L. : Sur la distribution des éléments magnétiques de France. Thèse de Doctorat, Paris VII, 154, 1969.

Letouzey, R. : Etude phytogéographique du Cameroun. Edit P. Lechevalier Paris, 511, 1986.

Lowrie, W. : Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, G B, 393, 2007.

Manguellé-Dicoum, E. : Etude géophysique des structures superficielles et profondes de la région de Mbalmayo Cameroun. Thèse de Doctorat d'Etat ès Science, Spécialité Géophysique, Université de Yaoundé, 202, 1988.

Maurizot, P., Abessolo, A., Feybesse, J.L., Johan J. et Lecomte P. : Etude et prospection minière du Sud-Ouest Cameroun, synthèse des travaux de 1978 à 1985, 1986, BRGM, rapport 85 CMR 066, 274, 1986.

Mbom Abane, S. : Investigations géophysiques en bordure du Craton du Congo et implications structurales. Thèse Doctorat d'Etat ès sciences. Université de Yaoundé I, Cameroun, 180, 1997.

Mboudou, G. M., Kennedy, F. F., Njoh, O. A. and Agyingi, C. M.: Characterization of Alluvial Gold Bearing Sediments of Betare Oya District-East Cameroon, Implication for Gold Exploration and Recovery. Journal of Geology, 7, 1724-1738, [doi.org/10.4236/ojg.2017.711115](https://doi.org/10.4236/ojg.2017.711115), 2017.

Mechler, P. : Les méthodes de la géophysique. Dunod Université, 200, 1982.

- Meying, A. : Investigations crustales profondes et superficielles par méthode audio magnétotellurique AMT dans la région Ayos-Nguelmendouka Cameroun. Thèse de Doctorat/Ph D de l'Université de Yaoundé I, 139, 2011.
- Mono, J., A., Ndougsa-Mbarga, T., BIkoro-Bi-Alou, M., Ngoh, J.D. and Owono, O.U.: Inferring the subsurface basement depth and the contact locations from aeromagnetic data over Loum–Minta area (Centre-East Cameroon). *International Journal of Geosciences*, Vol 9(7), 435-459. [doi.org/10.4236/ijg.2018.97028](https://doi.org/10.4236/ijg.2018.97028), 2018.
- Mvondo, H., Owona, S., Mvondo-Ondoa, J. and Essono, J.: Tectonic evolution of the Yaoundé segment of the Neoproterozoic Central African Orogenic Belt in southern Cameroon. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 44, 433-444, 2007b.
- Mvondo, H., Owona, S., Mvondo-Ondoa, J., Essono, J. and Yene-Atangana, J. Q.: Comment on U-Pb dating of plutonic rocks involved in the nappe tectonic in southern Cameroon: consequence for the Pan-African orogenic evolution of the Central African fold belt. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 44, 479-493, 2007a.
- Meying, A., Ndougsa-Mbarga, T. and Manguelle-Dicoum, E. : Evidence of fractures from the image of the subsurface in the Akonolinga-Ayos area (Cameroon) by combining the Classical and the Bostick approaches in the interpretation of audio-magnetotelluric data. *J. Geology and Mining Research*, 1(8) : 159-171, 2009.

Miller, H. G. and Singh, V.: Potential field tilt- a new concept for location of potential field sources. *Journal of applied Geophysics*, 32, 213-217, [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1), 1994.

Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., Phillips, J.D. and Ruder, M.E. : 75th Anniversary. The historical development of the magnetic method in exploration: *Geophysics*, 70, 6, 33-61, 2005.

Ndougsa-Mbarga, T., Bikoro, B. A., Tabod, C. T. and Sharma, K. K.: Filtering of gravity and magnetic anomalies using the finite element approach (fea). *Journal of Indian Geophysical Union*, 17(2), 167-178, 2013.

Ndougsa-Mbarga, T., Meying, A., Bisso, D., Layu, Y.D, Sharma, K.K. and Manguelle-Dicoum, E.: Audiomagnetotellurics (AMT) soundings based on the Bostick approach and evidence of tectonic features along the northern edge of the Congo Craton, in the Messamena/AbongMbang area (Cameroon),” *Journal of Indian Geophysical. Union*, 15, 3, 145–159, 2011.

Ndougsa-Mbarga, T. : Etude géophysique par méthode gravimétrique des structures profondes et superficielles de la région de Mamfé. Thèse de Doctorat / Ph D, Université de Yaoundé I, 265, 2004.

Nédélec, A., Macaudière, J., Nzenti, J. P. et Barbey, P. : Evolution structurale et métamorphisme des schistes de Mbalmayo (Cameroun). Informations pour

la structure de la zone mobile panafricaine d'Afrique centrale au contact du craton du Congo. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Sciences de la Terre et des Planètes, 303, 75-80, 1986.

Ngako, V., Affaton, P., Nnange, J. M. and Njanko, Th.: Pan-African tectonic evolution in Central and Southern Cameroon: transpression and transtension during sinistral shear movements, J. Afr. Earth Sci., 36, 207-214, [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(03\)00023-X](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(03)00023-X), 2003.

Ngako, V. : Les déformations continentales Panafricaines en Afrique Centrale : résultat d'un poinçonnement de type himalayen. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé I, 299, 1999.

Nguimbous-Kouoh, J. J., Ndougssa-Mbarga, T., Njandjock-Nouck, P., Eyike, A. Campos Enriquez, J. O. and Manguelle-Dicoum, E.: The structure of the GoulfeyTourba sedimentary basin (Chad-Cameroon): a gravity study. Geofísica Internacional, 49 (4), 181– 193, 2010.

Nih-Fon, A., Bih, C. V. and Suh, C. E.: Application of Electrical Resistivity and Chargeability Data on a GIS Platform in Delineating Auriferous Structures in a Deeply Weathered Lateritic Terrain, Eastern Cameroon. International Journal of Geosciences, 960-971, <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2012.325097>, 2012.

- Njandjock, N. P., Manguellé-Dicoum, E., Ndougsa-Mbarga, T. and Tabod, C. T.: Spectral analysis and gravity modelling in Yagoua, Cameroon, sedimentary basin. *Geofísica International*, 45, 209– 215, 2006.
- Njel, U. O. : Contribution à l'étude de l'orogénèse panafricaine. La ceinture volcanosédimentaire de Poli (Nord-Cameroun): lithostratigraphie, pétrographie, géochimie, minéralisations cuprifères associées. Doctorat de 3ème Cycle INPL, Nancy (France), INPL, 220, 1988.
- Njonfang, E., Ngako, V., Moreau, C., Affaton, P. and Diot, H.: Restraining bends in high temperature shear zones, the Central Cameroon Shear Zone, Central Africa. *Journal of African Earth Sciences* 52 (1-2), 9–20, 2008.
- Noutchogwe Tatchum, C., Tabod, C. and Manguelle-Dicoum, E.: A gravity study of the Crustal beneath the Adamawa Fault Zone, West Central Africa. *Journal of Geophysics and Engineering*, 3, 82-89, 2006.
- Noutchogwe Tatchum, C. B. : Apport de la gravimétrie à l'étude de la bordure méridionale du plateau de l'Adamaoua (Cameroun). Thèse de Doctorat 3e cycle. Université de Yaoundé I, Cameroun, 127, 2004.
- Nyaban, C. E., Ndougsa-Mbarga, T., Bikoro-Bi-Alou, M., Manekeng Tadjouteu, S. A., and Assembe, S. P.: Multi-scale analysis and modelling of aeromagnetic data over the Bétaré-Oya area in eastern Cameroon, for

structural evidence investigations, *Solid Earth*, 12, 785–800, <https://doi.org/10.5194/se-12-785-2021>, 2021.

Nzenti, J. P.: “Prograde and retrograde garnet zoning at high pressure and temperature in metapelitic and grenatite rocks from Yaoundé”. *Jour. Afr. Earth Sci.*, 15, 73 – 79, 1992.

Nzenti, J.P., Barbey, P., Macaudiere, J. and Soba: Origin and evolution of the late Precambrian high-grade Yaoundé gneisses (Cameroon). *Precambrian Research*, vol. 38, 91-109, 1988.

Nzenti, J.P. : Pétrogenèse des migmatites de Yaoundé (Cameroun) : éléments pour un modèle géodynamique de la chaîne panafricaine Nord Equatoriale. Thèse Université de Nancy I, 147, 1987.

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

Owono Amougou, O. U. I. : Cartographie aéromagnétique et gravimétrique multi-échelle de l’Est Cameroun. Thèse de Doctorat Ph. D. Université de Yaoundé I, Cameroun, 185, 2020.

Owono Amougou, O. U. I., Ndougsa, M. T., Meying, A., Assembe, S. P., Ngoh, J.D., Ngoumou, P. C., and Yandjimain, J.: Evidence of Major Structural

- Features over the Pan-African Domain in the Bertoua-Mbangue Area (East Cameroon) from a Multiscale Approach of Modeling and Interpretation of Aeromagnetic Data. *International Journal of Geophysics*, Volume 2019, Article ID 9148678, <https://doi.org/10.1155/2019/9148678>, 2019.
- Paterson, G., and Watson Ltd.: Aeromagnetic studies on some regions of the United Republic of Cameroon. Interpretation Report, Canadian International Development Agency, Toronto, 192, 1976.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J. K.: An Earth Gravitational Model to Degree 2160: Presented at the EGU General Assembly, Vienna Austria, April, 13-18, EGM 2008.
- Parasnis, D. S.: Principles of Applied Geophysics: 5th edition, Chapman and Hall, London, England, 400, 1997.
- Penaye, J., Toteu, S.F., Tchameni, R., Van Schmus, W.R., Tchakounté, J., Ganwa, A. Minyem, D. and Nsifa, E.N.: The 2.1 Ga West Central African belt in Cameroon : extension and evolution. *Journal of African Earth Sciences* 39, 159-164, 2004.
- Penaye, J., Toteu, S. F., Van Schmus, W. R. and Nzenti, J. P.: U-Pb and Sm-Nd preliminary geochronologic data on the Yaoundé Series, Cameroon: re-interpretation of the granulitic rocks as the suture of a collision in the 'Centrafrican' belt. *C.R. Académie des Sciences Paris* 317 : 789-794, 1993.

Pepogo, M. A. D. : Mise en évidence des relations entre déformations tectoniques et minéralisations aurifères à l'aide de la méthode audiomagnétotellurique (AMT) dans les régions de Garga Sarali - Ndokayo, Est Cameroun. Thèse de Doctorat / Ph D, Université de Yaoundé I, Cameroun, 199, 2020.

Pepogo, M. A. D., Ndougsa-Mbarga, T., Meying, A., Ngoh, J.D., Mvondo, O. J., and Ngoumou, P. C.: New Geological and Structural Facts under the Lateritic Cover in Garga Sarali, Ndokayo (East Cameroon) Area, from Audiomagnetotellurics Soundings, International Journal of Geophysics, Volume 2018, Article ID 4806357, 17, <https://doi.org/10.1155/2018/4806357>, 2018.

Poidevin, J. L. : Le Protérozoïque supérieur de la République Centrafricaine, Annals of Royal Museum for Central Africa, Tervuren, vol. 91, 74, 1985.

Poudjom-Djomani, Y. H., Legeley-Padovani, A., Boukeke, D. B., Nnange, J. M., AtebaBekoa, Albouy, Y. et Fairhead, J. D.: Levés gravimétriques de reconnaissance du Cameroun. Mémoire ORSTOM, France, 38, 1996.

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

- Rasmussen, R. and Pedersen, L.B.: End corrections in potential field modelling, *Geophys. Prospect.*, 27, 749–760, 1979.
- Reeves, C.: *Aeromagnetic Surveys; Principles, Practice, and Interpretation*, Geosoft, 155, 2005.
- Regnault, J.M.: *Geological Synthesis of Cameroon*. 119, 1986.
- Reid, A. B., Allsop, J.M. Granser, H., Millett, A. J. and Somerton. I. W.: Magnetic interpretation in three dimensions using Euler Deconvolution: *Geophysics*, vol.55, 80-90. <https://doi.org/10.1190/1.1442774>, 1990.
- Rolin P. : “La zone de décrochement panafricain des Oubanguides en République Centrafricaine,” *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, vol. 320, no. 2A, 63–69, 1995.
- Roy, K. K. : *Potential theory in applied geophysics*, Springer, Berlin, 2008.
- Sabaka, T. J., Olsen, N. and Langel, R. A. : A comprehensive model of the quiet-time, near- Earth magnetic field : phase 3, *Geophysical Journal International*, 151, 32-68, 2002.
- Sailhac, P. : *Analyse multiéchelle et inversion de données géophysiques en Guyane Française*, Thèse de Doctorat de l'Institut de Physique du Globe de Paris, 250, 1999.

Salem, A., Williams, S., Fairhead, J.D., Smith, R. and Ravat, D.J.: Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives. *Geophysics* 73, 1–10, <https://doi.org/10.1190/1.2799992>, 2008.

Salem, A., William, S., Fairhead, D., Ravat, D. and Smith, R.: Tilt-depth method: a simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. *The Leading Edge* December, *Meter Reader*, 150, 2-5, <https://doi.org/10.1190/1.2821934>, 2007.

Shandini, N. Y., Tadjou, J. M. and Basseka, C. A.: “Delineating deep basement faults in South Cameroon area,” *World Applied Sciences Journal*, vol. 14, no. 4, 611–615, 2011.

Simon, F. : Méthode magnétique appliquée à l'exploration multi-échelle du Bassin de Franceville. Thèse de Doctorat de l'Université de Strasbourg, 330, 2012.

Skalbeck, J.D., Karlin, R.E., Shevenell, L. and Widmer, M.C.: Gravity and aeromagnetic modeling of alluvial basins in the southern Truckee Meadows adjacent to the Steamboat Hills geothermal area, Washoe County, Nevada. *Geophysics*, Vol. 70, N°3, <https://doi.org/10.1190/1.1925739>, 2005.

Soba, D., Michard, A., Toteu, S. F., Norman, D. I., Penaye, J., Ngako, V., Nzenti, J. P. et Dautel, D.: Données géochronologiques nouvelles (Rb–Sr, U–Pb, Sm–Nd) sur la zone mobile panafricaine de l’Est Cameroun : âge Protérozoïque

- supérieur de la série de Lom. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Sciences de la Terre et des Planètes, 315, 1453-1458, 1991.
- Soba, D.: The Lom series: geological and geochronological study of a volcano-sedimentary basin of the Pan-African chain in eastern Cameroon. State Doctorate Thesis, Pierre and Marie Curie University, Paris 6, 198, 1989.
- Stuart, G. W., Fairhead, J. D., Dorbath, L. and Dorbath, C. : A seismic refraction study of the crustal structure associated with the Adamawa Plateau and Garoua rift, Cameroon, West Africa. Geophysics Journal Royal Astronomical society, 81, 1 – 12, 1985.
- Suh, C. E., Lehmann, B. and Mafany, G. T. : Geology and geochemical aspects of lobe gold mineralization at the Dimako-Mboscorro, SE Cameroon. Geological Society of London, 6, 295-309, 2006.
- Tabod, C. T., Fairhead, J. D., Stuart, G. W., Ateba, B. and Ntepe N. : Seismicity of the Cameroon Volcanic Line, 1982-1990. Tectonophysics, 212, 303 – 320, 1992.
- Tadjou, J.M., Nouayou, R., Kamguia, J., Kande, H.L. and Manguelle-Dicoum, E.: Gravity analysis of the boundary between the Congo craton and the Pan-African belt of Cameroon. Austrian J. Earth Sci., 102, 71-79, 2009.

Tchameni, R. : Géochimie et géochronologie des formations de l'Archéen et du Paléoprotérozoïque du Sud-Cameroun (Groupe du Ntem, craton du Congo).

Thèse Doctorat Université d'Orléans, France, 356, 1997.

Tchameni, R., Pouclet, A., Penaye, J., Ganwa, A. A. and Toteu, S. F. :

Petrography and geochemistry of the Ngaoundéré Pan-African granitoids in Central North Cameroon: Implications for their sources and geological setting. *Journal of African Earth Sciences*, 44, 511-529, 2006.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and Keys, D.A. :

*Applied Geophysics*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 860, 1990.

Telford W.M., Geldart L.P. and Sheriff R.E.: *Applied Geophysics*, second edition,

Cambridge University Press, 770, 1998.

Thompson D.T.: EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth

estimates from Magnetic data. *Geophysics*, vol. 47, 31-37,

<https://doi.org/10.1190/1.1441278>, 1982.

Toteu, S. F., Fouateu, R. Y., Penaye, J., Tchakounte, J., Mouangue, A. C. S., Van

Schmuss, W. R., Deloule, E. and Stendal, H.: U-Pb dating of plutonic rocks

involved in the nappe tectonics in southern Cameroon: Consequence for the

PanAfrican orogenic evolution of the central African fold belt. *Journal of*

*African Earth Sciences*, 44, 479 – 493, 2006.

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

Toteu, S. F., Van Schmus, W. R., Penaye, J. and Michard, A. : 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, 2001.

Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., Penaye, J., Nyobe, J.B.: U-Pb and Sm-Nd evidence for eburnean and panafrican high grade metamorphism in cratonic rocks of southern Cameroon. Pre. Res., 67, 321-347, 1994.

Toteu, S. F., Michard, A., Bertrand, J. M. and Rocci, G.: U/Pb dating of Precambrian rock from North-Cameroon, Orogenic evolution and chronology of the Pan-African belt of central African. Precambrian Research, 37, 71-87, 1987.

Tremolet L., E. : Magnétisme II : Matériaux et application, PUG, Grenoble, 1999.

Vairon, J. : Protocole d'accord pour la recherche des minéralisations d'or dans la province de l'Est (Cameroun) mission or, Batouri. Quatrième phase BRGM, 86, CMR, 1986.

- Verduzco, B., Fairhead, J. D, Green, C. M. and Mackenzie, C.: New insights into magnetic derivatives for structural mapping. The Leading Edge, SEG February, 116-119, <https://doi.org/10.1190/1.1651454>, 2004.
- Vicat, J.P.: Esquisse géologique du Cameroun, GEOCAM 1/1998, Presses Universitaires de Yaoundé I, 3 -11, 1998.
- Vishiti, A., Suh, C.E., Lehmann, B., Egbe J. and Shemang E.: Gold grade variation and particle microchemistry in exploration pits of the Batouri gold district, SE Cameroon. Journal of African Earth Sciences 111, 1-13, 2015.
- Won, I.J. and Bevis, M.: Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and FORTRAN subroutines, Geophysics, 52, 232–238, <https://doi.org/10.1190/1.1442298>, 1987.
- Yandjimain, J., Ndougsa-Mbarga, T., Meying, A., Bi-Alou, M.B., Ngoumou, P.C., Assembe, S.P., Ngoh J.D. and Owono-Amougou, O.U.I.: Combination of Tilt-angle and Euler Deconvolution Approaches to Determine Structural Features from Aeromagnetic Data Modeling over Akonolinga-Loum Area Centre-East, Cameroon. International Journal of Geosciences, 8, 925-947, 2017.
- Yonta, N.C. : Le contexte géologique des indices de talc de la région de Boumnyebel (Chaîne Panafricaine d’Afrique Centrale, Cameroun). Thèse de Doctorat d’Etat. Université de Yaoundé I., 425, 2010.

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

Zeng, H.: Estimation of the Degree of Polynomial Fitted to Gravity Anomalies and Its Applications. *Geophysical Prospecting*, 37, 959-973, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02242.x>, 1989.

## ANNEXES

### **Publications issues de la thèse**

**1- Nyaban, C. E., Ndougsa-Mbarga, T., Bikoro-Bi-Alou, M., Manekeng Tadjouteu, S. A., and Assembe, S. P.:** Multi-scale analysis and modelling of aeromagnetic data over the Bétaré-Oya area in eastern Cameroon, for structural evidence investigations, *Solid Earth*, 12, 785–800, <https://doi.org/10.5194/se-12-785-2021>, 2021.



# Multi-scale analysis and modelling of aeromagnetic data over the Bétaré-Oya area in eastern Cameroon, for structural evidence investigations

Christian Emile Nyaban<sup>1</sup>, Théophile Ndougsa-Mbarga<sup>1,2</sup>, Marcelin Bikoro-Bi-Alou<sup>3</sup>, Stella Amina Manekeng Tadjouteu<sup>1</sup>, and Stephane Patrick Assembe<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Postgraduate School of Sciences, Technologies & Geosciences, University of Yaoundé I, Yaoundé, Cameroon

<sup>2</sup>Department of Physics, Advanced Teachers' Training College, University of Yaoundé I, P.O. Box 47 Yaoundé, Cameroon

<sup>3</sup>Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Maroua, Maroua, Cameroon

<sup>4</sup>Department of Physics, Faculty of Science, University of Bamenda, Bamenda, Cameroon

**Correspondence:** Théophile Ndougsa-Mbarga (tndougsa@yahoo.fr)

Received: 28 June 2020 – Discussion started: 23 July 2020

Revised: 6 February 2021 – Accepted: 9 February 2021 – Published: 6 April 2021

**Abstract.** This study was carried out in the Lom series in Cameroon, at the border with Central African Republic, located between the latitudes 5°30'–6° N and the longitudes 13°30'–14°45' E. A multi-scale analysis of aeromagnetic data combining tilt derivative, Euler deconvolution, upward continuation, and 2.75D modelling was used. The following conclusions were drawn. (1) Several major families of faults were mapped. Their orientations are ENE–WSW, E–W, NW–SE, and N–S with a NE–SW prevalence. The latter are predominantly sub-vertical with NW and SW dips and appear to be prospective for future mining investigations. (2) The evidence of compression, folding, and shearing axis was concluded from superposition of null contours of the tilt derivative and Euler deconvolution. The principal evidence of the local tectonics was due to several deformation episodes (D1, D2, and D4) associated with NE–SW, E–W, and NW–SE events, respectively. (3) Depths of interpreted faults range from 1000 to 3400 m. (4) Several linear structures correlating with known mylonitic veins were identified. These are associated with the Lom faults and represent the contacts between the Lom series and the granito-gneissic rocks; we concluded the intense folding was caused by senestral and dextral NE–SW and NW–SE stumps. (5) We propose a structural model of the top of the crust (schists, gneisses, granites) that delineates principal intrusions (porphyroid granite, garnet gneiss, syenites, micaschists, graphite, and garnet gneiss) responsible for the observed anomalies. The 2.75D modelling re-

vealed many faults with a depth greater than 1200 m and confirmed the observations from reduced-to-Equator total magnetic intensity (RTE-TMI), tilt derivative, and Euler deconvolution. (6) We developed a lithologic profile of the Bétaré-Oya basin.

## 1 Introduction

There is a renewed interest in magnetic methods for solid mineral, hydrocarbon, and geological research. During data interpretation, the first crucial step is the removal of the effect of deep-seated structures from the observed total magnetic field to enhance shallow body signatures (Ndougsa et al., 2013). These shallow bodies in mining exploration are generally associated with mineral substances which have magnetic properties (Ndougsa et al., 2013). In our study, magnetic fabrics are signalled by Kankeu et al. (2009). The second step is mapping the causative body's edges, which is fundamental to the use of potential field data for geological mapping. The edge detection techniques are used to distinguish between different sizes and different depths of the geological discontinuities (Oruç et al., 2011). There have been several methods proposed to help normalize the magnetic signatures in images. Cordell and Grauch (1985) have suggested a method to locate horizontal extents of the sources from the maxima of horizontal gradient of the pseudo-gravity com-

puted from the magnetic anomalies. Verduzco et al. (2004) discussed the use of tilt derivatives from gravity or magnetic field anomaly maps using the horizontal gradient magnitude of the tilt derivative as an edge detector for vertical contacts.

Salem et al. (2008) developed a new interpretation method for gridded magnetic data based on the tilt derivative, without specifying prior information about the nature of the source. In this article, we have used the approach of Salem et al. (2007) for the location of vertical contacts and source depth. In addition, because the identified source has a non-uniform volume from the roof to the bottom, we examine how this volume varies with depth by using upward continuation of magnetic anomaly.

## 2 Geological and tectonic setting

### 2.1 Regional setting

The following structural domains can be distinguished in the Pan-African Belt north of the Congo craton (Toteu et al., 2004; Fig. 1):

- a. a pre-collisional stage that includes the emplacement of pre-tectonic calc-alkaline granitoids (e.g. at 660–670 Ma);
- b. a syn-collisional stage inducing crustal thickening and delamination of the subcrustal lithospheric mantle and comprising D1 and D2 deformations and S-type granitoids (640–610 Ma; Toteu et al., 2004);
- c. a post-collisional stage associated with D3 deformation (nappe and wrench) concomitant with the exhumation of granulites, development of D4 shear zones, and emplacement of late-tectonic calc-alkaline to sub-alkaline granitoids (600–570 Ma).

The Pan-African formations of Cameroon belong to the mobile zone of central Africa (Bessoles and Trompette, 1980), also known as the Oubanguide chain (Poidevin, 1985). It is attached to the east to Pan-African formations of the Mozambican belt of sub-meridian orientation. To the west, it extends to the north of Brazil by the Sergipe range. Two large dextral mylonitic shear zones, the Sanaga Fault (Dumont, 1986) and the central Cameroon shear zone, cross Cameroon from the north-east to the south-west. These major shears belong to the Oubanguides setback zone (Rolin, 1995), which runs continually from the Gulf of Guinea to the Gulf of Aden (Cornacchia and Dars, 1983). Geologically, the Pan-African mobile chain is composed of granites, schists, micaschists, and migmatites (Poidevin, 1985).

### Local setting

The study area is in eastern Cameroon; it is bounded by northern latitudes 5°30′–6° and eastern longitudes 13°30′–14°45′ (Fig. 2). The lithology comprises the Lom series, a

sequence of Neoproterozoic rocks consisting of metasedimentary and metavolcanic rocks with late granitic intrusions (Ngako et al., 2003). The lithologic units have a strong NE–SW regional foliation deflected in places by the granitic pluton reflecting dextral and sinistral shear senses. The rocks have been metamorphosed to greenschist facies and hydrothermal alteration especially around the granitic plutons (Odey Omang et al., 2014). Gold is sporadically identified in NE–SW quartz veins associated with early pyrite, whereas a vug-filling late pyritization event is barren (Asaah, 2010; Nih-Fon et al., 2012).

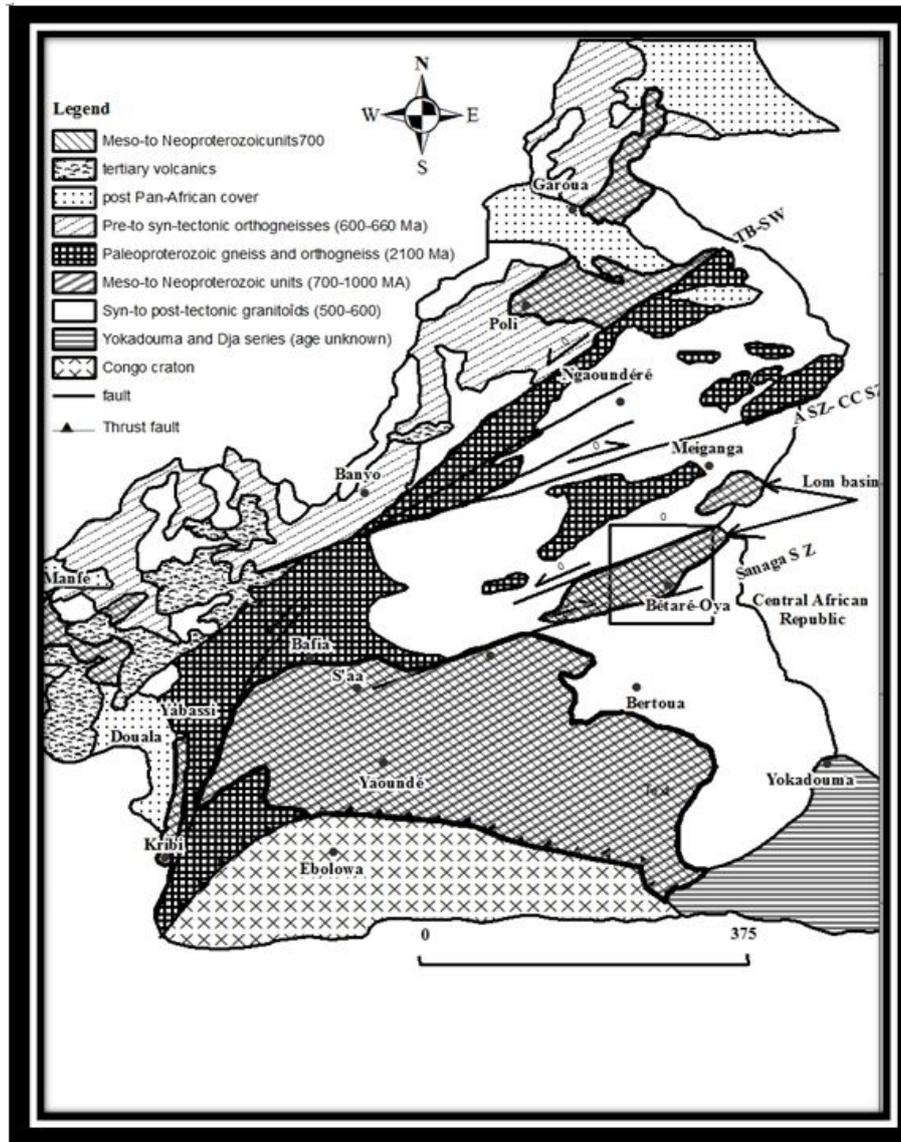
The orography and hydrographic network is structurally guided (Kouske, 2006), sub-divided into three major morphological units. The high-altitude unit (800–1092 m) which is a vast peneplain enamelled by interfluves with multiple vertices of alignment oriented NW–SE, N–S, and NE–SW. The low-altitude unit (652–760 m) is a large flat-bottomed depression, in the centre of which is a U-shaped valley, oriented NE–SW, within which flows the Lom river and the intermediate unit (760–860 m), which corresponds to a long NE–SW-oriented cliff connecting the high-altitude unit to that of low altitude. In its northern part, this unit has an E–W orientation.

### 2.2 Geophysical constraints

Seismic anisotropy in Cameroon has been studied by Koch et al. (2012) through analysis of SKS splitting, which allowed four regions of distinct anisotropy to be identified: moderately strong NE–SW-oriented fast polarization directions ( $\delta t \approx 1.0$  s) beneath two regions, the Congo Craton in the south and the Garoua rift in the north; weak anisotropy ( $\delta t \approx 0.3$  s) between the Congo Craton and the CVL; N–S-oriented fast polarization directions within the CVL, with  $\delta t \approx 0.7$  s (Koch et al., 2012). Benkhelil et al. (2002) used seismic data and proposed a structural and chronostratigraphic scheme of the southern Cameroon basin (clayey sand, dolomitic to calcite sandstone, marls and sandstone, dolomitic sandstone, granite, gneiss).

Gravity studies were carried out, and Tadjou et al. (2004) identified many structures like contacts, dykes, fractures, and faults in the transition zone between the Congo Craton and the Pan-African Belt in central Africa. Shandini et al. (2011) found evidence in the northern margin of the Congo Craton of a deep structure, which corresponds to a classical model of the collision suture of the West African Craton and Pan-African Belt.

Owono et al. (2019) used 2.75D modelling of aeromagnetic data in Bertoua and showed intrusive bodies composed of gneiss and porphyroid granite and some domes with their roof situated at various depths not exceeding 1800 m from the surface. The structural map of the study area shows the trending of the structural features observed, namely, NE–SW, NW–SE, ENE–WSW, and WNW–ESE, while the E–W and



**Figure 1.** Geologic map of Cameroon, modified from Kankeu et al. (2009) and available in the public domain, showing major lithotectonic units: ASZ, Adamaoua shear zone; CCSZ, central Cameroon shear zone; TBSZ, Tcholliré-Banyo shear zone. The location of the study area is marked by a box and shown in detail in Fig. 2.

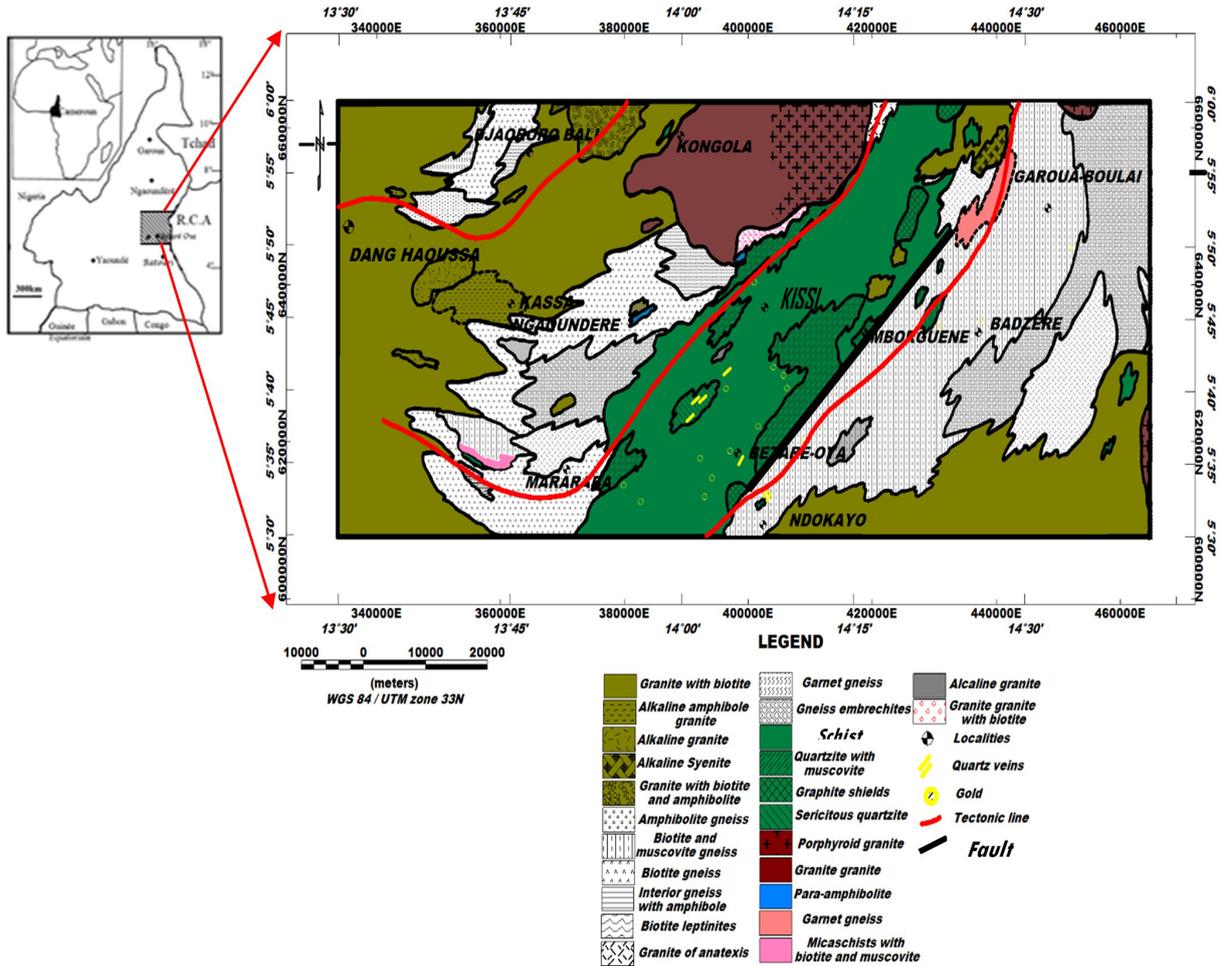
N–S are secondary orientations of the observed tectonic evidence.

### 3 Materials and methods

#### 3.1 Data acquisition and processing

The aeromagnetic data were collected in Cameroon by Survaïr Limited through the Cameroon–Canada cooperation framework in the 1970s. Data were collected along N–S flight lines at 750 m spacing, with a flying height of 235 m; the measurements involved a magnetometer with a sensitivity of 0.5 nT (Paterson et al., 1976). Aeromagnetic anomaly

maps have been digitized using the geographical information system software (Mapinfo Pro. 16.0) and interpolated on a grid with 750 m cells. The estimate error introduced is 0.28 mm, which is usually considered to be the distinctive capacity of human vision (Achilleos, 2010). Gridding and processing were done with Geosoft v8.4 software. The IGRF-70 reference field values were removed from the observed magnetic data as stated by Reeves (2005).



**Figure 2.** Geological map of the study area (Gazel and Gerard, 1954, modified as a document available in the public domain). In the centre we have the Lom series marked by its greenschist facies. We can also perceive in red the tectonic lines that cross the study area.

**3.2 Methods**

**3.2.1 Upward continuation**

The upward continuation computes the magnetic field that would have been measured further away from the source, with is the smoothing operation. The upward continuation was proposed by Henderson and Zietz (1949) and described by Blakely (1996). In this study it helps us to easily visualize the effects of the deep sources and to remove their effect.

**3.2.2 The tilt-angle approach**

The tilt angle (Miller and Singh 1994; Verduzco et al., 2004; Salem et al., 2007) is defined by Eq. (1) below for a potential field anomaly  $T$ :

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\frac{\partial T}{\partial h}}, \tag{1}$$

where  $\frac{\partial T}{\partial h} = \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$  is the horizontal gradient magnitude and  $\frac{\partial T}{\partial z}$  is the vertical gradient;  $\frac{\partial T}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial T}{\partial y}$  are the horizontal gradients along the  $x$  and  $y$  directions, respectively.

In 2007, Salem et al. (2007) extended the method to the determination of depth to source by relating the depth  $Z_c$  of the source and its horizontal location  $h$  to the tilt angle through Eq. (2):

$$\theta = \tan^{-1} \frac{h}{Z_c}. \tag{2}$$

This means that the vertical contacts are located for a nil tilt ( $h = 0$ ), and the depth corresponds to horizontal distance between  $0$  and  $\pm 45^\circ$  contours, i.e.  $h = \pm Z_c$  (Salem et al., 2007).

**3.2.3 Qualitative analysis by tilt-angle derivative**

The tilt-angle operator can be used for mapping geological structures because it permits their contacts and their shapes

**Table 1.** Structural index for magnetic sources of different geometries.

Source	Smellie model	Structural index
Sphere	Dipole	3
Vertical line end (pipe)	Pole	2
Horizontal line (cylinder)	Line of dipoles	2
Thin bed fault	Line of dipoles	2
Thin sheet edge	Line poles	1

to be located and delimited (Miller and Singh, 1994). By coupling it to the extension upward, it becomes more interesting because one obtains the lateral extension of body but also of depth and therefore its three-dimensional shape. Salem et al. (2007) proposed the use of tilt angle for the localization of vertical contacts, knowing that the upward continuation operator can attenuate short wavelengths and allow long wavelengths to be visualized (Henderson and Zietz, 1949). We can therefore use it for a better visualization of the behaviour of contacts with depth. Thus, we have

- generated the total magnetic intensity (TMI) maps reduced to the Equator and then applied upward continuation for 1 and 2 km,
- computed the position of the contact considered as vertical of these different three maps using Salem et al. (2007), and
- finally superimposed the different contact maps obtained to evaluate the continuity of the sources. This technique is used in the qualitative analysis for tilt-derivative results.

### 3.2.4 Euler deconvolution

This method was introduced by Thompson (1982) based on the Euler homogeneity equation to solve for the source depths for profile data. Reid et al. (1990) extended the operator to gridded data by using Eq. (3):

$$(x - x_o) \frac{\partial M}{\partial x} + (y - y_o) \frac{\partial M}{\partial y} + (z - z_o) \frac{\partial M}{\partial z} = N(B - M), \quad (3)$$

where  $(x, y, z)$  represents the coordinates of the observation point;  $(x_o, y_o, z_o)$  represents the coordinate of the magnetic source;  $M$  and  $B$  are the field at the observation point and regional the field respectively; and  $N$ , the structural index, characterizes the variation rate of the field in relation to the distance due to the type of source (Table 1). In this study, we take the advantage of the clustering in depth to define the correct structural index.

### 3.2.5 2.75D modelling

A particularly useful variation on the 2D model, which removes the restriction of infinite strike length and is easier to define than the more complex 3D model, is a model with constant cross section extending over a finite strike length. This is known as a 2.5D model. When the source can have different strike extents on either side of the modelled profile, or the strike or plunge of the body is not perpendicular to the profile, this is called a 2.75D model.

The 2.75D model represents the subsurface as a series of polygonal prisms with horizontal axes ( $x$ ) and finite extent in the strike direction ( $y$ ). This method was described by Skalbeck et al. (2005). Geologic models were constructed with a GM-SYS operator of Geosoft using the 2.75D modelling algorithm from Won and Bevis (1987), based on the analyses of Rasmussen and Pedersen (1979). The 2.75D model gives the interpreter control of the third dimension without the complexity of defining and manipulating a full 3D model.

## 4 Results

After interpolation, data have been reduced to the Equator using the Fourier transform performed with inclination  $I = -11.98^\circ$  and declination  $D = -4.96^\circ$  of 1 January 1970. Our choice of declination and inclination values for the IGRF is included in the interval of validity defined by the latest IGRF-12 (Thébault et al., 2015). This transformation eliminated the tilt of the Earth's magnetic field due to inclination and positioned anomalies directly above the corresponding magnetic source.

### 4.1 Interpretation of the aeromagnetic total field reduced to Equator (RTE)

The magnetic field over the Bétaré-Oya area has a complex magnetic pattern (Fig. 3). For better characterization of the geological structures, we subdivided the area into different units.

#### 4.1.1 Unit A

The major observable singularity is in the centre where a large anomaly about 5 km wide and up to 100 nT is observed. It is oriented NE–SW along the major tectonic feature in this area, namely the tectonic line of the Sanaga (Fig. 1). Comparing with the geological map in Fig. 2, this signal is mainly due to volcano-clastic schists (with gold deposit), also called Lom schists, associated with conglomeratic quartzites with intrusions of granitoids (Kankeu et al., 2009). Hence, the presence of the anomalies with similar signatures could be related to the circulation of hydrothermal fluids rich in magnetic minerals along the Bétaré-Oya shear zone (BOSZ).

#### 4.1.2 Unit B–C

In the north-eastern part of Bétaré-Oya, particularly around Badzéré, two heterogeneous anomalies are observed. They are in the south of the area at Ndokayo, with very long wavelength of about 22 km. Their amplitudes are quite high and reach 120 nT. They are aligned with one of the major foliations in this area trending E–W. The shape and amplitude of these anomalies suggest high magnetization of the causative bodies, such as igneous granitoids known to be in this area.

#### 4.1.3 Unit D–E

In Mararaba and Kassa, there is a large magnetic anomaly (Fig. 3). It is characterized by a long wavelength with variable amplitude reaching 150 nT; its approximate direction is ENE–WSW. We can also observe anomalies of 100 and 20 nT intensity; elongated shapes; circular and semi-circular shapes; and short wavelengths oriented ENE–WSW, NW–SE, and NE–SW corresponding to structural directions in the study area (Kankeu et al., 2009; Nih-Fon et al., 2012).

#### 4.1.4 Unit F

In the north-western part of Garoua-Boulai, a heterogeneous anomaly with irregular shapes and a very long wavelength of about 22 km has been observed. Its amplitude is quite high and reaches 177 nT. Its approximate direction is ENE–WSW. It is probably associated with the meta-volcanic outcrops of the meta-lava within the schistous Lom series (Regnault, 1986).

#### 4.1.5 Unit G

The lowest magnetic intensities are recorded in the north-west near Djaororo-Bali, where anomalies with amplitudes down to  $-98.9$  nT are found that are associated with surface meta-sediments such as modified-biotite gneiss overlying the old metamorphic basement.

### 4.2 Tilt angle on residual map

The residual map is obtained by subtracting the total magnetic field map reduced to the Equator to the regional map. The determination of the optimum regional anomaly map for the study area relies on the method of Zeng (1989). This method consists of determining a suitable altitude for upward continuation in the study area. The extrema of each altitude of upward continuation are then counted (Table 2). These are points where the gradient is null. Further, a graph of extrema versus altitudes of upward continuation is plotted (Fig. 4). Finally, the suitable altitude ( $h = 10$  km) necessary for the upward continuation technique is determined graphically (Jacobsen, 1987; Jean et al., 2016).

The generated tilt angle map (Fig. 5) represents possible lineaments of the study area. On this map it can clearly be

**Table 2.** Maxima and altitudes of upward continuation.

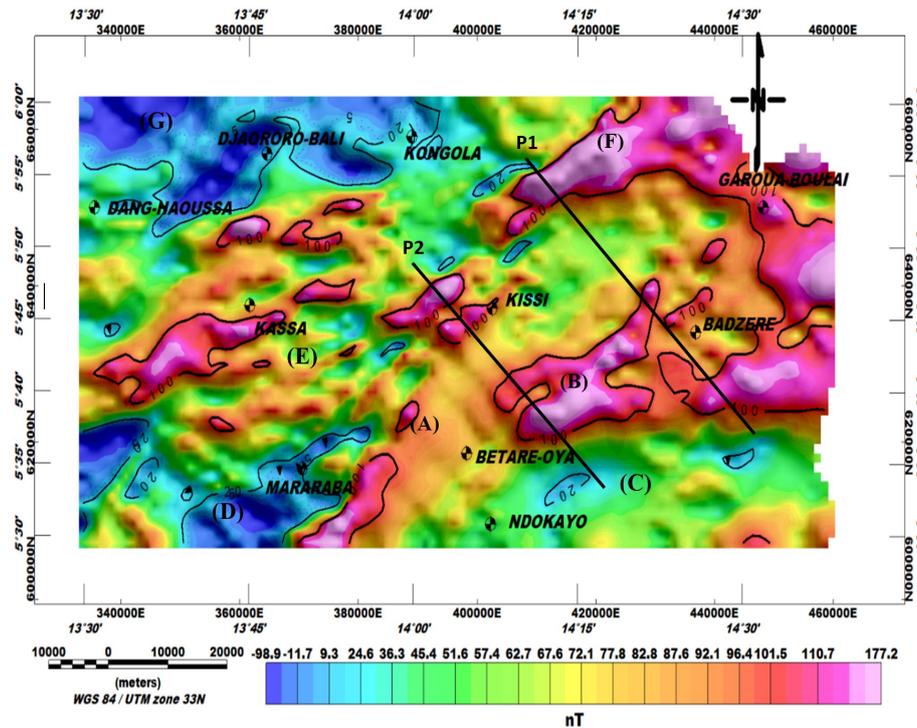
Number of maxima	Altitudes of upward continuation (km)
38	0
19	1
14	2
6	3
5	4
5	5
2	6
1	7
1	8
1	9
0	10

seen that the signal is uniformly distributed in  $-1.6$  to  $1.6$  rad intervals, thus making it possible to map the lineaments with an extremely high resolution. The presence of several accidents marks the heterogeneity of the basement in this area as well as the intense deformation undergone by its subsurface. The lineaments and spatial patterns of geophysical attributes are important data that can be obtained from magnetic interpretations. Steep features and straight faults are commonly expressed as subtle lineaments of potential fields. This expression can be gradient zones, local anomaly alignments of different types and shapes, aligned breaks, or discontinuities in the anomaly model.

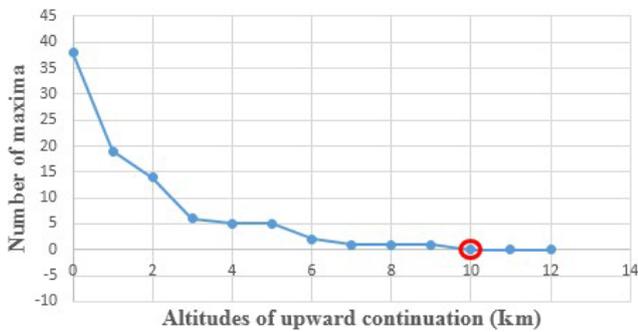
### 4.3 Structural map

To characterize information, we were interested in the peaks of anomalies derived from the tilt-angle derivative (Fig. 5). We counted 111 lineaments, among which 45 have lengths varying between 2.5 and 10.8 km, 37 are minor lineaments varying between 1.2 and 2.3 km, and 29 are major lineaments between 2.4 and 15.6 km. Five structural NE–SW families are observed: ENE–WSW, E–W, NW–SE, N–S, and the major structural direction NE–SW (Fig. 6).

The longest faults are present at the eastern edge of the Lom series with lengths of more than 15 km (F1, F3, F7). To the west we also note the NE–SW F4 fault with more than 10 km length, which marks the limit of the Lom series (Fig. 7). The most remarkable is the change of direction of compression or deformation axes. The E–W events marked by the faults F15, F16, F19, F25, and F26 at the eastern edge of the Lom and by the faults F5, F9, and F10 in the west seem to have been taken up by the tectonic accidents F1, F2, F3, F4, F7, F8, F12, and F23 punctuated by the BOSZ. The same phenomenon occurs in the extreme west of the study area around Dang Haoussa and Mararaba with the ENE–WSW (F13, F14, F18, F20, F21, F22) and NW–SE (F27, F29) accidents, respectively. These discrepancies



**Figure 3.** Total magnetic intensity (TMI) map reduced to the Equator.



**Figure 4.** Number of extrema versus upward continuation height. From  $h = 10$  km (circle in red), the number of maxima becomes constant and does not vary anymore.

suggest the passage of shear faults. The curvature (type II) structures corresponding to foliations induce most of the major fault network present in the Bétaré-Oya area. In order to confirm the results obtained by the tilt derivative, we apply the Euler deconvolution method.

#### 4.4 3D extension of anomalies

By superposing the zero contours of tilt angle of the residual map, we obtain Fig. 8, which has no perfect superimposition of sources on the previous ones and hence assumes the heterogeneity of the basement and the existence of movements that affected the subsurface formations. Deep crustal tight-

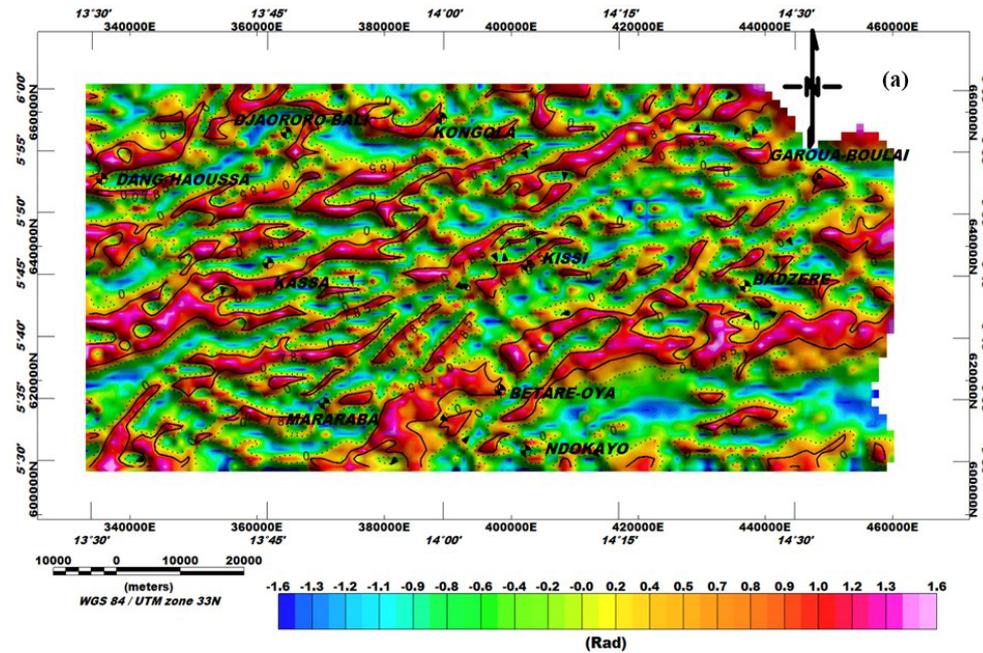
ening of volcano-clastic rocks in the vicinity of Bétaré-Oya confirms that the site is affected by shear tectonics (Soba, 1989), causing deep and shallow faults. This is shown by the contact between the granito-gneissic rocks and the Lom schists (Fig. 2). These contours delimit the edges of the magnetic source, so their superposition in depth allows an idea to develop about the disposition, the extent, the dip, and the shape of the geological sources responsible for the magnetic anomalies observed.

By applying the principles mentioned in Sect. 3.2.2, we observed the following from the obtained map (Fig. 8 below):

- i. They are not identical, which could mean that the contacts situated near the surface could be masked by those located at the subsurface or in depth.
- ii. There are some vertical contacts that narrowed with depth. This could be interpreted as a sign of crustal thinning of the source of the anomaly with depth.
- iii. In some places, a lateral displacement of the contact is identified. It could suggest here, a dip of the source in the concerned direction.

For example, the east of Ndokayo, Kassa, and the south-east of Mborguene, several structures lose extension in depth, taking the form of a basic cone of revolution located on the surface (interrupted circle).

The presence of this regional-scale fold system, which controls all movements in the area (BOSZ), suggests an inter-



**Figure 5.** Tilt angle on residual map.

connection of crustal geological structures by lines of faults and foliations. Hence the structural elements highlighted in this study (folds, faults, dykes, etc.) globally belong to Pan-African tectonics.

## 4.5 Quantitative analysis

### 4.5.1 Tilt angle

The tilt-angle operator makes it easy to determine the depth of the vertical contacts (Salem et al., 2007) by estimating the distance between the zero-angle contours and those corresponding to the values  $\pm 45^\circ$  (Fig. 7). We have determined the average-depth interval ranges from 1 to 3 km for major lineaments (Table 3).

### 4.5.2 Euler deconvolution

Euler solutions allowed us to verify the position of the contacts obtained by the tilt-angle method as well as their depth.

The superposition of the structural map with Euler solutions allowed us to delimit deep and superficial faults, dykes, and veins; to delineate tectonic lines established by previous geological studies (Gazel and Gerard, 1954); and to compare with results from the tilt-angle method (Fig. 10).

On the Euler solutions map we have perfectly distinguished the limits of the intrusive bodies and the deeper faults. On these maps, we observe the five main directions of structures, namely NE–SW, ENE–WSW, E–W, NW–SE, and N–S (Fig. 7). In addition, the vertical contacts are clearly

visible on the Euler solutions map and extend over 15 km in length.

The deepest accidents are mainly NE–SW to E–W with depths of over 3500 m and are well located at the eastern limits in the Lom series the Badzéré gneiss contact zone, and around the East fault of Bétaré-Oya. In the south-west of the map, at Mararaba, Euler solutions allow NW–SE faults to be approximately detected that were the result of the highlighted tectonic line (Fig. 9) and whose depths are estimated at 3000 m. We obtain depths ranging from 0.5 to 3.6 km. Figure 10 clearly shows tectonic directions which dominate all subsurface movements of the study area and their depths ranging from 1 to 3.4 km.

### 4.5.3 2.75D modelling

#### Profile 1

This profile (P1) extends 48.8 km NW–SE through Badzere and Mborguene. It crosses six geological formations from NW to SE, namely porphyroid granite, granite with biotite, gneiss embrechites, granite of anatexis, schists, biotite, and muscovite gneiss (Fig. 3). The strongest anomalies are localized in the NW of the profile with an intensity of 177 nT. The basement obtained is made up of granite anatexis which are old magmatic rocks forming the old basement complex and put in place during the first half of the Precambrian. Its maximum depth is  $h = 3.608$  km, which agrees with the depths obtained by the Euler convolution (Fig. 11). Its susceptibility is  $S = 0.05$  SI. Above, one can observe the embrechite gneisses ( $S = 0.025$  SI) and volcano-clastics schists

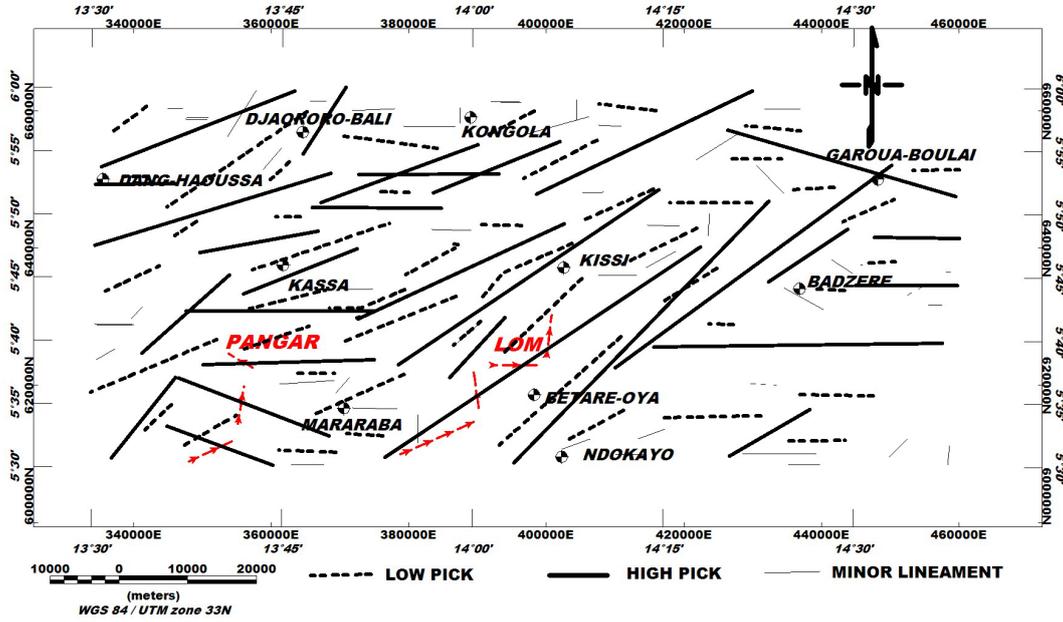


Figure 6. Structural map of the study area.

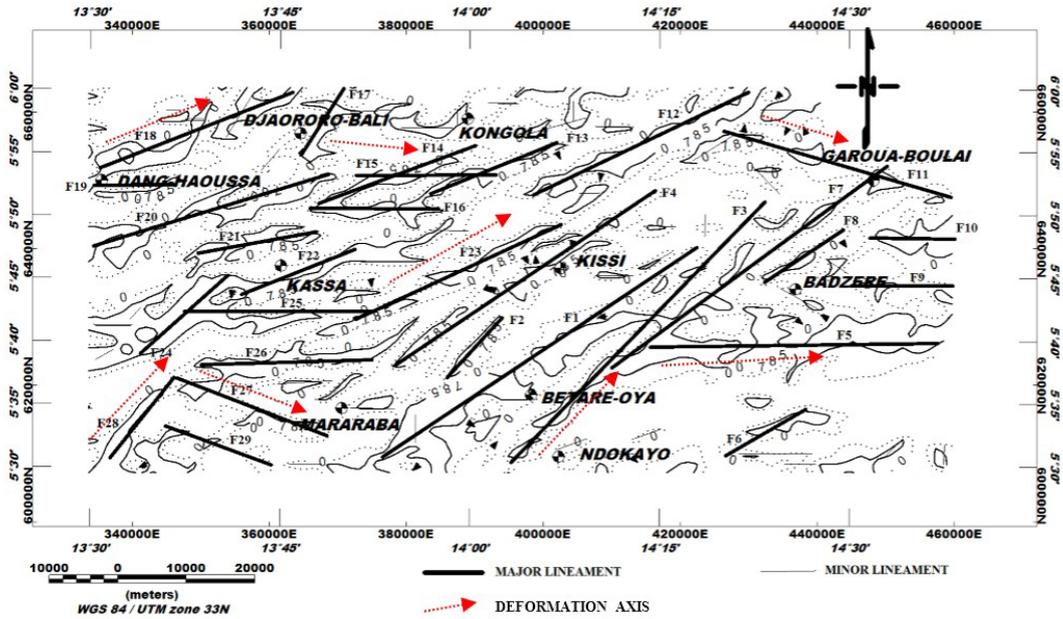


Figure 7. Major faults map superimposed on tilt-angle contours. On this map we observe the major regional deformation axes (NE–SW, E–W, ENE–WSW, and NW–SE) as well as the associated faults (F1 to F29).

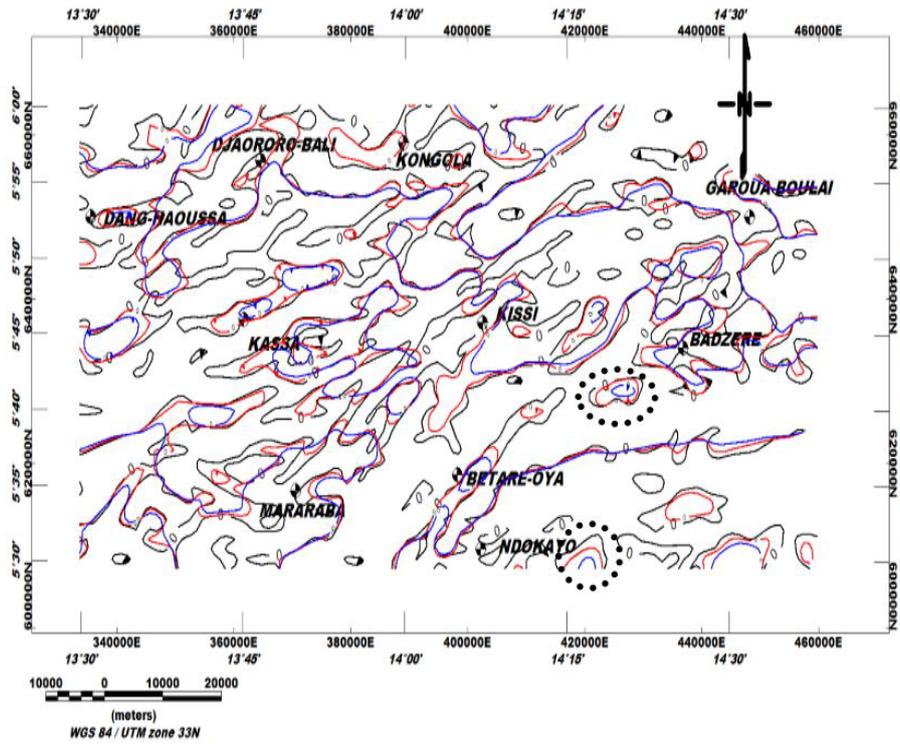


Figure 8. Superposition of contours ( $O = 0^\circ$ ) of tilt angle of upward data RTE continued to 1 km (red) and 2 km (blue).

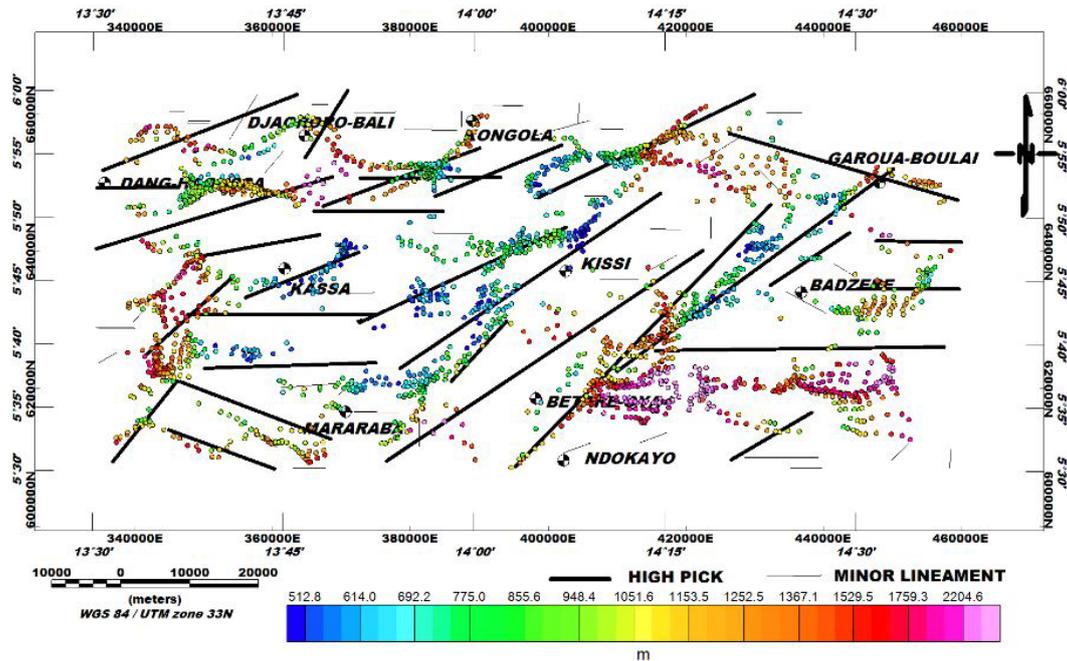
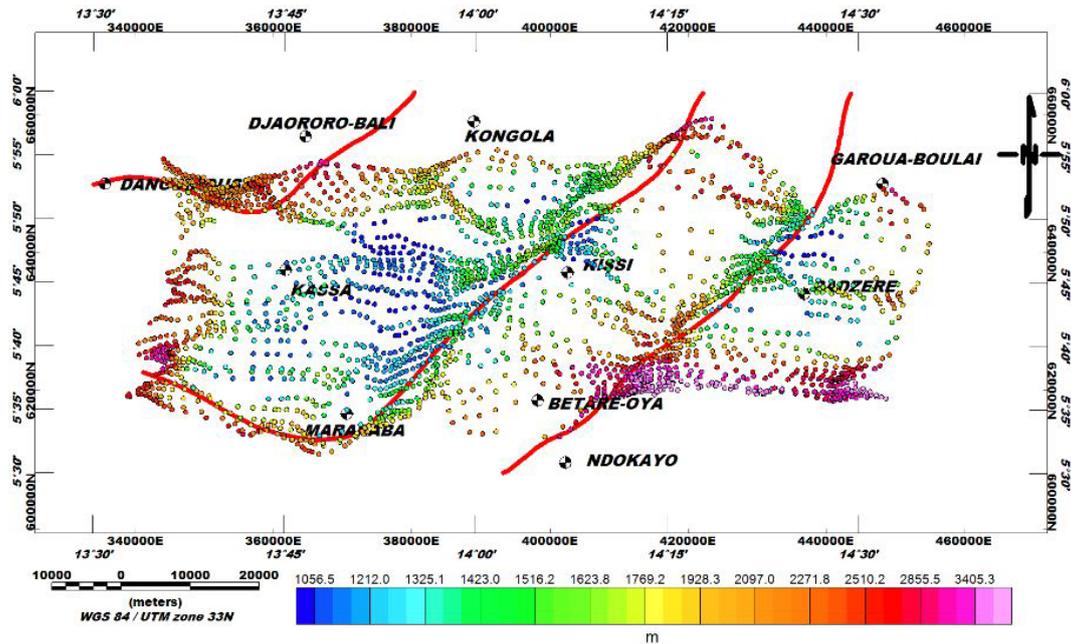


Figure 9. Euler solution ( $N = 1$ ;  $W = 25$ ;  $Z = 10\%$ ).



**Figure 10.** Euler solution ( $N = 2$ ;  $W = 20$ ;  $Z = 10\%$ ). These maps allow for a comparative study with the results obtained from the tilt derivative. They also make it possible to confirm the tectonic lines of the zone (in red) highlighted in the work of Gazel and Gerard (1954) and to estimate their depths.

( $S = 0.019$  SI). This contact between the granito-gneissic rocks and the Lom schists has therefore caused several fractures and faults, represented here by several intrusions: porphyroid granite ( $S = 0.029$  SI), garnet gneiss ( $S = 0.026$  SI), syenites ( $S = 0.035$  SI). Our model agrees with previous geological (Poidevin, 1985; Gazel and Gerard, 1954; Kouske, 2006; Ngako et al., 2003) and geophysical studies (Koch et al., 2012; Owono et al., 2019). These intrusions were set up during the Pan-African orogenesis (Eno Belinga, 1984) and are present in our geological map (Fig. 2).

### Profile 2

Profile 2 (P2) extends 46 km along the NW–SE direction through Bétaré-Oya and Kissi. It crosses five geological formations: biotite leptinites gneiss, quartzite with muscovite schists, schists, biotite and muscovite gneiss, and alkaline granite (Fig. 3). The lowest anomalies are localized in the NW of the profile with an intensity of  $-43.4$  nT, while the strongest are on the edge of the Lom schists with a maximum value of  $65.6$  nT. The basement is made up of anatexite granites ( $S = 0.05$  SI), intruded by strongly magnetized rocks such as syenite ( $S = 0.044$  SI), rhyolite ( $S = 0.037$  SI), and anatexic biotites ( $S = 0.048$  SI). Upstream, one can note the embrechtite gneisses ( $S = 0.025$  SI) discordant to volcanoclastic schists ( $S = 0.023$  SI) located above the metasediment's rocks ( $S = 0.003$  SI). One can also observe several intrusions of micaschists ( $S = 0.0186$  SI), graphite ( $S = 0.00012$  SI), and garnet gneiss ( $S = 0.027$  SI). The geolog-

ical layers obtained are located below the topography, and the maximum depth is  $h = 3.419$  km (Fig. 12), in agreement with the data resulting from the Euler deconvolution. The model from this profile is in accordance with previous studies (geology, seismic, magnetic etc.). We note intrusions from the Pan-African orogenesis (Poidevin, 1985; Gazel and Gerard, 1954; Kouske, 2006; Ngako et al., 2003; Koch et al., 2012; Owono et al., 2019; Eno Belinga, 1984), located in our geological map (Fig. 2).

### 5 Regional analysis of the 2.75D models

The geological synthesis of Cameroon allows us to have a lithostratigraphic sketch of the Lom Formation. Recently, the near-surface work of Mboudou et al. (2017) at Bétaré-Oya proposed the lithological model with topsoil, saprolites, sandy layer, conglomeritic sand, and schist formations.

On our model from profile 2 that passes through the locality of Bétaré-Oya, we observe that the first layers of rocks encountered are well below the topography, which is explained by the fact that the method used allows us to highlight the structuring of deep formations. This would have the effect of hiding the superficial (sediments) and hence the observed shift. Thus, the first formation detected on our models at Bétaré-Oya is schist. We can therefore complete this lithological model with the formations of the Pan-African basement highlighted by our geophysical methods (Fig. 13) and propose the litho-stratigraphic model updated below (Table 4).

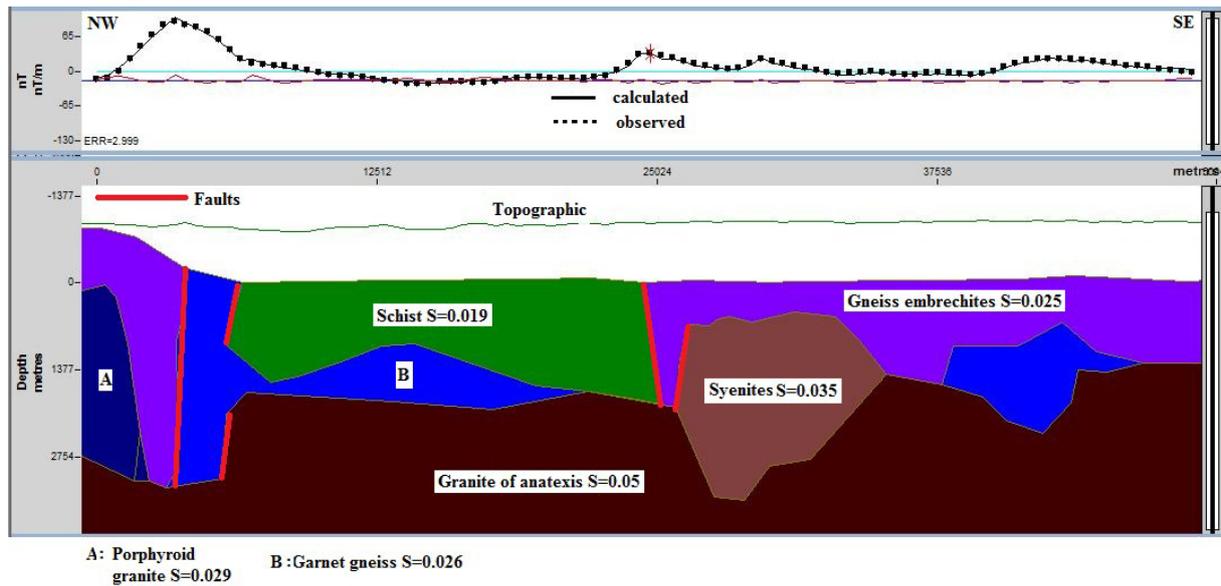


Figure 11. 2.75D model obtained from profile P1.

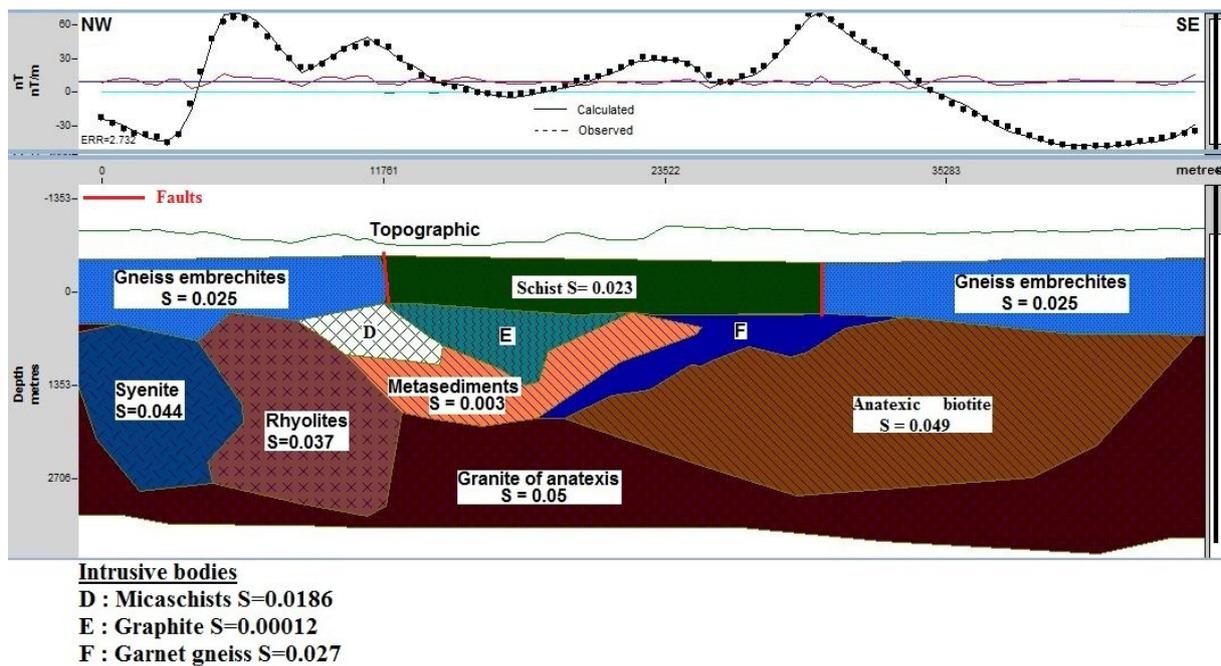


Figure 12. 2.75D model obtained from profile P2.

Crustal formations in our model are in accordance with those obtained by Benkhelil et al. (2002) from seismic data from south Cameroon, and the summary above is in accordance with the geological study of Mboudou et al. (2017).

This model confirms the granite-gneiss nature of the Pan-African base.

The major faults highlighted in this work controlled by the BOSZ belong in fact to a wider network of faults found on the Pan-African and which would extend to the São Fran-

cisco Craton (SFC) by the central Cameroon shear zone (CCSZ). Indeed, the work of Toteu et al. (2004) suggests that the Reghane shear zone, which during the whole Pan-African Belt evolution (650–580 Ma) only recorded dextral wrench movement, can be considered as a major boundary separating the mobile domain in two (Fig. 14) – a western part where the tectonics is controlled by the motion of the WAC and an eastern part controlled by the motion of the Congo craton.

**Table 3.** Main faults of Lom series. This summary table is obtained after comparing the results from the Euler deconvolution method and the tilt derivative.

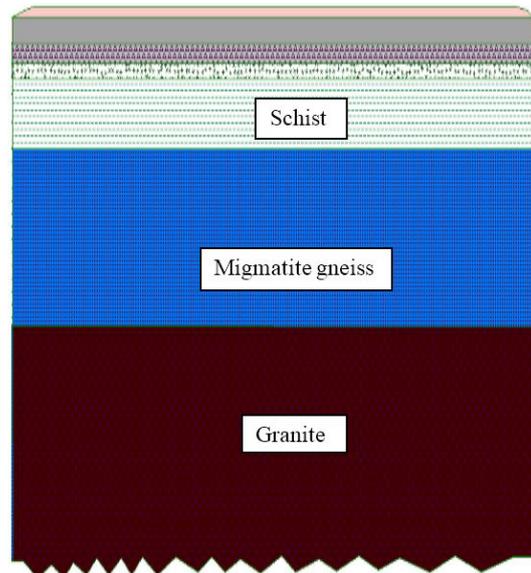
Faults	Directions	Dips	Depths (km)
F1	N56° E	Vertical	3.6
F2	N44° E	NW	2.1
F3	N44° E	NE	2.9
F4	N56° E	Vertical	1.3
F5	N90° E	Vertical	2.6
F6	N60° E	NE	2.1
F7	N56° E	Vertical	2.9
F8	N56° E	Vertical	1.6
F9	N90° E	Vertical	2.3
F10	N90° E	Nord	3.5
F11	N107° E	NW	2.6
F12	N65° E	NW	3.5
F13	N65° E	Vertical	1.5
F14	N70° E	Vertical	2.5
F15	N90° E	Nord	2.3
F16	N90° E	Nord	1.2
F17	N32° E	Vertical	2.3
F18	N70° E	Vertical	2.6
F19	N90° E	NW	2.6
F20	N70° E	Vertical	3.6
F21	N80° E	NW	3.6
F22	N65° E	Vertical	1.5
F23	N65° E	Vertical	2.3
F24	N47° E	Vertical	3.6
F25	N90° E	Vertical	3.5
F26	N90° E	Vertical	1.3
F27	N110° E	Vertical	2.3
F28	N40° E	Vertical	2.3
F29	N110° E	Vertical	2.5

**Table 4.** Nature of formations.

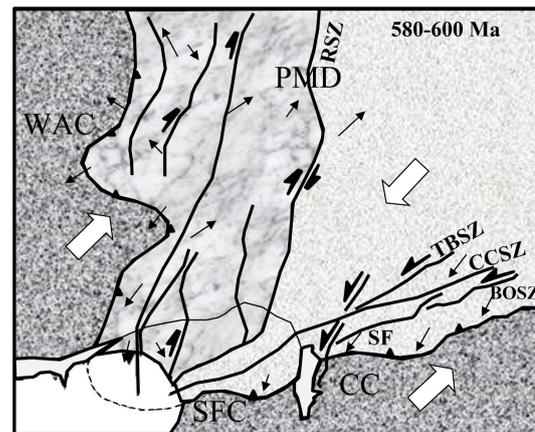
Rocks	Thicknesses (m)
Top soil	< 1.5
Saprolites	2
Sandy layer	1.5
Conglomeritic sand	1.4
Schist	227.18
Migmatite gneiss	699.83
Granites	> 1600

**6 Discussion**

The structural map obtained (Fig. 6) shows a great disparity in the distribution of lineaments which can be explained in part by the general tectonics of the area. Hence, the collision between the stable Archean craton in the south and one of the two Paleoproterozoic blocks in the north during the Pan-African orogeny of 700 Ma would have caused a flattening of the basement and intrusions in the old Precambrian base-



**Figure 13.** Improved sketch of the lithologic profile of Bétaré-Oya basin. The scale map is 2 / 1000.



**Figure 14.** The Pan-African mobile domain (PMD) between the West African Craton (WAC) and the São Francisco (SFC) and Congo (CC) cratons showing two sub-domains, west and east, separated by the Raghane shear zone (RSZ). Horizontal lines represent the Tcholiré–Banyo shear zone (TBSZ), central Cameroon shear zone (CCSZ), Sanaga fault (SF), and Bétaré-Oya shear zone (BOSZ). Small arrows correspond to stretching lineations and large arrows to movement directions of blocks during D3 (600–580 Ma). Modified from Toteu et al. (2004) (original document is available in the public domain).

ment, causing the major NE–SW-oriented lineaments related to the Lom schists. According to the Cameroon geological synthesis, these intrusions are identified as granitic batholiths placed during regional deformation D1 and D2.

On both sides of the Lom series, there are major NE–SW lineaments representing the bounding faults of the Lom series with the granite-gneiss rocks. The E–W, NE–SW, and N–

S lineaments may represent major tectonic structures marking the change in the structural direction between the trans-Saharan (N–S) and the Oubanguides (E–W) chains.

At the local scale, the deformation D2 is characterized by L2 lineations representing here stretches of quartz minerals oriented E–W. The ENE–WSW-oriented lineaments appear to correlate with the mylonitic deformations occurring during the D3 phase while the ones trending NW–SE related to senestral and dextral recesses and represent fractures with or without lode flow. These structures are much more abundant near Mararaba and could be the target for future mining studies.

The geoelectrical study of Nih-Fon et al. (2012) in our study area identified NE–SW-oriented irregular anomaly zones. These correlate with the quartz veins known in the region and are aligned with the regional shear zone. The morphological units identified also present NW–SE, N–S, NE–SW, and E–W directions. In addition, Kouske (2006) reveals that the hydrographic network of the study area has two major directions, NE–SW and NW–SE, and it is dense and dendritic.

The P1 and P2 models obtained can be used as pseudo-3D imagery of the Lom basement. Previous geological studies indicate that the area was subject to intense metamorphic activity during the Neoproterozoic that has resulted in schist formation (Coyne and Bellier, 2010). The contact between this schistous series and the gneissic and granitic rocks of the basement resulted in multiple fractures and faults (Gazel and Gerard, 1954; Soba, 1989). The litho-stratigraphic sketch proposed by our models, derived from the magnetic profiles and work of Mboudou et al. (2017), is consistent with previous geological work that asserts that the Pan-African basement would be made up of migmatites and granitic to orthogneissic and biotite-rich rocks (Poidevin, 1985; Gazel and Gerard, 1954; Kouske, 2006; Ngako et al., 2003; Koch et al., 2012; Pepogo et al., 2019; Owono et al., 2019; Eno Belinga, 1984).

From the mining point of view, the artisanal gold indices are places located near the Lom and Pangar rivers (Nih-Fon et al., 2012). These alluviums correlate with NE–SW trends in our structural map. Since the structures in our study area are structurally guided, it can be concluded that the alluvial deposits observed and exploited by residents are some signs that have been leached and transported by the waterways. Overall, the geological structures obtained from the data processing correspond to the ductile-brittle structures such as shear zones and faults. These structures constitute pathways for both mineralizing fluids and groundwater. Since several gold mines exist in the Bétaré-Oya area, the new mapping approach could be an important guide for the identification of the structures that control the gold mineralization in the area.

## 7 Conclusion

In this work, some new analysis techniques were applied on aeromagnetic data to delineate the sub-surface structures. The results obtained highlight the axes of compression, folding, and shearing as well as mylonitic veins (veins are at the outcrop's scale) several kilometres long and oriented NE–SW. The regional and local structural settings of the area are characterized by major faults and other structural elements mainly striking in the NE–SW, NW–SE, ENE–WSW, N–S, and E–W directions. A major trend in the NE–SW direction represents the dominant tectonic trend which is the prolongation of the central Cameroon shear zone (CCSZ) in the study area. Several folds and faults evidenced by this study correlate with past studies while others are inferences. The depths of major accidents in the area have been estimated between 1.2 and 3.6 km, and the NE–SW structures on our structural map are proposed here for possible gold exploration. The models from the P1 and P2 profiles have enabled us to propose a structuration of the superficial crust of the Lom that highlights the main rocks and intrusions responsible for the observed anomalies (porphyroid granite, garnet gneiss, syenites, micaschists, graphite, and garnet gneiss), identify deep and shallow fractures, their depths, and propose a lithostratigraphic model in agreement with the previous works. Finally, we note that the tilt angle coupled to the upward continuation is an interesting tool for 2.75D modelling.

Despite the results obtained, some limits are observed concerning the application of the tilt derivative on data RTE, as cited below:

- With the data RTE, we used the hypothesis of a magnetically induced anomaly, which has the same direction as the geomagnetic field, given by the global geomagnetic field models (IGRF), and the remanent part in the rock source of the anomaly seems to be neglected.
- Satisfactory results using the tilt angle on magnetic data analysis and modelling, especially in the determination of the vertical contacts in low-latitude areas, are constrained by the use of the data RTE.

In our case, investigating a low-latitude area we engaged the following:

- use of the Euler deconvolution to identify various potential contacts including the vertical one and then compare them with those derived from the tilt results, and
- care to correlate our results with the previous geological investigations over and outside on the one hand, and geophysical studies over adjacent areas, particularly the aeromagnetic investigations, on the other hand.

*Data availability.* The data used to support the findings of this study are available from the corresponding author upon request.

*Author contributions.* CEN performed the data analyses, modelling, and preliminary interpretation including preparation of the paper in conjunction with all the co-authors. TNM designed the topic, gave the orientations for the investigation, and reviewed the quality of the models and related interpretation and the entire paper. MBBA defined the criteria and the physical parameters for the 2D3/4 modelling with the first author. SAMT and SPA worked on the review of quality and quantitative analyses of the maps and 2D3/4 models.

*Competing interests.* The authors declare that they have no conflict of interest.

*Acknowledgements.* The authors thank the reviewers for their valuable comments.

*Review statement.* This paper was edited by Nicolas Gillet and reviewed by Bruno Gavazzi and one anonymous referee.

## References

- Achilleos, G. A.: Approaching a model for estimating horizontal errors of digitized contours, *J. Spat. Sci.*, 55, 147–164, <https://doi.org/10.1080/14498596.2010.487856>, 2010.
- Asaah, V. A.: Lode gold mineralization in the Neoproterozoic granitoids of Batouri, southeastern Cameroon, PhD Thesis, Faculty of Energy and Economic Sciences, Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld, Germany, 187 pp., 2010.
- Benkhelil, J., Pierre, G., Claude, P., and Nguetchoua, G.: Lithostratigraphic, geophysical and morpho-tectonic studies of the South Cameroon shelf, *Mar. Petrol. Geol.*, 19, 499–517, [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(02\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(02)00002-8), 2002.
- Bessoles, B. and Trompette, M.: Géologie de l’Afrique: la chaîne Panafricaine, Zone mobile d’Afrique centrale (partie sud) et Zone mobile soudanaise, *Mémoire du BRGM*, 92, 19–80, 1980.
- Blakely, R. J.: Potential theory applied in gravity and magnetism, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996.
- Cordell, L. and Grauch, V. J. S.: Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico, in: The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps, edited by: Hinze, W. J., Society of Exploration Geophysicists, Denver Colorado, USA, 181–197, <https://doi.org/10.1190/1.0931830346.ch16>, 1985.
- Cornacchia, M. and Dars, R.: Un trait structural majeur du continent africain: Les linéaments centrafricains du Cameroun au Golfe d’Aden, *B. Soc. Géogr. Fr.*, 25, 101–109, <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-XXV.1.101>, 1983.
- Coyne, B.: Aménagement hydroélectrique de Lom Pangar, Document No. 10108-RP-400-B, 57–58, Online report, Yaoundé-Cameroon, 2010.
- Dumont, J. F.: Identification par télédétection de l’accident de la Sanaga (Cameroun), Sa position dans les grands accidents d’Afrique Centrale et de la limite Nord du Craton du Congolais, *Géodynamique*, 1, 13–19, 1986.
- Eno Belinga, S. M.: Géologie du Cameroun, Librairie Universitaire de Yaoundé, Yaounde, Cameroon, 1984.
- Gazel, J. and Gerard, G.: Geological map of Cameroon recognition at the scale 1/500 000, 27, Report from the Directorate of Mines & Geology (available upon request), Ministry of mines and energy, Cameroon, 1954.
- Henderson, R. G. and Zietz, I.: The Upward Continuation of Anomalies in Total Magnetic Intensity Fields, *Geophysics*, 14, 517–534, <https://doi.org/10.1190/1.1437560>, 1949.
- Jacobsen, B. H.: 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>, 1987.
- Jean, M., Abate, E. J. M., Njandjock Nouck, P., Ngatchou, H. E., Oyoa, V., Tabod, C. T., and Manguelle-Dicoum, E.: Structure of the Crust Beneath the South Western Cameroon, from Gravity Data Analysis, *Int. J. Geosci.*, 7, 991–1008, 2016.
- KanKeu, B., Greiling, R. O., and Nzenti, J. P.: Pan-African strike slip tectonics in eastern Cameroon-Magnetic fabrics (AMS) and structures in the Lom basin and its gneissic basement, *Precambrian Res.*, 174, 258–272, <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.08.001>, 2009.
- Koch, F., Wiens, D., Nyblade, A., Shore, P., Tibi, R., Ateba, B., Tabod, C., and Nnange, J.: Upper Mantle Anisotropy beneath the Cameroon Volcanic Line and Congo Craton from Shear Wave Splitting Measurements, *Geophys. J. Int.*, 190, 75–86, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05497.x>, 2012.
- Kouske, A. P.: Geological and environmental study of the artisanal gold mining sector of Bangbel-Mborguéné (East Cameroon), PhD thesis, University of Yaounde I, Yaounde, Cameroon, 89 pp., 2006.
- Mboudou, G. M., Kennedy, F. F., Njoh, O. A., and Agyingi, C. M.: Characterization of Alluvial Gold Bearing Sediments of Betare Oya District-East Cameroon, Implication for Gold Exploration and Recovery, *J. Geol.*, 7, 1724–1738, <https://doi.org/10.4236/ojg.2017.711115>, 2017.
- Miller, H. G. and Singh, V.: Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources, *J. Appl. Geophys.*, 32, 213–217, [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1), 1994.
- Ndougsa, M. T., Bikoro, B. A., Tabod, C. T., and Sharma, K. K.: Filtering of gravity and magnetic anomalies using the finite element approach (fea), *J. Indian Geophysical Union*, 17, 167–178, 2013.
- Ngako, V., Affaton, P., Nnange, J. M., and Njanko, T.: Pan-African tectonic evolution in central and Southern Cameroon: transpression and transtension during sinistral shear movements, *J. Afr. Earth Sci.*, 36, 207–214, [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(03\)00023-X](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(03)00023-X), 2003.
- Nih-Fon, A., Bih, C. V., and Suh, C. E.: Application of Electrical Resistivity and Chargeability Data on a GIS Platform in Delineating Auriferous Structures in a Deeply Weathered Lateritic Terrain, Eastern Cameroon, *Int. J. Geosci.*, 3, 960–971, <https://doi.org/10.4236/ijg.2012.325097>, 2012.
- Odey Omang, B., Che, V. B., Nih, F., Embui, V., and Cheo Suh, E.: Regional Geochemical Stream Sediment Survey for Gold Exploration in the Upper Lom Basin, Eastern Cameroon, *Int. J. Geosci.*, 5, 1012–1026, 2014.
- Oruç, B. and Selim, H. H.: Interpretation of magnetic data in the Sinop area of Mid Black Sea, Turkey, using tilt derivative, Euler deconvolution, and discrete

- wavelet transform, *J. Appl. Geophys.*, 74, 194–204, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.05.007>, 2011.
- Owono Amougou, O. U. I., Ndougsa, M. T., Meying, A., Assembe, S. P., Ngoh, J. D., Ngoumou, P. C., and Yandjmain, J.: Evidence of Major Structural Features over the Pan-African Domain in the Bertoua-Mbangue Area (East Cameroon) from a Multiscale Approach of Modelling and Interpretation of Aeromagnetic Data, *Int. J. Geophys.*, 2019, 9148678, <https://doi.org/10.1155/2019/9148678>, 2019.
- Paterson, Grant, and Watson Ltd.: Aeromagnetic studies on some regions of the United Republic of Cameroon. Interpretation Report, Canadian International Development Agency (CIDA), Toronto, 192 pp., 1976.
- Pepogo, M. A. D., Ndougsa, M. T., Meying, A., Ngoh, J.D., Mvondo, O. J., and Ngoumou, P. C.: New Geological and Structural Facts under the Lateritic Cover in Garga Sarali, Ndokayo (East Cameroon) Area, from Audiomagnetotellurics Soundings, *International Journal of Geophysics*, Volume 2018, Article ID 4806357, 17, <https://doi.org/10.1155/2018/4806357>, 2018.
- Poidevin, J. L.: Le Protérozoïque supérieur de la République Centrafricaine, *Annals of Royal Museum for Central Africa*, 91, 74, Tervuren, Belgium, 1985.
- Rasmussen, R. and Pedersen, L. B.: End corrections in potential field modelling, *Geophys. Prospect.*, 27, 749–760, 1979.
- Reeves, C.: Aeromagnetic Surveys; Principles, Practice, and Interpretation, Geosoft, 155, 2005.
- Regnault, J. M.: Geological Synthesis of Cameroon, 119, Directorate of Mines & Geology, Ministry of mines, energy & water, Yaoundé, Cameroon, 1986.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J., and Somerton, I. W.: Magnetic interpretation in three dimensions using Euler Deconvolution, *Geophysics*, 55, 80–90, <https://doi.org/10.1190/1.1442774>, 1990.
- Rolin, P.: La zone de décrochement panafricain des oubanguides en république centrafricaine, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 320, 63–69, 1995.
- Salem, A., William, S., Fairhead, D., Ravat, D., and Smith, R.: Tilt-depth method: a simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives, *The Leading Edge* December, *Meter Reader*, 150, 2–5, <https://doi.org/10.1190/1.2821934>, 2007.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Smith, R., and Ravat, D. J.: Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives, *Geophysics*, 73, 1–10, <https://doi.org/10.1190/1.2799992>, 2008.
- Shandini, N. Y., Tadjou, J. M., and Basseka, C. A.: Delineating deep basement faults in South Cameroon area, *World Appl. Sci. J.*, 14, 611–615, 2011.
- Skalbeck, J. D., Karlin, R. E., Shevenell, L., and Widmer, M. C.: Gravity and aeromagnetic modeling of alluvial basins in the southern Truckee Meadows adjacent to the Steamboat Hills geothermal area, Washoe County, Nevada, *Geophysics*, 70, B1–B9, <https://doi.org/10.1190/1.1925739>, 2005.
- Soba, D.: The Lom series: geological and geochronological study of a volcano-sedimentary basin of the Pan-African chain in eastern Cameroon, PhD thesis, Pierre and Marie Curie University, Paris, France, 198 pp., 1989.
- Tadjou, J. M., Manguelle-Dicoum, E., and Tabod, C. T.: Gravity modelling along the northern margin of the Congo craton, South-Cameroon, *J. Cameroon Acad. Sci.*, 4, 51–60, 2004.
- Thébault, E., Finlay, C. C., Beggan, C. D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., Bertrand, F., Bondar, T., Boness, A., Brocco, L., Canet, E., Chambodut, A., Chulliat, A., Coisson, P., Civet, F., Du, A., Fournier, A., Fratter, I., Gillet, N., Hamilton, B., Hamoudi, M., Hulot, G., Jager, T., Korte, M., Kuang, W., Lalanne, X., Langlais, B., Leger, J. M., Lesur, V., Lowes, J. F., Macmillan, S., Manda, M., Manoj, C., Maus, S., Olsen, N., Petrov, V., Ridley, V., Rother, M., Sabaka, T. J., Saturnino, D., Schachtschneider, R., Sirol, O., Tangborn, A., Thomson, A., Toffner-Clausen, L., Vigneron, P., Wardinski, I., and Zvereva, T.: International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation, *Earth Planets Space*, 67, 79, <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>, 2015.
- Thompson, D. T.: EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from Magnetic data, *Geophysics*, 47, 31–37, <https://doi.org/10.1190/1.1441278>, 1982.
- Toteu, S. F., Penaye, J., and Poudjom Djomani, Y.: Geodynamic evolution of the Pan-African belt in central Africa with special reference to Cameroon, *Can. J. Earth Sci.*, 41, 73–85, <https://doi.org/10.1139/e03-079>, 2004.
- Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M., and Mackenzie, C.: New insights into magnetic derivatives for structural mapping, *Leading Edge*, 23, 116–119, <https://doi.org/10.1190/1.1651454>, 2004.
- Won, I. J. and Bevis, M.: Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and FORTRAN subroutines, *Geophysics*, 52, 232–238, <https://doi.org/10.1190/1.1442298>, 1987.
- Zeng, H.: Estimation of the Degree of Polynomial Fitted to Gravity Anomalies and Its Applications, *Geophys. Prospect.*, 37, 959–973, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02242.x>, 1989.