

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

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



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
FACULTY OF SCIENCE
DEPARTMENT OF PHYSICS

POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCES, TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES

**INVESTIGATION GEOPHYSIQUE PAR LA METHODE
AEROMAGNETIQUE : IMPLICATION TECTONIQUE ET
MINIERE DANS LA ZONE DE DJADOM-ETA AU
SUD-EST CAMEROUN**

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

Par : **YANDJIMAIN Justine,**
Master of Science Physique

Sous la direction de
NDOUGSA MBARGA Théophile, PhD
Professeur (U.Y.I, Cameroun)

Année Académique : 2019 - 2020



UNIVERSITE DE YAOUNDE I
UNIVERSITY OF YAOUNDE I



FACULTE DES SCIENCES
FACULTY OF SCIENCE

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
DEPARTMENT OF PHYSICS

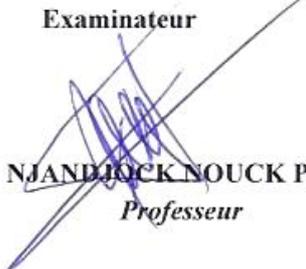
ATTESTATION DE CORRECTION DE LA THESE DE DOCTORAT/Ph.D

Nous, Professeur NJANDJOCK NOUCK Philippe et Professeur NDJAKA Jean- Marie **Bienvenu**, respectivement Examineurs et Président du jury de la Thèse de Doctorat/Ph.D de Madame YANDJIMAIN Justine, Matricule 05Q039, préparée sous la direction du Professeur NDOUGSA MBARGA Théophile, intitulée : «**INVESTIGATION GEOPHYSIQUE PAR LA METHODE AEROMAGNETIQUE : IMPLICATION TECTONIQUE ET MINIERE DANS LA ZONE DE DJADOM-ETA AU SUD-EST CAMEROUN**», soutenue le **mercredi 29 juillet 2020**, en vue de l'obtention du grade de Docteur/Ph.D en Physique, Spécialité Géophysique et Géoexploration, attestons que toutes les corrections demandées par le jury de soutenance ont été effectuées.

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

Fait à Yaoundé, le 04 AOUT 2020

Examineur

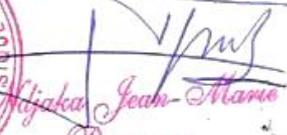

NJANDJOCK NOUCK Philippe
Professeur

Le Président du jury


NDJAKA Jean-Marie Bienvenu
Professeur



Le Chef de Département de Physique


NDJAKA Jean-Marie Bienvenu
Professeur

DEDICACE

A :

Mon défunt père, NJEUTCHA Joseph ;

Ma mère, YONGUI Thérèse ;

Mon fils, NJEUTCHA ELOMA Merveil Divin.

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été réalisée au sein du Département de Physique, au laboratoire de Physique de l'environnement terrestre de l'Université de Yaoundé I.

Au moment de mettre un point final à ce manuscrit de thèse, il m'est agréable de penser à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier, mon directeur de thèse, Professeur NDOUGSA MBARGA Théophile de m'avoir ouvert les portes de la recherche scientifique, de m'avoir donné le goût de la recherche et d'avoir eu confiance en moi et en mon travail. De plus, son enthousiasme et son optimisme inaltérables, sa disponibilité malgré ses multiples fonctions, sa rigueur scientifique et son dévouement au travail, ses critiques, sa modestie et surtout ses conseils en tant que parent ont été des sources de motivation tout au long de ces années de doctorat et de dur labeur. Je vous exprime l'expression de ma profonde gratitude.

Mes remerciements vont :

Au Professeur Emérite MANGUELLE-DICOUM Eliézer dont je connais le dévouement à l'encadrement scientifique, pour m'avoir enseigné à l'Université de Yaoundé I et pour avoir accepté d'assurer la présidence et la participation à mon jury de soutenance de Master.

Au Chef de Département de Physique de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, le Professeur NDJAKA Jean Marie Bienvenu et tout le personnel enseignant dudit département pour ma formation.

Aux Professeurs KOFANE Timoléon Crépin, TABOD Charles TABOD, NOUAYOU Robert, NJANDJOCK NOUCK Philippe, BEN-BOLIE Germain Hubert, MEYING Arsène, et OWONA ANGUE Marie Louise pour les enseignements, les remarques, les critiques et les suggestions qui ont contribué à l'amélioration de ce travail.

Aux Drs. NGOUMOU Paul Claude, BIKORO BI-ALOU Marcelin, GOUET Daniel Hervé, POKAM Wilfrid et TEIKU ASSATSE William pour leurs remarques, les critiques et les suggestions à l'édification de cette thèse.

Aux Dr. TCHAKOUNTE Jacqueline du Département des Sciences de la Terre, Drs ENYEGUE Françoise et MEL'I Larisa Jorelle du Département de Physique, pour leurs remarques et encouragement.

Aux Drs. TCHAPTCHET Dépesquidoux et GAMIE Aurèlie du Département des Sciences de la Terre pour leurs remarques, les critiques et les suggestions à l'édifice de cette thèse.

À mes camarades du laboratoire pour tous leurs soutiens et encouragements.

À mon défunt camarade Dr. WIRNGO Amos VEYONGNIMO pour son soutien à la réalisation de ce travail pour qui j'ai une pensée pieuse pour le repos de l'âme.

Aux membres du jury pour tout le temps précieux qu'ils ont bien sacrifié, afin d'examiner le présent travail.

À tous les camarades du Laboratoire de Physique de l'Environnement Terrestre option Géophysique et Géoexploration et ainsi que les amis pour leurs soutiens à la réalisation de ce travail.

À mes sœurs Mmes KUISSU Florinette, KAMTA Solange, MBIANKEU Tanserieu, TCHAMBA Célestine, DATCHAP Dorothée, pour tout le soutien qu'elles m'ont apporté tout au long de ce travail.

À mes deux petits frères Mrs. TCHANTCHO Symplice, MBATCHOU Sylvestre pour tout le soutien qu'ils m'ont apporté tout au long de ces années de recherche.

Aux petits fils et petites filles de la famille Njeutcha pour leurs reconnaissances.

À toutes mes connaissances de près ou de loin pour leurs soutiens et encouragements

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIERES	iii
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
RESUME	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE ET PROBLEMATIQUE	3
INTRODUCTION	3
I.TRAITS GEOLOGIQUE ET TECTONIQUE DE L’AFRIQUE PRECAMBRIENNE	3
I.1. Aperçu géologique de l’Afrique	3
I.2. Orogenèse Protérozoïque.....	5
I.3. Aperçu tectonique de l’Afrique.	5
II. APERÇU GEOLOGIQUE ET TECTONIQUE DU CAMEROUN	6
II.1. Aperçu de la Zone Mobile d’Afrique Centrale au Cameroun	6
i) Le domaine Nord Cameroun.....	6
ii) Le domaine central camerounais.	7
iii)- Le domaine sud	8
II.2. Aperçu sur le Craton du Congo au Sud Cameroun	9
II.3. Aperçu minière du Cameroun	9
III. PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE	10
III.1. Géographie physique	10
III.2. Géologie.....	11
III.3. Tectonique	12
IV. TRAVAUX GEOPHYSIQUES ANTERIEURS	13
IV.1. Connaissances en géoélectricité	13
IV.2. Connaissances en Audiomagnétotéllurique.....	15
IV.3. Connaissances en gravimétrie	15

IV.4. Connaissances en magnétisme.....	17
V. PROBLEMATIQUE	18
VI. OBJECTIFS	19
CONCLUSION	20
CHAPITRE II : METHODES ET DONNEES.....	21
INTRODUCTION	21
I. THEORIE DU GEOMAGNETISME	21
I.1. Champ magnétique terrestre.....	21
I.2. Modèles du champ magnétique terrestre	23
I.3. Contribution de la croûte terrestre	24
II. METHODE MAGNETIQUE.....	25
II.1 Définition et but de la méthode aéromagnétique	25
II.2. Applications de la méthode aéromagnétique	25
II.3. Avantages et inconvénients de la méthode aéromagnétique.....	26
II.4. Paramètres de la méthode aéromagnétique	26
III. APPAREILLAGE DE PROSPECTION AEROMAGNETIQUE	27
IV.DESCRPTION DES APPAREILLAGES D’ACQUISITION DES DONNEES AEROMAGNETIQUES	27
IV.1. Équipement au sol ou à la base.....	27
IV.2. Équipement embarqué	28
IV.3. Personnel d’acquisition.....	30
V.METHODOLOGIE D’INTERPRETATION DES DONNEES AEROMAGNETIQUES	32
V.1 Considérations générales.....	32
V.2. Approche qualitative et quantitative.....	32
VI. ACQUISITION DES DONNEES AEROMAGNETIQUES	33
VII. TRAITEMENT DES DONNEES AEROMAGNETIQUES.....	34
VII.1. Anomalie du champ magnétique	34
VII.2. Réduction à l’équateur.....	35
VII.3. Prolongement vers le haut	35
VII.4. L’anomalie résiduelle du Champ.....	35
VII.5. La variation de l’angle d’inclinaison	36
VII.6. Filtres de la dérivée.....	38
VII.7. Le signale analytique	39

VII.8. Déconvolution d'Euler	40
VII.9. Modélisation 2.75D et 3D	41
VIII. PRESENTATION DES DONNEES AEROMAGNETIQUES.....	42
IX. MISE EN GRILLES DES DONNEES ACQUISES.....	44
IX.1. Organigramme de traitement des données aéromagnétiques brutes.....	44
IX.2. Organigramme de traitement, de modélisation et d'interprétation des données aéromagnétiques	45
CONCLUSION	47
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	48
INTRODUCTION	48
I.PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATION.....	48
I. 1. ETUDE STRUCTURALE DE SUBSURFACE	48
I.1.1. Champ magnétique et champ magnétique international géo-référence.....	48
I. 1.2. Anomalie de l'intensité du champ magnétique.....	50
I. 1.3. Anomalie magnétique réduite à l'équateur.....	52
I.1. 4. Champ réduite à l'équateur prolongée à 2 km.....	53
I.1.5. Anomalies magnétiques résiduelles de la zone d'étude	54
I.1. 6. Variation de l'angle d'Inclinaison	56
I.1.7. Carte structurale de la variation de l'angle inclinaison.....	57
I.1. 8. Résultats quantitatifs.....	58
I.2. LINEAMENTS DU SOCLE ET IMPLICATION MINIERE.....	63
I.2. 1. Intensité magnétique résiduelle prolongée de 750 à 3750 m.....	63
I. 2. 2. Dérivée horizontale prolongée de 750 à 3750 m	64
I. 2. 3. Dérivée horizontale prolongée à 750 m et maxima	66
I.2. 4. Superposition des maxima 750 m sur la résiduelle.....	67
I. 2. 5. Superposition des maxima 1500 m sur la résiduelle.....	68
I.2.6. La superposition des maxima magnétiques de 375 à 1875 m de profondeur.	70
I. 2. 7. Linéaments inférés issus des maxima	72
I. 2. 8. Interprétation quantitative : Intérêt des pendages	74
I. 2. 9. Interprétation quantitative : Zones d'intérêts	76
I. 3. SIGNAL ANALYTIQUE	78
I.4. MODELISATION 2.75 D	79
I.4.1. Profil 1	81
I.4.2. Profil 2	82

I.4.3. Profil 3	83
I.4.4. Profil 4	83
I.4.5. Interprétation des profils	84
I.5. Modélisation 3D	85
I.5.1. Distribution 3D complète des susceptibilités magnétiques	86
I.5.2. Distribution 3D de forte magnétisation	86
I.5.2. Distribution 3D de faible magnétisation.....	87
II. DISCUSSION DES RESULTATS	88
II. 1. Du point de vue structurale et tectonique.....	88
II.2. Du point de vue minière	92
III. VALIDITE DES RESULTATS	95
CONCLUSION	100
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	102
I. CONCLUSION GENERALE	102
II. PERSPECTIVES	104
REFERENCES	105
REFERENCES Logiciel.....	105
REFERENCES Documentaires	105
ANNEXES	I
Annexe 1: Susceptibilités magnétiques des Minéraux	I
Annexe 2 : Publication issues de la thèse	IV

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

χ	: Susceptibilité magnétique
μ	: Perméabilité magnétique
θ	Angle d'inclinaison dans le tilt angle
ΔF	: Champ d'anomalies dû aux masses magnétiques de croûte
1D	: Une dimension
2.75D	: 2.75 dimensions
2D	: Deux dimensions
3D	: Trois dimensions
AGH	: Amplitude du Gradient Horizontal
AM	: Amphibole
CAO	: Craton de l'Afrique de l'Ouest
CC	: Craton du Congo
CCC	: Cisaillement Centre Cameroun
cgs	: centimètre gramme seconde
CK	: Craton du Kalahari
CMC	: Compagnie Minier du Cameroun
CPD	: Curie Point Depth
D	: Déclinaison du champ
E	: Est
ESE	: Est-Sud-Est
F	: Champ magnétique total
F _a	: Anomalie du champ magnétique
FR	: Fer Rubané (BIF : Banded Iron Formation)
FS	: Faille de la Sanaga
Ga	: Giga années
H	: Composante horizontale du champ
I	: Inclinaison du champ
IGRF	: International Geomagnetic Reference Field
IMR	: Intensité Magnétique Résiduelle
LVC	: Ligne Volcanique du Cameroun

Ma	: Millions d'années
MCS	: Méta-Craton du Sahara
NE	: Nord-Est
N _G	: Axe de rotation de la terre
N _M	: Axe des pôles magnétiques
NNE	: Nord-Nord-Est
nT	: nanoTesla
O	: Ouest
QFR	: Quartzite Ferrifère Rubanée (BIQ : Banded Iron Quartzite)
QMS	: Quartzite Micaschiste
RTE	: Réduction à l'Equateur
SA	: Signal Analytique
SI	: Système International
SO	: Sud –Ouest
SSE	: Sud-Sud-Est
SSO	: Sud-Sud-Ouest
T	: Tesla
TMI	: Intensité Magnétique Total
ONO	: Ouest-Nord-Ouest
ZMAC	: Zone Mobile de l'Afrique Centrale

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: <i>Avantages et Inconvénients de la méthode aéromagnétique</i>	26
Tableau 2: <i>Paramètres de la méthode aéromagnétique (Chouteau, 1999 modifié)</i>	26
Tableau 3: <i>Indices structuraux et nature des sources magnétiques (Colin-Reesves, 2005).</i>	40
Tableau 4: <i>La direction des linéaments majeurs, leurs longueurs et leurs profondeurs résultant de la variation de l'angle d'inclinaison ($Prof_{TA}$), résultant de la solution d'Euler de la variation de l'angle d'inclinaison ($Prof_E$).</i>	61
Tableau 5: <i>La direction des pendages de certains des linéaments enfouis dans la zone d'étude.....</i>	76
Tableau 6: <i>Synthèse structurale (direction des failles, failles, pendages, valeur des angles de pendage, orientation et zones d'intérêt).</i>	80
Tableau 7: <i>Indices structuraux et nature des sources magnétiques.</i>	100
Tableau 8: <i>Récapitulatif des résultats de la modélisation 2,75D des profils.</i>	101

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Les zones stables (noyaux cratoniques archéens) et les zones mobiles d'Afrique. (D'après Rocci, 1965 ; Key, 1992 modifié).....	4
Figure 1.2: Grandes formations géologiques du Cameroun.	8
Figure 1.3: Présentation de la zone d'étude située au Sud-Est Cameroun traversée par le fleuve Dja.	10
Figure 1.4: Carte Géologique de la zone d'étude. (Van Den Hende, 1969 Modifiée).	14
Figure 2.1: Représentation dans l'espace des lignes des champs magnétiques orientés du pôle Sud au Pôle Nord géomagnétique.....	22
Figure 2.2: Représentation du champ total F , champs observé et anomalie du champ total ΔF	23
Figure 2.3: Représentation du champ magnétique de référence dans le repère géographique local. (Telford et al., 1998 ; Groune, 2009).	24
Figure 2.4: Magnétomètre de la station de base installé sur le site qui communique en similitude en envoyant les signaux pour une bonne acquisition des données aéromagnétiques (Latrous et al., 2013).....	29
Figure 2.5: Emplacements des magnétomètres : (a) système d'enregistrement arrière ; (b) écran LCD d'affichage de contrôle (Latrous et al.,2013)..	29
Figure 2.6: Emplacements des magnétomètres qui transfère les données sur ordinateur de traitement : ((c) et (d) système d'enregistrement avant (Latrous et al. (2013).	290
Figure 2.7: Emplacements des magnétomètres qui communiquent en similitude en envoyant les signaux à la station de base, pour une bonne acquisition des données aéromagnétiques : (e) et (f) système d'accompagnement30	30
Figure 2.8: Emplacements des magnétomètres (g) avion dans lequel seront installés le système embarqué ; (h) avion en survolé pour l'acquisition des données (Latrous et al. (2013).	31
Figure 2.9: Représentation dans l'espace du vecteur champ d'anomalie magnétique.....	34
Figure 2.10: Anomalie magnétique avant (a) et après (b) la réduction à l'équateur.....	36
Figure 2.11: Étude d'une demi-plaque infinie aimantée de profondeur Z_c (c) créant une anomalie magnétique (a) réduite à l'équateur et transformée par tilt angle (b) (Salem et al., 2007).....	37

Figure 2.12: Les blocs d'acquisition des données dans le grand Sud-Cameroun réalisé par la CMC (2012).....	43
Figure 2.13: Trajectoire de l'aéronef lors de l'acquisition des données aéroportées par la CMC (2012).	44
Figure 2.14: Organigramme de traitement des données aéromagnétiques brutes.....	45
Figure 2.15: Organigramme de traitement, de modélisation et interprétation des données aéromagnétiques issues des données brutes.	46
Figure 3.1: L'intensité du champ magnétique total.....	49
Figure 3.2: Champ magnétique de géoréférence (IRGF) élaboré pour février 2012 de la zone d'étude.	50
Figure 3.3 : Anomalies de l'intensité du champ magnétique total.	51
Figure 3.4: Anomalie de l'intensité du champ magnétique total réduit à équateur.....	53
Figure 3.5: Anomalie de l'intensité du champ magnétique total réduit à l'équateur prolongée à 2 km.....	54
Figure 3.6: Anomalie de l'intensité du champ magnétique total résiduelle.....	55
Figure 3.7: Variation de l'angle d'inclinaison du champ magnétique.....	56
Figure 3.8: Linéaments issu de la Variation de l'inclinaison magnétique.....	57
Figure 3.9: Solution d'Euler du champ résiduel, $N=1$, $T=10\%$, $W=10\text{km} \times 10\text{km}$	58
Figure 3.10: Solution d'Euler de la variation du Tilt Angle, $N = 1$, $T = 15\%$, $W=10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$	60
Figure 3.11: Superposition des solutions d'Euler de Tilt angle et les linéaments.	61
Figure 3.12: (a) Rose des linéaments majeurs ; (b) Rose des linéaments mineurs.	61
Figure 3.13: Intensité magnétique résiduelle prolongée aux altitudes de 750 à 3750 m... 64	64
Figure 3.14: Plans correspondant des AGH à des profondeurs égales à 375 m, 750 m, 1125 m, 1500 m et 1875 m.	65
Figure 3.15: Amplitude du Gradient horizontal prolongée à 750 et ses maximas (points noirs).....	66
Figure 3.16: Superposition des maximas du AGH de IMR prolongée à vers le haut à l'altitude 750 m sur la résiduelle.	68
Figure 3.17: Amplitude du gradient horizontal de l'anomalie de résiduelle prolongée à vers le haut à l'altitude 1500 m et ses maximas (points jaunes).....	69
Figure 3.18: Superposition des maximas de l'amplitude du gradient horizontal de la résiduelle prolongée vers le haut à l'altitude 1500 m sur la Résiduelle.....	70

Figure 3.19: Superposition des maximas de l'amplitude du gradient horizontal de la résiduelle prolongée vers le haut de l'altitude 750 à 3750 m.....	71
Figure 3.20: Superposition des maximas de l'amplitude du gradient horizontal de la résiduelle prolongée vers le haut de l'altitude 750 à 3750 m sur la Résiduelle.	72
Figure 3.21: Superposition des linéaments sur les maximas de l'amplitude du gradient horizontal de la résiduelle prolongée vers le haut de l'altitude 750 à 3750 m. .	73
Figure 3.22: Pendage du linéament dans l'espace.....	74
Figure 3.23: Pendage des linéaments superposés aux maximas. Les linéaments à pendage inférieur à 40° SW et NW et les linéaments à pendage compris entre 40° et 90° Sud, Nord, SW et NW.....	75
Figure 3.24: Points d'intérêts (cercles) superposes aux maximas.	77
Figure 3.25: Points d'intérêts (cercles) superposes aux maximas et sur la grille de la résiduelle.....	78
Figure 3.26: Signale Analytique avec les 12 points potentiels d'intérêts (cercles) situés à des zones fortes amplitude du signe analytique.....	79
Figure 3.27: Profil 1 et modèle. Banded Iron Formation (BIF), Amphibole (AM), S=Susceptibilité, les flèches sont les points probables de forages.	81
Figure 3.28: Profil 2 et modèle. Banded Iron Quartz (BIQ), Amphibole (AM), S=Susceptibilité, les flèches sont les points probables de forages.	82
Figure 3.29: profile 3 et modèle. Fer rubané (BIF), Fer rubané Quartzite (BIQ), Amphibole (AM), S=Susceptibilité, les flèches sont les points probables de forages.....	83
Figure 3.30: Profil 4 et modèle. Fer rubané (BIF), Quartz Mica-Schist (QMS), Amphibole (AM), S=Susceptibilité, les flèches sont les points probables de forages.....	84
Figure 3.31: Distribution 3D des susceptibilités magnétiques jusqu'à plus de 6 km de profondeurs. Cette distribution sort le caractère dipolaire.....	86
Figure 3.32: Distribution 3D jusqu'à plus de 6 km de profondeur des corps de forte magnétisation caractéristique des anomalies positives.....	87
Figure 3.33: Distribution 3D jusqu'à plus de 6 km de profondeur des corps de faible magnétisation caractéristique des anomalies négatives.....	88
Figure 3.34: Carte structurale mettant en évidence les linéaments, les failles supposées de Djadom, Dja et Eta, les pendages magnétiques et les pendages géologiques...	89
Figure 3.35: Carte structurale mettant en évidence les linéaments, les failles supposées de Djadom, Dja et Eta, les pendages magnétiques et les pendages géologiques...	91

- Figure 3.36:** Carte structurale mettant en évidence les linéaments, les failles supposées de Djadom, Dja et Eta, les pendages magnétiques et indices miniers supposés.... 93
- Figure 3.37:** Carte structurale mettant en évidence les linéaments, les failles supposées de Djadom, Dja et Eta, les pendages magnétiques et indices miniers supposés sur la géologique..... 94
- Figure 3.38:** Carte Synthèse structurale présentant les failles de Djadom, Dja et Eta ; les pendages magnétiques et géologiques ; les linéaments issus de cette étude ; les point potentiels de minéralisation de Fer (BIF et BIQ) sans formation géologique..... 97
- Figure 3.39:** Carte Synthèse structurale présentant les failles de Djadom, Dja et Eta ; les pendages magnétiques et géologiques ; les linéaments issus de cette étude ; les point potentiels de minéralisation de Fer (BIF et BIQ) avec les formations géologiques. 98

RESUME

Les méthodes géophysiques sont utilisées pour mesurer les contrastes des propriétés physiques qui représentent une variation de la géologie structurale à l'intérieur de la terre. Dans cette optique, des travaux de levé magnétique sont fortement suggérés. Les données issues de ces travaux sont particulièrement efficaces pour compléter et améliorer les informations connues. Dans le cas d'espèce, les données utilisées dans ce travail ont été levées par la Compagnie Minière du Cameroun de 2012 dans la zone de Djadom–Eta au Sud-Est Cameroun. L'objectif de cette étude étant d'améliorer la carte structurale, de cibler les zones potentielles ferrifères et autres minéraux. Au-delà, la méthodologie de traitement et d'interprétation des données s'appuie sur l'utilisation des techniques de filtrage adéquates (les méthodes du Tilt angle, des gradients horizontaux, de la déconvolution d'Euler et du signal analytique). Ces derniers permettront de proposer une cartographie structurale puis, des modèles inverses (2.75D et 3D) afin d'analyser la distribution du contraste de susceptibilité magnétique de la zone d'étude.

Par ailleurs, par les méthodes d'approches du Tilt angle et des maximas de l'amplitude du gradient horizontal, les grands traits structuraux WSW–ENE, WNW–ESE et W–E sont mis en évidence. Notamment les failles de Djadom (WSW–ENE), du Dja (S–N) et d'Eta (WNW–ESE), correspondant respectivement aux formations géologiques du Panafricain et du Craton et les traits structuraux W–E sont en majorité des linéaments mineurs. Les pendages des maximas du gradient horizontal donc certains corrèlent avec ceux de la carte géologique sont aussi mis en évidence. Eu égard à cela, la déconvolution d'Euler a permis d'obtenir ces structures géologiques et d'estimer la profondeur et la géométrie des corps enfouis sous la couverture. Pendant que le constat révèle que les profondeurs du tilt angle sont incluses dans celles des solutions d'Euler et que l'ensemble des filtres appliqués ressort un réseau de failles et les inversions 2.75D montrent des modèles du sous-sol affectés par les activités tectoniques. De ce point de vue, des modèles d'inversions 2.75D et 3D sont des méthodes essentielles dans l'exploitation minière. L'application de ceux-ci sur les données potentielles permet d'identifier et de localiser les minerais dans l'optique qu'ils permettent d'obtenir la profondeur, la géométrie, les extensions et la nature des sources minérales. Le modèle 2.75D identifie donc la qualité de la source, sa géométrie, son extension et sa profondeur. Ainsi, le Fer Rubané (FR) et Fer Rubané Quartzite (FRQ), l'Amphibole (AM), le gneiss, le schiste et la roche verte, le quartz, le Quartzite Micaschiste (QMS), le grès sont identifiés. Le modèle d'inversion 3D appliqué sur la grille résiduelle, en plus des informations données par la 2.75D donne une estimation de la grandeur du gisement. Par ce modèle d'inversion 3D, les gisements fortement (susceptibilités supérieures à 0,02 cgs) et faiblement (susceptibilités inférieures à 0,02 cgs) magnétisés sont mis en évidence. Ce dernier met en évidence les failles supposées de Djadom, d'Eta et du Dja. Ces zones fortement magnétisées sont responsables des réponses magnétiques marquées par les anomalies positives. Egalement, d'après les modèles 2.75D ces derniers sont des réactions des corps magnétiques tels que le FR et FRQ dont la teneur est importante sur tous les modèles des profils. Ces deux modèles d'inversion couplés permettent d'estimer les zones potentielles de quelques forages. Ainsi, le gisement et la géométrie des corps de fortes et de faibles magnétisations sont réalistes puis, validés par les données géologiques et les travaux menés autour de cette zone d'étude. Cette étude prouve que les inversions 2.75D et 3D des données magnétiques sont des outils valables aux géophysiciens et aux géologues dans l'exploration des gisements minerais.

Mots-clés : Aéromagnétique, filtrages, tilt angle, déconvolution d'Euler, modélisation 2.75D et 3D, susceptibilités, failles, accidents tectoniques, minerais, forage, FR, FRQ.

ABSTRACT

Geophysical methods are used to measure the contrast of physical properties within the earth that represents a variation in structural geology. In this perspective, magnetic survey work is strongly suggested. The data from this work is particularly effective in supplementing and improving known information. In this case, the data used in this work was collected by the Compagnie Minière du Cameroun 2012 in Djadom-Eta, Southeast Cameroon. The objective of this study is to improve the structural map and target potential iron ore zones and other minerals. Beyond this, the methodology of data processing and interpretation is based on the use of adequate filtering techniques (Tilt angle methods, horizontal gradients, Euler deconvolution and the analytic signal). The latter will make it possible to propose a structural map then, inverse models (2.75D and 3D) in order to analyze the magnetic susceptibility contrast distribution of the study area. Moreover, the methods of the tilt angle (tilt derivative) and the maxima of the amplitude of the horizontal gradient, the large structural features WSW–ENE, WNW–ESE and W–E are highlighted. In particular the Djadom faults (WSW–ENE), the Dja faults of (S–N) and the Eta faults of (WNW–ESE), respectively corresponding to the geological formations of Panafrican and Craton and the E - W structural features are mostly minor lineaments. The dips of the maxima of the amplitude of the horizontal gradient thus some correlate with those of the geological map are also highlighted. In view of this, the Euler deconvolution has made it possible to obtain these geological structures and to estimate their depths and the geometry from the bodies buried while the contact reveals that the depths of the tilt angle are included in those of the solutions. Euler and that the set of applied filters shows a network of faults and the 2.75D inversions show models of the subsoil affected by the tectonic activities.

From this point of view, 2.75D and 3D inversions models are essential in mining. The application of these on the potential data makes it possible to identify and locate the ores as they make it possible to obtain the depth, the geometry, the extensions and the nature of the mineral sources. The 2.75D model therefore identifies the quality of the source, its geometry, its extension and its depth. Thus, Banded Iron Formation (BIF) and Banded Iron Quartzite (BIQ), Amphibole (AM), Gneiss, Schist and Green Rock, Quartz, Quartz-Micaschist (QMS), Sandstone are identified. The 3D inversion model applied to the residual grid, in addition to the information given by 2.75D gives the size of the deposit.

By this 3D inversion model, the strongly (susceptibilities greater than 0.02 cgs) and weakly (susceptibilities less than 0.02 cgs) magnetized deposits are highlighted. The latter highlights the supposed faults of Djadom, Eta, and Dja. These highly magnetized zones are responsible for the magnetic responses marked by positive anomalies.

According to the 2.75D models these are reactions of the magnetic bodies such as the BIF and BIQ whose content is important in the area. These two models of coupled inversion make it possible to estimate the potential zones of some drilling. Thus, the deposit and the geometry of the bodies of strong and weak magnetizations are realistic then validated by the geological data and the works carried out around this zone of study. This study proves that the 2.75D and 3D inversions of magnetic data are valuable tools for geophysicists and geologists in the exploration of ore deposits.

Keywords: Aeromagnetic, filtering, tilt angle (tilt derivative), Euler déconvolution, 2.75D and 3D modeling, susceptibilities, faults, tectonic accidents, ores, drilling, BIF, BIQ.

INTRODUCTION GENERALE

Le globe terrestre est constitué de deux masses : une masse liquide appelée « océan » qui représente 75% et une masse solide appelée « continent » qui représente 25% de la planète. La terre est une immense boule formée des couches de propriétés différentes dont l'exploration implique plusieurs disciplines telles que la télédétection, l'astronomie, la bio-géologie, la géochimie, la bio-géochimie, l'archéologie, la géophysique appliquée.

La géophysique appliquée implique la géophysique interne. Le but de la géophysique interne est de dégager l'existence des informations géologiques et d'étudier les propriétés des divers milieux qui composent l'intérieur de notre globe, et de décrire les méthodes mises en œuvre pour arriver à une connaissance assez précise de la distribution. Les domaines d'application de la géophysique appliquée sont divers. Ils sont entre autres: l'exploration et production minière, pétrolière, l'archéologie, l'environnement, le génie-civil, la glaciologie, l'hydrogéologie, la planétologie, la géothermie.

L'étude des structures internes du globe terrestre ainsi que leur dynamisme implique des investigations géophysiques. Ce dernier s'appuie sur l'observation, l'analyse et l'interprétation des propriétés physiques des roches afin de déterminer la nature du sous-sol. L'exploration géophysique emploie des méthodes indirectes pour déterminer, détecter et cartographier les gisements de minerais enfouis dans le sous-sol, à partir des informations observables en surface, fournissant ainsi des données précieuses sur la lithostratification locale, sur la présence et la nature des systèmes de failles, de fractures et de zones de contact. Cela dit, l'objectif de cette étude consiste à améliorer la carte structurale, de cibler les zones potentielles ferrifères. L'étude des données magnétiques permet de comprendre les structures profondes et superficielles d'une zone d'étude. La prospection magnétique au sol couvre peu d'espace et est perturbée par les installations humaines (urbanisation des villes, chemin de fer, pipeline (tuyau, tube, canalisation)) et par les matériaux magnétiques superficiels. Pour éviter ces problèmes, la géophysique aéroportée est appropriée et le choix de la couverture aéroportée s'est porté sur cette zone vu l'expansion socioéconomique dans la zone. Cependant, les données aéromagnétiques nécessitent des traitements spécifiques pour appréhender les caractéristiques des unités structurales et lithologiques d'une zone prospectée, ceci à l'aide des logiciels appropriés des secteurs miniers. Eu égard à tout cela, cette étude s'articule autour de trois chapitres :

Le premier permet de faire une brève présentation du contexte géologique et tectonique de l'Afrique puis, le contexte géologique et tectonique du Cameroun, ensuite

l'environnement géologique, tectonique et minier de la zone d'étude. Enfin en s'appuyant sur les travaux géophysiques antérieurs menés dans la région d'étude, pour dégager la problématique de l'étude.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des principes de base de la méthode aéromagnétique, la méthodologie d'acquisition et de traitement des données et un aperçu théorique de l'interprétation des données. Une présentation des principes et objectifs des différentes transformées et filtres à utiliser pour le traitement des données. Puis une description des origines d'acquisitions et de traitement des données. Ce chapitre sera chapeauté par un organigramme de présentation des résultats donnés dans le troisième chapitre.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats, l'analyse et les interprétations qualitatives et quantitatives, la discussion puis, la validité des résultats. Ces résultats s'appuient sur les grilles de données de la TMI générées, ses transformées (la Réduite à l'Equateur et Intensité Magnétique Résiduelle), les filtres à appliquer à savoir la variation de l'angle d'inclinaison (tilt angle derivative), les dérivées (gradients), le signal analytique, les solutions d'Euler et les modélisations 2.75D et 3D.

En fin, la conclusion générale résume les contributions originales de cette étude tandis que, les perspectives ouvrent principalement les voies de poursuite de l'exploration minière.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE ET PROBLÉMATIQUE

INTRODUCTION

Une bonne connaissance de la croûte continentale passe par celle de la géologie et la tectonique. Cette connaissance ne peut être illustrée qu'à partir de l'exploration des connaissances géophysiques, géologiques, tectoniques et minières régionales et locales en s'appuyant sur une méthode bien précise. Dès que ces connaissances seront illustrées, la feuille de route sera donnée à travers la problématique et les objectifs de l'étude.

I. TRAITS GEOLOGIQUE ET TECTONIQUE DE L'AFRIQUE PRECAMBRIENNE

I.1. Aperçu géologique de l'Afrique

Le Précambrien est divisé en quatre épisodes, à savoir le Précambrien inférieur (avant 3 Ga) ; le Précambrien moyen (entre 3 Ga à 2 Ga) ; le Précambrien supérieur (entre 2 Ga à 1 Ga) et le Précambrien tertiaire (1 Ga à 600 Ma) date du début du Cambrien (Eno-Belinga, 1984). L'Afrique comme d'autres continents a un Précambrien plissé. La majeure partie de l'Afrique se compose d'un socle ancien, d'origine précambrienne, à partir duquel se sont formés les reliefs actuels (Key, 1992). Longtemps soudées à la masse africaine, la péninsule arabique et l'île de Madagascar s'en sont détachées lors de l'ouverture de la mer Rouge et du canal de Mozambique, résultat de la tectonique des plaques. La géologie africaine a été rajeunie par l'épisode thermo-tectonique Panafricain (600 Ma–500 Ma) et a été le siège des manifestations volcaniques et tectoniques (Eno-Belinga, 1984). Cette géologie africaine est formée de roches métamorphiques (gneiss, schistes cristallins, quartzites) et de massifs cristallins intrusifs (granites). En plus, elle constitue un ensemble de faible plasticité qui a réagi aux forces tectoniques par des cassures et par des mouvements verticaux à grand rayon de courbure dont l'entrecroisement a donné naissance à des bassins et à des mûles (Schlüter, 2006).

La géologie de l'Afrique repose donc sur des formations stables (zones cratoniques) et des formations instables (zones mobiles). Un craton est défini comme une lithosphère continentale ancienne (précambrienne), possédant une topographie souvent peu élevée

(quelques centaines de mètres), une croûte continentale épaisse ainsi qu'une racine lithologique profonde. Il résulte de l'accrétion de blocs lors d'une ancienne orogénèse. Par ailleurs, les formations stables révèlent l'abondance relative des terrains cristallins et granitiques qui témoignent d'une grande ancienneté de régions étendues. L'Afrique s'articule ainsi autour de quatre principaux socles Précambriens : craton de l'Afrique de l'Ouest (CAO), méta-craton du Sahara (MCS) ou craton Nylotique, craton du Congo (CC) et craton du Kalahari (CK) ou craton sud-africain, (Figure 1.1) auquel il convient d'ajouter le craton arabe (Rocci, 1965 ; Key, 1992 ; Schlüter, 2006 ; Meying, 2011).

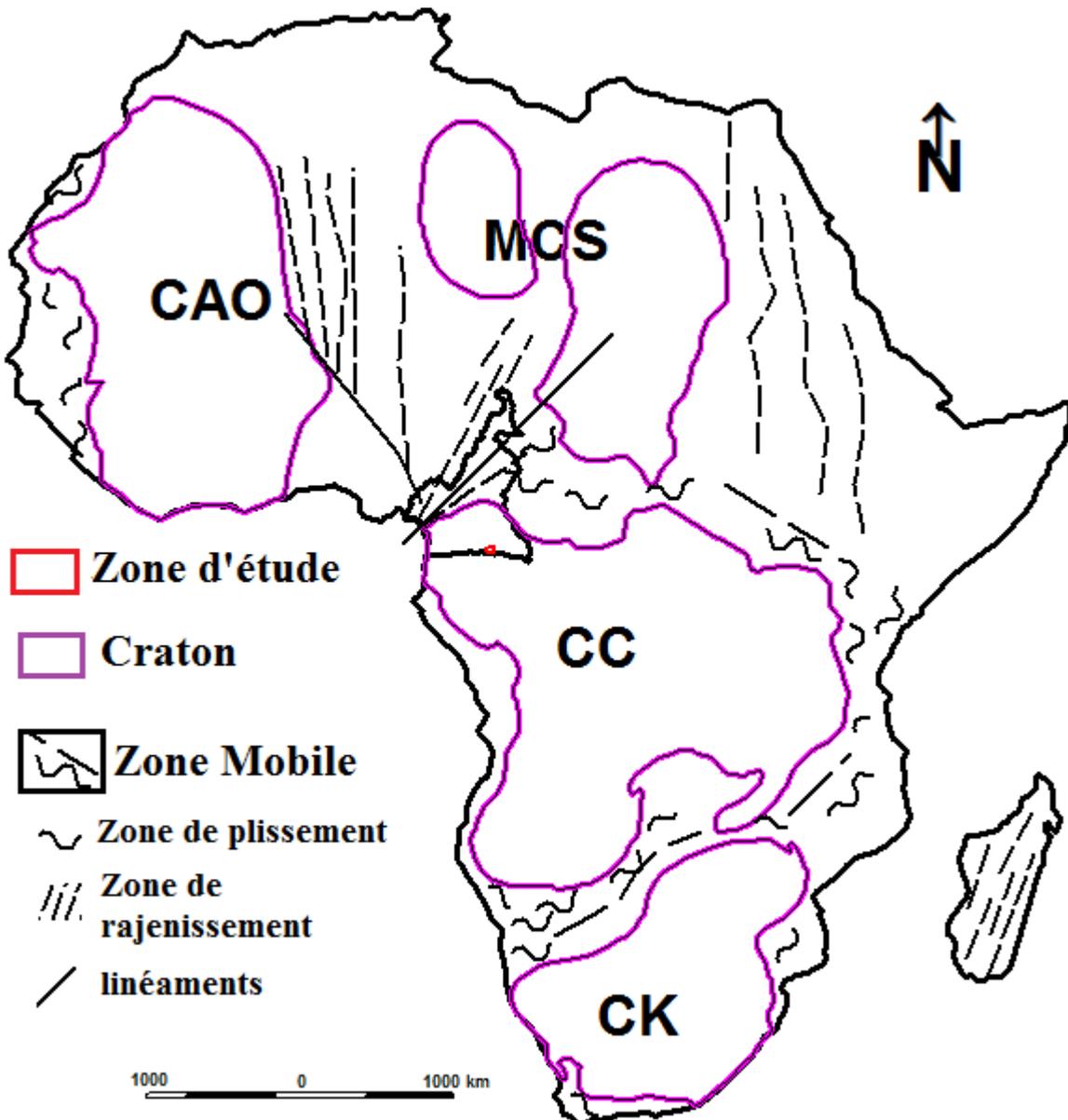


Figure 1.1: Les zones stables (noyaux cratoniques archéens) et les zones mobiles d'Afrique (D'après Rocci, 1965 ; Key, 1992 modifié).

Les formations instables subissent à certaines zones des compressions tangentielles et à d'autres des accidents longitudinaux plus ou moins verticaux accompagnés souvent des mylonites (Eno-Belinga, 1984). Ces accidents ont été accompagnés des mouvements d'extension en provoquant la formation des rifts et des bassins sédimentaires (Poudjom, 1994). En outre, la plupart des gisements miniers africains se situent aux contacts des zones mobiles et des cratons stables (Eno-Belinga, 1984). La Cartographie géologique détaillée et géochronologique ayant montré que tous les cratons archéens ont été reformés, au moins marginalement, au cours de plusieurs années (Ngako et al., 1989 ; Pouclet et al., 2006 ; Penaye et al., 2006).

I.2. Orogenèse Protérozoïque.

L'orogénèse est un produit de l'interaction entre les Plaques de l'Atlantique Nord et de l'Afrique. Le début de l'orogénèse paléo-protérozoïque dans le nord-ouest de l'Afrique est marqué par le volcanisme à environ 560 Ma. Le socle cristallin de l'Afrique est composé de roches méta-sédimentaires, méta-ignées et ignées, dont l'âge varie du Paléo-archéen au Cénozoïque (Poudjom et al., 1997). Dans les blocs cristallins Précambriens, la ceinture de roches vertes granito-gneissiques de la zone cratonique archéenne sont les noyaux entourés des roches du Protérozoïques (Chombong et al., 2013 ; Soh-Tamehe et al., 2018).

Les roches de couverture plus anciennes sont des roches sédimentaires Archéennes et Paléo-protérozoïques puis les séquences volcaniques coiffant le Craton du Kalahari. Les séquences de couverture les plus jeunes comprennent les dépôts volcano-sédimentaires Cénozoïques associés avec le rifting, notamment au sein du Rift est-africain (Schlüter, 2006). Par ailleurs, on note des intrusions de granitoïdes alcalins et des dykes dans la ceinture mobile Néoprotérozoïque. Leur mise en place est liée au soulèvement lors de la réactivation des cisaillements majeurs et des failles lors de la fragmentation du Gondwana (Schlüter, 2006). La mise en place des granites potassiques marque généralement la fin de l'orogénèse archéenne (Schlüter, 2006).

I.3. Aperçu tectonique de l'Afrique.

La tectonique de l'Afrique est décrite ici par Schlüter (2006). Selon ce dernier, le continent africain actuel résulte du fractionnement, commencé il y a environ 160 millions d'années (le Jurassique) de l'ancien supercontinent, le Gondwana, lui-même détaché de la Pangée, il y a 600 Ma. Il y a 125 Ma (le Crétacé) la plaque qui supporte l'Inde était complètement détachée, tandis que Madagascar acquiert son identité en tant que

microcontinent entre l'Afrique et l'Inde. Le bloc qui supporte l'Australie et l'Antarctique commence aussi à se détacher au début du Cénozoïque, il y a environ 60 millions d'années. Madagascar en ce qui le concerne être relié de nouveau temporairement au continent Africain.

II. APERÇU GEOLOGIQUE ET TECTONIQUE DU CAMEROUN

Le Précambrien est la division chrono-stratigraphique de rang le plus élevé, qui comprend deux ères l'Archéen et Protérozoïque (Foucault et Raoult, 2014). Le socle précambrien camerounais est divisé en deux grandes unités litho-structurales : le Craton du Congo (CC) au sud et la Zone Mobile d'Afrique Centrale (ZMAC) au nord (Nzenti et al., 1988, 1994).

II.1. Aperçu de la Zone Mobile d'Afrique Centrale au Cameroun

La Zone Mobile d'Afrique Centrale (ZMAC) couvre les deux tiers du territoire Camerounais, depuis le groupe de Yaoundé jusqu'à l'extrême Nord (Vail, 1989). Elle est un domaine du Panafricaine constituée de la chaîne Panafricaine et du bassin sédimentaire (*figure 1.2*). Généralement, la ZMAC est formée des roches métamorphiques et magmatiques datées de 780–500 Ma (Nzenti et al., 1987 ; Toteu et al. 2004) et des roches Méso- à Néoprotérozoïques, métamorphiques et magmatiques (1000–700 Ma) (Nkoumbou et al., 2014). Les particularités des domaines de la chaîne ont été mises en évidence dans les travaux de Nzenti et al. (1994) ; Nzenti (1998) ; Ngnotué et al. (2000) ; et Nzenti et al. (2006) ; Toteu et al. (2004) qui subdivisent la ZMAC au Cameroun en trois (03) domaines géodynamiques distincts (*Figure 1.2*) : le domaine Nord, le domaine Central, le domaine Sud.

i) Le domaine Nord Cameroun.

Ce domaine s'étend du Sud de Poli à l'extrémité Nord du Cameroun et est à évolution polyphasée et polycyclique (Nzenti et al., 1992 ; Toteu et al., 2001). Les formations du domaine nord ont subi une évolution crustale qui va de l'Archéen supérieur (3000–2900Ma) au Néoprotérozoïque (620–580 Ma) et marquée par trois (03) phases de déformations:

- **La phase de déformation D₁**, précoce et tangentielle (800-700 Ma, Toteu et al., 2001) associée à un métamorphisme du faciès amphibolite (Nzenti et al., 1992) d'âge Néoprotérozoïque.

- **La phase de déformation D₂**, datée à 600-580 Ma (Toteu et al., 2001), est synchrone d'une migmatisation intense (Nzenti et al., 1992) et d'une granitisation (granitoïdes calco-alcalins syntectoniques D₃). Cette phase D₂ a une évolution métamorphique dans le faciès amphibolite et schiste vert. La phase de déformation D₂ développe également des décrochements senestres N-S ou NW-SE, et correspond aussi à une période de déformation intense (Nzenti et al., 1992).

- **La phase de déformation D₃** est marquée par des décrochements dextres E-W et des plis d'entraînements E-W et N-S. Des granitoïdes syn-D₃ sont datés à 545 Ma (Toteu et al., 1987).

ii) Le domaine central camerounais.

C'est le domaine de l'Adamaoua–Yadé, zone intermédiaire entre les domaines nord et sud et est un vaste domaine qui s'étend du Sud de Bafia au Sud de Poli. L'évolution des roches le long de la limite Nord du CC a été revue par Tchakounté et al. (2017), particulièrement la relation entre le domaine Adamaoua–Yadé et le CC du domaine Sud. Le domaine Adamaoua-Yadé est limité par le cisaillement de Tcholliré-Banyo et s'étend jusqu'à la Faille de la Sanaga (*figure 1.2*). Le domaine central camerounais est marqué par des grands décrochements parmi lesquels le cisaillement centre camerounais (CCC), la faille de Fouban–Tibati-Banyo (FFTB) qui sont des accidents transcurrents ductiles (Nzenti et al., 1988 ; 2006 ; Ngako et al., 1991, 2003), la faille de Bétaré-Oya (FBO) qui est un accident ductilo-fragile (Kankeu et al., 2009 ; 2010) et la faille de la Sanaga (FS) qui est un accident fragile (Dumont, 1986). Le CCC traverse le pays et avec un soulèvement majeur post-Crétacé, marquant le soulèvement de l'Adamawa (Poudjom, 1994). Le domaine de l'Adamaoua-Yadé est constitué des roches métamorphiques, des roches méta-sédimentaires du Néoprotérozoïque et d'une abondance du granite Panafricain (Ball et al., 1984; Nzenti et al., 1998; Mvondo et al., 2007; Tchakounté et al., 2007; Owona, 2008; Caron et al., 2010; Owona et al., 2011, 2012). On note également trois (03) phases de déformation Panafricaine accompagnée de recristallisations métamorphiques dans le faciès amphibolite de faible à fort degré (Ngnotue et al., 2000). Nkoumbou et al. (2014), suggèrent que le domaine Adamaoua–Yadé est un microcontinent qui a été séparé du CC et qui est stabilisé depuis au moins 1800 Ma pendant la réactivation Panafricain.

iii) Le domaine sud

le domaine est représenté par le groupe de Yaoundé limité dans sa partie australe par le craton du Congo. Il comprend les séries de Yaoundé au centre, de Mbalmayo-Bengbis-Ayos au sud, de Yokadouma à l'est et de Bafia au nord (Nkoumbou et al., 2014).

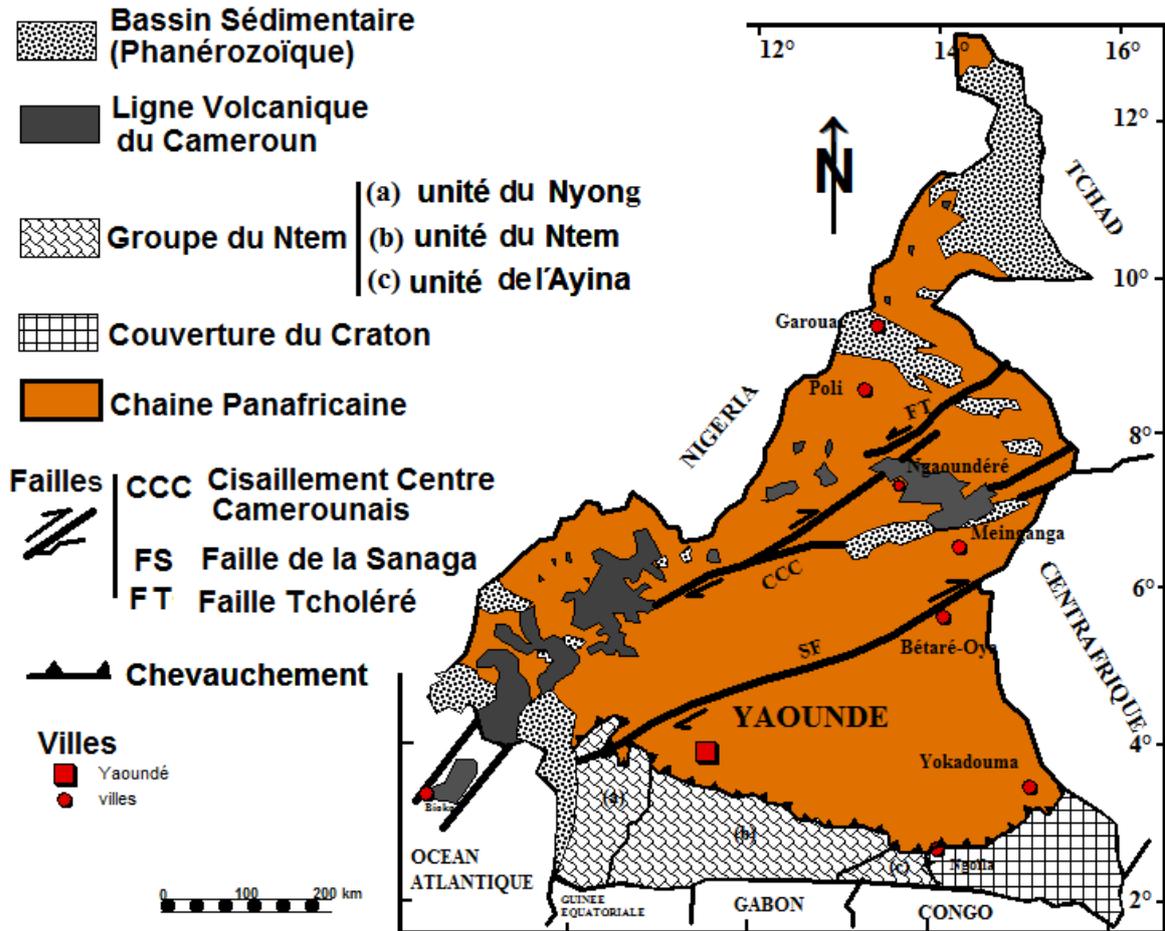


Figure 1.2: Importances formations géologiques du Cameroun (D'après Vicat & Bilong, 1998 modifié).

Ces différentes séries sont constituées des formations volcano-sédimentaires d'âge Néoprotérozoïque qui vont du SE-NW chevauchant vers le sud sur le Craton du Congo (Nzenti, 1987; Nzenti et al., 1988 ; Penaye et al., 1993). Ce domaine est à évolution polyphasée et monocyclique (Nzenti et al., 1988 ; Ngnotue et al., 2000) avec deux phases principales de déformation synchrones de recristallisation métamorphique dans le faciès des granulites. L'on y rencontre des assemblages granulitiques de haute pression et des migmatites (Nzenti et al., 1988 ; Owona et al., 2011).

II.2. Aperçu sur le Craton du Congo au Sud Cameroun

Le Craton du Congo est constitué de formations d'âge Archéen à Paléoprotérozoïque. Et dans cette logique, le Sud Cameroun est constitué (*figure 1.2*) du Groupe du Ntem et de la couverture du Craton du Congo (série du Dja) (Ndélé & Nsifa, 1987). Le groupe du Ntem est constitué de trois unités: l'unité du Nyong (a), l'unité du Ntem (b) et l'unité d'Ayina (c). Les principaux types de roches sont le gneiss, le granite et la charnockite. L'unité du Ntem est constituée de la ceintures de roches vertes et de plutons charnockitiques et granitiques datés de l'Archéen, entre 2,9 et 2,6 Ga (Toteu et al., 1994; Tchameni, 1997; Tchameni et al., 2000). Dans l'unité du Nyong, on trouve les mêmes formations affectées d'un métamorphisme au Paléoprotérozoïque (Tchameni, 1997 ; Tchameni et al., 2000 ; Tchameni et al., 2001). L'unité d'Ayina est constituée des différentes roches métamorphiques, gneiss, micaschistes et Schistes riches en chlorite avec fréquemment des amphiboles vert pâle et des granules microscopiques d'épidote (Foucault et Raoult, 1992). Ces formations appartiennent à la nappe de chevauchement (nappe de Yaoundé) déversée vers le sud sur le Groupe du Ntem, lors de l'orogénèse Panafricaine au Néoprotérozoïque (Penaye et al., 1993 ; Toteu et al., 1994).

II.3. Aperçu minier du Cameroun

Les informations des potentielles ressources minérales du Cameroun sont du bureau de recherche géologique et minière (BRGM) (2013) à partir de la carte des indices miniers et de certains travaux entre autres ceux de Ganno et al. (2015b), Ganno et al. (2017), Soh et al. (2018). Les diamants sont associés aux formations fluviaux-lacustres des «Séries de Carnot» à la frontière avec la République Centrafricaine et sont exploités en utilisant des méthodes artisanales. Les indices d'or apparaissent un peu partout sur le territoire mais avec des concentrations élevées à l'est, particulièrement le long de la frontière avec la République Centrafricaine et le Tchad. L'ilmenite, le fer et le titane se rencontrent dans les zones cristallophylliennes en grande concentration. La cassitérite (oxyde d'étain) se trouve dans un petit gisement à Mayo Darlé. Le Nickel et le Cobalt se produit à l'est de Lomié dans une zone d'environ 80 km². Le rutile a été exploité jusqu'en 1957 près de Yaoundé, où les schistes contenant du mica affleurent. La Bauxite se produit dans deux grands dépôts, à Ngaoundal et à Minim-Martap dans le nord du pays et près de Fongo-Tongo à l'ouest. Deux dépôts de fer (Mbalam et Kribi) avec des teneurs de 30-40% sont connus au Cameroun. Le calcaire est exploité à Figuil dans une usine locale pour la fabrication de ciment, alors que le marbre se produit dans le nord du Cameroun près de Bidzar. Une carrière de pouzzolane est exploitée dans le nord-ouest à la carrière de

Djoundou. Le Pétrole est produit le long de la côte au nord et au large de Victoria dans le champ pétrolifère de Mokoko-Abana.

III. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

III.1. Géographie physique de la zone d'étude

La zone (Figure 1.3) de prospection faisant l'objet de cette étude est localisée en Afrique Centrale, plus précisément dans la partie du Sud-Est Cameroun à l'hémisphère Nord, dans l'arrondissement de Ngoïla, département du Haut Nyong (région de l'Est Cameroun). entre les méridiens 13°50' et 14°20' de longitude Est et les parallèles 2°10' et 2°35' de latitude Nord avec une altitude moyenne de 850 m. Le climat qui y règne est de type équatorial guinéen. C'est une zone rurale dont l'accès est difficile en raison de l'abondance de sa diversité forestière. Le seul principal accès se fait par le trajet Zoulabot – Ngoïla – Djadom – Souanke au Gabon. L'hydrographie de la zone d'étude est dominée par le Dja, suivie de quelques petits cours d'eau. La végétation de la zone est caractérisée par une forêt dense, humide et verte. Les sols sont ferrallitiques.

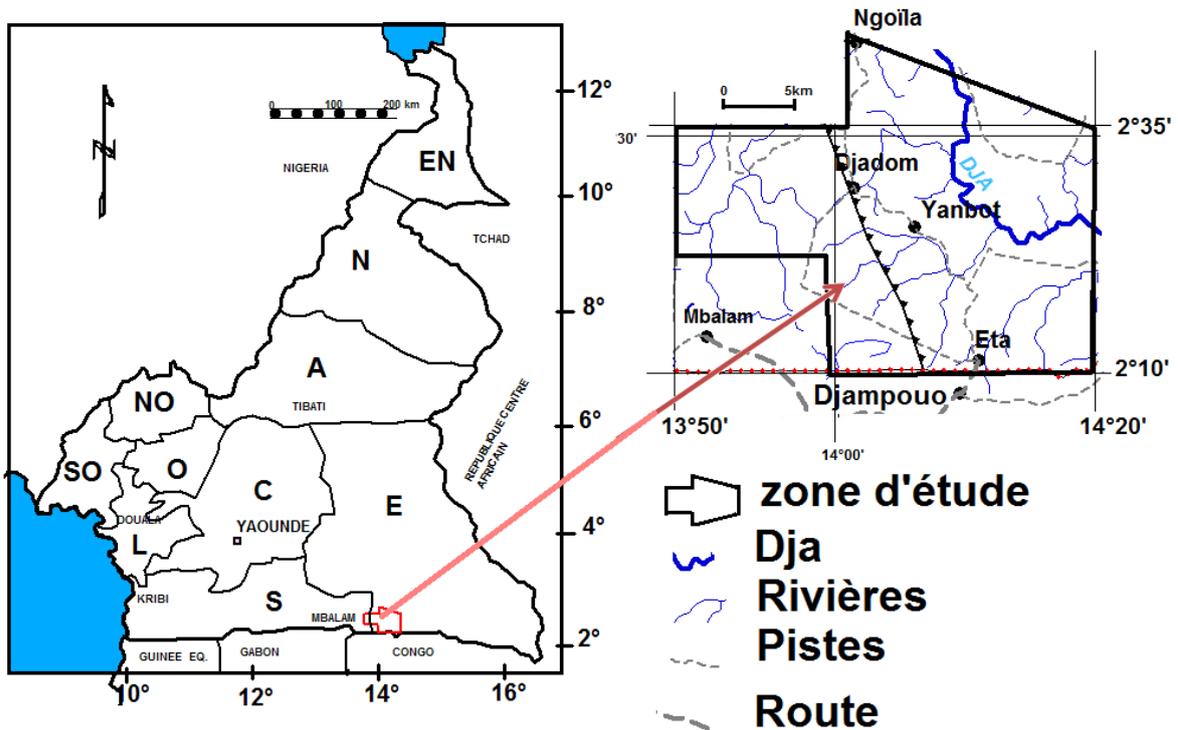


Figure 1.3: Présentation de la zone d'étude située au Sud-Est Cameroun traversée par le fleuve Dja (Van Den Hende, 1969 Modifié).

III.2. Géologie de la zone d'étude

Les données géologiques et tectoniques des récents travaux sont orientées sur les formations du Dja dans le secteur de Mintom où des dépôts de calcaires ont été identifiés (Vanhoutte et Salley, 1986, Vanhoutte, 1989). Ils révèlent que ces calcaires sont bordés par deux directions différentes de linéaments N60° et N110° mises en évidence par des études géologiques menées par Caron et al. (2010). La cartographie géologique de la zone d'étude (figure 1.4) a été réalisée par Van Den Hende (1969). Les formations de surface et subsurface sont constituées des argilo-schisteuses et des quartz, tous à faciès ferrugineux.

La région d'étude appartient au domaine sud du Cameroun et chevauche entre trois parties : le groupe de Yaoundé, l'unité d'Ayina du Complexe du Ntem et la couverture du CC. De manière particulière, la zone d'étude borde la couverture Nord du CC et l'unité d'Ayina. Elle est couverte de formations Méso et Néoprotérozoïques (700 à 1000 Ma) et comprend des roches issues des séries intermédiaires, constituées de schistes et de quartzites formés suite à un métamorphisme épizonal (Nkoumbou et al., 2014). La zone est également incluse dans la série du Dja inférieure et comprend les complexes tillitique, doléritique et Beuk. Elle appartient en effet à la série des méta-sédiments de Dja-Ayos-Mbalmayo-Bengbis (Paterson et al., 1976). Bessoles, (1977) considère les bassins d'Ayos, de Mbalmayo et de Bengbis comme étant d'âge moyen Précambrien. La géologie de la zone est dominée par l'extension du craton du Congo pendant l'archéen (Ntem Complex ~ 3 Ga) et de l'unité du Paléoprotérozoïque de la série d'Ayina (~ 2,5 Ga) favorable à la minéralisation du minerai de fer. La composition est constituée de chlorite-schistes, de micaschistes à muscovite et de lentilles d'inter-stratifiés de quartzites. Le complexe doléritique (silts et dykes) est composé de ceintures de roches vertes, les quartzites mylonitiques, les dolérites et les gabbros. Le complexe du Beuk est composé de grès quartzeux ocre, argilo-schiste et schiste. La série du complexe de base est principalement composée d'ectinites (gneiss et amphibolite), de migmatites (granite magmatique) et de roches intrusives (granite et granodiorite).

La zone d'étude fait partie du Craton du Congo (CC). Sa formation remonte au rajeunissement au cours de l'orogénèse Panafricaine, environ 550 Ma (Vicat, 1998 ; Toteu et al., 2004 ; Djoukam et al., 2004.). Un assemblage métamorphique de roche à foliation (S₁) de direction E-W et de nombreuses intrusions (granodiorite, diorite quartzique, amphibolite) à foliation (S₂) de direction SW-NE. Les failles et la foliation (S₃) mylonitique sont présentes dans cette zone. Les principales caractéristiques tectoniques se trouvent sous des couvertures géologiques.

III.3. Tectonique de la zone d'étude

La tectonique de la région d'étude est complexe. La tectonique principale de cette région est l'extension du CC sous la zone mobile. Les orogénèses successives se sont traduites par des séries de failles et des plissements importants. La déformation Panafricaine de la région d'étude est contrôlée par un décrochement tectonique et les zones de cisaillement. La déformation de la zone est contrôlée par l'orogénèse Eburnéen (Feumoé & Ndougsa-Mbarga, 2017). Les données de télédétection et de géophysiques (magnétique, gravimétrie et audiomagnétotélurique) dans cette zone l'ont interprété comme des foliations, des fractures (ou ruptures) et des zones de cisaillement. Les principales fractures s'observent facilement au contact entre le socle et les formations de Mbalmayo-Bengbis. La foliation est un ensemble des couches minérales qui constituent les roches métamorphiques. Olinga et al. (2010), Feumoé et al. (2012) ont relevé un réseau de foliation parallèle au cisaillement centre camerounais (CCC) et à la Faille Sanaga (FS). Le CCC est à N70°E percutant plusieurs structures de la croûte est parallèle à la FS et s'étend du soudan jusqu'au NE du Brésil. Il définit la géométrie du Cameroun central due à l'interaction du système du cisaillement.

La direction de fracturation est en générale W-E ou WNW-ESE alors que dans le centre et au nord Cameroun, les grands axes de fractures ont une direction sensiblement SW-NE. Dans le socle, la direction principale est SW-NE au nord de la région avec large virgation et les bourdinages (Yandjimain et al., 2017) et W-E au sud avec redressement vers le nord. Ces grands axes de plissements sont difficiles à suivre et à interpréter. Les schistes sont très plissotés et la schistosité s'accompagne de nombreuses flexures. Une discordance avec les micashistes à deux micas et à grenats semble probable (Gazel et Guiraudie 1965). La virgation est un ensemble des plis formant un arc. Les déformations subies par les roches schisteuses, argileuses et gréseuses engendrent des cassures et des décollements et permettent la mise en place des roches intrusives. Ainsi, deux phases majeures de déformation ont affecté la zone d'étude (Shang et al., 2004 ; Suh et al., 2009). La première phase D₁ d'âge libérien est associée à la foliation S₁ orientée généralement E-W, de pendage subvertical et aux plis isoclinaux intrafoliaux. La deuxième phase D₂ d'âge éburnéen est associée à la foliation S₂ de direction SW-NE. Elle a favorisé la mise en place des intrusions basiques. Par ailleurs, une troisième phase D₃ de déformation d'âge panafricain, très discrète, est associée à la foliation S₃ et aux failles N-S de décrochement dextre et senestre. Cette dernière phase a contrôlé la mise en place des schistes de la série de

Mbalmayo-Bengbis et est responsable du chevauchement vers le sud de la série de Yaoundé sur le complexe du Ntem.

IV. TRAVAUX GEOPHYSIQUES ANTERIEURS

IV.1. Connaissances en géoélectricité

Les travaux de Gouet et al. (2015) ont mis en évidence :

- Deux couloirs majeurs de fracturations, de failles ou de cisaillements intra-granitiques le long des profils, de directions principales E–W et SW–NE ;
- Les zones de minéralisations potentiellement aurifères le long des profils et, qui longent ou entrecoupent les zones de fracturations ou de cisaillements ;
- Les zones cibles des eaux souterraines intra-granitiques.

D'après ces travaux, les zones potentiellement aurifères témoignent de l'intérêt des zones de fracturations ou de cisaillements dans les travaux de recherches des points d'enrêge des dépôts aurifères pour mettre en évidence des couches conductrices et de granites fracturés/altérés faiblement polarisables. Il en ressort, particulièrement le potentiel minier des villages Boutou et Colomines. Ils ont de même à l'aide de la modélisation 1D, 2D et 3D mis en évidence des zones de faiblesses ou de discontinuités conductrices (fractures, failles, zones de cisaillement) de directions principales E–W et SW–NE qui traversent les structures du socle granitique Précambrien. Ils soulignent que cette traversée est un résultat des événements tectoniques et géologiques marqués par le Cisaillement Centre Camerounais.

Les travaux de Ngoumou (2015) ont montré à l'aide des pseudo-sections de résistivité que, la zone nord-ouest du CC (zone de Mossondo) aurait connu une intense activité tectonique, marquée par la formation des discontinuités accompagnées de soulèvements de structures sous-jacentes. Ces déformations interprétées comme des failles ou des zones de cisaillements de direction SW–NE seraient des couloirs de minéralisations. Ces couloirs de minéralisations correspondent à de fortes valeurs de chargeabilités marquées par des pics de chargeabilité obtenus à différentes profondeurs. Ces couloirs de minéralisation de direction NE–SW témoignent de l'intense activité tectonique subite par la zone et qu'ils auraient attribué aux formations minéralogiques de type fer rubané.

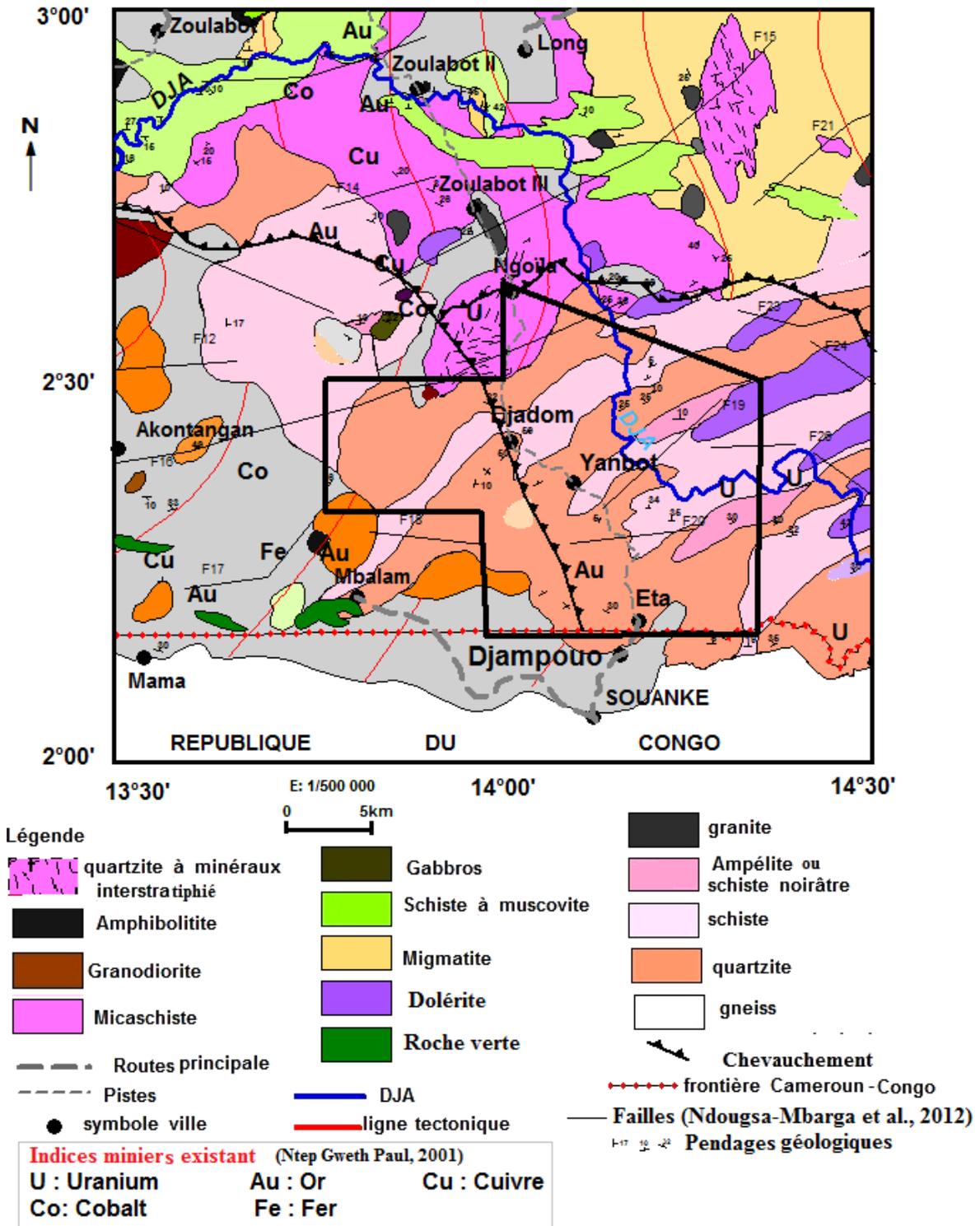


Figure 1.4: Carte géologique de la zone d'étude. (Van Den Hende, 1969 Modifiée).

IV.2. Connaissances en Audiomagnétotéllurique

Les travaux de Mbom-Abane (1997) ont mis en évidence une direction structurale principale N105°E (sensiblement W-E), deux directions secondaires, WSW-ENE et NNW-SSE à Ayos et une structure tectonique W-E de type faillée.

Meying (2011) dans ses travaux de thèse, par une modélisation 1D et 2D des données Audio-magnétotéllurique (AMT) scalaires d'une part, a montré que le socle granitique atteint environ 9 Km, et d'autre part a mis en évidence un système de failles de direction W-E qui correspond à la bordure septentrionale du Craton du Congo, et semble indiquer la limite de ce dernier avec le Panafricain. Il remarque qu'un soulèvement du socle qui présente une stratification quasi tabulaire en profondeur et une absence de fractures au-delà de 300 m de profondeur. Puis, un accident tectonique de direction SW-NE situé en proche surface est aussi mis en évidence et semble être lié à la mise en place du Cisaillement Centre Camerounais. Ndougsa-Mbarga et al. (2011) ont observé une structure tectonique mettant en évidence un système de faille à Messamena/Abong-Mbang résultant de la collision entre la ceinture du Panafricain et le CC.

IV.3. Connaissances en gravimétrie

Les travaux de 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.

Les travaux de Ndougsa-Mbarga et al. (2003) suggèrent une faille normale de direction E-W dans la zone Mengueme-Abong-Mbang. Les travaux de Tadjou et al. (2009) mettent en évidence les zones où les gradients de gravité sont élevés et qui séparent différentes anomalies. Ces anomalies sont situées sur la bordure septentrionale du Craton du Congo.

Ndougsa-Mbarga et al. (2002) relèvent un système de plis et de failles orientés E-W et des failles de la zone de juxtaposé des hautes densités du Panafricain au nord et de basse densité de l'Archéen au sud avec une profondeur crustale variant de 8 km à 20 km (Noutchogwe et al., 2006 ; Tadjou et al., 2009). Ndougsa-Mbarga (2004) partant des données géologiques, menant une modélisation 2.5D des structures profondes à partir de l'anomalie de Bouguer observée, il met en évidence un substratum en forme de graben de direction W-E, délimité au nord et au sud par une faille Normale de pendage variables. Cette modélisation révèle la présence de deux lignes structurales de direction NW-SE au nord de la bordure septentrionale du bassin de Manfé ; puis la présence d'un nœud

tectonique et une fracture du substratum en escalier de direction N-S qui serait issue du croisement cassantes SSW-NNE et NNW-SSE. La modélisation 2.5D de la carte de Bouguer lui a permis d'évaluer l'épaisseur sédimentaire du bassin de Manfé qui varie de l'ouest à l'est de 6400 m à 1450 m et donne une idée de la forme de ce bassin qui est en escalier et en dents de scie dans la direction W-E.

Noutchogwe (2004) a relevé une grande fracture orientée sensiblement N70°E, à cisaillement dextre, qui affecte le substratum avec un caractère lithosphérique qui localement, a joué une faille inverse et normale, entraînant le soulèvement du compartiment Nord ; Les fragments du substratum sont intrusés dans des roches volcaniques dont le toit se trouverait à une profondeur moyenne de 8 km, avec une profondeur minimale d'environ 5,5 km sous Tibati. L'interprétation de celle-ci lui permet de souligner que la remontée magmatique s'étend latéralement suivant la direction N70°E qui coïncide avec l'une des directions majeures du Cisaillement Centre Camerounais. Puis il relève que l'épaisseur du remplissage sédimentaire dans le fossé Sud-Adamaoua diminue d'Est en Ouest et est évaluée à environ 500 m dans le bassin du Djérem qui atteint 1500 m dans le fossé du Mbéré.

Owona–Angue et al. (2011) dans leurs travaux ont combiné les données sismiques, magnétotelluriques et gravimétries pour faire une analyse des cartes qui montrent la signature des principales unités géologiques et particulièrement le gradient NS corrélant avec la position et la direction de la faille de Kribi-Campo. Par une modélisation le long d'un profil gravimétrique transversal à la bordure entre le Craton et le bassin sédimentaire, ils constatent que la faille de Kribi-Campo est due aux intrusions des roches magmatiques survenues lors de la collision entre le Craton et la chaîne mobile Panafricaine et métamorphosées plus tard sous forme de granulites. Et que la structure résultante peut être interprétées à partir du modèle gravimétrique comme étant la conséquence de la subduction du Craton sous le Panafricain. Les données magnétotelluriques ont confirmé ces résultats. Aussi, ils ressortent que la vitesse des ondes de cisaillement révèle des différences dans la composition des structures de la croûte supérieure. Tandis que dans la croûte inférieure, les structures ont une composition similaire dans les deux régions tectoniques, mais avec des épaisseurs différentes.

Zanga-Amougou et al. (2013) ont appliqué la méthode des éléments finis aux données gravimétriques, dans le but de déterminer les structures géologiques et tectoniques qui animent le sous-sol. Ils ressortent de ce travail qu'ils ont distingué les sources superficielles des sources profondes et ont aussi estimé la profondeur de Moho à 35 km.

Ce qui confirme l'amincissement de la croûte terrestre dans cette région. Ils ont retenu les granulites comme formation de suture entre le CC et la Chaîne Panafricaine mis en place lors de la collision entre les masses. Appliquant la modélisation 2.5D, ils ont mis en évidence les granulites, les granites et les formations sédimentaires.

IV.4. Connaissances en magnétisme

La première étude en aéromagnétique fut menée en 1981 pour mettre en évidence les formations ultrabasiqes de Lomé. Elle a conduit à l'exploitation des gisements miniers dans la région.

Les travaux de Ndougsa-Mbarga et al. (2012) relèvent une densité de linéaments WNW-ESE, WSW-ENE et W-E. Ce qui leur a permis de dire que cette région d'étude est divisée en deux zones tectoniques. La comparaison de leurs résultats avec les données géo-scientifiques (structurelles, lithologiques) confirme la différence morphologique et la subdivision tectonique en deux secteurs tectoniques correspondant au Craton du Congo dans le sud et au Panafricain dans le nord ; et aussi identifié la frontière tectonique les séparant en profondeur. Ainsi les structures modélisées résultant d'une collision qui a provoqué un renversement considérable des formations Panafricaines sur les formations CC.

Feumoé et al. (2014) dans leurs travaux, par une modélisation 2.5D de deux profils relèvent des corps de fortes susceptibilités magnétiques. Sur le profil NW-SE de susceptibilités 0,015 cgs très volumineux de toi à une profondeur de 2730 m. Sur le profil NE-SW, des corps de susceptibilités 0,012 cgs qui ont la forme d'un sill dont le toi se situe à une profondeur de 2730 m. Ils soulignent que ces corps de masse intracrustale de forte susceptibilité pourraient expliquer les formations intrusives dans la croûte des corps lourds. La confrontation de ses résultats avec les données géo-scientifiques, a permis de souligner que la présence des linéaments majeurs est liée aux failles logées en profondeur dues aux grands mouvements tectoniques à l'échelle du continent. Quant aux linéaments mineurs, ils sont liés à des phénomènes géologiques locaux. La disposition des linéaments en quatre familles d'orientations majeures avec une prédominance dans la direction ENE-WSW. La solution d'Euler permet de relever les accidents verticaux de direction ENE-WSW et NW-SE proche de notre zone d'étude.

Feumoé & Ndougsa-Mbarga (2017) présentent la détermination de la profondeur du point de curie (Curie Point Depth (CPD)) comme une méthode permettant d'analyser la profondeur de transition de la magnétite. Le CPD est à température constante. Dans le sud Cameroun, ils estiment le CPD de 20,0 à 25,0 km. le CPD le plus profond correspond au

socle Précambrien avec un flux de chaleur faible et les moins profond correspond aux zones métamorphiques (Panafricain ou zone mobile). Ils montrent que le gradient thermique varie entre 23 et 29°C/km avec un flux de chaleur de 57 à 72 mW/m² et la conductivité de 2,5 à 2,7 W/m°C. Leur étude montre une zone de ressource géothermique possible. Les résultats de cette étude montrent l'existence d'un régime géothermique et géotectonique dans sud Cameroun.

L'Analyse des données aéromagnétiques (Nnange, 1991) montre que l'anomalie peut être due aux intrusions de subsurface. Cette anomalie marque la limite du Craton par la mise en évidence de la faille du cisaillement centre Africain (CCC).

Bikoro et al. (2013) ont identifié trois anomalies magnétiques dans la zone Djoum dues à un mélange de matériaux riche en magnétite et hématite. Dans ces zones, ils notent un important de dépôt de minéraux de fer. Par des données de forage, ils montrent que la susceptibilité magnétique croît avec la profondeur.

V. PROBLEMATIQUE

Les travaux antérieurs dans cette zone et ces environs montrent que l'évolution tectonique est contrainst par la collision continentale entre le CC et le Panafricain. Cette collision marque la subduction du CC sous le Panafricain et la dynamique de ce mouvement. La configuration des linéaments géophysiques confirme la subduction tectonique du CC sous le Panafricain et permettant d'identifier la limite tectonique entre les deux masses (Meying et al., 2009 ; Tadjou et al., 2009 ; Ndougsa-Mbarga et al., 2012 ; Ndougsa-Mbarga et al., 2014 ; Yandjimain et al., 2017). Cet évènement révèle l'environnement géothermique via les structures faillées.

Les principales caractéristiques tectoniques se trouvent sous des couvertures géologiques. Des études géophysiques (Ndougsa-Mbarga et al., 2014, Tadjou et al., 2009, Meying et al., 2009) montrent que la limite du CC et du Panafricain est à environ 4°N. En outre, une étude audio-magnétotellurique réalisée par Meying et al. (2009) montre de nombreuses discontinuités dans la topographie du sous-sol. Cette topographie présente une faille majeure profonde avec une direction W-E. Aussi, Feumoe et al. (2012), Ndougsa-Mbarga et al. (2012) et Yandjimain et al. (2017) ont estimé la limite géophysique entre Craton du Congo au sud, Panafricain au nord. Les caractéristiques tectoniques (failles et plis) sont intégrées dans l'historique des déformations et pourraient être dues au système de collision transsaharien est-ouest (Mvondo et al., 2007). Certaines failles profondes ont été confirmées dans des études géophysiques (Meying et al., 2009, Ndougsa-Mbarga et al.,

2003, Mbom-Abane, 1997). Feumoé et al. (2012 & 2014) ; Feumoé et al. 2017 ont mis en évidence les failles de direction W-E, WNW-ESE, la profondeur de transition de la magnétite (Curie Point Depth (CPD)). Tous ces nombreux travaux sont pour la plupart faits à grande échelle et donnent des connaissances à grande échelle (échelle régionale). Plus précisément les travaux de Feumoé menés sur une englobant la zone d'étude s'est fait avec les données aéromagnétique plus anciennes, collectés par la compagnie Canadienne SURVAIR en 1970 avec les paramètres de levé de 235 m d'altitude vol suivant les profils de direction N135 et espacés de 750 m. Ainsi les connaissances locales sont insuffisantes. Il est nécessaire de rechercher et de compléter les informations à petite échelle. Les cartes structurales et les profils à petite échelle pourront mener à une étude plus détaillée avec les nouvelles données aéromagnétiques de haute résolution. Ceci permettrait de proposer aux décideurs, des informations fiables d'une part pour l'exploration maîtrisée des ressources naturelles, et d'autre part, pour les risques naturelles. Déterminer tous les éléments pertinents pour une exploration plus approfondie afin d'obtenir un plan de développement des gisements, nécessite une investigation géophysique s'appuyant sur les méthodes géophysiques dont le choix porte ici sur la méthode aéromagnétique.

VI. OBJECTIFS

Cette étude a pour objectif principal d'améliorer la carte structurale, de cibler les zones potentielles ferrifères et autres minéraux. Pour mener cette étude, les objectifs spécifiques ont été élaborés :

- Mettre en évidence des traits structuraux et déterminations de la carte structurale conséquentes des mouvements tectoniques ;
- Faire une analyse qualitative et quantitative des anomalies magnétiques observées ;
- Corréler les résultats obtenus avec les observations géologiques, et les résultats des études d'autres méthodes géophysiques ;
- Evaluer si possibles les potentialités en ressources minérales et proposer les éventuels points de forages d'exploration susceptibles de fournir et de servir de guide à la prospection minéralogique;
- Réaliser une modélisation 2.75D et 3D des données aéromagnétiques en vue de mettre en évidence des points d'intérêts de minéralisations potentielles.
- Discuter des implications des modèles en termes de mode de mise en place des intrusions étudiées.

Cette étude permettra en s'appuyant sur une interprétation géophysique pertinente, de mieux mener une interprétation géologique, structurale, tectonique et minéralogique.

CONCLUSION

La majeure partie de l'Afrique se compose d'un socle ancien, d'origine précambrienne plissée, à partir duquel se sont formés les reliefs actuels. La géologie africaine a été rajeunie par l'épisode thermo-tectonique Panafricain formée de roches métamorphiques et de massifs cristallins intrusifs. Cette géologie repose sur des formations stables (zones cratoniques) et des formations instables (zones mobiles). Le Cameroun présente plusieurs entités géologiques : les rifts, du volcanisme (ligne volcanique, dôme volcanique de l'Adamaoua), craton et zone mobile. L'évolution géologique et géodynamique de notre pays est placée sous l'influence de l'évènement tectonique. Cette orogénie a donné naissance aux cratons et aux zones mobiles qui forment le socle Camerounais. Ces dernières ont été reprises par les épisodes tectoniques tardi-Panafricains. Le Mésozoïque est caractérisé par la formation des rifts (Bénoué, Adamaoua), des bassins sédimentaires (à l'extrême-nord du Cameroun), et de bassins côtiers (Douala, Rio Del Rey au Cameroun). Il y a également le soulèvement (dôme) de l'Adamaoua. L'enjeu de ces évènements tectonique Panafricain est la formation de la faille du cisaillement de Fouban (CCC) qui traverse le Cameroun allant du Golfe de Guinée au Soudan, la faille de Tholiré au nord de la CCC et celle de la Sanaga au sud de la CCC qui part du Sud-Ouest du Cameroun à la Centrafrique. La géologie économique est la partie consacrée aux différents minéraux tels que : le diamant, l'or, le fer, le titane, le calcaire, le nickel, le cobalt la pouzzolane, le pétrole, le gaz.

La zone d'étude (Djadam-Eta) appartient au Sud-Est du Cameroun. Elle présente l'empreinte de plusieurs entités géologiques : le Groupe de Yaoundé, l'unité d'Ayina du Complexe du Ntem et la couverture du CC. Les formations de surface et subsurface sont constituées des faciès ferrugineux. Les déformations subies par ces formations rocheuses ont engendré des cassures et des décollements et permettent la mise en place des roches intrusives. Pour mener à bien cette étude une problématique et des objectifs ont été définis.

CHAPITRE II : METHODES ET DONNEES

INTRODUCTION

Ce chapitre met présente la méthodologie, le matériel et les données utilisés pour mener à bien ce travail. L'exploration géophysique emploie des méthodes indirectes pour déterminer, détecter et cartographier les gisements de minerais enfouis dans le sous-sol, à partir des informations observables en surface, fournissant ainsi des données précieuses sur la litho-stratification locale, sur la présence et la nature des systèmes de failles, de fractures et de zones de contact. L'investigation géophysique consiste à chercher et à localiser les roches, les gisements et les formations de minerais, par les anomalies qu'ils produisent dans le sous-sol. Il est important d'explorer ce dernier en s'appuyant sur une méthode propre au type d'informations recherchées. La méthodologie de la méthode aéromagnétique sera explorée dans la première partie de ce chapitre et la présentation des données dans la deuxième partie.

I. THEORIE DU GEOMAGNETISME

I.1. Champ magnétique terrestre

L'induction magnétique, mesurée à la surface de la Terre, notée \vec{B} , est une grandeur vectorielle dont l'intensité se mesure en Tesla (T), ce qui correspond au Weber.m⁻² ou bien encore au kg.s⁻².A⁻¹ dans le Système International (SI). Elle est la résultante de toutes les sources magnétiques environnantes : noyau, croûte, objets géologiques ou anthropiques, ionosphère, magnétosphère. Le champ magnétique créé par le noyau représente à lui seul plus de 80 % du champ magnétique total mesuré à la surface de la Terre (Campbell, 1997 ; Roy, 2008). Aussi, au premier ordre, le champ terrestre est de type dipolaire et varie entre 30 000 et 60 000 nT à la surface du géoïde. Les mouvements de matières du noyau liquide sont générés et maintenus par des forces résultantes du fait des gradients thermiques, du mouvement de rotation de la terre et des gradients de concentrations qui découlent de la cristallisation du noyau solide au détriment du noyau liquide.

L'ensemble de ces mouvements crée le champ magnétique terrestre par arrangement d'un effet dynamo et d'un effet électro-aimant. Les lignes de champ sont les lignes tangentes en tout point au champ magnétique, et sont analogues à celles créées par un aimant droit (un dipôle magnétique) ou une bobine plate parcourue par un courant. Les lignes tangentes aux vecteurs champs magnétiques vont du pôle sud au pôle nord

magnétique (figure 2.1). L'axe des pôles magnétiques (N_M) forme un angle de $11,5^\circ$ avec l'axe de rotation de la terre (N_G) (figure 2.1). Au-delà de certaines profondeurs, les propriétés magnétiques intrinsèques des matériaux disparaissent en raison de l'augmentation de la température. Les 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).

Les Propriétés magnétiques intrinsèques des matériaux de la croûte terrestre sont pour la plus part celles des minéraux et plus rarement des phases amorphes.

La variation du champ magnétique est centenaire. Le champ magnétique total est la somme de plusieurs champs :

- le champ externe dû aux courants électriques dans la haute atmosphère ;
- le champ interne dipolaire dû aux courants électriques dans le noyau externe ;
- le champ interne secondaire (anomalies de dimension continentale) ;
- le champ d'anomalies dû aux masses magnétiques de la croûte.

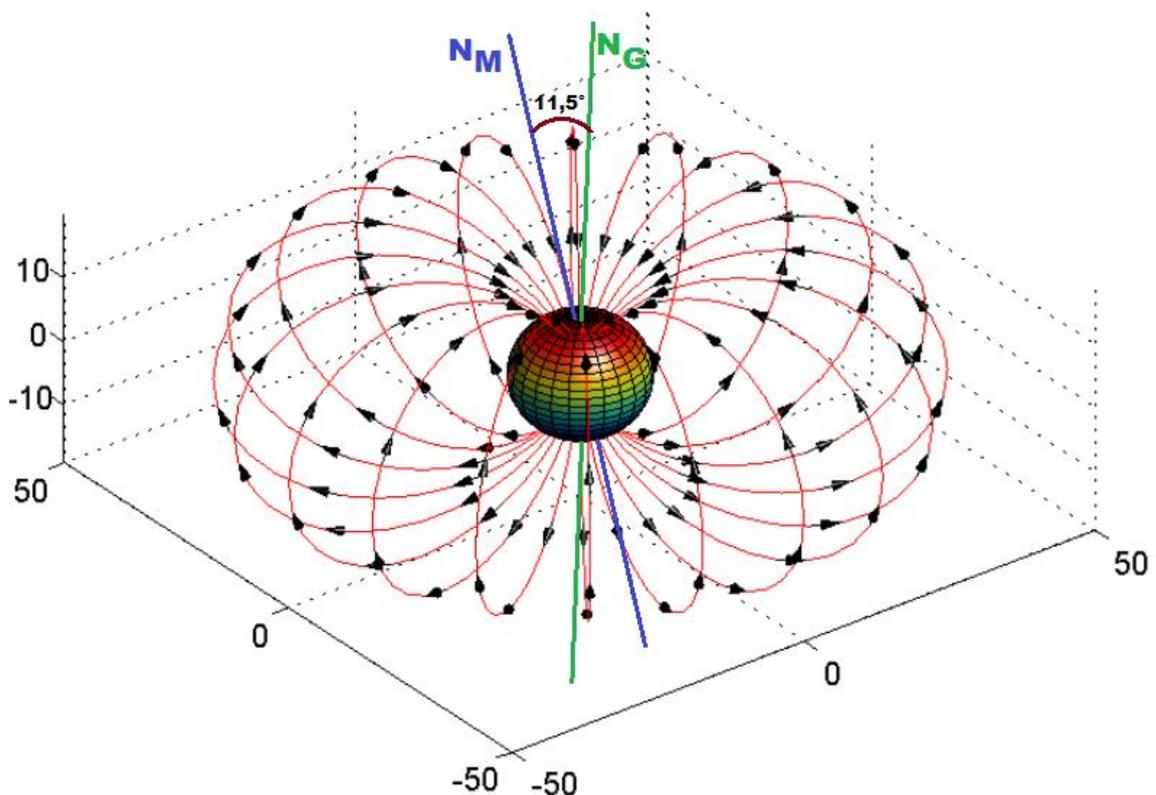


Figure 2.1: Représentation dans l'espace des lignes des champs magnétiques orientés du pôle Sud au Pôle Nord géomagnétique. (Simon, 2011 modifié).

En prospection, c'est le champ d'anomalies qui nous intéresse ; Noté ΔF , il est l'anomalie du champ total F . Il est la projection du vecteur champ d'anomalie F_a sur la direction du champ total F (figure 2.2). Il est donné par :

$$\Delta F = F_o - F$$

Où F_o est le champ observé (champ mesuré lors de l'acquisition des données).

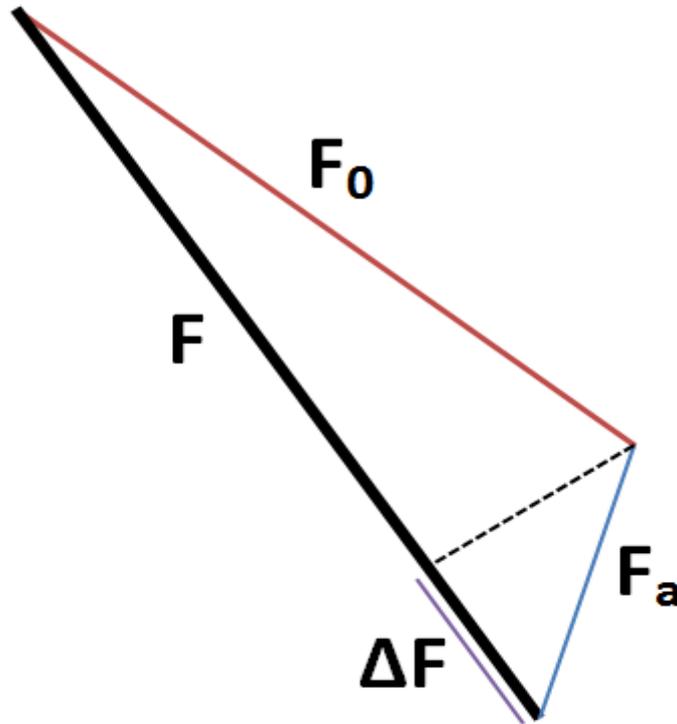


Figure 2.2: Représentation du champ total F , champs observé F_o et anomalie du champ total ΔF .

I.2. Modèles du champ magnétique terrestre

D'après Grone (2009), la description du champ magnétique dans un référentiel terrestre fait apparaître ses éléments caractéristiques. Le repère géographique local d'origine O est défini par trois axes pointant dans trois directions : OX vers le Nord géographique, OY vers l'Est géographique et OZ selon la verticale du lieu considéré, dirigé vers le bas (figure 2.3).

Ces trois éléments caractéristiques suffisent pour décrire entièrement le champ de référence :

H : la composante horizontale du champ ;

D : la déclinaison du champ qui est l'angle entre OX et H . D est positif si la déviation est vers l'Est et négative vers l'Ouest.

I : l'inclinaison du champ qui est l'angle entre H et F. Dans l'hémisphère magnétique Nord, I est positif car F pointe vers le bas. I est nul à l'équateur magnétique, vaut 90° au pôle Nord magnétique (en 2011, I valait 75° au Nord et 101° à l'Ouest). C'est la convention contraire dans l'hémisphère magnétique Sud, I vaut -90° au pôle Sud magnétique (en 2011, D valait 67° au Sud et 143° à l'Est).

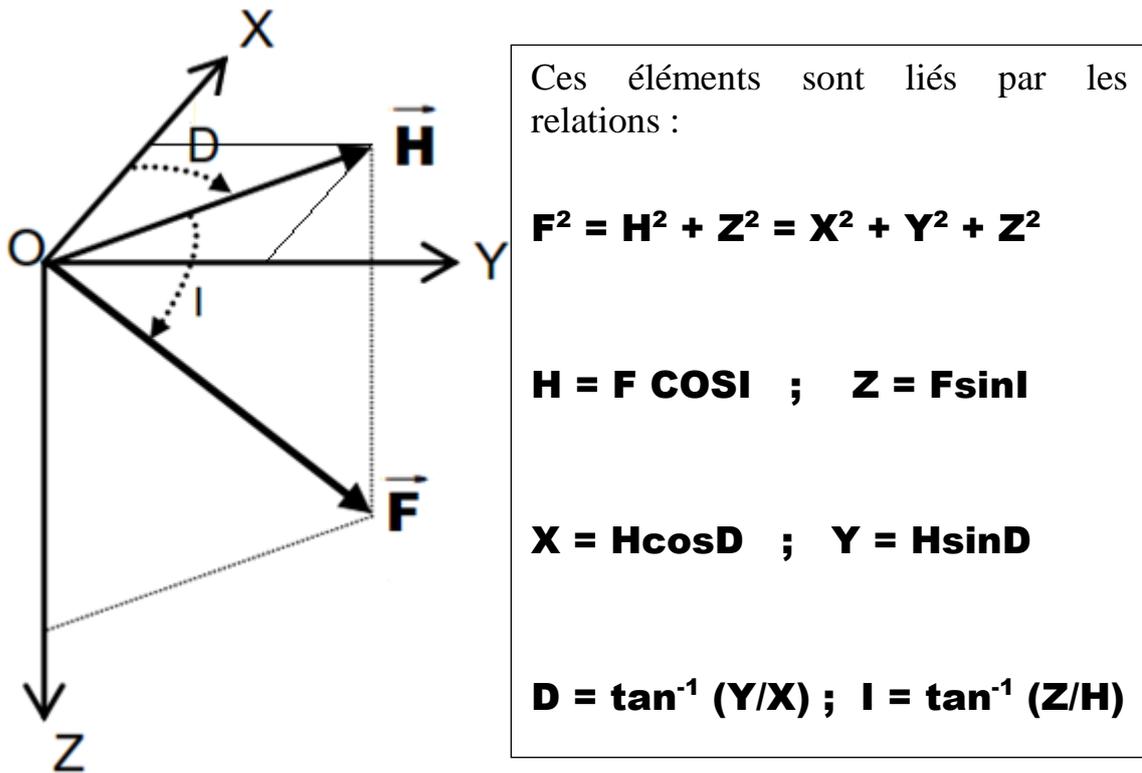


Figure 2.3: Représentation du champ magnétique de référence dans le repère géographique local (Telford et al., 1998 ; Groune, 2009).

I.3. Contribution de la croûte terrestre

D'après Lliboutry (1998), La croûte terrestre est constituée des matériaux dominés par des minéraux. Ces minéraux abondent par une forte teneur en fer d'environ 31% suivit du nickel 1,8%. Ces minéraux sont stockés dans le noyau de la terre à environ 2900 km de profondeur. Toute roche possédant des propriétés magnétiques contient les minéraux ferromagnétiques, et même s'ils ne sont qu'à l'état de traces, leur effet est plus important que celui de la roche encaissante. La valeur du champ magnétique est due à l'effet géologique et à la présence des éléments anthropiques dans le sous-sol. Ces deux effets sont : l'aimantation induite (réaction des éléments de subsurface au champ magnétique environnant) et l'aimantation rémanente (liée à l'histoire de l'objet ou de la roche).

II. METHODE MAGNETIQUE

Les informations sur l'acquisition et le traitement des données sont celles de Kwan et al. (2011) de Geotech LTD. La géophysique aéroportée consiste à acquérir des données à l'aide d'instruments géophysiques embarqués à bord d'un avion ou suspendus sous un hélicoptère pour en tirer des informations sur les roches sous-jacentes. Ces informations permettent de dresser la topographie du socle et par conséquent l'évolution de la profondeur du bassin. Les levés se font en général le long des lignes de vol parallèles et avec quelques lignes de contrôle perpendiculaire.

La prospection magnétique est l'utilisation de la théorie du magnétisme pour la recherche des gisements. Elle est basée sur la mesure du champ magnétique et la susceptibilité magnétique des roches. Elle consiste donc à rechercher et à localiser les variations (anomalies) produites dans le champ terrestre.

II.1 Définition et but de la méthode aéromagnétique

L'aéromagnétisme est une méthode potentielle utilisée depuis la fin de la deuxième guerre mondiale pour l'exploration minière, pétrolière et pour la cartographie géologique. Les levés aéromagnétiques sont effectués à l'aide d'un magnétomètre à bord d'un avion (Figure 2.4, 2.5, 2.6 et 2.7) volant à quelques centaines de mètres au-dessus du sol. Ils peuvent être complétés par des mesures effectuées au sol ou dans les zones maritimes, à bord d'un navire.

II.2. Applications de la méthode aéromagnétique

La prospection aéromagnétique a pour objet la mesure des variations du champ magnétique terrestre (exprimées en nanoTesla (nT) ou en gamma (γ)) causées par des variations des propriétés magnétiques des structures et formations géologiques du sol. Le magnétisme des roches peut être acquis lors de sa création ou des évolutions qu'elle a subies sous l'influence d'un champ magnétique ancien (aimantation rémanente) ou induit par le champ actuel. Dans ce dernier cas, l'aimantation est dirigée selon le champ magnétique terrestre et lui est proportionnelle. Le coefficient de proportionnalité est la susceptibilité magnétique. La susceptibilité (tableau1 annexe) et l'aimantation sont fonction de la teneur des roches en minéraux magnétiques (principalement magnétite, ilménite et pyrrhotite). Les formations sédimentaires ont des faibles susceptibilités comparées à celles des roches ignées ou métamorphiques.

II.3. Avantages et inconvénients de la méthode aéromagnétique

Les Avantages et inconvénients de la méthode aéromagnétique viennent de Lacomblesz & Cornet, 1973 et Latrous et al. (2013).

Tableau 1: Avantages et Inconvénients de la méthode aéromagnétique

a) Avantages opérationnelles	b) Avantages techniques
<ul style="list-style-type: none"> -Une couverture systématique et rapide des surfaces importantes (grandes surfaces) avec un personnel spécialisé et réduit à un temps très court ; -L'opération sur le terrain peut dépendre des conditions locales et de moyens logistiques très simplifiés. 	<p>La couverture systématique par maillage régulier adapté au problème posé ; La mesure en continue ou semi-continue le long des profils ; L'atténuation ou élimination des effets parasites superficiels ;</p> <p>Technique et sensibilité accrues des équipements embarqués ; La délimitation de la zone d'intérêt sans être obligé de parcourir de vastes surfaces, le gain appréciable de temps et une meilleure utilisation du budget et des moyens.</p>
c) Inconvénients de la méthode aéromagnétique	
<ul style="list-style-type: none"> - La localisation et la délimitation des points d'intérêt n'est pas très précise ; - Le pouvoir séparateur réduit ; - Une grille de mesures systématiques qui ne peut atteindre la densité d'un maillage de prospection au sol ; - La nécessité d'avoir un aéroport ou un espace d'atterrissage ; - L'altitude dépend des conditions sécuritaires du vol (relief topographique, météo, activité humaine). 	

II.4. Paramètres de la méthode aéromagnétique

Tableau 2: Paramètres de la méthode aéromagnétique (Chouteau, 1999 modifié)

a) Paramètre du levé	b) Paramètre d'interprétation
<ul style="list-style-type: none"> - la nature, la dimension et l'orientation des structures géologiques présentes dans la zone de levé ; - L'espacement des lignes ; - L'altitude de vol ; - L'orientation des lignes régulières (ou direction de profils) ; - La distance entre les points d'observation. 	<ul style="list-style-type: none"> - La susceptibilité magnétique (χ ou S en cgs, $ISI = 4\pi$) ; - La perméabilité magnétique (μ); - La classe magnétique des matériaux (Diamagnétique ($\chi < 0$; $\chi \approx 0$); - Paramagnétique ($\chi > 0$; $\chi \approx 0$); - Ferromagnétique ($\chi \gg 0$; $\chi > 0$)..

III. APPAREILLAGE DE PROSPECTION AEROMAGNETIQUE

La levée aéromagnétique a été réalisée avec l'appareillage (Bournas, 2001) suivant :

- Le choix des types d'avion dépend du prospecteur, du terrain et l'objectif poursuivis. Ils peuvent être du type Douglas DC-2 ;
- Les magnétomètres dont la précision est fonction du terrain et de l'objectif poursuivi. Ils sont de trois types :
 - le magnétomètre à fluxgate ;
 - le magnétomètre à précession nucléaire (ou à proton) ;
 - le magnétomètre à pompage optique.
- L'altimètre (effet Doppler), ou un baromètre ou l'altimètre radar d'une précision de 30 pieds dont le type et la précision sont fonction du terrain et l'objectif poursuivis.
- La camera à film continu de 35 mm, possédant un système de numérotage.
- La boussole magnétique de marque SPERRY CL2, d'une résolution de 1°.
- Un système d'acquisition des données qui peut être le LANCER.
- Les enregistreurs graphiques qui peuvent être à 2 et à 6 canaux pour l'affichage graphique des profils magnétiques.
- Un système navigation GPS en temps réel à correction différentielles fournit une précision ou le contrôle de la navigation en vol.
- Un capteur barométrique et de température.
- Une caméra vidéo numérique.

IV. DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE D'ACQUISITION DES DONNEES AEROMAGNETIQUES

La description des appareillages d'acquisition des données aéromagnétiques vient de Latrous et al. (2013). Après le calibrage des appareils tel que l'altimètre, le GPS et autres, un équipement est installé au sol à la base et l'autre embarqué à bord d'un avion. Ces deux équipements (au sol et embarqué) communiquent en similitude en envoyant les signaux réciproquement pour une bonne acquisition des données aéromagnétiques.

IV.1. Équipement au sol ou à la base

La station de base (Figure 2.4) comprend un magnétomètre autonome de station de base, un récepteur GPS et un système d'acquisition de données.

Le magnétomètre de la station de base est monté sur une tour non magnétique, à 2 m au-dessus du sol, dans une zone magnétiquement calme, loin des lignes électriques, des routes, des équipements électriques, d'autres objets en métal, à un emplacement où l'équipe de terrain peut facilement vérifier les tempêtes magnétiques.



Figure 2.4: Magnétomètre de la station de base installé sur le site qui communique en simultané en envoyant les signaux pour une bonne acquisition des données aéromagnétiques (Latrous et al., 2013).

IV.2. Équipement embarqué

L'équipement embarqué (Figure 2.5 à 2.8) est constitué de :

- Un capteur barométrique et de température qui sont utilisés pour enregistrer la pression et la température avec une précision.
- Les altimètres (et les baromètres) qui sont reliés au système d'acquisition de données avec une cadence de répétition de sortie (par exemple : de 0,5 seconde). Ils enregistrent la garde au sol sous forme numérique et à une précision bien déterminée.
- Le système d'acquisition enregistre les données numériques du levé sur une carte compact-flash interne. Les données sont affichées sur un écran LCD en tant que profils pour permettre à l'opérateur de surveiller l'intégrité du système.

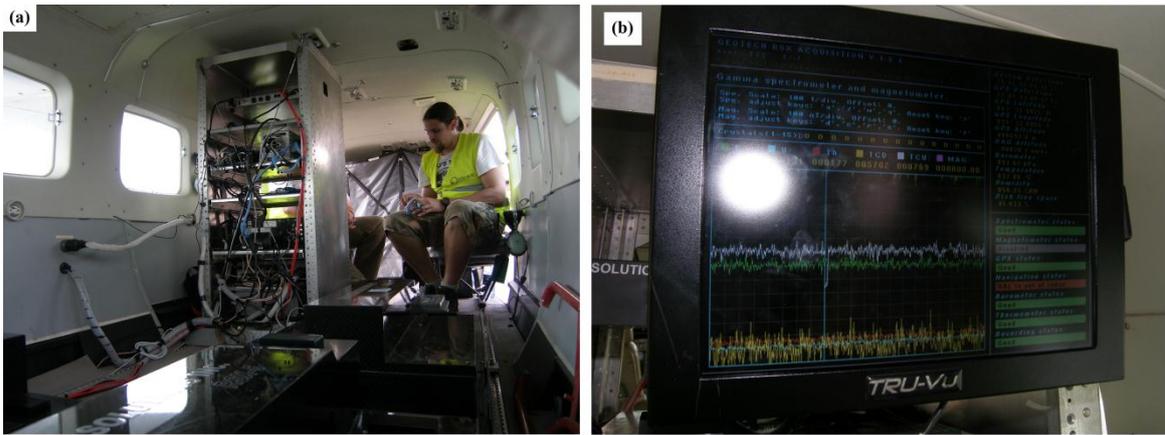


Figure 2.5: Emplacements des magnétomètres : (a) système d'enregistrement arrière ; (b) écran LCD d'affichage de contrôle (Latrous et al., 2013).



Figure 5: Emplacements des magnétomètres qui transfèrent les données sur ordinateur de traitement : ((c) et (d) système d'enregistrement avant (Latrous et al., 2013).

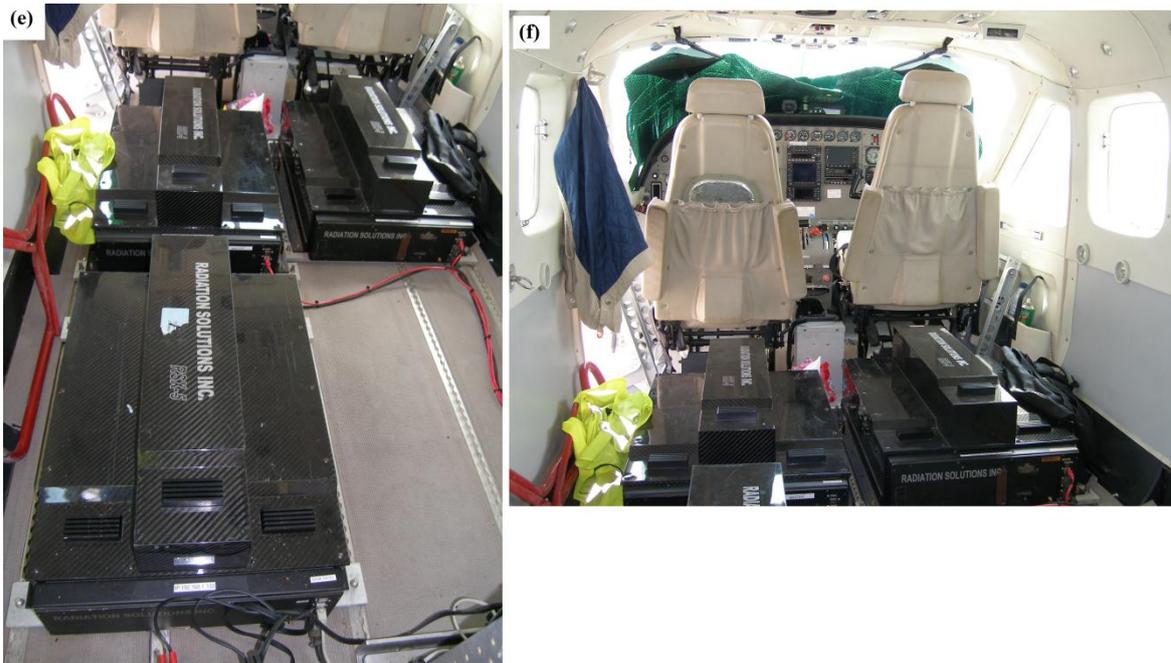


Figure 2.7: Emplacements des magnétomètres qui communiquent en similitude en envoyant les signaux à la station de base, pour une bonne acquisition des données aéromagnétiques : (e) et (f) système d'accompagnement (Latrous et al., 2013).

- Les données sont transférées sur l'ordinateur de traitement du projet et téléchargées sur le site. Une sauvegarde est également faite quotidiennement pour éviter toute perte de données.

IV.3. Personnel d'acquisition

Pour une acquisition de données aéromagnétiques, des personnes suivantes sont importantes :

- **Chef de projet**

Les chefs de projet sont les personnes ressources pour toute question liée au programme du levé dans la zone d'étude et peuvent-être contacté.

- **Personnel à bord de l'avion**

Le pilote en chef et les pilotes. Les opérateurs électroniciens responsables du contrôle des données en temps réel, du dépouillement et du transfert des données vers le site. De plus un Agent de sécurité est à bord en qualité d'observateur.



Figure 2.8: Emplacements des magnétomètres (g) avion dans lequel seront installés le système embarqué ; (h) avion en survolé pour l'acquisition des données (Latrous et al., 2013).

V. METHODOLOGIE D'INTERPRETATION

L'interprétation relie les observations magnétiques à leur cause possible. Un corps magnétique produira non seulement un effet magnétique à la surface mais l'intensité de l'anomalie et la forme de l'anomalie est en rapport direct quelconque avec la teneur en minéral magnétique, la taille, la profondeur du toit et la forme du corps inféré.

V.1 Considérations générales

La grandeur et la forme de l'anomalie dépendent de la teneur en minéral magnétique, de la profondeur du corps causatif et de l'orientation de l'anomalie par rapport à la direction du champ magnétique terrestre. Les anomalies observées expriment seulement l'effet global des aimantations induites et rémanentes qui ont en général des directions et des intensités d'aimantation différentes. Comme l'aimantation rémanente peut avoir des aspects et des propriétés variables, on interprète généralement les anomalies comme si l'aimantation induite était la somme de tous les effets d'anomalie.

V.2. Approche qualitative et quantitative

L'interprétation se décline en deux approches : l'approche qualitative et l'approche quantitative.

- ✚ L'approche qualitative joue un rôle de reconnaissance des tendances, des formes et des motifs dans les données magnétiques et leur rapport avec la géologie. Par exemple, Les anomalies étroites s'étendant sur des grandes distances sont associées aux linéaments géophysiques qui ici sont les linéaments magnétiques. Des anomalies elliptiques avec des valeurs positives et négatives avoisinantes correspondent plutôt à des cheminées intrusives. D'après Faure, (2001) les linéaments géophysiques sont les linéaments issus de l'interprétation des réponses des paramètres liés aux méthodes géophysiques. Dans ce sens on appelle linéaments magnétiques, les linéaments issus des réponses magnétiques. Ce sont les linéaments sécants et les linéaments d'entraînements. Les linéaments sécants soulignent des discontinuités très nettes et rectilignes avec ou sans déplacement et généralement transversales par rapport aux rubanements magnétiques. Les linéaments d'entraînements sont des anomalies magnétiques curvilinéaires de grandes longueurs d'ondes et de faibles amplitudes dont la trace est généralement à faible angle par rapport au grain magnétique environnant. Ils sont interprétés comme des couloirs de déformations majeurs. L'analyse qualitative dans cette

étude s'appuie sur les filtres de la dérivée, la réduction à l'équateur, les dérivées (ou gradient), la variation de l'angle d'inclinaison.

- ✚ Dans l'approche quantitative, les anomalies sont analysées en termes de chiffres, de valeur ou de grandeur. On se propose alors d'estimer les valeurs de la profondeur, les dimensions (latérales ou longitudinales) et de la susceptibilité de la cause de l'anomalie. L'analyse quantitative dans cette étude s'appuie sur la déconvolution d'Euler, la variation de l'angle d'inclinaison, les maxima des gradients, les modélisations.

Par définition, l'anomalie d'un paramètre est l'écart entre sa valeur mesurée en un point et sa valeur théorique en ce point. Le calcul de la valeur théorique se fait à partir d'un modèle théorique. Une anomalie magnétique est due au changement de structures ou de la nature géologique du sous-sol. Une anomalie brute ne peut donner les informations précises à cause de l'influence de plusieurs paramètres sur les mesures et par conséquent avant de passer à l'étape d'interprétation, on doit introduire les traitements nécessaires aux données prises sur terrain.

VI. ACQUISITION DES DONNEES AEROMAGNETIQUES

En recherche minière, les altitudes sont basses et les vols serrés. Les altitudes sont maintenues constantes et peuvent variées en fonction du but recherché. Les profils sont parallèles et distants les uns des autres de quelques centaines de mètre à une dixième de kilomètre. La hauteur est continuellement enregistrée par un altimètre (effet Doppler), soit par un radar, soit par un baromètre. Le positionnement de l'avion est effectué par un système de radionavigation associé à quatre radars Doppler fournissant en continu la vitesse de l'avion ainsi que sa direction, ajouté à cela la prise de photographies aériennes réalisées en continu et qui permettent ainsi de définir avec exactitude la position de l'avion. La cellule sensible du magnétomètre aéroporté est placée dans une enceinte cylindrique allongée appelée « oiseau », tracé par un câble à une centaine de mètre de l'avion de manière à éviter l'effet magnétique (bruits). L'itinéraire de vol (Figure 2.13) est généralement constitué de profils, rectilignes, parallèles, régulièrement espacés. Ces profils sont perpendiculaires à la direction des structures tectoniques de la région d'étude (Latrous et al., 2013).

VII. TRAITEMENT DES DONNEES AEROMAGNETIQUES

La méthodologie de traitement des données aéromagnétiques par Oias Montaj de Geosoft est tirée de Colin-Reesves (2005). Le traitement des données aéromagnétiques quant à lui est fait en passant par les modules du logiciel Oias Montaj v8.4 de Geosoft.

L'utilisation du menu MAGMAP d'Oasis Montaj qui est conçu pour le traitement des données magnétiques facilite l'application des filtres tels que : la réduction à l'équateur ou la réduction au pôle, les dérivées (ou gradient), la variation de l'angle d'inclinaison, le signal analytique, l'analyse spectrale.

L'utilisation du menu Euler 3D d'Oasis Montaj permet de construire les cartes des maxima et les cartes de variation des profondeurs et dont la disposition des symboles permet de mener une analyse qualitative et quantitative.

VII.1. Anomalie du champ magnétique

En géophysique, le champ d'anomalie magnétique ΔF (figure 2.9) peut être défini comme étant la différence entre le champ magnétique observé (\mathbf{F}_{obs}) et le champ magnétique théorique ou International Geomagnetic Reference Field (IGRF) \mathbf{F}_{ref} à chaque station de mesure à la date du 05 février 2012. Cette anomalie magnétique est donnée par la relation (1) suivante :

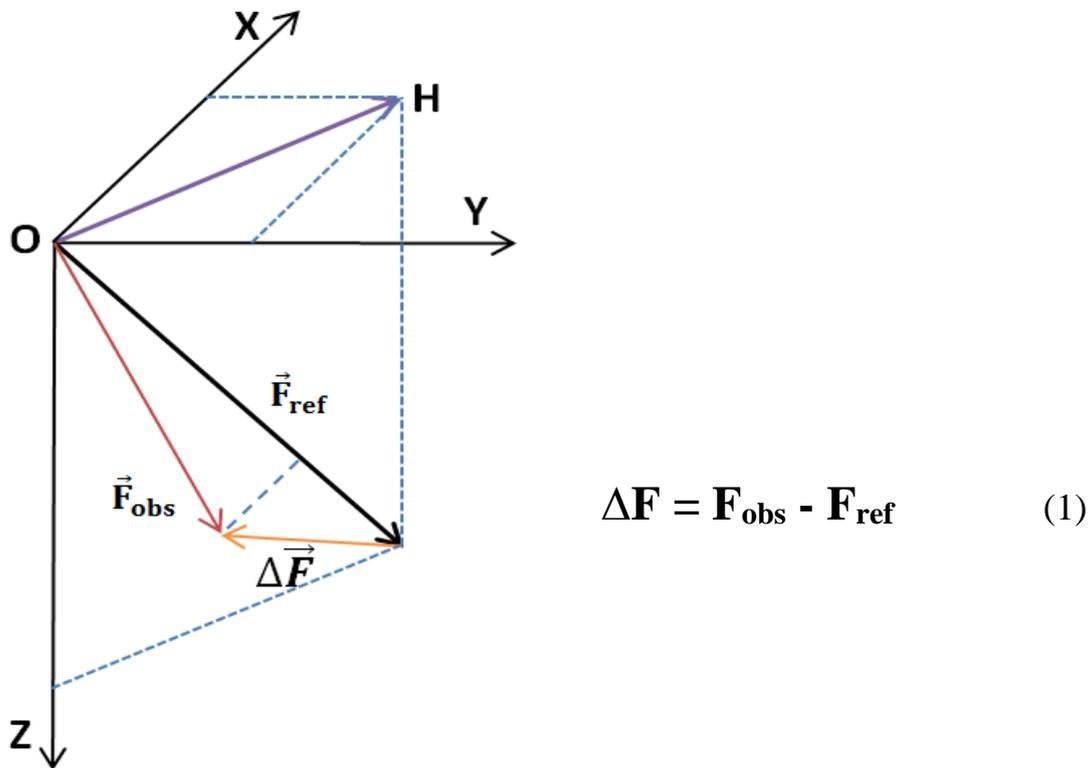


Figure 2.9: Représentation dans l'espace du vecteur champ d'anomalie magnétique. (Simon, 2011).

VII.2. Réduction à l'équateur.

Lors de l'acquisition des données aéromagnétiques, le vol se fait sous l'influence de l'inclinaison. De ce fait, l'anomalie obtenue n'est pas à l'aplomb de la source. Les corps sources ne sont pas situés à l'aplomb des maxima (Blakely, 1996 ; Naidu & Mathew, 1998) des profils magnétiques. Ils sont entre les maxima et les minima de ces profils (Naidu & Mathew, 1998). Pour ramener l'anomalie à l'aplomb de la source, on applique la réduction à l'équateur. La figure 2.10 illustre bien cette transformation et nous permet donc de comprendre la distribution des anomalies magnétiques sur les grilles.

La réduction du champ à l'équateur (en anglais Reduction To the Equator (RTE)) est appliquée pour résoudre le problème lié au basse latitude (Grauch et al., 2004). RTE est un filtre complémentaire au processus de réduction au pôle (en anglais Reduction-to-Pole (RTP)) chaque point d'anomalie magnétique dépend de l'Inclinaison (I) et la Déclinaison (D) du champ magnétique principal terrestre. L'expression de ce champ réduit à l'équateur est donnée par la relation (2) suivante :

$$\mathbf{RTE} = \sin I + \mathbf{icosI} \sin(D - \theta)^2 \quad (2)$$

Où **I** et **D** sont respectivement l'Inclinaison et la Déclinaison géomagnétique ; **sinI** est l'amplitude composante et **icosI sin(D - θ)²** est la phase.

VII.3. Prolongement vers le haut

Le prolongement vers le haut est une transformation qui transporte le plan de mesure (z_0) pour une vision sous un autre plan (z) ceci dans l'optique de mener une étude en 3D. En faisant varier l'altitude de prolongement, on est capable d'étudier une source suivant les extensions latérales et longitudinales. Le prolongement vers le haut atténue les courtes longueurs d'ondes et amplifie les grandes longueurs d'ondes (Blakely, 1996). Les études superficielles s'appuient sur les courtes longueurs d'ondes et les études profondes, sur les grandes longueurs d'ondes. Ce filtre a l'avantage de faciliter une étude régionale et profonde en fonction de l'altitude de prolonger.

VII.4. Anomalie résiduelle du Champ

L'anomalie résiduelle ($[M_{RTE}]_{\text{résiduel}}$) est calculée à chaque point de la grille par la différence entre l'anomalie du champ RTE ($[M_{RTE}]$) et l'anomalie du champ RTE prolongé à 2 km ($[M_{RTE}]_{Up2km}$). Son expression est donnée par la relation (3) suivante :

$$[\mathbf{M}_{RTE}]_{\text{résiduel}} = [\mathbf{M}_{RTE}] - [\mathbf{M}_{RTE}]_{\text{Up2km}} \quad (3)$$

VII.5. La variation de l'angle d'inclinaison

La variation de l'angle d'inclinaison, encore appelé **Tilt Angle** est une transformation qui inclut la dérivée verticale première et le module de la dérivée première horizontale de l'anomalie de TMI résiduel réduite à l'équateur. Comparé aux autres méthodes, la technique du tilt-angle a l'avantage qu'elle ne nécessite pas la connaissance des paramètres tels que : la densité, susceptibilité magnétique, l'indice structural etc.... L'autre avantage de cette transformation est qu'en calculant un angle, toutes les formes sont représentées de manière similaire, que l'anomalie soit de faible ou de forte amplitude et aussi permet de cartographier les linéaments avec hautes résolutions.

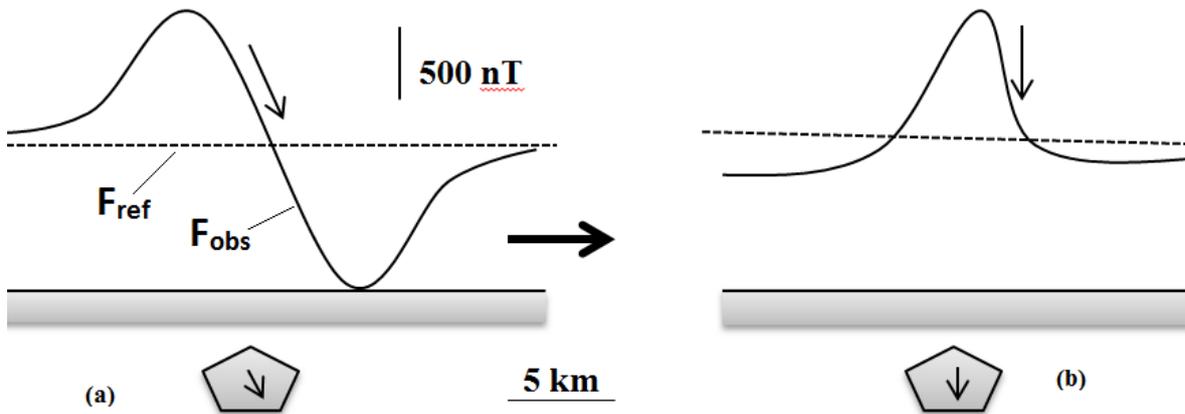


Figure 2.10: Anomalie magnétique avant (a) et après (b) la réduction à l'équateur (Blakely, 1996).

En effet, la fonction arc tangente a pour effet de répartir le signal calculé entre -90° et 90° , le tilt angle appliqué à l'anomalie du champ magnétique réduit à l'équateur ($[\mathbf{M}_{RTE}]$) permet d'estimer la profondeur du toit des sources. D'après (Miller et Singh 1994 ; Verduzco et al., 2004 ; Salem et al., 2007 ; Yandjimain et al., 2017) il est donné par la relation (4) suivante :

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial M_{RTE}}{\partial z}}{\frac{\partial M_{RTE}}{\partial h}} \right) \quad (4)$$

$$\text{où} \quad \frac{\partial M_{RTE}}{\partial h} = \sqrt{\left(\frac{\partial M_{RTE}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M_{RTE}}{\partial y}\right)^2}$$

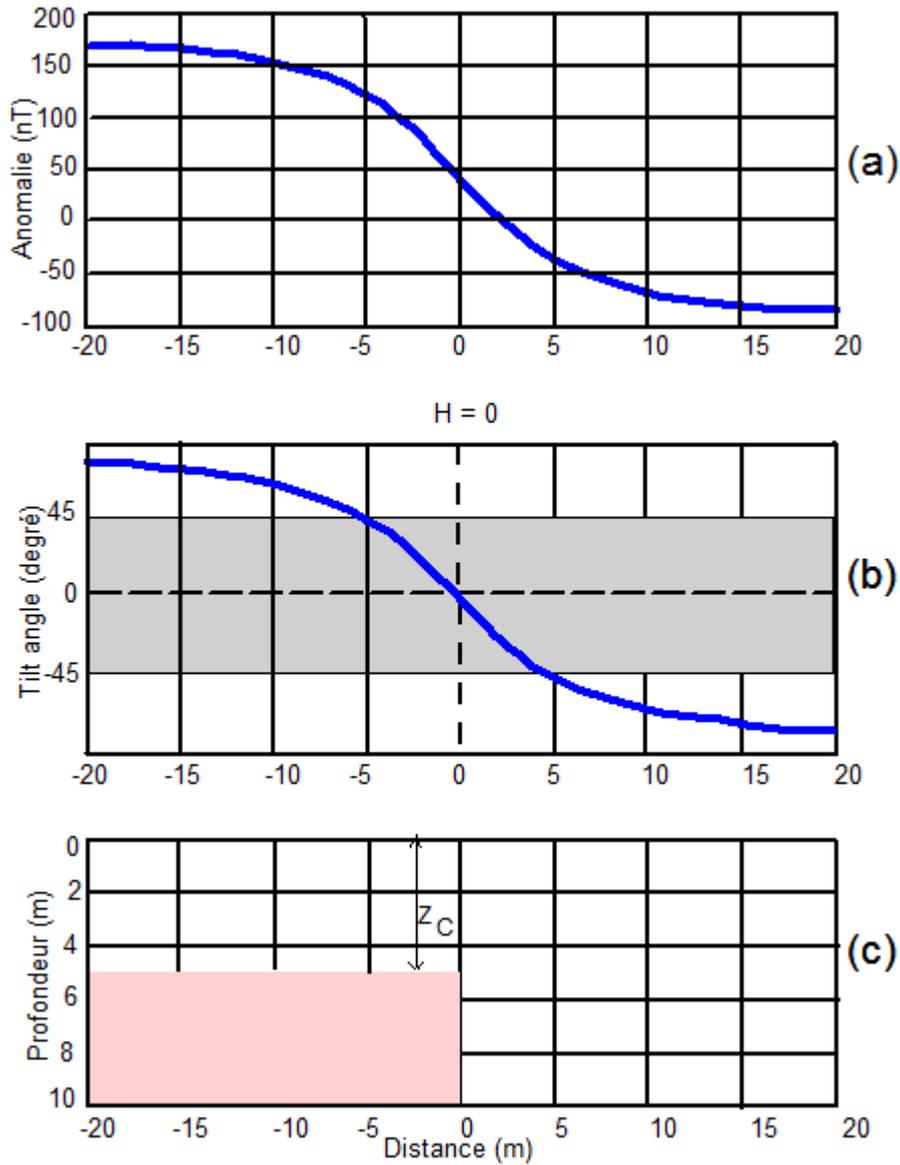


Figure 2.11: Étude d'une demi-plaque infinie aimantée de profondeur Z_c (c) créant une anomalie magnétique (a) réduite à l'équateur et transformée par tilt angle (b) (Salem et al., 2007).

En posant $H = \frac{\partial M}{\partial z}$ et $Z_c = \frac{\partial M}{\partial h}$,

On déduit $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{H}{Z_c}\right)$.

Ainsi l'interprétation (figure 2.11) est faite en considérant

$$\theta = 0^\circ \text{ Pour } H = 0 \text{ et } \theta = \pm \pi/4 \text{ pour } H = \pm Z_c$$

- $\theta = 0^\circ$ pour $H = 0$ correspond à l'ensemble des points à l'aplomb du contact.

- $\theta = \pm 45^\circ$ pour $H = \pm Z_c$ la distance entre l'une des deux valeurs et la valeur nulle.

Autrement dit, la profondeur ($H = \pm Z_c$) du toit de la source est estimée en mesurant la

distance perpendiculaire entre le contour $\theta = 0 \text{ rad}$ et le contour $\theta = \pm\pi/4 \text{ rad}$.

La carte tilt angle est réalisée en utilisant le logiciel Geosoft de Oasis Montaj v.8.4 via le module MAGMAP.

VII.6. Filtres de la dérivée

Encore appelé Gradient, c'est une transformation qui implique la dérivée première du champ. Cette technique amplifie les courtes longueurs d'ondes puis, permet d'estimer les contacts géologiques et de focaliser l'effet des sources superficielles. Lorsqu'elle est appliquée sur la direction X, elle permet de localiser les sources dans le plan Y et sur la direction Y, permet de localiser les sources dans le plan X. Elle exige un grand nombre de sources, mais a l'avantage de minimiser le bruit fourni par les données pendant la prospection. Le calcul de la dérivée horizontale (ou l'amplitude du gradient horizontal (AGH)) tient compte des deux directions et implique la dérivée du premier ordre du champ magnétique (Phillips, 1998). Selon Blakely & Simpson (1986), le gradient horizontal permet de localiser des discontinuités élémentaires locales, correspondant aux maxima de ce gradient. Pour une analyse quantitative, on s'appuie sur la disposition des maxima d'AGH, sur une colonne du socle jusqu'au toit de la source. Elle permet d'observer les failles associées à des couches géologiques. Si M est le champ magnétique résiduel, alors la technique d'AGH est donnée par la relation (5) suivante :

$$\frac{\partial M}{\partial h} = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2} \quad (5)$$

L'importance des discontinuités est fonction de l'amplitude locale du gradient. L'analyse du gradient s'intéresse (et/ou se focalise) sur des maxima au niveau des zones de contacts entre structures, contacts lithologiques, failles. Cette localisation est précise si ces contacts sont verticaux et superficiels. L'application de l'AGH à différentes altitudes de prolongement permet d'avoir un plan d'observation du sous-sol à des profondeurs.

Selon Jacobsen (1987), l'estimation de la profondeur (z_0) de chacun plan d'observation de la source correspondante à la moitié de chacune des altitudes (h) de prolongement ainsi, on a $h = 2z_0$. Ensuite, la profondeur d'estimation est donnée par la relation (6) suivante :

$$z_0 = h / 2 \quad (6)$$

Si les structures sont verticales, tous les maxima aux différents niveaux se chevauchent. De plus, en fonction des contraintes liées aux caractéristiques géologiques, de nombreuses

altitudes sont testées et seule celles qui mettent en évidence des linéaments et des lignes tectoniques fragiles sont conservées (Biyiha-Keleba et al., 2013).

En plus selon Blakely et Simpson (1986), Phillips (1998), la disposition des maxima dépend si : (a) les contacts géologiques sont verticaux ; (b) les contacts sont isolés ; (c) les sources magnétiques sont épaisses ; (d) la magnétisation ont la même direction avec le champ régional. L'application de ces affirmations se fait si le champ est réduit à l'équateur et si le signal analytique ne dépend pas de la direction de l'aimantation. L'AGH est réalisée en utilisant le logiciel Oasis Montaj v.8.4 de Geosoft via le module « Grid and image ».

L'interprétation se fait en s'appuyant sur les critères tel que :

- Si les maxima à différentes couches sont parallèles et confondus, alors la structure est quasi-verticale ;
- Si les maxima à différentes couches sont parallèles et non confondus, alors la structure est quasi-horizontale ;
- Si les maxima à différentes couches sont parallèles et confondus et sont interceptés par d'autres allants dans une autre direction, alors on assiste à une fracture.

VII.7. Le signale analytique

Le signal analytique a été Développé par Nabighian (1972) comme combinaison des dérivées horizontales (2D) puis revu par Nabighian et al. (1974), Nabighian (1984), Roest et al. (1992) comme une combinaison des dérivées horizontales et verticales appliquées à une donnée potentielle. Elle permet l'étude d'un corps sous ces trois dimensions (3D). L'amplitude du signal analytique qui est la valeur absolue du signal analytique propose une interprétation fondée sur la décomposition de l'anomalie magnétique. L'amplitude du signal analytique montre les caractéristiques appropriées de la source causative. Il a l'avantage qu'il est indépendant de la direction d'aimantation de la source puisque le champ magnétique est un vecteur dont la direction et l'intensité varient en fonction du temps et du lieu d'observation. Si M est le champ magnétique résiduel, alors la technique d'Amplitude du signale analytique est donnée par la relation (7) suivante :

$$A = \sqrt{\left(\frac{\partial M_{RTE}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M_{RTE}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M_{RTE}}{\partial z}\right)^2} \quad (7)$$

Avec $A = \mathbf{abs}(A(x, y, z))$

C'est l'action des filtres dérivés suivant la direction X, la direction Y et la direction Z et puis, c'est l'action de l'amplitude du signal analytique sur une source. Les maxima du signal analytique ici permet de localiser la source et d'estimer sa profondeur (Roest et al., 1992).

VII.8. Déconvolution d'Euler

La Déconvolution d'Euler (Reid et al., 1990 ; Gunn & Dentith, 1997) est une technique qui permet d'estimer la profondeur et la pente des sources magnétiques. Dans cette méthode d'Euler, l'indice structural est une information prioritaire et importante. La qualité de la profondeur d'estimation dépend principalement du choix de l'indice structural approprié, qui est fonction de la géométrie des corps causatifs et caractérise le taux de variation de l'intensité d'anomalie avec la distance. Thompson (1982) et Reid et al. (1990) ont montré que l'indice structural optimum se rapporte à un groupe de solutions. Les valeurs de l'indice structural et la géométrie des corps causatifs sont groupés dans le tableau 3.

Tableau 3: Indices structuraux et nature des sources magnétiques (Colin-Reeves, 2005).

SI	sources Magnétiques
0.0	Contact de grande profondeur ou faille de grand rejet vertical
0.5	Contact/limite/faille ou relief intermédiaire ou rejet de faille
1.0	Limite des couches (couche-filon, filon intrusif oblique, formation de fer rubanée, etc) ou faille de faible rejet/contact
2.0	Source linéaire intrusive (pipeline, cheminée de kimberlite étroite, etc)
3.0	Sphère ou corps compact à distance

En plus du choix de l'indice structural, plusieurs facteurs affectent la qualité des évaluations des solutions d'Euler; ces facteurs comprennent la taille de la fenêtre (fenêtre de Nyquist ($W \times W$)), la tolérance (T), l'exactitude de l'altitude de vol, et l'espacement des lignes de vol. La taille de la fenêtre doit être suffisamment petite pour saisir les caractéristiques intéressantes, mais pas trop grande afin de ne pas inclure de multiples anomalies. Tous les points de la fenêtre sont utilisés pour calculer la solution d'Euler. La hauteur de vol détermine la manière donc des solutions d'Euler sont réparties (ou disposées). L'évaluation de la profondeur des données magnétiques est appliquée sur les grilles magnétiques dont on veut faire une analyse quantitative. Les solutions d'Euler sont basées sur une équation d'homogénéité d'Euler en 3D. Son application en chaque point

des données magnétiques donne la profondeur, la nature de l'extension et la géométrie du corps causatif (Durheim & Cooper, 1998; Reid et al., 1990; Thompson, 1982 ; Reid & Thurston, 2014). Cette équation est définie par :

$$(\mathbf{x} - \mathbf{x}_o) \frac{\partial F}{\partial x} + (\mathbf{y} - \mathbf{y}_o) \frac{\partial F}{\partial y} + (\mathbf{z} - \mathbf{z}_o) \frac{\partial F}{\partial z} = N(\mathbf{B} - F) \quad (8)$$

Où \mathbf{B} est la valeur du champ magnétique régional total, $(\mathbf{x}_o, \mathbf{y}_o, \mathbf{z}_o)$ est la position de la source magnétique, F est le champ magnétique mesuré en point $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$. N est l'indice structural qui caractérise la source.

La Déconvolution d'Euler est réalisée en utilisant le logiciel Geosoft de Oasis Montaj v.8.4 via le module EULER 3D.

VII.9. Modélisation 2.75D et 3D

L'inversion (la modélisation) a un grand avantage qu'elle fait une corrélation entre la géologie et la géophysique. La modélisation nécessite la connaissance de la structure géologique du sous-sol de la zone d'étude. La connaissance de la structure à modéliser est basée sur certains paramètres donc les plus importants sont la forme, la position, la profondeur et le contraste de susceptibilité de la source. Les analyses qualitatives et quantitatives des données aéromagnétiques couplées aux données géologiques permettent d'estimer ces paramètres. La forme de la source est estimée par les grilles de l'anomalie magnétique, la RTE et la résiduelle. La position de la source est estimée par la méthode des maxima des gradients horizontaux, le signal analytique et la déconvolution d'Euler. La profondeur est estimée par la déconvolution d'Euler et la variation de l'angle d'inclinaison (tilt angle). La connaissance de la nature de la roche permet de connaître la contrainte de susceptibilité de la source qui est proche de celles connues groupées dans un tableau de valeur de susceptibilités (tableau (a) annexe). La nature des roches est connue à partir des données géologiques et de la connaissance de la géologie de la zone.

La modélisation 2.75D est une méthode adaptée à la modélisation du socle, des filons et des contacts semi-infinis. Le choix du tracé des profils repose sur la forme et la position des sources. Le tracé des profils s'est fait sur la carte résiduelle.

De ce fait ils sont tracés perpendiculairement à la source en utilisant les modules « Maptools » et « Database » de Geosoft pour obtenir le tracé du profil et le tableau des valeurs le long du profil. La modélisation 2.75D des profils utilise le module « GMSYS » de Geosoft (2014).

La modélisation 3D est adaptée pour la modélisation des corps de la surface jusqu'au socle. Elle permet d'observer et d'identifier le corps sous les trois dimensions. Elle est appliquée sur la grille magnétique résiduelle en utilisant le module « VOXI » de Geosoft (2014).

Le groupe Geosoft a introduit le module VOXI Earth Modelling dans le logiciel Geosoft en 2012 (Camille, 2015). C'est une technique de modélisation d'inversion 3D de Geosoft des données potentielles. Le logiciel inverse les données gravimétriques et magnétiques aéroportées, générant des modèles 3D. Un avantage de cette inversion est de produire un modèle final très visible, permettant aux explorateurs d'observer et comprendre la distribution de la densité (données gravimétriques) ou la susceptibilité (données magnétiques) du sous-sol de la surface jusqu'au socle. Cette inversion produit un modèle des propriétés de la roche que l'on peut confronter aux données géologiques et des forages si elles existent. L'obtention de ce modèle 3D permet aux explorateurs d'obtenir un aperçu beaucoup plus clair du sous-sol et améliorer ainsi l'identification des cibles forages minier complexes.

VIII. PRESENTATION DES DONNEES AEROMAGNETIQUES.

Dans le cadre de ses travaux d'exploration de Geotech, 2012, la Compagnie Minière du Cameroun (CMC) SA s'est doté six (6) permis en septembre et octobre 2010 : Sud-Est (DJA, DJADOM), Sud (LELE), Nord-Ouest (BINGA), Sud-Ouest (MINKO et SANAGA). Au cours de ses campagnes, des données radiométriques et magnétiques ont été acquises en 2012. Les données utilisées dans cette étude sont les données magnétiques des deux premiers permis. Le permis DJADOM (bloc nord) couvre une superficie de 994 km² et 1000 km² pour celui de DJA (bloc sud) dans l'arrondissement de Ngoïla du département Haut Nyong dans la région du sud et de l'Est Cameroun respectivement (figure 2.12).

La campagne s'est effectuée à l'aide d'un hélicoptère AS350B2 avec une hauteur de vol de 100 m. Les survols se font le long des lignes de traverse (vol) parallèles espacées de 200 m de direction NE-SW. Ils sont accompagnés par des lignes de contrôle de direction NW-SE aux intervalles réguliers de 2000 m. En général, la géologie de la zone d'étude détermine l'espacement des lignes de traverse. L'espacement des lignes de contrôle est plus ou moins dix fois celui des lignes de traverse. Les données magnétiques sont échantillonnées à des intervalles de 7 m le long des profils, soit un pixel équivalent à 7 m au sol à environ 0,1s.

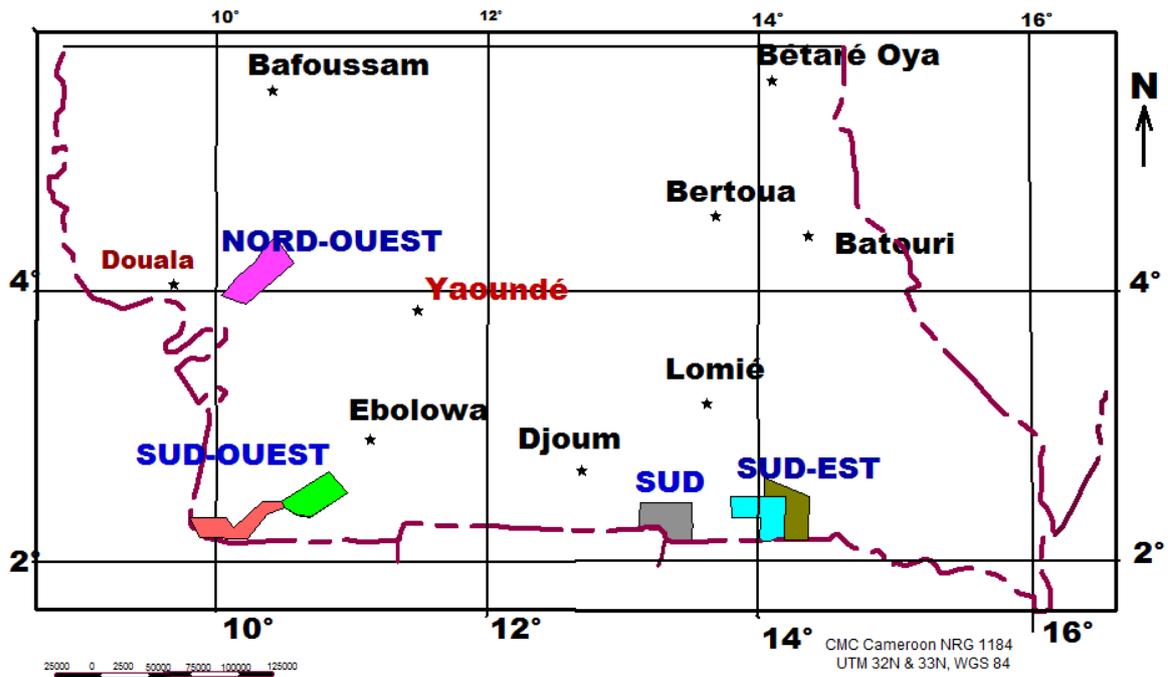


Figure 2.12: Les blocs d'acquisition des données dans le grand Sud Cameroun réalisé par la CMC (2012).

Les données magnétiques acquises sont de hautes résolutions 200x2000 m espacement entre les lignes de vol et l'espacement nominal ± 20 m, suivant une direction N315° soit 11 305 lignes au km. A l'aide du logiciel GIS (Mapinfo8.2), les lignes de vol, lignes de traverse de direction N75° et de contrôle de direction N315° de la zone d'étude sont ressorties et présentées à la Figure 2.13. Ces données magnétiques sont collectées à l'aide d'un compteur magnétométrique NRG RDAC 11, un magnétomètre SCINTREC CS3, des magnétomètres à fluxgate Barrington et un magnétomètre NRG installé à la station de base. Le système est capable d'enregistrer le champ magnétique total.

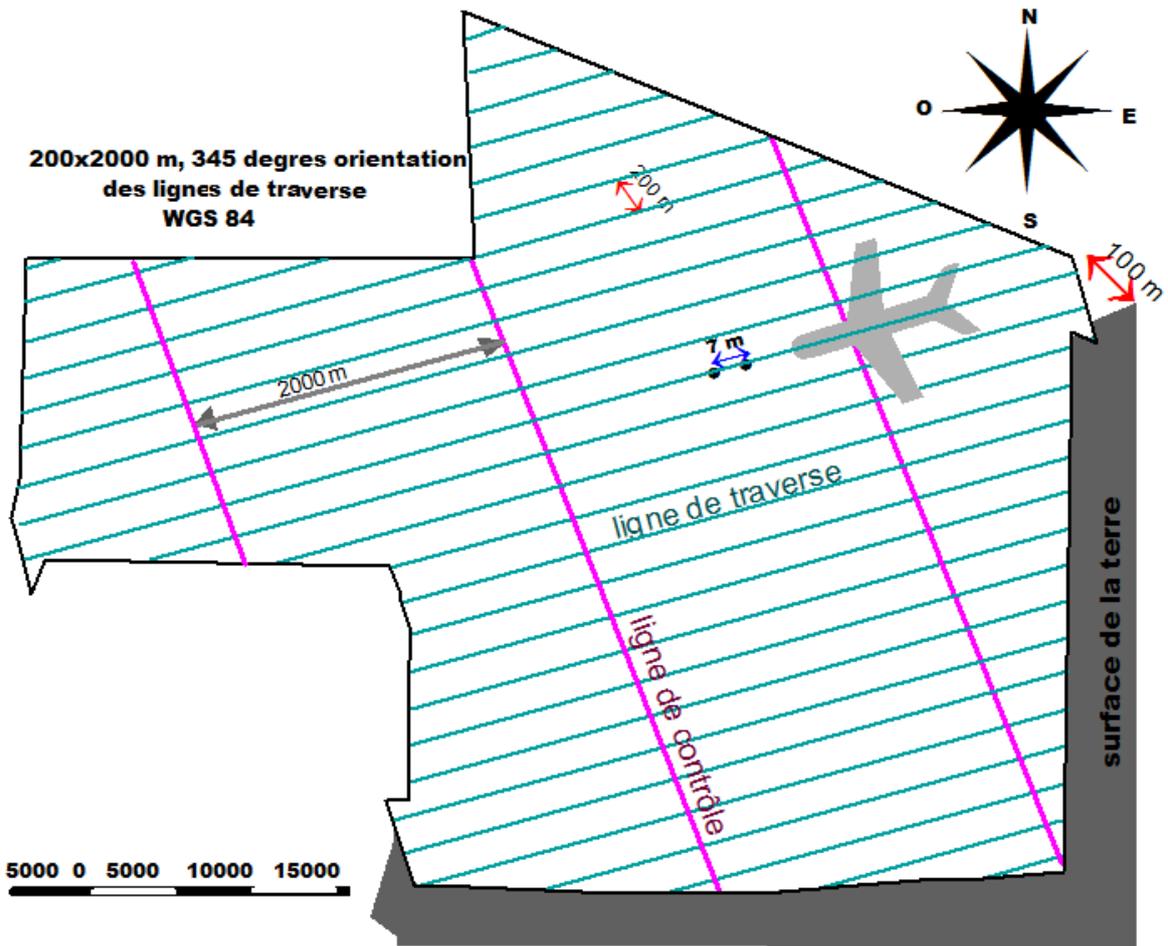


Figure 2.13: Trajectoire de l'aéronef lors de l'acquisition des données aéroportées par la CMC (2012).

IX. MISE EN GRILLES DES DONNEES ACQUISES

IX.1. Organigramme de traitement des données aéromagnétiques brutes

Le traitement des données aéromagnétiques exige la correction des effets des variations diurnes, l'élimination du champ magnétique régional et la réduction des observations à une base commune.

D'après la Nouvelle Résolution Géophysique (NRG) 1184 de la CMC 2012, la première étape consiste à tenir compte de la variation diurne. Les données numériques diurnes sont déduites des données en provenance du magnétomètre aéroporté. Une quantité égale à la moyenne des données du magnétomètre au sol pendant toute la période du levé est ajoutée aux données aéromagnétiques acquises.

L'étape suivante est le « nivellement » : les intersections des lignes de vol et des lignes de contrôle sont déterminées et utilisées afin de niveler les données magnétiques. Après, le Champ Géomagnétique de Référence (en anglais : International Geomagnetic Reference Field (IGRF)) de la période du levé est déduit des données nivelées. Enfin, les données sont mises en grille avant de traiter dans les domaines spatial et fréquentiel. On peut comparer les diverses étapes du traitement par les organigrammes des figures 2.14 et 2.15.

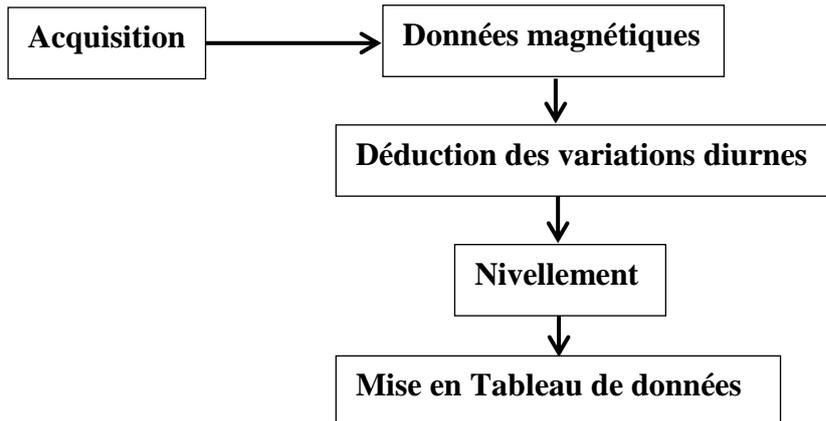


Figure 2.14: Organigramme de traitement des données aéromagnétiques brutes.

IX.2. Organigramme de traitement, de modélisation et interprétation des données aéromagnétiques

Après le traitement des données brutes par la NRG et mis sous forme de tableau de données, viens l'étape de traitement, de modélisation et interprétation des données aéromagnétiques issues des données brutes. La suite du traitement de ce travail est faite à l'aide du logiciel Oasis Montaj v8.4 de Geosoft en suivant l'organigramme de la figure 2.15. Le tableau de données obtenu est complété en calculant l'inclinaison, la déclinaison et le champ magnétique de référence (IGRF). A partir de ce nouveau tableau, l'anomalie magnétique est obtenue en faisant la différence entre le champ magnétique observé et l'IGRF. Les grilles l'intensité du champ magnétique (TMI), d'anomalie de TMI et ces transformées (RTE, RTE prolongée, IMR), le signal analytique, les filtres (variation de l'angle d'inclinaison, AGH), les cartes d'interprétation telles que la carte de linéament, d'Euler et les maximas de AGH, puis les modèles d'inversion 2.75D et 3D.

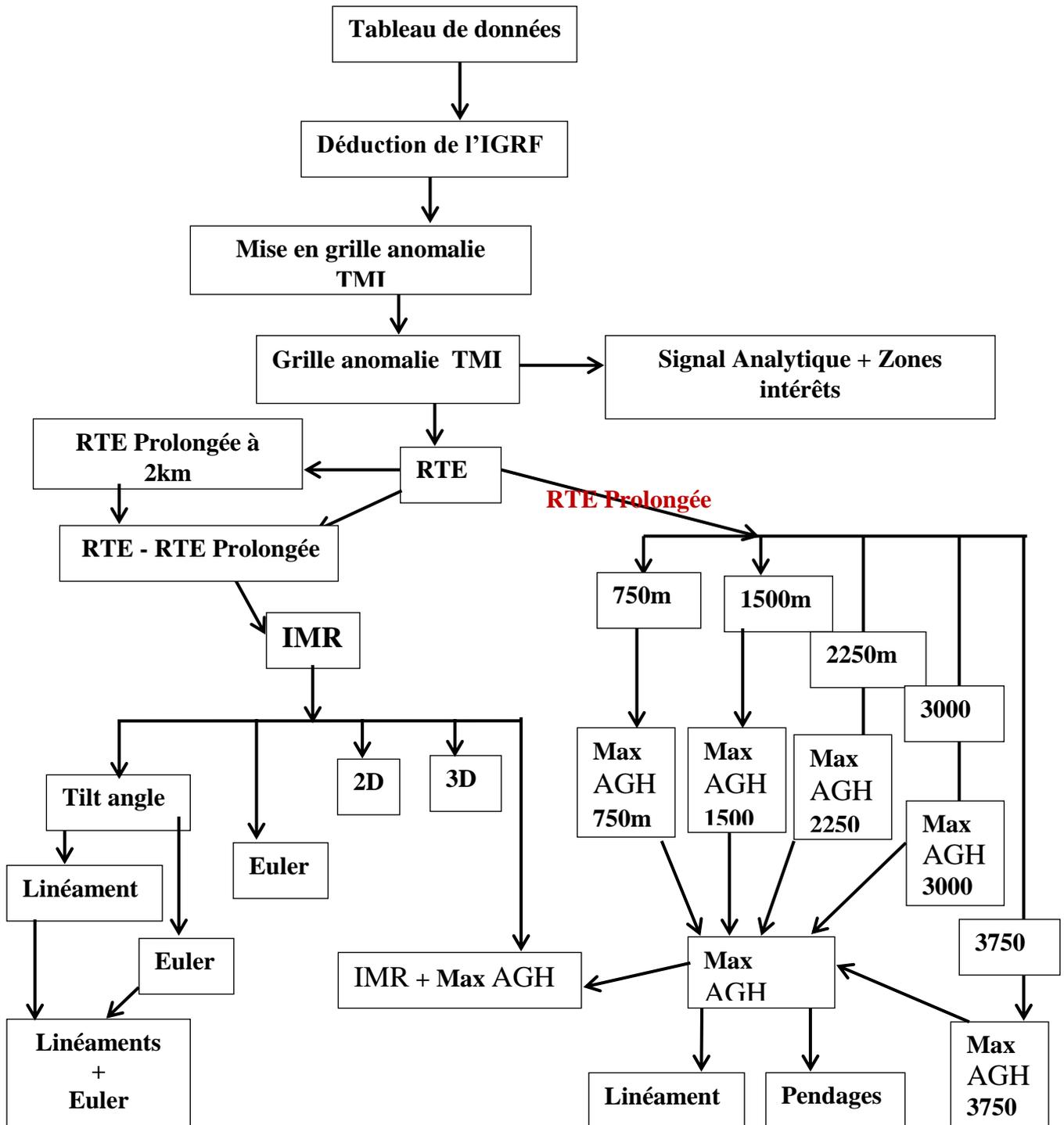


Figure 2.15: Organigramme de traitement, de modélisation et interprétation des données aéromagnétiques issues des données brutes.

CONCLUSION

Le but de ce chapitre était de présenter brièvement les méthodes de prospection géophysique. L'accent a été mis sur la méthode aéromagnétique, son principe d'acquisition, de traitement, d'interprétation des données. Le champ magnétique est d'origine terrestre et il est variable dans le temps et s'inverse des centaines de fois. Les propriétés magnétiques intrinsèques des matériaux de la croûte terrestre sont celles des minéraux. Toute roche possédant des propriétés magnétiques contient les minéraux ferromagnétiques et même s'ils ne sont qu'à l'état de traces, leur effet est plus important que celui de la roche encaissante.

La méthode aéromagnétique est une méthode potentielle, la plus utilisée pour des études structurales et dans la recherche des formations ferrifères. Elle a des avantages opérationnelle et technique et le paramètre magnétique est la susceptibilité. L'acquisition des données repose sur le choix de l'appareillage. L'interprétation repose sur le traitement de l'anomalie de TMI et l'application des filtres (RTE, dérivée, tilt angle, prolongement vers le haut, IMR, signale analytique, deconvolution d'Euler). En utilisant l'organigramme l'analyse, l'interprétation des données sera faite dans le chapitre III consacré aux résultats.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

INTRODUCTION

Après une revue de la littérature, une description de la méthodologie d'acquisition, de traitement et d'interprétation puis, la présentation des données. Ce chapitre permettra de suivre les réponses magnétiques pour mener une étude qualitative suivie d'une étude quantitative de subsurface, ensuite d'une modélisation 2.75D et 3D. L'objectif ici étant de déterminer la géométrie du sous-sol, afin de fournir des informations sur la présence, la profondeur et la forme géométrique des sources d'anomalies observées. Pour connaître ces informations, le traitement des anomalies du champ magnétique est suivi de l'application des filtres puis, corrélés aux données géologiques pour atteindre l'objectif fixé plus haut.

I. PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATION

I.1. ETUDE STRUCTURALE DE SUBSURFACE

I.1.1. Champ magnétique et champ magnétique international géo-référence.

La forme des anomalies dépend non seulement de la structure de la source elle-même, de ses dimensions, de la susceptibilité des roches qui la composent et de la profondeur, mais aussi du champ magnétique au lieu considéré. Car l'aimantation induite dépend de l'inclinaison (influence de la latitude) et de la déclinaison (influence de l'orientation de la structure par rapport au méridien magnétique).

En effet, l'effet d'un corps uniformément aimanté est équivalent à celui des masses magnétiques fictives, développées à la surface. Par conséquent, l'anomalie due à une structure simple est dipolaire et apparaît avec une partie positive et une partie négative. Cette courbe présente donc un maximum et un minimum dans le cas général comme l'a illustrée la figure 2.10a. C'est l'examen simultané de ces deux parties (partie positive et partie négative) qui permet de se faire une idée sur la position, la forme et l'importance des corps magnétiques aimantés.

À l'aide du module « grid and image » de Geosoft appliquée sur la grille numérique des données obtenues, la grille de l'intensité du champ magnétique (TMI) a été faite avec une « gridcell size » de 100 m (Figure 3.1). Le champ magnétique varie entre 32722,0 nT et 33246,1 nT.

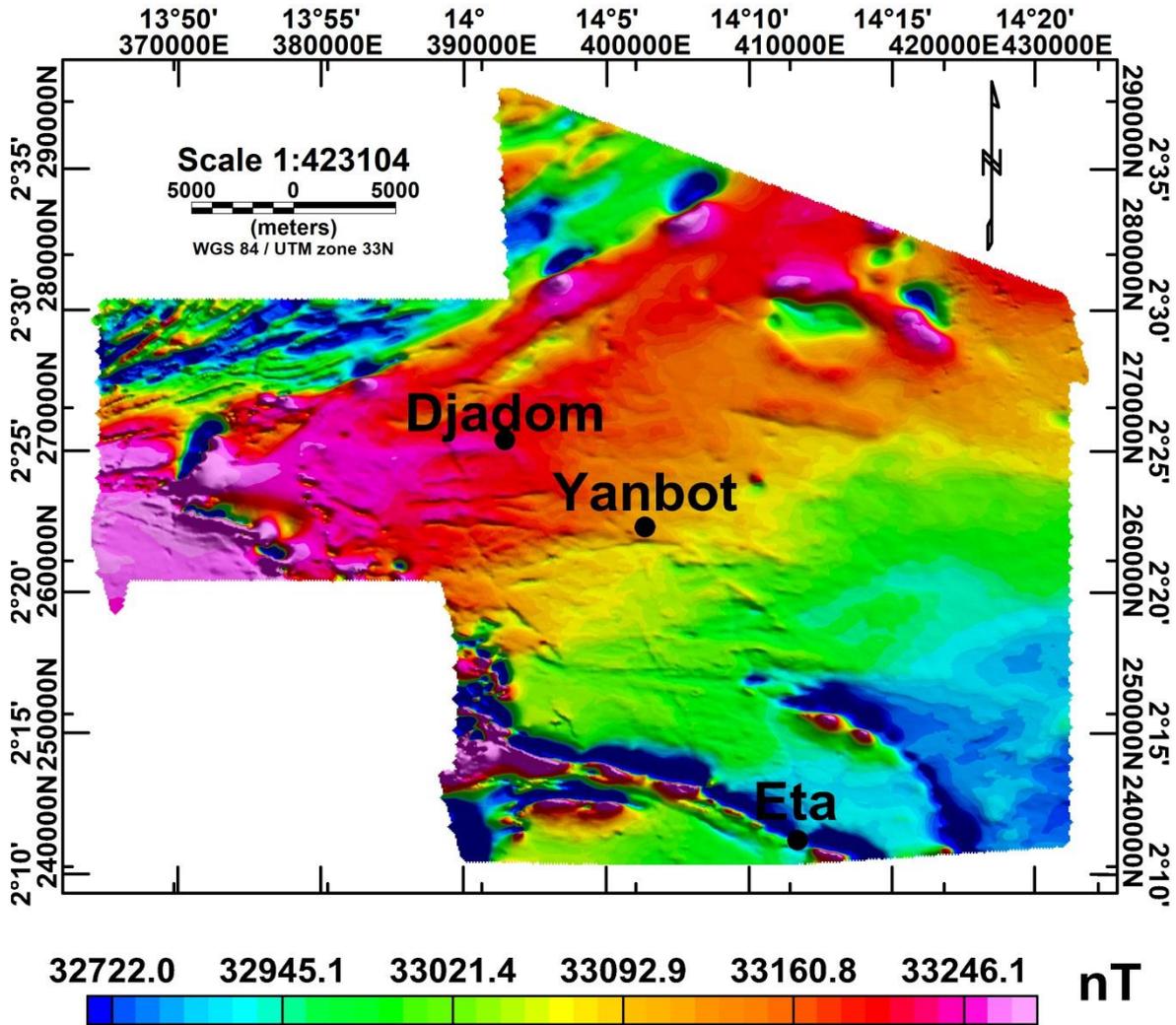


Figure 3.1: L'intensité du champ magnétique total de la zone de Djadom.

Puisque les données ont été collectées en 2012, les données correspondantes du champ magnétique international géo-référence (en anglais International Geomagnetic Reference Field (IGRF)) sont celles de la même année entre 2010 et 2015. Celles-ci sont publiées chaque cinq (05) par l'association internationale de géomagnétisme et aéronomie (Colin-Reeves 2005). La grille de l'IGRF a été faite à l'aide de Geosoft Oasis Montaj v8.4 (figure 3.2) avec une « gridcell size » de 100 m. Le champ magnétique ambiant moyen est $M = 33168,1158$ nT, l'inclinaison moyenne est $I = -22,78^\circ$ et la déclinaison est $D = -1,08^\circ$.

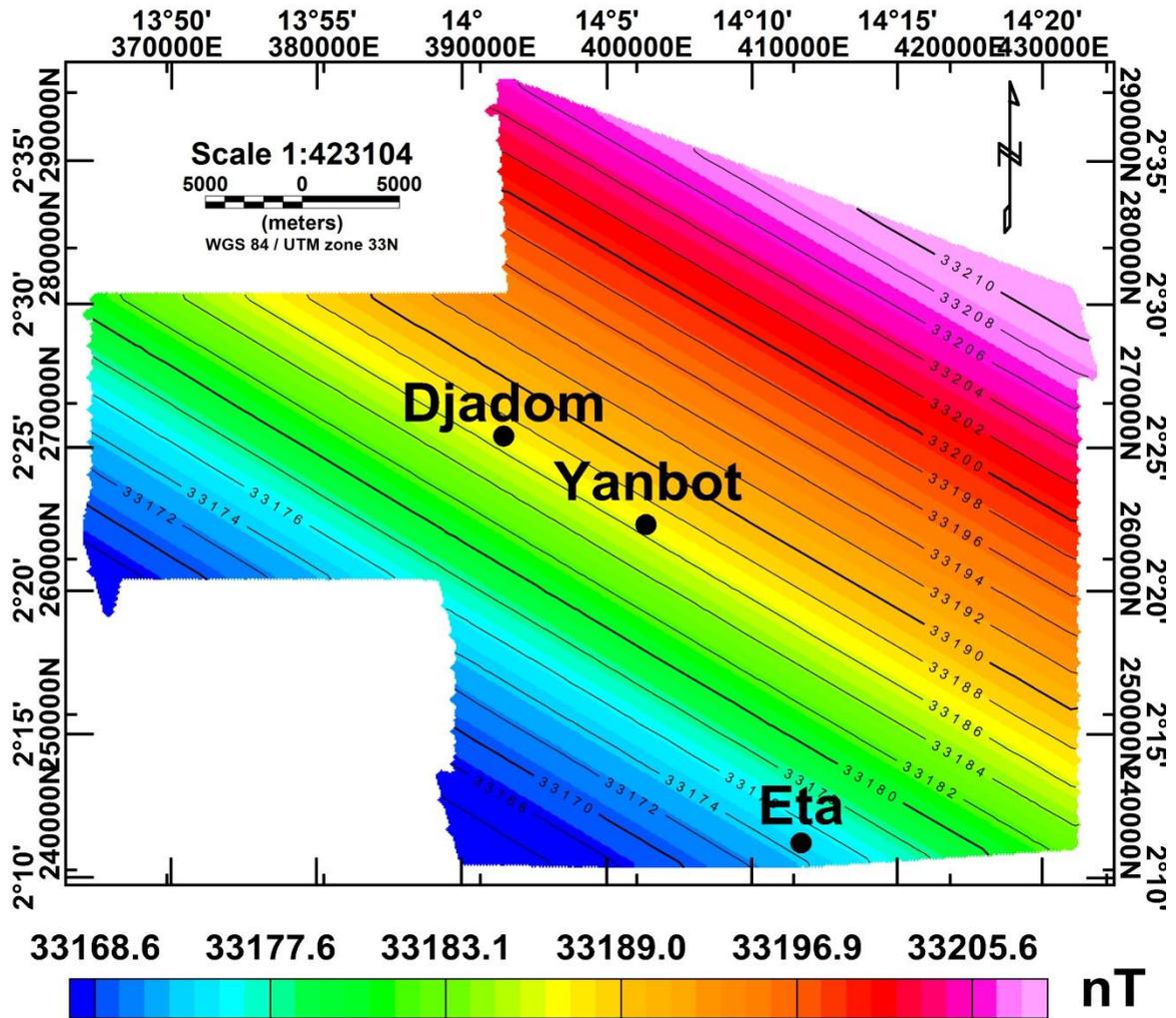


Figure 3.2: Champ magnétique de géoréférence (IRGF) élaboré pour février 2012 de la zone d'étude de la zone de Djadom.

I. 1.2. Anomalie de l'intensité du champ magnétique

L'intensité du champ magnétique est la réponse produite par des roches contenant les minerais magnétiques. La figure 3.3 donne la répartition de l'anomalie du champ magnétique dans le plan. Les amplitudes de l'anomalie varient de $-3914,0$ à $2072,8$ nT et ont une distribution bipolaire sur la zone d'étude. Les anomalies du champ et les formations géologiques ont une faible corrélation.

Une bande magnétique qui mène à une bifurcation magnétique donnant lieu aux rubanements magnétiques et à un gradient quasi-horizontale sur l'axe Yanbot. De part et d'autre de cet axe, est marqué un gradient quasi-vertical. À certains endroits, apparaissent des pics dans des formations fortement magnétiques et le caractère dipolaire est bien observé.

Ces observations mettent en évidence les intenses activités entre le Craton du Congo et le Panafricain. L'axe Djadom montre une distribution latérale et longitudinale des anomalies hétérogènes dominées par les anomalies positives, avec une valeur maximale de 2072,8 nT et une grande longueur d'onde d'environ 33176,9 m. Ces anomalies de grandes longueurs d'onde sont dues au socle Précambrien. Les réponses magnétiques montrent une variation de la lithologie des structures du socle et des sources sédimentaires.

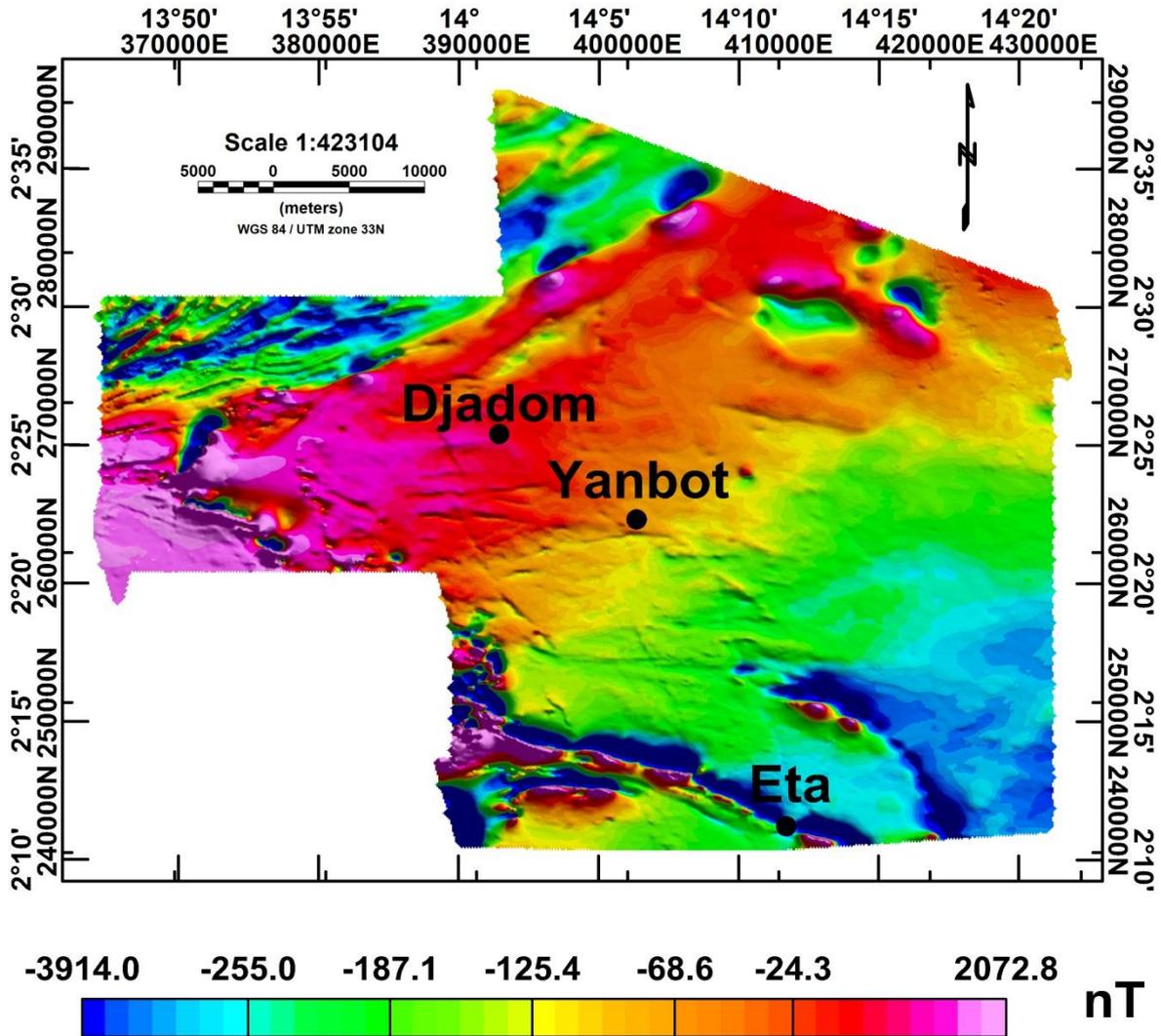


Figure 3.3: Anomalies de l'intensité du champ magnétique total de la zone de Djadom.

Géologiquement, ces observations seraient dues au quartz et au schiste du complexe de Bek, puis aux dolérites du complexe doléritique du Précambrien supérieur, ensuite du micaschiste argenté, du minéral de quartz et les schistes à bioties du complexe de base du Précambrien inférieur. Des répartitions magnétiques sont qualitativement interprétées en tant que roches de subsurface avec des fortes et faibles susceptibilités. Sur cette grille d'anomalies de TMI, quelques endroits de forts contrastes de susceptibilités mettent en évidence les indicateurs de forte magnétisation. Ces indicateurs géologiques marquent un

enfouissement magnétites, hématites, dolérite, roche verte, quartzites schiste d'ocre qui ont des propriétés de forte magnétisation dans cette zone. La présence des anomalies faiblement magnétisées serait due aux intrusions migmatites de la série du complexe de base.

I. 1.3. Anomalie magnétique réduite à l'équateur

Le logiciel Oasis Montaj v.8.4 de Geosoft via le module MAGMAP utilisant la transformée de Fourier a servi à faire la grille de l'anomalie de l'intensité magnétique du champ total réduite à l'équateur (RTE). Pour réaliser cette grille, le calcul de la moyenne des Inclinaison (I) et Déclinaison (D) a été fait. Les valeurs sont respectivement $I = -22,78^\circ$ et $D = -1,08^\circ$.

La grille de la RTE (figure 3.4) montre que les anomalies varient de $-1945,5$ nT à $3855,2$ nT. Comparée à l'anomalie de TMI, les anomalies conservent leurs formes avec une augmentation de l'amplitude de $1782,4$ nT. Dans l'ensemble, les anomalies positives persistent mais avec un peu plus d'extension et un léger déplacement vers le nord. Les anomalies positives présentent la réponse d'un socle fortement magnétisé. Les anomalies de grande longueur d'onde reflètent des réponses magnétiques plus profondes, tandis que les anomalies de courtes longueurs d'onde reflètent la réponse magnétique peu profonde (Langenheim & Jachens, 2014). Une anomalie étant caractérisée par ses propriétés physiques et magnétiques, ainsi, plus sa longueur d'onde est grande, plus cette réponse est profonde. Ces anomalies marquent ainsi les formations géologiques. D'une observation générale de cette grille, les anomalies positives de direction WNW-ESE et WSW-ENE tendent à augmenter en amplitude et en longueur d'onde. Les gradients et les pics magnétiques su-évoqués sont bien remarquables. Ces observations mettent en évidence l'évènement de subduction du CC sous le Panafricain. Les fortes anomalies circulaires dans cette zone traduisent la présence d'accumulation des minéraux de fortes susceptibilités dans les failles majeures. Il est dû à la présence d'une part des minéraux diamagnétiques tel que le quartz ocre et d'autre part des minéraux ferromagnétiques de forte aimantation rémanentes telle que les éctinites, les dolérites dans la série du complexe de base et également les hématites et magnétites. Les intrusions évoquées sont dues à la présence des anomalies négatives aussi présentes sur cette grille.

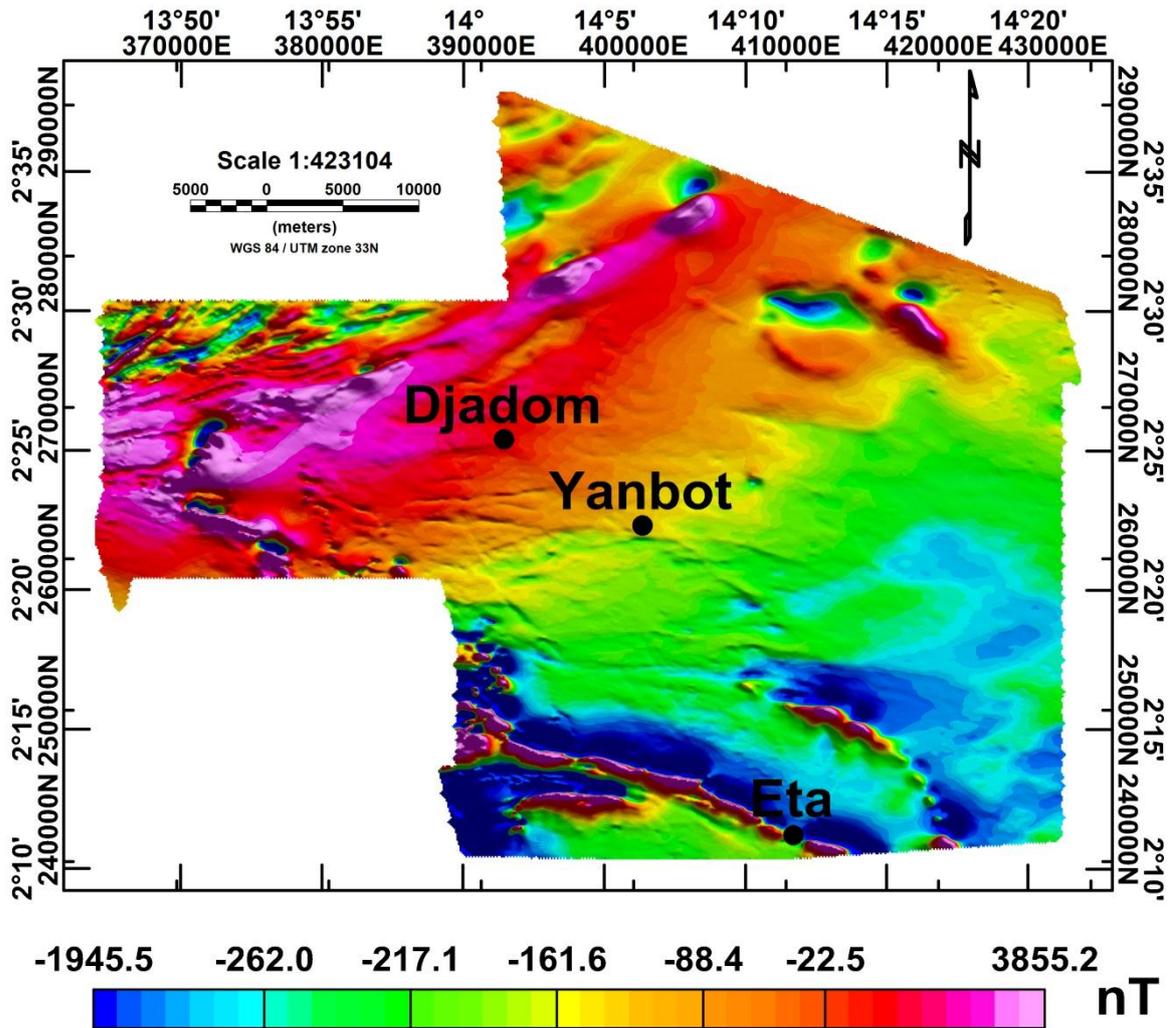


Figure 3.4: Anomalie de l'intensité du champ magnétique total réduit à équateur de la zone de Djadom..

I.1. 4. Champ réduite à l'équateur prolongé à 2 km

La figure 3.5 présente la grille de la TMI prolongée vers le haut à 2 km d'altitude. L'amplitude d'anomalie sur cette grille varie de -721,0 à 148,2 nT. Cette grille présente deux grands blocs : le bloc sud de l'iso-anomalie Yanbot d'amplitudes négatives et le bloc nord de l'iso-anomalie Yanbot d'amplitudes positives. Ce dernier a une anomalie de grande longueur d'onde et d'extension latérale et longitudinale importante.

Son interprétation permet de voir une réponse d'un socle fortement magnétique et affecté par d'intenses événements tectoniques. Une étude de subsurface plus détaillée s'appuie sur une grille résiduelle obtenue à l'aide d'une grille régionale faite à 2 km (figure 3.5).

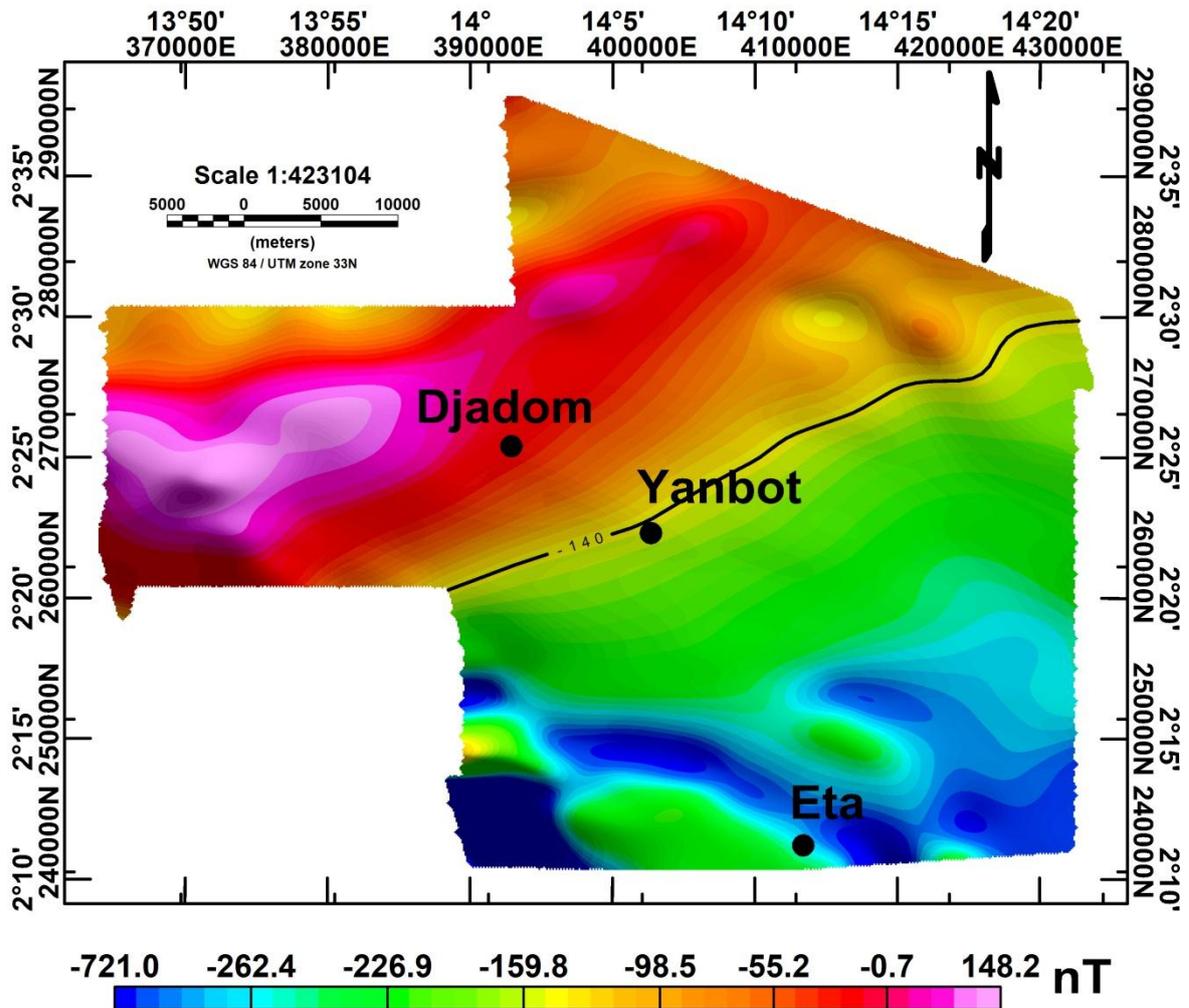


Figure 3.5: Anomalie de l'intensité du champ magnétique total réduit à l'équateur prolongée à 2 km de la zone de Djadom.

I.1.5. Anomalies magnétiques résiduelles de la zone d'étude

La grille de l'anomalie résiduelle (IMR) (figure 3.6) est la différence de la RTE et RTE régionale (prolongée à 2 km). Les valeurs des anomalies varient de - 1647,0 nT à 3711,8 nT, avec une réduction de 43,4 nT par rapport à celle de l'anomalie RTE.

Cette grille d'anomalie montre les corps magnétiques enfouis. Les effets des structures de surface sont masqués par les effets sous la couverture. Les anomalies magnétiques de l'axe Djadom sont disloquées. Les distributions des anomalies sont plus raffinées et traduisent les maximas locaux de directions WNW-ESE et WSW-ENE comme précédemment remarqué sur la grille de l'anomalie de TMI et sa transformée (RTE). Cette orientation des anomalies positives permet d'identifier les directions des structures principales et de les localiser.

Les pics et les rubanements su-évoqués sont éclatés en plusieurs autres et les rubanements sont plus observés marquant ainsi les linéaments rubanés. On note une ouverture accompagnée des virgations au sud-ouest de Djadom. Il se remarque par la mise en place de deux grands accidents géologiques sur l'axe Djadom (WSW-ENE) et l'axe ETA (WNW-ESE). De plus leurs amplitudes et leurs longueurs d'onde, permettent de dire que ces accidents géologiques vont des couvertures au socle. Sur l'axe Djadom, on note une discontinuée rectiligne et transversale par rapport au rubanement magnétique. Il peut être comparable et compatible avec des structures et des événements cassantes Protérozoïques magnétiques et sédimentaires. Et sur l'axe ETA, on note les anomalies curvilinéaires de grande longueur d'onde et de faibles amplitudes qui peuvent être attribués à des couloirs sédimentaires de déformation majeure. Une interprétation est associée à la présence d'un linéament sécant sur l'axe Djadom et un linéament d'entraînement sur l'axe Eta d'après les définitions de Faure (2001). Le caractère magnétique dipolaire est tout à fait observé sur cette grille.

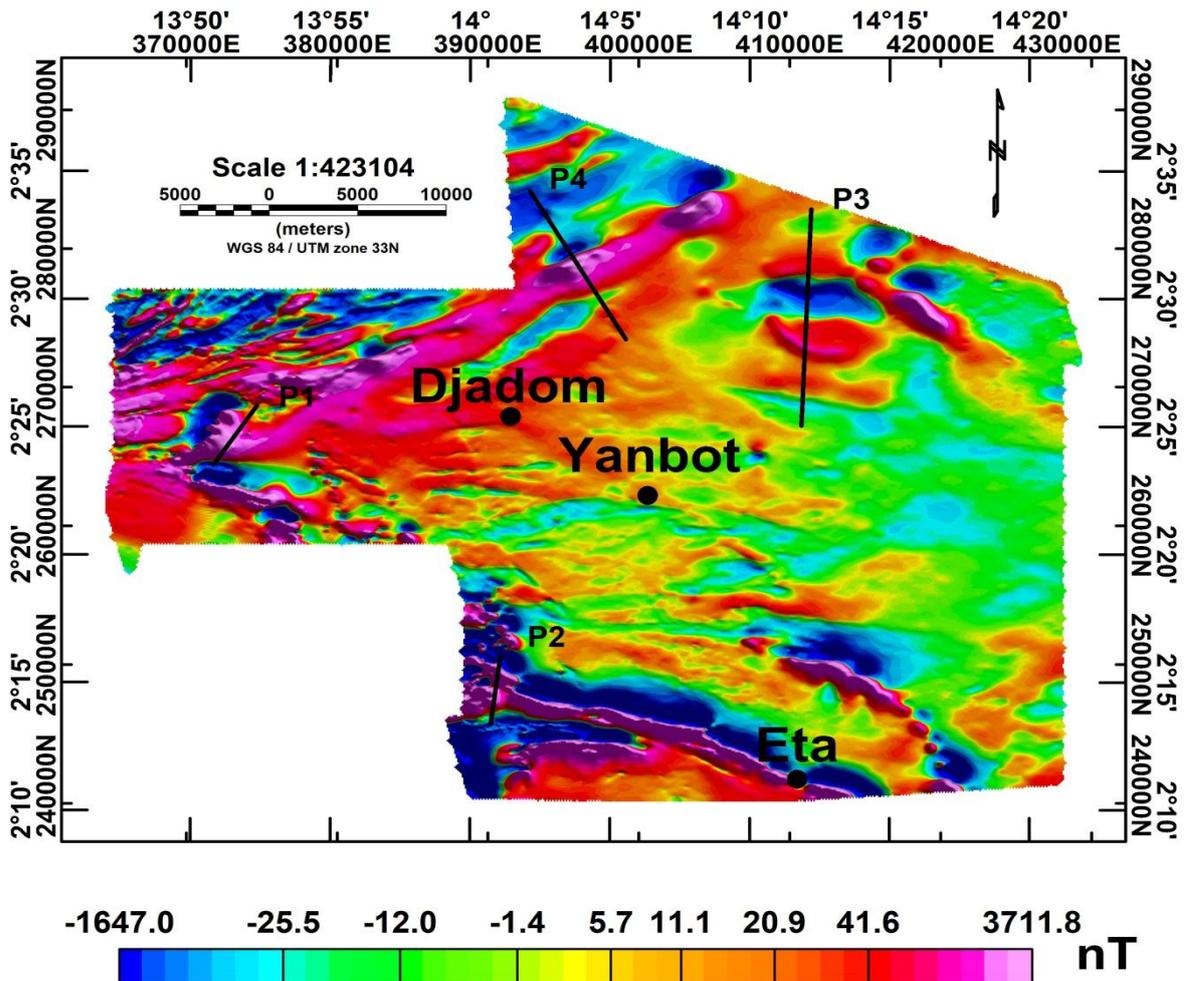


Figure 3.6: Anomalie de l'intensité du champ magnétique total résiduelle de la zone de Djadom.

I.1. 6. Variation de l'angle d'Inclinaison

La figure 3.7 présente la variation de l'angle d'inclinaison (dénommer en anglais Tilt Angle) de la carte d'anomalie résiduelle de l'anomalie de TMI. Les structures sont observées avec une haute résolution. Tous les signaux calculés sont distribués entre -90° et $+90^\circ$ et l'amplitude de cette variation entre $-1,6$ et $+1,6$ radient avec la variation de longueur d'onde des structures.

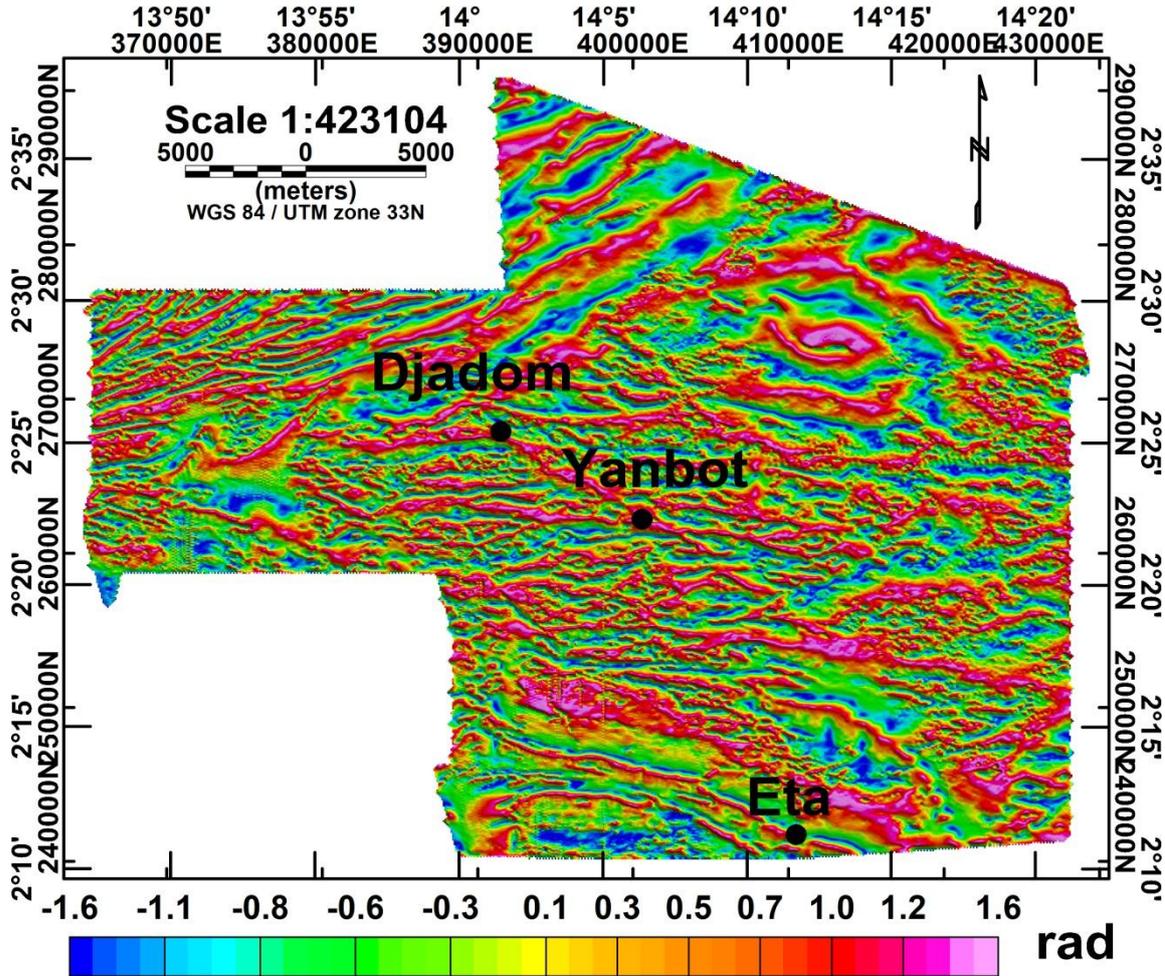


Figure 3.7: Variation de l'angle d'inclinaison (Tilt angle) du champ magnétique de la zone de Djadom.

Cette grille de Tilt Angle montre plusieurs linéaments de subsurface inférés non visibles sur la carte géologique. L'interprétation des données aéromagnétiques montre plusieurs linéaments magnétiques dans cette zone d'étude. Les grilles précédentes ont permises d'observer des rubanements magnétiques qui sont de même observe ici. Les anomalies magnétiques positives sont éclatées et disposées suivant les directions des linéaments. Au sud-ouest de Djadom, les structures de direction quasi W-E semblent rencontrer un choc et amorcent une courbure pour prendre des directions très denses

WSW–ENE, WNW–ESE et W–E. Cette courbure de directions des structurales indique un pli d’entraînement révélateur d’un mouvement senestre suivant la direction WSW–ENE et dextre suivant la direction WNW–ESE. Il peut être interprété comme des linéaments sécants et entrainements évoqués. Puisque le tilt permet de faire une étude de subsurface, cette multitude d’anomalies très raffinées donnent une réponse magnétique du sous-sol qui marque une zone ondulée et plissotée. Ceci est donc une conséquence des évènements tectoniques qu’a subir cette zone géologique.

I.1.7. Carte structurale de la variation de l’angle inclinaison

En fonction de l’amplitude et de la longueur d’ondes, on note 39 linéaments majeurs et 397 linéaments mineurs, soient 436 linéaments (figure 3.8). Ces linéaments majeurs ont des longueurs variant de 1731,9 m à 33 176,9 m, des profondeurs allant de 0,7 m à 237,3 m. Les caractéristiques mesurées sur cette carte (longueurs, directions, profondeurs) des linéaments majeurs sont groupées dans le tableau 4.

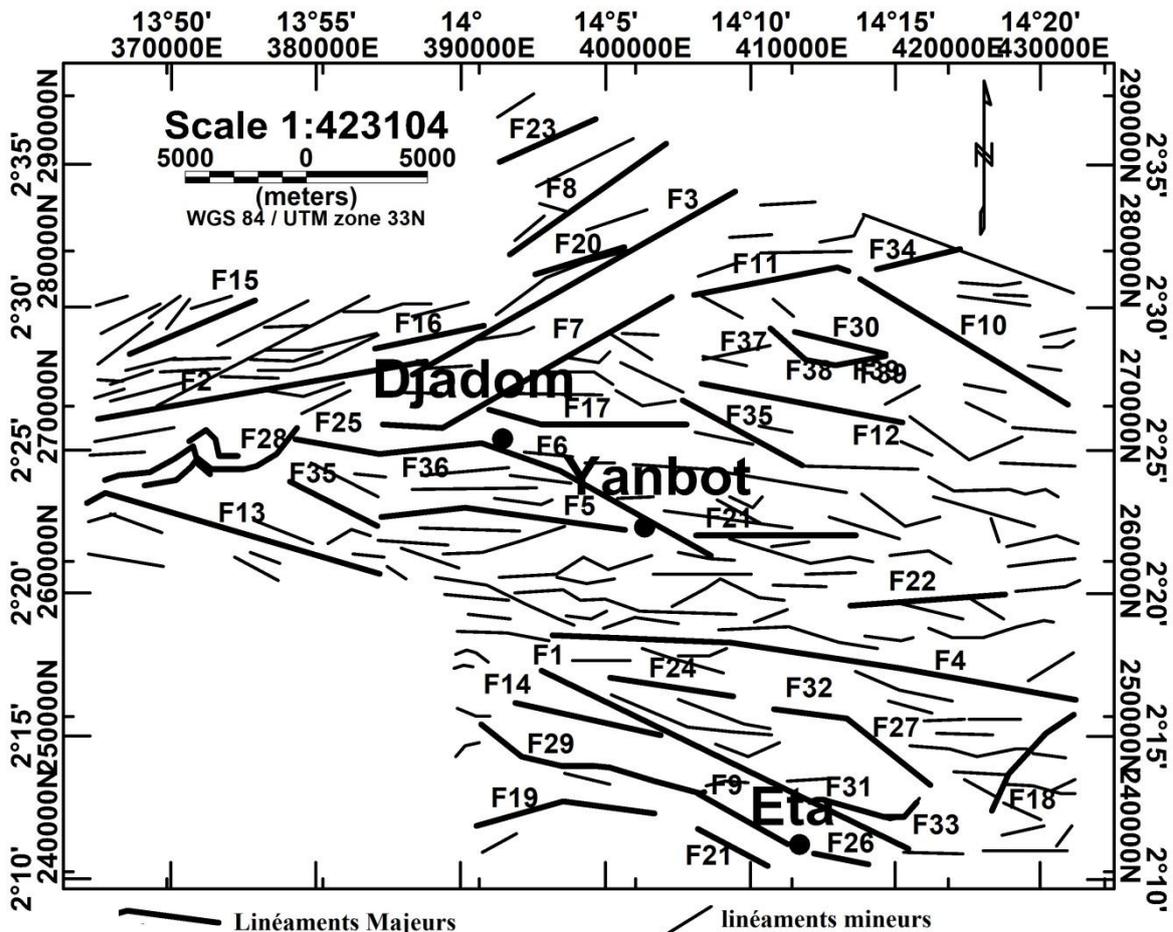


Figure 3.8: Linéaments de la Variation de l’inclinaison (Tilt angle) magnétique.

Les linéaments mineurs montrent un socle affecté par les évènements tectoniques qui caractérisent la transition entre la zone du Craton du Congo et la ceinture de plis du

Panafricain. On observe dans l'ensemble, les foliations de textures quasi-parallèles. Cet assemblage de foliations marque donc une ondulation. Au même titre, on observe un réseau de failles qui est interprété comme une conséquence que la zone d'étude appartient à une masse solide victime d'un choc tectonique qui ne l'a pas laissé indifférent (car est aussi affecté).

I.1. 8. Résultats quantitatifs

a) Solution d'Euler de la résiduelle

Les solutions d'Euler permettent la caractérisation des réponses magnétiques et la détermination de la profondeur et de la géométrie des corps intrus. La solution de l'Euler (figure 3.9) est faite en utilisant les paramètres suivants :

-L'index structural $N=1$, car c'est la valeur appropriée pour mettre en évidence les failles, les limites des couches ;

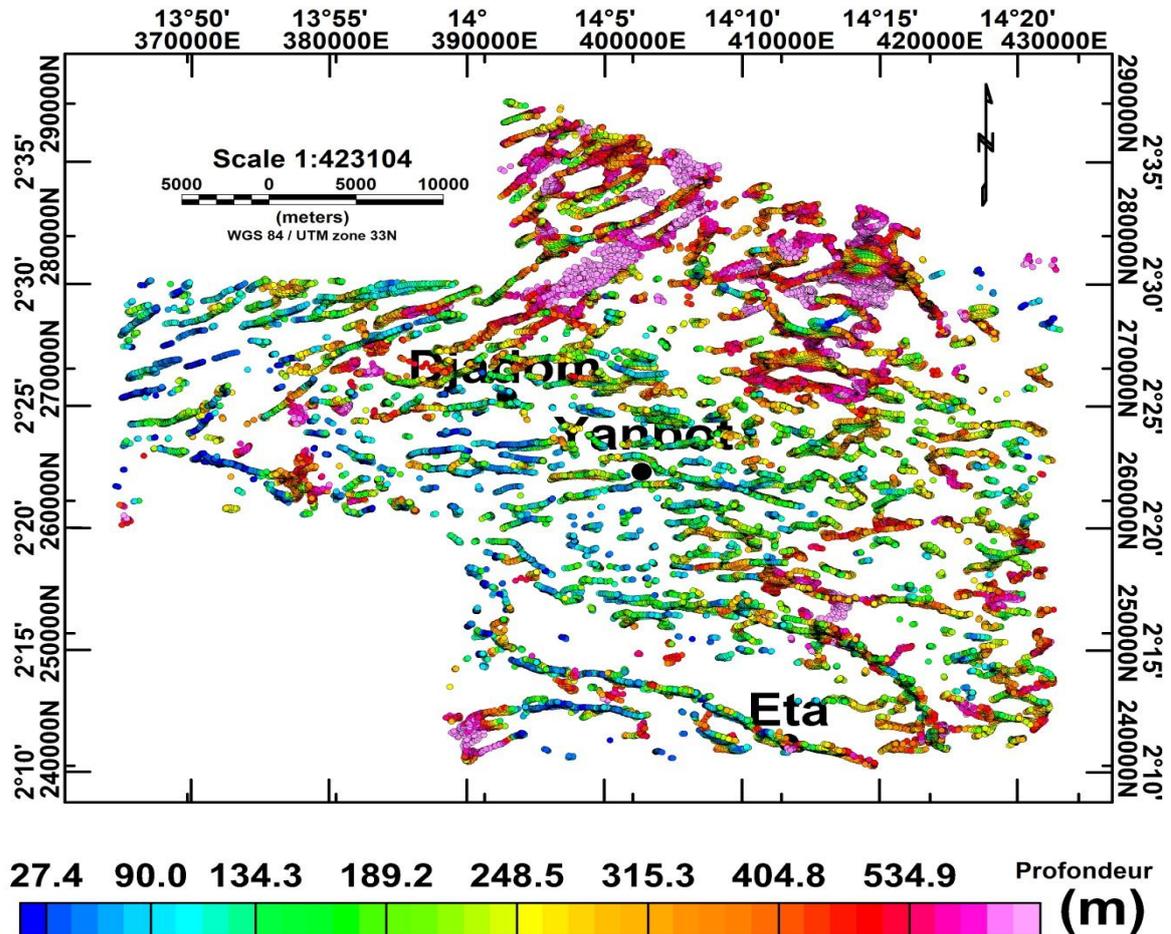


Figure 3.9: Solution d'Euler du champ résiduel, $N=1$, $T=10\%$, $W=10\text{km} \times 10\text{km}$.

- La tolérance sur les solutions d'Euler qui est l'erreur sur la profondeur est fonction des structures géologiques. Les anomalies magnétiques sont de grandes longueurs d'ondes

qui résultent des structures profondes. Le choix de la tolérance et de la fenêtre de Nyquist dépendent de la longueur d'onde des anomalies (Marson & Klingele, 1993). Selon ce dernier, pour de telles structures, la meilleure erreur sur la profondeur doit être entre 5 et 15% et pour cela la tolérance $T=10\%$ et fenêtre de Nyquist $W=10$ kilomètres x 10 kilomètres sont utilisées.

Les profondeurs des solutions d'Euler varient de 13 m à plus de 535 m, y compris ceux des corps avec leurs géométries. L'interprétation de la carte structurale montre les linéaments affectant le socle de cette zone. Les profondeurs et la limite des corps intrusifs sont distinguées. Les directions remarquables des linéaments de cette zone sont : WSW-ENE, W-E et WNW-ESE. On observe la disposition des solutions d'Euler le long de l'axe Eta, marquant un linéament désigné sous le nom de l'accident géologique d'Eta. Leur profondeur varie de 13,3 m à plus de 535 m.

b) Solution d'Euler de la variation de l'angle d'inclinaison

La solution d'Euler de la variation de l'angle d'inclinaison (tilt angle) (Figure 3.10) présente une variation de profondeur de 0,7 m à plus de 273,2 m (tableau 4). Plusieurs détails sur la profondeur des structures géologiques intruses du socle sont révélés. La solution d'Euler est utilisée pour l'interprétation des contacts géologiques associés aux linéaments remarquables précédemment. L'ampleur du nombre de structures sur la carte met en évidence l'activité tectonique intense que ce secteur a subie. C'est la preuve d'un métamorphisme de couverture, rajeunie lors de la collision. Effectivement, on observe les séries de solutions qui indiquent une faille majeure sur l'axe Djadom et sur l'axe Eta.

Les profondeurs des structures prouvent le fait que cette zone d'étude appartient à la bordure Nord du CC qui s'approche d'une zone limite de la ceinture mobile d'Afriques centrale (CMAC) comme souligné dans l'investigation gravimétrique menée par Ndougsa et al. (2003). La quasi-discordance de discontinuité avec ou sans déplacement sur l'axe Djadom et aussi des colonnes de déformation de l'axe Eta est confirmée par la disposition des solutions d'Euler (Figure 3.10). La disposition et le nombre de solutions d'Euler corrélerent avec la mise en place des ondulations et des plissotés remarquables aux paragraphes précédents.

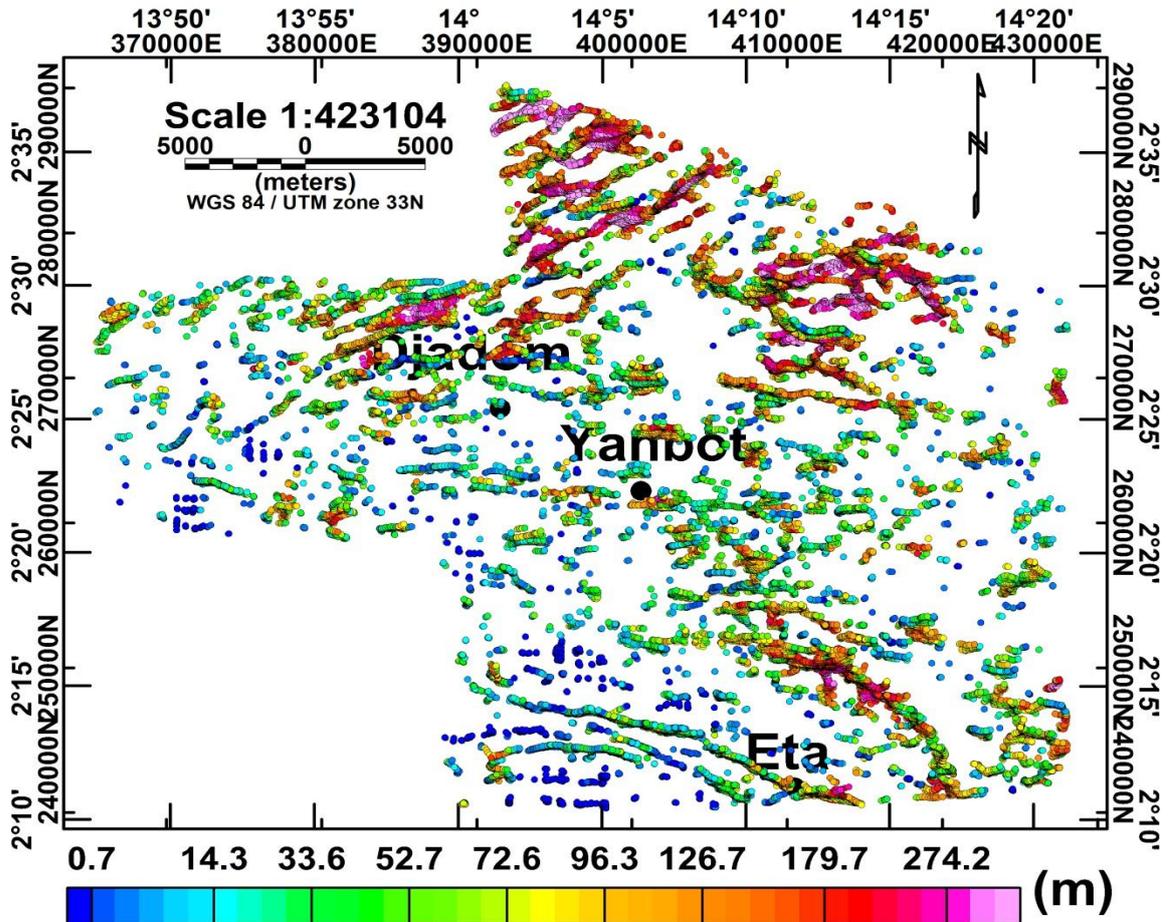


Figure 3.10: Solution d'Euler de la variation de l'angle d'inclinaison (Tilt Angle), $N = 1$, $T = 15\%$, $W = 10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$.

c) Corrélation des structures du tilt angle et ses solutions d'Euler

L'interprétation faite en superposant des cartes structurales du tilt angle et ses solutions d'Euler est basée sur des critères élaborés et vérifiés par (Reid et al., 1990 ; Phillips 1998 ; Ndougsa-Mbarga et al., 2012 ; Yandjmain et al., 2017). Ces critères sont :

- si les linéaments du tilt angle et les solutions d'Euler sont quasi parallèles mais non confondus, les linéaments du Tilt représentent les contacts tandis que ceux des solutions d'Euler indiquent le sens et la direction des pentes de ces contacts.
- si les linéaments du Tilt et les solutions de l'Euler sont quasi-parallèles et confondus, les linéaments du Tilt représentent les contacts tandis que ceux des solutions d'Euler indiquent la direction et le sens des pentes de ces contacts qui peuvent être verticaux, on parle des gradients verticaux affectant le socle magnétique.

La superposition (figure 3.11) des résultats du tilt et les solutions d'Euler de ce tilt montre une corrélation. On note plusieurs linéaments majeurs avec le contact vertical. D'une façon générale, ces pentes sont dextres au centre et au sud, et senestre dans le nord.

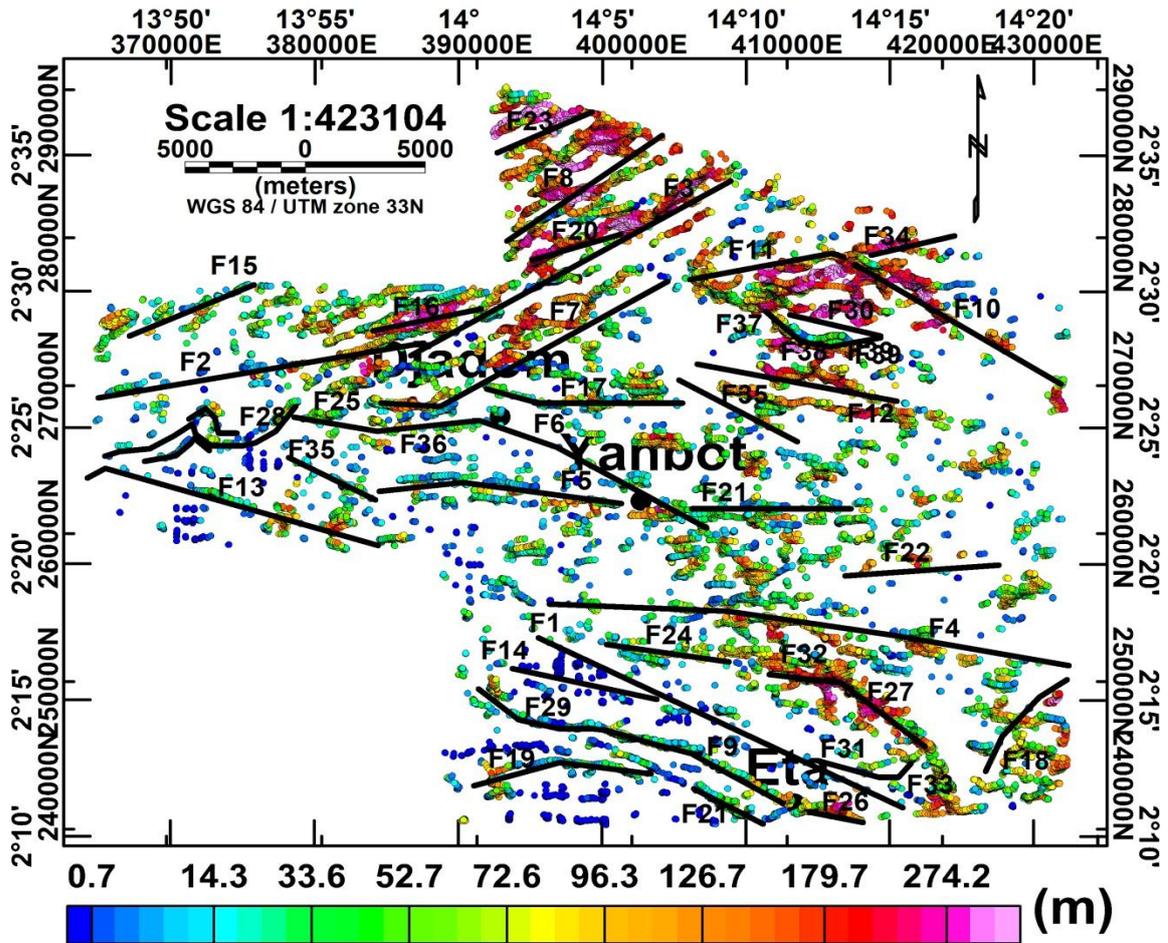


Figure 3.11: Superposition des solutions d'Euler de Tilt angle et les linéaments.

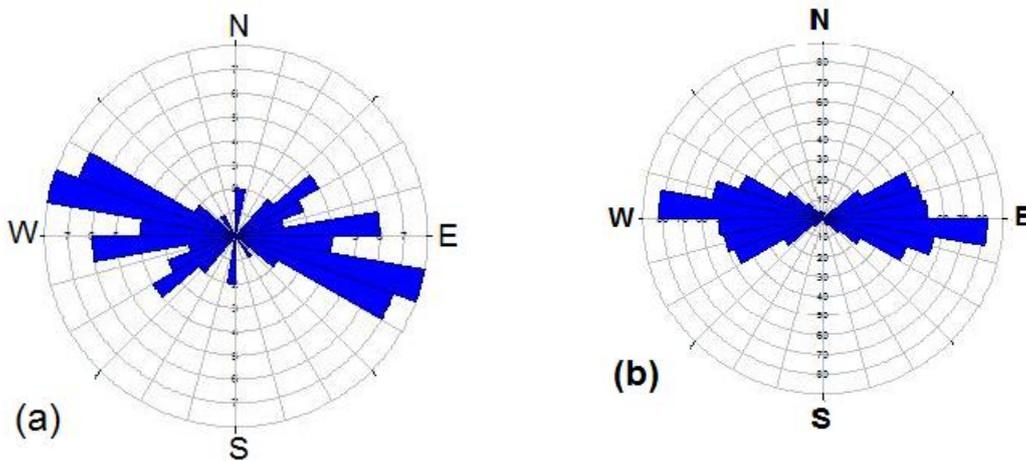


Figure 3.12: (a) Rose des linéaments majeurs ; (b) Rose des linéaments mineurs.

La direction des linéaments est mesurée par rapport à l'azimut nord dans le logiciel ArcGis 10.1, puis les valeurs des coordonnées extrêmes des linéaments sont exportés dans Excelle pour calculer la direction θ des linéaments. Ces valeurs de θ sont introduites dans le logiciel Rocwork pour construire la rosace de direction (figure 3.12). L'intérêt de la

rosace est de donner les directions des structures étudiées. La connaissance des directions des structures est d'une importance capitale en recherche minière. La figure 3.12 est la rosace constituée des quatre points cardinaux et des directions des linéaments. Le diagramme de la figure 3.12 (a) est la rosace des linéaments majeurs et celui de la figure 3.12 (b) est celle des linéaments mineurs. Cette rosace donne les directions des grands ensembles structuraux WSW–ENE et WNW–ESE pour les linéaments majeurs et W–E pour les linéaments mineurs.

Tableau 4: La direction des linéaments majeurs, leurs longueurs et leurs profondeurs résultant du Tilt angle ($Prof_{TA}$), résultant de la solution d'Euler de la variation du Tilt angle ($Prof_E$).

N°	Direction (°)	Long(m)	Prof _{TA} (m)	Prof _E (m)
F1	N104E	33176.9	64.49	0.7-65.1
F2	N119E	24462.3	237.2	2.5-237.3
F3	N69E	23674.4	138.8	2.5-142.2
F4	N55E	21949.7	223.9	0.7-237.3
F5	N80E	19129.5	124.2	2.5-124.8
F6	N59E	17165.9	100.1	2.5-109.8
F7	N76E	14272.5	100.1	2.5-109.8
F8	N67E	12699.4	237.8	31.0-237.3
F9	N54E	12930.8	87.8	0.7-96.5
F10	N82E	12010.5	220.9	74.4-237.3
F11	N118E	10613.1	166.0	2.5-164.4
F12	N96E	12762.6	222.1	22.6-237.3
F13	N115E	10478.5	39.3	2.5-48.1
F14	N66E	11192.3	5.0	0.7-4.9
F15	N71E	8109.3	161.6	2.5-164.41
F16	N101E	12206.8	237.2	109.8-237.3
F17	N90E	9648.3	138.8	2.5-164.4
F18	N126E	7586.5	149.5	2.5-164.4
F19	N141E	9134.9	62.1	2.5-65.1
F20	N112E	9812.3	237.2	84.9-237.3
F21	N87E	7965.6	78.5	0.7-74.4
F22	N107E	7965.6	223.43	2.5-109.8

F23	N102E	9021.0	238.8	109.8-237.3
F24	N118E	6988.8	87.8	2.5-109.8
F25	N94E	9253.1	62.1	4.9-65.1
F26	N117E	8763.2	83.3	14.2-164.4
F27	N107E	7289.8	223.9	14.2-237.3
F28	N100E	6245.5	17.8	0.7-14.2
F29	N101E	5296.5	164.9	22.6-164.8
F30	N43E	5322.5	237.2	2.5-237.3
F31	N80E	5596.2	62.1	2.5-74.4
F32	N87E	5056.8	220	14.2-237.2
F33	N103E	4732.8	62.1	2.5-74.4
F34	N129E	5005.4	228.9	48.1-237.3
F35	N225E	6761.5	237.2	109.8 -237.3
F36	N291E	6144.4	17.1	0.7-14.2
F37	N270E	2745.7	223.8	22.6-237.3
F38	N84E	1731.9	223.8	22.6-237.3
F39	N56E	2360.9	223.8	22.6-237.3

I.2. LINEAMENTS DU SOCLE ET IMPLICATION MINIERE

I.2. 1. Intensité magnétique résiduelle prolongée de 750 à 3750 m

Pour voir l'évolution de la réponse magnétique de la surface jusqu'en profondeur, des grilles de l'intensité magnétique résiduelle (IMR) prolongée à différentes altitudes sont superposées. Les choix des altitudes (750, 1500, 2250, 3000 et 3750 m) de prolongement vers le haut reposent sur le fait qu'à ces altitudes, les linéaments magnétiques sont clairement observés. Le prolongement vers le haut de l'anomalie de la IMR à des différentes altitudes ressort les deux accidents susmentionnés (accident de l'axe Djadom et celui de l'axe Eta). Le prolongement de l'IMR vers le haut permet une étude régionale. La grille IMR utilisée ici est obtenue en faisant la différence entre la RTE et la RTE prolongée à 4 km. Mais il est à noter que lors de la superposition de la carte des maximas, la grille résiduelle utilisée est celle obtenue avec la grille régionale à 2 km du paragraphe (I.1. 4.).

Lorsqu'on prolonge vers le haut à une altitude h , on transporte le plan d'observation à une profondeur qui est égale à la moitié de l'altitude de prolongement (Jacobsen, 1687) c'est-à-dire égale à $h/2$. Pour cela, les prolongements vers le haut aux altitudes 750 m,

1500 m, 2250 m, 3000 m et 3750 m permettent d'observer les comportements du sous-sol aux profondeurs respectives 375 m, 750 m, 1125 m, 1500 m et 1875 m (figure 3.13). Comme déjà souligné plus haut, Plus on va en profondeur, on constate que ces accidents géologiques vont de la couverture au socle. L'anomalie de grande longueur d'onde de l'axe Djadom est renforcée et celui de l'axe Eta forme des lobes. Cette évolution montre que les effets magnétiques affectent les roches sédimentaires du sous-sol et séparent le secteur d'étude en blocs.

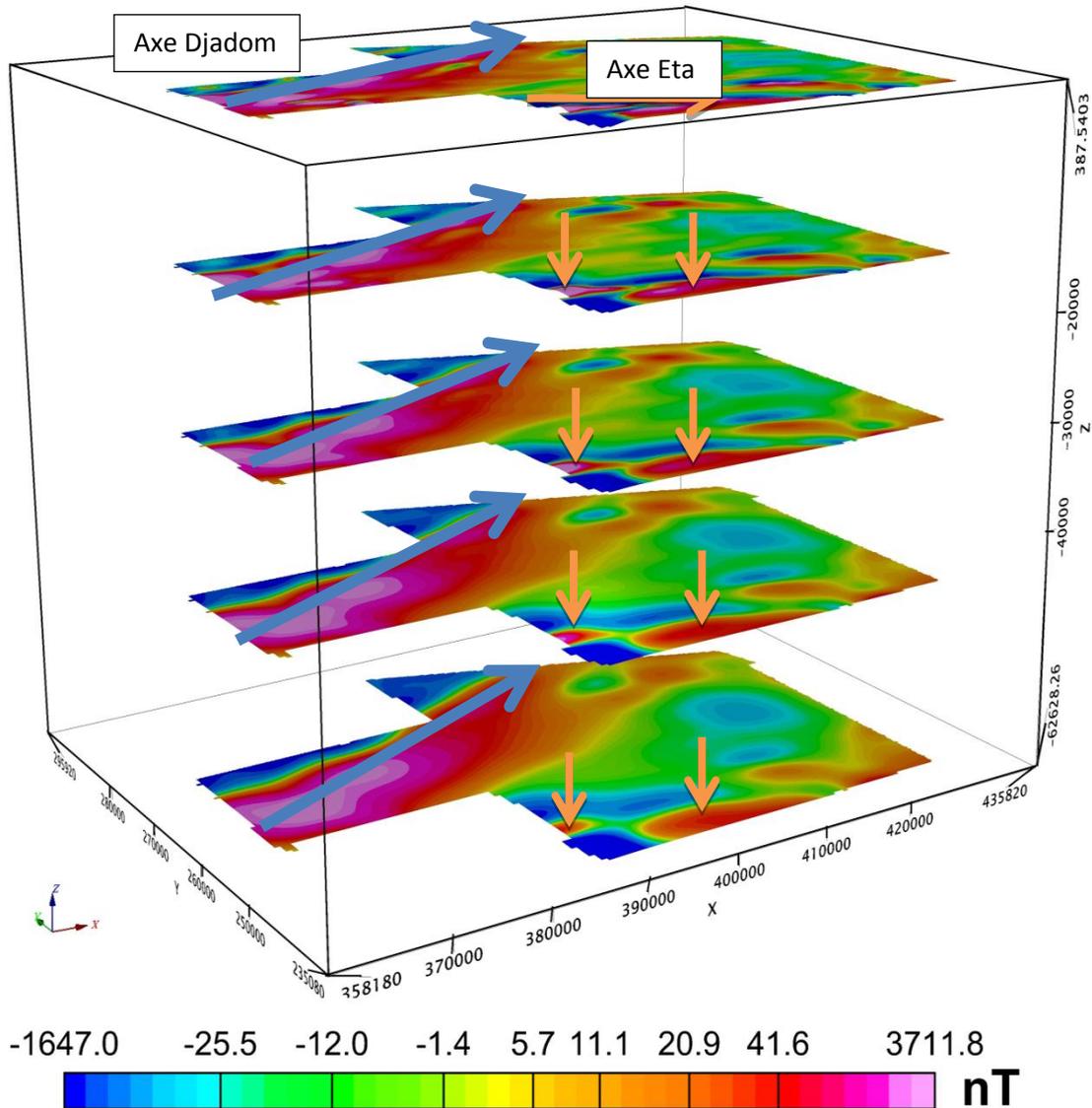


Figure 3.13: Intensité magnétique résiduelle prolongée aux altitudes de 750 à 3750 m.

I. 2. 2. Dérivée horizontale prolongée de 750 à 3750 m

La méthode de la dérivée horizontale est utilisée pour localiser les contacts géologiques. Celle-ci met en évidence les zones de fort gradient telles que celles qui pourraient se produire aux limites des corps. L'intérêt de cette disposition est de voir

l'évolution des contacts géologiques de la surface jusqu'au socle. L'amplitude sur la grille de ce filtre varie de $-0,40$ à $0,23$ nT/m (figure 3.14). La distribution de ces anomalies est plus raffinée et indique les maxima locaux des contacts géologiques. La faille de l'axe Eta est bien présente alors que celle de l'axe Djadom a disparu marquant les discontinuités locales correspondant aux maxima des gradients de celle-ci. Cette dernière a donné place aux lobes que l'on peut assimiler à des boudins (ou dômes) magnétiques. Les dômes des structures d'amplitudes positives d'environ $0,23$ nT/m sont bien observés en série sur l'axe Djadom et sur l'axe Eta, puis au nord-est de Yanbot.

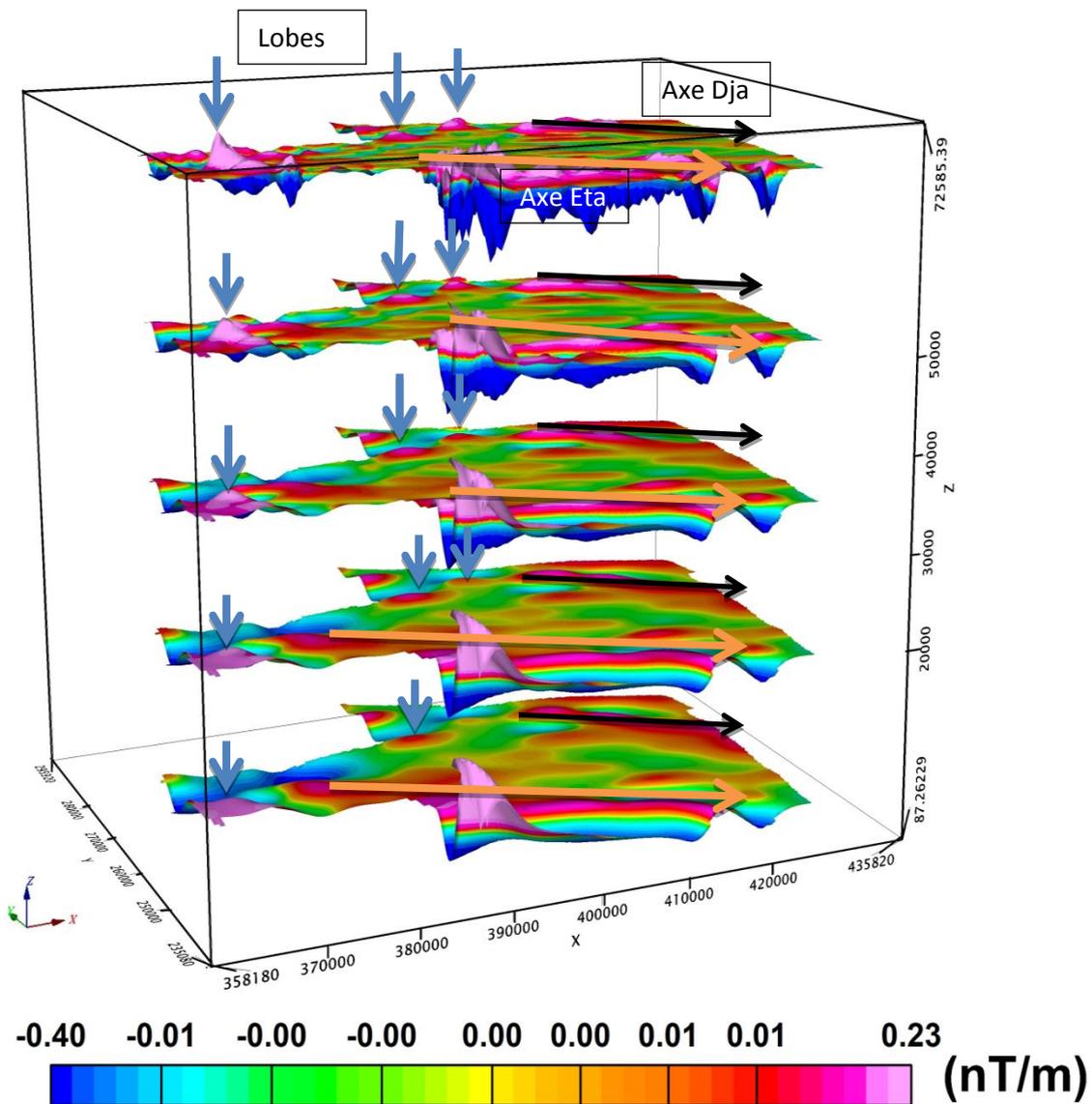


Figure 3.14: Plans correspondant des AGH à des profondeurs égales à 375 m, 750 m, 1125 m, 1500 m et 1875 m.

Ces dômes sont marqués de la couverture jusqu'en profondeur. De même comme dans le cas de la IMR prolongée, les rubanements magnétiques diminuent avec la profondeur, mais une faille semble apparaître au nord-est de Yanbot de direction SE - NW. Cette dernière va de la couverture jusqu'au socle. On peut assimiler celle-ci à la faille du Dja. Une interprétation est qu'elle met en évidence le chevauchement de la partie nord de la couverture Cratonienne du Congo et de la série d'Ayina, puis une expansion de la nappe du groupe de Yaoundé sur la couverture de CC.

I. 2. 3. Dérivée horizontale prolongée à 750 m et maxima

La superposition des maxima sur la grille AGH prolongée à 750 m montre que ces maxima corrént bien avec les pics d'amplitudes positives sur la grille d'AGH (figure 3.15). La grille d'anomalie magnétique est utilisée pour déterminer les tendances structurales dans la zone d'étude. L'orientation des anomalies positives laissent identifier la direction des contacts et localiser les principales sources.

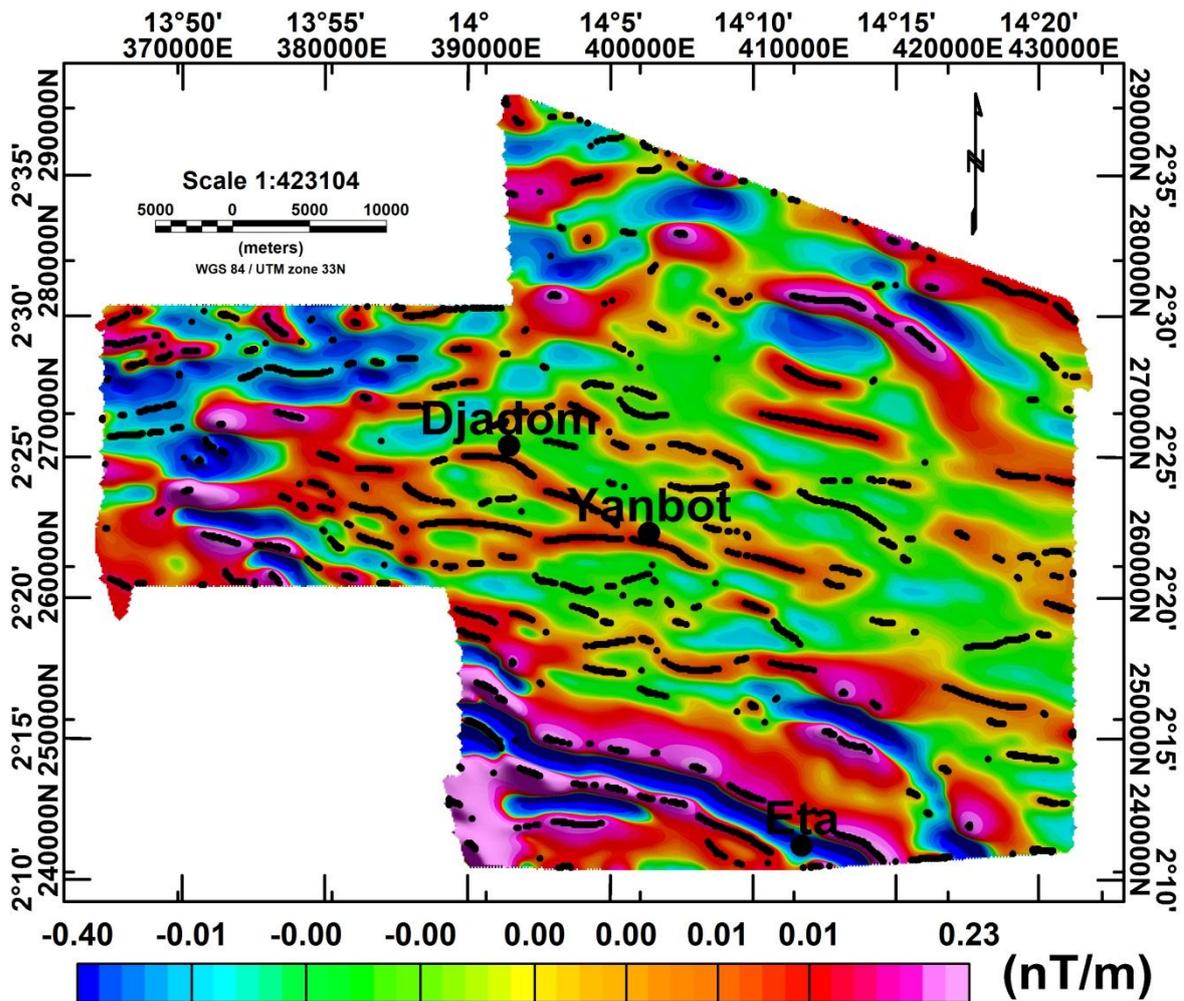


Figure 3.15: Amplitude du Gradient horizontal prolongée vers le haut à une altitude de 750 m et ses maxima (points noirs).

Les contacts linéaires sont marqués. Ces maximas montrent un réseau de failles peu profondes qui n'est pas visible sur la carte géologique.

L'interprétation du résultat de ce filtre aéromagnétique montre plusieurs faciès magnétiques dans cette zone. Les cartes précédentes ont permis d'observer les cassures. Les anomalies positives sont éclatées et disposées selon les faciès. Les structures sont presque W-E à l'ouest de Djadom et WNW-ESE, W-E et WSW-ENE sur le reste de la grille. Ces anomalies positives sont entrecoupées et les maximas ne sont pas continus, ils sont marqués par des ruptures. Ce qui pourrait être interprété comme des fractures dirigées suivant la faille de Djadom.

I.2. 4. Superposition des maxima 750 m sur la résiduelle

Les maximas à 750 m sont également superposés sur la grille résiduelle issue de la différence entre la RTE et la RTE prolongée à 2 km (figure 3.16) pour montrer la corrélation entre les limites des sources peu profondes et les anomalies profondes de la zone d'étude. Cette carte transformée présente une analogie avec la structure géologique du sous-sol de cette zone et aussi une description des zones de contact des formations géologiques et des formations magnétiques. Sur cette carte, la disposition des maximas d'AGH prouve effectivement que le passage des anomalies positives aux négatifs est marqué par un gradient tantôt faible, tantôt fort. Elle met en évidence les zones de gradient sur la grille magnétique.

L'interprétation des maximas donnant plusieurs linéaments magnétiques permet de voir la structure des corps ayant des caractéristiques magnétiques. C'est donc une preuve que cette zone d'étude, située au sud-est du pays est affectée par l'intense activité de la collision entre la formation légère qui est le Panafricain et la formation solide qui est le CC qui n'a pas laissé cette dernière masse indifférente. Suite à cela, plusieurs discontinuités sont marquées. La disposition des maximas sur la IMR (figure 3.16) rejoint les directions susmentionnées et celles indiquées par la carte structurale du tilt angle (figure 3.8) et de la carte de rose de direction (figure 3.12).

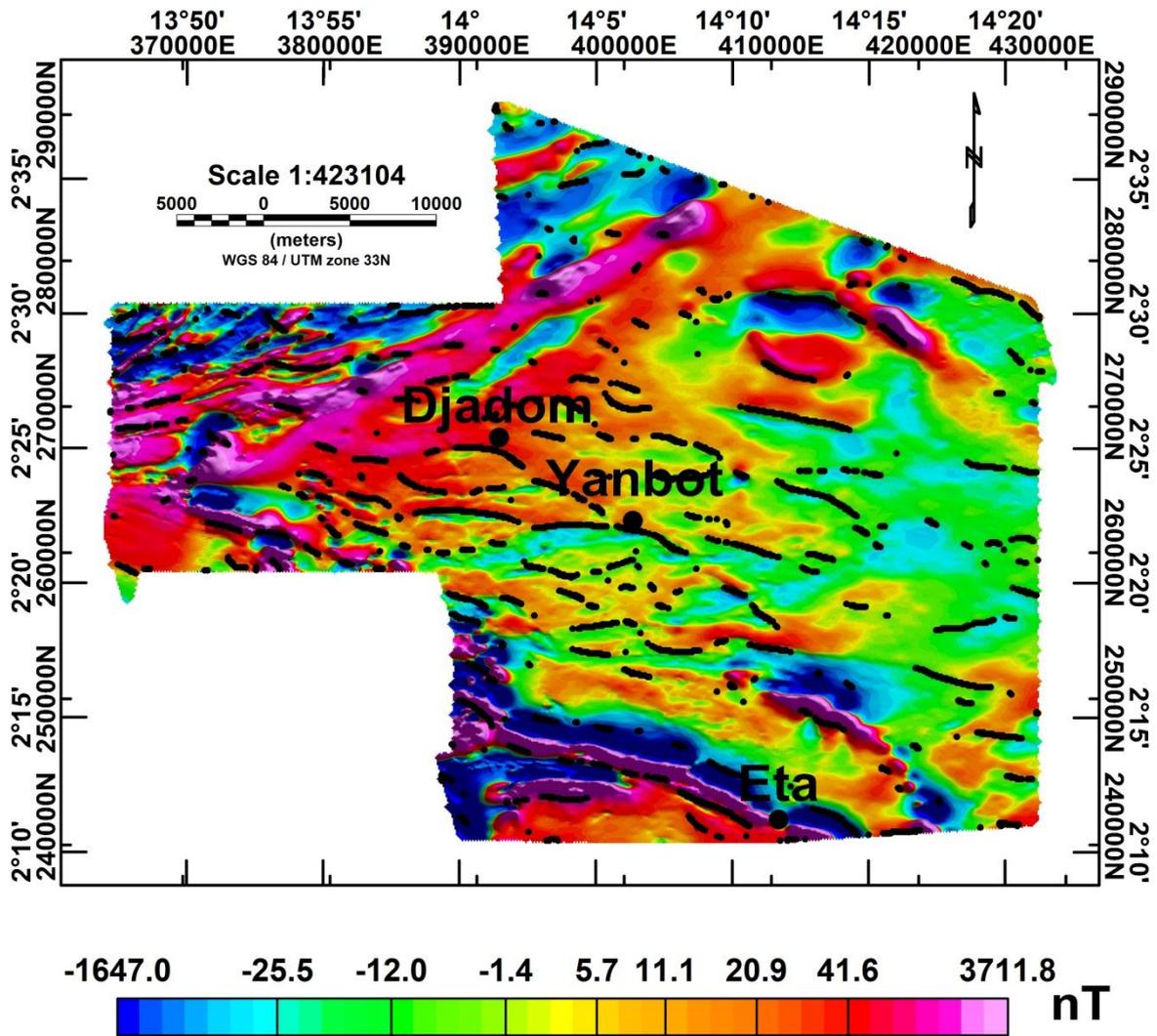


Figure 3.16: Superposition des maximas du AGH de IMR prolongée à vers le haut à l'altitude 750 m sur la résiduelle.

I. 2. 5. Superposition des maximas 1500 m sur la résiduelle

La grille de gradient horizontal de l'IMR prolongée vers le haut à 1500 m présente les amplitudes variant entre $-0,11$ et $0,12$ nT/m. Cette grille montre les structures à une profondeur de 750 m qui est la moitié de l'altitude de prolongement. Comme à la figure 3.17, les maximas superposés sur cette grille corréleront fortement avec les pics des anomalies positives.

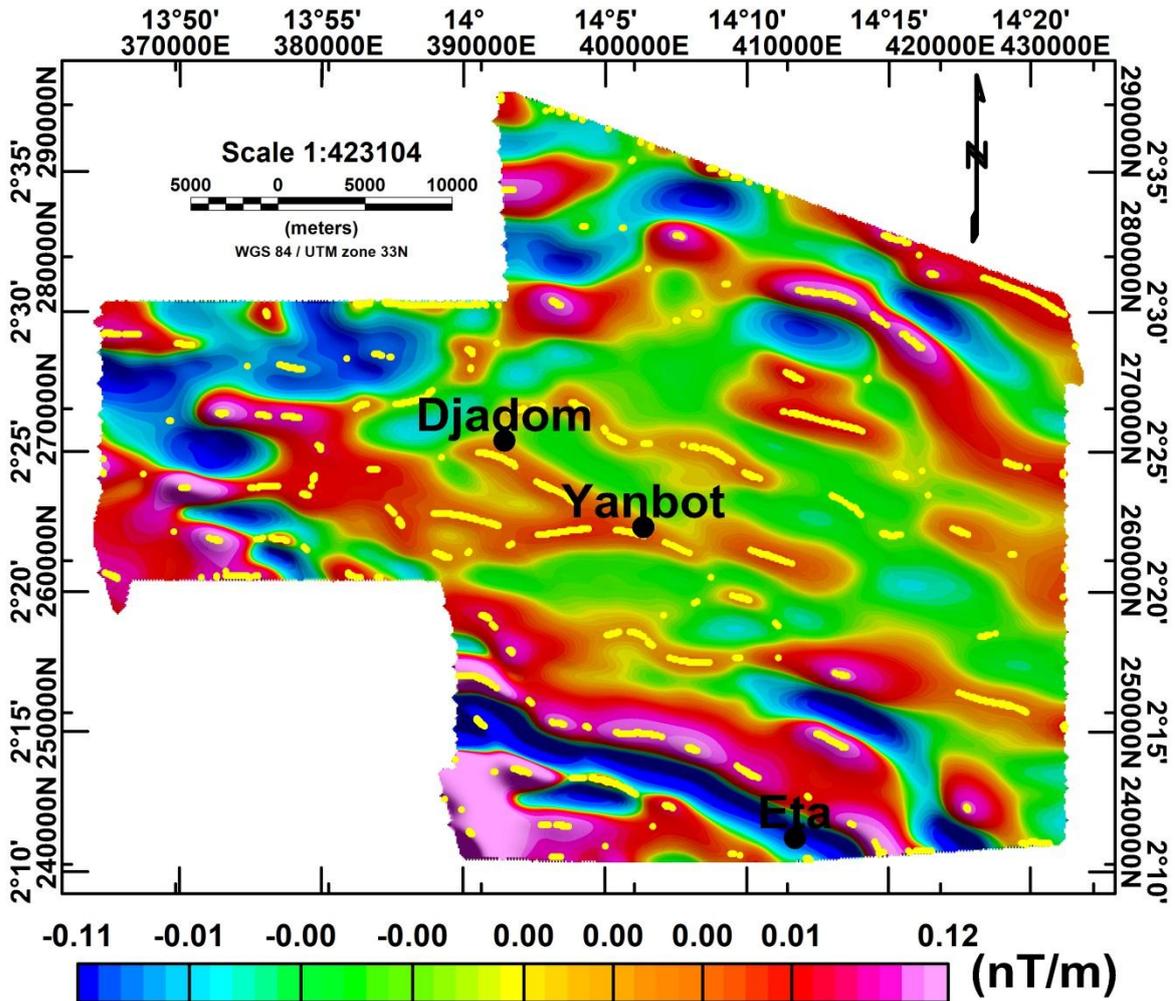


Figure 3.17: Amplitude du gradient horizontal de l'anomalie de résiduelle prolongée à vers le haut à l'altitude 1500 m et ses maximas (points jaunes).

Ces maximas superposés sur la grille résiduelle (figure 3.18) mettent en évidence les zones de gradients magnétiques. La disposition de ces maximas donne la direction des linéaments de la zone d'étude. Ces directions sont entre autres W–E à l'ouest de Djadom puis, WNW–ESE, W–E et WSW–ENE à l'est, comme dans le cas du prolongement vers le haut à 750 m. Cette disposition relevée de même des discordances et des ruptures pouvant être assimilés à des fractures.

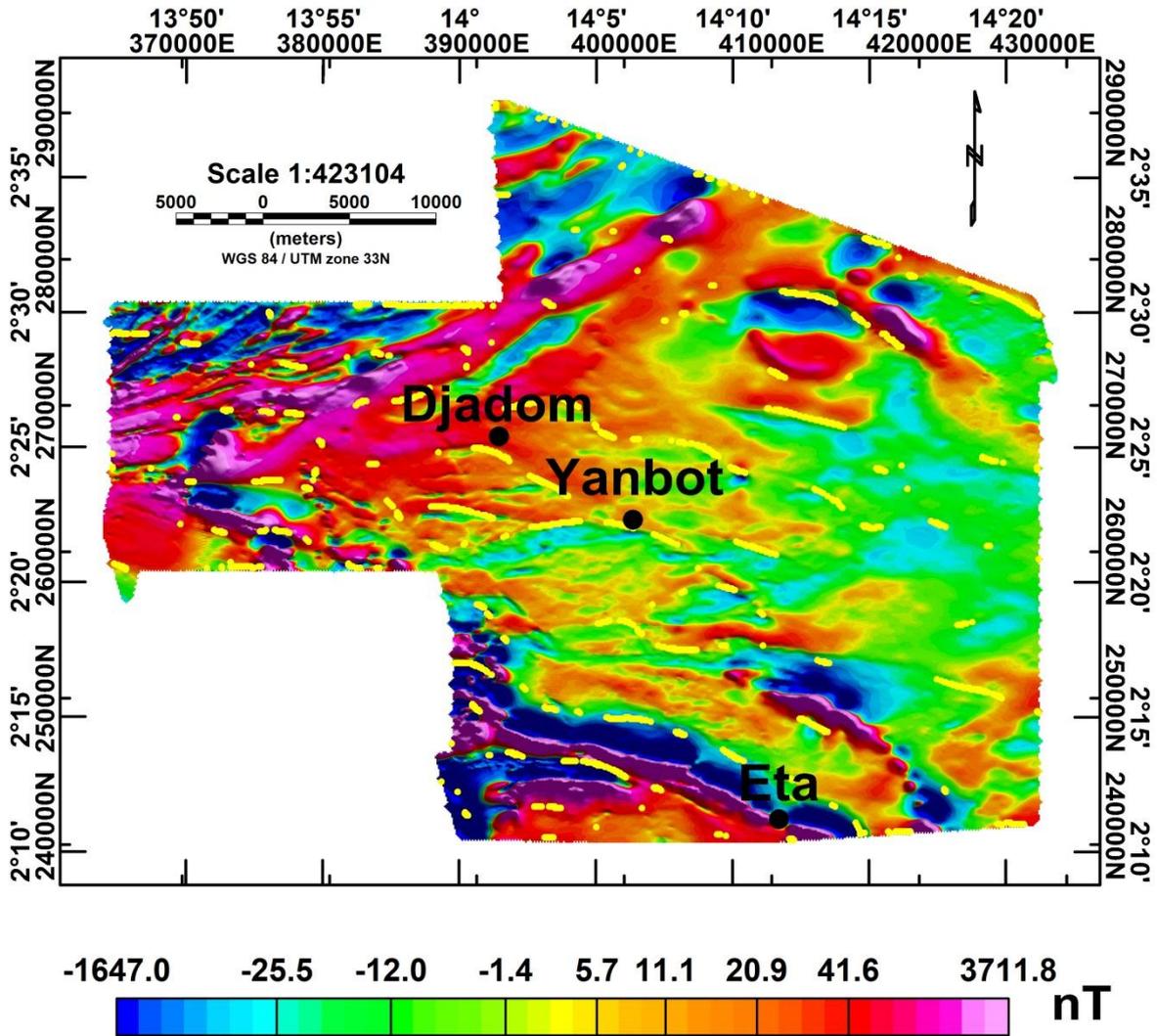


Figure 3.18: Superposition des maximas de l'amplitude du gradient horizontal de la résiduelle prolongée vers le haut à l'altitude 1500 m sur la Résiduelle.

I.2.6. La superposition des maximas magnétiques de 375 à 1875 m de profondeur.

La superposition des maxima magnétiques à des profondeurs de 375 m à 1875 m (figure 3.19) présente une forte corrélation. Comme précédemment, la disposition des maximas sur la grille d'IMR (figure 3.19) ressort les gradients magnétiques. La disposition de ce maxima donne une idée des contacts géologiques de la zone. L'interprétation de ce maxima s'appuie sur cette corrélation.

- Lorsque les maximas à différentes profondeurs sont parallèles et chevauchants (confondus), on note la présence des gradients verticaux.

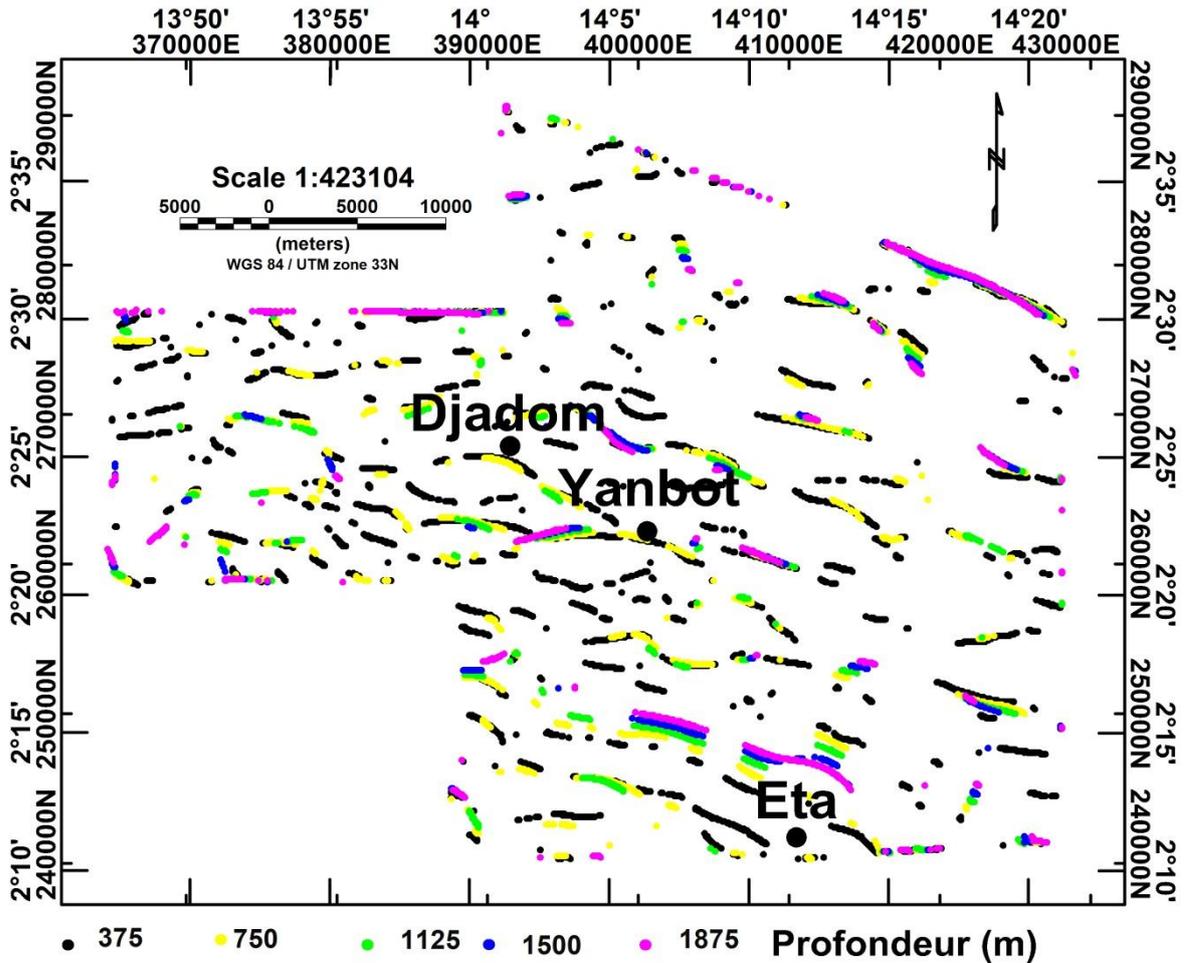


Figure 3.19: Superposition des maxima de l'amplitude du gradient horizontal de la résiduelle prolongée vers le haut de l'altitude 750 à 3750 m.

- Lorsque les maxima à différentes profondeurs sont parallèles et non chevauchants, on note des gradients quasi-horizontaux. Tous ces gradients marquent des linéaments géophysiques de la zone d'étude. Des structures qui tendent dans la même direction sont susceptibles d'être produites par les mêmes processus géologico-tectoniques. Ainsi, il prouve que le modèle structural du sous-sol dans le complexe du Ntem et la couverture du CC est marqué par les linéaments structuraux du socle. Les failles identifiées sont attribuées à l'extension du bassin tectonique du complexe Ntem.

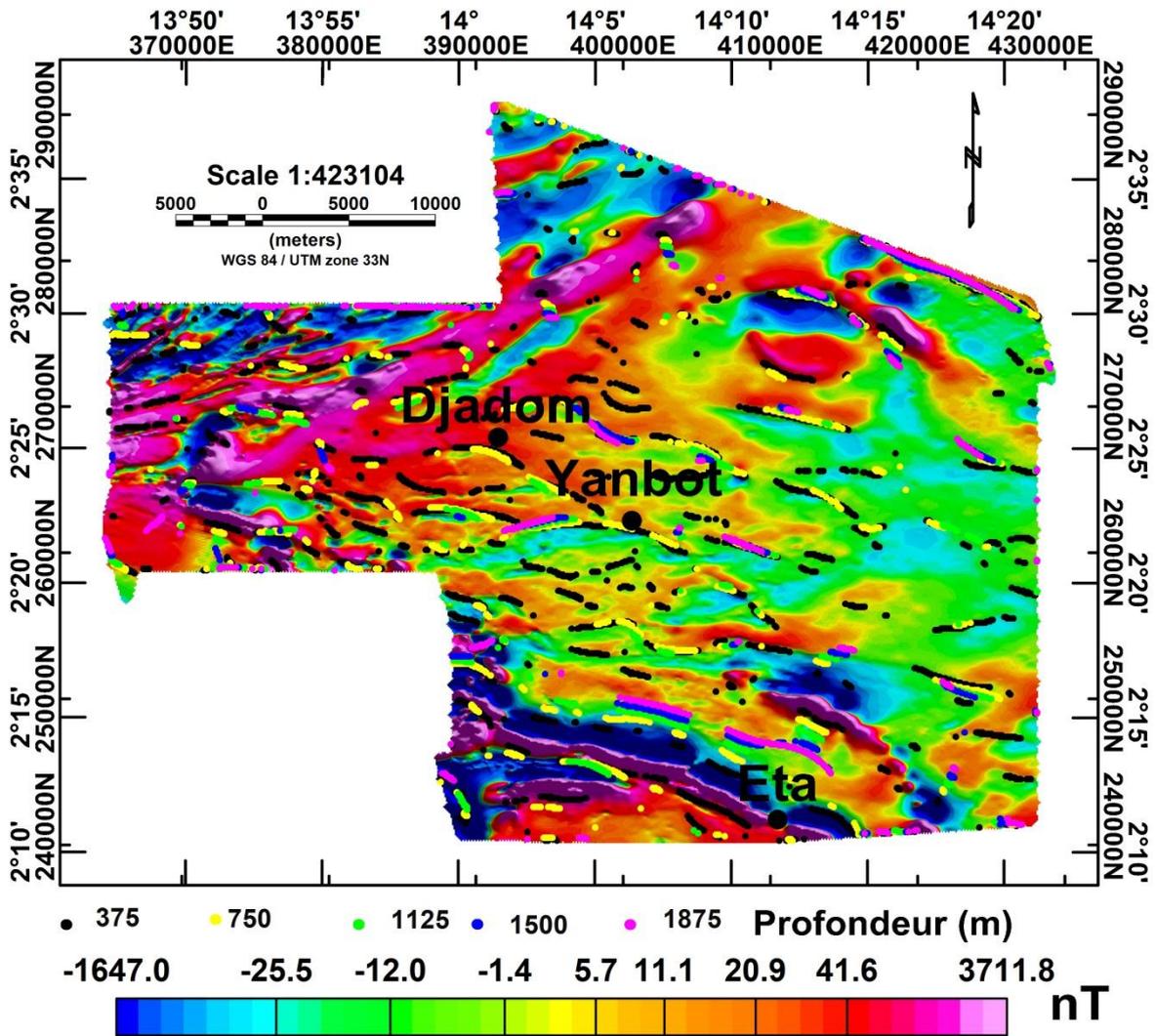


Figure 20: Superposition des maximas de l'amplitude du gradient horizontal de la résiduelle prolongée vers le haut de l'altitude 750 à 3750 m sur la Résiduelle.

I. 2. 7. Linéaments inférés issus des maximas

La disposition des maximas nous permet de tracer les linéaments (figure 3.20). La tendance structurale du sous-sol montre des linéaments et le relief dont leurs dispositions reflètent l'histoire de la structure du sous-sol d'une zone. Il implique que le sous-sol de la zone est influencé par les activités tectoniques. Ces linéaments dont les profondeurs du toit vont à environ 1875 m, sont souvent enfouis sous les formations géologiques. La disposition des linéaments donne trois directions WNW–ESE (axe ETA), WSW–ENE (axe Djadom) et W–E (axe Yanbot). La majorité de ces linéaments corrélient avec ceux relevés en appliquant la méthode du Tilt angle.

Les linéaments sont attribués suivant la tectonique de la couverture du CC et de l'unité du Ntem. Généralement, la tendance discontinue de ces structures faillées présente à certains endroits des ruptures qui pourraient être assimilées à des fractures tectoniques.

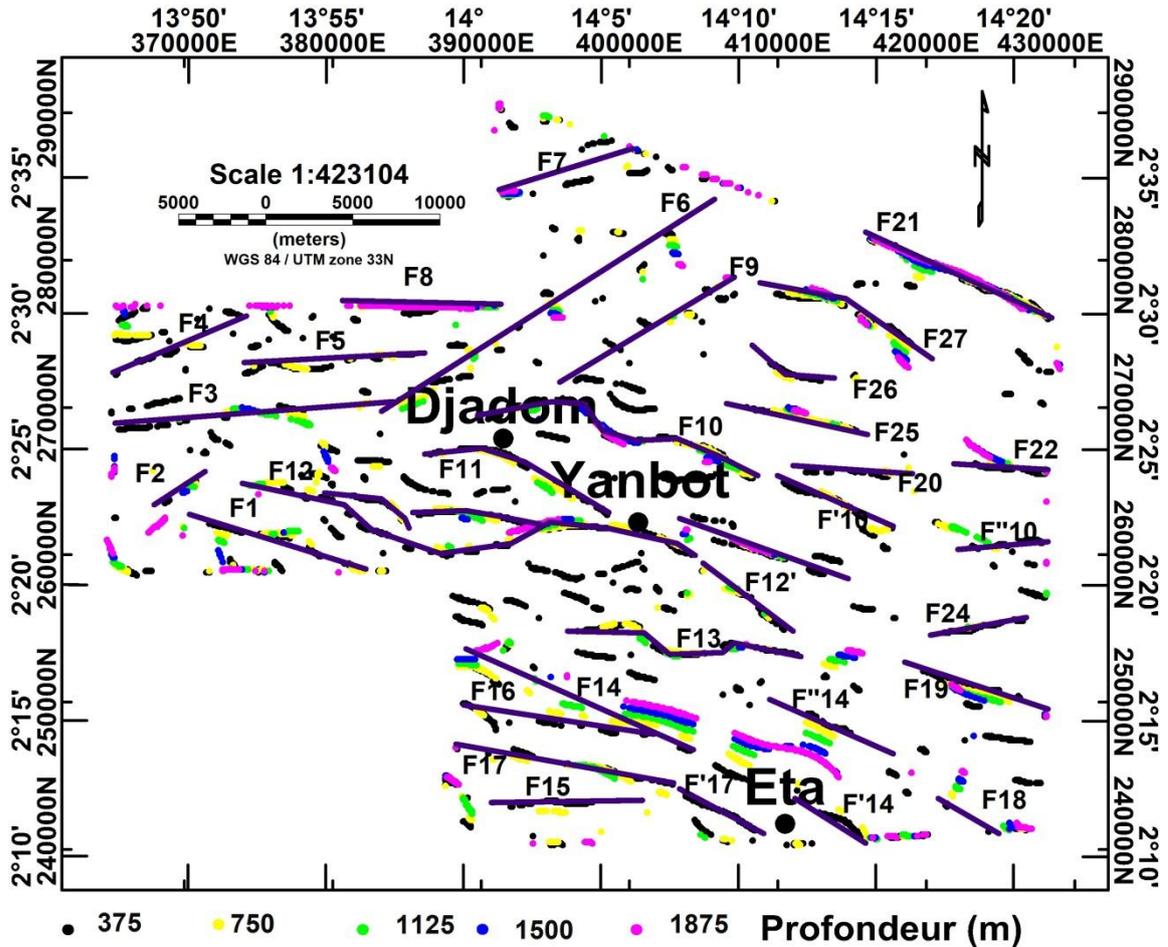


Figure 3.21: Superposition des linéaments sur les maximas de l'amplitude du gradient horizontal de la résiduelle prolongée vers le haut de l'altitude 750 à 3750 m.

L'allure des linéaments le long des axes Yanbot et Eta permet d'observer les contacts ondulatoires marquant les présences des plissotés dans cette zone. Ce qui nous a amené à dire que les mouvements tectoniques ayant affectés cette zone ont comme conséquences la mise en place des fractures, des failles et des plis. En fonction des pendages, on note la présence des linéaments quasi-horizontaux (F14, F19, F3, F19, F27, F9, F6, F18) et les linéaments quasi-verticaux (F1, F12, F16, F17, F7, F21, F26, F25, F23, F11, F10, F13, F20, F8, F5, F24) (tableau 6). Au NE de Yanbot, la disposition des linéaments donne lieu à une faille que l'on pourrait nommer la « Faille du DJA ». Le long de l'axe Eta, on assiste à des linéaments (F14, F16, F17) qui rencontrent des ruptures puis un déplacement (F'14) mettant ainsi en évidence une fracture autour d'Eta. Cet ensemble de structures géologiques sert de canaux de migrations de minerais et à des dispositions stratigraphiques. Donc des modélisations 2.75D et 3D nous permettront de les mettre en évidence.

I. 2. 8. INTERPRETATION QUANTITATIVE : Intérêt des pendages

Le pendage des linéaments est l'angle que forme le plan du linéament et le plan horizontal (El-Wartiti & Zahraoui, 2007). Le sens du pendage est orienté dans le sens de l'inclinaison du linéament. Le pendage est représenté par « T » qui peut ou non finir par une flèche (Figure 3.21) telle que :

- La tête indique la direction (ou l'orientation) du linéament et est mesurée par rapport au nord ;
- La queue indique la direction de la pente du linéament et est mesurée par rapport à l'horizontal.

P : Plan du linéament ;

O'O : Direction du linéament définie par intersection des plans du linéament et l'horizontal ;

H : Plan horizontal ;

α : Valeur angulaire (plus α est grand, plus la pente est forte et inversement).

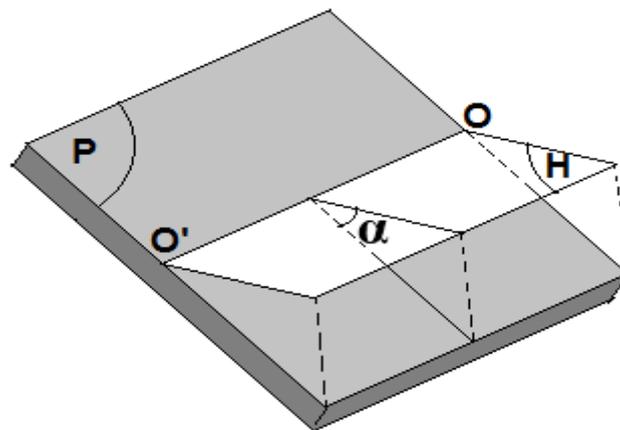


Figure 3.22: Pendage du linéament dans l'espace.

La construction des maxima aide à définir la situation des linéaments par rapport au socle. Il présente avec précision l'orientation du pendage de chaque linéament de la surface jusqu'au socle. La faille peut être le long de cette disposition de maxima. En fonction des pendages et leurs directions, on note les linéaments à pendage inférieur à 40° SW et NW et les linéaments à pendage compris entre 40° et 90° Sud, Nord, SW et NW (figure 3.22). Cette dernière a une signification particulière pour cette étude minière. Car dans les exploitations minières, les forages sont plus facilement réalisés à des points où les pendages sont supérieurs à 40° et inférieur à 90°. Le tableau 5 présente la direction des pendages des linéaments inférés de la zone.

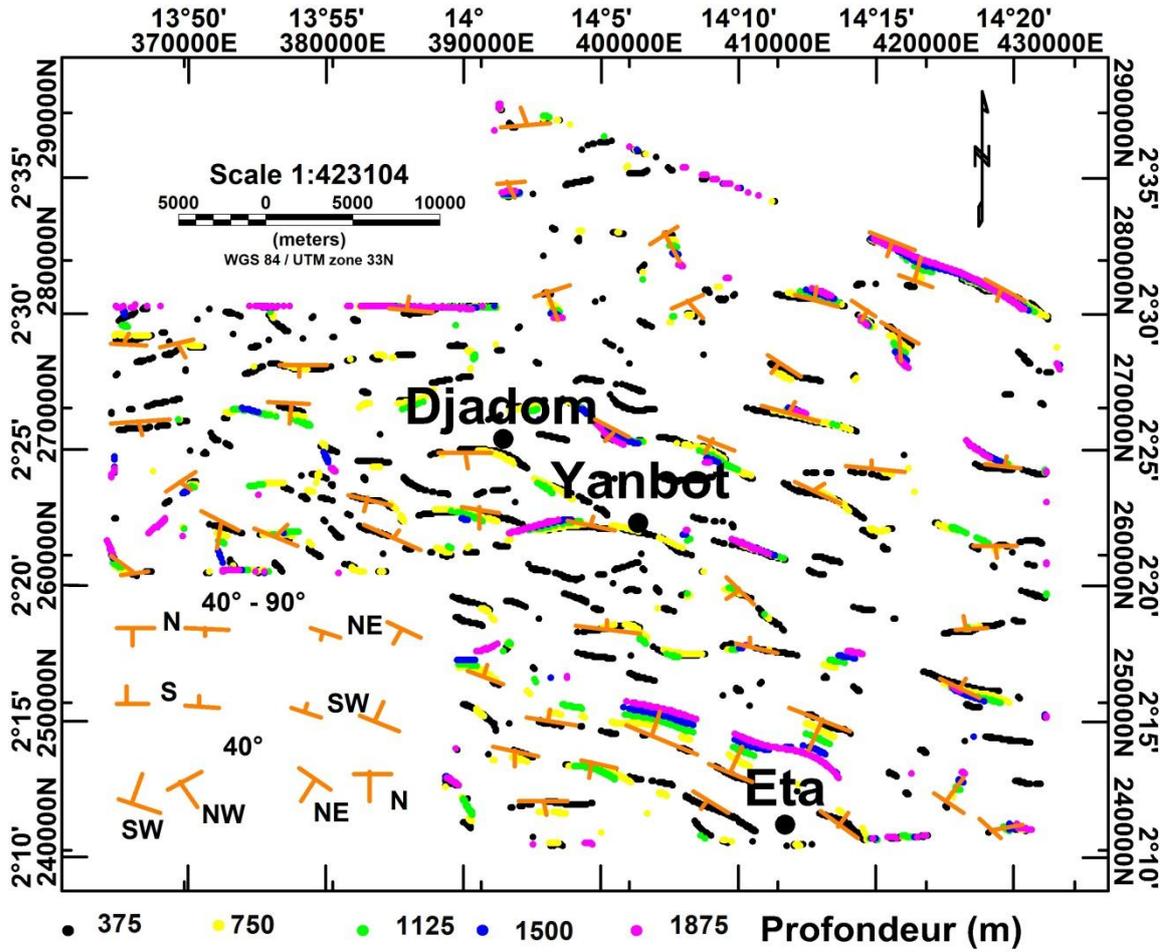


Figure 3.23: Pendage des linéaments superposés aux maximas. Les linéaments à pendage inférieur à 40° SW et NW et les linéaments à pendage compris entre 40° et 90° Sud, Nord, SW et NW

Tableau 5: La direction des pendages de certains des linéaments enfouis dans la zone d'étude.

Qualités de Pendages	Pendages	Directions pendages
Pendages d'intérêts majeure 40° - 90°		Nord
		Nord – Est
		Sud
		Sud – ouest
Pendages d'intérêts mineures 40°		Sud – ouest
		Nord – ouest
		Nord – Est

I. 2. 9. Interprétation quantitative : Zones d'intérêts

La principale observation faite sur la disposition des maxima des figures 3.23 et 3.24 est la forte corrélation entre les linéaments peu profonds et ceux du socle. Ceux-ci suggèrent le lien entre le socle tectonique et la colonne stratigraphiques (sédimentaires). L'analyse de l'extension des linéaments du socle donne une bonne compréhension de la structure géologique qui aboutit à une possible BIF comme l'avait révélé Ndougsa-Mbarga et al. (2012) au sud de cette zone d'étude.

Les informations sur l'extension des linéaments de la zone amplifient la compréhension de l'architecture du bassin géologique. Mais aussi, elles servent de guide dans la recherche des faciés minerais dans une étude de modélisation.

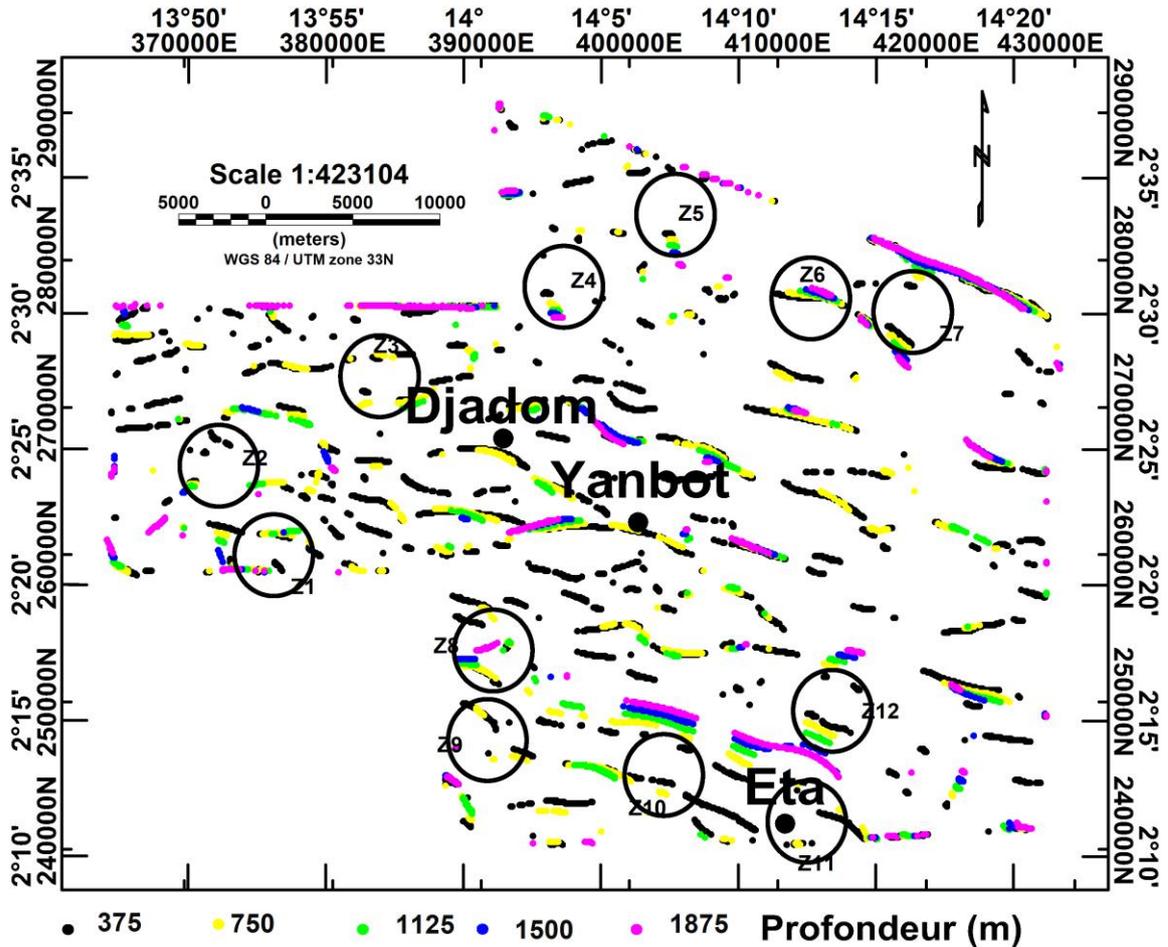


Figure 3.24: Points d'intérêts (cercles) superposes aux maximas.

L'interprétation d'un point probable de forage (zone potentielle de minerai) est basée sur les critères selon lequel Faure (2001) et Takodjou-Wambo et al. (2018): la rencontre des maximas ou le changement de sens de pendage des maximas marquent un point probable de forage. Ces zones sont les endroits où la teneur de la minéralisation est élevée. Ainsi, on a estimé 12 points probables de forages dans cette zone particulièrement repérés aux zones d'anomalies circulaires. Ces points appartiennent aux zones de faiblesse qui sont les zones de discontinuités, de discordances, de cisaillements, de fractures et de failles évoquées dans les paragraphes précédents. Pour avoir une spécificité sur ces points probables et du type de minerais qu'ils regorgent, une analyse basée sur les modélisations 2.75D et 3D sera menée dans la suite du travail.

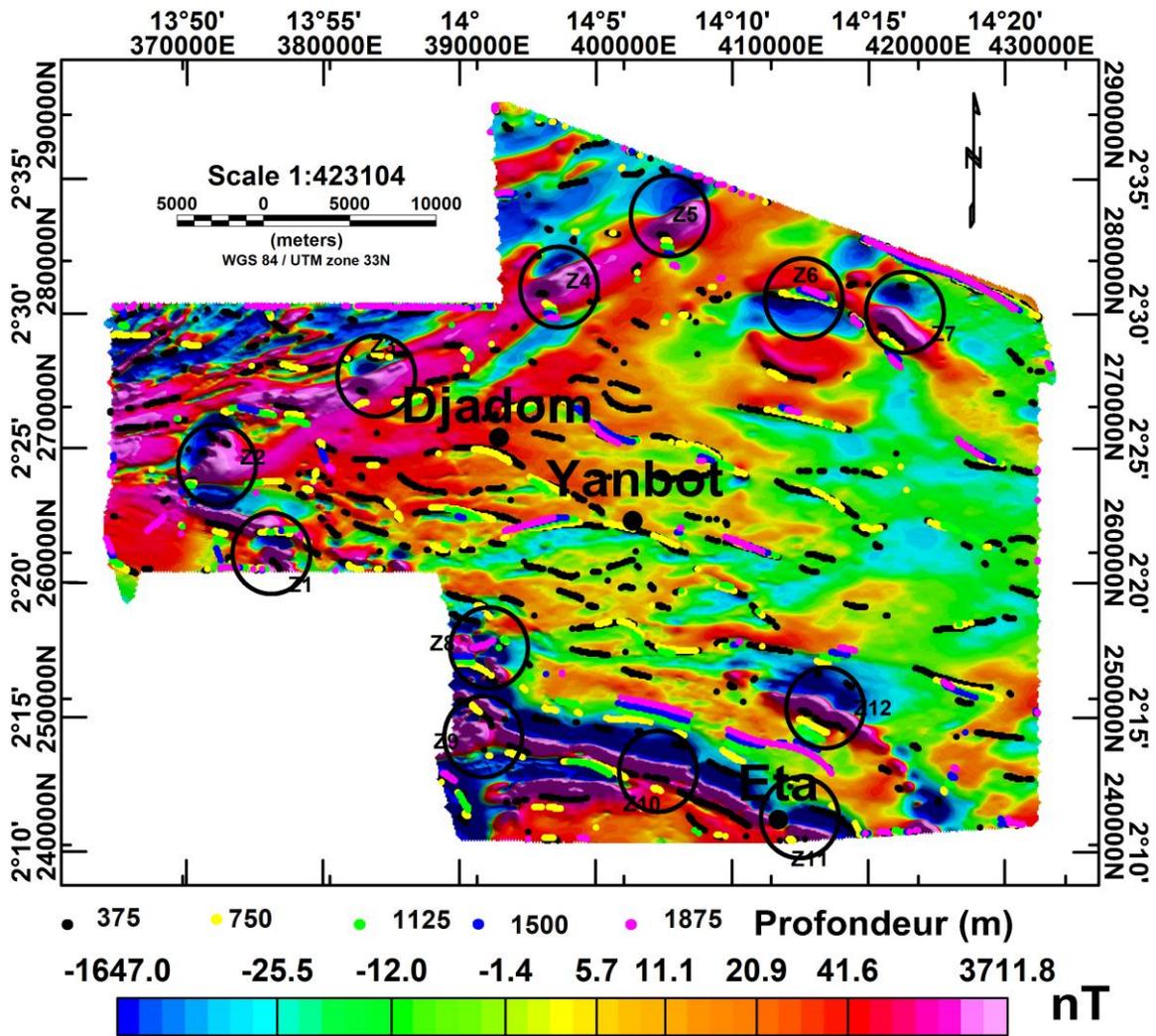


Figure 3.25: Points d'intérêts (cercles) superposés aux maximas et sur la grille de la résiduelle.

I. 3. SIGNAL ANALYTIQUE

La figure 3.26 représente la grille du signal analytique de l'anomalie du champ total. L'amplitude du signal analytique varie de 0,00 nT/m à 48,95 nT/m. Les amplitudes maximales sont concentrées au sud, à l'ouest et au nord de la grille. Celles-ci marquent ainsi la réponse d'un socle fortement magnétique. La disposition linéaire de ces amplitudes positives rappelle les grandes structures linéaires observées sur les grilles de l'anomalie de TMI, RTE, IMR, AGH et tilt. Aussi, la déconvolution d'Euler et les maximas d'AGH l'ont relevé. Ainsi, cette grille de signal analytique délimite bien les contacts des corps géologiques de fortes aimantations donc certaines sont ciblées (voir cercles) sur cette grille.

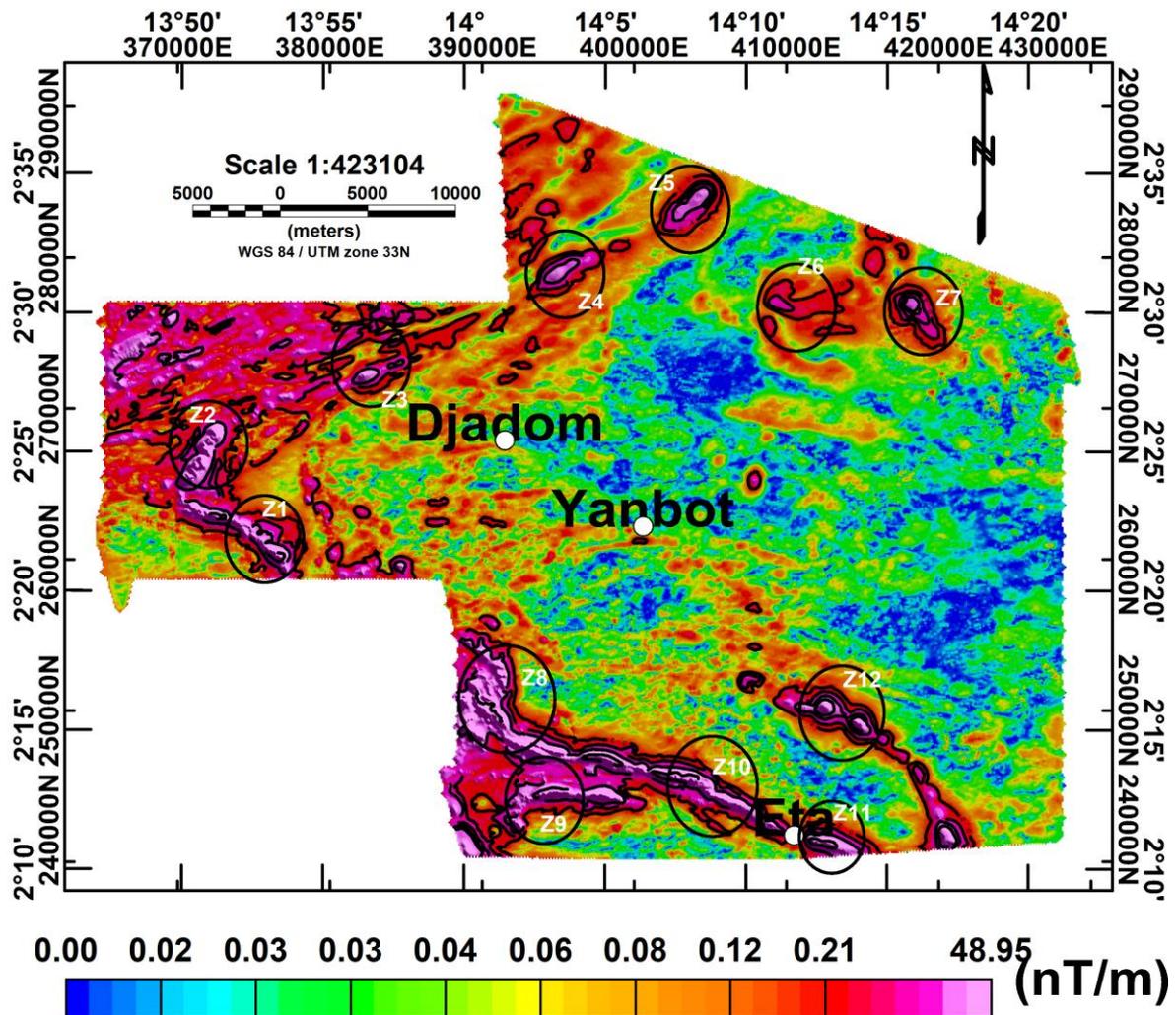


Figure 3.26: Signale Analytique avec les 12 points potentiels d'intérêts (cercles) situés à des zones fortes amplitude du signe analytique.

I.4. MODELISATION 2.75 D

La modélisation nécessite la connaissance des directions des linéaments, la géométrie des anomalies et la profondeur des toits des sources. Ainsi par les analyses qualitatives, les linéaments et les formes des anomalies ont été mis en évidence. Puis, par les analyses quantitatives les profondeurs des toits des sources sont estimées à environ 300 m pour la méthode de la variation de l'angle d'inclinaison, 600 m pour les solutions d'Euler et 1875 m pour les maxima de l'amplitude du gradient horizontal. Le choix des profils sont tels qu'ils sont perpendiculaires aux linéaments traversant l'anomalie à modéliser et aussi à l'axe de l'anomalie. Chaque profil traverse une anomalie d'amplitude environ 2711,8 nT. L'immense anomalie négative de part et d'autre des anomalies coupées suggère qu'elles pourraient indiquer la présence de plis géologiques.

Tableau 6: Synthèse structurale (direction des failles, failles, pendages, valeur des angles de pendage, orientation et zones d'intérêt).

Direction des failles	Failles	Pendages	Valeur Pendages	Orientations	Zones d'intérêt
ESE - WNW	F1	Quasi-vertical	40° – 90°	SW	Z1
	F17	Quasi-vertical	40° – 90°	N, S	Z9
	F21	Quasi-vertical	40° – 90°	NE, SW	Z7
	F'14	Quasi-vertical	40° – 90°	SW	Z12
	F14	Quasi-Horizontal	<40°	SW	Z8, Z10
	F''14	Quasi-Horizontal	<40°	NE	Z11
	F16	Quasi-Horizontal	<40°	SW	Z8, Z9
	F27	Quasi-Horizontal	<40°	SW, N	Z6, Z7
	F18	Quasi-Horizontal	<40°	SW	Z12
E - W	F12	Quasi-vertical	40° – 90°	N, S	
	F23	Quasi-vertical	40° – 90°	SW	
	F24	Quasi-vertical	40° – 90°	S	
	F25	Quasi-vertical	40° – 90°	S	Z6
	F10	Quasi-vertical	40° – 90°	N, NE	Z3
	F26	Quasi-vertical	40° – 90°	NE	Z6, Z7
	F20	Quasi-vertical	40° – 90°	S	
	F22	Quasi-Horizontal	<40°	S	
	F11	Quasi-Horizontal	<40°	N, NE	Z3
OSO - ENE	F3	Quasi-vertical	40° – 90°	N	Z2
	F7	Quasi-vertical	40° – 90°	N	Z4
	F4	Quasi-vertical	40° – 90°	NW	Z2
	F2	Quasi-vertical	40° – 90°	SE	Z1, Z2
	F5	Quasi-vertical	40° – 90°	S, N	Z3
	F6	Quasi-Horizontal	<40°	SE	Z4, Z5
	F9	Quasi-Horizontal	<40°	NE	Z5, Z6

La modélisation s'appuie sur les paramètres tels que les moyennes de l'inclinaison (-22,78°), la déclinaison (-1,08°) et l'IRGF (33168,12 nT). La variation des amplitudes des anomalies magnétiques est une réponse des corps magnétiques et du socle (Gunn et al., 1997 ; Yandjimaïn et al., 2017). On constate effectivement que l'allure des profils reflète le modèle des corps et du socle. La lithologie de la zone d'étude est constituée du

sédiment, du sol, de la latérite, de l'argile, du quartz micaschiste, du quartz, de la roche verte, du schiste, du Fer rubané (FR) ou BIF, fer rubané quartzite (FRQ) OU BIQ, de l'amphibole, du gneiss.

I.4.1. Profil 1

Le profil P1 (Figure 3.27) a une longueur de 4844,83 m, de direction NE–SW, d'allure convexe et d'amplitude variant entre 0 et 350 nT. Cette allure s'accompagne avec celle de la dernière couche qui se présente sous forme d'un bassin induit par une remonté au centre. Le modèle du sous-sol est réalisé avec une erreur de 8,07 présente des couches géologiques suivantes : la 1^{ère} couche et la dernière (socle), la couche intermédiaire donc deux (2) couches au centre et une (1) aux extrémités. La première couche (couche sédimentaire) est épaisse dans certaines zones dans les localités situées à 1274 m et à 3741 m du profil. De part et d'autre la couche intermédiaire du modèle est une roche riche en roche verte de susceptibilité 0,00165 cgs. Puis la 1^{ère} couche intermédiaire au centre du profil est riche en magnétite de susceptibilité 0,03 cgs formant ainsi un Fer rubané (BIF : Banded Iron Formation) d'une extension latérale de 2971 m, plus épais au SW, moyennement épais au NE, puis faiblement épais au centre. Ensuite la seconde couche intermédiaire est une amphibolite de susceptibilité 0,0006 cgs formant une formation AM (Amphibole) en forme d'un arc recouvrant le gneiss. La dernière couche est le gneiss de susceptibilité 0,0011 cgs.

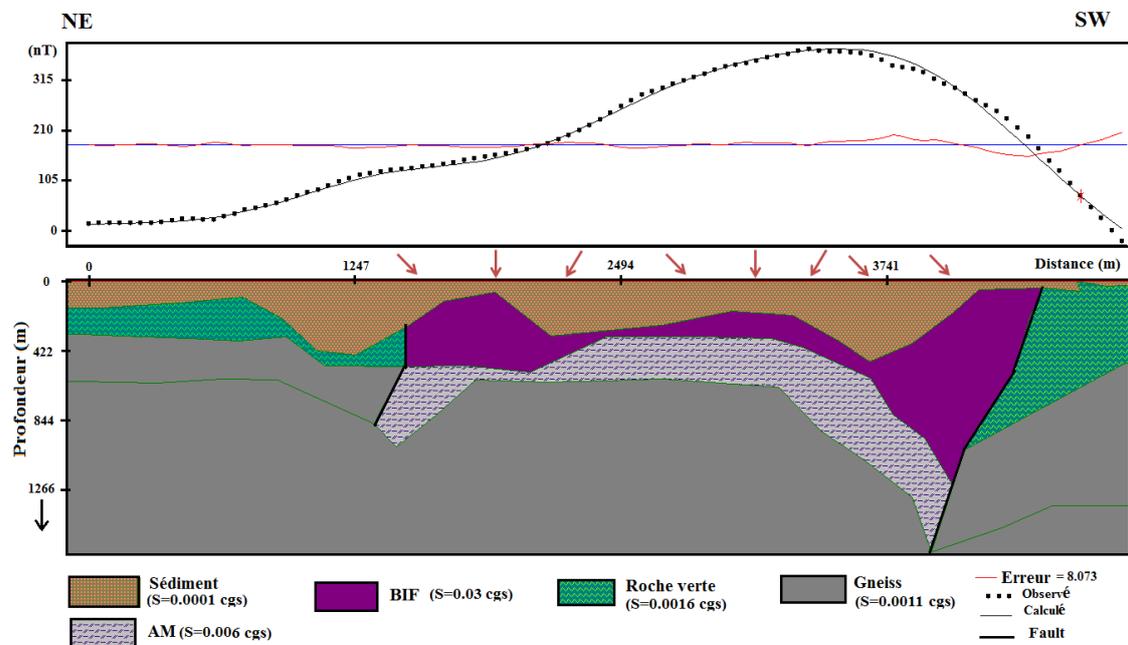
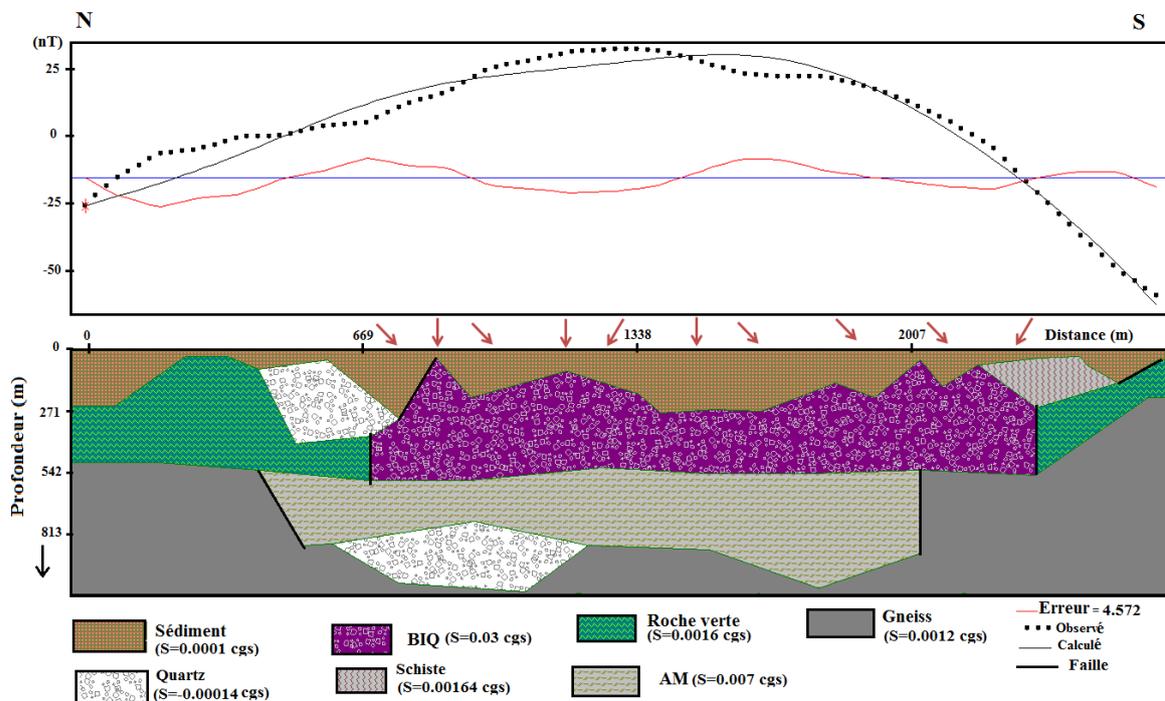


Figure 3.27: Profil 1 et modèle. Banded Iron Formation (BIF), Amphibole (AM), S =Susceptibilité, les flèches sont les points probables de forages.

I.4.2. Profil 2

Le profil P2 (Figure 3.28) a une longueur de 2598,75 m, de direction N–S, une allure convexe, et l’amplitude varie entre -59,68 et 32,70 nT. Ce modèle est réalisé avec une erreur de 4,53 et présente des couches géologiques suivantes : la 1^{ère} couche et la dernière (socle), la couche intermédiaire donc deux (2) couches au centre et une (1) aux extrémités. La différence entre ce profil et le précédent est qu’il y a deux intrusions de quartz de formes ovoïdales, de direction N–S et situés au Nord et une formation schisteuse de direction N–S au sud. La 1^{ère} couche est la couche sédimentaire de susceptibilité 0,0001 cgs. Les extrémités de la couche intermédiaire du modèle sont riches en roche verte de susceptibilité 0,02 cgs. Puis les couches intermédiaires au centre du modèle sont riches en magnétite contenant le quartz de susceptibilité 0,03 cgs formant ainsi une formation appelée fer rubané (BIQ : Banded Iron Quartz) d’une extension latérale de 1626 m de forme plus allongée, de profondeur variante entre 27 m et 559 m soit une épaisseur 532 m. La seconde couche intermédiaire est une amphibolite de susceptibilité 0,00067 cgs appelée AM de forme linéaire d’extension latérale entre 430 m et 2026 m, soit une longueur de 1596 m et une profondeur entre variant 513 m et 1040 m, soit une épaisseur de 527 m. La dernière couche est riche en gneiss de susceptibilité 0,00125 cgs.



I.4.3. Profil 3

Le profil P3 (Figure 3.29) a une longueur de 15 430,55 m de direction N–S et a l’allure d’une cavité à bord allongé et d’amplitude variant de -190,27 nT à 75 nT. Cette allure s’accompagne avec l’allure du socle qui présente des alternances de remonté. Le modèle du sous-sol est fait avec une erreur de 8,886 et présente cinq couches géologiques : La première couche est la couche sédimentaire ; la deuxième est riche en grès de susceptibilité 0,02 cgs ; La troisième est une encaissante donc les extrémités sont riches en roche verte de susceptibilité 0,0016 cgs, puis le centre, riche en magnétite de susceptibilité 0,035 cgs formant ainsi le FR avec une intrusion de la magnétite quartzite formant le BIQ de susceptibilité 0,03 cgs. Ces FR et FRQ ont de profondeur allant de 286 m à 1284 m et d’extension latérale de 3919 m à 13150 m soit une longueur de 9209 m. La quatrième couche est riche en amphibole de susceptibilité 0,007 cgs formant une AM. Et la dernière est riche en gneiss de susceptibilité 0,0012 cgs.

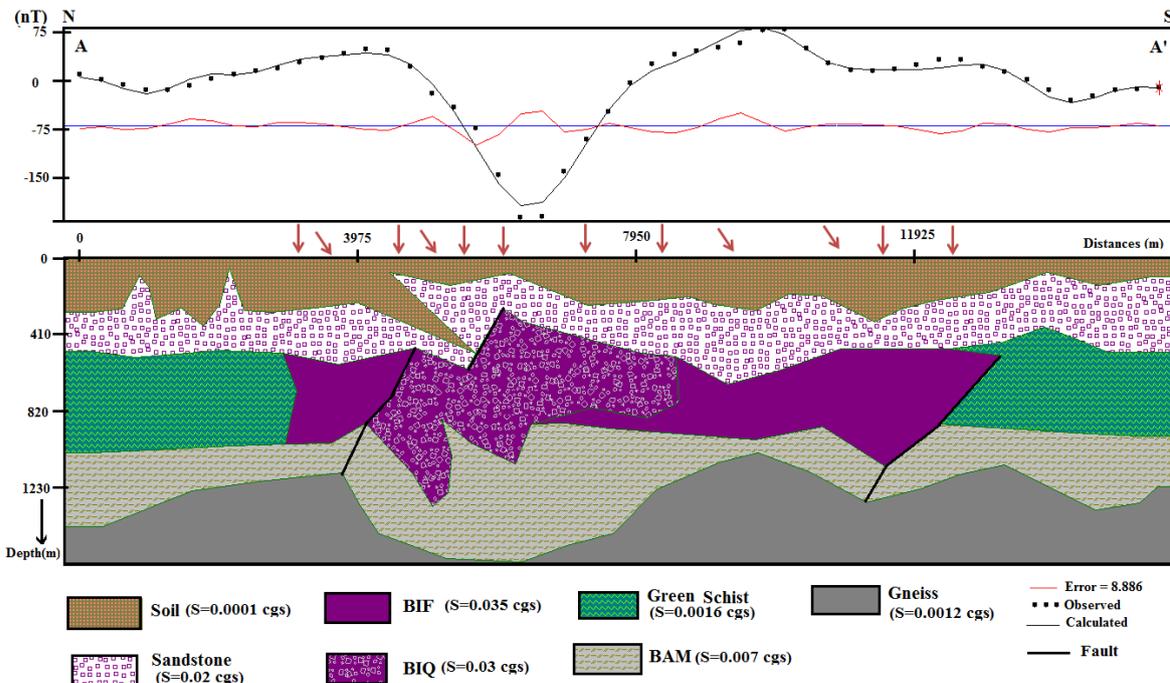


Figure 3.29: profile 3 et modèle. Fer rubané (BIF), Fer rubané Quartzite (BIQ), Amphibole (AM), S=Susceptibilité, les flèches sont les points probables de forages.

I.4.4. Profil 4

Le profil P4 (Figure 3.30) a une longueur de 12 330,72 m, de direction NW–SE, d’allure presque sinusoïdale à bord atténué et d’amplitude variant entre -140,95 à 294,21 nT. Cette allure laisse voir un socle attaqué formant des remontés. Le modèle du sous-sol est fait avec une erreur de 9,03 et présente trois couches géologiques. La première est La couche sédimentaire, la deuxième est une encaissante donc les extrémités sont riches en

roche verte de susceptibilité 0,00167 cgs, puis le centre, riche au NW du Quartz Micaschiste de susceptibilité 0,0014 cgs et au SE de la magnétite de susceptibilité 0,04 cgs formant ainsi le BIF en dent de sic. On note une intrusion du quartz de susceptibilité 0,0014 cgs et de grès de susceptibilité 0,021 cgs. Ce BIF a une profondeur allant de 343 m à 1203 m, soit une épaisseur 860 m et une extension latérale de 4740 m. La troisième est une amphibolite de susceptibilité 0,0071 cgs formant une AM. Ce profil présente un gradient très dressé qui affecte le socle et touche presque toutes les couches, marquant ainsi la présence de la « Faille de Djadom ». Ces intrusions quartzite et grèssique sont des filons de quartz et de grès.

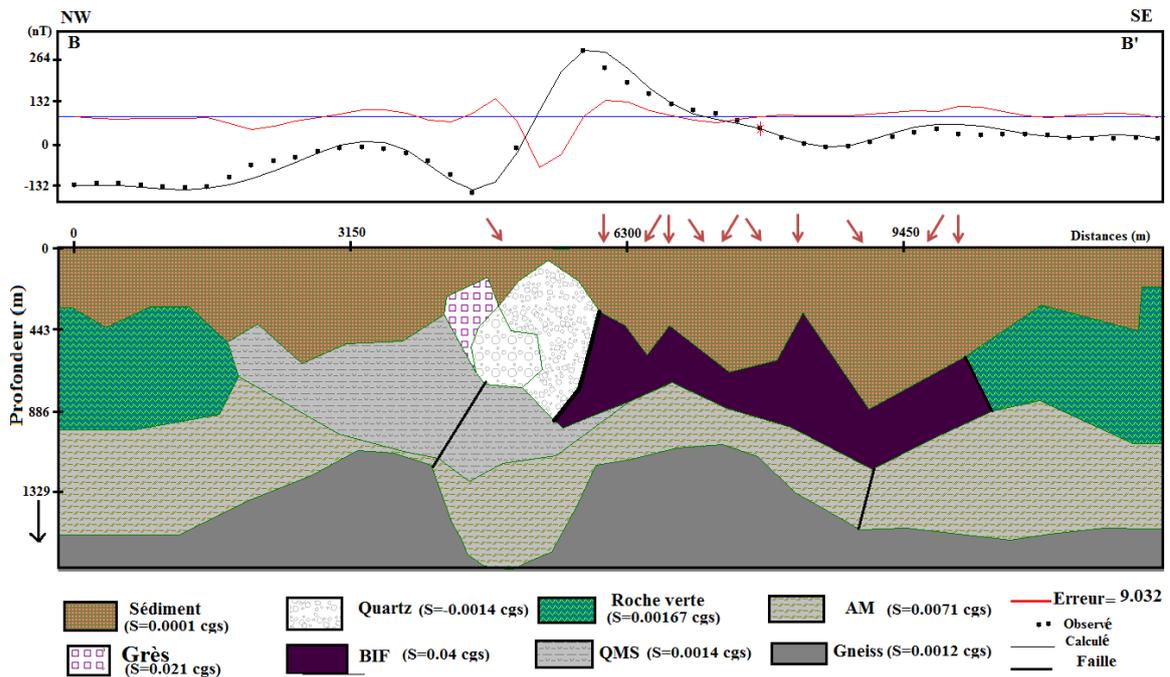


Figure 3.30 : Profil 4 et modèle. Fer rubané (BIF), Quartz Mica-Schist (QMS), Amphibole (AM), S=Susceptibilité, les flèches sont les points probables de forages.

I.4.5. Interprétation des profils

Le socle de la zone affectée présente des dômes qui seraient dûs aux importantes déformations verticales. Ces dômes gneissiques épaissent dans le socle sont des corps métamorphiques. On note un déplacement horizontal (N-S) sur les profils entre la formation rubanée (FR) et l'Amphibolite. Il pourrait être dû au déversement de la nappe du groupe de Yaoundé sur la couverture nord du CC, sur la série d'Ayina et du complexe du Ntem. C'est donc une conséquence de l'intense activité de collision entre le Panafricain et le CC. D'où la présence du chevauchement qui limite les trois formations géologiques (Couverture nord du CC, la série d'Ayina et le groupe de Yaoundé) dans cette zone d'étude. Des observations sur les modèles géologiques permettent de comprendre pourquoi

la carte géologique de la zone présente des formations géologiques issues de la nappe du groupe de Yaoundé et des formations issues de la série d'Ayina et du CC. Ces résultats sont liés à une subduction continentale, suivie d'une collision entre ces trois formations. D'où la formation des réseaux de failles dans cette zone indiquant la direction du transport des nappes. Le sens du déplacement est celui de l'empilement des gradients magnétiques et aussi confirme le sens des pendages à ces zones.

Géologiquement, ces profils permettent de voir que cette zone d'étude a un teneur en magnétite importante car les couches formées du FR et FRQ sont les plus importantes de par leurs intrusions et leurs extensions dans les roches vertes.

Les intrusions des quartzites et de grèssique (profil 4) forment ainsi les filons de quartz et de grès. L'AM observé est de quelques mètres (profils 1 et 2) voir quelques kilomètres (profils 3 et 4) dans le gneiss. D'après les données géologiques (Van de hand, 1986) ce type d'amphibole est un amphibole verte.

Toutes ces formations géologiques pourraient être une conséquence de la recristallisation magmatique. Cette modélisation 2.75D montre une proche corrélation entre les données géologiques et les données magnétiques. Les FR et FRQ sur les modèles géologiques sont responsables des réponses des anomalies positives. Le BIF obtenu vient compléter celui obtenu par Biyiha et al. (2013) au nord-ouest de la zone d'étude, par Feumoé et al. (2012), Ganno et al. (2018) et Teutsong et al. (2017) à l'ouest de la zone d'étude.

On constate bien que sur l'axe Eta, le champ magnétique est beaucoup plus intense que sur l'axe Djadom. Cette différence pourrait être due à la colonne sédimentaire qui est beaucoup plus important le long de l'axe Djadom, car la couche sédimentaire est plus épaisse le long de cet axe.

I.5.Modélisation 3D

Le modèle 3D est conçu pour mieux observer et identifier les formations importantes de la zone, les informations géologiques et géophysiques obtenues précédemment en appliquant les méthodes d'approches et d'évaluations.

Pour mettre l'accent sur les zones d'intérêt ciblées précédemment et confirmer les résultats de l'inversion 2.75D, une inversion 3D est faite. Elle permet de convertir les données géophysiques (aéromagnétiques) en image 3D. L'intérêt de cette inversion 3D est de voir la distribution des susceptibilités afin de mieux observer les zones de fortes et de faibles magnétisations. C'est un modèle important dans la recherche des formations ferrières. La grille de l'intensité résiduelle (IMR) est celle qui présente plus en détail des

anomalies magnétiques permettant d’observer avec une précision acceptable les réponses des corps souterrains. Pour cette raison le VOXI Earth Modelling est appliqué sur cette grille d’IMR et donne les figures 3.31, 3.32 et 3.33. Cette inversion 3D est obtenue en intégrant les paramètres obtenus par les méthodes d’approches précédemment. Ces paramètres sont entre autres la profondeur à près de 6 km, la moyenne de l’inclinaison et de la déclinaison de valeurs $-22,78^\circ$ et $-1,08^\circ$ respectivement.

I.5.1. Distribution 3D complète des susceptibilités magnétiques

La figure 3.31 est le VOXI complète des données aéromagnétiques de la RMI qui permet d’observer en 3D la distribution des données à une profondeur allant à plus de 6 km environ. Cette distribution donne des valeurs de susceptibilité variant de $-0,0396$ cgs et plus de $0,0303$ cgs. En fonction des contrastes de susceptibilités, ce modèle présente quelques points où l’intensité de l’anomalie du champ est intense et ceux moins intenses. Par exemple à la colonne verticale d’abscisse $X = 390\,000$ m laisse voir à sa droite un fort contraste de susceptibilité et à sa gauche un faible contraste de susceptibilité magnétique. D’où le modèle ressort bien le caractère bipolaire des anomalies des champs magnétiques dans cette zone.

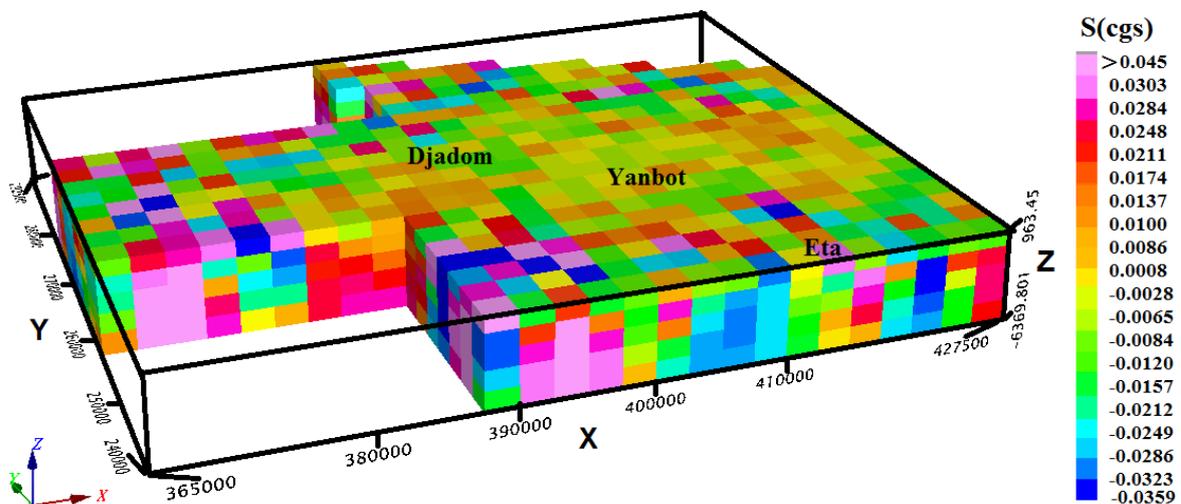


Figure 3.31: Distribution 3D des susceptibilités magnétiques jusqu’à plus de 6 km de profondeurs. Cette distribution sort le caractère dipolaire.

I.5.2. Distribution 3D de forte magnétisation

La figure 3.32 du VOXI de l’IMR présente les différents dômes magnétiques qui sont les zones de moyennes et de forts contrastes de susceptibilités supérieures à $0,0100$ cgs. Ces zones de forts contrastes s’observent parfaitement sur la figure 3.32 avec des susceptibilités supérieures à $0,0284$ cgs et sont localisées exactement à des endroits où des points d’intérêts ont été ciblés et où les profils ont été modélisés. Il permet de dire que, de

telles zones sont des points de fortes magnétisations. La zone d'étude étant située sur la bordure nord du CC, elle est caractérisée par les chlorite-schistes, les schistes à biotite, les gneiss métamorphosé devenu magnétique, les amphibolites, les roches vertes. Celles-ci intègrent les formations donnant lieu à des hématites.

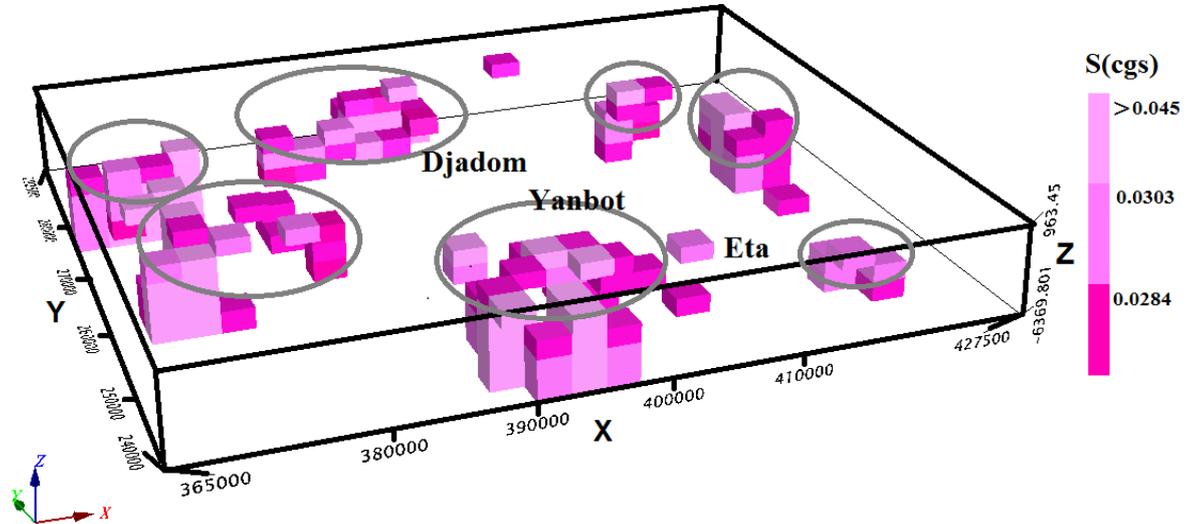


Figure 3.32: Distribution 3D jusqu'à plus de 6 km de profondeur des corps de forte magnétisation caractéristique des anomalies positives.

Vu le taux de répartition des moyens et forts contraste de susceptibilité, celle-ci pourrait être une zone d'importante des formations de fers rubanés (BIF) et des formations de fers rubanés quartzites (BIQ) sur les modèles obtenus par modélisation 2.75D. Ce modèle d'inversion 3D met en évidence d'importants volumes de gisements de magnétisation forte. Par exemple à la colonne verticale d'abscisse $X = 390\,000$ m laisse voir à sa droite un fort contraste de susceptibilité magnétique. Ainsi cet exemple de point pourrait être un point de potentielle minéralisation ferrifère.

I.5.2. Distribution 3D de faible magnétisation

Le caractère dipolaire étant bien observé, la présence des zones dont l'intensité de l'anomalie magnétique est très faible et de contraste de susceptibilités inférieures à $-0,0286$ cgs permet de dire que ces zones de faibles susceptibilités. Les zones vides sur cette figure 3.33 sont celles précédemment occupées par les forts contrastes de susceptibilités magnétiques. Par exemple à la colonne verticale d'abscisse $X = 390\,000$ m laisse voir à sa gauche un faible contraste de susceptibilité magnétique. La figure 3.33 ressort les failles de Djadom, d'Eta, et du Dja qui sont déjà mises en évidence par la variation de l'angle d'inclinaison (tilt angle), la déconvolution d'Euler et l'amplitude du gradient horizontal.

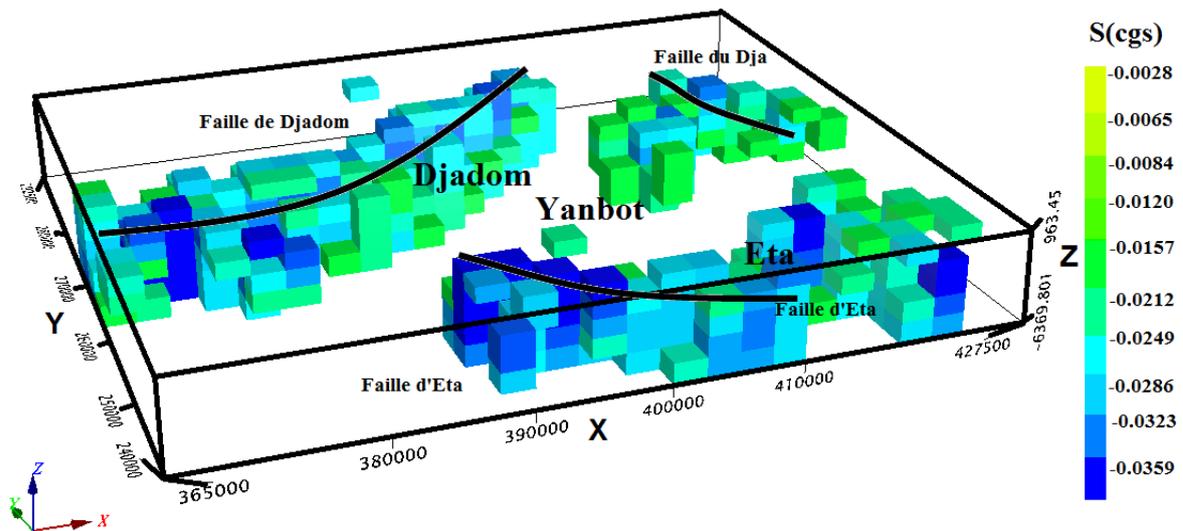


Figure 3.33: Distribution 3D jusqu'à plus de 6 km de profondeur des corps de faible magnétisation caractéristique des anomalies négatives.

Ces zones développent des colonnes sédimentaires et explique l'épaisse couche sédimentaire obtenu sur l'inversion 2.75D des profils. Cette zone de faible magnétisation serait liée soit à la présence des roches fortement aurifères soit à la présence des grabens qui sont tout de même important en recherche minière.

II. DISCUSSION DES RESULTATS

Un travail scientifique doit être corroboré avec d'autres travaux réalisés. Le présent travail s'est fait autour d'une prospection structurale et minière.

. Ainsi, les outils utilisés dans le présent travail sont d'une résolution et d'une qualité comparable aux standards internationaux en matière d'étude aéromagnétique. Les outils sont entre autre les filtres de rehaussement d'image (dérivées horizontales, signal analytique, tilt magnétique) et les techniques de modélisation et d'interprétation des données (tilt angle, déconvolution d'Euler, modélisation 2.75D et 3D).

II. 1. Du point de vue structurale et tectonique

Les anomalies du TMI (figure 3.1) issues du traitement des données montrent trois directions principales WNW–ESE, WSW–ENE et W–E qui sont mises en évidence par les cartes de linéaments du Tilt angle, les cartes des solutions d'Euler (Tilt, et résiduelle), la carte des maximas de AGH. Les contacts sur ces cartes magnétiques sont compatibles. Les cartes structurales ont permis d'observer un réseau des failles plus détaillées que celui observé par Feumoé et al. (2012) appliquant la méthode aéromagnétique. La continuité de ce réseau de faille au nord de la zone est mise en évidence parpar Meying et al. (2009) et

Yandjmain et al. (2017) appliquant les méthodes audio-magnétotellurique et aéromagnétique respectivement.

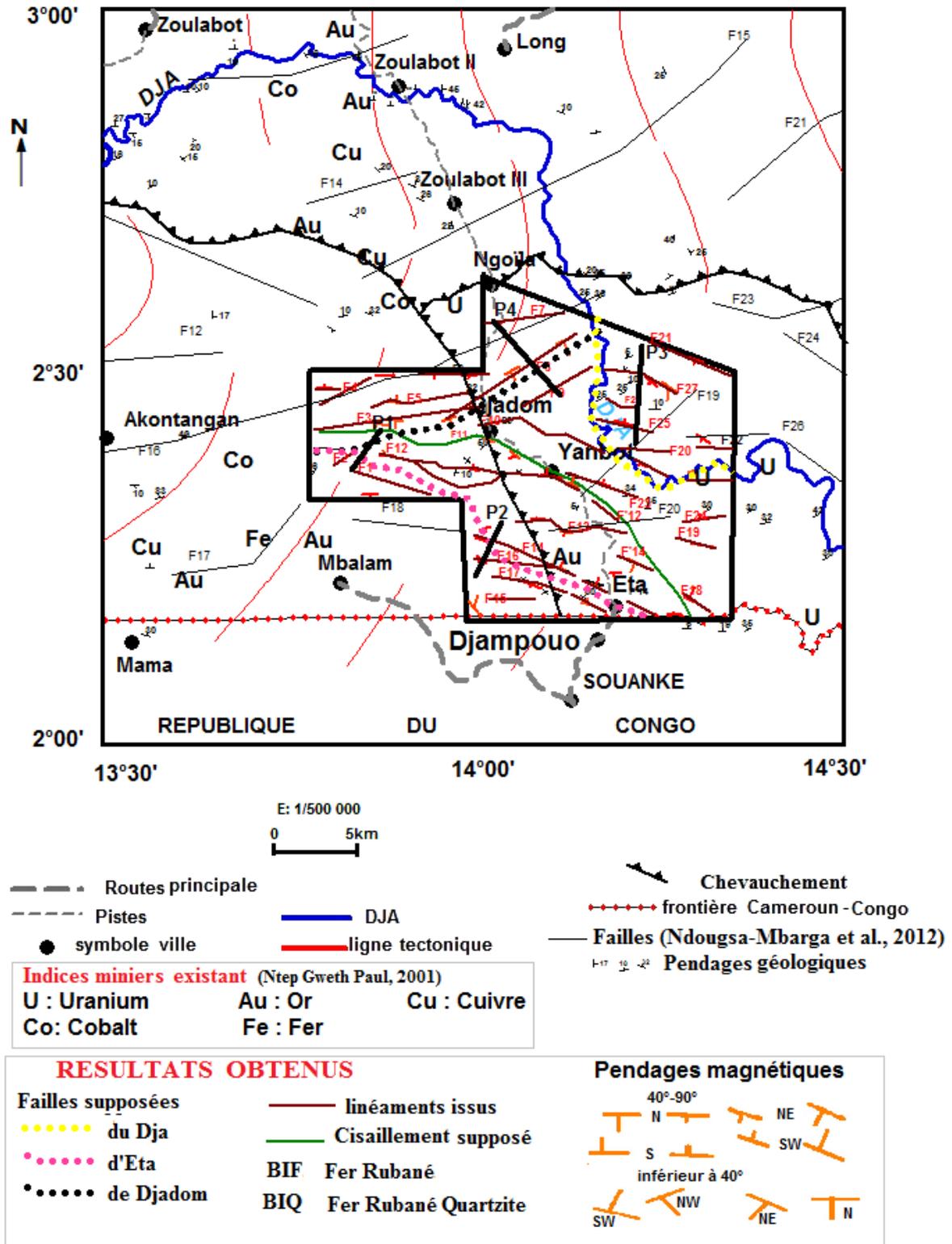
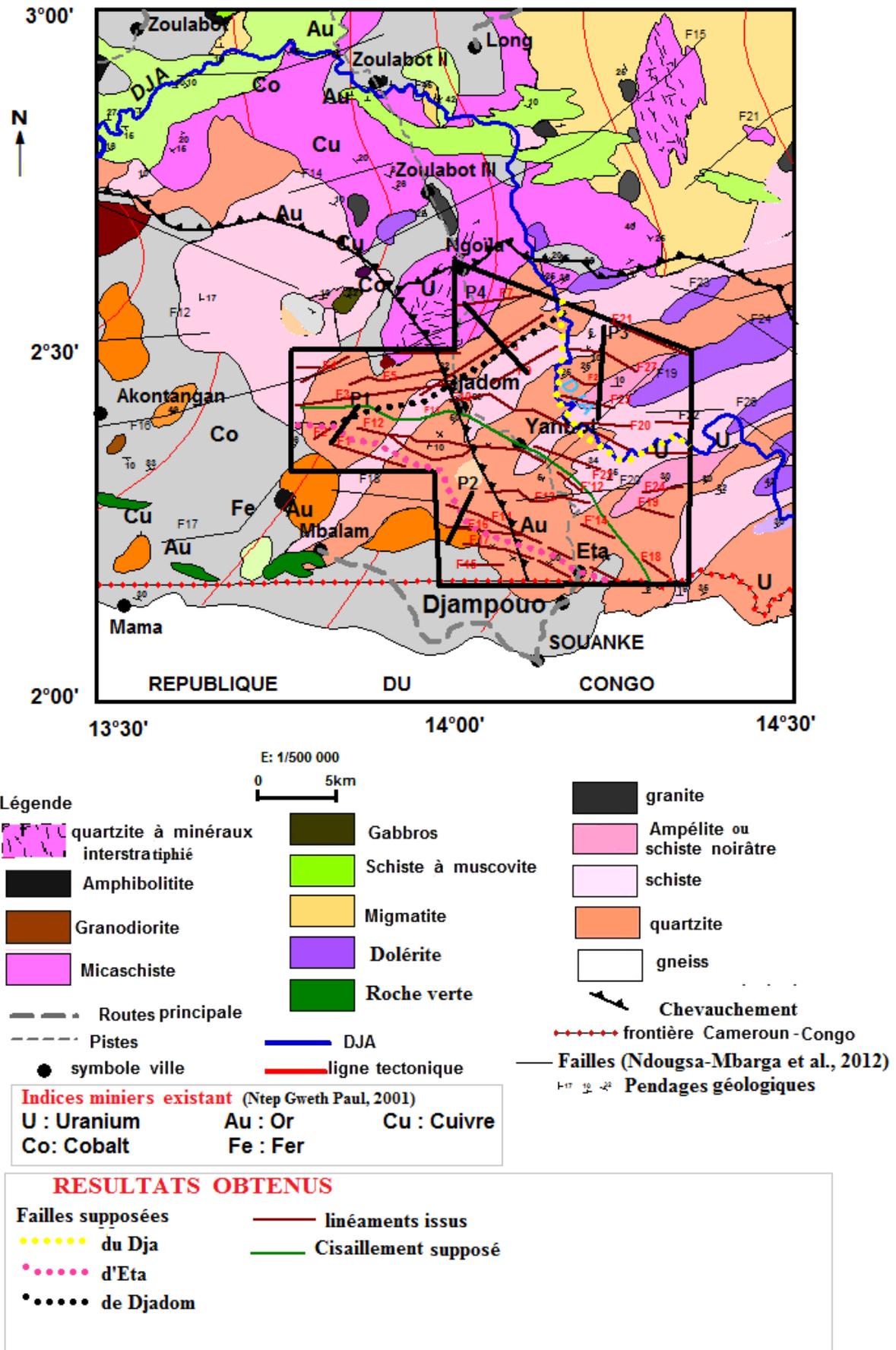


Figure 3.34: Carte structurale mettant en évidence les linéaments, les failles supposées de Djadom, Dja et Eta, les pendages magnétiques et les pendages géologiques.

Le passage de l'anomalie positive à l'anomalie négative (figures 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4) est caractérisé par les géométries verticales, particulièrement les gradients. Ces gradients sont bien mis en évidence par les maxima d'AGH lorsqu'ils sont superposés sur la grille IMR. La description géométrique de cette structure suggère un synclinal ouvert transposée sur des foliations verticales : la faille majeure sur l'axe Djadom est quasi-parallèle à la limite nord du CC et parallèle à la Faille de Sanaga (FS) et à la zone de cisaillement centre Cameroun (CCC). Elle est l'une des failles mis en évidence par Feumoé et al. (2012). Les autres failles majeures ETA et DJA ont été mises en évidence dans ce travail. Des foliations observées pourraient être des ondulations. Ces foliations montrent une série de déformation récente ayant pour direction principale WSW–ENE (figure 3.12) réalisé dans les conditions extrêmes d'état métamorphique selon Olinga et al. (2010) et Mvondo et al. (2007).

L'interprétation de tous ces traits structuraux sur les cartes montrent que le socle de la zone est fortement affecté par la tectonique. Ce qui caractérise d'une part, la transition entre la zone du craton du Congo et la ceinture des plis de Panafricain, et d'autre part, le déversement de la nappe du groupe Yaoundé sur l'unité d'Ayina et la couverture du CC. Ces déductions, ainsi que les observations précédentes amènent à dire que la zone d'étude appartient au le sud Cameroun qui est autour de la zone mobile de l'Afrique centrale comme dans l'étude gravimétrique effectuée par Ndougsa-Mbarga et al. (2003). L'autre interprétation s'appuyant sur la disposition des maxima permet de dégager les traits structuraux déjà connus (lignes tectoniques) et de révéler d'autre tels que la Faille de Djadom, la Faille d'Eta et la faille du Dja; Puis de mettre en évidence les pendages magnétiques (tableau 6) donc certains corrèlent bien aux pendages de la carte géologique (figures 3.34 & 3.35). Les modèles 2.75D donnent une image du sous-sol le long des profils choisis en fonction de la répartition des anomalies magnétiques. Ils ressortent des failles, des décalages qui mettent en évidence les activités tectoniques qu'à subit la zone.

Le modèle 3D donne la géométrie des corps de forte et de faible magnétisation et permet de localiser les gisements ferrifère et aurifère. La figure 3.33 met en évidence les failles de Djadom, d'Eta, et du Dja.



II.2. Du point de vue minier

L'intrusion du quartz, de grès et du schiste ocre du complexe de Bek, le dolérite du complexe doléritique, et le quartzite argenté de micaschiste et de minerai dans le complexe de base sont notés. Les grilles d'anomalie de TMI, RTE, IMR montrent de fortes contrastes de susceptibilités qui marquent ainsi la réponse des sources magnétiques du sous-sol (Gunn et al., 1997 & 1990). La corrélation observée à certains endroits du sous-sol et les failles superficielles de couverture suggèrent fortement un lien tectonique entre le sous-sol et la colonne sédimentaire sus-jacente.

L'analyse structurale de la propagation des failles permet une compréhension des structures géologiques pour la circulation et l'accumulation possibles du système de BIF en un lieu comme indiquent Feumoé et al. (2012) à l'échelle régionale, Chombong et al. (2013), Ganno et al. (2015 & 2017) à l'ouest de la zone d'étude. Les informations sur la distribution des failles et les couches des modèles du sous-sol dans ce secteur d'étude améliorent non seulement la compréhension de l'architecture de bassin, mais peuvent également servir de guide dans une exploration de BIF et BIQ. Les zones de structure géologique sont les marques de zone de faiblesse qui regorgent de fort potentiel de minéralisation. On peut citer : la magnétite, l'hématite, et les schistes et roches verte qui sont fortement magnétisation et quartz, migmatite, oxyde d'aluminium d'amphibolite et ilménite qui ont une magnétisation moyenne.

Ces résultats corrént avec ceux de Chombong et al. (2013) Ganno et al. (2017 & 2015a) à l'ouest et nord-ouest de la zone d'étude respectivement. Cette étude a permis de mettre en évidence les pendages magnétiques d'angle compris entre 40° et 90° situés dans les zones d'intérêts donc certains corrént à ceux de la géologie. Ces pendages correspondent à ceux recherchés en exploitation minière. Cette étude a aussi mis en évidence les zones d'intérêt de potentielle minéralisation tel que les magnétites, les hématites, les roches verts et quartz qui constituent les faciès du FRs d'une part et du FRQs d'autre part.

Des inversions 2.75D et 3D ont permis de mettre en évidence des FR, FRQ, AM, le grès, les roches vertes, le quartz allongé et de schiste dans ces zones d'intérêt. Les intrusions des quartzites et de grèssique (profil 4) forment ainsi les filons de quartz et de grès. L'Amphibolite observé dans le gneiss. Ces zones (FR, FRQ, AM) peuvent être des zones de potentiel de forages (**Figures 3.36 & 3.37**).

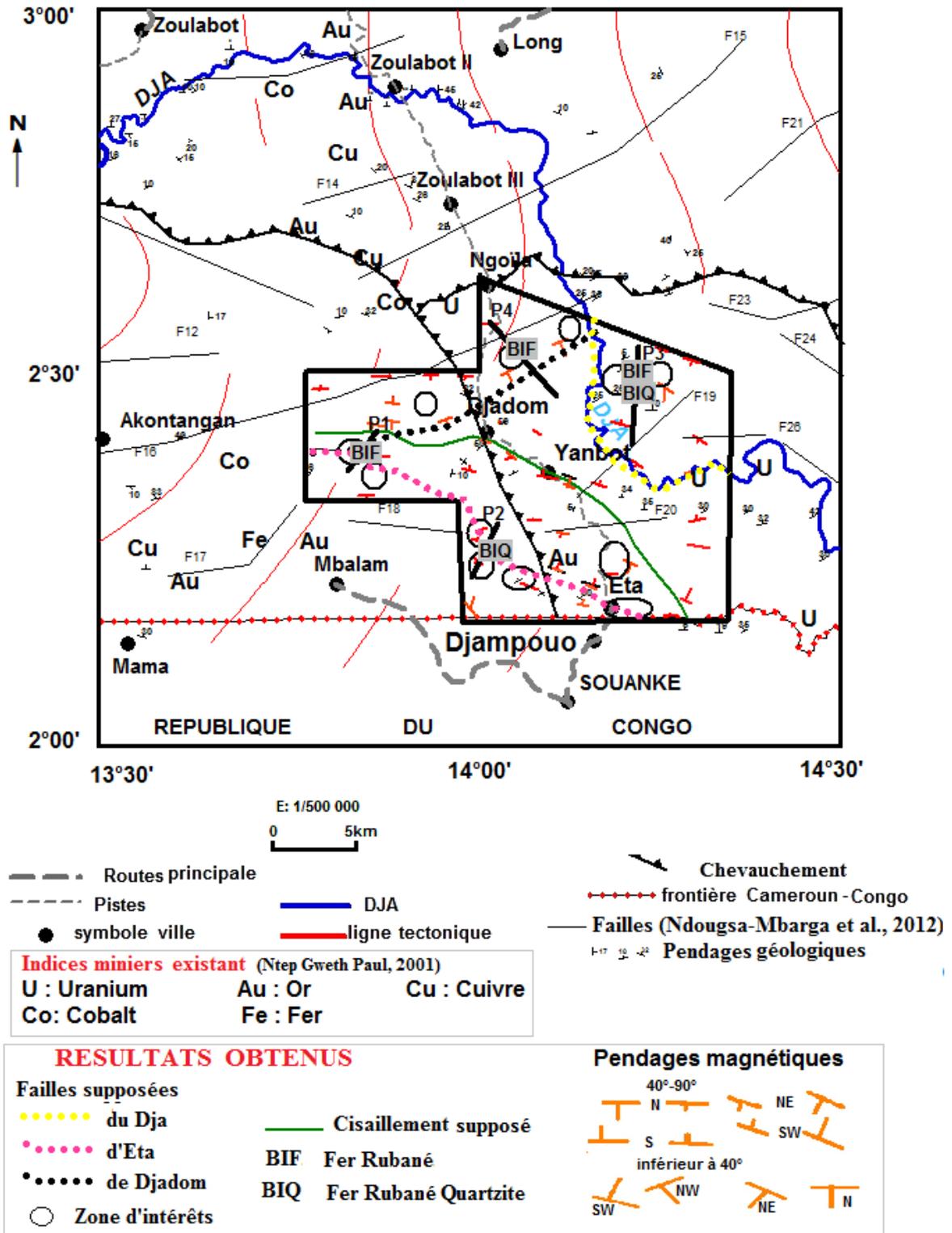


Figure 3.36: Carte structurale mettant en évidence les failles supposées de Djadom, Dja et Eta, les pendages magnétiques et indices miniers supposés.

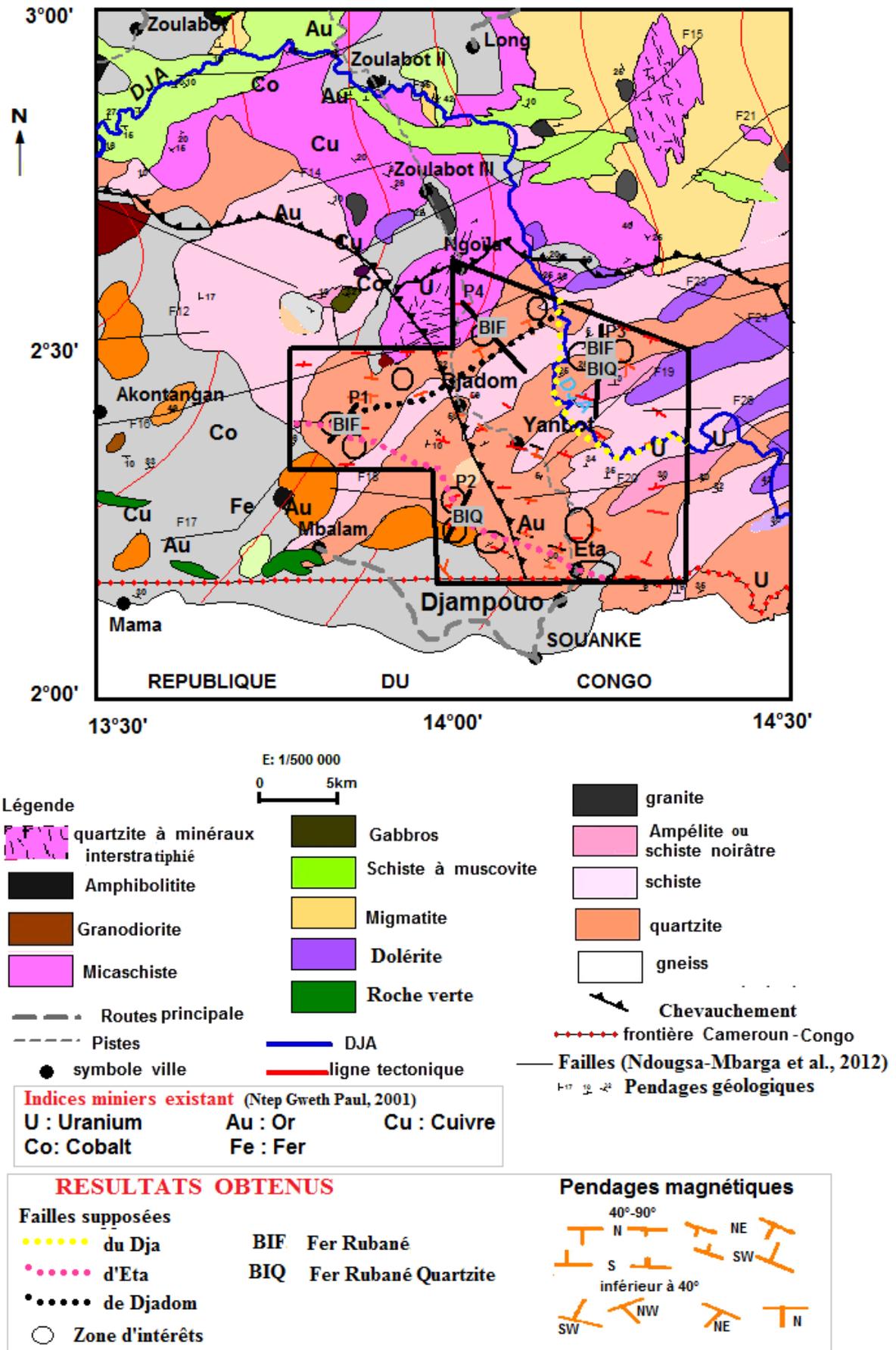


Figure 3.37: Carte structurale mettant en évidence les failles supposées de Djadom, Dja et Eta, les pendages magnétiques et indices miniers supposés sur la géologie.

III. VALIDITE DES RESULTATS

Les anomalies positives sur les grilles des anomalies magnétiques et leurs transformées correspondent avec les réponses des corps magnétiques. Les anomalies linéaires de grandes longueurs d'ondes corréent aux réponses du socle magnétique comme l'a affirmé Gunn & Dentih (1997).

L'utilisation de l'indice structural $N=1$ pour obtenir des solutions d'Euler assimilables à des failles, des filons en accord avec les types de sources proposées par la littérature (Tableau 7) (Reid et al., 1990 ; Thompson, 1982 ; Verdugo et al., 2014). L'erreur sur l'estimation de la profondeur (taux d'acceptation des solutions) est de 15 % pour les solutions d'Euler appliquées sur la grille de la variation de l'angle d'inclinaison puis, de 10 % pour la grille résiduelle.

L'utilisation de ces paramètres est acceptable, car selon Marson & Klingele (1993) le choix approprié de la taille de la fenêtre dépend de la longueur d'onde de l'anomalie examinée et du pas de la grille. par ailleurs, la meilleure erreur sur la profondeur doit être entre 5 et 15%. La profondeur du toit des solutions d'Euler varie entre 0,7 m et 1 km. Ce résultat avec une erreur sur la profondeur de 10% est acceptable pour une étude de subsurface orientée vers la connaissance structurale et la minéralogie. L'enchaînement des grilles AGH et RTE prolongées de 750 m à 3750 m en 3D montrent évidemment l'évolution des corps et des structures magnétiques de la surface jusqu'en profondeur.

Les linéaments WNW–ESE, WSW–ENE et W–E sont les trois grands groupes obtenus, donc les groupes WSW–ENE et WNW–ESE dénommés respectivement faille de Djadom et faille d'Eta, correspondent sur le terrain respectivement les formations géologiques du Panafricain et du Craton. Les linéaments W–E sont en majorité des linéaments mineurs. La faille de Djadom (WSW–ENE) obtenue à l'échelle locale corréle avec celle mise en évidence à l'échelle régionale dans les études structurales menées par Noutchogwé (2010) dans l'Adamaoua, Feumoé et al. (2012) et Ndougsa-Mbarga et al. (2012) dans le Sud. La direction de cette faille Djadom est parallèle au Cisaillement Centre Camerounais, à la Faille de la Sanaga, à la Faille de Fouban. La direction des formations géologiques venant de la nappe de Yaoundé, la direction des anomalies du tilt angle, celle des maximas, celles linéaments et le déplacement des couches des modèles 2.75D permettent de supposer une mise en place d'un cisaillement au centre de la zone d'étude (*figures 3.38 & 3.39*). Ce qui relève des conséquences d'une collision continentale. Par ailleurs, les pendages mise en évidence sont à certain endroit on voit

presque une corrélation entre les pendages magnétiques et les pendages géologiques (figures 3.38 & 3.39).

Le but fondamental de l'intégration des données géologiques et géophysiques est de développer un modèle géologique qui est compatible avec la compréhension conceptuelle et la validation qualitative et quantitative. Ainsi, les modèles des inversions 2.75D et 3D géophysiques obtenus montrent une proche corrélation entre les données géologiques et les données magnétiques. En s'appuyant sur les profondeurs données par les solutions d'Euler, la variation de l'angle d'inclinaison, des maxima du gradient horizontal et des paramètres magnétiques de modélisation (la direction des profils qui doit être perpendiculaire aux directions des linéaments et à l'axe de l'anomalie, l'inclinaison $-22,78^\circ$, la déclinaison $-1,08^\circ$ et la moyenne du champ géomagnétique 33128,16 nT), les modèles 2.75D sont validés. La profondeur des toits de sources de forte magnétisation (BIF et BIQ) obtenues sont incluses dans celles issues des méthodes d'approches (les transformés, tilt angle, AGH, Euler). L'extension des BIF et BIQ est important par rapport à d'autres sources et dont environ 30% à 67 % en fer dans cette zone d'étude. Ce résultat est acceptable car le Cameroun regorge environ 31 à 35 % de minerais de fer par rapport aux autres minerais.

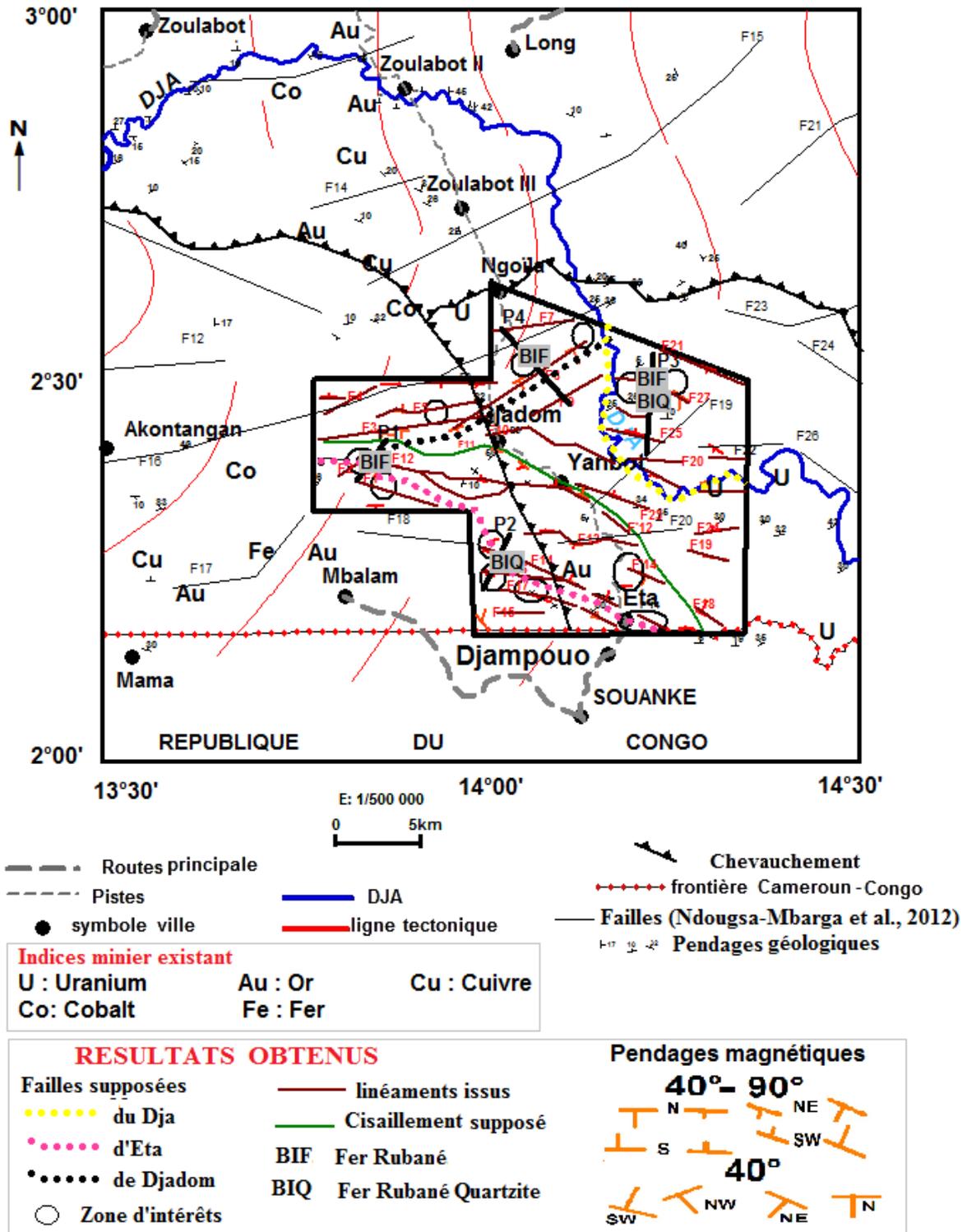


Figure 3.38: Carte Synthèse structurale présentant les failles de Djadom, Dja et Eta ; les pendages magnétiques et géologiques ; les linéaments issus de cette étude ; les point potentiels de minéralisation de Fer (BIF et BIQ) sans formation géologique.

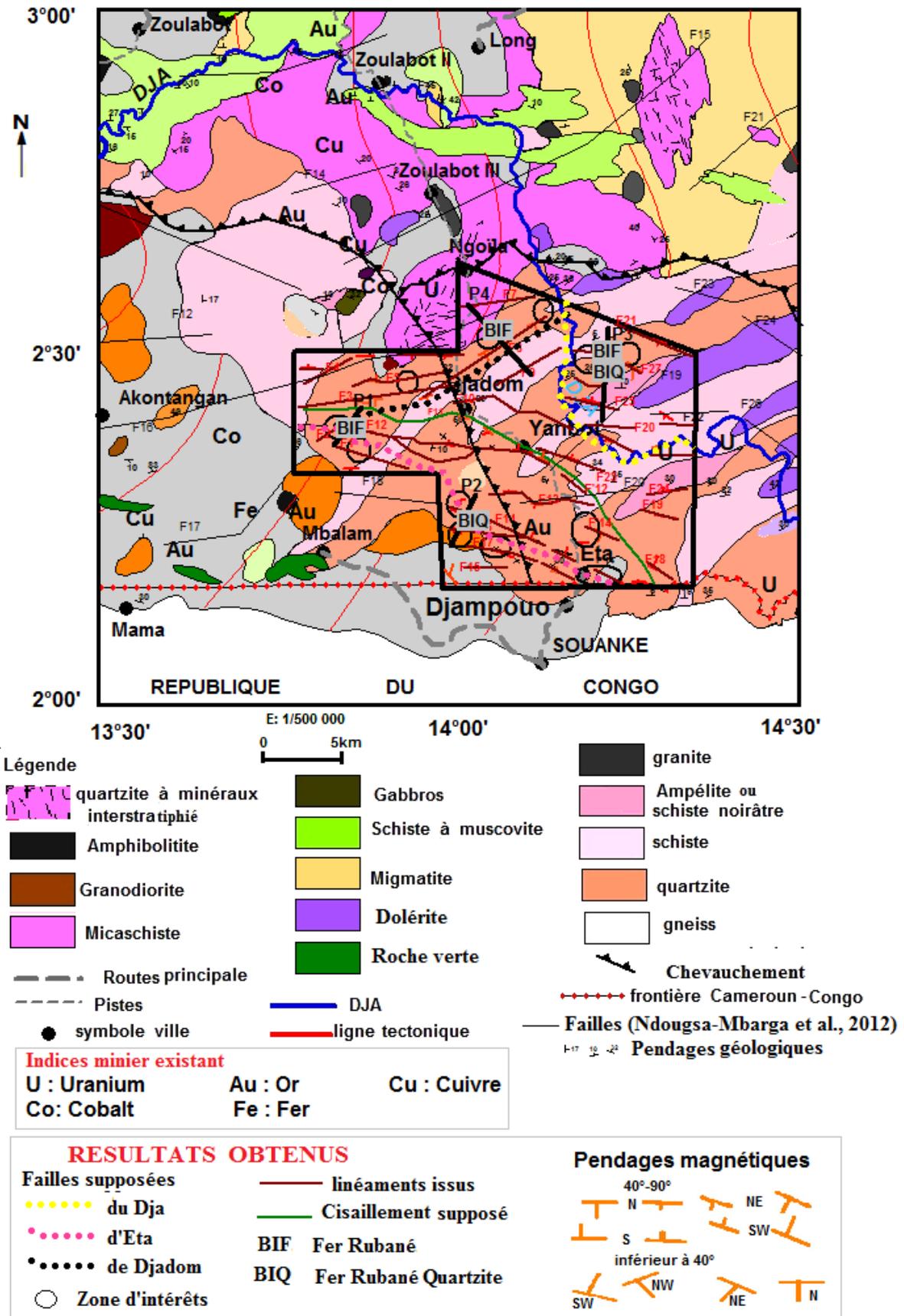


Figure 3.39: carte Synthèse structurale présentant les failles de Djadom, Dja et Eta ; les pendages magnétiques et géologiques ; les linéaments issus de cette étude ; les point potentiels de minéralisation de Fer (BIF et BIQ) avec les formations géologiques.

Cette modélisation 2.75D a permis de relever les filons correspondant aux filons de quartz. Le déplacement dans les modèles géologiques entre les BIF et d'AM correspond sur le terrain aux conséquences du déversement de la nappe du groupe de Yaoundé sur l'unité d'Ayina et la couverture du Craton lors de la collision entre le Panafricain et le CC. Ces modèles d'inversion 2.75D des données magnétiques donnent un modèle géologique donc la lithologie est présentée dans le tableau 8.

Le gisement et la géométrie des corps de forte et de faible magnétisation sont réalistes et validés par les données géologiques et les travaux de Feumoé et al. (2012), Chombong et al. (2013), Teutsong et al. (2017), Ganno et al. (2015, 2017 & 2018) menés autour de cette zone d'étude.

La réalisation du modèle d'inversion 3D des données aéromagnétiques a permis d'avoir un aperçu beaucoup plus clair de la disposition des sources géologiques de la surface au socle et améliore l'identification des cibles à exploiter dans la zone d'étude. Les gradients magnétiques marquant le passage de l'anomalie positive à celle négative corrélerent sur les grilles magnétiques avec les maximas. Sur le terrain, ceux-ci correspondent aux chutes de susceptibilités qui ressortent le caractère dipolaire du champ magnétique. Ce qui valide l'assertion selon laquelle la signature magnétique d'un dépôt de fer présente généralement un aspect dipolaire d'après Paterson et al. (1976). Les pendages magnétiques obtenus de cette étude corrélerent pour certains aux pendages de la carte géologique. Sur le modèle d'inversion 3D, la disposition des blocs fortement et faiblement magnétiques caractérise bien le caractère dipolaire. Les blocs de forte magnétisation (susceptibilité $(S) > 0,02$ cgs) correspondent sur le terrain aux formations riches en hématite, en magnétite, en hématite schiste et en quartzite ferrifère. Par conséquent, le pourcentage en fer varie d'une zone d'intérêt à l'autre entre 30 % à 67 %. Les blocs de faible magnétisation ($S < 0,02$ cgs) correspondent sur le terrain aux formations sédimentaires et para-gneissiques qui contiennent un très faible pourcentage en magnétite et hématite. Ces formations de faibles susceptibilités retracent les trois grands ensembles structuraux WNW–ESE, WSW–ENE et W–E mis en évidence. L'ensemble de ces résultats de modèle d'inversion 3D sont acceptables car ils sont faits avec une erreur (déviatation standard) de 0,595 %.

Tableau 7: Indices structuraux et nature des sources magnétiques.

Grilles	Sources	Indice structural	Tolérance	Fenêtre de Nyquist
Tilt angle	couche-filon, filon intrusif oblique, formation de fer rubanée	1	15 %	10x10 km
IMR	couche-filon, filon intrusif oblique, formation de fer rubanée.	1	10 %	10x10 km

CONCLUSION

L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus ont mis en évidence l'efficacité de la méthodologie adoptée pour la cartographie des structures linéaires et l'identification des potentielles sources minerais dans le sous-sol de la zone d'étude. Les différents traitements et représentations des données aéromagnétiques de la zone d'étude ont permis de mettre en évidence :

- Le caractère magnétique dipolaire observé sur l'axe Djadom et sur l'axe Eta ;
- Les linéaments majeurs et mineurs de directions principales WNW–ESE et W–E respectivement ;
- Les traits structuraux tels que la Faille de Djadom (linéament sécant) et la Faille d'Eta (linéament d'entraînement) de direction WSW–ENE et WNW–ESE respectivement et celle du Dja de direction NW–SE ;
- Les traits structuraux peuvent être obtenus par les méthodes du Tilt angle et les maximas ;
- Un sous-sol de la zone très influencé par les activités tectoniques ;
- Les pendages magnétiques donc certains corréleront bien aux pendages géologiques ;
- La présence des points de rencontre des maximas caractérisant en étude minière des points d'intérêt. Les forages sont plus facilement réalisés à des points où les pendages sont compris entre 40° et à 90°.
- Les zones d'intérêt de potentielles minéralisations ;
- Des modèles 2.75D qui mettent en exergue les sources minerais telles que les magnétites, les hématites, puis les quartzites hématites qui constituent les faciès du fer rubanés (BIFs) et du fer rubanés quartzites (BIQ) respectivement puis des schistes, des roches vertes, des quartzs, des quartzites micaschistes ;
- Des modèles 3D qui ressortent au mieux d'importants gisements de formations fortement et faiblement magnétiques et mettent en évidence les failles de Djadom, d'Eta, et du Dja.

Tableau 8: Récapitulatif des résultats de la modélisation 2.75D des profils. Z_a profondeur du toit, Z_b profondeur du mur des minéraux.

Profils	Erreur %	Lithologie	Profondeur Z(m)		Epaisseur (m)	Longueur (m)	Localités
			Z_a	Z_b			
P1 NE-SW	8,073	BIF	29	1227	1198	2971	BIF
		AM	337	1630	1293	2696	
		Roche verte	43	500	457	Demi-infini	
		Gneiss	500	infini	Demi-infini	infini	
P2 N-S	4,531	BIQ	27	559	532	1626	BIQ
		AM	513	1040	527	1596	
		Schiste	37	236	199	306	
		Quartz1	56	416	360	324	
		Quartz2	766	1032	266	589	
		Roche verte	37	359	322	Demi-infini	
		Gneiss		infini	Demi-infini	infini	
P3 N-S	8,886	BIF1	477	1003	526	1340	BIF
		BIF2	482	1117	635	3811	
		BIQ	220	1321	1101	4058	
		AM	875	1624	749	infini	
		Grès	80	653	573	infini	
		Roche verte	362	1016	654	Demi-infini	
		Gneiss	1016	infini	Demi-infini	infini	
P4 NW-SE	9,032	BIF	343	1203	860	4740	BIF
		AM	697	1740	1043	infini	
		QMS	360	1263	903	3709	
		Grès	152	534	382	626	
		Quartz	69	916	847	1419	
		Roche verte	311	986	675	Demi-infini	
		Gneiss	986	infini	Demi-infini	infini	

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

I. CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail était d'améliorer la carte structurale et de cibler les zones potentielles ferrifères dans la zone de Djadom-Eta au sud-est Cameroun. Pour y arriver une étude structurale a été faite puis, couplée à des modélisations afin de dégager les potentielles ressources minérales et proposer les éventuels points de forages d'exploration. L'étude liminaire a permis de connaître la zone d'étude sur le plan géographique, géologico-tectonique. Elle a abouti sur la problématique de cette étude. Une seconde étude a permis de dégager le principe et la méthodologie de la méthode aéromagnétique utilisée dans cette étude pour arriver à l'objectif de cette étude et apporter une solution à la problématique énoncée.

Les études antérieures ont montré d'une part que l'Afrique se compose d'un socle ancien d'origine précambrienne plissée et sa géologie a été rajeunie par l'épisode thermo-tectonique Panafricain formée de roches métamorphiques et de massifs cristallins intrusifs. Cette géologie africaine repose sur des formations stables (zones cratoniques) et des formations instables (zones mobiles). Et d'autre part, le Cameroun est constitué principalement de deux unités géologiques majeures : le Craton du Congo au sud et la Zone Mobile de l'Afrique Centrale au nord. L'enjeu des événements tectoniques Panafricains est la formation de la faille de Fouban, la faille de Tholiré et la faille de la Sanaga. La zone d'étude se trouve sur trois entités géologiques : le Groupe de Yaoundé, l'unité d'Ayina du Complexe du Ntem et la couverture du Craton du Congo. La minéralogie de la zone est dominée par les formations ferrifères et les roches intrusives. Les propriétés magnétiques intrinsèques des matériaux de la croûte terrestre sont celles des minéraux. La méthode aéromagnétique est une méthode potentielle très utilisée pour des études structurales et dans la recherche des formations ferrifères. Elle a des avantages opérationnels et techniques. Le paramètre magnétique est la susceptibilité. L'acquisition des données repose sur le choix de l'appareillage et l'interprétation repose sur le traitement des données de l'intensité du champ magnétique.

Les principaux résultats obtenus dans cette étude mettent en évidence de nouveaux éléments géologiques et géophysiques qui améliorent les connaissances sur les structures géologiques de la zone d'étude. Les méthodes du tilt angle et des maxima du gradient horizontal sont utilisées pour délimiter les contacts géologiques et les structures puis, pour estimer leurs profondeurs et leurs longueurs. Les linéaments majeurs sont mis en évidence

avec la direction principale WNW–ESE et WSW–ENE alors que les mineurs sont mis en évidence avec la direction principale W–E. On note la présence des bifurcations accompagnées des virgations sur les grilles magnétiques. Ce qui donne lieu à deux systèmes de linéaments principaux : les linéaments d'entraînements (Faille de Djadom) de direction WSW–ENE et les linéaments sécants (Faille d'ETA) de direction WNW–ESE et puis, la faille du Dja de direction NW–SE. L'application de la méthode de la déconvolution d'Euler a permis d'obtenir ces structures géologiques et d'estimer leurs profondeurs et la géométrie des corps enfouis. Ce qui a permis de voir que les profondeurs obtenues par la variation de l'angle d'inclinaison sont incluses dans celles obtenues par la déconvolution d'Euler. La méthode des maxima des AGH a donné à nouveau une carte des linéaments corrélée à celle obtenue par la méthode de la variation de l'angle d'inclinaison (tilt angle). Elle a donné lieu aux pendages et leurs directions, puis aux zones d'intérêts. Certains pendages obtenus s'approchent de ceux des données géologiques. Ce qui permet de dire que la zone d'étude a un sous-sol très influencé par les activités tectoniques. Les points de rencontre des maxima et le changement de pendage caractérisent en étude minière des points d'intérêt. Les forages sont plus facilement réalisés à des points où les pendages sont compris entre 40° et 90°. Sur ces critères, les zones d'intérêt sont ciblées. Des modèles d'inversions 2.75D des profils mettent en exergue les sources de minerais tel que les magnétites, les hématites, puis les quartzites hématites qui constituent les faciès des BIFs et des BIQ respectivement puis, des roches verts, des schistes, des quartz, des quartz-micaschistes. Des intrusions quartzite et grèssique qui sont des filons de quartz et de grès. Ces BIFs et ces BIQ mis en évidence dans cette étude ont des profondeurs de toit variant de 27 m à 482 m. Ils ont un volume important : soient 1198 m d'épaisseur et 2971 m de longueur pour ceux localisés au profils P₁, 532 m d'épaisseur et 1626 m de longueur pour ceux localisés au profils P₂, 1101 m d'épaisseur et 9029 m de longueur ceux localisés au profils P₃, 860 m d'épaisseur et 4740 m de longueur ceux localisés au profils P₄. Le VOXI réalisé donne une inversion de modèles 3D des données aromagnétiques. Il donne une image plus claire de la répartition des sources géologiques de la surface au socle et améliore ainsi l'identification des cibles de fortes et faibles magnétisations à exploiter dans la zone d'étude. Ce modèle d'inversion 3D met en évidence les failles de Djadom, d'Eta et du Dja. Dans l'exploration minière et la géophysique de proche surface, les cartes aéromagnétiques sont un outil important pour retracer la géologie et identifier les cibles minières.

II. PERSPECTIVES

Les investigations menées par l'approche multi-échelle ont permis d'améliorer considérablement les connaissances des structures, des formations géologiques et des indices miniers dans cette zone. Malgré cette approche combinée, la complexité du fonctionnement de ce système géologique, il reste encore à faire dans cette zone. Les perspectives ouvertes par ce travail concernent aussi bien les études géologiques que celles géophysiques. De ce fait, il serait souhaitable pour plus d'efficacité :

- Qu'une investigation géophysique aéroportée de gravimétrie et radiométrie soit menée sur l'ensemble de la région afin d'observer et de confirmer à moyenne et grande échelle le comportement de la minéralisation en fer et des substances connexes ;
- Que des forages, les tranchées d'exploration et leurs analyses soient effectués avec des profondeurs permettant d'atteindre le socle, afin de vérifier les puissances potentielles des zones potentielles de minéralisation en fer et des substances connexes ;
- Contraindre les modèles 2.75D et 3D aux données des forages, des tranchées et sismiques pour une exploration plus porteuse des cibles proposées ;
- D'associer la méthode de détermination de la profondeur du point de Curie pour analyser la profondeur de transition de minéralisation de la magnétite en cherchant les données du flux thermique qui traverse les roches. Car au-delà des profondeurs de Curie, les effets magnétiques disparaissent. Puis mesurer la température à différentes profondeurs à travers une série de forages afin de connaître avec plus de précision le potentiel géothermique de la zone d'étude.

REFERENCES

REFERENCES LOGICIEL

Geosoft Program (Oasis Montaj), (2014). Aero Service Company, Mineral Petroleum Ground-Water Assessment Program (MAGMAP), 2-D Frequency-Domain Processing, Geosoft Inc., Toronto, Canada.

REFERENCES DOCUMENTAIRES

- Ball, E., Bard, J.P. and Soba, D., (1984).** Tectonique tangentielle dans la catazone panafricaine du Cameroun: les gneiss de Yaoundé, *J. Afr. Earth Sci.* Vol. 2, pp. 91-95.
- Bessoles, B. and Lasserre, M., (1977).** Le complexe de base du Cameroun. Bulletin de la Société Géologique de France, Vol. 19, pp. 1085-1092.
<https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-XIX.5.1085>
- Bikoro-Bi-Alou, M., (2016).** Application de la method des elements finis pour l'évaluation des cibles minières dans la region d'Ebolowa-Djoum. Thèse de Doctorat/Phd de l'Université de Yaoundé I, 117 pages.
- Biyiha-Kelaba. W., Ndougsa-Mbarga, T. Yene-Atangana, J.Q., Ngoumou, P. C. and Tabod, T. C., (2013).** 2.5D Models Derived from the Magnetic Anomalies Obtained by Upwards Continuation in the Mimbi Area, Southern Cameroon. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, vol. 3, N°. 4, PP. 175-199
- Blakely R. J. and Simpson R. W., (1986).** Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies *Geophysics*, vol. 51, pp.1494-1498.
- Blakely, R. J., (1996).** Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press, 441pages.
- Bournas, N., (2001).** Interpretation des données aéromagnétiques acquises au-dessus du Hoggar oriental, Thèse Doctorat d'état, USTHB, 250 pages.
- Camille St-Hilaire Inc., (2015).** Levés magnétique et gravimétrique aéroportés region de la Gaspésie-îles-de la Madeleine, quebec. Interprétation des données rapport final. Ministère de l'énergie et des ressources naturelles. Direction des hydrocarbures et des biocombustibles 5700-4^e Avenue Ouest –a.422 Québec G1H 6R1.
- Campbell, W. C., (1997).** Introduction to geomagnetic fields, Cambridge University Press, New York.
- Caron, V., Ekomane, E., Mahieux, G., Moussango, P., and Ndjeng, E., (2010).** The Mintom Formation (new): Sedimentology and geochemistry of a Neoproterozoic, paralic succession in south-east Cameroon. *J. Afr. Earth Sci.* Vol. 57, pp. 367–385.

- Chombong, N. N., Suh, E. C. and Ilouga, C. D. C., (2013).** New detrital zircon U-Pb ages from BIF-related metasediments in the Ntem Complex (Congo craton) of southern Cameroon, West Africa. *Natural Science* Vol.5, N°7, pp. 835-847 doi:10.4236/ns.2013.57101
- Chouteau, M., (1999).** Géophysique appliquée, tome I, magnetism, Ecole Polytechnique de Montréal.
- Colin Reesves, (2005).** Aeromagnetic Surveys. Principales, Practice & Interpretation. Earthworks, global thinking Exploration Geoscience. Published by Geosoft. 92 pages
- Djoukan, F. M. L., Shüssler, U., and Tchouankoue, J. P., (2004).** Geochemistry and petrogenesis of neoproterozoicgranitoids within the Central African Fold Belt in the Bafoussam area, Western Cameroon (Central Africa). University of Wuerzburg, Germany, pp. 4.
- Dumont, J.F., (1986).** Identification par télédétection de l'accident de la Sanaga (Cameroun). Sa position dans le contexte des grands accidents d'Afrique Centrale et de la limite nord du craton congolais. *Géodynamique* Vol. 1, pp. 13–19.
- Durrheim, R. J. and Cooper, R. J., (1998).** EULDEP: A Program for the Euler Deconvolution of Magnetic and Gravity Data, *Computer and Geosciences*, Vol. 24, N°6, pp. 545-550.
- Eno Belinga, S. M., (1984).** Géologie du Cameroun. Librairie Universitaire, Université de Yaoundé I. ISBN : 2-86491-013-6, 307 pages.
- El-Wartiti, M. and Zahraoui, M., (2007).** Manuel de cartographie. Laboratoire de géologie appliquée. Faculté des Sciences. Université MohammedV-Agdal Rabat. <http://clik.to/geolaprabat/>
- Faure, S., (2001).** analyse des linéaments géophysiques en relation avec les minéralisations en or et métaux de base de l'abitibi. Projet 2000-03A, Ph.D. 32 pages.
- Feumoe, A. N. S., Ndougsa-Mbarga, T., Manguelle-Dicoum, E. and Derek Fairhead, J., (2012).** Delineation of tectonic lineaments using aeromagnetic data for the south-east Cameroon area. *Geofizika*, Vol. 29, N°2, pp. 175-192.
- Feumoe, S. A. N., (2014).** Apport des filtres et inversions 2D1/2 des anomalies aéromagnétiques dans ladétermination des accidents tectoniques majeurs au sud-est du cameroun (Craton du Congo). Thèse de Doctorat/PhD de l'Université de Yaoundé I, 153 pages.

- Feumoé, A. N. S and Ndougsa-Mbarga, T. (2017).** Curie point Depth Variations Derived from Aeromagnetic Data and the Thermal Structure of the Crust at the Zone of Continental Collision (South-East Cameroon). *Geophysica* Vol. 52, N°1, pp. 31-45.
- Ganno, S., Ngnotue, T., Kouankap-Nono, G. D., Nzenti, J. P. and Notsa-Fokeng, M., (2015a).** Petrology and geochemistry of the Ntem banded iron-formations from complex greenstones belt, Elom Implications area, Southern Cameroon: for the origin and depositional environment. *Chemie Erde - Geochemistry*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemer.2015.08.001>
- Ganno, S., Moudioh, C., Nzina Nchare, A., Kouankap Nono, G.D. and Nzenti, J.P., (2015b).** Geochemical fingerprint and iron ore potential of the siliceous itabirite from palaeoproterozoic Nyong series, Zambi area, southwestern Cameroon. *Resource Geology* 66 (1), 71–80..
- Ganno, S., Njiosseu-Tanko E. L., Moudioh, C., Kouankap-Nono, G.D., Djoukouo-Soh A., Ngnotué, T. and Nzenti, J. P., (2017).** A mixed seawater and hydrothermal origin of superior-type banded iron formation (BIF)-hosted Kouambo iron deposit, Palaeoproterozoic Nyong series, Southwestern Cameroon: Constraints from petrography and geochemistry. *Ore Geology Reviews* Vol. 80, pp.860-875. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.08.021>.
- Ganno, S., Tsozué, D., Kouankap-Nono, G. D., Tchouatcha, M. S., Ngnotué, T., Gamgne-Takam, R. and Nzenti, J. P., (2018).** Geochemical Constraints on the Origin of Banded Iron Formation-Hosted Iron Ore from the Archaean Ntem Complex (Congo Craton) in the Meyomessi Area, Southern Cameroon. *Resource Geology* Vol..., N°... 1-16. doi: 10.1111/rge.12172.
- Gazel, J. and Guiraudie, C., (1965).** Notice Explicative sur la Région Abong-Mbang Ouest de la Carte Géologique de Reconnaissance à l'échelle du 1/500.000. Direction des Mines et Géologie, Yaoundé, 29 pages.
- Gunn, J.P., (1997a).** Quantitative methods for interpreting aeromagnetic data: a subjective review. *AGSO Journal of Australian Geologic & Geophysics*, Vol.17 (2), pp 105-113.
- Gunn, J.P., (1997b).** Application of aeromagnetic surveys to sedimentary basin studies. *AGSO journal of Australian Geologic & Geophysics*, Vol.17, N°2, pp 105-113.
- Gunn, P. J. and Dentih, M. C., (1997).** Magnetic response associated with mineral deposits. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, Vol. 17 N°2, pp.145-158.

- Gouet, D.H., Meying, A., Assemble, S. P. and Ndougsa-Mbarga, T., (2013).** Gold Mineralization Channels Identification in the Tindikala-Boutou Area (Eastern-Cameroon) Using Geoelectrical (DC & IP) Methods: A Case Study. *International Journal of Geosciences*, Vol. 4, pp. 643-655.
- Gouet, D. H., (2014).** Application des méthodes géoélectriques (DC & IP) à l'identification des cibles minières et des aquifères dans la zone de Boutou-Colomine (Est-Cameroun). Thèse de doctorat/PhD, Université de Yaoundé I, 181 pages.
- Gouet, D. H., Meying, A., Assemble, S. P. and Ndougsa-Mbarga, T. (2015).** Clay Minerals Channels Identification in the Tindikala-Boutou Area (Eastern-Cameroon) along the Kadey River Using Direct Current 5DC) Method. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol.3, pp. 123-133.
- Grauch, V. J. S., Bauer and P. W., Kelson, K. I., (2004).** Preliminary interpretation of high-resolution aeromagnetic data collected near Taos, New Mexico. *New Mexico Geological Society, 55th Field Conference, Guidebook*, pp. 244 – 256.
- Groune, D., (2009).** Analyse Magnéto-Spectrométrique des données Aérogréophysiques du Grand Fossé Pharusien (Hoggar Occidental), Mémoire, Magister en géophysique, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 143 pages.
- Key, R. M., (1992).** An introduction to the crystalline basement of Africa.- In: *Hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa*, E. P. Wright & W.G. Burgess (eds.) London, Geol. Soc. Spec. Publ. Vol. 66, pp.29-57.
- Kwan, K. Prikhodko A. and Bagrianski, A., Geotech LTD (2011).** Improving aeromagnetic data collection using a horizontal gradiometer (HGrad) system mounted on a VTEM platform for mineral exploration. *Geotech Airborne Geophysical Surveys, Geotech LTD* 9 pages.
- Lacomblez, P. et Cornet, M., (1973).** Méthodes Aéroportées, (rapport) colloque de Géophysique Minière *Revue de la société de l'industrie, minérale, compagnie générale de Géophysique*, pp. 29-34.
- Langenheim, V. E. and Jachens, R. C., (2014).** Aeromagnetic Data, Processing, and Maps of Fort Irwin and Vicinity, California, chap. I of Buesch, D.C., ed., *Geology and Geophysics Applied to Groundwater Hydrology at Fort Irwin, California: U.S. Geological Survey Open-Fort Report*, pp. 2013-1024.
- Latrous, A., Plastow, G., Pagotto, D. et Vidal, J., (2013).** Levé géophysique aéroporté acquisition et traitement des données. Projet financé par la banque mondiale et réalisé par Geotech LTD, 24 pages.

- Lliboutry, L., (1998).** Géophysique et géologie, Masson, Paris.
- Marson, I., and Klingele, E. E., (1993).** Advantages of using the vertical gradient of gravity for 3-D interpretation, *Geophysics*, Vol. 58, pp. 1588-1595.
- Mbom-Abane, S., (1997).** Investigations géophysiques en bordure du craton du Congo (région d'AbongMbang/Akonolinga, Cameroun) et implications structurales. Thèse de doctorat d'état, Université de Yaoundé I, 180 pages.
- Meying, A., Ndougsa-Mbarga, T. and Manguelle-Dicoum, E, (2009).** Evidence of Fractures from the Image of the Subsurface in the Akonolinga-Ayos Area (Cameroon) by Combining the Classical and the Bostick Approaches in the Interpretation of Audio-Magnetotelluric Data. *Journal of Geology and Mining Research*, Vol. 1, pp. 159-171.
- Meying, A., (2011).** Investigations crustales profondes et superficielles par méthode audio magnétotellurique (AMT) dans la région Ayos-Nguelmendouka (Cameroun). Thèse de Doctorat/PhD de l'Université de Yaoundé I, 139 pages.
- Miller, H. G. and Singh, V., (1994).** Potential field tilt a new concept for location of potential field sources. *Journal of applied Geophysics*, Vol. 32, pp. 213-217.
- Mvondo, H., Owona, S., Mvondo-Ondoa, J., Essono, J. (2007).** Tectonic evolution of the Yaoundé segment of the Neoproterozoic Central African Orogenic Belt in southern Cameroon. *Can. J. Earth Sci.*, Vol. 44, pp. 433-444. <https://doi.org/10.1139/e06-107>
- Mvondo-Ondoa, J., Bouyo-Houketchang, M., Ganwa, A.A. and White, W., (2007).** Evidence of ca 1.6-Ga detrital zircon in the Bafia Group (Cameroon): Implication for the chronostratigraphy of the Pan-African Belt north on the Congo craton. *C.R. Geoscience* Vol. 339, pp. 132–142.
- Nabighian, M. N., (1972).** The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*, Vol. 37, pp. 507-517.
- Nabighian, M. N., (1974).** Additional comments on the analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section, *Geophysics*, Vol. 39, pp. 85-92.
- Nabighian, M. N., (1984).** Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations, *Geophysics*, Vol. 49, pp.780-786.
- Ndougsa-Mbarga, T., Manguelle-Dicoum, E., Mbom-Abane, S. and Tabod, C. T. (2002).** Deep crustal structures along the north eastern margin of the Congo Craton

- in the Abong-Mbang/Bertoua region (Cameroon) based on gravity data, In: Electronics Memories of the 2nd Cuban Geophysical Congress and the IV Latin American Geophysical Conference, Cuba, CD Rom. 15 page.
- Ndougsa-Mbarga, T., Manguelle-Dicoum, E., Tabod, C.T. and Mbom-Abane, S., (2003).** Modélisation d'anomalies gravimétriques dans la région de Mengueme-Akonolinga (Cameroun). *Sci. Technol. Dev.*, Vol. 10, N°1, pp. 64-74.
- Ndougsa-Mbarga, T., (2004).** Etude géophysique, par méthode gravimétrique des structures profondes et superficielles de la région de Mamfé. Thèse de doctorat, Université de Yaoundé I, discipline : Géophysique Interne, 239 pages.
- Ndougsa-Mbarga, T., Meying, A., Bisso, D., Layou, D. Y., Sharma, K. K. and Manguelle-Dicoum, E., (2011).** Audiomagnetotellurics (AMT) soundings based on the Bostick approach and evidence of tectonic features along the northern edge of the Congo Craton, in the Messamena/Abong-Mbang area (Cameroon) *J. Ind. Geophys. Union* Vol. 15, N°3, pp. 145-159.
- Ndougsa-Mbarga, T., Feumoe, A. N., Manguelle-Dicoum, E. and Derek-Faihead, J., (2012).** Aeromagnetic Data Interpretation to Locate Buried Faults in South-East Cameroon. *Geophysica*, Vol. 48 N°1-2, pp. 49-63.
- Ndougsa-Mbarga, T., Yufenyiu Layu, D., Quentin Yene-Atangana, J. and Tabod C.T., (2014).** Delineation of the northern limit of the Congo Craton based on spectral analysis and 2.5D modeling of aeromagnetic data in the Akonolinga-Mbama area, Cameroon. *Geofísica internacional*, Vol. 53 N°1, pp. 5-16.
- Nédélec, A., et Nsifa, E.N., (1987).** Le complexe du Ntem (Sud Cameroun) : Une série tonalito-trondhjémitique archéen typique. In *current Research in African earth sciences, Matheis and Schandelmeier(eds)*, pp. 3-6.
- Ngako, V., Jegouzo, P. et Nzenti, J. P., (1991).** Le Cisaillement Centre Camerounais. Rôle structural et géo - dynamique dans l'orogénèse panafricaine. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, vol.313, N°2, pp. 457-463.
- Ngako, V., (1999).** Les déformations continentales PanAfricaines en Afrique Centrale. Résultat d'un poin - çonnement de type himalayen. Thèse de Doctorat d'état (Université de Yaoundé I). 241 pages.
- Ngako, V., Jégouzo, P., and Djallo, S., (1989).** Deformation and metamorphism in the Poli Pan-African orogenic belt (North Cameroon): geodynamic and paleogeographic implications. *J. Afr. Earth Sci.* Vol. 9, pp. 541–555.

- Ngako, V., Affaton, P., Nnange, J.M. and Njanko, T., (2003).** Pan-African tectonic evolution in central and southern Cameroon: transpression and transtension during sinistral shear movements. *J. Afr. Earth Sci.* Vol. 36 N°3, pp. 207–214.
- Ngnouté, T., Nzenti, J. P., Barbey, P. and Tchoua, F. M., (2000).** The Ntui – Bétamba high grade gneisses: a northward extension of the Pan-African Yaoundé gneisses in Cameroon. – *Journal of African Earth Sciences*, vol. 36, N°2, pp. 369-381.
- Ngoumou, P. C., (2015).** Application des méthodes géoélectriques (DC & IP) à l'identification des cibles et des aquifères dans la zone de Messondo-Kelle Bidjoka (Centre- Cameroun). Thèse de doctorat PhD, Université de Yaoundé I, discipline : Géophysique Interne, 196 pages.
- Nkoumbou, C., Barbey, P., Yonta-Ngouné, C., Paquette, J.L. and Villieras, F., (2014).** Precollisional geodynamic context of the southern margin of the Panafrican fold belt in Cameroon. *J. Afr. Earth Sci.* Vol. 99, pp. 245–260.
- Nnange, J. M., (1991).** The crustal structure of the Cameroon volcanic line and the Fouban shear zone based on gravity and aeromagnetic data. *Ph. D. thesis, Univ. of Leeds, England, 242 pages.*
- Noutchogwe-Tatum, C. B., (2004).** Apport de la gravimétrie à l'étude de la bordure méridionale du plateau de l'Adamaoua (Cameroun). Thèse de doctorat 3^{ème} cycle, Université de Yaoundé I, discipline : Géophysique Interne, 161pages.
- Noutchogwe, C., Tabod, C. and Manguelle-Dicoum, E., (2006).** A Gravity Study of the Crust beneath the Adamawa Fault Zone, West Central Africa. *Journal of Geophysics and Engineering*, Vol. 3, pp. 82-89. <https://doi.org/10.1088/17422132/3/1/009>.
- Ntep Gweth,(2001).** Carte thématique des ressources minérales sur un fond géologique. Sous la tutelle et appui : Ministère des mines, de l'eau et de l'énergie. Echelle : 1/1 500 000.
- Nzenti, J. P., (1987).** Pétrogenèse des migmatites de Yaoundé (Cameroun). Eléments pour un modèle géo - dynamique de la chaine Panafricaine Nord-Equatoriale. Thèse de Doctorat/PhD (Université de Nancy I). 147 pages.
- Nzenti, J. P., Barbey, P., Macaudière, J. and Soba, D., (1988).** Origin and evolution of the late Precambrian high grade gneisses (Cameroon). – *Precambrian Research*, vol 38, pp. 91-109.
- Nzenti, J.P., (1992).** Prograde and retrograde zoning at high pressure and temperature in metapelitic and garnetite rocks from Yaoundé (Cameoon Panafrican north-equatorial fold belt). *Journal of African Earth Sciences*, 15: 73-79.

- Nzenti, J.P., (1998).** Neoproterozoic alkaline meta-igneous rocks from the Pan-African North Equatorial Fold Belt (Yaoundé, Cameroon): biotitites and magnetite rich pyroxenites, *J. Afr. Earth Sci.*, Vol. 26, pp. 37-47.
- Shang, C. K., Satir, W. S. M. Chen, F. and Mvondo- Ondoua, J., (2004).** Zircon Pb-Pb and U-Pb systematics of TTG rocks in the Congo Craton: Constraints on crust formation, magmatism, and Pan-African lead loss. *Bulletin of Geosciences*, 7(4),p. 205-219.
- Suh C., Cabral A. and Ndime E., (2009).** Geology and ore fabrics of the Nkout high-grade haematite deposit, southern Cameroon. Society for geology applied to mineral deposits. *Smart Science for Exploration and Mining" P. J. Williams et al. (editors), p. 558-563.*
- Olinga, J.B., Mpesse, J.E., Minyem, D., Ngako, V., Ndougsa-Mbarga, T. and Ekodeck, G.E., (2010).** The Awaé-Ayos Strike-Slip Shear Zones (Southern-Cameroon) Geometry, Kinematics and Significance in the Late Pan African Tectonics. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, Vol. 257, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1127/0077-7749/2010/0042>.
- Owona – Angue, M.L.C., Nguiya, S., Nouayou, R., Tokam-Kamga, A.P., and Manguelle-Dicoum, E., (2011).** geophysical investigation of the transition zone between the Congo Craton and the kribi-campo sedimentary basin (southwestern Cameroon). *South African journal of geology*, vol. 114, N°2 pp. 145-158. doi:10.2113/gssajg.114.2.145.
- Owona, S., (2008).** Archaean, Eburnean and Pan-African Features and Relationships in their Junction Zone in the South of Yaounde (Cameroon). PhD. thesis, University of Douala, 232 pages.
- Owona, S., Schulz, B., Ratsbacher, L., Mvondo-Ondoa, J., Ekodeck, G.E., Tchoua, F., and Affaton, P., (2011).** Pan-African metamorphic evolution in the southern Yaounde Group (Oubanguide Complex, Cameroon) as revealed by EMP-monazite dating and thermobarometry of garnet metapelites. *J. Afr. Earth Sci.* Vol. 59, pp. 125–139.
- Owona, S., Tichomirowa, M., Ratschlbacher, L., Mvondo Ondoa, J., Tchoua, M.F., Affaton, P. and Ekodeck, G.E., (2012).** New igneous zircon Pb/Pb and metamorphic Rb/Sr ages in the Yaounde group (Cameroon, central Africa): implications for the Panafrican central African Fold belt evolution. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, Vol. 101, pp. 1689-1703.

- Paterson, Grant, Watson Ltd (1976).** Etudes aéromagnétiques sur certaines Régions de la République Unie du Cameroun. Rapport d'interprétation. ACDI, Toronto, Canada. 190 pages.
- Penaye, J., Toteu, S. F., Van Schmus, W. R. and Nzenti, J. P., (1993).** U-Pb and Sm-Nd preliminary geochronologic data on the Yaoundé series, Cameroon: reinterpretation of the granulitic rocks as the suture of a collision in the "centrafrican" belt. – Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris, vol. **317**, pp. 789-794.
- Penaye, J., Kröner, A., Toteu, S.F., Van Schmus, W.R. and Doumnang, J.C., (2006).** Evolution of the Mayo Kebbi region as revealed by zircon dating: an early (ca. 740 Ma) Pan-African magmatic arc in southwestern Chad. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 44, pp. 530–542.
- Phillips, J.D., (1998).** Processing and Interpretation of Aeromagnetic Data for the Santa Cruz Basin - Patahonia Mountains Area, South-Central Arizona. U.S. Geological Survey Open-File Report, Arizona, pp. 02–98.
- Poudjom Djomani, Y.H., Diament, M. and Wilson, M., (1997).** Lithospheric structure across the Adamawa plateau (Cameroon) from gravity studies, *Tectonophysics*, Vol. 273, pp. 317-327.
- Pouclet, A., Vidal, M., Doumnang, J.C., Vicat, J.-P. and Tchameni, R., (2006).** Neoproterozoic evolution in the Southern Chad: Pan-African ocean basin closing, arc accretion and late- to post-orogenic granitic intrusion. *J. Afr. Earth Sci.* Vol. 44, pp. 543–560.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J. and Somerton, I. W., (1990).** Magnetic interpretation in three dimensions using Euler Deconvolution, *Geophysics*, Vol. 55, pp. 80–90.
- Reid, A.B. and Thurston, J.B., (2014).** The Structural Index in Gravity and Magnetic Interpretation: Errors, Uses, and Abuses. *Geophysics*, 79, pp. 61-J66. <https://doi.org/10.1190/geo2013-0235.1>
- Rocci, G., (1965).** Essai d'interprétation des mesures géochronologiques. La structure de l'Ouest africain. *Sciences de la Terre, Fr.*, Vol. 10 N°3-4, pp. 461-479
- Roest, W. R., Verhoef, J., and Pilkington, M., (1992).** Magnetic interpretation using the 3-D signal analytic, *Geophysics*, Vol. 57, pp. 116-125
- Roy, K., (2008).** Potential theory in applied geophysics, Springer, Berlin.

- Sabaka, T. J., Olsen, N., and Langel, R. A., (2002).** A comprehensive model of the quit-time, near-Earth magnetic field: phase 3, *Geophysical Journal International*, Vol. 151, pp. 32-68.
- Salem, A., William, S., Fairhead, D., Ravat, D., and Smith, R., (2007).** Tilt-depth method: a simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. *The Leading-Edge December, Meter Reader*, Vol.150, pp. 2-5.
- Schlüter, T. and Trauth, M. H., (2006).** Geological Atlas of Africa. With Notes on Stratigraphy, Tectonics, Economic Geology, Geohazards and Geosites of Each Country. UNESCO Nairobi Office. 255 pages.
- Shandini, N. Y., Tabord, C. T. and Fairhead, J. D., (2010).** Gravity data interpretation in the northern edge of the Congo Craton, South-Cameroon, *Anuário do Instituto de Geociências*, Vol. 33 N°1, pp.73-82.
- Simon-Fleury, (2011).** Methode magnétique appliquée à l'exploration multi-échelle du bassin de Franceville. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg,333 pages.
- Soh Tamehe, L., Tankwa, M.N., Chongtao, W., Ganno, S., Ngnotue, T., Kouankap Nono, G.D., Jeremia Simon, S., Zhang, J. and Nzenti, J.P., (2018).** Geology and geochemical constrains on the origin and depositional setting of the Kpwa–Atog Boga banded iron formations (BIFs), northwestern Congo craton, southern Cameroon, *Ore Geology Reviews*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.03.017>
- Tadjou, J. M., Nouayou, R., Kamguia, J., Kande, H. I. and Manguelle-Dicoum, E., (2009).** Gravity analysis of the boundary between the Congo craton and the Pan-African belt of Cameroon, *Aust. J. Earth Sci.*, Vol.102, pp.71–79.
- Tchakounté, J.N., Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., Penaye, J., Deloule, E., MvondoOndoa, J., Bouyo Houketchang, M., Ganwa, A.A. and White, W., (2007).** Evidence of ca 1.6-Ga detrital zircon in the Bafia Group (Cameroon): Implication for the chronostratigraphy of the Pan-African Belt north on the Congo craton. *C.R. Geoscience* Vol. 339, pp. 132–142.
- Tchameni, R., (1997).** Géochimie et géochronologie des formations de l'archéen du paléoprotérozoïque du Sud Cameroun groupe du Ntem, Craton du Congo. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, France.
- Tchameni, R., Mezger, K., Nsifa, N.E. and Pouclet, A., (2000).** Neoproterozoic evolution of the Congo craton: Evidence from K-rich granitoids of the Ntem Complex, southern

- Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. **30**, pp. 133-147. doi:10.1016/S0899-5362(00)00012-9
- Tchameni, R., Mezger, K., Nsifa, N.E. and Pouclet, A., (2001).** Crustal origin of early Proterozoic syenites in the Congo craton (Ntem Complex), southern Cameroon. *Lithos*, vol. **57**, pp0 23-42. doi:10.1016/S0024-4937(00)00072-4.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sherill, R.E., (1998).** *Applied Geophysics*, second edition, Cambrig University Press, 770 pages.
- Teutsong Tessontsap, Tomaso R.R. Bontognali, Paul-Désiré Ndjigui, Johannes C. Vrijmoed, Damon Teaglec, Matthew Cooper and Derek Vance, (2017).** Petrography and geochemistry of the Mesoarchean Bikoula banded iron formation in the Ntem complex (Congo craton), Southern Cameroon: Implications for its origin. *Ore geology reviews* 80, <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.07.003>
- Thompson, D.T., (1982).** EUIDPH: A New Technique for Making Computer-Assisted Depth Estimates from Magnetic Data. *Geophysics*, Vol. 47, pp. 31-37. <https://doi.org/10.1190/1.1441278>
- Takodjou-Wambo, J. D., Ganno, S., Djonthu Lahe, Y. S., Kouankap Nono, G. D., Fossi, D. H., Tchouatcha, M. S. and Nzenti, J. P., (2018).** Geostatistical and GIS analysis of the spatial variability of alluvial gold content in Ngoura-Colomines area, Eastern Cameroon: Implications for the exploration of primary gold deposit. *Journal of African Earth Sciences*. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2018.03.015
- Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., Penaye, J. and Nyobe, J.B., (1994).** U-Pb and Sm-Nd evidence of Eburnean and Pan-African high grade metamorphism in cratonic rocks of southern Cameroon. *Precambrian Research*, vol. 67, pp. 321-347.
- Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., Penaye, J. and Michard, A., (2001).** New U–Pb and Sm–Nd data from north-central Cameroon and its bearing on the pre-PanAfrican history of Central Africa. *Precambrian Research*, vol. 108, pp. 45–73.
- Toteu, S.F., Penaye, J. and Poudjom Djomani, Y., (2004).** Geodynamic Evolution of the Pan-African Belt in Central Africa with Special Reference to Cameroon. *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 41, pp. 73-85. <https://doi.org/10.1139/e03-079>
- Toteu, S.F., Yongue Fouateu, R., Penaye, J., Tchakounte, J., Seme Mouangue, A.C., Van Schmus, W.R., Deloule, E., and Stendal, H., (2006).** 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, pp. 479–493. **Vail, J.R. (1989)**. Ring complexes and related rocks in Africa. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 8 N°1, pp. 19-40.
- Van Den Hende, (1969)**. Notice Explicative sur la Région Batouri-Ouest Ouest de la Carte Géologique de Reconnaissance à l'échelle du 1/500.000, Direction des Mines et Géologie, Yaoundé, Cameroun, 23 pages.
- Vanhoutte, M. and Salley, P., (1986)**. Reconnaissance des calcaires de Mintom – Projet de recherches 1045 minières, sud-est Cameroun. *United Nations Development Program, Unpublished Report*, Vol. 91, pp. 59.
- Vanhoutte, M., (1989)**. Bilans de l'étude géologique et l'évaluation des calcaires de Mintom. Projet de mise en valeur d'indices miniers sélectionnés. *United Nations Development Program, Unpublished Report* Vol. 92, pp. 64.
- Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M. and MacKenzie, C., (2004)**. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, Vol. 23 N°2, pp. 116-119.
- Vicat, J. P. and Bilong, P, (1998)**. Esquisse géologique du Cameroun. Collection GEOCAM, Presses Universitaires Yaoundé, pp. 3-11.
- 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., (2017)**. Combination of Tilt-angle and Euler Deconvolution Approaches to Determine Structural Features from Aeromagnetic Data Modeling over Akonolinga Loum Area(Centre-East, Cameroon). *International Journal of Geosciences*, Vol. 8, pp.925-947.
- Yonta-Ngouné, C., Nkoumbou, C., Barbey, P., Le Breton, N., Montel, J.M. and Villiéras, F., (2010)**. Geological context of the Boumnyebel talcschists (Cameroon): inferences on the Pan-African belt of Central Africa. *C. R. Geosci.* Vol. 342, pp. 108–115.
- Zanga-Amougou, A., (2015)**. Investigation gravimétrique des structures profondes et superficielles de la zone Batouri-Berberati (Est-Cameroun/Ouest de la République Centrafricaine). Thèse de Doctorat/Phd de l'Université de Yaoundé I, 89 pages.
- Zanga-Amougou, A., Ndougsa-Mbarga, T., Meying, A., Yufenyu Layu, D., Bikoro-Bi-Alou, M. and Manguelle-Dicoum, E., (2013)**. 2.5D Modeling of Crustal Structures along the Eastern Cameroon and Western Central African Republic Derived from Finite Element and Spectral Analysis Methods. *Geophysica*, Vol. 49 N°1–2, pp. 75–97.

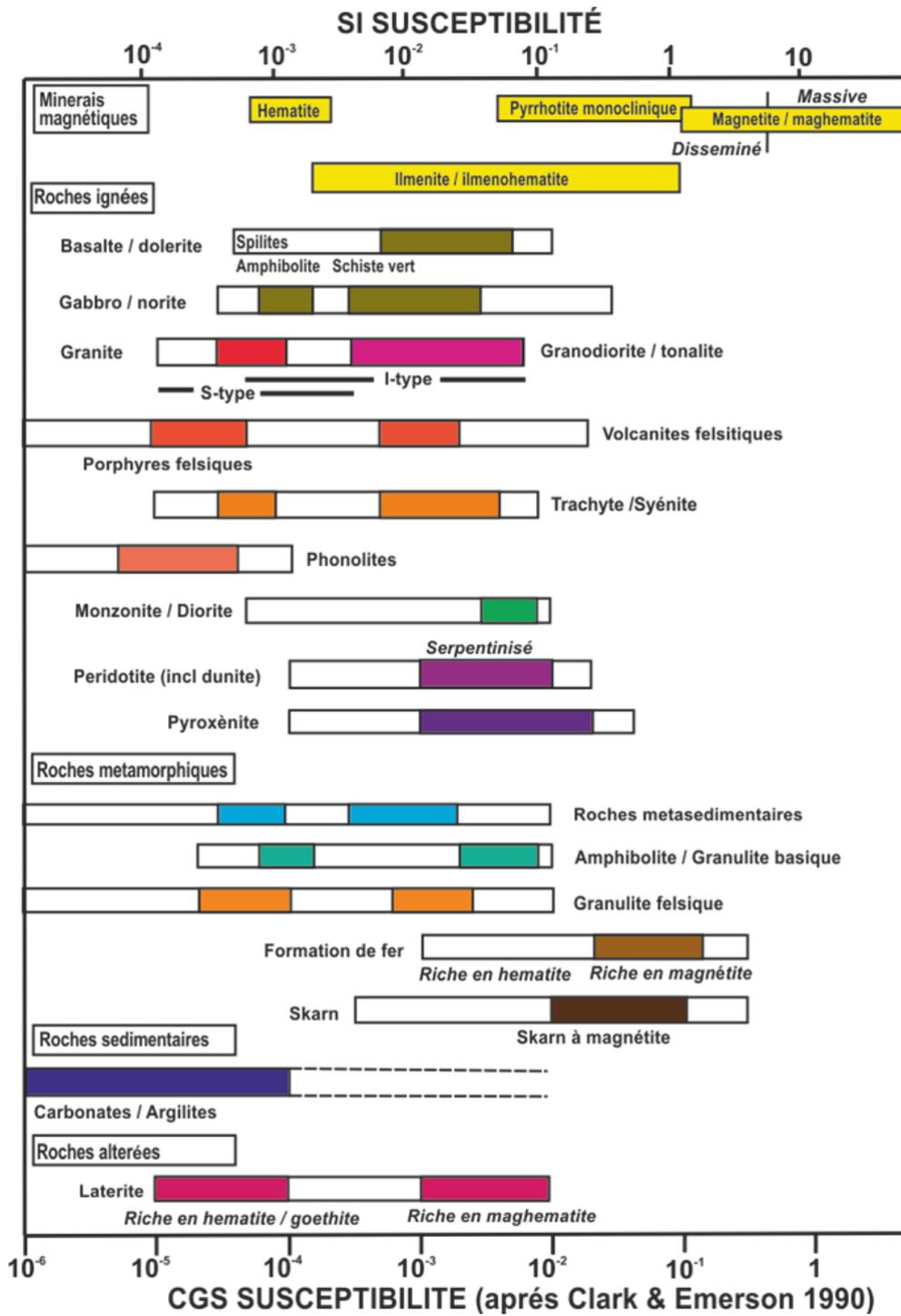
ANNEXES

Annexe 1 : Susceptibilités magnétiques des Minéraux

Tableau (a): Minéraux et leurs susceptibilités magnétiques classés en fonction de matériaux

Nom des minéraux	Formules chimiques	Susceptibilités ($\times 10^{-6}SI$)
Eau	H ₂ O	-9,05
Or, bismuth	Au, Bi	-166
Calcite	(CaCO ₃)	-13,8
Plomb	Pb	-18
Cuivre	Cu	-10
Mercure	Hg	-29
Argent	Ag	-26
quartz	(SiO ₂)	-14,5
Feldspaths		-12,4
pyroxènes	(Fe,Mg) SiO ₃	
Silicates	(Fe,Mg)Ca(SiO ₃) ₂	
ilménite	FeTiO ₃	
sidérite	FeCO ₃	
Amphibole		750
Pyroxène		
Césium		51
Uranium		7,2
Calcium		7,2
Sodium		7,2
Aluminium		22
Olivine	(Fe,Mg) ₂ SiO ₄	
granodiorite		300 – 3 000
Schiste		300 – 3 000
Gneiss		100 – 25 000
Granite		0 – 50 000

Basalte		200 – 17 500
grès		0 – 20 900
Limestones		0 – 3 000
Gabbro		1000 – 90 000
dolerite		
Maghémite	Fe_2O	2000 – 25000
Hématite	Fe_2O_3	4000 - 35 000
Illmenite		300 – 35 000
Magnétite	Fe_3O_4	1200 - 19 200



Annexe 2 :Publication de la thèse

Justine Yandjimain, Théophile Ndougsa-Mbarga, Arsène Meying, and Paul Claude Ngoumou, 2020. Evidences by Multiscale Analysis and 2D3/4 Models from the Magnetic Anomalies and Iron Mineralization (BIF) over the DJADOM-ETA Area, Southeastern Cameroon. Open Journal of Earthquake Research, 9, 19-32. <https://doi.org/10.4236/ojer.2020.91002>

Justine Yandjimain, Théophile Ndougsa-Mbarga, Marcelin Bikoro Bi-Alou, Arsène Meying. 2018. Aeromagnetic Data Modeling for Geological and Structural Mappings over the DJADOM-ETA Area, in the Southeastern Cameroon. International Journal of Geosciences, 9, 354-370. <https://doi.org/10.4236/ijg.2018.96022>

Justine Yandjimain, Théophile Ndougsa-Mbarga, Arsène Meying Marcelin Bikoro Bi-Alou, Paul Claude Ngoumou, Stéphane Patrick Assembe, Jean Daniel Ngoh , Olivier Ulrich Igor Owono-Amougou. 2017. Combination of Tilt-Angle and Euler Deconvolution Approaches to Determine Structural Features from Aeromagnetic Data Modeling over Akonolinga-Loum Area (Centre-East, Cameroon). International Journal of Geosciences, 8, 925-947 <https://doi.org/10.4236/ijg.2017.87053>