

REPUBLIQUE DU CAMEROUN  
Paix-travail-patrie

\*\*\*\*\*

UNIVERSITE DE YAOUNDE I  
\*\*\*\*\*

FACULTE DES SCIENCES  
\*\*\*\*\*

CENTRE DE RECHERCHE ET DE  
FORMATION DOCTORALE EN  
SCIENCES, TECHNOLOGIE ET  
GEOSCIENCES  
\*\*\*\*\*

UNITE DE RECHERCHE ET DE  
FORMTATION DOCTORALE PHYSIQUE ET  
APPLICATIONS  
\*\*\*\*\*

B.P.812 Yaoundé

Email : crfd\_stg@uy1.uninet.cm



REPUBLIC OF CAMEROON  
Peace-Work-Fatherland

\*\*\*\*\*

UNIVERSITY OF YAOUNDE I  
\*\*\*\*\*

FACULTY OF SCIENCE  
\*\*\*\*\*

POSTGRADUATE SCHOOL OF  
SCIENCE, TECHNOLOGY AND  
GEOSCIENCES  
\*\*\*\*\*

RESEARCH AND POSTGRADUATE  
TRAINING UNIT FOR PHYSIC AND  
APPLICATIONS  
\*\*\*\*\*

P.O. Box 812 Yaoundé

Email : crfd\_stg@uy1.uninet.cm

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

# CONTRIBUTION DE LA METHODE NEURONALE A L'OPTIMISATION DES INVESTIGATIONS GEO- PHYSIQUES AU CAMEROUN

**THESE**

*Présentée et soutenue publiquement en vue de l'obtention du*

*Doctorat/Ph.D en Physique*

*Spécialité : Physique de l'environnement terrestre*

Option: Géophysique et Géo-exploration

Par:

**DIFFO STEVE**

Matricule : 12W1894

Master de Physique

*Sous la Co-direction de*

**NGUIYA Sévérin**  
*Maître de Conférences,*  
*Université de Douala*

**NDJAKA Jean Marie Bienvenu**  
*Professeur,*  
*Université de Yaoundé I*

**ANNEE 2022**



RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN

*Paix-Travail-Patrie*

\*\*\*\*\*

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I

\*\*\*\*\*

FACULTÉ DES SCIENCES

\*\*\*\*\*

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

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



REPUBLIC OF CAMEROON

*Peace-Work-Fatherland*

\*\*\*\*\*

UNIVERSITY OF YAOUNDÉ I

\*\*\*\*\*

FACULTY OF SCIENCE

\*\*\*\*\*

DEPARTMENT OF PHYSICS

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

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

Nous, Professeur **VONDOU Derbetini Appolinaire** et Professeur **MANGUELLE-DICOUM Eliezer**, respectivement Examineur et Président du jury de la thèse de Doctorat/Ph.D de Monsieur **DIFFO Stève**, matricule **12W1894**, préparée sous la co-direction du Professeur **NDJAKA Jean-Marie Bienvenu** et du Professeur **NGUIYA Sévérin** intitulée : «**Contribution de la méthode neuronale à l'optimisation des investigations géophysiques au Cameroun**», soutenue le **Mardi 13 décembre 2022**, 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..... **05 JAN 2023** .....

Examineur

Pr **VONDOU Derbetini  
Appolinaire**

Président du jury

Pr **MANGUELLE-DICOUM  
Eliezer**

Le Chef de Département de Physique



**Bienvenu**

---

## **DEDICACE**

---

À

Mon Père feu Papa DIFFO Martin ;  
Sa tendre épouse, ma Mère MBOUGUE Epse DIFFO Colette  
Noëlle.

Le succès n'est pas final et l'échec fatal non plus ; c'est le  
courage de continuer qui compte. Surtout, fait de l'Éternel tes  
délices et tes projets réussiront !!!

---

## REMERCIEMENTS

---

Je rends tout d'abord grâce au Seigneur **Dieu Tout-Puissant** de m'avoir maintenu en santé, soutenu dans toutes les difficultés, accompagné et guidé dans ce travail, et sans qui la réalisation de celui-ci n'aurait pas été possible.

L'occasion m'est ici offerte de remercier le Professeur **NDJAKA Jean-Marie Bienvenu** Chef du Département de Physique à l'Université de Yaoundé I, qui malgré ses multiples occupations, notamment liées à l'animation du département a accepté d'assurer la supervision de ce travail. Sa grande disponibilité et ses encouragements répétés m'ont galvanisé tout au long de mes études doctorales.

Je remercie également le Professeur **NGUIYA Severin**, Directeur de cette thèse, qui m'a proposé d'entreprendre cette investigation géophysique par la méthode neuronale dans la région de Lom-Pangar en mettant gracieusement à ma disposition les données de ma zone d'étude ; mais également en m'a accordant sa confiance, sa disponibilité et toute l'expertise scientifique dont j'avais besoin pour mener à bien ces travaux. Nos séances de discussions scientifiques ont été très enrichissantes, et suffisamment efficaces pour la finalisation de cette thèse.

Que le Recteur de l'Université de Yaoundé I, le Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I et le Directeur de l'Ecole Doctorale de l'Université de Yaoundé I trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour leur accueil et les commodités ayant permis la bonne réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier le Professeur Émérite **MANGUELLE-DICOUM Eliézer**, qui a accepté de présider le jury de soutenance de cette thèse. J'exprime toute ma reconnaissance aux membres de jury pour l'évaluation de ce travail. Leurs remarques et observations ont contribué à améliorer la qualité de ce travail. A cet effet, j'exprime ma profonde gratitude vis-à-vis du Professeur **VONDOU Derbetini Appolinaire** Responsable du laboratoire A.C.T de l'Université de Yaoundé I.

Une reconnaissance particulière est adressée au Docteur **TOKAM Alain-Pierre**, pour ses remarques, conseils et suggestions apportés dans ce travail ; qu'il trouve ici l'expression de toute ma reconnaissance.

---

Je remercie le Docteur **NGATCHOU Evariste**, enseignant de l'école Normale Supérieure de Yaoundé au Département de Physique qui m'a tenu en éveil : son expertise, ses critiques, ses remarques et son savoir-faire ont été très bénéfiques durant ce travail, sans oublier sa disponibilité légendaire. Il m'a toujours encouragé et a le mérite d'avoir conduit mes premiers pas dans cette exaltante voie de la recherche, depuis les travaux de mon mémoire de Master, sans qui ledit mémoire n'aurait pas été rendu possible.

Je ne saurais oublier les enseignants et chercheurs, membres (ou membres associés) du Laboratoire de Géophysique et géo-exploration, en l'occurrence les Professeurs **NOUAYOU Robert**, **OWONA ANGUE Marie Louise**, **Théophile NDOUGSA MBARGA**, **Philippe NJANDJOCK NOUCK**, et **TABOD Charles TABOD** pour leur précieux enseignements ; et avec qui j'ai eu des échanges fructueux.

Une reconnaissance particulière va à l'endroit de mes camarades et aînés académiques particulièrement **LEMOTIO Willy** et le Docteur **KAMTO Paul Gautier** pour nos fructueux échanges, leurs contributions multiformes sans oublier leur disponibilité.

Une profonde gratitude va à l'endroit de l'ingénieur **NDAM NJIKAM Mohamed** pour son assistance, suggestions, et apports à propos de la manipulation du logiciel Geosoft Oasis montaj, ainsi que pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail.

Je tiens enfin à remercier :

- Ma tendre épouse **DJIDJOU NGUEWA Epse DIFFO Corinne**. Son attention, sa présence, son amour et son soutien légendaire auront été déterminant quant à l'aboutissement de cette étude. Reçoit tout mon affection et ma profonde gratitude. Aucun mot, ni cadeau ne sera jamais assez grand pour exprimer la merveilleuse personne que tu es pour moi.
- Mon beau Père Papa **NGUEWA Laurent** pour les encouragements et le soutien moral qu'il a su me donner tout au long de mes travaux de thèse.
- Ma sœur aînée et mes frères : **MEZEMPEM AGOUTSOP Epse KUETEJIO Nathalie Nadège**, **SONKENG DIFFO Armel**, **DIFFO DONGMO AKOUA Duplex**, **DIFFO DJIOMO DONFACK Lionel** et **DIFFO TIAGUE Yannick** pour les encouragements et leur soutien multiforme tout au long de mes études universitaires. Leur présence dans ma vie me procure un bonheur inestimable et me donne toujours la force d'avancer face aux différents obstacles. Mon Père feu **DIFFO Martin** se serait certainement réjoui aujourd'hui avec nous, en voyant le fruit des énormes sacrifices consentis pour mes

---

études scolaire et universitaire. Malheureusement DIEU l'a rappelé plus tôt ; que Son Nom soit loué et que Sa volonté soit faite !

Que tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la bonne réalisation de cette thèse trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude !

## TABLE DE MATIERES

|  |              |
|--|--------------|
| <b>DEDICACE</b> .....  | <b>i</b>     |
| <b>REMERCIEMENTS</b> .....   | <b>ii</b>    |
| <b>TABLE DE MATIERES</b> .....                                     | <b>xii</b>   |
| <b>LISTE DES FIGURES</b> .....                                     | <b>xiv</b>   |
| <b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....                                    | <b>xvii</b>  |
| <b>LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES</b> .....                    | <b>xviii</b> |
| <b>RESUME</b> .....  | <b>xiii</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>xiv</b>   |
| <b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....                                 | <b>1</b>     |
| <b>CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE ET PROBLEMATIQUE</b> ..... | <b>4</b>     |
| <b>I.1 PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE</b> .....                   | <b>4</b>     |
| I.1.1 Contexte géologique .....                                    | 5            |
| I.1.2 Contexte tectonique .....                                    | 9            |
| I.1.3 Contexte hydrographique de la région.....                    | 14           |
| <b>I.2 LES TRAVAUX ANTERIEURS</b> .....                            | <b>15</b>    |
| I.2.1 Travaux géophysiques antérieurs .....                        | 15           |
| I.2.2 Travaux antérieurs sur le réseau de neurones .....           | 18           |
| <b>I.3 PROBLEMATIQUE</b> .....                                     | <b>19</b>    |
| <b>I.4 HYPOTHESES ET OBJECTIFS DE L’ETUDE</b> .....                | <b>20</b>    |
| <b>CONCLUSION</b> .....  | <b>21</b>    |
| <b>CHAPITRE II : THEORIE, DONNÉES ET MÉTHODES</b> .....            | <b>22</b>    |
| <b>II.1 THEORIE</b> .....  | <b>22</b>    |
| II.1.1 L’anomalie gravimétrique .....                              | 22           |
| II.1.2 Les anomalies de Bouguer .....                              | 23           |
| <b>II.2 DONNÉES GRAVIMETRIQUES</b> .....                           | <b>24</b>    |
| II.2.1 Acquisition des données gravimétriques.....                 | 24           |
| II.2.2 Distribution des points de mesure .....                     | 25           |
| <b>II.3 METHODES DE TRAITEMENT</b> .....                           | <b>26</b>    |
| II.3.1 Méthode neuronale .....                                     | 26           |
| II.3.2 Méthode géophysique de traitement des données .....         | 39           |
| II.3.3 Traitement des données .....                                | 47           |
| <b>CONCLUSION</b> .....  | <b>55</b>    |
| <b>CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION</b> .....                  | <b>56</b>    |
| <b>III.1 CONCEPTION ET VALIDATION DU MODELE NEURONAL</b> .....     | <b>56</b>    |

|   |            |
|---|------------|
| III.1.1 Conception du réseau de neurones.....   | 56         |
| III.1.2 Validation du réseau.....   | 59         |
| <b>III.2- CARTE D'ANOMALIE DE BOUGUER DENSIFIÉE .....</b>                             | <b>65</b>  |
| III.2.1 Analyse et interprétation de la Bouguer.....                                  | 65         |
| III.2.2 Comparaison avec la géologie .....  | 66         |
| <b>III.3 ÉTUDE QUANTITATIVE .....</b>   | <b>67</b>  |
| III.3.1 Les cartes transformées.....  | 67         |
| III.3.2 Analyse multi-échelle des maxima de gradient et cartographie des linéaments.. | 76         |
| III. 3.3 Carte structurale interprétative.....  | 82         |
| III.3.4 Analyses et confrontations .....  | 83         |
| III.3.5 Bilan de l'étude linéamentaire .....  | 86         |
| <b>III.4 ANALYSE ET INTERPRETATION DES ANOMALIES RESIDUELLES ET REGIONALES.....</b>   | <b>87</b>  |
| III.4.1 Le choix de la régionale.....   | 87         |
| III.4.2 La carte d'anomalies régionales de la région de Lom- Pangar .....             | 90         |
| III.4.3 La carte d'anomalies résiduelles de la région de Lom- Pangar .....            | 91         |
| <b>III.5 MODELISATION 2.5D.....</b>   | <b>94</b>  |
| III.5.1 Choix du profil.....  | 95         |
| III.5.2 Application aux profils de la résiduelle d'ordre 2.....                       | 95         |
| <b>III.6. DISCUSSION .....</b>  | <b>101</b> |
| III.6.1 L'architecture du réseau neuronal.....  | 101        |
| III.6.2 Profondeur d'investigation.....   | 101        |
| III.6.3 Carte structurale .....   | 102        |
| III.6.4 La méthode de séparation des anomalies gravimétriques .....                   | 102        |
| III.6.5 Sur la densité de structures .....  | 103        |
| III.6.6 La modélisation 2.5D.....   | 103        |
| <b>CONCLUSION .....</b>   | <b>104</b> |
| <b>CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....</b>                                       | <b>130</b> |
| 1. CONCLUSION GÉNÉRALE .....  | 106        |
| 2. PERSPECTIVES.....  | 107        |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>   | <b>109</b> |

## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 : Carte routière du Cameroun montrant la localisation de la zone d'étude.....        | 4  |
| Figure 2 : Carte géologique de l'Afrique Centrale montrant les grands ensembles.....          | 5  |
| Figure 3 : Carte géologique de la région d'étude (Toteu et al., 2008 ; modifié).....          | 8  |
| Figure 4: Carte structurale schématique de la Chaîne Panafricaine du Cameroun .....           | 11 |
| Figure 5: Extension de la Ligne Volcanique du Cameroun (Tokam et al., 2010 ; modifiée) ..     | 13 |
| Figure 6: Carte de localisation du plateau Sud camerounais présentant le réseau .....         | 15 |
| Figure 7: Modèle simplifié de la terre: l'ellipsoïde de référence .....                       | 23 |
| Figure 8: Carte de distribution des points de mesure in-situ de la donnée gravimétrique ..... | 25 |
| Figure 9: Carte d'anomalies de Bouguer de la zone d'étude .....                               | 26 |
| Figure 10: Exemple de neurone biologique (Jayet, 2002) .....                                  | 28 |
| Figure 11: Architecture d'un neurone artificiel .....   | 29 |
| Figure 12: Fonction Sigmoidale.....   | 30 |
| Figure 13: Fonction Heaviside .....   | 30 |
| Figure 14: Fonction Signe .....   | 30 |
| Figure 15: Fonction linéaire à seuil.....   | 31 |
| Figure 16: Le modèle de Kohonen.....  | 32 |
| Figure 17: Le réseau monocouche .....   | 32 |
| Figure 18: Architecture d'un réseau multicouche .....   | 33 |
| Figure 19: Modèle du neurone .....  | 35 |
| Figure 20: Gradient de l'erreur totale.....   | 36 |
| Figure 21: Procédure d'élaboration d'un modèle neuronal.....                                  | 39 |
| Figure 22: Calcul de l'effet gravimétrique d'un élément de volume V .....                     | 46 |
| Figure 23: Schéma de la procédure d'apprentissage de notre RNA .....                          | 48 |
| Figure 24: Architecture du réseau de neurones .....   | 49 |
| Figure 25: Réseau de perceptrons multicouches .....   | 57 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 26: Performance du réseau neuronal dans l'estimation des anomalies de Bouguer .....   | 58 |
| Figure 27: Superposition des anomalies de Bouguer mesurées avec celles générées.....         | 61 |
| Figure 28: Nouvelle carte de distribution des points de données gravimétriques estimées .... | 62 |
| Figure 29 : Présentation comparée de la Bouguer.....   | 63 |
| Figure 30: Carte topographique de la zone d'étude. ....                                      | 67 |
| Figure 31: Facteur de corrélation entre les prolongées de la Bouguer .....                   | 68 |
| Figure 32: Représentation de la déflection en fonction de l'altitude de prolongement         | 69 |
| Figure 33: Carte d'anomalies de Bouguer prolongée à 5km.....                                 | 70 |
| Figure 34: Carte d'anomalies de Bouguer prolongée à 15km.....                                | 71 |
| Figure 35: Carte d'anomalies de Bouguer prolongée à 25km.....                                | 72 |
| Figure 36: Carte d'anomalies de Bouguer prolongée à 35km.....                                | 73 |
| Figure 37: Carte de la dérivée verticale des anomalies de Bouguer .....                      | 75 |
| Figure 38: Carte du gradient horizontal des anomalies de Bouguer .....                       | 76 |
| Figure 39: Localisation des maxima du gradient horizontal .....                              | 77 |
| Figure 40: Localisation des maxima du gradient horizontal obtenus sur la carte .....         | 77 |
| Figure 41: Localisation des maxima du gradient horizontal de la dérivée verticale.....       | 79 |
| Figure 42: Localisation des maxima du gradient horizontal de la dérivée verticale.....       | 79 |
| Figure 43: Carte de déconvolution d'Euler avec un indice structurel de 0,1 .....             | 81 |
| Figure 44: Carte structurale interprétative de la zone d'étude .....                         | 82 |
| Figure 45: Rosace des directions de fracturation déduites des anomalies gravimétriques ..... | 83 |
| Figure 46: Facteur de corrélation entre la grille des valeurs de la Bouguer prolongée.....   | 88 |
| Figure 47: Variance entre la grille des valeurs de la Bouguer prolongée .....                | 89 |
| Figure 48: Carte d'anomalies régionales de degré 3 de la zone d'étude.....                   | 91 |
| Figure 49: Carte d'anomalie résiduelle de degré 2 de la zone d'étude .....                   | 93 |
| Figure 50: Spectre de puissance 1D caractérisant les anomalies au sud de Sembé .....         | 96 |
| Figure 51: Spectre de puissance 1D caractérisant les anomalies du bassin de Pangar .....     | 96 |

Figure 52: Modélisation de l'anomalie positive caractérisant le dôme gravimétrique. .... 97

Figure 53: Modélisation du bassin à l'ouest de Pangar..... 100

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1: Organismes, chercheurs et années de campagne (Tadjou, 2004)..... 24

Tableau 2: Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel ..... 28

Tableau 3: Indices structuraux pour les sources gravimétriques..... 43

Tableau 4: Paramètres d'entrées et statistiques des modèles développés..... 57

Tableau 5 : Récapitulatif des paramètres statistiques..... 64

Tableau 6: Direction des principales failles identifiées par l'analyse multi-échelle ..... 83

## LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

### ABREVIATIONS

|                        |  |
|------------------------|--|
| <b>A.C.D.I :</b>       | Agence Canadienne de Développement International             |
| <b>A.I.G :</b>         | Association Internationale de Géodésie                       |
| <b>A.N.N:</b>          | Artificial Neural Network                                    |
| <b>A.S.A :</b>         | Amplitude du signal analytique                               |
| <b>B.G.I :</b>         | Bureau Gravimétrique International                           |
| <b>C.A.S.Z:</b>        | Central African Shear Zone                                   |
| <b>C.C.C :</b>         | Cisaillement Centre Camerounais                              |
| <b>D.V :</b>           | Dérivée verticale  |
| <b>D.H :</b>           | Dérivée horizontale  |
| <b>E</b>               | Est  |
| <b>E.Q.M :</b>         | Erreur Quadratique Moyenne                                   |
| <b>GE.TECH:</b>        | Geophysical Technology                                       |
| <b>G.P.S:</b>          | Global Positioning System                                    |
| <b>G.S.R</b>           | Global Solar Radiation                                       |
| <b>I.G.R.F:</b>        | International Geomagnetic Reference Field                    |
| <b>I.R.D :</b>         | Institut de Recherche pour le Développement                  |
| <b>I.R.G.M :</b>       | Institut de Recherche Géologique et Minière                  |
| <b>IGSN71:</b>         | International Gravity Standardization Network 1971           |
| <b>L.C :</b>           | Ligne du Cameroun  |
| <b>M.B.E:</b>          | Mean Bias Error  |
| <b>M.S.H.D.V.D :</b>   | Multi-scale horizontal derivative of the vertical derivative |
| <b>N</b>               | Nord   |
| <b>O.R.S.T.O.M :</b>   | Office de Recherche Scientifique des Territoires d’Outre-Mer |
| <b>P.MC :</b>          | Perceptron Multicouche                                       |
| <b>R<sup>2</sup> :</b> | Coefficient de corrélation                                   |
| <b>R.M.S.E:</b>        | Root Mean Square Error                                       |
| <b>R.N.A:</b>          | Réseaux de Neurones Artificiels                              |
| <b>R.T.P:</b>          | Reduction-to-the-pole  |
| <b>S</b>               | Sud  |

|                |  |
|----------------|--|
| <b>S.L.P:</b>  | Single Layer Perceptron                            |
| <b>U.I.G.G</b> | Union Internationale de Géodésie et de Géophysique |
| <b>W</b>       | Ouest  |
| <b>W.C.D:</b>  | Western Cameroon Domain                            |
| <b>ZCCC</b>    | Zone de Cisaillements Centre Cameroun              |
| <b>ZCS</b>     | Zone de Cisaillements de la Sanaga                 |

## SYMBOLES, VARIABLES ET CONSTANTES PHYSIQUES

|  |  |   |
|--|--|---|
| $\int$ :   | Intégral   |   |
| $\partial$ :                                       | Dérivée partielle  |   |
| $\frac{d}{dx}$ :                                   | Dérivée par rapport à x  |   |
| $\vec{\nabla}$ ou $\overrightarrow{\text{grad}}$ : | Opérateur nabla ou gradient                                    |   |
| $\Delta$ :   | Variation  |   |
| $\Sigma$ :   | Somme  |   |
| $P_n$ :  | Polynôme de Legendre de degré n                                |   |
| $P_{n,m}$ :  | Fonction associée de Legendre de degré n et d'ordre m          |   |
| $P_n^m$ :  | Fonction de Schmidt de degré n et d'ordre m                    |   |
| <b>R</b> :   | Rayon moyen de la terre  | <b>(m)</b>  |
| <b>a</b> :   | Rayon équatorial de l'Ellipsoïde de référence                  | <b>(m)</b>  |
| <b>c</b> :   | Rayon polaire de l'Ellipsoïde de référence                     | <b>(m)</b>  |
| <b>B</b> :   | Anomalie de Bouguer  | <b>(mGal)</b>   |
| <b>g</b> :   | Valeur théorique de la pesanteur sur l'Ellipsoïde de référence | <b>(m/s<sup>2</sup>)</b>                              |
| <b>U</b> :   | Potentiel gravimétrique  | <b>(m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup>)</b>                 |
| $\varphi$ :  | Latitude géocentrique  | <b>(degré)</b>  |
| $\omega$ :   | Vitesse de rotation de la terre                                | <b>(rad.s<sup>-1</sup>)</b>                           |
| $\delta$ ou $\rho$ :                               | Densité volumique de masse                                     | <b>(g.cm<sup>-3</sup>)</b>                            |
| $\lambda$ :  | Longueur d'onde  | <b>(m)</b>  |
| <b>k</b> :   | Nombre d'onde  | <b>(m<sup>-1</sup>)</b>                               |
| <b>G</b> :   | Constante de gravitation universelle                           | <b>(m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>.s<sup>-2</sup>)</b> |
| <b>A</b> :   | Anomalie à l'air libre   | <b>(mGal)</b>   |

---

## RESUME

---

Dans cette étude il est question de ressortir la contribution de la méthode neuronale à l'optimisation du traitement des données géophysiques au Cameroun ce à travers une technique de densification. Pour cela, la région de Lom-Pangar à l'Est-Cameroun a été choisie comme zone-cible car présentant à l'échelle du Cameroun, l'une des plus faibles couvertures en données géophysiques terrestres. Partant de 466 points de mesures in-situ on obtient après densification 960 points. Les résultats obtenus après densification sont jugés satisfaisants d'un point de vue géostatistique notamment, statistique (bonne corrélation  $R^2 = 0,9811$ , faible valeur d'erreurs : RMSE= 0,0804 et MBE= 0,0003) et gravimétrique avec tout d'abord forte une similitude entre la Bouguer issue de la méthode neuronale et celle obtenue exclusivement à partir des données in-situ puis une zone de gradient qui s'apparenterait à une identité liée à la zone CCC. L'exploitation des données densifiées met en évidence dans la région de Lom-Pangar : (1) Trois directions majeures (NE-SW, WNW-ESE, et ENE-WSW) identifiées comme appartenant toutes au domaine du panafricain et correspondant à trois domaines géologiques d'âge et d'évolution différents à savoir les granites syn-tectoniques à l'Est, la série de Lom au centre et la série métamorphique au nord-ouest. L'orientation ENE-WSW apparaît comme principale direction. (2) La séparation régionale résiduelle associée à la modélisation 2.5D caractérisent la zone de Lom-Pangar comme appartenant au vaste couloir d'anomalies négatives et positives. Les anomalies positives au Sud et au Nord sont associées aux intrusions de matériaux denses, mises en place suite à une remontée de matériaux lourds depuis la croûte inférieure ou d'origine mantellique. Le toit du socle constituant la profondeur maximale du bassin est à 17,5 km. Les modèles obtenus montrent que le socle de la région est granito-gneissique. Les migmatites et les gneiss assurant les contacts faillés dans la région de Lom-Pangar. (3) Des nouvelles failles ont été identifiées et considérées comme des extensions latérales et verticales de la Zone de Cisaillements de la Sanaga (ZCS) ou celles de la Zone de Cisaillement Centre Cameroun (ZCCC). Des nouvelles couches structurales clairement identifiées dans les localités Sud de Sembé et Ouest de Pangar, témoignant ainsi la forte dynamique et de la complexité géologique de la zone d'étude. Ces conclusions font bien plus que corroborer avec celles obtenues précédemment dans la région. Elles contribuent ainsi à valider la méthode neuronale comme procédé d'optimisation des données géophysiques.

**Mots clés:** Lom-Pangar, bassin volcano-sédimentaire du Lom, méthode neuronale artificielle anomalies gravimétriques, filtrage, analyse multi-échelle, interprétation.

---

## ABSTRACT

---

In this study, the contribution of the neural method to the optimization of geophysical data processing in Cameroon is highlighted through a densification technique. For this purpose, the Lom-Pangar region in Eastern Cameroon was chosen as a target area because it has one of the lowest coverage of terrestrial geophysical data in Cameroon. Starting from 466 points of in-situ measurements, we obtain 960 points after densification. The results obtained after densification are considered satisfactory from a geostatistical point of view, in particular, statistical (good correlation  $R^2 = 0.9811$ , low error values: RMSE= 0.0804 and MBE= 0.0003) and gravimetric with firstly a strong similarity between the Bouguer obtained from the neural method and that obtained exclusively from in-situ data, then a gradient zone that would be similar to an identity related to the CCS zone. Densified data analysis highlights three major directions in the Lom-Pangar area (NE-SW, WNW-ESE, and ENE-WSW), all of which are identified as belonging to the Pan-African domain and corresponding to three geological domains of different age and evolution, namely the syn-tectonic granites in the east, the Lom series in the center, and the metamorphic series in the northwest. The ENE-WSW orientation appears as the main direction. (2) Residual regional separation associated with 2.5D modeling characterize the Lom-Pangar area as belonging to the broad corridor of negative and positive anomalies. The positive anomalies to the south and north are associated with intrusions of dense material, emplaced by upwelling of heavy material from the lower crust or of mantle origin. The top of the basement constituting the maximum depth of the basin is at 17.5 km. The models obtained show that the basement of the region is granite-gneissic. Migmatites and gneisses provide the fault contacts in the Lom-Pangar area. (3) New faults have been identified and considered as lateral and vertical extensions of the Sanaga Shear Zone (SSZ) or the Central Cameroon Shear Zone (CCSZ). New structural layers were clearly identified in the southern Sembé and western Pangar localities, reflecting the strong dynamics and geological complexity of the study area. These findings more than corroborate those obtained previously in the region. They thus contribute to validate the neural method as a method for optimizing geophysical data.

**Key words:** Lom-Pangar, Lom volcano-sedimentary basin, artificial neural network, gravity anomalies, filtering, multi-scale analysis, interpretation.

---

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

---

A l'Est du Cameroun tout comme dans l'ensemble du pays, les principales campagnes de levés géophysiques remontent à plus de quatre décennies. Ces campagnes faites pour l'essentiel le long des routes et au sein des agglomérations, n'offraient pas toujours une bonne couverture (qualitative et quantitative) en données géophysiques car, ayant une distribution de données particulièrement éparse; donc pas toujours propice à une interprétation ou une modélisation de son sous-sol. D'autre part, le Cameroun porte les traces des grands évènements tectoniques ayant affecté l'Afrique à l'échelle du Gondwana notamment le Craton du Congo, le Cisaillement Centre-Camerounais, la ligne volcanique du Cameroun, la chaîne panafricaine nord équatoriale pour ne citer que ceux-ci (Dumont, 1986 ; Nzenti et al., 2006). De même, la région de l'Est Cameroun est reconnue pour son sous-sol particulièrement riche en réserves minières (Ngoumou et al., 2021).

Plusieurs travaux notamment géophysiques ont déjà été menés dans la région de l'Est-Cameroun dans l'optique d'améliorer la connaissance de cette zone au niveau géologique et géodynamique. Elle commence par les campagnes de levés géophysiques et particulièrement gravimétriques de reconnaissance menés par l'ORSTOM en Afrique centrale et occidentale (Crenn, 1957; Rechenmann, 1966) ; puis s'en sont suivies les études menées par Nzenti et al., (2006) qui présentaient essentiellement des indices clairs d'affleurement de structure dans la région. Nguiya, (2009) a utilisé les données gravimétriques pour apporter une contribution à la géologie et la tectonique dans le bassin de Lom ; La distribution spatiale des données insuffisantes, il recommande pour des études géophysiques futures une densification des données gravimétriques. Kamto et al., (2021) confrontés au souci lié à la faible couverture en données gravimétriques, utilisent la technique de collocation des moindres carrés pour combiner des données terrestres in-situ aux données satellitaires du modèle d'EGM 2008 afin d'améliorer la résolution de la carte d'anomalies de Bouguer obtenue et de produire une carte structurale dans la région côtière du sud-ouest du Cameroun. Bouba et al., (2017) pour mieux caractériser les structures géologiques du plateau de l'Adamaoua, comblent le déficit de données gravimétriques terrestres en combinant les données existantes avec celles du modèle gravimétrique GGM02C. Ceci permet de noter qu'une bonne étude structurale nécessite une couverture suffisante en données géophysiques.

La région de Lom-Pangar du fait de son fort degré d'enclavement, au moment où le Cameroun bénéficie d'une campagne de levées géophysiques ; il en est résulté une couverture faible en données gravimétriques et très éparse ; impactant ainsi de façon considérable la qualité des résultats géophysiques dans la région (Diffo et al., 2022). Il était donc primordial dans cette région avant toute étude scientifique, d'améliorer la couverture en données géophysiques soit

en effectuant de nouvelles campagnes de levés géophysiques, ce qui nécessite un certain coût ou alors utiliser une méthode d'interpolation suffisamment performante. Certaines technologies issues du domaine de l'intelligence artificielle comme la méthode neuronale fournissent des méthodes innovatrices de traitement de données scientifiques. Cette technologie de pointe issue de l'intelligence artificielle a connu récemment un développement significatif dans la plupart des domaines de la science y compris en géophysique.

Le travail effectué et présenté dans cette étude consiste à améliorer la couverture gravimétrique de la région de Lom-Pangar en faisant recours à la méthode neuronale artificielle de plus en plus utilisée et appréciée dans le domaine des géosciences pour la qualité de ses résultats. A la nouvelle grille d'anomalies de Bouguer obtenue, on y appliquera différents types de filtrage afin de ressortir les identités structurales et tectoniques majeures de la région. Il sera plus précisément question de:

- Présenter les données géophysiques (gravimétriques) en soulignant les limites de celles-ci face à une étude structurale plus approfondie ;
- Concevoir une architecture neuronale offrant des garanties statistiques et gravimétriques suffisantes, nécessaires à une densification des anomalies de Bouguer dans la zone d'étude ;
- Réaliser une étude structurale de la région de Lom-Pangar à partir de la grille densifiée via la méthode neuronale ;
- Utiliser une méthodologie plus élaborée faisant intervenir différentes méthodes d'interprétation indirecte, inverse et directe, à l'effet de proposer un modèle de structure 2D1/2 pouvant servir de guide dans les recherches géologiques hydrogéologiques et minières futures ;
- Réaliser une analyse comparative des différentes signatures géologiques enregistrées à travers l'approche neuronale par rapport aux autres études faites dans la zone ; dans le but de souligner la plus-value de ce travail, ressortir la pertinence de la technique d'interpolation utilisée.

L'étude est basée sur les méthodes de traitement neuronales et gravimétriques. L'approche neuronale intervient spécifiquement dans le but d'améliorer la couverture en données gravimétriques de la région de Lom-Pangar en la densifiant. La méthode gravimétrique a pour objet d'établir une corrélation entre les variations latérales du champ de pesanteur et la densité des roches du sous-sol, pour en déduire sa structure géologique.

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

- Dans le premier chapitre, après avoir présenté la zone d'étude à travers une brève description des généralités géologiques, on passera en revue les principaux résultats des études géologiques, géophysiques et neuronales réalisés antérieurement dans la région de Lom-Pangar et au-delà ( pour les études neuronales), enfin la problématique servant de fil conducteur à la présente étude.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des données, à la méthode neuronale basée sur la densification des données et les techniques de traitement, d'analyse et d'interprétation gravimétriques.
- Dans le chapitre 3, après avoir conçu et réalisé un réseau de neurone adapté à l'étude, offrant des garanties d'un point de vue géostatistique ; différentes techniques de traitement et d'analyse permettront d'une part d'identifier les structures tectoniques et géologiques importantes dans la région de Lom-Pangar; mais aussi, proposeront un modèle de structure lithologique du sous-sol de ladite région. Cette partie s'achève par une discussion débouchant sur une analyse comparative des observations obtenues à travers l'approche neuronale vis-à-vis des autres études faites dans la zone, une conclusion et enfin des perspectives.

# **CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE ET PROBLEMATIQUE**

---

Toute étude géophysique s'appuie sur une zone d'investigation. Dans ce travail, la zone cible se localise dans la région de l'Est-Cameroun à Lom-Pangar. Le but de ce chapitre est de localiser la région d'étude et de décrire son contexte géologique et tectonique. Un résumé des travaux antérieurs effectués dans la région ; une analyse critique des travaux récents dans la région permet de dégager l'intérêt scientifique de ce travail.

## I.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone étudiée est située au centre-Est du Cameroun, dans le bassin volcano-sédimentaire du Lom et se limite (figure 1):

- au Sud: par le parallèle 4°30'N,
- au Nord: par le parallèle 6°15'N,
- à l'Ouest: par le méridien 11°30'E limitrophe à la région du centre
- à l'Est: par le méridien 13°45'E.

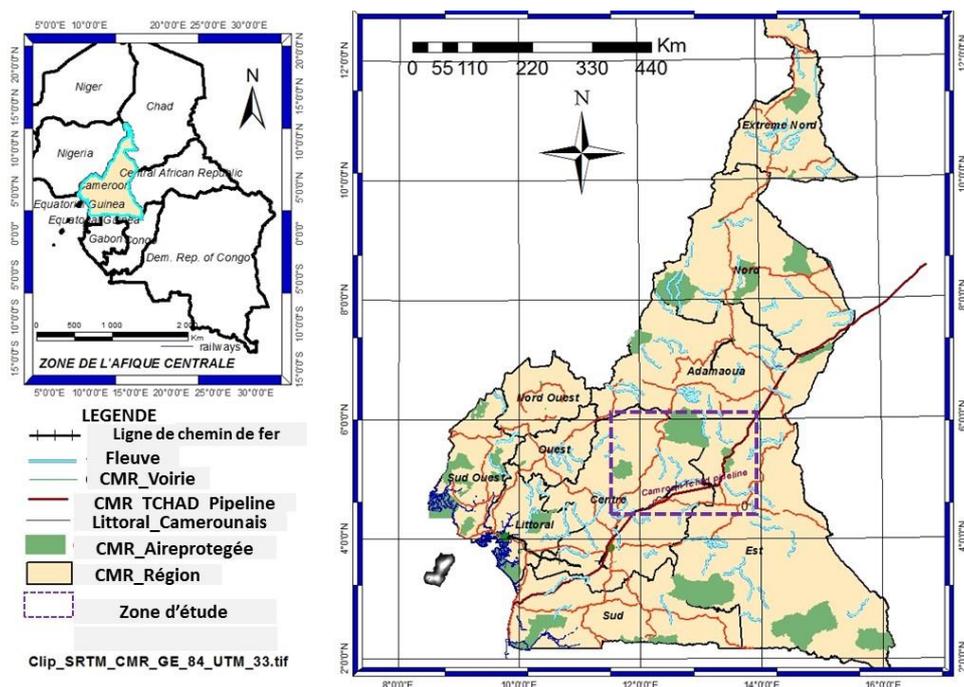


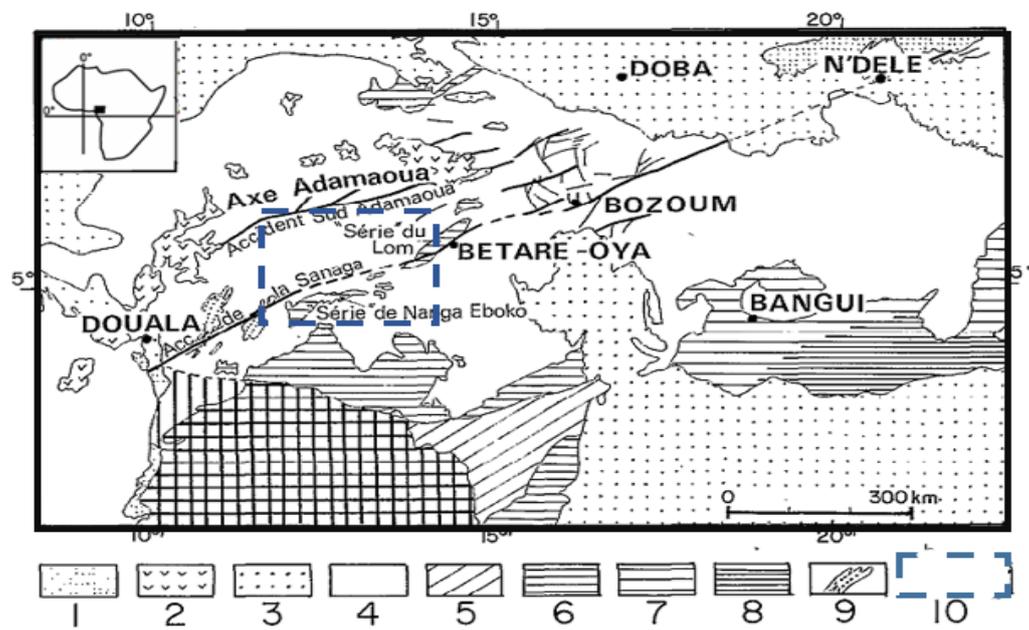
Figure 1 : Carte routière du Cameroun montrant la localisation de la zone d'étude.

Le climat qui y règne est du type équatorial guinéen, caractérisé par quatre saisons (deux saisons sèches et deux saisons de pluies) ; avec des températures relativement peu élevées et régulières. C'est une zone très enclavée à cause du manque de voies de communication, ce qui justifie une démographie assez faible (Jay et Grandjean, 2011). La zone d'étude présente un bon potentiel minier; car on soupçonne le flanc de la rivière Lom-Pangar d'être un réservoir de substances précieuses telles le diamant, le saphir, l'argent, le graphite, l'or pour ne citer que

ceux-ci (Jay et Grandjean, 2011 ; Fils et al., 2020). Elle est traversée par deux sous-bassins, formés par le Lom et son affluent principal le Pangar ; c'est d'ailleurs sur ces derniers qu'est construit le barrage hydroélectrique de Lom-Pangar. Sa géomorphologie ne diffère pas de celle de l'ensemble de la région. La région de L'Est a déjà fait l'objet de plusieurs travaux de géoscience impliquant la géologie, l'hydrogéologie et la géophysique.

### I.1.1 Contexte géologique

Après les levés de reconnaissance entrepris en Afrique centrale dans les années cinquante (Guiraudie, 1955), des données géologiques plus récentes ont été obtenues à la suite des travaux effectués sur le domaine central de la chaîne panafricaine du Cameroun (Soba, 1989; Ngako et al., 1991; Ngako, 1999; Njanko, 1999; Nzenti et al., 1999; Ngnotué et al., 2000; Toteu et al., 2001; Kapajika, 2003; Nzenti et al., 2006; Djouka-Fonkwé et al., 2008; Ngako et al., 2008; Njonfang et al., 2008; Kwékam et al., 2010) et la Ligne du Cameroun (Dautria et Girod, 1986; Temdjim, 1986 ; Nono et al., 1994; Marzoli et al., 1999; Temdjim et al., 2004; Temdjim, 2006; Kamgang et al., 2010).



1: Quaternaire ; 2: Volcanisme récent ; 3: Séries sédimentaires du Crétacé et du Tertiaire ; 4 : Série métamorphique de la zone mobile ; 5 : Série du Dja ; 6 : Série intermédiaire ; 7 : Séries du Précambrien ; 8 : Craton du Congo ; 9 : Bande de quartzites et de micaschistes ; 10 : Zone d'étude.

**Figure 2 : Carte géologique de l'Afrique Centrale montrant les grands ensembles géologiques et l'accident Sanaga-N'délé. (Dumont, 1986; modifiée).**

Ces travaux, en général plus détaillés, appliquent différentes méthodes d'approche telles que la géochronologie, la microtectonique, l'étude du métamorphisme, la pétrologie, la géochimie et la volcanologie. Les structures géologiques rencontrées dans la région de Lom-Pangar peuvent être regroupées en deux grands ensembles (figure 2): le socle et les formations de couvertures.

### ***1.1.1.1 Le socle***

Il regroupe les formations panafricaines "sensu stricto" mises en place au cours de cette orogénèse, et les formations héritées d'un bâti plus ancien repris au Panafricain.

#### ***a) L'Archéen***

L'Archéen constitue la période pendant laquelle la croûte continentale s'est formée (Taylor et McLennan, 1985). La connaissance de ces premières périodes de l'histoire de la Terre est basée sur les rares vestiges de la croûte ancienne appelée craton. Les formations géologiques comprennent parfois des matériaux d'origine volcano-sédimentaire. Sur le plan tectonique, l'épisode Archéen commence par une période primitive d'âge supérieure à 3,1 Ga et correspond à une phase de distension avec formation des bassins marins ou continentaux comblés de matériaux volcanosédimentaires injectés par suite des roches basiques (Tchameni, 1997 ; Tchameni et Nsifa, 1998). La période de 2,9 - 2,6 Ga correspond à une phase compressive et comporte un abondant plutonisme charnockitique, tonalitique et granitique. Il se développe aussi des raccourcissements, qui sont essentiellement accommodés par le biais de mouvements transcurrents auxquels sont associées des phases thermiques ; les granitoïdes d'âge environ 2,6 Ga sont les produits de cette fusion crustale. Ce magmatisme calco-alcalin clôt le cycle Archéen. Un autre épisode cette fois protérozoïque, commence avec des fracturations suivies des événements thermiques. Ce réchauffement favorise une remobilisation des formations Achéennes qui montent diapiriquement. En bordure du Craton, une tranche d'âges absolus (900 - 500 Ma) indiquant le Panafricain s'y individualise, il s'agit du contre-coup de la déformation tangentielle qui affecte le Panafricain.

#### ***b) Le Panafricain***

L'un des épisodes tectoniques majeurs ayant marqué le continent africain est le Panafricain ; il couvre une période allant de  $1000 \pm 10$  Ma à  $500 \pm 50$  Ma, et est responsable du paléocontinent Gondwanien (Nzenti et al., 2001). En tenant compte du cycle

orogénique contemporain dans d'autres continents, on arrive à la conclusion selon laquelle le Panafricain correspond à un événement majeur dans l'évolution terrestre. Cet événement se traduit par la formation des ceintures orogéniques les plus vastes appelées « chaînes », qui marquent la limite entre le précambrien et le phanérozoïque (Nzenti, 1987).

Les formations panafricaines du Cameroun appartiennent à la chaîne panafricaine Nord-Equatoriale (Nzenti et al., 1988) ou chaîne des Oubanguides (Poidevin, 1996; Vareille, 1994). Cette chaîne (Figure 2) se rattache à l'Est à la chaîne Mozambicaine et à l'Ouest, elle se prolonge au Nord du Brésil par la chaîne de Sergipe. L'ensemble forme une mega-ceinture orogénique de direction E-W et d'une longueur supérieure à 5000 km, sur une largeur de 300 km. Elle est pincée entre le craton du Congo-Sao Francisco au Sud et le complexe polycyclique Bresilocentrafricain au Nord (Vareille, 1994).

***c) Les formations paléoprotérozoïques remaniées***

Il s'agit des granulites, constitués par des gneiss à haut degré de métamorphisme, datés à 2100 Ma (Soba, 1989; Toteu et al., 2001). Sur l'ensemble de la chaîne panafricaine Nord équatoriale du Cameroun, ces formations affleurent sous forme de reliques au sein des formations panafricaines (Ngako, 1999 ; Ngnotué et al., 2000; Toteu et al., 2001)

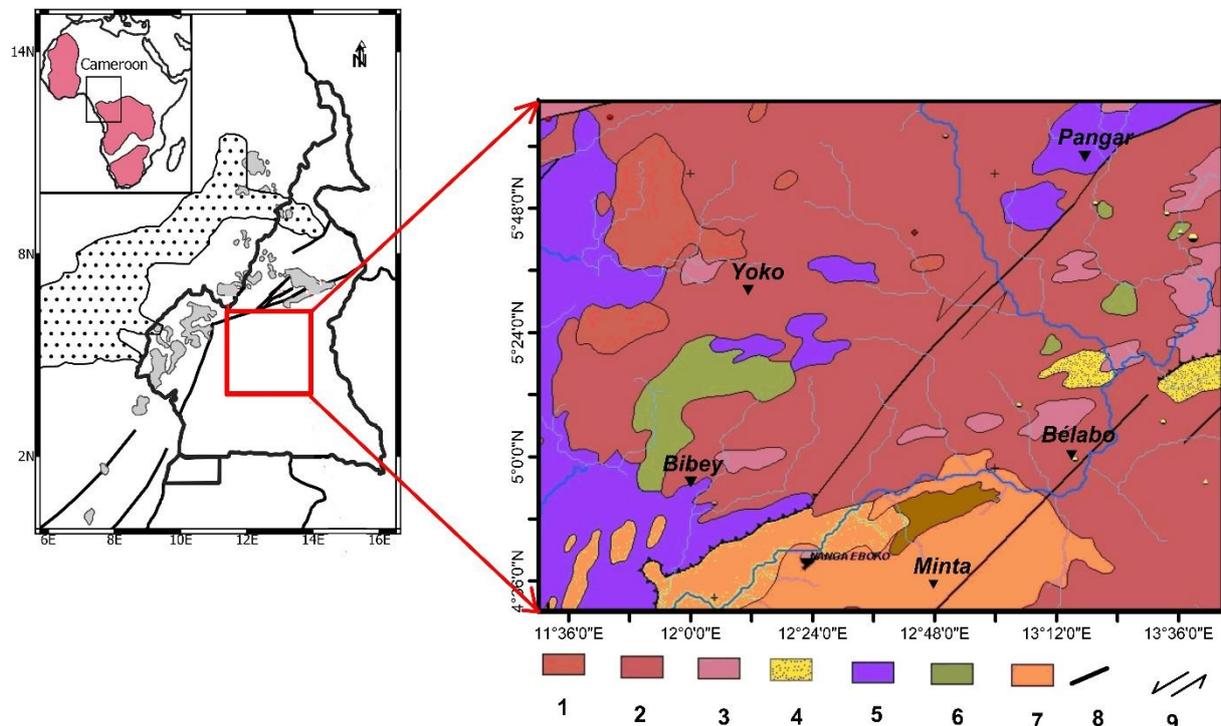
***d) Les formations panafricaines "sensu stricto"***

Elles sont constituées par les granitoïdes, les gneiss indifférenciés et métasédiments de la série du Lom. Les granitoïdes, essentiellement représentés par les granites syn-tectoniques sont très abondants dans la région où ils soulignent la zone de failles du Cisaillement Centre Camerounais (Njanko, 1999; Kapajika, 2003). Les gneiss indifférenciés sont surtout rencontrés dans la partie occidentale de la région. Les roches métasédimentaires de la série du Lom (Soba, 1989; Soba et al., 1991) sont constituées de schistes volcano-sédimentaires et graphiteux, de quartzites et de micaschistes. Cette série repose en concordance sur le socle granito-gneissique (Soba, 1989).

***1.1.1.2 Les formations de couverture***

Les travaux de tectonique, géochronologie et géochimie menés ces deux dernières décennies Vicat et Bilong, (1998) ont conduit à une vision globale de la géologie du Cameroun à l'échelle de la plaque africaine et du Gondwana. La vue générale de la géologie de la zone d'étude est une compilation des données issues de la notice explicative sur la feuille Batouri-

Est présentée par Gazel et Gérard, (1954), les travaux de Kankeu, (2008) et Toteu et al.,(2008) . Dans la région, le premier auteur fait la distinction entre un socle ancien et les roches sédimentaires plus récentes (Figure 3).



**1** : Granitoïdes post-tectoniques ; **2** : Granitoïdes syn à tardi-tectoniques ; **3** : Granitoïdes pré à syn-tectoniques ; **4** : schiste sédimentaire ; **5** : Gneiss granulitiques ; **6** : Sédiments détritiques ; **7** : Gneiss et micaschistes ; **8** : Failles et **9** : Mouvement des failles

**Figure 3 : Carte géologique de la région d'étude (Toteu et al., 2008 ; modifié)**

**a) Terrain sédimentaire non métamorphique**

Les terrains sédimentaires sont essentiellement constitués de formations superficielles. Ces formations sont très étendues et ne laissent que rarement apparaître les affleurements (Gazel et Gérard, 1954). On distingue :

- Les éluvions, abondantes dans la région ;
- Les terrasses, peu anciennes. Un exemple de ce type est situé le long de la falaise du Mari au Nord de Bétaré Oya ;
- Les alluvions récentes ;
- Les latérites, très importantes dans la région où l'épaisseur du manteau latéritique est de l'ordre d'une dizaine de mètres en général.

**b) Terrains métamorphiques**

Ce sont les formations qui datent du Précambrien. On peut distinguer actuellement deux types :

La série métamorphique ancienne, composée des ectinites (gneiss, micaschistes, amphibolites) et des migmatites (diadysites, embréchites, anatexites). Il s'agit d'anciens sédiments auxquels se sont associés les roches éruptives. L'ensemble a été entièrement transformé en roches cristallophylliennes par un métamorphisme profond. On observe cette série à l'Est de Bétaré Oya (Marraraba, Biboko, Djaoro-Bali), au Centre (pont de Lom), au Centre-Est (Garoua Boulai, Badzère, Borongo, Ndokayo) et au sud, où elle est plus étendue. La série épimétamorphique, comprenant les schistes et quartzites de la zone micaschiste. Cette série est localisée presque exclusivement dans la vallée du Lom, d'où son nom de série du Lom. Les premiers travaux menés dans cette région (Gazel et Gérard, 1954 ; Soba, 1989) ont montré que cette série était discordante sur la série métamorphique ancienne. Les travaux plus récents montrent plutôt une concordance entre les deux séries. Les formations du Lom ont été traversées par des intrusions granitiques. En relation avec ces intrusions, il existe dans le complexe du Lom, un réseau dense de filons, filonets et lentilles de quartz inter-stratifiés, dont l'étude détaillée pourra éclaircir le problème de l'or, intensément exploité dans la région.

### *c) Les intrusions granitiques*

Les formations métamorphiques précédentes ont été traversées par des intrusions granitiques parmi lesquelles on peut distinguer :

- Les granites syn-tectoniques anciens, à structure et composition souvent hétérogène, fréquemment orientés ou même gneissiques et dont les contours concordent avec les directions structurales des formations encaissantes. Des spécimens peuvent être observés le long de la route Bertoua – Bétaré-Oya ;

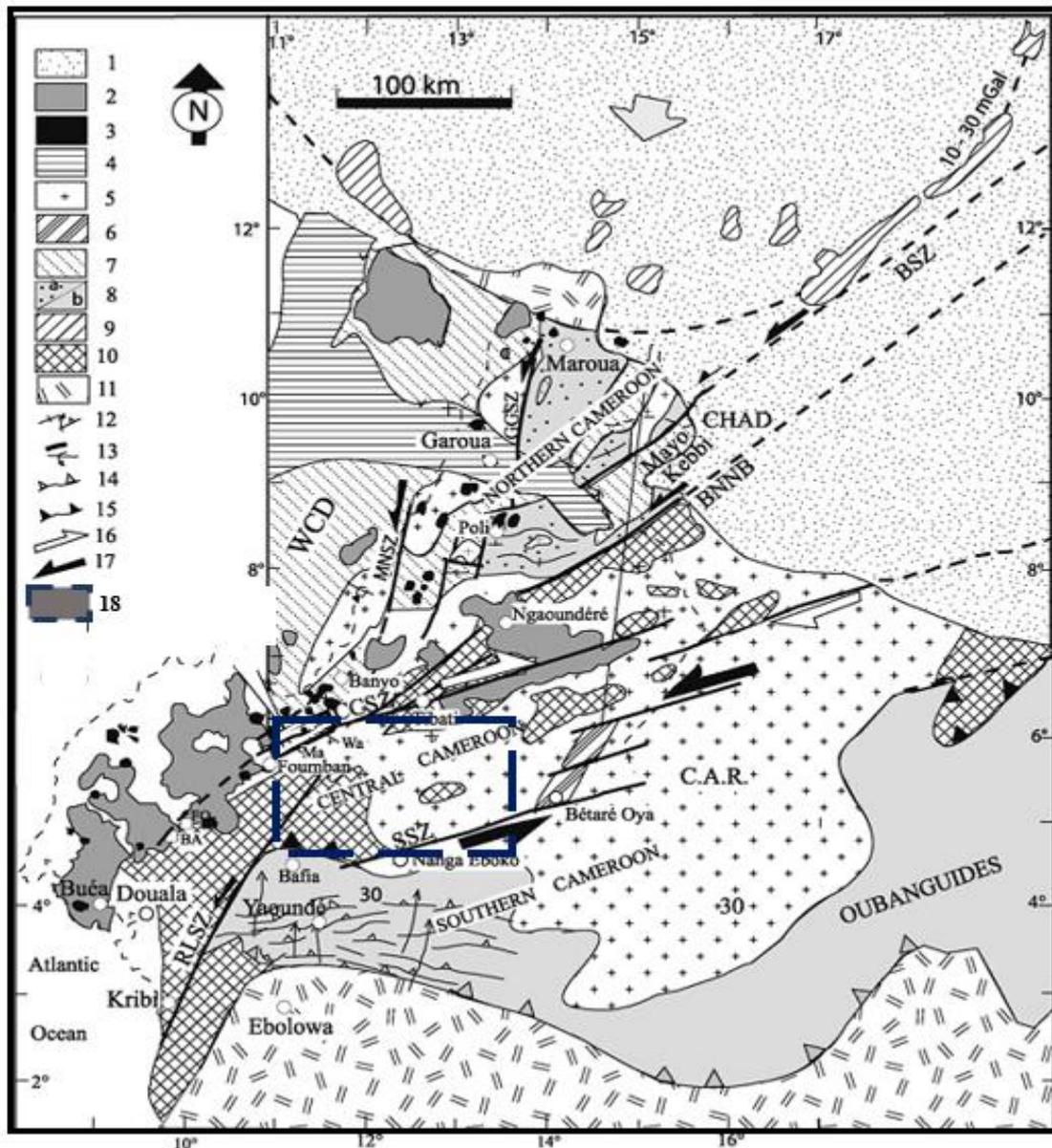
- Les formations syn-tectoniques tardives, dont la composition est souvent voisine des premières, mais qui présentent une homogénéité beaucoup plus grande et une orientation beaucoup plus rare. Leurs limites paraissent parfois indépendantes des plissements qu'ils recoupent suivant des directions quelconques. Les massifs Jérusalem, Borongo et Lingboka sont constitués de ce type ;

- Les granites post tectoniques, qui se présentent en gisement discordants, très homogènes et de composition nettement plus alcaline que les deux autres. Le massif de Kongolo en témoigne la présence dans la région.

## **I.1.2 Contexte tectonique**

Les travaux tectoniques, géochronologiques et géochimiques réalisés antérieurement (J. Vicat et P. Bilong, 1998) ont conduit à une vision globale de la géologie du Cameroun à l'échelle

de la plaque africaine et du Gondwana. L'ensemble de la région du Lom-Pangar est un sous-ensemble du plateau de l'Adamaoua, qui appartient aux formations géologiques de l'ancien craton du Congo et de la chaîne panafricaine. Le Cameroun fait partie du bouclier de l'Afrique centrale. Les plissements intenses du socle sont dus à l'orogénèse huronienne, pris dans un sens très large. Dans la zone d'étude, la direction dominante est N-E, mais avec de fréquentes variations (partie Nord et Est). Dans la zone sud, elle est N-S. Enfin vers l'Ouest de la zone, les directions s'infléchissent pour devenir E-W ou même N-W. On peut distinguer deux phases de plissements. La première ayant affecté la série métamorphique ancienne, et la seconde ayant affecté la série épimétamorphique. Pour la première, elle s'observe partiellement dans le Sud, le Nord-Est et le Nord-Ouest de la région étudiée. Pour la seconde, c'est non seulement dans la région du Lom où affleurent les schistes et quartzites, mais encore dans toute la série hétérogène où flottent de nombreux lambeaux de la même série. Pendant et après les phénomènes orogéniques, l'ensemble du socle a joué à plusieurs reprises, ce qui a donné de nombreuses fractures ou cassures plus ou moins importantes (tectonique de fond). Elles sont difficiles à observer à cause du manque d'affleurement (Gazel et Gérard, 1954; Soba, 1989). Il est à noter que la zone d'étude est coincée entre deux discontinuités majeures affectant le socle du Cameroun : la faille de la Sanaga au Sud, et la zone de cisaillement centre Camerounais au Nord. A ces deux principales zones de faiblesse, est associé un vaste réseau de linéaments constitué de failles parallèles et de directions variées (Figure 4).



1: Sédiments quaternaires; 2: volcanisme de la Line du Cameroun; 3: Plutonisme de la Line du Cameroun; 4: Sédiments mésozoïques (fossé de la Bénoué) ; 5: Granitoïdes syn-tectoniques tardifs; 6: Bassin métasédimentaire du Lom ; 7: Domaine ouest camerounais (intrusions syn-tectoniques basiques à calco-alcalins intermédiaires, 660–600 Ma); 8a: Groupe de Poli (Néoprotérozoïque) 8b: Groupe de Yaoundé (dépôts intra-cratoniques) ; 9: Anomalies gravimétriques de Massenya-Ounianga (10–30 mGal); 10: Reliques paléoprotérozoïques du domaine de l'Adamaoua-Yadé et du Nyong; 11: Craton; 12: foliations S2 et linéations d'étirements L2; 13: Antiformes; 14: Zone de chevauchement frontal majeur syn-D2; 15: Zone de chevauchement Syn-D1; 16: Sens du cisaillement syn-D3; 17: Sens du cisaillement syn-D2 ; 18 : zone d'étude SZ = zone de cisaillement. BSZ = SZ de Balché; BNMB = SZ Buffle Noir – Mayo Baléo; CCSZ = SZ Centre Camerounais; GGSZ = SZ Godé – Gormaya; MNSZ = SZ du Mayo Nolti; RLSZ = SZ du Rocher du Loup; SSZ = SZ de la Sanaga.

**Figure 4: Carte structurale schématique de la Chaîne Panafricaine du Cameroun (Njonfang et al., 2008 ; modifiée).**

Au Cameroun, la ceinture orogénique d'Afrique centrale (CAOB), qui s'étend sur près de 4000 km, abrite la zone de cisaillement sinistre de Tchollire-Banyo (TBSZ), la zone de cisaillement du Cameroun central (CCSZ) et la zone de cisaillement de la Sanaga (SSZ) ; ces deux dernières zones de cisaillement sont clairement représentées sur la figure 1. La première (CCSZ), dans la région du Nord-Ouest, traverse le plateau de l'Adamaoua de manière oblique entre les régions de Tibati et de Ngaoundal. La seconde (SSZ) est située au Sud-Est et traverse la région de Minta. Ces zones de cisaillement définissent un tissu mylonitique qui s'est développé de façon variable dans des gneiss métamorphiques, des migmatites et des intrusions granitiques ignées (Njonfang, et al., 2008 ; Ngalamo et al., 2017).

Les études structurales (Ngako et al., 1991) ont montré que le CCC est un accident ductile, de direction moyenne N30°E qui s'infléchit au Nord, au niveau de Tibati, en une direction N70°E (Figure 4). Cette mégastructure est jalonnée de nombreux affleurements de mylonites et de granitoïdes (Njonfang et Moreau, 1996; Ngako, 1999; Njanko, 1999; Nzenti et al., 1999; Kapajika, 2003 ; Nzenti et al., 2006 ; Njonfang et al., 2008; Ngako et al., 2008) Son évolution structurale fait apparaître deux phases de cisaillement dont l'une est dextre et l'autre sénestre. D'après Ngako, (1999), la phase dextre serait postérieure à la phase sénestre.

#### ***1.1.2.1 Le fossé Sud-Adamaoua***

Ce fossé est associé aux failles qui bordent la partie méridionale du plateau de l'Adamaoua. Il comprend le fossé créacé du Mbéré et le bassin du Djérem et correspond à un couloir d'environ 300 km de long sur 200 km de large orienté N60° à N70° (Dumont, 1987), masqué en surface par les basaltes qui constituent la limite géographique entre le fossé du Mbéré et le bassin du Djérem. Leur remplissage comprend des formations continentales et lagunaires: conglomérats, grès arkosiques et calcaires (Vincent, 1971).

#### ***1.1.2.2 La Ligne Volcanique du Cameroun (LVC)***

Déruelle et al., (1991) ont réalisé une synthèse des différentes hypothèses émises aussi bien quant à sa définition qu'à son interprétation. La Ligne Volcanique du Cameroun (figure 5) est une chaîne de volcans intra plaques en forme de Y qui s'étend de l'île de Pagalu dans l'Océan Atlantique jusqu'en Afrique de l'Ouest, sur environ 2000 km. Le long de cette ligne, on dénombre au moins une soixantaine de complexes anorogéniques dans le secteur continental et environ douze centres volcaniques majeurs s'étendant du Golfe de Guinée jusqu'au Lac Tchad suivant une direction moyenne N30°E (Tchoua, 1974; Moreau et al., 1987; Déruelle et al., 1991). Une particularité essentielle de la LVC réside dans sa situation

à cheval en domaines continental et océanique. Parmi tous ses édifices volcaniques, seul le Mont Cameroun est encore actif et sa dernière éruption s'est produite en l'an 2000. Plusieurs travaux (Tchoua, 1974 ; Nana, 1991 ; Ngatchou Wandji, 1995; Nkouathio, 1997, Kamgang, 2003 ; Déruelle et al., 2007) montrent que le volcanisme continental sur cette ligne est typiquement alcalin, issu d'un magma d'origine mantélique. L'origine du magmatisme serait liée à la réactivation des anciennes structures panafricaines dans un contexte qui fait l'objet d'interprétations variées. Plusieurs études suggèrent l'existence de zones de panache mantélique sous la LVC (Meyers et al., 1998; Burke, 2001), associée à une ligne de fragilité lithosphérique dans un contexte de rift naissant (Ebinger et al., 1997; Ngako et al., 2006) ont récemment proposé, après compilation de données pétrologiques, géochimiques et structurales récentes, des provinces volcaniques de Air au Niger, du plateau Joss au Nigéria et du Cameroun, que le volcanisme alcalin de la LVC serait dû à une relation complexe entre points chauds et fracture lithosphérique.

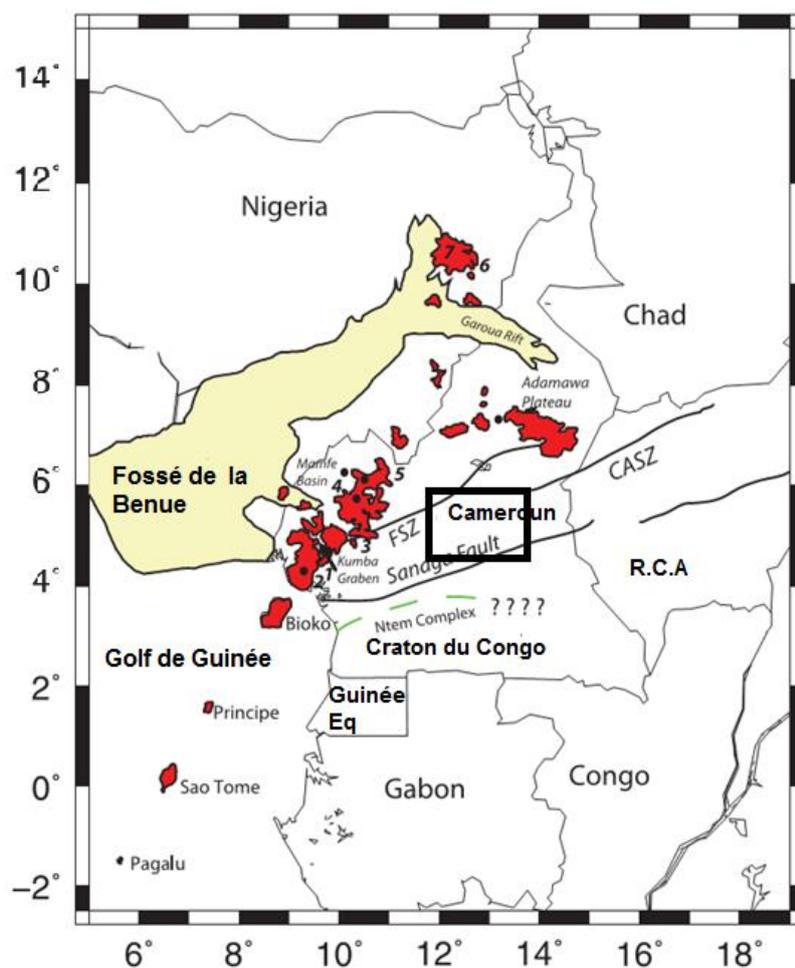


Figure 5: Extension de la Ligne Volcanique du Cameroun (Tokam et al., 2010 ; modifiée)

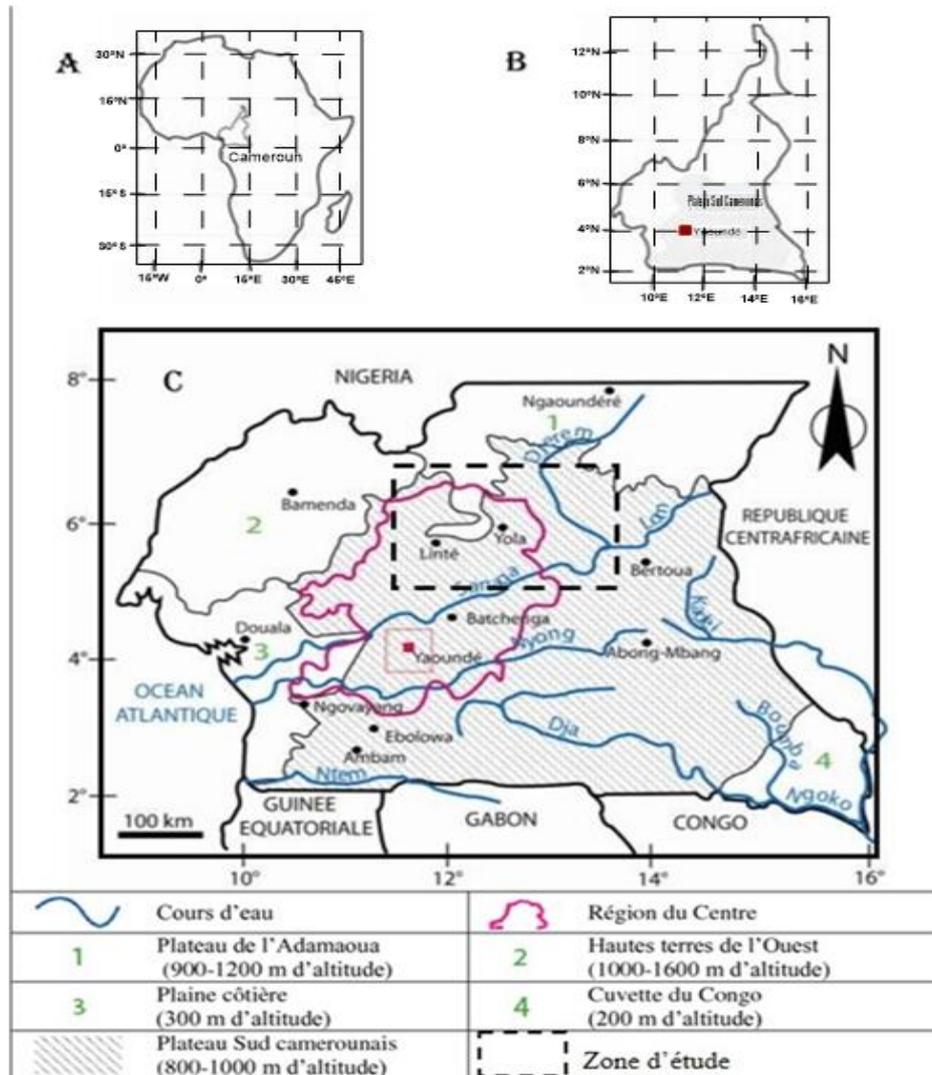
### ***1.1.2.3 Évolution tectonique de la zone***

Au Panafricain, l'Adamaoua aurait joué de façon transpressive, contrôlant la mise en place de nombreux granites dits "syn-tectoniques" (Ngako, 1999 ; Nzenti et al., 1999). Au Crétacé, la région est marquée par une tectonique extensive en relation avec l'ouverture de l'Atlantique Sud (Ngangom, 1983 ; Popoff, 1988). Les failles transcurrentes panafricaines rejoignent en cisaillement dextre, donnant naissance au fossé du Mbéré et au bassin du Djérem (Cornacchia et Dars, 1983; Dumont, 1987). Au Crétacé supérieur et au Tertiaire, une activité volcanique affecte le plateau de l'Adamaoua, les produits volcaniques sont pour la plupart des basaltes et des andésites (Temdjim et Tchoua, 1999). La réactivation de la faille de Fouban et la formation du rift contemporain de Ngaoundéré accompagnent la mise en place du "dôme" de l'Adamaoua au Cameroun et du Darfour au Soudan (Browne et Fairhead, 1983).

### **1.1.3 Contexte hydrographique de la région**

Elle est organisée autour de deux grands bassins : le bassin de Lom et Sanaga situé à l'Ouest et le bassin de la Sangha à l'Est. Ces deux bassins sont séparés par le tronçon de la route nationale n°1 traversant la région. Tous les cours d'eau de la partie nord autour de Bétaré-Oya, appartiennent au bassin de Lom et de la Sanaga directement lié à l'océan atlantique. Le Lom prend sa source à la frontière de la République Centrafricaine au Nord-Est de la région d'étude (Morin, 1979) . Son cours suit sensiblement une direction NNE-SSW dans la région de Bétaré-Oya où il a creusé une importante vallée dans les métasédiments. Il se jette vers le Sud-Ouest dans le Djerem et forme avec ce dernier la Sanaga, le fleuve le plus important du Cameroun. Les principales rivières sur la rive droite sont : le Mari qui collecte un grand nombre de petits cours d'eau, plus ou moins permanents dont les plus importants sont le Bédéré qui prend sa source au niveau du village Gazaweli et longe grossièrement la route goudronnée jusqu'à Bétaré-Oya, et le Nguengué qui coule au pied du Ngari Nguengué. Le Bal se jette directement dans le Lom (figure 6).

La route nationale qui traverse la partie sud de Garga-Sarali, suit approximativement une ligne de crête qui est comme il a été dit plus haut une ligne de partage des eaux. : À l'Est les rivières Oudou et Dila coulent vers le bassin de la Sangha, à l'Ouest, les rivières Doué et Boyo convergent vers le bassin de Lom et de la Sanaga. En majorité, ces cours d'eau ont un profil d'équilibre irrégulier et sont jalonnés de chutes et de rapides assez importants, les rendant en principe non navigables.



**Figure 6: Carte de localisation du plateau Sud camerounais présentant le réseau hydrographique de la région d'étude (Morin, 1979 ; modifiée).**

Quelques travaux géologiques ont été réalisés dans la zone d'étude. Ces travaux ont permis d'avoir une idée de la structure et de la tectonique du bassin. A ces travaux, il faut intégrer les études spécifiques effectuées sur des formations précises et dans des secteurs définis. Cependant, il existe quelques travaux géophysiques relevant ou non de l'intelligence artificielle qui ont été effectués à l'échelle régionale intégrant la zone d'étude.

## I.2 LES TRAVAUX ANTERIEURS

### I.2.1 Travaux géophysiques antérieurs

Les investigations géophysiques menées dans la région de l'Est-Cameroun ont essentiellement utilisé les méthodes magnétiques, sismiques, gravimétriques et magnétotelluriques.

### ***1.2.1.1 En magnétisme***

Mischel et Patterson, (1976) ont présenté un rapport d'interprétation d'études aéromagnétiques sur certaines régions de l'ancienne République Unie du Cameroun. Ils montrent que les métasédiments de la formation du Bas-Lom se répartissent en deux principaux faciès :

- le faciès phylliteux groupant les schistes, séricitoschistes et chloritoschistes ;
- le faciès siliteux essentiellement représenté par des quartzites interstratifiés dans la série schisteuse sous forme de lentilles de taille variable ; par suite d'une tectonique plicative importante, voire cassante, leur puissance et leur position stratigraphique sont difficiles à évaluer.

Kankeu, (2008) montre que les linéations magnétiques de la zone de cisaillement de Bétaré-Oya sont subhorizontales ou plongent faiblement vers le SW-WSW. Mbom-Abane, (1997) ont révélé l'existence d'un accident tectonique majeur de direction E-W le long du parallèle 4°N. Nyaban et al., (2021) mène dans la série du Lom au Cameroun une analyse multi-échelle des données aéromagnétiques. En combinant la dérivée d'inclinaison, la déconvolution d'Euler, le prolongement vers le haut et la modélisation 2.75D cartographient plusieurs grandes familles de failles dont les orientations sont ENE-WSW, E-W, NW-SE et N-S avec une prévalence NE-SW ; des failles de profondeurs interprétées entre 1000 et 3400 m. Dans ces études les données magnétiques utilisées sont pour l'essentielles aéromagnétiques, et/ou satellitaires. Les contraintes de ces mesures de l'ordre de l'altitude, de la végétation, et des constructions humaines impliquent un prétraitement non moins aisé.

Nguemhe Fils et al., (2020) pour évaluer efficacement la teneur en minerais aurifères dans la localité de Bétaré Oya, combinent diverses technique associées à trois jeux de données notamment : Une image satellitaire Sentinel-1A ; la localisations de 37 indices aurifères connus des organes de Recherche Géologique et Minière ; et enfin les Motifs de linéament interprétés à partir de l'image Sentinel-1A après analyse texturale. La qualité d'un seul jeu de donnée pour cette étude dans cette région se révélant particulièrement insuffisante.

### ***1.2.1.2 En sismologie***

Les études sismologiques de Dorbath et al., (1984) ; Dorbath et al., (1986) ont permis de mettre en évidence une croûte mince de 23 km d'environ , sous l'Adamaoua et environ. Les résultats de ces études permettent également de délimiter une zone anormale entre 40 km

et 140 km de profondeur, située dans le manteau supérieur, et due à une intrusion de faible densité caractérisée par des vitesses faibles.

D'autres travaux sismologiques ont été effectués dans le cadre de l'étude de la sismicité associée à la province volcanique du Cameroun. La compilation des données sismologiques concernant les séismes de 1982 à 1990 (Tabod et al., 1992) a permis de mettre en évidence deux zones de sismicité, dont l'une est liée à la faille de Foumban qui traverse le bassin sédimentaire du Lom, et l'autre associée à la bordure Nord du Craton du Congo. En effet, les activités sismiques enregistrées entre 1983 et 1985 (Nnangue et al., 1985) ont leurs hypocentres le long de la faille de Foumban, avec des profondeurs parfois supérieures à 30 km correspondant à la profondeur de la croûte dans le bassin volcano-sédimentaire du Lom auquel appartient la zone de Lom-Pangar.

Tokam et al., (2010) étudient la structure de la croûte sous la LVC et les régions adjacentes au Cameroun à l'aide de modèles de vitesse d'onde de cisaillement 1-D ; obtiennent différentes profondeurs de la croûte le long de la Ligne Volcanique du Cameroun, notamment qu'elle serait entre 35 et 39 km au Sud, plus profonde (43–48 km) sous le nord marge du craton du Congo et par contre plus fine (26–31 km) sous le rift de Garoua et la plaine côtière, zone intermédiaire à la région de Lom-Pangar. Ils expliquent ces différences par le fait que, l'amincissement de la croûte d'une part sous la plaine côtière soit dû à l'ouverture de l'océan Atlantique sud, tandis que sous le rift de Garoua il serait survenu lors de la formation de la fosse de la Bénoué au début du Crétacé. Ils suggèrent également que la croûte épaissie et l'épaisse couche mafique de la croûte inférieure sous la marge nord du craton du Congo pourraient être des caractéristiques reliques d'une collision continent-continent le long de cette marge lors de la formation du Gondwana.

### ***1.2.1.3 En gravimétrie***

Le levé gravimétrique de Collignon, (1968), révèle un gradient particulièrement important des anomalies gravimétriques dans la partie SW de la région. Ce gradient suggère l'existence de mouvements tectoniques importants.

Une étude gravimétrique menée par Poudjom et Diament, (1992) sur le comportement de la lithosphère sous le plateau de l'Adamaoua a permis de mettre en évidence une remontée de l'asthénosphère dans le manteau supérieur. Celle-ci est associée à un amincissement de la croûte.

Les études réalisées par Noutchogwe, (2004) sur la séparation régionale-résiduelle des anomalies gravimétriques du Sud-Adamaoua a permis de montrer que les anomalies

positives de courtes longueurs d'ondes traduisent l'effet gravimétrique d'une intrusion de roches lourdes, probablement basiques, dans le substratum granito-gneissique. Noutchogwe, (2010) en combinant un jeu de données gravimétrique in-situ avec des levés aéromagnétiques, obtient pour la même région, une profondeur moyenne du toit de l'intrusion estimée à 8 km. L'épaisseur de la pile sédimentaire est d'environ 500 m dans le bassin du Djerem et 1500 à 2000 m dans le fossé de la Mbéré.

Nguiya et al., (2008) ; Nguiya, (2009) ont montré que le bassin métasédimentaire du Lom est dissymétrique, limité dans ses parties nord et sud par des failles de rejets normales. Les métasédiments auraient une épaisseur de 3,5 à 6 km et reposeraient sur les migmatites vers le Nord et les gneiss vers le Sud. Ces auteurs ont également identifié une discontinuité majeure située entre 8 et 20 km de profondeur qu'il interprète comme étant la limite probable entre la croûte inférieure et la croûte supérieure sous le bassin. Cette étude étant précurseur dans le bassin du Lom, il recommande pour des études futures une densification des points de mesures gravimétriques ; laquelle permettra à travers des mailles plus serrées de déceler avec plus de précision les structures déjà mises en évidence, mais aussi celles qui étaient masquées du fait des zones de faible densité des points de mesure.

#### ***1.2.1.4 La méthode magnétotellurique***

L'étude récemment réalisée par Kandé-Houétchak, (2008), autour du fossé tectonique de la Mbere a révélé que le socle granito-gneissique a une résistivité supérieure à 10 000  $\Omega.m$ . La pile sédimentaire du fossé a une résistivité inférieure à 10 000  $\Omega.m$  et une épaisseur variant entre 1800 et 2000 mètres avec des grès dont l'épaisseur ne dépasse pas 360 mètres, reposant sur des conglomérats. Les sections géoélectriques dressées par cet auteur suggèrent un Moho situé entre 25 et 35 km, séparant une croûte très résistante, ayant des résistivités supérieures à 300 000  $\Omega.m$  et un manteau supérieur plus conducteur de résistivité inférieure à 300 000  $\Omega.m$ .

Ndougsa et al., (2011) révèlent un réseau de failles de direction E-W qui s'étend de Akonolinga jusqu'à Abong-Mbang. Ce réseau serait la zone de transition entre le Craton du Congo et le Panafricain. Ils passeraient par Edéa à l'intersection de l'accident NE-SW de la Sanaga et de la faille NNE-SSE de Kribi.

#### **1.2.2 Travaux antérieurs sur le réseau de neurones**

Les Méthodes d'interpolation comme le krigeage, la méthode de spin ou celle du minimum de courbure sont couramment utilisées pour densifier les données spatiales non

uniformément repartis dans les régions peu couvertes. Cependant, la méthode neuronale se démarque spécifiquement des autres en ce sens qu'elle intègre dans ses paramètres d'entrée, un nombre illimité de données ; et dont la précision dans le résultat est très satisfaisante (Trépanier, 2005; Merad, et al., 2004 ; El Badaoui et al., 2013) . Cette méthode qui tire son inspiration du mode de fonctionnement des neurones biologiques, présente aujourd'hui des applications dans tous les domaines de la science, notamment en Physique au Cameroun.

Koumi Ngoh et al., (2013) utilisent un réseau de neurones artificiels avec six entrées pour prédire l'intensité du rayonnement solaire global dans la zone de Garoua entre 1995 et 2003. Ils enregistrent pour cela un coefficient de corrélation entre les prédictions (ANN) et les intensités réelles du rayonnement solaire global (GSR) proche de 98%, une faible valeur de l'erreur moyenne de biais (MBE= 0,072) et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE=0,2) ; suggérant ainsi une grande fiabilité du modèle dans l'évaluation du rayonnement solaire. On pouvait donc utiliser le réseau de neurones artificiel pour évaluer le potentiel de la ressource solaire dans les endroits où il n'y a pas de stations de surveillance.

Mouzung Pemi et al., (2018) partant du constat selon lequel la couverture gravimétrique des anomalies de Bouguer dans la région du nord Cameroun et environs est très faible, mettent à profit la méthode neuronale à travers l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LMA) pour densifier la zone en données géophysiques afin de réaliser une étude structurale. Cette étude débouche sur la présence de signatures structurales majeures dont les failles avec leurs profondeurs et leurs orientations.

Diffo et al., (2022) font recours au réseau de neurones artificiels (RNA) pour améliorer la couverture gravimétrique dans la région de Lom-Pangar, préalable à une étude structurale qui permettrait de ressortir l'essentiel du potentiel minier dont dispose la zone. Les deux critères de validation (au niveau statistique et gravimétriques) ont permis de façon objective d'établir la possibilité d'améliorer la qualité de l'analyse, de l'interprétation et de la modélisation des données gravimétriques collectées sur une grille clairsemée de stations d'enregistrement à partir de la méthode neuronale.

### **1.3 PROBLEMATIQUE**

Au moment où le Cameroun bénéficie d'une campagne de levés gravimétriques, la région de Lom-Pangar comme dans la majeure partie du pays fait face à un fort degré d'enclavement. Ces levés étant terrestres, ils se faisant essentiellement le long des routes et au sein de certaines agglomérations. Il en est résulté une couverture en données gravimétriques faible et très éparse (figure 8) impactant de façon considérable la qualité de l'interprétation des

résultats géophysiques dans la région. Il devient donc primordial dans cette zone avant toute étude scientifique, d'améliorer la couverture en données géophysiques soit en effectuant de nouvelles campagnes de levés géophysiques ce qui nécessiterait un certain coût, ou alors utiliser une méthode d'interpolation suffisamment performante. Certaines technologies issues du domaine de l'intelligence artificielle fournissent des méthodes innovatrices de traitement de données scientifiques. Ces méthodes permettent d'intégrer une grande quantité de données comprenant un nombre illimité de couches d'information. Les réseaux neuronaux sont l'une de ces technologies de pointes issues de l'intelligence artificielle qui ont connu récemment un développement significatif dans la plupart des domaines de la science y compris en géophysique. De manière spécifique, par une technique d'apprentissage, ils créent de nouveaux points de mesures qui, si elles sont consistantes, améliorent de façon considérable la qualité de l'interprétation.

#### **I.4 HYPOTHESES ET OBJECTIFS DE L'ETUDE**

En général, les cartes gravimétriques révèlent des anomalies remarquables qui suggèrent l'existence de structures tectoniques profondément enfouies, non décelables par les investigations géologiques. Elles mettent en évidence les anomalies alternativement positives et négatives séparées par des discontinuités plus ou moins significatives. Les anomalies négatives semblent traduire soit un affaissement, soit une présence de matériaux légers, tandis que les anomalies positives indiquent une intrusion de matériaux denses dans la croûte. Les zones de gradient limitant les anomalies de signes opposés traduisent sans doute la manifestation superficielle de fractures profondes.

Dans ce travail, la méthode gravimétrique est associée à une approche neuronale, dans le but de réaliser une étude structurale de la région de Lom-Pangar à partir d'une grille d'anomalie de Bouguer densifiée par la méthode neuronale. Cette méthode est choisie sur la base des données disponibles. L'exploitation de ces données devrait apporter un éclairage significatif sur la tectonique de la région en rapport avec les données géologiques disponibles. Il sera pour cela question de:

- présenter les données géophysiques (gravimétriques) et souligner les limites de celles-ci face à une étude structurale plus approfondie ;
- concevoir une architecture neuronale offrant des paramètres statistiques suffisantes nécessaires à une densification des anomalies gravimétriques de Bouguer de la zone d'étude ;

- trouver la signature gravimétrique des structures particulières (bassins, failles ou contacts) et de donner une interprétation en rapport avec la géologie régionale ;
- utiliser une méthodologie plus élaborée, à l'effet de proposer un modèle de structure 2.5D pouvant servir de guide dans les recherches géologiques et hydrogéologiques et minières futures ;
- réaliser une analyse comparative des différentes signatures géologiques enregistrées à travers l'approche neuronale par rapport aux autres études faites dans la zone dans le but de montrer les limites des études antérieures par rapport à celle-ci. Souligner la plus-value de ce travail en ressortant la pertinence de la technique d'interpolation utilisée.

## **CONCLUSION**

Ce premier chapitre a permis de montrer que la zone d'étude a des intérêts sur le plan géologique et socio-économique. Au niveau socio-économique, la région de Lom-Pangar regorge de multiples ressources minières avec plusieurs gisements déjà identifiés à ce jour. A cause de sa position centrale à l'échelle du Cameroun, elle dispose d'une faune riche et assez diversifiée, mais aussi d'une flore dominée par la forêt. Sur le plan géologique et tectonique, cette zone a été affectée par plusieurs activités tectoniques et regorge plusieurs structures géologiques. Les structures géologiques majeures de cette région étant la zone de CCC et la FS. Pour mener à bien le processus d'optimisation des investigations géophysiques, on devra au préalable maîtriser le processus de densification des données suivant la méthode neuronale, et présenter les différentes techniques de filtrage géophysique auxquelles on aura recours dans cette étude.

---

## **CHAPITRE II : THEORIE, DONNÉES ET MÉTHODES**

---

En Géophysique, le but de l'interprétation est généralement de déterminer les structures géologiques à partir des anomalies du champ géophysique observées à la surface de la Terre. Il s'agit donc d'accéder à la structure du sous-sol en estimant les paramètres physiques (densité, en ce qui concerne notre étude) et géométriques (forme et position) des formations géologiques à partir de leurs signatures géophysiques en surface. Dans le cadre de cette étude, la méthode d'investigation géophysique que nous utiliserons est essentiellement gravimétrique adossée à la méthode neuronale. Cette méthode de prospection encore appelée méthode de potentiel du fait que le champ gravimétrique dérive d'un potentiel (potentiel gravimétrique) exploite l'inégale répartition de densités des masses rocheuses du sous-sol, dans l'écorce terrestre. Ainsi, dans cette partie il est présenté en premier lieu les données tout en soulignant leurs insuffisances vis-à-vis de la zone d'investigation ; puis dans un deuxième temps à la méthode neuronale comme méthode d'interpolation, et en fin quelques méthodes géophysiques de traitement, d'analyse et d'interprétation.

## II.1 THEORIE

### II.1.1 L'anomalie gravimétrique

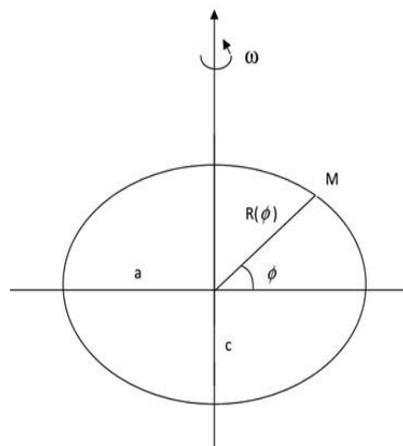
La terre n'est pas sphérique à cause de sa rotation autour de l'axe des pôles et sa forme peut être approximée par l'ellipsoïde de révolution ou ellipsoïde de référence (figure 7) qui est à son tour une approximation du géoïde de référence, la surface équipotentielle de pesanteur coïncidant avec le niveau moyen des océans lorsqu'on néglige l'effet des marées et des courants marins. La pesanteur théorique en un point de latitude  $\varphi$  sur l'ellipsoïde de référence, adoptée en 1930 par l'U.I.G.G. (Union Internationale de Géodésie et de Géophysique) est calculée par la formule :

$$g_{th} = 978031,85(1 + 0,00527889 \sin^2 \varphi - 0,000023462 \sin^4(2\varphi)) \quad (2.1)$$

Où  $g_{th}$  est exprimée en milliGals ( $1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ) et  $\varphi$  en radians.

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

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



**Figure 7: Modèle simplifié de la terre: l'ellipsoïde de référence (Noutchogwe, 2010)**

### II.1.2 Les anomalies de Bouguer

En gravimétrie, le point de départ de tout traitement de données et de leur interprétation est l'anomalie de Bouguer. Elle est définie comme la différence entre la pesanteur mesurée et une valeur théorique de la pesanteur calculée en un point de l'ellipsoïde de référence à la verticale de la station, à laquelle on ajoute l'effet de la topographie locale affectée d'une densité constante (Naudy et Neumann, 1965)

$$B = g_{mes} - [g_{th} - \Delta g_a + \Delta g_p - \Delta g_t] \quad (2.3)$$

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

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

$\Delta g_a = 0,3086 \cdot h$  est la correction à l'air libre, exprimée en mGal,  $h$  étant l'altitude de la station en mètres ;

$\Delta g_p = -0,0419 \cdot \rho \cdot h$  est la correction de plateau, exprimée en mGal,  $\rho$  étant la densité moyenne de la croûte terrestre ;

$\Delta g_t$  est la correction topographique qui élimine l'effet de l'attraction des reliefs autour de la station de mesure, lui aussi s'exprimant en mGal. Elle est toujours positive et devient négligeable au-delà d'une distance limite  $R_0$  autour de la station; sa valeur est déterminée à partir des abaques.

Puisque l'anomalie de Bouguer compare le champ gravimétrique réel au champ d'un modèle homogène de la terre, elle est la réponse gravimétrique de toutes les hétérogénéités situées à diverses profondeurs de la terre. Une anomalie positive traduit l'attraction des roches souterraines de densité plus grande que la normale tandis qu'une anomalie négative traduit la

perte d'attraction due à des roches de densité plus faible que la normale. Dans la pratique, les anomalies gravimétriques de Bouguer sont présentées sous forme de cartes constituées de courbes joignant les points de même anomalies appelées iso-anomalies.

## II.2 DONNÉES GRAVIMÉTRIQUES

### II.2.1 Acquisition des données gravimétriques

Les données gravimétriques utilisées dans cette étude proviennent de la base de données de la société britannique de géophysique GETECH Group plc, pour l'Afrique Centrale et l'Afrique de l'Ouest, limitée au domaine compris entre les longitudes 11° et 16°E et les latitudes 5° et 8°N, incluant la zone d'étude. Ces données ont été obtenues après compilation de l'ensemble des levés gravimétriques réalisés au Cameroun et dans les pays limitrophes par différents organismes et chercheurs entre 1959 et 1985 (tableau I). Les données les plus anciennes sont celles réalisées par l'ORSTOM lors des campagnes gravimétriques de reconnaissance (1960 à 1968). Sur le territoire camerounais, les campagnes ont été réalisées en voiture, le long des pistes ou des routes. Les itinéraires étaient choisis en fonction de l'existence des voies de pénétration liées au relief et à la végétation.

**Tableau 1: Organismes, chercheurs et années de campagne (Tadjou, 2004).**

| <b>PAYS</b>                      | <b>ORGANISME</b>             | <b>ANNEE</b>               |
|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| <b>Cameroun</b>                  | <b>ORSTOM</b>                | <b>1960</b>                |
|                                  | <b>IRGM</b>                  | <b>1982 et 1984 - 1985</b> |
|                                  | <b>Mapping &amp; Chating</b> | <b>1983</b>                |
| <b>Nigeria</b>                   | <b>Université de Leeds</b>   | <b>1984</b>                |
| <b>République Centrafricaine</b> | <b>ORSTOM</b>                | <b>1960</b>                |
| <b>Tchad</b>                     | <b>ORSTOM</b>                | <b>1959</b>                |

Ces campagnes couvrent l'ensemble du territoire camerounais pour un total de 3600 stations. Ces données ont été complétées par d'autres organismes et chercheurs. En ce qui concerne les mesures effectuées par L'ORSTOM, les distances inter-stations étaient de 3 à 5 km tandis qu'elles étaient de 4 à 10 km pour celles réalisées par les autres organismes. La densité des données est d'environ 220 stations par degré carré. La localisation des stations a été déterminée sur des cartes topographiques et par cheminement à la boussole. L'élévation des stations a été obtenue avec des relevés barométriques, en utilisant les altimètres Wallace et Tiernan ou Thommen (type 3B4). L'erreur sur la position des stations est d'environ 200 m. L'erreur sur l'altitude des stations peut être de 10 m sur les profils les plus

éloignés des repères géodésiques. Les mesures de gravité ont été effectuées à l'aide des gravimètres Lacoste & Romberg (modèle G, n° 471 et 823), Worden (n° 69, 135, 313, 600 et 1153), World Wide (n° 36), Canadian Scintrex (n° 305G) et North-American (n° 124 et 165). La précision sur les valeurs de la pesanteur est de l'ordre de 0,2 mGal. Les mesures ont été rattachées aux stations de référence dites bases gravimétriques du réseau Martin.

## II.2.2 Distribution des points de mesure

Les figures 8 et 9 ci-dessous représentent respectivement d'une part, la carte distribution des données gravimétriques de la zone d'étude et d'autre part la carte d'anomalie de Bouguer résultante générée suivant le minimum de courbure. La carte d'anomalie de Bouguer de la zone d'étude (figure 9) a été obtenue par compilation des données gravimétriques constituées de 466 points de mesures irrégulièrement réparties sur la zone d'étude ; ceux à partir du logiciel Geosoft (Oasis Montaj, 2007 logiciel de cartographie et de traitement des données gravimétriques). Ce logiciel de traitement bien qu'utilisant un programme d'interpolation, génère une carte de Bouguer dont le maillage n'est pas complet (zone blanche).

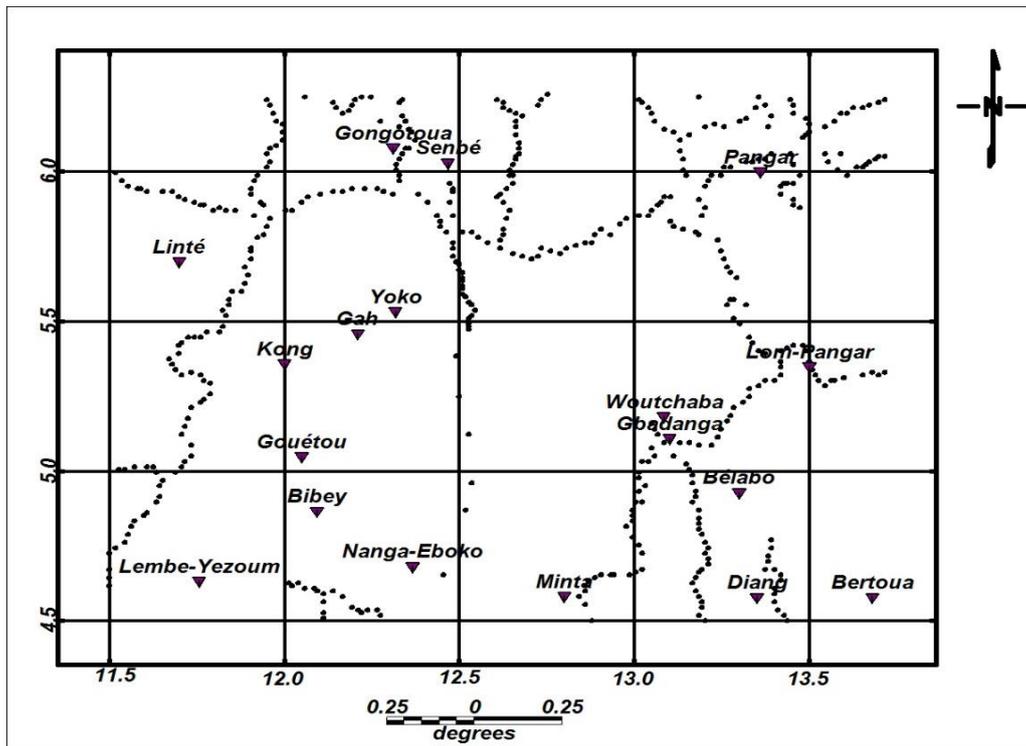
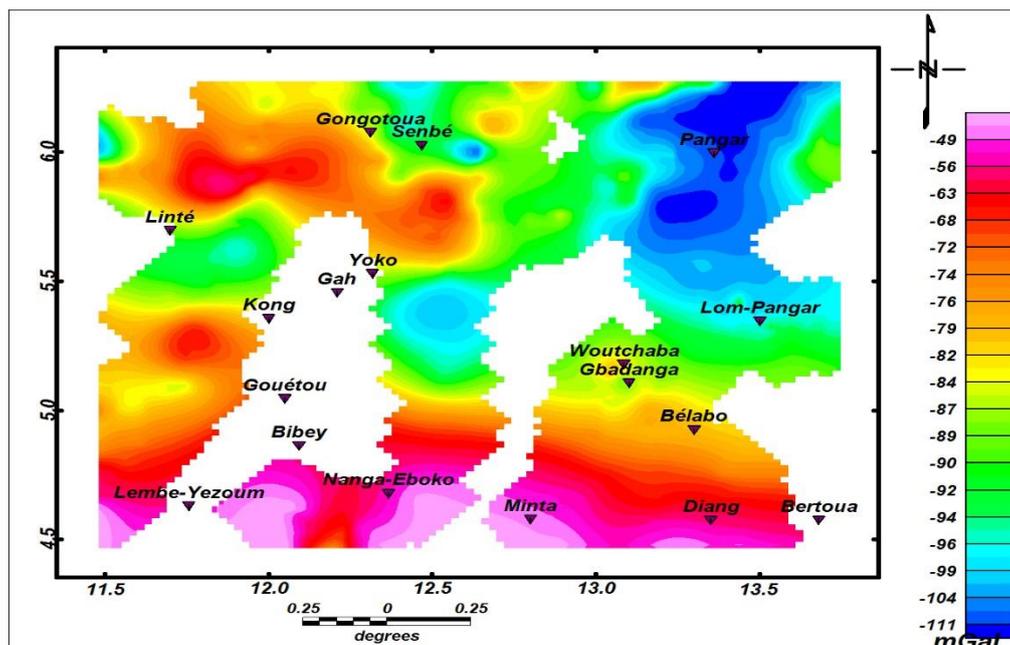


Figure 8: Carte de distribution des points de mesure in-situ de la donnée gravimétrique



**Figure 9: Carte d'anomalies de Bouguer de la zone d'étude**

En effet sur une superficie de plus de 47400 km<sup>2</sup> on enregistre une distribution des données dont la résolution est inférieure à 0,01 donnée au km<sup>2</sup> ce qui paraît très insuffisant pour une étude géophysique de meilleur rendement. Il devient donc important de trouver un nouveau jeu de données in-situ (très onéreux) ou alors une technique d'interpolation à même de combler ces « vides » tout en garantissant une certaine fiabilité géostatistique. Compte tenu des dernières avancées enregistrées dans la méthode neuronale dans le domaine des géosciences nous allons recourir à cette dernière pour mailler notre zone d'étude de façon complète.

## II.3 METHODES DE TRAITEMENT

### II.3.1 Méthode neuronale

#### II.3.1.1 Généralités sur la méthode neuronale

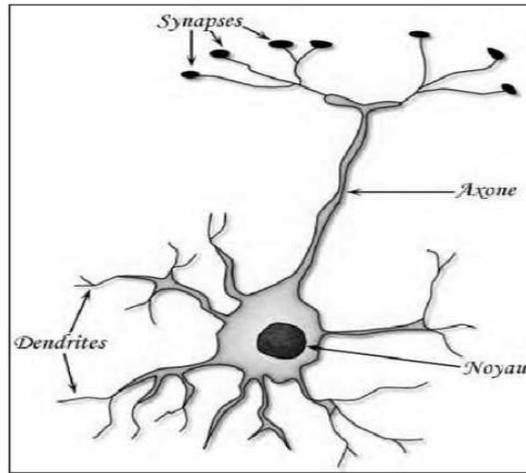
Lors de l'émergence d'une nouvelle technique, le scientifique se demande naturellement en quoi elle peut lui être utile ? Celle-ci est dotée d'un nom plus métaphorique que scientifique car en effet, le nom est lié fortement à la biologie. Cependant, techniquement parlant, les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont de nature purement mathématiques et statistiques ; leurs applications se situent dans des domaines qui n'ont généralement aucun rapport avec la neurobiologie (Derras, 2011). Les réseaux de neurones sont désormais couramment utilisés dans les processus de contrôle de fabrication, de contrôle de la qualité, de la conception du produit, d'analyse financière, de la détection des fraudes, de l'approbation du prêt, de la reconnaissance vocale, d'exploration de données entre autres. Le logiciel anti-virus sur votre

ordinateur utilise probablement des réseaux neuronaux pour reconnaître les instructions qui peuvent être liées aux virus (Poulton et al., 1992). Les réseaux de neurones artificiels ou réseaux connexionnistes sont fondés sur des modèles qui tentent à imiter les cellules du cerveau humain et leurs interconnexions. Le but d'un point de vue global, est d'exécuter des calculs complexes et de trouver par apprentissage, une relation non linéaire entre des données numériques et des paramètres. Puisqu'il existe un grand nombre de structures des réseaux de neurones artificiels, il est nécessaire de faire un résumé de leurs caractéristiques afin de choisir un réseau de neurones appropriés à l'interpolation des anomalies gravimétriques.

**a) *Le neurone biologique***

Le cerveau humain possède deux hémisphères latérales reliées par le corps calleux et d'autres ponts axonaux, il pèse moins de deux kilogrammes et contient mille milliards de cellules, dont 100 milliards sont des neurones constitués en réseaux. Le neurone biologique est une cellule vivante spécialisée dans le traitement des signaux électriques (figure 10). Les neurones sont reliés entre eux par des liaisons appelées axones. Ces axones vont eux-mêmes jouer un rôle important dans le comportement logique de l'ensemble. Ils conduisent les signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée (synapse) d'un autre neurone. Les neurones font une sommation des signaux reçus en entrée et en fonction du résultat obtenu vont fournir un courant en sortie (Sorin, 2001). Les neurones sont des cellules nerveuses décomposables en quatre (04) parties principales (figure 10) : Les dendrites, sur lesquelles les autres cellules entrent en contact synaptique : c'est par les dendrites que se fait la réception des signaux. Le corps de la cellule ou noyau, c'est l'unité de traitement. L'axone est la partie où passent les messages accumulés dans le corps de la cellule. Enfin, à la sortie du neurone on trouve les synapses, par lesquelles la cellule communique avec d'autres neurones, ce sont des points de connexion par où passent les signaux de la cellule.

Un neurone stimulé envoie des impulsions électriques ou potentielles d'action, à d'autres neurones. Ces impulsions se propagent le long de l'axone unique de la cellule. Au point de contact entre neurones, les synapses, ces impulsions sont converties en signaux chimiques. Le neurone émettant le signal est appelé le neurone pré-synaptique et celui recevant ce signal, neurone post-synaptique.



**Figure 10: Exemple de neurone biologique (Jayet, 2002)**

**b) Structure des réseaux de neurones artificiels**

McCulloch et Pitts, (1943) ont implémenté un système de réseaux neuronaux artificiels, qui est analogue aux neurones biologiques fondés sur une structure complexe (tableau 2). Le système des RNA est composé d'une succession de couches connectées de manière à ce que chaque neurone tienne son entrée de la sortie du neurone précédant. Chaque neurone dans ce cas fonctionne indépendamment par rapport aux autres afin que l'ensemble forme un système compact. L'information est emmagasinée de façon répartie dans le réseau sous forme de coefficients synaptiques. Le neurone formel calcule régulièrement un résultat qu'il transmet ensuite aux neurones suivants, chaque calcul est associé à un poids qui définit la force de la connexion (Hagan et al., 2002).

**Tableau 2: Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel**

| Neurone formel        | Neurone biologique |
|-----------------------|--------------------|
| Poids de connexion    | Synapses           |
| Signal de sortie      | Axones             |
| Signal d'entrée       | Dendrite           |
| Fonction d'activation | Soma               |

Mathématiquement, tel qu'illustrée par la figure 11, chaque neurone reçoit des entrées sous forme vectorielle puis, calcule une somme pondérée de ses entrées pour que le résultat passe ensuite par la fonction d'activation afin de créer une sortie.

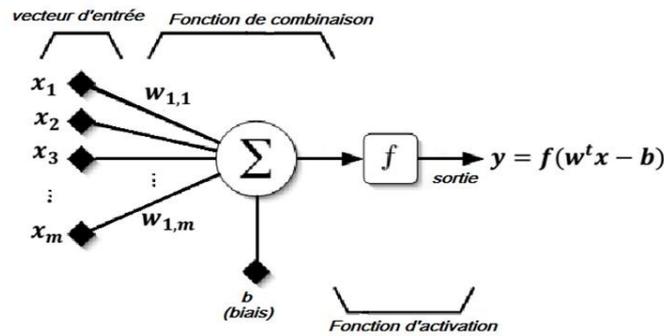


Figure 11: Architecture d'un neurone artificiel (Hagan et al., 2002 ; modifié)

### II.3.1.2 Fonction d'activation

La fonction d'activation (ou fonction de transfert) sert à convertir le résultat de la somme pondérée des entrées d'un neurone en une valeur de sortie, cette conversion s'effectue par un calcul de l'état du neurone en introduisant une non-linéarité dans le fonctionnement du neurone (Cybenko 1989).

Le biais  $b$  joue un rôle de seuil, quand le résultat de la somme pondérée dépasse ce seuil, l'argument de la fonction de transfert devient positif ou nul; dans le cas contraire, il est considéré négatif. Finalement si le résultat de la somme pondérée est:

- En dessous du seuil, le neurone est considéré comme non-actif ;
- Aux alentours du seuil, le neurone est considéré en phase de transition ;
- Au-dessus du seuil, le neurone est considéré comme actif.

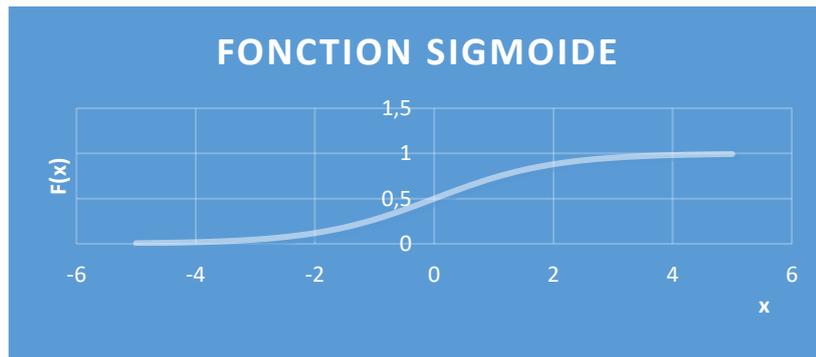
Il y a plusieurs types de fonctions de transfert qui peuvent être utilisées dans les RNA. Les fonctions d'activation souvent utilisées sont représentées ci-dessous:

#### a) La fonction non linéaire sigmoïde

La fonction non linéaire sigmoïde dont la représentation est illustrée par la figure 12, est fréquemment utilisée dans les RNA, particulièrement dans les réseaux utilisant l'algorithme de rétro-propagation (Van der Baan et Jutten, 2000) car contrairement à la fonction sigmoïde, les autres fonctions donnent seulement une sortie binaire ce qui rend plus difficile à estimer les poids optimaux.

La fonction sigmoïde est définie par l'équation 2.4

$$F(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (2.4)$$

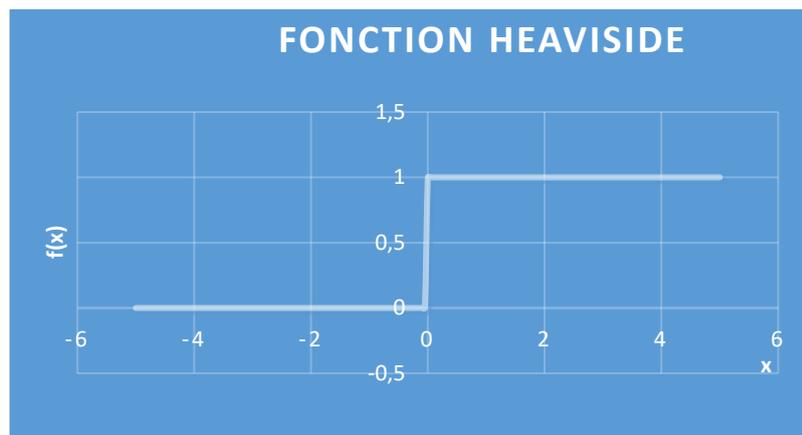


**Figure 12: Fonction Sigmoïde**

**b) La fonction à seuil**

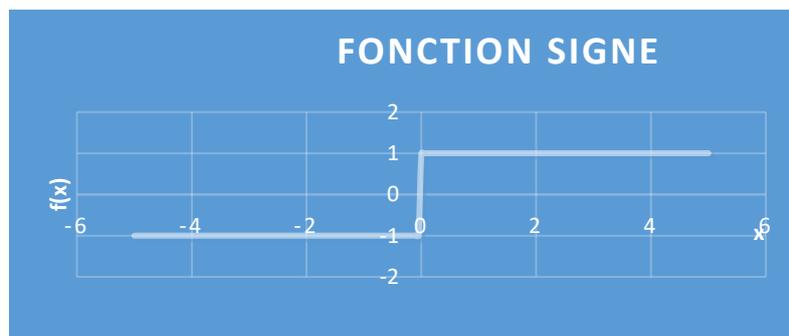
Dans la fonction seuil, nous avons deux catégories : On peut citer comme exemple la fonction Heaviside dont le tracé est la figure 13, et la fonction signe présente sur la figure 14 qui sont définies respectivement comme suit :

**Fonction Heaviside :** 
$$h(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } \text{non} \end{cases} \quad (2.5)$$



**Figure 13: Fonction Heaviside**

**Fonction Signe :** 
$$Sgm(x) = \begin{cases} +1 & \text{si } x \geq 0 \\ -1 & \text{si } \text{non} \end{cases} \quad (2.6)$$

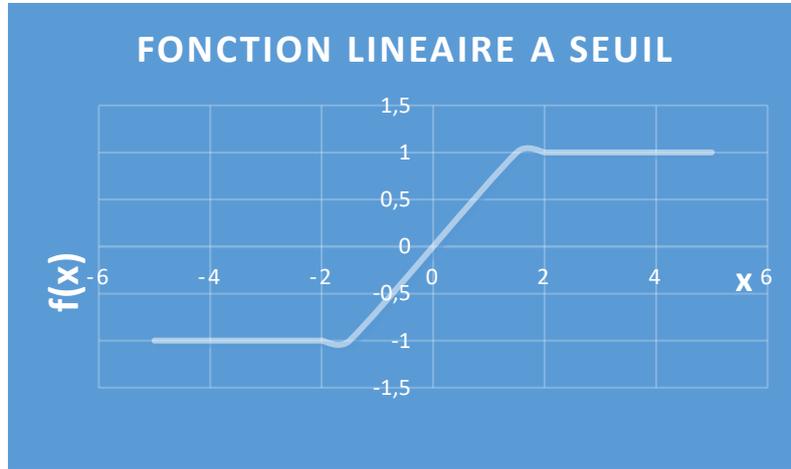


**Figure 14: Fonction Signe**

**c) La fonction linéaire à seuil**

Comme autre catégorie de fonction de transfert, nous avons la fonction linéaire à seuil,

définie comme suit (figure 15) : 
$$F(x) = \begin{cases} x & \text{si } x \in [u, v] \\ v & \text{si } x \geq v \\ u & \text{si } x \leq u \end{cases} \quad (2.7)$$



**Figure 15: Fonction linéaire à seuil**

**II.3.1.3 Architecture des réseaux de neurones**

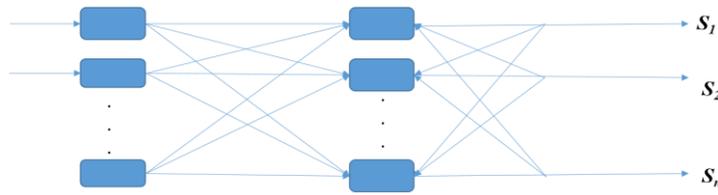
L'architecture est un concept très important qui joue un rôle déterminant dans la classification des RNA. Dans la littérature on utilise souvent le mot structure comme synonyme d'architecture (Hertz et al., 1991). Chaque architecture a sa propre organisation qui est adaptée à des applications bien spécifiques (Sarle, 1994 ; Haykin, 1994).

**a) Les réseaux récurrents « FEED-BACK »**

Ce genre de réseaux est caractérisé par le pouvoir de laisser l'information circuler récursivement d'une manière partielle ou bien totale (Kasabov, 1996 ; Elman, 1990). Les architectures les plus utilisées sont:

**- Les cartes auto-organisatrices de Kohonen.**

Ce type de réseau illustré par la figure 16 utilise un apprentissage non-supervisé qui ajustent une carte discrète et ordonnée en fonction de patterns d'entrée. Ces réseaux sont dérivés des travaux de Fausett, (1994) et Kohonen, (1995) et sont généralement utilisés pour l'analyse de données grâce à leur pouvoir de distinguer les groupes dans un ensemble de données et de les cartographier en deux dimensions.



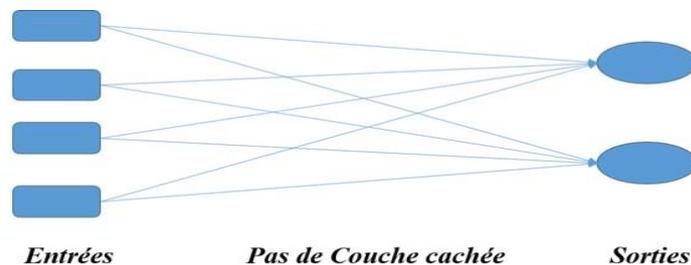
**Figure 16: Le modèle de Kohonen**

**b) Réseaux propagation vers l'avant « FEED-FORWARD »**

La particularité de ce type de réseau est que l'information se propage dans un sens unique, sans aucune rétroaction (des entrées vers les sorties). Ce genre de réseau utilise un apprentissage supervisé, par correction des erreurs (Lippmann, 1987), où le signal d'erreur est rétro-propagé vers les entrées afin de mettre à jour les poids des neurones.

**- Le perceptron mono couche « SLP »**

Avant de définir la structure collective d'un ensemble de neurones, il est important de définir le perceptron mono couche qui est un réseau très simple grâce à sa composition d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie sans avoir de couche cachée, il obéit généralement à un apprentissage supervisé selon la règle de correction de l'erreur ou selon la règle de Hebb (figure 17).

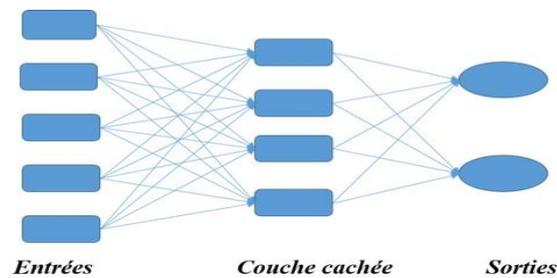


**Figure 17: Le réseau monocouche**

**- Le perceptron multi couche «PMC»**

Le PMC est une extension du perceptron monocouche qui dispose d'une ou de plusieurs couches cachées. Les neurones y sont arrangés en couches successives comme le montre la figure 18 : La première couche qui forme le vecteur des données d'entrée est appelée couche d'entrée tandis que la dernière couche qui produit les résultats est appelée couche de sortie. Toutes les autres couches qui se trouvent au milieu sont appelées couches cachées (Lippmann, 1987 ; Hagan et al., 2002). Les neurones de la couche d'entrée sont connectés uniquement à la couche suivante tandis que les neurones des couches cachées ont la particularité d'être connectés à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante, par contre il n'y a pas de connexions entre les neurones au sein d'une même couche. Contrairement au SLP la

présence d'une couche cachée dans le PMC facilite la modélisation des relations non linéaires entre les entrées et la sortie. Le choix du nombre de couches cachées dépend généralement de la complexité du problème à résoudre, en théorie une seule couche cachée peut être suffisante pour résoudre un problème donné mais il se peut que le fait de disposer de plusieurs couches cachées permette de résoudre plus facilement un problème complexe.



**Figure 18: Architecture d'un réseau multicouche**

### ***c) Réseaux à fonction radiale « RBF »***

Les réseaux à fonction radiale RBF sont très semblables à celles des PMC mais leur particularité est qu'ils sont caractérisés par l'utilisation des fonctions Gaussiennes comme fonctions de base. Les RBF sont donc utilisés dans les mêmes genres de problèmes que les PMC à savoir, en classification et en prédiction. Parmi les types d'apprentissages utilisés pour les RBF, on peut citer le mode hybride avec les règles de correction de l'erreur (Seshagiri et Khalil, 2000).

#### ***II.3.1.4 Apprentissage d'un réseau de neurones***

L'apprentissage est une étape très importante du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié itérativement jusqu'à l'obtention du comportement désiré, et ce par l'ajustement des poids (connexion ou synapse) des neurones à une source d'informations bien définies (Hebb, 1949; Grossberg, 1988 ; Rumelhart et al., 1986) L'apprentissage consiste également à extraire des conformités parmi les données utilisées pour l'entraînement du réseau mais l'objectif essentiel de l'apprentissage est la résolution du problème par la prévision, la classification etc. (Weiss et Kulikowski, 1991).

Pour un RNA, l'apprentissage peut être regardé également comme étant le processus de la mise à jour des poids (connexion) au sein du réseau dans le but d'ajuster la réponse du réseau à l'expérience et aux exemples. Il existe plusieurs types de règles d'apprentissage qui peuvent être rassemblées en deux catégories qui sont l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé.

**a) L'algorithme d'apprentissage du type perceptron multicouche (PMC)**

Définir l'architecture d'un RNA pour un problème quelconque revient à faire un choix judicieux de la taille du réseau, du nombre total de couches et de neurones, distribution des données et des fonctions de transfert (Baum et Haussler, 1988). Le choix de ces paramètres dépend de l'utilisateur. Il n'existe pas dans la littérature pour le moment des données suffisantes qui peuvent déterminer clairement les paramètres à adopter pour résoudre un problème donné (Coulibaly et al., 1999 ; Coulibaly et al., 2000). Les différentes techniques présentées par différents auteurs (Zurada, 1992; Widrow et Lehr, 1990; Murata et al., 1994; Jacobs, 1997) sont destinées à résoudre des cas particuliers.

Afin de répondre à l'objectif principal de cette étude, on a choisi l'architecture de perceptrons multicouches PMC, en utilisant un algorithme de rétro-propagation avec fonction sigmoïde comme fonction de transfert. Ce choix d'utiliser le PMC et l'algorithme rétro-propagation est dû principalement à la popularité de ces deux derniers dans la gestion des relations non linéaires entre les variables ; des caractères propres à notre zone d'étude.

**b) L'algorithme de rétro-propagation**

L'algorithme d'apprentissage de rétro-propagation consiste dans un premier temps à circuler vers l'avant les données d'entrées jusqu'à l'obtention d'une sortie calculée par le réseau, puis la seconde étape est de comparer la sortie calculée à la sortie réelle connue (Rumelhart et al., 1986). Les poids sont modifiés de telle sorte qu'à la prochaine itération, l'erreur commise entre la sortie calculée est minimisée, en prenant en considération la présence des couches cachées, l'erreur est rétro-propagée vers l'arrière jusqu'à la couche d'entrée tout en modifiant la pondération. Le processus est répété sur tous les exemples jusqu'au temps où l'on obtient une erreur de sortie considérée comme négligeable. Mathématiquement, on peut résumer l'algorithme de rétro-propagation comme suit:

Soit le couple  $(\vec{x}(n), \vec{d}(n))$  désignant la *nième* donnée d'entraînement du réseau où :

$$\vec{x}(n) = \langle x_1(n), \dots, x_p(n) \rangle \text{ et} \tag{2.8}$$

$$\vec{d}(n) = \langle d_1(n), \dots, d_q(n) \rangle \tag{2.9}$$

correspondent respectivement aux  $p$  entrées et aux  $q$  sorties désirées du système. L'algorithme de rétro propagation consiste alors à mesurer l'erreur entre les sorties désirées  $\vec{d}(n)$  et les sorties observées  $\vec{y}(n)$  :

$$\vec{y}(n) = \langle y_1(n), \dots, y_q(n) \rangle \tag{2.10}$$

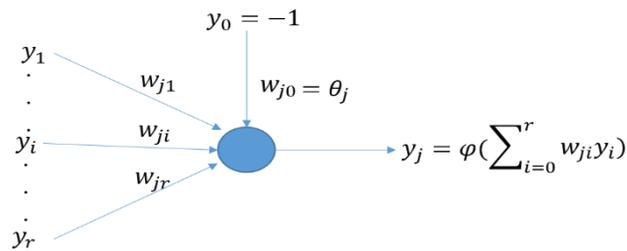
résultantes de la propagation vers l'avant des entrées  $\bar{x}(n)$ , et à retro propager cette erreur à travers les couches du réseau en allant des sorties vers les entrées.

**i) Cas de la couche de sortie**

L'algorithme de rétro-propagation procède à l'adaptation des poids neurone par neurone en commençant par la couche de sortie. Soit l'erreur observée  $e_j(n)$  pour le neurone de sortie  $j$  et la donnée d'entraînement  $n$  :

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \tag{2.11}$$

où  $d_j(n)$  correspond à la sortie désirée du neurone  $j$  et  $y_j(n)$  à sa sortie observée. La figure 19 ci-dessous présente un modèle de neurones artificiels.



**Figure 19: Modèle du neurone**

- La variable  $n$  représentera toujours la donnée d'entraînement c'est-à-dire le couple contenant un vecteur d'entrée et un vecteur de sortie désiré.
- L'objectif de l'algorithme est d'adapter les poids des connexions du réseau de manière à minimiser la somme des erreurs sur tous les neurones de sortie.
- L'indice  $j$  représentera toujours le neurone pour lequel on veut adapter les poids. Soit  $E(n)$  la somme des erreurs quadratiques observées sur l'ensemble  $C$  des neurones de sorties :

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n) \tag{2.12}$$

La sortie  $y_j(n)$  du neurone  $j$  est définie par :

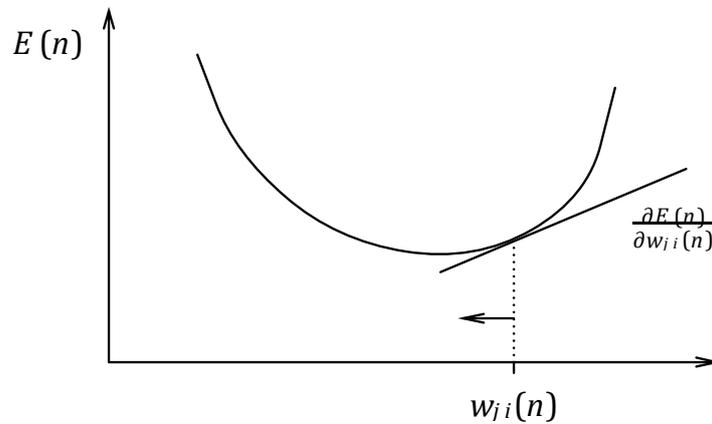
$$y_j(n) = \varphi \left[ v_j(n) \right] = \varphi \left[ \sum_{i=0}^r w_{ji}(n) y_i(n) \right] \tag{2.13}$$

où  $\varphi[.]$  est la fonction d'activation du neurone,  $v_j(n)$  est la somme pondérée des entrées du neurone  $j$ ,  $w_{ji}(n)$  est le poids de la connexion entre le neurone  $i$  de la couche précédente et le neurone  $j$  de la couche courante, et  $y_i(n)$  est la sortie du neurone  $i$ . On suppose ici que la couche précédente contient  $r$  neurones numérotés de 1 à  $r$ , que le poids  $w_{j0}(n)$  correspond au biais du neurone  $j$  et que l'entrée  $y_0(n) = -1$ . La figure 20 illustre l'équation 2.13.

- L'indice  $i$  représentera toujours un neurone sur la couche précédente par rapport au neurone  $j$  ; on suppose par ailleurs que cette couche contient  $r$  neurones.

Pour corriger l'erreur observée, il s'agit de modifier le poids  $w_{ji}(n)$  dans le sens opposé au gradient  $\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)}$  de l'erreur (voir figure 20).

- Cette dérivée partielle représente un facteur de sensibilité : En variant un peu  $w_{ji}(n)$ , est-ce que ça change beaucoup  $E(n)$  ? Si oui, on fait varier beaucoup plus  $w_{ji}(n)$  dans le sens inverse de cette dérivée car cela devrait rapprocher du minimum local. Sinon, on change seulement un peu  $w_{ji}(n)$  pour corriger l'erreur vu qu'on est tout près de ce minimum.



**Figure 20: Gradient de l'erreur totale ( Parizeau, 2004)**

- Puisqu'il y a  $r$  neurones sur la couche précédente la couche de sortie, il y a aussi  $r$  poids à adapter, et il importe donc de remarquer que la courbe de la figure 20 correspond en fait à une hyper-surface de  $r + 1$  dimensions !

Par la règle de chaînage des dérivées partielles, qui nous dit que  $\frac{\partial f(y)}{\partial x} = \frac{\partial f(y)}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial x}$ , on obtient:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \frac{\partial E(n)}{\partial e_j(n)} \cdot \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \cdot \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} \cdot \frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (2.14)$$

et on exprime la variation de poids  $\Delta w_{ji}(n)$  sous la forme suivante :

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (2.15)$$

avec  $0 \leq \eta \leq 1$  représentant un *taux d'apprentissage* ou *gain* de l'algorithme.

En évaluant chacun des termes du gradient, on obtient :

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = -e_j(n) y_j(n) [1 - y_j(n)] y_i(n) \quad (2.16)$$

et la règle dite du “delta” pour la couche de sortie s’exprime par :

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \eta \delta_j(n) y_i(n)$$

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \delta_j(n) y_i(n) \quad (2.17)$$

$$\text{Avec : } \delta_j(n) = e_j(n) y_j(n) [1 - y_j(n)] \quad (2.18)$$

qui correspond à ce qu’on appelle le “gradient local”.

Jusqu’ici, seul le cas de la couche de sortie a été traité.

## ii) Cas d’une couche cachée

Considérons maintenant le cas des neurones sur la dernière couche cachée (le cas des autres couches cachées est semblable).

- La variable  $n$  désignera toujours la donnée d’entraînement c’est-à-dire un couple de vecteurs d’entrées et de sorties désirées.
- L’objectif sera toujours d’adapter les poids de la couche courante en minimisant la somme des erreurs sur les neurones de la couche de sortie.
- Les indices  $i$  et  $j$  désigneront respectivement (comme précédemment) un neurone sur la couche précédente et un neurone sur la couche courante.
- L’indice  $k$  servira maintenant à désigner un neurone sur la couche suivante. Reprenons l’expression de la dérivée partielle de l’erreur totale  $E(n)$  par rapport à  $w_{ji}$  mais en ne dérivant plus par rapport à l’erreur  $e_j(n)$  car celle-ci est maintenant inconnue :

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \frac{\partial E(n)}{\partial y_j(n)} \cdot \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} \cdot \frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (2.19)$$

Par rapport aux résultats obtenus pour la couche de sortie, les deux derniers termes de cette équation restent inchangés, seul le premier terme requiert d’être évalué :

$$\frac{\partial E(n)}{\partial y_j(n)} = \frac{\partial \left[ \frac{1}{2} \sum_{k \in C} e_k^2(n) \right]}{\partial y_j(n)} \quad (2.20)$$

La difficulté ici, contrairement au cas des neurones de la couche de sortie, est que tous les  $e_k(n)$  dans la somme ci-dessus dépendent de  $y_j(n)$ . On ne peut donc pas se débarrasser de cette somme! Néanmoins, il est possible d’écrire :

$$\frac{\partial E(n)}{\partial y_j(n)} = \sum_{k \in C} \left[ e_k(n) \cdot \frac{\partial e_k(n)}{\partial y_j(n)} \right] = \sum_{k \in C} \left[ e_k(n) \cdot \frac{\partial e_k(n)}{\partial v_k(n)} \cdot \frac{\partial v_k(n)}{\partial y_j(n)} \right]$$

Après divers traitements ; on obtient :

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = -y_k(n)[1 - y_k(n)] \left[ \sum_{k \in C} \delta_k(n) w_{kj}(n) \right] y_i(n) \quad (2.21)$$

$$\text{Et } \Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \eta \delta_j(n) y_i(n) \quad (2.22)$$

$$\text{Avec } \delta_k(n) = y_k(n)[1 - y_k(n)] \sum_{k \in C} \delta_k(n) w_{kj}(n) \quad (2.23)$$

On peut démontrer que les équations (2.22) et (2.23) sont valides pour toutes les couches cachées.

### iii) Sommaire de l'algorithme (règle du "delta")

L'algorithme de rétro-propagation standard se résume donc à la série d'étapes suivantes:

1. Initialiser tous les poids à de petites valeurs aléatoires dans l'intervalle  $[-0.5, 0.5]$ ;
2. Normaliser les données d'entraînement;
3. Permuter aléatoirement les données d'entraînement;
4. Pour chaque donnée d'entraînement  $n$  :
  - (a) Calculer les sorties observées en propageant les entrées vers l'avant;
  - (b) Ajuster les poids en rétro propageant l'erreur observée:

$$\begin{aligned} w_{ji}(n) &= w_{ji}(n-1) + \Delta w_{ji}(n) \\ w_{ji}(n) &= w_{ji}(n-1) + \eta \delta_j(n) y_i(n) \end{aligned} \quad (2.24)$$

où le "gradient local" est défini par :

$$\delta_j(n) = \begin{cases} e_j(n) y_j(n) [1 - y_j(n)] & \text{Si } j \in \text{couche de sortie} \\ y_j(n) [1 - y_j(n)] \sum_k \delta_k(n) w_{kj}(n) & \text{Si } j \in \text{couche cachée} \end{cases} \quad (2.25)$$

avec  $0 \leq \eta \leq 1$  représentant le taux d'apprentissage et  $y_i(n)$  représentant soit la sortie du neurone  $i$  sur la couche précédente, si celui-ci existe, soit l'entrée  $i$  autrement.

5. Répéter les étapes 3 et 4 jusqu'à un nombre maximum d'itérations ou jusqu'à ce que la racine de l'erreur quadratique moyenne (EQM) soit inférieure à un certain seuil.

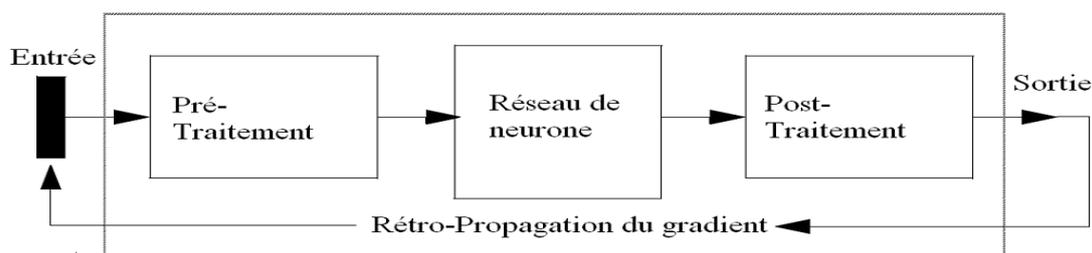
**iv) Règle du “delta généralisé”**

L'équation 2.27 décrit ce qu'on appelle la règle du “delta” pour l'algorithme de retro-propagation des erreurs. L'équation suivante, nommée règle du “delta généralisé”, décrit une autre variante de l'algorithme :

$$w_{ji}(n) = w_{ji}(n-1) + \eta \delta_j(n) y_j(n) + \alpha \Delta w_{ji}(n-1) \quad (2.26)$$

Où  $0 \leq \alpha \leq 1$  est un paramètre nommé *momentum* qui représente une espèce d'inertie dans le changement de poids.

L'algorithme de retro-propagation dit de DELTA est résumé dans la figure 21 ci-dessous



**Figure 21: Procédure d'élaboration d'un modèle neuronal**

### II.3.2 Méthode géophysique de traitement des données

Les différentes méthodes géophysiques utilisées dans l'analyse et l'interprétation gravimétriques sont dites directes, indirectes ou inverses. Le choix de la technique de filtrage étant fonction de la nature de l'étude mais aussi de la zone d'implémentation.

#### II.3.2.1 L'opérateur de prolongement

Le prolongement consiste à déplacer artificiellement le plan d'observation et à calculer le champ que l'on observerait en ces nouveaux points à partir des données recueillies sur le terrain. Le prolongement peut se faire vers le haut ou vers le bas. Le prolongement vers le haut fait passer l'anomalie de l'altitude  $z = 0$  à une altitude  $z > 0$ . Cet opérateur agit comme un filtre électronique passe-bas en atténuant les courtes longueurs d'onde; mettant ainsi en exergue les anomalies des structures de plus en plus profondes, en fonction de l'altitude du prolongement.

Soit  $g(x, y, z)$  une fonction définie dans le domaine spatial en 3 dimensions, sa transformée de Fourier en 2 dimensions notée  $G(k_x, k_y, z)$  ou  $F[g]$  décompose la fonction  $g(x, y, z)$  en termes des longueurs d'onde qu'elle contient, et s'exprime par la relation:

$$F[g] = G(k_x, k_y, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y, z) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (2.27)$$

La transformée inverse permet de récupérer la fonction  $g$  :

$$F^{-1}[g] = g(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(k_x, k_y, z) e^{-i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (2.28)$$

Les champs potentiels satisfont l'équation de Laplace à l'extérieur des sources; et si nous nous intéressons à une carte à l'altitude  $z_1$ , nous aurons:

$$-(k_x^2 + k_y^2)G(k_x, k_y, k_1) + \frac{\partial^2 G(k_x, k_y, k_1)}{\partial z^2} = 0 \quad (2.29)$$

Si on connaît la valeur du spectre pour  $z = 0$  alors une solution à cette équation différentielle du 2<sup>nd</sup> ordre est :

$$G(k_x, k_y, k_1) = G(k_x, k_y, 0) e^{z_1 \sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \quad (2.30)$$

$$\text{L'opérateur de prolongement pour une carte est donc: } \mathbf{O}_p = e^{k.z_1} \quad (2.31)$$

Le prolongement vers le bas a la même expression que le prolongement vers le haut, mais le signe du changement d'altitude est opposé ( $z < 0$ ). C'est un filtre passe-haut qui a l'inconvénient d'amplifier le bruit (erreurs de mesures) contenu dans le signal, diminuant ainsi la fiabilité de l'interprétation. L'amplitude d'un champ gravimétrique au-dessus d'une source varie avec l'altitude en fonction exponentielle de la longueur d'onde. Cette relation peut être facilement exploitée avec des filtres à transformée rapide de Fourier pour recalculer le champ à une altitude plus élevée (« continuation vers le haut »).

### II.3.2.2 L'opérateur de dérivation verticale

En général, les opérateurs de dérivations effectuées sur les cartes d'anomalies ont pour but d'atténuer ou au contraire de rehausser certaines informations contenues dans les données de champs potentiels. L'opérateur de dérivation selon la verticale agit comme un filtre électronique passe-haut en amplifiant les courtes longueurs d'onde, mettant ainsi en exergue les anomalies associées à des structures superficielles au détriment de celles associées aux structures profondes. De plus, lorsque plusieurs structures sont assez proches et situées à des profondeurs comparables, le signal mesuré montre généralement l'existence d'une seule anomalie. La dérivation verticale permettra alors de mieux distinguer (séparer) les différentes anomalies.

D'après l'expression (2.30), le prolongement de la fonction  $g$  à l'altitude  $z$  s'écrit dans le domaine spectral:

$$G(k_x, k_y, z) = G(k_x, k_y, 0) e^{z \sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \quad (2.32)$$

En dérivant cette expression par rapport à z, on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{\partial G(k_x, k_y, z)}{\partial z} &= \sqrt{k_x^2 + k_y^2} G(k_x, k_y, 0) e^{z \sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \\ \frac{\partial G(k_x, k_y, z)}{\partial z} &= \sqrt{k_x^2 + k_y^2} G(k_x, k_y, z) \end{aligned} \quad (2.33)$$

### II.3.2.3 L'opérateur de dérivation horizontale

Les dérivées horizontales suivant x et suivant y peuvent être estimées dans le domaine spatial par la méthode des différences finies. Soient  $g_{i,j}$  ( $i= 1, 2, \dots, N_x$  ;  $j= 1, 2, \dots, N_y$ ) les valeurs du champ d'anomalies g dans une grille de mesures contenue dans le plan horizontal, échantillonnées selon un pas  $\Delta x$  et  $\Delta y$  suivant les directions x et y respectivement, les dérivées directionnelles du champ g aux points d'indices i, j sont approximées par les relations (Blakely, 1995):

$$\frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \cong \frac{g_{i+1,j} - g_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial g(x, y)}{\partial y} \cong \frac{g_{i,j+1} - g_{i,j-1}}{2\Delta y} \quad (2.35)$$

Dans le domaine de Fourier, les dérivées directionnelles à l'ordre n suivant x et y sont respectivement:

$$F \left[ \frac{\partial^n g}{\partial x^n} \right] = (ik_x)^n F[g] = (ik_x)^n G \quad (2.36)$$

$$F \left[ \frac{\partial^n g}{\partial y^n} \right] = (ik_y)^n F[g] = (ik_y)^n G \quad (2.37)$$

Pour un champ de gravité G(x,y), la magnitude du gradient horizontal (HGM) est donnée par la formule suivante (Blakely et Simpson, 1986).

$$HGM = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2} \quad (2.38)$$

### II.3.2.4 La déconvolution d'Euler

Thompson, (1982) et Reid et al., (1990) **sont** les premiers à exploiter de manière automatique les équations d'Euler pour l'inversion des données gravimétriques et magnétiques. Thompson, (1982) a travaillé sur des profils tandis que Reid et al., (1990)

ont étendu la méthode aux grilles de données. Soit  $t$  un réel quelconque, une fonction  $f$  est dite homogène de degré  $n$  si

$$f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z) \quad (2.39)$$

Si la fonction  $f(x, y, z)$  est homogène de degré  $n$ , alors elle satisfait l'équation d'Euler :

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = nf \quad (2.40)$$

L'intensité du champ magnétique (ou gravimétrique) créée par une source simple telle qu'un dipôle (ou une masse ponctuelle) à une distance d'observation  $r$  peut se mettre sous la forme :

$$f(x, y, z) = \frac{G}{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})^N} \quad (2.41)$$

où  $G$  est proportionnelle à l'aimantation de la source magnétique (ou à sa masse). La fonction  $f$  est homogène de degré  $(-N)$  et satisfait l'équation d'Euler (Blakely, 1995) :

$$\vec{r} \cdot \vec{\nabla} f = -Nf \quad (2.42)$$

Thompson, (1982) a montré qu'on peut déterminer la position d'une source d'anomalie magnétique (ou gravimétrique)  $T \Delta(x)$  sur un profil de direction  $Ox$ , en résolvant l'équation d'Euler :

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (z - z_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -N \Delta T(x) \quad (2.43)$$

Pour une grille de données, cette équation prend la forme (Reid et al., 1990) :

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -N \Delta T(x, y) \quad (2.44)$$

$$(x, y, z) \text{ et } (x_0, y_0, z_0)$$

sont respectivement les coordonnées du point de mesure et de la source. La constante  $N$  est un indice structural dont la valeur dépend de la variation du champ avec la distance. Elle varie donc avec la géométrie de la structure (tableau 3). On peut résoudre l'équation (2.44) pour déterminer les coordonnées  $(x_0, y_0, z_0)$  de la source ainsi que le champ régional  $B$  pour différentes valeurs de l'indice structural  $N$ . Lorsque  $N$  vaut 0, l'équation d'Euler prend la forme (Reid et al., 1990) :

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = A \quad (2.45)$$

où  $A$  est un terme constant qui intègre les effets de l'amplitude de l'anomalie, de la direction structurale et du pendage.

Notons que de nos jours, la déconvolution d'Euler n'est plus seulement appliquée à l'intensité du champ magnétique ou gravimétrique; son application au gradient vertical (Cooper, 2004) et au signal analytique (Keating et Pilkington, 2004) a conduit à des résultats intéressants.

**Tableau 3: Indices structuraux pour les sources gravimétriques (Thompson, 1982 ; Reid et al., 1990; Stavrev, 1997).**

| <i>Source</i>                   | <i>Indice structural en gravimétrie</i> |
|---------------------------------|---|
| Contact, Dyke vertical et Still | 0                                       |
| Cylindre vertical et pipe       | 1                                       |
| Sphère                          | 2                                       |

### II.3.2.5 La séparation régionale-résiduelle

La méthode de séparation retenue pour cette étude est la méthode polynomiale de Skeels, (1967). Cette méthode consiste à assimiler la régionale à un polynôme en x et y Rég (x, y) de degré n donné passant au mieux par la surface représentative des anomalies de Bouguer. Le calcul des coefficients du polynôme permettra d'obtenir les valeurs de la régionale, et d'en déduire par soustraction sur la Bouguer celles de la résiduelle pour un nombre de points  $P_i(x_i, y_i)$  où l'anomalie de Bouguer vaut  $B_i$ . Plusieurs programmes informatiques existent pour effectuer cette opération de séparation.

Soit  $g(x_i, y_i)$ , la valeur de l'anomalie de Bouguer au point  $P_i$ . Il est question de calculer les valeurs de la régionale  $Reg(x_i, y_i)$  et celle de la résiduelle  $Res(x_i, y_i)$ , par un choix convenable du polynôme  $F(x_i, y_i)$  d'ordre N; ce polynôme génère une surface analytique  $Reg(x_i, y_i)$  la plus proche possible de la surface expérimentale  $g(x_i, y_i)$ . D'après Radhakrishna et Krishnamacharyulu, (1990), ce polynôme peut se mettre sous la forme :

$$F(x_i, y_i) = B_i + \sum_{j=1}^N \sum_{L=0}^j B_m A_m(x_i, y_i) \quad (2.46)$$

Avec : N ordre du polynôme ;  $A_m(x_i, y_i) = X_i^L Y_i^{(j-L)}$ ;  $m = \frac{j(k+3)}{2} - L + 1$  où  $B_m$  est le Coefficient à déterminer. Pour une valeur de N, on a  $(N+1)(N+2)/2$  coefficients.

L'écart entre les points homologues des surfaces expérimentales et analytiques respectivement est désigné par  $\varepsilon_i = g(x_i, y_i) - F(x_i, y_i)$  le nombre de stations  $P_i$  où l'anomalie de Bouguer  $g(x_i, y_i)$  est connue est  $N_0$ .

L'ajustement des surfaces analytiques consiste à rendre minimal l'écart quadratique:

$$E = \sum_{i=1}^{N_0} \varepsilon_i^2 \text{ soit } \frac{\partial E}{\partial B_k} = 0 \quad \text{avec } 1 \leq k \leq M \quad (2.47)$$

La détermination de coefficients  $B_m$  nécessite la résolution d'un système de M équations à M inconnues. Une fois que les coefficients  $B_m$  sont déterminés, on calcule l'anomalie régionale analytique  $Reg(x_i, y_i) = F(x_i, y_i)$  et la résiduelle analytique est telle que  $Res(x_i, y_i) = g(x_i, y_i) - Reg(x_i, y_i)$  (2.48)

Les données ainsi séparées permettent d'établir des cartes d'anomalies régionales et résiduelles, mettant respectivement en évidence les effets des structures étendues et profondes des structures locales et superficielles à interpréter.

Les équations 2.45, 2.46, et 2.47 mises ensembles, peuvent être simplifiées à la résolution d'un système matriciel linéaire de la forme :  $AY=E$

Le programme utilisé dans cette étude est un sous-programme du logiciel Géosoft (Oasis montaj).

### II.3.2.6 L'analyse spectrale

Cette technique permet d'estimer la profondeur des contrastes de densité ou de susceptibilités magnétiques majeures, à partir du spectre d'énergie des anomalies gravimétriques ou magnétiques observées (Spector et Grant, 1970). Cette méthode s'applique aussi bien sur des profils que sur des grilles de données.

#### i) Cas d'un profil

Une fonction non périodique  $f(x)$  représentant la variation du champ le long d'un profil donné peut être décomposée en une infinité de termes sinusoidaux telle que :

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(x) e^{iwx} dx \quad (2.49)$$

où  $F(w)$  est la transformée de Fourier de  $f(x)$  donnée par la relation :

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-iwx} dx \quad (2.50)$$

Dans la pratique, les profils d'anomalies étant constitués d'un nombre fini de points, on préfère plutôt utiliser la transformée de Fourier discrète. Spector et Grant, (1970) ont montré que si  $f_t$  est une série de N points de mesure échantillonnée avec un pas constant sur le profil, la transformée de Fourier discrète de cette série est donnée par :

$$F_n = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} f_t \exp\left(-\frac{2\pi n t}{N}\right) \quad (2.51)$$

où  $n$  est la fréquence (nombre d'onde),  $1/N$  la fréquence fondamentale et  $F_n$  l'onde de Fourier à la fréquence  $n$ .

L'énergie contenue dans chaque fréquence du champ créé par les sources perturbatrices (ou énergie spectrale) est donnée par Bhattacharyya, (1966),

$$E_n = |F_n|^2 \quad (2.52)$$

La profondeur moyenne de la source est estimée à partir des valeurs de l'énergie spectrale par la relation (Dimitriadis et al., 1987):

$$E_n = \exp - (4\pi n h) \quad (2.53)$$

Cette dernière relation montre que le logarithme de l'énergie contenue dans chaque fréquence du champ créé par les sources perturbatrices varie linéairement en fonction de la fréquence considérée. Ainsi, si  $\Delta(\text{Log}E)$  est la variation du logarithme de l'énergie dans l'intervalle de fréquence  $\Delta n$ , la profondeur  $h$  du toit de la source est donnée par :

$$h = \frac{\Delta(\text{Log}E)}{4\pi\Delta n} \quad (2.54)$$

## ii) Cas d'une grille

Soient  $N_x$  et  $N_y$  le nombre de données suivant  $X$  et  $Y$  respectivement,  $n_x$  et  $n_y$  les fréquences suivant  $X$  et  $Y$ , la transformée de Fourier d'une grille de données gravimétriques ou magnétiques peut s'écrire :

$$G(n_x, n_y) = \sum_{i=0}^{N_x-1} \sum_{j=0}^{N_y-1} P_{n_x, n_y} \cos \left[ \left( \frac{2\pi}{N_x} \right) (x n_x + y n_y) \right] + Q_{n_x, n_y} \sin \left[ \left( \frac{2\pi}{N_y} \right) (x n_x + y n_y) \right] \quad (2.55)$$

$$\text{L'énergie spectrale est donnée par : } E_n = (P_{n_x, n_y})^2 + (Q_{n_x, n_y})^2 \quad (2.56)$$

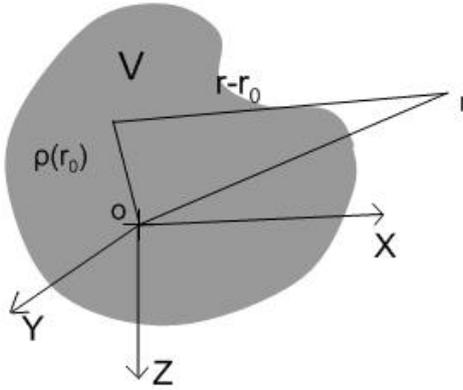
$$\text{et la fréquence : } n = \sqrt{n_x^2 + n_y^2} \quad (2.57)$$

Dans la pratique, on calcule le spectre radial correspondant aux différentes fréquences. La profondeur de la source est déterminée par la technique des pentes comme pour le spectre d'un profil.

### II.3.2.7 Le calcul direct : Cas de la modélisation 2.5D

La modélisation 2D est appliquée aux structures d'allongement infini. Afin de permettre un bon contrôle de l'extension latérale des structures, des modélisations 2D1/2 sont proposées en magnétisme (Shuey et Pasquale, 1973) et en gravimétrie (Cady, 1980). D'une façon générale, l'effet gravimétrique en un point  $r$  d'un élément de volume  $v$  de densité  $\rho$  (figure 22) est donné par la relation :

$$F(r) = -\nabla U(r), \text{ avec } U(r) = -G \int_V \rho(r_0) \frac{d^3 r_0}{|r-r_0|} \quad (2.58)$$



**Figure 22: Calcul de l'effet gravimétrique d'un élément de volume V de densité uniforme  $\rho$  à partir du point r (D'après Cady, 1980).**

Dans un système de coordonnées x, y, z on a :

$$F_x = -2G\rho\delta U/\delta x; \quad F_y = -2G\rho\delta U/\delta y; \quad F_z = -2G\rho\delta U/\delta z$$

Si on considère que  $\rho$  est uniforme, et sachant que le champ de gravité total mesuré est vertical,

$$F_z = -G\rho \iiint \frac{\delta}{\delta z} (x^2 + y^2 + z^2)^{-1/2} dx dy dz \quad (2.59)$$

Considérons une structure limitée latéralement en  $Y_1$  et  $Y_2$ . Si on intègre l'équation ci-dessus de  $-Y_2$  à 0 et de 0 à  $Y_1$ , on aura l'expression suivante :

$$F_z = -G\rho \frac{\delta}{\delta z} \iint [-\ln(x^2 + z^2) + \ln(Y_1 + R_1) + \ln(Y_2 + R_2)] dx dy \quad (2.60)$$

Avec  $R_1 = \sqrt{(x^2 + Y_1^2 + z^2)}$  et  $R_2 = \sqrt{(x^2 + Y_2^2 + z^2)}$

La résolution de cette intégrale permet de calculer les effets d'une structure de section polygonale et d'allongement fini.

La modélisation géophysique est un outil puissant pour proposer une hypothèse sur la géométrie des corps responsables d'anomalies magnétiques en profondeur. Il permet de voir en coupe de manière détaillée comment les différentes unités se superposent. Ces objets sont alors interprétés comme des corps géologiques. Cependant, si aucune information extérieure ne vient contraindre le modèle, il existe théoriquement une infinité de modèles pouvant expliquer une anomalie. Pour cette raison, il est essentiel d'injecter dans le modèle le maximum d'informations pour obtenir des modèles les plus contraints possible. Les contraintes peuvent être de diverses natures : structurelles, lithologiques, éléments de géométrie, profondeur ou caractéristiques pétrophysiques affectées à un corps. Dans cette étude, les contraintes seront de l'ordre de la géométrie, la profondeur, et la densité.

### II.3.3 Traitement des données

Le but principal dans cette étude est de densifier les données gravimétriques in-situ initialement de faible résolution à partir de la méthode neuronale pour obtenir une nouvelle carte d'anomalie de Bouguer de la région de Lom-Pangar, afin d'analyser les paramètres structuraux et régionaux y afférents. Pour cela, on devra au préalable estimer les anomalies de Bouguer en de nouveaux points grâce au RNA puis appliquer quelques techniques de filtrage à ces dernières.

#### II.3.3.1 Conception et validation du Réseau de Neurones Artificiels (RNA)

La conception et l'implémentation du modèle neuronal artificiel prend en compte les étapes suivantes :

##### a) Collecte des données et prétraitement

Sur la totalité des données obtenues (466 échantillons) dans cette région test, 60% de ces données (soit 280) sont utilisées pour la formation et l'entraînement du réseau perceptron multicouche 20% des données (soit 93) sont utilisées pour la validation et 20% également pour tester le modèle. Après la collecte des données, les procédures de prétraitements des données sont menées dans le but de résoudre le problème des données manquantes et de normalisation. Les données manquantes sont remplacées par la moyenne des valeurs d'anomalies voisines encadrant cette zone. La procédure de normalisation est préconisée car le fait de mélanger des variables de grandes et de petites grandeurs confondra l'algorithme d'apprentissage sur l'importance de chaque variable et peut le forcer à rejeter finalement la plus petite magnitude variable. Les valeurs correspondantes aux anomalies de Bouguer ont été normalisées dans l'intervalle  $[-1,1]$  à partir de la relation suivante (2.61):

$$B_{nor} = \frac{2(B - B_{min})}{B_{max} - B_{min}} - 1 \quad (2.61)$$

A la fin, les valeurs d'anomalies sont dé-normalisées en utilisant la fonction (2.62)

$$B = \frac{1}{2} \cdot (B_{nor} + 1) \cdot (B_{max} - B_{min}) + B_{min} \quad (2.62)$$

##### b) Apprentissage du réseau

Pour la plupart des architectures des RNA, l'apprentissage se traduit par une modification des poids synaptiques, c'est-à-dire par un changement dans la valeur des poids qui relient les

neurones d'une couche à l'autre (Parizeau, 2004). Le processus d'entraînement de notre système de RNA se résume en plusieurs étapes (Figure 23) qui peuvent être résumées comme suit :

- Le choix des variables d'entrée et de sortie basé sur la banque des données des anomalies de Bouguer in-situ disponible. On utilise 280 échantillons (soit 60%) essentiellement répertoriés dans les zones ayant une meilleure couverture ;
- La détermination du nombre de couches cachées, le nombre de neurones dans chaque couche cachée et le nombre d'itérations nécessaire pour atteindre à une solution stable ;
- L'apprentissage du système de RNA basé sur la rétro-propagation de l'erreur dans les poids synaptiques.

Le type d'apprentissage utilisé dans cette étude est l'apprentissage supervisé. Ici, on cherche à imposer au réseau un fonctionnement donné en forçant les sorties des réseaux à prendre des valeurs bien définies (choisies par l'opérateur) et ce en modifiant les poids synaptiques.

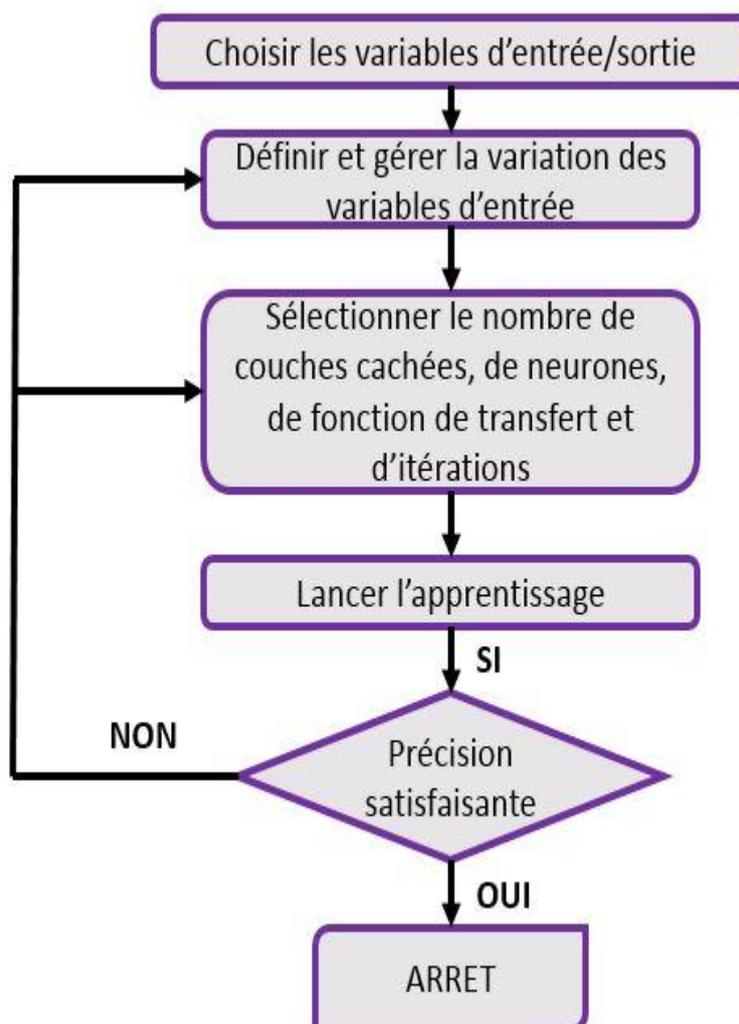


Figure 23: Schéma de la procédure d'apprentissage de notre RNA

Au cours du processus de formation, les poids sont ajustés afin de rendre les sorties prédites proches des sorties cibles (mesurées in-situ) du réseau. Plusieurs combinaisons entre les fonctions de transfert et différents modèles de réseaux sont à envisager dans l'optique de trouver la meilleure architecture pour laquelle la corrélation est très grande, les erreurs quadratiques et de biais moyennes aussi faibles que possible. MatLab fournit des fonctions de transfert intégrées qui sont utilisées dans cette étude. L'algorithme d'apprentissage Levenberg Marquardt est utilisé pour la formation du réseau qui est un algorithme de retro-propagation.

La figure 24 présente l'une des architectures possibles du réseau généré à partir du logiciel MatLab au cours de l'implémentation avec deux entrées, une couche cachée comportant 15 neurones te terminant par une sortie.

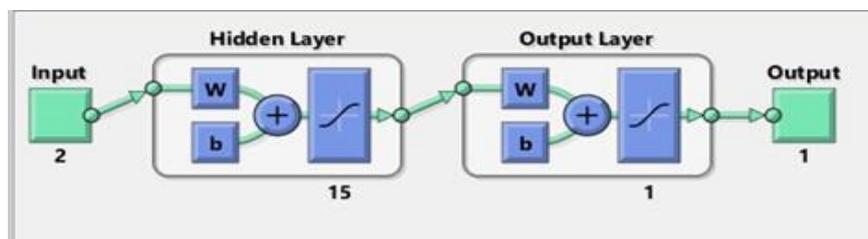


Figure 24: Architecture du réseau de neurones

### c) Test et validation du modèle neuronal conçu

L'étape suivante consiste à tester puis valider la performance du modèle développé. En ce qui concerne l'étude dans la région de Lom-Pangar, 93 échantillons de données gravimétriques ont été utilisés pour tester et 93 également pour valiser le modèle neuronal établi plus haut. Afin d'évaluer quantitativement la performance du modèle de réseau neuronal artificiel développé, une analyse statistique impliquant le calcul du coefficient de corrélation ( $R^2$ ) l'erreur quadratique moyenne (RMSE : Root Mean Square Error) et l'erreur de biais moyenne (MBE : Mean Bias Error) est nécessaire. Le coefficient de détermination met en exergue la proximité entre les valeurs d'anomalies de Bouguer enregistrées sur le terrain, et celles générées par le réseau neuronal ; par conséquent, plus il est proche de 1, plus le modèle de réseau est fiable. L'erreur quadratique moyenne fournit des informations sur la performance étendue à une petite échelle ; c'est une mesure de la variation des valeurs prédictives par rapport aux données mesurées. Plus elle est faible plus l'estimation est précise. L'erreur de biais moyenne est une indication de l'écart moyen des valeurs prédites par rapport aux données mesurées correspondantes et fournit des informations sur les performances sur une étude à grande échelle.

Les expressions (2.63), (2.64) et (2.65) permettent de calculer respectivement l'erreur quadratique moyenne, l'erreur de biais moyenne et le coefficient de corrélation.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (B_{p,i} - B_i)^2} \quad (2.63)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (B_{p,i} - B_i) \quad (2.64)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (B_{p,i} - \bar{B})^2}{\sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2} \quad (2.65)$$

### II.3.3.2 Techniques d'analyse géophysique

#### a) Détermination de l'altitude optimale de prolongement du champ gravimétrique

Le procédé utilisé ici est la méthode empirique de Zeng et Lin, (2007). Elle consiste à déterminer l'altitude de prolongement de la Bouguer où la courbe de corrélation entre les champs prolongés à des altitudes successives présente une déflexion maximale. Les étapes de traitement de données effectuées pour déterminer cette altitude dans notre zone d'étude sont les suivantes :

- prolongement vers le haut de la carte de Bouguer aux altitudes allant de 5 à 120 km, par intervalle de 5 km ;
- calcul des facteurs de corrélation entre les champs prolongés à deux altitudes successives:  $r_{5,10}$  ;  $r_{10,15}$  ;  $r_{15,20}$  ; ... ;  $r_{115,120}$  ;
- tracé du graphe donnant la variation du facteur de corrélation en fonction de l'altitude de prolongement en faisant correspondre chaque facteur de corrélation à l'altitude la plus basse (par exemple  $r_{5,10}$  correspond à  $h = 5$ km).

#### b) Le Prolongement

Le prolongement vers le haut sert de filtre passe-bas comme l'intégration. Le signal est lissé et les effets des grandes structures profondes sont privilégiés par rapport aux structures superficielles. L'amplitude des anomalies diminue au fur et à mesure qu'on augmente l'altitude. Seules les anomalies liées aux structures profondes apparaissent clairement car la forme et l'extension dépendent de l'altitude de prolongement. La poursuite vers le haut atténue les anomalies de haute fréquence par rapport aux anomalies de basse fréquence et selon (Blakely et Simpson, 1986 ; Blakely, 1996), plus la longueur d'onde est courte, plus l'atténuation est

importante. Cette opération est utilisée ici pour supprimer les effets d'anomalies peu profondes révélant ainsi les détails des anomalies plus profondes.

***c) Les magnitudes du gradient horizontal et vertical***

Le gradient horizontal et vertical constituent un excellent moyen de localiser les contacts géologiques dans le sous-sol, notamment les failles en déterminant leur tracé, leur pendage et leur degré d'importance (Khattach et al., 2004, 2006). Pour la localisation automatique des maxima du gradient horizontal, la méthode de Blakely et Simpson (1986) a été adoptée. De plus, la géométrie d'une zone de gradient horizontal maximum donne une idée du type de structure géologique. Ainsi, les gradients présentant une crête allongée et plus ou moins rectiligne correspondent aux failles et contacts géologiques subverticaux, tandis que ceux dont la crête dessine grossièrement un contour arrondi révèlent souvent la présence en subsurface d'une intrusion ignée, d'un dôme de sel ou d'un diapir.

***d) Analyse multi-échelle du gradient horizontal***

L'analyse à l'échelle de ces maxima implique la poursuite vers le haut du champ de gravité à différentes hauteurs en vue de caractériser l'extension verticale des structures anormales. Les failles et les contacts s'expriment par une disposition quasi-linéaire de nombreux maxima et les limites horizontales des corps intrusifs sont matérialisées par leurs dispositions quasi circulaires (Koumetio et al., 2014 ; Penaye et al., 2004 ; Cordell, 1979). En général, les pics locaux de l'amplitude du gradient horizontal donnent les emplacements des contacts de grande densité. Le gradient horizontal le plus raide d'une anomalie de gravité sera situé directement au-dessus du bord du corps si le bord est vertical et éloigné de tout autre bord ou source (Galloway et al., 1999).

La méthodologie d'établissement et d'analyse consiste à :

- Etablir les cartes du champ prolongé vers le haut à différentes altitudes avec un pas constant;
- Etablir les cartes du gradient horizontal des différentes cartes prolongées;
- Etablir les cartes des maxima du gradient horizontal des cartes prolongées ;
- Superposer les cartes de maxima du gradient horizontal des cartes prolongées.

Les maxima du gradient horizontal des anomalies présentent la plupart des caractéristiques des structures sous forme de failles/fractures et de limites géologiques. La cartographie des contours à plusieurs échelles est un processus de détection des contours

dans les données de terrain potentielles. Au cours du processus, les positions des maximums de gradients sont détectées sur plusieurs hauteurs de continuation vers le haut. La carte de gradient horizontal d'analyse multi-échelle est obtenue en montrant les maxima de différents niveaux sur la même parcelle. Les décalages observés sur la disposition des maxima renseignent sur le pendage de la structure esquissée (Blenkinsop et al., 2008).

**e) Analyse multi-échelle du gradient horizontal de la dérivée verticale**

La carte linéamentaire de la région sera déduite de l'analyse multi-échelle du gradient horizontal de la dérivée verticale dans la mesure où d'après les travaux de Grauch et Cordell, (1987) lorsque plusieurs sources sont rapprochées, la superposition de leurs effets gravimétriques sur la carte d'anomalies de Bouguer (qui montrera une seule anomalie) et du gradient horizontal, a pour effet de délocaliser les maxima du gradient horizontal. Ceux-ci ne se trouveront plus à l'aplomb des contacts abrupts de densité. Cette délocalisation sera d'ailleurs accentuée par l'opération de prolongement vers le haut qui lisse généralement les cartes d'isoanomalies. Pour minimiser le phénomène de délocalisation des maxima, on peut exploiter les cartes du gradient vertical qui montrent une bonne aptitude à minimiser l'effet dû à l'interférence des signatures gravimétriques des sources (Marson et Klingele, 1993).

La méthodologie d'analyse consiste à :

- établir la carte de la dérivée verticale du 1<sup>er</sup> ordre des anomalies de Bouguer à différentes altitudes;
- sur chaque carte obtenue, appliquer le filtre de dérivation horizontale et déterminer les maxima/minima locaux.
- superposer les maxima/minima locaux obtenus sur les différentes cartes sur une seule carte

Le degré d'importance (en profondeur) d'une faille et ou de contacts lithologiques est déterminé par la persistance de la présence des maxima locaux pour des altitudes de prolongement de plus en plus élevées. Le même critère permet de comparer qualitativement les profondeurs relatives des corps intrusifs ; de plus, le déplacement des maximas pourrait permettre de déterminer la direction d'inclinaison des contacts mis en évidence. De plus, d'après Jacobsen, (1987) le prolongement de la Bouguer à une altitude  $h_0$  qui élimine l'effet gravifique des sources se trouvant au-delà de la profondeur  $h_0/2$ .

**f) La déconvolution d'Euler-3D**

Dans l'étude actuelle, l'outil de déconvolution d'Euler-3D a été utilisé pour tenter de trouver la profondeur du sous-sol des linéaments étudiés. Cette technique fournit des estimations automatiques de la profondeur et de l'emplacement de la source. En effet, la déconvolution d'Euler-3D crée un ensemble de solutions à partir d'un ensemble de données de grille contenant des sources proposées qui «expliquent» les anomalies de la grille. Elle calcule l'emplacement, la profondeur sous le capteur et la fiabilité pour chaque solution ainsi que l'erreur estimée sous forme d'écart types. Par conséquent, la déconvolution d'Euler 3D est à la fois un chercheur de limites et un estimateur de profondeur (Thompson, 1982 ; Reid et al., 1990). Les solutions d'Euler-3D ont été calculées avec un indice structural proche de zéro car, il aide à mettre en évidence les contacts (filon-couche, filon intrusif oblique, formation de fer rubanée, etc.) ou les failles du sous-sol (Reid et al., 1990). Un bon regroupement de solutions indique que la localisation de la source est bien résolue, et une dispersion indique que les solutions doivent probablement être ignorées (Reid et al., 1990).

**g) Choix du degré de polynôme n**

La détermination du degré n consiste à établir les cartes d'anomalies régionales pour différents degrés du polynôme ( $1 \leq n \leq 12$ ). La carte d'anomalies régionales retenue est celle présentant la meilleure ressemblance avec la Bouguer prolongée vers le haut à l'altitude optimale. Le degré de ressemblance entre deux champs gravimétriques  $g_1$  et  $g_2$  est déterminé par le facteur de corrélation entre les deux grilles de données, calculé à l'aide de la formule proposée par Abdelrahman et al., (1989):

$$r_{g_1, g_2} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_1(x_i, y_j) g_2(x_i, y_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_1^2(x_i, y_j) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_2^2(x_i, y_j)}} \quad (2.66)$$

où M et N sont les nombres de données suivant les directions x et y respectivement.

**h) Profondeur d'investigation**

C'est la profondeur maximale des sources dont les anomalies constituent le champ résiduel. L'altitude optimale  $h_0$  du prolongement vers le haut de la Bouguer fixe cette profondeur. En effet, partant d'un modèle de sous-sol composé d'un ensemble de couches minces, Jacobsen, (1987), a montré que le spectre de puissance des champs régionaux et résiduels peut s'exprimer sous la forme :

$$P_{reg}(\vec{k}) = C.S_0(\vec{k}) \exp(-2kz_0) \quad (2.67)$$

$$P_{res}(\vec{k}) = C.S_0(\vec{k}) \exp(1 - 2kz_0) \quad (2.68)$$

$$S_0(\vec{k}) = \frac{S(\vec{k})}{2k\Delta z} \quad (2.69)$$

Avec :  $S(\vec{k})$  : Spectre de puissance de la distribution de densité d'une feuille mince ;

$\vec{k}$  : Vecteur d'onde, de module  $k$  (nombre d'onde radial) ;

$\Delta z$  : Espacement vertical entre les feuilles.

Le champ résiduel est produit par les feuilles se trouvant au-dessus de la profondeur  $Z_0$  et le champ régional est produit par l'ensemble des feuilles situées en dessous de  $Z_0$ . Le spectre de puissance du champ observé est la somme des spectres donnés par les relations (2.67) et (2.68) en multipliant cette somme par le filtre  $F(\vec{k}) = \exp(-2kz_0)$  on obtient le spectre de puissance du champ régional. Dans le domaine de Fourier,  $F(\vec{k}) = \exp(-2kz_0)$  est donc l'opérateur qui, appliqué à la Bouguer, permet d'extraire la régionale. Son expression montre qu'il correspond aussi au filtre du prolongement vers le haut à l'altitude  $2Z_0$  (voir l'expression 2.31).

#### ***i) Cas de la modélisation 2.5D***

Dans la pratique, la technique de modélisation consiste à déterminer par ajustement successif la structure qui s'adapte le mieux au contexte géologique. Cette structure crée l'anomalie calculée la plus proche de l'anomalie mesurée, basée sur les algorithmes décrits par Won et Bevis, (1987) ; Rasmussen et Pedersen, (1979) l'extension GM-SYS de Geosoft Oasis Montaj permet de construire un socle géologique approprié à partir de l'ajustement optimal du modèle de courbe de source généré à la courbe de données observée. La procédure qui est celle d'une méthode directe d'interprétation des données gravimétriques, consiste à calculer par itérations successives un profil théorique qui coïncide le mieux possible au profil expérimental. Pour un profil donné, la structure initiale pour amorcer le processus itératif n'est pas choisie au hasard. Elle correspond à un modèle de départ dont les paramètres (Profondeur, épaisseur, densité, géométrie, etc.) sont suggérés soit par les résultats de l'interprétation géologique, soit par les méthodes inverses et indirectes.

#### ***j) Procédure d'interprétation***

Les couloirs d'anomalies négatives sont associés soit à la présence de matériaux légers, soit à un effondrement du socle, ou alors aux deux à la fois. Les anomalies positives sont quant

à elles associées soit à la présence en profondeur des formations denses, soit à une intrusion de ces matériaux dans la croûte. Les zones de contact entre ces différentes formations sont des discontinuités gravimétriques caractérisées par un gradient latéral plus ou moins fort. Ces contacts peuvent être chevauchants ou faillés. L'interprétation se fera selon les étapes suivantes :

- détermination de la profondeur d'investigation par l'analyse spectrale ;
- choix des valeurs de densités ;
- évaluation de la forme et de l'extension des sources responsables d'anomalies.

Ces informations seront utilisées pour proposer un modèle des structures du sous-sol sur le profil considéré.

## **CONCLUSION**

Comme mentionné au début de ce chapitre, les courbes d'anomalies observées sont interprétées en fonction de leur forme, de leur amplitude et de leur extension, celles-ci étant des paramètres importants pour le choix de la méthode d'interprétation à appliquer. Chaque méthode bien entendu, a des contraintes qui sont fixées au départ afin de trouver le meilleur modèle corrélant au mieux avec les données observées. Dans cette étude, les méthodes d'interprétation directe, indirecte et inverse ont été envisagées. Les paramètres physiques obtenus à partir de ces dernières (profondeur, forme et densité) sont utilisés pour déterminer des modèles directs synthétiques 2D1/2.

---

## **CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION**

---

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus et de leur discussion. La première partie de ce chapitre consiste à proposer un modèle d'architecture neuronale offrant des garanties géostatistiques nécessaires à une densification des anomalies de Bouguer dans la région de Lom-Pangar. Par la suite, la nouvelle grille d'anomalie de Bouguer obtenue est soumise à différentes techniques de filtrages dans le but de caractériser dans la zone l'essentiel des signatures géologiques de la région. La séparation régionale-résiduelle par la méthode polynomiale couplée à la modélisation 2D1/2 est faite dans le but de déterminer la nature et la profondeur des principales couches lithologiques. Ce chapitre se terminera par une analyse comparative des différents paramètres géologiques et structuraux de la zone d'étude par rapport aux études antérieures, afin de souligner la pertinence de cette nouvelle technique d'interpolation des données gravimétriques.

### **III.1 CONCEPTION ET VALIDATION DU MODELE NEURONAL**

L'implémentation de cette méthode d'interpolation au service de la gravimétrie requiert dans un premier temps, d'adapter la méthode neuronale à l'interpolation des anomalies de Bouguer, en concevant un réseau de neurones approprié à travers une architecture correspondante. Dans un deuxième temps, valider les résultats obtenus à travers différentes approches notamment gravimétrique et statistique (calcul de certaines valeurs d'erreurs comme la RMSE, MBE et du coefficient de corrélation  $R^2$ ).

#### **III.1.1 Conception du réseau de neurones**

##### ***III.1.1.1 Présentation de l'architecture***

Il est question ici de concevoir le réseau de neurones en introduisant dans le système les paramètres d'entrées (longitude, latitude), la cible (l'anomalie de Bouguer in-situ), le nombre de couches cachées, le nombre de neurones dans chaque couche, la fonction de transfert, la fonction d'apprentissage, et le poids / biais de connexion qui permettront de générer la sortie (anomalie de Bouguer) souhaitée. Au cours du processus d'apprentissage, les poids sont ajustés de façon à rendre les sorties prédites proches des sorties réelles. Dans ce travail aucune fonction de transfert utilisée de type linéaire (pureline), tangente sigmoïdale hyperboliques (tansig) et logarithme sigmoïdale (logsig). La figure 25 présente de manière simplifiée en ce qui concerne cette étude, un modèle d'architecture de type perceptron multicouches.

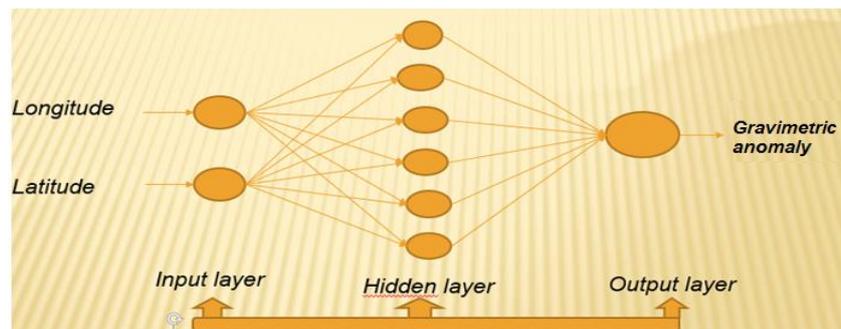


Figure 25: Réseau de perceptrons multicouches

### III.1.1.2 Test du réseau de neurones

Cette section présente les résultats obtenus à travers le modèle de perceptron multi couches du réseau neuronal artificiel. Le tableau 4 montre les valeurs calculées de  $R^2$  de RMSE et de MBE, en considérant 15 architectures de réseaux différents. Il met en exergue la performance du réseau neuronal généré en fonction de l'architecture choisie.

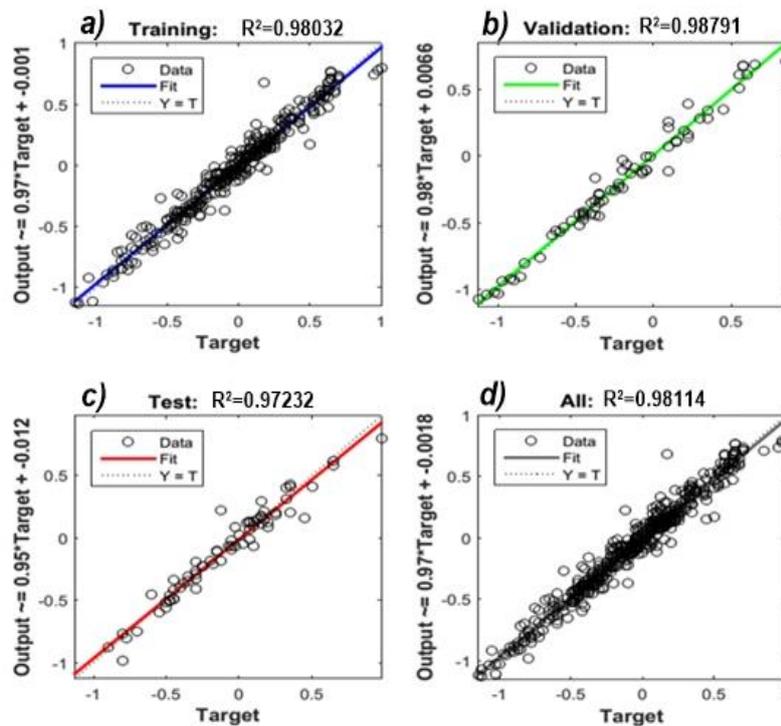
**Tableau 4: Paramètres d'entrées et statistiques des modèles développés pour différentes architectures de réseaux neuronaux**

| Modèle | Fonction de transfert            | Entrées               | Structure du réseau | $R^2$  | RMSE   | MBE                    |
|--------|----------------------------------|-----------------------|---------------------|--------|--------|------------------------|
| 1      | Linéaire                         | longitude et latitude | 2-6-1               | 0,8580 | 0,8571 | -0,1532                |
| 2      |                                  |                       | 2-10-1              | 0,8581 | 0,8500 | 0,0761                 |
| 3      |                                  |                       | 2-15-1              | 0,8258 | 0,8634 | -0,1472                |
| 4      |                                  |                       | 2-17-1              | 0,8479 | 0,8740 | -0,1405                |
| 5      |                                  |                       | 2-20-1              | 0,8876 | 0,8563 | 0,1161                 |
| 6      | Tangente sigmoïdale hyperbolique | longitude et latitude | 2-6-1               | 0,9223 | 0,1609 | 0,0080                 |
| 7      |                                  |                       | 2-10-1              | 0,9547 | 0,1238 | 0,0037                 |
| 8      |                                  |                       | 2-15-1              | 0,9750 | 0,0923 | -2,34x10 <sup>-6</sup> |
| 9      |                                  |                       | 2-17-1              | 0,9715 | 0,0986 | 0,0032                 |
| 10     |                                  |                       | 2-20-1              | 0,9811 | 0,0804 | 0,0003                 |
| 11     | Logarithme sigmoïdale            | longitude et latitude | 2-6-1               | 0,9180 | 0,8655 | 0,0561                 |
| 12     |                                  |                       | 2-10-1              | 0,9277 | 0,2450 | -0,2837                |
| 13     |                                  |                       | 2-15-1              | 0,9493 | 0,0915 | 0,0313                 |
| 14     |                                  |                       | 2-17-1              | 0,9263 | 0,2315 | 0,1418                 |
| 15     |                                  |                       | 2-20-1              | 0,9541 | 0,3314 | 0,0088                 |

Dans la quatrième colonne, Le premier nombre indique le nombre de neurones dans la couche d'entrée, le dernier nombre représentant les neurones dans la couche de sortie et le nombre entre ses deux valeurs représente le nombre de neurones de la couche cachée. Tant que l'anomalie prédite n'est pas aussi proche possible de l'anomalie réelle, le programme est compilé à nouveau en changeant si besoin certains paramètres du réseau comme le poids des synapses, le nombre d'epochs etc. jusqu'à obtention d'une courbe de régression qui corrèle le mieux possible avec la droite d'équation  $y=x$ .

**a) Le coefficient de corrélation :  $R^2$**

Le coefficient de corrélation établit le degré de ressemblance ou de similitude entre les valeurs de même nature. Il est utilisé ici pour évaluer le degré de rapprochement entre les valeurs d'anomalies générées par le réseau neuronal et celles mesurées in-situ. Le tableau 4 présente le modèle N°10 comme ayant la meilleure corrélation (0,9811 soit 98,11%). Il est tout aussi important de préciser que, les architectures utilisant comme fonction de transfert la tangente sigmoïdale hyperbolique ou logarithmique sigmoïdale, présentent des résultats particulièrement satisfaisants. La figure 26 donne les différentes corrélations de l'apprentissage(a), de la validation(b), du test(c), et de l'ensemble des données(d) du modèle N°10.



**Figure 26: Performance du réseau neuronal dans l'estimation des anomalies de Bouguer**

**b) L'erreur quadratique moyenne : RMSE**

L'erreur quadratique moyenne ou RMSE (Root Mean Square Error) fournit des informations sur la performance étendue à une petite échelle. C'est une mesure de la variation des valeurs prédictives par rapport aux données mesurées. A cet effet, plus elle est faible plus l'estimation est précise. L'équation (2.62) (où  $B_{p,i}$  et  $B_i$  représentent respectivement les valeurs d'anomalie de Bouguer générées par le réseau de neurones et obtenues par mesure in-situ) permet de valider à travers le tableau 4, que le modèle N°10 reste la meilleure architecture du fait de sa RMSE très faible.

**c) L'erreur de biais moyenne : MBE**

L'erreur de biais moyenne ou MBE (Mean Bias Error) est une indication de l'écart moyen des valeurs prédites des anomalies de Bouguer par le réseau de neurones, par rapport aux données mesurées correspondantes. Elle fournit surtout des informations sur la performance du modèle étendue sur une étude à grande échelle. Le tableau 4 présente les modèles N°8 et 10 comme étant les meilleurs possibles pour ce type de problème. Ses valeurs d'erreur très proches de zéro (0) renseignent sur la fiabilité de la méthode neuronale appliquée à l'interpolation des anomalies de Bouguer.

**d) Récapitulatif**

Les différentes valeurs d'erreur calculées (RMSE, MBE) et de coefficient de corrélation  $R^2$  mettent en exergue d'un point de vue purement statistique une fiabilité certaine de l'interpolation des anomalies de Bouguer via le réseau de neurones artificiel. Cependant, précisons qu'il n'existe véritablement jusqu'ici aucune corrélation entre le nombre de données en entrée et le nombre de couches cachées ou de neurones sur ces couches ; néanmoins il apparaît que la fonction de transfert de type tangente sigmoïdale hyperbolique est celle à suggérer pour l'interpolation des anomalies gravimétriques de Bouguer. En somme, le modèle N° 10 (ayant une bonne corrélation et de faibles valeurs d'erreurs) apparaît comme étant l'architecture la plus fiable pour densifier les anomalies de Bouguer dans la région de Lom-Pangar.

### **III.1.2 Validation du réseau**

De ce qui précède, il ressort que le modèle N°10 (ayant la fonction de transfert de type tangente sigmoïdale hyperbolique, associée à l'architecture [2-20-1]) serait à même de pouvoir

densifier dans la région de Lom-Pangar en anomalies de Bouguer. Validons à présent ce modèle en utilisant d'une part, une approche basée sur la distribution des valeurs d'anomalies de Bouguer dans la région en fonction de la distance, et d'autre part suivant une approche gravimétrique.

### **III.1.2.1 Approche graphique**

La valeur d'anomalie mesurée ou estimée en chaque point est caractérisée par une latitude et une longitude ; elle peut être représentée dans un graphe en fonction de la distance. En prenant un point origine comme référence (le point de coordonnées géographique : 11°30' N et 4°30'E), nous pouvons, en utilisant l'équation (3.3) calculer la distance entre chacun des points de coordonnées géographiques connues et un point origine.

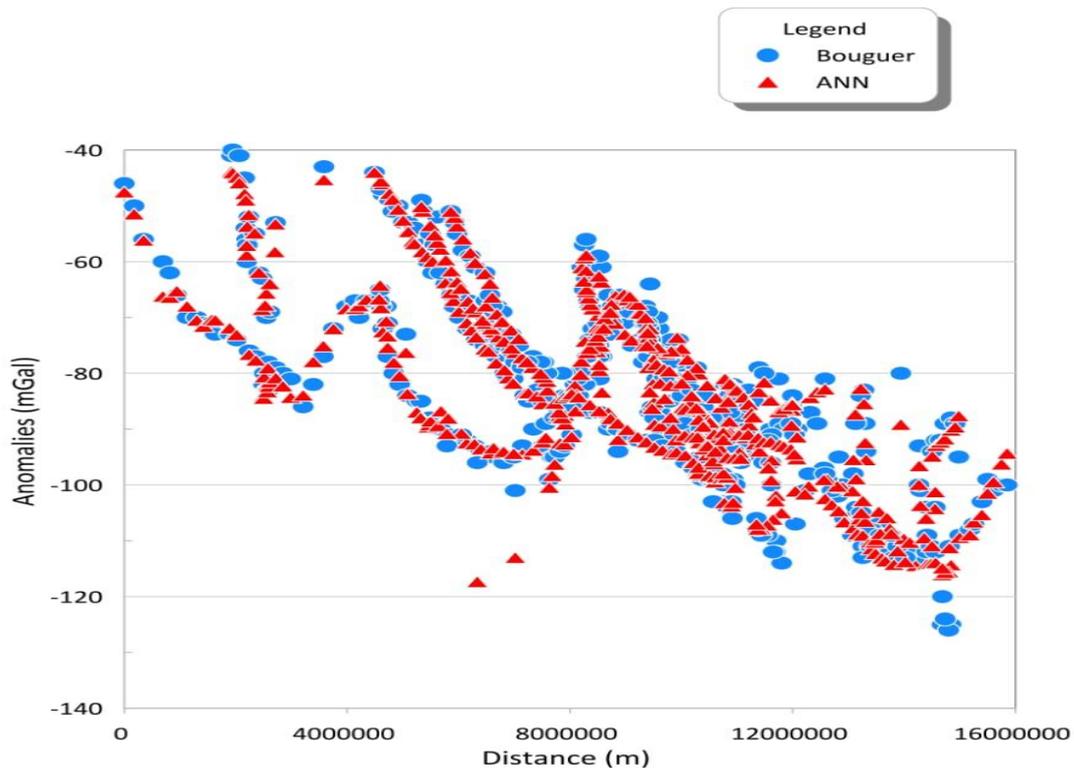
$$a = \sin^2(\Delta\varphi / 2) + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \sin^2(\Delta\lambda / 2) \quad (3.1)$$

$$c = 2 \cdot a \tan 2(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (3.2)$$

$$d = R \cdot c \quad (3.3)$$

Où les valeurs de  $\varphi$  et de  $\lambda$  correspondent respectivement aux latitudes et longitudes

Afin de valider de façon plus rigoureuse le modèle neuronal, une comparaison des valeurs d'anomalies mesurées avec celles générées par le réseau neuronal est faite. La figure 27 met en évidence la superposition des valeurs mesurées (des petits ronds bleus) avec celles générées par le réseau de neurones (des triangles rouges). On note suivant la distribution des valeurs d'anomalie de Bouguer, une absence totale de progression prédictible pouvant être décrite par une fonction mathématique.



**Figure 27: Superposition des anomalies de Bouguer mesurées avec celles générées par le réseau neuronal en fonction de la distance**

La figure ci-dessus illustre clairement une certaine concordance entre les valeurs d'anomalies mesurées et celles générées. On assiste d'ailleurs à partir d'une certaine distance à une superposition des deux valeurs (prédites et mesurées).

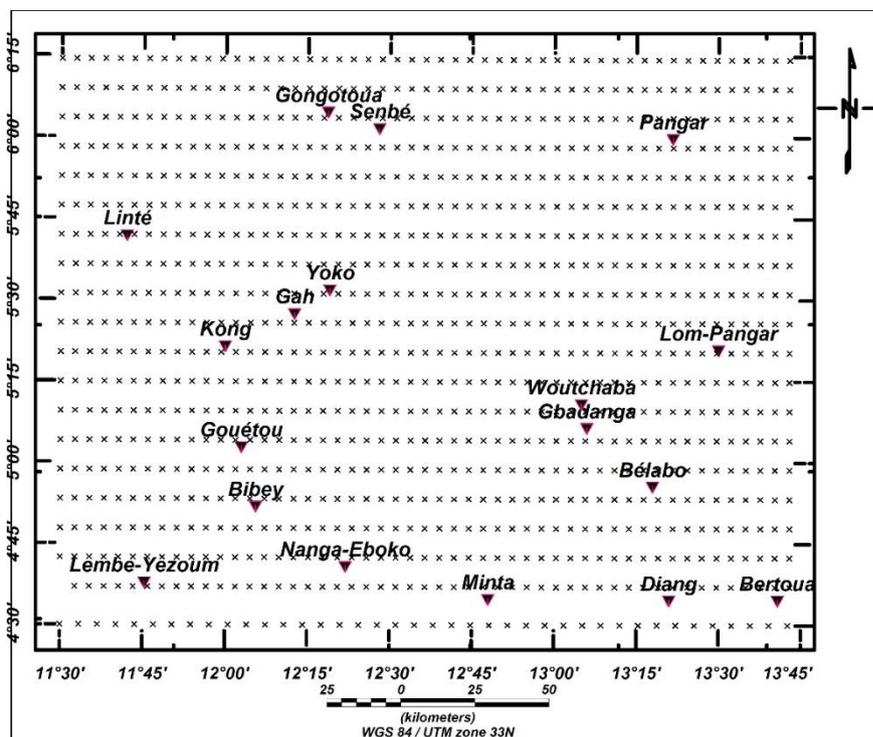
### **III.1.2.2 Approche gravimétrique**

La figure 28 présente une nouvelle distribution des points de mesures où les données d'anomalies de Bouguer ont été estimées. La validation de l'architecture neuronale d'un point de vue gravimétrique se fera suivant une analyse comparative des figures 29.a et 29.b obtenues respectivement à partir de la Bouguer obtenue par krigéage des données in-situ et celles obtenues après densification des données de base par la méthode neuronale.

On a tout d'abord dans le grand Sud et au NW de la région des anomalies fortes caractérisée par des valeurs d'anomalies comprises entre -77 mGal et -41 mGal ; tels suivant leurs anomalies tridimensionnelles plus ou moins sphériques ou en forme de cône, propres aux dômes on pourrait suspecter l'intrusion des roches denses, ou une remontée de matériaux denses depuis les profondeurs respectivement au NW et au Sud. La deuxième zone est la partie centrale caractérisée par des anomalies moyennes (-94 mGal à -77 mGal) ; intermédiaires aux anomalies

fortes et légères. On les remarque en parcourant les localités de Sembé, Gah, Linté, Woutchaba, Lom-Pangar etc. On a enfin au NE et puis au Sud de Yoko les anomalies très légères (-94 mGal à - 112 mGal), avec des courbes isoanomales fermées. Elles dessinent grossièrement des ellipses caractéristiques des anomalies tridimensionnelles sous forme, de cuvettes ou amas, mais aussi caractéristiques des structures cylindriques telles que des synformes, antiformes, filons et galeries. Ces différentes structures ont été précédemment misent en évidence par les auteurs suivants : Poudjom et al., (1992) ; Tadjou, (2004) ; Nguiya et al., (2008).

Cependant on a noté quelques individualités propres au modèle de la Bouguer généré par RNA vis-à-vis de celui obtenu par krigeage. Ce sont principalement la forte anomalie négative au Sud de la localité Lom-Pangar, et la limitation de l'extension positive au NW de la zone d'étude au profit d'une anomalie très légère. Ces disparités se présentent systématiquement dans les régions où le maillage a été fait par interpolation. Finalement la spécificité de la méthode neuronale sera également jugée en fonction des informations géologiques et tectoniques que révéleraient ces zones.



**Figure 28: Nouvelle carte de distribution des points de données gravimétriques estimées suivant l'approche neuronale**

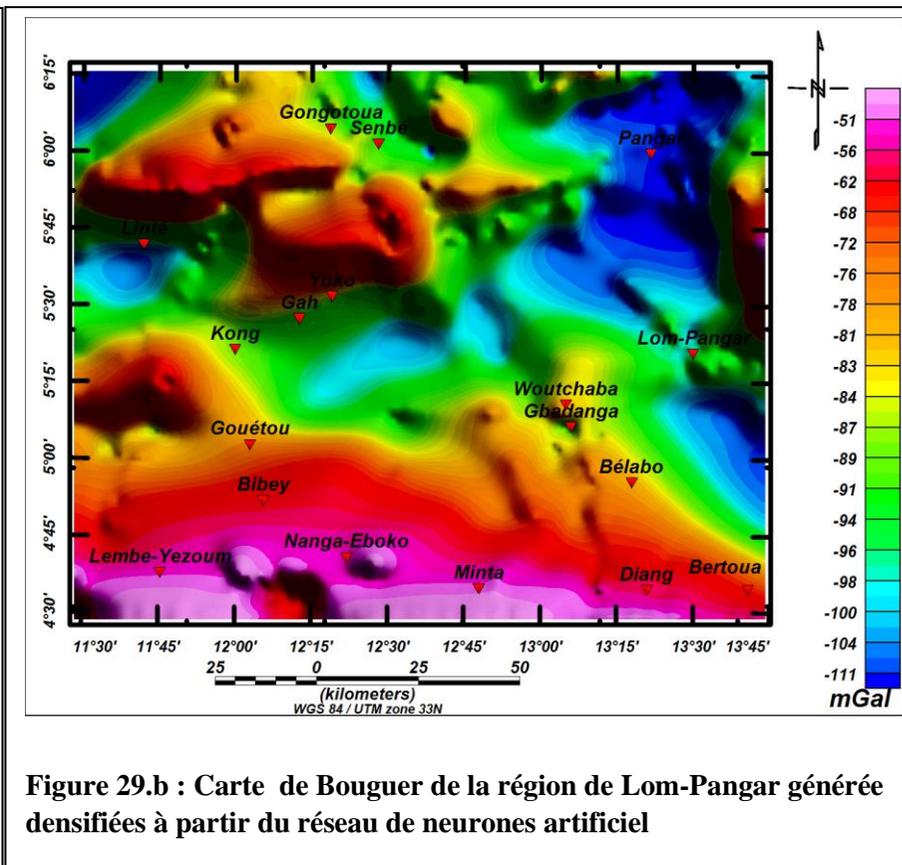
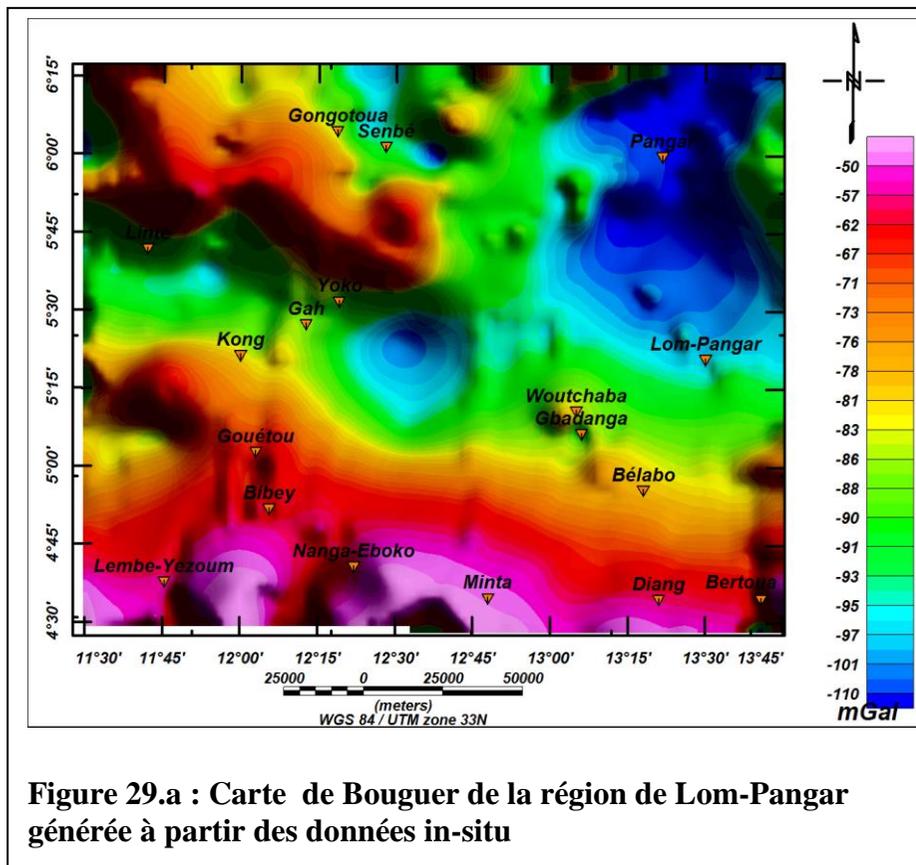


Figure 29 : Présentation comparée de la Bouguer « conventionnelle » (figure 29a) et la Bouguer obtenue suivant le Réseau Neuronal Artificiel (RNA) (figure 29.b).

### III.1.2.3 Approche Comparative vis-à-vis d'autres méthodes d'interpolation

L'interpolation spatiale est une procédure qui consiste à estimer la valeur d'une variable aléatoire pour des sites non échantillonnés. Il est question ici d'interpoler les anomalies de Bouguer à travers d'une part des méthodes d'interpolations classiques basées sur des algorithmes purement déterministes, et d'autre part les méthodes d'estimation géostatistique qui s'appuient sur une modélisation probabiliste du phénomène.

Le tableau 5 ci-dessous présente de manière détaillée les paramètres statistiques issus de différentes méthodes d'interpolations communément utilisées.

**Tableau 5 : Récapitulatif des paramètres statistiques**

| Paramètres statistiques    | Valeurs de référence | Méthodes d'interpolations |          |                     |                            |                        |
|----------------------------|----------------------|---------------------------|----------|---------------------|----------------------------|------------------------|
|                            |                      | ANN (2-20-1)              | Krigeage | Minimum de courbure | Pouvoir d'inverse distance | Régression polynômiale |
| <b>R<sup>2</sup></b>       | 1,0000               | 0,9811                    | 0,5720   | 0,5720              | 0,5720                     | 0,5720                 |
| <b>RMSE</b>                | 0,0000               | 0,0804                    | 82,32    | 82,31               | 81,93                      | 80,33                  |
| <b>MBE</b>                 | 0,0000               | 0,0003                    | 3,813    | 3,812               | 3,795                      | 3,721                  |
| <b>Déviat ion standard</b> | 38,18377             | 33,07909                  | 15,88    | 18,09               | 14,21                      | 11,92                  |
| <b>Moyenne</b>             | -73                  | -70,9276                  | -80,77   | -80,29              | -80,69                     | -79,44                 |
| <b>Max</b>                 | -46                  | -47,5371                  | -40,28   | -5,5                | -41,28                     | -50,89                 |
| <b>Min</b>                 | -100                 | -94,318                   | -125,68  | -133,55             | -124,57                    | -108                   |

Il ressort de ce tableau que la méthode neuronale présente de biens meilleurs paramètres statistiques. Elle serait donc plus indiquée pour une interpolation des données gravimétriques. On peut par conséquent affirmer à la lumière de ce qui précède et soutenue par les travaux menés par Diffo et al., (2022) que, la méthode neuronale est un procédé d'interpolation jouissant d'une certaine fiabilité, pour estimer les grandeurs gravimétriques en Géoscience.

Pour caractériser la région de Lom-Pangar à l'Est-Cameroun, s'appuyant sur la nouvelle Bouguer (Figure 28.b) il sera question tout d'abord de faire une étude qualitative basée sur l'analyse de la carte d'anomalies de Bouguer, les cartes prolongées ainsi que les différentes cartes de gradient. Une analyse quantitative s'appuyant sur l'analyse multi-échelle des cartes de gradients et celles de la déconvolution d'Euler-3D, permettra de ressortir les structures

linéamentaires. Une séparation régionale-résiduelle associée à la modélisation 2.5D donnera un aperçu lithologique de la région de Lom-Pangar.

## **III.2- CARTE D'ANOMALIE DE BOUGUER DENSIFIÉE**

### **III.2.1 Analyse et interprétation de la Bouguer**

La figure 29.b présente la carte d'anomalies de Bouguer de la zone d'étude densifiée par la méthode neuronale. Une vue générale de la carte met en évidence une structuration apparente assez complexe, dans laquelle les directions des anomalies sont variables. On observe, des domaines d'anomalies lourdes (anomalies supérieures à une moyenne de -76 mGal), et des domaines d'anomalies légères (anomalies inférieures à la moyenne), séparés par des gradients horizontaux plus ou moins importants caractérisés par le resserrement des lignes isoanomaes. On distingue ainsi:

#### ***III.2.1.1 Les secteurs d'anomalies faibles***

Le domaine central de la carte est caractérisé par un plateau gravimétrique orienté NE-SW au Sud de Yoko, à Linté puis au Sud de Lom-Pangar respectivement avec pour direction W-E et NW-SE. On enregistre dans ces localités des pics d'anomalies pouvant atteindre -100 mGal. La carte présente dans sa partie NE (localité de Pangar) un axe secondaire dirigé NE-SW, avec un pic d'amplitude de -112 mGal. Cette anomalie présente une ramification apparente dans sa partie NW. L'essentiel de ces anomalies témoignent du fait que nous soyons dans une zone de faible densité (dépôt sédimentaire) ; la zone d'ailleurs reposant presque entièrement sur la série de Lom constituée de metasédiments (schistes).

#### ***III.2.1.2 Les secteurs d'anomalies fortes***

On peut identifier sur la carte de la Bouguer deux grands secteurs d'anomalies positives. Dans sa zone centrale on a entre les localités de Yoko et Sembé un pic d'anomalie pouvant atteindre -65 mGal ; suivant sa forme on pourrait suspecter une zone d'intrusion de matériaux denses. La zone du Sud, située en dessous du parallèle 5°N, semble raisonnablement associée à un grand panneau gravimétrique positif de direction presque W-E, pouvant être associé à une remontée de matériaux denses. Cette dernière couvre les localités de Nanga-Eboko, Minta, Diang avec un maximum qui culmine à -50 mGal.

### **III.2.1.3 Zones de gradient**

Au sud de la carte, on observe une zone de gradient latéral très élevé, avec des isoanomales de direction W-E autour du parallèle 5°N dans laquelle se situent les localités de Gouétou et Belabo. Ce gradient évolue autour de Kong et Yoko avec une direction NE-SW qui proviendrait certainement de la rencontre de deux autres zones de gradients de directions différentes. Il sépare le secteur gravimétrique positif au sud du secteur négatif, et dénote ainsi une structure tectonique majeure pénétrant la croûte. Cette structure semble marquer ainsi la transition entre le domaine du nord et le domaine du sud. Le gradient situé au nord-Ouest de Pangar et passant par Gongotoua semble dénoter la limite nord du fossé de la Mbéré.

### **III.2.2 Comparaison avec la géologie**

Les anomalies gravimétriques du bassin sédimentaire du Lom auquel appartient la région de Lom-Pangar recouvrent à la fois les formations gneissiques et les immenses affleurements granitiques, quelque fois recouverts de sédiments et d'épanchements volcaniques.

Lorsqu'on fait le rapprochement entre les anomalies négatives de grandes longueurs d'onde observées et la topographie de la zone d'étude (figure 30), caractérisée par une altitude comprise entre 570m et 955m soit une moyenne de 763 m, plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour justifier la présence de différentes formations. L'anomalie négative pourrait être due à une bande schisteuse qui se prolongerait en s'épaississant sous les nappes essentiellement granito-gneissiques; soit sous l'effet de la compensation isostatique, qui se serait effectuée par un enfoncement (la racine) de la croûte dans le manteau supérieur plus lourd. La deuxième hypothèse nous semble plus proche de la réalité grâce au rapprochement de la carte de Bouguer avec celle de la géologie. En effet, les études sismologiques (Dorbath et *al.*, 1984 ; Dorbath et Dorbath, 1984 ; Stuart et *al.*, 1985 ; Tokam et *al.*, 2010) ont montré que l'épaisseur de la croûte est normale (33 km) au Sud du plateau de l'Adamaoua (région de Lom-Pangar), et plus réduite (23 km) lorsqu'on progresse vers le Nord.

La zone sud de la carte caractéristique de la forte anomalie positive devrait constituer la preuve d'un relèvement du socle Panafricain, lequel serait responsable de presque toutes les anomalies gravimétriques positives relevées dans la zone. L'alignement de ces anomalies positives pourrait être attribuées aux effets d'une suture de plaque (Tadjou, 2004). Il représenterait ainsi la limite entre le massif de l'Adamaoua et celui du sud-Cameroun, caractérisée par des formations métamorphiques et une série de plutons granitiques témoignant

d'une intense activité magmatique. La zone de gradient observée au Nord de Linté matérialiserait sans doute la trace de la zone de cisaillements centre Camerounais (CCC). Ces résultats corroborent les travaux gravimétriques effectués par Poudjom, (1993) puis Poudjom et *al.*, (1995) qui suggèrent un amincissement lithosphérique sous le plateau de l'Adamaoua, consécutif à une remontée asthénosphérique, plus légère, d'environ 40 km. La grande anomalie négative dans la région de Lom-Pangar a donc été attribuée au bombement qui en a résulté tandis que la zone de maxima positifs, au sud de la région, est attribuée d'une part à l'amincissement de la croûte et d'autre part à l'existence de poches magmatiques non affleurantes (Noutchogwe, 2004).

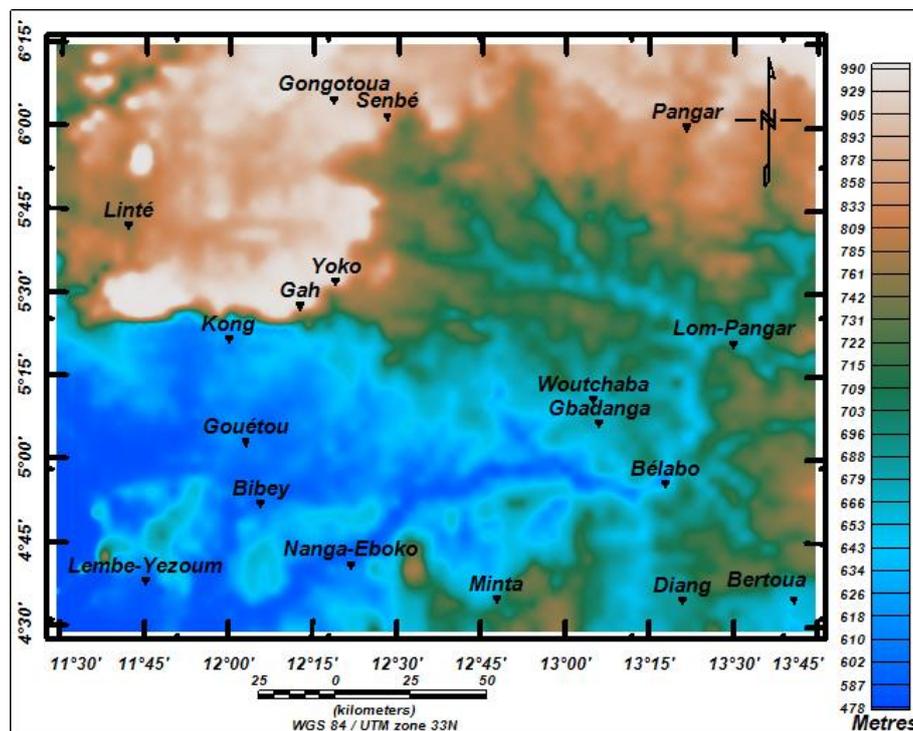


Figure 30: Carte topographique de la zone d'étude.

La carte d'anomalies de Bouguer présente les effets combinés des sources superficielles et profondes. Afin de poursuivre l'analyse et l'interprétation, des transformations ont été appliquées à la carte de Bouguer pour isoler les influences des diverses sources de ces anomalies. L'établissement et l'interprétation de ces cartes permettront de mieux localiser les sources d'anomalies mises en évidence sur la carte de Bouguer.

### III.3 ÉTUDE QUANTITATIVE

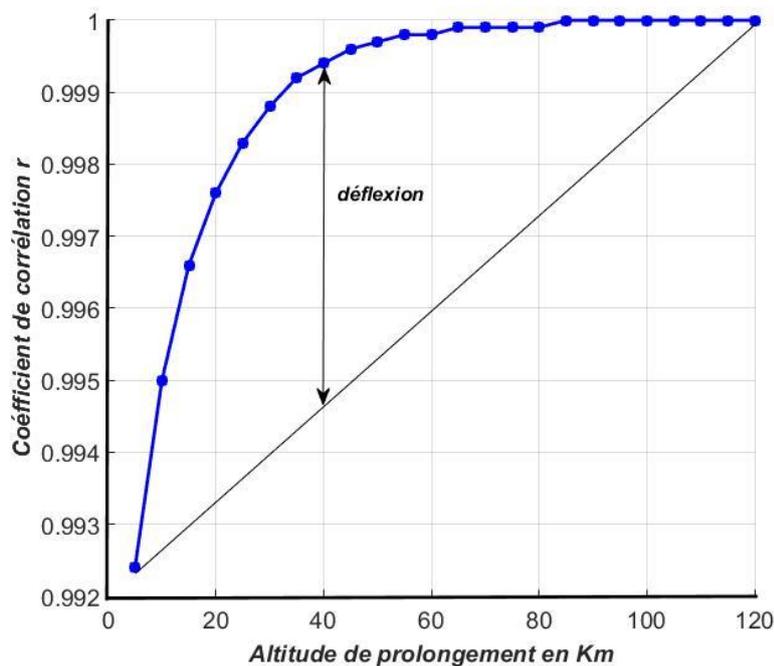
#### III.3.1 Les cartes transformées

Il est question dans cette section de l'analyse des cartes prolongées exclusivement vers le haut, des cartes de gradient vertical et horizontal.

### III.3.1.1 Les cartes prolongées vers le haut

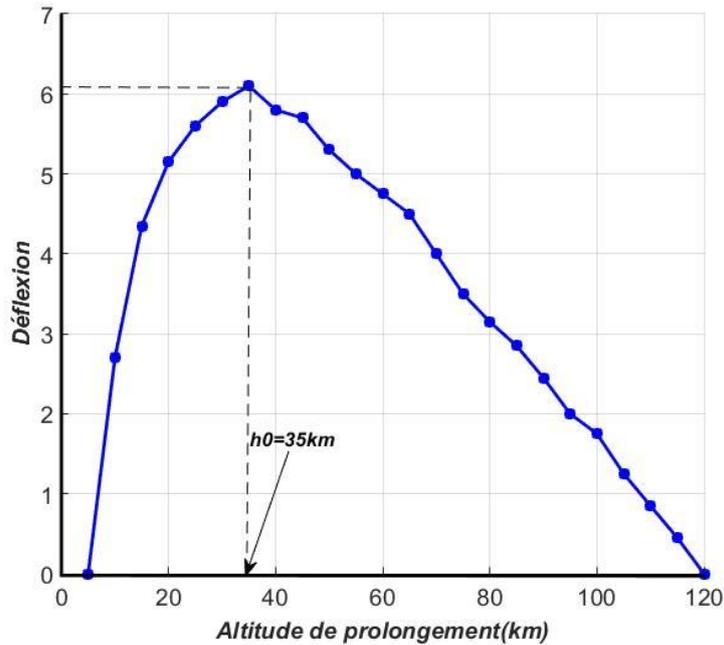
#### a) Détermination de l'altitude optimale de prolongement

La figure 31 ci-dessous présente les variations de la corrélation avec l'altitude de prolongement pour la région de Lom-Pangar. C'est une courbe croissante dont la pente décroît progressivement au fur et à mesure que l'altitude de prolongement augmente ; elle présente par conséquent une déflexion maximale à une certaine altitude de prolongement. La déflexion (indiquée sur la figure 31) à chaque altitude est donnée par le gap entre la courbe du facteur de corrélation et la droite joignant les deux extrémités de la courbe.



**Figure 31: Facteur de corrélation entre les prolongées de la Bouguer à deux altitudes successives en fonction de l'altitude de prolongement, dans la zone d'étude.**

En évaluant les différentes valeurs de la déflexion aux différentes altitudes de prolongement de la Bouguer et le tracé de la courbe donnant celle-ci en fonction de l'altitude de prolongement (figure 32) ; on constate que cette courbe passe par un maximum à l'altitude 35 km. Cette altitude  $h_0 = 35 \text{ km}$  correspond à l'altitude optimale du prolongement vers le haut de la Bouguer dans la région de Lom-Pangar. Cette altitude  $h_0$  permet de fixer également la profondeur d'investigation  $Z_0$ .



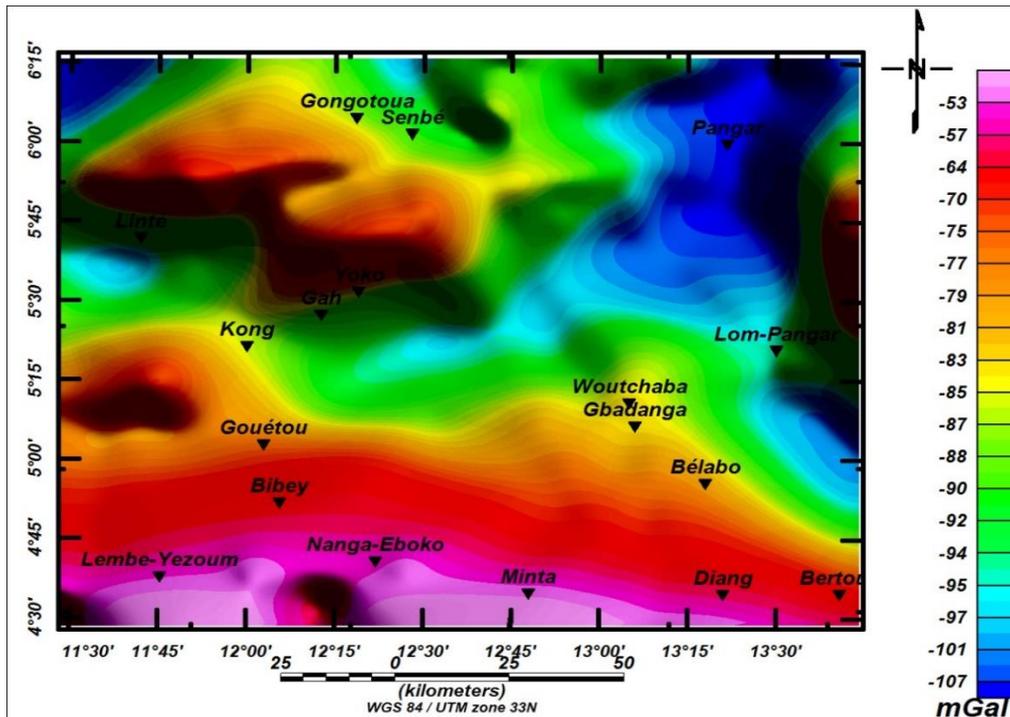
**Figure 32: Représentation de la déflexion en fonction de l'altitude de prolongement de la Bouguer dans le secteur d'étude indiquant l'altitude optimale du prolongement vers le haut de la Bouguer vaut  $h_0 = 35$  km.**

**b) Prolongement à 5km**

La carte d'anomalies prolongée à 5km (figure 33) présente une légère atténuation des anomalies, cette carte ressemble encore à celle de Bouguer mais les anomalies liées aux structures superficielles ne sont plus très visibles notamment :

- La disparition des anomalies légèrement fortes ou moyennes situées au centre de la carte entre Sembé et Gongotoua rendant compte de la présence d'une structure crustale superficielle assez dense ;
- Les anomalies négatives au sud de Linté et à l'Est de Yoko ont perdu d'envergure et devenant du même coup plus légères ;
- L'anomalie positive au NW de la région bien qu'ayant conservée sa forme a baissé en intensité et en volume ; révélant ainsi une structure intrusive dense et suffisamment profonde.

Cependant, les anomalies fortes au sud (Lembe-Yézoum Bibey et Minta) et très faibles au NE (Pangar) ont gardé leurs amplitudes, leurs formes, et leurs pendages ; suggérant des sources d'anomalies très profondes (au-delà de 5km d'altitude).



**Figure 33: Carte d'anomalies de Bouguer prolongée à 5km**

**c) Prolongement à 15km**

À cette altitude de prolongement, l'évolution des contours d'anomalie, leurs orientations et directions présente une évolution déjà assez perceptible comparativement à la Bouguer, en ce sens que Les anomalies négatives de part et d'autre de Gah ont totalement disparu au détriment d'une anomalie très moyenne (figure 34). L'anomalie très négative de Pangar culminant désormais à -102mGal a perdu de sa superficie. On note du sud vers le nord de la région d'étude un déplacement latéral progressif des anomalies positives au détriment de celles moyennes avec un amincissement de la frontière séparant les deux blocs (positif au sud et négatif au nord) suivant la direction NWW-SEE. De même l'anomalie au NW de Linté a perdu d'envergure et de son amplitude. Par contre les zones au sud de Lembé-Yezoum, Bibey et Minta demeurent très positives en termes d'anomalies, conséquence d'une structure source supérieure à 15km. La région de Pangar au NE de la zone d'étude présente des anomalies toujours très négatives rendant compte particulièrement en ce lieu d'un affaissement du socle ou d'une intrusion très légère particulièrement profonde.

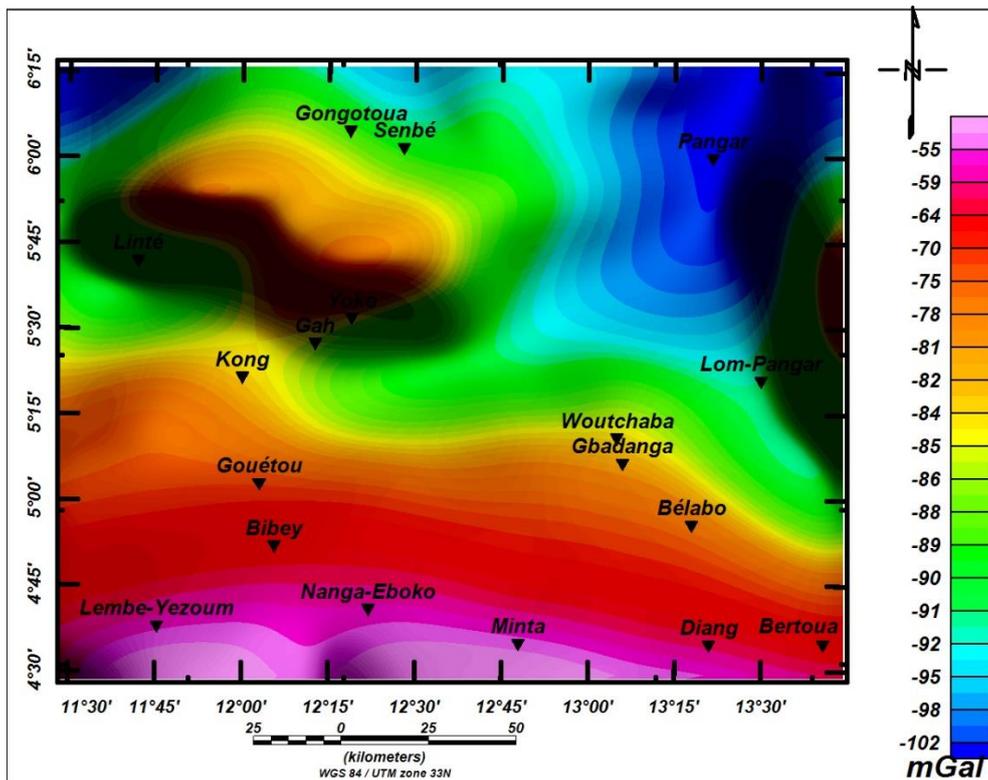


Figure 34: Carte d'anomalies de Bouguer prolongée à 15km

*d) Prolongement à 25km*

Parvenu à cette altitude et illustré par la figure 35, les zones d'anomalie fortes (aussi bien positives que négatives) apparaissent de moins en moins marquées respectivement au Sud au NE où on note une extension de cette dernière vers l'Ouest. Les formations à fortes anomalies positives au sud de la zone d'étude restent clairement visibles tout comme l'anomalie négative de Pangar. Les courbes d'isoanomales deviennent progressivement linéaires de direction majeure WNW-ESE traversant les localités de Yoko, kong et Woutchaba. Progressivement, on entrevoit la structure gravimétrique au niveau régional.

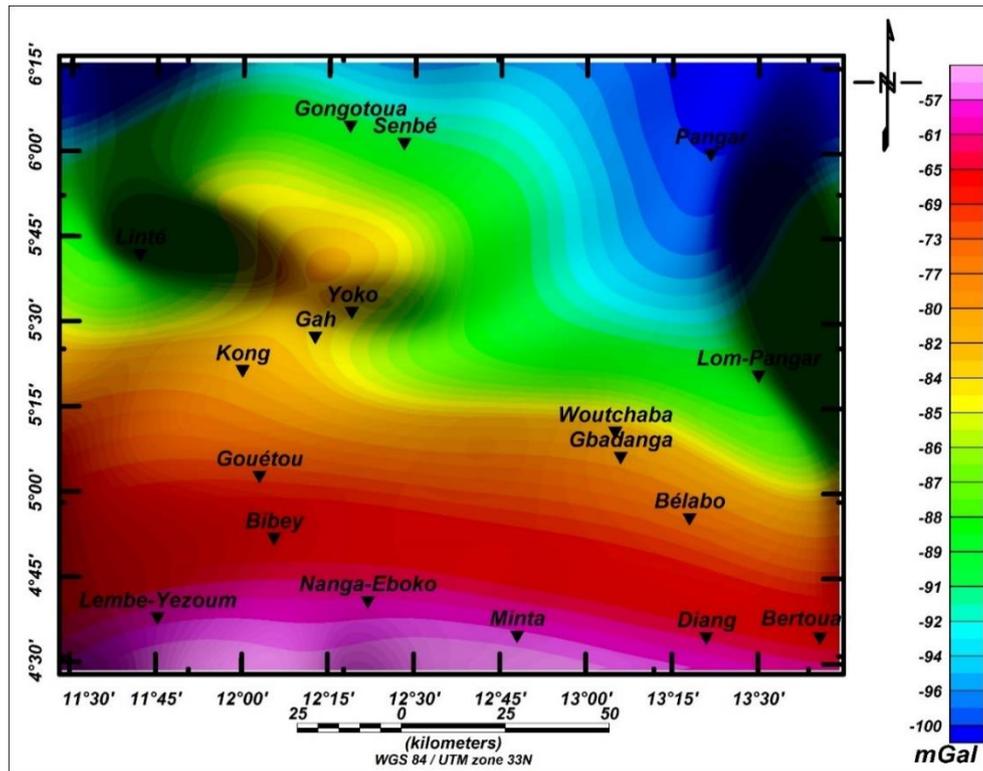
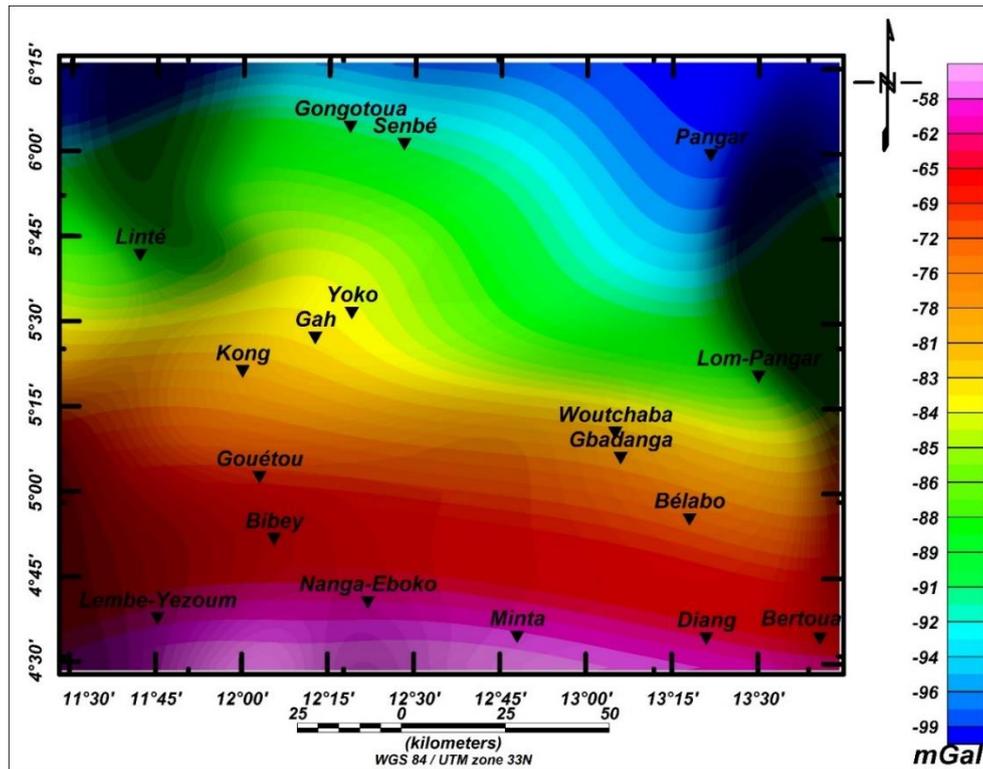


Figure 35: Carte d'anomalies de Bouguer prolongée à 25km

e) *Prolongement à 35km*

La figure 36 met en lumière les contours d'anomalie quasi linéaires au détriment de celles initialement circulaires et/ou curvilignes rencontrées précédemment de direction NWW-SEE. La zone de gradient est orientée suivant la même direction. Toutes les zones d'anomalies plus ou moins superficielles (inférieures à 35km) ont été totalement nivelées. On peut en déduire que la zone de gradient qui sépare la chaîne panafricaine du craton du Congo au Sud représente un système de failles d'origine très profondes.



**Figure 36: Carte d'anomalies de Bouguer prolongée à 35km**

L'examen général des cartes de Bouguer prolongées vers le haut montre que les anomalies localisées sont fortement atténuées et s'estompent tandis que les anomalies de longueur d'onde plus grande sont lissées et passent progressivement d'une orientation assez variée, aux contours divers à une orientation filiforme de direction WNW-ESE. En somme, il ressort des cartes prolongées que le craton du Congo s'enfonce sous la chaîne panafricaine à partir de leurs zones de subduction au niveau desquelles le craton passe sous la chaîne pour atteindre les profondeurs du manteau et illustrer par les points suivants :

- l'existence d'une géodynamique profonde dans la chaîne panafricaine, migrant de Sud vers le Nord dans la région de Lom-Pangar ;
- le déversement de la chaîne panafricaine au-dessus du craton du Congo ;
- l'identification d'un socle cratonique superficielle plus jeune.

### **III.3.1.2 Carte du gradient vertical**

Elle montre en outre une séparation latérale des anomalies et une amplification de l'effet gravimétrique des contrastes de densité superficiels au détriment des contrastes profonds ou régionaux (figure 37). En effet, l'analyse des cartes prolongées vers le haut a permis d'isoler les anomalies provenant probablement des sources moins profondes, dont les unes fortement positives notamment à Minta, Lembe-Yezoum, Bibey , à l'Ouest de Minta et les autres

fortement négatives comme celles des localités de Pangar, Linté, Ouest de Bélabo. On note également de nouveaux ensembles qui n'apparaissent que sur la carte du dérivé vertical soulignant leur nature superficielle.

Sur cette carte, on remarque que les gradients verticaux d'anomalies ont des amplitudes allant de -1,6 à 1,5 mGal/km soit une amplitude d'environ 3,1mGal/km.

Ainsi :

- Les anomalies de Lembé-Yézoum, Bibey et Gouétou d'un côté et Minta s'individualisent et se caractérisent par un gradient positif qui culmine Jusqu'à 1,5 mGal/km et de direction communes NWW-SEE. Les contrastes bruts d'anomalies gravimétriques, mettent en évidence une zone de gradient qui s'apparenterait à la Zone de cisaillement de la Sanaga (ZCS) (Toteu et al., 2004).
- Les zones au nord de Linté à forte anomalies positives et négatives, de direction WSW-ENE et de forme curviligne sont encadrées de part et d'autre des zones d'anomalie négatives mettant clairement en évidence une zone qui coïncide avec le Cisaillement Centre Camerounais (Ngalamo et al., 2018).
- Les zones de Kong ; Gah et Yoko s'alignent parfaitement sur une ligne de gradient qui serait soit celle des bordures d'une cavité ou alors celle d'un linéament pouvant se matérialiser par une faille. Ces anomalies semblent former un réseau rectiligne et continu de contacts géologiques avec des linéaments qui sont visiblement liés aux structures faillées enfouies dans le sol. Ces anomalies sont probablement liées à des sources superficielles.
- Les anomalies d'extension plus restreintes (les hautes fréquences) qui sont associées à des sources superficielles sont très bien individualisées. La disparition des anomalies de grande longueur d'onde qui caractérisent la carte d'anomalie de Bouguer confirment qu'elles sont liées à des causes profondes.

Il revient donc que Les anomalies gravimétriques liées aux failles, aux contacts lithologiques et structuraux et aux accidents tectoniques sous le panafricain sont bien mises en évidence avec des gradients verticaux plus ou moins élevés.

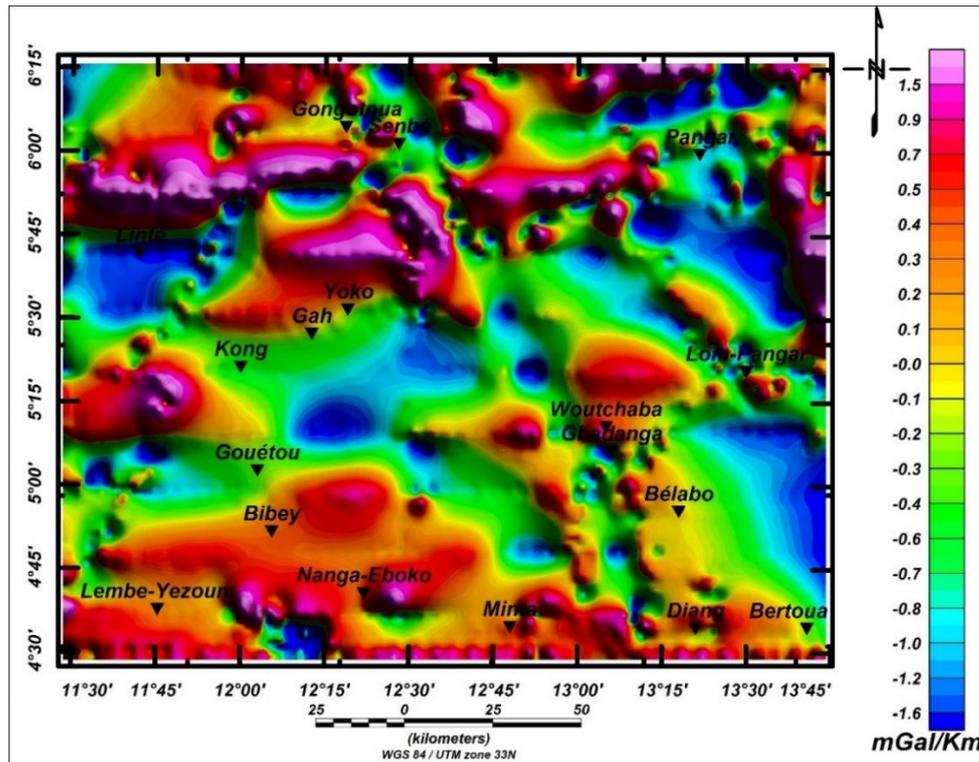


Figure 37: Carte de la dérivée verticale des anomalies de Bouguer

### III.3.1.3 Carte du gradient horizontal

La carte du gradient horizontal de la région d'étude est présentée à la figure 38. Elle met en évidence des zones de gradients horizontaux d'amplitudes et de formes variables, dominées par la direction SWS-NEN à l'échelle de toute la région d'étude. On y distingue aisément les zones de gradients correspondant aux structures de type contact/faille et celles correspondant à la présence de structures intrusives. De ce fait :

- Il est noté que les zones de gradient sont plus visibles et aux contours plus marqués avec une amplitude comprise entre 0 et 1,7mGal/km.
- Au Sud de Gongotou, autour des localités de Gah et de Pangar et passant par Linté, on observe la présence de gradients horizontaux importants ( $\geq 1,7$  mGal/km), dont les contours sont circulaires, et suivant les directions W-E et NEN-SWS. Suivant leurs formes, on les associerait aux failles et contacts géologiques subverticaux.
- À l'Est de Gouéto, au NE de Lom-Pangar, au nord de Linté et à Bertoua où de par leurs formes plus ou moins recourbées, la crête dessine grossièrement un contour arrondi révélant ainsi la présence en subsurface d'une intrusion ignée, d'un dôme gravimétrique d'un diapir.

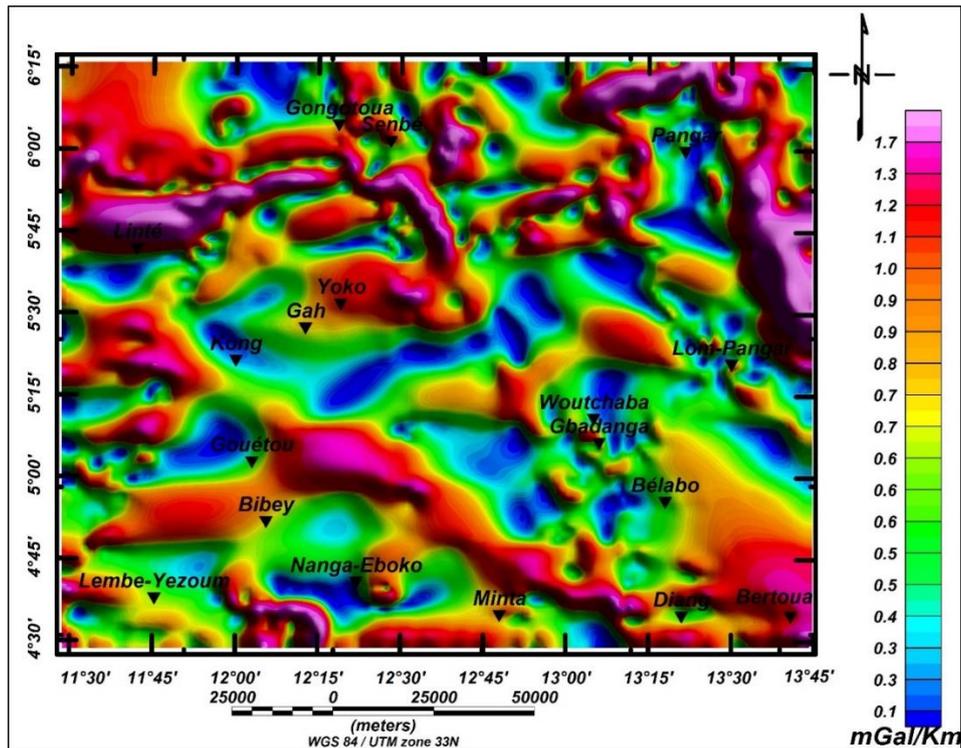


Figure 38: Carte du gradient horizontal des anomalies de Bouguer

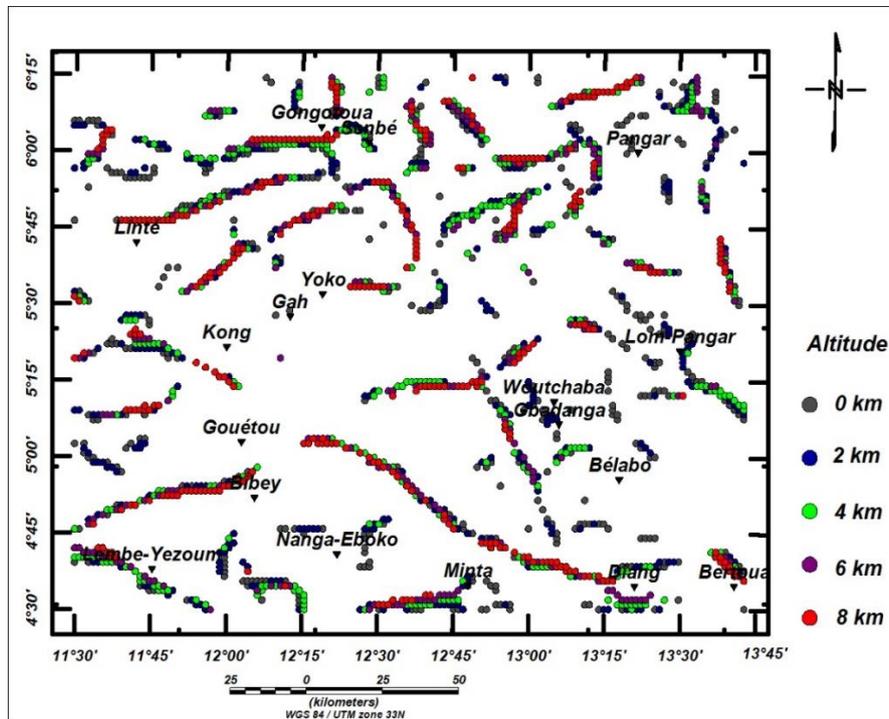
### III.3.2 Analyse multi-échelle des maxima de gradient et cartographie des linéaments

Les cartes d'anomalies prolongées vers le haut à différentes altitudes (figures 33 à 36) et les cartes de la dérivée verticale et horizontale (figure 37 et 38) ont permis de différencier les anomalies liées aux structures régionales (profondes) de celles provenant des structures locales (moins profondes ou superficielles). La carte du gradient horizontal met en évidence les zones présentant des variations de densité abruptes, interprétées soit comme des failles ou des contacts géologiques, soit comme des formations intrusives. L'analyse multi-échelle du gradient horizontal et de la dérivée verticale du gradient horizontal consiste à coupler le gradient horizontal au prolongement vers le haut à différentes altitudes en vue de (1) caractériser l'importance et l'extension latérale des structures sources d'anomalies et (2) de déterminer les sens du pendage des contacts/failles identifiés. En effet, lorsque le contact présente un pendage, les maxima des gradients horizontaux se déplacent du côté du pendage au fur et à mesure qu'on augmente l'altitude du prolongement, mais ces maxima restent pratiquement à l'aplomb des contacts pour des contacts subverticaux.

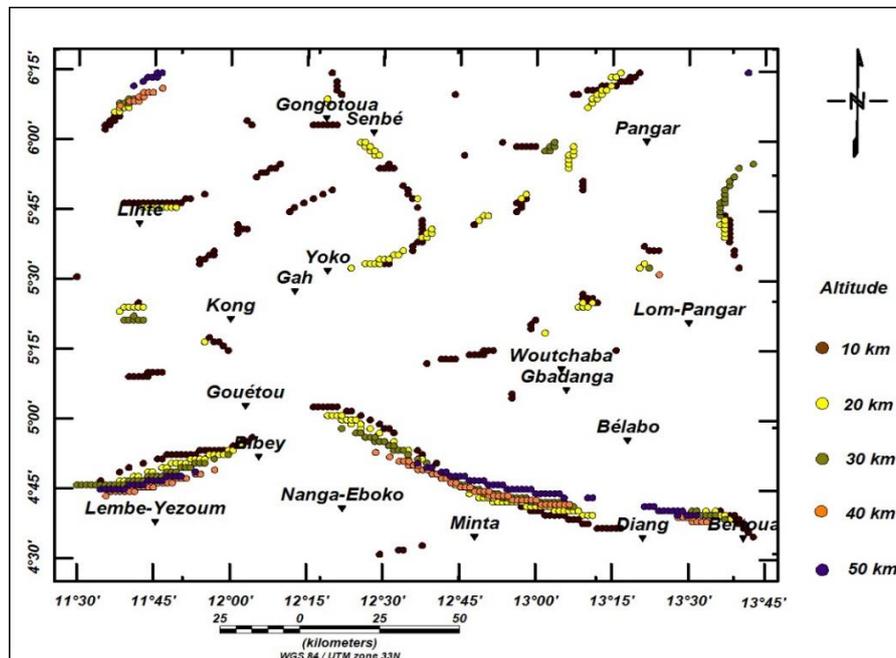
#### III.3.2.1 Analyse multi-échelle de la carte du gradient horizontal

Les figures 39 et 40 ci-dessous sont les cartes de bordure multi-échelles à partir du gradient horizontal de la carte de l'anomalie de Bouguer prolongée vers le haut de aux

altitudes 0km, 2km, 4km, 6km, 8km et à 10km, 20km, 30km, 40km, 50km respectivement pour les figures 39 et 40. L'analyse des cartes multi-échelles ci-dessous permet de dégager de nombreuses caractéristiques géologiques, notamment les linéaments et les cavités.



**Figure 39:** Localisation des maxima du gradient horizontal obtenus sur la carte d'anomalies de Bouguer prolongée vers le haut jusqu'à 8km avec un pas de 2km



**Figure 40:** Localisation des maxima du gradient horizontal obtenus sur la carte d'anomalies de Bouguer prolongée vers le haut jusqu'à 50km avec un pas de 10km

Il ressort à première vue que les maxima des différents niveaux de prolongement se superposent sur la quasi-totalité de la carte, ce qui suppose que la plupart des structures de la zone d'étude sont des structures verticales, lesquelles mettent en évidence (1) des contacts linéaires correspondant à des failles ou (2) des contacts circulaires correspondant aux contours horizontaux des limites de corps intrusifs ou de diapirs. Ainsi, on a pu relever :

- ✓ La superposition d'un alignement de maxima de direction NEE-SWW et NWW-SWW qui délimitent l'anomalie forte du Sud d'une profondeur supérieure à 25km correspondrait aux limites latérales de la remontée de matériaux denses. De même, au Nord-Ouest de la zone d'étude au-dessus de la localité de Linté on enregistre un alignement de failles de direction WSW-ENE dont la profondeur va au-delà de 25km qui s'apparenterait à une partie de la ligne de cisaillement centre du Cameroun (CCC).
- ✓ Une famille d'accidents de direction générale SW-NE, matérialisée par la superposition des maxima le passant à l'Est et à l'Ouest de Pangar mais également celle situé à l'Ouest de Lembé-Yezoum qui s'apparentent tous aux structures linéamentaires. Il en est même pour celles qui passent au Sud de Sembé et dont les directions sont multiples. Ces familles d'accidents pas encore mis en évidence sur la carte géologique de la zone d'étude seraient par leur pendage quasi-vertical, de failles profondes non affleurantes, associées à une extension lithosphérique.
- ✓ Des structures linéamentaires circulaires ou curvilignes aux contours fermés d'après la superposition de maxima renverraient aux cavités. C'est le cas pour celles se trouvant à l'Est de Kong et à Pangar. Ces contacts lithologiques sont assez visibles sur la figure 35 et presque pas sur la figure 36 témoignent du fait qu'on ait à faire aux intrusions de faible densité par rapport à celle de la structure encaissante ou alors au remplissage sédimentaire d'un bassin étroit dont la profondeur ne dépasse pas 5km (spécifiquement pour celle au Sud de Linté).

Cependant, le caractère d'une part assez épars de la disposition des maxima/minima sur les figures 39 et 40 (mauvais alignement) et d'autre part la faible densité des points de distribution des maxima sur la figure 39 ne permettent pas de mettre en évidence de manière aisée les différents contacts crustals ; ceci dû probablement à la complexité géologique de la région de Lom-Pangar dont une partie importante appartiendrait au plateau de l'Adamaoua qui d'après Noutchogwe et al., (2010) est une région de géologie complexe. Il serait donc

imprudent d'attribuer directement le déplacement latéral des maxima du gradient horizontal à l'existence d'un pendage.

### III.3.2.2- Analyse multi-échelle du gradient horizontal du gradient vertical

Les maxima locaux du gradient horizontal de la dérivée verticale du champ gravimétrique à différentes altitudes ont été déterminés dans la zone d'étude. Leur superposition a permis de dresser les cartes des maxima présentées à la figure 41 et 42 ci-dessous respectivement aux altitudes maximales 8km et de 50km.

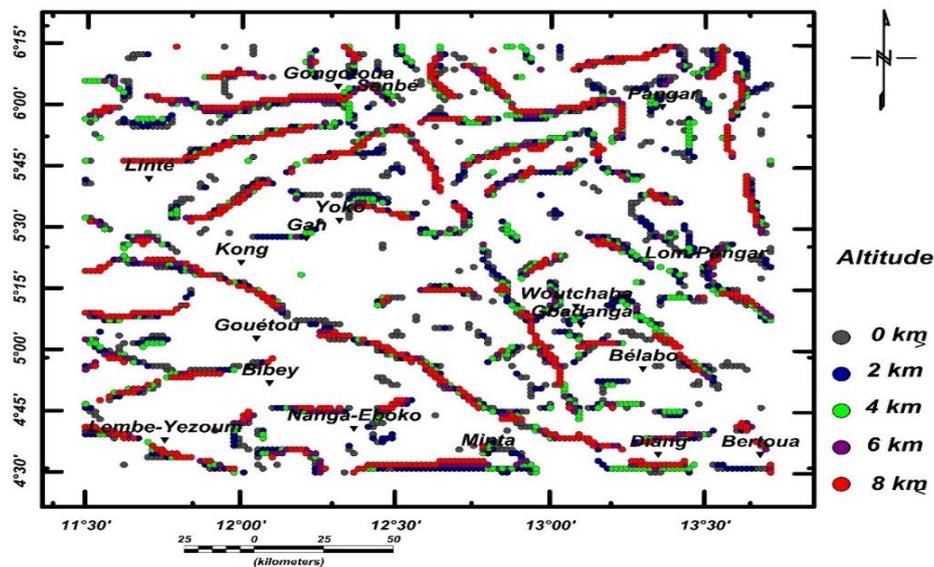


Figure 41: Localisation des maxima du gradient horizontal de la dérivée verticale à différentes altitudes de prolongement vers le haut jusqu'à 8km avec un pas de 2km

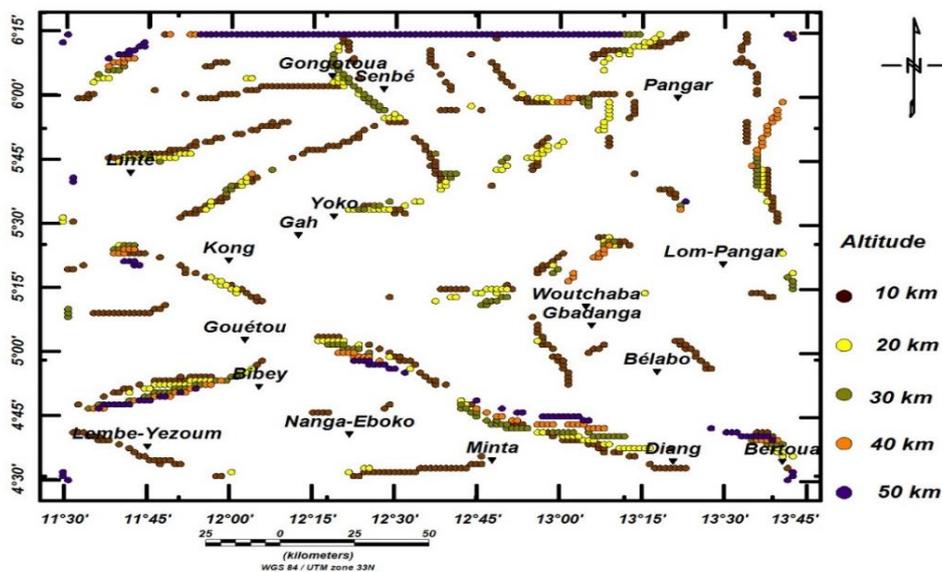


Figure 42: Localisation des maxima du gradient horizontal de la dérivée verticale à différentes altitudes de prolongement vers le haut jusqu'à 50km avec un pas de 10km

Comparativement à la carte des maxima de la dérivée horizontale prolongée à différentes altitudes (figure 39 et 40), la carte des maxima du gradient horizontal du champ dérivé suivant la verticale à différentes altitudes souligne plus nettement les différents traits structuraux présents dans la zone d'étude ; qu'il s'agisse des failles ou des structures intrusives. Du fait que le gradient vertical du champ gravimétrique est moins sensible aux effets d'interférence de sources voisines, ces dernières cartes sont plus appropriées pour déterminer le sens de pendage des différents contacts. Ainsi :

- ❖ On a une distribution des maxima moins épars et plus denses, nettement mieux perceptible au niveau de la figure 41
- ❖ Le sens des pendages y sont beaucoup plus marqués notamment au niveau des cavités de Pangar, Nanga-Eboko et Bélébo.
- ❖ Contrairement à la carte de la figure 40 où l'alignement des maxima correspondant aux structures linéamentaires, la figure 42 quant à elle présente jusqu'à 30km des linéaments clairement perceptibles, rendant compte des contacts/failles à près de 15km.

Les anomalies positives et négatives décrites plus haut et limitées par des gradients assez forts ont été illustrées ci-dessus à travers les cartes de maxima/minima. L'alignement de celles-ci met en évidence les structures linéamentaires qui sont des discontinuités gravimétriques ; elles se matérialisent soit comme des fractures avec ou sans effondrement du socle (c'est le cas pour celles traversant les localités nord de Linté de direction WSW-ENE ou à l'Ouest de Lembé-Yezoum) ou comme des cavités correspondant aux intrusions de corps moins denses (c'est le cas pour les cavités susmentionnées) ou par contre aux remontées de corps plus denses (celle entourée par les localités de Gah, Linté, Gongotoua et Yoko) certainement survenues suite à d'intenses activités tectoniques dont la région aura été sujette. Ces discontinuités intenses vers le sud de direction NWW-SEE et NEE-SWW marqueraient probablement le prolongement des limites du bassin du Lom dont appartiendrait la région de Lom-Pangar. Ces indicateurs renforcent l'hypothèse d'une histoire tectonique commune entre le bassin de Lom et le fossé de la Mbéré (Noutchogwe et *al.*, 2010).

Cependant, pour améliorer l'estimation des solutions de profondeur au socle, afin de ressortir une carte tectonique plus enrichie, la technique de déconvolution d'Euler -3D a été réalisée à partir de la carte d'anomalie de Bouguer densifiée par la méthode neuronale dans le but de trouver la profondeur au socle des linéaments.

### III.3.2.3 La déconvolution d'Euler-3D

La carte de solution de profondeur d'Euler est illustrée à la figure 43. Dans cette étude, différentes combinaisons de SI (0, 0.1, 1, et 2), W (5×5, 8×8, 10 × 10, et 15 × 15), T (5%, 8%, 10%, et 15%) ont été faites dans l'optique de retrouver un bon regroupement. Le meilleur modèle de regroupement est observé pour le contact avec SI = 0,1, W=15, et T=15%. On constate à première vue que la zone d'étude est affectée par un système de failles dont la profondeur serait à plus de 15800 m. L'analyse de cette carte montre que les cercles de regroupement linéaires ou cavités sont suggérés comme étant le résultat de failles et/ou les limites de corps intrusifs. La non-uniformité des profondeurs desdits contacts dans la zone suggère que tous les contours des formations crustales n'ont pas la même origine. Ces solutions évoluent dans les directions principales ENE-WSW et NE-SW. Sur la carte des solutions d'Euler, les limites des corps intrusifs, de failles sont parfaitement distinguées.

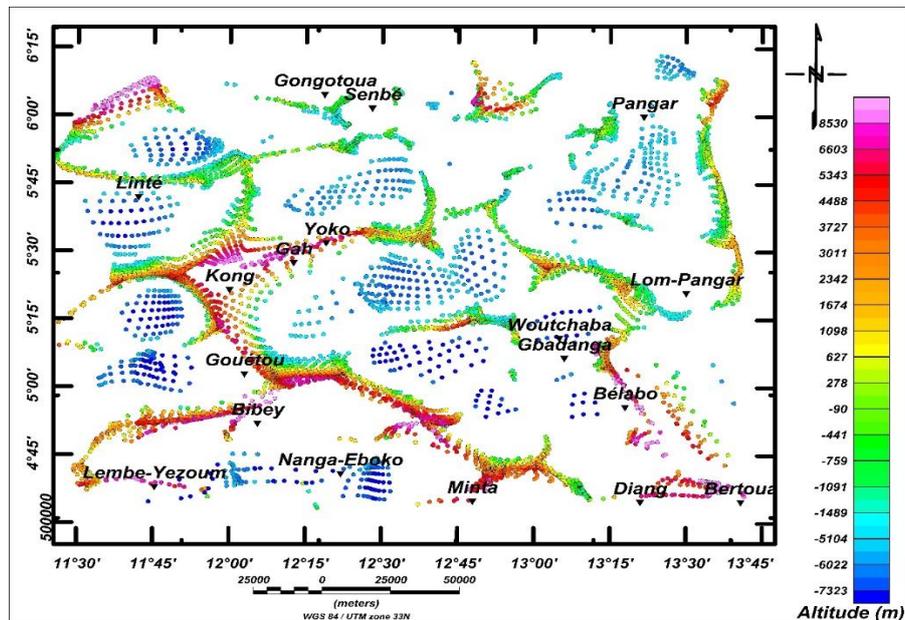


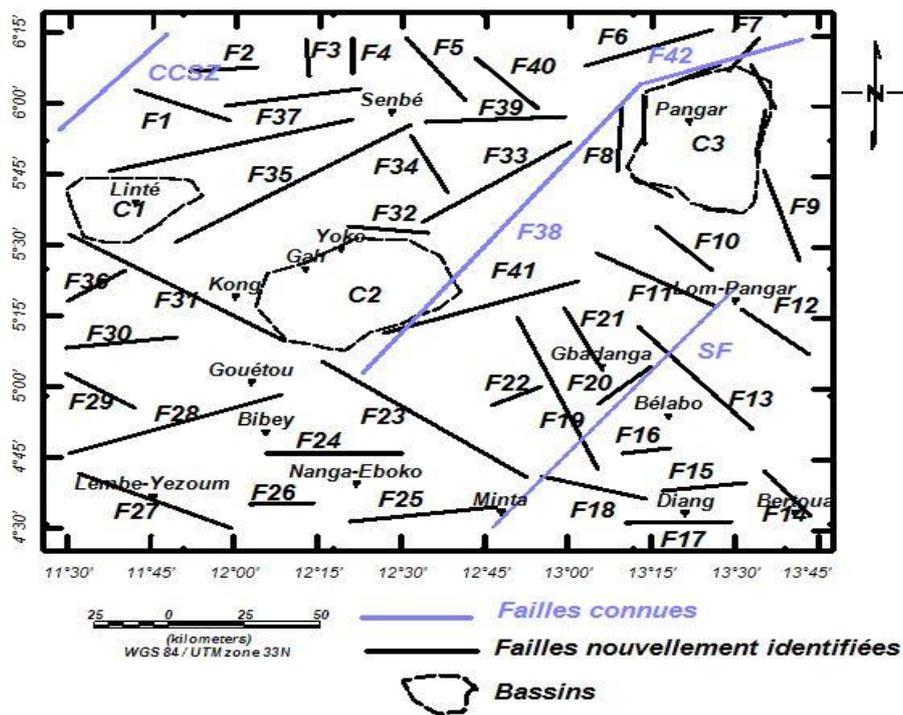
Figure 43: Carte de déconvolution d'Euler avec un indice structural de 0,1

À côté des failles clairement mises en évidence nous avons la superposition et l'alignement des contours circulaires ou curvilignes correspondant aux frontières de corps intrusifs plus denses ou plus légers vis-à-vis de la roche encaissante. Ils sont pour la majorité essentiellement sédimentaire car constitué de conglomérats quartzites schistes sédimentaires et volcano-sédimentaires tous relevant la série du Lom (Nguia et *al.*, 2008). Cette opération permet ainsi de mettre en évidence les formations crustales majeures à travers leurs formes, leurs envergures et leurs profondeurs. Celles-ci corréleront parfaitement aux observations faites précédemment et mises en évidence par la carte des maxima de la dérivée verticale du gradient

horizontal. Mieux encore la déconvolution d'Euler -3D aura permis de détecter de nouvelles structures difficilement identifiables sur la carte des maxima.

### III. 3.3 Carte structurale interprétative

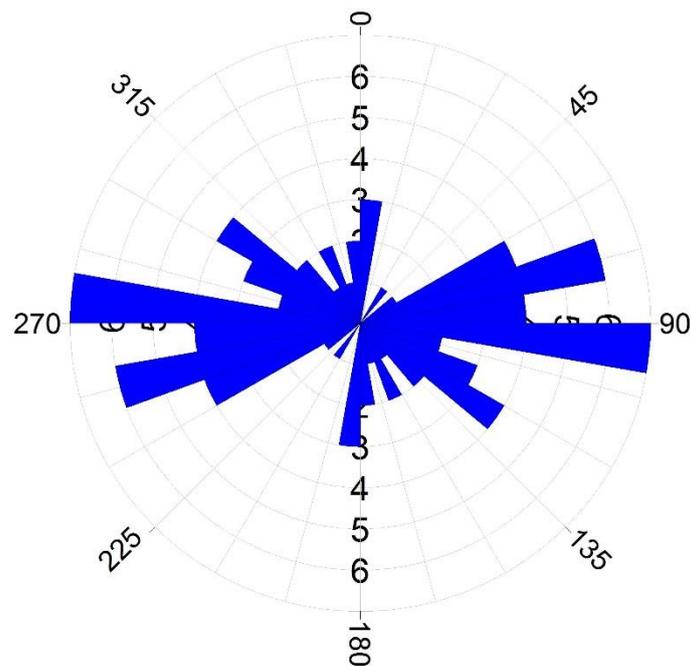
Les cartes des maxima locaux des champs  $g_{DH}$  et  $g_{DHDV}$  calculés à différentes altitudes associées à la déconvolution d'Euler-3D (figures 35 à 39) ont permis de construire une carte structurale synthétique mettant en évidence les accidents (linéaments numérotés L1 à L42) et les contours des formations intrusives dans le substratum correspondantes pour l'essentiel aux cavités ( de C1 à C3), illustrés par la figure 44 . Les directions des linéaments identifiés sont données dans le tableau 6. La rosace des directions (figure 45) met en évidence plusieurs groupes dont les principales directions sont : (1) celles constituées par les directions N0-30°E, correspondant à la direction de la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC) et (2) celles constituées des directions N30-90°E correspondant soit à la direction de l'Adamaoua ou à la zone de cisaillement de la Sanaga (ZCS) .



**Figure 44: Carte structurale interprétative de la zone d'étude, déduite des anomalies Gravimétriques de Bouguer.**

**Tableau 6: Direction des principales failles identifiées par l'analyse multi-échelle des anomalies gravimétriques de Bouguer à partir de la figure 40.**

| Faille | Direction | Faille | Direction | Faille | Direction | Faille | Direction |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| F1     | N 111° E  | F12    | N 128° E  | F23    | N 124° E  | F34    | N 151° E  |
| F2     | N 84° E   | F13    | N 138° E  | F24    | N 89° E   | F35    | N 58° E   |
| F3     | N 176° E  | F14    | N 137° E  | F25    | N 82° E   | F36    | N 53° E   |
| F4     | N 176° E  | F15    | N 84° E   | F26    | N 87° E   | F37    | N 77° E   |
| F5     | N 141° E  | F16    | N 79° E   | F27    | N 112° E  | F38    | N 39° E   |
| F6     | N 72° E   | F17    | N 88° E   | F28    | N 72° E   | F39    | N 89° E   |
| F7     | N 34° E   | F18    | N 105° E  | F29    | N 122° E  | F40    | N 46° E   |
| F8     | N 1° E    | F19    | N 156° E  | F30    | N 83° E   | F41    | N 74° E   |
| F9     | N 18° E   | F20    | N 48° E   | F31    | N 120° E  | F42    | N 72° E   |
| F10    | N 133° E  | F21    | N 151° E  | F32    | N 97° E   | CCSZ   | N 42° E   |
| F11    | N 118° E  | F22    | N 65° E   | F33    | N 58° E   | SSF    | N 41° E   |



**Figure 45: Rosace des directions de fracturation déduites des anomalies gravimétriques**

### III.3.4 Analyses et confrontations

Dans la perspective de mieux cerner la cartographie, l'analyse et l'interprétation géostructurale de la zone d'étude, on procède à une confrontation des résultats des linéaments/failles avec les cartes géologiques et lithostratigraphiques existantes de même qu'avec les données géochimiques de la région.

### **III.3.4.1 Analyses et confrontations au niveau structurale**

On analysera ces structures tectoniques à deux échelles :

#### **a) A l'échelle locale**

L'analyse statistique et l'observation de la carte de linéaments ont également révélé trois grandes familles d'orientation à l'échelle locale (ENE-WSW, WNW-ESE et NE-SW). L'interprétation de ces différentes familles est faite en établissant un lien avec les phénomènes géologiques de la région et c'est ainsi que :

- La direction centrale ENE-WSW, la plus importante dans l'image entière, correspond à une série de cisaillements intenses accompagnés d'une remontée mantellique et une granitisation, représente l'orientation normale des failles à l'Est -Cameroun. Elle se rattache à la direction de subduction de la partie méridionale du craton sous la plaque de l'Adamaoua tout comme d'autres failles importantes du territoire camerounais telles que la faille de la Sanaga, la faille de Fouban etc. Une partie prépondérante des linéaments de cette famille est liée à la tectonique Panafricaine, nous avons associé les linéaments majeurs centraux à la tectonique Eburnéenne.
- Les linéaments de direction WNW-ESE situés à majorité à l'Est et au centre de notre région traduisent la direction subhorizontale de l'extension subie par le magma granitique au cours de sa mise en place une fois que l'ascension du magma a pris fin à l'Archéen.
- Les fabriques magnétiques de notre région sont comparables pour les deux ensembles géologiques à savoir les granites syntectoniques tardifs et anciens. Les linéations ont des directions homogènes dans chaque ensemble, plus remarquable est l'amplitude et l'extension bien élevées des linéaments centraux qui s'orientent ENE-WSW. Ceux-ci se regroupent en un secteur qui, par rapprochement avec les données scientifiques, est interprété comme étant la direction des déformations cisailantes. Dans cet alignement qui se met en place dans une croûte fragile et déjà refroidit, les linéations sont analysées comme étant localisées, orientées selon une direction ENE-WSW. La présence de quelques entrecroisements des directions WNW-ESE et ENE-WSW peut s'expliquer par la réactivation de la zone mobile.

La confrontation avec les données géologiques du terrain permet de relier l'apparition des failles à deux types de phénomènes géologiques :

- Les phénomènes de plutonisme qui incluent le contact entre les schistes-granites sont accentués dans notre région d'étude ;
- Les accidents tectoniques tels que les failles sont beaucoup plus accentués dans le centre et le nord-ouest de notre région.

De ces faits, les linéaments longs corrèlent avec les accidents géologiques tels que les failles de la région.

#### ***b) À échelle régionale***

Sur le plan régional, la zone d'étude est constituée des terrains d'âge Panafricain. L'évolution tecto- métamorphique ici est polyphasée avec deux déformations successives. Les failles dextres ou senestres, localement parallèles à la foliation principale, caractérisent des étapes tardives de l'évolution structurale. Nous avons dénombré environ 42 éléments linéaires formés essentiellement de failles et contacts lithologiques. Ces éléments linéaires sont regroupés en trois grandes familles dans les proportions : ENE-WSW (45%), NE-SW (30%) et WNW-ESE (25%). En examinant ces résultats, on se rend compte de l'influence de l'organisation structurale de la région. Cette région après l'orogénèse archéenne a été l'objet de plusieurs épisodes tectoniques et orogéniques, d'une granitisation et métamorphisme poussés au cours des temps géologiques. Le métamorphisme régional est d'âge panafricain, de basse pression et associé à une tectonique transpressive ; il est associé à une fusion crustale très étendue qui a produit des granitoïdes de type "S" (Soba, 1989 ; Toteu et al., 2001). Ces failles sont orientées chronologiquement NE-SW, WNW-ESE, et ENE-WSW, dont l'âge varie vraisemblablement d'Archéen à Panafricain.

#### ***III.3.4.2 Analyse et Confrontation aux niveaux lithostratigraphiques et miniers***

Les données lithostratigraphiques de la région montrent une grande diversité de formations lithologiques constituées d'alternance de bandes volcano-sédimentaire, plutonique et schisteux d'âge archéen à panafricain (Soba et al., 1991). L'analyse de cette carte de synthèse des linéaments fait ressortir le fait que notre région a une dominance schisto-quartzitique, composée surtout de roches magmatiques (granites). Sur la base des travaux de (Feumoe et al., 2012), nous pouvons associer l'orientation ENE-WSW de la majorité de nos linéaments à celle des structures panafricaines, notre région d'étude appartenant au panafricain.

Les données minières de la région de Lom-Pangar montrent que les potentiels indices miniers seraient de directions approximatives ENE-WSW dans la partie Nord-Est de notre zone

d'étude et associée au gneiss granulitique, au grès et quartzite au schiste sédimentaires et volcano sédimentaires mais également aux sédimentaires détritiques. Au sud au niveau des localités de Nanga-Eboko la composition minéralière est principalement celles des formations ferrifères notamment itabirites et quartzites du groupe Nyong. Au centre, les formations sont dominées par les granitoïdes syn- à tardi-tectoniques et post tectoniques de direction WNW-SES. En fin à l'ouest la région est dominée par le groupe du Dja constitué du grès et quartzites (Toteu et *al.*, 1991).

### III.3.5 Bilan de l'étude linéamentaire

Les trois ensembles caractérisés sur le terrain (NE-SW, WNW-ESE, et ENE-WSW) appartenant tous au domaine du panafricain correspondent bien à trois domaines géologiques d'âge et d'évolution différents à savoir les granites syn-tectoniques à l'Est, la série de Lom au centre et la série métamorphique au nord -ouest. L'orientation ENE-WSW est bien celle qui caractérise la tectonique Panafricaine à l'échelle régionale, elle a été mise en évidence sur les structures de l'Adamaoua par Noutchogwé, (2010) et Feumoé, (2012). C'est aussi la direction des grandes structures Panafricaine du Cameroun à savoir le Cisaillement Centre Camerounais et la faille de la Sanaga, par contre l'orientation WNW-ESE serait due à la mise en place de la nappe Panafricaine. Les grandes lignes tectoniques ainsi cartographiées sont à l'échelle locale liées : (1) Au réseau de failles profondes orienté ENE-WSW qui pourrait se prolonger jusqu'à Bétare-Oya. (2) Aux failles profondes d'effondrement à compartiments abaissés Est orientées WNW-ESE pour les lignes tectoniques de même orientation. A l'échelle régionale, nous pouvons associer l'origine de ces deux principaux ensembles de plissements et lignes tectoniques cassantes à la collision entre la plaque méridionale du Craton du Congo et la plaque septentrionale de l'Adamaoua. L'interprétation des données gravimétriques de notre zone d'étude a révélé la présence de failles. La différence d'orientation de ces failles implique que notre zone d'étude a subi plusieurs évènements tectoniques. Ces informations sur l'orientation des failles superficielles et profondes, et des structures intrusives peuvent permettre entre autres de déterminer le sens de circulation des fluides à l'intérieur de la couverture sédimentaire et la présence de potentiels gisements miniers. Les différentes failles identifiées dans la zone d'étude seraient la réponse d'activités tectoniques dont a connu la région.

Cependant, la carte d'anomalies de Bouguer présente les effets combinés des sources superficielles et profondes du sous-sol, aussi bien à l'intérieur de la croûte terrestre qu'au-delà du Moho. Puisqu'il est question dans cette étude de la variations de densité intracrustales, il faut donc au préalable procéder à la séparation régionale-résiduelle afin d'éliminer de la

Bouguer l'effet des masses qu'on ne veut pas interpréter (localisées au-delà de la profondeur d'investigation). On aura alors d'un côté un champ dû aux phénomènes de grandes longueurs d'onde ayant un caractère régional et une origine lointaine ou profonde, appelé anomalies régionales ; de l'autre un champ associé aux phénomènes de courtes longueurs d'onde ayant un caractère plutôt local et une origine plus superficielle, appelé anomalies résiduelles. Cette séparation permettra de mieux localiser les sources d'anomalies mises en évidence sur la carte de Bouguer.

### **III.4 ANALYSE ET INTERPRETATION DES ANOMALIES RESIDUELLES ET REGIONALES**

La carte des anomalies de Bouguer montre ensemble, les effets des densités profondes et superficielles, étendues et locales. Il arrive donc souvent qu'une structure profonde plus intéressante soit masquée par des structures superficielles moins intéressantes et vice-versa. Pour une interprétation fiable des données gravimétriques, il serait nécessaire de séparer les effets de densités profondes et étendues appelées anomalies régionales, des effets de densités superficielles moins étendues appelées anomalies résiduelles.

Les anomalies régionales sont calculées à partir de celles de Bouguer. Ces dernières étant connues aux nœuds d'une grille régulière issue de l'interpolation, les anomalies régionales sont estimées de façon analytique en calculant les termes d'un polynôme de degré  $n$ . Les anomalies résiduelles en chaque nœud de la grille régulière sont obtenues en faisant la différence entre l'anomalie de Bouguer et l'anomalie régionale. En effet, le choix de la régionale, c'est-à-dire de l'ordre du polynôme représentant la surface analytique recherchée n'est pas arbitraire. De ce choix dépend la nature de la résiduelle à interpréter.

#### **III.4.1 Le choix de la régionale**

Dans les travaux antérieurs menés dans le bassin volcano-sédimentaire du Lom dont appartient la zone d'étude, Nguiya, (2009) effectue le choix de la surface régionale en se référant essentiellement au modèle de structure lithosphérique de type 2D proposé par Poudjom, (1993), ou encore sur la base des hypothèses retenues sur la structure du socle lors de l'analyse de la Bouguer et sur la géologie locale. Le choix d'une telle structure au combien importante reposant uniquement sur une analyse visuelle des attraits géologiques de la zone, n'offre pas toujours de garanties suffisantes pour une étude approfondie à l'instar des modélisations 2D/3D. Il est donc nécessaire de définir un critère de choix de la surface régionale qui

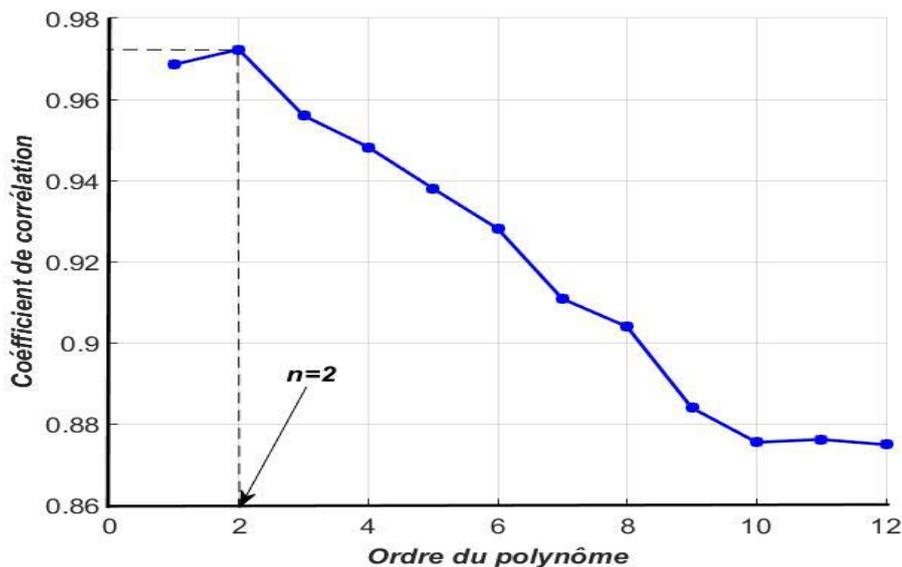
prenne en compte les variations du champ gravimétrique dans toutes les directions à partir des paramètres statistiques satisfaisants auxquels seront associées les identités géologiques.

### III.4.1.1 Détermination du degré $n$ du polynôme

Suivant deux approches basées d'abord sur la détermination du coefficient de corrélation entre la Bouguer prolongé à 35km et les différentes régionales d'ordre 1 à 12 ; puis selon la valeur de la variance entre ces deux champs de données (Bouguer prolongée à 35km et les régionales d'ordre 1 à 12), on validera l'ordre  $n$  retenu pour la séparation régionale-résiduelle la zone d'étude.

#### ❖ Approche suivant le coefficient de Corrélation $R^2$

La détermination de la valeur de l'ordre polynomial  $n$  consiste à calculer les coefficients de corrélation entre la carte de Bouguer prolongée vers le haut à 35 km et les cartes d'anomalies régionales pour différents degrés (ordres). Les résultats sont présentés dans le graphe de la figure 46 ci-dessous. Le pic de la valeur du coefficient de corrélation obtenu correspond à l'ordre retenu. On constate que la carte de Bouguer prolongée vers le haut à l'altitude optimale  $h_0$  possède une corrélation maximale avec la carte d'anomalies régionales d'ordre 2.



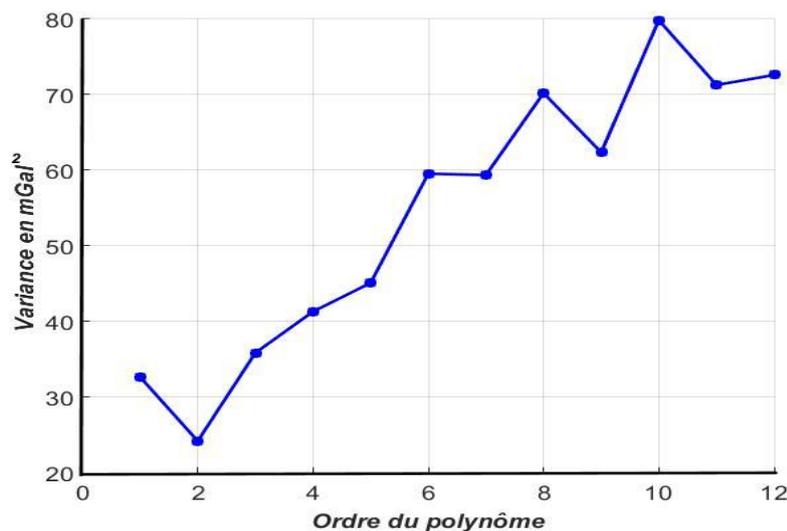
**Figure 46: Facteur de corrélation entre la grille des valeurs de la Bouguer prolongée vers le haut à l'altitude  $h_0$  et celles des cartes d'anomalies régionales, en fonction du degré de la régionale.**

❖ **Approche suivant la valeur de la variance**

Pour choisir la régionale, il suffit de calculer la variance régie par la formule 3.4 entre la grille des N valeurs de la Bouguer prolongée à 35 km (notée g) et celle de la régionale pour différents degrés du polynôme (notée f). La variance étant associée à un estimateur de disparité entre deux champs de données, contrairement à la corrélation, sa valeur sera d'autant plus faible qu'il y aura une grande similitude entre les deux champs analysés. La figure 47 ci-dessous illustre à suffisance la situation.

$$Var = \frac{\sum_{i=1}^N (g_i - f_i)^2}{N} \quad (3.4)$$

Les résultats présentés sur la figure 47 montrent que cet écart est minimum entre la carte du champ prolongé vers le haut à l'altitude  $h_0$  et la régionale de degré  $n=2$  ; corroborant le résultat obtenu en calculant les facteurs de corrélation. Ainsi, la carte d'anomalies régionales de degré 2 a été retenue pour déterminer la résiduelle associée aux structures superficielles.



**Figure 47: Variance entre la grille des valeurs de la Bouguer prolongée vers le haut à l'altitude  $h_0$  et celles des cartes d'anomalies régionales, en fonction du degré de la régionale.**

**III.4.1.2 La profondeur d'investigation**

. Ainsi, le prolongement de la Bouguer à l'altitude  $h_0=35$  km élimine l'effet gravifique des sources se trouvant au-delà de la profondeur  $Z_0= h_0/2$ . Par conséquent, dans la région de Lom-Pangar, la carte d'anomalies gravimétriques résiduelles de degré  $n=2$  mettra essentiellement en évidence l'effet gravifique des structures se trouvant à une profondeur  $n$ 'excédant pas 17,5 km.

### III.4.2 La carte d'anomalies régionales de la région de Lom- Pangar

La carte d'anomalies régionales de degré 2 est présentée à la figure 48 et traduit essentiellement l'effet des sources situées au-delà de 17,5 km de profondeur. Elle est essentiellement constituée d'anomalies de grandes longueurs d'onde, avec trois directions générales selon les régions de la zone d'étude. Au Nord-Est de la région nous avons une anomalie négative de direction majeure NNW-SSE avec des valeurs comprises entre -55 et -106 mGal rendant compte d'une structure crustale enfouie au-dedans de la croûte terrestre de très faible densité par rapport à la couche encaissante. Au sud de la zone d'étude, nous avons des anomalies très positives dont l'amplitude diminue progressivement du Sud vers le nord. Entre les deux domaines d'anomalies plus haut nous avons une zone de gradient horizontal de direction WNW-EES qui traverse l'ensemble de la région d'Ouest à l'Est autour des latitudes  $4^{\circ}45'N$  à  $6^{\circ}00'N$  où l'anomalie régionale observée correspond à la moyenne dans la région qui vaut -78 mGal. Lorsqu'on compare les longueurs d'onde observées sur cette régionale au contenu spectral de carte d'anomalies de Bouguer prolongée vers le haut à différentes altitudes, on constate que les longueurs d'onde mises en évidence sur la carte régionale de degré 2 sont analogues à celles observées sur les cartes prolongées à l'altitude 35km. En considérant qu'un prolongement à une altitude  $h$  ne laisse subsister que les effets des structures situées à des profondeurs supérieures à  $h/2$  (Jacobsen, 1987), on peut conclure que la carte régionale du secteur d'étude est largement dominée par l'effet des structures situées au niveau de la croûte supérieure terrestre dont la profondeur n'excéderait pas 18 km. La géologie de la région d'étude est caractérisée par un bassin volcano-sédimentaire, et aussi par l'existence en profondeur dans le socle de la région d'une tectonique responsable de la mise en place de grabens.

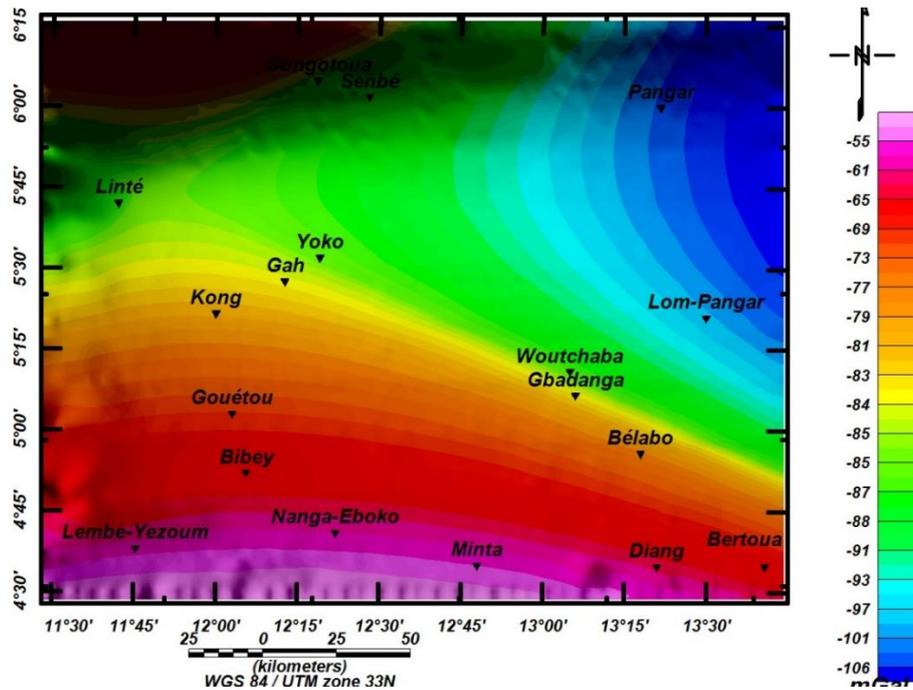


Figure 48: Carte d'anomalies régionales de degré 3 de la zone d'étude

### III.4.3 La carte d'anomalies résiduelles de la région de Lom- Pangar

Rappelons que la carte d'anomalies résiduelles de degré 2 présentée à la figure 49 traduit essentiellement l'effet des sources situées au-dessus de la profondeur  $Z_0 = 17,5$  km. Cette carte présente des anomalies positives et négatives bien individualisées, comprises entre -15 et +12 mGal. L'analyse est basée sur l'identification des différentes signatures gravimétriques présentes sur la carte et leur corrélation avec la géologie. La carte d'anomalies résiduelles choisie met en évidence les anomalies liées aux structures crustales plus superficielles que la plupart de celles observées sur la carte de Bouguer. Tout comme la Bouguer, cette carte présente des secteurs d'anomalies positives et des secteurs d'anomalies négatives. On distingue ainsi :

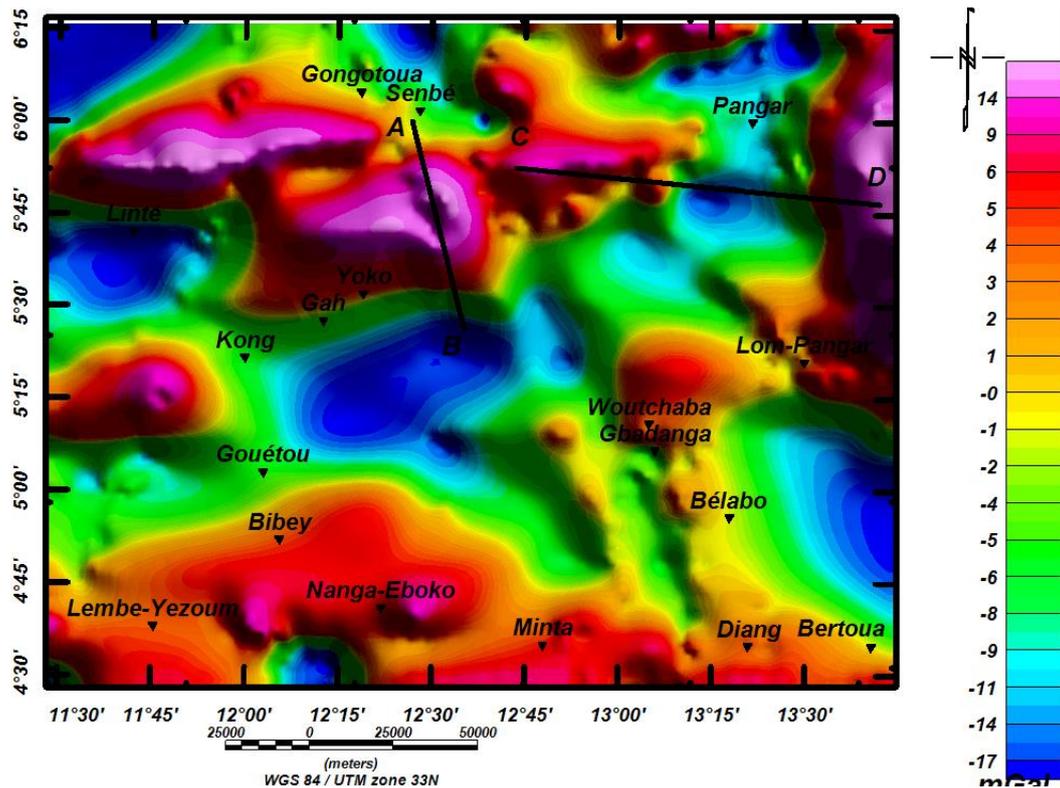
#### III.4.3.1 Les secteurs d'anomalies positives

On observe des anomalies positives au Nord de Yoko et de Linté (anomalie supérieur à 15 mGal), ainsi qu'à l'Est de Pangar. Au Sud de la carte (les localités de Bibey, Lembé-Yezoum, Nanga-Eboko, Minta Lom-Pangar aux anomalies moins fortes que les précédentes (10 mGal). Leurs formes varient de circulaires à elliptiques ; ces formes permettent de les associer à des structures bidimensionnelles. Ces anomalies aux formes diverses seraient d'une part le résultat d'un relèvement du socle panafricain, responsable des anomalies

gravimétriques positives notées dans le Sud de la zone d'étude (Tadjou, 2004 ; Nguiya, 2009); ou alors d'origine mantellique, elle caractériserait un soulèvement de la base panafricaine dans cette partie de la zone et marquerait la transition et la limite entre le craton du Congo et la chaîne panafricaine de l'Afrique centrale (Enyegue et al., 2020). Les anomalies positives du nord sont causées par une intrusion de matériaux dense associés aux gneiss (Noutchogwe et al., 2006).

#### ***III.4.3.2 Les secteurs d'anomalies négatives***

Les anomalies négatives observées sur cette carte sont de même forme que les anomalies positives observées précédemment. On les retrouve au sud de Linté, Yoko, de Lom-Pangar, à Pangar à l'extrême NW de la région d'étude. Ces anomalies sont toutes bordées de part et d'autre par des gradients assez forts qui les rattachent aux anomalies positives citées plus haut. Ces gradients, couplés aux faibles valeurs de ces anomalies par rapport à leurs environnements, permettent de les interpréter comme des synformes (graben). L'anomalie de Pangar est située au-dessus du fossé de Mbéré, et interprétée comme la partie la plus profonde de ce fossé (Kandé et al., 2006). On observe également que le bassin de Lom appartient à un vaste panneau d'anomalies négatives. Ce vaste panneau a une direction qui varie de NWSE à NE-SW, et s'étend du sud de Linté à Pangar en passant par Kong. Ce panneau correspond à un couloir tectonique ; ce qui suggère que le bassin de Lom et le fossé de la Mbéré auraient une même histoire tectonique (Nguia, 2009). La disposition des secteurs d'anomalies négatives sur ce couloir en forme d'arc de cercle suggère une tectonique compressive dominée par des forces provenant du Nord. L'anomalie à l'extrême NW de la zone correspondrait à l'extension ouest du bassin de Lom. Ces anomalies négatives pourraient être justifiées par l'effondrement du socle ou une légère intrusion dans la croûte (Enyegue et al., 2020).



**Figure 49: Carte d'anomalie résiduelle de degré 2 de la zone d'étude présentant les profils AB et CD**

### III.4.3.3 Les zones de gradient

Les anomalies positives et négatives décrites ci-dessus sont limitées par des gradients assez forts. Du nord de Linté et rejoignant Sembé, délimitant l'anomalie positive jusqu'à Yoko ; celle passant au Sud par Bertoua, Diang et sud de Gouétou , on observe entre les minima et les maxima d'anomalies deux zones à forts gradients. Ces gradients sont des discontinuités gravimétriques, qui matérialisent des fractures avec effondrement du socle. Ces gradients moins intenses vers le sud marqueraient probablement les prolongements des limites du bassin (Nguiya, 2009). Cet indicateur renforce l'hypothèse d'une histoire tectonique commune entre le bassin de Lom et le fossé de la Mbéré. Ces zones qui marquent les variations brutales des valeurs d'anomalies caractérisant des accidents ou des intrusions tectoniques allant de la faible profondeur à la grande profondeur. Cet indicateur renforce l'hypothèse d'une histoire tectonique commune entre le bassin de Lom et le fossé de la Mbéré un peu plus au nord.

L'analyse des cartes gravimétriques de la Bouguer prolongées, de la cartographie des linéaments/failles a permis, à partir des connaissances géologiques sur la région, de définir les éléments structuraux, d'identifier les différentes unités géologiques et de donner une description simplifiée de la tectonique de la région. Les cartes d'anomalies issues de la

séparation régionales-résiduelles des anomalies de Bouguer ont permis d'une part d'individualiser les anomalies de grande longueur d'onde, mettant ainsi en évidence des structures profondes ; d'autre part ont mis en évidence des structures superficielles. L'analyse de ces dernières ont permis de cerner les secteurs d'anomalies positives négatives et les zones de gradient. Les anomalies positives du sud ont été caractérisées comme étant associées à une remontée de matériaux lourds; les anomalies positives observées au nord par contre associées aux intrusions de matériaux denses (Nord de Linté, est et ouest de Pangar) . Cette analyse a également permis de mettre en évidence la signature gravimétrique du bassin de Lom-Pangar caractérisé par trois secteurs d'anomalies négatives situés dans un même couloir tectonique de direction variable. Les anomalies positives et négatives séparées par des zones de gradients assez forts. Ces gradients qui sont des discontinuités gravimétriques, marquent la transition entre deux formations de densité différentes ; elles dénotent des structures tectoniques superficielles ou profondes. La présence des anomalies positives, négatives et des zones de gradient sur toutes les cartes résiduelles permet de déduire que les unités géologiques responsables sont d'origine profonde et remontent jusqu'en surface. Une approche de modélisation apportera certainement des éclairages à la connaissance de la région. L'interprétation des anomalies consiste à proposer un modèle théorique, à calculer son effet et à comparer cet effet à celui mesuré. Dans le cas où on disposerait d'informations précises sur la nature et la densité des corps perturbateurs, la modélisation des structures est réalisée en recherchant les corps bidimensionnels ou les corps tridimensionnels qui rendent compte aux mieux de l'anomalie observée.

### **III.5 MODELISATION 2.5D**

L'étude comparée des cartes précédentes avec la carte géologique a montré que les sources à l'origine des anomalies décrites se situent plus ou moins à l'intérieur de la croûte terrestre. Les caractéristiques réelles de ces sources sont inconnues, pourtant il est nécessaire d'avoir quelques idées à priori pour réduire l'indétermination lors de la modélisation. Il sera question ici de présenter les résultats d'une interprétation directe des anomalies par une modélisation 2.5D; cette interprétation consiste à obtenir des modèles du sous-sol comportant différentes couches de terrains avec leurs épaisseurs, et à déterminer la géométrie des surfaces de contact entre terrains différents ainsi que celle des accidents éventuels. Pour réduire l'indétermination liée à la non unicité des modèles, l'analyse spectrale a été utilisée pour fixer les profondeurs des anomalies étudiées. Les informations

obtenues ont été utilisées pour proposer des modèles réalistes du sous-sol le long de profils choisis sur la carte résiduelle comme traversant l'ensemble des unités géologiques et tectoniques de la région de Lom-Pangar.

### III.5.1 Choix du profil

Les profils choisis traversent chacune des principales zones d'anomalies (négatives, positives et de gradient) mais également de structures tectoniques majeures (failles) parcourant la région. L'orientation est choisie perpendiculairement à la principale direction des anomalies, contact et direction linéamentaires de la région d'étude. Un profil gravimétrique est interprété sous la forme d'une superposition de terrains caractérisés chacun par sa densité et son épaisseur. L'ensemble des formations pour un profil constitue le modèle de structure du sous-sol correspondant. Lorsque le rapprochement est fait avec la géologie et que l'on assimile chaque terrain à une formation géologique, on obtient alors une coupe lithologique du profil. Celle-ci montre la distribution de terrains le long du profil considéré. L'interprétation d'un profil ne conduit pas à une solution unique et l'interprétation 2D est rarement univoque ; la confrontation des modèles gravimétriques avec la géologie est donc indispensable pour déterminer un modèle réaliste.

### III.5.2 Application aux profils de la résiduelle d'ordre 2

Ici nous modéliserons à l'échelle de la région d'étude deux profils dont le premier caractérisant un dôme gravimétrique (celui caractérisant l'intrusion au centre de la zone d'étude) et un deuxième caractérisant la basin de Pangar encadré de part et d'autre par des anomalies positives pouvant être associés aux intrusions.

#### III.5.2.1 Estimation des profondeurs des structures sources (analyse spectrale)

Le spectre de puissance calculé suivant le profil (AB) traverse l'anomalie forte (positive) orientée NNW-SSE (figure 50). A la lumière du résultat obtenu, ce spectre montre trois interfaces majeures : La première dans les basses fréquences, correspond à limite inférieure d'une formation dont la limite de son toit serait  $h_1=(8,87\pm 0,07)\text{Km}$  ; la seconde dans les moyennes fréquences pour une hauteur du toit de structure  $h_2=(2,96\pm 0,05)\text{Km}$  puis enfin hautes fréquences correspondantes aux structures superficielles  $h_3=(1,24\pm 0,27)\text{Km}$ .

Le spectre de puissance est calculé suivant le profil CD (figure 51) qui parcourt les localités sud de Pangar jusqu'au sud de Sembé traversant les zones d'anomalies lourdes, légères

séparées par les zones de gradient et qui rencontrent également des lignes de failles tectoniques clairement différenciées plus haut sur la figure 3. A la lumière d'un premier constat, le spectre montre quatre interfaces majeures, la première dans les basses fréquences, est  $h_1=(13,50\pm 0,23)\text{Km}$ , la seconde et la troisième dans les moyennes fréquences dont les hauteurs des toits sont à  $h_2=(7,10\pm 0,10)\text{Km}$  et à  $h_3=(3,08\pm 0,25)\text{Km}$  et la dernière dans les hautes fréquences, soit  $h_4=(1,56\pm 0,03)\text{Km}$ .

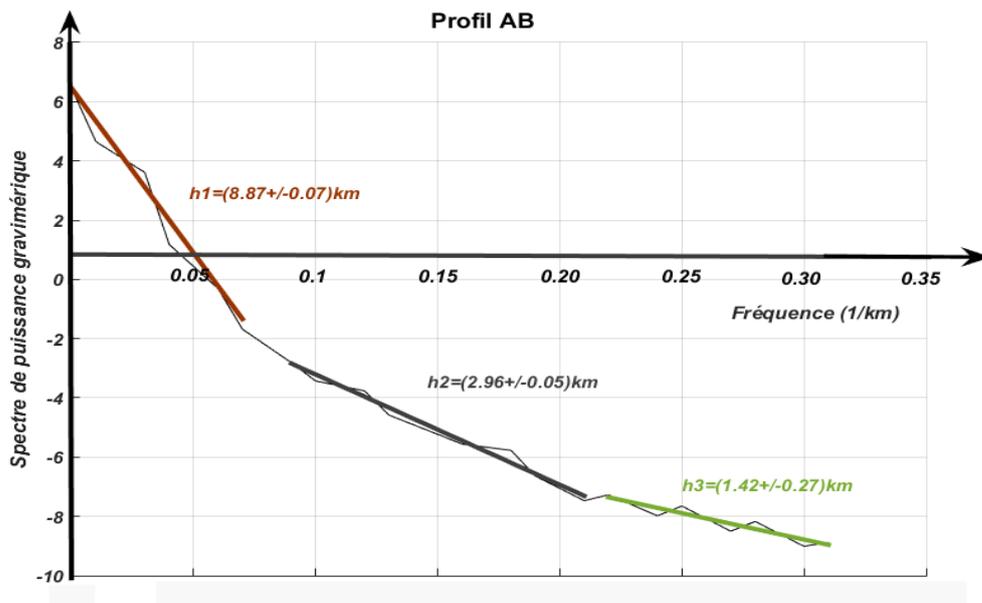


Figure 50: Spectre de puissance caractérisant les anomalies au sud de Sembé

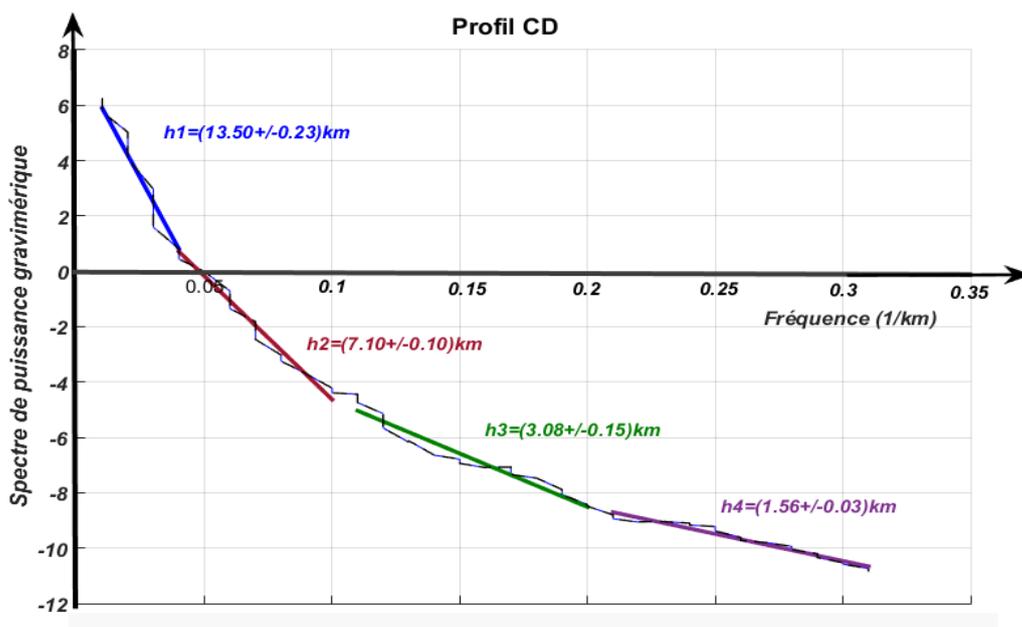
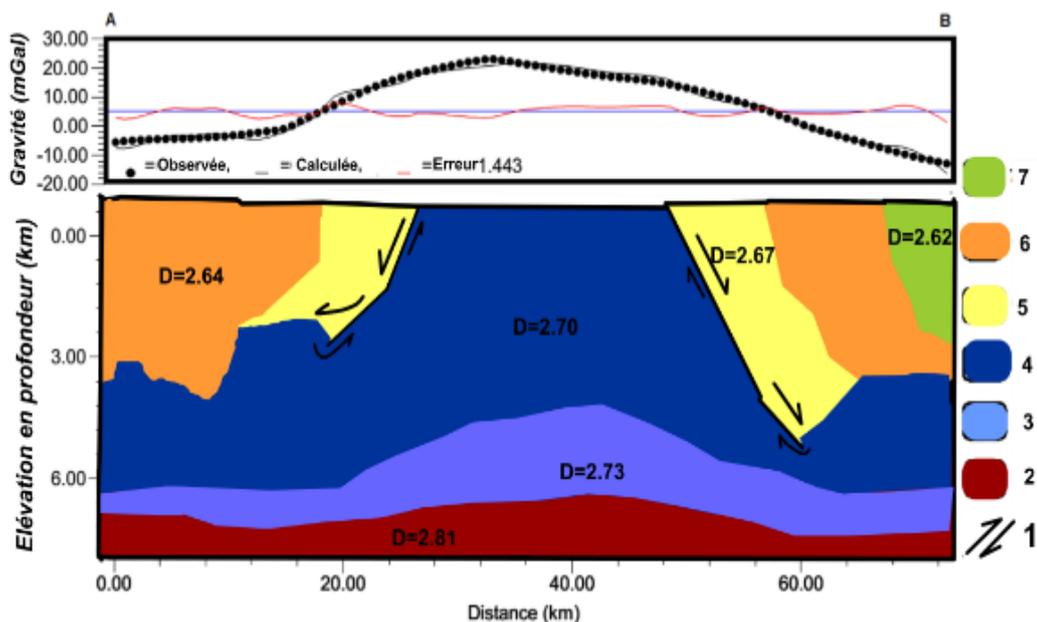


Figure 51: Spectre de puissance caractérisant les anomalies traversant le bassin de Pangar

### III.5.2.2 Modélisation des structures présentes sur la carte d'anomalies résiduelles

#### a) Cas de l'anomalie entre Sembé et Yoko

La figure 52 représente un modèle géophysique de sous-sol au Sud de la localité de Sembé calculé selon le profil (AB). Il s'étend sur près de 73 km de direction NNW–SSE. La courbe d'anomalie observée suivant le profil (AB) est celle d'un dôme gravimétrique avec un maximum qui culmine à 20mGal dans sa partie centrale et des minimums aux extrémités NNW et SSE d'une valeur dépassant -10mGal. L'interprétation géophysiques et géologiques de cette modélisation montre un bon ajustement entre les anomalies observées et calculées avec une erreur de 1,443. Ce modèle présente une coupe lithologique contenant six formations de densités comprises entre 2,62 et 2,81g/cm<sup>3</sup>; un socle débutant à près de 8,87km. Il est traversé par les structures allant des formations granitoïdes post-tectoniques caractéristiques des schistes et micaschistes en proche surface, aux structures plus denses en profondeur caractéristique des formations granitoïdes pré à syn-tectoniques. On note également l'intrusion d'une formation dense en proche surface (le gneiss granulitique), encadrée par un jeu de failles inverses survenue probablement suite à une activité tectonique, mise en place après une remonté des matériaux plus denses; témoignant ainsi de la forte activité tectonique survenue dans la zone. La structure prépondérante ici est granito-gneissique.



1 : Failles ; 2 : Granitoïdes pré à syn-tectoniques ; 3 : migmatites ; 4 : Gneiss granulitique ; 5:Granitoïdes syn à tardi-tectoniques 6 : Schiste granitique ; 7 : granitoïde post-tectonique ;

**Figure 52: Modélisation de l'anomalie positive caractérisant le dôme gravimétrique au sud de Sembé.**

Les trois dernières formations ((5), (6) et (7)), respectivement granitoïdes syn à tardi-tectoniques, Schiste granitique et granitoïde post-tectonique sont affleurantes, pour une extension latérale à près de 5km. Considérant la fourchette des valeurs moyennes des densités des roches données par la littérature scientifique et en tenant compte du contexte géologique de la zone d'étude (Figure 3) ces trois couches lithologiques pourraient s'associer aux formations du granite. Localisées aux extrémités gauche et droite du profil, ces formations sont intercalées par le gneiss granulitique ; elle se présente sous forme de pluton d'origine assez profonde mise en place probablement suite à une tectonique caractérisée par une remontée du socle facilité par le système de failles inverses ayant affecté la région du bassin du Lom. Cette intrusion est interprétées comme le soulèvement du socle dans la région lors de l'orogénèse panafricaine (Eno Belinga, 1984 ; Owono et al., 2019).

Les migmatites sont adjacents à au gneiss et s'étendent sur toute la longueur du profil pour une extension verticale de près de deux km au milieu en milieu de profil. Le dôme gravimétrique enregistré à ce niveau serait dû aux effets conjugués des formations (3) et (4). La dernière formation domine toute la partie sud du modèle. Comme la formation précédente, elle se présente sous la forme de pluton venant des grandes profondeurs. Ce corps a été attribué au Granitoïde pré à syn-tectonique de densité moyenne  $2,81\text{g/cm}^3$ .

#### ***b) Cas du profil au Sud de Pangar***

Le profil (CD) s'étend sur près de 100 km selon la direction NWW–SEE. Il traverse en surface quatre formations géologiques : granitoïde post-tectonique; Gneiss granulitiques ; Granitoïdes syn à tardi-tectoniques, et les sédiments détritiques ; ainsi qu'une série de failles inverses ayant favorisées la formation du bassin (Figure 51). Les anomalies les plus faibles sont localisées au centre du profil avec une intensité de  $-18\text{mGal}$ , correspondant aux dépôts sédimentaires ( $d=2,30\text{ g/cm}^3$ ) tandis que les plus fortes se situent aux extrémités gauche et droite du profil avec une valeur maximale atteignant  $+50\text{mGal}$ , certainement sous l'effet d'une remontée des formations denses depuis croute inférieure ( $d= 2,81\text{ g/cm}^3$ ). Ce modèle présente une coupe lithologique contenant six formations de densités comprises entre  $2,30$  et  $2,81\text{g/cm}^3$ ; un socle débutant à près de  $13,50\text{km}$  conformément aux conclusions révélées par analyse spectrale. Il est traversé par les structures allant des formations sédimentaires en proche surface, aux structures plus denses en profondeur caractéristique des formations granitoïdes pré à syn-tectoniques.

La deuxième formation est celle sur laquelle repose le modèle (Granitoïdes pré à syn-tectoniques) d'une densité plus forte égale à  $2,81 \text{ g/cm}^3$ . Elle se présente sous la forme d'un pluton car sa racine se trouve au-delà de la profondeur d'investigation qui est de 17,5 km. Traversée par les migmatites d'origine également profonde, cette formation constitue le substratum de l'ensemble des formations de la région. Ce substratum est constitué essentiellement de granito-gneiss. La non horizontalité du toit de ce socle dénote la présence d'une tectonique de fond importante. Il dénote également une poussée verticale venant des profondeurs, et plus intense dans à l'extrémité SEE du profil.

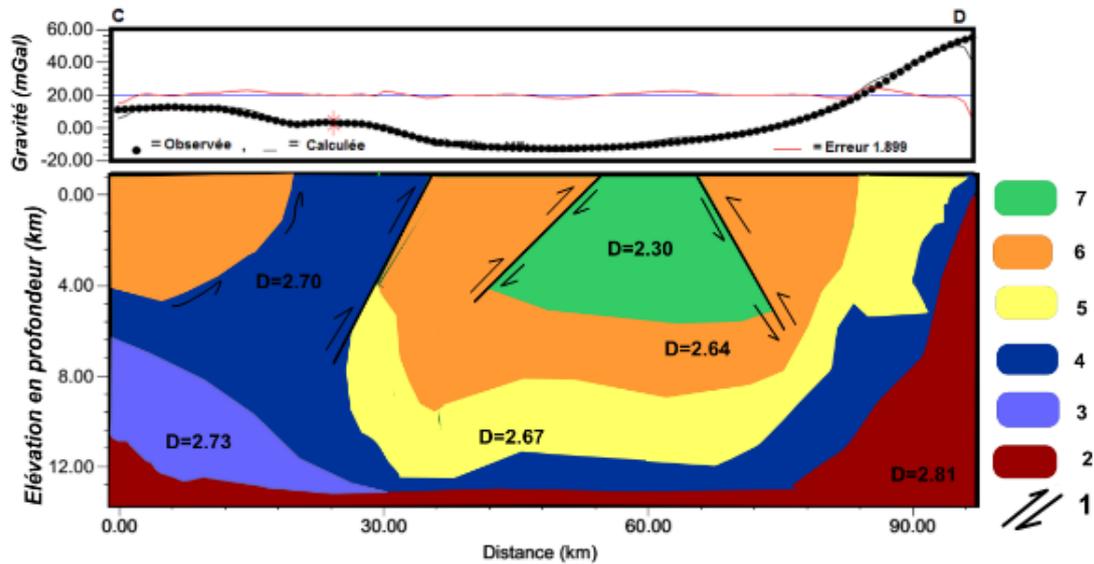
La troisième formation associée aux migmatites, est le corps précédent le tout dernier. Il limite essentiellement le profil dans sa partie ouest. Son enracinement est très important (à plus de 13km) et d'une densité suffisamment forte ( $d=2,73 \text{ g/cm}^3$ ) prouve que celle-ci aurait une origine profonde. Cette formation prend naissance au SW de Pangar et se poursuit vers le centre de la zone d'étude, car elle est présente tout le long de la base du profil (AB) modélisé précédemment.

La quatrième formation correspond au gneiss granulitique d'une densité de  $2,70 \text{ g/cm}^3$  elle est présente sur l'ensemble des compartiments du modèle probablement à cause d'une activité tectonique dont aurait été témoin la région. Sous-jacente en milieu de profil, elle est par contre affleurante dès le deuxième quart du côté gauche du profil. Limitée de part et d'autre par des formations moins denses, sa mise en place sous forme d'intrusion est facilitée par un système de failles dont l'une décrochante est clairement identifiable sur la carte géologique (figure 3). Cette formation est également visible sur le modèle (AB) où son affleurement serait responsable du dôme gravimétrique enregistré.

Les cinquièmes et sixièmes formations, Correspondent au Granitoïdes syn à tardi-tectoniques de densité  $2,67 \text{ g/cm}^3$  et schiste granitique de densité  $2,64 \text{ g/cm}^3$  respectivement d'épaisseur variable. La sixième formation revient également à l'extrême gauche du profil détaché des précédentes formations suite à une intrusion facilitée par une activité tectonique survenue dans la région et illustrée sur la figure 53 par les deux séries de failles majeures accompagnées des déplacements de blocs situés de part et d'autre de celui-ci.

La septième formation est constituée de sédiments détritiques de densité faible ( $d=2,30 \text{ g/cm}^3$ ). Cette formation se loge dans un bassin en forme de graben, de profondeur et d'extension latérale estimées à 5.5 km et 30 km dans sa base respectivement. Cette formation serait principalement responsable de la zone d'anomalie négative observée au SW de Pangar. Les bordures du bassin limitées par un système de failles inverses indiquent une tectonique ayant

joué en faveur de sa mise en place. Elle a été attribuée aux métasédiments de la série du Lom.



1 : Failles ; 2 : Granitoïdes pré à syn-tectoniques ; 3 : migmatites ; 4 : Gneiss granulitique ; 5:Granitoïdes syn à tardi-tectoniques 6 : Schiste granulitique ; 7 : Métasédiments ;

**Figure 53: Modélisation du bassin à l'ouest de Pangar.**

Le modèle de ce profil est conforme aux études antérieures (géologies, et géophysiques). On note des intrusions issues de l'orogénèse panafricaine (Poidevin, 1985 ; Gazel et Gérard, 1954 ; Ngako et al., 2003 Toteu et al., 2008 ; Nguiya, 2009 ; Koch et al., 2012 ; Owono et al., 2019), présentes sur géologique (Figure 3).

Les résultats obtenus par modélisation des structures superficielles du sous-sol de la région de Lom-Pangar démontrent que les structures étudiées sont complexes. Les modèles obtenus permettent de donner une image assez représentative du sous-sol de ladite région. La similitude enregistrée au niveau de l'identité des couches lithologiques au niveau des deux modélisations montre en ce qui concerne les deux dernières formations (granitoïdes pré à syn-tectoniques, migmatites) qu'on a à faire à une extension des formations de l'Est vers le centre de la zone et mise en place sous forme d'intrusion. L'interprétation de ces modèles aboutit à la conclusions d'un affaissement du socle, facilité par un système de failles inverses et profondes limitant le bassin au SW de Pangar. Ces failles auraient également favorisé non seulement la mise en place des plutons enracinés dans la région, mais aussi le chevauchement des formations du Nord sur celles du Sud. Le toit du socle constituant la profondeur maximale du bassin à 13,5 km. Les différents déplacements de mouvements de blocs précisément au niveau de la modélisation du profil CD sont révélatrices d'une tectonique de fond ayant affecté

l'ensemble de la région. Les résultats obtenus et observations faites sont semblables à ceux obtenus suivant d'autres méthodes dans la région et ses environs.

### **III.6. DISCUSSION**

La contribution de la méthode neuronale à l'investigation géophysique au Cameroun a été rendue possible à travers le choix très justifié d'une zone cible (la région de Lom-Pangar : Centre-Est Cameroun) où partant d'une zone disposant d'une couverture gravimétrique très médiocre ; Nous l'avons densifié puis effectué sur la nouvelle grille de données des traitements et analyses géophysiques. Le travail mené dans cette section consiste donc à valider la conformité des résultats obtenus avec ceux obtenus à partir d'autres méthodes de traitement géophysique afin de dégager la pertinence de la méthode neuronale en gravimétrie à travers la plus-value que celle-ci apporte. A partir d'un examen critique des résultats obtenus présentés, il sera dégagé les résultats essentiels de ce travail.

La validité des résultats obtenus au cours de l'interprétation gravimétrique est tributaire, d'une part, de la technique utilisée pour le traitement des données, et d'autre part, des contraintes imposées dans le choix des paramètres physiques intervenant dans l'élaboration des modèles.

#### **III.6.1 L'architecture du réseau neuronal**

Le réseau de neurones généré et validé ci-dessus, appliqué à la zone de Lom-Pangar, aura permis d'accroître la couverture gravimétrique de la région de Lom-Pangar ; en la rendant d'une part moins éparse en qualité de couverture, d'autre part plus dense. Ainsi, sur une surface d'environ 47400km<sup>2</sup> avec initialement 466 points de mesures, on a obtenu après interpolation des données in-situ par la méthode neuronale, 960 points de données estimées avec une corrélation de plus de 98 %. En comparant les deux cartes de Bouguer, non seulement les anomalies préexistantes ont été régénérées, mieux encore, les zones interpolées ressortent des identités géologiques et tectoniques identifiables sur les cartes géologiques et tectoniques. C'est le cas par exemple de la ligne de cisaillement centre camerounais (CCC) au NW de la zone d'étude.

#### **III.6.2 Profondeur d'investigation**

La profondeur d'investigation a été déterminée par l'altitude optimale  $h_0$  du prolongement vers le haut du champ de Bouguer ; elle vaut  $Z_0 = 17,5\text{km}$ ; elle corrobore avec les profondeurs optimales d'investigation suivant la solution d'Euler 3D ou encore par analyse

spectrale. Cette profondeur bien qu'analogue à celle déterminée par la sismique (Dorbath et Dorbath, 1984 ; Stuart et al., 1985), s'avère bien supérieure par rapport à celle obtenue par Nguiya, (2009) et Noutchogwe, (2010). La méthodologie utilisée dans les deux études étant similaire la différence viendrait de la qualité des données utilisée( données non densifiées et densifiées par la methode neuronale).

### **III.6.3 Carte structurale**

Bien qu'ayant une zone d'investigation assez réduite et un jeu de données très éparses, on a pu obtenir plus d'une quarantaine de linéaments dans la zone en retrouvant au préalable les failles connues avec des extensions verticales assez considérables (plus de 10km) notamment les failles de la zone de cisaillements centre Cameroun (ZCCC) ou de la zone des cisaillements de la Sanaga (ZCS). La rosaces des directions de fracturations (figures 44) montrent que les accidents tectoniques identifiés à partir des anomalies gravimétriques corroborent avec celles obtenues dans la région par Cheunteu et al.,(2022). D'autre part, la carte de synthèse de la structurale interprétative (figure 40) montre des structures linéaires à l'échelle régionale qui contrôlent le contexte structural de la zone d'étude (ENE-WSW, WNW-ESE et NE-SW). La relation entre ces différentes directions linéamentaires montre que le domaine étudié a été le siège de plus d'une activité tectonique au cours des temps géologiques. Les linéaments majeurs au centre de la carte de synthèse, qui s'étendent du SW au NE de la carte suivent l'alignement des roches granitiques de la série de Lom, et matérialisent ainsi la signature des failles normales qui effondrent la zone mobile au Centre-Est du Cameroun (Ngalamo et al., 2018 ; Cheunteu et al., 2022).

### **III.6.4 La méthode de séparation des anomalies gravimétriques**

Une bonne séparation des anomalies gravimétriques appartenant au champ de potentiel est celle qui permet de bien isoler les anomalies dont les sources sont dues aux structures superficielles et/ou locales de celles dont les sources sont lointaines et/ou profondes. Nous avons dans cette étude, compte tenu de la nature gravimétrique des données, le choix entre la une approche graphique et une approche analytique. Pour une interprétation de type 2.5D, la séparation graphique sur la carte d'anomalies de Bouguer serait fastidieuse et assez subjective. On a donc utilisé la méthode analytique des moindres carrés avec un critère objectif pour le choix de la régionale basé sur la forte corrélation entre la carte de Bouguer prolongée à l'altitude optimale et la régional d'ordre 2 ; cette approche associée à la forte densité des données des données gravimétriques réalisées dans cette étude, on a pu isoler les anomalies créées par les

structures intracrustales. Dans les travaux antérieurs (Nguia, 2009), la régionale retenue pour extraire la résiduelle était de degré 3 ; différente de celle obtenue dans cette étude, probablement du fait de l'étendu de notre zone d'étude plus petite ; mais également du jeu de données utilisées (densifiée par la méthode neuronale). L'ordre retenu fut approprié pour des modélisations 2D1/2 car présentant des résultats similaires à d'autres études menées avec un jeu de données différents (magnétiques par exemple).

### III.6.5 Sur la densité de structures

Ne disposant pas de mesure de densité sur des échantillons prélevés dans des carrières ou par forage nous avons procédé à la superposition des cartes gravimétriques à la carte géologique de la région ; ce qui a permis de noter que : Les formations géologiques décrites dans la région sont : les gneiss, les migmatites, les granites et les schistes. Ces formations se retrouvent toutes sur l'ensemble de la région de Lom-Pangar. Les différentes valeurs de densités sont compatibles à la gamme des valeurs prévue par la littérature et les abaques (Tadjou, 2004; Burger et al., 2006). La densité étant le marqueur de l'onde gravimétrique, cette compatibilité garantit d'une part la validité des résultats obtenus d'autre part la technique d'interpolation utilisée pour densifier les données. Ainsi donc, l'analyse des modèles issus des profils résiduels permet de retenir que les roches légères associées aux anomalies négatives correspondent aux métasédiments de la série du Lom auquel appartient la région de Lom-Pangar. Contrairement à ces roches légères, les roches lourdes présentes sur le modèle et associées aux anomalies gravimétriques positives se présentent sous la forme de plutons bien enracinés ; attribuées aux migmatites et aux gneiss présents dans la région et attestées par les travaux menés par (Fon et al., 2012 ; Seni et al., 2018; Nyaban et al., 2021).

### III.6.6 La modélisation 2.5D

L'interprétation des anomalies des champs dits potentiels pose le problème de la non unicité des solutions. L'analyse des profils AB et CD modélisés suggère une zone particulièrement complexe ; au regard de la multiplicité des couches lithologiques enregistrées dans la zone. Le modèle géophysique nous donne un profil qui est traversé par six formations lithologiques dont quatre affleurantes. En les comparant au modèle géologique on note que, le profil(AB) ne traverse en surface que deux formations (les granitoïdes syn à tardi-tectoniques et le gneiss granulitique) et le profil (CD) trois formations (en plus des deux précédentes, les sédiments détritiques). Suivant les valeurs de densité proposées par la littérature scientifique plusieurs structures géophysiques pourraient en effet représenter une seule et même formation

géologique. Les structures (3) et (4) seraient en effet une même formation géologique (le gneiss) ; tout comme les structures (5) et (6) pour le profil (CD) et (5) (6) et (7) pour le profil (AB) pourraient s'apparenter aux granitoïdes syn à tardi tectoniques, conformément aux travaux de Toteu et al., (2008). Les travaux antérieurs réalisés par Nguiya, (2009) et Owono et al., (2019) dans la zone ont modélisé d'une part de moindres extensions verticales de structures, et d'autre part une faible diversité de couches lithologiques. Bien que la longueur du profil utilisé dans cette étude n'ait pas toujours été inférieur ou égale (cas des travaux de Owono et al., (2019)) nous pensons néanmoins que la qualité du résultat obtenu serait fortement tributaire du jeu de données « amélioré » utilisé. Sur le profil (CD), on observe deux zones de discontinuités dénotant des structures faillées allant de faibles aux moyennes profondeurs : l'une à l'ouest et l'autre au centre du profil. Au centre, la discontinuité observée sépare deux anomalies différentes (une anomalie lourde et une anomalie légère) s'accompagnant d'une subduction. La discontinuité observée à l'ouest a été assimilée au prolongement de la faille de la Sanaga traversant la région, en accord avec les travaux de géologiques de Kankeu, (2008) et Toteu, (2008). La faille de la Sanaga ainsi décrite aurait joué aussi bien sur l'effondrement du socle dans la région que sur le chevauchement des formations du panafricain sur celles du craton (Tadjou, 2004).

## CONCLUSION

Au chapitre 3, il a été présenté les différents résultats suivis d'une discussion. Premièrement, après avoir validé le modèle d'architecture neuronal approprié (bonne corrélation  $R^2 = 0,9811$  ; faibles valeurs d'erreurs : RMSE= 0,0804 et MBE= 0,0003 ; et forte similitude établie entre la Bouguer issue de la méthode neuronale et celle obtenue par krigéage) le nouveau jeu de données est utilisé pour redéfinir une nouvelle carte d'anomalie de Bouguer de meilleure densité avec un maillage constant. Plusieurs filtres géophysiques ont été appliqués à cette dernière dans l'optique de mettre en évidence les signatures structurales majeures de la région. Deuxièmement, l'exploitation des données densifiées met en évidence dans la région de Lom-Pangar : (1) trois directions structurales majeures (NE-SW, WNW-ESE, et ENE-WSW) dont l'orientation ENE-WSW apparaît comme principale direction des grandes structures Panafricaines du Cameroun à savoir le CCC et la FS. (2) La séparation régionale résiduelle associée à la modélisation 2.5D caractérisent la région de Lom-Pangar comme appartenant au vaste couloir d'anomalies négatives associées aux bassins sédimentaires ou à un effondrement du socle. Les anomalies positives sont associées aux intrusions de matériaux

denses, mise en place suite à une remontée de matériaux lourds depuis la croûte inférieure ou d'origine mantellique. Le toit du socle à une profondeur de 17,5km. (3) Les modèles obtenus montrent que le socle de la région de Lom-Pangar est principalement constitué de roches métamorphiques (le socle est granito-gneissique). Les migmatites et les gneiss assurent les contacts faillés dans la région de Lom-Pangar. Enfin les nouvelles failles obtenues sont interprétées d'une part comme des extensions latérales et verticales de la Zone de Cisaillements de la Sanaga (ZCS) ou celles de la Zone de Cisaillement Centre Cameroun (CCC) ; d'autres parts, elles ont été associées à la complexité lithologique de la zone d'étude. Ces résultats contribuent ainsi à valider la méthode neuronale comme procédé d'optimisation des données géophysiques.

---

## **CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES**

---

## **1. CONCLUSION GÉNÉRALE**

Il était question dans cette étude de faire ressortir la contribution de la méthode neuronale à l'optimisation des investigations géophysiques au Cameroun. Pour cela, il a été considéré la zone de Lom- Pangar dans la région de l'Est-Cameroun comme zone cible ; car disposant d'une des plus faibles couvertures en données gravimétriques. S'appuyant sur le caractère primordial de la qualité des données dans toute étude scientifique ; l'objectif majeur était donc d'utiliser la méthode neuronale dont l'efficacité et la fiabilité dans la qualité des résultats obtenus n'est plus à démontrer, pour améliorer la couverture gravimétrique dans la région de Lom- Pangar. Partant de l'algorithme de Levenberg-Marquardt il a été conçu une architecture de type perceptron multicouches avec deux entrées (longitudes et latitudes) qui génèrait une seule sortie (l'anomalie de Bouguer). Sur une zone s'étendant sur près de 47400 km<sup>2</sup> avec juste 466 points de mesures en données gravimétriques, nous avons obtenus après densification via le réseau de 1050 points de données couvrant toute la zone d'étude suivant un maillage judicieusement choisi. La forte corrélation enregistrée ( $R^2=0,9811$ ), les faibles valeurs d'erreurs (RMSE= 0,0804 et MBE= 0,0003) associées à une validation basée sur un critère gravimétrique à travers une comparaison des cartes d'anomalies de Bouguer obtenue par la méthode neuronale et par krigeage ont contribué à valider l'architecture N°10 comme celle appropriée pour la densification des données gravimétriques dans la région de Lom-Pangar. Ensuite ; s'appuyant sur les données gravimétriques densifiées les différents traitements et filtrages géophysiques ont permis de noter que:

Les trois ensembles caractérisés sur le terrain (NE-SW, NW-SE, et ENE-WSW) appartenant tous au domaine du panafricain correspondent bien à trois domaines géologiques d'âge et d'évolution différents à savoir les granites syn-tectoniques à l'Est, la série de Lom au centre et la série métamorphique au nord -ouest. L'orientation ENE-WSW apparaît comme principale direction des grandes structures du Panafricain au Cameroun à savoir le Cisaillement Centre Camerounais et la faille de la Sanaga, à l'inverse de WNW-ESE qui serait due à la mise en place de la nappe Panafricaine. Les différentes orientations des failles impliquent que la zone d'étude a subi plusieurs évènements tectoniques ; leurs profondeurs et la présence de structures intrusives peuvent permettre de déterminer le sens de circulation des fluides mais aussi la présence de potentiels gisements miniers à l'intérieur de la couverture sédimentaire.

La séparation régionale résiduelle a permis de situer la région de Lom-Pangar comme appartenant au vaste couloir d'anomalies négatives encastré dans des anomalies positives

et dont les limites sont marquées par des zones à forts gradients d'anomalies. Les anomalies positives du sud sont caractérisées comme étant associées à une remontée de matériaux lourds (gneiss et granites); les anomalies positives observées au nord par contre associées aux intrusions de matériaux denses. Les forts gradients caractérisent les structures faillées dont l'une limitant le couloir au Sud pourrait être le prolongement de la faille de la Sanaga. La modélisation 2.5D mène à la conclusion d'un affaissement du socle, facilité par un système de failles normales et profondes limitant le bassin volcano-sédimentaire du Lom auquel appartient la région de Lom-Pangar. Ces failles auraient également favorisé non seulement la mise en place des plutons enracinés dans la région, mais aussi le chevauchement des formations du Nord sur celles du Sud. Le toit du socle constituant la profondeur maximale du bassin à 13.5 km en évidence la forme en graben dissymétrique du bassin dans la région de Lom-Pangar. Ces caractéristiques confirment que ces failles auraient joué plusieurs fois en faveur de l'affaissement du socle et à la mise en place du vaste couloir d'anomalies négatives observé sur les cartes d'anomalies résiduelles.

De nouvelles structures ont été identifiées par rapport aux études antérieures dont les plus visibles sont : (1) Au niveau tectonique avec des nouvelles failles identifiées considérées comme des extensions latérales et verticales de la zone de cisaillements de la Sanaga (ZCS) ou celle de la ligne volcanique du Cameroun (LVC) dont les extensions ne sont pas toujours clairement identifiables sur les cartes géologiques préexistantes. (2) Des nouvelles couches structurales et extensions lithologiques clairement identifiées dans les localités au sud de Sembé de Pangar par rapport aux études antérieures témoignent d'une part de la forte dynamique de la croûte en ce lieu mais aussi de sa complexité géologique.

Ces conclusions pour l'essentiel corréleront avec celles obtenues dans d'autres zones dans la région de l'Est et une partie de l'Adamaoua comme mentionné plus haut, contribuant ainsi à valider la méthode neuronale comme procédé d'optimisation des données géophysiques. Cependant, la méthode gravimétrique associée au réseau de neurones artificiel bien qu'efficace, nécessiterait pour des études futures certaines améliorations.

## **2. PERSPECTIVES**

Les perspectives offertes pour des travaux ultérieurs sont les suivantes:

- ✓ Compte tenu de la faible densité des données géophysiques terrestres à l'échelle du Cameroun et vu les contraintes matérielles et financières qu'exigent une campagne de

levé géophysique. On propose la généralisation d'une telle opération de densification des données à l'échelle nationale.

- ✓ les mesures de densités et l'étude géochimique des carottes obtenues des forages profonds effectués dans la région de Lom-Pangar permettront de connaître avec plus de précision la texture et la composition des différentes formations le long d'un profil lors d'une modélisation 2.5D.
- ✓ Inversion des données densifiées. Les techniques d'inversion produisent des résultats de bonne résolution lorsque les données sont denses et disposées en grilles fines. Cette technique présente l'avantage de générer automatiquement les contrastes de densité ainsi que les extensions des structures sources.
- ✓ Couplage à d'autres méthodes géophysiques. L'utilisation de la méthode magnétique qui, partant de leur susceptibilité magnétique, permettrait de mieux différencier les roches de contrastes de densités voisins. De même, les méthodes dites de résistivités (méthodes électriques, magnétotelluriques) permettront comme précédemment de mieux différencier les roches par leur résistivités électriques. Ces dernières en plus permettraient de déceler des failles dans les structures de même nature.

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- Abdelrahman, E., A. Bayoumi., Y. Abdelhady., M. Gobashy and H. El-Araby., 1989.** Gravity interpretation using correlation factors between successive least-squares residual anomalies. *Geophysics*, 54, 1614-1621.
- Alemetpm, V. L. M. E. P., 1971.** Le fossé créacé du sud-Adamaoua (Cameroun). *Cahiers ORSTOM: Série géologie*, 3, 67.
- Basseka, C. A., N. T. C. Donald., E. Y. Albert., S. Yves and K. J. Victor., 2016** Apport des données magnétiques de surface et satellitaires à l'étude des structures profondes du Sud-Cameroun. *Sciences, Technologies et Développement*, Volume 18, pp 15-30.
- Bouba, A., K. Joseph, T. C. Tabod., Y. Loudi., N. Robert., K. H. Ludovic and O. Valentin., 2017.** Subsurface Structural Mapping Using Combined Terrestrial and Grace Gravity Data of the Adamawa Plateau (North-Cameroon). *International Journal of Geosciences*, 8, 869.
- Baranov, V.,1957.** A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, 22, 359-382.
- Baum, E. and D. Haussler., 1988.** What size net gives valid generalization? *Advances in neural information processing systems*, 1 81-90.
- Bhattacharyya, B., 1966.** Continuous spectrum of the total-magnetic-field anomaly due to a rectangular prismatic body. *Geophysics*, 31, 97-121.
- Blakely, R. J., 1996.** *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge university press.
- Blakely, R. J. and R. W. Simpson., 1986.** Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51, 1494-1498.
- Blenkinsop, T. G., C. Huddleston-Holmes., D. Foster., M. Edmiston., P. Lepong., G. Mark., J. Austin., F. Murphy., A. Ford and M. J. Rubenach., 2008.** The crustal scale architecture of the Eastern Succession, Mount Isa: The influence of inversion. *Precambrian Research*, 163, 31-49.
- Browne, S. and J. Fairhead., 1983.** Gravity study of the Central African Rift system: A model of continental disruption: 1. The Ngaoundere and Abu Gabra Rifts. In *Developments in Geotectonics*, 187-203. Elsevier.
- Burger, H. R., A. F. Sheehan., C. H. Jones and H. R. Burger., 2006.** *Introduction to applied geophysics: Exploring the shallow subsurface*. (Vol. 550) WW Norton New York.

- Burke, K., 2001** Origin of the Cameroon line of volcano-capped swells. *The Journal of Geology*, 109, 349-362.
- Cady J.W., 1980.** Calculation of gravity and magnetic anomalies of finite-length right polygone prism. *Geophys, prospect*, 45(10), 1507-1512.
- Cheunteu Fantah, C. A., C. A. Mezoue., M. P. Mouzong., A. P. Tokam Kanga., R. Nouayou and S. Nguiya., 2022.** Mapping of major tectonic lineaments across Cameroon using potential field data. *Earth, Planets and Space*, 74, 1-19.
- Collignon, F.,1968.** Gravimétrie de reconnaissance de la République Fédérale du Cameroun. *ORSTOM, Paris*, 3
- Cooper, G. R., 2004.** Euler deconvolution applied to potential field gradients. *Exploration Geophysics*, 35, 165-170.
- Cordell, L. and V. Grauch., 1985.** Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. In *The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps*, 181-197. Society of Exploration Geophysicists.
- Cordell, L. S., 1979.** *A cultural resources overview of the middle Rio Grande valley, New Mexico.* Department of Agriculture, Forest Service, Southwestern Region.
- Cornacchia, M. and R. Dars., 1983.** Un trait structural majeur du continent Africain; les lineaments centrafricains du Cameroun au Golfe d'Aden. *Bulletin de la Société géologique de France*, 7, 101-109.
- Coulibaly, P., F. Anctil and B. Bobée., 1999.** Prévision hydrologique par réseaux de neurones artificiels: état de l'art. *Canadian Journal of civil engineering*, 26, 293-304.
- Crenn, Y., 1957.** Mesures gravimétriques et magnétiques dans la partie centrale de l'AOF: interprétations géologiques. *Cahiers ORSTOM. Série Géophysique*.
- Cybenko, G., 1989.** Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of control, signals and systems*, 2, 303-314.
- Dautria, J.-M. et M. Girod., 1986.** Les enclaves de lherzolite à spinelle et plagioclase du volcan de Dibi (Adamaoua, Cameroun): des témoins d'un manteau supérieur anormal. *Bulletin de minéralogie*, 109, 275-288.
- Davalo, E., P. Naïm et F. Clément., 1990.** *Des réseaux de neurones.* Eyrolles Paris.
- Derras, B., 2011.** Contribution des données accélérométriques de KiKNet à la prédiction du mouvement sismique par l'approche neuronale avec la prise en compte des effets de site. Université de Tlemcen.

- Déruelle, B., C. Moreau., C. Nkoumbou., R. Kambou., J. Lissom., E. Njonfang., R. Ghogomu and A. Nono., 1991.** The Cameroon line: a review. *Magmatism in extensional structural settings*, 274-327.
- Diffo, S., W. Lemotio., C. Mezoue Adiang., E. Ngatchou Heutchi., S. Nguiya and J. M. B. Ndjaka., 2022.** Contribution of the artificial neural network (ANN) method to the interpolation of the Bouguer gravity anomalies in the region of Lom-Pangar (East-Cameroon). *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 8, 1-15.
- Dimitriadis, K., G.-A. Tselentis and K. Thanassoulas., 1987.** A basic program for 2-D spectral analysis of gravity data and source-depth estimation. *Computers & Geosciences*, 13, 549-560.
- Djouka-Fonkwé, M., B. Schulz., U. Schüssler., J.-P. Tchouankoué and C. Nzolang., 2008.** Geochemistry of the Bafoussam Pan-African I-and S-type granitoids in western Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 50, 148-167.
- Dorbath, C., L. Dorbath, J. Fairhead and G. Stuart., 1986.** A teleseismic delay time study across the Central African Shear Zone in the Adamawa region of Cameroon, West Africa. *Geophysical Journal International*, 86, 751-766.
- Dorbath, C., L. Dorbath, R. Gaulon., T. George., P. Mourgue., M. Ramdani., B. Robineau and B. Tadili., 1984.** Seismotectonics of the Guinean earthquake of December 22, 1983. *Geophysical Research Letters*, 11, 971-974.
- Dorbath, L. and C. Dorbath., 1984.** Approche Sismologique de la Lithosphère en Afrique de l'Ouest. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Dumont, J.-F., 1986.** Identification par télédétection de l'accident de la Sanaga (Cameroun): Sa position dans le contexte des grands accidents d'Afrique Centrale et de la limite nord du craton Congolais. *Géodynamique*, 1, 13-19.
- Dumont, j.-F., 1987.** Etude structurale des bordures nord et sud du plateau de l'Adamaoua: influence du contexte atlantique. *Géodynamique*, 2, 55-68.
- Ebinger, C., Y. Poudjom-Djomani., E. Mbede and A. Foster., 1997.** Rifting the Archaean: Development of the Natron-Manyara-Eyasi basins. Tanzania. *J. Geol. Soc. London*, 154, 947-960.
- El Badaoui., H., A. Abdallaoui and S. Chabaa., 2013.** Etude des effets des algorithmes d'apprentissage et des fonctions de transfert sur la performance des modèles statistiques neuronaux: Application dans le domaine météorologique. *International Journal of Engineering Research and Development*, 9, 15-26.
- Elman, J. L., 1990.** Finding structure in time. *Cognitive science*, 14, 179-211.

- Eno Belinga., 1984.** SM: Géologie du Cameroun, Librairie Universitaire de Yaoundé, Yaoundé, Cameroun.
- Enyegue A Nyam, F. M., A. E. Yomba., A. R. Nzeuga and A. S. Soh., 2020.** 2.5-D Earth Crust Density Structure Modeling of the Central Part of Cameroon Using Gravity Data. *Open Journal of Earthquake Research*, 9, 289-306.
- Fausett, D., 1994.** *The strange surprising sources of Robinson Crusoe*. Rodopi.
- Feumoe, A. N. S., T. Ndougsa-Mbarga., E. Manguelle-Dicoum and J. D. Fairhead., 2012.** Delineation of tectonic lineaments using aeromagnetic data for the south-east Cameroon area. *G eofizika*, 29, 175-192.
- Florio, G., M. Fedi and R. Pasteka., 2006.** On the application of Euler deconvolution to the analytic signal. *Geophysics*, 71, L87-L93.
- Fon, A. N., V. B. Che and C. E. Suh., 2012.** Application of electrical resistivity and chargeability data on a GIS platform in delineating auriferous structures in a deeply weathered lateritic terrain, eastern Cameroon. *International Journal of Geosciences*, 3, 960.
- Galloway, W., P. Ganey-Curry., N. Archibald and J. Bain., 1999.** Geology and geophysics. *Offshore*, 59, 70.
- Gazel, J. et G. Gérard., 1954.** Carte géologique de reconnaissance du cameroun au 1/500 000, feuille Batouri-Est avec notice explicative. Memoir. *Direction Mines Géologie, Yaoundé Cameroun*.
- Grauch, V. and L. Cordell., 1987.** Limitations of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data. *Geophysics*, 52, 118-121.
- Grauch, V. and M. R. Hudson., 2007.** Guides to understanding the aeromagnetic expression of faults in sedimentary basins: Lessons learned from the central Rio Grande rift, New Mexico. *Geosphere*, 3, 596-623.
- Grauch, V., M. R. Hudson and S. A. Minor., 2001.** Aeromagnetic expression of faults that offset basin fill, Albuquerque basin, New Mexico. *Geophysics*, 66, 707-720.
- Green, W. R., 1975.** Inversion of gravity profiles by use of a Backus-Gilbert approach. *Geophysics*, 40, 763-772.
- Grossberg, S., 1988.** Nonlinear neural networks: Principles, mechanisms, and architectures. *Neural networks*, 1, 17-61.
- Guiraudie, C., 1955.** Notice explicative sur la feuille Ngaoundéré-Ouest. *Carte géologique de reconnaissance al'échelle du*, 1, 500000.
- Gunn, P. J., 1975.** Linear transformations of gravity and magnetic fields. *Geophysical prospecting*, 23, 300-312.

- Hagan, M. T., H. B. Demuth and O. D. Jesús., 2002.** An introduction to the use of neural networks in control systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal*, 12, 959-985.
- Hassoum, M., 1995.** Fundamentals of artificial neural networks. Eds. MIT Press, Cambridge.
- Haykin, S., 1994.** Intelligent Signal Processing. In *Advances in Signal Processing for Nondestructive Evaluation of Materials*, 1-12. Springer.
- Hebb, D. O., 1949.** The first stage of perception: growth of the assembly. *The Organization of Behavior*, 4, 60-78.
- Hertz, J., A. Krogh and R. G. Palmer., 1991.** Introduction to the Theory of Neural Computation, volume I of Lecture Notes. *Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Jacobs, I., S. Bleue and J. Goodman., 1997.** Creatine ingestion increases anaerobic capacity and maximum accumulated oxygen deficit. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 22, 231-243.
- Jacobsen, B. H., 1987.** A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps. *Geophysics*, 52, 1138-1148.
- Jayet, A., 2002.** Affective Computing: Apport des Processus Emotionnels aux Systèmes Artificiels. Site.
- Jay, G., and grandjean, J. P., 2011.** Plan d'indemnisation et de réinstallation.
- Kamgang, P., E. Njonfang., A. Nono., M. G. Dedzo and F. M. Tchoua., 2010.** Petrogenesis of a silicic magma system: geochemical evidence from Bamenda Mountains, NW Cameroon, Cameroon Volcanic Line. *Journal of African Earth Sciences*, 58, 285-304.
- Kamto, P. G., W. Lemotio., A.-P. K. Tokam and L. Yap., 2021.** Combination of Terrestrial and Satellite Gravity Data for the Characterization of the Southwestern Coastal Region of Cameroon: Appraisal for Hydrocarbon Exploration. *International Journal of Geophysics*.
- Kandé-Houétchak, L., 2008.** Étude géophysique de la structure de la croûte le long du fossé tectonique de la Mbéré (Sud-Cameroun). Thèse de Doctorat/Ph. D., Université de Yaoundé 1.
- Kankeu, B., 2008.** Anisotropie de la susceptibilité magnétique (ASM) et fabriques des roches Néoproterozoïques des régions de Garga-Sarali et Bétaré-Oya à l'Est Cameroon: implications géodynamiques pour l'évolution de la chaîne panafricaine d'Afrique Centrale. Ph. D. thesis. Université de Yaoundé I.
- Kapajika, B., 2003.** Les granitoids calco-alcalins, syn-cisaillement de l'Ouest Tibati (CPNE Cameroun): Petrogenèse et structurogenèse. Ph. D. thesis, University Lubumbashi, 113p.

- Kasabov, N. K., 1996.** *Foundations of neural networks, fuzzy systems, and knowledge engineering.* Marcel Alencar.
- Keating, P. and M. Pilkington., 2004.** Euler deconvolution of the analytic signal and its application to magnetic interpretation. *Geophysical prospecting*, 52, 165-182.
- Khattach, D., Keating, P., Mili, E. M., Chennouf, T., Andrieux, P. et Milhi, A., 2004.** Apport de gravimétrie à l'étude de la structure du bas-fa (Maroc nord-oriental) : implications hydrogéologiques. *Geoscience*, 336, pp. 1427-1432.
- Khattach, D., Mraoui, H., Sbibih, D et Chennouf, T., 2006.** Analyse multi-échelle par ondelettes des contacts géologiques : application à la prospection gravimétrique du Maroc nord-oriental, *C. R. Geoscience*, 338, pp. 521-526.
- Koch, F. W., D. A. Wiens., A. A. Nyblade., P. J. Shore., R. Tibi., B. Ateba., C. Tabod and J. Nnange., 2012.** Upper-mantle anisotropy beneath the Cameroon Volcanic Line and Congo Craton from shear wave splitting measurements. *Geophysical Journal International*, 190, 75-86.
- Kohonen, T., 1995.** Learning vector quantization. In *Self-organizing maps*, 175-189. Springer.
- Koumetio, F., D. Njomo., C. N. Tatchum., A. P. K. Tokam., T. C. Tabod and E. Manguelle-Dicoum., 2014.** Interpretation of gravity anomalies by multi-scale evaluation of maxima of gradients and 3D modelling in Bipindi region (South-West Cameroon). *International journal of Geosciences*, 5, 1415.
- Koumi Ngoh, S., O. Ayina LM., L. Monkam and A. Kemajou., 2013.** Estimation of the global solar radiation under sudan-type tropical climate using artificial neural network model.
- Kwékam, M., J.-P. Liégeois., E. Njonfang., P. Affaton., G. Hartmann and F. Tchoua., 2010.** Nature, origin and significance of the Fomopéa Pan-African high-K calc-alkaline plutonic complex in the Central African fold belt (Cameroon). *Journal of African Earth Sciences*, 57, 79-95.
- Lippmann, R., 1987.** An introduction to computing with neural nets. *IEEE Assp magazine*, 4, 4-22.
- Lyngsie, S. B., H. Thybo and T. M. Rasmussen., 2006.** Regional geological and tectonic structures of the North Sea area from potential field modelling. *Tectonophysics*, 413, 147-170.
- Marc Parizeau., 2004.** Le perceptron multicouche et son algorithme de retropropagation des erreurs. 8 p.
- Marson, I. and E. Klingele., 1993.** Advantages of using the vertical gradient of gravity for 3-D interpretation. *Geophysics*, 58, 1588-1595.

- Marzoli, A., P. R. Renne., E. M. Piccirillo., C. Francesca., G. Bellieni., A. J. Melfi., J. B. Nyobe and J. N'ni., 1999.** Silicic magmas from the continental Cameroon Volcanic Line (Oku, Bambouto and Ngaoundere): 40 Ar-39 Ar dates, petrology, Sr-Nd-O isotopes and their petrogenetic significance. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135, 133-150.
- Mbom-Abane, S., 1997.** Investigation géophysique en bordure du Craton du Congo (région d'Abong-Mbang/Akonolinga, Cameroun) et implications structurales. *Université de Yaoundé I*.
- McCulloch, W. S. and W. Pitts., 1943.** A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5, 115-133.
- Merad, L., S. Meriah et F. Bendimerad., 2004.** Application des Réseaux Neuronaux pour la Modélisation et l'Optimisation de Réseaux d'Antennes Imprimées. *Université Abou-Bekr Belkaïd-Tlemcen*.
- Meyers, J. B., B. R. Rosendahl., C. G. Harrison and Z.-D. Ding., 1998.** Deep-imaging seismic and gravity results from the offshore Cameroon Volcanic Line, and speculation of African hotlines. *Tectonophysics*, 284, 31-63.
- Mischel, W. and C. J. Patterson., 1976.** Substantive and structural elements of effective plans for self-control. *Journal of Personality and Social Psychology*, 34, 942.
- Moreau, C., J.-M. Regnoul., B. Déruelle and B. Robineau., 1987.** A new tectonic model for the Cameroon Line, Central Africa. *Tectonophysics*, 141, 317-334.
- Morin, Y.-C., 1979.** La morphophonologie des pronoms clitiques en français populaire. *Cahier de linguistique*, 9, 1-36.
- Mouzong Pemi., M., J. Kamguia., S. Nguiya and E. Manguelle-Dicoum., 2018.** Depth and Lineament Maps Derived from North Cameroon Gravity Data Computed by Artificial Neural Network. *International Journal of Geophysics*, 2018.
- Murata, N., S. Yoshizawa and S.-i. Amari., 1994.** Network information criterion-determining the number of hidden units for an artificial neural network model. *IEEE transactions on neural networks*, 5, 865-872.
- Nana, R., 1991.** Contribution à l'étude volcanologique et pétrologique des lacs de la région de Wum (Province de North-Ouest, Cameroun). Thèse de doctorat de troisième cycle de l'université de Yaoundé I.
- Naudy, H. et R. Neumann., 1965** Sur la définition de l'anomalie de Bouguer et ses conséquences pratiques. *Geophysical Prospecting*, 13, 1-11.

- Ndougsa-Mbarga, T., E. Manguelle-Dicoum., C. Tabod et S. Mbom-Abane., 2003.** Modélisation d'anomalies gravimétriques dans la région de Mengueme-Akonolinga (Cameroun). *Science, Technology and Development*, 10, 67-74.
- Ndougsa-Mbarga., T., A. Meying., D. Bisso., K. Sharma., D. Layu and E. Manguelle-Dicoum., 2011.** Audiomagnetotellurics (AMT) soundings based on the Bostick approach and evidence of tectonic features along the northern edge of the Congo Craton, in the Messamena/Abong-Mbang area (Cameroon). *Journal of Indian Geophysical Union*, 15, 145-159.
- Ngako, F., P. Jegouzo et J.-P. Nzenti., 1991.** Le Cisaillement Centre Camerounais. Rôle structural et géodynamique dans l'orogénèse panafricaine. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 313, 457-463.
- Ngako, V., 1999.** Les déformations continentales panafricaines en Afrique Centrale: résultat d'un poinçonnement de type himalayen. *Doct. d'Etat thesis, Univ. Yaoundé I*.
- Ngako, V., P. Affaton and E. Njonfang., 2008.** Pan-African tectonics in northwestern Cameroon: implication for the history of western Gondwana. *Gondwana research*, 14, 509-522.
- Ngako, V., E. Njonfang., F. T. Aka., P. Affaton and J. M. Nnange., 2006.** The North–South Paleozoic to Quaternary trend of alkaline magmatism from Niger–Nigeria to Cameroon: complex interaction between hotspots and Precambrian faults. *Journal of African Earth Sciences*, 45, 241-256.
- Ngalamo, J. F. G., D. Bisso., M. G. Abdelsalam., E. A. Atekwana., A. B. Katumwehe and G. E. Ekodeck., 2017.** Geophysical imaging of metacratonization in the northern edge of the Congo craton in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 129, 94-107.
- Ngalamo, J. F. G., M. Sobh., D. Bisso., M. G. Abdelsalam., E. Atekwana and G. E. Ekodeck., 2018.** Lithospheric structure beneath the Central Africa Orogenic Belt in Cameroon from the analysis of satellite gravity and passive seismic data. *Tectonophysics*, 745, 326-337.
- Ngangom, E., 1983.** Etude tectonique du fossé créacé de la Mbéré et du Djerem, Sud-Adamaona, Cameroun. *Bulletin des centres de recherches exploration-Production Elf-Aquitaine*, 7, 339-347.
- Ngatchou Wandji, J., 1995.** Etude de tests paramétriques et non-paramétriques asymptotiquement puissants pour les modèles autorégressifs bilinéaires. Paris 13.

- Ngnotué, T., J. Nzenti., P. Barbey and F. Tchoua., 2000.** The Ntui-Betamba high-grade gneisses: a northward extension of the Pan-African Yaoundé gneisses in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 31, 369-381.
- Ngoumou, P. C., A. S. Patrick., O. A. O. U. Igor., M. Arsene., Y. Justine., N. J. Daniel and P. M.-M. A. Didier., 2021.** 2.5 D Crustal Models Derived from Analytical Polynomial Separation Technique and Spectral Analysis of Gravity Data with Their Probable Gold Mineralization Migrations (Batouri, SE-Cameroon). *Advances in Remote Sensing*, 10, 1.
- Nguemhe Fils, S. C., M. E. Mimba., B. Nyeck., M. T. Nforba., B. Kankeu., P. Njandjock Nouck and J. V. Hell., 2020.** GIS-based spatial analysis of regional-scale structural controls on gold mineralization along the Betare-Oya Shear Zone, Eastern Cameroon. *Natural Resources Research*, 29, 3457-3477.
- Nguiya, S., 2009.** Investigation géophysique du bassin volcano-sédimentaire de Lom (Est-Cameroun): Implications structurale et tectonique. Thèse de Doctorat/PhD, Université of Yaoundé, Cameroon, 1, 120pp.
- Njanko, T., 1999.** Les granitoïdes calco-alcalins, syn-cisaillement de la région de Tibati (domaine central de la chaîne Panafricaine): leur signification géodynamique par rapport à la tectonique panafricaine. *Doc. Fac. Sci. Univ. Yaoundé-1, Cameroon*.
- Njonfang, E. and C. Moreau., 1996.** The mineralogy and geochemistry of a subvolcanic alkaline complex from the Cameroon Line: the Nda Ali massif, southwest Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 22, 113-132.
- Njonfang, E., V. Ngako., C. Moreau., P. Affaton and H. Diot., 2008.** Restraining bends in high temperature shear zones: the “Central Cameroon Shear Zone”, Central Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 52, 9-20.
- Nkouathio, D., 1997** Le volcanisme récent du graben de Tombel (provinces du Littoral et du Sud-ouest, Cameroun): volcanologie, géochimie, pétrologie et valeurs agricoles. *These 3e cycle, Université de Yaoundé*, 1.
- Nnange, M., S. Djallo., J. Fairhead and G. Stuart., 1985.** Earthquake activity in Cameroon during 1983.
- Nono, A., B. Déruelle., D. Demaiffe and R. Kambou., 1994.** Tchabal Nganha volcano in Adamawa (Cameroon): petrology of a continental alkaline lava series. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 60, 147-178.
- Noutchogwe, T., 2004.** Apport de la gravimétrie à l'étude de la bordure méridionale du plateau de l'Adamaoua (Cameroun). *These de Doctorat 3e cycle*.

- Noutchogwe, C. T., C. Tabod and E. Manguelle-Dicoum., 2006.** A gravity study of the crust beneath the Adamawa fault zone, West Central Africa. *Journal of geophysics and Engineering*, 3, 82.
- Noutchogwe, C. T., 2010.** Investigation géophysique dans la région de l'Adamaoua par les méthodes gravimétriques et magnétiques: implications structurales et hydrogéologiques. *Yaounde: Université de Yaoundé I.*
- Noutchogwe, C. T., F. Koumetio and E. Manguelle-Dicoum., 2010.** Structural features of South-Adamawa (Cameroon) inferred from magnetic anomalies: Hydrogeological implications. *Comptes Rendus Geoscience*, 342, 467-474.
- Nyaban, C. E., T. Ndougsa-Mbarga., M. Bikoro-Bi-Alou., S. A. Manekeng Tadjouteu and S. P. Assembe., 2021.** Multi-scale analysis and modelling of aeromagnetic data over the Bétaré-Oya area in eastern Cameroon, for structural evidence investigations. *Solid Earth*, 12, 785-800.
- Nzenti, J.-P., 1987.** Pétrogenèse des migmatites de Yaoundé(Cameroun): éléments pour un modèle géodynamique de la chaîne pan-africaine nord-équatoriale.
- Nzenti, J., P. Barbey., J. Macaudiere and D. Soba., 1988.** Origin and evolution of the late Precambrian high-grade Yaounde gneisses (Cameroon). *Precambrian research*, 38, 91-109.
- Nzenti, J., P. Barbey and F. Tchoua., 1999.** Evolution crustale au Cameroun: éléments pour un modèle géodynamique de l'orogénèse néoprotérozoïque. *Géologie et environnements au Cameroun. Collection GEOCAM*, 2, 397-407.
- Nzenti, J., D. Minyem., J. Tchouankoue and S. Belinga., 2001.** Le panafricain. *Histoire Géologique du Cameroun. Les Classiques Camerounais*, 39-55.
- Nzenti, J. P., B. Kapajika., G. Wörner and T. R. Lubala., 2006.** Synkinematic emplacement of granitoids in a Pan-African shear zone in Central Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 45, 74-86.
- Owono, A.O. U. I., N. M. Theophile., M. Arsène., A. Stephane Patrick., N. Jean Daniel., N. Paul Claude and Y. Justine., 2019.** Evidence of Major Structural Features over the Pan-African Domain in the Bertoua-Mbangue Area (East Cameroon) from a Multiscale Approach of Modeling and Interpretation of Aeromagnetic Data. *International Journal of Geophysics*, 2019.
- Parker, R. L., 1975.** The theory of ideal bodies for gravity interpretation. *Geophysical Journal International*, 42, 315-334.

- Penaye, J., S. Toteu., R. Tchameni., W. Van Schmus., J. Tchakounté., A. Ganwa., D. Minyem and E. Nsifa., 2004.** The 2.1 Ga West central African belt in Cameroon: extension and evolution. *Journal of African Earth Sciences*, 39, 159-164.
- Phillips, J. D., 2002.** *Processing and Interpretation of Aeromagnetic Data for the Santa Cruz Basin--Patagonia Mountains Area, South-central Arizona*. US Department of the Interior, US Geological Survey Washington, DC, USA.
- Poidevin, J., 1996.** Un segment proximal de rampe carbonatée d'âge protérozoïque supérieur au Nord du craton d'Afrique centrale (sud-est de la République Centrafricaine). *Journal of African Earth Sciences*, 23, 257-262.
- Popoff, M., 1988.** Du Gondwana à l'Atlantique Sud: les connexions du fossé de la Bénoué avec les bassins du Nord-Est brésilien jusqu'à l'ouverture du golfe de Guinée au Crétacé inférieur. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 7, 409-431.
- Poudjom Djomani, Y. et M. Diament., 1992.** Modélisation 2-D d'un profil gravimétrique au Cameroun. *Stage de fin de première année de Magistère IGP*.
- Poudjom Djomani, Y. H., 1993.** Apport de la gravimétrie à l'étude de la lithosphère continentale et implications géodynamiques: étude d'un bombement intraplaque: le massif de l'Adamaoua(Cameroun).
- Poulton, M. M., B. K. Sternberg and C. E. Glass., 1992.** Location of subsurface targets in geophysical data using neural networks. *Geophysics*, 57, 1534-1544.
- Radhakrishna Murthy, I. and S. Krishnamacharyulu., 1990.** Polyfit: A Fortran 77 program to fit a polynomial of any order to potential field anomalies. *Journal of Association of Exploration Geophysicists*, 11, 99-105.
- Rasmussen, R. and L. Pedersen., 1979.** End corrections in potential field modeling. *Geophysical prospecting*, 27, 749-760.
- Rechenmann, J., 1966.** Catalogue des stations gravimétriques réoccupables en Afrique occidentale: réseau ORSTOM, mesures effectuées de 1953 à 1965. *Cahier d'ORSTOM--Série Géophysique*, 7, 195.
- Reid, A. B., J. Allsop., H. Granser., A. t. Millett and I. Somerton., 1990.** Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55, 80-91.
- Rumelhart, D. E., G. E. Hinton and R. J. Williams., 1986.** Learning representations by back-propagating errors. *nature*, 323, 533-536.
- Sarle, W. S., 1994.** Neural networks and statistical models.

- Seni, E. J., G. D. Mulibo and G. Bertotti., 2018.** Tectono-sedimentary evolution of the offshore hydrocarbon exploration Block 5, East Africa: implication for hydrocarbon generation and migration. *Open Journal of Geology*, 8, 819-840.
- Seshagiri, S. and H. K. Khalil., 2000.** Output feedback control of nonlinear systems using RBF neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 11, 69-79.
- Shuey R. T. and Pasquale Q. S., 1973.** End corrections in magnetic profile interpretation. *Geophysics*, 38, 507-512.
- Skeels, D., 1967.** What is residual gravity? *Geophysics*, 32, 872-876.
- Soba, D., 1989.** La serie du lom: etude geologique et geochronologique d'un bassin volcano-sedimentaire de la chaine panafricaine a l'est du cameroun. Paris 6.
- Soba, D., A. Michard., S. Toteu., D. Norman., J. Penaye., V. Ngako., J.-P. Nzenti et D. Dautel., 1991.** Données géochronologiques nouvelles (Rb-Sr, U-Pb et Sm-Nd) sur la zone mobile panafricaine de l'Est du Cameroun: âge protérozoïque supérieur de la série de Lom. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 312, 1453-1458.
- Sorin, F., L. Broussard et P. Roblin., 2001.** Régulation d'un processus industriel par réseaux de neurones. *Techniques de l'ingénieur. Informatique industrielle*, 6, R7582. 1-R7582. 13.
- Spector, A. and F. Grant., 1970.** Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35, 293-302.
- Stavrev, P. Y., 1997.** Euler deconvolution using differential similarity transformations of gravity or magnetic anomalies [Link]. *Geophysical Prospecting*, 45, 207-246.
- Steenland, N. C., 1988.** On:“A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps” by Bo Holm Jacobsen (*Geophysics*, 52, 1138–1148, August 1987). *Geophysics*, 53, 723-723.
- Stuart, G., J. Fairhead., L. Dorbath and C. Dorbath., 1985.** A seismic refraction study of the crustal structure associated with the Adamawa Plateau and Garoua Rift, Cameroon, West Africa. *Geophysical Journal International*, 81, 1-12.
- Tabod, C., J. Fairhead., G. Stuart., B. Ateba and N. Ntepe., 1992.** Seismicity of the Cameroon volcanic line, 1982–1990. *Tectonophysics*, 212, 303-320.
- Tadjou, J., 2004.** Apport de la gravimétrie à l'investigation géophysique de la bordure septentrionale de Craton du Congo (Sud-Cameroun). Thèse de Doctorat/Ph. D, Univ. Yaoundé I, 178 pages.

- Tadjou, J., E. Manguelle-Dicoum., C. Tabod., R. Nouayou., J. Kamguia., N. Njandjock and M. Ndougsa., 2004.** Gravity modelling along the northern margin of the Congo craton, South-Cameroon. *Journal of the Cameroon Academy of Sciences*, 4, 51-60.
- Tadjou, J. M., R. Nouayou., J. Kamguia., H. L. Kande and E. Manguelle-Dicoum., 2009.** gravity analysis of the boundary between the Congo crat and the Panafrical belt of the Cameroonon. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 102.
- Taylor, S. R. and S. M. McLennan., 1985.** The continental crust: its composition and evolution.
- Tchameni, R., 1997.** Géochimie et géochronologie des formations de l'Archéen et du Paléoprotérozoïque du Sud-Cameroun (Groupe du Ntem, Craton du Congo). Orléans.
- Tchameni, R. et N. Nsifa., 1998.** Revues des données géochronologiques sur la partie nord-ouest du craton du Congo (groupe du Ntem), Sud Cameroun. *Géosciences au Cameroun, Vicat, JP et Bilong, P.(éds). Collect. Geocam*, 1, 351-359.
- Tchoua, F., 1974.** Contribution à l'étude géologique et pétrologique de quelques volcans de la ligne du Cameroun. *Thèse, Clermont Ferrand*, 340.
- Temdjim, R., 1986.** Le volcanisme de la region de ngaoundere (adamaoua-cameroun): etude volcanologique et petrologique. Clermont-Ferrand 2.
- Temdjim, R., 2006.** Contribution à la connaissance du manteau supérieur du Cameroun au travers de l'étude des enclaves ultrabasiques et basiques remontées par les volcans de Youkou (Adamaoua) et de Nyos (Ligne du Cameroun).
- Temdjim, R., P. Boivin., G. Chazot., C. Robin et É. Rouleau., 2004.** L'hétérogénéité du manteau supérieur à l'aplomb du volcan de Nyos (Cameroun) révélée par les enclaves ultrabasiques. *Comptes Rendus Geoscience*, 336, 1239-1244.
- Temdjim, R. et F. Tchoua., 1999.** Etude de l'altération palagonitique dans les hyaloclastites du district volcanique de Ngaoundéré (Nord-Cameroun). *Géologie et environnements au Cameroun, GEOCAM*, 2, 285-292.
- Thompson, D., 1982.** EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47, 31-37.
- Tokam, A.-P. K., C. T. Tabod., A. A. Nyblade., J. Julia., D. A. Wiens and M. E. Pasyanos., 2010.** Structure of the crust beneath Cameroon, West Africa, from the joint inversion of Rayleigh wave group velocities and receiver functions. *Geophysical Journal International*, 183, 1061-1076.
- Toteu, S., W. Van Schmus., J. Penaye and A. Michard., 2001.** New U–Pb and Sm–Nd data from north-central Cameroon and its bearing on the pre-Pan African history of central Africa. *Precambrian Research*, 108, 45-73.

- Toteu, S. F., J. Penaye and Y. P. Djomani., 2004.** Geodynamic evolution of the Pan-African belt in central Africa with special reference to Cameroon. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 41, 73-85.
- Toteu, S.F., Penaye J., Maldan F., Nyama Atibagoua, B., Bouyo Houketchang, M et Sep Nlomgan, J.P., 2008.** Géologie et ressources minérales du Cameroun, 33eme congrès International de la Géologie, OSLO, Norway, p 6–14
- Trépanier, S., 2005.** Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lac–Phase 2. *Rapport du projet CONSOREM*, 3, 74.
- Van der Baan, M. and C. Jutten., 2000.** Neural networks in geophysical applications. *Geophysics*, 65, 1032-1047.
- Vicat, J. et P. Bilong., 1998.** Esquisse géologique du Cameroun. *Géosciences au Cameroun*, 1, 3-11.
- Weiss, S. M. et C. A. Kulikowski., 1991.** *Computer systems that learn: classification and prediction methods from statistics, neural nets, machine learning, and expert systems.* Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Widrow, B. and M. A. Lehr., 1990.** 30 years of adaptive neural networks: perceptron, madaline, and backpropagation. *Proceedings of the IEEE*, 78, 1415-1442.
- Won, I. and M. Bevis., 1987.** Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines. *Geophysics*, 52, 232-238.
- Zeng, D. and D. Lin., 2007.** Maximum likelihood estimation in semiparametric regression models with censored data. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 69, 507-564.
- Zurada, J., 1992.** *Introduction to artificial neural systems.* West Publishing Co.

