

## Interprétation des cartes d'anomalies gravimétriques et contribution à l'étude structurale d'un bassin sédimentaire présentant un intérêt pétrolier majeur : Cas du sous-bassin de Busira dans la Cuvette Centrale de la RDC

### [ Interpretation of gravity anomalies maps and contribution to the structural study of a sedimentary basin of major petroleum interest: Case of the Busira sub-basin in the Central basin of the DR Congo ]

*Tondozi Keto<sup>1</sup>, Eli Achille Manwana Mfumukani<sup>2</sup>, Joseph Ntibahanana Munezero<sup>2</sup>, Mpaka Mananga<sup>3</sup>, Fulgence Mulopo Shinginyeka<sup>4</sup>, Jean Felix Mupande Kapwa<sup>5</sup>, Ndiadia Kandolo<sup>1</sup>, and Mukandila Ngalula<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Department de physique, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo

<sup>2</sup>Department d'Exploration et Production, Faculté de Pétrole, Gaz et Energies Nouvelles, Université de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo

<sup>3</sup>Department de Sciences de base, Institut Supérieur des Techniques Appliquées, Kinshasa, RD Congo

<sup>4</sup>Department de Physique, Université Pédagogique Nationale, Kinshasa, RD Congo

<sup>5</sup>Ministère de Mines, Cadastre Minier, Kinshasa, RD Congo

---

Copyright © 2018 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** Le présent travail a pour objectif de faire une étude structurale du sous-bassin de Busira en se basant sur l'interprétation des cartes d'anomalies gravimétriques. Ce sous-bassin qui est une zone d'intérêt pétrolier majeur, est situé dans la Cuvette Centrale de la R.D. Congo. Les valeurs d'anomalies de Bouguer nous ont permis de localiser des zones de hautes et basses intensités qui correspondraient respectivement à des horsts et des fossés. Notons aussi que les changements abrupts d'intensités et les resserrements des courbes d'iso-anomalies constituent les signatures gravimétriques classiques des failles. Pour mieux étudier notre bassin sédimentaire, nous avons recouru à la méthode de séparation régionale-résiduelle. C'est l'interprétation des cartes d'anomalies régionales qui nous a permis de mieux connaître la structure du socle de notre bassin sédimentaire. Ces cartes 2D et 3D d'anomalies régionales ont été élaborées en soustrayant les bruits aux anomalies de Bouguer. L'analyse des valeurs d'intensités d'anomalies régionales, de la forme des courbes d'iso-anomalies et des profils tracés sur ces cartes a abouti à la mise en évidence des zones affaissées (fossés ou grabens) et des zones surélevées (horsts) qui sont séparées par des failles. Nous avons aussi recouru, au traçage des profils sur la carte d'anomalies résiduelles et à des corrélations avec les profils sismiques effectués dans ce secteur permettant de déceler plusieurs structures géologiques d'un très grand intérêt pétrolier. L'application des filtres directionnels nous a permis de localiser avec précision plusieurs failles probables ou autres contacts géologiques et d'établir leurs directions préférentielles.

**MOTS-CLEFS:** horst, graben, filtrage, faille, profil sismique, contact géologique.

**ABSTRACT:** The aim of this work is to make a structural study of the Busira sub-basin based on the interpretation of the gravimetric anomaly maps. This sub-basin, which is an area of major oil interest, is located in the Central Basin of the D.R. Congo. The Bouguer anomaly values allowed us to locate areas of high and low intensities which correspond respectively to horsts and

ditches. Note also that the abrupt changes in intensities and the tightening of the iso-anomalous curves constitute the classical gravimetric signatures of the faults. For a better study our sedimentary basin, we used the regional-residual separation method. It is the interpretation of the maps of regional anomalies which allowed us to better know the structure of the basement of our sedimentary basin. These 2D and 3D maps of regional anomalies were elaborated by subtracting the noises to the Bouguer anomalies. Analysis of intensity values of regional anomalies, the shape of the iso-anomaly curves and the profiles traced on these maps resulted in the identification of the collapsed areas (grabens) and raised areas (horsts) that are separated by faults. We also resorted to the tracing gravity profiles on the map of residual anomalies and correlations with seismic profiles made in this area to detect several geological structures of a very large oil interests. The application of the directional filters allowed us to precisely locate several probable faults or others geological contacts and to establish their preferential directions.

**KEYWORDS:** horst, graben, filtering, fault, seismic profile, geological contact.

## 1 INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, le bassin sédimentaire de la Cuvette Centrale a fait l'objet des études visant l'amélioration des connaissances sur sa structure et l'évaluation de ses potentialités pétrolières. Ces études, basées sur la géochimie, la géologie et la géophysique ainsi qu'aux forages des puits, ont permis de retenir que ce gigantesque bassin sédimentaire aurait un intérêt pétrolier majeur en mettant en évidence des roches mères potentielles, des voies de migration, des roches réservoirs et des pièges possibles. Cependant, la Cuvette Centrale est subdivisée en plusieurs sous-bassins sédimentaires où nous constatons une absence d'études structurales circonscrites dans chaque sous-bassin, étant donné que les études structurales qui ont été réalisées à l'échelle régionale s'avèrent donc muettes quand il s'agit de donner plus de détails sur les structures géologiques d'une zone relativement moins vaste telle que le sous-bassin du Busira. En considération des problèmes susmentionnés, nous estimons qu'une étude structurale basée sur l'interprétation des cartes d'anomalies gravimétriques du sous-bassin de Busira, s'avère nécessaire pour améliorer les connaissances à l'échelle de son étendue.

## 2 METHODOLOGIE ET MATERIELS UTILISES

La méthodologie employée pour la réalisation de cette étude se résume en trois étapes :

- La première étape est celle d'acquisition des données. Elle a consisté à répertorier toutes les stations de mesures gravimétriques localisées dans le sous-bassin de Busira dans une base des données ;
- A la deuxième étape, nous avons procédé au traitement des données et à la cartographie des résultats obtenus. Pour ce faire, nous avons recouru aux méthodes de séparation régionale – résiduelle et de filtrage directionnel pour le traitement des données. La méthode d'interpolation par krigeage nous a été nécessaire pour la cartographie des résultats ;
- La troisième étape c'est celle de l'interprétation des résultats. A cette étape, il a été question de donner une signification géologique et structurale aux anomalies observées sur les cartes gravimétriques élaborées.

Les logiciels informatiques ci-dessous, nous ont permis d'accomplir ce travail. Il s'agit notamment de : Geosoft Oasis montaj, OriginPro, ArcGis, Golden Surfer, etc.

## 3 APERÇU GENERALE DU SOUS-BASSIN DE BUSIRA

### 3.1 CADRE GEOGRAPHIQUE

#### 3.1.1 LOCALISATION

Le sous-bassin de Busira s'étale sur une très grande aire située au Nord-Ouest de la R.D.C (fig.1). Il est entièrement localisé à l'intérieur du bassin sédimentaire de la Cuvette Centrale et il couvre trois provinces qui sont : l'Equateur, la Tshuapa, la Mongala et une partie du Sud Ubangi. Il est situé entre 2° de latitude Nord et 2° de latitude Sud ainsi que 18° et 23° de longitude Est.

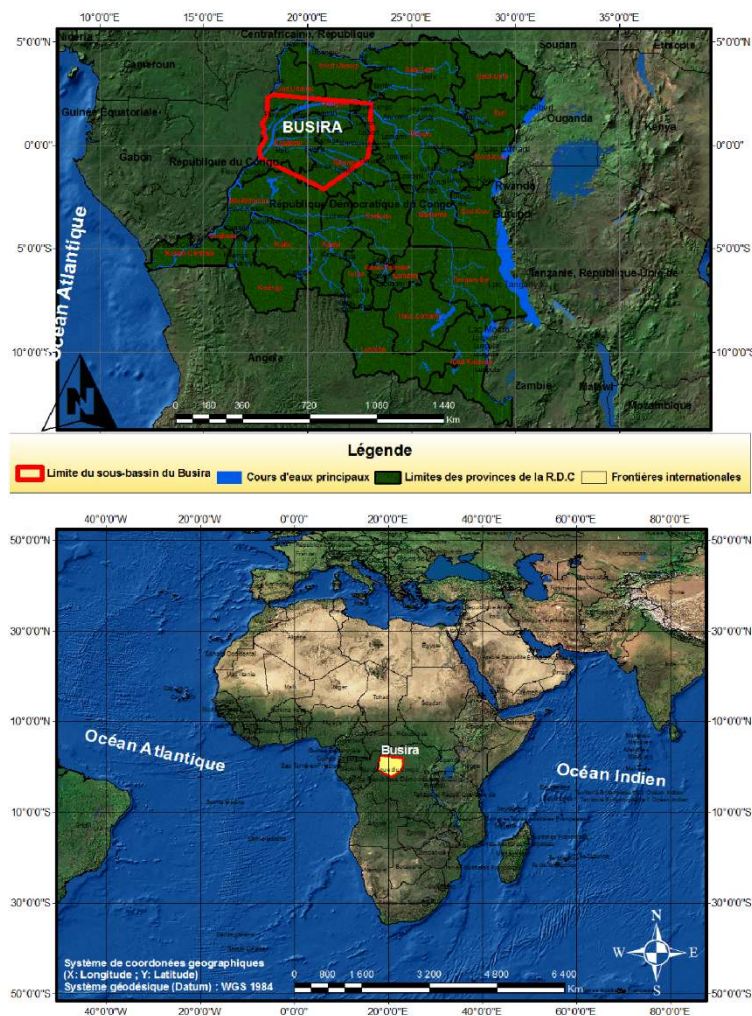


Fig. 1. Localisation géographique du sous-bassin de Busira

### 3.1.2 RELIEF ET HYDROGRAPHIE

Le sous-bassin de Busira est entièrement situé dans la plaine alluviale de la Cuvette Centrale et sa grande partie est occupée par des basses terres marécageuses ou inondables. Son altitude varie de 300 m à proximité de la rivière Salonga dans la province de la Tshuapa à 500 m toujours dans la Tshuapa.

La zone est traversée par le fleuve Congo qui, avec ses nombreux affluents constituent l'artère vitale du point de vue transport (fig.2). Elle est aussi traversée par un réseau dense de rivières tels que : Salonga, Ikelemba, Tshuapa, Ruki, Lopori, Maringa etc. Il est à noter que ce dense réseau hydrographique a révélé son importance lors de la phase d'acquisition des données sismiques car la majorité des lignes sismiques ont été tracées le long des principaux cours d'eaux qui arrosent cette zone à végétation luxuriante.

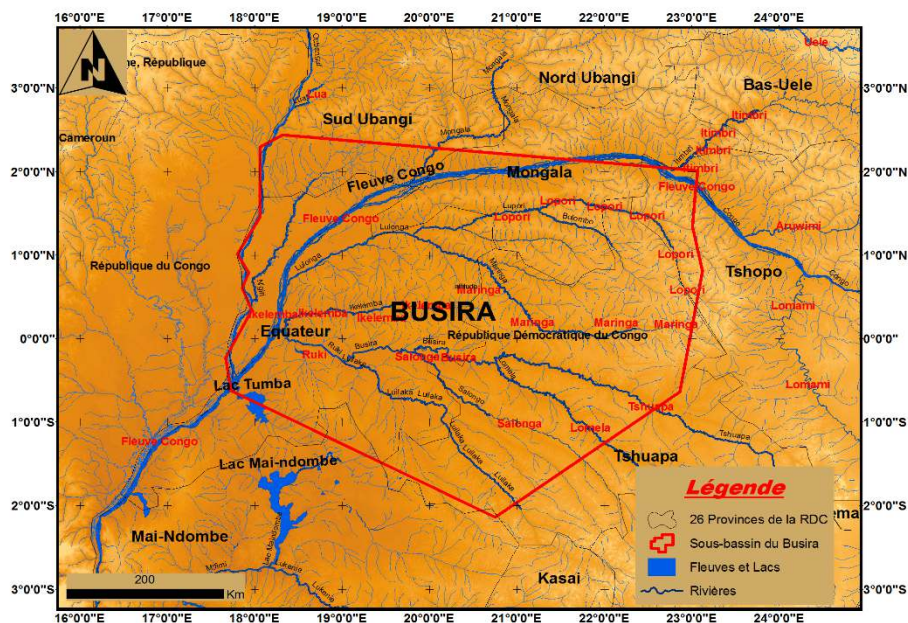


Fig. 2. Carte hydrographique du sous-bassin de Busira

### 3.1.3 VEGETATION ET CLIMAT

Le sous-bassin de Busira est situé en pleine forêt équatoriale et sa végétation est dominée par la forêt dense humide de type ombrophile sempervirente. On y observe aussi des forêts inondables et/ou marécageuses qui longent des rivières et des ruisseaux.

L'ensemble du paysage connaît un climat de type équatorial de la zone Af selon la classification de Koppen, avec une pluviométrie annuelle moyenne de l'ordre de 2000 mm et une saisonnalité peu marquée. Dans cette zone, la saison sèche est quasi inexistante mais on y enregistre une diminution des pluies en Janvier et Février. La période la plus humide va d'Août à Octobre et la durée de la période la moins pluvieuse (Janvier-Février) est inférieure à 2 mois (COMIFAC, 2005[1]).

### 3.2 CADRE GEOLOGIQUE

Des études géologiques, géophysiques et géochimiques relativement récentes ainsi que les forages des puits d'exploration et stratigraphiques ont contribué à la compréhension de la géologie du bassin sédimentaire de la Cuvette Centrale. Une carte géologique simplifiée de notre zone d'étude a donc été élaborée à l'issue de ces études (fig.3).

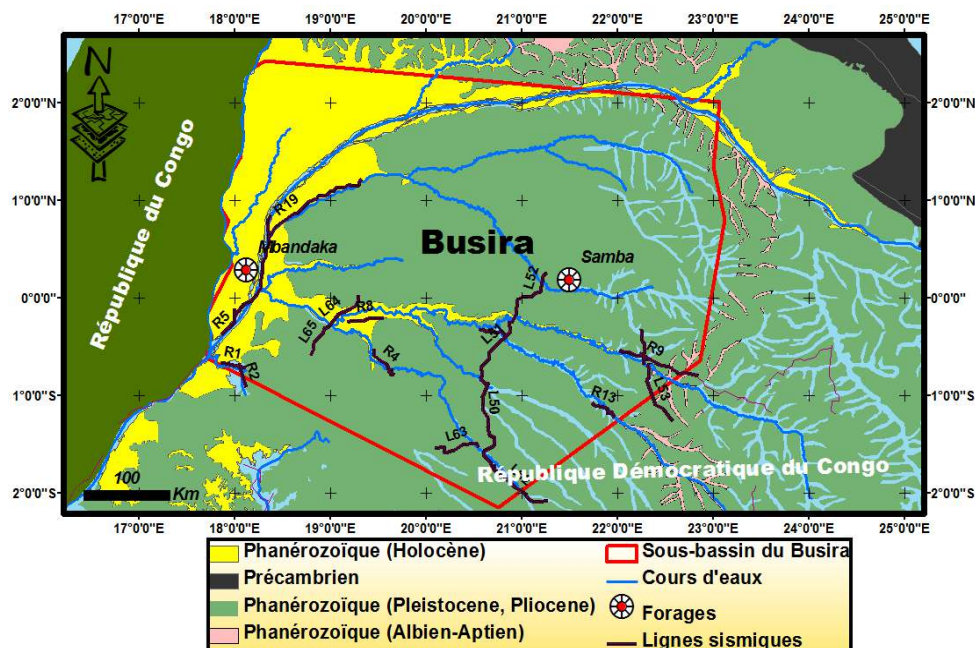


Fig. 3. Carte géologique simplifiée du sous-bassin de Busira

Sur cette carte, nous remarquons que l'Ouest du sous-bassin est occupé par des sédiments quaternaires (Holocène) beaucoup plus récents tandis que sa plus grande partie contient des sédiments tertiaires (Pliocène) et quaternaires (Pléistocène).

Sa stratigraphie commence par les formations du Néoprotérozoïque et se termine par des grès et des sables ocres d'origine fluviatile et éolienne beaucoup plus récents (tertiaires et quaternaires).

Quatre puits ont été forés dans la Cuvette Centrale (ENI, 2011[2]) dont deux sont localisés dans le sous-bassin du Busira. Il s'agit des forages Samba (profondeur totale : 2038 m) et Mbandaka (profondeur totale : 4350 m) qui sont respectivement stratigraphique et d'exploration. Ce dernier qui est le plus profond n'a jamais atteint le socle cristallin, il s'est plutôt arrêté dans les dépôts massifs de sel.

### 3.3 INTERET PETROLIER

Les études géochimiques faites par Victoria SASCHE and al. 2012[3], sur base des échantillons de roches issus du forage stratigraphique de Samba, ont mis en évidence des roches mères potentielles avec d'excellentes valeurs de T.O.C et des indices d'hydrogène élevés reflétant le kérogène de bonne qualité (type I ou II), notamment pour les groupes de Stanleyville et Loia. D'autres études géochimiques antérieures réalisées dans la Cuvette Centrale par JNOC en 1984 et 1986 [4], ECL en 1988 [5] et HRT en 2007 [6] ont identifié les argilites d'Alolo, de Mamungi et de Kole comme des roches mères potentielles. Ces formations ont été traversées par le forage d'exploration de Mbandaka.

Plusieurs études géophysiques et géologiques réalisées dans la Cuvette Centrale (JNOC, 1984 et 1986 ; ENI, 2011 ; Kadima and al., 2011 et 2015 [4], [2], [7]) ont pu mettre en évidence des structures géologiques pouvant constituer des pièges et des voies de migration dans le sous-bassin du Busira.

## 4 TRAITEMENT DES DONNEES ET CARTOGRAPHIE DES RESULTATS OBTENUS

### 4.1 PRESENTATION DES DONNEES

Les données gravimétriques utilisées dans ce travail ont été acquises par la voie terrestre. Cette acquisition des données fut l'œuvre de la Société de Recherche Minière en Afrique (REMINA) entre les années 1952 et 1956. D'après le Secrétariat Général aux Hydrocarbures (R.D.C), le levé qui a produit ces données est localisé dans les sous-bassins de Busira et de Lokoro. Dans le sous-bassin de Busira nous avons répertorié plus de 1300 mesures gravimétriques.

Ces données nous ont été procurées par le Laboratoire de SIG et Cartographie Numérique de la Faculté de Pétrole, Gaz et Energies Nouvelles de l'Université de Kinshasa en collaboration avec la Société Nationale des Hydrocarbures (SONAHYDROC) et sont présentées sur une base de données en format MS Excel. Le tableau 1 ci-dessous montre la structure de la base de données gravimétriques utilisées. Notons cependant qu'il n'est pas aisé de représenter l'ensemble de ces données dans ce travail suite à leur multitude, ce qui justifie le choix des 10 premières stations, à titre illustratif.

**Tableau 1 : Représentation et structure des données gravimétriques utilisées**

N°	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)	Gravité (mGal)	Air libre (mGal)	Bouguer (mGal)
01	20,9767	-1,92	436	977865,9	-59,5	-100,1
02	20,945	-1,88	321	977877	-61,2	-97,1
03	20,9217	-1,8567	353	977868,6	-59,6	-99,1
04	20,865	-1,7967	341	977869,8	-61,8	-99,9
05	20,8267	-1,7533	319,5	977876,3	-61,8	-99,9
06	20,8083	-1,7233	345,5	977870	-59,7	-97,3
07	20,755	-1,7033	314,5	977876,6	-62,5	-98,4
08	20,7267	-1,6733	329	977872,1	-62,5	-97,7
09	20,6933	-1,6433	312,5	977875,4	64,1	-99,3
10	20,95	-1,62	312	977876,8	-62,7	-99,1

## 4.2 TRAITEMENT DES DONNEES

En prospection gravimétrique, le traitement des données a pour but de séparer les anomalies, de mieux préciser les profondeurs des sources, de représenter les limites géologiques telles que les contacts ou les failles, etc. (J. Dubois, 2011[8]). Une panoplie de méthodes de traitement est donc disponible selon le but recherché. L'objectif de ce travail étant de faire l'étude structurale d'une zone d'intérêt pétrolier majeur, nous avons utilisé les méthodes de séparation régionale-résiduelle et de calcul du gradient horizontal (filtrage directionnel) des anomalies de Bouguer.

### 4.2.1 SEPARATION REGIONALE-RESIDUELLE

Une fois toutes les corrections appliquées sur les données gravimétriques brutes, on obtient une carte de l'anomalie de Bouguer qui montre en général deux caractéristiques (Chouteau, 2002 [9]) :

- Des variations régulières et continues du champ gravitationnel sur de grandes distances appelées « anomalies régionales ». Elles sont produites par les hétérogénéités à grandes profondeurs ;
- Superposées à ces anomalies régionales, et souvent masquées par celles-ci, on observe aussi des petites perturbations locales du champ gravitationnel qui sont petites en dimensions mais primordiales. Elles sont appelées « anomalies résiduelles » et sont produites par des structures superficielles.

Les anomalies régionales correspondent aux basses fréquences du signal total. Elles sont rehaussées pour étudier la structure du socle métamorphique ou magmatique d'un bassin sédimentaire. Quant aux anomalies résiduelles qui correspondent aux hautes fréquences du signal total, elles sont analysées pour faire l'étude des structures géologiques de faible profondeur situées généralement dans la couverture sédimentaire. Nous comprenons dès lors que nous pouvons raisonner en termes de fréquence et soumettre les données d'anomalies de Bouguer à une analyse qui recherchera des fréquences en provenance de différents niveaux, les hautes fréquences appartenant aux anomalies résiduelles et les basses fréquences appartenant aux anomalies régionales.

Dans notre cas, nous avons appliqué les filtres fréquentiels passe-bas et passe-haut sur les données d'anomalies de Bouguer. Ces filtres fréquentiels effectuent donc une distinction précise dans le domaine des fréquences pour un signal d'entrée donné (Philip Kearey, 2002[10]). Les filtres passe-bas ont éliminé les hautes fréquences du signal et ont effectué un lissage des contours d'isoanomalies. Ce genre de filtre donne donc des cartes de contours plus lisses que celles du signal total. Quant aux filtres passe-haut, ils ont enlevé les variations de fond et rehaussé certains détails de faible profondeur. C'est ainsi que sur base de cette méthode de séparation régionale-résiduelle nous avons élaboré des cartes d'anomalies régionales et résiduelles de notre zone d'étude (fig.4).

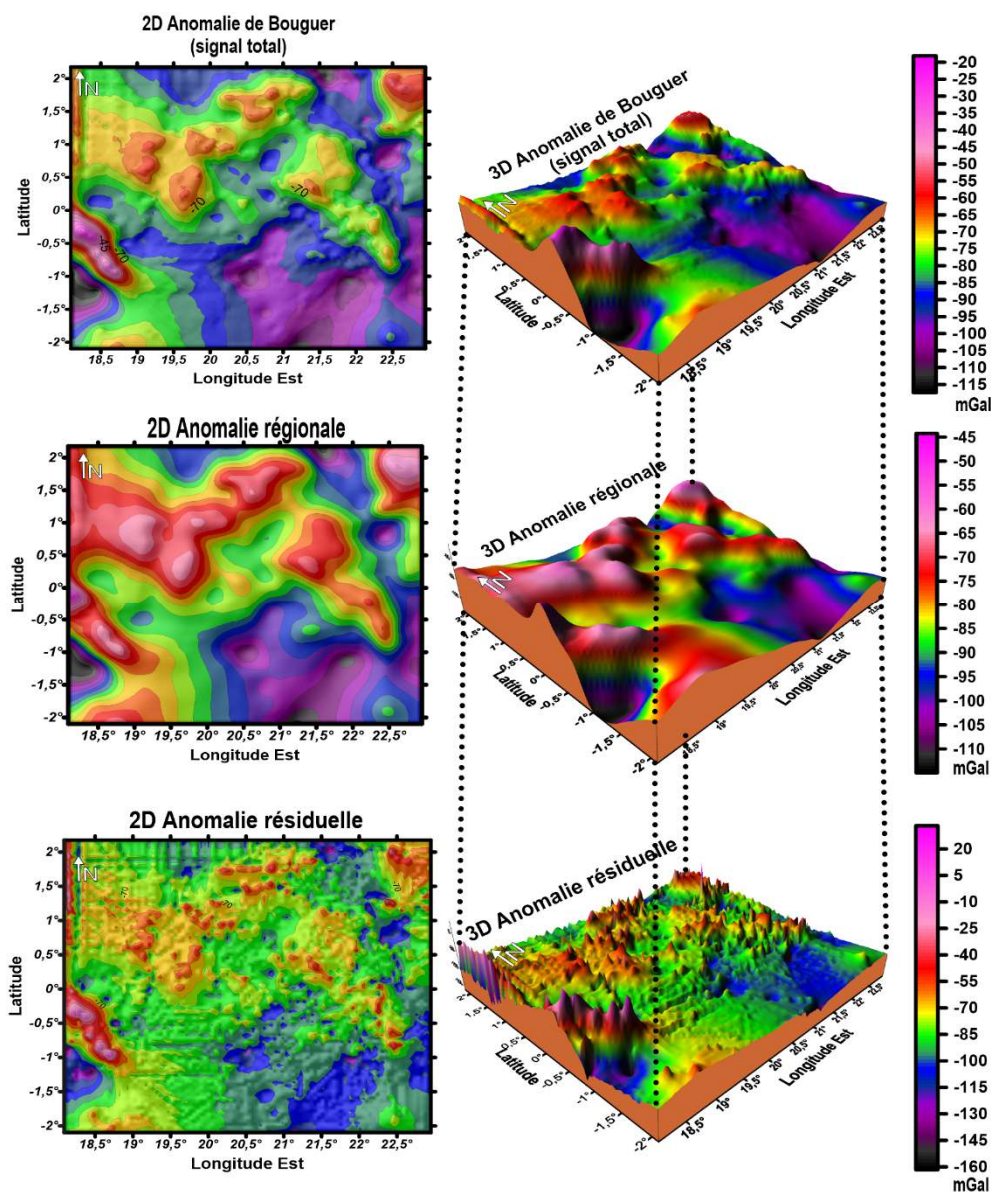


Fig. 4. Séparation régionale - résiduelle des anomalies

#### 4.2.2 FILTRAGE DIRECTIONNEL DES ANOMALIES DE BOUGUER

En imagerie géophysique, plus précisément en gravimétrie, l'application des filtres directionnels est la méthode la plus efficace dans la détection des contacts entre blocs de densités différentes (linéaments gravimétriques) et l'établissement de leur direction préférentielle. La confirmation sur la nature géologique de ces contacts étant l'œuvre de l'intégration de toutes les données géologiques (structurales, stratigraphiques, etc.) et géophysiques (sismiques, magnétométriques, gravimétriques, etc.) de la zone étudiée, ces contacts sont considérés en gravimétrie comme des failles probables.

Ces filtres directionnels calculent les gradients horizontaux des anomalies de Bouguer. En effet, au-dessus d'un contact vertical l'anomalie est matérialisée par une courbe ayant un minimum du côté des roches de faible densité et un maximum du côté des roches de densité élevée (N. El Goumi et al., 2010[11]). Le point d'inflexion de la courbe se trouve à l'aplomb de ce contact. Cependant, après calcul du gradient horizontal, cette anomalie devient un maximum, ce qui facilite la cartographie du contact. L'avantage de ces filtres directionnels est qu'après calcul du gradient horizontal, les anomalies deviennent maximales à l'aplomb des contacts ou des failles tels que de part et d'autre existe un contraste de densité. C'est ce qui facilite et améliore la perception et la cartographie de ces contacts à partir des données d'anomalies de Bouguer. Ainsi pour tenter de mettre en

évidence un nombre maximum de failles probables dans notre secteur d'étude, nous avons procédé aux filtrages dans 4 directions : N-S ; E-W ; NE-SW ; NW-SE.

#### 4.3 CARTOGRAPHIE DES RESULTATS OBTENUS

En prospection gravimétrique, comme dans toute autre investigation géophysique, il est obligatoire de présenter les résultats obtenus sous forme des cartes. Ceci dans le but de faciliter la visualisation et l'interprétation de la variation du paramètre géophysique calculé et/ou mesuré. C'est dans cette optique que nous avons présenté les résultats des traitements évoqués ci-haut de manière claire sur des cartes. Les stations gravimétriques de notre zone d'étude étant aléatoirement espacées car elles avaient été acquises par la voie terrestre le long des voies accessibles (routes et cours d'eaux), Il nous a donc été indispensable de convertir ces données ponctuelles en grille en choisissant la méthode d'interpolation adéquate pour mieux les cartographier.

La méthode d'interpolation choisie est le krigeage car elle permet l'interpolation exacte des données (estimation ponctuelle) et la propriété de lissage qui implique que les valeurs estimées sont moins dispersées que les valeurs vraies connues. Les cartes élaborées ici seront présentées au point 5 de ce travail.

#### 5 INTERPRETATION DES CARTES D'ANOMALIES GRAVIMETRIQUES

Les cartes d'anomalies gravimétriques sont les documents de base pour toute interprétation en prospection gravimétrique. Le but de leur interprétation est de trouver la distribution des sources : contrastes de densité et géométries qui créent les anomalies observées en surface. En effet, Les anomalies gravimétriques sont sensibles aux contrastes de densité du sous-sol et les sources principales qui les induisent dans un bassin sédimentaire sont les structures géologiques (fig.5).

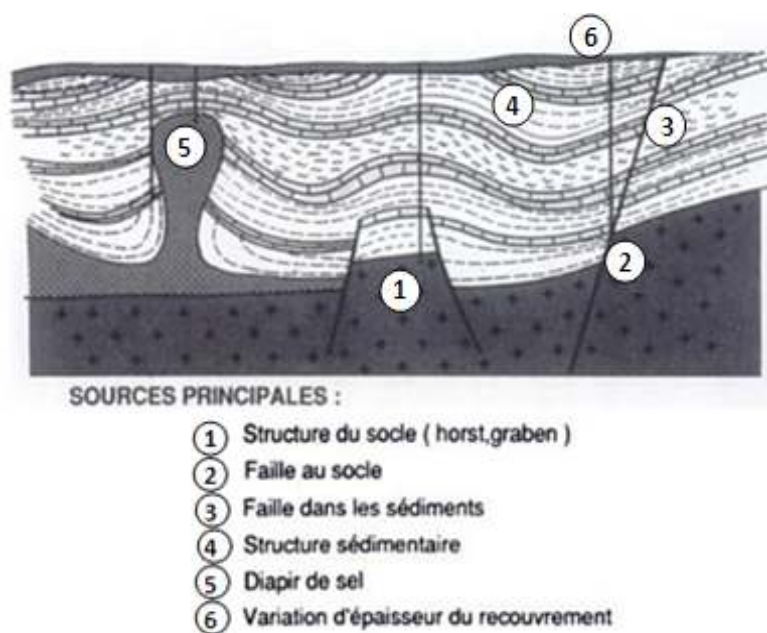


Fig. 5. Illustration des sources principales des contrastes de densité dans un bassin sédimentaire (G. Henry, 1994 [12])

Nous comprenons donc que pour faire une étude structurale d'une région donnée à l'aide de la gravimétrie, il faudra rechercher minutieusement, sur les cartes d'anomalies gravimétriques, toutes les signatures gravimétriques qui expriment la présence des structures géologiques. C'est ainsi que nous avons fait l'interprétation de toutes les cartes gravimétriques élaborées à l'issue des procédés de traitement de données (corrections, filtrages, interpolation, etc.) pour faire une étude structurale plus complète.



## 5.1 LA CARTE D'ANOMALIES DE BOUGUER (SIGNAL TOTAL)

### 5.1.1 INTERPRETATION EN FONCTION DE L'INTENSITE ET LA FORME DES COURBES D'ISO-ANOMALIES

En fonction de l'intensité des anomalies, nous constatons sur les cartes d'anomalies de Bouguer (fig.6) que le Sud de notre sous-bassin est dominé par les anomalies légères variant entre -115 mGals et -96 mGals (couleur mauve foncée) précisément dans les territoires de Boende, Bokungu et Monkoto. Cependant, nous remarquons que les parties centrale et occidentale de notre sous-bassin sont caractérisées par des valeurs élevées d'anomalies de Bouguer.

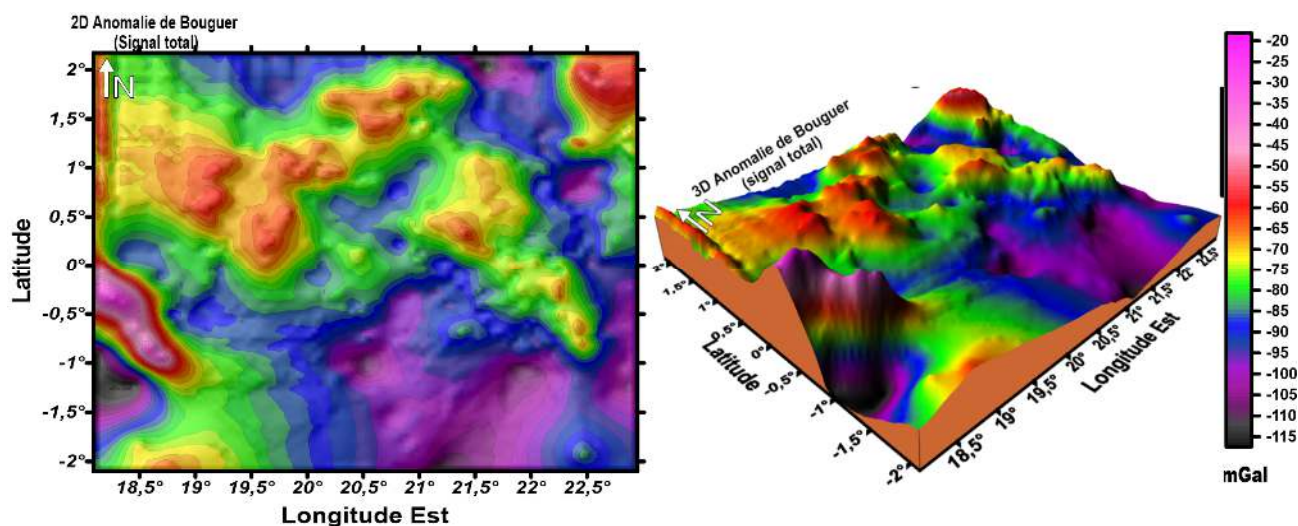


Fig. 6. Cartes d'anomalies de Bouguer (signal total) représentées en fonction de l'intensité

En fonction de la forme des contours d'iso-anomalies, la carte ci-dessous (fig.7) met en évidence des anomalies quasi-circulaires concentriques et des anomalies linéaires.

La forme de contours d'iso-anomalies prédominante est la forme linéaire. Quant aux anomalies quasi-circulaires concentriques, elles sont observées vers l'Est, le centre et le Sud de la zone d'étude. Cette carte met aussi en évidence des zones de resserrement des courbes d'iso-anomalies qui peuvent être interprétées comme étant des contacts entre des matériaux de densités différentes ou des failles. A l'Ouest, une structure gravimétrique particulière est bien identifiée aussi bien sur la carte en couleurs que sur celle des contours d'iso-anomalies. Elle a une forme elliptique à courbes concentriques et est caractérisée par une augmentation considérable des valeurs d'intensités d'anomalies (haut gravimétrique). Nous constatons la présence des zones de resserrement des courbes d'iso-anomalies autour de cette structure concentrique. Ces zones, qui mettent en évidence un énorme contraste de densité entre le haut gravimétrique et les matériaux environnants, ont des signatures gravimétriques se rapprochant nettement de celles des failles.

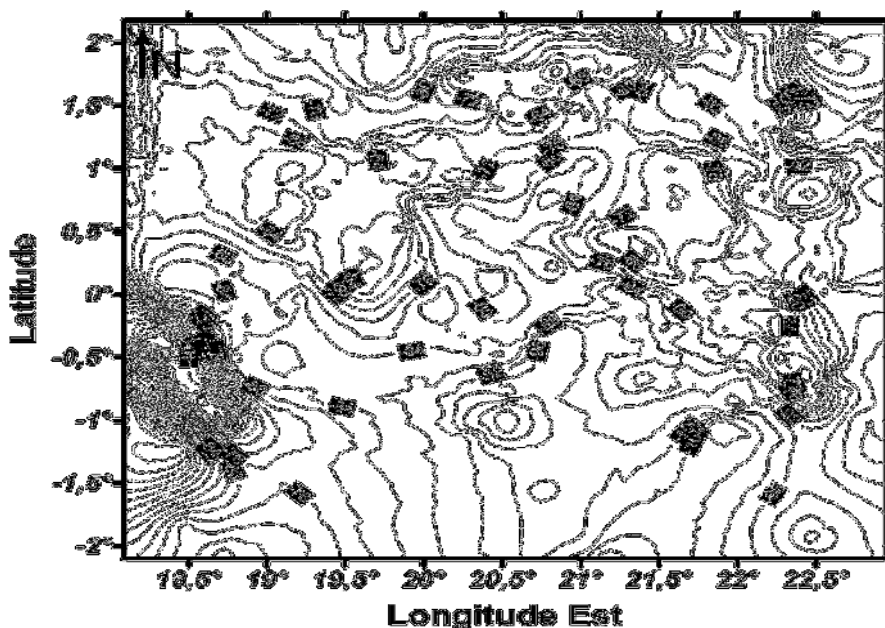


Fig. 7. Carte d'anomalies de Bouguer (signal total) représentée en fonction des courbes d'iso-anomalies

## 5.2 LA CARTE D'ANOMALIES REGIONALES

### 5.2.1 INTERPRETATION EN FONCTION DE L'INTENSITE ET LA FORME DES COURBES D'ISO-ANOMALIES

En analysant la carte d'intensités d'anomalies régionales en 2D et en 3D (fig.8), nous constatons une petite ressemblance avec les cartes d'intensités d'anomalies de Bouguer (signal total). Malgré cette ressemblance palpable des deux types de cartes, nous remarquons cependant que le relief de la carte d'anomalies régionales comporte moins d'aspérités que celui de la carte d'anomalies de Bouguer (signal total). Ce lissage du relief de la carte d'anomalies régionales prouve que les bruits de hautes fréquences liées aux anomalies superficielles de courte longueur d'onde ont été éliminés grâce à l'application du filtre passe-bas sur le signal total.

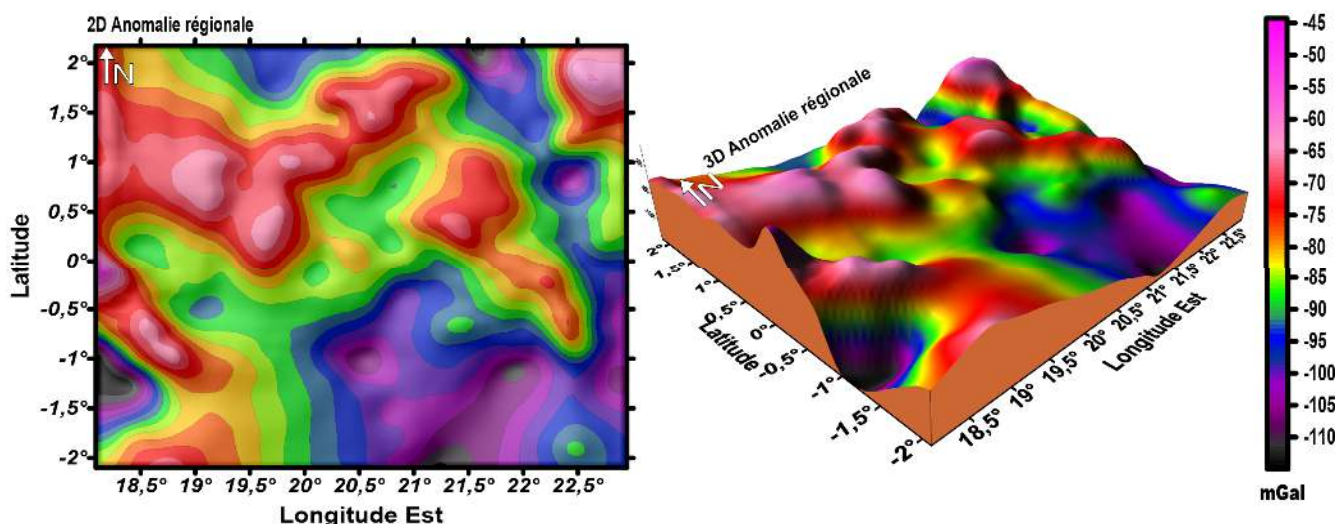
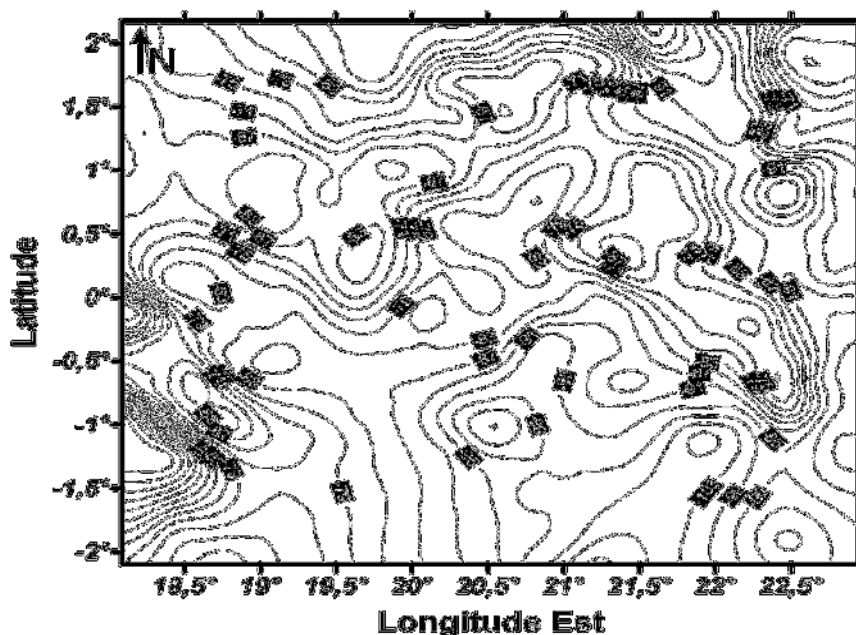


Fig. 8. Cartes d'anomalies régionales représentées en fonction de l'intensité

Sur cette carte nous remarquons la présence des matériaux de forte densité mise en évidence par des valeurs élevées d'anomalies régionales dans les parties centrale et occidentale de notre sous-bassin. Le grand fossé identifié sur les cartes

d'anomalies de Bouguer devient très nette sur notre carte d'anomalies régionales. Nous trouvons donc qu'il s'agirait d'une énorme dépression au socle du sous-bassin du Busira.

Sur la carte de contours d'anomalies régionales (fig.9), nous observons quasiment la même disposition des contours que sur la carte du signal total. Cependant, nous constatons que les contours d'iso-anomalies de cette carte sont plus lisses que sur la carte du signal total. La structure de forme elliptique à courbes concentriques identifiée à l'Ouest de notre zone d'étude sur la carte de contours du signal total apparait moins nette sur cette carte de contours d'anomalies régionales. Notons que l'atténuation de l'effet de cette zone anormale sur une carte représentant les variations des masses géologiques profondes révèle que ce haut gravimétrique est une gigantesque structure localisée probablement dans la couverture sédimentaire.

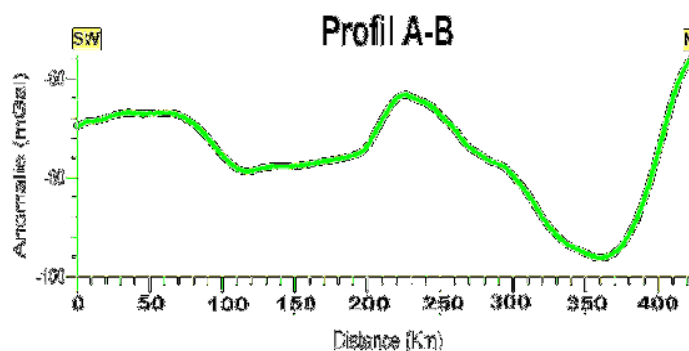


*Fig. 9. Carte d'anomalies régionales représentée en fonction des courbes d'iso-anomalies*

### 5.2.2 INTERPRETATION EN FONCTION DES PROFILS

Les profils gravimétriques sont très importants dans le suivi des signatures gravimétriques de plusieurs modèles structuraux. Ainsi, dans le but de recouper toutes les formes d'anomalies (linéaires et quasi-circulaires) et de couvrir l'ensemble de notre sous-bassin pour mieux étudier l'aspect structural du socle précambrien, nous avons tracé trois longs profils gravimétriques sur notre carte d'anomalies régionales : Les profils A-B, M-N et P-Q.

#### 5.2.2.1 PROFIL A-B



*Fig. 10. Profil A-B*

Le profil A-B ci-dessus (fig.10), ayant une orientation SW-NE, recoupe principalement la partie Nord de notre zone d'étude. On remarque la présence d'une inflexion de la courbe où la valeur de l'anomalie décroît de -64 à -80 mGals sur la distance comprise entre 60 de et 110 Km mettant en évidence un contraste de densité se rapprochant nettement de la signature gravimétrique d'une faille.

Au milieu de notre profil, nous remarquons la présence d'un haut gravimétrique et à l'Est du profil nous observons une forte dépression gravimétrique avec des valeurs qui atteignent -98 mGals. Une telle dépression est une signature gravimétrique caractéristique d'un fossé.

### 5.2.2.2 PROFIL M-N

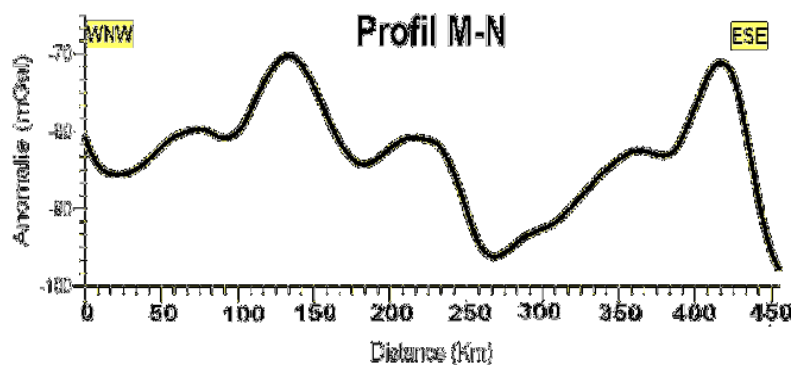


Fig. 11. Profil M-N

Le profil M-N ci-dessus (fig.11), ayant une orientation WNW-ESE, est tracé dans la partie centrale de notre sous-bassin. On y observe une courbe d'anomalie très fluctuante et accidentée mettant en évidence plusieurs hauts et dépressions gravimétriques. Ces fluctuations sont probablement induites par la présence des failles au niveau du socle. Nous remarquons également un très grand contraste de densité mis en évidence par l'inflexion de la courbe sur la distance comprise entre 230 et 260 Km. Cette zone où le contraste d'anomalie est très fort (-80 et -96 mGals respectivement pour la partie élevée et la partie affaissée) révèle la signature gravimétrique d'une énorme faille au socle.

### 5.2.2.3 PROFIL P-Q

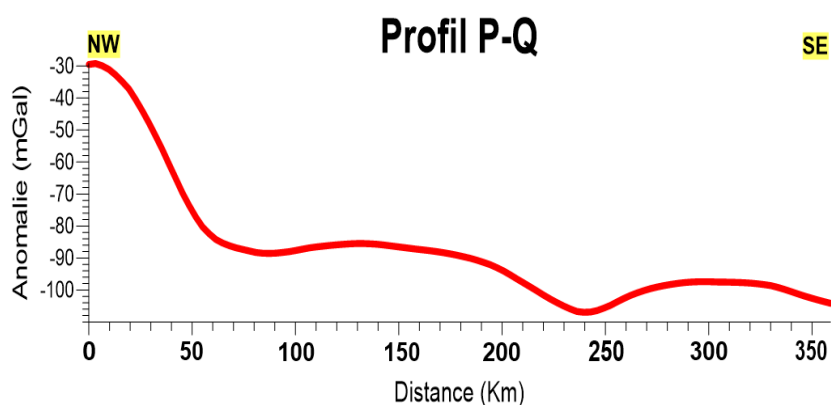


Fig. 12. Profil P-Q

Le profil P-Q ci-dessus (fig.12), ayant une orientation NW-SE et tracé au Sud de notre zone d'étude, nous remarquons de très grandes valeurs d'anomalies à l'Ouest du profil. Cette zone représente l'endroit où les valeurs d'anomalies régionales sont les plus élevées dans le sous-bassin de Busira. On constate en revanche, une décroissance significative des valeurs d'anomalies

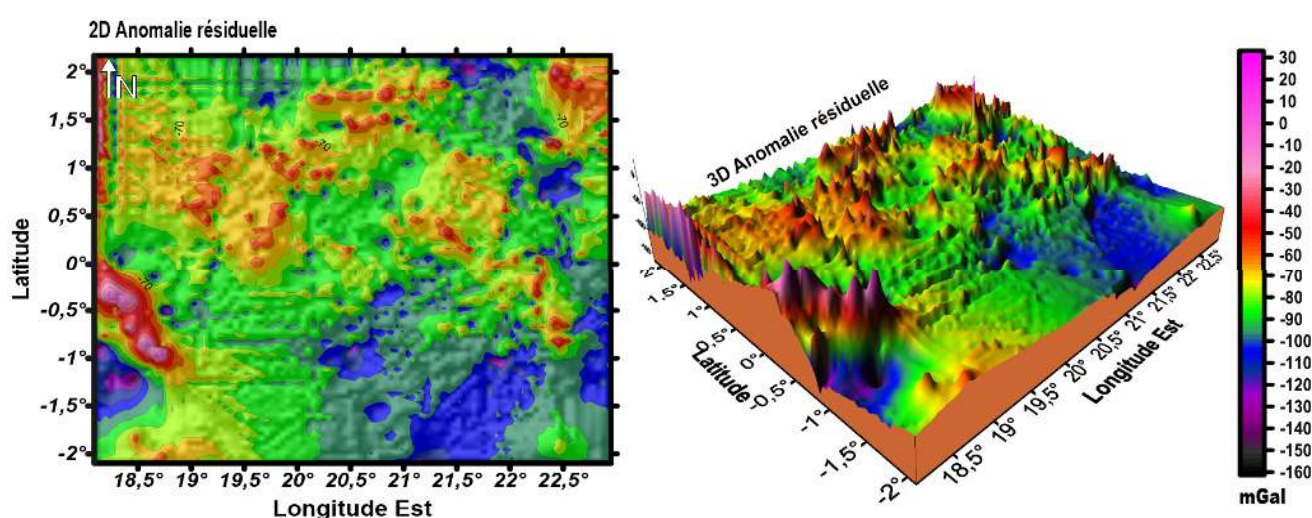
régionales dans toute la région située à l'Est du haut gravimétrique avec d'importantes anomalies négatives sur une grande distance. Il s'agit de la signature gravimétrique d'une grande dépression localisée au Sud de notre sous-bassin avec des anomalies inférieures ou égales à -90 mGal.

### 5.3 LA CARTE D'ANOMALIES RESIDUELLES

#### 5.3.1 INTERPRETATION EN FONCTION DE L'INTENSITE

Rappelons que les sources génératrices de ces anomalies de faibles longueurs d'ondes sont généralement les structures géologiques localisées dans la couverture sédimentaire (dôme de sel, failles, plis, etc.). La carte d'anomalies résiduelles (fig.13) a donc été obtenue en faisant la différence entre l'anomalie de Bouguer et l'anomalie régionale.

En fonction de l'intensité des anomalies, nous observons des anomalies de faible amplitude à variation rapide latérale. Le haut gravimétrique visible de manière nette sur la carte d'anomalies de Bouguer (signal total) y est aussi représenté. On y voit également des creux gravimétriques de très faible extension marquant la présence des matériaux superficiels de faible densité.



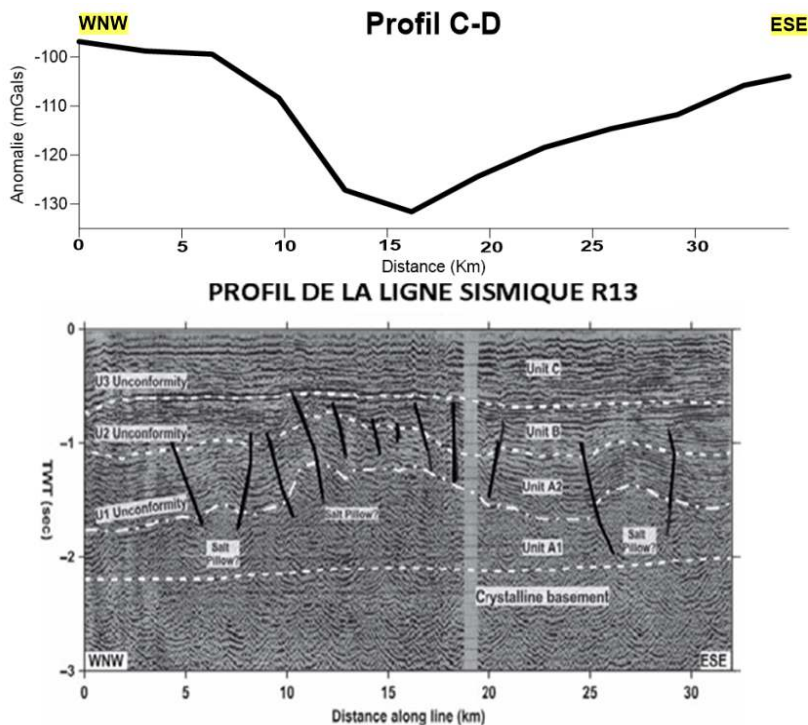
*Fig. 13. Cartes d'anomalies résiduelles représentées en fonction de l'intensité.*

#### 5.3.2 INTERPRETATION EN FONCTION DES PROFILS

Pour renforcer notre interprétation, nous avons tracé les profils gravimétriques **C-D** et **E-F** sur notre carte d'anomalies résiduelles et nous les avons corrélés respectivement avec les profils sismique-réflexions **R13** et **R5** situés aux mêmes endroits et orientés dans les mêmes directions.

##### 5.3.2.1 PROFIL C-D

Le profil C-D d'anomalies résiduelles a été tracé au même endroit et dans la même orientation que le profil sismique-réflexion de la ligne R13 dans le but de faciliter la corrélation (fig.14).



**Fig. 14. Corrélation du profil C-D avec le profil sismique R13**  
(Source du profil sismique : (Kadima & al., 2011[7])

Au milieu du profil gravimétrique, nous observons un enfoncement de la courbe d'anomalies révélant la présence d'un matériau de très faible densité. L'ampleur de cet enfoncement des valeurs d'anomalies résiduelles nous révèle que le corps perturbateur est une gigantesque masse de faible densité. La corrélation avec le profil sismique de la ligne R13 nous montre que ces faibles valeurs d'anomalies résiduelles résultent probablement d'un dôme de sel. Ce profil sismique met aussi en évidence plusieurs discontinuités d'impédances acoustiques qui sont interprétées (hormis celles étant horizontales représentant des discordances majeures) comme étant des failles, et met également en évidence plusieurs structures plissées. Ces structures sont certainement générées par la tectonique salifère.

En outre, en faisant une analyse visuelle de la carte d'anomalies résiduelles, nous remarquons que le haut gravimétrique localisé à l'Ouest de notre zone d'analyse "kiri high" apparaît de manière nette. Cette structure apparaît comme une montagne de haute intensité gravimétrique orientée dans une direction NW-SE sur cette carte. Notons que ce haut gravimétrique était déjà localisable sur la carte du signal total cependant elle apparaît plus large mais moins intense sur la carte d'anomalies régionales (fig.15).

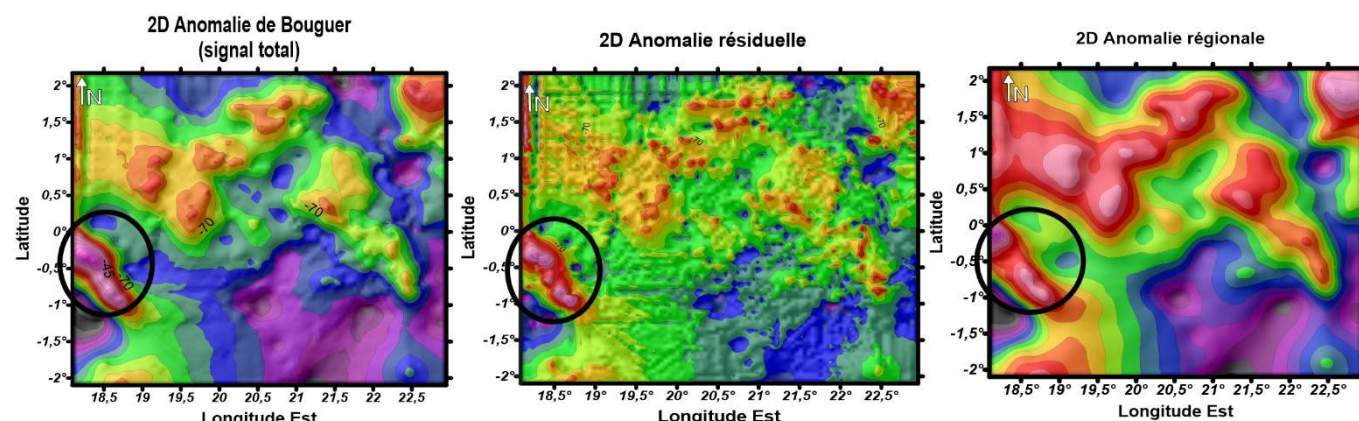


Fig. 15. Localisation du KIRI HIGH sur les cartes d'anomalies gravimétriques

Pour mieux interpréter cette signature gravimétrique particulière, nous avons tracé un profil d'anomalies résiduelles pour suivre la signature gravimétrique de la couverture sédimentaire et un profil d'anomalies régionales pour suivre la signature gravimétrique du socle à cet endroit. La figure 16 ci-dessous nous montre les signatures gravimétriques régionale et résiduelle de cette zone.

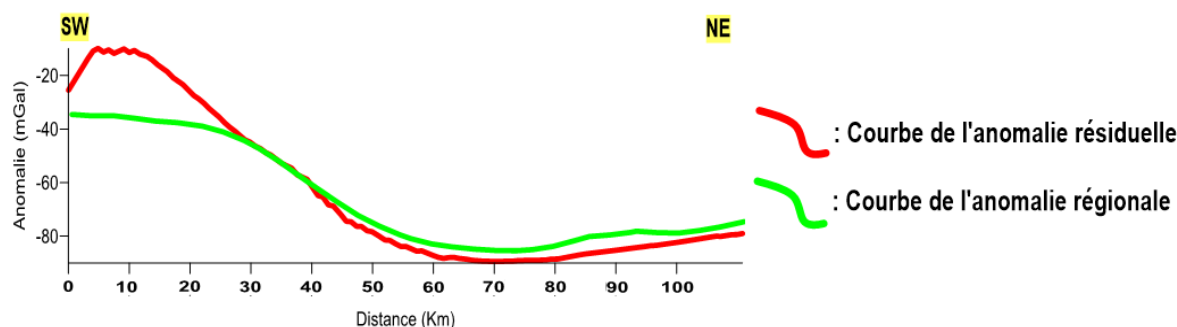


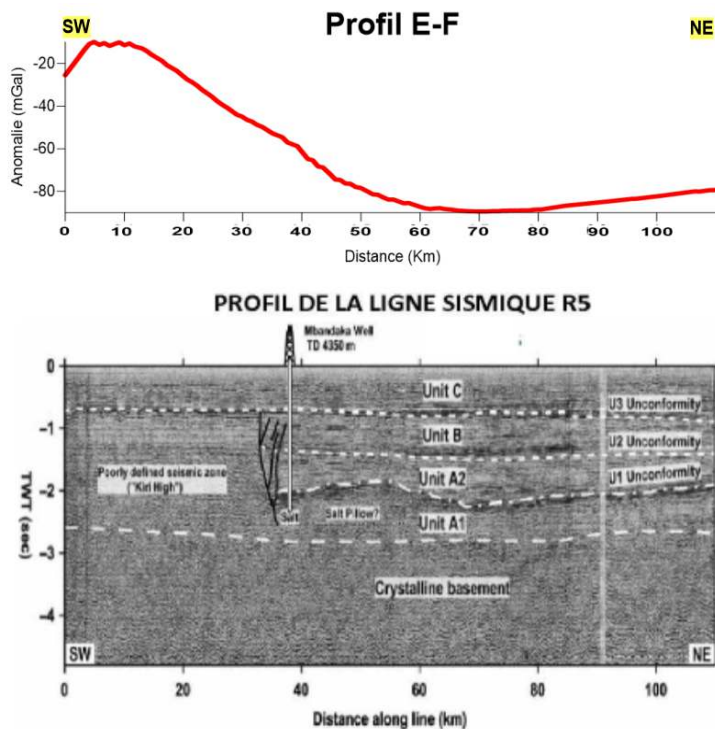
Fig. 16. Signatures gravimétriques régionale et résiduelle du KIRI HIGH

A l'issue de cette figure, nous pouvons ressortir les observations suivantes :

- Sur la courbe d'anomalies régionales, il y a une faible variation d'anomalies entre la structure étudiée et son environnement. Notons aussi que sur cette courbe, toutes les valeurs sont négatives (le pic des valeurs étant de -45 mGals). Nous pouvons alors dire qu'il s'agit de la signature gravimétrique d'un faible soulèvement du socle car un important uplift de celui-ci induirait d'importantes anomalies régionales positives.
- Cependant, la courbe d'anomalies résiduelles nous montre de hautes intensités d'anomalies au-dessus de cette structure. En gravimétrie cette situation peut être interprétée de diverses manières, raison pour laquelle nous allons corrélater ce profil, que nous appelons E-F, avec le profil sismique de la ligne R5 (fig.17).

### 5.3.2.2 PROFIL E-F

Sur la corrélation de la figure 17 ci-dessous, nous voyons que les grandes valeurs d'anomalies résiduelles sur le profil E-F se raccordent parfaitement avec la zone où il y a absence de réflecteurs ou discontinuités majeurs (poorly defined seismic zone "kiri high") sur le profil de la ligne sismique R5.



**Fig. 17. Corrélation du profil E-F avec le profil sismique R5**  
(Source du profil sismique : (Kadima & al., 2011[7])

Le profil E-F met en évidence un contraste de densité énorme entre sa partie Ouest caractérisée par de hautes intensités d'anomalies (supérieure à -20 mGals) et sa partie Est dont les valeurs d'anomalies résiduelles chutent considérablement pour atteindre des valeurs inférieures à -85 mGals. L'hypothèse d'un important soulèvement du socle étant déjà exclue, en analysant le contexte géologique de la zone, la seule structure qui pourrait causer une augmentation des anomalies résiduelles comme celle-ci est probablement un dôme de sel muni d'un cap rock très dense et compact.

Rappelons que les interfaces géologiques, appelées aussi réflecteurs, repérées en sismique-réflexion sont les surfaces de séparation d'impédances acoustiques différentes. L'impédance acoustique d'une roche est égale au produit de sa masse volumique par la vitesse de propagation  $V_P$  pour les ondes P (ou ondes de compression) ou  $V_S$  pour les ondes S (ou ondes de cisaillement) (Lavergne M., 1986[13]). Il est à noter aussi que les vitesses des ondes  $V_P$  et  $V_S$  dépendent largement des paramètres physiques de la roche qu'elles traversent. Ces paramètres physiques sont : les constantes élastiques (module de rigidité ou de cisaillement  $\mu$ , module d'incompressibilité  $K$ , etc.) et la densité.

L'absence notable des réflecteurs éminents dans cette zone à l'Ouest du profil sismique peut se traduire comme une certaine homogénéité des constantes élastiques et de la densité du matériau traversé par les ondes de volume à cet endroit du profil. Nous remarquons aussi sur ce profil que la séquence A1 (Unit A1) dans laquelle s'est terminé le forage de Mbandaka est occupée par une épaisse couche de sel. Nous voyons que le matériau homogène traversé par les ondes de volume à cet endroit est très probablement un gigantesque dôme de sel.

Cette hypothèse explique parfaitement les grandes valeurs d'anomalies résiduelles observées sur le profil gravimétrique E-F car l'existence très fréquente d'un "cap rock" très compact et relativement plus dense que le dôme de sel sur lequel il repose produit de très grandes valeurs d'anomalies.

#### 5.4 LES CARTES ISSUES DU FILTRAGE DIRECTIONNEL

Comme nous l'avons évoqué ci-haut, nous avons procédé aux filtrages dans 4 directions (N-S ; E-W ; NE-SW ; NW-SE) dans le but de mettre en évidence un nombre maximum de failles probables dans notre zone d'étude (fig.18).



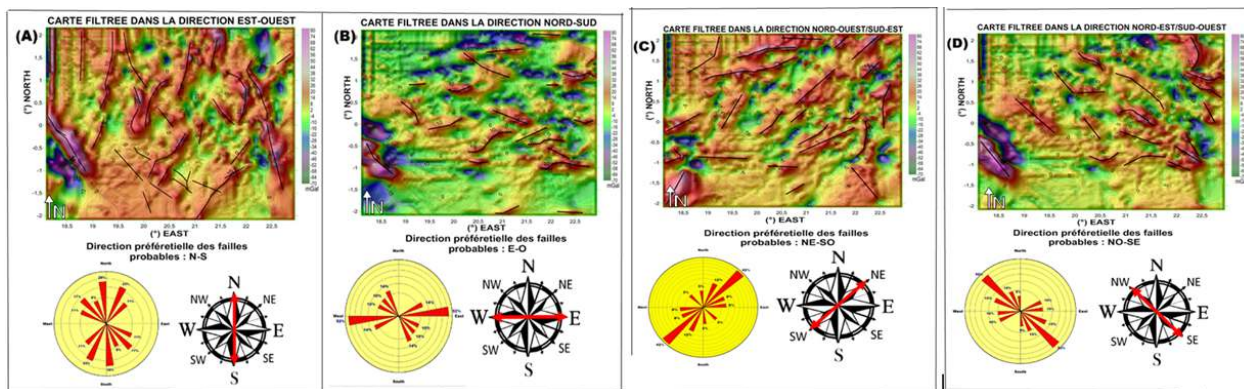


Fig. 18. Cartes issues du filtrage directionnel

Nous remarquons sur les quatre cartes présentées sur la figure ci-dessus que la majorité des failles mises en évidence sont perpendiculaires à la direction du filtre appliqué. La figure 19 (A) par exemple nous montre la carte filtrée dans la direction Est-Ouest. Sur cette carte, la direction préférentielle d'alignement des failles est : Nord-Sud. La flèche rouge de la rose de vent et le diagramme circulaire nous l'indique. Ainsi pour mieux faire l'étude structurale de notre zone d'étude, nous avons superposé toutes les failles probables rehaussées dans notre zone d'étude par filtrage directionnel (fig.19).

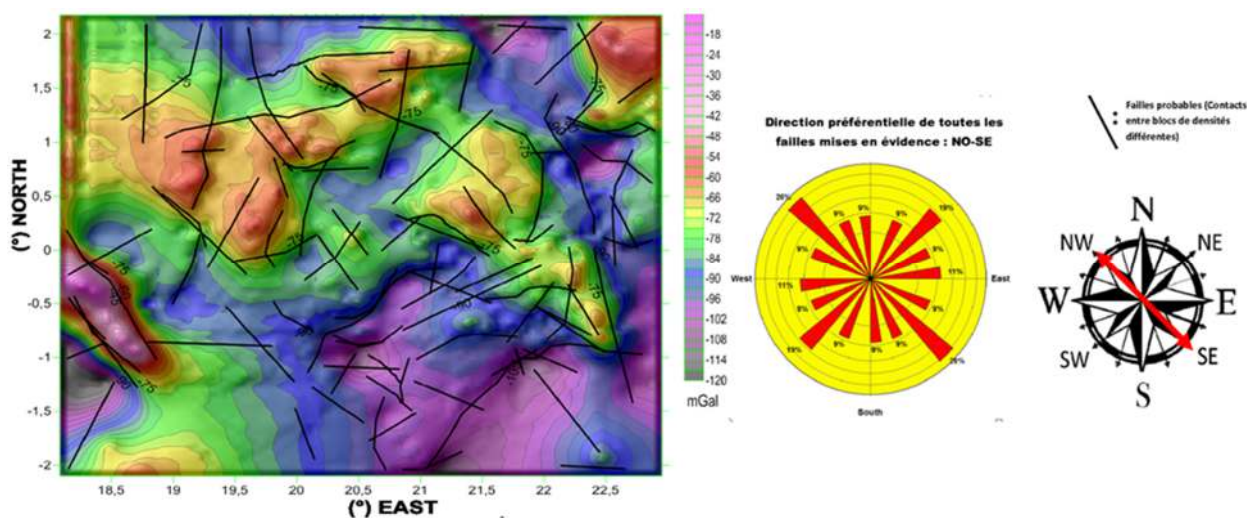


Fig. 19. Carte gravimétrique composite des failles probables dans le sous-bassin de Busira

## 6 CONTRIBUTION DE L'INTERPRETATION DES CARTES D'ANOMALIES GRAVIMÉTRIQUES A L'ETUDE STRUCTURALE DU SOUS-BASSIN DU BUSIRA

L'interprétation des différentes cartes d'anomalies gravimétriques nous a permis de mieux connaître la structure du sous-bassin du Busira. En effet, notre zone d'étude est incluse dans le bassin sédimentaire de la Cuvette Centrale. Ce dernier est une grande dépression intracratonique qui a un socle cristallin composé de roches magmatiques et métamorphiques précambriennes (archéennes à mésoprotérozoïques) (Kadima & al., 2015[7]). D'après Japan National Oil Corporation (1984)[4], la densité moyenne de ce socle cristallin serait de 2,73. Le champ de gravité mesuré par le satellite GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) dans la Cuvette Centrale montre d'importantes anomalies négatives en son centre, ce qui confirme la présence d'une zone profonde localisée au centre du bassin. Cette zone correspond à une grande dépression au niveau du socle cristallin et un épaissement corrélatif de la couverture sédimentaire de faible densité.

Ce fossé est localisé dans la partie Sud du sous-bassin du Busira car celui-ci est situé au Nord-Ouest de la Cuvette Centrale. Il s'agit d'une dépression profonde et de grande extension latérale caractérisée par d'importantes anomalies négatives variant entre -115 mGals et -96 mGals précisément dans les territoires de Boende, Bokungu et Monkoto et comblée par une épaisseur importante des sédiments. Cette gigantesque structure a été mise en évidence sur la carte d'anomalies de Bouguer (Signal total) ainsi que sur la carte d'anomalies régionales et sur le profil P-Q. Cette dépression représente donc une zone d'intérêt pétrolier majeur car, d'une manière générale, les bassins sédimentaires d'intérêt pétrolier majeur sont remplis par plusieurs kilomètres de sédiments. Ces grandes épaisseurs de sédiments appelées « dépôts centres » sont des lieux propices pour la génération des hydrocarbures car les conditions de maturation des roches mères sont proportionnelles à leur profondeur d'enfouissement. Signalons que plusieurs autres zones de faibles anomalies régionales sont également localisées comme des dépressions du socle de notre zone d'étude.

Nous constatons, en revanche, des zones relativement hautes autour de ces fossés. Ces zones de hautes intensités d'anomalies régionales apparaissent comme des horsts ou des uplifts du socle entourant ces grandes dépressions. Notons aussi que les inflexions des courbes des différents profils d'anomalies régionales ont révélé plusieurs signatures gravimétriques des failles au socle de notre zone d'analyse.

Plusieurs structures localisées au sein de la couverture sédimentaire ont été mises en évidence à l'aide de l'interprétation de la carte d'anomalies résiduelles. La corrélation gravimétrie-sismique ainsi que les informations stratigraphiques issues du puits Mbandaka ont été d'une importance capitale dans cette interprétation structurale. En effet, la stratigraphie du puits Mbandaka nous révèle que la strate la plus profonde pénétrée par ce puits est une couche salifère massive datant du Néoprotérozoïque (Kadima & al. 2011[7]). Dans notre analyse des profils gravimétriques et sismiques, nous constatons que cette couche se distingue de son environnement par ses propriétés physiques particulières, à savoir : sa faible densité par rapport aux roches sus-jacentes, sa plasticité exceptionnelle et sa grande mobilité.

La faible densité de cette couche par rapport aux roches sus-jacentes l'a rendue facilement détectable sur la carte d'anomalies résiduelles et sur le profil C-D car elle a induit de faibles intensités d'anomalies résiduelles. Sa plasticité exceptionnelle lui a conféré une mobilité hors du commun et cette dernière a provoqué, sous le poids des sédiments sus-jacents, des mouvements ascensionnels verticaux de cette couche et qui sont responsables d'une intense tectonique halocinétique. C'est cette tectonique qui a causé l'apparition de plusieurs structures plissées (plis diapirs, anticlinaux, flexures) et discontinues (failles) observables sur les profils gravimétriques (inflexions des courbes) et clairement sur les profils sismiques. Nous constatons donc que la tectonique salifère a joué un très grand rôle dans l'aspect structural de la couverture sédimentaire de notre zone d'étude.

Il est à noter aussi qu'en analysant les valeurs d'intensités d'anomalies, les faibles valeurs d'anomalies résiduelles suivent l'allure des fossés identifiés sur la carte d'anomalies régionales. Nous pouvons ainsi dire qu'il y a un épaissement de cette couche salifère dans les dépressions du socle de notre zone d'étude (fig.20).

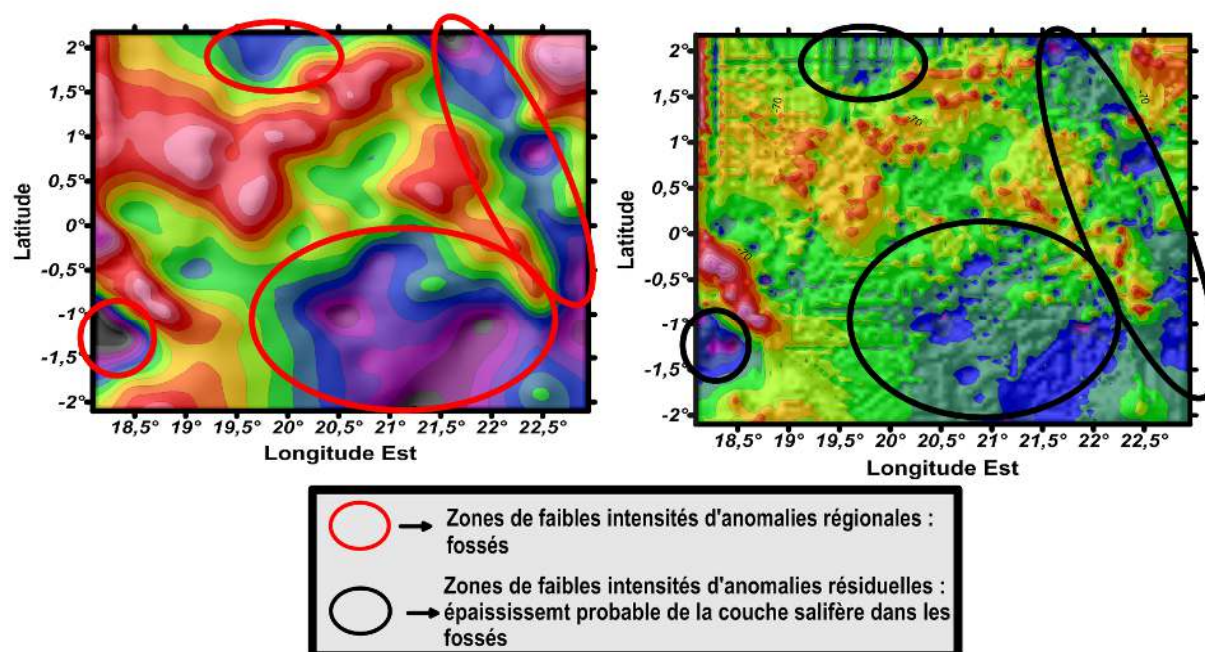


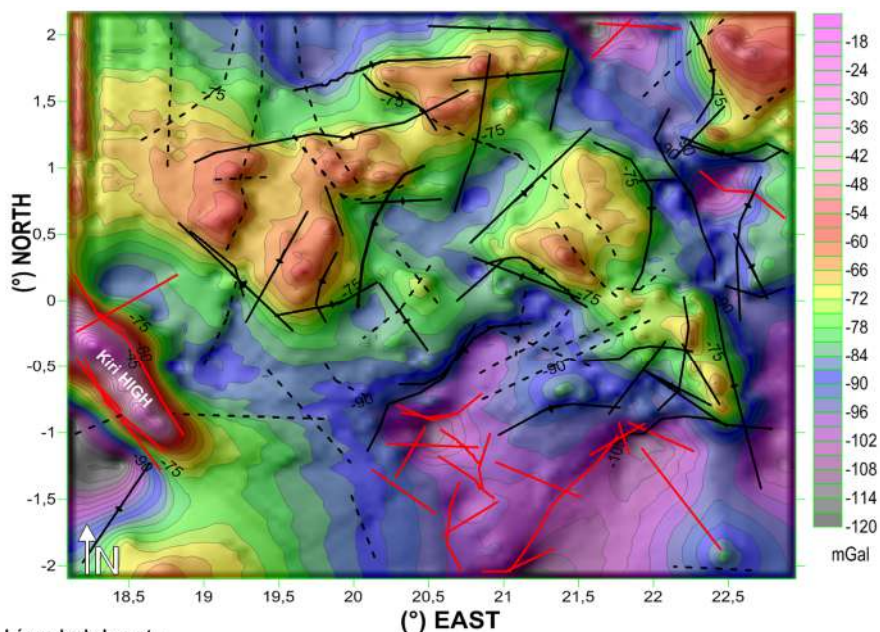
Fig. 20. Epaissement de la couche salifère dans les dépressions.

L'épaississement de cette couche salifère a aussi été mis en évidence par le profil de la ligne sismique R13 localisé au Sud de notre sous-bassin. Nous pouvons aussi signaler une importante continuité latérale de la couche salifère dans cette zone en voyant l'étalement des faibles anomalies résiduelles. En outre, signalons que l'analyse des structures géologiques générées par cette tectonique salifère montre qu'il y a une croissance d'Ouest en Est de l'intensité des déformations liées à cette tectonique. A l'Ouest, hormis le gigantesque dôme de sel du Kiri High et plusieurs failles en relation avec cette structure, nous remarquons que sur une grande surface la tectonique salifère a eu un faible impact sur les couches. Les déformations sont faibles et les couches sont presque planes et tabulaires dans cette zone. Cependant, à l'Est du sous-bassin, plus précisément dans le grand fossé, les mouvements verticaux du sel ont générés de grandes déformations. On y observe plusieurs dômes de sel, des failles et des plis anticlinaux.

Cette forte tectonique halocinétique dans le grand fossé peut être expliquée par l'épaississement de la couche salifère et le poids des sédiments sus-jacents à cette couche. En effet, dans notre zone d'étude la couche salifère se situe parmi les couches les plus profondes du remplissage sédimentaire car elle se trouve au sein de l'unité sismique A1 qui repose directement sur le socle cristallin (voir fig. 18 et 14). Dans le grand fossé, la série sédimentaire est très épaisse et l'action attractive de la pesanteur favorise ainsi l'enfoncement des roches sus-jacentes à cette couche salifère. Ce qui cause des remontées de la couche salifère perçant et déformant intensément les roches sus-jacentes. Notons aussi que les tectoniques de compression panafricaine et permo-triasique (Hercynien) ont largement favorisé les mouvements verticaux de cette couche salifère du Néoprotérozoïque.

Les cartes issues du filtrage directionnel ont mis en évidence plusieurs failles dans le sous-bassin du Busira, ce dernier s'inscrivant dans le cadre tectonique et structural du bassin sédimentaire de la Cuvette Centrale. En effet, la Cuvette Centrale a subi plusieurs des phénomènes tectoniques au cours de son évolution structurale. Les phénomènes de rifting panafricain (Néoprotérozoïque), les tectoniques de compression panafricaine et hercynienne (Permo-Triasique) ainsi que l'intense tectonique salifère qui a été mise en évidence dans cette étude ont largement contribué à la génération de plusieurs failles dans notre zone d'étude, ce qui explique la présence des multiples failles rehaussées par le filtrage directionnel des anomalies.

A l'issue de l'interprétation de nos cartes d'anomalies gravimétriques, nous avons établi une carte gravi-structurale qui est une carte composite représentant les anomalies gravimétriques ainsi que les éléments structuraux mis en évidence dans le sous-bassin du Busira (fig.21).



**Légende de la carte**

**Hauts intensités d'anomalies** (Hauts gravimétriques) avec les couleurs rosâtre, rouge et jaune claire (valeurs d'anomalies situées entre -18 et -72 mGals  
 ► **Voir échelle d'intensité** : Horsts, zones où le socle est surélevé. (Exception faite pour le Kiri high qui est un dôme de sel).

**Faibles intensités d'anomalies** (dépressions gravimétriques) avec les couleurs verte, bleue, mauve et mauve foncée (valeurs d'anomalies situées entre -72 et -120 mGals ► **Voir échelle d'intensité** : fossés (grabens) et présence d'une épaisse couche salifère.



: **Contours d'isogrammes quasi-circulaires et concentriques** exprimant la présence des structures en dôme. (Dômes de sel probables, plis diapirs, anticlinaux).



: **failles normales** séparant les fossés (zones de faibles intensités d'anomalies) et les horsts (zones de hautes intensités d'anomalies).



: **failles localisées** dans les fossés et entourant des anomalies quasi-circulaires, ces failles sont probablement liées au phénomène d'halocinèse.



: **failles** dont la nature et les condition de genèse sont indéterminées.

**Fig. 21. Carte gravi-structurale du sous-bassin de Busira**

Sur la carte ci-dessus, nous ressortons les observations suivantes :

- Les valeurs d'intensités d'anomalies gravimétriques nous montrent parfaitement la configuration structurale de notre sous-bassin. En effet, les hautes intensités d'anomalies traduisent les signatures gravimétriques des horsts qui sont des zones où la couverture sédimentaire est peu profonde tandis que les faibles valeurs d'intensités résultent des fossés qui sont des zones où la couverture sédimentaire atteint une épaisseur maximale. Notons aussi que la carte d'anomalies résiduelles nous a indiqué que les faibles valeurs d'intensités d'anomalies résultent d'un épaissement probable d'une couche salifère dans les fossés de notre zone d'analyse ;
- Les anomalies quasi-circulaires et concentriques nous révèlent les signatures gravimétriques des structures en forme de dôme (dômes de sel probables), des plis diapirs ou des anticlinaux. Ces structures d'intérêt pétrolier majeur résultent probablement des tectoniques de compression et/ou des phénomènes d'halocinèse ;
- Les failles normales (traits noirs) se localisent aux bordures des fossés (zones de faibles intensités d'anomalies gravimétriques) et les séparent des horsts (zones de hautes intensités d'anomalies gravimétriques). Ces failles résultent donc probablement d'une tectonique d'extension ;
- Les failles localisées au sein des fossés et entourant les anomalies quasi-circulaires (traits rouges) sont probablement liées au phénomène d'halocinèse. Les tectoniques de compression ont largement favorisé les mouvements verticaux du sel dans la Cuvette Centrale. Ces failles sont donc probablement de type inverse ;

- Les failles en traits noirs discontinus représentent celles dont la nature et les conditions de genèse n'ont pas été déterminé.

## **7 CONCLUSION**

En guise de conclusion, nous disons que notre zone d'étude comporte des horsts caractérisés par de intensités élevées d'anomalies et des fossés qui sont des zones de basses intensités d'anomalies. Cette configuration structurale confère un très grand intérêt pétrolier aux zones de basses intensités d'anomalies (fossés) car ce sont des zones propices pour la maturation des roches mères. Cependant, les horsts ne doivent pas être négligés car s'ils se caractérisent par de hautes intensités d'anomalies de Bouguer et régionales, ces dernières restent toujours négatives. Ce qui signifie que l'épaisseur des sédiments est aussi considérable au-dessus de ces structures et que les roches mères peuvent donc aussi atteindre leur degré de maturation. L'analyse des anomalies résiduelles en corrélation avec les profils sismiques ainsi que l'application du filtrage directionnel des anomalies a permis de détecter plusieurs structures géologiques ayant un très grand intérêt pétrolier : les anticlinaux sont d'excellents pièges à pétrole, les failles peuvent aussi constituer des pièges (pièges par failles) mais elles peuvent aussi favoriser la migration ou la dysmigration des hydrocarbures et, les dômes de sel jouent un très grand rôle dans la genèse des structures géologiques pouvant piéger les hydrocarbures et constituent des roches couvertures par excellence.

En guise de perspective d'avenir, nous suggérons que :

- Une étude de magnétométrie soit réalisée avec les mêmes méthodes de traitements utilisées dans cette étude pour avoir plus de précision sur la structure du socle du sous-bassin du Busira ;
- Une sismique 2D soit réalisée sur base des informations issues de cette analyse pour améliorer les connaissances sur les structures géologiques situées dans la couverture sédimentaire. Cette méthode nous permettra certainement de détecter des structures d'intérêt pétrolier majeur dans le sous-bassin de Busira ;
- Une étude de contribution à la modélisation du (des) système(s) pétrolier(s) de ce sous-bassin soit réalisée pour sa mise en valeur.

## **REMERCIEMENTS**

Nous tenons à remercier la Société Nationale des Hydrocarbures (SONAHYDROC) pour les données gravimétriques et la Faculté de Pétrole, Gaz et Energies Nouvelles de l'Université de Kinshasa pour avoir mis à notre disposition son laboratoire.

## **REFERENCES**

- [1] COMIFAC (2005). Les forêts du bassin du Congo, évaluation préliminaire.
- [2] ENI, (Février 2011). Final Report. Cuvette Centrale: basin geological evolution and petroleum system analysis.
- [3] SACHSE VICTORIA F., DELVAUX D. et LITKE R. (2012) Petrological and geochemical investigations of potential source rocks of the central Congo Basin, Democratic Republic of Congo
- [4] JNOC, (1984-1986). Rapport des investigations géophysiques et géologiques dans la Cuvette Centrale de la République du Zaïre. Japan National Oil Corporation.
- [5] ECL, (1988) Rapport: Hydrocarbon potential of Cuvette Centrale (Republic of Zaire).
- [6] HRT, (2006) Petroleum Technical Report 05.CM0001. High Resolution Technology.
- [7] KADIMA KABONGO E., DELVAUX D. et al., (2015). Neoproterozoic to Lower Paleozoic Sequences of the Congo Shield: Comparisons Between the Congo and Its Peripheral Basins.
- [8] KADIMA KABONGO E., DELVAUX D. et al, (2011a). Structure and geological history of the Congo Basin: An integrated interpretation of gravity, magnetic and reflection seismic data.
- [9] DUBOIS J., DIAMENT M. et COGNE J-P., (2011). Géophysique (cours et exercices corrigés 4è édition). Ed. DUNOD, Paris.
- [10] CHOUTEAU M., (2002). Géophysique appliquée I. (Gravimétrie). Ecole polytechnique de Montréal.
- [11] KEAREY P., BROOKS M. et HILL I. (2002). An Introduction to Geophysical Exploration, 3rd edition Blackwell Science.
- [12] N. EL GOUMI et al., (2010). Apport de la gravimétrie à l'étude de la structure du bassin du haouz (Maroc).
- [13] HENRY G., (1994). Géophysique des bassins sédimentaires. Ed. Technip, Paris.
- [14] LAVERGNE M., (1986). Méthodes sismiques. Ed. Technip, Paris.