

Contribution de la géophysique Appliquée par électromagnétisme transitoire et gravimétrie à la recherche de lentilles manganésifères sur le permis d'exploitation PE 36 de la Compagnie Minière du Littoral dans le département de Guitry sous-préfecture de Lauzoua, Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire

Gnamon Innocent KOUAKOU¹ Loukou Nicolas KOUAME¹ Djah Denis Moise KOUADIO¹ Serge Pacôme Déguine GNOLEBA¹ Ehui Beh Jean Constantin AKA¹ Simon Pierre DJROH¹ Boko Célestin SOMBO¹ Emile GAHE²

¹(Laboratoire de Géologie des Ressources Minérales et Énergétiques, Option : Géophysique Appliquée UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières Université Felix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire)
²(GEOSERVICIESCI.SA)

ABSTRACT : An applied geophysics campaign combining transient electromagnetics and ground gravimetry was carried out on the manganese exploitation permit PE 36 of the Compagnie Minière du Littoral in Lauzoua, by the Société pour le Développement Minier de Côte d'Ivoire and aimed to detect the geological structures which control the primary manganese mineralization. This survey successfully detected strong conductive lineaments and several heavy anomalous zones, which would correspond to accumulations of manganese ore within graphitic schists, clayey rocks or amplites, which are the main known surrounding rocks at the Lauzoua deposit. A total of sixteen (16) conductive lineaments were modeled from the results. Within these lineaments, ten (10) sectors stand out with significantly higher conductance and have been the subject of drilling recommendations and 20 soundings are proposed in this ground gravity survey study to clarify the nature of the interpreted mass excesses, likely to be associated with manganese deposits. This work made it possible to identify the location and parameters of drilling in this study area. The results of the gravity survey combined with the results of the TDEM will have important implications for the generation of targets and for the development of exploration strategies for the Lauzoua deposit.

KEYWORDS Heavy anomalies, transient electromagnetics, gravimetry, primary manganese mineralization, conductive lineaments

Date of Submission: 25-04-2024

Date of Acceptance: 02-05-2024

I. INTRODUCTION

Le gisement de manganèse de Lauzoua autrefois appelé gisement de Mokta se situe au sud de la Côte d'Ivoire à la lisière du bassin sédimentaire, dans le département de Guitry, sous-préfecture de Lauzoua. Il a déjà fait l'objet d'une première exploitation de 1960 par la société française MOKTA EL HADID, et ferma le 27 février 1970 suite à la baisse du cours du manganèse sur le marché international. Depuis les années 90, la demande en manganèse ne fait que croître. C'est pourquoi en 1994, la Société pour le Développement Minier de Côte d'Ivoire, (SODEMI) a repris les études et a évalué les réserves en manganèse à 1631086 tonnes à 41,97 % Mn. Mais jusque-là, l'exploitation n'ayant portée que sur le minerai oxydé, minerai de lentille; minerai de démantèlement et minerai de cuirasse. Pour trouver des ressources additionnelles autre que le manganèse de démantèlement, vérifier l'extension en profondeur de la minéralisation manganésifère et évaluer des ressources additionnelles, des travaux d'exploration géophysique en électromagnétisme transitoire et en gravimétrie au sol ont été entrepris sur le permis d'exploitation. Cette campagne s'est fixée comme objectif de contrôler la continuité des lentilles manganésifères primaire mises en évidence ou non par les travaux antérieurs en vue de proposer des points de sondages.

II. CADRE D'ETUDE

1. Localisation

Le gisement de manganèse de Lauzoua autrefois appelé gisement de MOKTA se situe au sud de la Côte d'Ivoire à la lisière du bassin sédimentaire, dans le département de Guitry et dans la sous-préfecture de Lauzoua (Fig. 1) :

- Latitude 5° 22' 40'' N et 5° 15' 20'' N ;
- Longitude 5° 29' 00'' W et 5° 21' 10'' W

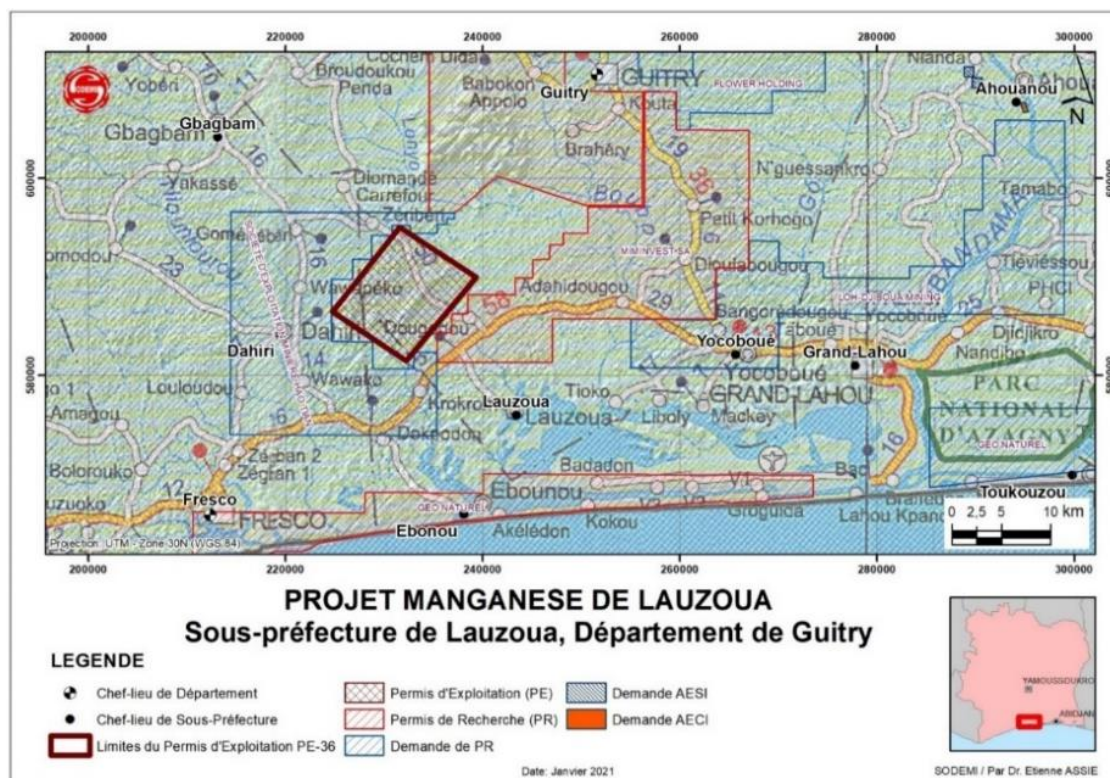


Figure 1 : Localisation du projet manganèse de Lauzoua (Sodemi 2021)

2. Contexte géologique

La Côte d'Ivoire appartient au craton Ouest-Africain et plus particulièrement à la dorsale de Man. Deux ensembles géologiques couvrent toute la surface de la Côte d'Ivoire. Sa partie nord est occupée par le socle précambrien et cristallophyllien, couvre 97,5 % [1]. Elle est bordée dans sa partie sud par un étroit bassin côtier en bordure du golfe de Guinée qui se présente en forme de croissant. Ce bassin d'âge Crétacé-Tertiaire [2]. occupe 2,5 % du territoire ivoirien.

Ce bassin où se trouve la zone d'étude fait partir des bassins sédimentaires côtiers de l'Afrique occidentale qui se succèdent de Dakar à Lagos en passant par Abidjan, Accra, Lomé, Cotonou et se prolongent jusqu'à Libreville [3]. Il est de type ouvert faisant partie donc du chapelet de bassins sédimentaires bordant la côte atlantique depuis le sud du Maroc jusqu'en Afrique du Sud. Il s'étend de Fresco (à l'Ouest) à Axim (à l'Est) (frontière du Ghana).

Le manganèse se situe dans une bande étroite limitée à l'Ouest par les granites syntectoniques, à l'Est par le domaine schisteux de la basse Comoé et au Sud par le bassin sédimentaire. Cette bande disparaît vers le Nord, à la hauteur de Tiassalé contre des granites syntectoniques. Le massif d'Orumbo-Boka (SE de Toumodi) serait un vestige septentrional de ce complexe volcano-sédimentaire [4]. L'horizon manganésifère est interstratifié dans les schistes en une série de lentilles discontinues les unes après les autres selon la direction birimienne. La minéralisation qui se trouve sous forme d'oxydes secondaires qui provient de l'altération des gondites, ampélites et schistes manganésifères.

D'après les travaux de certains auteurs [5]. On peut distinguer dans la région de Lauzoua, des formations métamorphiques d'origine sédimentaire, les formations métamorphiques d'origine volcanique et les formations volcaniques.

III. MATERIEL ET METHODES

3.1. Matériel

3.1.1 matériel électromagnétique transitoire au sol

Le levé électromagnétique dans le domaine du temps utilisé pour ce levé se compose de

- **RÉCEPTEUR (RX) SMARTem24** Portable, avec tablette à écran tactile et saisie clavier, léger et robuste, Système d'exploitation Windows 7

- **SONDE (ARMIT-TDEM)** qui mesure simultanément le champ B et $\partial B/\partial t$, permettant de détecter des types de conducteurs très variés, du très faible au plus fort.
- **ÉMETTEUR (TX) (TRANSMETTEUR TERRASCOPE®)** avec une puissance accrue et pulse stable avec un système facilement transportable. Le Terrascope® fournit jusqu'à 30 Amps et 18 kW et une Génératrice de 18 kW, 25 A ou 600 V, onde bipolaire, cycle effectif de 50%, 5 Hz ($T/4 = 25$ ms): 50 Hz

3. 1. 2. Matériel du levé gravimétrique au sol

Le matériel pour le levé gravimétrique a nécessité l'utilisation d'un gravimètre de type:

- **CG-5 AUTOGRAV** Précision : 1 microGal, Déviation standard : inférieur à 5 microGal. Gamme de mesure : jusqu'à 8000 mGal. Dérive journalière : entre 0,2 et 1,5 mGal/j. Correction automatique : diurne, inclinaison, température, bruit sismique.

3. 2. Méthodes

3. 2. 1 Méthodes électromagnétiques transitoires

L'une des méthodes géophysiques qui a connu une évolution constante est la méthode électromagnétique. Cette méthode connaît de nombreuses variantes autant dans le support aérien, sol ou forage. Les méthodes électromagnétiques (EM) en géophysique sont utilisées particulièrement pour la recherche de conducteurs dans le sous-sol en utilisant un champ électromagnétique primaire provenant de différentes sources artificielles ou naturelles. Lorsqu'un corps géologique conducteur est présent dans le sous-sol, un champ électromagnétique secondaire est induit et peut être détecté et mesuré par des appareils appropriés. Ces méthodes peuvent être appliquées dans le domaine temporel (Time Domain ElectroMagnetic, TDEM, ou dans le domaine fréquentiel, FDEM).

3. 2. 1. 1 Principe

Le principe des méthodes TDEM est basé sur le fait qu'un champ magnétique variable peut être créé par une interruption brusque d'un courant continu circulant dans une boucle émettrice. Ce champ magnétique variable dans le temps induit des courants de Foucault dans le sol. Ces courants induits vont à leur tour donner naissance à un champ magnétique secondaire dont la décroissance au cours du temps est enregistrée par des instruments. Des comparaisons [6] de la propagation du courant induit dans le sous-sol à des ronds de fumée (Fig. 2).

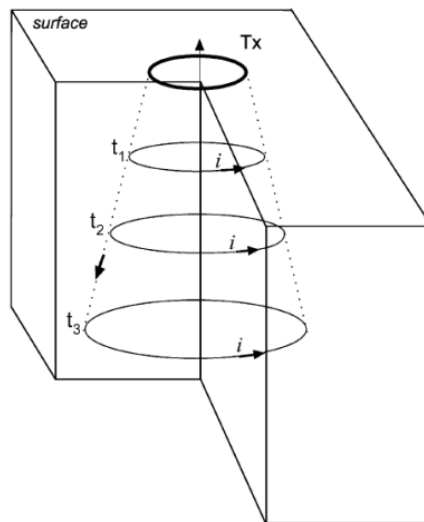


Figure 2: Propagation des courants de Foucault sous forme de filaments de courant dans le sol [7].

Dans la pratique, pendant un quart de période, le courant est interrompu dans la boucle émettrice T_x pour être ultérieurement injecté en sens opposé lors d'un autre quart de période. Ces deux étapes d'injection sont séparées par la période d'enregistrement au récepteur R_x , de la décroissance dans le temps du champ secondaire (db_z/dt).

L'injection du courant, sa coupure et l'enregistrement sont respectivement appelés turn-on-time, turn-off-time et off-time (Fig. 3).

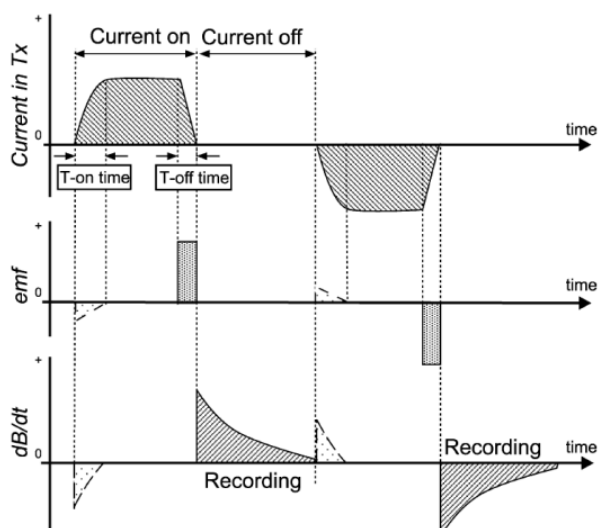


Figure 3: Principe de la TEM [8]

Le courant injecté se situe en haut, la force électromotrice induit au milieu (fem), et variation du champ magnétique mesuré au récepteur (db_z/dt) se situe en bas [9].. La courbe db_z/dt enregistrée contient les informations sur la variabilité en profondeur de la résistivité électrique (conductivité) du sous-sol. Les données sont enregistrées suivant des fenêtres de temps distribuées de manière logarithmique, 8 à 10 fenêtres par décade. Cette distribution permet d'augmenter le rapport signal sur bruit (S/N) pour les dernières fenêtres dont le signal est très faible [10].. Suivant les lois de Maxwell, la coupure du courant injecté crée une variation dans le champ magnétique primaire, qui engendre des courants de Foucault dans un corps conducteur et fait circuler les courants dans les formations géologiques. Avec la variation dans le temps du champ électromagnétique primaire, l'intensité de ces courants secondaires varie dans le temps ce qui donne naissance à un champ magnétique secondaire. La variation dans le temps de ce dernier est finalement enregistré par le récepteur du système TDEM. Le potentiel au récepteur est proportionnel au taux de variation du champ magnétique secondaire en fonction de temps. Le couplage électromagnétique entre l'émetteur et le récepteur le corps conducteur est donné par la relation suivante [11].:

$$e_s(t) = M_{02} \frac{\partial I}{\partial t} = I_0 \frac{M_{01} M_{12}}{L} \left[\delta(t) - \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \right] \quad (3.2.1)$$

avec:

$$t \geq 0$$

- $e_s(t)$: Intensité du champ électrique en volt par mètre (V/m) ;
- M_{02} : le terme de couplage entre le transformateur et le récepteur ;
- M_{01} : le terme de couplage entre le transmetteur et le récepteur ;
- M_{12} : le terme couplage entre le conducteur et le récepteur ;
- I_0 : le courant initial émis au transmetteur
- L : l'inductance du conducteur ;
- τ : Constante de temps

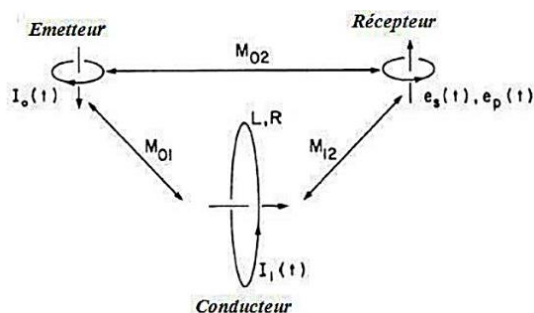


Figure 4: Représentation d'un système électromagnétique transitoire [12].

3. 2. 2. Méthode gravimétrique

La gravimétrie est une méthode d'exploration basée sur l'étude des variations du champ de pesanteur terrestre dues à des distributions de densité variables dans le sous-sol. La prospection gravimétrique est une méthode d'investigation géophysique, qui permet de résoudre plusieurs problèmes d'ordre géologique ou structural ; et ce, à des échelles locales ou régionales [13]. Elle est également très utilisée en combinaison avec les données sismiques pour l'étude de la structure de la croûte terrestre. Elles dépendent de la géométrie, de la profondeur ainsi que de la densité des édifices géologiques profonds. La densité élevée de certains métaux, comme l'or, offre une technique parfaitement adaptée à ce type d'imagerie [14]. La méthode gravimétrique est aussi largement employée en géodésie [15] dans l'industrie d'exploration des ressources pétrolières [16]. La méthode de prospection gravimétrique appliquée aux études de subsurface s'attache à détecter les variations de densité des terrains. La gravimétrie est une méthode de prospection qui permet de déterminer des anomalies de densité dans le sous-sol. Ces minuscules variations, causées par des contrastes de densité des constituants de l'écorce terrestre peuvent être mesurées par des levés gravimétriques, en utilisant des instruments extrêmement sensibles. La balance d'Eötvös a été le premier instrument précis de mesure gravimétriques. Elle est très précise et très simple. On mesurait le gradient de la pesanteur dans un plan horizontal, opération délicate. Les mesures étant longues environ 3 à 4h par station et les corrections topographiques très fortes rendent son emploi impossible dans les régions accidentées[17].

3. 2. 1 Principe

La gravimétrie est une des disciplines fondamentales de la géophysique qui permet d'ausculter des milieux à différentes échelles : de l'étude des formations de subsurface jusqu'au noyau. Cette technique d'imagerie est basée sur les formulations mathématiques d'Isaac Newton (1687), et plus particulièrement sur les deux lois suivantes et leur formalisme.

- *Lois de l'attraction universelle*

D'un point de vue historique, c'est en 1687, dans *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, que Isaac Newton a publié sa loi de l'attraction universelle.

- *1ère loi de Newton*

La première loi de Newton peut s'énoncer ainsi :

L'attraction gravitationnelle entre deux masses est proportionnelle à chacune des deux masses et inversement proportionnelle au carré de leur distance (Fig. 5). L'attraction gravitationnelle F entre deux masses ponctuelles m_1 et m_2 séparés par une distance r est donc telle que :

$$\vec{F} = \frac{Gm_1m_2}{r_1^2} \vec{r}_1 \quad (3.2.2)$$

avec $G = 6,6742 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{S}^{-2}$ la constante de gravitation universelle.

Où F est la force appliquée sur la masse m_2 , \vec{r}_1 le vecteur unitaire r_1 , la distance entre les masses m_1 et m_2 , et G , la constante universelle de la gravite. r_1 et G sont données par :

$$\begin{aligned} \vec{r} &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \\ G &= 6.67 \cdot 10^{-8} \text{ dyne cm}^2 / \text{g}^2 \text{ CGS} \\ &= 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2 \text{ SI} \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

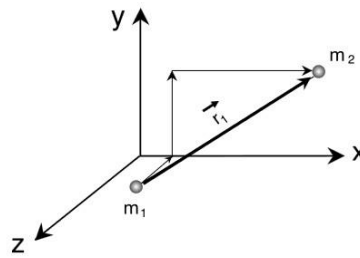


Figure 5 : Attraction gravitationnelle entre deux masse

- 2^{ème} Loi de Newton

Il faut appliquer une force F à une masse m pour lui faire subir une accélération a . Ceci se traduit par la relation :

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (3.2.4)$$

L'accélération d'une masse m à la surface de la terre s'exprime donc par :

$$\vec{a} = \frac{GM_T}{R_T^2} \vec{r} = \vec{g} \quad (3.2.5)$$

Où M_T est la masse de la terre ($5,977 \times 10^{24}$ kg) et R_T le rayon moyen de la terre (6370 km). g est dite "accélération de la gravité" et vaut en moyenne 9.81 m/s². En l'honneur de Galilée, on a nommé l'unité d'accélération gravitationnelle le gal avec :

$$1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/S}^2 = 10^{-2} \text{ m/S}^2$$

$$1 \text{ mgal} = 10^{-3} \text{ gal} = 10^{-5} \text{ m/S}^2$$

La précision d'un gravimètre d'exploration est de l'ordre de 0.01 mgal (10^{-7} m/s²). Les gravimètres pour les études géodynamiques ou géotechniques sont sensibles au μgal , soit 10^{-8} m/s², environ le milliardième de g .

3.3. Traitement des données

Le traitement des données de terrain est précédé du contrôle de qualité qui est une activité régulière faite au bureau chef à chaque réception des données de terrain.

Les données sont géoréférencées selon le système de référence « Côte d'Ivoire » de 2021 (ECI2021), en coordonnées (x, y) "Universal Transverse Mercator" (UTM) WGS84 suivant la zone d'étude 30N avec une élévation au-dessus de la mer de 97.743 m.

3.3.1. Traitement des données électromagnétiques transitoires

Le contrôle de qualité des données de levés électromagnétiques dans le domaine du temps au sol est l'élément primordial dans la chaîne de traitement des données. Ce traitement se fait comme suit :

○ Contrôle de qualité effectué

▪ Avant le levé:

Le fonctionnement optimal de l'émetteur et de la génératrice a été vérifié en effectuant un test à charge maximale. Une ligne test a été effectuée pour vérifier les paramètres tels que la fréquence de base et le nombre de répétitions.

▪ Chaque jour, durant l'acquisition des données:

Le récepteur et transmetteur ont été synchronisés à l'horloge GPS pour obtenir la même solution de tire. Les structures artificielles autour des stations de mesure ont été notées par l'opérateur. Les variations du voltage, de la durée de la rampe, du courant transmis et de la résistance des boucles de transmission ont été notés. Des lectures de contrôle à proximité des boucles ont été effectuées un minimum de deux fois par profil.

▪ Après le levé:

Une série de lectures de contrôle de qualité a été effectuée pour vérifier le comportement individuel des axes de mesure.

▪ **À la base des opérations (bureau chef):**

Les mesures dans le domaine du temps ont été rééchantillonnées selon les délais associés à une rampe de 600µs. La polarité des composantes Z, X et Y du champ primaire doit être vérifiée puis corrigée lorsque nécessaire. La dérive de la synchronisation doit être mesurée et corrigée pour toutes les lectures

○ *Logiciels*

Les différents logiciels utilisés pour ce travail sont :

SMARTem24 d'EMIT: programme utilisé pour l'acquisitions des données

Maxwell d'EMIT: QC, est le programme utilisé pour traiter et interpréter les données de levé électromagnétique **EMAX** et **VPem3D** de Fullagar Geophysics: pour la modélisation

Modélisation **Montaj** de Seequent: Cartes et interprétation

3. 3. 2. Traitement des données de levé gravimétrique au sol

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. Ces traitements consistent à l'obtention de la carte de contours de l'anomalie de Bouguer ((mGal) (densité moyenne du plateau de Bouguer 2.00 g/cm³)), la carte de contours de l'élévation (m), la carte de contours de l'anomalie résiduelle (mGal), la carte de contours de la dérivée première verticale (mGal/m), et la carte d'interprétation géophysique. Les différents traitements apportés pour l'obtention de ces cartes sont les suivants :

○ *Obtention du (g_A) absolu*

Les valeurs gravimétriques ont été importées dans *Gravity* de Seequent, de même que les positions X, Y, Z issues du levé topographique. L'écart-type sur ces données est estimé à 0,017 mGal. La correction luni-solaire est calculée par le module *Gravity* en tenant compte de la localisation de chaque station et l'heure de la lecture. L'erreur sur la correction est inférieure à 0,001 mGal. La mesure de la hauteur de la base de l'instrument par rapport au sol peut introduire une erreur de ± 1 cm qui est équivalent à ± 0,003 mGal. La compensation de la dérive résiduelle des gravimètres s'effectue automatiquement dans le module *Gravity* et elle est assumée linéaire. Si la dérive n'est pas linéaire, une erreur de 0,005 mGal en milieu de programme peut apparaître. L'erreur maximale sur g_A est donc évaluée à ± 0,026 mGal.

○ *Obtention de l'anomalie de Bouguer (g_B)*

Une densité "ρ" de 2,00 g/cm³ a été adoptée pour la correction de Bouguer (*slab density*) et une densité de 2.67 g/cm³ pour la correction topographique. En géophysique appliquée, afin d'obtenir les variations du champ gravitationnel dues à des causes géologiques, il est nécessaire de corriger nos lectures de toutes les autres causes extérieures pouvant les influencer (dérive de l'appareil, marée, ellipticité de la terre, . . .)

▪ **Correction de Latitude :**

Le renflement de la terre à l'équateur et sa rotation produisent une augmentation de l'attraction avec la latitude. La correction s'effectue en calculant la valeur théorique de la pesanteur (g_L) à la surface de l'ellipsoïde de référence en utilisant le Système de Référence géodésique (GRS67) :

$$g_L = 978\ 031.846 \{1.0 + 0.005278895 \sin^2(\phi) + 0.000023462 \sin^4(\phi)\}, [mGal] \quad (3\ 3\ 1)$$

La position étant connue avec une précision d'environ ± 2 cm, l'erreur sur cette correction est inférieure à 0,001 mGal.

▪ **Anomalie d'air libre (Faye) :**

La pesanteur varie inversement avec le carré de la distance. Une correction s'impose pour ramener les lectures à un même niveau de référence. L'anomalie d'air libre à l'altitude "h" est:

$$g_F = g_A - g_L + 0.308596 * h, [mGal] \quad (3\ 3\ 2)$$

▪ **Anomalie de Bouguer :**

Elle tient compte de la masse du terrain de densité "ρ" entre la station et le niveau de référence, ignorée lors de la correction d'air libre :

$$g_B = g_F - 0.0419088 * \rho * h, [mGal] \quad (3\ 3\ 3)$$

En utilisant une densité de $2,00 \text{ g/cm}^3$ et une erreur moyenne de $\pm 3,0 \text{ cm}$ en altimétrie, l'erreur sur la correction combinée d'air libre et de Bouguer est de $\pm 0,007 \text{ mGal}$.

○ Correction de terrain (HAMMER)

Cette correction compense pour les irrégularités du terrain au voisinage de la station, lesquelles sont négligées lors de la correction de Bouguer. Un relief positif exercera une attraction sur le gravimètre, diminuant ainsi la lecture observée. D'autre part, un relief négatif se traduira aussi par un déficit d'attraction au point de lecture. La correction de terrain est donc toujours positive.

○ Correction de terrain des zones proches (B et C) :

La correction des irrégularités dans un rayon de 50 m de la station de mesure est effectuée à l'aide des observations de l'opérateur sur le terrain par une simple estimation visuelle de la dénivelé (différence de l'élévation absolue) dans chacune des quatre directions "préférentielles" des zones B et C de Hammer.

La correction de terrain a été calculée en utilisant la formule de Hammer (Hammer 1939):

$$g_T = \gamma * \rho * \theta * (r_2 - r_1 + \sqrt{r_1^2 + z^2} + \sqrt{r_2^2 + z^2}) \quad (3.3.4)$$

où

$$\gamma = 0.00667 \text{ Nm}^2/\text{g}^2$$

θ = angle (radians) des secteurs des anneaux

ρ = densité ($2,67 \text{ g/cm}^3$)

r_1, r_2 = rayons intérieur et extérieur des cercles

Z = différence d'élévation entre la station et la hauteur d'une tranche plate approxinant l'effet de toutes les irrégularités du secteur

○ Correction de terrain des zones éloignées :

La correction des irrégularités topographiques dans un rayon de 5.0 km pour les zones proches et un rayon de 20 km pour les zones éloignées, a été calculé par la méthode de Nagy (1966) et Kane (1962), en utilisant une grille SRTM semi détaillée de 30 m de résolution pour corriger l'effet de terrain local ($\leq 5 \text{ km}$) et une grille semi-régionale (SRTM) maillée avec 92 m pour les corrections de terrain entre 5 et 20 km. Les statistiques obtenues sur la correction de terrain totale se résument par une introduction d'une correction de terrain sur l'anomalie de Bouguer allant de 0.082 à 1.13 mGal pour une moyenne de 0.528 mGal et un écart-type de 0.197 mGal.

IV. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1 Interprétations des données électromagnétiques au sol

La carte d'interprétation (Fig. 6) représente la distribution de la conductance des données du levé électromagnétique transitoire. La conductance étant le produit de la conductivité et de l'épaisseur. Cette carte montre une distribution des cibles de type 2.

Les cibles de type 2 sont des conducteurs qui démontrent une forte réponse électromagnétique et se manifestent lorsqu'un linéament conducteur s'étend latéralement, vers la surface et en profondeur, présentent une bonne continuité électrique et/ou l'effet superposé de nombreuses lentilles parallèles. Elle montre également des zones de failles interprétées associées aux cibles de type 4. Les cibles de types 4 étant des intersections entre les linéaments électromagnétiques et les linéaments structuraux interprétés comme étant des zones de failles ayant déplacé le système.

L'interprétation des données du levé électromagnétique transitoire au sol, sur le permis PE n° 36 en fonction de la conductivité a permis de proposer des zones de forages. Ces forages proposés ne tiennent pas compte de la déviation et doivent donc être revus et ajustés par les géologues. Au total pour le levé TDEM, seize (16) ont été proposés (Fig. 7). Une extension du forage de 100 mètres à la suite de l'intersection de la cible est recommandée pour augmenter l'efficacité des levés géophysiques en forage.

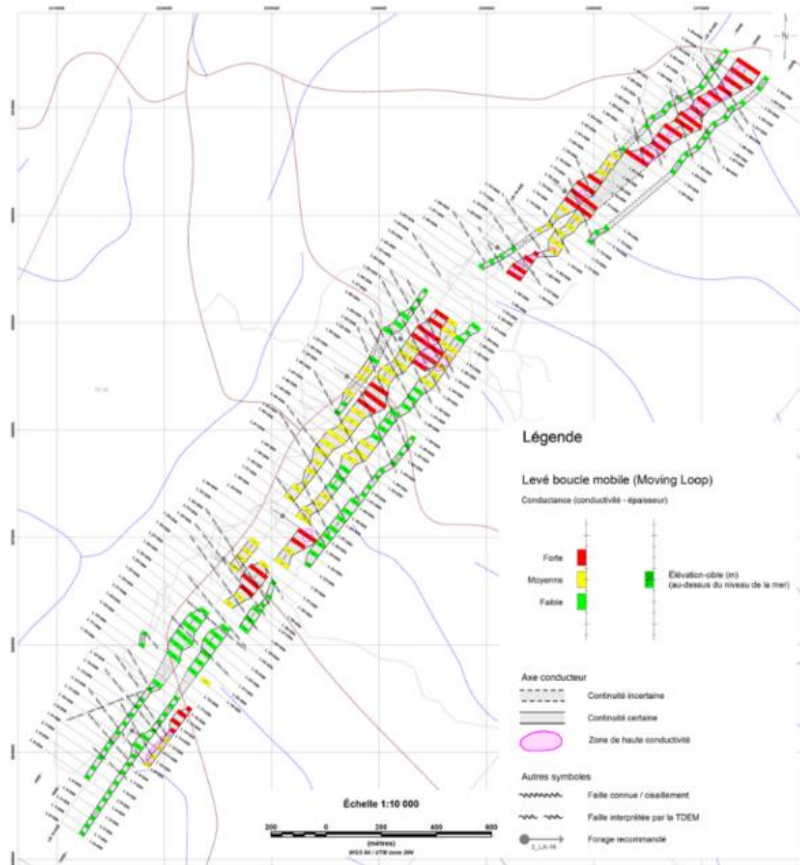


Figure 6 : Carte d'interprétation du levé TDEM dans le domaine du temps

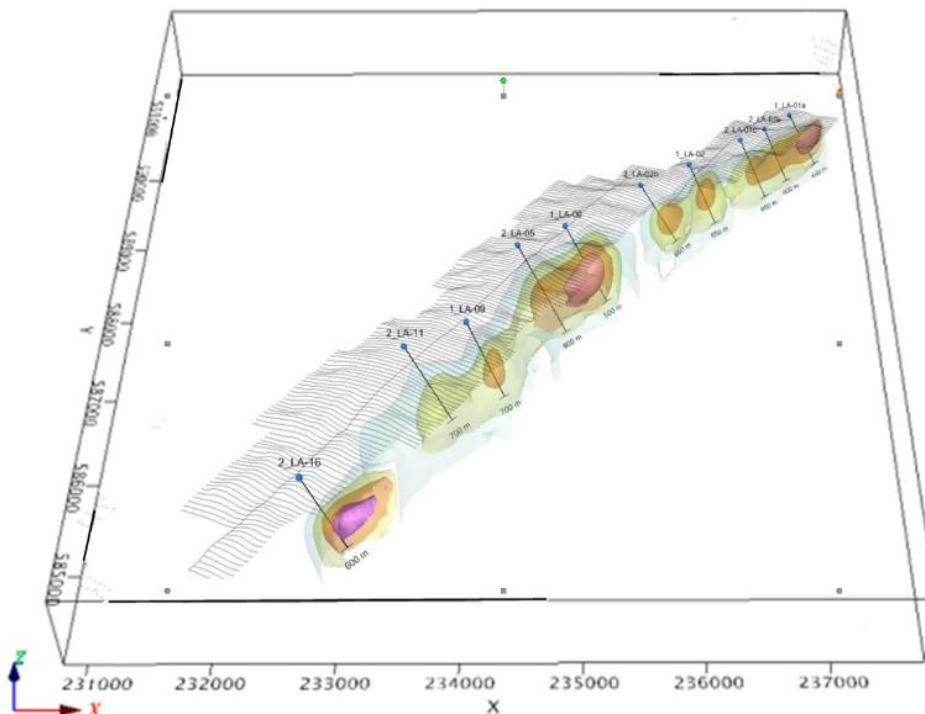


Figure 7: Carte des sondages recommandés avec les enveloppes de conductivité et des zones de sondages proposés

4. 2. Interprétations des données gravimétriques au sol

Une carte simplifiée issue de la tranche du contraste de densité extraite du modèle 3D à l'élévation - 50 m a été proposée comme une carte d'interprétation géophysique en incluant les failles interprétées et les hauts axes de gravité définis à partir de la carte de la dérivée première verticale de l'anomalie de Bouguer. Au total, 20 sondages sont proposés dans cette étude de levé gravimétrique au sol pour éclaircir la nature des excès de masse interprétés, susceptibles d'être associés à des dépôts de manganèse. Les positions de ces sondages sont aussi illustrées à la figure ci-dessous (Fig. 8). Ces sources (excès de masse) sont caractérisées par des contrastes de densité allant de +0.15 à +0.4 g/cm³ environ. Les sources des anomalies LA_G-4, LA_G-5 et LA_G-6 sont aussi bien définies dans le modèle d'inversion. Les deux premières sources (LA_G-4 et LA_G-5) sont caractérisées par des contrastes de densité allant de +0.15 à +0.21 g/cm³, tandis que la troisième source (LA_G-6) affiche un contraste de densité allant de +0.15 à +0.35 g/cm³. À noter que le pic de gravité (+4.21 mGal) identifié à la station 1800 / L 89+50N au niveau de l'anomalie LA_G-6, a montré une source dont le contraste de densité dépasse +2.0 g/cm³.

Le modèle final de l'inversion est illustré sous forme de bloc de pixel rectangulaire (Fig. 9), et d'iso-surface (enveloppe) tridimensionnelle du contraste de densité coupée à +0,15 g/cm³. L'analyse du modèle de densité interprété permet d'éclaircir la géométrie 3D des excès de masse causant les anomalies gravimétriques détectées sur la propriété Lauzoua. Ainsi, le modèle de densité récupéré a caractérisé le sous-sol de Lauzoua par des valeurs allant de -1.0 à +2,5 g/cm³. Toutes les anomalies gravimétriques mises en évidence ont été retrouvées dans le modèle d'inversion.

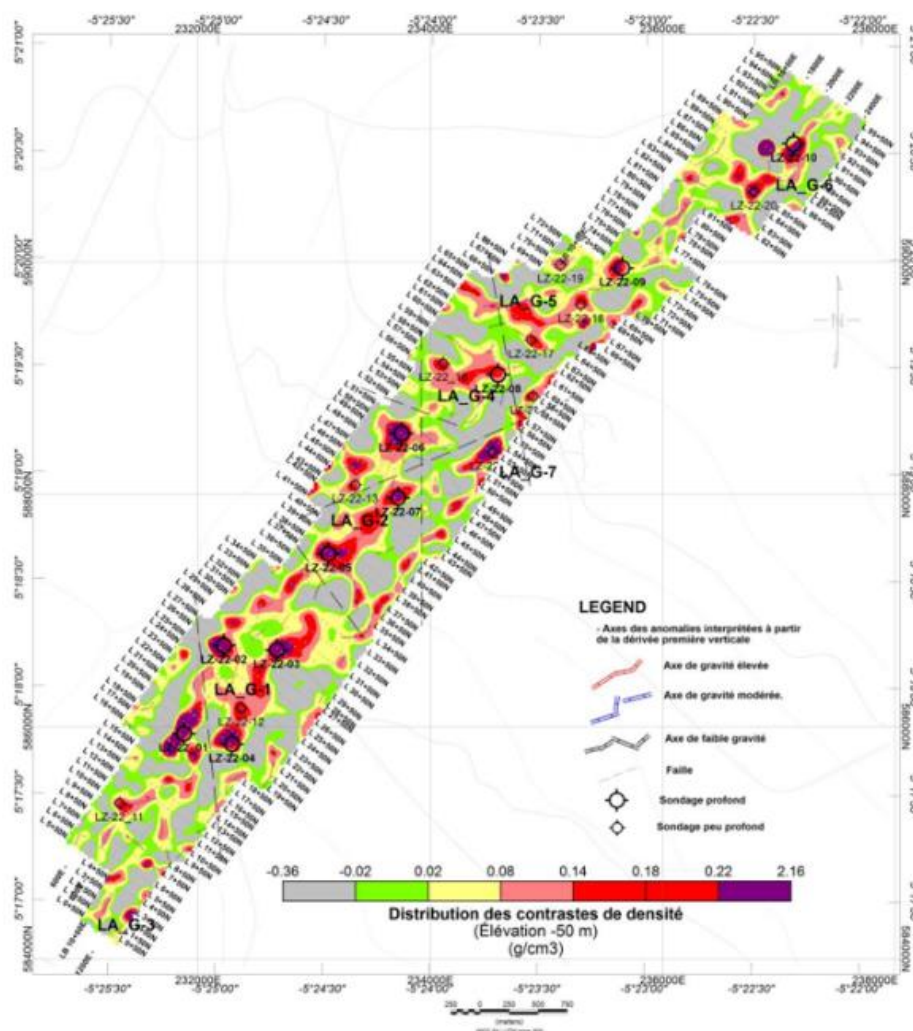


Figure 8: Carte d'interprétation simplifiée affichant la distribution des excès de masse et des sondes de sondages proposés

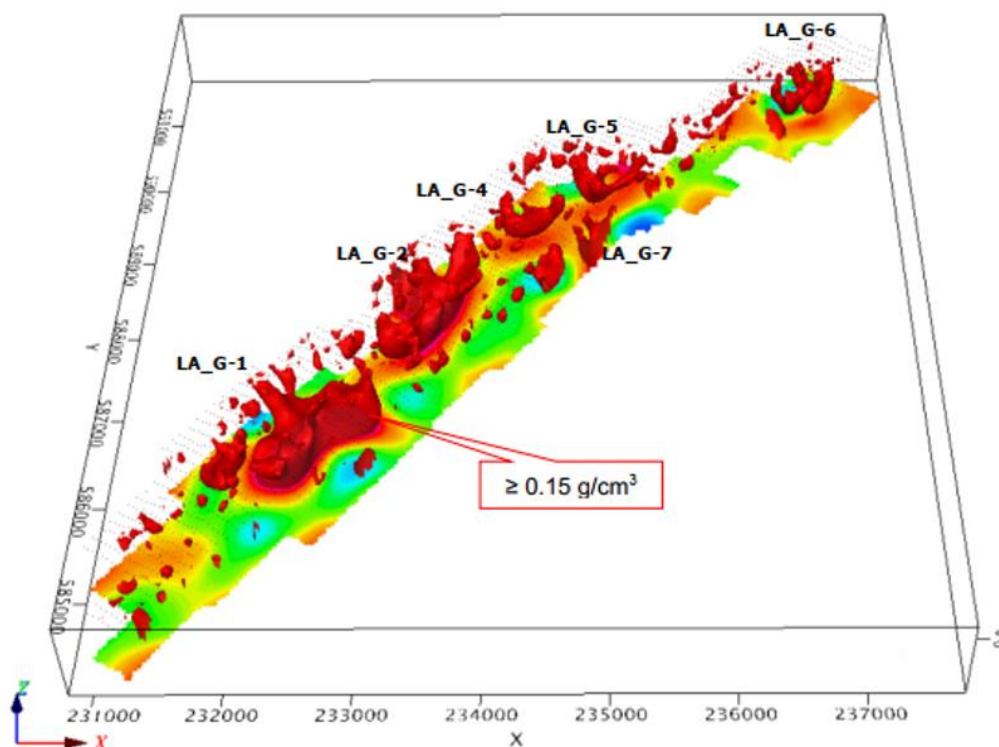


Figure 9 : Carte d'iso-surface du contraste de densité des anomalies gravimétriques identifiées

V Conclusion générale

Du levé géophysique combiné, électromagnétique dans le domaine du temps et la gravimétrie au sol, réalisé sur le projet Lauzoua et qui s'est fixé comme objectif de contrôler la continuité des lentilles manganésifères primaires mises en évidence ou non par les travaux antérieurs en vue de proposer des points de sondages dont les résultats sont présentés plus haut, nous permet de de tirer les conclusions suivantes :

Le levé électromagnétique réalisé sur le projet Lauzoua a détecté avec succès de fortes anomalies électromagnétiques sur toute la zone du projet. Un total de seize (16) linéaments conducteurs ont été modélisés à partir des résultats. À l'intérieur de ces linéaments, dix (10) secteurs se démarquent avec une conductance nettement plus élevée ont fait l'objet de recommandation de forage. La nomenclature des anomalies et leur ordre dans cette section est telle qu'elle se présentent du nord vers le sud.

Les linéaments conducteurs délimités par ce levé sont en accord avec la présence de larges conducteurs de type formationnel, soit des schistes graphiteux, orientés N035°.

Ce levé a également a permis la détection de plusieurs zones anomaliques lourdes qui pourraient correspondre à des accumulations du minerai de manganèse au sein des schistes graphiteux, des roches argileuses ou des ampélites qui sont les principales roches encaissantes connues au gisement Lauzoua.

Des cartes de haute qualité de l'anomalie de Bouguer, de la dérivée première verticale et de l'anomalie résiduelle ont été produites pour mettre en lumière les zones d'intérêts identifiées (LA_G-1 à LA_G-7). Pour caractériser ces anomalies gravimétriques, une inversion tridimensionnelle non contrainte a été effectuée et un modèle du contraste de densité est obtenu. Plusieurs sources denses de différentes dimensions (volumes) ont été mises en évidence par l'inversion 3D.

Les sources des anomalies LA-G-01 et LA-G_02 semblent être les plus grandes et les plus enracinées (profondes). Ces sources sont allongées en direction NE et affichaient des formes complexes. Pour ce qui est des sources des anomalies LA_G-4, LA_G-5 et LA_G-6, celles-ci sont de volume moyen et de profondeur limitée. Entre ces sources gravimétriques (LA_G-1 à LA_G-7) interprétées, il y a tout un essaim de petites sources qui ont été localisées dans le sous-sol de la propriété Lauzoua.

Le modèle de l'inversion gravimétrique obtenu est présenté sous forme de sections verticales et horizontale pour montrer la distribution du contraste de densité en profondeur.

Au total, 20 sondages sont proposés dans cette étude de levé gravimétrique au sol pour éclaircir la nature des excès de masse interprétés, susceptibles d'être associés à des dépôts de manganèse. Cette interprétation a permis d'identifier l'emplacement et les paramètres de forages dans cette zone d'étude.

Les résultats du levé gravimétrique combinés avec les résultats de la TDEM auront des implications importantes pour la génération de cibles et pour le développement de stratégies d'exploration pour le gisement de Lauzoua.

VI Recommandations

A la suite de ces travaux, les recommandations suivantes sont proposées dans cette étude pour éclaircir la nature des excès de masse interprétés, susceptibles d'être associés à des dépôts de manganèse :

- Nous recommandons la continuité du présent levé gravimétrique au sud des lignes 0+50N et 8+50N pour définir l'anomalie **LA_G-3**, et exécuter si nécessaire des travaux de détail avec une maille de 50 x 20m pour bien définir les anomalies dont les sondages de vérification seraient positifs.
- Une analyse d'échantillons est recommandée sur chacun des types de cibles pour y déterminer la composition et mettre à l'épreuve les hypothèses présentées.
- Selon les zones minéralisées connues, le système géologique cible s'étend jusqu'à la surface. Alors, il serait également efficace d'effectuer de la prospection de surface par méthode de tranchées et de sondages peu profonds sur les extensions à la surface des anomalies.
- Cependant, la résolution dans les premiers 100 mètres de la surface est relativement faible. À cet effet, une réinterprétation des résultats des levés MAX-MIN est recommandée. À l'extérieur de la grille levé, si la CML et la SODEMI désirent explorer pour des réponses similaires, des levés de reconnaissance rapide par configuration InfiniTEM® à grande boucles sont recommandés pour offrir un couplage de chaque côté des conducteurs.
- Pour mieux définir les structures qui contrôlent la minéralisation, un levé magnétométrique de haute résolution est recommandé. Celui-ci devrait être effectué dans le même réseau de lignes espacées aux 50 mètres. Telle qu'observée dans les levés tests de 2015, la magnétométrie ne réagit pas forcément aux gisements manganifères mais peut être utile à la cartographie des structures géologiques afin de valider les failles interprétées par le levé électromagnétique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. **Pothin, K.B.K. and Gioan, P. 2000**, Bilan géochronologique du socle précambrien de Côte d'Ivoire. BIOTERRE, Revue internationale des sciences de la vie et de la terre, 1, 36-47.
- [2]. **Spengler A., Delteil J. R. (1964)**, Le bassin secondaire-tertiaire de Côte d'Ivoire, G Bassins sédimentaires du littoral africain)), D. REYRE ...14 pages
- [3]. **Yacé, I. (2002)** Initiation à la géologie. L'exemple de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest. Pétrologie, Géologie régionale. CEDA, SODEMI, Abidjan, 160 p .
- [4]. **Zanone L. (1964)**, Le manganèse de Côte d'Ivoire. Rapport de fin de mission. Rapport SODEMI, Abidjan. n° 44 et 44 bis (t. I et II), 273 p. (inédit).
- [5]. **PAPON A. (1962)**, Problème du manganèse. Régions de Grand-Lahou, Divo, Toumodi. BRGM, Abidjan, multigr. 26 p.
- [6]. **Camil J. (1994)**, Géologie du gisement de MOKTA. Rapport SODEMI. 26 p.
- [7]. **Nabighian, M. N. (1979)**, Quasi-static transient response of a conducting half-space-An approximate representation. Geophysics, 44(10), 1700-1705.
- [8]. **Krivochieva, S. (2002)**, Application des méthodes électromagnétiques transitoires à la prospection des aquifères profonds. Thèse de Doctorat, École polytechnique.237
- [9]. **Reynolds, J.M. 1897**, An introduction to applied and environmental geophysics, John Willey and sons inc. New York ed., no. 12
- [10]. **Christiansen, A. V., Auken, E., & Sørensen, K. (2009)**, The transient electromagnetic method. *Groundwater Geophysics* (p. 179-226)
- [11]. **Jacques, J.M., Parsons, M.E., Price, A.D., Schwartz, D.M. - 2003** - Improving geologic understanding with gravity and magnetic data: Examples from Gabon, Nigeria and the Gulf of Mexico. First Break 21.
- [12]. **Nabighian, M. N., Macnae, J. C., 1991**. Time Domain Electromagnetic prospecting methods. Dans: Nabighian, M. N. (Ed.), Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 2, Application, Parts A and B. Society of Exploration Geophysicists, p. 5-46.
- [13]. **Nabighian, M. N., Macnae, J. C., 1991**. Time Domain Electromagnetic prospecting methods. Dans: Nabighian, M. N. (Ed.), Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 2, Application, Parts A and B. Society of Exploration Geophysicists, p. 5-46.
- [14]. **Blakely R.J. & Simpson R.W. 1986**. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies Geophysics, 51, 1494 -1498
- [15]. **Blakely R.J. & Simpson R.W. 1986**. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies Geophysics, 51, 1494 -1498
- [16]. **Seigel, H.O., Hill, H.L., Baird, J.G. - 1968** - Discovery case history of the pyramid ore bodies pine point, Northwest territories, Canada. Geophysics 33, 645-656. doi:10.1190/1.1439959
- [17]. **Torge, W. (1980)**. Geodesy. ed. by Berlin : New York. Walter de Gruyter. ISBN: 0-89925-561-2.
- [18]. **Chapin, D.A., and Ander, M.E. - 1999** - Applying Gravity in Petroleum Exploration, in: Treatise of Petroleum Geology/Handbook of Petroleum Geology: Exploring for Oil and Gas Traps. AAPG Special Volumes.
- [19]. **Mustafa Ozdemir 2012**, Prospection magnétique et gravimétrique dans la vallée de l'Isère - Alpes françaises Alpes françaises. Géophysique [physics.geo-ph]. Thèse p 98