



Année Universitaire : 2021-2022



Licence Sciences et Techniques : Géoresources et Environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Licence Sciences et Techniques

Titre

**Magnétométrie et applications en prospection minière
Etude de cas : filon de Taïfast (Agadir melloul-Anti Atlas)**

Présenté par:

Driss EL YAMMOURY

Encadré par:

Pr. EL AZZAB Driss, FST-Fès

Soutenu Le 6 juillet 2022, devant le jury composé de :

Pr. CHAOUNI Abdelali

Pr. GHFIR Younès

Pr. ZAHOUR Rachid

Résumé :

L'objectif principal de ce travail PFE est d'évaluer l'efficacité de la magnétométrie pour la délimitation latérale des sources aimantées.

La magnétométrie est une des méthodes les plus utilisées en prospection minière, elle a plusieurs avantages tels que la facilité en exploration (les mesures relativement faciles), sa fiabilité et moins coûteuse par rapport aux autres méthodes d'exploration minière ainsi que la facilité de mise en œuvre du matériel de mesure.

Nous avons fait une étude de modèles synthétiques dont on connaît leurs limites, on a calculé les grilles correspondantes au champ magnétique résultant puis on a réalisé des traitements par des filtres (la RP, Ph, etc.).

Lors de l'étude des filtres sur les modèles synthétiques, on applique différentes règles telles que la demie-somme des maxima et on superpose les limites de la structure aimantée. Nous avons constaté son efficacité pour la délimitation latérale des sources.

Le deuxième volet de ce PFE consiste à appliquer la prospection magnétique pour la délimitation d'un filon d'oligiste dans la région de Taïfast (Anti-atlas). Les données recueillies ont été nettoyées corrigées et mise en forme de grilles pour faciliter leurs traitements. Ainsi le champ régional a été évalué par une fonction polynomiale de faible degré qui a été ensuite soustraite aux données de l'intensité du champ magnétique total. La carte résiduelle représentant les anomalies magnétiques de la zone d'étude a montré plusieurs anomalies magnétiques reflétant la présence de zones à contraste d'aimantation vraisemblablement dues à la présence de l'oligiste.

L'opération de réduction au pôle a montré sans ambiguïté via la méthode de la DSM que le filon se situe au Nord de l'anomalie et que cette dernière est beaucoup plus grande. Elle s'étend au Sud, à l'Est et à l'Ouest indiquant ainsi que la partie extraire ne représente qu'une petite partie d'un filon beaucoup plus large.

La carte réduite au pôle indique également qu'il y a plusieurs endroits à proximité du filon mais de de moindre étendue ayant un contraste d'aimantation qu'il faudra explorer.

Mots clés : géophysique ; magnétométrie ; filon ; minéralisation ; prospection minière.

Remerciement

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à mon encadrant de ce projet de fin d'étude, **Pr. EL AZZAB Driss**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je tiens à remercier les membres de jury pour leur disponibilité pour évaluer ce travail ;

Pr. CHAOUNI Abdel Ali (Chef de département de l'Environnement), **Pr. GHFIR Younès** et **Pr. ZAHOUR Rachid**.

Je rappelle juste à titre de reconnaissance que le premier magnétomètre

J'adresse mes remerciements au futur chercheur, le doctorant **TAZI Mohammed-Jalal** d'avoir mis à ma disposition les données du filon de Taïfast, alors qu'il venait juste d'exécuter le levé.

Je désire aussi remercier les professeurs de la FSTF, qui m'ont fourni les connaissances nécessaires pour la réussite de mes études universitaires.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et mes amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce projet de fin d'études.

Un grand merci à El-Hassouni Anas, Farhi Ayoub pour leurs conseils concernant le style d'écriture, ils ont grandement facilité mon travail.

Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre I : Généralités sur les méthodes géophysiques.....	3
I-1. Quelques définitions.....	4
I-2. Méthodes de Prospection Géophysique.....	4
I-2-1. Méthode Magnétométrie.....	4
I-2-1-a. Généralités.....	4
I-2-1-b. Prospection aéromagnétique.....	5
Efficacité de méthode magnétique.....	6
Mise en œuvre de la méthode magnétique sur le terrain.....	6
I-2-2. Méthode Gravimétrie.....	7
I-2-3. Méthode électrique.....	8
I-2-4. Le Radar géophysique.....	9
I-2-5. Méthode sismique.....	9
Chapitre II : champ magnétique créé par des structures synthétiques et transformation des cartes.....	11
II-1. Introduction.....	12
II-2. Calcul du champ magnétique dû à un prisme.....	12
II-2-1. Cas le plus simple correspondant à la position du Maroc.....	12
II-2-2. Cas où $I_a=I_n=90^\circ$	14
II-2-3. Prisme de forme octogonale : modèle f2.....	14
II-2-3-a) cas où $D_a=D_n=0^\circ$, $I_a=I_n=50^\circ$	15
II-2-3-b) cas où $D_a=D_n=0^\circ$, $I_a=I_n=90^\circ$	15
II-2-4. Prisme de forme quelconque : modèle f.....	16
II-2-4-a) cas où $D_a=D_n=0^\circ$, $I_a=I_n=50^\circ$	16
II-2-4-b) cas où $D_a=D_n=0^\circ$, $I_a=I_n=90^\circ$	17
II-3. Influence de la déclinaison.....	19
II-3-1. Cas où $D_n=0$ et $D_a=30^\circ$ à différentes altitudes de prolongement.....	19
II-3-2. Influence de la déclinaison ($D_a=50^\circ$ et $D_a=90^\circ$).....	20
II-4. Influence de l'inclinaison.....	21
II-5. L'intensité de l'aimantation.....	22

Chapitre III : extraction des contacts anormaux : étude de quelques opérateurs.....	24
III-1. Opérateurs de détection de contacts utilisant la RP.....	25
III-1-a. La Réduction au Pôle.....	25
III-1-b. Différence entre la RP et le calcul directe aimantation et champ verticaux.....	27
III-2. La dérivée verticale.....	27
III-3. Gradient horizontal (GH).....	28
III-4. Autres Opérateurs de détection de contacts n'utilisant pas la RP.....	30
III-4-a. Tilt dérivative (TDR).....	30
III-4-b. Signal analytique SA.....	31
III-4-c. Rehaussement du gradient total ETG.....	31
III-4-d. Angle Thêta.....	32
III-4-e. Autres filtres.....	33
III-5. Cas d'un filon en partie caché et décalé par une faille.....	33
III-5-a. Carte du champ magnétique dû au filon.....	34
III-5-b. Application de la RP sur Mod2_Fil.grd.....	35
III-5-c. Gradient horizontal (GH) sur la RP de Mod2_Fil.grd.....	35
Chapitre IV : Application de la magnétométrie.....	36
IV-1. Cadre géologique.....	37
IV-2. Levé magnétométrique du filon d'hématite de Taïfast.....	38
IV-3. Résultats du levé.....	40
IV-4. La carte réduite au pôle.....	40
IV-5. La carte réduite au pôle prolongée vers le haut.....	41
Conclusion.....	42
Références bibliographiques.....	43

Table de Figures :

Figure 1: Mod_1.grd.....	13
Figure 2: Mod1_V.grd.....	14
Figure 3: Modèle F2 $i=50^\circ$	15
Figure 4: Model F2 $i=90^\circ$	15
Figure 5: Model F $i=50^\circ$	16
Figure 6: toit du prisme du model F.....	16
Figure 7: superposition des figures 5 et 6.....	17
Figure 8: Model F $i=90^\circ$	17
Figure 9: Mod_1_RP.grd.....	18
Figure 10: Mod1_F_RP.grd.....	18
Figure 11: Mod_1.grd ($J=3A/M$).....	22
Figure 12: Mod_1.grd ($J=6A/M$).....	22
Figure 13. Modèle tenant compte de l'aimantation rémanente.....	23
Figure 14. Modèle ne tenant pas compte de l'aimantation rémanente.....	23
Figure 15 : carte du Mod_1 réduit au pôle.....	25
Figure 16: a) $I_n=50^\circ$ et $I_a=-50^\circ$, b) $I_n=50^\circ$ et $I_a=50^\circ$	25
Figure 17: Réduction au pôle avec $I_n=50^\circ$ et $I_a=-50^\circ$	26
Figure 18 : cartes du model_1_F où on change I_a et I_n	26
Figure 19 : superposition d'une carte ($I_a=I_n=90^\circ$) sur sa RP.....	27
Figure 20. Cartes de dZs de la RP combinées au Ph (a) et à la dZ (b).....	28
Figure 21: Mod1_RP_GH.....	29
Figure 22 : Mod1_F2_RP_GH.....	29
Figure 23:Mod1_F_RP_GH.....	29
Figure 24 : TDR du Mod_1.....	30
Figure 25: TDR du Mod1_RP.....	30
Figure 26 : TDR du Mod_1V.....	30
Figure 27 : SA du Mod_1.....	31
Figure 28 : ETG du mod_1.....	32

Figure 29 : THETA appliqué sur Mod_1.....	32
Figure 30 : THETA appliqué sur Mod1_RP.....	32
Figure 31 : Exemple pratique d'un filon.....	34
Figure 32 : a) Crs dû au filon, b) la carte a avec la position du filon.....	34
Figure 33 : a) RP de la carte (figure 30) ; b) superposition avec les limites.....	35
Figure 34 : a) GH de la carte (figure 31) ; b) superposition avec les limites.....	35
Figure 35 : Carte géologique simplifiée de la boutonnière d'Iguerda.....	37
Figure 36 : Crs dû au filon.....	40
Figure 37 : RP du Crs du filon.....	41
Figure 38 : MagAM_RP_Ph10m.....	41
Figure 39 : MagAM_RP_Ph100m.....	41
Figure 40 : MagAM_RP_Ph1km.....	42

Liste des abréviations :

- GPR : (ground penetrating radar) radar à pénétration du sol
- RP : réduction au pôle
- DSM : Demi-Somme des Maximas
- GH : Gradient Horizontal
- PH : Prolongement vers le Haut
- SA : Signal Analytique
- ETG : (Enhanced Total Gradient) rehaussement du gradient total
- Crs : champ résiduel
- Cg : champ régional
- Ia : intensité de l'aimantation
- In : intensité du champ normal
- Da : déclinaison de l'aimantation
- Dn : déclinaison du champ normal

Liste des photos :

Photo 1 : Etudiants de la LST GRE 2021-22 en plein exécution d'un profil magnétique.....	7
Photo 2 Filon de Taïfast.....	38
Photo 3. Levé magnétométrique dans la zone du filon de Taïfast.....	39

Liste des tableaux :

Table 1 : Table 1 : Caractéristiques du levé de Taïfast.....	39
--	----

Introduction

Le champ magnétique dipolaire de la Terre se trouve amplifié par la présence en concentrations variables des minéraux magnétiques. La prospection magnétométrique a pour but de déceler ces concentrations à partir de la mesure des variations du champ magnétique terrestre qu'elles engendrent. La première étape consiste à faire des mesures qui permettent l'acquisition de données qui seront ensuite corrigées, traitées et mises en forme. Les cartes obtenues mettent en relief les anomalies magnétiques dont l'interprétation peut être poussée jusqu'à la détermination des dimensions et de la profondeur des corps magnétiques causatifs des anomalies.

L'objectif du présent travail est de présenter l'anomalie magnétique d'un objet quelconque à trois dimensions. Le champ ainsi calculé sera traité de façon à ressortir les caractéristiques de la source magnétique et de montrer l'intérêt des transformations magnétiques. Le deuxième volet concernera l'application de la magnétométrie à un cas réel où il est question de délimiter latéralement un filon d'oligiste afin d'élargir ou d'arrêter l'exploitation.

Le calcul du champ créé a été effectué par le programme Talwani qui utilise des structures décrites par des tranches afin de bien simuler la forme. Il intègre également la totalité de l'aimantation, aussi bien rémanente d'induite. Le reste des transformations sont réalisées par les programmes Transmap et WinSurf.

S'agissant du cas d'étude, le levé a été effectué par le magnétomètre du département (WCZ1) à titre d'exercice et d'essai du magnétomètre. Six profils de 200m de longueur chacun ont été réalisés à l'occasion des travaux de terrain d'un doctorant.

Nous espérons par le présent travail de bien montrer l'intérêt des transformations magnétiques, les traitements nécessaires et celles souvent utilisées et qui n'apportent aucune valeur ajoutée. Dans un deuxième temps on montrera comment le levé magnétométrique permet de résoudre des problèmes majeurs pour guider l'exploitation et de décider la poursuite ou l'arrêt d'extraction d'un minerai.

Chapitre I

Généralités sur les méthodes géophysiques.

I-1. Quelques définitions

La géophysique est une discipline des sciences de la Terre qui étudie les caractéristiques physiques de la Terre, utilisant des techniques de mesures indirectes (gravimétrie, géomagnétisme, sismologie, radar géologique, résistivité apparente, etc.). Son objet d'étude couvre tous les phénomènes liés à la structure, aux conditions physiques et à l'histoire évolutive de la Terre. On y distingue :

La géophysique théorique étudie les bases mathématiques de la géophysique et les applique pour simuler des processus géophysiques.

La géophysique expérimentale comprend des essais en laboratoire qui visent généralement à étudier les propriétés des matériaux – dans les conditions régnant à l'intérieur de la Terre.

La géophysique appliquée explore le sous-sol au moyen de méthodes de mesure géophysiques. Les résultats obtenus ont un but pratique:

- ✓ Recherche de matières premières (pétrole, eau, minerais).
- ✓ Recherche de dépôts de stockage définitif appropriés.
- ✓ Investigation de sites contaminés, études géotechniques et archéologiques.

L'exploration géophysique est souvent pratiquée à partir d'un trou de forage (géophysique en forage).

I-2. Méthodes de Prospection Géophysique

I-2-1. Méthode Magnétométrique

I-2-1-a. Généralités

Dans n'importe quel point de la surface de la Terre, l'aiguille de la boussole s'oriente. Cette orientation témoigne la présence d'un champ magnétique naturel lié à la terre. L'étude de l'action réciproque d'un aimant et d'une aiguille aimantée, fait ressortir que tout se passe comme si l'aimant et l'aiguille portaient des "masses magnétiques" positives et négatives susceptible d'être mesurées quantitativement.

Deux masses magnétiques m_1 et m_2 s'attirent si elles sont de signes contraires et se repoussent si elles ont le même signe, par des forces proportionnelles au produit de leur masse et en raison inverse du carré de leur distance "r".

Dans un milieu ambiant matériel :

$$\mathbf{F} = \frac{m_1.m_2}{\mu r^2} \quad (\text{Charles COULOMB})$$

Où : μ représente la perméabilité magnétique du milieu, dans le vide la perméabilité est égale à l'unité : Le gamma (γ); un gamma vaut 10^{-5} Oersted.

Le champ magnétique de la terre se caractérise par son intensité "**T**". Elle représente la force agissant sur l'unité de masse magnétique.

I-2-1-b. Prospection aéromagnétique

La prospection magnétique aérienne est largement utilisée, des magnétomètres adaptés (flux-gâte, à protons ou à pompage optique) sont portés et entraînés par avion ou par satellite à des altitudes bien déterminées, pour pouvoir mesurer les différents paramètres géomagnétiques de la terre: soit la variation du champ magnétique total ou bien la variation de la composante verticale "Z".

L'avantage de l'aéromagnétisme est de pouvoir éliminer les parasites magnétiques superficiels, permettant ainsi d'améliorer l'interprétation des anomalies magnétiques présentant un intérêt géologique.

Le choix de l'altitude et les lignes du vol dépendent de l'objectif recherché. En recherche minière, les altitudes sont relativement basses et les vols serrés; par contre en recherche pétrolière où l'on recherche plutôt des anomalies assez profondes liées au socle cristallin, les altitudes des vols doivent être respectivement hautes et écartés.

Les itinéraires de vol sont généralement constitués de profils de vol, rectilignes, parallèles, régulièrement écartés. Ces profils sont aussi perpendiculaires à la direction tectonique générale de la région.

L'altitude de vol, maintenue constante, peut varier en fonction du but recherché, elle est habituellement de 300 mètres; les profils parallèles sont distants les uns des autres de quelques centaines de mètres à une dizaine de kilomètres. La hauteur de vol est continuellement enregistrée par un altimètre (effet doppler), soit par radar, soit encore à l'aide d'un baromètre. Le positionnement de l'avion est effectué par un système de radionavigation (GPS) associé à quatre radars Doppler fournissant en continu la vitesse de l'avion ainsi que sa direction, ajouté à cela la prise de photographies aériennes réalisées en continu et qui permettent ainsi de définir avec exactitude le positionnement de l'avion.

La cellule sensible du magnétomètre aéroporté est placée dans une enceinte cylindrique allongée appelée "oiseau", tracté par un câble à une centaine de mètres de l'avion de manière à éviter l'effet magnétique de l'avion (bruits).

Les levés magnétométriques sont de deux types :

➤ Levés aériens

Les levés aériens dont l'objectif est de faire de la cartographie régionale (lithologie, structure etc.). En exploration minière, ces levés permettent de mettre en évidence des cibles potentielles. Ils sont également utilisés dans l'exploration pétrolifères et l'étude des grands bassins sédimentaires.

➤ Levés au sol

Les levés au sol permettent de vérifier les anomalies décelées par les levés régionaux et contribuent de façon directe à la découverte des gisements.

Efficacité de méthode magnétique

La magnétométrie est la méthode la plus utilisée en exploration minière car c'est la moins coûteuse et la plus informative sur l'évaluation du potentiel minier d'une région donnée. Elle contribue à cette évaluation de trois façons :

- Détection directe des gisements de fer et des formations de fer aurifères ainsi que des gisements d'amiante (les fibres sont intimement associées avec la magnétite et se trouvent dans les roches très basiques).
- Détection indirecte de minéralisations associées à des minéraux ou roches magnétiques (Le Nickel, la Chromite et le Manganèse associés à des roches ultrabasiques).
- Cartographie géologique et structurale (lithologies illustrant des contrastes de susceptibilité magnétique, failles, fractures, plis, topographie du socle, etc.).

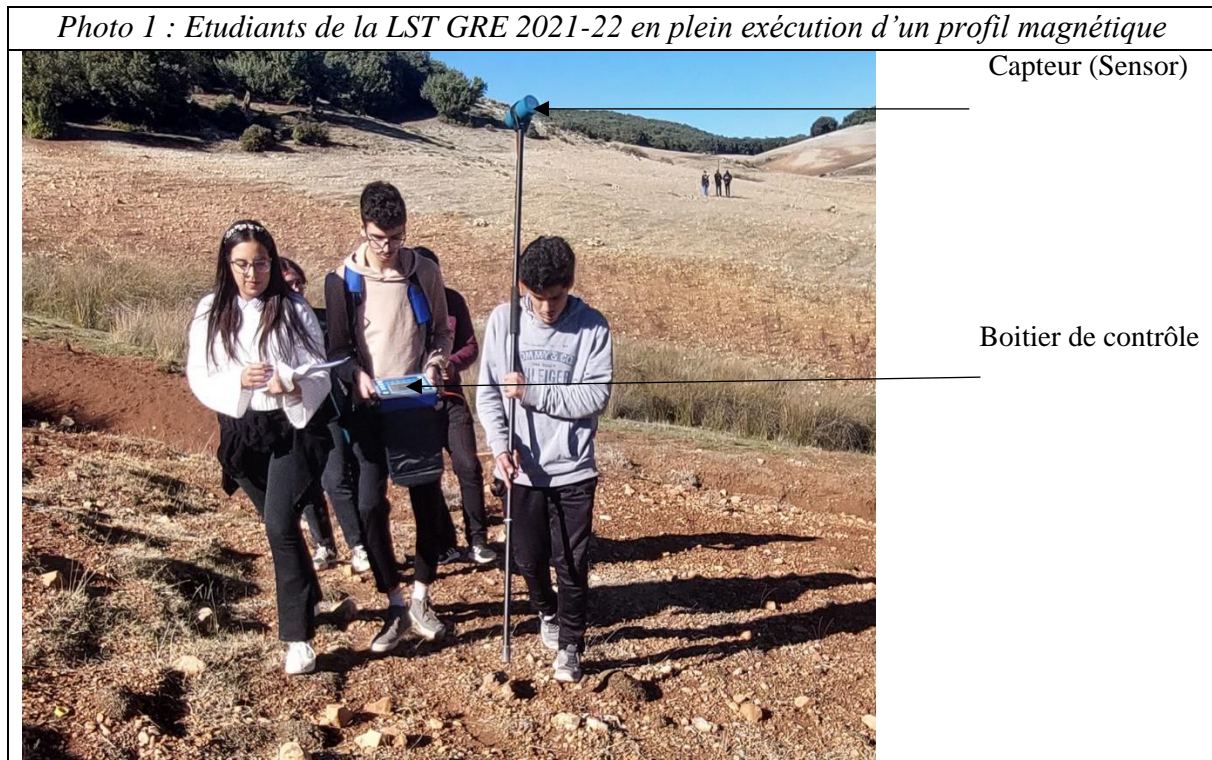
Mise en œuvre de la méthode magnétique sur le terrain

La mise en œuvre sur le terrain d'un levé magnétométrique nécessite deux magnétomètres synchronisés : l'un mobile (photo 1), et l'autre immobile représentant la base. Lors de la réalisation d'un levé magnétique, il est nécessaire de respecter le minimum d'instructions suivant :

- ❖ effacer la mémoire ;
- ❖ synchroniser les deux magnétomètres ;
- ❖ installer la base qui mesure en mode continue (cycle de 10s) ;
- ❖ s'assurer que l'opérateur est dépourvu d'objets métalliques qui pourront bruite les mesures ;
- ❖ s'assurer de la stabilité des mesures des deux instruments ;
- ❖ rentrer les paramètres du levé : champ de référence, position, etc. ;
- ❖ commencer les mesures avec le magnétomètre mobile ;

A la fin de chaque journée, les données sont transférées sur ordinateur, corrigées des variations diurnes, intégrées à la base de données des journées précédentes et contrôlées par visualisation sous forme d'une carte de contours ou de profils du champ total.

Photo 1 : Etudiants de la LST GRE 2021-22 en plein exécution d'un profil magnétique



La géophysique rassemble d'autres méthodes, parmi lesquelles nous citons :

I-2-2. Méthode Gravimétrique

La gravimétrie est une méthode de prospection géophysique basée sur l'exploitation du champ de gravité. Tout corps doté d'une masse (densité) situé en surface ou sous terre (enfouis) est attiré vers le centre de la terre par une force proportionnelle au produit des deux masses respectivement la masse du corps et la masse de la terre (supposée concentrée en son centre) et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Cela se traduit par l'expression suivante :

$$F = G \frac{m.M}{R^2} \quad (\text{NEWTON 1687})$$

(Avec m très négligeable devant M : masse de la terre)

$$\text{Alors } F \text{ devient : } F = G \frac{M}{R^2}$$

Où : $G=6,674.10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ou bien $[G]=\text{N.m}^2 \text{ kg}^{-2}$; R : rayon de la terre.

Rayon polaire= 6356.75 km ; Rayon équatorial= 6378.14 km ; $g=9,780318(1+5,3024.10^{-3} \cdot \sin^2(L) + 5,9.10^{-6} \sin^2(2L)) \dots$ où L : latitude du point ; $g_{\text{pole}}=9,83 \text{ ms}^{-2}$; $g_{\text{équateur}}=9,78 \text{ m.s}^{-2}$ (c'est la valeur de g théorique).

g anomalie est obtenu en faisant la différence entre la valeur de g théorique et la valeur de g mesurée à l'aide d'un gravimètre, des corrections dites de Bouguer sont introduites (correction d'air libre ; correction de plateau ; correction de relief).

$$\mathbf{Anomalie}_{\text{bouguer}} = \mathbf{g}_{\text{mes}} - \mathbf{g}_{\text{th}} + \mathbf{C}_{\text{al}} + \mathbf{C}_{\text{pl}} + \mathbf{C}_{\text{relief}} \text{ (Pierre Bouguer)}$$

Où: \mathbf{g}_{mes} : mesure observée ; \mathbf{g}_{th} : valeur théorique de la pesanteur ; \mathbf{C}_{al} : correction air libre ;

\mathbf{C}_{pl} : correction de plateau ; $\mathbf{C}_{\text{relief}}$: correction de relief.

I-2-3. Méthode électrique

La prospection électrique est une des méthodes géophysiques, appliquée dans l'exploration du sous-sol, par sondage électrique vertical ou par profilage électrique (recherche des conducteurs).

Le signal émis consiste à envoyer un courant électrique dans le sol à travers des électrodes d'émission (A, B) et recevoir la réponse du sous-sol à travers les électrodes de réception (M, N).

La profondeur d'investigation s'étale de quelques centimètres à quelques centaines de mètres de profondeur; donc son spectre d'utilisation est très large: En sub-surface, en recherche minière, dans l'agriculture, dans l'aménagement du territoire, construction de bâtiments, des ponts et chaussés, voies ferrées, dans les recherches archéologiques, également dans la recherche des aquifères en hydrogéologie. Elle est utilisée en sub-surface, grâce aux techniques de multi électrodes, on peut ausculter la partie superficielle du sol avec une grande précision.

La base théorique de la prospection électrique, consiste à étudier le champ électrique correspondant aux coupes géoélectriques prédéfinies ou données théoriques (modèles théoriques). Le modèle théorique celui des courbes théoriques ou abaque est obtenu à partir de cette formule :

$$\rho_a = \rho_1 [1 + 2 \sum r^3 (K_{12})^n / [(r^2 + (2nh_1)^2)^{3/2}]$$

La résolution du problème inverse consiste à retrouver les paramètres géoélectriques à partir des données expérimentales; le problème inverse est la confrontation du modèle théorique avec celui du modèle expérimental.

Le modèle expérimental est obtenu à partir des mesures prises sur le terrain et sont convertis à l'aide de cette formule :

$$\rho_a = \mathbf{K} \cdot \Delta \mathbf{V} / \mathbf{I} ; \quad \mathbf{K} : \text{coefficient du dispositif (Chapellier, 2000).}$$

I-2-4. Le Radar géophysique

La prospection géoradar de surface ou GPR (ground penetrating radar) est une des méthodes géophysiques exploitant les ondes électromagnétiques, elle est proche de la méthode sismique réflexion, Par contraste avec cette dernière, les instruments radar utilisent des ondes électromagnétiques au lieu d'ondes acoustiques. Le géoradar utilise des antennes (émetteur récepteur intégrés) au lieu de géophones, qui suivant leur fréquence étalent leur profondeur d'investigation, ainsi pour une antenne de 1.5 GHz, la profondeur d'investigation serait de 40 cm et une antenne de 80 MHz la profondeur d'investigation atteindrait les 30 à 40 mètres de profondeur.

Cette méthode géophysique nouvellement adaptée, d'une technologie intégrée, répond bien aux préoccupations des géologues, géophysiciens et explorateurs en générale qui s'intéressent à de faibles profondeurs, que ce soit dans le domaine des travaux publics (Pose et suivi de canalisations eau, gaz, égouts, câblages d'électricité, de téléphone, câble de télécommunication fibre optique) ; Génie civil (auscultation des structures béton armé et armatures métalliques), en Aménagement du territoire (Recherche de nappes, détection des zones polluées par des hydrocarbures ou d'autres traces de pollution) ; Dans le domaine de l'exploration des hydrocarbures (sondage de diagraphie), suivi du tubage en forage et de son environnement, fuite des hydrocarbures, également dans le domaine de la recherche archéologique. C'est un outil nouvellement introduit en Algérie qui contribue parallèlement aux autres méthodes géophysiques à résoudre les difficultés d'accès rencontrés jadis en zone urbaines ou dans les forages pétroliers.

I-2-5. Méthode sismique

La sismique s'emploie pour désigner d'une manière générale les vibrations et les secousses C'est une méthode géophysique, sa théorie est construite à partir des connaissances de l'élasticité, de l'optique géométrique, de la physique vibratoire, du traitement du signal, et enfin de la géologie.

Pour connaître la constitution géologique d'une région, les géophysiciens procèdent à diverses mesures de surface. Pour préciser en particulier les courbes de niveau des couches géologiques, ils emploient les méthodes de la prospection sismique: Une explosion est provoquée au voisinage des couches superficielles du terrain étudié. L'onde de choc, provoquée artificiellement se propage dans le sous-sol. Les couches géologiques étant de densité et de nature différente, lorsque le front d'onde franchit la frontière séparant deux couches, une partie de l'énergie transportée est réfléchiée et réfractée vers la surface du fait de la discontinuité des constantes élastiques des couches.

En surface des sismographes enregistrent les arrivées de l'énergie libérée par l'explosion durant les 4 ou 5 secondes qui la suivent.

En pointant ces arrivées sur les sismogrammes (section temps) et en recoupant leurs indications avec celles procurées par d'autres mesures, le géophysicien établie des cartes en isochrones qui traduisent la position des différentes structures en terme de profondeur.

La connaissance d'une loi de vitesse permet de convertir ces cartes en isochrone en cartes d'isobathe (égale profondeur).

On distingue deux méthodes de prospection sismique: la sismique réflexion et la sismique réfraction. Elles ont toutes deux pour but de déterminer la profondeur et la forme des discontinuités géologiques, qui constituent le sous-sol.

Chapitre II

Champs magnétique créé par des structures synthétiques et Transformations des cartes

II-1. Introduction

Dans ce chapitre nous calculons l'effet magnétique de structures prismatiques à l'aide du programme Talwani (Talwani 1964) qui décrit la source magnétique, ayant une certaine aimantation, par des tranches. Chaque tranche, qui est un polygone, est définie par les coordonnées de ses sommets et sa profondeur. C'est une méthode très puissante qui permet de bien simuler la forme de l'objet. Le résultat est une grille de données qui sera ensuite adapté au logiciel WinSurf, de Golden Software, pour les diverses présentations et manipulations à savoir le calcul des dérivées les filtrages les opérations arithmétiques etc. La réduction au pôle et la dérivée verticale quant à eux sont effectuées par le programme Transmap.exe.

Dans ce qui suit, les différentes manipulations et résultats sont résumés dans des tableaux.

II-2. Calcul du champ magnétique dû à un prisme utilisant la méthode Talwani (M. Talwani, 1965)

Caractéristiques du levé, du prisme et du champ ambiant :

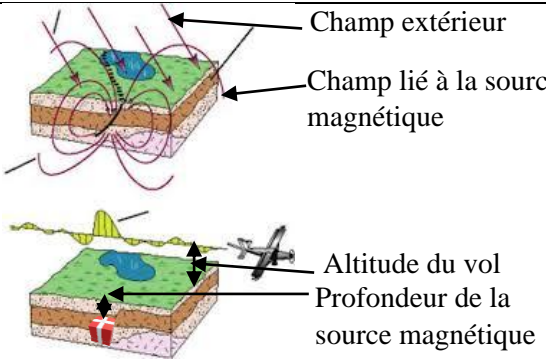
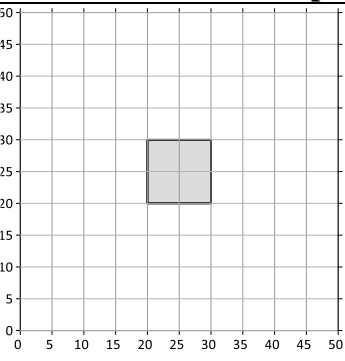
II-2-1. Cas le plus simple correspondant à la position du Maroc

Déclinaison = 0° et inclinaison = 50° aussi bien pour le champ extérieur que pour l'aimantation.

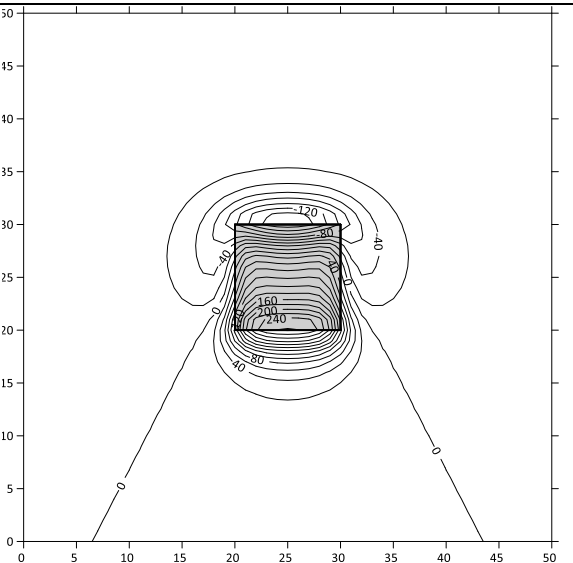
Voici un fichier réponse type pour le programme Talwani.

0	Azimut des lignes de vol
1	Altitude du plan de vol
0 50	Déclinaison et inclinaison champ normal
1	Nombre de prisme
1	Numéro du prisme
3 0 50 3	Nbre de tranches déclinaison inclinaison et intensité de l'aimantation
1 4	Profondeur de la tranche et nombre de sommets
20 20	Coordonnées de chaque sommet
20 30	Coordonnées de chaque sommet
30 30	Coordonnées de chaque sommet
30 20	Coordonnées de chaque sommet
1.5 4	Profondeur de la tranche et nombre de sommets
...	Coordonnées de chaque sommet
2 4	Profondeur de la tranche et nombre de sommets
...	Coordonnées de chaque sommet

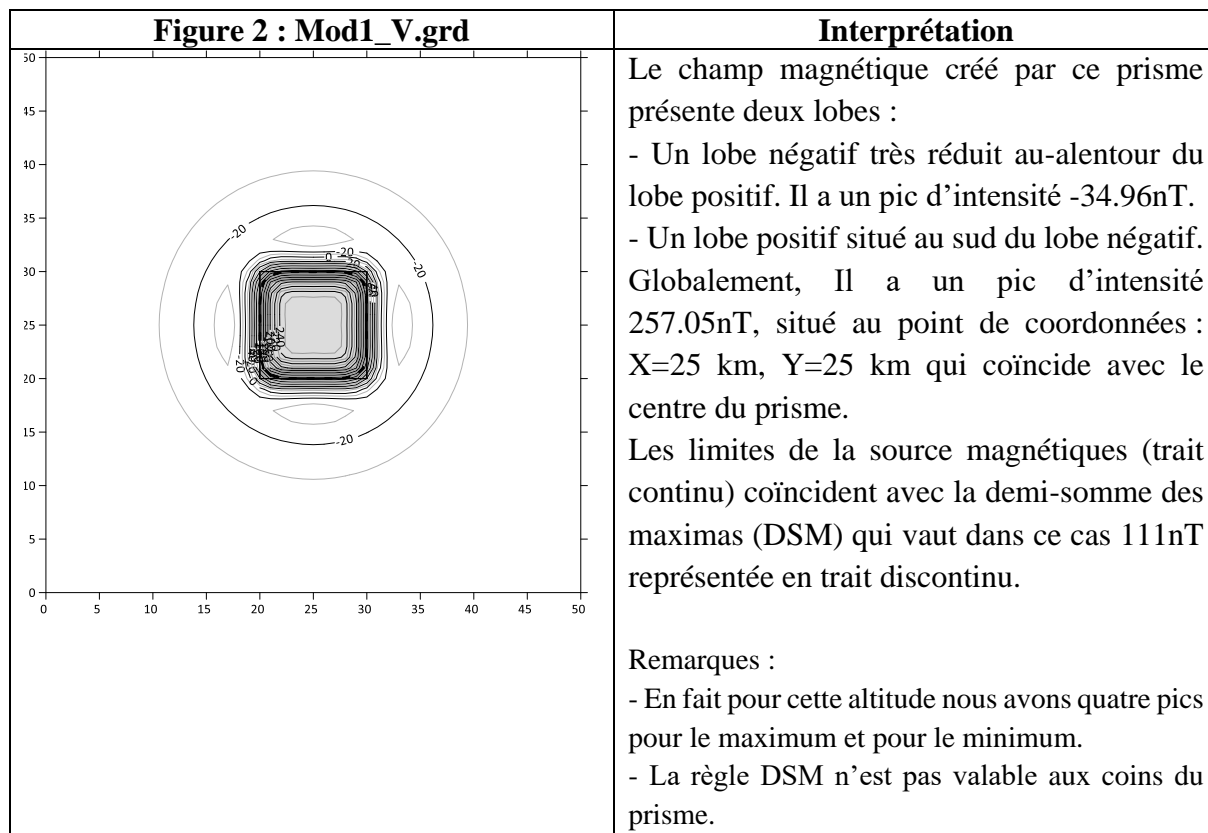
Schéma explicatif des paramètres les plus importants du modèle :

schéma	Description
 <p>Champ extérieur</p> <p>Champ lié à la source magnétique</p> <p>Altitude du vol</p> <p>Profondeur de la source magnétique</p>	 <p>Position du prisme (vue de dessus) par rapport à la grille. Pour une tranche Les quatre sommets ont pour coordonnées : (20, 20) ; (20, 30) ; (30, 30) ; (30, 20)</p>

Résultat

Figure 1 : Mod_1.grd	Interprétation
	<p>Le champ magnétique créé par ce prisme présente deux lobes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Un lobe négatif situé au nord du lobe positif. Il a un pic d'intensité -155.33 nT, situé au point de coordonnées : X=25 km, Y=30 km - Un lobe positif situé au sud du lobe négatif. Il a un pic d'intensité 262.17 nT, situé au point de coordonnées : X=25 km, Y=20 km. <p>Moyenne = 0.97 nT (≈ 0 nT).</p> <p><i>Rappelons que la déclinaison de l'aimantation ainsi que celle du champ magnétique extérieur est N0.</i></p> <p>L'axe joignant les maxima est orienté N0.</p> <p>La position du toit de la source magnétique est située entre les deux lobes.</p> <p>Dans la direction N-S Ses limites coïncident avec les pics des deux maxima.</p>

II-2-2. Cas où l'inclinaison du champ magnétique extérieure et de l'aimantation du prisme valent 90°

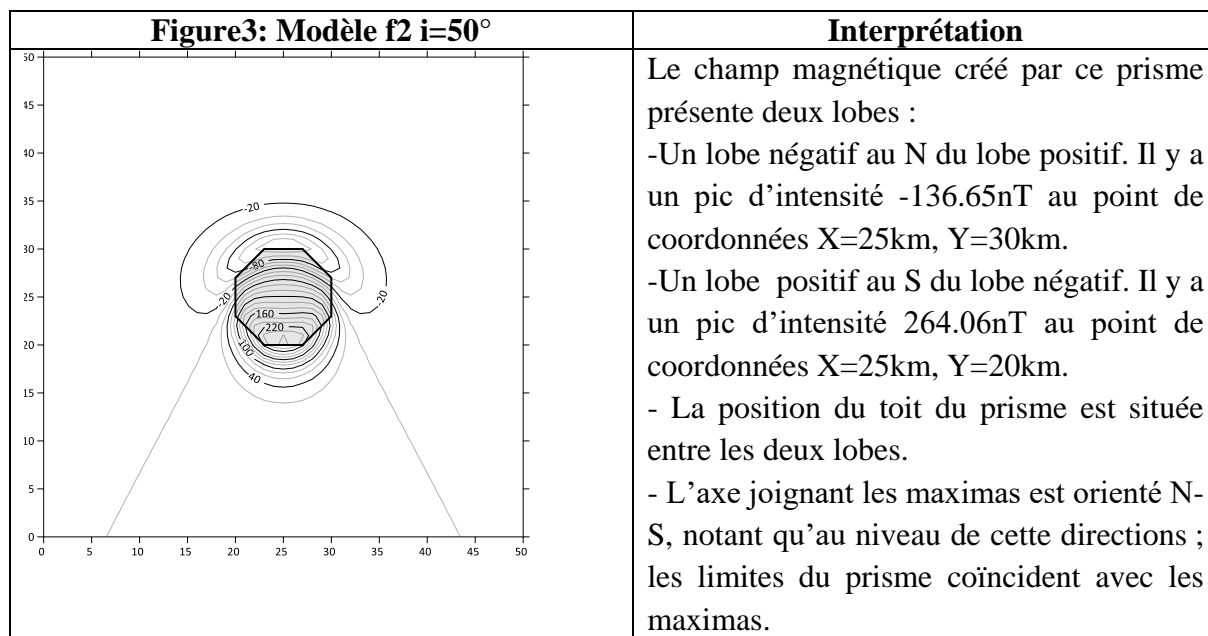


II-2-3. Prisme de forme octogonale : modèle f2

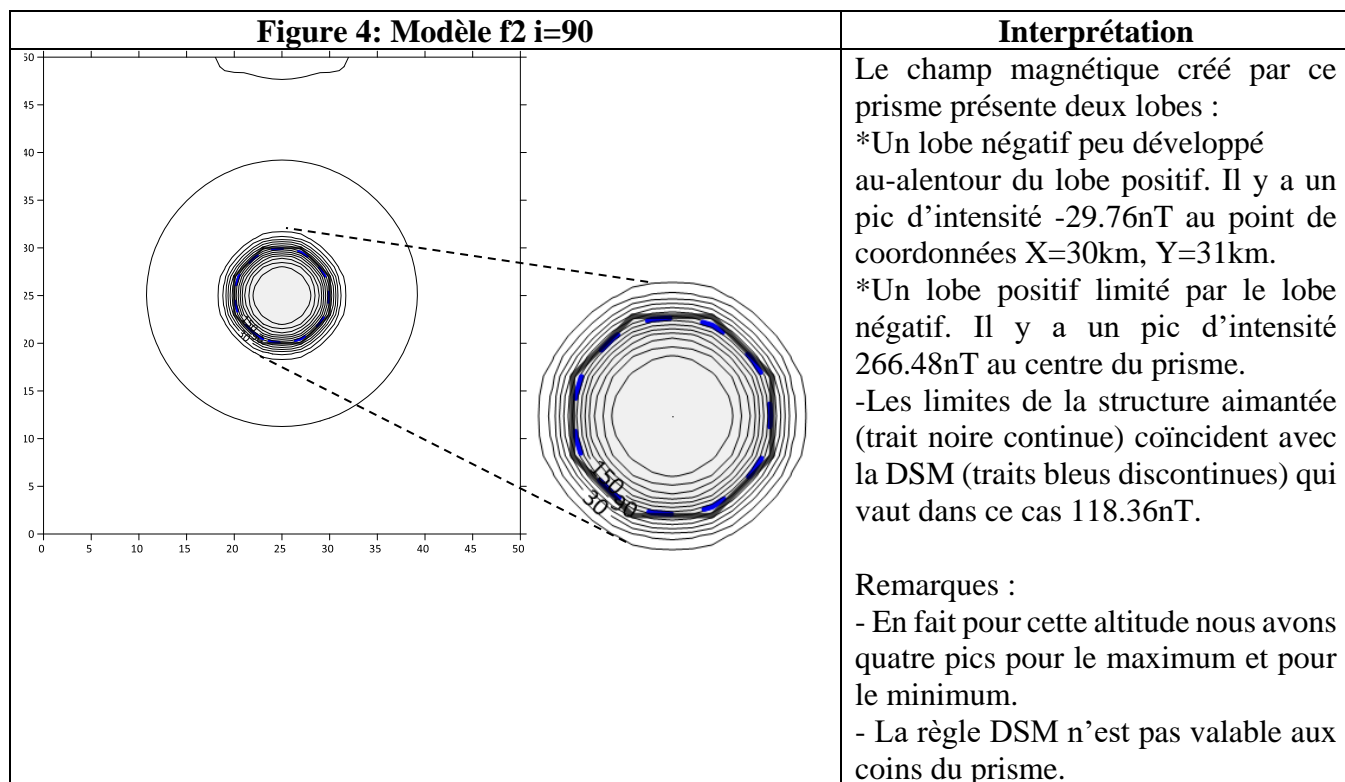
0	Azimut des lignes de vol
1	Altitude du plan de vol
0 50	Déclinaison et inclinaison champ normal
1	Nombre de prisme
1	Numéro du prisme
3 0 50 3	Nbre de tranches déclinaison inclinaison et intensité de l'aimantation
1 8	Profondeur de la tranche et nombre de sommets
23 30	Coordonnées de chaque sommet
27 30	Coordonnées de chaque sommet
30 27	Coordonnées de chaque sommet
30 23	Coordonnées de chaque sommet
27 20	Coordonnées de chaque sommet
23 20	Coordonnées de chaque sommet
20 23	Coordonnées de chaque sommet
20 27	Coordonnées de chaque sommet
1.5 8	Profondeur de la tranche et nombre de sommets
...	Coordonnées de chaque sommet
2 8	Profondeur de la tranche et nombre de sommets
...	Coordonnées de chaque sommet

Résultat

II-2-3-a) cas où Déclinaison=0°, Inclinaison=50° aussi bien pour le champ extérieur que pour l'aimantation.



II-2-3-b) cas où l'inclinaison du champ magnétique et de l'aimantation du prisme valent 90°

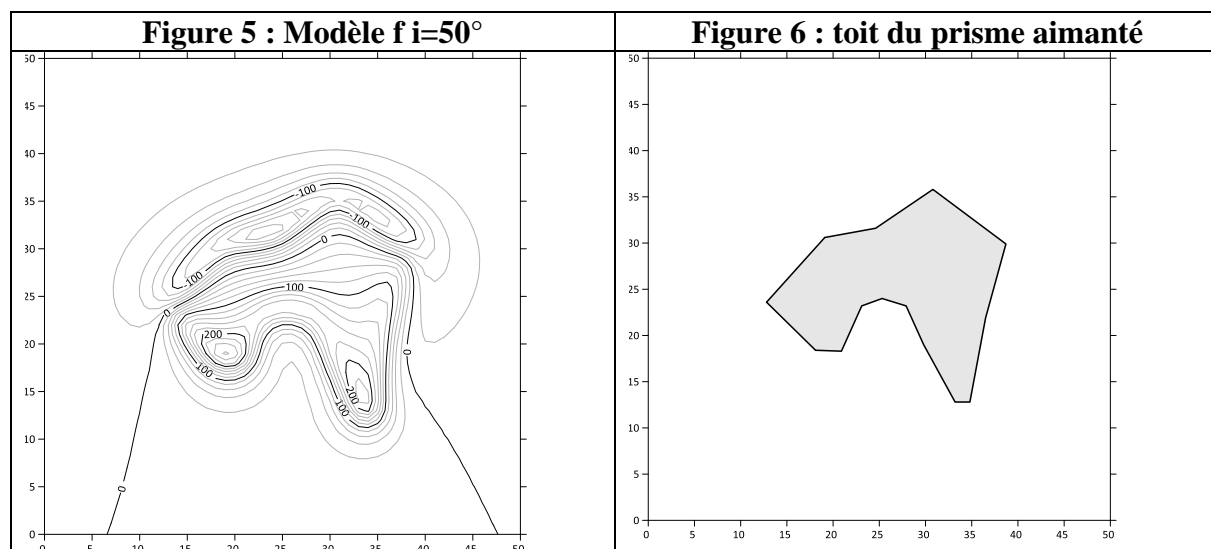


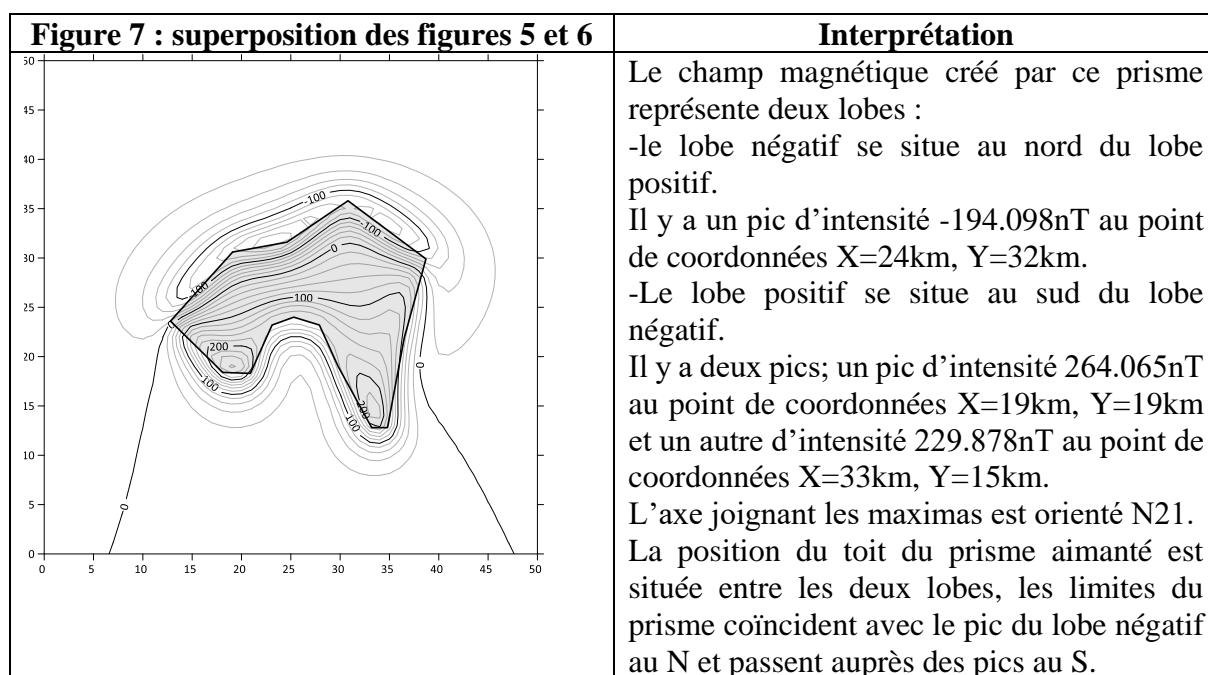
II-2-4. Prisme de forme quelconque : modèle f

0	Azimut des lignes de vol
1	Altitude du plan de vol
0 50	Déclinaison et inclinaison champ normal
1	Nombre de prisme
1	Numéro du prisme
3 0 50 3	Nbre de tranches déclinaison inclinaison et intensité de l'aimantation
1 14	Profondeur de la tranche et nombre de sommets
12.8 23.6	Coordonnées de chaque sommet
19.1 30.6	Coordonnées de chaque sommet
24.6 31.6	Coordonnées de chaque sommet
30.8 35.8	Coordonnées de chaque sommet
38.7 29.9	Coordonnées de chaque sommet
36.5 21.9	Coordonnées de chaque sommet
34.8 12.8	Coordonnées de chaque sommet
33.2 12.8	Coordonnées de chaque sommet
29.8 19	Coordonnées de chaque sommet
27.9 23.2	Coordonnées de chaque sommet
25.3 24	Coordonnées de chaque sommet
23.1 23.2	Coordonnées de chaque sommet
20.9 18.3	Coordonnées de chaque sommet
18.1 18.4	Coordonnées de chaque sommet
1.5 14	Profondeur de la tranche et nombre de sommets
...	Coordonnées de chaque sommet
2 14	Profondeur de la tranche et nombre de sommets
...	Coordonnées de chaque sommet

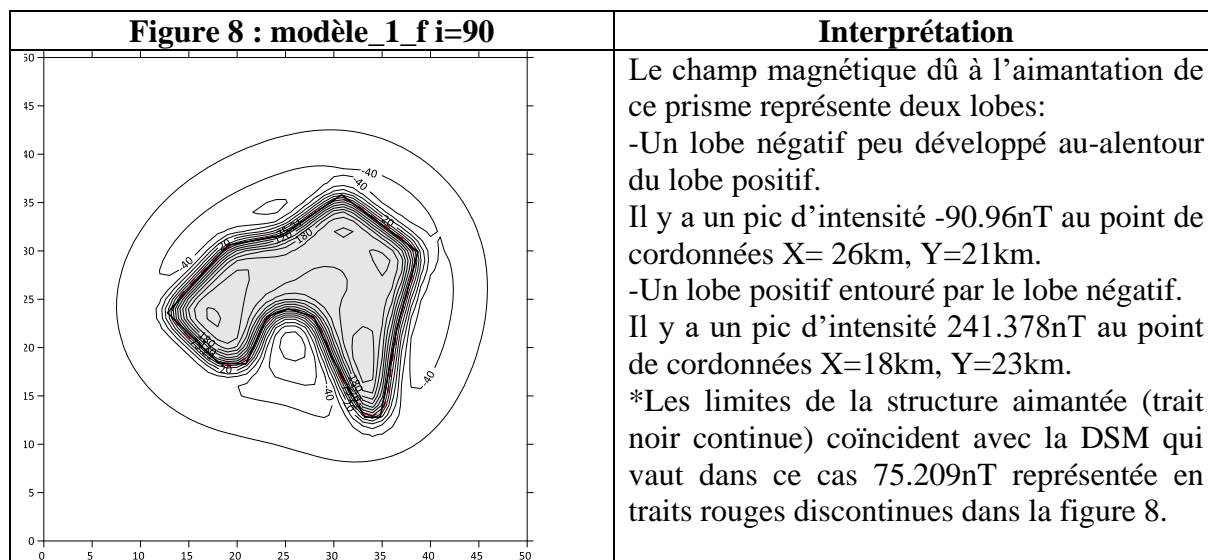
Résultat

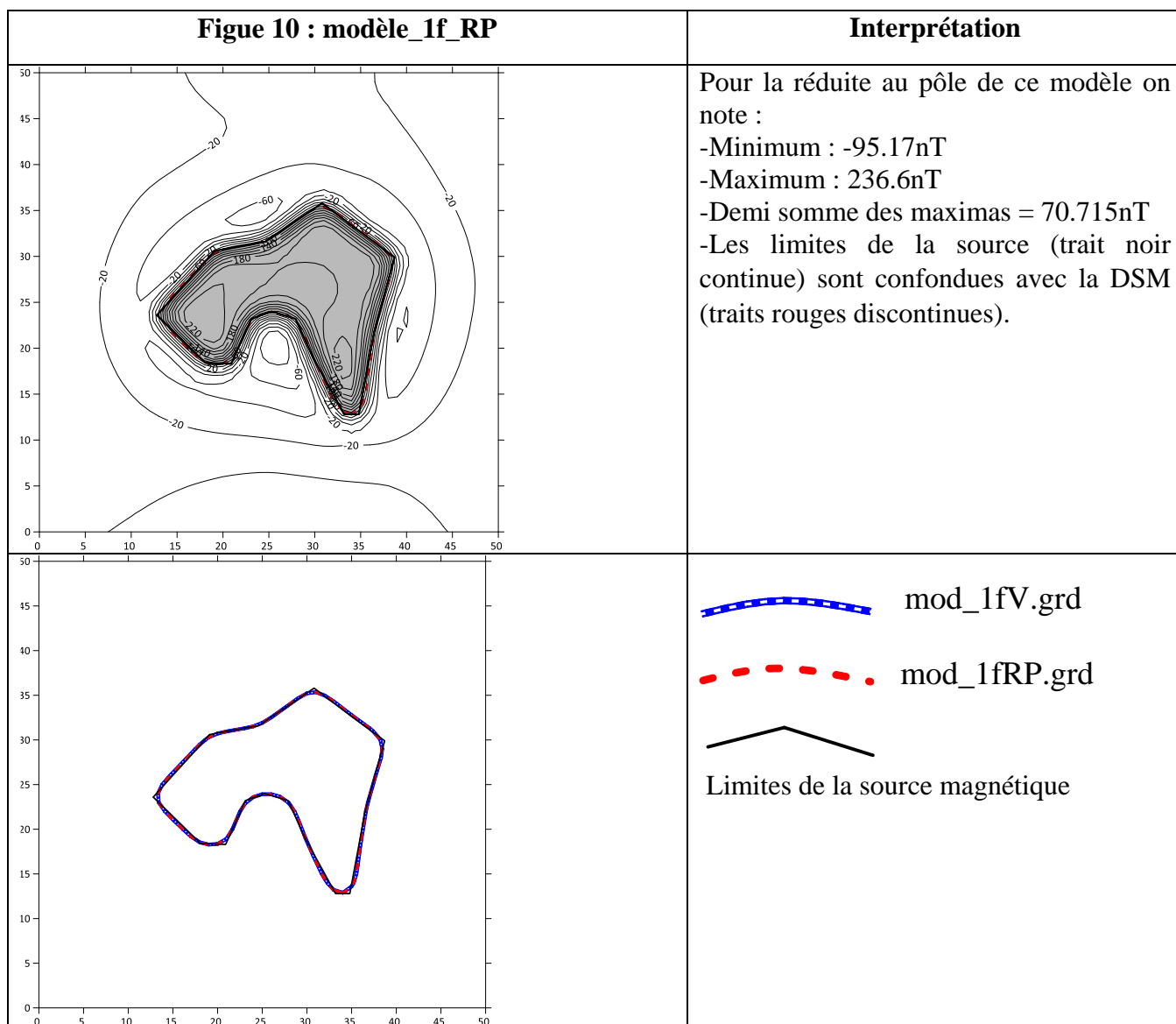
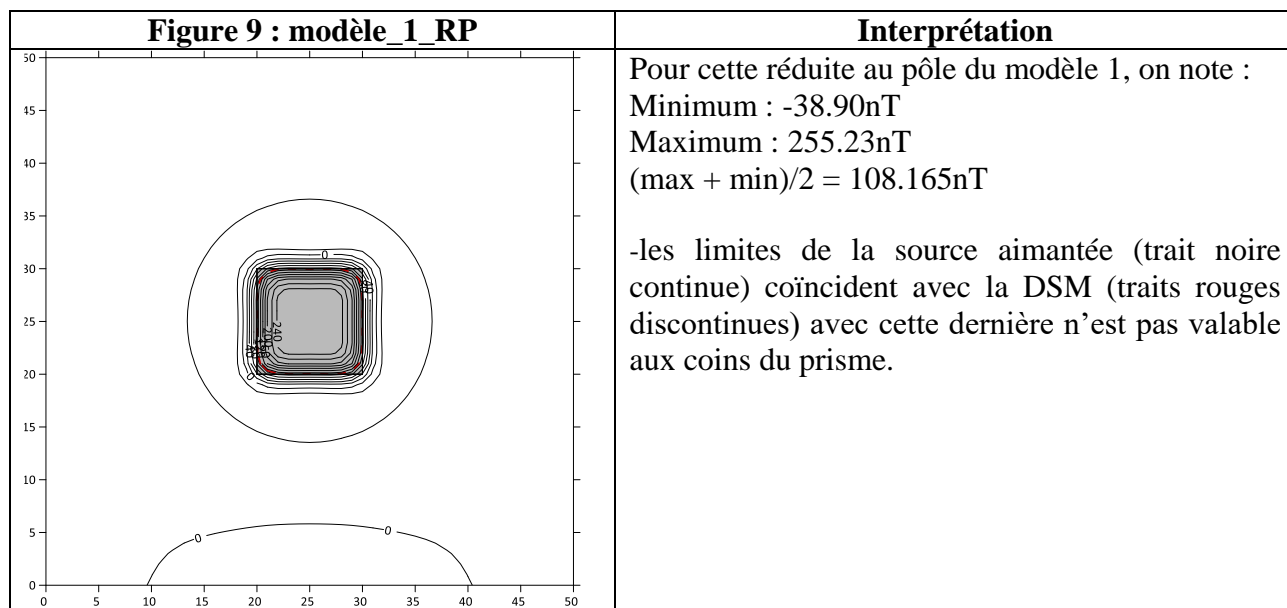
II-2-4-a.) Cas où Déclinaison=0°, Inclinaison=50° pour le champ magnétique et pour l'aimantation





II-2-4-b.) Cas où l'inclinaison du champ magnétique et de l'aimantation du prisme vaut 90° .

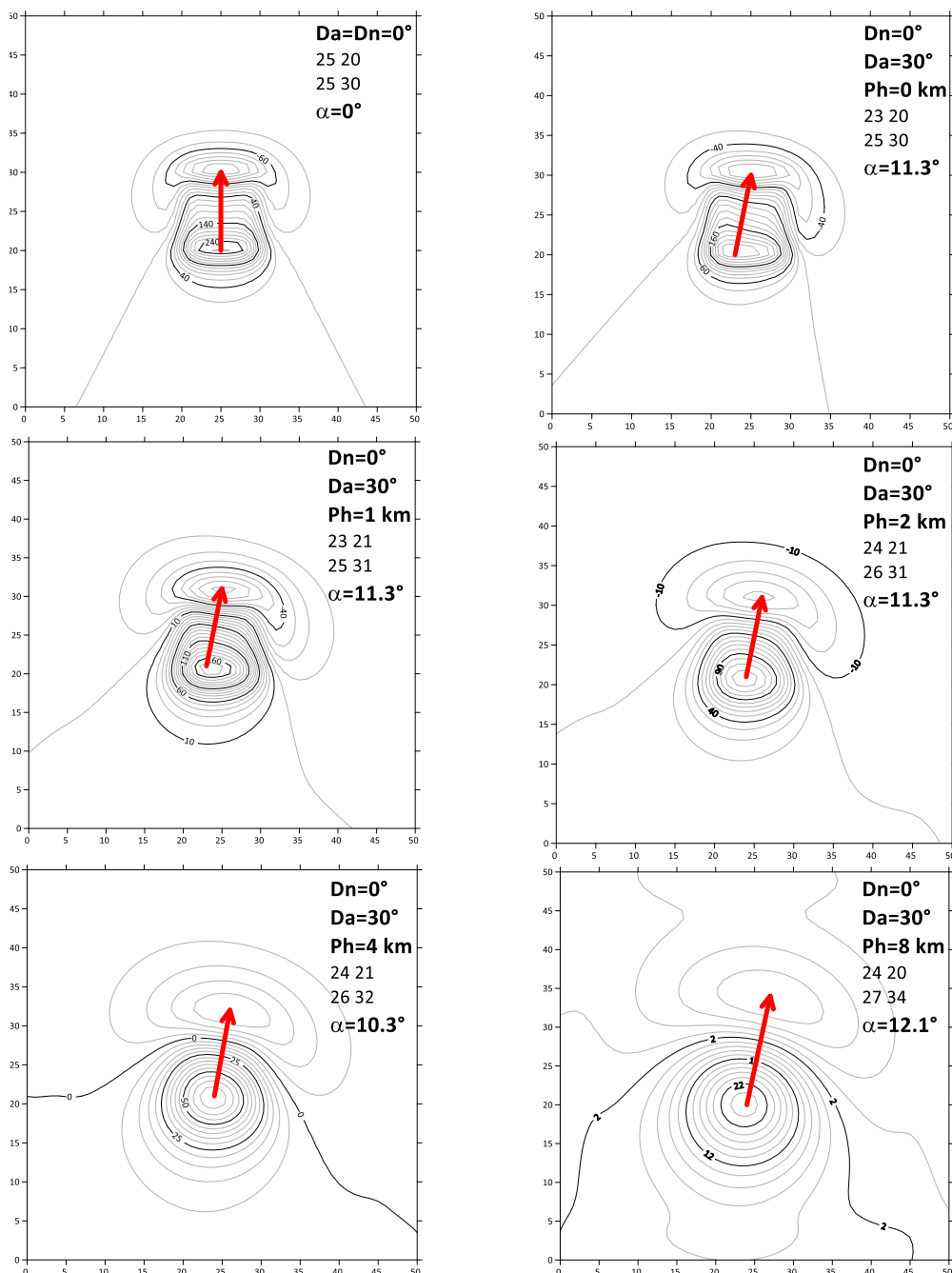




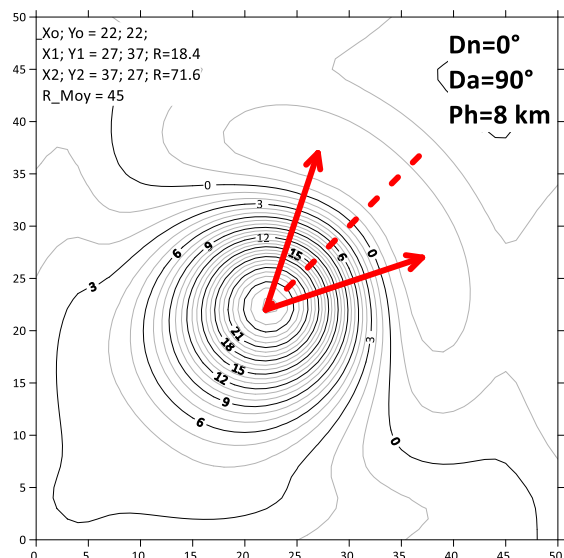
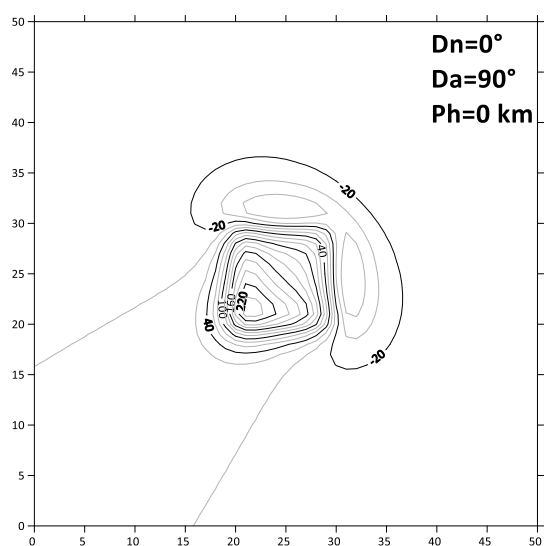
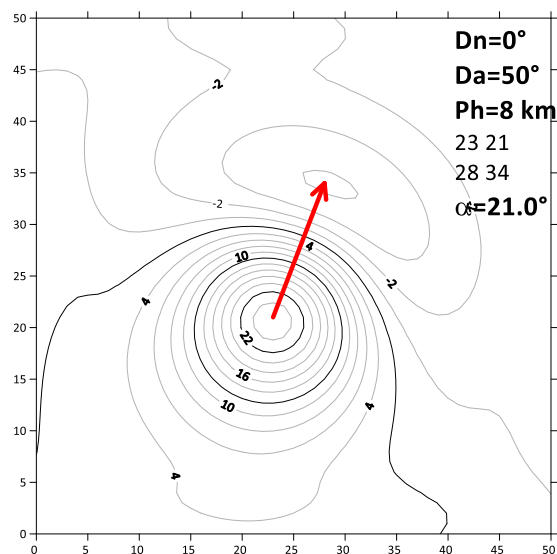
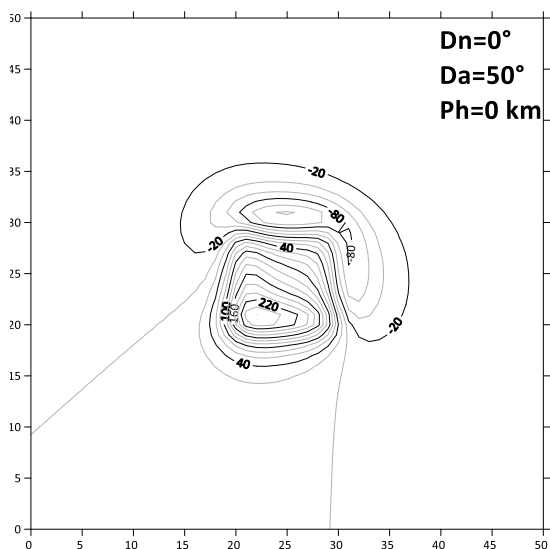
II-3. Influence de la déclinaison

Nous recalculons dans le présent paragraphe le champ du prisme type Mod1 mais en lui affectant différentes déclinaisons, afin d'examiner la forme de l'anomalie. Le but est d'avancer une possible rotation horizontale en examinant la forme de l'anomalie.

II-3-1. Cas où $Dn=0$ et $Da=30^\circ$ à différentes altitudes de prolongement



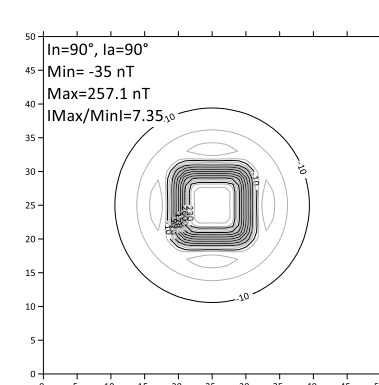
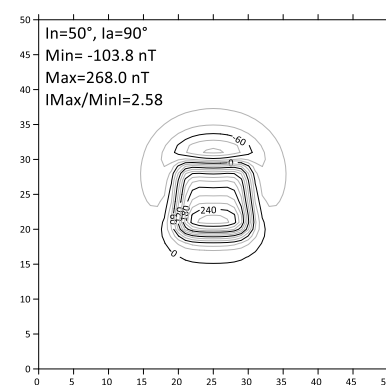
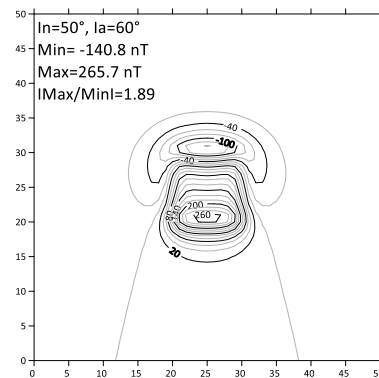
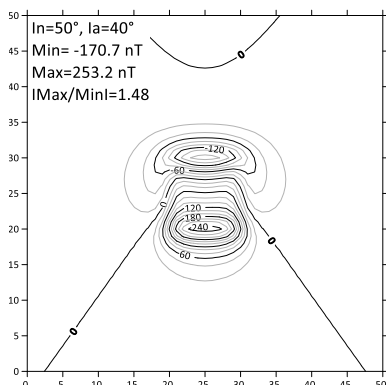
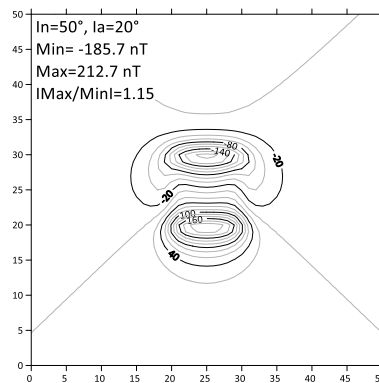
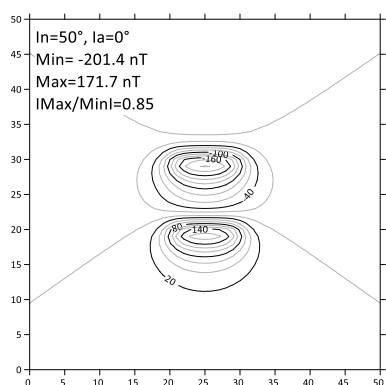
Interprétation : On s'aperçoit que lorsque la source magnétique tourne (la déclinaison tourne) l'axe joignant les maxima tourne également avec une valeur inférieure même si on prolonge l'anomalie vers le haut pour éviter la forme de l'anomalie très influencée par celle de la source.

II-3-2. Influence de la déclinaison ($Da=50^\circ$ et $Da=90^\circ$)

Interprétation : De manière générale : on constate que si la source subit une rotation horizontale qui sera accompagnée par une rotation de la déclinaison, alors l'axe joignant les maximas tourne dans le sens de la rotation. La valeur de rotation de l'axe est toujours inférieure à celle de la rotation vraie même si on change la forme de l'objet ou en lissant l'anomalie magnétique par un prolongement vers le haut. Il s'agit donc d'une mise en évidence de la rotation et non sa valeur.

II-4. Influence de l'inclinaison

Etude de basculement de bloc : Lorsque la source magnétique subit un basculement (mouvement de rotation dans le plan vertical) la valeur de l'inclinaison change : elle diminue si la rotation est dans le sens horaire et augmente dans le sens contraire.



Interprétation : Lors d'un basculement du bloc dans le sens horaire, l'inclinaison diminue et par conséquent l'intensité du lobe négatif diminue. Comparée à sa valeur normale (I_{ref}) on déduit si la source magnétique à subir un basculement.

II-5. L'intensité de l'aimantation

Elle est composée d'une aimantation rémanente (J_r) et d'une aimantation induite (J_i)

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_i + \mathbf{J}_r$$

La J_i est induite par un champ extérieur, He. Elle est présente tant qu'il est présent, si on met l'échantillon dans une enceinte protégée du He, la J_i disparaît.

$$\mathbf{J}_i = \chi \times \mathbf{H}_e \times 10^{-2}/4\pi \text{ [A/m]}$$

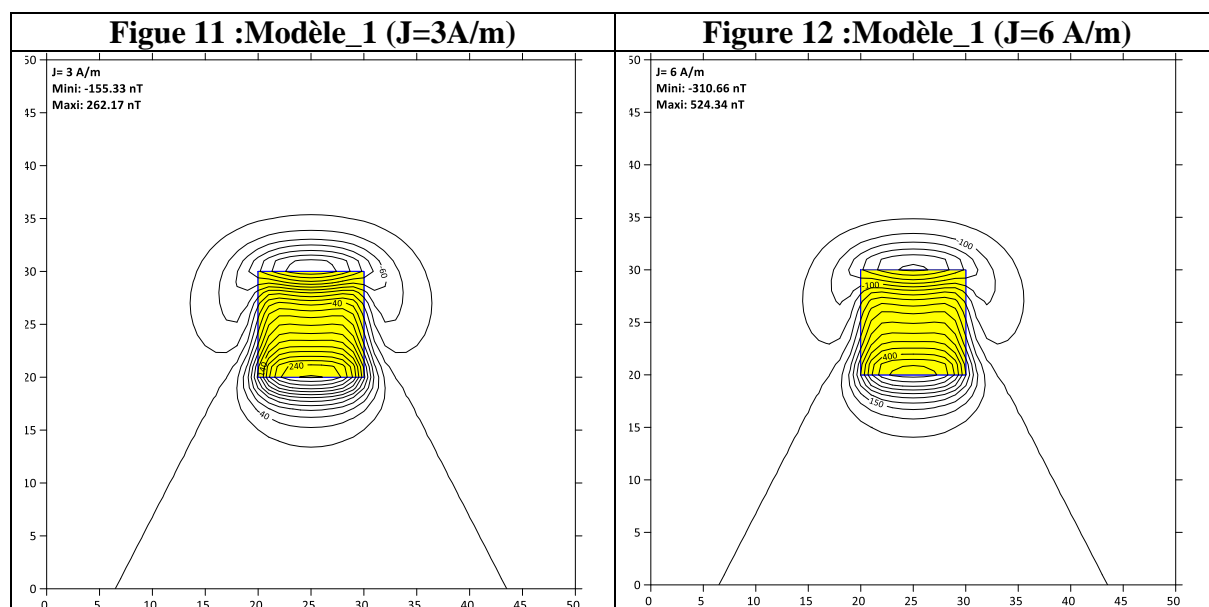
(χ étant la susceptibilité sans dimension dans le SI)

La J_r subsiste à l'intérieur de la roche même en l'absence de He. Son expression est :

$$\mathbf{J}_r = \mathbf{M}/v \text{ [A/m]}$$

Où \mathbf{M} est le moment magnétique et v le volume de l'échantillon.

Un corps aimanté produit une anomalie magnétique. L'intensité de l'anomalie est directement proportionnelle à l'intensité de l'aimantation.

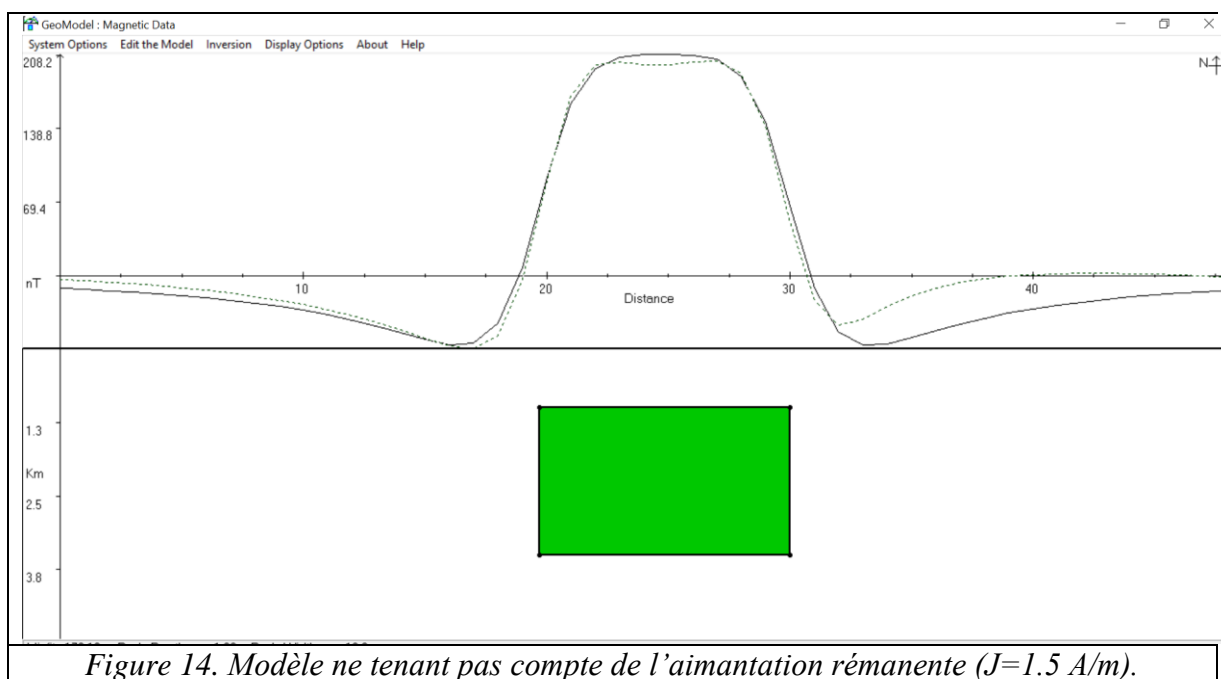
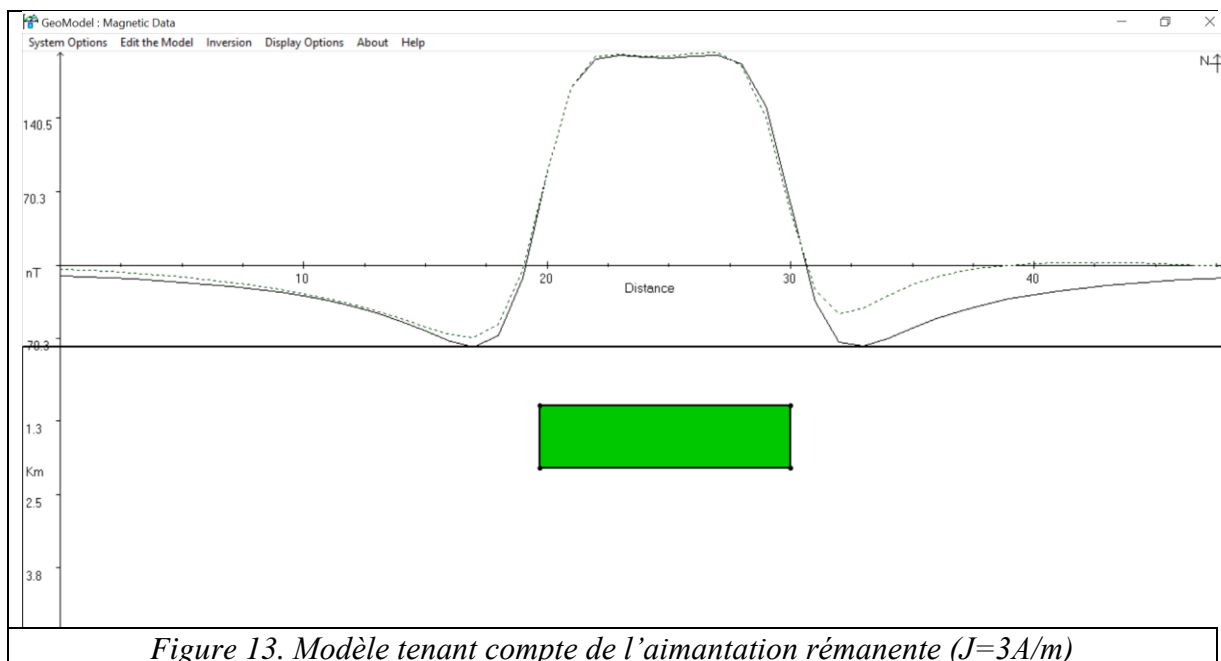


On constate que la forme de l'anomalie reste la même juste les valeurs de l'intensité se double si l'aimantation se double.

Important : Si on ne considère que la susceptibilité et donc la J_i , on sous-estime l'aimantation et lors de la modélisation on doit surestimer le volume afin d'ajuster le profil théorique au profil observé.

Exemple : supposons que l'on cherche à modéliser une source magnétique d'aimantation 3 A/m, sachant que l'aimantation induite est d'intensité 1.5 A/m et l'aimantation rémanente est d'intensité 1.5 A/m.

Le levé est pris à 1 km d'altitude et le toit horizontal de la source se trouve à 1 km de profondeur. L'intensité du champ normal est 45 000 nT avec $D_n=0^\circ$ et $I_n= 57^\circ$.



*Ajustement du modèle (figure 14) en ajoutant de la matière de compensation (la source magnétique) ayant $J=1.5 A/m$, alors que le vrai modèle est celui de la figure 13.

Epaisseur surestimé de $100 \times (3.5-2.05) / 2.05 = 70.73\%$.

Lorsqu'on commet ce genre d'erreur on annonce un volume supérieur à la réalité de 70.73 % (dans notre cas), ce qui nuit gravement par exemple à l'estimation des réserves minières.

Chapitre III

Extraction des contacts anormaux : Etude de quelques opérateurs

III-1. Opérateurs de détection de contacts utilisant la RP

III-1-a. La Réduction au Pôle

Elle calcul l'effet magnétique d'une source comme s'elle était au pôle et aimantée verticalement. L'anomalie se présente en un seul lobe positif dont le pic coïncide avec le centre de la source magnétique. Son inconvénient est ce qu'elle nécessite la connaissance de la direction de l'aimantation. La figure 15 montre la réduction au pôle du Mode1 (chapitre I).

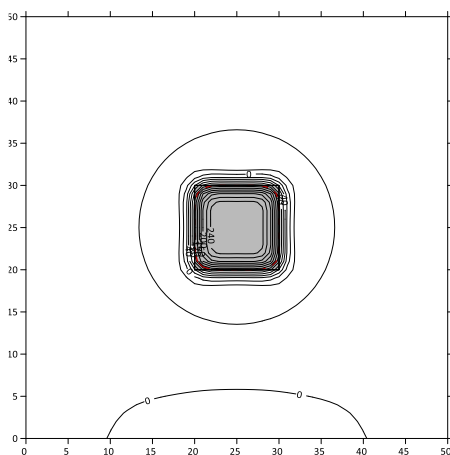


Figure 15 : carte du Mod_1 réduit au pôle (Mod_1RP)

Supposons qu'on ne connaît pas la direction de l'aimantation, quelles sont les erreurs commises ? Reprenons la figure Modèle_f2 avec différentes I_n et I_a (figures 16 a et b):

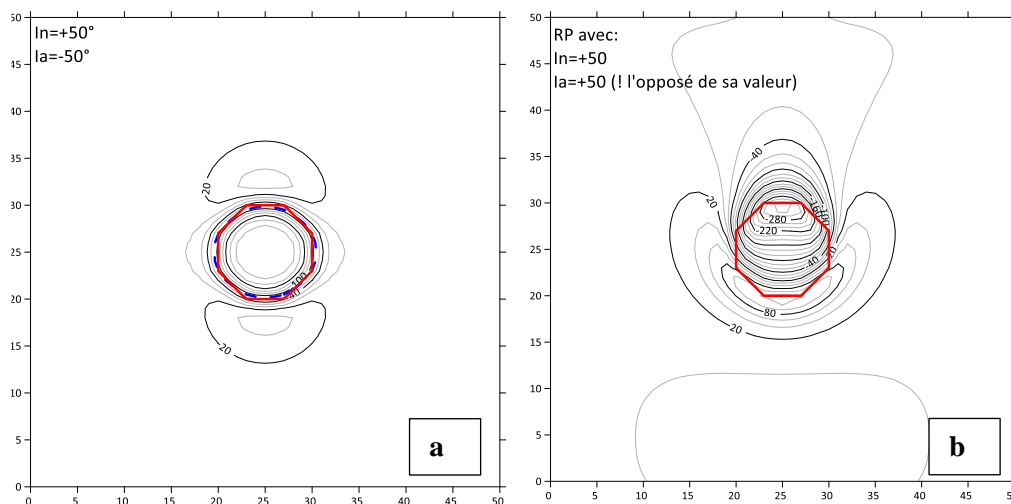


Figure 16: a) $I_n=50^\circ$ et $I_a=-50^\circ$, b) $I_n=50^\circ$ et $I_a=50^\circ$

La non-connaissance de la direction de l'aimantation rémanente ($D_n=D_a=0^\circ$, $I_n=0^\circ$ et $I_a=-50^\circ$) induit de graves erreurs au niveau de la RP.

Lorsqu'on introduit les bonnes valeurs (figure 17) la transformation est plus efficace. Nous trouvons que la DSM coïncide avec l'objet.

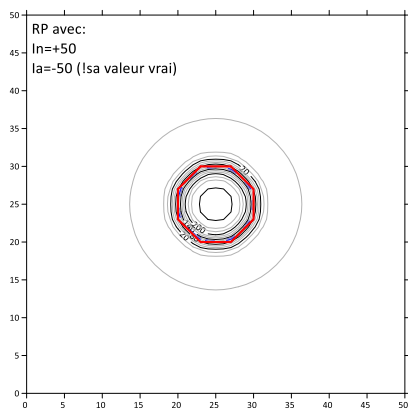


Figure 17: Réduction au pôle avec $In=50^\circ$ et $Ia=-50^\circ$

Reprenons le même exercice avec le modèle : modèle_f (figure 18). Les valeurs des inclinaisons sont inscrites sur les figures

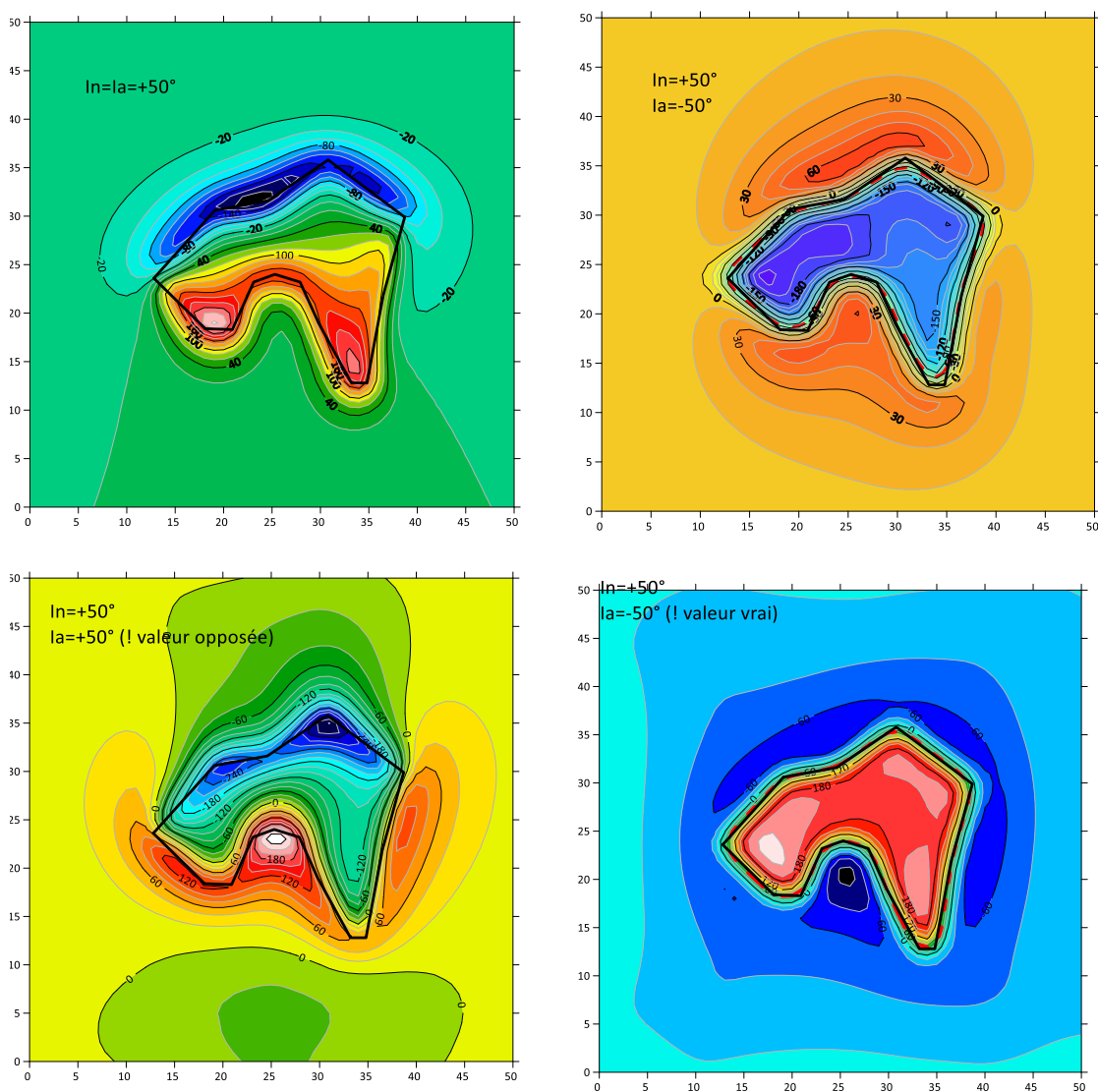
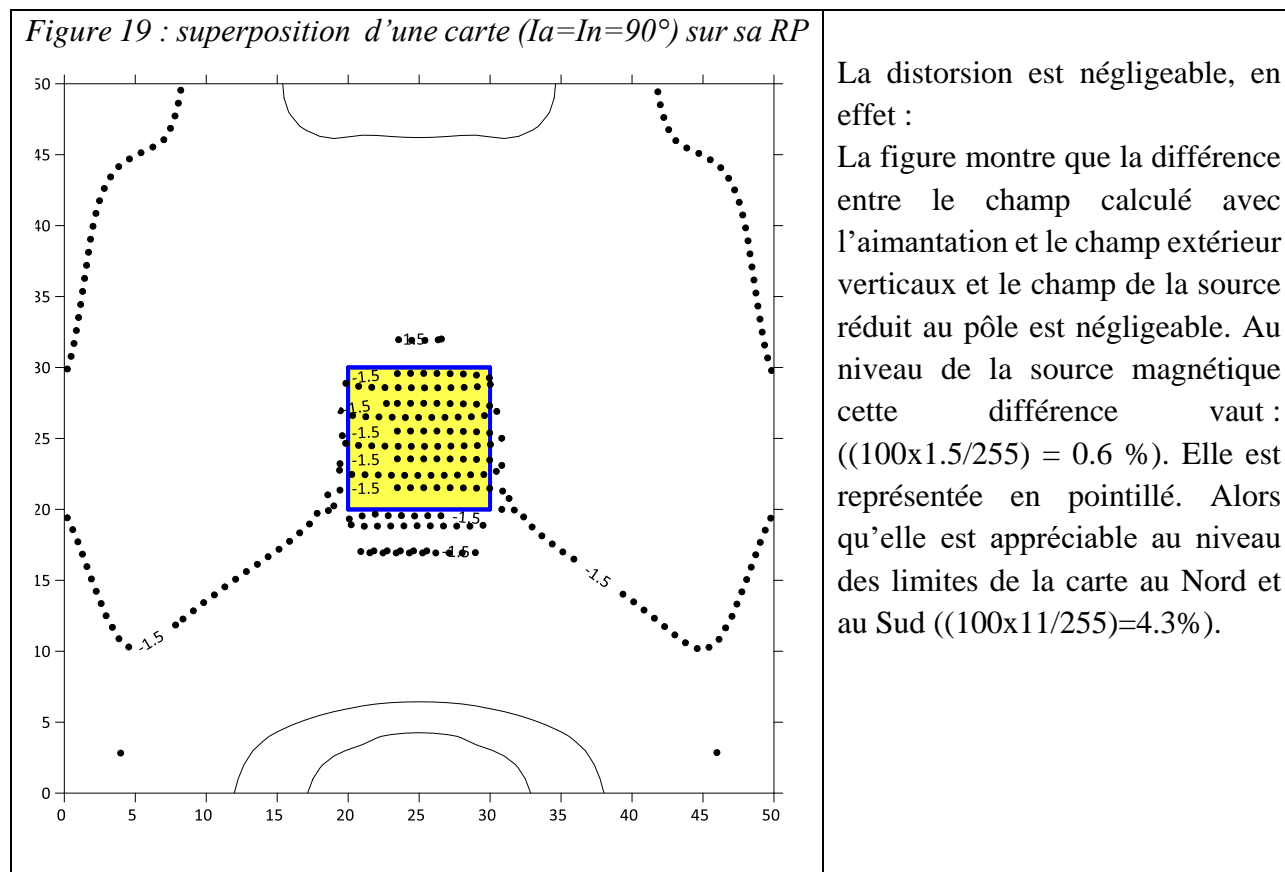


Figure 18. cartes du model_1_F où on change Ia et In .

On constate que la règle de la DSM est valable et vient sur les limites de la source aimantée, donc on peut se baser sur la DSM pour définir les limites latérales de la source.

III-1-b. Différence entre la RP et le calcul directe aimantation et champ verticaux :

Quelles sont les distorsions que produit la RP (figure 19)



III-2. La dérivée verticale

Ce filtre est utile pour mettre en relief la présence de sources locales (figure 20), car l'effet de masses superficielles est souvent masqué par la réponse de larges masses régionales (Robinson et Silva, 1981).

- Fait ressortir les courtes longueurs d'ondes de sources magnétiques superficielles (dykes, formations de Fer).
- Identifier les structures superficielles (de 0 à 1km de profondeur) et plus discrètes.

NB : La DSM peut être appliquée aussi à la RP prolongé vers le haut et la dérivée verticale.

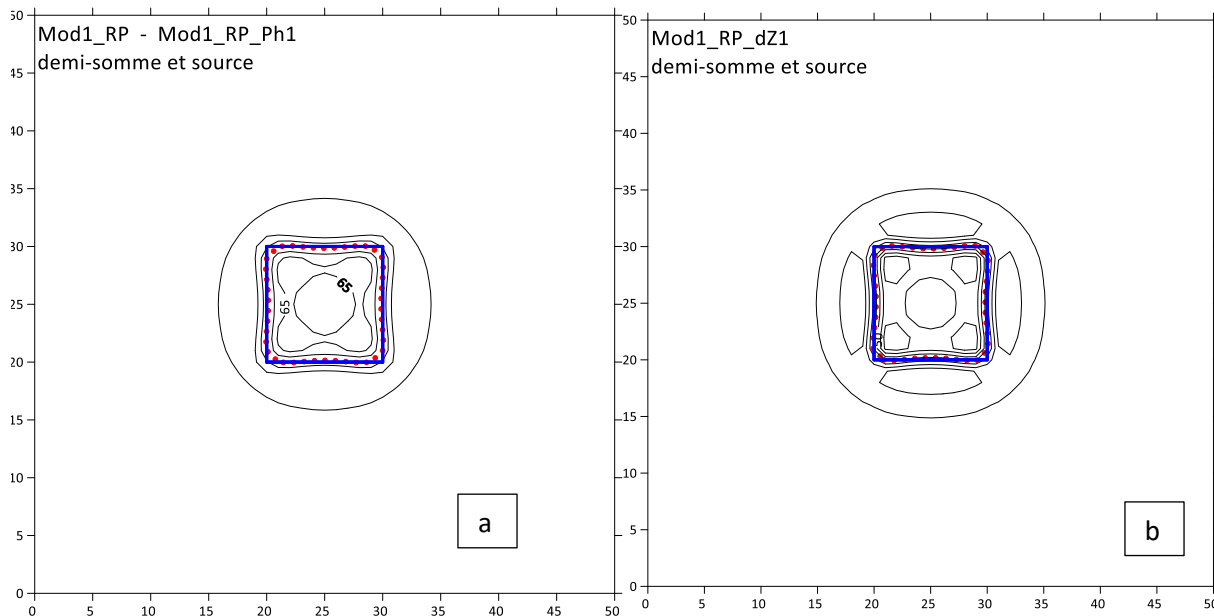


Figure 20. Cartes de dérivées verticales de la RP combinées au prolongement vers le haut (a) et à la dérivée verticale (b)

On voit dans les figures de Mod1_RP_Ph1 et Mod1_RP_dZ1 que la DSM (traits rouges discontinus) vient sur les limites latérales de la source aimantée (trait bleu continu).

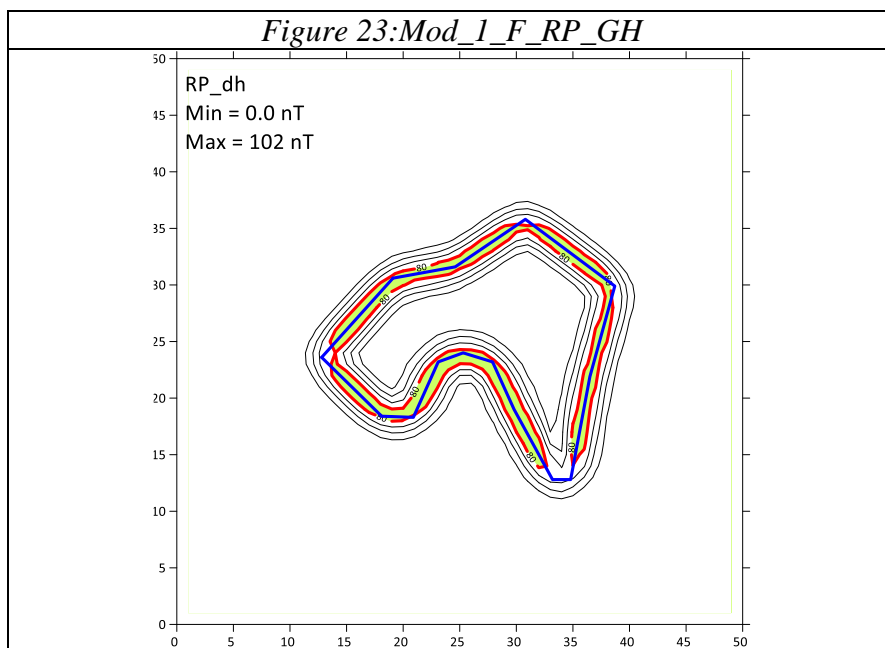
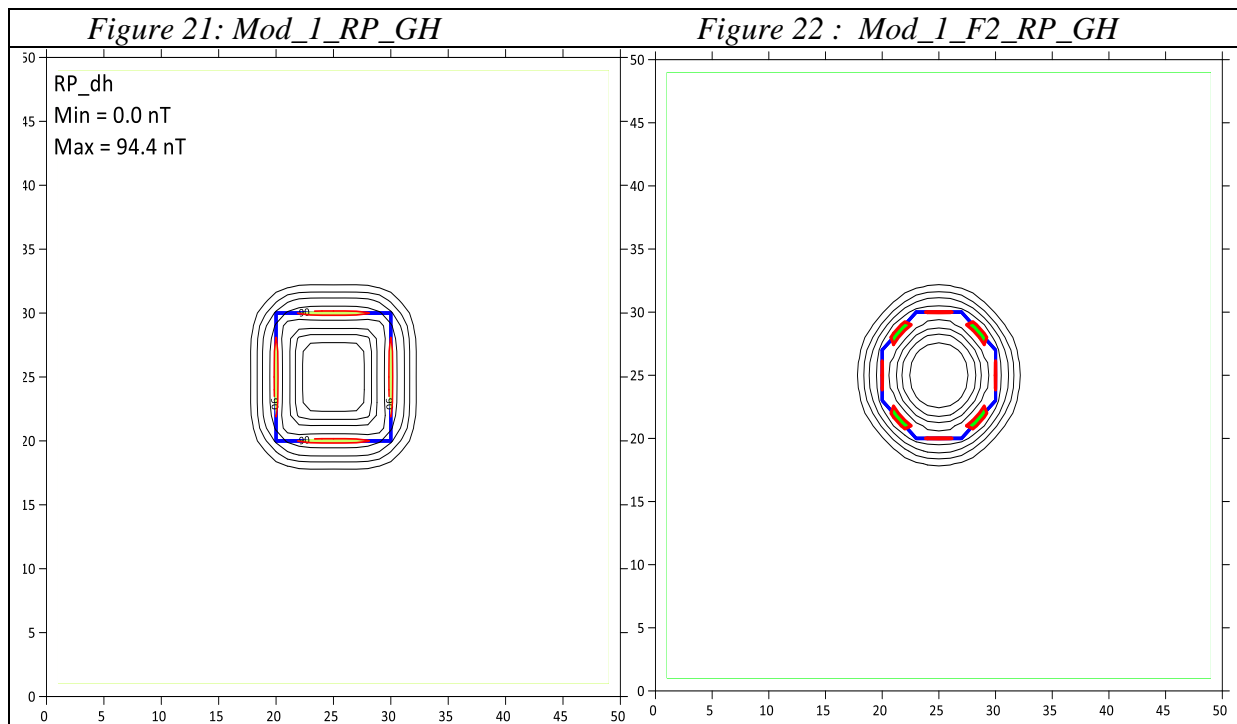
III-3. Gradient horizontal (GH)

Il représente en générale le taux de variation de la lithologie pour un déplacement horizontal (Cordelle, 1979; Cordelle et Grauch, 1985; Blakely, 1996; Nabighian et al., 2005)

- Permet de mieux définir les bordures de domaines magnétiques selon une orientation.
- Souligne bien les linéaments d'entraînement. Pas toujours facile à interpréter.

Il est défini par Cordelle et Grauch (1985) par l'expression suivante :

$$GH = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}$$



Dans ces 3 figures (figures 21-22 et 23) on note les limites de la structure aimantée en trait bleu continu et le maximum d'intensité en couleurs fleurissantes. Elles montrent que les limites de la structure viennent sur le maximum d'intensité du GH de la RP

III-4. Autres Opérateurs de détection de contacts n'utilisant pas la RP

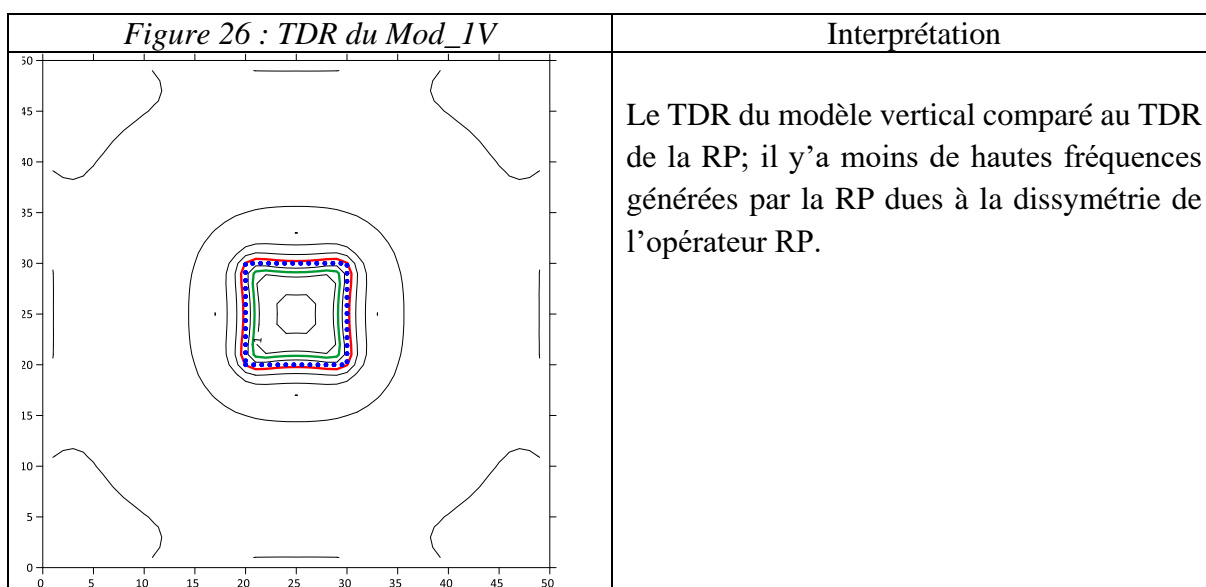
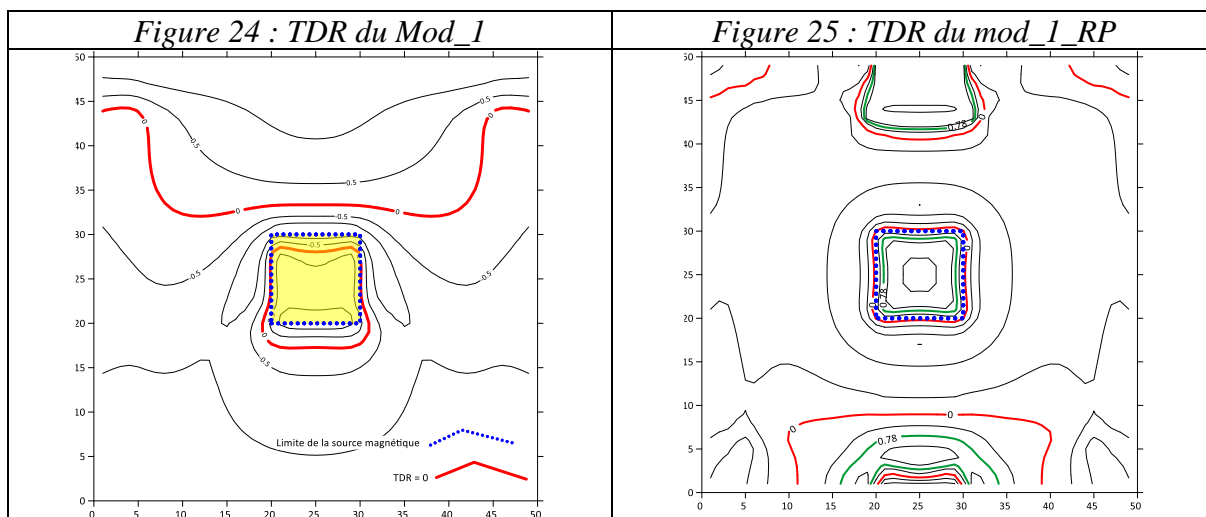
III-4-a. Tilt dérivative (TDR)

C'est l'angle entre le gradient horizontal total (selon les axes X et Y) et la première dérivée verticale (selon l'axe Z).

- Enlève la composante régionale et réduit l'amplitude entre les anomalies.
- Souligne les linéaments sécants et les dykes.

Il est défini par (Miller and Singh 1994) :

$$\text{TDR} = \text{atan} \frac{\frac{\partial F}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}}$$



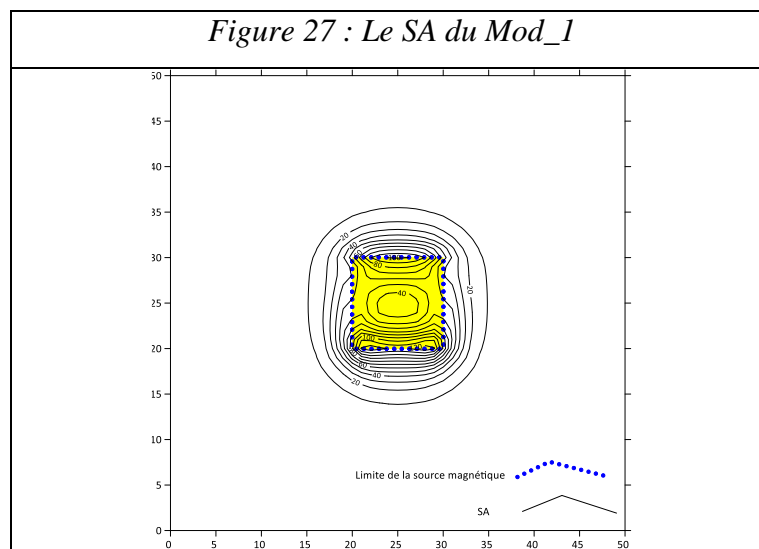
III-4-b. Signal analytique SA

C'est le gradient total (combine les dérivées horizontales et la dérivée verticale).

- Crée des pics au-dessus des bordures des grosses anomalies ou au centre des petites. (Denth et mudge, 2014)
- Souligne bien les linéaments d'entraînement.

Il est défini par :

$$|SA| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2}$$



On note un maximum de 126.5nT et un minimum de 0nT

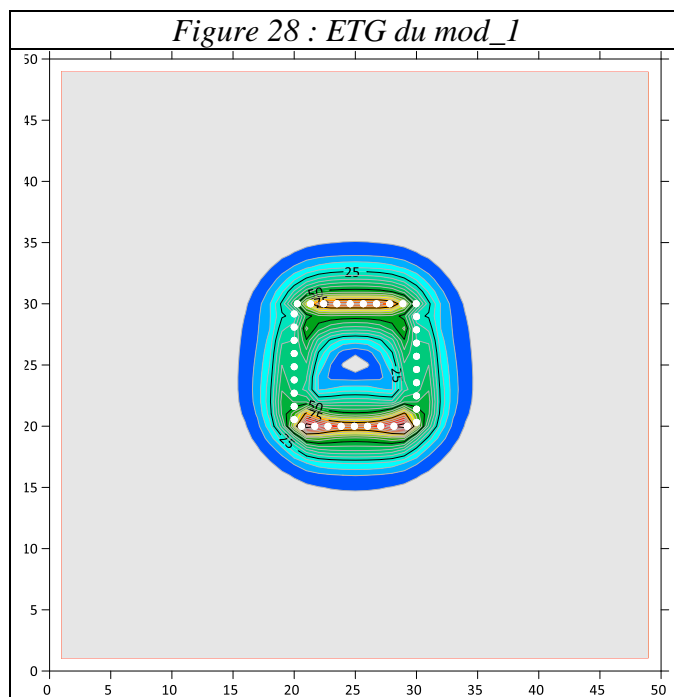
Au niveau de la limite vers la direction sud, le coté coïncide avec le maximum

III-4-c. Rehaussement du gradient total (Enhanced total gradient) ETG

La méthode ETG est l'une des méthodes à haute résolution pour l'amélioration des bords des structures géologiques.

Il est défini par (Hsu et al., 1996) :

$$ETG = \sqrt{\left(\frac{\partial^2 F}{\partial z \partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 F}{\partial z \partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 F}{\partial z \partial z}\right)^2}$$

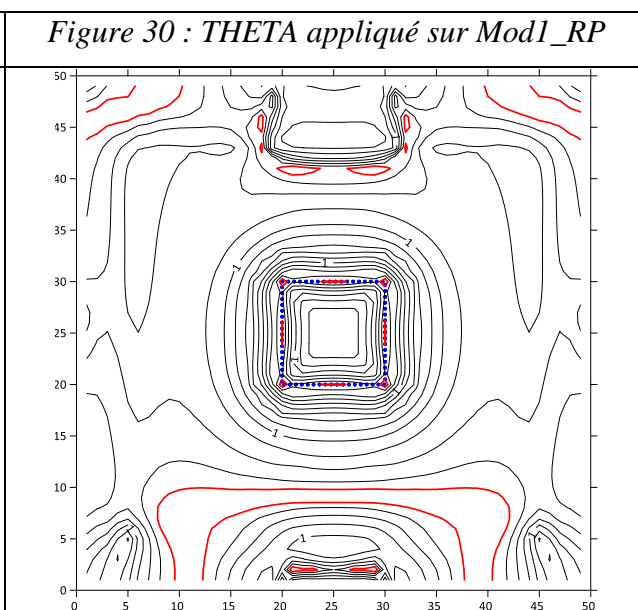
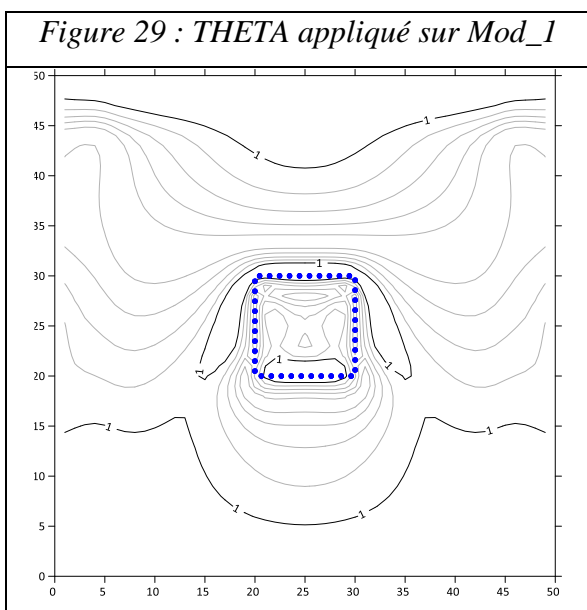


Les limites de la structure aimantée se voient clairement en pointillés blancs mais difficilement déductible à partir de l'ETG.

III-4-d. Angle Thêta

Le filtre Thêta est résultat de la normalisation du gradient horizontal (GH) par le signal analytique (SA). Il a été appliqué, pour la première fois, pour la délimitation des sources et la cartographie des discontinuités. Il est défini par (Wijns et al. 2005) par l'expression suivante :

$$THETA = \text{acos} \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}}$$



Les limites de la structure aimantée se voient pointillés blancs mais difficilement déductible à partir de l'angle THETA à part l'application sur la RP.

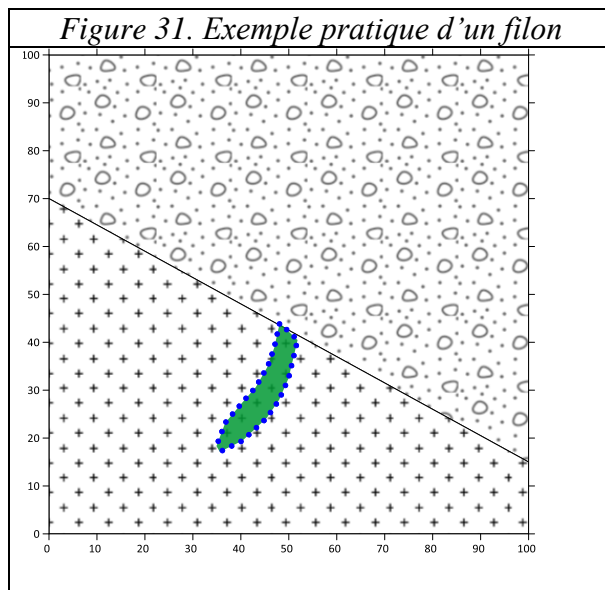
III-4-e. Autres filtres

Formule	Référence
$\text{TDX} = \text{atan} \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}}{\left \frac{\partial F}{\partial z}\right }$	Cooper et Cowan (2006).
$\text{HTA} = \mathcal{R} \left(\tan h^{-1} \left(\frac{\frac{\partial F}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}} \right) \right)$	hyperbolic tilt ang Cooper and Cowan (2006)
$\text{TAHG} = \text{atan} \frac{\frac{\partial \text{THG}}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial \text{THG}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{THG}}{\partial y}\right)^2}}$	Ferreira et al. (2013)
$\text{THDR} = \sqrt{\left(\frac{\partial \text{TDR}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{TDR}}{\partial y}\right)^2}$	Rehaussement du TDR Verduzco et al. 2004
TDX + TDR TDX - TDR	Combinaison de filtre

III-5. Cas d'un filon en partie caché et décalé par une faille

Nous souhaitons par le présent exercice examiner l'effet magnétique d'un filon.

Supposons que nous sommes en présence de deux formations sous aimantées en contact anormal, traversé par un filon très aimanté (10 A/m). Une partie de ce filon est caché par la formation superficielle et probablement décalé par la faille (figure 29).

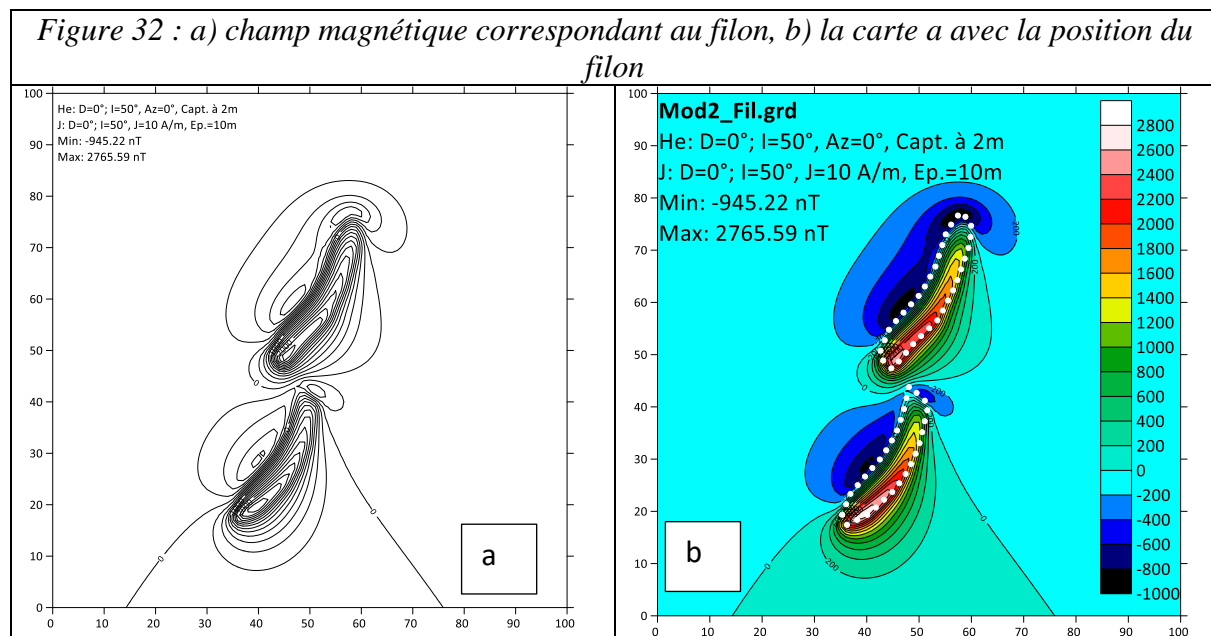


Comment trouver la suite du filon ? Quel est son étendu ?

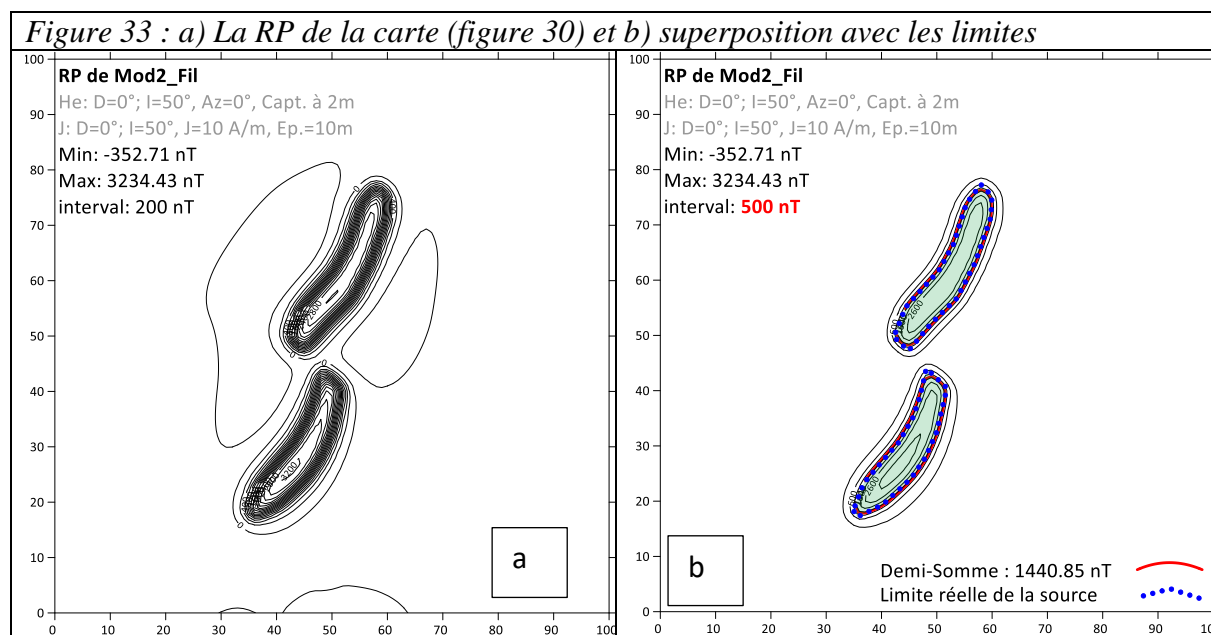
Pour cela, on va appliquer les filtres étudiés sur les données de ce filon.

III-5-a. Carte du champ magnétique dû au filon

Ci-dessous (figures 30 a et b) la grille correspondante aux données magnétiques de la zone autour du filon.

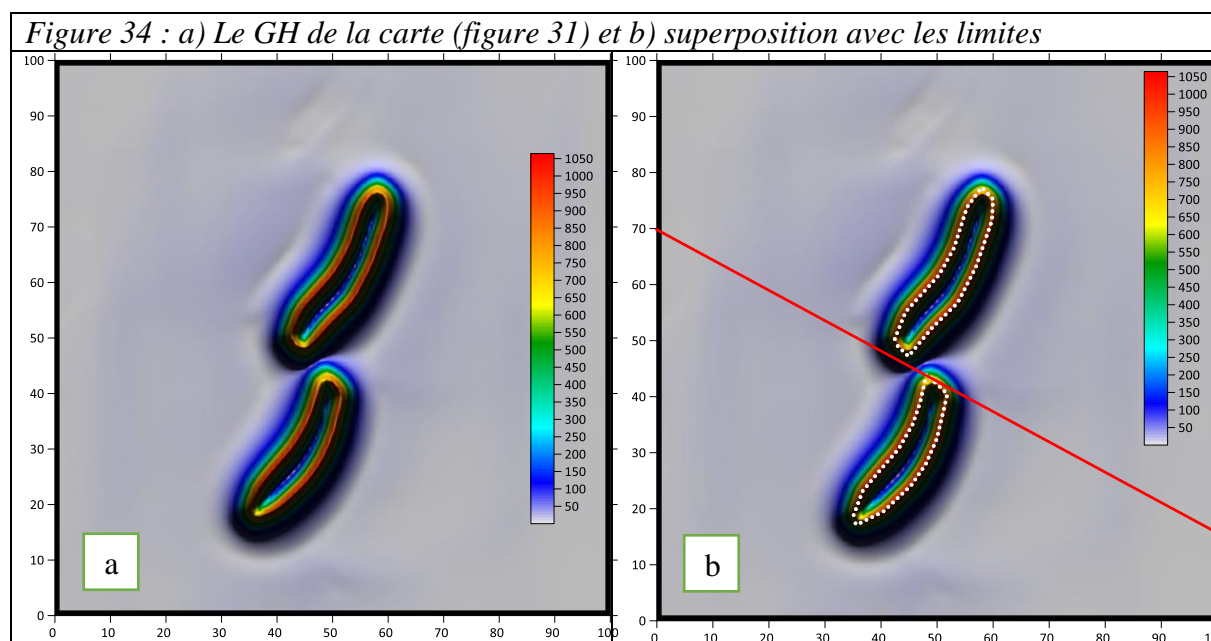


III-5-b. Application de la RP sur Mod2_Fil.grd (figures 31 a et b)



La DSM (courbe 1440.85 nT) se superpose de manière excellente aux limites du filon.

III-5-c. Gradient horizontal (GH) sur la RP de Mod2_Fil.grd (figures 32 a et b)



Interprétation

On remarque la coïncidence entre le maximum local et le contour géologique des filons.

Après ces résultats on déduit que le filon présente une autre partie décalée par la faille et cachée par une couche de sédiments.

Chapitre IV

Application de la magnétométrie Cas du filon d'hématite de Taïfast (Agadir Melloul, Anti-Atlas)

IV-1. CADRE GEOLOGIQUE

Les boutonnières d'Agadir Melloul, Iguerda et Idikel se situent respectivement à 170 et 190 km au SE de la ville d'Agadir et font partie, avec les boutonnières de Zenaga, de Bou Azzer-EI Grara et du massif du Siroua, de l'Anti-Atlas Central. Elles appartiennent au domaine Sud-Occidental qui forme la bordure nord du craton Ouest africain.

Le socle paléo-protérozoïque (PI) de la boutonnière d'Iguerda -Taïfast est constitué d'une série méta-sédimentaire (schistes, micaschistes, et gneiss) intruse par des granitoïdes (Bilal et Derre, 1989), des diorites à structure orbiculaire et des filons de pegmatites (Agard 1952 et 1954). Ce socle est traversé par un important réseau des filons basiques de direction NNE et NW à NNW, antérieurs aux formations du Néo-protérozoïque terminal (PIII), leur mise en place est postérieure aux deux phases de déformation panafricaines, majeure et tardive, affectant les granites et les pegmatites (PI), (Bilal et Derre, 1989).

L'ensemble est recouvert par une série volcano-sédimentaire rougeâtre attribuée au Néo-protérozoïque terminal (PIII). Cette série, légèrement plissée et qui affleure à l'Est et au NW de la boutonnière est constituée de grès, de conglomérats, de pyroclastites et de roches volcaniques, située à l'WNW de la boutonnière d'Iguerda –Taïfast. (Fig. 33)

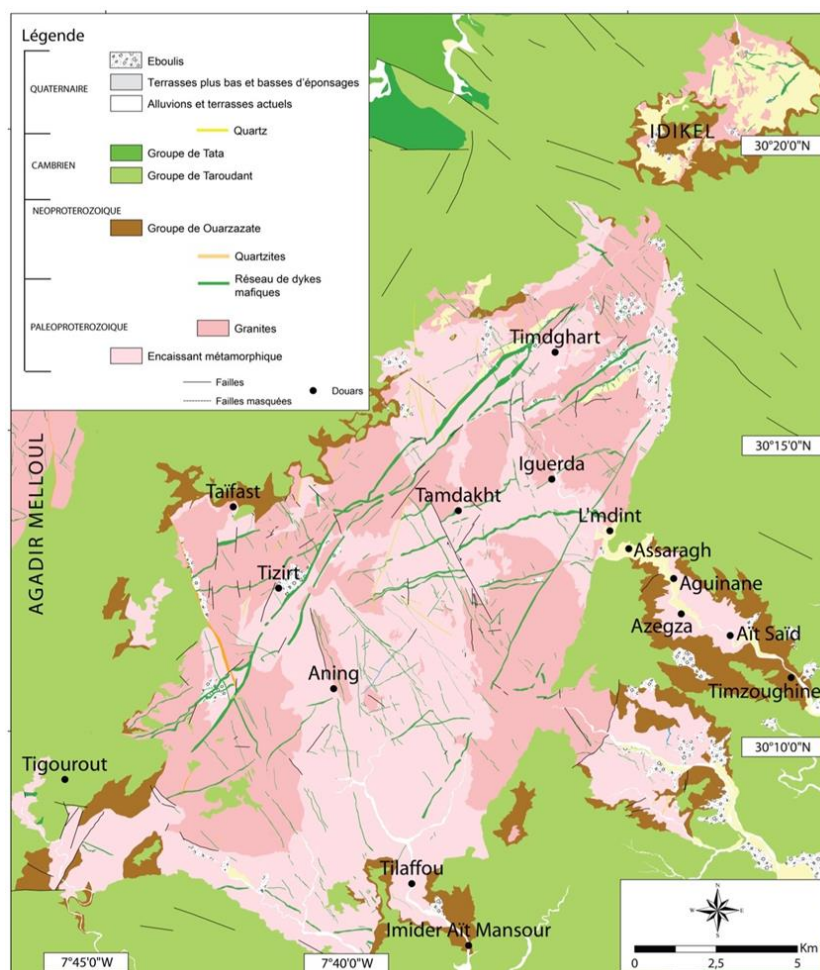


Figure 35 : Carte géologique simplifiée de la boutonnière d'Iguerda

On peut distinguer quatre principales unités géologiques dans le domaine d'Iguerda (fig. 27)

- (i) Le substratum Paléoprotérozoïque qui fait partie du Complexe de Zenaga (Thomas et al., 2002) regroupe l'ensemble des terrains méta-sédimentaires, et des diverses roches plutoniques intrusives au cours du cycle éburnéen. Des manifestations basiques sont également à associer à ce complexe Paléoprotérozoïque ;
- (ii) Un important réseau de dykes mafiques qui traversent le substratum d'Iguerda, composé d'essaim de dolérite-diabase, à âge et géométrie variables ;
- (iii) Le Groupe de Ouarzazate : Unité volcano-sédimentaire qui repose en discordance majeure sur le substratum éburnéen, et qui correspond à la dernière manifestation volcanique du cycle panafricain dans un contexte transtensif ;
- (iv) Le Groupe de Taroudant : ou la formation Adoudou, formée de grandes barres de dolomies azoïques d'âge édiacarien terminal. Ces assises carbonatées entourent la boutonnière d'Iguerda et sont localement perturbées par des réactivations de failles bordières profondes lors des compressions hercyniennes au Carbonifère terminal ;

IV-2. Levé magnétométrique du filon d'hématite de Taïfast

Dans la région de Taïfast, il existe un filon d'hématite qui est déjà exploité (voir image).



Photo 2 Filon de Taïfast

Des mesures magnétométriques ont été réalisées par le doctorant Tazi (Mai 2022, Photo 3) dont le but est de tester le magnétomètre (type WCZ1) sur un cas demandant beaucoup de précision (filon de quelques mètres non décelable par l'aéromagnétisme) et de délimiter latéralement le filon en question. nous tentons donc de traiter les données recueillies : Corrections, calcul du champ régional restitution du champ résiduel et d'appliquer la RP et déduire la DSM pour détecter les limites latérales du filon.

*Photo 3. Levé magnétométrique dans la zone du filon de Taïfast
(A gauche le doctorant Ouchchen et à droite le doctorant Tazi)*



Les mesures ont été prises selon 6 profils écartés de 20m l'un de l'autre choisis perpendiculairement au filon. Les mesures sont prises avec un pas de 1m. Le tableau suivant (Table 1) illustre les caractéristiques du levé.

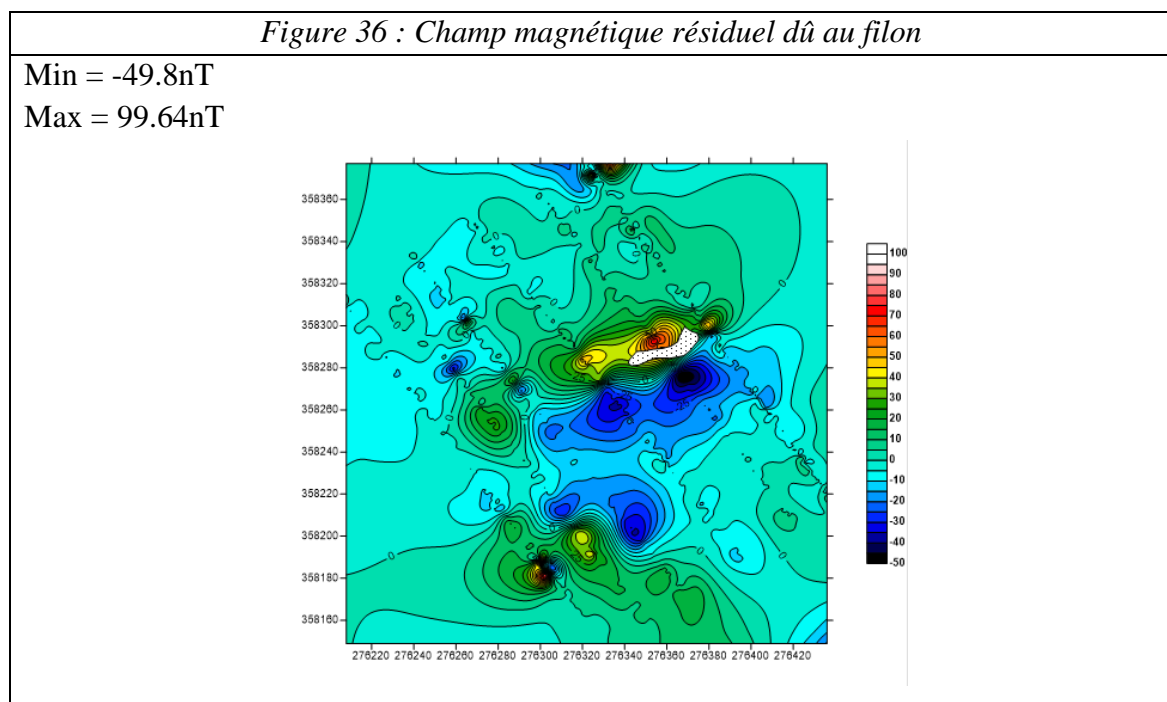
Table 1 : Caractéristiques du levé de Taïfast

Numéro de ligne	Nombre de points de mesures
L101	169
L102	163
L103	137
L104	142
L105	156
L106	176

IV-3. Résultats du levé

Les données, au nombre de 933, sont nettoyées d'une part des valeurs aberrantes, au nombre d'une douzaine (1.2 % des valeurs mesurées), dues vraisemblablement à l'instabilité du magnétomètre (*saut de plusieurs 100 de nT de l'intensité du champ magnétique sur une distance horizontale de 1m !!*). D'autre part, le calcul de la dérive, qui est moins de 0.013 nT/mn, révèle une excellente répétitivité des mesures et donc un magnétomètre de très haute performance.

La carte du champ magnétique résiduel est représentée dans la figure 28.



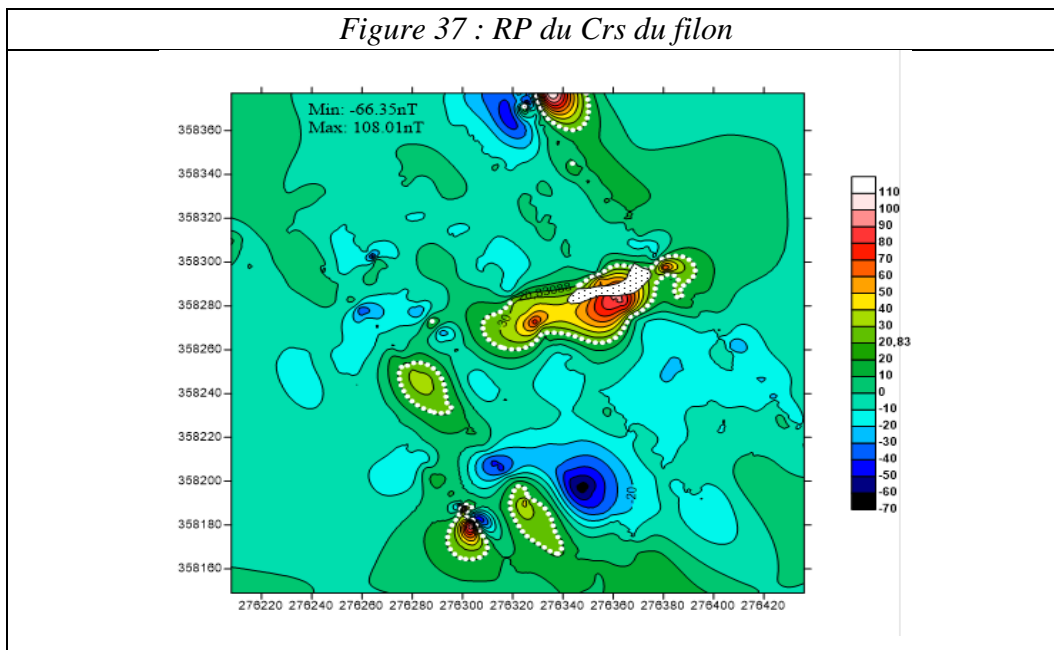
Le champs magnétique créé par la structure aimantée représente une imporantte anomalie dans la zone de mesures. On remarque des anomalie positives au sud de la carte et près du filon (partie blanche en points) et d'autre tailles plus ou moins importante.

On remarque que pour le filon de Taïfast le lobe négative se situe au sud du lobe positif ce qui indique l'anomalie est inverse. Il est forpé de deux à trois pics avec des axes joignant les maximas prientés NW-SE. Plus au Sud une anomalie plutôt de polatrité normale (lobe négatif au Nord du lobe positif) aindiquant ainsi qu'on est en présence de différente époques d'aimantation et probablement différentes sources magnétiques voir différents matériel magnétique. Il va de soit qu'une étude plus approfondie soit effectuée en suivant ces anomalies.

IV-4. La carte réduite au pôle

A fin de délimiter latéralement le filon d'oligiste nous somme impérativement amener à réduite au pôle la carte d'anomalies magnétiques.

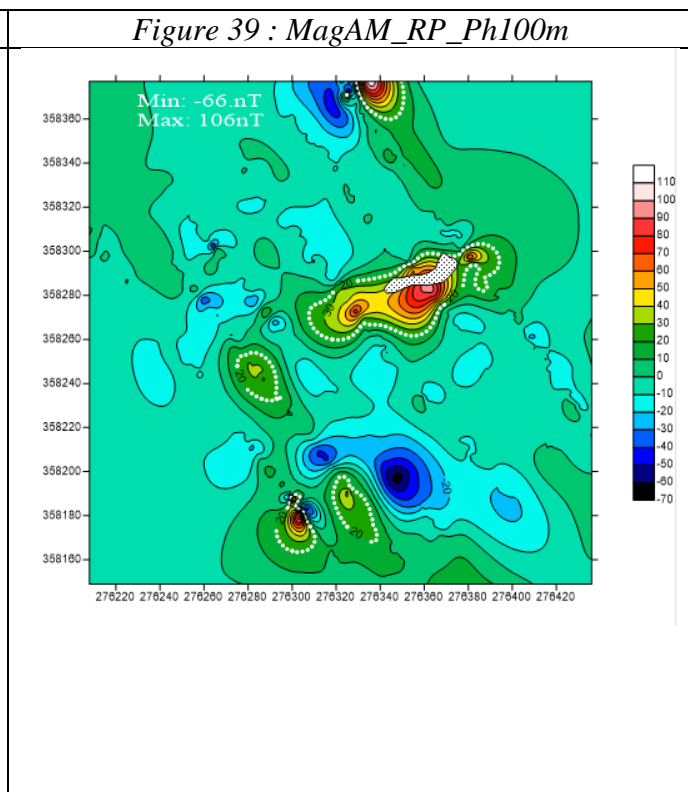
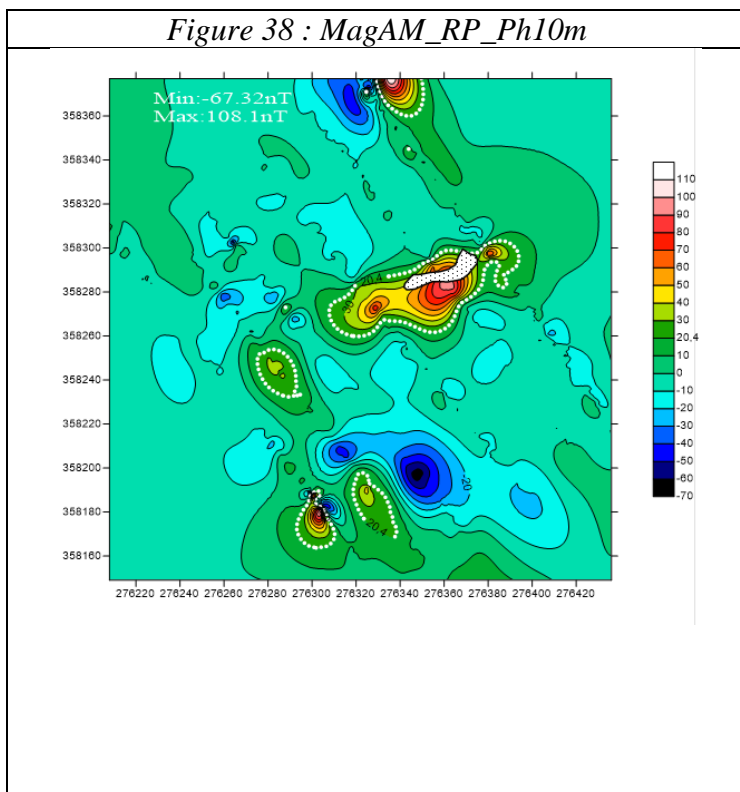
Ci-dessous, la grille correspondante au champ résiduel (Crs) réduit au pôle avec la DSM :

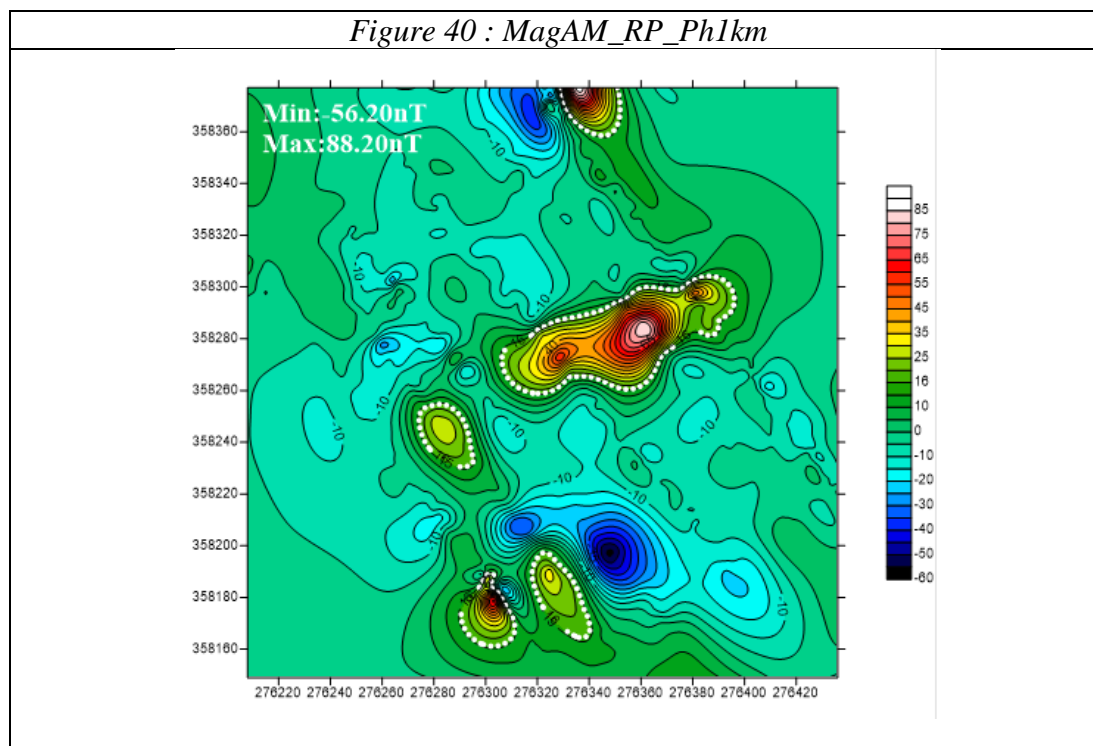


On constate que la courbe de la DSM (traits blancs discontinues) entoure une zone plus large par rapport à la zone d’affleurement du filon, d’autres zones aussi encadrées par la DSM qui contiennent probablement le même minerais.

On note un maximum de 108.01nT et un minimum de -66.35nT et une DSM qui vaut 20.83nT.

IV-5. La carte réduite au pôle prolongée vers le haut





Rappel : on peut appliquer la règle de DSM aussi pour le prolongement vers le haut de la RP, et ça ce qu'on a fait dans les figures 29,30, 31 et 32.

On note des valeurs de DSM de 20,375nT, 20nT, 16nT respectivement pour le Ph10m, Ph100m, Ph1km.

Conclusion

La magnétométrie est l'une des méthodes les plus utilisées en prospection minière, elle est utilisée grâce à sa fiabilité et sa facilité de manipulation. Les modèles synthétiques étudiés ont montré l'efficacité de la règle DSM. Quand on l'a superpose sur la carte elle coïncide avec les limites latérales de la source.

Concernant le filon de Taïfast, une fois les mesures sont corrigées et mises sous forme de grille régulière, nous avons soustrait le champ régional approximé par un polynôme de faible degré afin de restituer le champ résiduel. Ce dernier est à la base de tous les calculs et traitements qui viendront après.

Le Crs montre plusieurs anomalies de polarité inverses et normales de tailles, d'intensité et de forme différentes. La RP montre une anomalie très importante au niveau du filon de Taïfast (83m² de surface) exploité pour son minerai d'oligiste. Sa taille est 12 fois plus grande que celle du filon. Son DSM de 985 m² de surface s'étend très loin à l'Est, à l'Ouest et au Sud. Nous avons également effectué le prolongement vers le haut de la RP : RP_PH (de 10,100 et 1km) tout en utilisant la règle de la DSM. On a déduit que le filon s'étale en profondeur sur une superficie plus large que l'affleurement, et il y a d'autres parties dans la zone de mesure où il peut exister la même minéralisation.

Références bibliographiques:

A.Bitri, J.Perrin, A. Beauce (1996) – La sismique réflexion haute résolution : principe et applications. Rap. BRGM R 39220.

Beiki, M., 2010. Analytic signals of gravity gradient tensor and their application to estimate source Appl Geophys 32:213–217.

Cordell L (1979) Gravimetric expression of graben faulting in Santa Fe Country and the Espanola Basin. New Mexico Geol. Soc. Guidebook, 30th Field Conf., New Mexico, 59–64.

Gibert D. and Galdeano A. (1985). A computer program to perform transformation of gravimetric and Aeromagnetic survey. Computers and geosciences vol. 11, N°, 5, pp. 553-588, 1985.

Hsu, S.K., Sibuet, J.C., Shyu, C.T., 1996. High-resolution detection of geologic boundaries from Potential field anomalies: an enhanced analytic signal technique. Geophysics 61, 373–386

Miller HG, Singh V (1994) Potential field tilt a new concept for location of potential field sources.

Talwani, Manik, Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies caused by Bodies of arbitrary shape, Geophysics, 30(5), 797–817, 1965—Reprinted in Golden Anniversary issue Of Geophysics, 1985, as one of top papers in Geophysics, 1960–1985.

Verduzco B, Fairhead JD, Green CM, MacKenzie C (2004) New insights into magnetic derivatives for Structural mapping. Lead Edge 23(2): 116–119. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts (A. Dupis, A.Choquier, G.Bossuet).

Wijns C, Perez C, Kowalczyk P (2005) Theta map: edge detection in magnetic data. Geophysics 70:39–43.

WinSurf: <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Licence Sciences et Techniques

EL YAMMOURY DRISS

Année Universitaire : 2021/2022

Titre : Magnétométrie et applications en prospection minière
Etude de cas : filon de Taïfast (Agadir melloul-Anti Atlas)

Résumé

L'objectif principal de ce travail PFE est d'évaluer l'efficacité de la magnétométrie pour la délimitation latérale des sources aimantées.

La magnétométrie est une des méthodes les plus utilisées en prospection minière, elle a plusieurs avantages tels que la facilité en exploration (les mesures relativement faciles), sa fiabilité et moins coûteuse par rapport aux autres méthodes d'exploration minière ainsi que la facilité de mise en œuvre du matériel de mesure.

Nous avons fait une étude de modèles synthétiques dont on connaît leurs limites, on a calculé les grilles correspondantes au champ magnétique résultant puis on a réalisé des traitements par des filtres (la RP, Ph, etc.).

Lors de l'étude des filtres sur les modèles synthétiques, on applique différentes règles telles que la demie-somme des maxima et on superpose les limites de la structure aimantée. Nous avons constaté son efficacité pour la délimitation latérale des sources.

Le deuxième volet de ce PFE consiste à appliquer la prospection magnétique pour la délimitation d'un filon d'oligiste dans la région de Taïfast (Anti-atlas). Les données recueillies ont été nettoyées corrigées et mise en forme de grilles pour faciliter leurs traitements. Ainsi le champ régional a été évalué par une fonction polynomiale de faible degré qui a été ensuite soustraire aux données de l'intensité du champ magnétique total. La carte résiduel représentant les anomalies magnétiques de la zone d'étude a montré plusieurs anomalies magnétiques reflétant la présence de zones à contraste d'aimantation vraisemblablement dues à la présence de l'oligiste.

L'opération de réduction au pôle a montré sans ambiguïté via la méthode de la DSM que le filon se situe au Nord de l'anomalie et que cette dernière est beaucoup plus grande. Elle s'étend au Sud, à l'Est et à l'Ouest indiquant ainsi que la partie extraire ne représente qu'une petite partie d'un filon beaucoup plus large.

La carte réduite au pôle indique également qu'il y a plusieurs endroits à proximité du filon mais de de moindre étendue ayant un contraste d'aimantation qu'il faudra explorer.

Mots clés : géophysique ; magnétométrie ; filon ; minéralisation ; prospection minière.