UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ANALYSE DES DONNÉES GRAVIMÉTRIQUES EN FORAGE D'UN GISEMENT DE SULFURES MASSIFS VOLCANOGÈNES DANS UN CONTEXTE GÉOLOGIQUE COMPLEXE

GABRIELLE-CLAUDINE NACKERS

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE MINÉRAL)

JUILLET 2013

© Gabrielle-Claudine Nackers, 2013.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ANALYSE DE DONNÉES GRAVIMÉTRIQUES EN FORAGE D'UN GISEMENT DE SULFURES MASSIFS VOLCANOGÈNES DANS UN CONTEXTE GÉOLOGIQUE COMPLEXE

présenté par : NACKERS Gabrielle-Claudine

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. MARCOTTE Denis, Ph.D., président

M. CHOUTEAU Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. KEATING Pierre, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je voudrais commencer par remercier deux personnes en particulier qui ont été pour moi des mentors et des sources de réponses à mes questions presque infinies. Michel Chouteau, mon directeur de maitrise, a été là pour, bien sûr répondre à toutes mes questions, mais surtout là pour me réaligner et me garder concentré sur ce projet. J'avais l'impression des fois de me perdre sur des pistes peu connues et Michel a toujours pu me remettre sur le bon chemin. Pejman Shamsipour, stagiaire postdoctoral, a été pour moi un co-directeur. Il était toujours là pour répondre à mes questions lorsque Michel était parti dans ces périples outremer.

Un merci tout particulier aux membres du jury qui ont pris le temps de lire mon mémoire. Leurs suggestions et leurs commentaires ont pu améliorer grandement ce mémoire.

Un gros merci à la compagnie Abitibi Géophysique pour son partenariat au projet MITACS-Accélération et de m'avoir accueilli dans ses murs pendant l'été 2012. Sans l'aide de son personnel, mon projet n'aurait pas été aussi complet. En plus de vos merveilleux conseils, vous m'avez permis d'utiliser les données du projet Coulon. Pour une étudiante comme moi ce fut une vraie mine d'or. Ce court séjour avec vous m'a révélé une composante importante de l'analyse de la gravimétrie en forage : le problème de la régionale.

Finalement, je voudrais remercier pour leur contribution financière, sous la forme de bourses, l'organisme MITACS (bourse MITACS-Accélération), le réseau Divex et le CRSNG.

RÉSUMÉ

Un code de modélisation et d'inversion a été développé pour étudier la capacité de la méthode de gravimétrie en forage à explorer les gisements de sulfures massifs volcanogènes dans la région de l'Abitibi, Québec. Deux difficultés importantes viennent entraver son développement : l'acquisition de données lente et coûteuse dans un contexte de forages en quantité limitée et la séparation de l'anomalie associée au gisement de celle causée par la géologie encaissante et par la structure régionale. L'objectif principal de ce projet de maitrise est d'analyser ces deux problèmes majeurs en modélisant et inversant les réponses d'un modèle synthétique. Les objectifs spécifiques sont l'optimisation de l'acquisition des données en forage et la séparation de la régionale et de la résiduelle.

Pour calculer les réponses du modèle synthétique, la méthode de modélisation décrite par Li et Chouteau (1998) a été utilisée. L'inversion est basée sur l'inversion stochastique développée par Shamsipour et al. (2010) pour les données de surface, adaptée ici aux mesures en forage. Le modèle étudié est celui d'un gisement de sulfures massifs volcanogènes typique de la région de l'Abitibi.

Lors de la prise de données, trois paramètres sont importants : le nombre de forages dans lesquels les réponses gravimétriques ont été mesurées, la position de ces forages par rapport au gisement, et l'intervalle des données dans les forages. Puisque la gravimétrie en forage est une méthode géophysique relativement coûteuse, il est important de bien connaître l'influence de ces paramètres pour pouvoir les optimiser. Un minimum de trois forages bien positionnés par rapport à la cible est requis pour bien positionner la structure recherchée. Lorsque quatre forages situés à portée du gisement sont utilisés celui-ci peut être positionné avec certitude. Dans le cas où la gravimétrie est utilisée pour évaluer un gisement, quatre forages au moins sont requis dont un forage interceptant le gisement, et des contraintes de densités ou de gradients fixes doivent être appliquées. Un pas de mesure de 10m est fortement recommandé. Si la position du gisement est connue, un bon compromis est d'utiliser un pas de mesure plus grand lorsque le forage est situé loin du gisement pour déterminer l'anomalie régionale et un pas de mesure de 10m lorsque le forage s'approche du gisement.

La séparation de la régionale et de la résiduelle est un aspect très important et délicat de l'interprétation des données gravimétriques autant en forage qu'en surface, pour mettre en évidence la structure locale recherchée. Plusieurs méthodes existent, mais pour ce projet, trois méthodes ont

été étudiées : la méthode du gradient vertical, le filtrage non-linéaire et le filtrage par ondelettes. Une fois les données traitées et inversées, les résultats sont comparés au modèle initial. Même si les différentes méthodes ne calculent pas la même anomalie associée au gisement, les inversions donnent des résultats similaires. Toutes les méthodes ont pu positionner le gisement, mais la forme de celui-ci diffère du modèle réel. De plus, les excès de masse calculés sont similaires mais sous-estimés par rapport à l'excès de masse réel. Les méthodes de filtrage non-linéaire et par ondelettes se sont avérées celles qui permettent la détermination d'une anomalie résiduelle qui, une fois inversée, produisent des modèles les plus près du modèle réel. Le gradient vertical sous-estime grandement les contrastes de densité lorsqu'aucun forage n'intercepte le gisement et lorsque cette méthode est appliquée pour évaluer le gisement, la forme est difficilement observée et l'excès de masse est sous-estimé même lorsque des contraintes sont ajoutées.

Des données réelles ont été acquises en forage près d'un gisement pour le projet Coulon de Virginia Gold. Un modèle géologique du gisement de sulfures massifs a été construit en utilisant les descriptions géologiques de carottes de forage et les résultats de levés électromagnétiques en forage. Ce modèle est utilisé pour comparer les résultats obtenus à l'aide de l'inversion. Les trois méthodes de séparation de la réponse régionale et de la résiduelle ont été utilisées pour traiter les données en forage de Coulon, en plus de la méthode graphique. Comme pour les réponses gravimétriques filtrées à partir des modèles synthétiques, les résiduelles calculées diffèrent d'une méthode à l'autre. Cependant, les résultats des inversions montrent de grandes similitudes. Les formes des structures calculées par méthode graphique, par filtrage non-linéaire et par filtrage par ondelettes sont similaires. Même que les excès de masse calculés par la méthode graphique et par filtrage non-linéaire sont sensiblement les mêmes. Ceux calculés par gradients verticaux et par filtrage par ondelettes sont plus faibles.

ABSTRACT

A forward modeling and an inversion code have been developed to study the use of the borehole gravity method for exploration of volcanogenic massif sulphides (VMS) deposits in the Abitibi region of Quebec. Two problems are associated with the gravity method: acquiring data can be a long and costly method in the context where there is a limited quantity of boreholes and the separation of the response caused by the immediate or local geology and the response of deeper and farther formations called the regional. The principal objective of this master's project is to analyse those two major problems by modelling and inverting synthetic data. The specific objectives are the optimisation of the data acquisition settings and the regional-residual anomaly separation.

The forward modeling method is based on the prismatic method described by Li and Chouteau (1998). A stochastic approach developed by Shamsipour et al. (2010) is chosen for the inversion and was adapted for borehole data. A density model of a typical VMS ore deposit was designed based on a number of well-known mines in the region of Rouyn-Noranda, Val-d'Or and Matagami.

The data acquisition settings include the number of boreholes, their location and data collection sampling in the boreholes. Since the borehole gravity method is a costly geophysics method, it is best to know well the influence of the data acquisition settings to be able to optimise them. A minimum of three boreholes within appropriate distance from the target is required to locate any structure. When four boreholes situated at the detectability range of the deposit are used, it can be located with precision. In the scenario where the borehole gravity method is used to calculate the excess mass of a deposit and to define its structure, at least four boreholes should be used with one intercepting the deposit and fixed densities or gradient constraints must be applied. A 10m sampling interval is recommended. If the position of the deposit is known, a good compromise is to use a larger interval far from the deposit and use a 10m interval when the borehole is closer to the deposit.

The regional-residual anomaly separation is a very important aspect of the data interpretation. Up to now no technic is effective in performing an optimal separation. Three different methods are used in this project; these methods are the vertical gradient, a non-linear filter and a wavelet filter. Once the data has been treated, the inverted density model is compared to the initial model. Though the different methods do not calculate the same residual, the results are fairly similar. All the methods can position the deposit well, but the shape differs from the initial model. Also, the excess mass calculated are similar to each other, but they are a bit underestimated compared to the real excess mass. Non-linear and wavelet filtering were proven to be the best methods to calculate results closest

to the actual model. The vertical gradient grossly underestimates the density contrasts when no borehole intercepts the deposit. Furthermore, when the method is applied to evaluate the deposit, the shape is not recovered and the excess mass is underestimated even when constraints are used.

Real borehole gravity data was acquired over and in the vicinity of the Virginia Gold's Coulon deposit (Quebec, Canada). A model was built using borehole electromagnetic data and geological data. This model is used to compare the inverted results. The three regional-residual anomaly separation methods were applied to the Bouguer anomaly of the Coulon data as well as the graphical method. Like for the synthetic data the residual calculated differed from method to method but the results resembled one another. The shapes of the structure calculated by the graphical, non-linear filtering and wavelet filtering methods were essentially the same. It was also observed that the excess masses calculated by graphical method and non-linear method were similar. Finally, the excess masses calculated by vertical gradient and wavelet filter were a bit lower.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS III

RÉSUMÉ IV

ABSTRACT VI

TABLE DES MATIÈRES VIII

LISTE DES TABLEAUX X

LISTE DES FIGURES XII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XXIII

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Introduction 1

1.2 Problématique 2

1.3 Contenu du mémoire 3

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE 4

2.1 Sulfures massifs volcanogènes (SMV) dans un contexte abitibien 4

2.2 Études antérieures dans le domaine du pétrole 5

2.3 Modélisation et inversion 3D 10

2.4 Problème de la régionale 18

CHAPITRE 3 OUTILS ET MÉTHODOLOGIE 20

3.1 Programmes utilisés 20

3.2 GraviLog 21

3.3 Méthodologie 21

CHAPITRE 4 RÉSULTATS DES INVERSIONS SUR LES MODÈLES SYNTHÉTIQUES 31

4.1 Modèle d’un gisement dans une matrice homogène 31

4.2 Modèle d’une géologie encaissante complexe sans gisement 49

4.3 Modèle d’un gisement dans une géologie encaissante complexe 52

4.4 Effet de la régionale 73

4.5 Portée ou distance d'exploration 119

CHAPITRE 5 ÉTUDE DE CAS : COULON 121

5.1 Contexte 121

5.2 Données gravimétriques 122

5.3 Paramètres d'inversion 130

5.4 Résultats des inversions 132

CHAPITRE 6 DISCUSSION ET CONCLUSION 138

6.1 Limitations du code 138

6.2 Résultats des modèles synthétiques 139

6.3 Étude de cas : Coulon 147

6.4 Étapes suivantes 148

6.5 Conclusion 150

RÉFÉRENCES 152

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Densité moyenne des roches 22

Tableau 3.2 : Roches encaissantes du deuxième modèle synthétique 22

Tableau 4.1 : Modèle de covariance initial (Ax, Ay, Az : portée cartésienne; angles ϕ, θ, verticale (vert.) : angles de direction; C0 : effet de pépite; C : covariance) 35

Tableau 4.2 : Modèles de covariance (var.: variogramme, sphér.: sphérique, MAE : erreur moyenne absolue, R : corrélation de Pearson) 35

Tableau 4.3 : Modèles de covariance (var.: variogramme, sphér.: sphérique) 42

Tableau 4.4 : Excès de masse calculés pour les inversions d'un gisement (4.4 g/cm^3) dans une matrice homogène (2.7 g/cm^3) 43

Tableau 4.5 : Modèle de covariance initial (Ax, Ay, Az : portée cartésienne, ϕ, θ, vert. : angles de direction, C0 : effet de pépite, C : covariance) 56

Tableau 4.6 : Modèles de covariance (var.: variogramme, sphér.: sphérique) 56

Tableau 4.7 : Modèles de covariance (var.: variogramme, sphér.: sphérique) 65

Tableau 4.8 : Excès de masse calculés pour les inversions d'un gisement dans une géologie encaissante complexe 66

Tableau 4.9 : Excès de masse calculés pour les inversions utilisant un pas de mesure de 20m 73

Tableau 4.10 : Modèle de covariance initial 84

Tableau 4.11 : Modèles de covariance (var.: variogramme, sphér.: sphérique) 84

Tableau 4.12 : Excès de masse calculés pour les inversions utilisant les gradients verticaux 92

Tableau 4.13 : Modèle de covariance initial 97

Tableau 4.14 : Modèles de covariance (var.: variogramme, spher.: sphérique) 97

Tableau 4.15 : Excès de masse calculés pour les inversions utilisant les résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire 103

Tableau 4.16 : Modèle de covariance initial 107

Tableau 4.17 : Modèles de covariance (var.: variogramme, sphér.: sphérique) 107

Tableau 4.18 : Excès de masse calculés pour les inversions utilisant les résiduelles calculées à l'aide D'ondelettes 114

Tableau 5.1 : Caractéristiques des forages 122

Tableau 5.2 : Erreurs sur les données gravimétriques 125

Tableau 5.3 : Modèles de covariance pour les résiduelles calculées à l'aide de la méthode graphique. (var.: variogramme, spher.: sphérique) 132

Tableau 5.4 : Modèles de covariance pour les gradients verticaux 132

Tableau 5.5 : Modèles de covariance pour les résiduelles par filtre non-linéaire 132

Tableau 5.6 : Modèles de covariance pour les résiduelles par filtre ondelettes 132

Tableau 6.1: Comparaison des excès de masse calculés sans contrainte 146

Tableau 6.2 : Comparaison des excès de masse calculés avec contraintes de densité fixes le long des forages 147

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Forme de la réponse gravimétrique d'une sphère située à une distance x. Réponse gravimétrique en fonction de la profondeur 7

Figure 2.2 : Facteur géométrique en fonction de la portée /épaisseur de la couche 8

Figure 2.3 : a) Rapport de densité en fonction de l'angle, ϕ, de la couche , b) Cylindre centrée sur le forage de rayon, R, ayant un angle, ϕ, par rapport à l'horizontale et une épaisseur, T. 9

Figure 3.1 : Modèle de densités 22

Figure 3.2 : Position des forages qui seront utilisés lors des inversions 24

Figure 3.3 : Modèle de densité avec régionale. La région vide a une densité de 2.7 g/cm^3. 29

Figure 4.1 : Modèle d'un gisement (4.4 g/cm^3) dans une géologie encaissante de densité homogène (2.7 g/cm^3). Les forages, représentés en rouge, ont tous une direction de N180° et une inclinaison de 80° 32

Figure 4.2: Réponse gravimétrique en surface causée par le modèle de la figure 4.1 32

Figure 4.3 : Données gravimétriques en forage. Le gisement est représenté de façon schématique en rouge et r sont les distances entre les forages et le centre du gisement. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D1 interceptant le gisement, b) Forage D2 situé à l'est du gisement, c) Forage D3 est situé à l'ouest du gisement, d) Forage D4 est situé au nord du gisement 33

Figure 4.4 : Données gravimétriques en forage. Le gisement est représenté de façon schématique en rouge et r sont les distances entre les forages et le centre du gisement. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D5 est situé au sud du gisement, b) Forage D6 est situé au nord du gisement 34

Figure 4.5 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3 37

Figure 4.6 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire. Les forages sont en noir et plus long que ceux des

inversions précédentes. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3 38

Figure 4.7 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, D4 et D6. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3 39

Figure 4.8 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, D4 et D5. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3 40

Figure 4.9 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, D4 et D5 à un intervalle de donnée de 20m. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=120m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3 41

Figure 4.10 : Modèle de densité de l'inversion des données des forages D1, D2 et D3. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3. L'excès de masse estimé est de 2.5 Mt 44

Figure 4.11 : Modèle de densité de l'inversion des données des forages D1, D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3. L'excès de masse estimé est de 2.9 Mt 45

Figure 4.12 : Modèle de densité de l'inversion des données des forages D1, D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire. Les forages sont en noir et plus long que ceux précédents. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3 46

Figure 4.13 : Modèle de densité de l'inversion des données des forages D1, D2, D3 avec des contraintes le long des forages. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3. L'excès de masse estimé est de 3.4 Mt 47

Figure 4.14 : Modèle de densité de l'inversion des forages D1, D2, D3, des données de surface et avec des contraintes. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les

forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3. L'excès de masse estimé est de 3.5Mt.....48

Figure 4.15 : Modèle de densité d'un gisement d'une géologie complexe.....49

Figure 4.16 : Données gravimétriques en forage. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D1, b) Forage D2, c) Forage D3.....50

Figure 4.17 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, et D4. Les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=250m, c) Densités supérieures à ρ=0.6 g/cm^3 51

Figure 4.18 : Modèle de densité d'un gisement dans une géologie encaissante complexe 52

Figure 4.19 : Données gravimétriques en surface avec tampon aux limites du domaine. Les deux dykes affleurants créent deux anomalies bien visibles. La vue de droite est une vue agrandie de l'anomalie gravimétrique située directement au-dessus du gisement. 53

Figure 4.20 : Données gravimétriques en forage. Le gisement est représenté de façon schématique en rouge et r représente la distance entre les forages et le centre du gisement. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D1 interceptant le gisement, b) Forage D2 situé à l'est du gisement, c) Forage D3 est situé à l'ouest du gisement, d) Forage D4 est situé au nord du gisement 54

Figure 4.21 : Données gravimétriques en forage. Le gisement est représenté de façon schématique en rouge et r sont les distances entre les forages et le centre du gisement. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D5 est situé au sud du gisement, b) Forage D6 est situé au nord du gisement.....55

Figure 4.22 : Comparaison des données gravimétriques mesurées et calculées pour l'inversion utilisant les forages D2, D3 et D4 de la figure 4.23.....57

Figure 4.23 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.4 g/cm^3 ...58

Figure 4.24 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, D4 et D5. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m;

la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.9 g/cm^3 60

Figure 4.25 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, D4 et D6. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m et la trace des dykes en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.4 g/cm^3 61

Figure 4.26 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, D4 et D5, mais en utilisant un intervalle de données de 20m. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets; b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.5 g/cm^3 62

Figure 4.27 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3 et D4 et des données de surface. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=350m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=190m, c) Densités supérieures à ρ=0.4 g/cm^3 63

Figure 4.28 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3 et D4 avec des contraintes le long des forages. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.4 g/cm^3 64

Figure 4.29 : Modèle de densité de l'inversion des forages D1, D2 et D3. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.4 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.4 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 4.5 Mt 67

Figure 4.30 : Modèle de densité de l'inversion des forages D1, D2, D3, et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 4.5 Mt 68

Figure 4.31 : Modèle de densité de l'inversion des forages D1, D2 et D3. Des contraintes de densités fixes ont été ajoutées le long des forages. Le gisement est représenté en structure filaire noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section

à y=170m, c) Densités supérieures ρ=0.4 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.4 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 3.4 Mt 69

Figure 4.32 : Modèle de densité de l'inversion des forages D1, D2 et D3 et des données de surface. Des contraintes de densités fixes ont été ajoutées le long des forages et en surface. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures ρ=0.6 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.6 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 6.4 Mt 70

Figure 4.33 : Modèle de densité de l'inversion des forages D1, D2 et D3, mais en utilisant un intervalle de données de 20m. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.5 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.5 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 4.2 Mt 71

Figure 4.34 : Modèle de densité de l'inversion des forages D1, D2 et D3 et des données de surface. Des contraintes de densités fixes ont été ajoutées le long des forages et en surface, mais un pas de mesure de 20m a été utilisé. Le gisement est représenté en structure filaire noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.5 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.5 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 6.0 Mt 72

Figure 4.35 : Anomalies de Bouguer. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D1, b) Forage D2, c) Forage D3, d) Forage D4 74

Figure 4.36 : Anomalies de Bouguer. . La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D5, b) Forage D6 75

Figure 4.37 : Gradients verticaux. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D1 deux anomalies, A et B, créées par le pendage du gisement et du forage peuvent être observées, b) Forge D2, c) Forage D3, d) Forage D4 76

Figure 4.38 : Gradients verticaux. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D5, b) Forage D6 77

Figure 4.39 : Anomalies de Bouguer (gris) et régionale calculée à l'aide du filtre de Naudy (noir). La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D1, b) Forage D, c) Forage D3, d) Forage D4.....78

Figure 4.40 : Anomalies de Bouguer (gris) et régionale calculée à l'aide du filtre de Naudy (noir). La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D5, b) Forage D6.....79

Figure 4.41 : Anomalies de Bouguer (gris) et régionale calculée à l'aide du filtre par ondelettes (noir). La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D1, b) Forage D2, c) Forage D3, d) Forage D4 80

Figure 4.42 : Anomalies de Bouguer (gris) et régionale calculée à l'aide du filtre par ondelettes (noir). La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D5, b) Forage D6.....81

Figure 4.43 : Comparaison des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire (noir), par ondelettes (gris) et les réponses gravimétriques du gisement (pointillé). a) Forage D1, b) Forage D2, c) Forage D3, d) Forage D4 82

Figure 4.44 : Comparaison des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire (noir), par ondelettes (pointillé) et les réponses gravimétriques du gisement (gris). a) Forage D5, b) Forage D6.....83

Figure 4.45 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux en forages de D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=350m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.0 g/cm^3.....86

Figure 4.46 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux en forages de D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire. Les forages sont en noir et sont plus longs que l'inversion précédente. a) Section à x=350m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.0 g/cm^3 87

Figure 4.47 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux en forages de D2, D3, D4 et D5. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.0 g/cm^3.....88

Figure 4.48 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux en forages de D2, D3, D4 et D6. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=350m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.0 g/cm^3.....89

Figure 4.49 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux en forages de D2, D3 et D4. Des contraintes de densités fixes ont été ajoutées le long des forages. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=350m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.015 g/cm^3 90

Figure 4.50 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux des forages D1, D2 et D3. Le gisement est représenté en structure filaire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=150m, c) Densités supérieures à ρ=0.15 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.15 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 2.5 Mt.....93

Figure 4.51 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux des forages D1, D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=150m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 2.2 Mt 94

Figure 4.52 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux des forages D1, D2, D3, D4 et D5. Le gisement est représenté en structure filaire noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=150m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 2.4 Mt 95

Figure 4.53 : Modèle de densité de l'inversion contrainte des gradients verticaux des forages D1, D2 et D3. Le gisement est représenté en structure filaire noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=150m, c) Densités supérieures à ρ=0.35 g/cm^3.....96

Figure 4.54 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire des forages D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=50m, b) Section à y=190m, c) Densités supérieures à ρ=0.07 g/cm^3 99

Figure 4.55 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire des forages D2, D3, D4 et D5. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3 100

Figure 4.56 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire des forages D2, D3, D4 et D6. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=50m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.08 g/cm^3 101

Figure 4.57 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire des forages D1, D2, et D3. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=190m, c) Densités supérieures à ρ=0.2 g/cm^3. L'excès de masse estimé est de 2.0Mt..... 104

Figure 4.58 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire des forages D1, D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=190m, c) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3. L'excès de masse estimé est de 2.8Mt..... 105

Figure 4.59 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire des forages D1, D2, et D3. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=190m, c) Densités supérieures à ρ=0.15 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.15 g/cm^3 et le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 4.4 Mt 106

Figure 4.60 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre par ondelettes des forages D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=350m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.05 g/cm^3 109

Figure 4.61 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre par ondelettes des forages D2, D3, D4 et D6. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.05 g/cm^3 110

Figure 4.62 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre par ondelettes des forages D2, D3, D4 et D5. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=130m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3 111

Figure 4.63 : Modèle de densité de l'inversion contrainte des résiduelles calculées à l'aide du filtre par ondelettes des forages D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=350m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.07 g/cm^3 112

Figure 4.64 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide d'ondelettes des forages D1, D2 et D3. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 3.9 Mt 115

Figure 4.65 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide d'ondelettes des forages D1, D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 4.2 Mt 116

Figure 4.66 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide d'ondelettes des forages D1, D2, D3, D4 et D5. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.2 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.2 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 3.7 Mt 117

Figure 4.67 : Modèle de densité de l'inversion contrainte des résiduelles calculées à l'aide d'ondelettes des forages D1, D2 et D3. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=190m, c) Densités supérieures à ρ=0.2 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 4.1 Mt 118

Figure 4.68 : Portée en fonction de la masse du gisement. 119

Figure 4.69 : Portée en fonction de l'angle, ϕ et l'épaisseur, T, de la couche stratigraphique interceptée. a) Cas pour un dyke de gabbro, b) Cas pour une couche d'andésite 120

Figure 5.1 : Localisation du projet Coulon 121

Figure 5.2 : Géologie et localisation de la lentille 44 du projet Coulo (Image de Virginia Mines)... 123

Figure 5.3 : Modélisation du gisement effectuée à l'aide de levés électromagnétiques et des données de forages. Les forages sont en noir. 124

Figure 5.4 : Anomalies de Bouguer ; points mesurés représentés par des astérisques a) Forage CN-07-068, b) Forage CN-07-072 125

Figure 5.5 : Anomalies de Bouguer du forage CN-08-128 ; points mesurés représentés par des astérisques 126

Figure 5.6 : Gradients verticaux. Le gisement est représenté en vert; les distances entre les forages et le gisement et la forme du gisement sont approximatives. CN-07-072 et indiquer en gris l'intersection entre le forage et le gisement, c) Forage CN-08-128 127

Figure 5.7 : Régionales calculées à l'aide du filtre non-linéaire (gris), régionales calculées à l'aide d'ondelettes (tirets), régionales calculées graphiquement (pointillé) et anomalies de Bouguer (noir). a) Forage CN-07-068, b) Forage CN-07-072, c) Forage CN-08-128 128

Figure 5.8 : Régionales calculées à l'aide du filtre non-linéaire (gris), régionales calculées à l'aide d'ondelettes (tirets), régionales calculées graphiquement (pointillé) et anomalies de Bouguer (noir). 129

Figure 5.9 : Résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire (gris), résiduelles calculées à l'aide d'ondelettes (noir) et résiduelles calculées à l'aide de la méthode graphique (tirets). 131

Figure 5.10 : Comparaison des données gravimétriques mesurées et calculées 133

Figure 5.11 : Inversion des données de la résiduelle graphique : En vert, le gisement Lens44 de Coulon modélisé à l'aide des descriptions de forages et des résultats des levés électromagnétiques. En jaune, les résultats de l'inversion gravimétrique utilisant les forages 068, 128, 072 (en rouge) sont montrés sous la forme d'une isosurface de 1 g/cm^3. Cette surface délimite un excès de masse de 18 MT. 134

Figure 5.12 : Inversion des données du gradient vertical : En vert, le gisement Lens44 de Coulon modélisé à l'aide des descriptions de forages et des levés électromagnétiques. a) En rouge, les résultats de l'inversion gravimétrique utilisant les forages 068, 072 et 128 sont présentés sous forme d'une isosurface de 1 g/cm^3 Cette surface délimite un excès de masse 6.8 MT, b) En rouge, les résultats de l'inversion gravimétrique sont présentés sous forme d'une isosurface de 0.5 g/cm^3. Cette surface délimite un excès de masse 17.3 MT 135

Figure 5.13 : Inversion des données du gradient vertical : En vert, le gisement Lens44 de Coulon modélisé à l'aide des descriptions de forages et des levés électromagnétiques. En rouge, les résultats de l'inversion gravimétrique utilisant les forages 068, 072 et 128 sont présentés sous forme d'une isosurface de 1 g/cm^3. Cette surface délimite un excès de masse 14.7 MT. 136

Figure 5.14 : Inversion des données du gradient vertical : En vert, le gisement Lens44 de Coulon modélisé à l'aide des descriptions de forages et des levés électromagnétiques. En rouge, les résultats de l'inversion gravimétrique utilisant les forages 068, 072 et 128 sont présentés sous forme d'une isosurface de 0.5 g/cm^3. Cette surface délimite un excès de masse 10.2 MT. 137

Figure 6.1 : Gradients verticaux du forage D3.....144

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BHGM	Borehole Gravity Meter (Gravimètre en forage)
SMV	Sulfures massifs volcanogènes
MAE	Erreur moyenne absolue (Mean average error)
DAO	Dessin assisté par ordinateur
G	Constante gravitationnelle ($cm^3g^{-1}s^{-2}$)
g_z	Champ gravitationnel vertical (mGal)
M	Masse (kg)
ρ	Densité (g/cm^3, kg/m^3)
μ	Masse linéaire (kg/m)
G_f	Facteur géométrique
ρ_{BHGM}	Densité mesuré par le BHGM (g/cm^3)
ρ_R	Densité de la régionale (g/cm^3)
ρ_{sl}	Densité de la couche (g/cm^3)
F	Correction de plateau (0.3086 mGal/m)
R	Rayon du cylindre ou de la sphère (m, cm)
φ	Angle d'une couche stratigraphique (°)
T	Épaisseur d'une couche stratigraphique (m)
δg	Précision du gravimètre (mGal, µGal)
G_z	Noyau (*Kernel*) gravimétrique
F	Champ gravitationnel (mGal)
r	Vecteur entre deux point d'observation (m, cm)
dx, dy, dz	Longueur des prismes rectangulaires (m)
x_i, y_j, z_k	Distances entre les points d'observation et les prismes rectangulaires (m)
φ_d	Fonction de l'erreur

φ_m	Fonction objective
g_{obs}	Données gravimétriques mesurées (mGal)
w(z)	Fonction de poids
Ax, Ay, Az	Portées cartésiennes (m)
Phi, thêta, vertical	Angles de direction (°)
C_0	Effet de pépite ($(g/cm^3)^2$)
C	Covariance ($(g/cm^3)^2$)
$C_{gg\text{-}exp}$	Matrice de covariance gravimétrique expérimentale ($mGal^2$)
$C_{gg\text{-}th}$	Matrice de covariance gravimétrique thérique ($mGal^2$)
C_e	Matrice de covariance d'erreur ($mGal^2$)
v_{th}, v_{exp}	Vecteur des matrices théorique et expérimentale ($mGal^2$)
N_{div}	Nombre de divisions
$C_{\rho\rho}$	Matrice de covariance de densité ($(g/cm^3)^2$)
C_{gp}	Matrice de covariance entre les densités et les données gravimétriques (g/cm^3*mGal)
g_{zz}	Gradients verticaux (mGal/m)
G_{zz}	Noyau des gradients verticaux
ΔM	Différence de masse (kg, g)

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Introduction

La région de l'Abitibi, située au nord-ouest de la province du Québec, est reconnue pour son secteur minier. Les camps miniers comme Val d'Or, Rouyn-Noranda et Matagami sont des camps explorés depuis très longtemps (de 70 à 100 ans) et les gisements situés à faible profondeur, entre 0 et 500m, sont soit connus soit déjà exploités. Désormais, les sociétés minières recherchent les gisements situés plus profondément. Pour cela, de nouveaux outils doivent être développés, car les méthodes géophysiques actuelles de surface ou aéroportées (électromagnétique, gravimétrique, magnétique, etc.) sont limitées aux premiers 500 m approximativement. Les gisements de Bracemac-McLeod (Matagami) et de Coulon sont des exemples de gisements non-détectables (ou difficilement) de la surface. Récemment, la compagnie Scintrex a développé un gravimètre, le GraviLog, qui peut être utilisé dans les forages NQ et BQ, de diamètre de 57.2mm et 60mm respectivement, principalement utilisés pour l'exploration minière. Le gravimètre peut prendre des mesures jusqu'à une profondeur de 2km, rendant possible la détection de gisements jusqu'à cette profondeur.

Cette méthode géophysique est bien adaptée pour l'exploration minière en Abitibi, parce que les gisements de sulfures massifs, gisements les plus souvent exploités dans cette région, sont beaucoup plus denses que la roche encaissante (typiquement 4,6 contre 2,7 g/cm^3). Ce changement de densité et un volume suffisamment grand peuvent causer une anomalie observable sur les données gravimétriques. La gravimétrie en surface est déjà utilisée fréquemment en exploration minière. Cependant, la gravimétrie n'a pas une portée d'investigation très grande pour les gisements, les gisements situés à des profondeurs de plus de 500m étant difficilement observables à la surface. Par exemple, un gisement de 5Mt situé à 500m de profondeur aura une réponse gravimétrique maximale en surface d'environ 0.55mGal. Si la précision sur les valeurs de l'anomalie de Bouguer est de cet ordre, il ne sera pas possible d'observer l'anomalie créée par un gisement. En utilisant les forages, le gravimètre se rapproche des cibles et l'augmentation de l'amplitude de la réponse associée permettra d'observer ce gisement.

1.2 Problématique

La gravimétrie en forage a été utilisée dans le domaine du pétrole depuis les années 1960. Par conséquent, plusieurs aspects de la méthode ont déjà été bien étudiés. Ces aspects seront révisés plus en détail dans la revue de littérature. Cependant, l'application de cette méthode en exploration minière est très récente et quelques questions se posent sur l'utilisation de celle-ci en contexte abitibien. Un levé gravimétrique en forage est coûteux en temps et en argent. C'est pour cela qu'il est essentiel d'optimiser la prise de données; celle-ci sera étudiée en détail. Le nombre et la distribution des forages, leur inclinaison et le pas de mesure suivant le forage sont tous des aspects de la prise de données qui peuvent affecter les réponses gravimétriques.

Pour bien comprendre les effets de ces paramètres, la modélisation et l'inversion de données gravimétriques seront utilisées. Un modèle synthétique d'un gisement type de la région de l'Abitibi et de la géologie encaissante a été dimensionné. Les paramètres d'acquisition seront modifiés et les réponses gravimétriques du modèle seront calculées à l'aide de la modélisation 3D. Une méthode stochastique sera alors utilisée pour inverser ces réponses. En comparant les résultats des inversions au modèle original, nous serons en mesure d'analyser l'effet des paramètres d'acquisition et d'optimiser ceux-ci.

La gravimétrie peut être utilisée dans deux contextes : pour la détection de gisements et la caractérisation de ceux-ci. Dans le premier cas, le système GraviLog est utilisé lors d'une campagne d'exploration. Le contexte géologique indique qu'il y a une possibilité d'un gisement dans une région et la gravimétrie en forage est couplée aux forages pour localiser un gisement. Dans le deuxième cas, un ou quelques forages ont interceptés un gisement et la gravimétrie est utilisée dans ces forages pour estimer le tonnage et dimensionner le gisement. Ceci permet de savoir si le gisement est économiquement exploitable.

La dernière problématique qui sera abordé dans ce mémoire est l'effet du traitement de la régionale. Lors du traitement de données gravimétriques, plusieurs corrections sont apportées et le problème de la séparation de la régionale de l'anomalie de Bouguer pour déterminer la réponse résiduelle associée uniquement aux structures locales n'est pas évident. Cette difficulté a déjà été discutée maintes fois dans la littérature. Dans le contexte de ce projet de maitrise, nous n'essayerons pas de proposer une recette miracle, mais bien d'étudier l'effet des différentes techniques de filtrage de la régionale sur les résultats des inversions.

1.3 Contenu du mémoire

L'optimisation de la prise de données dans les contextes de détection et de caractérisation d'un gisement type de l'Abitibi est l'objectif de cette maitrise. Cependant, avant d'entrer dans le vif du sujet, quelques notions seront expliquées et décrites dans la revue de la littérature. Premièrement, il faudra proposer un modèle synthétique représentatif du problème à résoudre. Pour ce faire, il faut bien connaître la géologie des camps miniers de l'Abitibi. Dans un premier temps, la géologie et les autres outils pour créer un modèle synthétique seront donc revus au chapitre 1. Ensuite, au chapitre 2, les travaux dans le domaine du pétrole seront discutés et résumés. Les différentes méthodes de modélisation et d'inversion sont les éléments fondamentaux de ce projet, il sera par conséquent important d'en comprendre les détails. Finalement, la problématique de la séparation de la régionale et de la résiduelle sera abordée.

Plusieurs outils et logiciels ont été utilisés pour mener à bien cette maitrise. Dans le chapitre 3, *Outils et méthodologie*, nous expliquerons pourquoi et comment ils ont servi et nous décrirons la méthodologie utilisée pour atteindre notre objectif. Le chapitre 4 décrira en détails les paramètres utilisés lors des modélisations et inversions. Les résultats de ceux-ci seront aussi présentés. Le cas de Coulon sera analysé dans le chapitre 5 de ce mémoire. Par la suite, les résultats seront discutés au chapitre 6, puis nous finaliserons le tout avec un résumé, nos conclusions et nos recommandations.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre présentera la revue de littérature. Les éléments qui y seront présentés sont essentiels à la bonne compréhension des étapes suivies lors de ce projet. Premièrement, un modèle de densité basé sur les gisements typiques de l'Abitibi a dû être proposé et la première section de ce chapitre fera un survol des gisements de sulfures massifs volcanogènes (SMV) en vue de bien identifier un gisement-type. Pour bien comprendre la méthode de gravimétrie en forage, une revue de ce qui a déjà été publié sera faite dans la section suivante. La troisième section portera sur les différentes méthodes de modélisation et d'inversion 3D. Ceci permettra de mieux comprendre pourquoi les méthodes de modélisation par prismes et d'inversion stochastique ont été choisies pour ce projet. Finalement le problème de la régionale sera abordé pour présenter la problématique et survoler ce qui a déjà été fait pour la résoudre.

2.1 Sulfures massifs volcanogènes (SMV) dans un contexte abitibien

La première étape de ce projet est de dimensionner un modèle géologique. Pour ce faire, il faut bien connaître et comprendre la géologie de la région de l'Abitibi. Le modèle développé est une version simplifiée de la géologie de l'Abitibi. D'abord, la géologie de l'Abitibi associée aux gisements volcanogènes est très complexe et il aurait été très difficile de créer un modèle qui est géologiquement réaliste. Ensuite, notre modèle est synthétique et est surtout utilisé pour démontrer que notre méthodologie est adéquate.

2.1.1 Types de gisements

Dans le contexte abitibien, il y a deux types de gisements de cuivre, or et zinc. Premièrement, il y a les zones de cisaillements minéralisées. Dans ces zones, la minéralisation se retrouve dans des veines ou des veinules de quartz sous forme disséminée (Saunders et Allard, 1989). Ces gisements sont difficiles à identifier à l'aide de la gravimétrie puisque le changement de densité est beaucoup moins prononcé que dans le cas des SMV.

Ceci nous mène au deuxième type de gisements retrouvé en Abitibi. Les SMV se forment en lentilles constituées de plusieurs métaux de base comme le Zn, Cu, Pb, et bien sûr, l'or et l'argent (Galley et al, 2007). Ces métaux ont des densités beaucoup plus élevées que la roche encaissante.

2.1.2 Minéralisation et densité des SMV

La densité des SMV dépend de la minéralisation et de la teneur de celle-ci. Les éléments retrouvés en bonne quantité sont le Cu, Pb, Ag, Zn et l'Au. Il est aussi possible de retrouver une certaine quantité de Co, Sn, Se Mn, Cd, In, Bi, Te, Ga et Ge (Galley et al, 2007). Les densités des SMV peuvent varier, mais elles se situent généralement entre 4,3 et 4.7 g/cm^3 contre 2.6 à 2.8 g/cm^3 pour la roche encaissante (Telford, 1990); si les lentilles ont un volume assez élevé, l'excès de masse est suffisamment important pour qu'il soit détecté par le gravimètre.

2.1.3 Géologie encaissante

La géologie entourant les SMV varie beaucoup dépendamment de la région, du contexte géologique et de la profondeur du gisement. Dans les cas de gisements semi-profonds (entre 500 et 1200m) de la région de Rouyn-Noranda et Matagami (Piché et al, 1983; Barrett et al, 1993; Liaghat et MacLean, 1992), les gisements se trouvent au contact ou près du contact de la rhyolite et de l'andésite (contact felsique-mafique). Des dykes de gabbro interceptent la couche d'andésite à divers endroits. C'est sur la base de cette géologie que le modèle synthétique a été établi.

2.1.4 Modèles géométriques des SMV

Il est plus facile à dimensionner un modèle en utilisant des formes géométriques simples, même si en réalité les gisements peuvent prendre des formes très complexes. Les formes qui ont été retenues lors de la revue de littérature sont des lentilles en forme de disque plat ou de cigare. Les disques plats sont des ellipsoïdes qui ont deux grands axes et un petit axe. Ces formes de lentilles sont retrouvées dans la région de Matagami (Piché et al, 1983). Les cigares sont des ellipsoïdes qui ont deux petits axes et un grand axe. Il est très fréquent de retrouver ces types de lentilles dans la région de Rouyn-Noranda, par exemple les mines Corbet et Ansil (Barrett et al, 1991 et Barrett et al, 1993). Pour les couches stratigraphiques, une épaisseur et un pendage constants seront utilisés. Ceci permettra de simplifier le modèle géométrique.

2.2 Études antérieures dans le domaine du pétrole

Avant d'entamer la modélisation et l'inversion qui seront les sujets les plus importants du projet, une revue sera faite sur les études antérieures de gravimétrie en forage dans le domaine du pétrole. Même si la gravimétrie en forage n'a été utilisée que récemment en exploration minière, de nombreuses applications ont été décrites dans le domaine pétrolier.

Les premières publications sur la gravimétrie en forage ont été publiées dans les années 50 à 70. Ces publications se concentraient sur le calcul des densités en utilisant des méthodes de modélisation. En réduisant la géologie en formes géométriques simples, il est possible de reproduire les données gravimétriques mesurées et de calculer la densité à partir des anomalies associées à ces formes (Smith, 1950, Hearst et McKague, 1976, Snyder, 1976 et LaFehr, 1983). Dans un contexte pétrolier, ces méthodes sont bien adaptées puisque la géologie est à faible pendage et est plus simple que dans le contexte minier. Brown et Lautzendhiser (1982) ont pu analyser avec succès l'effet d'une couche inclinée qui est plus adaptée à la géologie du Bouclier Canadien.

Dans le domaine pétrolier, les gravimètres en forage sont différents de celui développé par Scintrex. Ils sont plus massifs et leur fonctionnement est différent. Ces gravimètres ont un diamètre plus grand, entre 100mm et 130mm, que le GraviLog, 48mm. Aussi, ils utilisent un système de sonde-navette entre deux positions pour déterminer le gradient gravimétrique et ainsi obtenir la densité du terrain. Le système de Scintrex utilise une microbalance au quartz.

2.2.1 Corrections en forage

Les corrections dues à la prise de mesures et à la géologie entourant le forage sont déjà bien connues. Comme pour la gravimétrie en surface, il faut corriger pour l'effet de plateau, la latitude et les variations diurnes (Nind et al, 2007). La topographie affecte aussi les données en forage, mais de manière notable seulement pour les mesures près de la surface (Li et Chouteau, 1999). En plus de ces effets, il faut corriger les variations de pression atmosphérique, de température et de l'angle du forage (Nind et al, 2007). Le GraviLog est équipé d'un thermomètre, d'un baromètre et d'un clinomètre pour pouvoir calculer ces effets et corriger les données.

2.2.2 Réponses gravimétriques de formes typiques

Plusieurs formes simples ont été étudiées. Dans le Borehole Gravity Handbook de Black (1996), plusieurs de ces formes et leurs réponses gravimétriques sont présentées. La première est la sphère puisque c'est la forme la plus simple pour un corps 3D. Pour une sphère, de masse M, pour laquelle sont centre est situé à une distance r du forage, le champ gravitationnel est:

$$g_z = -GM\frac{z}{(x^2+y^2)^{5/2}} \qquad (2.1)$$

Où g_z est le champ gravitationnel, G est la constante gravitationnelle (en SI), M est la masse de la sphère (kg) et z, x et y sont les composantes du vecteur entre le centre de la sphère et le point de mesure

Si le forage traverse la sphère :

$$g_z = -\frac{4}{3}\pi G\rho z \qquad (2.2)$$

Où ρ est la densité de la sphère (kg/m^3)

Pour un cylindre horizontal infini à une distance x du forage, le champ gravitationnel peut être calculé comme suit :

$$g_z = -2G\mu\frac{z}{x^2 + z^2} \qquad (2.3)$$

Où μ est la masse linéaire du cylindre (kg/m)

Si le forage traverse le cylindre :

$$g_z = -2\pi G\rho \qquad (2.4)$$

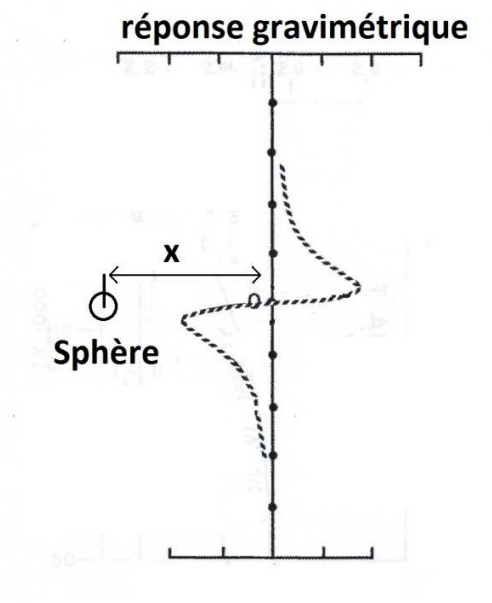


Figure 2.1 : Forme de la réponse gravimétrique d'une sphère située à une distance x. Réponse gravimétrique en fonction de la profondeur

2.2.3 Portée

Un autre aspect de la gravimétrie en forage qui a été bien étudié est la portée ou distance d'investigation. Cette valeur permet de calculer la distance maximale pour laquelle une structure donnée peut être détectée par le gravimètre en forage (BHGM – Borehole Gravity Meter). La méthode la plus utilisée pour calculer la portée d'un BHGM est de calculer un rayon pour lequel 80% de la réponse mesurée provient de la structure choisie (Black, 1996). Dans la littérature, trois structures sont documentées et elles dépendent du contexte géologique.

La première est une couche horizontale homogène. Cette structure est surtout intéressante dans le domaine du pétrole puisque les roches encaissantes sont de types sédimentaires et ont un faible pendage. Pour calculer la portée, la densité d'un cylindre vertical d'épaisseur T centré sur le forage est calculée. Pour mieux représenter la portée, un facteur géométrique est utilisé :

$$G_f = \frac{\rho_{BHGM} - \rho_R}{\rho_{sl} - \rho_R} \qquad (2.5)$$

Où, G_f est le facteur géométrique, ρ_{sl} est la densité de la couche, ρ_R est la densité régionale et

$$\rho_{BHGM} = \frac{F}{4\pi G} - \left(\frac{1}{4\pi G}\right)\frac{\Delta g_z}{\Delta z} \qquad (2.6)$$

Où, F est la correction de plateau (0.3086 mGal/m), G est la constante gravitationnelle, Δz est la distance entre deux points de mesure et Δg_z est la différence de champ gravitationnelle entre les deux points de mesure.

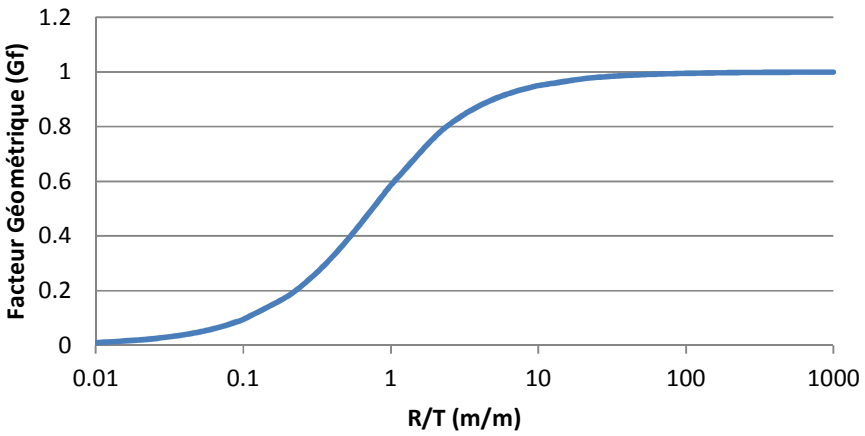


Figure 2.2 : Facteur géométrique en fonction de la portée /épaisseur de la couche

Brown et Lautzenhiser (1982) ont étudié l'effet d'une couche ayant un pendage. Cette structure est intéressante dans la région de l'Abitibi puisque la majorité des unités géologiques sont redressées et ont un pendage entre 75° et 90°. Pour une couche de dimension finie, les auteurs ont dérivé la formule pour un cylindre incliné pour représenter une couche de densité ρ_{sl} dans une roche encaissante homogène de ρ_{hor}.

$$\frac{\Delta\rho_{dip}}{\Delta\rho_R} = -\left(sin^2\varphi + \frac{cos^2\varphi}{\sqrt{1+(2R/T)^2}}\right) \qquad (2.7)$$

Où

$$\Delta\rho_{dip} = \frac{F}{4\pi G} - \left(\frac{1}{4\pi G}\right)\left(\frac{\Delta g_z}{\Delta z}\right) - \rho_{sl} \qquad (2.8)$$

$$\Delta\rho_R = \rho_{sl} - \rho_{hor} \qquad (2.9)$$

R est le rayon du cylindre, T est l'épaisseur de la couche, ϕ est l'angle de la couche, F est la correction de plateau (0.3086 mGal/m) et G est la constante gravitationnelle ($6.673*10^{-8}$ $cm^3g^{-1}s^{-2}$).

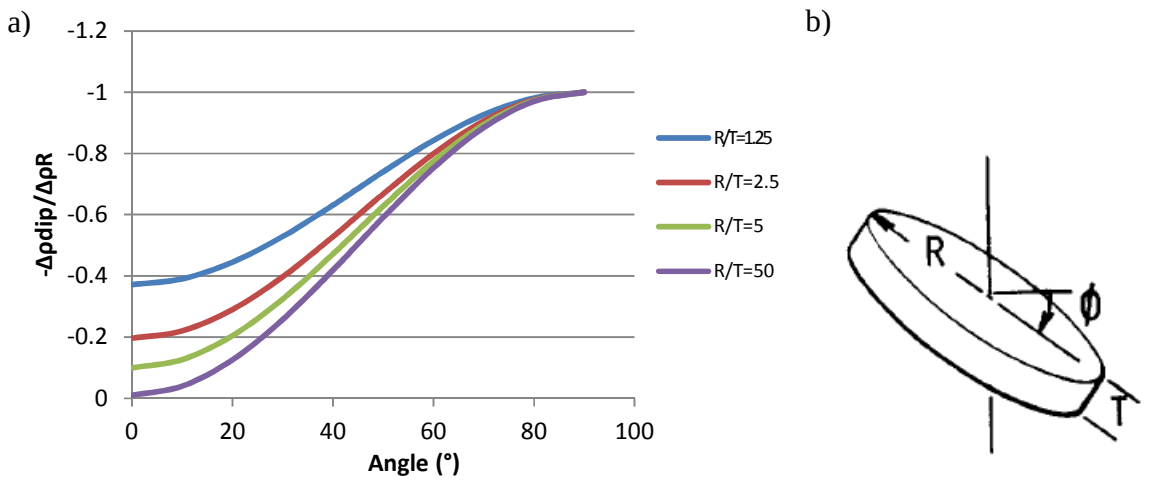


Figure 2.3 : a) Rapport de densité en fonction de l'angle, ϕ, de la couche , b) Cylindre centrée sur le forage de rayon, R, ayant un angle, ϕ, par rapport à l'horizontale et une épaisseur, T.

En réarrangeant les équations ci-dessus, il est possible d'isoler R pour calculer le rayon d'influence maximal d'une couche inclinée. Ce rayon d'influence représente la portée d'un gravimètre situé dans une couche inclinée.

$$R = -T\frac{\sqrt{-\left(\frac{\Delta\rho_{DIP}}{\Delta\rho_R}\right)^2 - 2\left(\frac{\Delta\rho_{DIP}}{\Delta\rho_R}\right)sin^2(\varphi) - sin^4(\varphi) + cos^4(\varphi)}}{2(\left(\frac{\Delta\rho_{DIP}}{\Delta\rho_R}\right) + sin^2(\varphi))} \qquad (2.10)$$

Pour calculer la distance d'investigation, il faut bien connaître la géologie et la densité des couches entourant le forage. Les densités situées immédiatement autour du forage peuvent être calculées. Par exemple, un levé gamma-gamma pourrait être utilisé. En connaissant la densité et l'angle de la couche, la densité régionale et la précision du gravimètre, il est possible de calculer la portée. La précision du gravimètre est utilisée pour calculer la variation $\Delta\rho_{dip}$ minimum que le gravimètre peut détecter.

La dernière structure étudiée dans la littérature et qui est intéressante dans le cas des gisements SMV en Abitibi est la sphère. Bien que la plupart des gisements aient une forme de cigare ou de disque plat, ils peuvent être approximés par une sphère si la portée doit être estimée. Si une sphère possède une masse M et que le gravimètre a une précision de δg, alors la portée est calculée comme suit :

$$R = \sqrt{\frac{M}{0.3896\delta g}} \qquad (2.11)$$

2.3 Modélisation et inversion 3D

Bien que la gravimétrie en forage soit un développement récent dans le domaine minier, la gravimétrie en surface est utilisée depuis quelques décennies. Plusieurs avancées accomplies en gravimétrie en surface peuvent être facilement transposables à cette méthode en forage. La modélisation 3D et l'inversion 3D sont facilement adaptables au cas de gravimétrie en forage. La modélisation calcule les réponses gravimétriques théoriques d'un modèle de densité. Dans notre cas, la modélisation est utilisée pour calculer les réponses gravimétriques d'un modèle; l'inversion de ces réponses tentera de retrouver ce modèle de la manière la plus fidèle.

Comme mentionné précédemment, les premiers travaux effectués avec la gravimétrie en forage étaient surtout concentrés sur la modélisation. Cependant, puisque les ordinateurs n'étaient pas aussi puissants, les modèles se résumaient à des formes simples. La modélisation est de nos jours

beaucoup plus complexe et plusieurs méthodes existent. Deux méthodes de modélisation 3D ont été testées pour la modélisation en forage et seront présentées dans cette section. Aussi, il est à noter la méthode par différences finies présentée par Farquharson et Mosher (2009) qui procède à partir de l'équation de Poisson.

L'inversion consiste à calculer la distribution de densité dans le sol à partir des données gravimétriques. La modélisation est le calcul direct des réponses. Sous forme matricielle, l'équation est définie comme suit :

$$g_z = G_z \rho \qquad (2.12)$$

Où g est un vecteur de longueur n_g qui contient la réponse gravimétrique en z, G_z est le noyau (ou *kernel*) ou une matrice de sensitivité de n_g par n_p qui contient la position des densités et ρ est un vecteur de longueur n_p qui contient les densités.

L'inversion est appelée ainsi parce que pour calculer la distribution de densité dans le sol, le noyau est inversé pour calculer ρ :

$$\rho = {G_z}^{-1} g_z \qquad (2.13)$$

Cependant, dans la majorité des cas, n_p est beaucoup plus grand que n_g causant la sous-détermination du problème, donc à solutions non unique. Pour résoudre cette ambiguïté, plusieurs méthodes ont été développées (Last et Kubik, 1983; Guillen et Menichetti, 1984; Barbosa et Silva, 1994; Bear et al, 1995; Li et Oldenburg, 1998; Pilkington, 1997; Boulanger et Chouteau, 2001; Mosher et al, 2008; Shamsipour et al, 2010). Deux méthodes seront présentées et expliquées dans les sections suivantes. Aussi, des contraintes peuvent être ajoutées pour réduire la non-unicité. À l'exception de la méthode stochastique de Shamsipour et al. (2010), seulement Mosher et al. (2008) ont appliqués leur méthode au cas en forage. Sur le site web du logiciel Grav-3D de UBC-GIF, d'après la description du logiciel, il semble que ce dernier peut inverser des données en forage (http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/). Toutefois, en réalité, le logiciel ne peut pas encore inverser des données en forage. Le logiciel GeoModeller de Intrepid Geophysics offre aussi l'inversion en forage. Ils utilisent une inversion utilisant des données à priori d'un modèle géologique (http://www.intrepid-geophysics.com/ig/index.php?page=geomodeller). Cependant, aucun exemple d'inversion de données en forage n'est encore disponible.

2.3.1 Modélisation 3D par intégrale de surface

La première méthode a été développée par Singh et Guptasarma (2001), et Giroux et al (2007) ont appliqué cette méthode à la modélisation 3D des réponses en forage. Les auteurs utilisent une approche qui permet de calculer le champ gravitationnel, **F**, de la surface d'un solide pour lequel la densité est connue.

$$F = Gr \iint (\rho \boldsymbol{r} \cdot \boldsymbol{u_n})/r^2 ds \qquad (2.14)$$

Où G est la constante gravitationnelle ($6.673*10^{-8}$ $cm^3g^{-1}s^{-2}$), **r** est le vecteur entre le point d'observation et l'élément de surface ds, ρ est la densité du solide et $\mathbf{u_n}$ est un vecteur unitaire orthogonal à l'élément de surface ds.

Pour faciliter le calcul de l'intégrale, la surface est divisée en plusieurs facettes. Le champ, F, est la somme des effets de chacune de ces facettes et le champ de chacune des facettes peut être divisé en trois composantes :

$$F_x = -G\rho d(l\Omega + nQ - mR) \qquad (2.15)$$

$$F_y = -G\rho d(m\Omega + IR - nP) \qquad (2.16)$$

$$F_z = -G\rho d(n\Omega + mP - IQ) \qquad (2.17)$$

Où, d=$\mathbf{r}\cdot\mathbf{u_n}$ et (l, m, n) sont les composantes de u_n. P, Q et R sont des composantes cartésiennes qui peuvent être calculées à l'aide des équations données par Guptasarma et Singh (1999).

2.3.2 Modélisation 3D par intégrale de volume (prismes)

La deuxième méthode a été décrite par Li et Chouteau (1998). Le sous-sol est divisé en prismes rectangulaires de longueur dx, dy et dz et une densité, ρ, est assignée à chaque prisme. Pour calculer le champ à un point donné, il suffit d'additionner les contributions de chaque prisme. Pour ce faire, l'équation de Haaz (1953) est utilisée :

$$g_z = -G\rho \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{2} \mu_{ijk} \times \left[x_i \ln\left(y_j + r_{ijk}\right) + y_j \ln\left(x_i + r_{ijk}\right) - z_k arctan \frac{x_i y_j}{z_k r_{ijk}} \right] \qquad (2.18)$$

Où,

$$\mu_{ijk} = (-1)^i(-1)^j(-1)^k \tag{2.19}$$

$$x_i = x_0 - \xi_i, \qquad y_j = y_0 - \eta_j, \qquad z_k = z_0 - \varsigma_k \tag{2.20}$$

$$r_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2} \tag{2.21}$$

Pour simplifier le calcul, les équations sont utilisées sous forme de matrices.

$$g_z = G_z \rho \tag{2.22}$$

$$G_z = -G \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{2} \sum_{k=1}^{2} \mu_{ijk} \times \left[x_i \ln\left(y_j + r_{ijk}\right) + y_j \ln\left(x_i + r_{ijk}\right) - z_k arctan \frac{x_i y_j}{z_k r_{ijk}} \right] \tag{2.23}$$

En assignant les différentes densités à chaque prisme, il est possible de construire toutes les formes. Cependant, ces formes auront des aspects de marche d'escalier. Ceci est limitatif, surtout dans le cas de modèles ayant des formes variables. Une méthode pour contrer cette problématique est de diminuer dx, dy et dz, mais ceci augmente le nombre de cellules, le temps de calcul et la mémoire requise pour calculer l'inversion. La précision du modèle et des réponses modélisées dépend donc de la puissance et de la mémoire vive de l'ordinateur.

2.3.3 Inversion 3D par méthodes des moindres-carrés amortis

L'inversion par moindres-carrés consiste à minimiser une fonction objective, ϕ_m, et l'erreur, ϕ_d, entre les réponses gravimétriques mesurées, g_{obs}, et les réponses gravimétriques prédites, g_z pour calculer un modèle de densité, ρ.

$$\varphi_d = \|W_d(g_z - g_{obs})\|_2^2 \qquad (2.24)$$

Où W_d est une matrice diagonale de $1/\sigma_i$ et σ_i est l'écart type suivant une distribution χ^2 avec N degré de liberté ; $E[\chi^2]=N$.

La fonction objective que Li et Oldenburg (1998) ont choisi est une équation qui utilise un modèle initial de ρ_0 et a un effet de lissage dans les trois directions x, y, z. En forme matricielle, la fonction objective s'écrit comme suit :

$$\varphi_m = \left\|W_\rho((\rho - \rho_0)\right\|^2 \qquad (2.25)$$

Où W_ρ est une matrice des poids qui dépendent de la structure imposée (minimisation du gradient ou de la courbure des densités) et ρ-ρ_0 sont les changements de densités.

Pour calculer les densités, l'équation qui suit doit être minimisée.

$$\varphi(\rho) = \varphi_m - \lambda^{-1}(\varphi_d - \varphi_d^*) \qquad (2.26)$$

Le multiplicateur de Lagrange λ est utilisé pour ajouter des contraintes puisque le système est sous-déterminé (nombre de données, g_{obs}, << nombre de densités, ρ). Le modèle de densité est calculé itérativement.

Le système d'équations en gravimétrie est un système linéaire puisque la réponse est proportionnelle à la densité. Le système est sous-déterminé puisque que le nombre de cellules, n_p, est beaucoup plus grand que le nombre de données gravimétriques, n_g. Le résultat d'un système sous-déterminé est un nombre infini de solutions. Pour y remédier, il y a plusieurs méthodes. L'addition d'*informations a priori* est la méthode la plus souvent employée. À l'aide de paramètres déjà connus, il est possible de contraindre notre système pour calculer des résultats qui sont plus près de la réalité.

Il existe plusieurs types de contraintes qui peuvent être facilement incorporées dans l'inversion par moindres-carrés. La première contrainte est une pondération en fonction de la profondeur. Lors de l'inversion, les structures tendent à se retrouver en surface. Ceci est dû à la grande sensibilité des

cellules superficielles qui tendent à placer toutes les structures à la surface. Pour remédier à ce phénomène, Li et Oldenburg (1998) proposent d'utiliser un poids qui dépend de la profondeur :

$$w(z) = \frac{1}{(z + z_0)^{\beta/2}} \qquad (2.27)$$

Où, z est la profondeur de la cellule dont on tente de déterminer la densité, z_0 dépend de la grandeur des cellules et β est une constante généralement de l'ordre de 1 à 2 (Li et Oldenburg, 1996).

Ce poids est ajouté en forme de matrice diagonale lors des inversions. Cependant, puisque β est choisi pour donner le modèle le plus plausible géologiquement, cette méthode est seulement intéressante si aucune donnée gravimétrique en forage n'est disponible.

Une autre conséquence de l'inversion est l'effet de lissage des structures. Ce phénomène causé par la minimisation des gradients ou de la courbure lors de l'inversion, semble réduire les écarts de densité du modèle et générer des structures très progressives. Une contrainte de support minimum (Last et Kubik, 1983) peut être ajoutée sous forme de matrice diagonale où $V_{jj} = \frac{1}{\rho_j^2+\varepsilon}$. Cette contrainte rend les structures plus compactes et minimise le volume de celles-ci.

Si certaines densités sont connues, leurs valeurs peuvent être fixées dans les prismes correspondants dans le modèle recherché. Cette contrainte est imposée en appliquant une matrice diagonale de poids sur les densités. Si la valeur sur la diagonale est égale à 0.001, le prisme est contraint. Sinon, elle est égale à 1. Les densités déjà connues sont ajoutés au modèle initial. Cette matrice fait en sorte qu'à chaque itération, la valeur de cette densité ne change pas.

2.3.4 Inversion 3D stochastique

L'inversion 3D stochastique (Shamsipour et al, 2010) sera celle utilisée pour ce projet de maitrise; elle sera décrite plus en détail que les précédentes. Pour cette approche, le cokrigeage est utilisé pour minimiser la variance entre les données mesurées et celles prédites. Le cokrigeage minimise la variance en dérivant l'équation de la variance par rapport à ces poids, λ_i.

2.3.4.1 Modèle de covariance

Les matrices de covariance dépendent de la corrélation spatiale entre les données et ces matrices sont calculées à l'aide de covariogrammes. Plusieurs modèles de covariogrammes existent. Dans notre cas, les covariogrammes tridimensionnels anisotropes stationnaires seront utilisés. Les covariogrammes anisotropes ont des portées qui varient avec la direction. Pour calculer les

covariogrammes, un modèle de covariance qui comporte plusieurs paramètres est nécessaire. Il s'agit des portées cartésiennes, Ax, Ay et Az, des angles de direction phi, thêta et vertical, du type de modèle de variogramme, de l'effet de pépite, C_0, et de la covariance, C. Les types de modèles de variogramme qui sont utilisés plus fréquemment en gravimétrie sont les modèles sphérique, gaussien et de Cauchy avec b=0.5. Pour calculer les paramètres du modèle de covariance, la méthode du graphique v-v est utilisée (Asli et al, 2000). L'approche du graphique v-v consiste à minimiser l'erreur entre les matrices de covariances théoriques et expérimentales.

Premièrement, la matrice de covariances expérimentales des données gravimétriques est calculée à l'aide de cette équation

$$C_{gg-exp} = g_{obs} \cdot g_{obs}^T \qquad (2.28)$$

La matrice de covariances théoriques est calculée à l'aide de cette équation

$$C_{gg-th} = G_z C_{\rho\rho} {G_z}^T + C_e \qquad (2.29)$$

Où C_e est une matrice de covariance d'erreur sur les données et $C_{\rho\rho}$, la covariance des densités, est calculée à l'aide d'un modèle de covariance initial.

Les premiers paramètres du modèle de covariance sont arbitraires. Ensuite, les matrices $C_{gg\text{-}exp}$ et $C_{gg\text{-}th}$ sont transformées en vecteur, v_{th} et v_{exp}. Le vecteur v_{th} est classé en ordre décroissant et cet ordre est appliqué au vecteur v_{exp}. Ces vecteurs sont groupés en N_{div} divisions et la moyenne de chaque division est calculée. L'erreur moyenne absolue (MAE) est calculée entre les vecteurs v_{th} et v_{exp}. En variant les différents paramètres du modèle de covariance, cette erreur peut être minimisée.

$$MAE = \frac{1}{N_{tot}} \sum_{i=1}^{N_{div}} N_i \left| v_{th}(i) - v_{exp}(i) \right| \qquad (2.30)$$

Où N_i est le nombre de paires dans chaque division et $N_{tot}=N_{div}*N_i$.

La minimisation de MAE peut être faite de plusieurs manières. Shamsipour et al (2010) proposent une minimisation par méthode simplex par l'algorithme Nelder-Mead. La méthode par essais et erreurs peut aussi être utilisée, mais peut être très coûteuse en temps de calcul. Il faut aussi noter que le modèle de covariance peut aussi être choisi en comparant graphiquement les courbes des vecteurs de covariances en fonction de N_{div}.

2.3.4.2 Cokrigeage

Une fois le modèle de covariance choisi et les matrices C_{gg} et $C_{\rho\rho}$ calculée, la dernière matrice de covariances nécessaire peut être calculée.

$$C_{g\rho} = G_z C_{\rho\rho} \tag{2.31}$$

Le cokrigeage simple est donné par l'équation suivante :

$$C_{gg}\Lambda = C_{g\rho} \tag{2.32}$$

En inversant la matrice C_{gg}, il est possible de calculer les poids, Λ. Les densités peuvent maintenant être calculées ;

$$\rho^* = \Lambda^T g \tag{2.33}$$

2.3.4.3 Contraintes

Ce système d'équations est sous-déterminé, alors pour améliorer le modèle des densités inversées, des contraintes de densités fixes, ρ_F, et gradients de densités fixes, g_R, peuvent être ajoutées. Le cokrigeage s'écrit alors comme suit :

$$\begin{bmatrix} C_{gg} & C_{g\rho F} & C_{ggR} \\ C_{\rho Fg} & C_{\rho F\rho F} & C_{\rho FgR} \\ C_{gRg} & C_{gR\rho F} & C_{gRgR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{g\rho} \\ C_{\rho F\rho} \\ C_{gR\rho} \end{bmatrix} \tag{2.34}$$

$$C_{\rho F\rho} = F C_{\rho\rho} \tag{2.35}$$

$$C_{\rho F\rho F} = F C_{\rho\rho} F^T + C_{eFeF} \tag{2.36}$$

$$C_{gR\rho} = C_{\rho gR}^T = H C_{\rho\rho} \tag{2.37}$$

$$C_{gR\rho F} = {C_{\rho FgR}}^T = H C_{\rho\rho} F^T \tag{2.38}$$

$$C_{gRg} = {C_{ggR}}^T = H C_{\rho\rho} {G_z}^T \tag{2.39}$$

$$C_{gRgR} = H C_{\rho\rho} H^T + C_{egRegR} \tag{2.40}$$

Où λ, μ et η sont des vecteurs de poids, F est une matrice de n_F x n_p où tous les coefficients ont une valeur de 1 si la densité est connue et 0 autrement, H est une matrice de n_{GR} x n_p où tous les

coefficients ont une valeur de -1 et 1 où le gradient est connu et 0 autrement, C_{eFeF} est une matrice diagonale de covariances des erreurs sur ρ_F, C_{egRegR} est une matrice diagonale de covariance des erreurs sur g_R.

2.4 Problème de la régionale

Le gravimètre mesure la variation de l'accélération gravitationnelle causée par les structures de densités différentes dans son voisinage. Il est possible de considérer la réponse enregistrée comme la somme de deux types de contribution qui sont mesurées en même temps : la réponse des structures dans le voisinage immédiat du forage et la réponse des structures plus régionales (de grande extension ou plus profondes). Un des éléments-clés lors de l'interprétation sera de pouvoir séparer les deux types de réponse pour se concentrer sur celle provenant de la région immédiate du forage. Pour traiter ce problème, dit de la séparation régionale-résiduelle, plusieurs méthodes ont été proposées. Quatre méthodes seront présentées dans cette revue de littérature : la méthode graphique, le gradient vertical, les filtres non-linéaires, les filtres par ondelettes et l'inversion de la structure régionale.

Méthode graphique : La méthode graphique consiste à tracer la régionale à main levé en se basant sur la connaissance a priori de la région et sur l'expérience de l'interpréteur. Cette méthode est subjective et est difficile à systématiser.

Gradient vertical : Le gradient vertical peut être utilisé pour atténuer les grandes longueurs d'onde associées à la régionale. L'interprétation porte alors sur le gradient vertical du champ et non sur le champ; l'anomalie est surtout associée aux courtes longueurs d'onde causées par les structures locales. Certains gravimètres peuvent mesurer le gradient vertical; il peut être aussi estimé par différences de lectures gravimétriques normalisées par la distance en z entre chaque lecture, si l'échantillonnage est adéquat:

$$g_{zz} = \frac{\Delta g_z}{\Delta z} \tag{2.41}$$

Cependant, lors de l'inversion, le noyau G_z sera remplacé par le noyau G_{zz} qui est une matrice des gradients verticaux, calculée à l'aide de l'équation de Li et Chouteau (1998) :

$$G_{zz} = G \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{2} \sum_{k=1}^{2} \mu_{ijk} \arctan\left(\frac{x_i y_j}{z_k r_{ijk}}\right) \tag{2.42}$$

Filtre non-linéaire : Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un filtre non-linéaire proposé par Naudy (1968) et popularisé par Keating et Pinet (2011). Contrairement aux autres filtres proposés, celui-ci reproduit assez bien le résultat par la méthode graphique. Ce filtre dépend seulement de la géométrie des anomalies.

Filtre par ondelettes : Cette méthode utilise la décomposition en ondelettes pour calculer une régionale. La réponse gravimétrique est décomposée en signaux détaillés et en signaux de basse résolution. Si ces signaux sont additionnés, la réponse initiale est retrouvée. Pour la régionale, le signal de basse résolution est utilisé. Ce signal est de grande longueur d'onde et devrait bien représenter la régionale. Différentes ondelettes peuvent être utilisées pour la décomposition.

Inversion de la structure régionale : La dernière méthode a été proposée par Li et Oldenburg (1998). Elle consiste en une inversion en deux temps. Cette méthode peut être résumée en cinq étapes :

1. Inverser l'anomalie gravimétrique pour obtenir un premier modèle ayant un grand volume et un maillage grossier.
2. Choisir un volume plus petit qui inclut seulement la source locale et qui sera le volume final à inverser où se trouvent les structures créant la résiduelle.
3. Appliquer un contraste de densité de 0 à ce volume local.
4. Calculer la réponse gravimétrique de ce modèle dit « régional » et la soustraire de l'anomalie originale.
5. Inverser l'anomalie gravimétrique résiduelle sur le volume plus petit ayant un maillage plus fin pour déterminer la structure locale.

À l'étape 4, la régionale est calculée aussi bien en surface que le long des forages utilisés pour les mesures gravimétriques en forage.

CHAPITRE 3 OUTILS ET MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre décrit les outils et la méthodologie utilisés pour analyser la gravimétrie en forage dans un contexte de géologie complexe. Premièrement, les programmes et logiciels utilisés ainsi que la stratégie développée dans le contexte de ce projet de maitrise seront présentés. Ensuite, le gravimètre développé par Scintrex, le GraviLog, sera brièvement présenté. Finalement, la méthodologie développée pour ce projet sera décrite et expliquée dans la dernière section.

3.1 Programmes utilisés

GOCAD est un logiciel multidisciplinaire pour la modélisation géologique comprenant plusieurs composantes (http://www.pdgm.com/Products/GOCAD). Dans le cadre de ce projet, le module de dessin assisté par ordinateur (DAO) a été utilisé pour créer un modèle de densité. Il a permis de créer des formes comme des ellipsoïdes et des polyèdres et de produire le maillage. Des densités ont été assignées aux différentes régions pour définir le modèle de densité. Le logiciel GOCAD contient aussi un module géophysique d'UBC-GIF qui permet de modéliser et inverser des données gravimétriques. Cependant, ce module ne traite pas les données en forage, seulement celles en surface.

MATLAB est un logiciel de programmation basé sur le langage C++. Il a servi à coder le programme de modélisation et d'inversion utilisé pour calculer les résultats présentés au chapitre 4 et 5 de ce projet de maitrise. Puisque le langage de MATLAB utilise des variables en forme matricielle, il est bien adapté pour les calculs requis pour ce projet. En plus, il a été utilisé pour traiter les données à l'aide du filtre par ondelettes. La fonction *wavemenu* a été utilisée pour traiter les données.

BHGravi est un logiciel de modélisation tridimensionnel de données gravimétriques développé à l'École Polytechnique (Giroux et al, 2007). Ce logiciel utilise la modélisation par intégrale de surface et contrairement au programme GOCAD, il peut modéliser les données en forage. Ce logiciel a été utilisé pour valider les résultats obtenus à l'aide du code MATLAB.

3.2 GraviLog

Le GraviLog a été utilisé pour acquérir les données gravimétriques en forage du projet Coulon. Il utilise un système de microbalance au quartz qui le rend très sensible et plus compact que ces antécédents du domaine pétrolier. En ce moment, il est le seul gravimètre ayant un diamètre assez petit pour prendre des données dans des forages BQ et NQ. Ces forages sont les plus communément utilisés dans le domaine minier et ont respectivement des diamètres externes de 60mm et 76mm. La précision du GraviLog est de 5µGal. La sonde contenant le gravimètre a un diamètre de 48 mm et une longueur de 2m. La profondeur maximale de prise de données est de 2000m (Nind et al, 2007). Le GraviLog a été conçu pour les applications au domaine minier et en ingénierie. Un dernier aspect très intéressant du GraviLog est qu'il peut être utilisé dans des forages miniers existants pourvu que ces derniers ne soient pas bloqués.

3.3 Méthodologie

3.3.1 Dimensionnement du modèle géologique

Comme modéliser la diversité des gîtes SMV de la région de l'Abitibi dans le contexte d'un projet de maitrise serait beaucoup trop long, un cas-type a été choisi. Deux modèles synthétiques seront analysés.

Le premier est un modèle simple d'un gisement en forme de disque plat (ellipsoïde) de 245m (axe x) x 10m (axe y) x 345 m (axe z). Il a une densité moyenne de 4.4 g/cm^3, avec un tonnage de 14 MT. Il est situé dans un milieu homogène de densité 2.7 g/cm^3, produisant un excès de masse de 5.8 MT.

Le deuxième modèle utilise le même gisement dans une géologie encaissante plus complexe (Figure 3.1). La stratigraphie choisie est composée de gabbro, de rhyolite et d'andésite. Une densité moyenne a été choisie pour ces roches. Le même gisement que le modèle précédent a été utilisé, mais puisque la densité de la roche encaissante est différente, son excès de masse change aussi. Ce nouvel excès de masse est de 6.4 MT.

Tableau 3.1 : Densité moyenne des roches

Formation	Densité (g/cm³)	Contraste de densité (g/cm³)
Andésite	2.8	0.3
Gabbro	3.1	0.6
Rhyolite	2.5	0
Gisement	4.4	1.9

La couche de rhyolite est située au sud du modèle et les couches ont une direction de 270° et un pendage de 80°. Les épaisseurs des couches et leurs séquences sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.2 : Roches encaissantes du deuxième modèle synthétique

Formation	Épaisseur (m)
Gabbro	50
Andésite	100
Gabbro	50
Andésite	100+
Rhyolite	100+

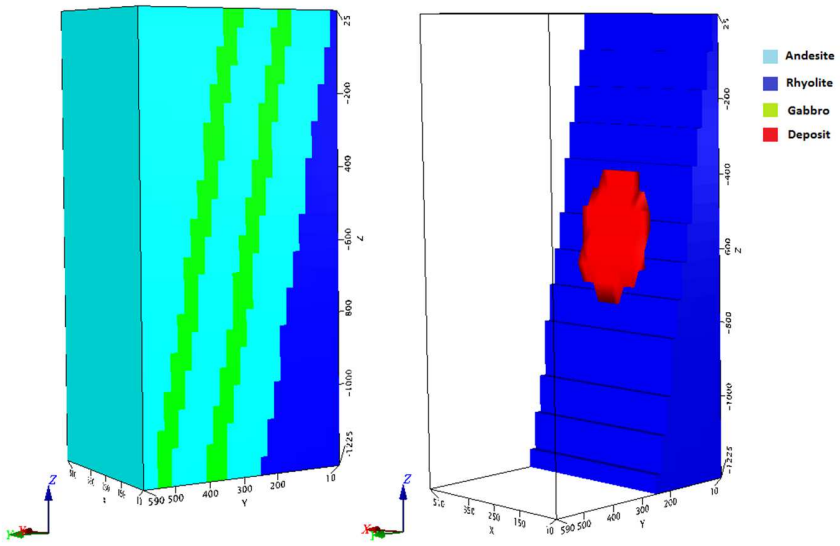


Figure 3.1 : Modèle de densités

Des prismes rectangulaires de 20m x 20m x 50m ont été utilisés. Le modèle a des dimensions de 500m x 580m x 1250m. Une zone tampon (*padding)* de 1500m en x et y a été ajoutée pour éviter des effets de bord. En incluant la zone tampon, le nombre total de cellules cubiques est 42 025.

3.3.2 Modélisation

Maintenant qu'un modèle de densité a été construit et dimensionné, les paramètres d'optimisation peuvent être analysés. Dans le cas du premier modèle, puisqu'il ne devrait avoir aucune anomalie que celle du gisement, ce dernier devrait, en théorie, être facilement positionné. Cependant, plus de trois forages devraient être nécessaires pour bien caractériser le gisement. Par après, le modèle avec une géologie plus complexe sera modélisé et inversé.

Premièrement, la position et le nombre de forages optimaux seront étudiés. Idéalement, les forages entourent le gisement, à une distance inférieure à la portée de la méthode, pour qu'il y ait une signature décelable dans les forages et que le gisement soit facilement localisé. Cependant, durant une campagne de forages réelle, les forages sont habituellement positionnés tous d'un même côté du gisement pour avoir plus de chance d'intercepter le gisement s'il suit un certain pendage. Dans le cadre de ce projet, les deux cas seront étudiés. Les premières inversions seront faites avec trois forages, puis un forage sera ajouté jusqu'à ce qu'une précision adéquate soit atteinte. Ensuite, en variant le pas d'échantillonnage des données (pas plus grand le long des forages), son effet sur la reconstruction du modèle pourra être étudié. La même analyse sera faite en ajoutant des contraintes.

Les forages ont une direction de N180° et un angle de pendage de 80° (figure 3.2). Ces directions ont été choisies pour représenter le plus près possible la réalité des campagnes de forage. Lors de campagnes de forage, les forages sont presque perpendiculaires à la stratigraphie pour pouvoir intercepter le gisement. Aussi, lorsque le gisement est intercepté, les forages continuent rarement plus profondément que 100m après l'interception. Les positions des forages ont été choisies pour entourer le gisement et seulement le forage D1 intercepte le gisement.

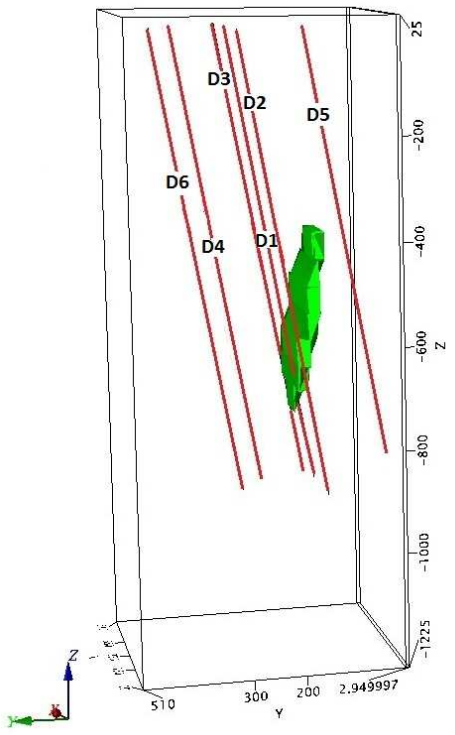


Figure 3.2 : Position des forages qui seront utilisés lors des inversions

La méthode de modélisation utilisée pour ce projet est celle des prismes. En premier lieu, la matrice G_z est calculée à l'aide de l'équation de Haaz (1953) et ensuite, cette matrice est multipliée par un vecteur contenant toutes les densités des prismes. Les coordonnées des densités sont centrées dans les prismes pour faciliter le calcul.

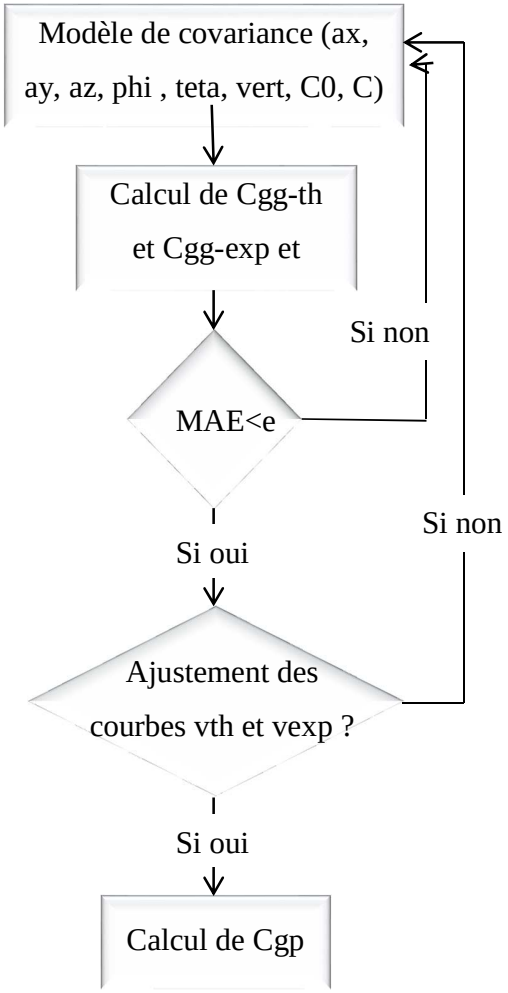
3.3.3 Inversion stochastique

L'inversion stochastique géostatistique comprend plusieurs avantages. Contrairement à l'approche de Li et Oldenburg (1998), ce type d'inversion n'est pas itératif. Seul le choix du modèle de covariance est itératif, mais une fois le modèle choisi, l'inversion est directe. Aussi, le modèle de covariance ne change pas si des contraintes sont ajoutées et ne change que très peu lorsque d'autres données gravimétriques en forage sont ajoutées. Aussi, cette méthode reproduit exactement les données gravimétriques mesurées en l'absence de bruit. Les contraintes sont aussi très faciles à ajouter (équations 2.34 à 2.40).

Du côté programmation, c'est une méthode qui est facile à écrire en forme matricielle, alors les logiciels Matlab et Python peuvent être utilisés pour programmer le code. Python est un langage de

programmation qui est disponible gratuitement et qui est constamment amélioré. Cependant, comme tout gratuiciel (*freeware*), il est recommandé de ne pas utiliser la version la plus récente, mais celle précédente.

Voici l'algorithme à suivre pour une inversion stochastique :



3.3.3.1 Modèle de covariance; Graphique V-V (V-V plot)

Le modèle de covariance est utilisé pour calculer la matrice de covariance théorique des densités, $C_{\rho\rho\text{-th}}$. Plusieurs méthodes existent pour choisir ce modèle. Shamsipour et al. (2010) proposent une minimisation par méthode simplex utilisant l'algorithme Nelder-Mead. La méthode d'essai et erreur peut aussi être utilisée, mais peut être très coûteuse en temps. Il faut aussi noter que le modèle de covariance peut aussi être choisi en comparant graphiquement les courbes des vecteurs de covariance en fonction de N_{div}.

La minimisation par méthode simplex peut produire des minimums locaux. Cela signifie que le modèle trouvé n'est pas nécessairement le meilleur. Aussi, il peut être très long d'utiliser cette méthode de minimisation si la matrice $C_{\rho\rho}$ est lourde, et dans le cas de la gravimétrie, cela est très fréquent. Pour éviter ce problème, il est recommandé de suivre ces quelques étapes pour bien calculer le modèle de covariance. Il est à noter que cette méthode n'est pas une recette miracle et peut prendre autant de temps que la minimisation. Cependant, elle permettra de comparer plusieurs minimums locaux et les résultats obtenus à l'aide de ces modèles.

Premièrement, il est recommandé que les portées et les angles de directions initiales représentent la géologie encaissante. Ces paramètres vont surtout affecter la forme des structures calculées lors de l'inversion. Par exemple, si les couches stratigraphiques ont une direction vers le nord et un pendage de 45°, il est recommandé que la portée en x soit petite, les portées en y et z plus grandes, l'angle de direction phi soit de 45° et thêta et verticale soit égales à 0°.

Ensuite, le modèle de variogramme est choisi. Pour la gravimétrie, trois modèles sont recommandés : le modèle sphérique, le modèle Cauchy b=0.5 et le modèle gaussien. Il est recommandé de commencer par choisir un modèle sphérique. La covariance dépend du nombre de données gravimétriques. Cependant, la covariance et l'effet de pépite affecte très peu les résultats des inversions. Ensuite, les données sont inversées à l'aide de ce premier modèle de covariance et les valeurs de densité observées sont notées. Si ces valeurs sont réalistes, les courbes v_{th} et v_{exp} sont comparées. Sinon, il faut recommencer l'inversion en utilisant un modèle de variogramme différent. Les courbes des vecteurs de covariance devraient se superposer. Si les valeurs de la courbe v_{th} sont beaucoup plus grandes que la courbe v_{exp}, C devra être diminué et vice versa.

Une fois que les courbes des vecteurs de covariance prédite et expérimentale sont ajustées de manière satisfaisante, les portées peuvent être modifiées pour diminuer le MAE et/ou la forme des structures observées. Ce dernier ajustement peut être très utile si la ou les structures recherchées sont bien connues et que le tonnage veut être calculé.

3.3.3.2 Calcul de l'excès de masse

À moins de connaître la densité moyenne du gisement et de la roche encaissante, le tonnage ne peut être calculé, puisque les inversions calculent des contrastes de densité et non la densité absolue. Cependant, l'excès de masse peut être calculé. Puisqu'une densité est calculée pour chaque prisme,

l'excès de masse est calculé en additionnant la masse de primes ayant une densité plus élevée qu'un certain seuil.

$$M_{\rho lim} = \sum_{\rho_i \geq \rho lim} (\rho_i - \rho_{\min}) * V_i \qquad (3.1)$$

Où $M_{\rho lim}$ est l'excès de masse pour une certaine densité limite, ρ_{lim}, ρ_i est la densité du prisme i, ρ_{min} est la densité minimum calculée et V_i est le volume du prisme i

La limite de densité est choisie de manière ad hoc. Il est recommandé d'utiliser une limite de densité relativement petite lorsqu'aucune contrainte n'est utilisée à cause de l'effet de lissage. En plus, lorsqu'aucune contrainte n'est utilisée, les contrastes de densité calculés tendent à être sous-estimés comme il sera constaté dans les résultats présentés au chapitre 4. Pour ce projet, les limites de densité ont été choisies d'après deux critères : la forme des structures observées et les excès de masse calculés.

Puisque cette méthode dépend du choix de la limite de densité et résulte en général en un excès de masse sous-estimé, une autre méthode peut être utilisée pour comparer les réponses. Cette méthode ne dépend pas des résultats des inversions, mais seulement de la réponse mesurée. Si une masse quelconque, M, cause une variation d'attraction gravitationnelle, Δg, il est possible en appliquant le théorème de Gauss de démontrer le résultat suivant (Blakely, 1996):

$$\Delta M = \frac{1}{2\pi G} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta g_z dxdy \qquad (3.2)$$

Où ΔM est l'excès de masse, G est la constante gravitationnelle et Δg_z est la réponse gravimétrique mesurée sur la toute la surface.

Cette méthode a deux limites. La première étant que les données doivent être mesurées sur une surface plane. En forage, ceci n'est pas possible, alors il faudrait que les données soient acquises en surface. Deuxièmement, si d'autres structures que celle recherchée sont mesurées, ils sont aussi comprises dans le calcul d'excès de masse. Pour calculer la masse du gisement seulement, il faut être capable d'isoler la réponse de celle-ci en soustrayant la réponse de la géologie encaissante et celle de la structure régionale.

3.3.4 Problème de la régionale

Pour bien analyser l'effet de la régionale, le modèle géologique synthétique doit être altéré quelque peu. Il suffit d'ajouter une structure régionale. Si le volume du modèle de densité présenté à la section 3.2.1 est considéré comme étant le volume local, une régionale peut être produite par une structure importante, de densité différente, ajoutée autour et sous le modèle initial. Cette nouvelle région sera appelée le volume régional.

Dans le cas de l'Abitibi ou du Bouclier Canadien, il est présumé que la régionale est due aux formations situées en profondeur. Le volume régional a été ajouté sous le modèle simple d'un gisement dans une roche encaissante uniforme. La structure régionale s'étend en profondeur de 1300m à 2000m et est séparée en trois couches de densités différentes ayant des densités de 3.0, 3.3 et 3.6 g/cm^3 respectivement (figure 3.3). Les densités et les volumes utilisés ont permis de calculer une réponse régionale adéquate. C'est ce modèle de densité qui représentait le mieux une réponse régionale typique de l'Abitibi ou du Bouclier Canadien. Les prismes ont une dimension de 100 x 100 x 100 m. Un maillage plus grossier est utilisé puisque la précision n'est pas essentielle. Ainsi, la quantité de mémoire requise est limitée et les calculs sont plus rapides.

Une fois les nouvelles données gravimétriques calculées, quelques méthodes déjà discutées dans la section 2.4 seront utilisées pour traiter les données. Le gradient a pour avantage d'être facile à appliquer dans un cas en forage. Cependant, il a une moins grande portée. Le gradient vertical décroit comme $1/r^3$, contrairement à la réponse gravimétrique qui décroit comme $1/r^2$ où r est la distance entre l'observateur et la structure étudiée. Les gradients verticaux sont calculés à l'aide de l'équation 2.41. Le Δz utilisé est la distance verticale entre chaque lecture. Puisque les forages ont un pendage et que les données ont une certaine distance horizontale, les gradients verticaux calculés ne sont pas exacts. Cependant, cette erreur n'est pas significative et n'affectera pas suffisamment les résultats.

La méthode des filtres non-linéaires est, en théorie, très semblable à celle graphique, puisque ce filtre est géométrique. Il ne requiert aucune information *a priori*, à l'exception de la largeur de l'anomalie à soustraire. Aussi, il est très facilement applicable au cas en forage. Le filtre Naudy élimine les anomalies de courte longueur d'onde à l'aide de deux paramètres : la largeur de l'anomalie et une tolérance (mGal). La largeur de l'anomalie n'a pas d'unité puisque le filtre est 1D et ne dépend que

du nombre de points. Le logiciel Oasis Montaj peut être utilisé pour calculer ce filtre à l'aide de la fonction *non-linear filter* dans l'onglet *Database Tools*.

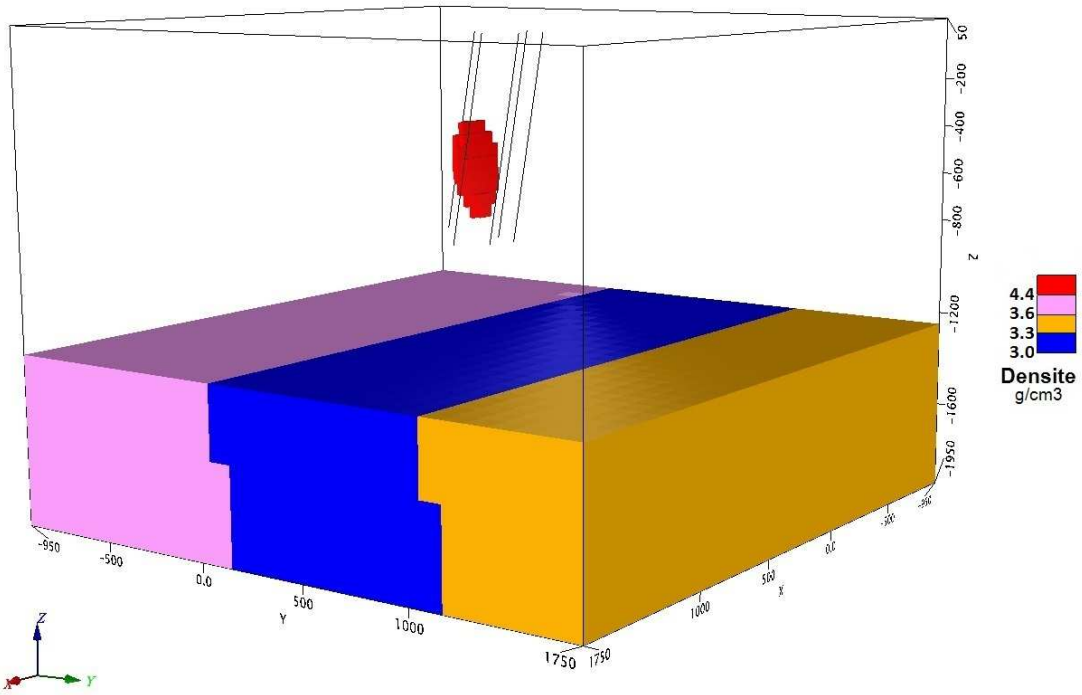


Figure 3.3 : Modèle de densité avec régionale. La région vide a une densité de 2.7 g/cm^3.

Un autre filtre intéressant est l'utilisation d'ondelettes. Pour le calcul de ce filtre, la fonction *wavelet menu* du logiciel MATLAB a été utilisée. Ce *toolbox* permet de décomposer des signaux à l'aide de différentes ondelettes. Différentes ondelettes peuvent être utilisées comme les ondelettes de Haar, de Daubechies (db), les coiflets (coif) et les bi-orthogonales (bior). D'autres ondelettes existent, mais celles utilisées dans ce travail ont été testées et donnent les meilleurs résultats. Aussi, puisque les ondelettes sont décomposées en plusieurs signaux de basse résolution, différents niveaux peuvent être utilisés. Ces niveaux dépendent du nombre de données. En théorie, le niveau le plus élevé devrait être le mieux adapté pour la réponse régionale, parce que c'est le signal qui a la longueur d'onde la plus longue. Cependant, il a été observé que ce n'est pas toujours le cas et différents niveaux peuvent être utilisés.

L'inversion en deux temps de Li et Oldenburg (1998) comporte plusieurs désavantages. Puisqu'elle requiert deux inversions, cette méthode demande beaucoup de temps de calcul et de mémoire vive. Aussi, il faut choisir un volume local après la première inversion et cette étape est très arbitraire.

Lorsque la géologie de la région est bien connue, cette méthode peut être intéressante, mais sinon elle est longue et demande beaucoup d'informations *a priori*.

Pour ce projet de maitrise, trois méthodes seront analysées, soit les méthodes du gradient, du filtre non-linéaire et des ondelettes.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS DES INVERSIONS SUR LES MODÈLES SYNTHÉTIQUES

Dans ce chapitre, les résultats des modélisations et des inversions des modèles synthétiques seront présentés en quatre sections. La première section portera sur le modèle simple d'un gisement dans une formation encaissante de densité homogène. La deuxième section abordera brièvement un modèle d'une géologie encaissante sans gisement. Ensuite, les résultats pour le modèle d'un gisement dans une géologie plus complexe seront présentés. Finalement, les résultats où une régionale a été ajoutée seront abordés. Pour chaque section, les données gravimétriques modélisées et traitées et les modèles de covariance utilisés seront présentés. Aussi pour chaque modèle, deux scénarios seront analysés. Le premier étant le cas où la gravimétrie en forage est utilisée pour détecter un gisement et l'autre est pour caractériser un gisement. Lors de la caractérisation, le tonnage et la forme du gisement veulent être déterminés.

4.1 Modèle d'un gisement dans une matrice homogène

Le premier modèle synthétique modélisé et inversé est celui d'un gisement dans une formation géologique de densité homogène (figure 4.1). Ce modèle permettra d'analyser un cas simple d'un gisement et confirmer que la gravimétrie en forage est capable de détecter et caractériser un gisement. En plus, les résultats obtenus avec ce modèle seront comparés aux résultats des inversions des gradients verticaux et des données traités à l'aide des filtres non-linéaire et par ondelettes.

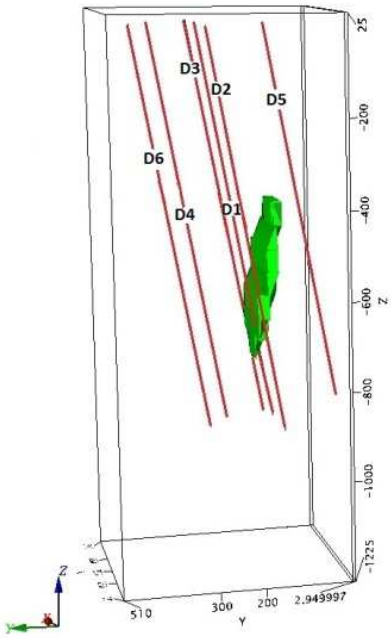


Figure 4.1 : Modèle d'un gisement (4.4 g/cm^3) dans une géologie encaissante de densité homogène (2.7 g/cm^3). Les forages, représentés en rouge, ont tous une direction de N180° et une inclinaison de 80°

4.1.1 Données gravimétriques modélisées

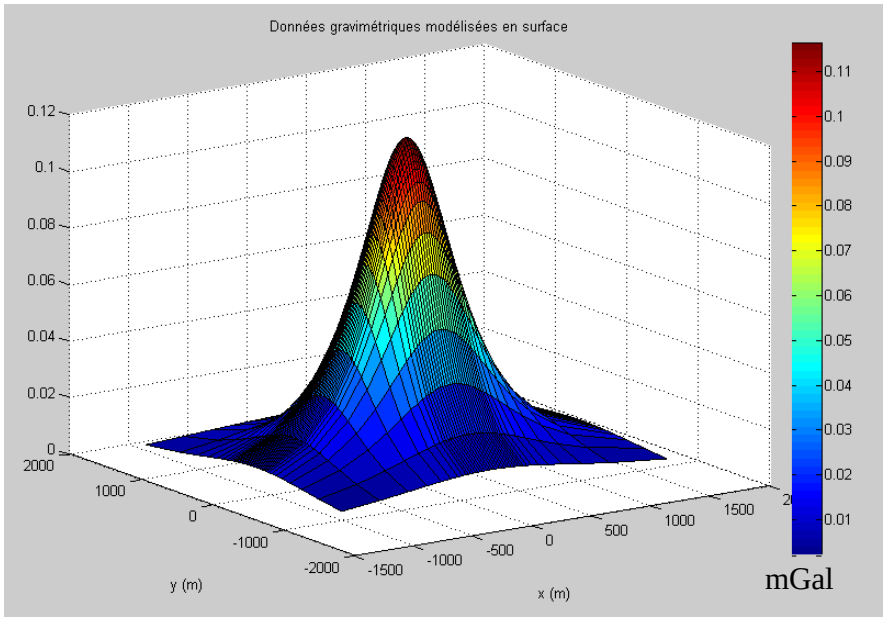


Figure 4.2: Réponse gravimétrique en surface causée par le modèle de la figure 4.1

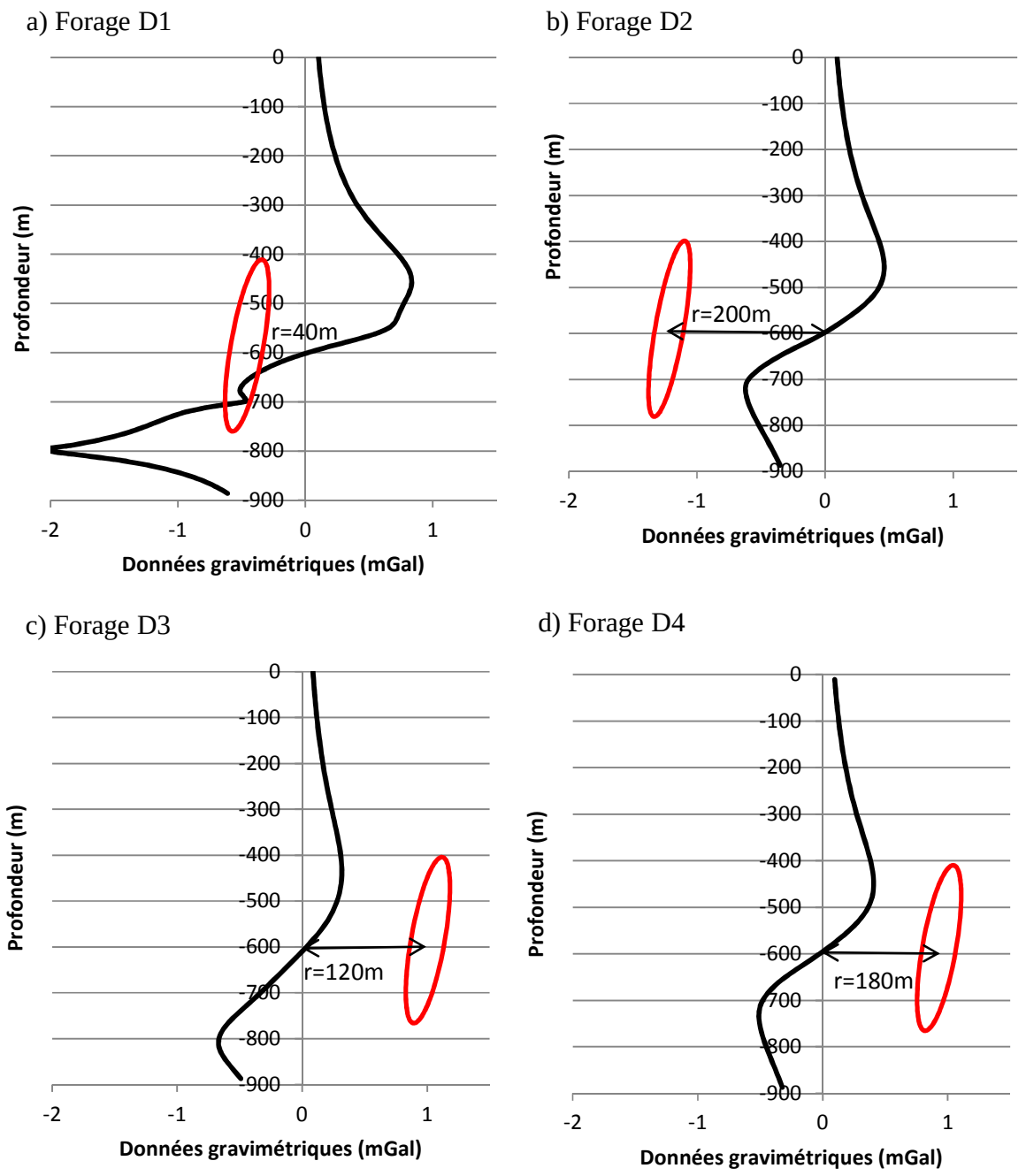


Figure 4.3 : Données gravimétriques en forage. Le gisement est représenté de façon schématique en rouge et r sont les distances entre les forages et le centre du gisement. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D1 interceptant le gisement, b) Forage D2 situé à l'est du gisement, c) Forage D3 est situé à l'ouest du gisement, d) Forage D4 est situé au nord du gisement

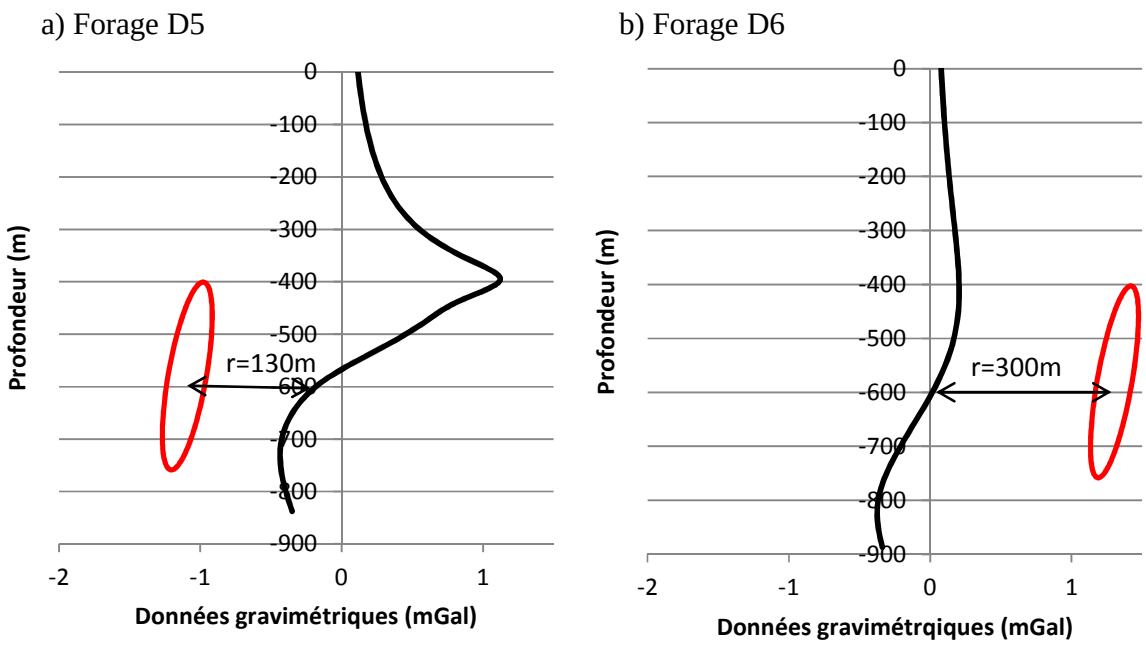


Figure 4.4 : Données gravimétriques en forage. Le gisement est représenté de façon schématique en rouge et r sont les distances entre les forages et le centre du gisement. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D5 est situé au sud du gisement, b) Forage D6 est situé au nord du gisement

Sur les données de surface, la réponse due au gisement est bien visible (figure 4.2). La valeur gravimétrique maximale de 0.11 mGal est située à la verticale du gisement. Sur cette réponse, il n'y a aucune indication du pendage. Le choix d'une zone tampon autour du domaine d'inversion a été fait pour s'assurer d'observer le plus possible cette réponse positive et pour éviter les effets de bord. La réponse typique d'une structure sphérique située près d'un forage vertical a une forme antisymétrique ayant des amplitudes équivalentes de chaque côté de l'axe z. Dans notre cas, puisque les forages ont une inclinaison ainsi que le gisement, les réponses calculées ont une forme asymétrique, avec des amplitudes non égales de part et d'autre du centre de la lentille (figures 4.3 et 4.4). Le forage D1 est le seul qui intercepte le gisement et une petite variation rapide peut être observée à 700m de profondeur où le forage intercepte la structure. Sur le forage D5, la courbe est un peu différente puisque le forage passe juste au-dessus du gisement.

4.1.2 Détection du gisement : Résultats des inversions

Les paramètres des modèles de covariance utilisés lors de l'inversion des données sont présentés dans le tableau 4.2. La méthode décrite à la section 3.3.3.1 a été utilisée pour calculer ces paramètres. Le modèle initial utilisé est présenté dans le tableau 4.1. Ce modèle a été choisi en supposant que certaines informations étaient connues à propos du gisement.

Tableau 4.1 : Modèle de covariance initial (Ax, Ay, Az : portée cartésienne; angles ϕ, θ, verticale (vert.) : angles de direction; C0 : effet de pépite; C : covariance)

Modèle de variogramme	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(kg/m^3)^2$	C $(kg/m^3)^2$
Sphérique	200	20	500	-10	0	0	0.1	10000

Tableau 4.2 : Modèles de covariance (var.: variogramme, sphér.: sphérique, MAE : erreur moyenne absolue, R : corrélation de Pearson)

Forages	Modèle de var.	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	φ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(kg/m^3)^2$	C $(kg/m^3)^2$	MAE (kg/m^3)	R
D2, D3,D4	Sphér.	200	40	450	-10	0	0	0.1	60000	0.0349	0.95
D2,D3,D 4,D5	Sphér.	200	40	450	-10	0	0	0.1	70000	0.0406	0.94
D2,D3,D 4,D6	Sphér.	200	40	450	-10	0	0	0.1	50000	0.0279	0.95

Lorsque seulement les forages D2, D3 et D4 sont utilisés (figure 4.5), il est possible d'observer une structure dense située près du gisement et quelques structures de faibles contrastes de densité situées au nord du gisement. Aussi, les contrastes de densité calculés sont beaucoup plus petits que ceux du modèle initial. Une structure présentant un contraste de densité négatif peut être observée sous le gisement. Il est difficile de dire si elle est un artéfact de l'inversion ou elle correspond à une réponse présente dans les données. Puisque les forages ne dépassent pas de beaucoup le gisement, il se pourrait que cette structure soit causée par la troncation de l'anomalie gravimétrique observée au bas du forage. Lorsque des forages plus longs sont utilisés (Figure 4.56), une structure de densité

négative est encore observée. Toutefois, elle est de dimension plus petite et ses contrastes sont plus près de zéro (entre -0,06 et 0).

Lorsque le forage D6 est ajouté au nord du gisement (figure 4.7), la structure causée par le gisement est plus grande, mais les contrastes de densités maximales calculés sont très semblables à ceux calculés à l'aide de trois forages. Les structures de faibles contrastes de densité situées au nord du gisement sont créées par les forages D4 et D6. À cause de l'effet de lissage, les anomalies observées sur ces forages ne sont pas concentrées près du gisement. À la place, l'inversion génère de petites structures de faible contraste de densité autour des forages D4 et D6.

Comme pour le cas à trois forages, la même structure de contrastes de densité négatifs peut être observée sous le gisement. Cependant, celle-ci est plus difficilement observée lorsque le forage D5 est ajouté au sud du gisement (figure 4.8) pour que les forages entourent celui-ci. Des contrastes de densité négatifs sont encore observés, mais ils sont plus élevés et plus répartis. Le modèle est beaucoup plus près de celui initial avec une forme qui se rapproche d'un disque plat et des contrastes de densité calculés plus réalistes.

En ajoutant les données de surface, les résultats obtenus ne diffèrent pas beaucoup des inversions sans les données de surface. Nous avons voulu utiliser un pas d'échantillonnage plus grand (passant de 10 à 20m) pour vérifier son influence sur la reconstruction du modèle (figure 4.9). Il est encore possible d'observer une structure dans le voisinage du gisement initial. Cependant, la structure semble avoir un volume beaucoup plus grand et les contrastes de densité calculés sont plus petits que ceux précédents. Ceci est dû à l'effet de lissage. Puisque moins d'information est fournie par les données gravimétriques, l'inversion lisse les contrastes de densité et créée une structure ayant un volume plus grand.

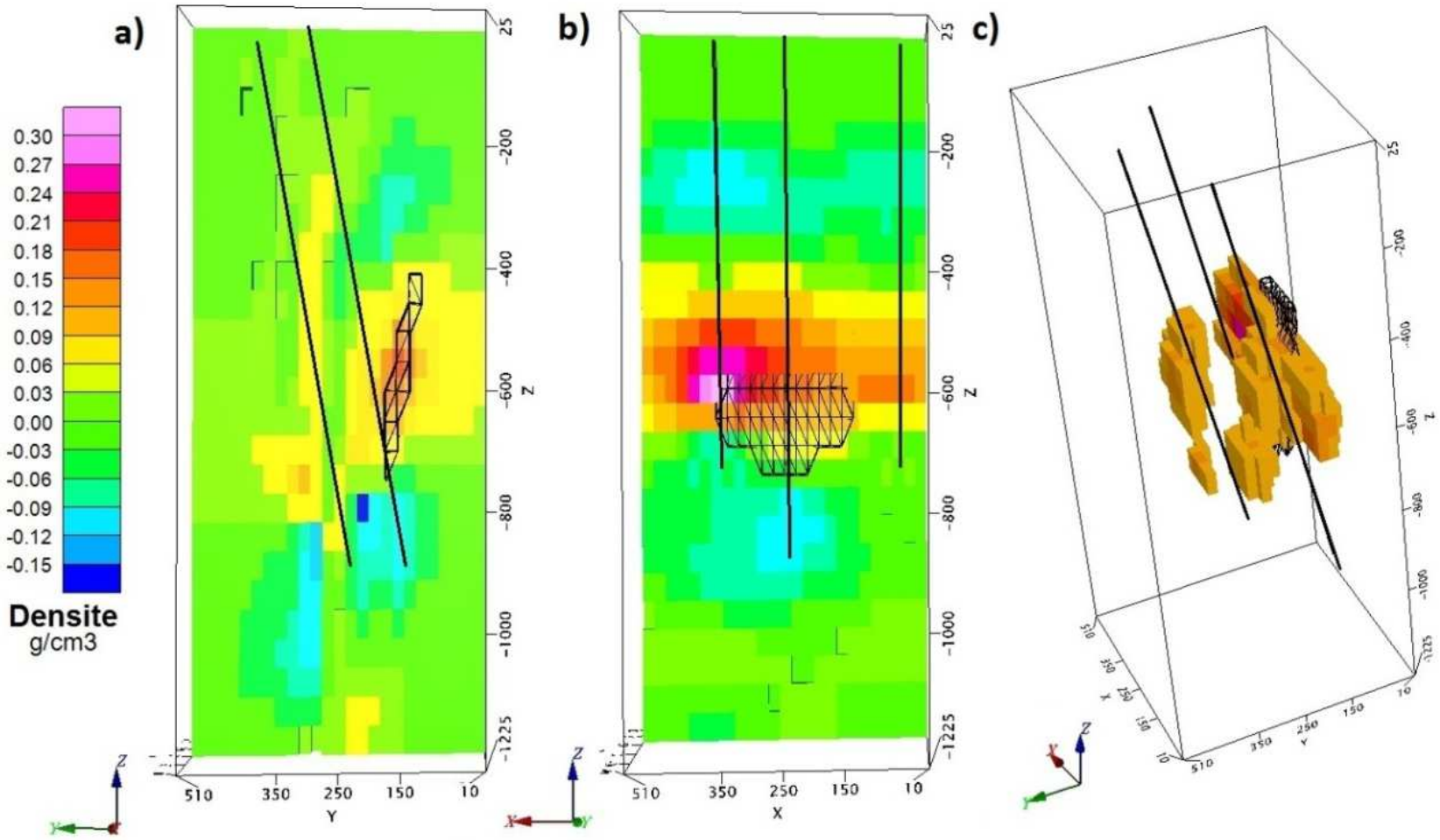


Figure 4.5 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3

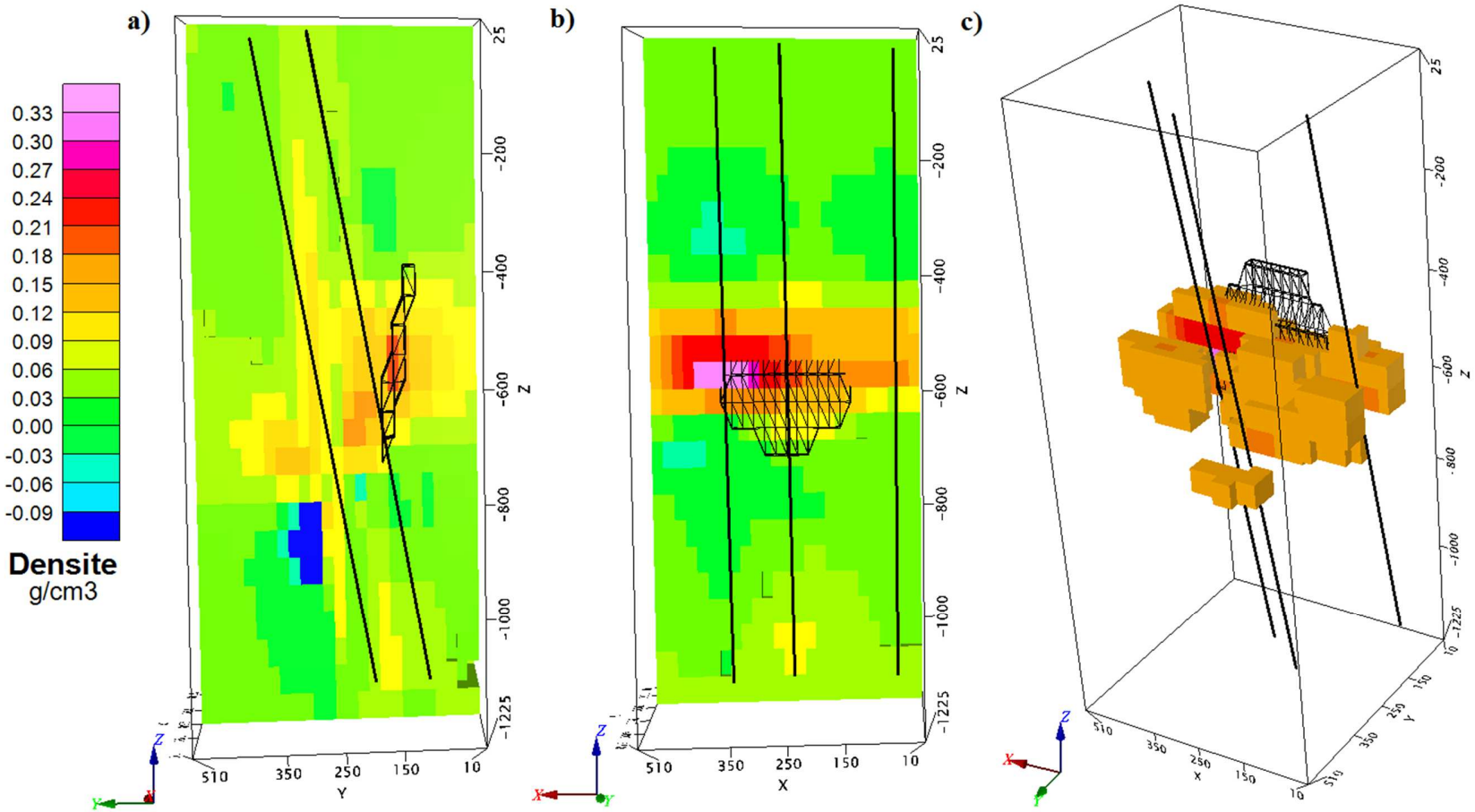


Figure 4.6 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire. Les forages sont en noir et plus long que ceux des inversions précédentes. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3

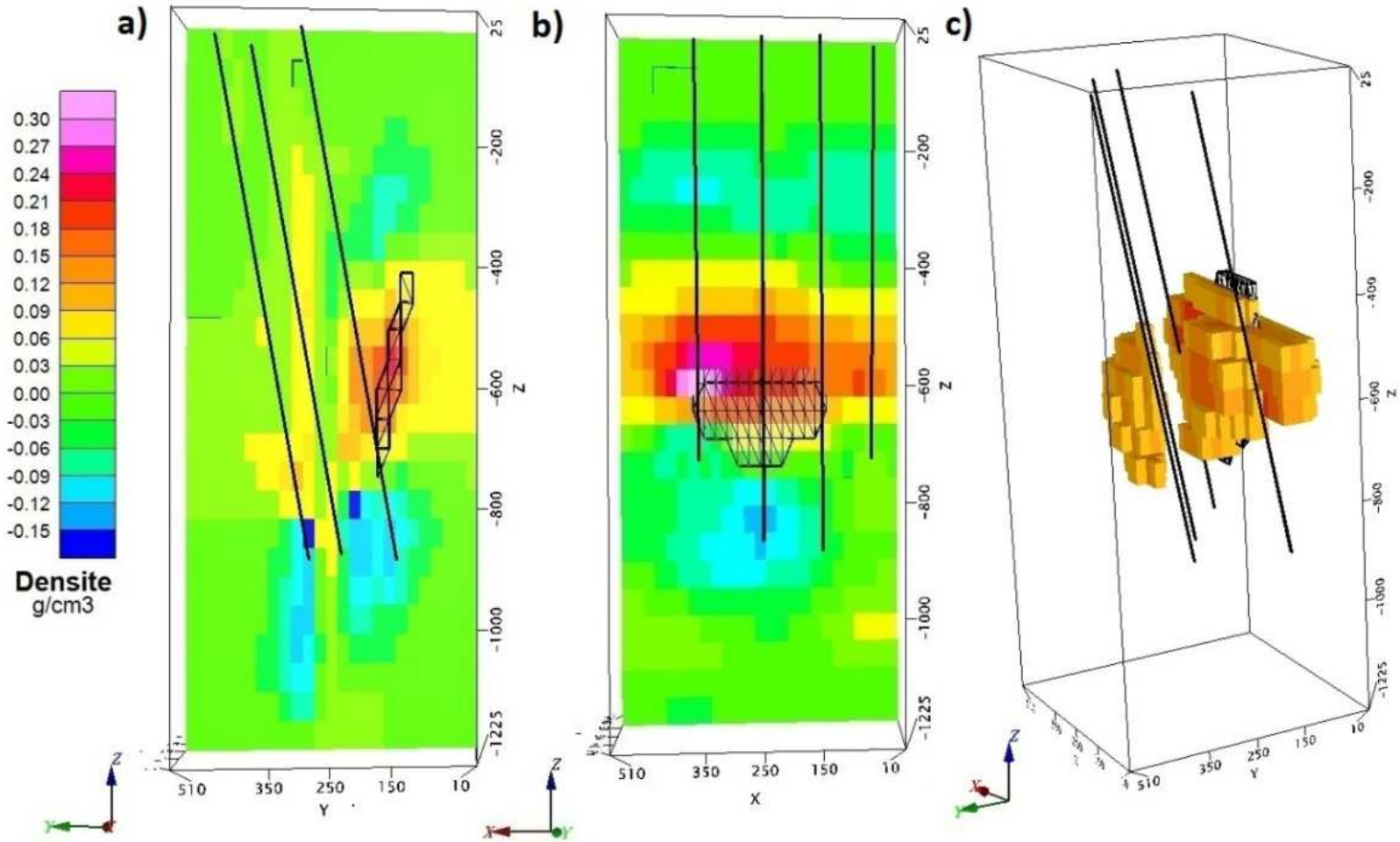


Figure 4.7 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, D4 et D6. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3

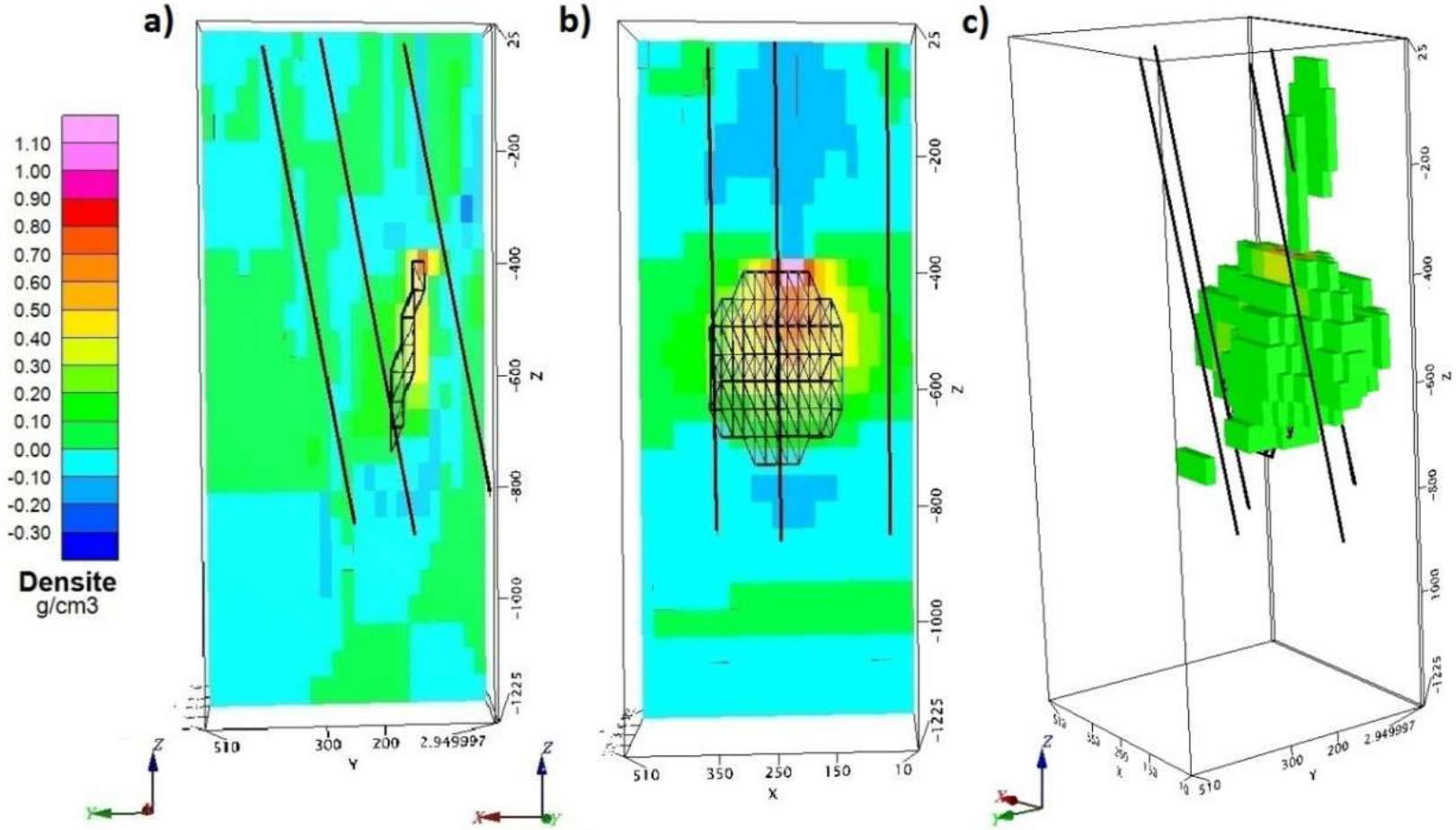


Figure 4.8 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, D4 et D5. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3

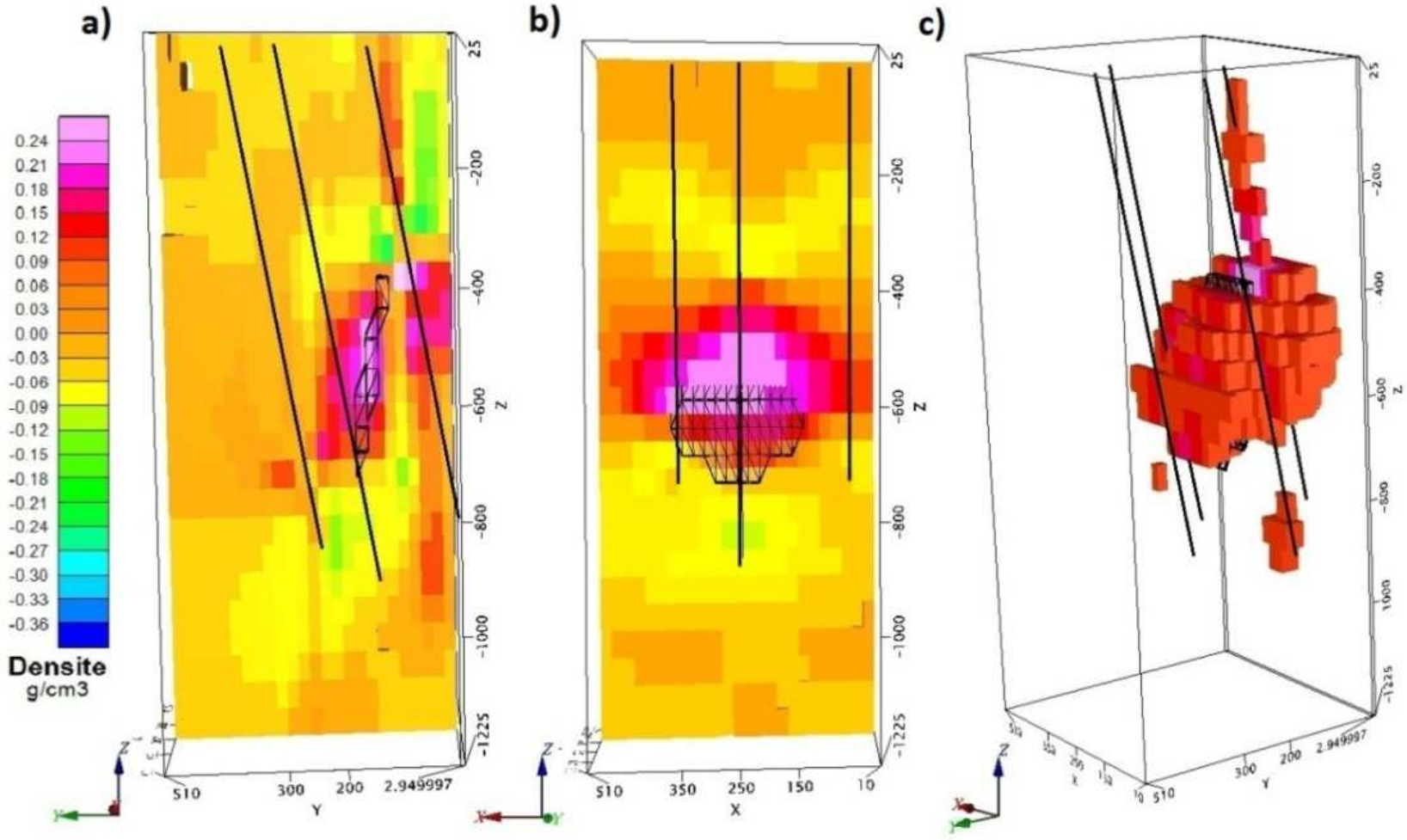


Figure 4.9 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, D4 et D5 à un intervalle de donnée de 20m. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=120m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3

4.1.3 Caractérisation d'un gisement : Résultats des inversions

Les paramètres des modèles de covariance utilisés lors de l'inversion des données sont présentés dans le tableau 4.3. La méthode décrite à la section 3.3.3.1 Modèle de covariance; Graphique V-V (V-V plot) a été utilisée pour calculer ces paramètres. Le modèle initial utilisé est le même que celui présenté au tableau 4.1.

Tableau 4.3 : Modèles de covariance (var.: variogramme, sphér.: sphérique)

Forages	Modèle de var.	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(kg/m^3)^2$	C $(kg/m^3)^2$	MAE $(kg/m^3)^2$	R
D1, D2, D3	Sphér.	200	40	450	-10	0	0	0.1	150000	0.0838	0.92
D1, D2, D3, D4	Sphér.	200	40	450	-10	0	0	0.1	90000	0.0631	0.93
D1, D2, D3, D4, D5	Sphér.	200	40	450	-10	0	0	0.1	11000	0.0647	0.94

Lorsque les trois forages, D1, D2 et D3 sont utilisés (figure 4.10), il est possible d'observer une structure de densité plus élevée située près du gisement. Toutefois, une structure de contrastes de densité négatifs peut être observée sous le gisement. Cette structure est très semblable à celles observées sur les résultats de la section précédente (figures 4.5 et 4.7). Lorsque des forages plus long sont utilisés (figure 4.12), cette structure augmente en volume. Toutefois, les contrastes de cette dernière structure sont plus près de zéro.

Une limite de densité de 0.3 g/cm^3 a été utilisée pour calculer les excès de masse. En utilisant la même limite, il est plus facile de comparer le volume, la forme et l'excès de masse des structures calculées par l'inversion. À cause de l'effet de lissage, si une limite de densité trop petite est utilisée, la forme du gisement ne sera pas bien représentée et l'excès de masse calculé sera surestimé. La limite de densité de 0.3 g/cm^3 a été choisie d'après la forme de la structure représentée et l'excès de masse calculé. La limite de densité choisie est un juste milieu. En utilisant la limite de densité 0.3 g/cm^3, tous les excès de masse calculés sont sous-estimés, même en utilisant cinq forages (D1, D2, D3, D4 et D5) bien positionnés. Cependant, le volume et le pendage sont bien retrouvés.

Des contraintes de densités fixes ont été ajoutées à chaque 10m le long des forages. Lorsque des contraintes de densités fixes sont ajoutées le long des forages, les contrastes de densité calculés sont plus près du modèle initial et la structure de contrastes de densité négatifs est plus difficilement observée (figure 4.13). En ajoutant les données de surface et des contraintes de densité fixe en surface à chaque 10m (figure 4.14), la forme de l'anomalie créée par le gisement ne change pas beaucoup, mais les contrastes de densité calculés sont un peu plus élevés. Ceci permet de calculer un excès de masse plus près de l'excès de masse réel de 5.8 Mt. Toutefois, les excès de masse demeurent un peu sous-estimés.

Tableau 4.4 : Excès de masse calculés pour les inversions d'un gisement (4.4 g/cm^3) dans une matrice homogène (2.7 g/cm^3)

Forages	Limite de densité (g/cm^3)	Contraintes – Données de surface	Excès de masse (Mt)
D1, D2, D3	0.3	Non – Non	2.5
D1, D2, D3, D4	0.3	Non – Non	2.9
D1, D2, D3, D4, D5	0.3	Non – Non	3.7
D1, D2, D3	0.3	Oui – Non	3.4
D1, D2, D3, D4	0.3	Oui – Non	3.7
D1, D2, D3, D4, D5	0.3	Oui – Non	4.3
D1, D2, D3	0.3	Oui – Oui	3.5
D1, D2, D3, D4	0.3	Oui – Oui	3.9
D1, D2, D3, D4, D5	0.3	Oui – Oui	4.7

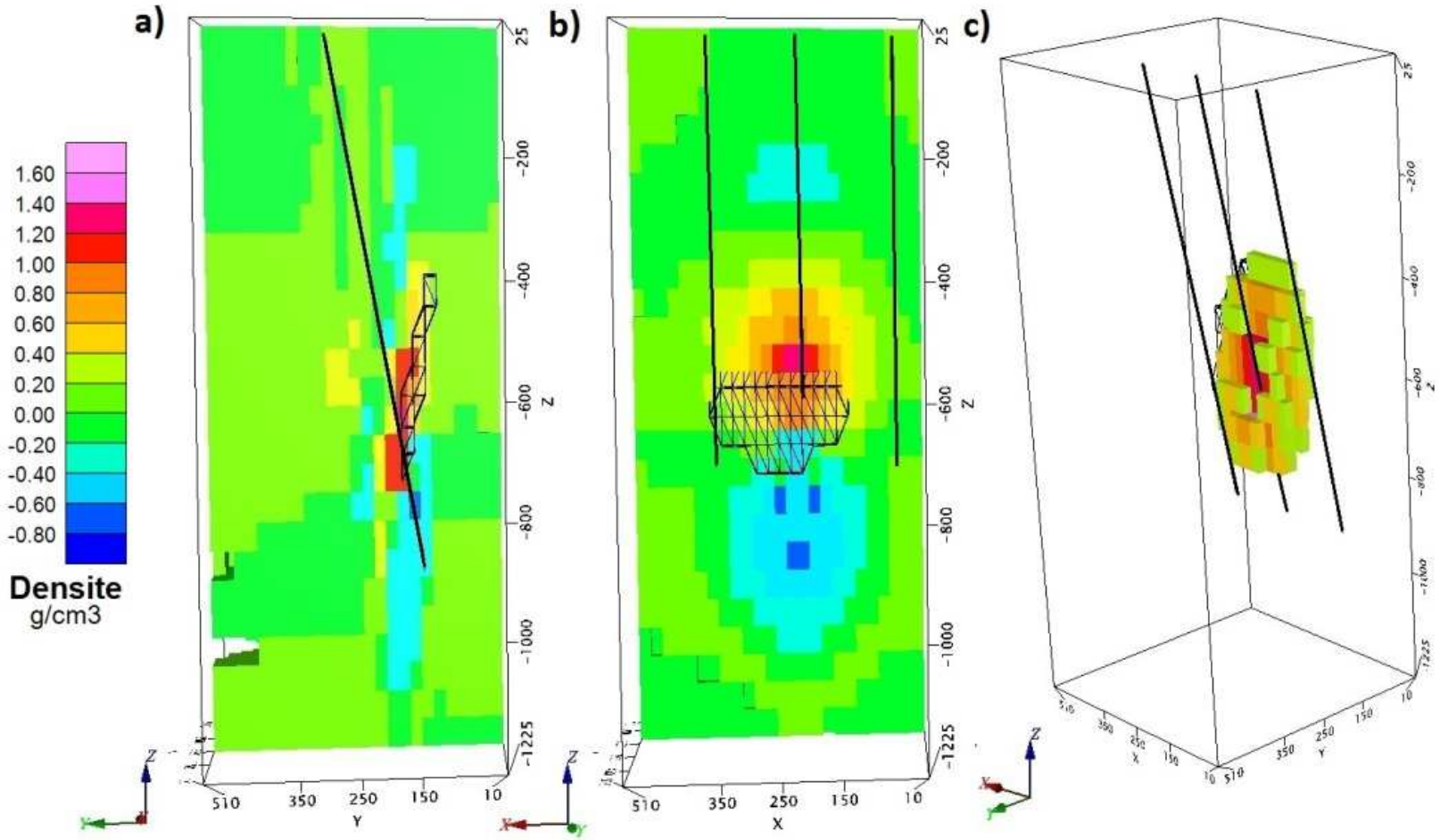


Figure 4.10 : Modèle de densité de l'inversion des données des forages D1, D2 et D3. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3. L'excès de masse estimé est de 2.5 Mt

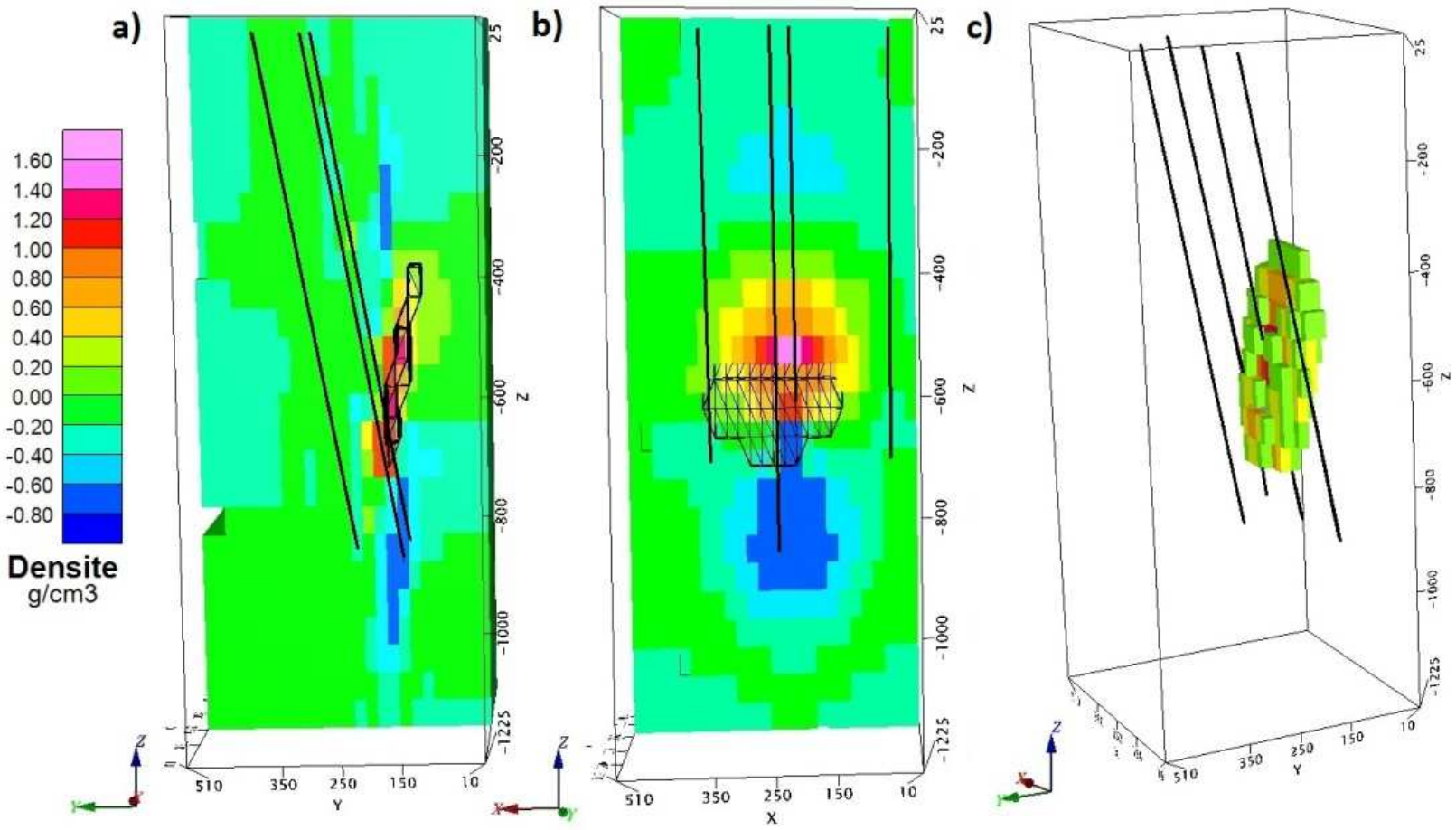


Figure 4.11 : Modèle de densité de l'inversion des données des forages D1, D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3. L'excès de masse estimé est de 2.9 Mt

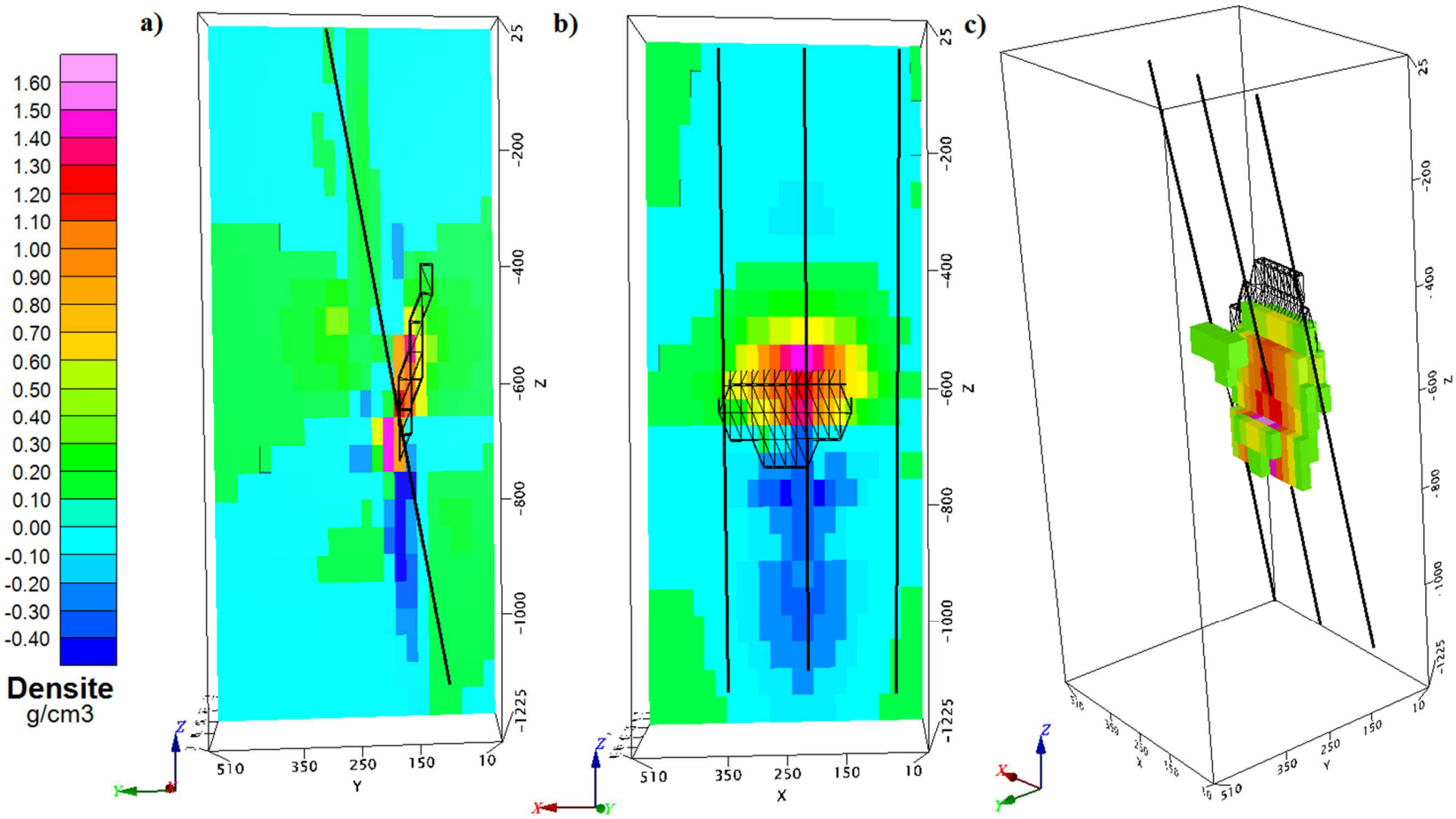


Figure 4.12 : Modèle de densité de l'inversion des données des forages D1, D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire. Les forages sont en noir et plus long que ceux précédents. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3

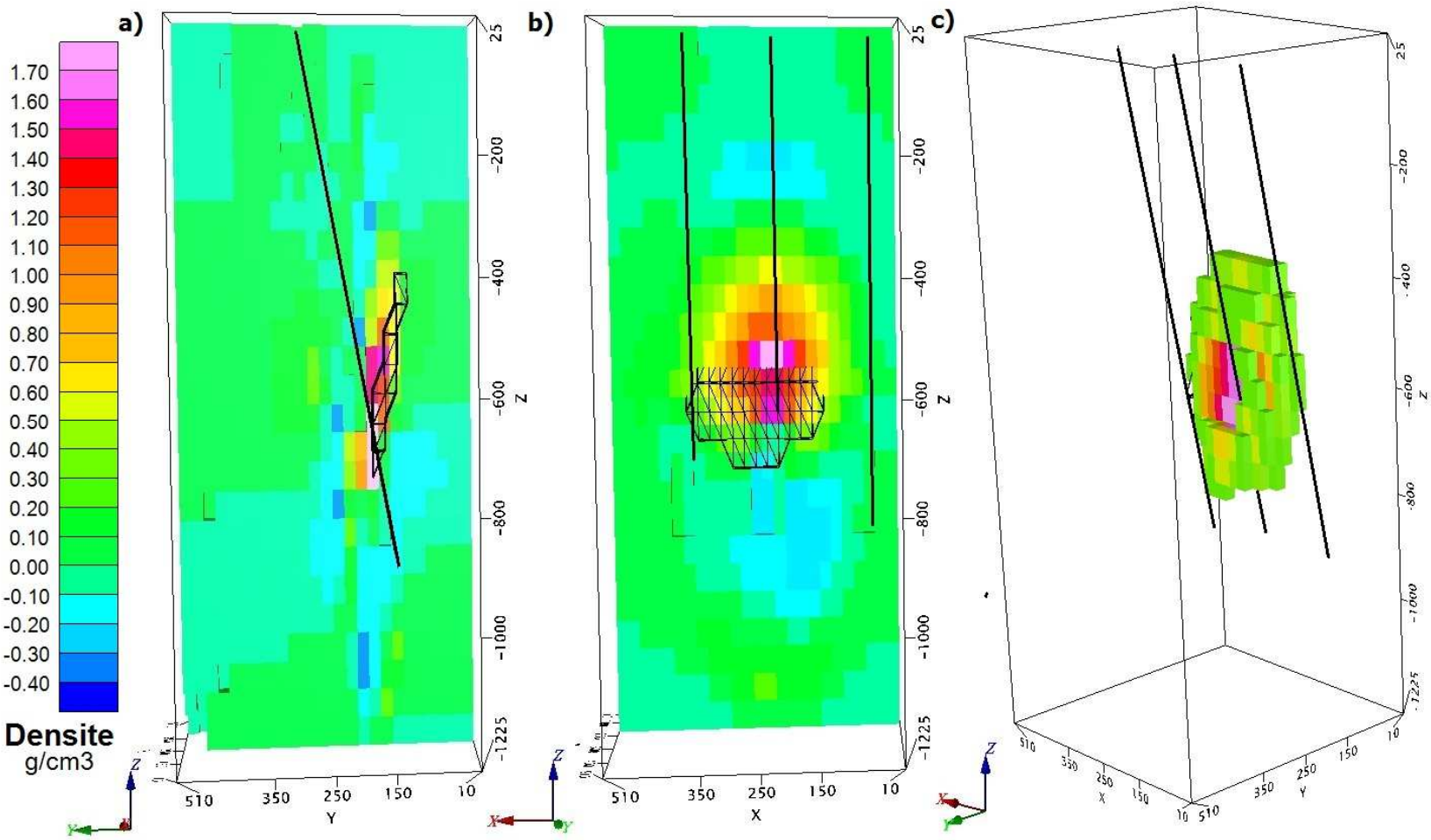


Figure 4.13 : Modèle de densité de l'inversion des données des forages D1, D2, D3 avec des contraintes le long des forages. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3. L'excès de masse estimé est de 3.4 Mt

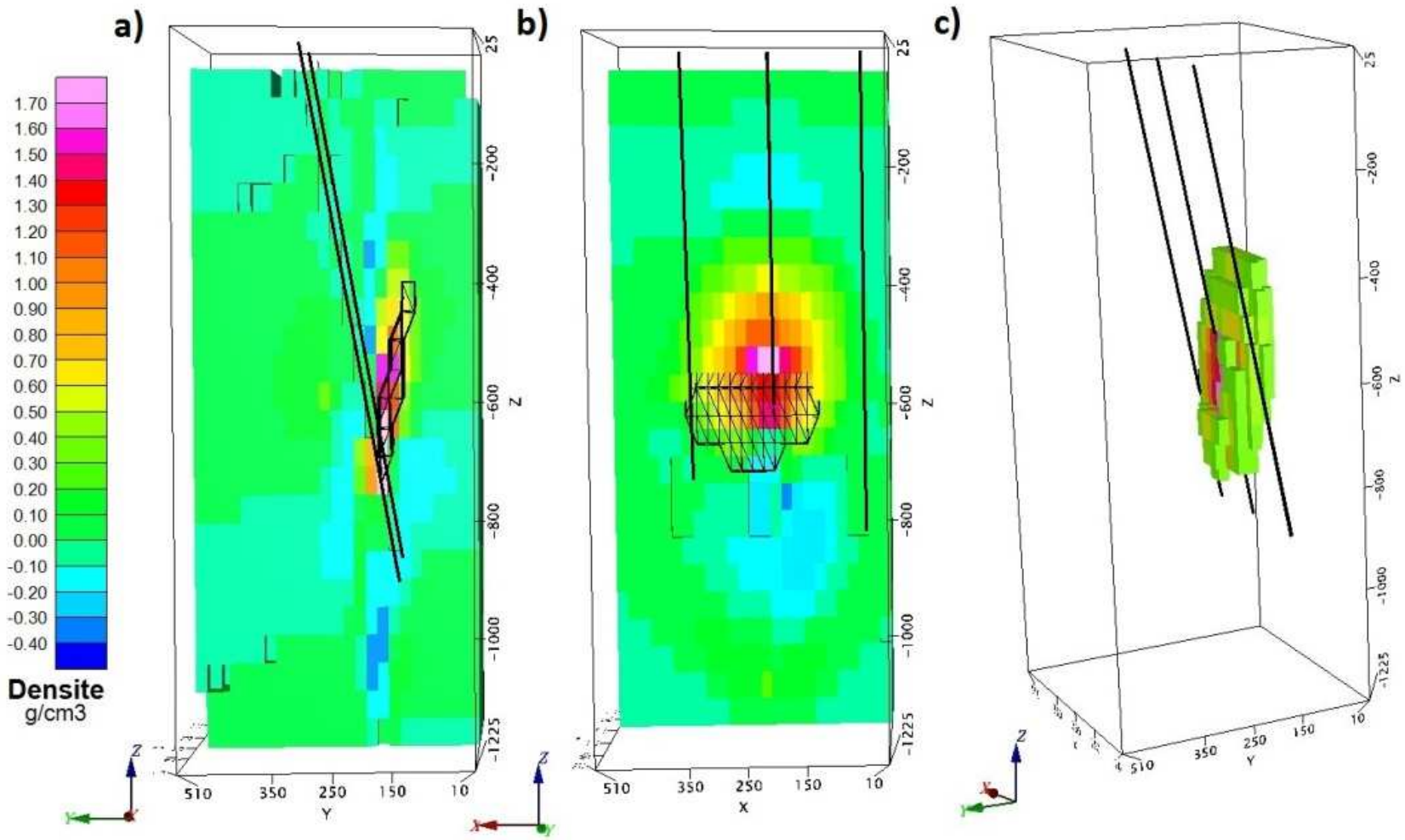


Figure 4.14 : Modèle de densité de l'inversion des forages D1, D2, D3, des données de surface et avec des contraintes. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3. L'excès de masse estimé est de 3.5Mt

4.2 Modèle d'une géologie encaissante complexe sans gisement

Avant d'entamer le modèle d'un gisement dans une géologie encaissante complexe, le modèle d'une géologie complexe sans gisement sera brièvement abordé (figure 4.15). Le but de cette section est de savoir si l'inversion est capable de bien retrouver différentes structures comme des dykes et des contacts entre deux formations.

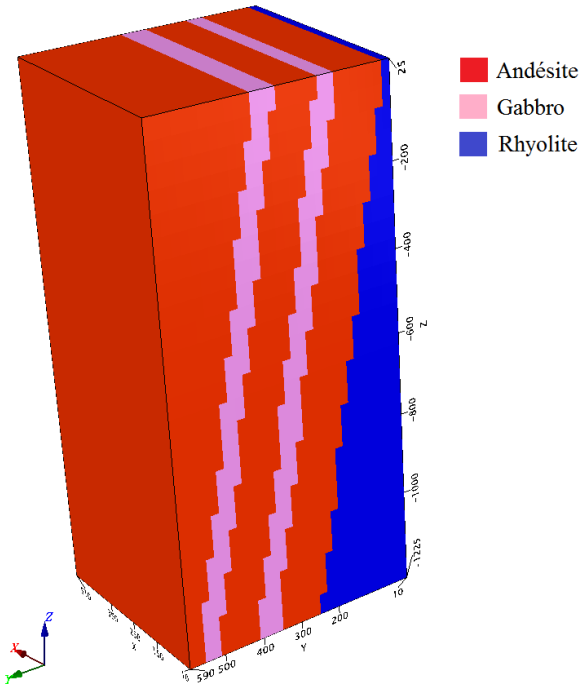
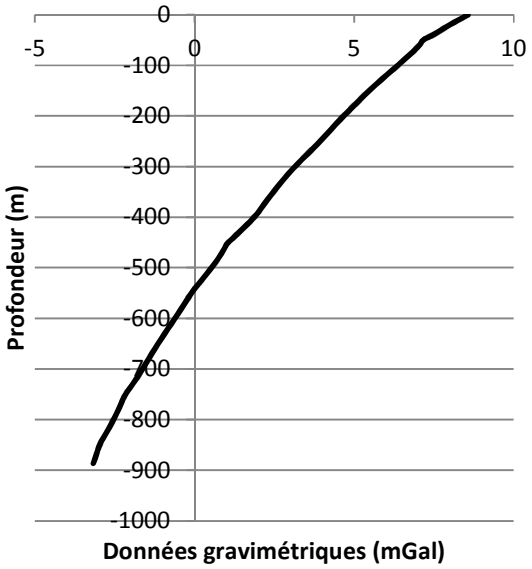


Figure 4.15 : Modèle de densité d'un gisement d'une géologie complexe

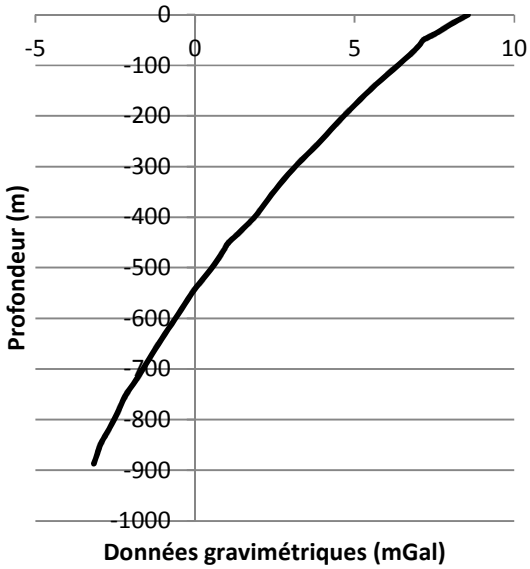
4.2.1 Données gravimétriques

Sur les données gravimétriques modélisées en forage, il est possible d'observer une réponse qui diminue en profondeur. Les réponses diminuent parce que les forages s'approchent de la couche de rhyolite qui est de densité plus faible que l'andésite. Il est aussi possible d'observer deux petites anomalies créées par les dykes aux profondeurs 50m et 450m.

a) Forage D1



b) Forage D2



c) Forage D3

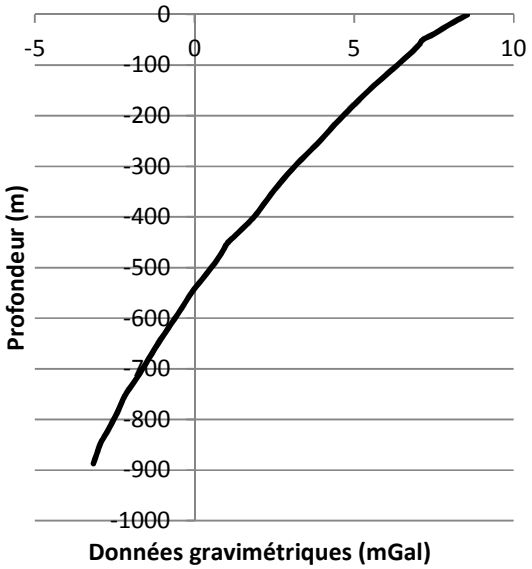


Figure 4.16 : Données gravimétriques en forage. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D1, b) Forage D2, c) Forage D3

4.2.2 Résultats d'inversion

Il est possible d'observer deux structures créées par les dykes avec seulement trois forages (figure 4.17). Cependant, les dykes ne sont pas observés en profondeur, parce que la portée de la gravimétrie en forage est trop faible pour déceler les dykes en entier. Cependant, il est possible d'observer les pendages des dykes où les contrastes de densité sont plus élevés. Le contact entre l'andésite et la rhyolite est bien observé où les forages l'intercepte comme dans le cas des dykes. Cependant, ce contact est plus difficilement observable en surface et en profondeur. Sur la figure 4.17b la section révèle l'intersection des forages avec le dyke inférieur de gabbro.

Si des contraintes de densités fixes sont ajoutées le long des forages, il est possible de bien observer deux structures distinctes ayant un pendage de 80°. Cependant, comme pour l'inversion précédente, ces structures ne sont pas observées en profondeur.

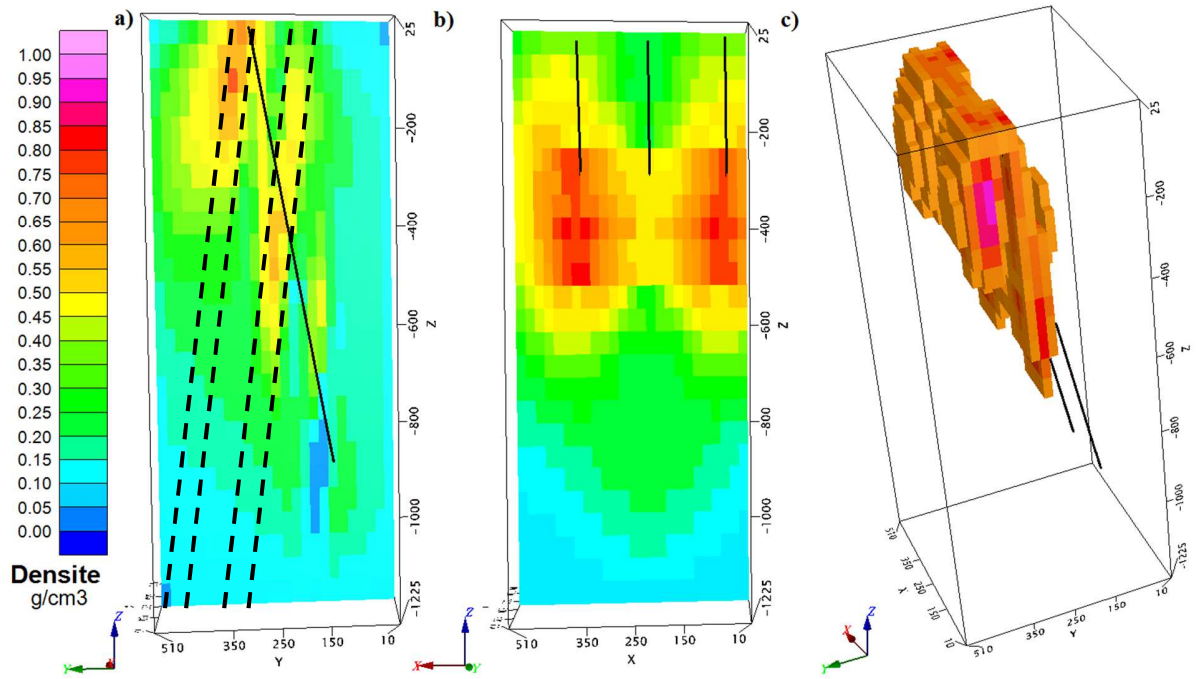


Figure 4.17 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, et D4. Les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=250m, c) Densités supérieures à ρ=0.6 g/cm^3

4.3 Modèle d'un gisement dans une géologie encaissante complexe

Une géologie encaissante plus complexe a été ajoutée pour analyser la performance de la gravimétrie en forage et de l'inversion dans une situation plus compliquée.

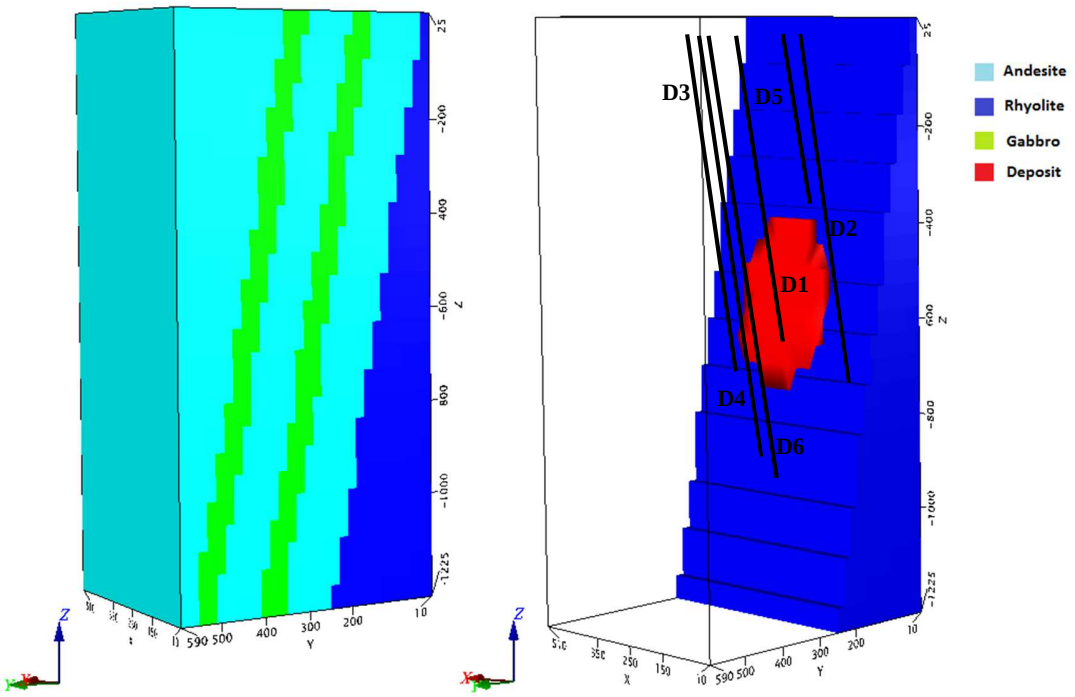


Figure 4.18 : Modèle de densité d'un gisement dans une géologie encaissante complexe

4.3.1 Données gravimétriques modélisées

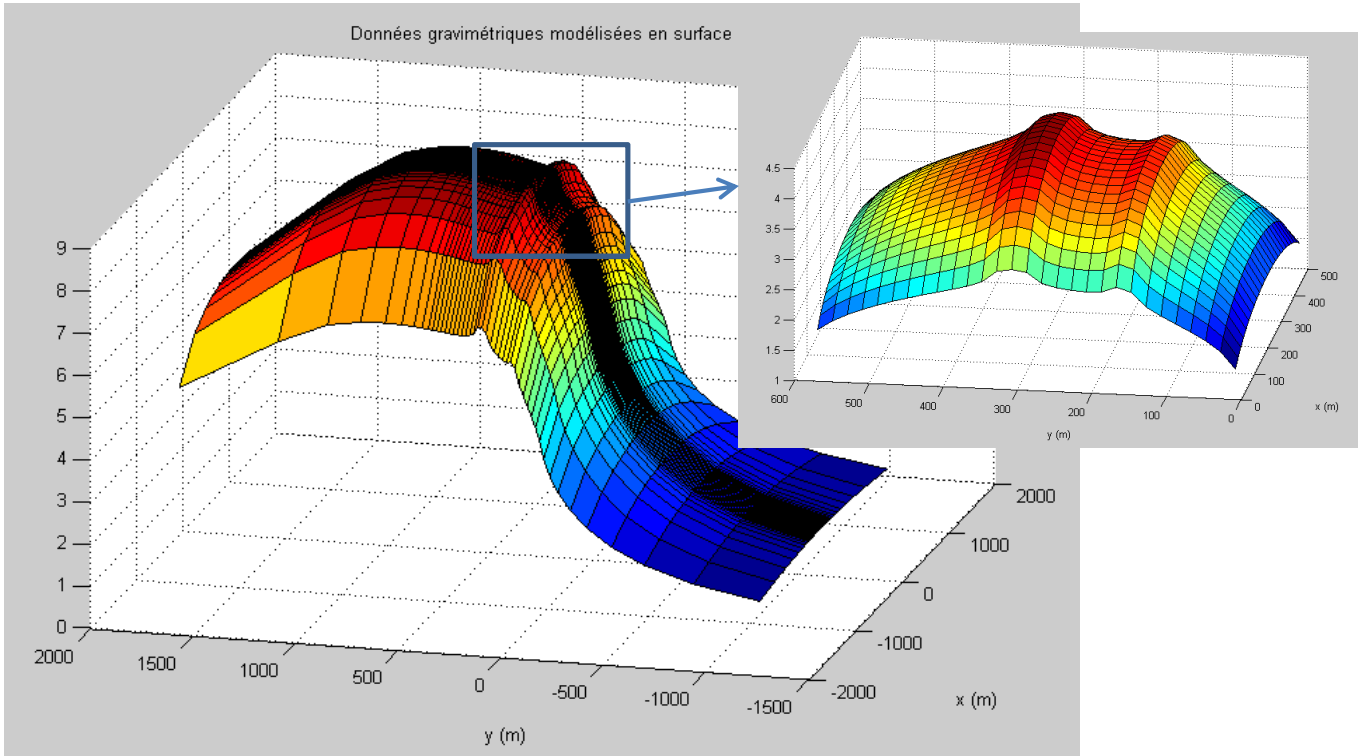


Figure 4.19 : Données gravimétriques en surface avec tampon aux limites du domaine. Les deux dykes affleurants créent deux anomalies bien visibles. La vue de droite est une vue agrandie de l'anomalie gravimétrique située directement au-dessus du gisement.

Sur les données gravimétriques en surface, deux anomalies créées par les dykes de gabbro peuvent être observées. Ces anomalies importantes combinées avec celles des formations d'andésite et de rhyolite masquent la réponse subtile du gisement.

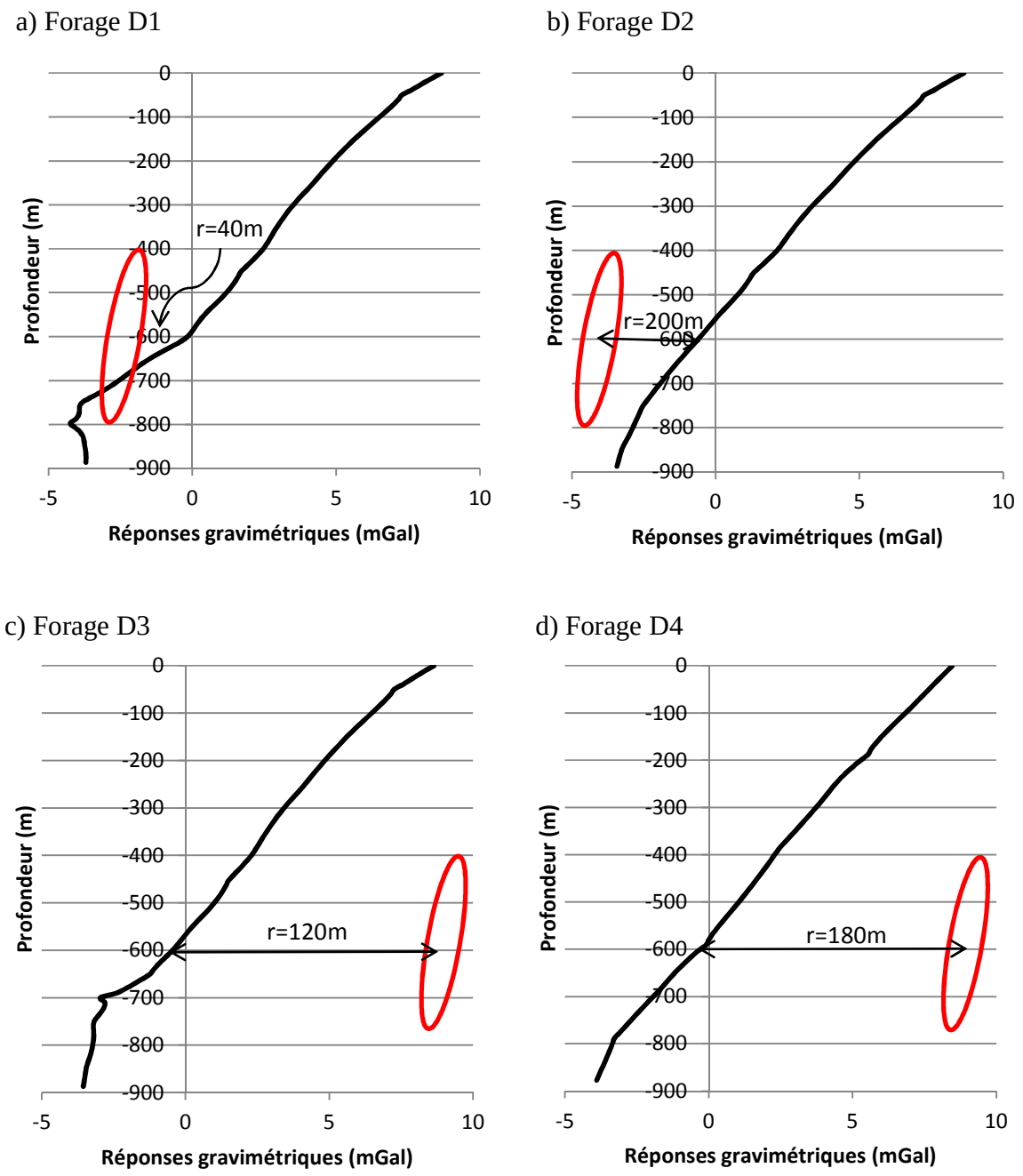


Figure 4.20 : Données gravimétriques en forage. Le gisement est représenté de façon schématique en rouge et r représente la distance entre les forages et le centre du gisement. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D1 interceptant le gisement, b) Forage D2 situé à l'est du gisement, c) Forage D3 est situé à l'ouest du gisement, d) Forage D4 est situé au nord du gisement

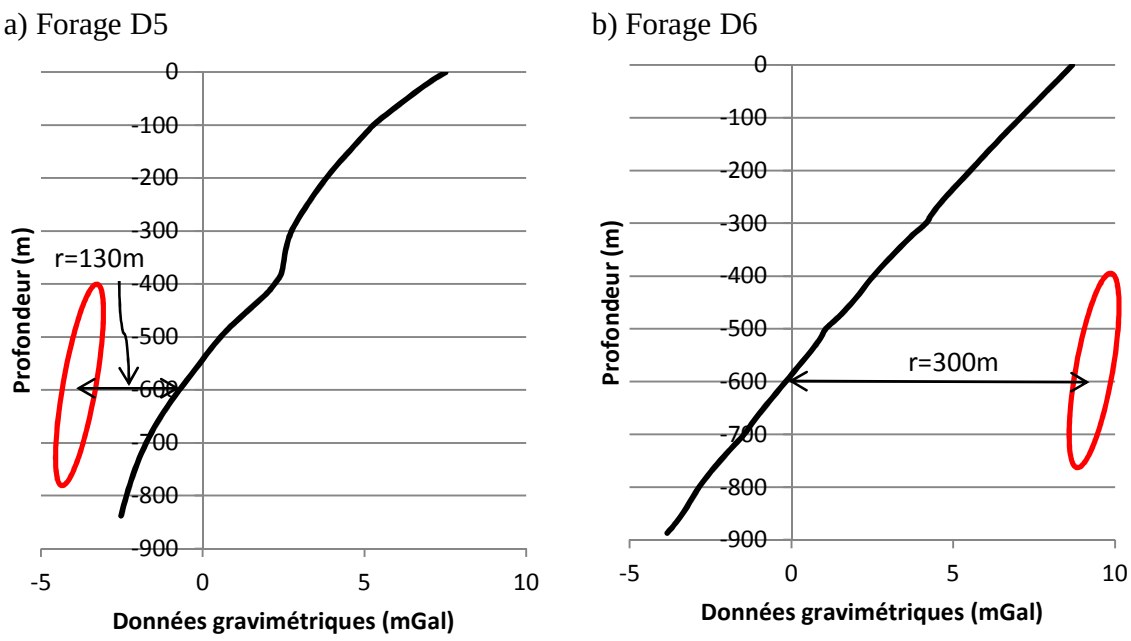


Figure 4.21 : Données gravimétriques en forage. Le gisement est représenté de façon schématique en rouge et r sont les distances entre les forages et le centre du gisement. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D5 est situé au sud du gisement, b) Forage D6 est situé au nord du gisement

Sur les forages D2, D4 et D6, il est très difficile d'observer la réponse causée par le gisement. Ces forages sont situés plus loin du gisement. Sur le forage D1, il est possible d'observer la réponse du gisement à une profondeur de 700m où le forage intercepte le gisement. Puisque le forage D3 est situé plus près du gisement que le forage D2, la réponse de celui-ci peut être observée à 700m de profondeur. C'est le même cas pour le forage D5, mais puisqu'il passe par-dessus le gisement, la réponse de celui-ci peut être observée près de 400m de profondeur.

4.3.2 Détection du gisement : résultats des inversions

Les paramètres des modèles de covariance utilisés lors de l'inversion des données sont présentés dans le tableau 4.6. La méthode décrite à la 3.3.3.1 Modèle de covariance; Graphique V-V (V-V plot) a été utilisée pour calculer ces paramètres. Le modèle initial utilisé est présenté dans le tableau suivant. Ce modèle a été choisi d'après la géologie encaissante et en supposant que quelques informations étaient connus à propos du gisement.

Tableau 4.5 : Modèle de covariance initial (Ax, Ay, Az : portée cartésienne, ϕ, θ, vert. : angles de direction, C0 : effet de pépite, C : covariance)

Modèle de variogramme	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(g/cm^3)^2$	C $(g/cm^3)^2$
Sphérique	200	20	500	-10	0	0	1e-03	1

Tableau 4.6 : Modèles de covariance (var.: variogramme, sphér.: sphérique)

Forages	Modèle de var.	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(g/cm^3)^2$	C $(g/cm^3)^2$	MAE (g/cm^3)	R
D2,D3, D4	Sphér.	200	30	200	-10	0	0	0.1	20	5.3e-03	0.68
D2,D3, D4,D5	Sphér.	200	30	200	-10	0	0	0.1	15	5.2e-03	0.70
D2,D3, D4,D6	Sphér.	200	40	450	-10	0	0	0.1	25	5.5e-03	0.69

Lorsque l'inversion par cokrigeage est utilisée et s'il n'y a aucune erreur sur les données, l'inversion devrait retrouver exactement les données gravimétriques mesurées. La figure 4.22 représente les données gravimétriques mesurées et celles calculées à partir des contrastes de densité inversées. Il est possible d'observer que les données inversées retrouvent bien les données mesurées. Ceci est le cas pour toutes les inversions sans erreurs sur les données.

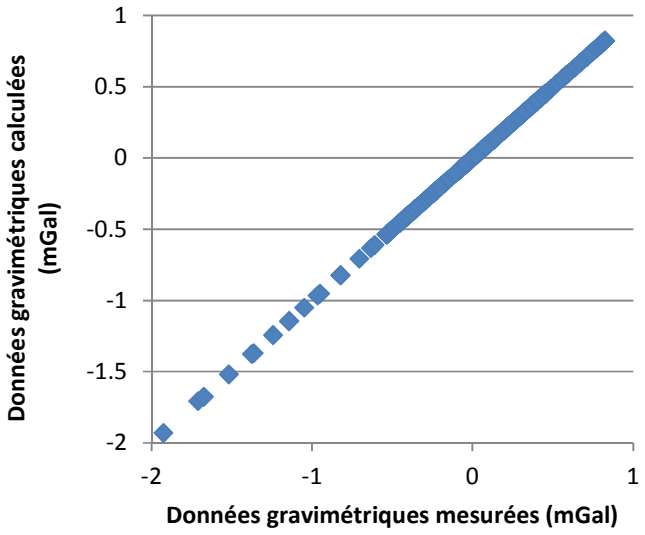


Figure 4.22 : Comparaison des données gravimétriques mesurées et calculées pour l'inversion utilisant les forages D2, D3 et D4 de la figure 4.23

Si seulement trois forages (D2, D3 et D4) sont utilisés (figure 4.23), plusieurs structures de densité positive sont observées. Elles sont créées par le gisement, les dykes de gabbro et probablement la formation d'andésite. Les structures créées par les dykes ont à peu près les mêmes contrastes de densité maximaux que l'anomalie créée par le gisement. Il est alors difficile de faire la différence entre les structures créées par les dykes et celle créée par le gisement. Comme dans les résultats précédents, une structure de contraste négatif de densité peut être observée sous le gisement.

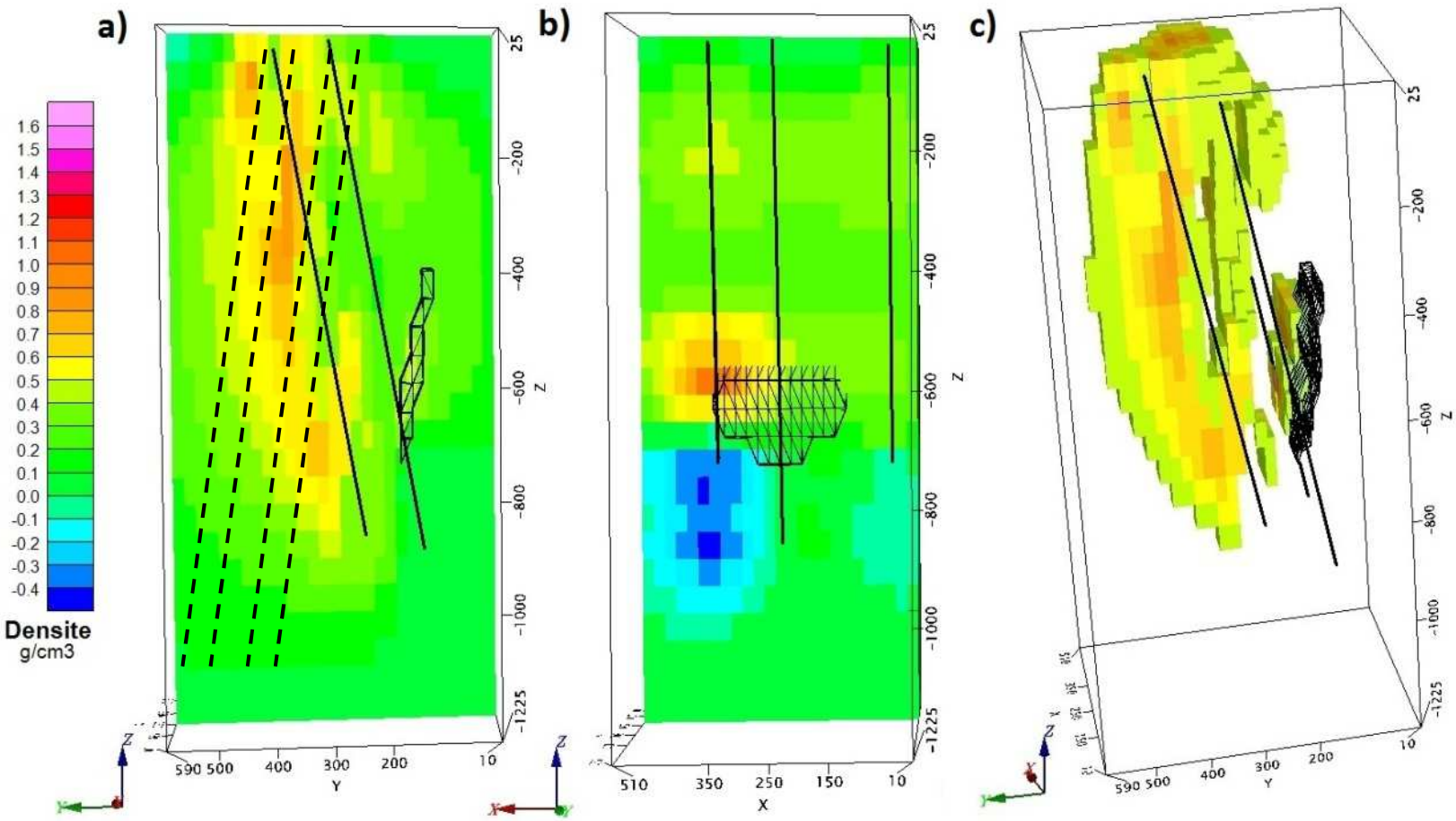


Figure 4.23 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.4 g/cm^3

En ajoutant le forage D5 situé au sud du gisement pour que les forages entourent le gisement, encore une fois, plusieurs structures sont observées (figure 4.24). Cependant, celle associée au gisement a cette fois-ci des contrastes de densité beaucoup plus élevés que ceux produits par les dykes. Ceci permet de facilement détecter et positionner le gisement. La structure de contraste de densité négatif est encore observée, mais elle est située plus au sud et le contraste de densité est plus élevé. Cette structure est probablement causée par la formation de rhyolite de densité plus faible que l'andésite, le gabbro et le gisement.

Si un forage est ajouté, mais au nord du gisement cette fois (forage D6), la structure attribuable au gisement est plus difficilement observable (figure 4.25). Comme pour le cas à trois forages, les contrastes de densité des différentes structures sont semblables. Ces structures peuvent alors être mal interprétées si la géologie encaissante n'est pas très bien connue. Une structure de contraste de densité négative est observée, mais ces contrastes sont plus élevés. Aussi, cette structure correspond probablement par la formation de rhyolite.

Les mêmes observations peuvent être faites sur les résultats obtenus en utilisant un intervalle de données de 20m (figure 4.26). Même lorsque les forages sont bien positionnés par rapport au gisement, il est difficile de différencier les diverses structures.

Lorsque des données de surface sont ajoutées (figure 4.27), les contrastes de densité près du gisement augmentent et ceux des structures créées par les dykes diminuent. Aussi, la forme des dykes est mieux définie et les pendages peuvent être bien observés. Ceci permet de mieux positionner le gisement. Cependant, l'anomalie créée par le gisement est située un peu à l'est comme pour l'inversion sans données de surface. La structure de contraste de densité négative observée sous le gisement et à l'est correspond à la formation de rhyolite.

En ajoutant des contraintes, les structures causées par les dykes et la formation de rhyolite ont des contrastes de densité plus près de ceux réels et par conséquent, il est plus facile de détecter le gisement (figure 4.28).

Puisque les excès de masse ne sont pas calculés dans le cas de détection, les limites de densité choisies ont peu d'importance. Les limites de densité des figures suivantes ont été choisies seulement pour bien observer la structure située près du gisement et pour bien différentier cette structure de celles créées par les dykes.

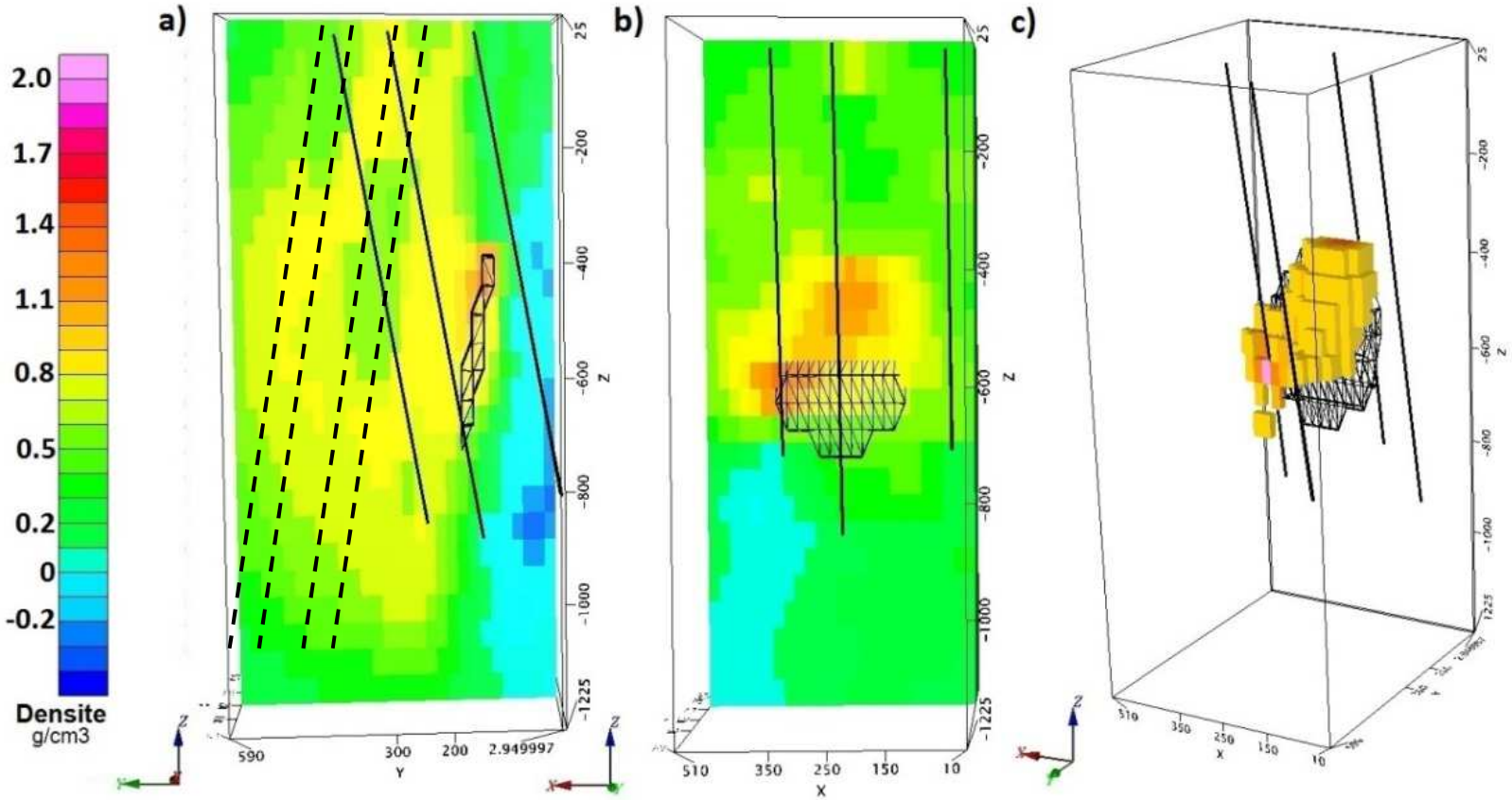


Figure 4.24 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, D4 et D5. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.9 g/cm^3

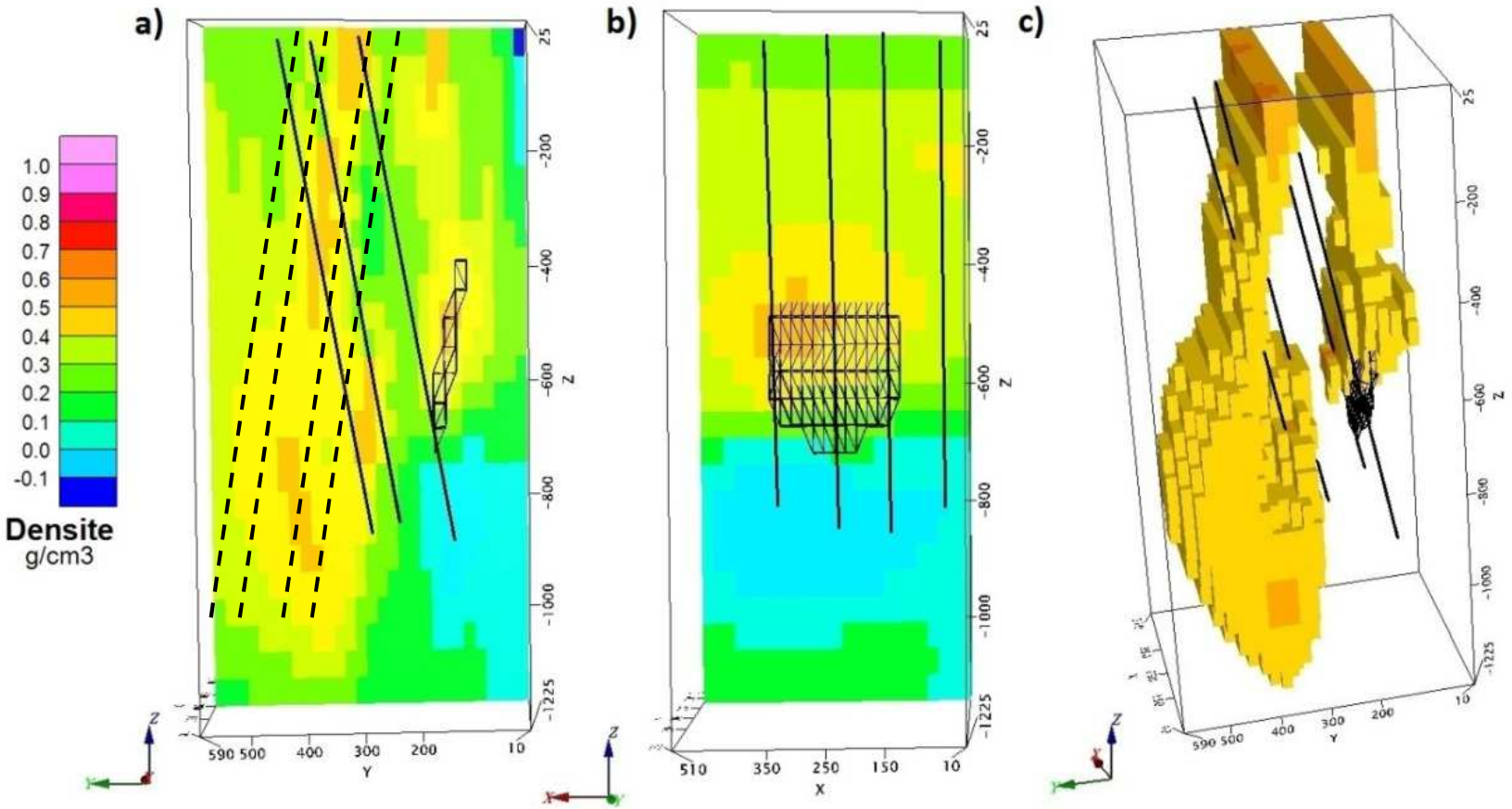


Figure 4.25 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, D4 et D6. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m et la trace des dykes en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.4 g/cm^3

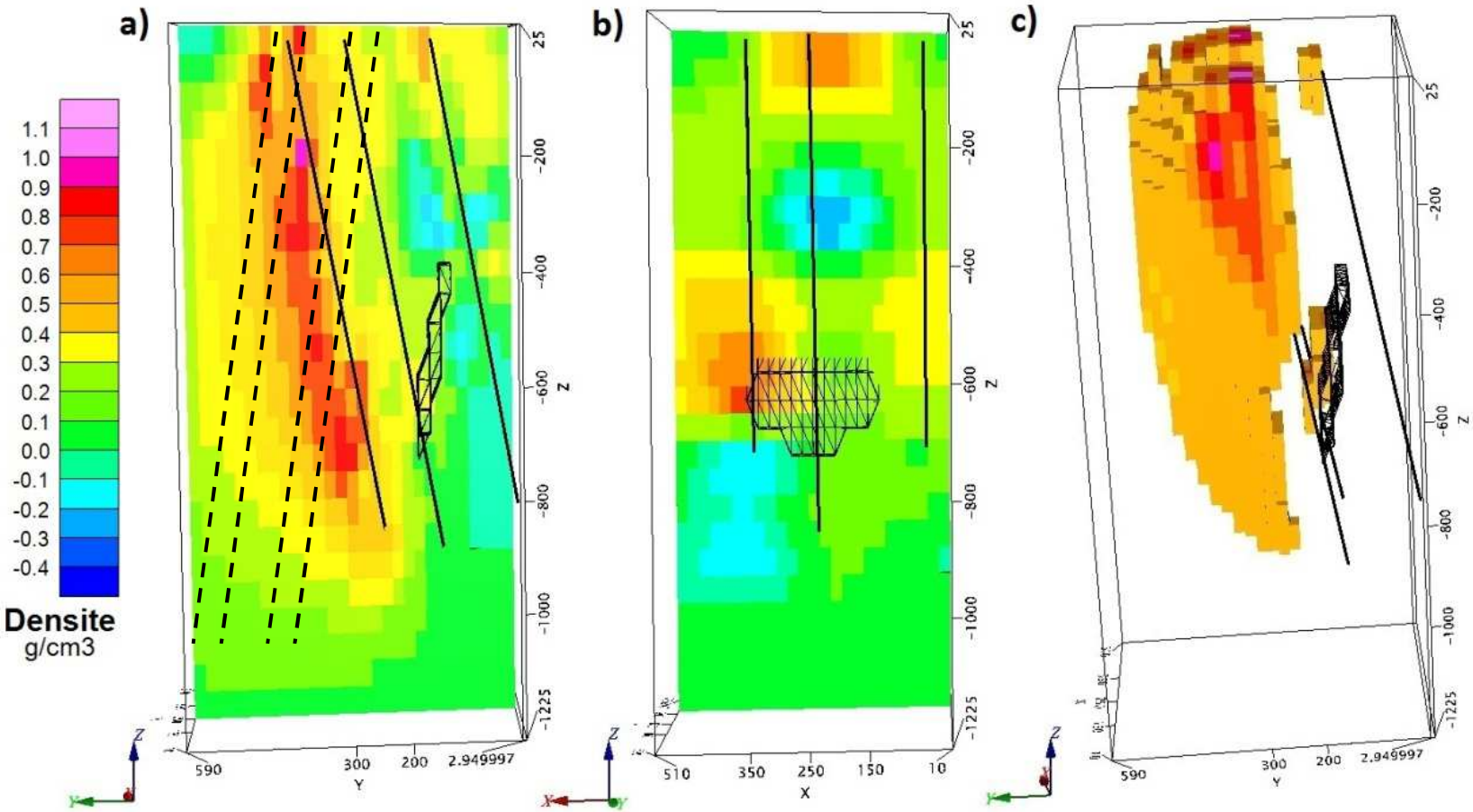


Figure 4.26 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3, D4 et D5, mais en utilisant un intervalle de données de 20m. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets; b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.5 g/cm^3

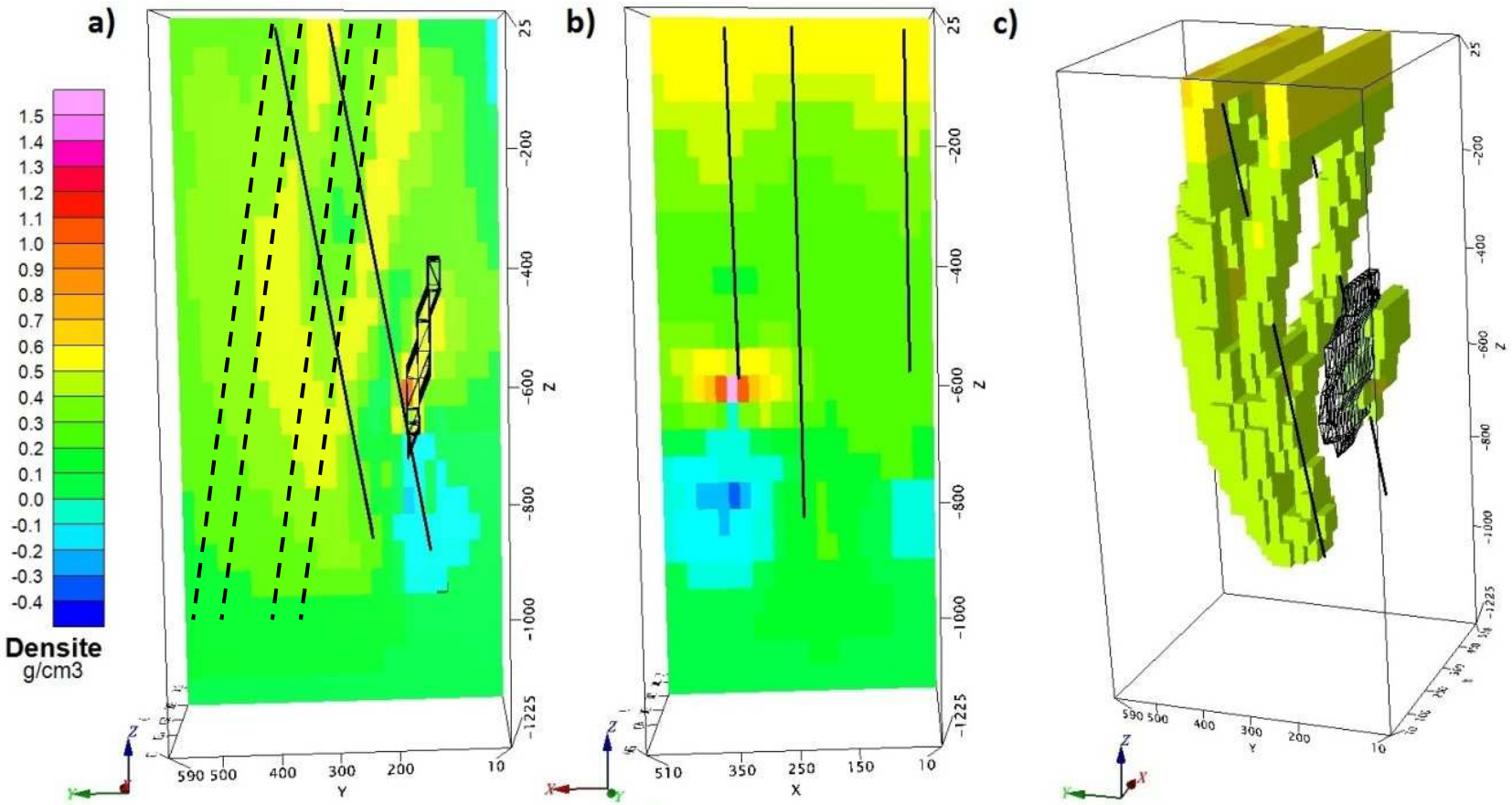


Figure 4.27 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3 et D4 et des données de surface. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=350m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=190m, c) Densités supérieures à ρ=0.4 g/cm^3

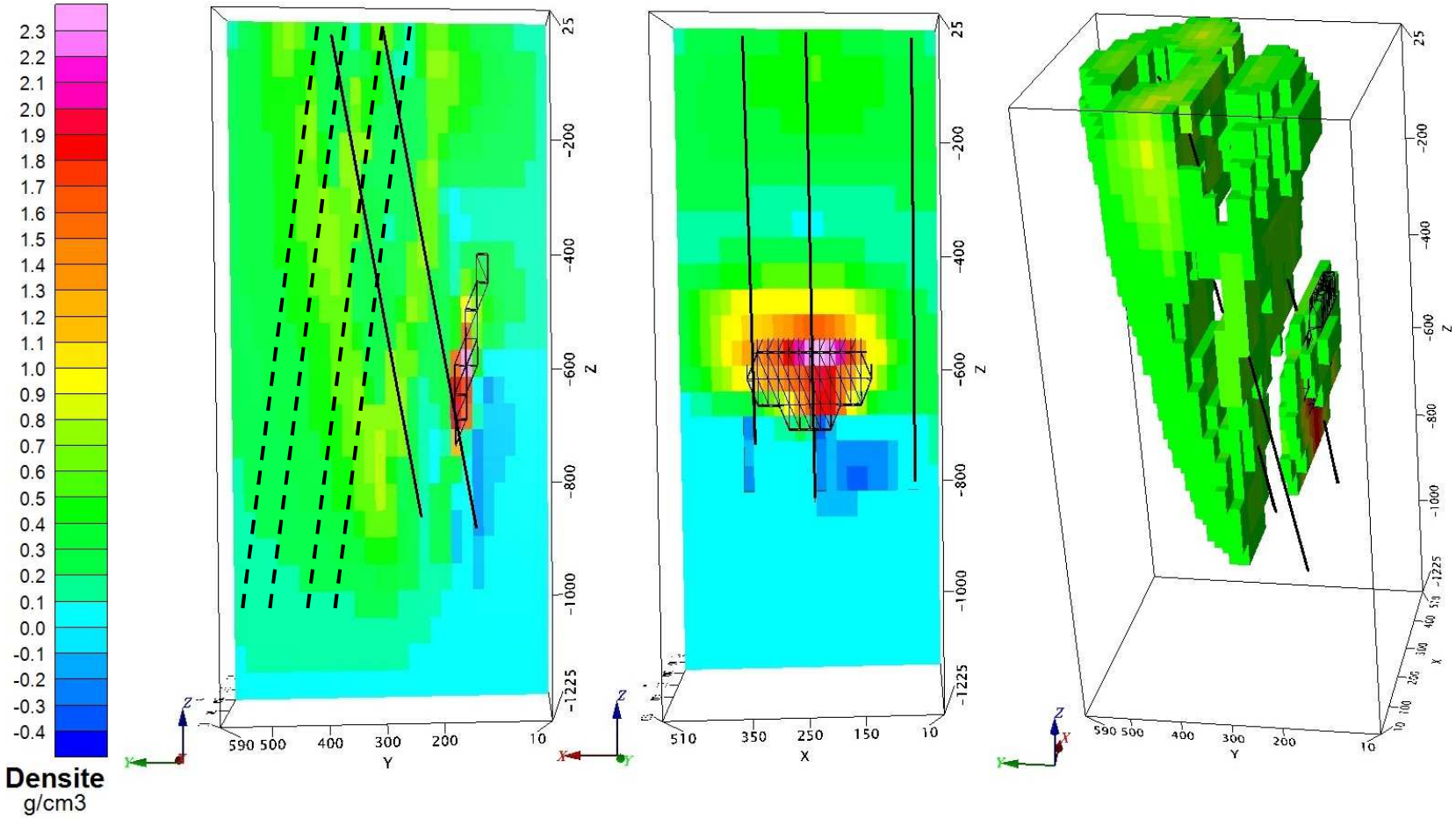


Figure 4.28 : Modèle de densité de l'inversion des forages D2, D3 et D4 avec des contraintes le long des forages. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.4 g/cm^3

4.3.3 Caractérisation du gisement : Résultats des inversions

Les modèles de covariance utilisés lors de l'inversion des données sont présentés dans le tableau 4.8. La méthode décrite à la section 3.3.3.1 Modèle de covariance; Graphique V-V (V-V plot) a été utilisée pour calculer ces paramètres. Le modèle initial utilisé est le même que celui présenté au tableau 4.5.

Tableau 4.7 : Modèles de covariance (var.: variogramme, sphér.: sphérique)

Forages	Modèle de var.	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(g/cm^3)^2$	C $(g/cm^3)^2$	MAE (g/cm^3)	R
D1, D2, D3	Sphér.	200	30	200	-10	0	0	0.1	15	5.6e-03	0.68
D1, D2, D3, D4	Sphér.	200	30	200	-10	0	0	0.1	25	5.7e-03	0.69
D1, D2, D3, D4, D5	Sphér.	200	30	200	-10	0	0	0.1	25	5.2e-03	0.71

Comme dans le cas d'une géologie homogène, lorsque trois forages (D1, D2 et D3) sont utilisés, il est possible de bien observer la structure créée par le gisement (figure 4.29). Les autres structures de contrastes de densité positifs sont créées par les dykes de gabbro et la formation d'andésite, mais puisque les contrastes de densité calculés de ces anomalies sont beaucoup plus petits, il est facile d'isoler l'anomalie créée par le gisement et de calculer son excès de masse.

Sur les figures 4.29 et 4.30, des structures de contrastes de densité négatifs sont encore observées. Il semble que ces structures soient surtout observées lorsque les forages n'entourent pas le gisement et qu'aucune contrainte n'est utilisée. Des contrastes de densité négatifs peuvent être observés sur les autres inversions, mais ils sont plus élevés et plus étendus uniformément.

Les limites de densité utilisées pour le calcul des excès de masse ont été choisies d'après la forme et le volume des structures observées. Elles ont été choisies également pour bien faire la différence entre les structures créées par les dykes et celle créée par le gisement.

Si les cinq forages D1, D2, D3, D4 et D5 sont utilisés, l'excès de masse calculé estime bien celui réel, mais en théorie, si des contraintes sont ajoutées, moins de forages devraient être nécessaires.

Lorsque des contraintes de densité fixes le long des forages sont ajoutées (figure 4.31), les contrastes de densité calculés sont plus près du modèle initial.

En ajoutant un quatrième forage situé plus loin du gisement (forage D4), un excès de masse plus petit est calculé puisque, lors de l'inversion, ces données donnent comme information que le gisement est situé plus au nord qu'il ne l'est réellement. Ceci diminue les contrastes de densité de la structure associée au gisement et augmente ceux situés entre le gisement et le forage. Un excès de masse plus petit est alors calculé.

En ajoutant le forage D5 situé au sud du gisement, il est possible de réduire ce problème, mais l'excès de masse calculé est encore sous-estimé si les données de surface ne sont pas ajoutées. Lorsque des données de surface sont ajoutées (figure 4.32), l'excès de masse est calculé précisément avec seulement trois forages. Même s'il n'y a aucune réponse gravimétrique du gisement en surface, ces données donnent plus d'informations sur la géologie de surface (dykes de gabbro, andésite, rhyolite) et aident à positionner la source de l'anomalie plus en profondeur près du gisement.

Tableau 4.8 : Excès de masse calculés pour les inversions d'un gisement dans une géologie encaissante complexe

Forages	Limite de densité (g/cm^3)	Contraintes – Données de surface	Excès de masse (Mt)
D1, D2, D3	0.3	Non - Non	3.4
D1, D2, D3, D4	0.3	Non - Non	3.7
D1, D2, D3, D4, D5	0.3	Non - Non	5.2
D1, D2, D3	0.4	Oui - Non	4.5
D1, D2, D3, D4	0.4	Oui - Non	4.5
D1, D2, D3, D4, D5	0.4	Oui - Non	6.0
D1, D2, D3	0.6	Oui - Oui	6.4
D1, D2, D3, D4	0.5	Oui - Oui	6.1

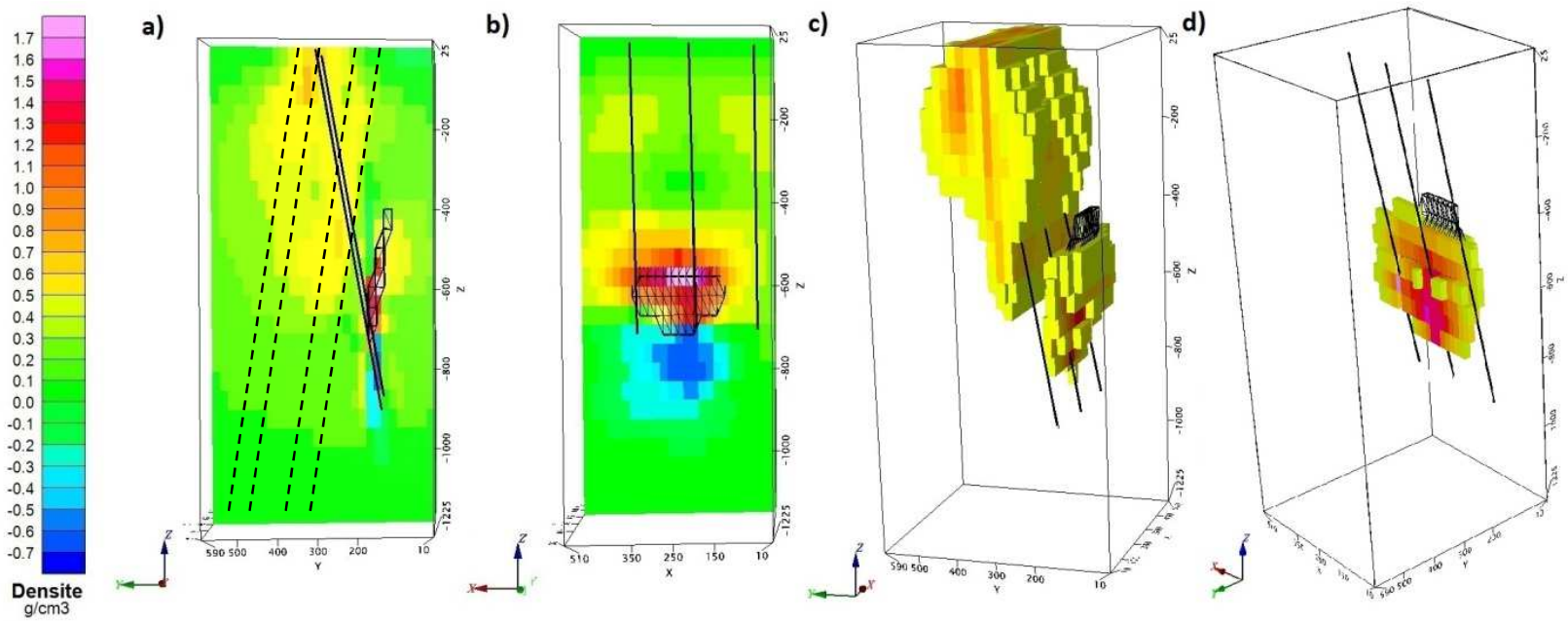


Figure 4.29 : Modèle de densité de l'inversion des forages D1, D2 et D3. Le gisement est représenté en structure filaire (*wireframe*) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.4 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.4 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 4.5 Mt

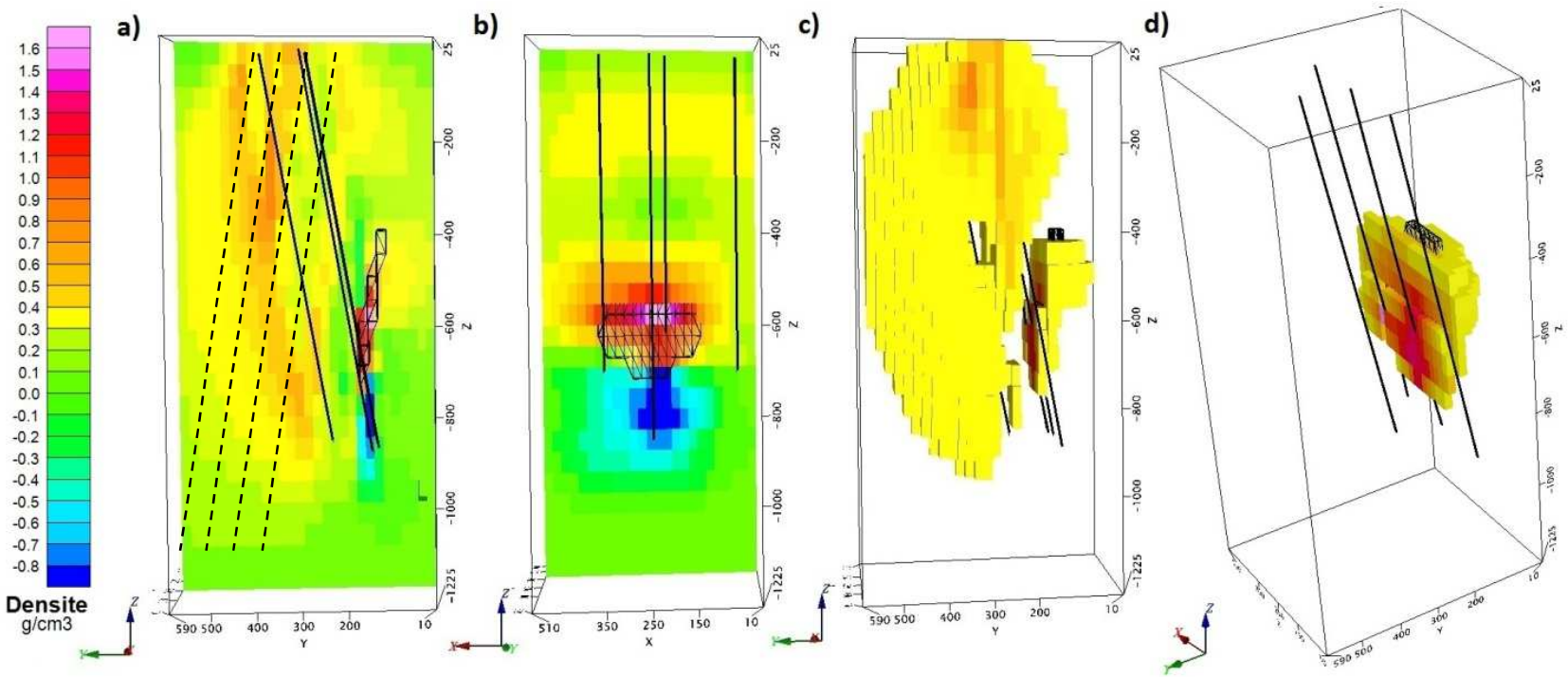


Figure 4.30 : Modèle de densité de l'inversion des forages D1, D2, D3, et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 4.5 Mt

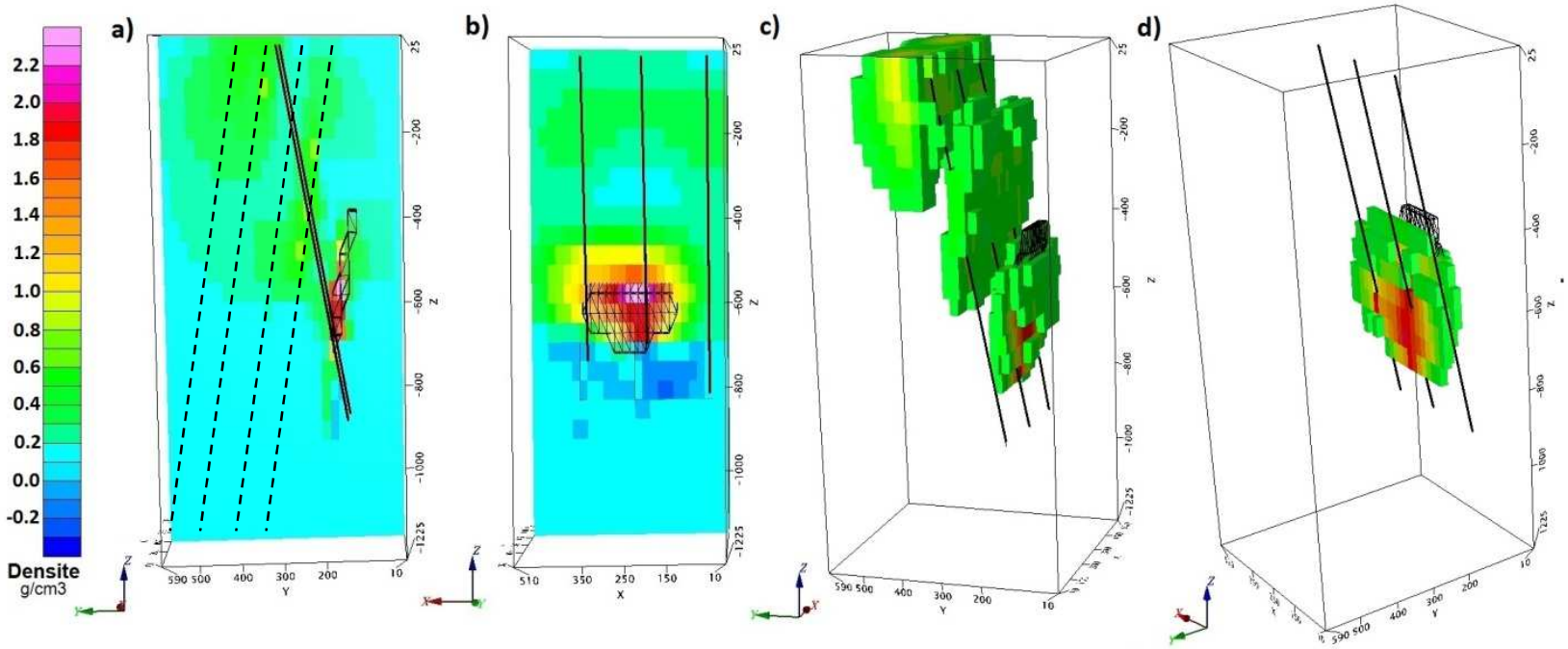


Figure 4.31 : Modèle de densité de l'inversion des forages D1, D2 et D3. Des contraintes de densités fixes ont été ajoutées le long des forages. Le gisement est représenté en structure filaire noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures ρ=0.4 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.4 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 3.4 Mt

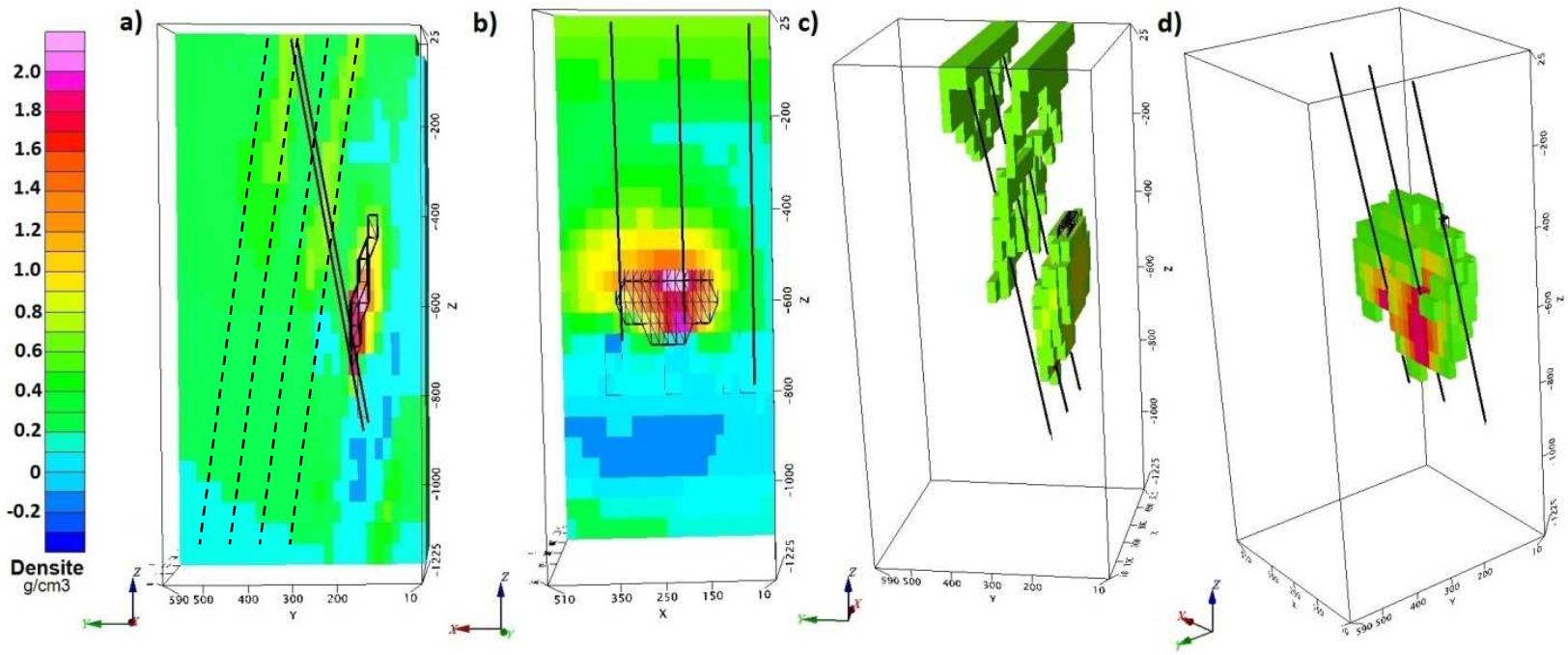


Figure 4.32 : Modèle de densité de l'inversion des forages D1, D2 et D3 et des données de surface. Des contraintes de densités fixes ont été ajoutées le long des forages et en surface. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures ρ=0.6 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.6 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 6.4 Mt

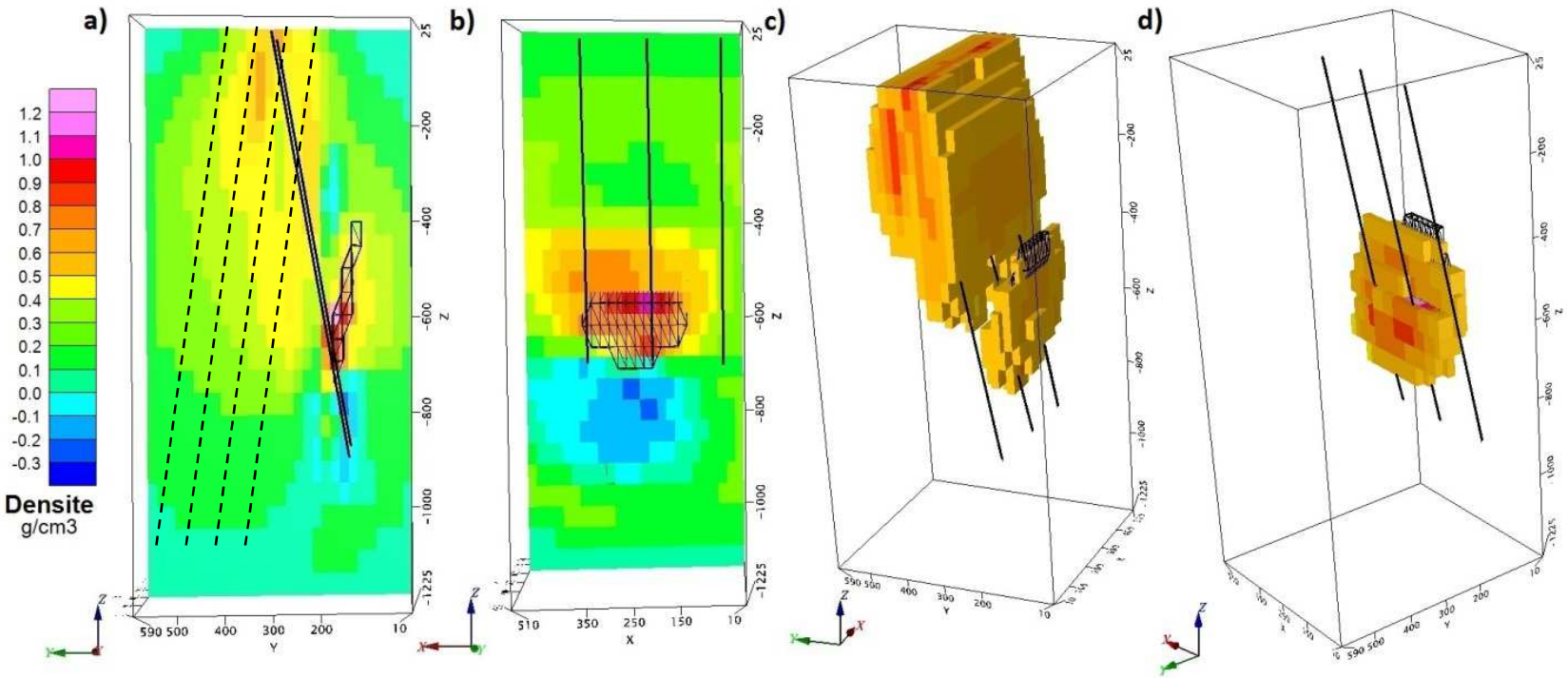


Figure 4.33 : Modèle de densité de l'inversion des forages D1, D2 et D3, mais en utilisant un intervalle de données de 20m. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.5 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.5 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 4.2 Mt

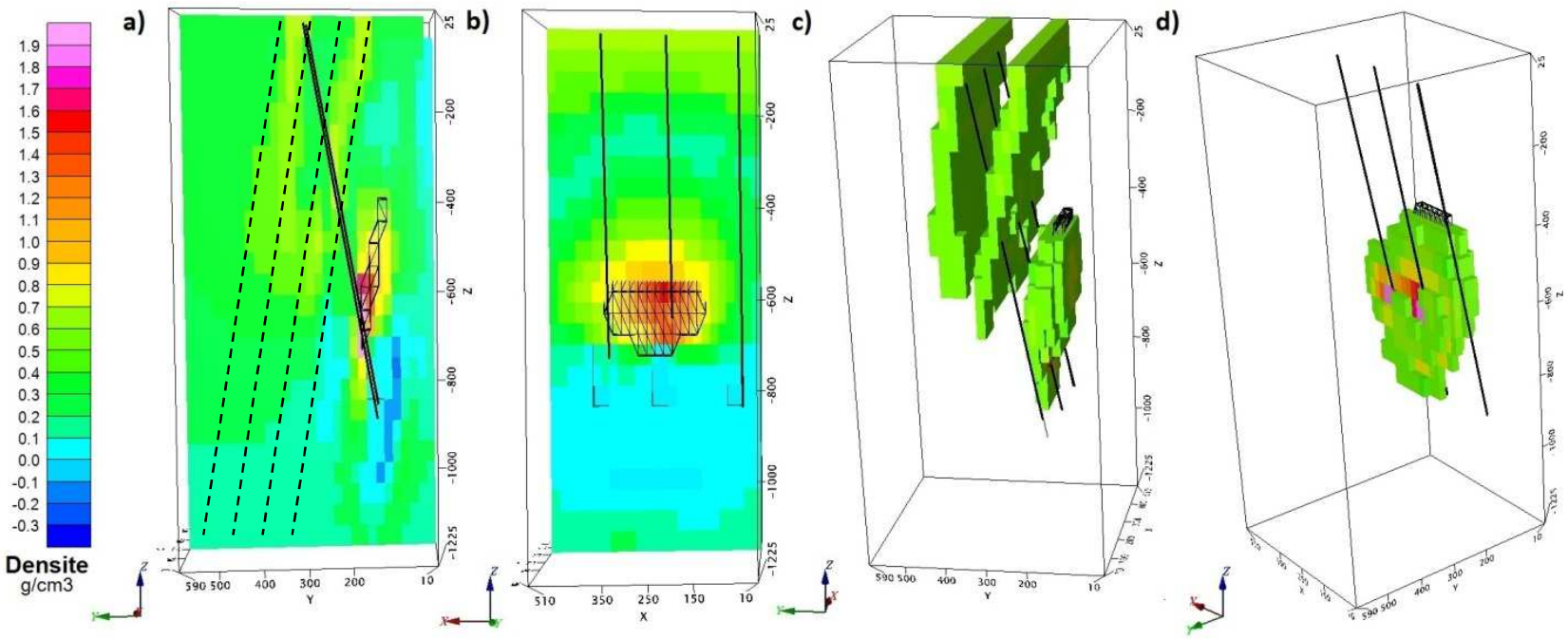


Figure 4.34 : Modèle de densité de l'inversion des forages D1, D2 et D3 et des données de surface. Des contraintes de densités fixes ont été ajoutées le long des forages et en surface, mais un pas de mesure de 20m a été utilisé. Le gisement est représenté en structure filaire noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m; la trace des dykes est affichée en tirets, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.5 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.5 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 6.0 Mt

En utilisant un intervalle de données de 20m, la prise de mesures prend moins de temps, ce qui la rend plus économique. Pour le cas à trois forages (figure 4.33), un excès de masse de 4.2 Mt a été calculé et pour le cas utilisant le même nombre de forages, les données de surface et des contraintes, un excès de masse de 6.0Mt a été calculé (figure 4.34). Ces estimations sont un peu plus petites que celles calculées avec un intervalle de 10m. Un bon compromis est de prendre des données à des intervalles plus grands en surface et des intervalles près de 10m à des profondeurs plus grandes où le gisement est situé.

Tableau 4.9 : Excès de masse calculés pour les inversions utilisant un pas de mesure de 20m

Forages	Limite de densité (g/cm^3)	Contraintes – Données de surface	Excès de masse (Mt)
D1, D2, D3	0.5	Non - Non	4.2
D1, D2, D3	0.5	Oui - Oui	6.0

4.4 Effet de la régionale

4.4.1 Estimation de la régionale à partir de l'anomalie observée

Le problème de la régionale sera abordé dans cette section. Premièrement, les anomalies de Bouguer seront présentées pour les forages D1, D2, D3, D4, D5, et D6. Sur ces courbes, il est possible d'observer l'anomalie régionale qui a une grande longueur d'onde et les anomalies qui ont une forme antisymétrique. Ensuite, trois traitements seront faits pour séparer la régionale de la résiduelle. Les régionales seront présentées, puis les différentes résiduelles seront comparées à la réponse réelle du gisement, à l'exception des gradients verticaux.

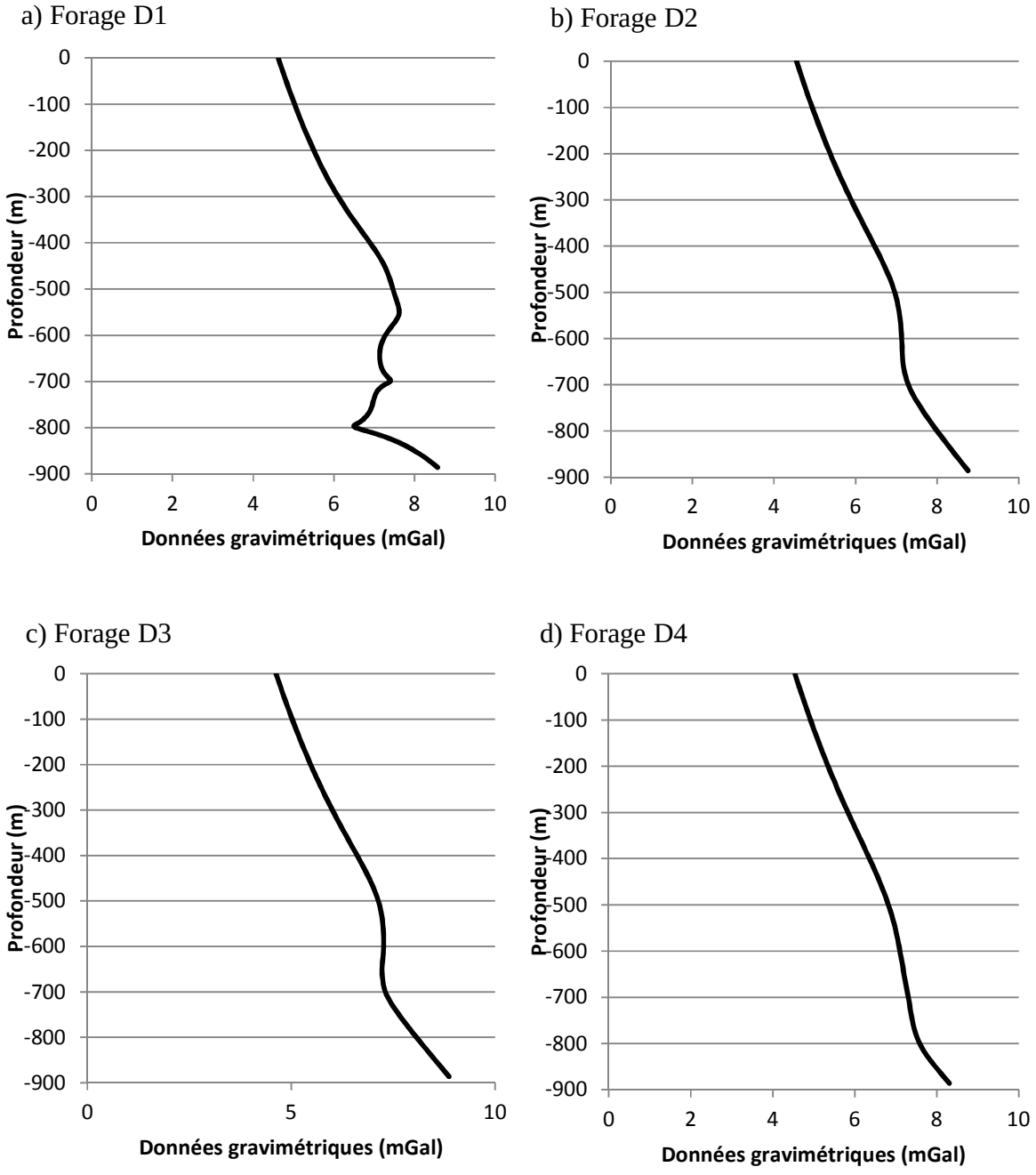


Figure 4.35 : Anomalies de Bouguer. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D1, b) Forage D2, c) Forage D3, d) Forage D4

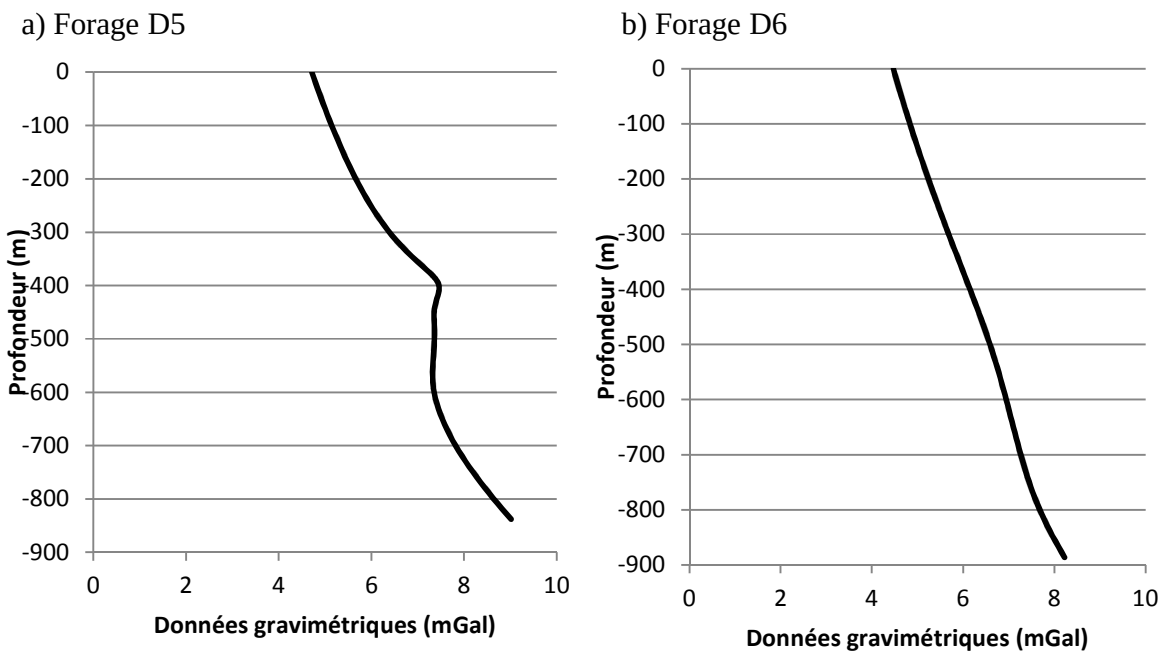


Figure 4.36 : Anomalies de Bouguer. . La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D5, b) Forage D6

4.4.1.1 Réponse des gradients verticaux

Les graphiques suivants présentent les résultats des gradients verticaux des anomalies de Bouguer. Il est possible d'observer qu'il y a beaucoup de variations pour le forage D1. Ces variations sont dues à l'asymétrie du gisement et au pendage du forage. Une première anomalie, A, est créée par le gisement située près du forage et l'autre anomalie, B, est créée par le forage qui intercepte le gisement (figure 4.37a). Un phénomène semblable se produit pour le forage D5 (figure 4.38a). Puisque le forage passe au-dessus du gisement, puis à côté, il est possible d'observer plus d'une anomalie. Les gradients verticaux des forages D2, D3, D3 et D6 présentent une anomalie antisymétrique typique d'une structure ayant un pendage.

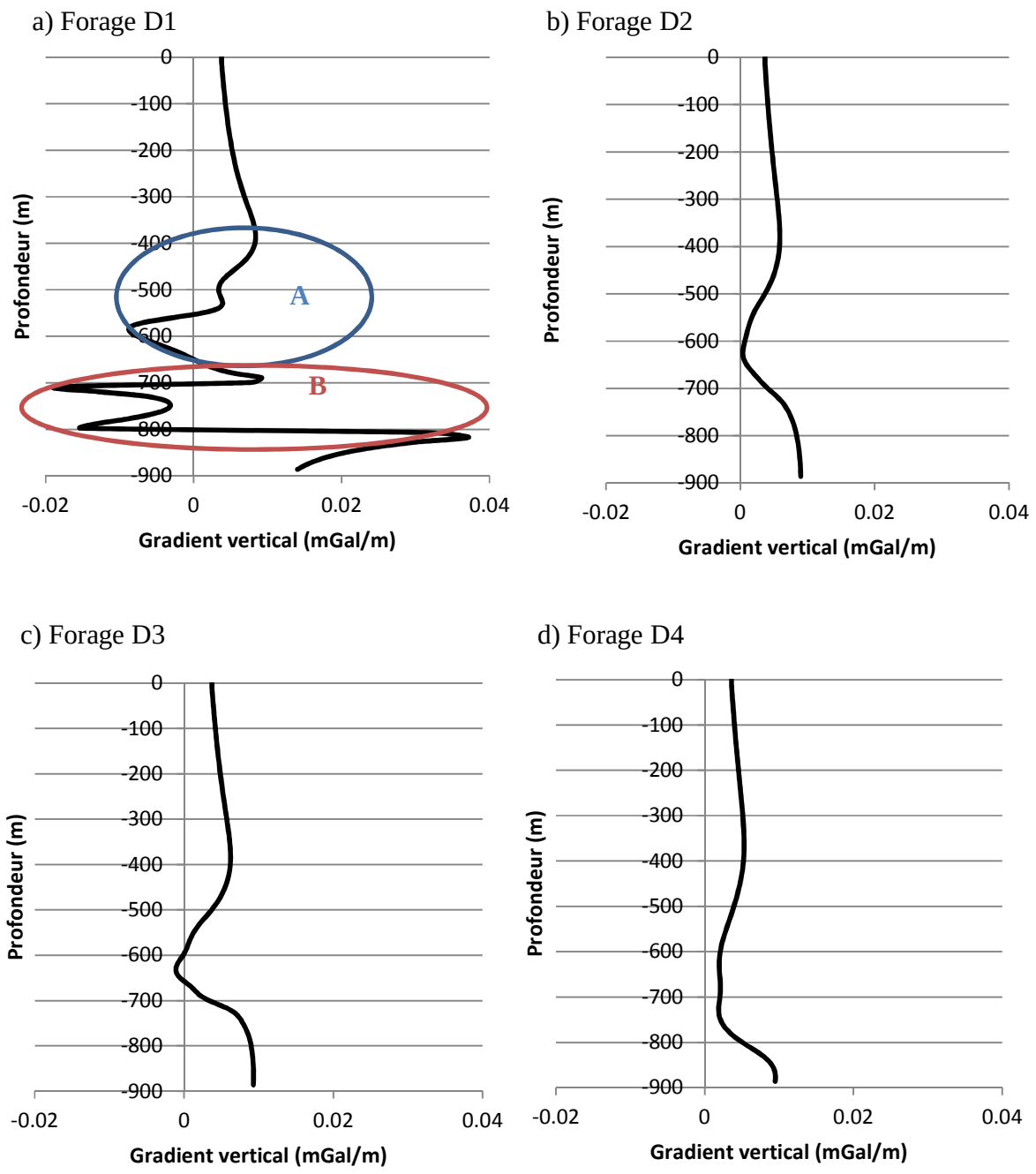


Figure 4.37 : Gradients verticaux. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D1 deux anomalies, A et B, créées par le pendage du gisement et du forage peuvent être observées, b) Forge D2, c) Forage D3, d) Forage D4

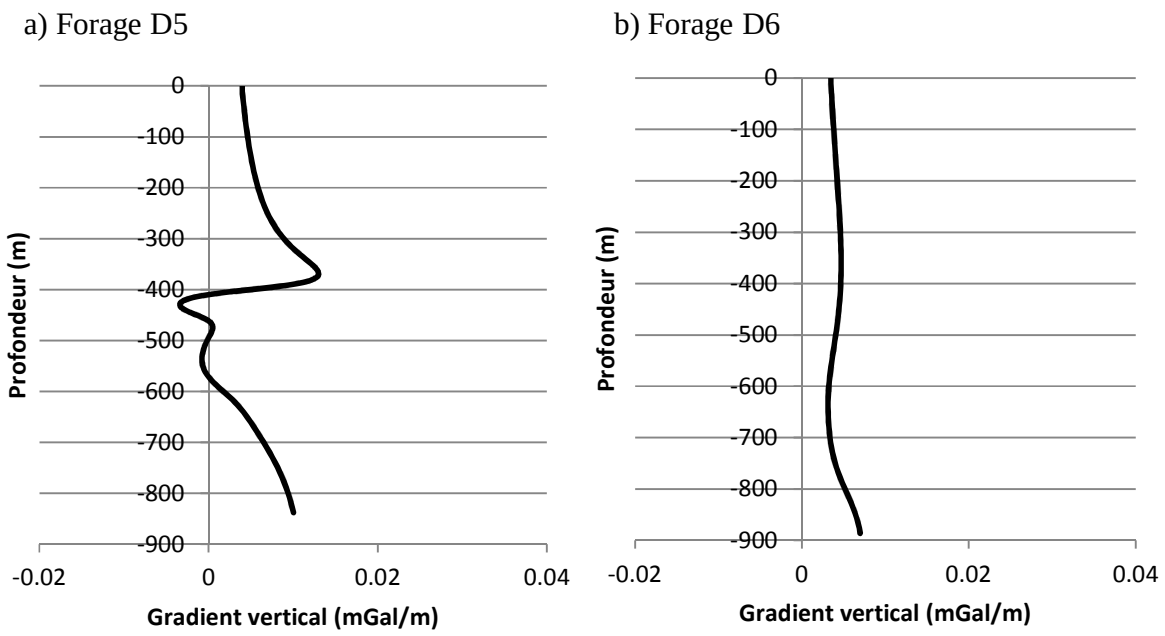


Figure 4.38 : Gradients verticaux. La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D5, b) Forage D6

4.4.1.2 Estimation de la régionale par filtrage non-linéaire de Naudy

Les graphiques suivants comparent les anomalies de Bouguer et les réponses régionales calculées à l'aide du filtre non-linéaire de Naudy réalisé à l'aide du logiciel Oasis Montaj. Pour tous les forages, à l'exception du forage D2, une largeur de 22 points et une tolérance de 0 mGal ont été utilisées. Dans le cas du forage D2, une largeur de 12 points et une tolérance de 0 mGal ont été utilisées. Puisque les points ont été pris à chaque 10m, les anomalies des forages D1, D3, D4, D5 et D6 ont une largeur de 220m et celle du forage D2 a une largeur de 120m. Plusieurs paramètres ont été essayés et ce sont ces paramètres qui calculaient la régionale la plus réaliste. Le filtre élimine trois types d'anomalies : les anomalies présentant un maximum, les anomalies à deux minimums ou des anomalies larges. Cependant, il n'élimine pas spécifiquement les anomalies de type antisymétrique généralement observées en forage. Sur les graphiques suivants, il est possible d'observer ce phénomène. Puisque le gisement a un pendage, les anomalies n'ont pas une antisymétrie parfaite et le filtre considère certaines de ces anomalies comme étant des anomalies larges ou à deux minimums. Ceci atténue l'anomalie antisymétrique et même l'élimine pour créer une anomalie différente.

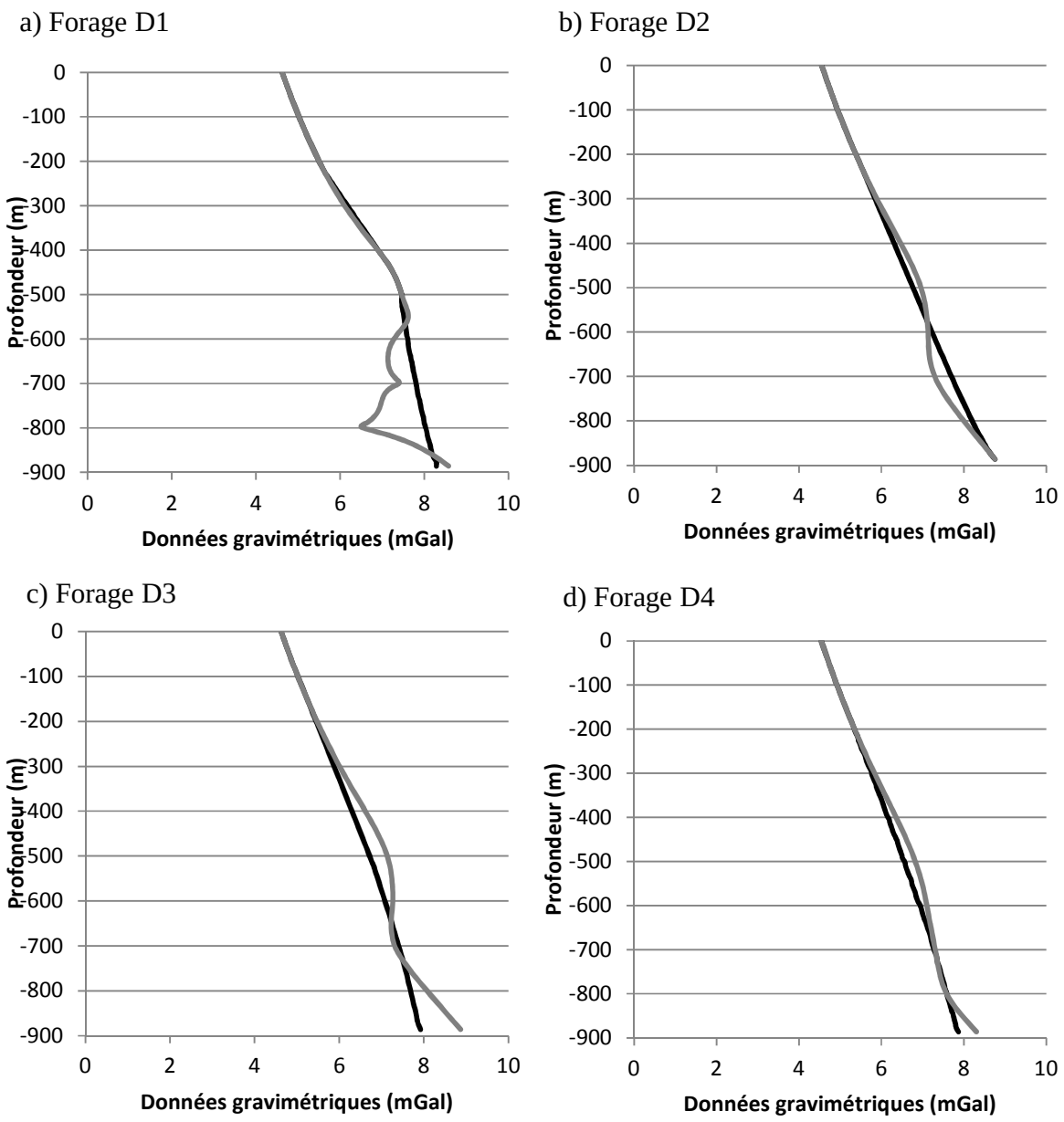


Figure 4.39 : Anomalies de Bouguer (gris) et régionale calculée à l'aide du filtre de Naudy (noir). La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D1, b) Forage D, c) Forage D3, d) Forage D4

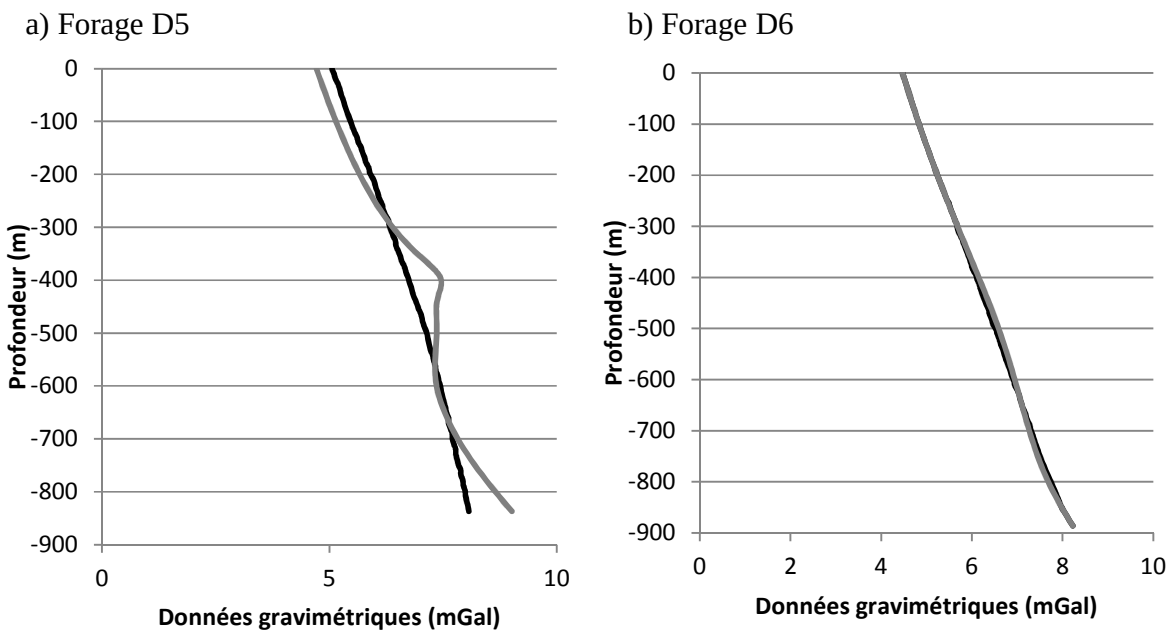


Figure 4.40 : Anomalies de Bouguer (gris) et régionale calculée à l'aide du filtre de Naudy (noir). La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D5, b) Forage D6

4.4.1.3 Estimation de la régionale par transformée en ondelette

Les graphiques suivants comparent les anomalies de Bouguer et les régionales calculées à l'aide du filtre par ondelettes. L'ondelette utilisée pour le forage D1 est une ondelette rbio 1.3, et pour les autres forages, une ondelette db 5 a été utilisée. Seul le dernier niveau a été utilisé pour calculer la régionale. Comme pour le filtre non-linéaire, plusieurs types d'ondelettes ont été utilisés pour estimer les régionales sur l'anomalie de Bouguer. Ensuite, les régionales qui semblaient les plus « réalistes » ont été choisies. Le filtre par ondelettes semble représenter la régionale un peu mieux que le filtre non-linéaire.

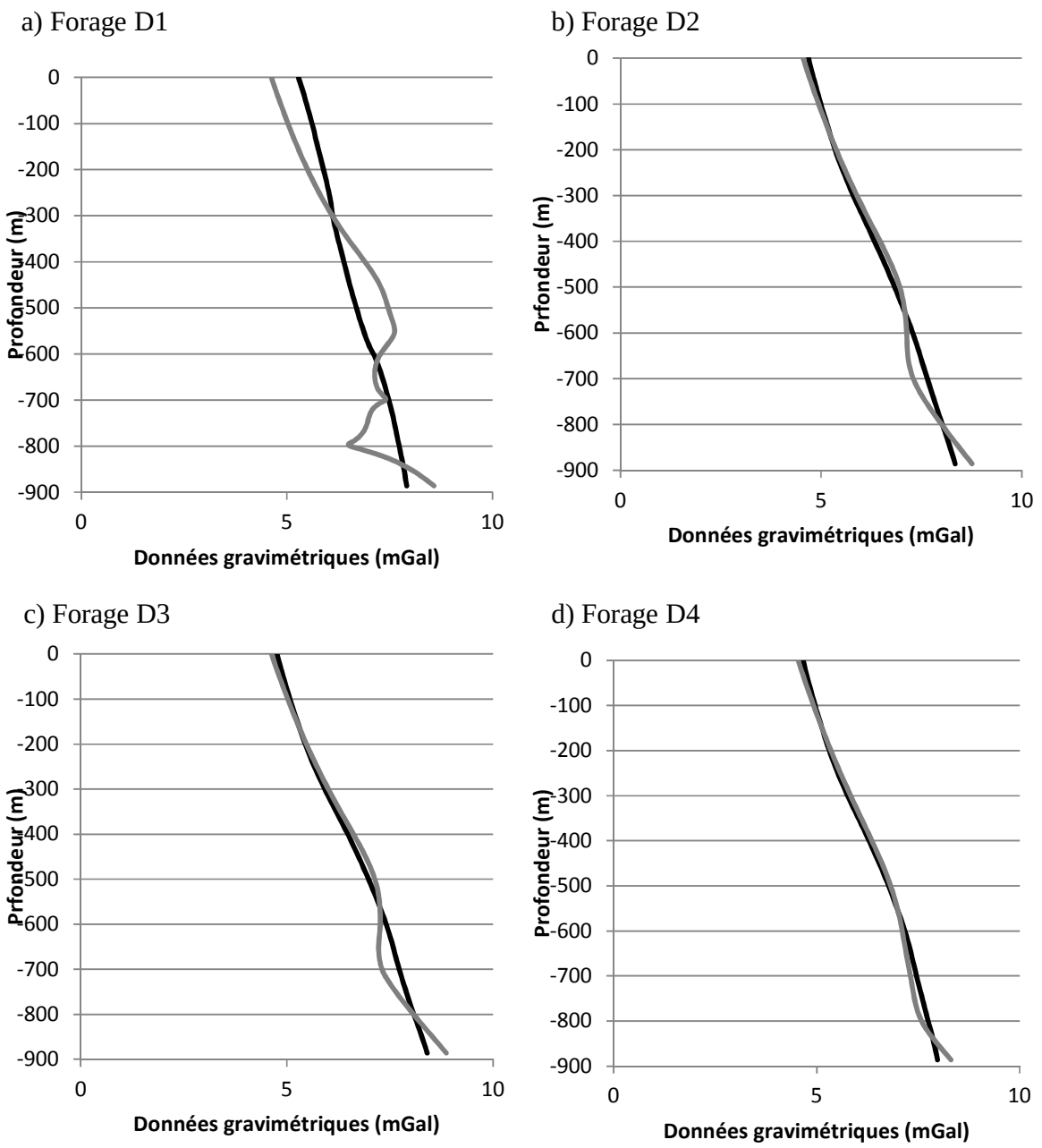


Figure 4.41 : Anomalies de Bouguer (gris) et régionale calculée à l'aide du filtre par ondelettes (noir). La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D1, b) Forage D2, c) Forage D3, d) Forage D4

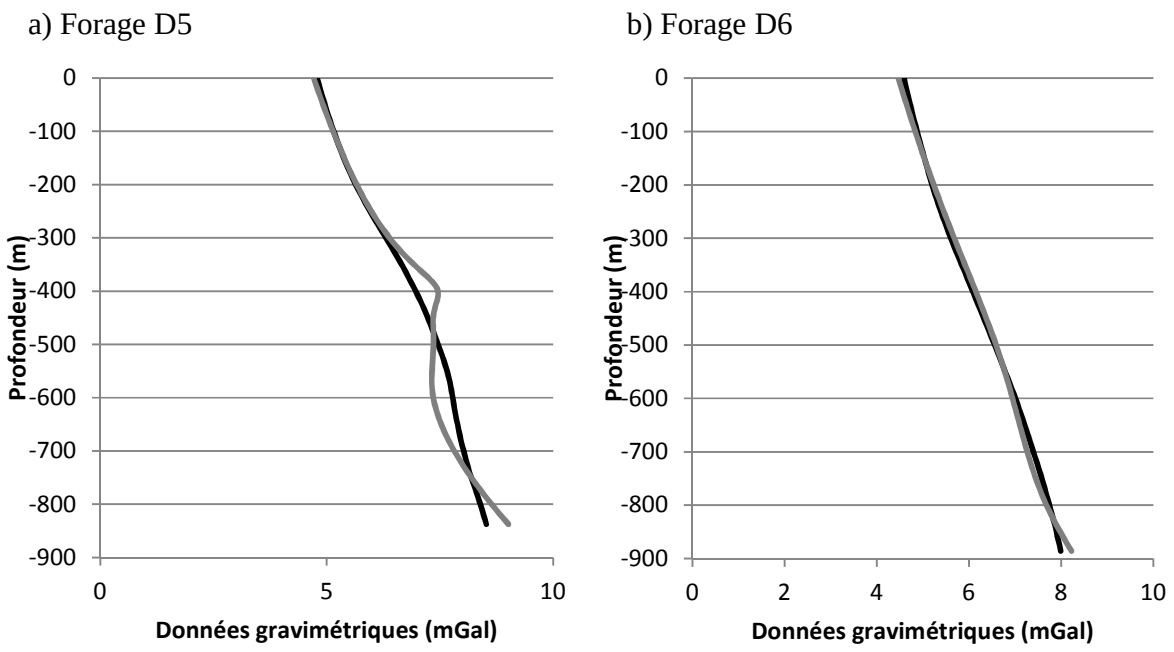


Figure 4.42 : Anomalies de Bouguer (gris) et régionale calculée à l'aide du filtre par ondelettes (noir). La profondeur indique la distance verticale depuis la surface. a) Forage D5, b) Forage D6

4.4.1.4 Comparaison des résiduelles calculées

Les graphiques suivants comparent les réponses gravimétriques du gisement aux différentes résiduelles obtenues à l'aide du filtre non-linéaire et du filtre par ondelettes. Premièrement, il est possible d'observer que les filtres diminuent l'amplitude de l'anomalie. Pour le forage D1, le filtre par ondelettes retrouve bien l'anomalie créée par le gisement. Cependant, le filtre non-linéaire élimine cette forme antisymétrique. Pour les forages D4, D5, et D6, il est possible d'observer de petites anomalies de courtes longueurs d'onde sur la résiduelle calculée à l'aide du filtre non-linéaire. Il est difficile d'expliquer ces courtes longueurs d'onde, puisque les régionales ont été calculées à l'aide d'un logiciel. Cependant, leurs amplitudes ne sont pas assez grandes pour affecter les données.

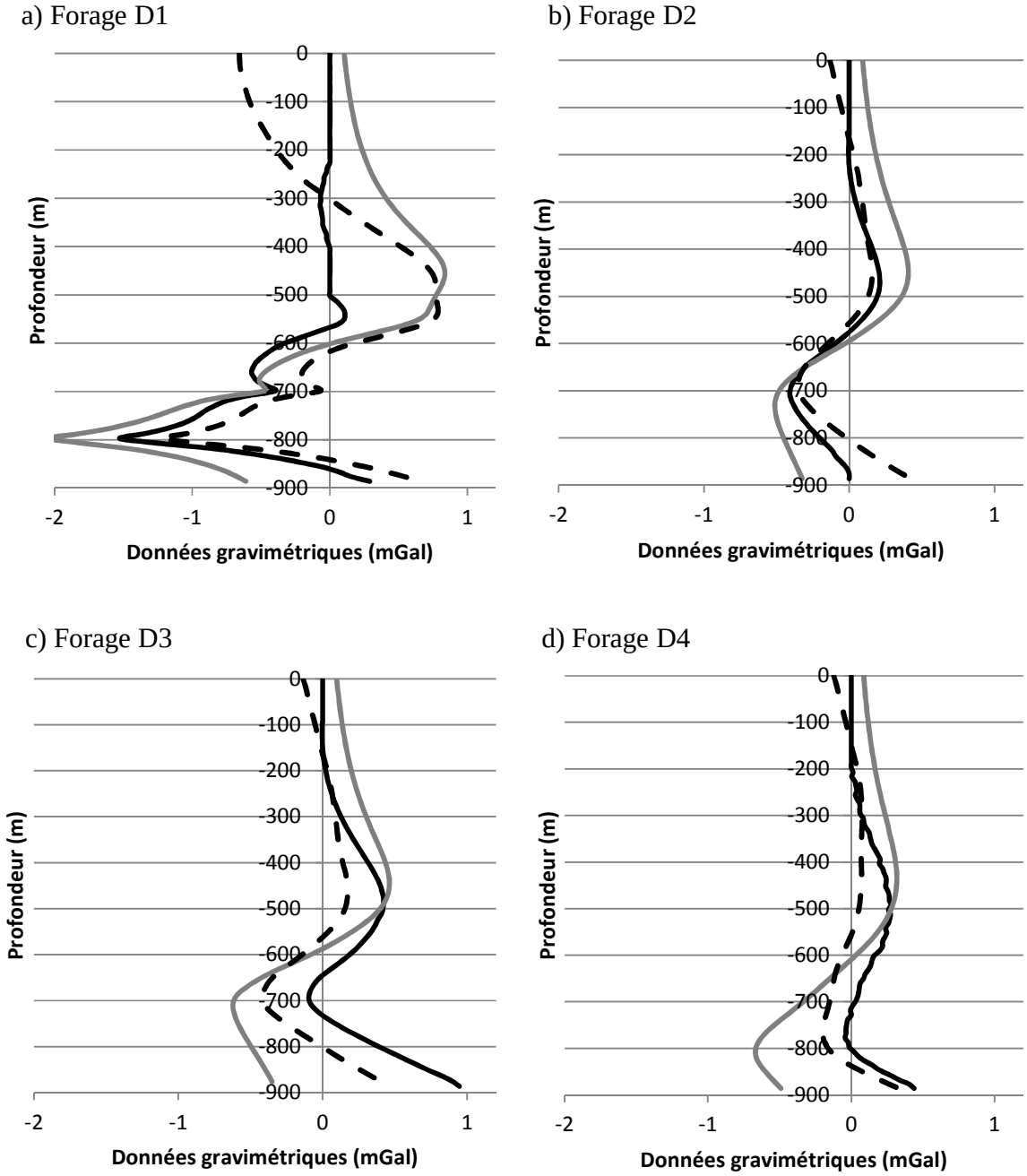


Figure 4.43 : Comparaison des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire (noir), par ondelettes (gris) et les réponses gravimétriques du gisement (pointillé). a) Forage D1, b) Forage D2, c) Forage D3, d) Forage D4

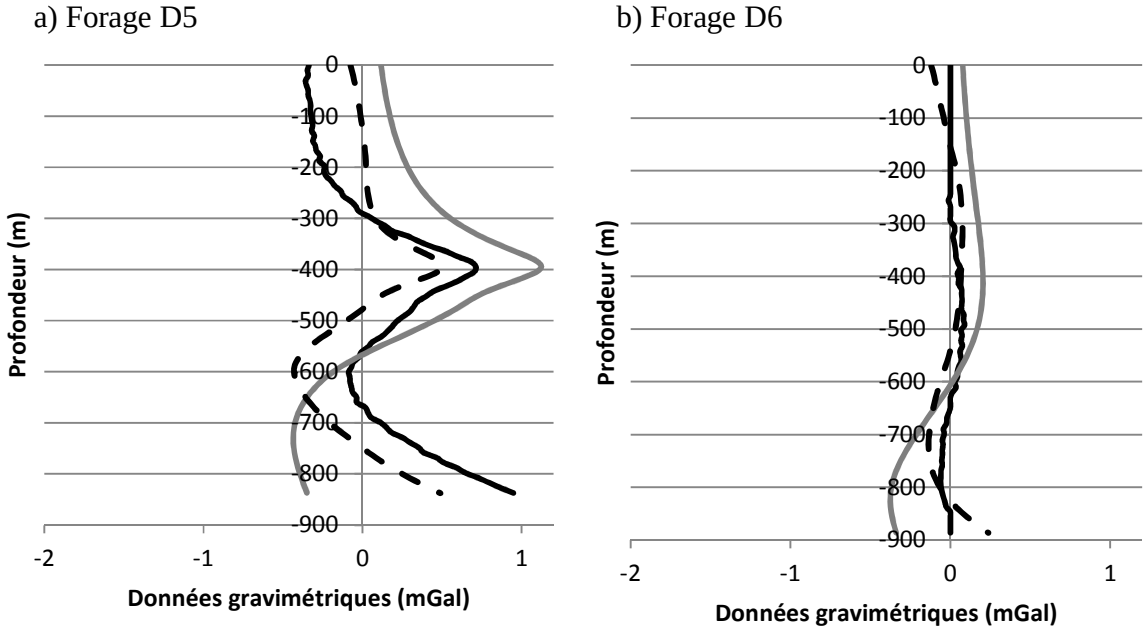


Figure 4.44 : Comparaison des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire (noir), par ondelettes (pointillé) et les réponses gravimétriques du gisement (gris). a) Forage D5, b) Forage D6

4.4.2 Gradients verticaux des données gravimétriques

Dans cette section, les résultats des inversions obtenus à l'aide des gradients verticaux seront présentés. Les paramètres des modèles de covariance utilisés lors de l'inversion des données sont présentés dans le tableau 4.11. La méthode décrite à la section 3.3.3.1 Modèle de covariance; Graphique V-V (V-V plot) a été utilisée pour calculer ces paramètres. Le modèle initial utilisé est présenté dans le tableau suivant. Ce modèle a été choisi d'après les modèles de covariance précédents.

Tableau 4.10 : Modèle de covariance initial

Forages	Modèle de variogramme	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(kg/m^3)^2$	C $(kg/m^3)^2$
D2, D3,D4	Sphérique	200	20	500	-10	0	0	0.1	1000

Tableau 4.11 : Modèles de covariance (var.: variogramme, sphér.: sphérique)

Forages	Modèle de var.	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(kg/m^3)^2$	C $(kg/m^3)^2$	MAE (kg/m^3)	R
D2, D3,D4	Sphér.	400	100	400	-10	0	0	0.1	500	21	0.32
D2, D3,D4, D5	Sphér.	400	100	400	-10	0	0	0.1	700	22	0.38
D2, D3,D4, D6	Sphér.	400	100	400	-10	0	0	0.1	700	20	0.27
D1, D2, D3	Sphér.	400	50	400	-10	0	0	0.1	1200	21	0.55
D1, D2, D3, D4	Sphér.	300	50	300	-10	0	0	0.1	800	22	0.30
D1, D2, D3, D4, D5	Spher.	400	100	400	-10	0	0	0.1	1200	20	0.45

Pour la détection d'un gisement, l'anomalie du gradient vertical semble bien associée à la réponse du gisement, comme le démontrent les figures 4.37 et 4.38. Cependant, les contrastes de densité calculés à partir de l'inversion des trois forages D2, D3 et D4 (figure 4.45) sont très sous-estimés et une grosse structure peut être observée au bas du modèle. Cette dernière a des contrastes de densité un peu plus petits que ceux de l'anomalie créée par le gisement. Toutefois, elle pourrait créer des difficultés d'interprétation. Cette structure profonde peut être créée par deux phénomènes.

Le premier serait que cette structure profonde soit créée par la régionale. Il se pourrait que la réponse des structures situées en profondeur n'ait pas été totalement filtrée. Ce serait ce résidu de réponse qui crée la structure profonde observée sur les résultats d'inversion.

Sinon, elle est peut-être due au fait que les forages ne vont pas assez profondément et que la réponse du gisement ne soit pas complètement visible sur les forages. Cette troncation des données pourrait créer des artéfacts sur les résultats d'inversion et faire apparaitre cette structure profonde. En allongeant les forages (figure 4.46), cette structure profonde n'est plus observée. Cependant, les contrastes de densité calculés sont beaucoup plus faibles.

En ajoutant le forage D5 au sud du gisement pour que ceux-ci l'entourent (figure 4.47), la structure créée par le gisement est plus grande, ses contrastes de densité sont plus élevés et la forme est plus représentative de la réelle. Lorsque le forage D6 est ajouté au nord du gisement (figure 4.48), une autre structure peut être observée au nord du gisement. Comme dans le cas homogène, cette structure est créée par la réponse gravimétrique du forage D6 (figure 4.38b) et par l'effet de lissage. Cependant, cette structure a des contrastes de densité plus faibles que celle créée par le gisement, et puisque l'un des forages l'intercepte, elle peut facilement être ignorée.

Comme pour les résultats obtenus à la section 4.1.2, une structure de contraste de densité négatif peut être observée sous le gisement dans le cas où les forages D2, D3 et D4 sont utilisés et celui où les forages D2, D3, D4 et D6 sont utilisés. Lorsque les forages entourent le gisement, les contrastes de densité de cette structure sont beaucoup plus près du contraste de densité moyen du milieu homogène encaissant.

Lorsque des contraintes sont ajoutées (figure 4.49), il n'y a pas beaucoup de changements. Les mêmes structures peuvent être observées, mais les contrastes de densité calculés sont un peu plus élevés.

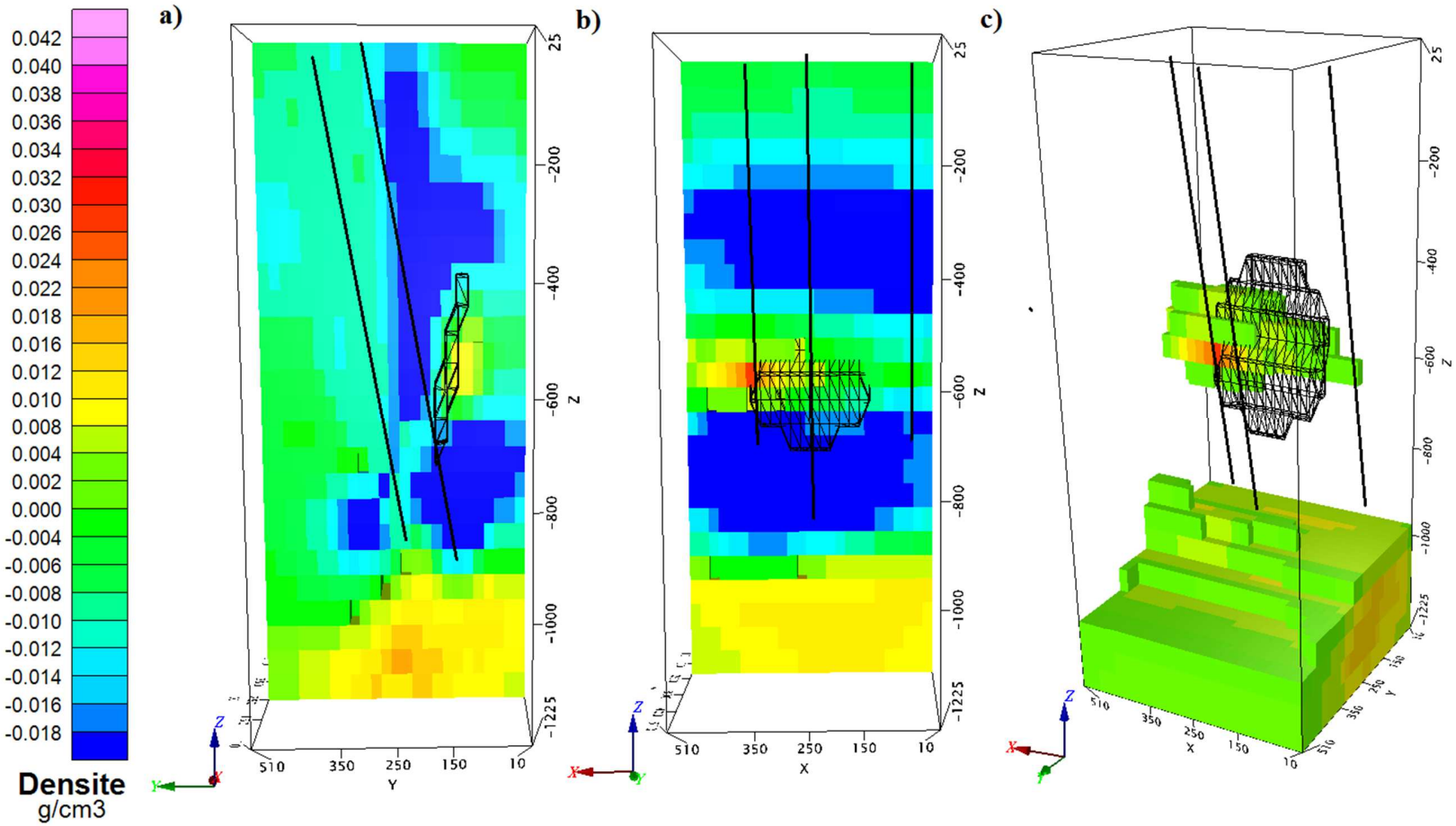


Figure 4.45 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux en forages de D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=350m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.0 g/cm^3

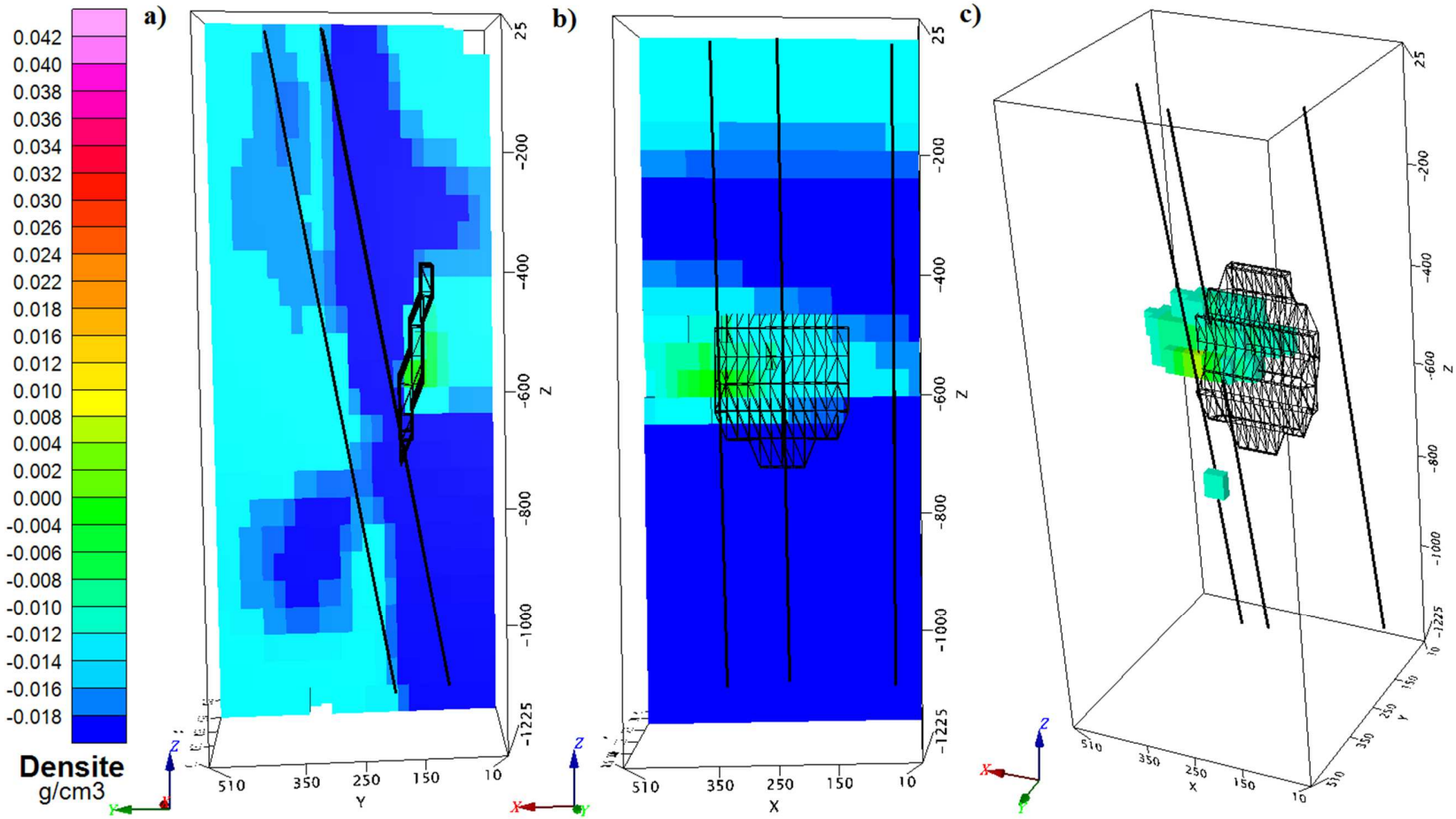


Figure 4.46 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux en forages de D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire. Les forages sont en noir et sont plus longs que l'inversion précédente. a) Section à x=350m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.0 g/cm^3

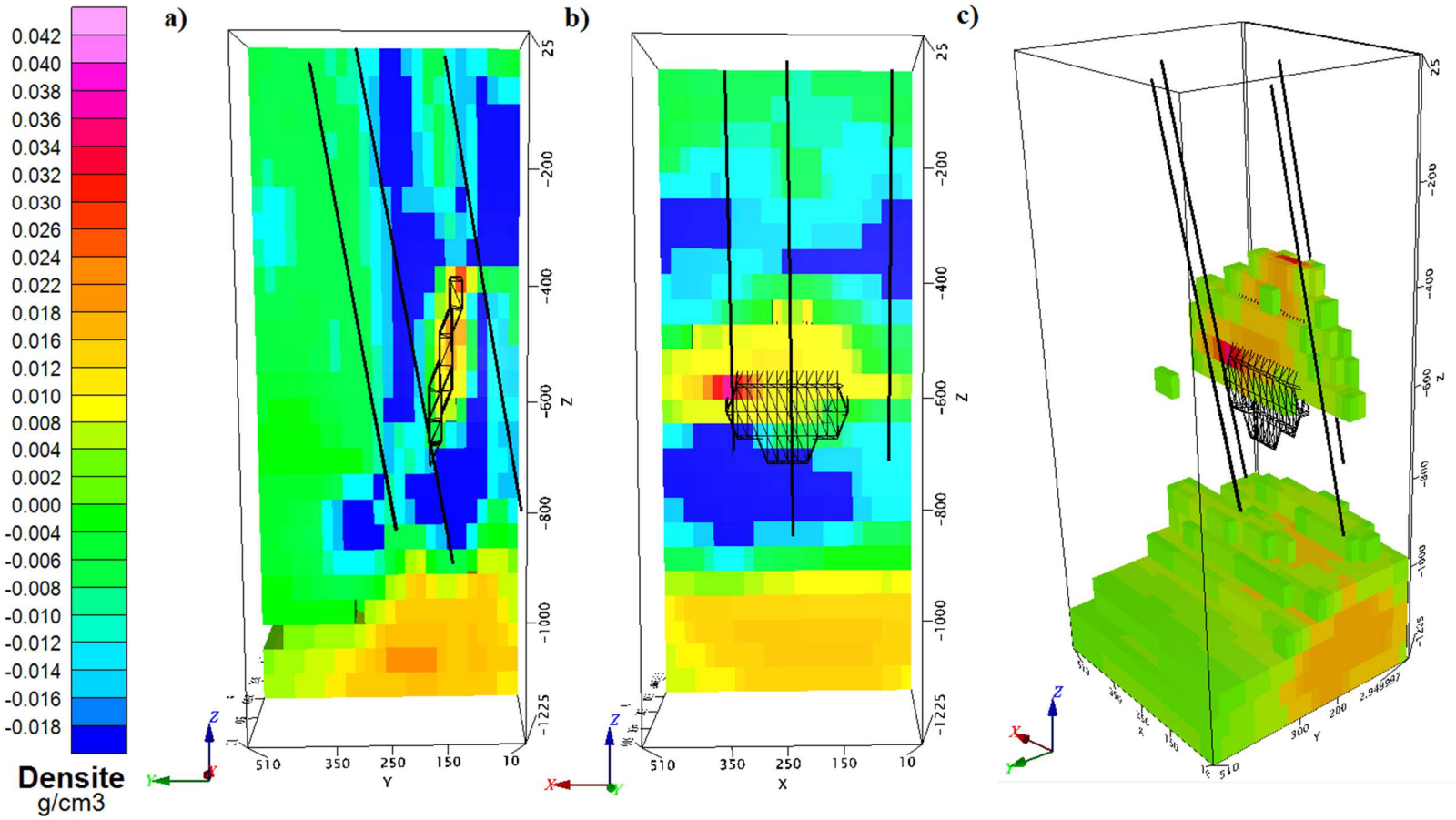


Figure 4.47 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux en forages de D2, D3, D4 et D5. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.0 g/cm^3

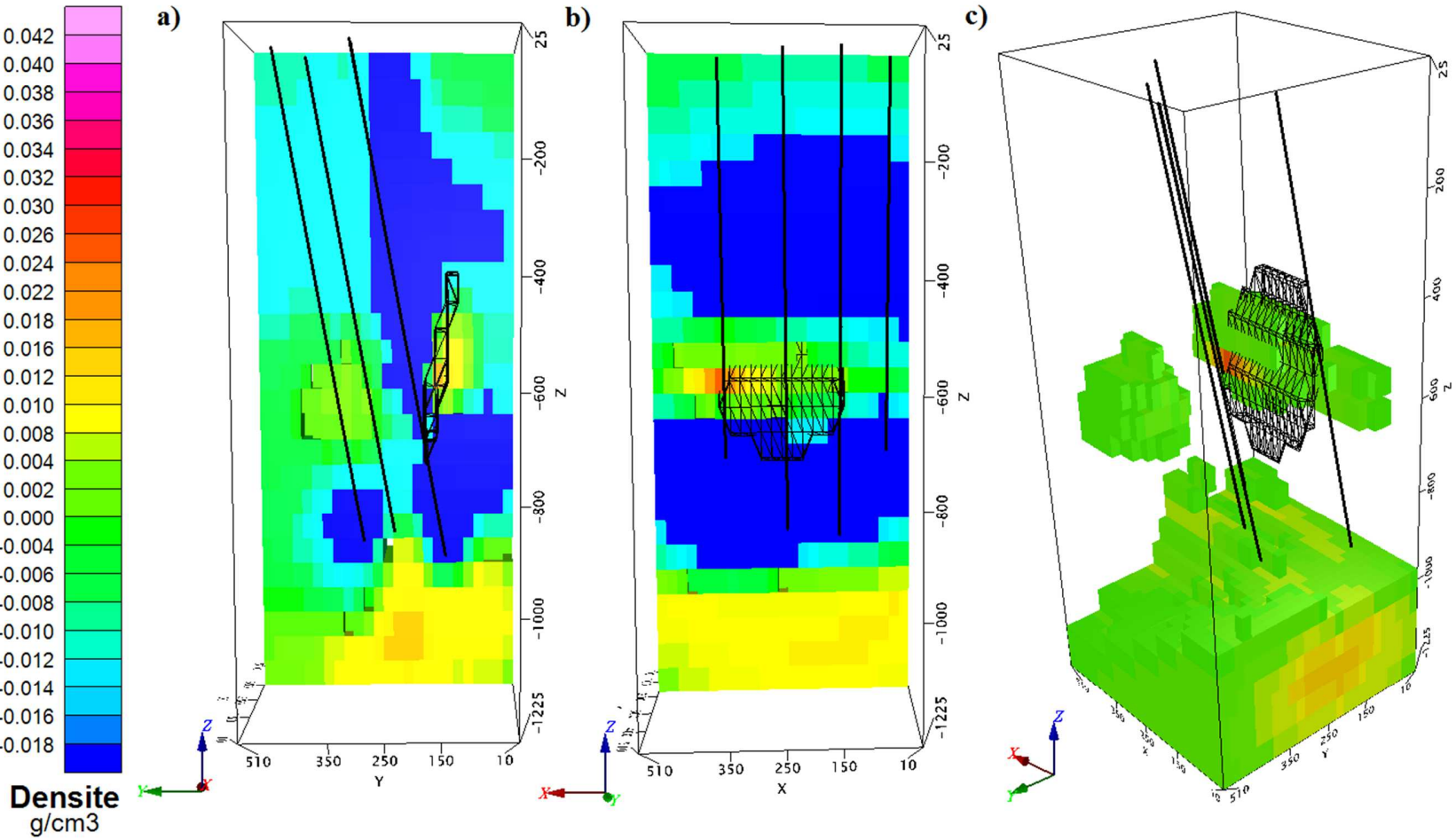


Figure 4.48 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux en forages de D2, D3, D4 et D6. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=350m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.0 g/cm^3

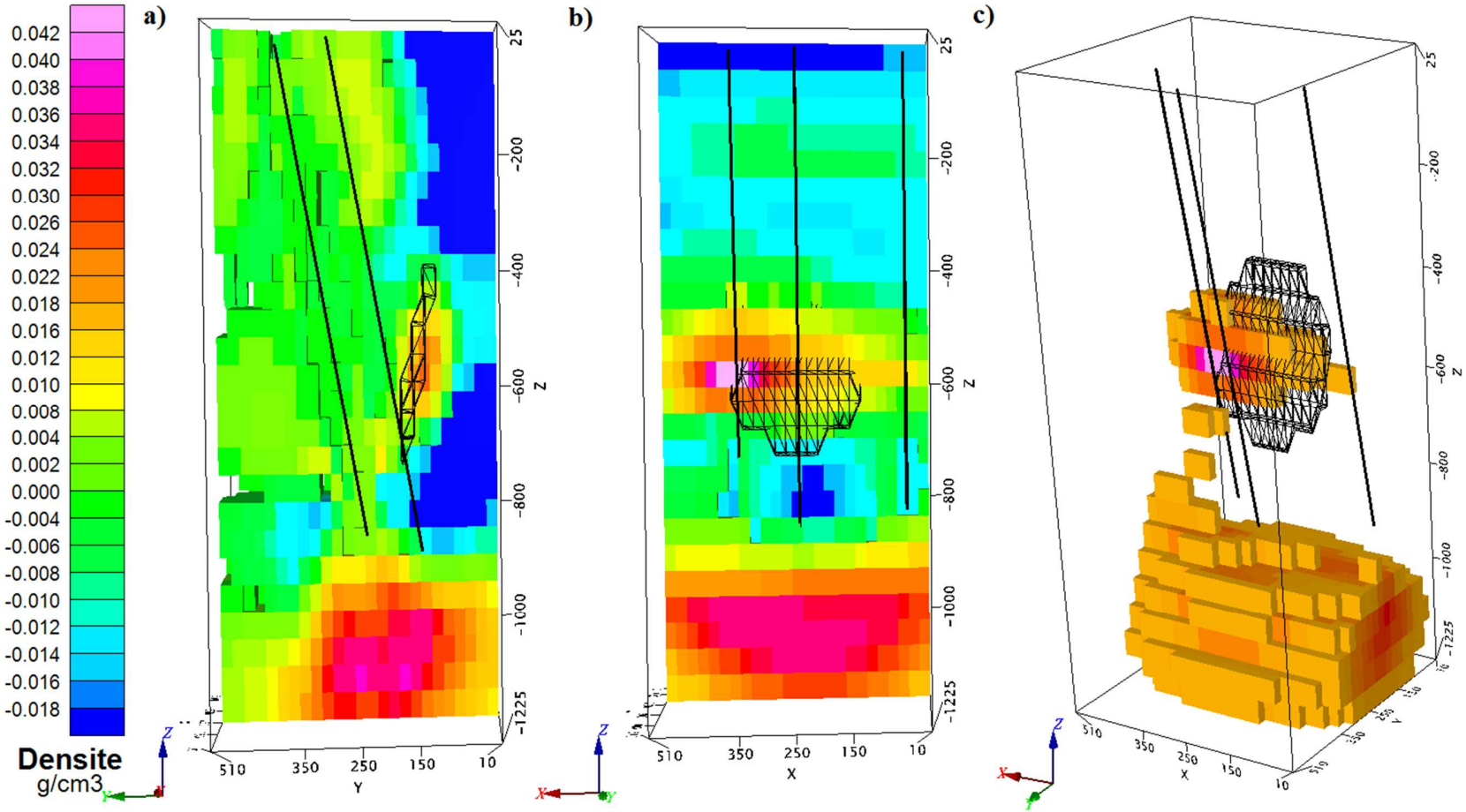


Figure 4.49 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux en forages de D2, D3 et D4. Des contraintes de densités fixes ont été ajoutées le long des forages. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=350m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.015 g/cm^3

Lors de la caractérisation du gisement, les contrastes de densité calculés à l'aide des gradients verticaux sont sous-estimés (figures 4.50 à 4.52). Cependant, ils sont mieux estimés que ceux lorsqu'aucun forage n'intercepte le gisement (figures 4.45 à 4.48). Deux structures de contrastes de densité positifs peuvent être observées : une structure située près du gisement et une deuxième située directement sous le gisement. Cette dernière apparaît à cause du forage D1. Sur les gradients verticaux de ce forage, l'anomalie due à l'interception du forage est située entre 700m et 800m de profondeur et cette dernière crée une anomalie en profondeur sur les inversions. Elle pourrait causer des erreurs d'interprétation en étant considérée comme une lentille située plus profondément. Cependant, son contraste de densité est beaucoup plus faible, expliquant pourquoi une partie de cette structure a été négligée lors du calcul de l'excès de masse. Lorsque des forages plus longs sont utilisés, les résultats ne sont pas améliorés. Les contrastes de densité calculés sont semblables et contrairement au cas de détection, la structure plus en profondeur n'est pas éliminée. Dans le cas de caractérisation, la structure en profondeur est causée par le forage D1. Sur celui-ci (figure 4.37a), il est possible d'observer plusieurs variations. La structure en profondeur est probablement causée par ces variations en profondeur.

Les résultats les plus concluants semblent être obtenus à l'aide de trois forages (figure 4.50). Lorsque des forages sont ajoutés, les contrastes de densité calculés sont un peu plus petits ; les contrastes de densité maximaux calculés à l'aide de trois forages sont de 0.8 g/cm^3 et ceux calculés à l'aide de quatre et cinq forages sont de 0.7 g/cm^3. Par conséquent, les excès de masse calculés à l'aide de trois forages sont un peu plus élevés que ceux calculés à l'aide de quatre et cinq forages même lorsque des contraintes sont ajoutées. Ceci est probablement dû à l'effet de lissage. En utilisant seulement trois forages (D1, D2 et D3), la structure créée par le gisement est moins contrainte et tend à avoir une forme plus étendue.

Lorsqu'un et deux forages sont ajoutés, la structure est plus contrainte et compacte (figures 4.50 et 4.52). Cependant, en théorie, la structure devrait être plus dense, mais il semble que les densités soient distribuées autour du gisement. En moyenne, le même excès de masse devrait être le même pour les trois inversions, mais dans le cas à trois forages, les densités sont plus concentrées près du gisement que dans les cas à quatre et cinq forages. Les structures de contrastes de densités négatifs sont encore visibles sur ces résultats. Les limites de densité ont été choisies d'après la forme et le volume de la structure observée. Comme pour la section 4.3.3, des excès de masse différents ont été choisis pour comparer des volumes semblables.

En ajoutant des contraintes, seulement une structure peut être observée. Cependant, la longueur de cette structure dans l'axe z est plus longue que celle réelle. Aussi, aucun pendage ne peut être observé. Une limite de densité plus élevée a été choisie puisque les contrastes de densité calculés sont plus élevés.

Tableau 4.12 : Excès de masse calculés pour les inversions utilisant les gradients verticaux

Forages	Limite de densité (g/cm^3)	Contraintes	Excès de masse (Mt)
D1, D2, D3	0.15	Non	2.5
D1, D2, D3, D4	0.10	Non	2.2
D1, D2, D3, D4, D5	0.10	Non	2.4
D1, D2, D3	0.35	Oui	3.5
D1, D2, D3, D4	0.35	Oui	3.3
D1, D2, D3, D4, D5	0.35	Oui	3.4

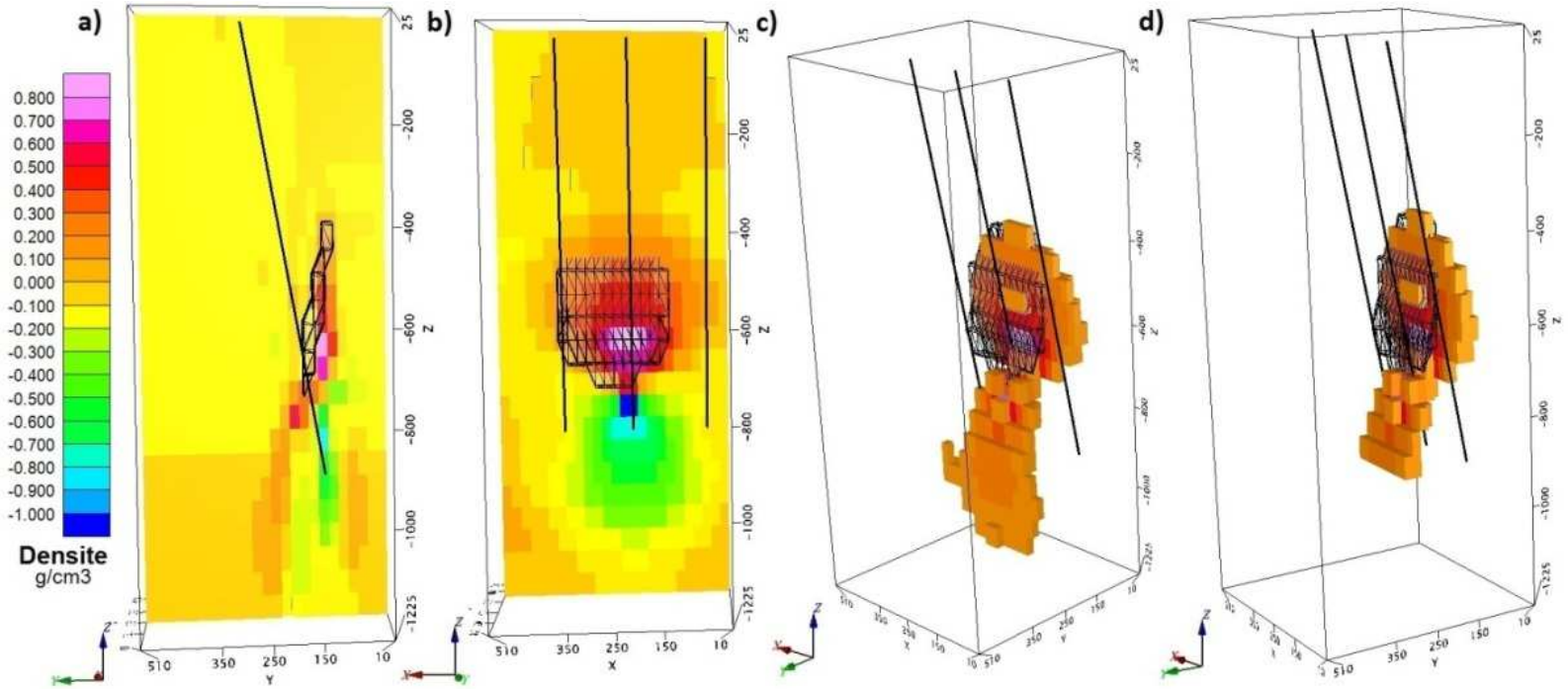


Figure 4.50 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux des forages D1, D2 et D3. Le gisement est représenté en structure filaire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=150m, c) Densités supérieures à ρ=0.15 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.15 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 2.5 Mt

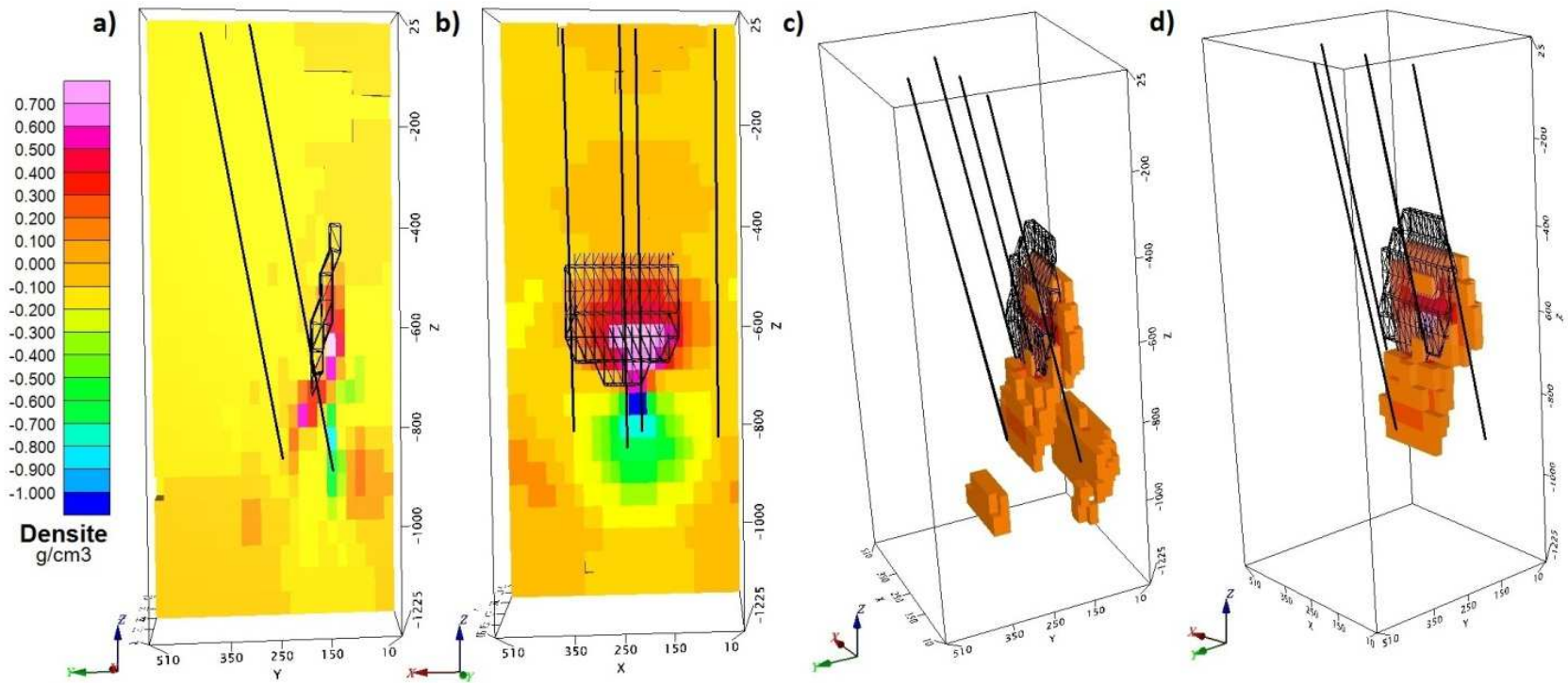


Figure 4.51 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux des forages D1, D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=150m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 2.2 Mt

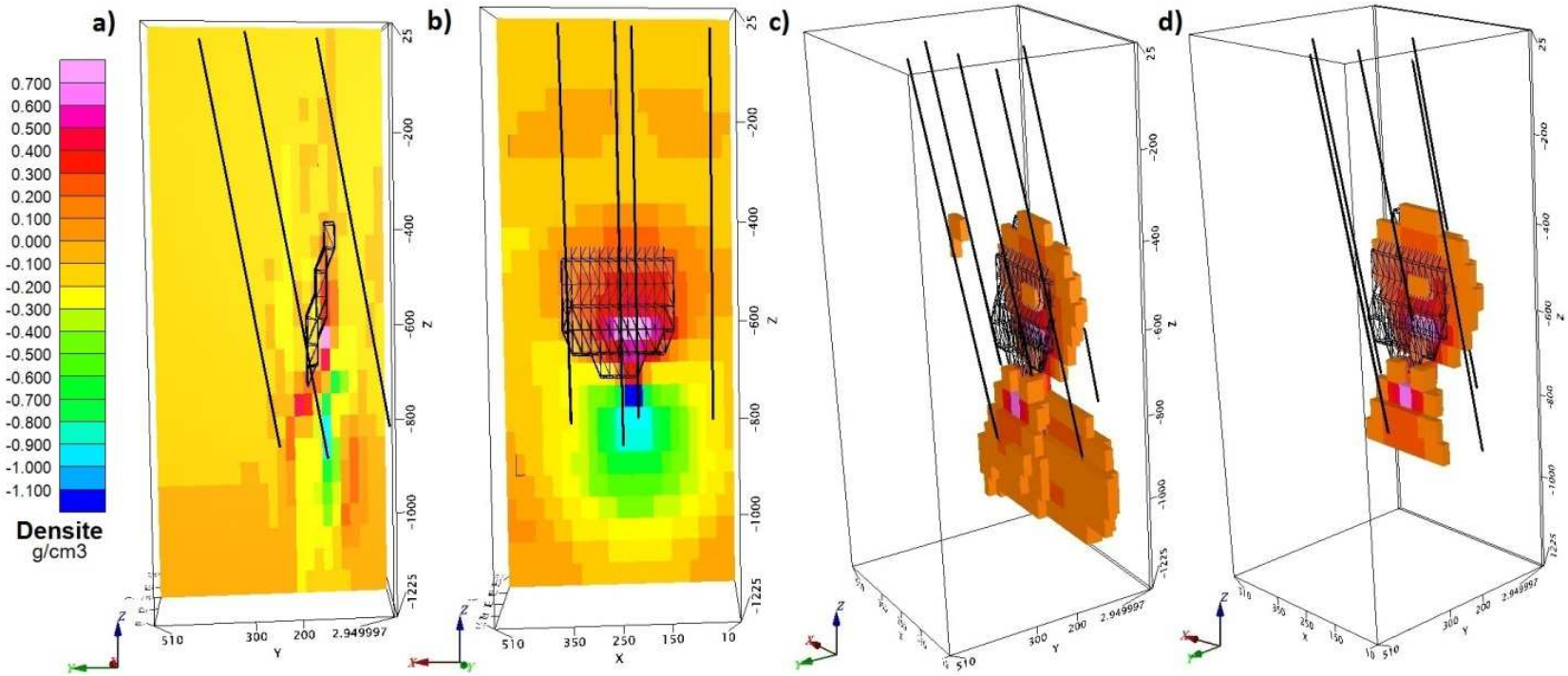


Figure 4.52 : Modèle de densité de l'inversion des gradients verticaux des forages D1, D2, D3, D4 et D5. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=150m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 2.4 Mt

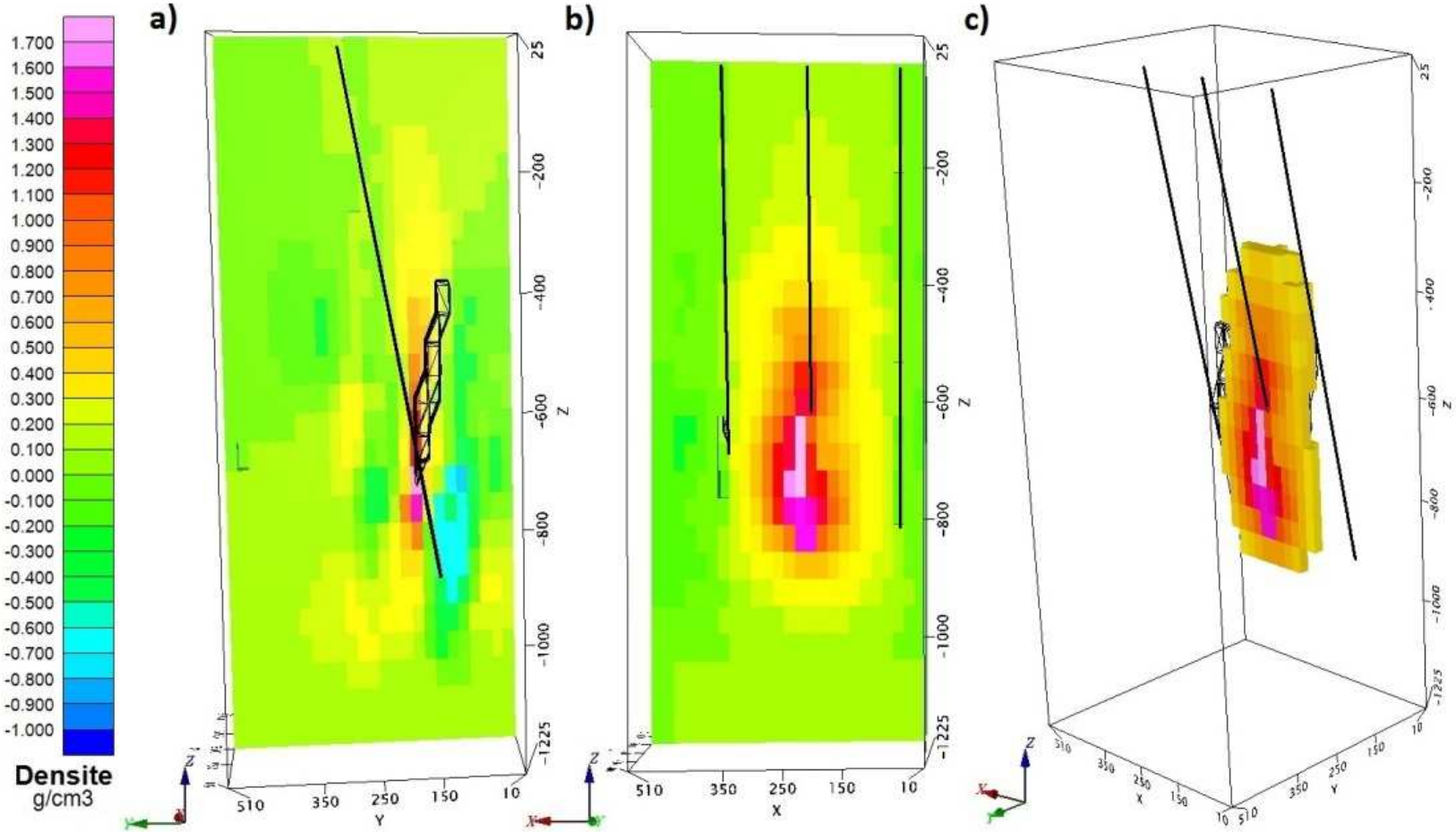


Figure 4.53 : Modèle de densité de l'inversion contrainte des gradients verticaux des forages D1, D2 et D3. Le gisement est représenté en structure filaire noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=150m, c) Densités supérieures à ρ=0.35 g/cm^3

4.4.3 Filtre non-linéaire

Dans cette section, les résultats des inversions obtenus à l'aide des données traitées par filtre non-linéaire seront présentés. Les paramètres des modèles de covariance utilisés lors de l'inversion des données sont présentés dans le tableau 4.14. La méthode décrite à la section 3.3.3.1 Modèle de covariance; Graphique V-V (V-V plot) a été utilisée pour calculer ces paramètres. Le modèle initial utilisé est présenté dans le tableau suivant. Ce modèle a été choisi d'après les modèles de covariance précédents.

Tableau 4.13 : Modèle de covariance initial

Modèle de variogramme	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(g/cm^3)^2$	C $(g/cm^3)^2$
Sphérique	200	20	500	-10	0	0	1e-03	1

Tableau 4.14 : Modèles de covariance (var.: variogramme, spher.: sphérique)

Forages	Modèle de var.	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(g/cm^3)^2$	C $(g/cm^3)^2$	MAE (g/cm^3)	R
D2,D3, D4	Sphér.	400	40	400	-10	0	0	1e-06	5	6.7e-06	0.43
D2,D3, D4, D5	Sphér.	400	40	400	-10	0	0	1e-06	5	6.7e-06	0.38
D2,D3, D4, D6	Sphér.	400	40	400	-10	0	0	1e-06	5	6.7e-06	0.36
D1, D2, D3	Sphér.	400	40	400	-10	0	0	1e-06	5	7.9e-08	0.52
D1, D2, D3, D4	Sphér.	400	40	400	-10	0	0	1e-06	5	8.0e-08	0.42
D1, D2, D3, D3, D5	Sphér.	400	40	400	-10	0	0	1e-06	5	7.6e-08	0.47

Lorsqu'un filtre non-linéaire est appliqué aux données, l'inversion en forage détecte quelques structures. Les contrastes de densité sont sous-estimés lorsqu'aucun forage n'intercepte pas le gisement, mais contrairement au gradient vertical, ceux-ci sont plus élevés et multipliés par un

facteur de dix. Deux structures de contrastes de densité positifs sont observées sur les résultats de l'inversion en utilisant les trois forages D2, D3 et D4 (figure 4.54). Une structure est située près du gisement et la deuxième est située plus en profondeur. Celle située près du gisement a des contrastes de densité plus faibles que celle en profondeur, ce qui peut être trompeur lors de l'interprétation. Aussi, la structure créée par le gisement est située un peu plus à l'est que celui-ci. Une structure de contraste de densité négatif peut aussi être observée sous le gisement.

Les mêmes observations peuvent être faites en ajoutant le forage D4 au nord du gisement (figure 4.56). En ajoutant le forage D5 au sud du gisement (figure 4.55), plusieurs petites structures peuvent être observées. Cependant, leurs contrastes de densités sont plus petits que ceux des structures situées près du gisement, à l'exception de celle située en profondeur. La structure située plus en profondeur est probablement causée parce que la réponse régionale n'a pas été totalement éliminée. En ajoutant des contraintes, les résultats ne s'améliorent pas beaucoup. Des contrastes de densité plus élevés sont calculés, mais cette augmentation est négligeable. Puisqu'aucun forage n'intercepte le gisement, les densités fixes contraignent les prismes situées directement autour des forages. Toutefois, cette information ne semble pas suffisante pour bien détecter le gisement. Il faudrait plus de contraintes de densité fixe ou de gradient ou des contraintes situées plus près du gisement.

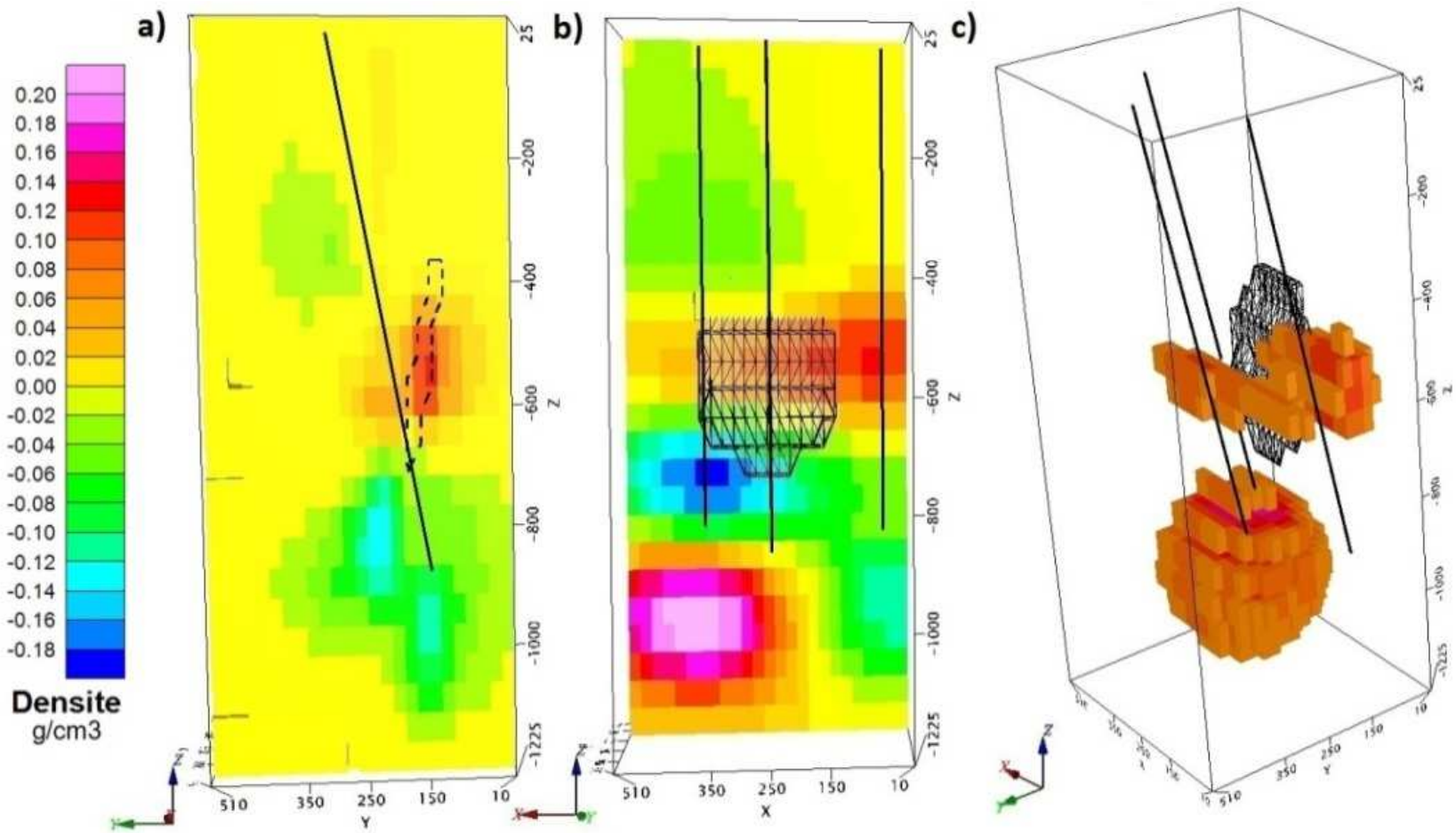


Figure 4.54 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire des forages D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=50m, b) Section à y=190m, c) Densités supérieures à ρ=0.07 g/cm^3

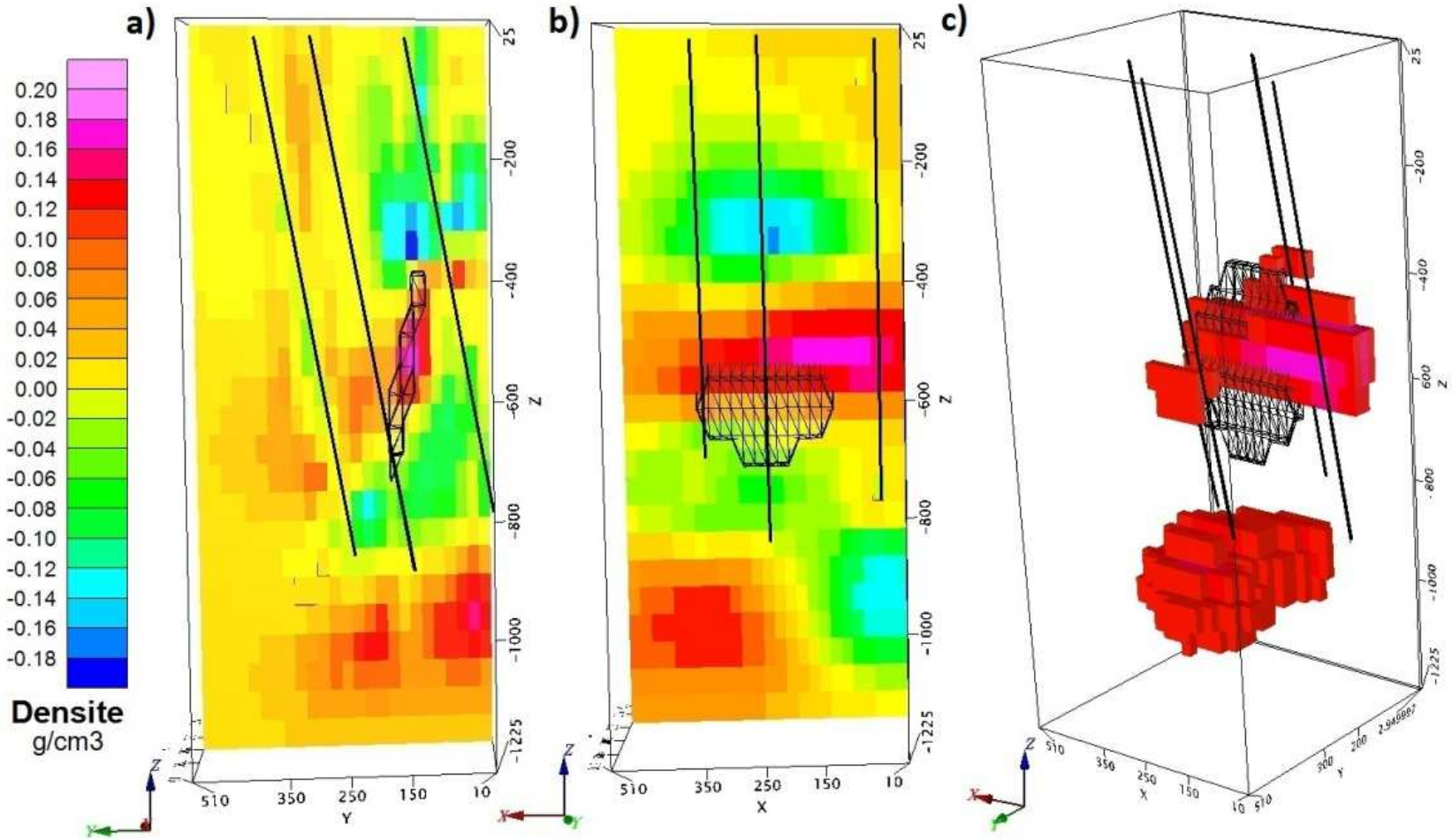


Figure 4.55 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire des forages D2, D3, D4 et D5. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3

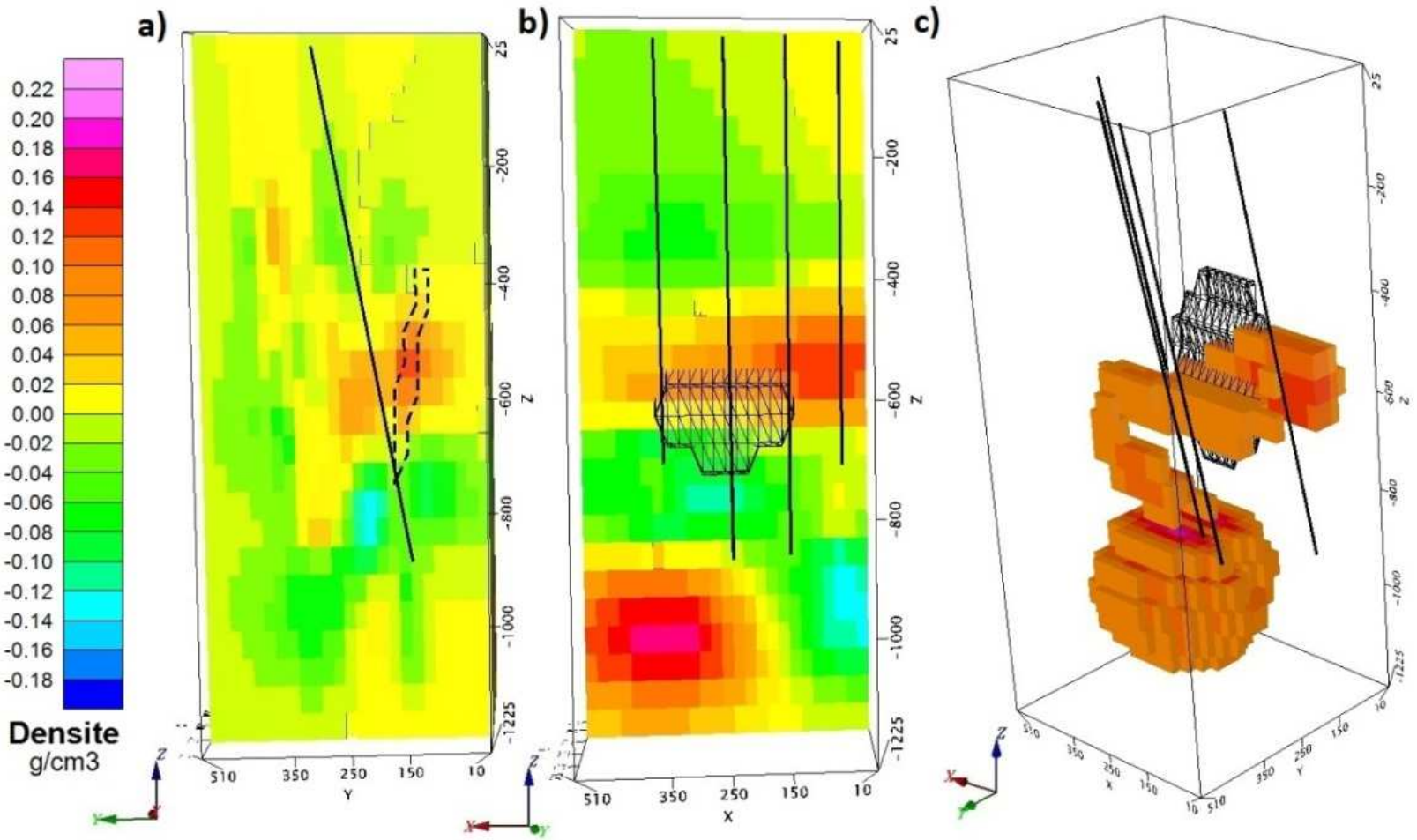


Figure 4.56 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire des forages D2, D3, D4 et D6. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=50m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.08 g/cm^3

Lors de la caractérisation du gisement, les contrastes de densité calculés à l'aide du filtre non-linéaire de Naudy sont sous-estimés. Une structure de contraste de densité positif peut être observée en profondeur, mais elle peut être ignorée puisque les contrastes de densités maximaux calculés sont plus petits que ceux de la structure située près du gisement. Comme pour les résultats précédents, elle est probablement créée par la réponse régionale qui n'a pas totalement été éliminée lors du traitement.

Aussi, lorsque les forages n'entourent pas le gisement (figure 4.58), la structure de contraste de densité négatif peut encore être observée. Puisque les contrastes de densités sont sous-estimés, les excès de masse sont par conséquent sous-estimés. En utilisant une limite de densité de 0.20 g/cm^3, la forme du gisement et le pendage de celui-ci sont bien retrouvés.

En ajoutant des contraintes, les contrastes de densité augmentent, mais une structure de plus faible densité peut être observée au-dessus de la structure créée par le gisement. Si le gisement est bien connu, il est facile d'ignorer cette structure (figure 4.59). Dans les calculs d'excès de masse, cette structure n'a pas été prise en compte. Si tous les prismes ayant un contraste de densité plus élevé que le seuil étaient inclus dans le calcul d'excès de masse, ce dernier serait surestimé. En ignorant cette structure, les excès de masse calculés sont plus près de l'excès de masse réel de 5.8 Mt. La limite de densité de 0.15 g/cm^3 a été choisie parce qu'elle était un bon compromis entre les structures aberrantes observées et le volume de la structure située près du gisement.

Une limite de densité plus élevée a été choisie lorsque cinq forages sont utilisés puisque les contrastes de densité calculés sont plus élevés et par conséquent, l'excès de masse calculé et le volume de la structure située près du gisement sont plus élevés. En utilisant cinq forages (D1, D2, D3, D4 et D5) et des contraintes de densité fixe le long des forages, cet excès de masse est calculé précisément.

Tableau 4.15 : Excès de masse calculés pour les inversions utilisant les résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire

Forages	Limite de densité (g/cm^3)	Contraintes	Excès de masse (Mt)
D1, D2, D3	0.20	Non	2.0
D1, D2, D3, D4	0.20	Non	2.8
D1, D2, D3, D4, D5	0.20	Non	3.2
D1, D2, D3	0.15	Oui	4.4
D1, D2, D3, D4	0.15	Oui	4.4
D1, D2, D3, D4, D5	0.25	Oui	5.8

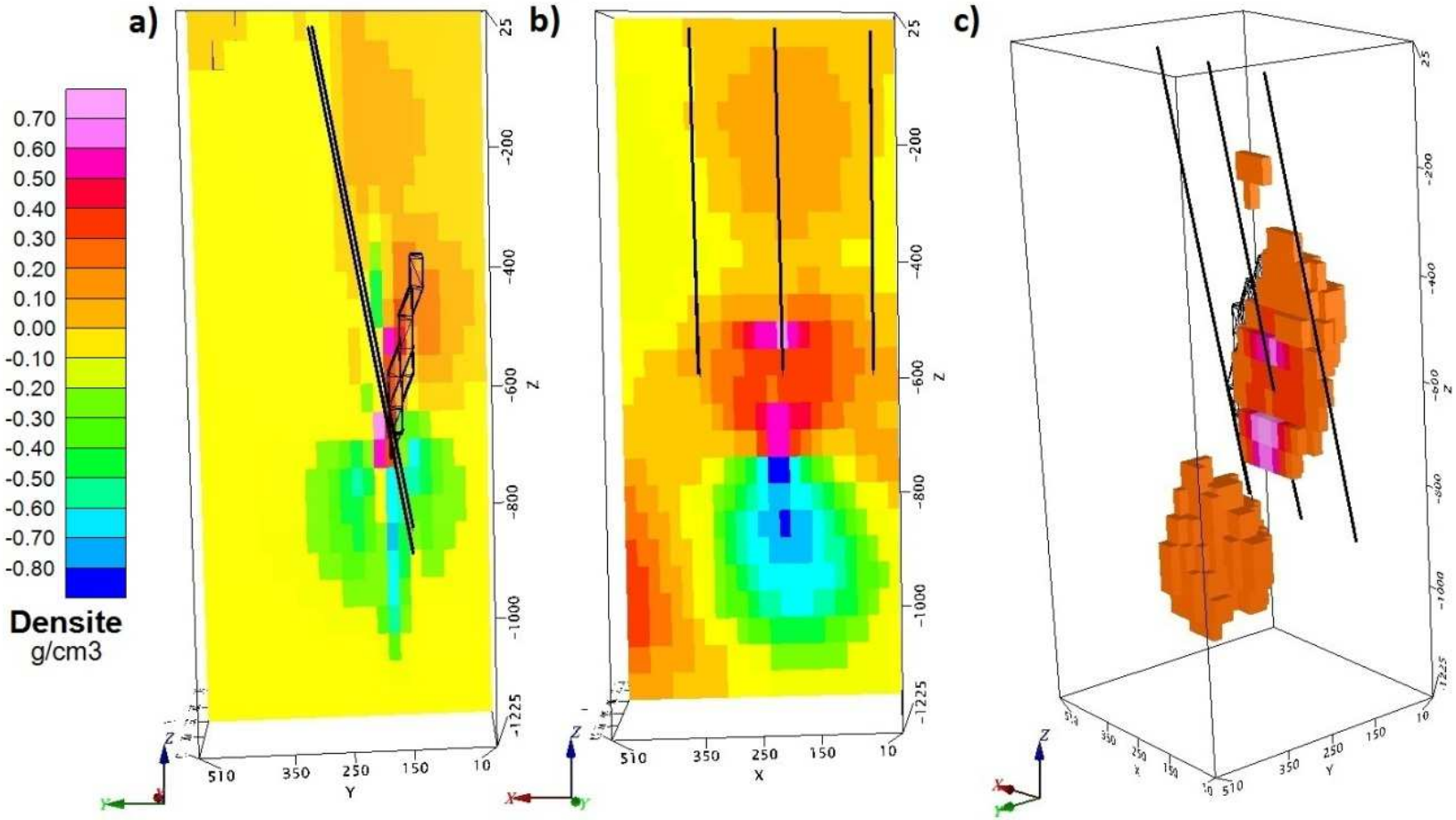


Figure 4.57 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire des forages D1, D2, et D3. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=190m, c) Densités supérieures à ρ=0.2 g/cm^3. L'excès de masse estimé est de 2.0Mt

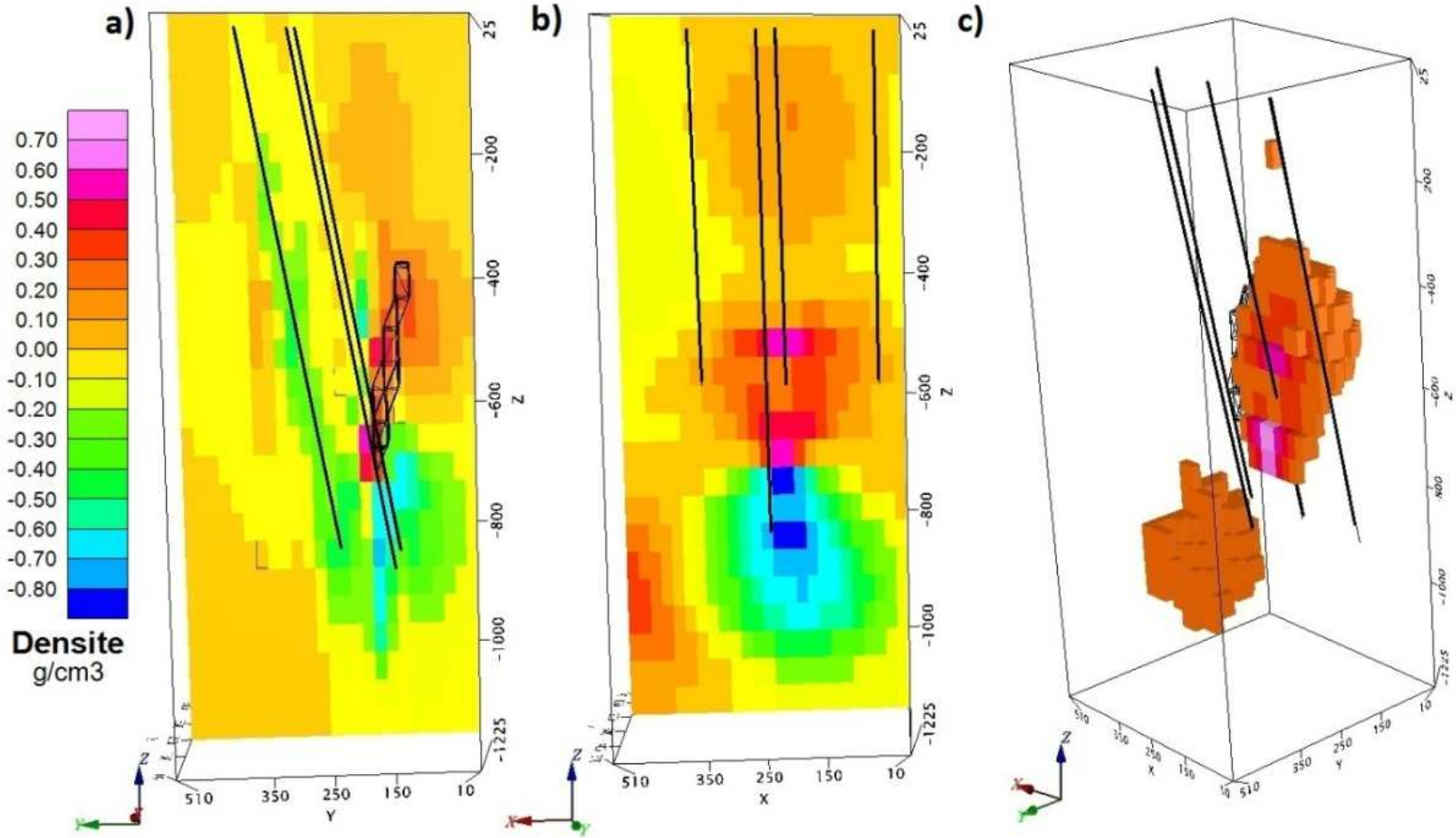


Figure 4.58 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire des forages D1, D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=190m, c) Densités supérieures à ρ=0.3 g/cm^3. L'excès de masse estimé est de 2.8Mt

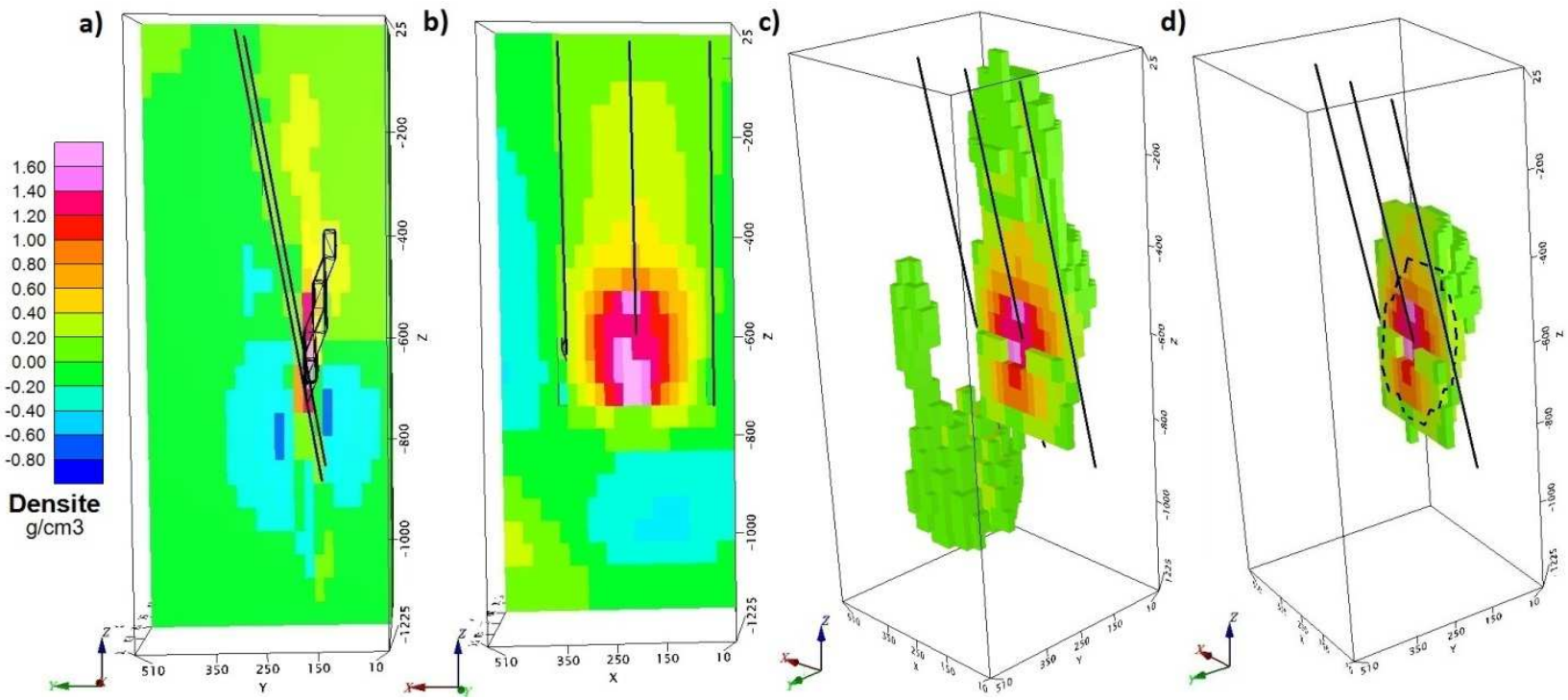


Figure 4.59 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire des forages D1, D2, et D3. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=190m, c) Densités supérieures à ρ=0.15 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.15 g/cm^3 et le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 4.4 Mt

4.4.4 Filtre par ondelettes

Dans cette section, les résultats des inversions obtenus à l'aide des données traitées par filtre par ondelettes seront présentés. Les paramètres des modèles de covariance utilisés lors de l'inversion des données sont présentés dans le tableau 4.17. La méthode décrite à la section 3.3.3.1 a été utilisée pour calculer ces paramètres. Le modèle initial utilisé est présenté dans le tableau suivant. Ce modèle a été choisi d'après les modèles de covariance précédents.

Tableau 4.16 : Modèle de covariance initial

Modèle de variogramme	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(kg/m^3)^2$	C $(kg/m^3)^2$
Sphérique	200	20	500	-10	0	0	1	1000

Tableau 4.17 : Modèles de covariance (var.: variogramme, sphér.: sphérique)

Forages	Modèle de var.	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(kg/m^3)^2$	C $(kg/m^3)^2$	MAE (kg/m^3)	R
D2,D3, D4	Sphér.	200	20	200	-10	0	0	0.1	10000	0.009	0.55
D2,D3, D4, D5	Sphér.	400	50	400	-10	0	0	0.1	8000	0.015	0.47
D2,D3, D4, D6	Sphér.	200	20	200	-10	0	0	0.1	10000	0.007	0.55
D1, D2, D3	Sphér.	200	50	200	-10	0	0	0.1	30000	0.021	0.60
D1, D2, D3, D4	Sphér.	200	50	200	-10	0	0	0.1	30000	0.017	0.56
D1, D2, D3, D3, D5	Sphér.	200	50	200	-10	0	0	0.1	30000	0.016	0.55

Les résultats obtenus à l'aide des résiduelles calculées par ondelettes permettent de localiser le gisement. Il est possible d'observer sur les inversions utilisant les forages D2, D3, D4 (figure 4.60) et D2, D3, D4, D6 (figure 4.61) une structure située près du gisement et quelques petites anomalies de faible contraste de densité. Ces anomalies ont des contrastes de densité tellement faibles qu'elles peuvent être facilement ignorées et ne causeraient aucun problème d'interprétation. Les structures situées près du gisement ont toutefois des contrastes de densité beaucoup plus faibles qu'en réalité. Aussi, la forme de la structure située près du gisement ne représente pas celle d'un disque plat ayant un pendage. Elle a plutôt la forme d'un cylindre horizontal. Même en ajoutant des contraintes (figure 4.63), la forme de la structure ne change pas beaucoup. Toutefois, les contrastes de densité calculés sont un peu plus élevés. Lorsque les forages entourent le gisement (figure 4.62), le nombre de petites structures diminue et la forme du gisement est mieux retrouvée. Cependant, aucun pendage ne peut être observé. Encore une fois, les structures de contrastes de densité négatifs peuvent être observées sur les figures 4.60 et 4.61. Les limites de densité ont été choisies pour bien identifier le gisement et ne pas observer trop d'anomalies aberrantes.

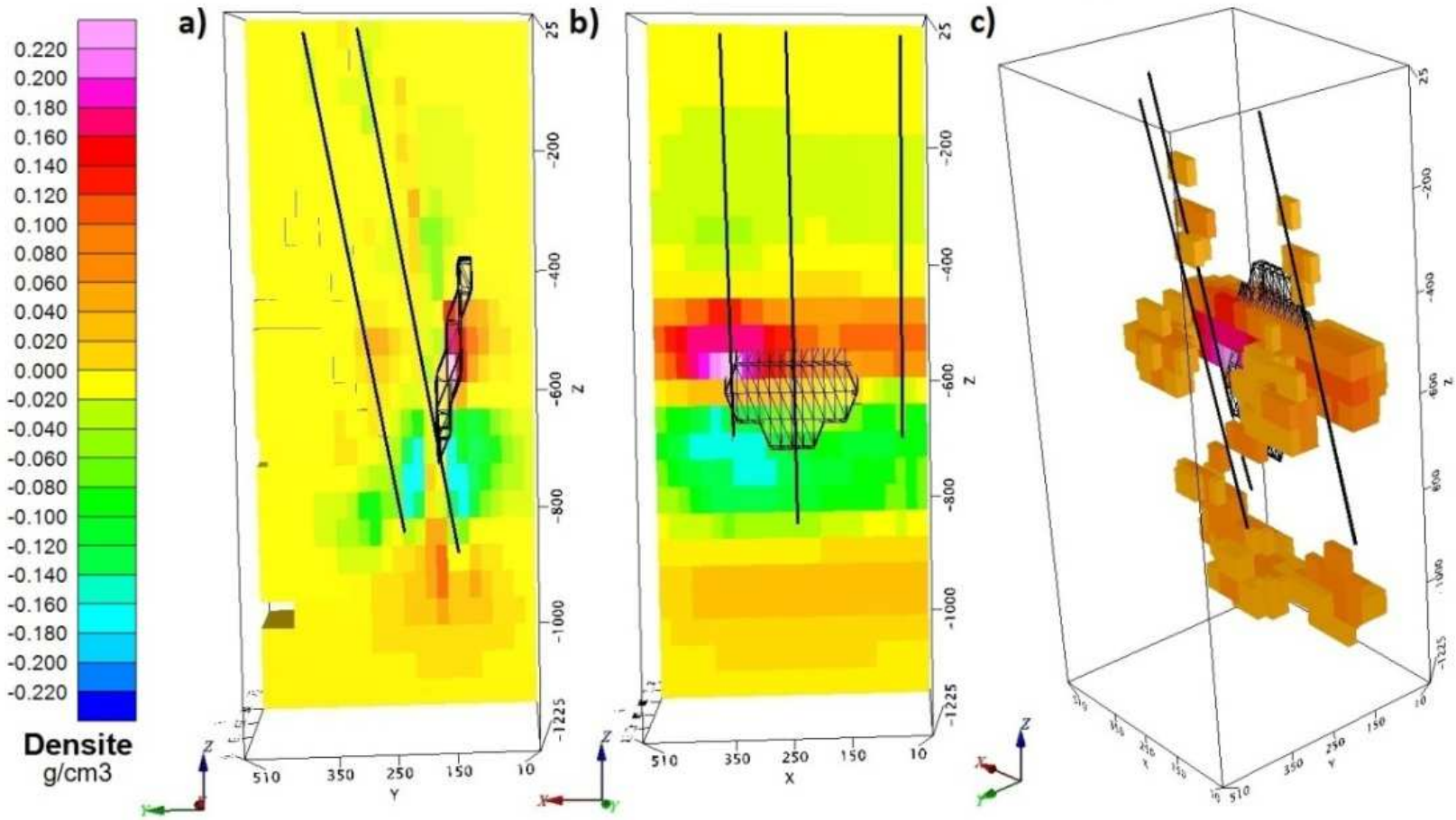


Figure 4.60 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre par ondelettes des forages D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=350m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.05 g/cm^3

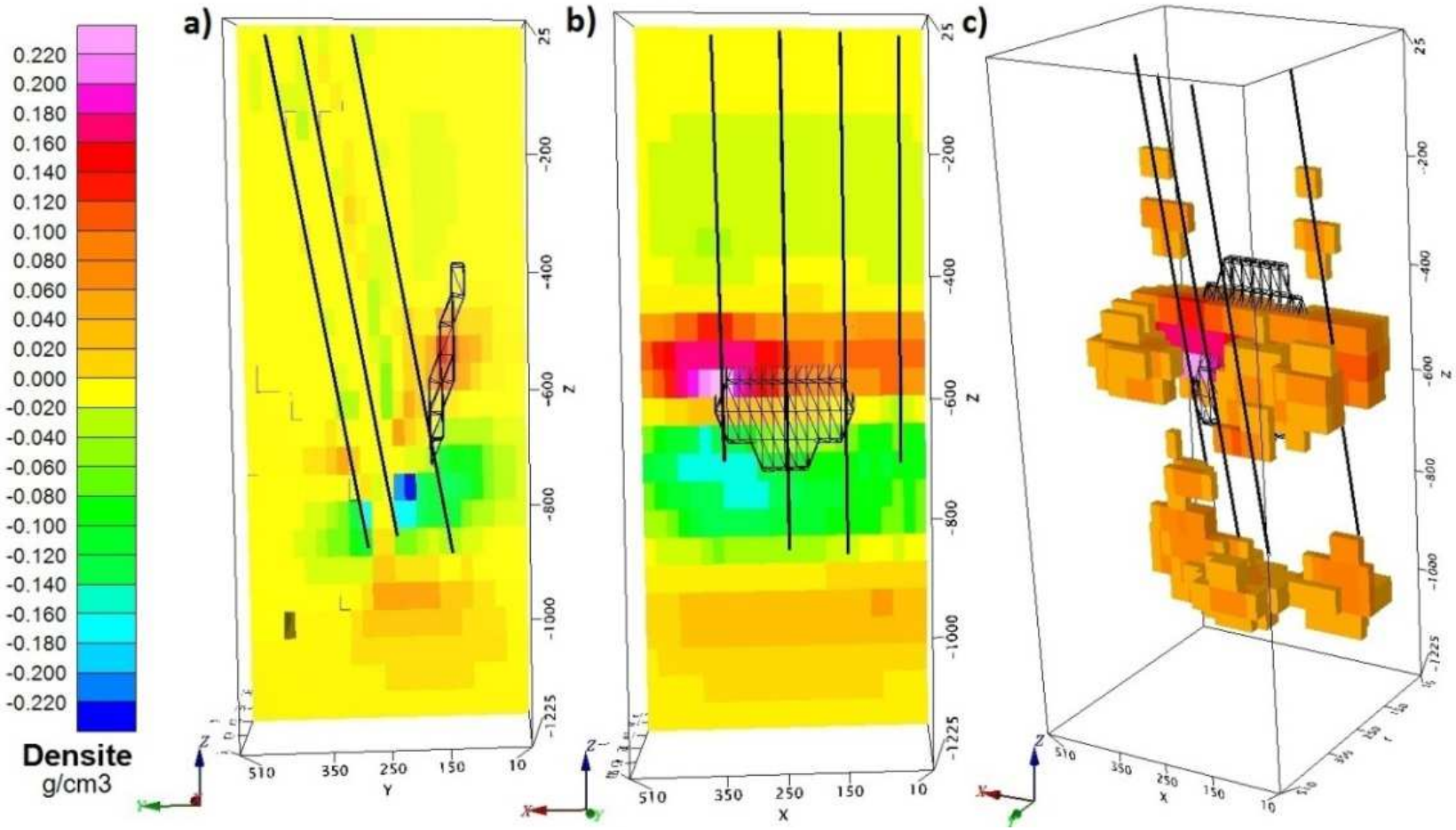


Figure 4.61 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre par ondelettes des forages D2, D3, D4 et D6. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.05 g/cm^3

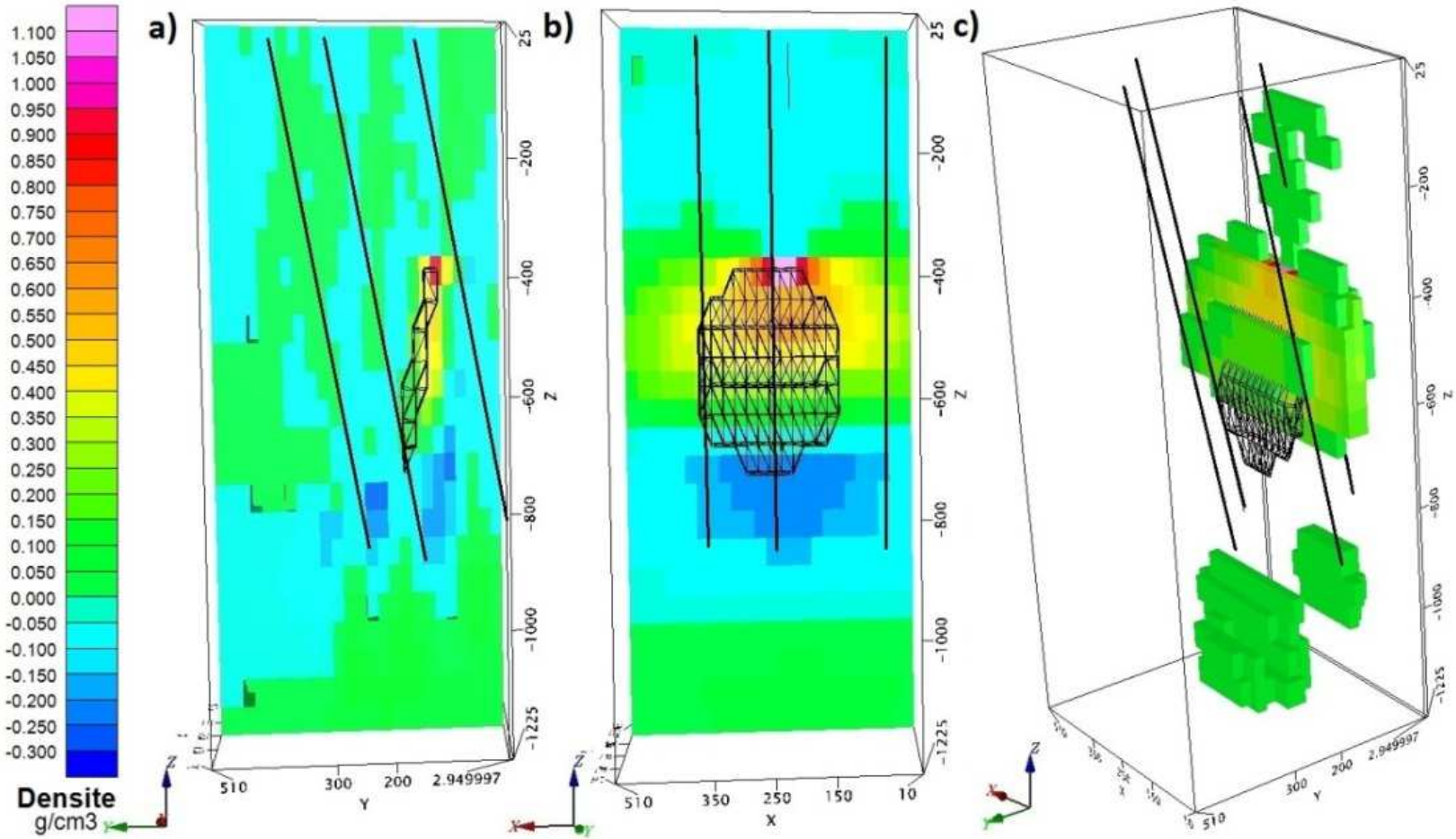


Figure 4.62 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide du filtre par ondelettes des forages D2, D3, D4 et D5. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=130m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3

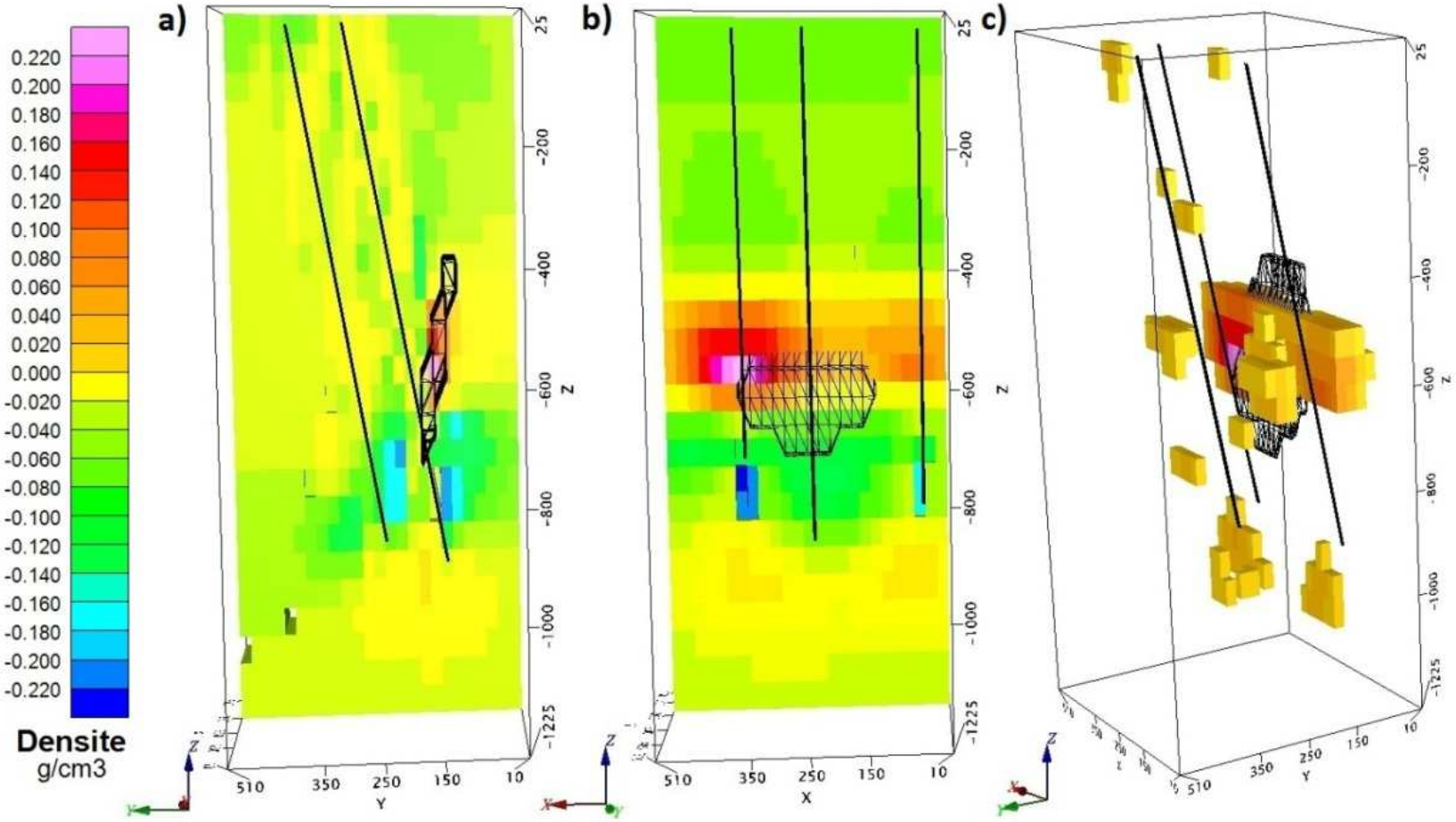


Figure 4.63 : Modèle de densité de l'inversion contrainte des résiduelles calculées à l'aide du filtre par ondelettes des forages D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=350m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.07 g/cm^3

Dans le cas où la gravimétrie est utilisée pour la caractérisation d'un gisement, les résultats obtenus à l'aide d'un filtre par ondelettes sont semblables à ceux obtenus à l'aide d'un filtre non-linéaire. Une structure est facilement observée près du gisement ainsi que quelques petites structures de contraste de densité positif. Comme dans le cas lors de la détection, ces structures ont des contrastes de densité suffisamment faibles pour facilement les ignorer. Aussi, les structures de contraste de densité négatif peuvent être observées sous le gisement sur les figures 4.64 et 4.65.

Des contrastes de densité négatifs peuvent être observés sur les autres inversions, mais ils sont plus élevés et mieux distribués. Lors du calcul des excès de masse, les petites structures ont été éliminées et seulement celles situées près du gisement ont été utilisées pour les calculs. Lorsqu'aucune contrainte n'est utilisée, les contrastes de densité sont sous-estimés et le haut du gisement n'est pas perceptible pour les inversions utilisant trois et quatre forages. Cependant, il est possible de retrouver le pendage du gisement sur toutes les inversions. En utilisant des contraintes de densités fixes le long des forages, les contrastes de densité calculés sont plus près de la réalité.

La forme du gisement est bien retrouvée, mais les excès de masse sont sous-estimés. À cause de l'effet de lissage des inversions, les contrastes de densité au centre du gisement sont bien estimés, mais un gradient se forme au bord du gisement. Ceci diminue les contrastes de densité en périphérie du gisement et crée les petites structures observées. Par conséquent, cela diminue l'excès de masse calculé. Les limites de densité ont été choisies pour bien observer la forme et le pendage de la structure près du gisement et pour que les autres structures ne soient pas trop imposantes. Les limites de densité diffèrent d'une inversion à l'autre pour pouvoir comparer des volumes similaires.

Tableau 4.18 : Excès de masse calculés pour les inversions utilisant les résiduelles calculées à l'aide D'ondelettes

Forages	Limite de densité (g/cm^3)	Contraintes	Excès de masse (Mt)
D1, D2, D3	0.10	Non	3.9
D1, D2, D3, D4	0.10	Non	2.8
D1, D2, D3, D4, D5	0.2	Non	3.7
D1, D2, D3	0.10	Oui	4.1
D1, D2, D3, D4	0.15	Oui	4.3
D1, D2, D3, D4, D5	0.15	Oui	4.6

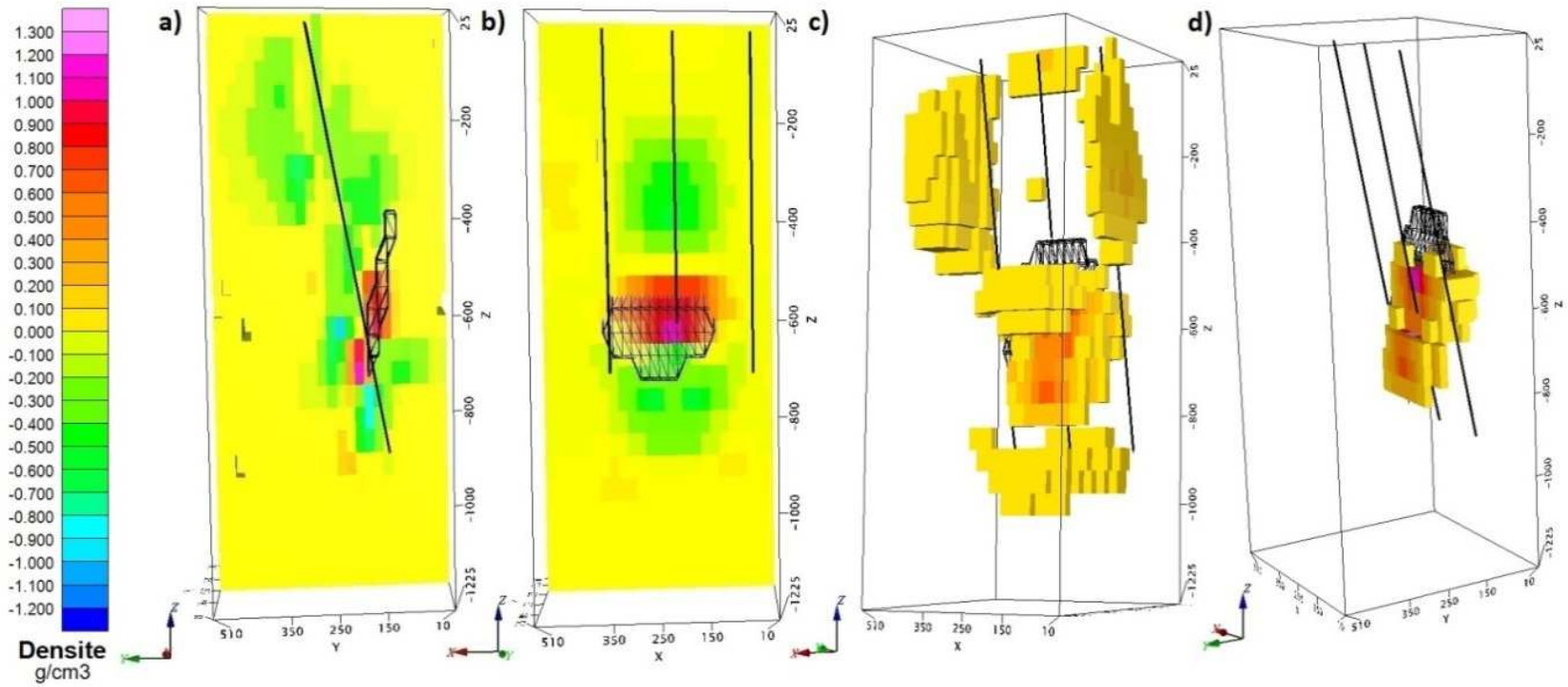


Figure 4.64 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide d'ondelettes des forages D1, D2 et D3. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 3.9 Mt

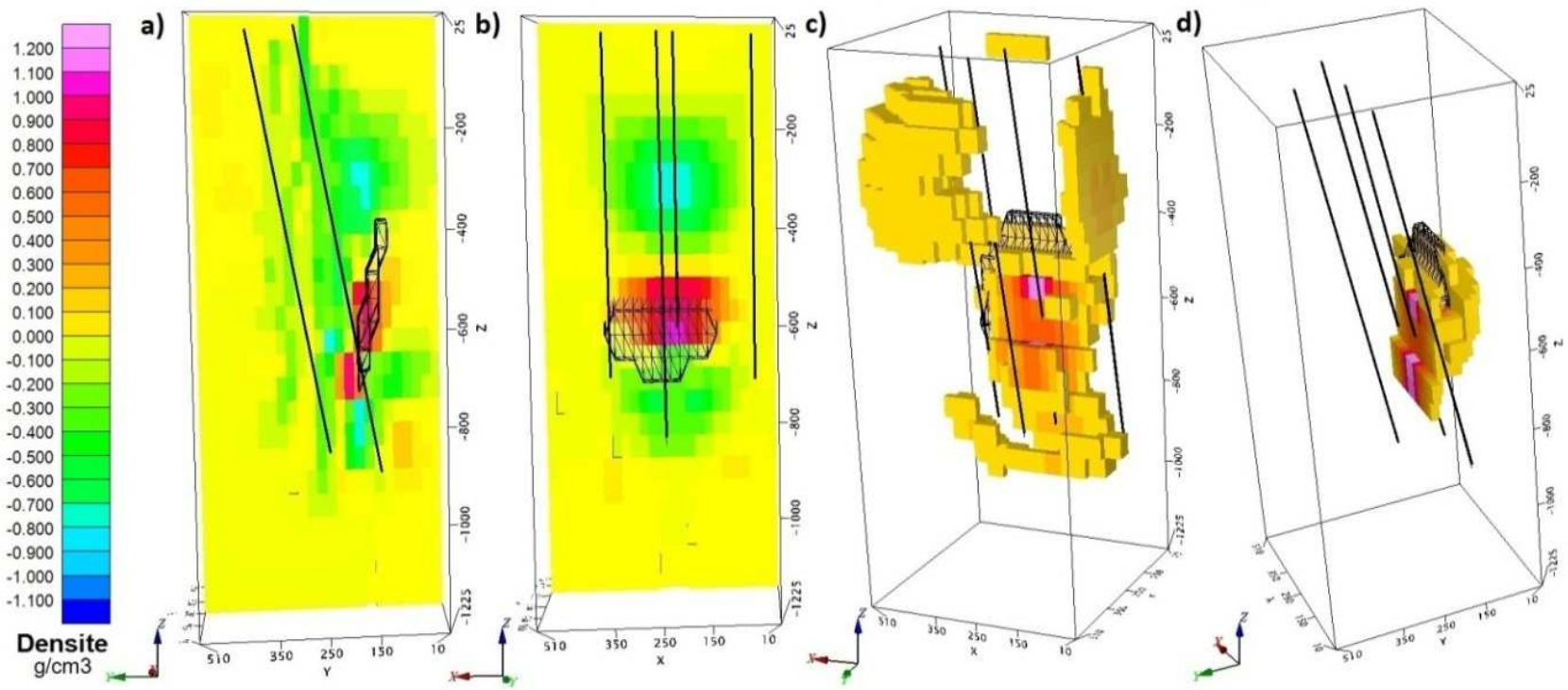


Figure 4.65 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide d'ondelettes des forages D1, D2, D3 et D4. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 4.2 Mt

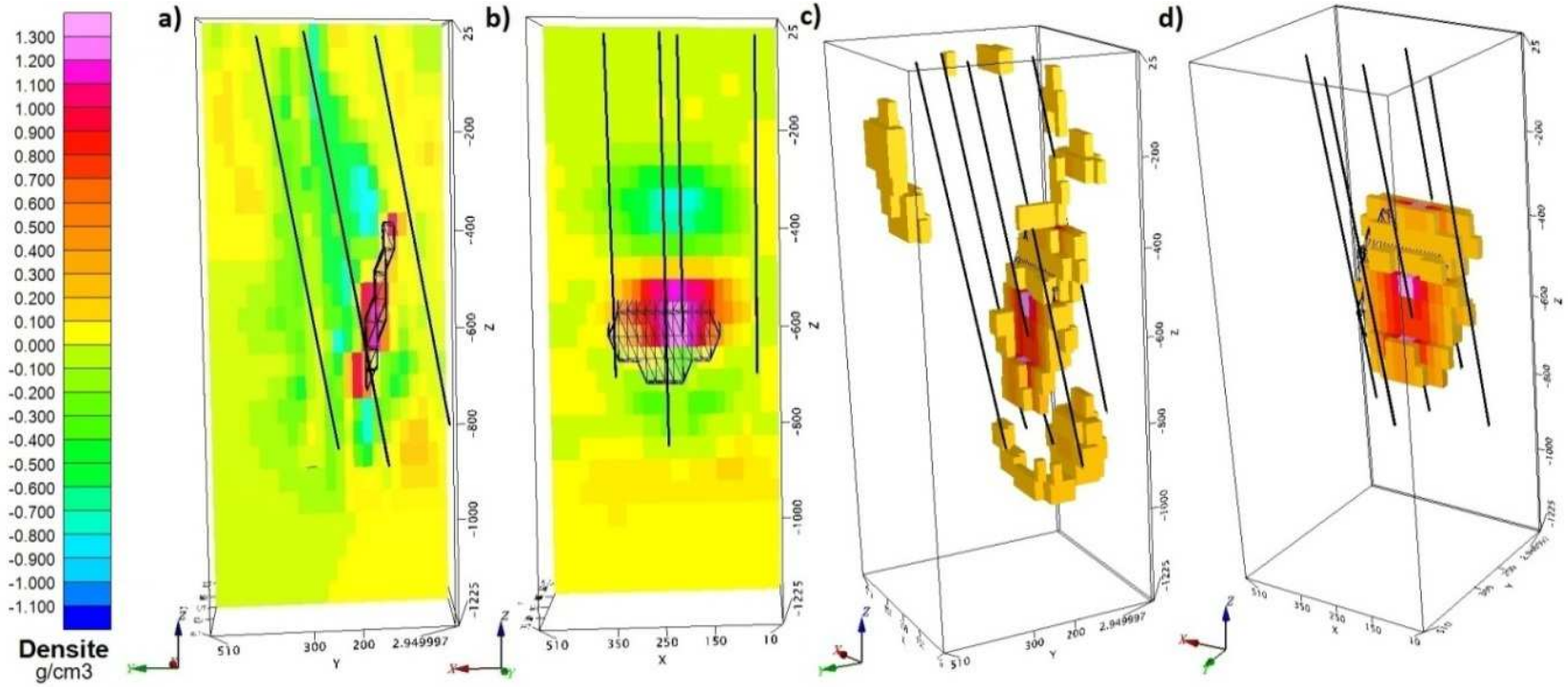


Figure 4.66 : Modèle de densité de l'inversion des résiduelles calculées à l'aide d'ondelettes des forages D1, D2, D3, D4 et D5. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=170m, c) Densités supérieures à ρ=0.2 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.2 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 3.7 Mt

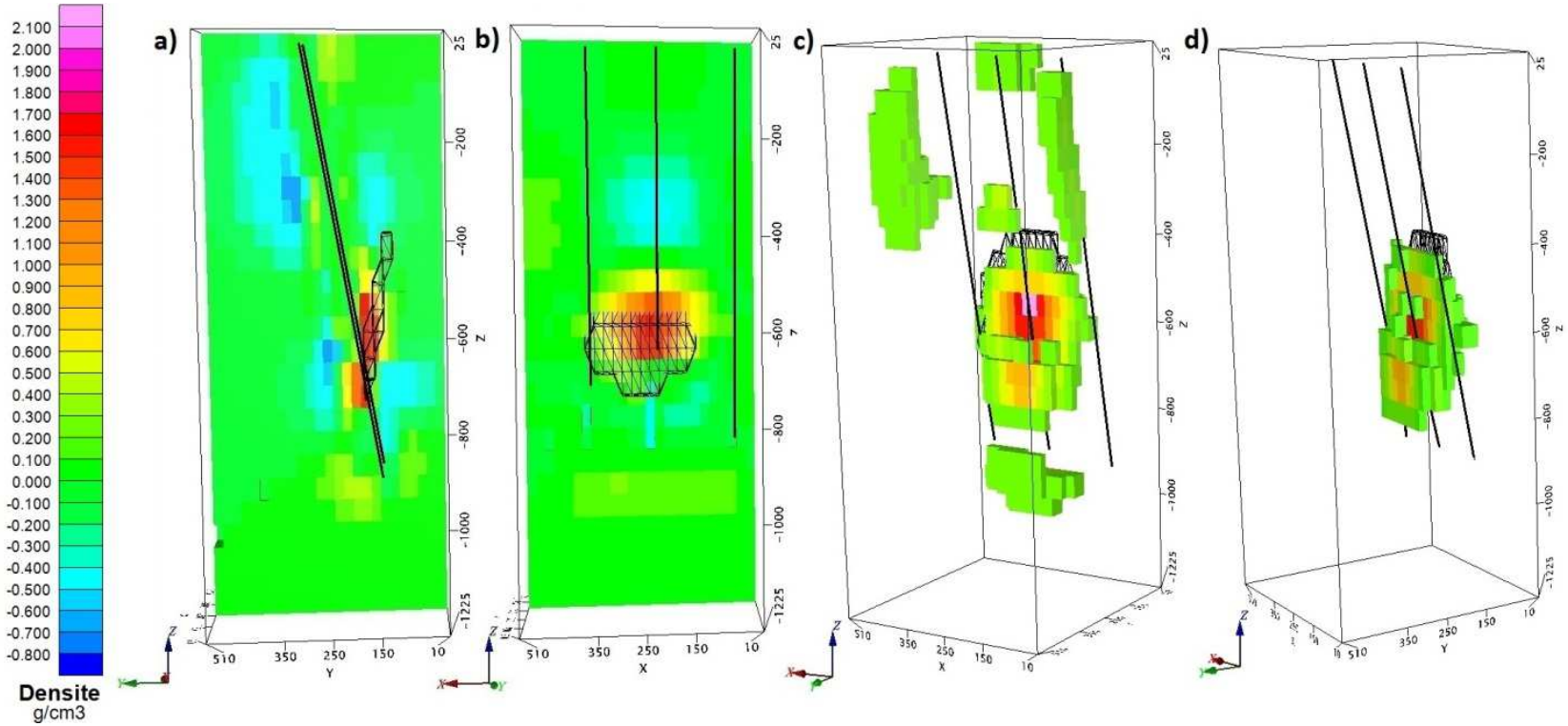


Figure 4.67 : Modèle de densité de l'inversion contrainte des résiduelles calculées à l'aide d'ondelettes des forages D1, D2 et D3. Le gisement est représenté en structure filaire (wireframe) noire et les forages sont en noir. a) Section à x=250m, b) Section à y=190m, c) Densités supérieures à ρ=0.2 g/cm^3, d) Densités supérieures à ρ=0.1 g/cm^3; le gisement a été isolé pour calculer son excès de masse de 4.1 Mt

4.5 Portée ou distance d'exploration

La position des forages par rapport au gisement influence grandement les résultats des inversions. Pour mieux positionner les forages la détermination de la portée est essentielle. Un petit rappel de la section 2.2.3 : la portée ou distance d'exploration de la méthode gravimétrique en forage pour l'exploration des SMV est définie comme un rayon pour lequel 80% de la réponse mesurée provient de la structure choisie. Puisqu'en réalité la géologie est complexe, les calculs ne sont que des estimations, mais ils peuvent donner une bonne idée pour positionner les forages. Dans un contexte géologique comme celui de l'Abitibi, on déterminera les portées pour une sphère équivalente au gisement SMV et pour une couche à fort pendage. Pour commencer, le cas de la sphère sera analysé. D'après l'équation 2.11, la portée dépend de deux variables : la masse de la sphère et la précision de la mesure. Dans notre cas, la précision du Gravilog est de 5µGal, mais à la suite de plusieurs corrections sur les données, une précision de 10µGal sera utilisée. Aussi, plutôt que la masse, un excès de masse sera utilisé lors du calcul. Une moyenne de densité de 2.7 g/cm^3 sera utilisée pour la géologie encaissante. Sur la figure 4.68, la portée est tracée en fonction de la masse du gisement plutôt que de l'excès de masse pour donner une meilleure idée du tonnage du gisement. L'utilisation du Gravilog est intéressante surtout pour des gisements ayant un tonnage plus petit situé entre 2 et 7 Mt. Il est possible d'observer que la portée augmente grandement lorsque la masse du gisement est élevée.

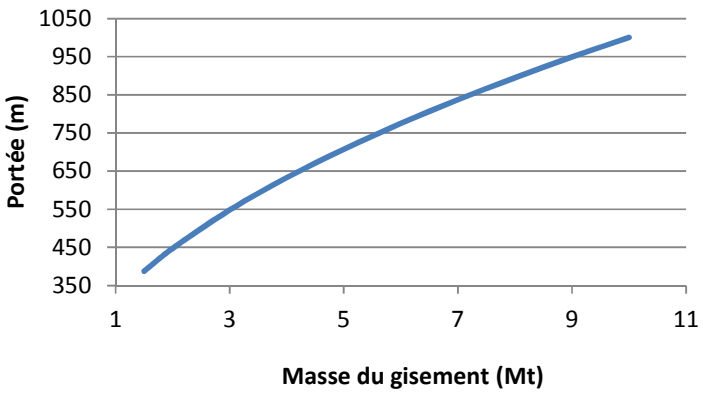


Figure 4.68 : Portée en fonction de la masse du gisement.

Le même exercice est fait avec une couche ayant un pendage. L'équation 2.10 permet de calculer la portée d'un cylindre incliné. Le rayon du cylindre est la portée. Cette équation est beaucoup plus complexe que celle de la sphère et contient plus de variable. Comme dans le cas de la sphère, une

précision, Δg_z, de 10µGal sera utilisée. La précision est utilisée dans l'équation de $\Delta\rho_{dip}$ (équation 2.8) et dans cette même équation, le Δz utilisée est de 1 m. La portée dépend aussi de la moyenne de densité régionale (ρ_{hor}=2.7 g/cm^3 dans notre cas) et la densité moyenne de la couche interceptée, ρ_{sl}. Finalement, les dernières variables sont l'épaisseur de la couche, T, et son inclinaison, ϕ. La Figure 4.69 représente la portée pour deux cas : une couche de gabbro (ρ_{sl}=3.1 g/cm^3) intercepté et une couche d'andésite (ρ_{sl}=2.5 g/cm^3) interceptée.

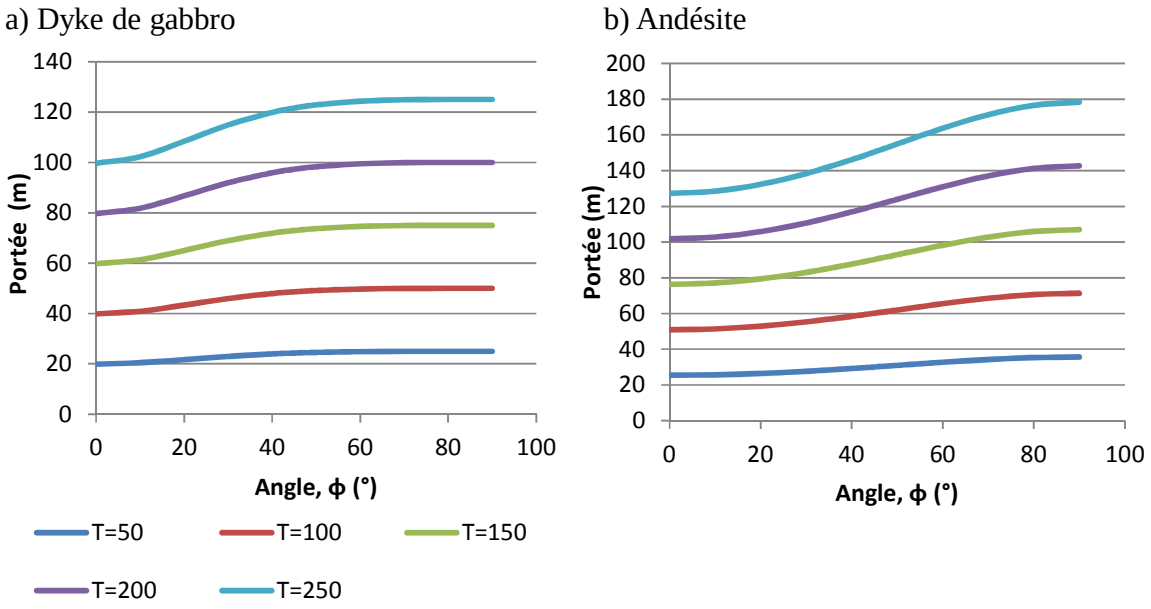


Figure 4.69 : Portée en fonction de l'angle, ϕ et l'épaisseur, T, de la couche stratigraphique interceptée. a) Cas pour un dyke de gabbro, b) Cas pour une couche d'andésite

En comparant les portées calculées pour une couche inclinée et pour une sphère, il est possible d'observer que celles calculées pour une couche inclinée sont plus faibles que celles calculées pour une sphère. La portée va être contrôlée par les deux structures. Cependant, puisque les couches sont situées directement autour du forage, la portée d'un gravimètre en forage est beaucoup plus contrôlée par la stratigraphie interceptée qu'un gisement. Aussi ce que nous remarquons c'est que dans un contexte abitibien, la portée d'un gravimètre peut varier grandement.

CHAPITRE 5 ÉTUDE DE CAS : COULON

5.1 Contexte

La propriété Coulon, située dans le Nord du Québec (figure 5.1), est une cible d'exploration de la compagnie Virginia Mines depuis 2008. C'est un complexe composé de plusieurs lentilles de sulfures massifs volcanogènes (figure 5.2). La lentille 44, qui sera le sujet de notre étude, a été découverte en 2006 par des forages d'exploration. Cinq levés de gravimétrie en forage ont été effectués en 2012 par Abitbi Géophysique inc. près de la lentille 44 dans les forages CN-08-216, CN-08-167, CN-08-128, CN-07-068 et CN-07-072 (figure 5.3). Les deux forages CN-08-128 et CN-07-068 sont situés près du gisement et le forage CN-07-072 intercepte le gisement. Le quatrième forage, CN-08-167, passe sous le gisement et le cinquième forage, CN-08-216, est situé plus à l'ouest.

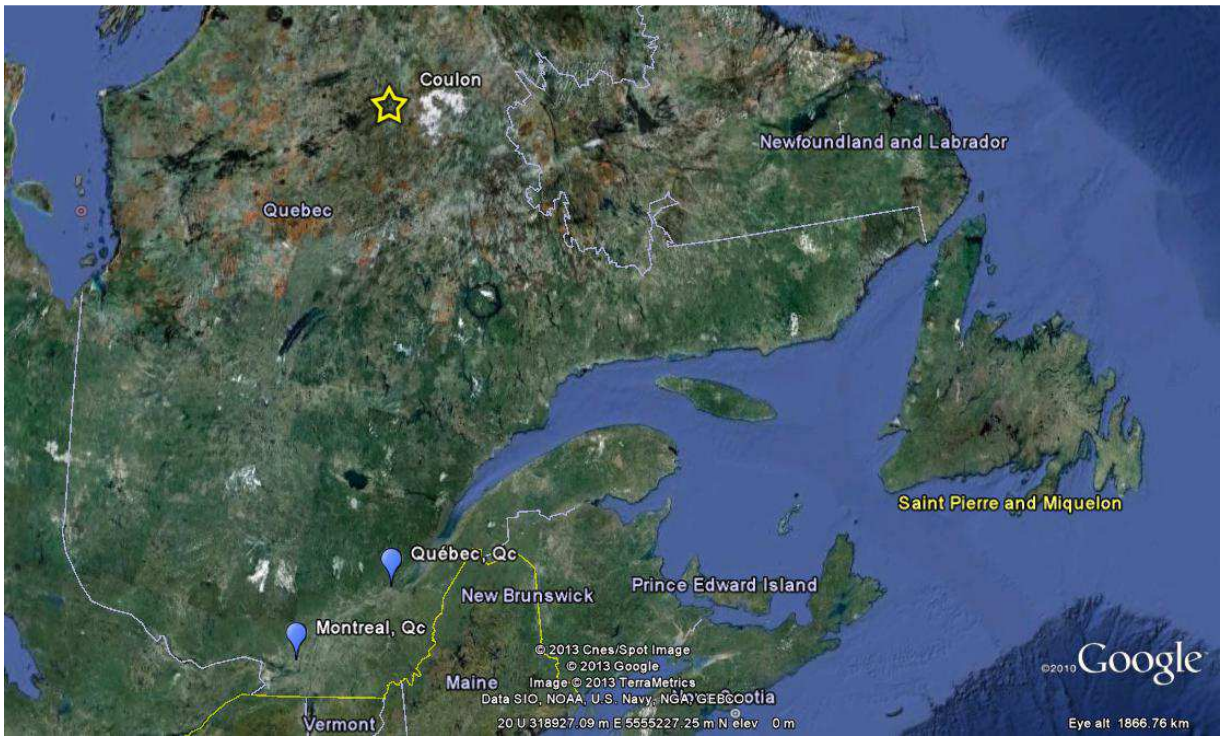


Figure 5.1 : Localisation du projet Coulon

Le gisement est situé dans une couche felsique près du contact avec une couche d'andésite et entrecoupée de dykes de gabbro. Bien que la géologie soit plus complexe, ce cas est très semblable

au modèle synthétique présenté aux chapitres 3 et 4. Ceci nous permettra de comparer les résultats d'un modèle synthétique à la situation réelle. Des levés électromagnétiques dans le domaine du temps (Time-Domain Electromagnetic), ont aussi été effectués près de la lentille 44. À l'aide de ces levés et des carottes de forages, une première modélisation du gisement a pu être faite (figure 5.3). Les résultats obtenus à l'aide des inversions gravimétriques seront comparés à ce modèle. Puisque les forages CN-08-216 et CN-08-167 sont situés loin du gisement, ils ne seront pas utilisés lors des inversions.

Tableau 5.1 : Caractéristiques des forages

Forage	**Collet (UTM, NAD 83 Zone 17)**			**Azimut de départ**	**Inclinaison de départ**	**Longueur forée (m)**
	X (m)	**Y (m)**	**Élévation**			
CN-08-128	352 801.88	6 072 955.46	525.40	92°	-61°	300
CN-07-068	352 788.90	6 073 052.40	529.70	89°	-54°	235.45
CN-07-072	352 578.40	6 073 102.30	535.80	87°	-55°	474

5.2 Données gravimétriques

Les données gravimétriques ont été prises avec un pas mesuré de 50m en surface et de 10m près du gisement. Chaque levé en forage a été fait indépendamment et les données de chaque forage n'ont pas été rattachées à une référence commune. Pour ce faire, des mesures au sol auraient dû être prises près de chaque forage. Des corrections pour les variations de pression et de température ont été apportées aux données. Ensuite, les corrections diurnes et de plateau ont été apportées. La correction de la latitude est négligeable puisque les forages n'ont pas une grande portée vers le nord ou le sud. Pour la correction de plateau la densité 2.67 a été utilisée pour les forages. Cette densité a été établie d'après les courbes des anomalies de Bouguer. Les données gravimétriques sont présentées en fonction de l'élévation en z.

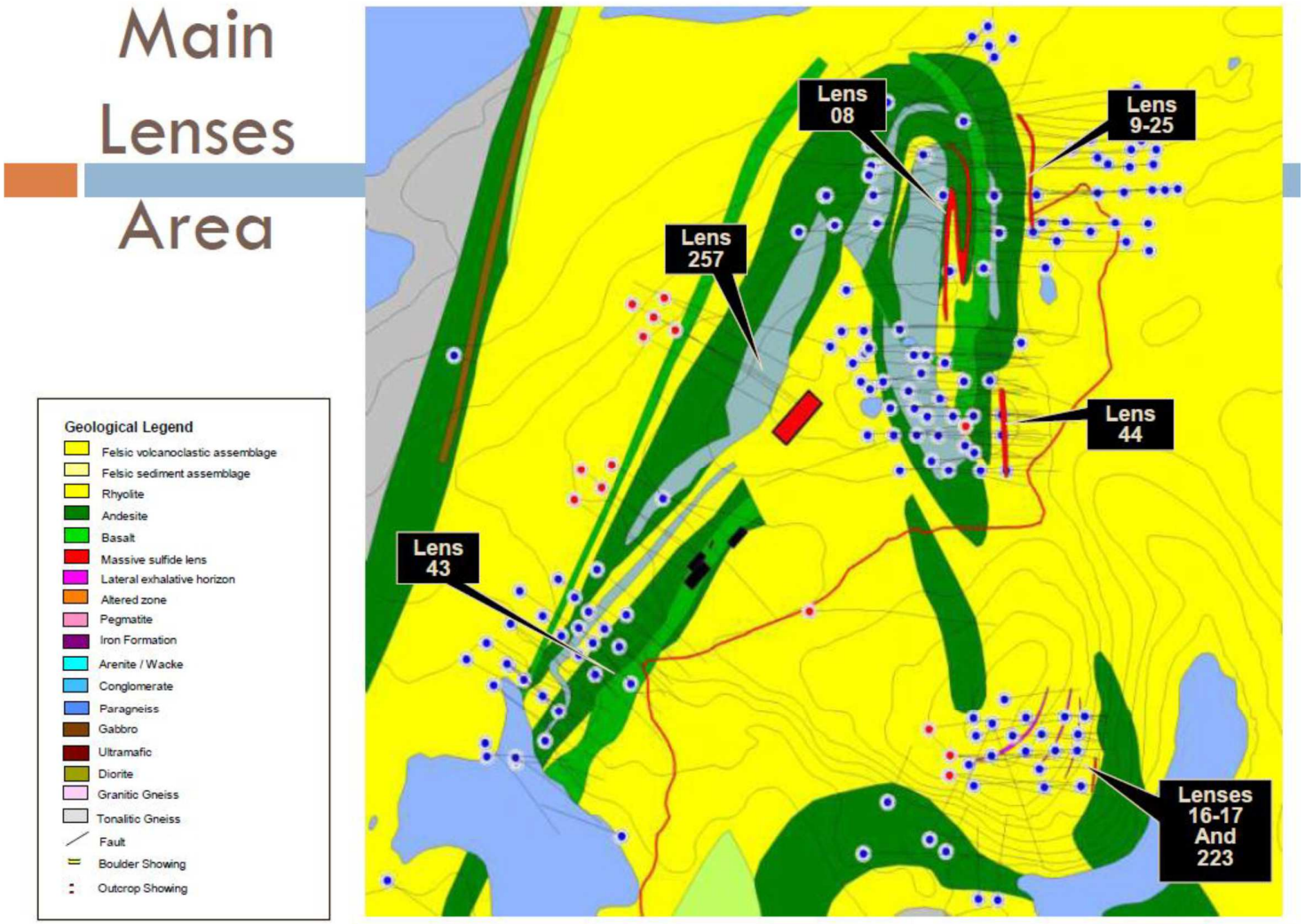


Figure 5.2 : Géologie et localisation de la lentille 44 du projet Coulo (Image de Virginia Mines)

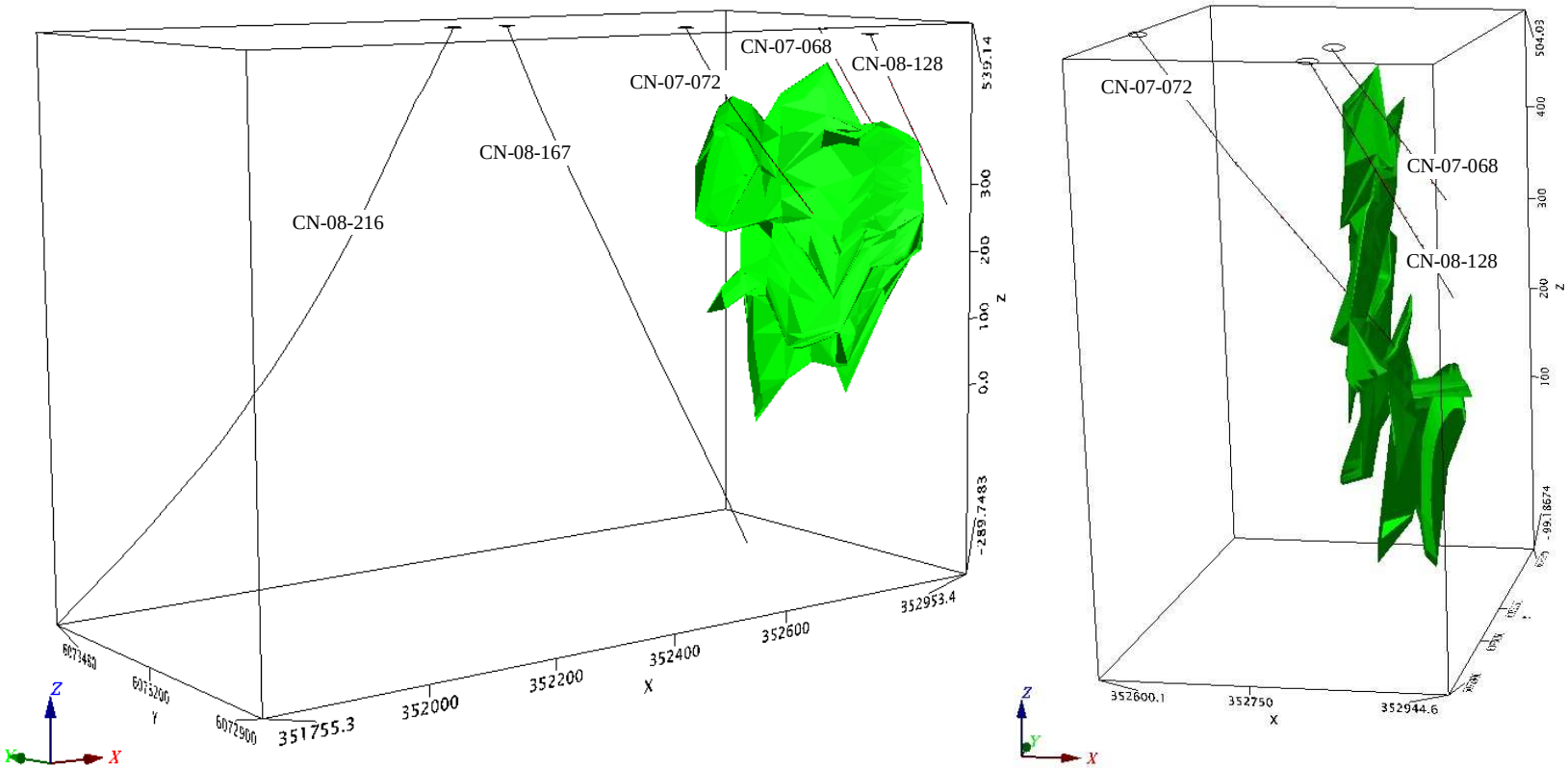


Figure 5.3 : Modélisation du gisement effectuée à l'aide de levés électromagnétiques et des données de forages. Les forages sont en noir.

Tableau 5.2 : Erreurs sur les données gravimétriques

Trou de forage	**Stations**	**Lectures**	**Erreur sur** g_A (μGal)	
			Écart moyen	**Écart-Type**
CN-08-128	28	56	**1.9**	**2.5**
CN-07-068	24	50	**4.0**	**4.7**
CN-07-072	30	96	**4.8**	**6.0**

Aucune donnée en surface n'a été utilisée lors des inversions. Celles qui sont disponibles utilisent un pas d'échantillonnage trop grand, ce qui rend le gisement imperceptible en surface.

5.2.1 Anomalies de Bouguer

À première vue, il est difficile d'observer une régionale parce que les forages ne sont pas très profonds. Il y a plusieurs petites anomalies de courtes longueurs d'onde, mais il est difficile de savoir lesquelles sont causées par le gisement et lesquelles sont causées par la géologie encaissante.

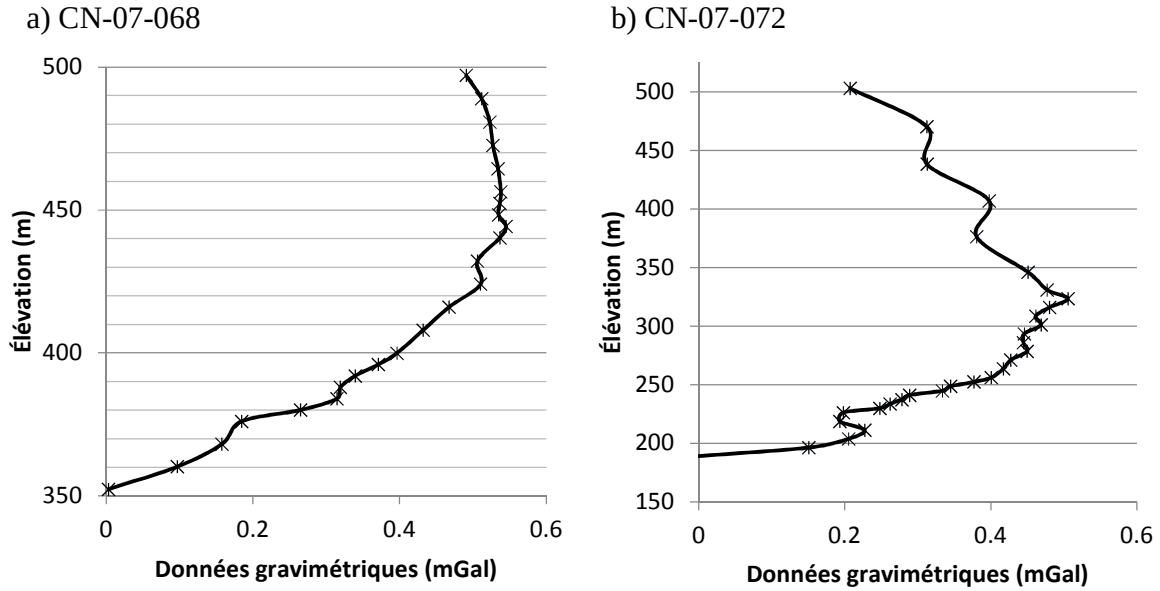


Figure 5.4 : Anomalies de Bouguer ; points mesurés représentés par des astérisques a) Forage CN-07-068, b) Forage CN-07-072

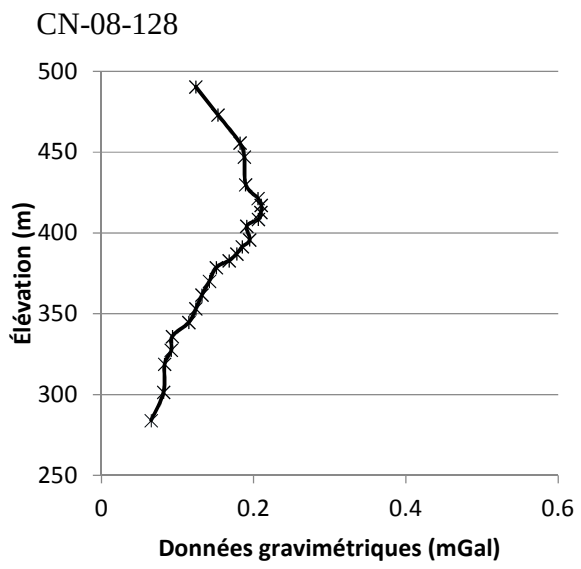


Figure 5.5 : Anomalies de Bouguer du forage CN-08-128 ; points mesurés représentés par des astérisques

5.2.2 Gradients verticaux

Les gradients verticaux ont été calculés par différences de lectures divisées par l'élévation en z entre chaque lecture (équation 2.41). Les graphiques suivants représentent les gradients verticaux des trois forages. Il est possible d'observer plusieurs anomalies de courte longueur d'onde. Plusieurs de ces variations sont probablement dues à la géologie encaissante. Les anomalies ayant des amplitudes plus grandes sont probablement créées par le gisement. Le forage 072 intercepte le gisement entre les élévations 190 et 220 m et il est possible d'observer des anomalies de plus forte amplitude et de courtes longueurs d'onde. Sur les forages 068, plusieurs anomalies de courtes longueurs d'onde peuvent être observées. Sur le forage 128, les anomalies ont, elles aussi de courtes longueurs, mais leurs amplitudes sont beaucoup plus petites que les deux autres forages. Ainsi, lors de l'inversion, ces données vont probablement jouer un rôle secondaire.

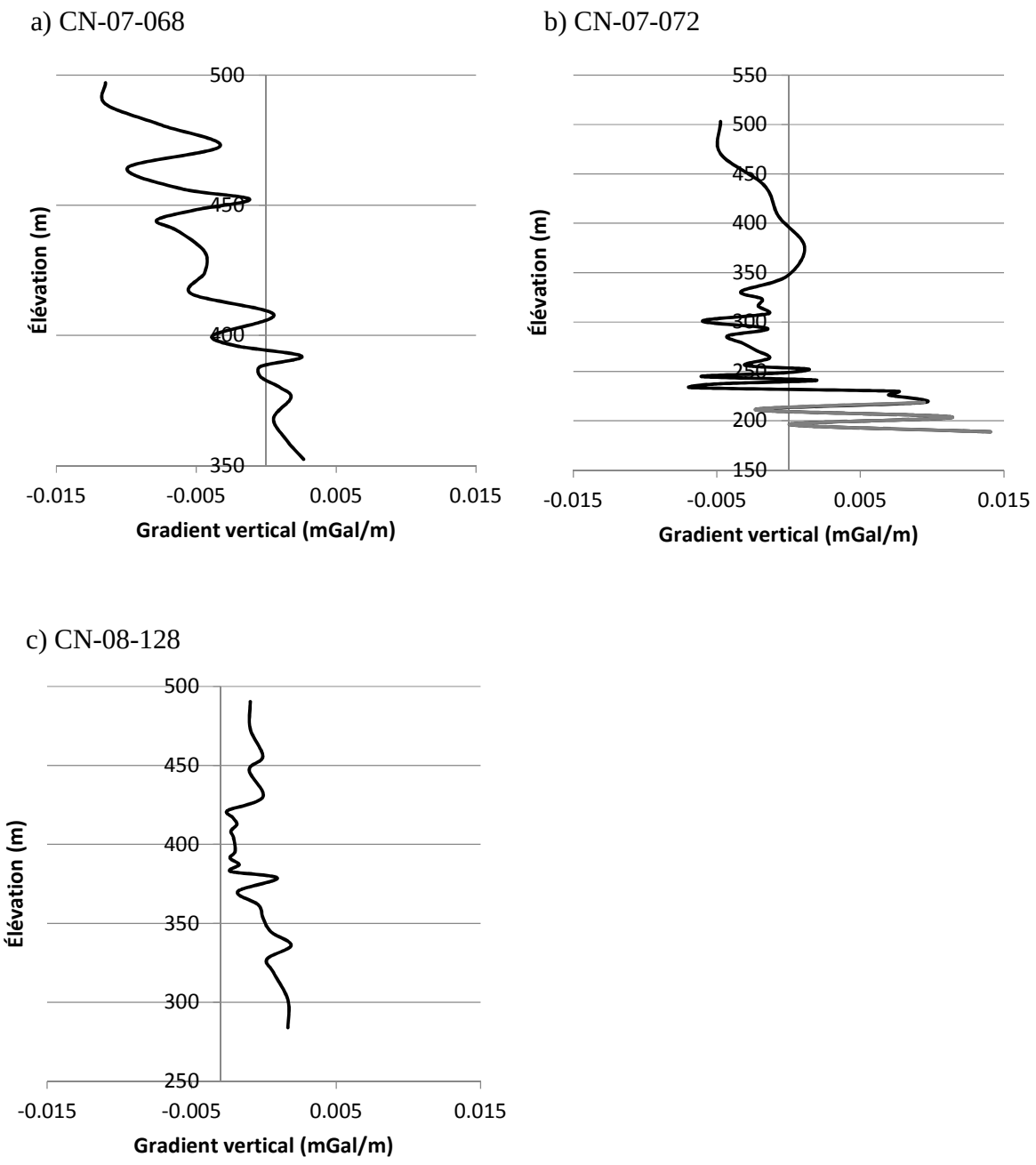


Figure 5.6 : Gradients verticaux. Le gisement est représenté en vert; les distances entre les forages et le gisement et la forme du gisement sont approximatives. CN-07-072 et indiquer en gris l'intersection entre le forage et le gisement, c) Forage CN-08-128

5.2.3 Régionales

Les figures 5.7 et 5.8 comparent les régionales calculées à l'aide du filtre non-linéaire, de la méthode graphique et des ondelettes à partir des anomalies de Bouguer. Les paramètres utilisés pour le filtre non-linéaire (gris) sont une largeur de 1 et une tolérance de 1 mGal pour tous les forages. Madjid Chemam, chargé de projet chez Abitibi Géophysique, a calculé les résiduelles en évaluant les anomalies régionales par méthode graphique et en les soustrayant des anomalies de Bouguer (pointillé). L'ondelette utilisée pour calculer les anomalies régionales est la db5 (tirets). Cependant, un niveau plus bas a été utilisé pour le forage CN-08-128.

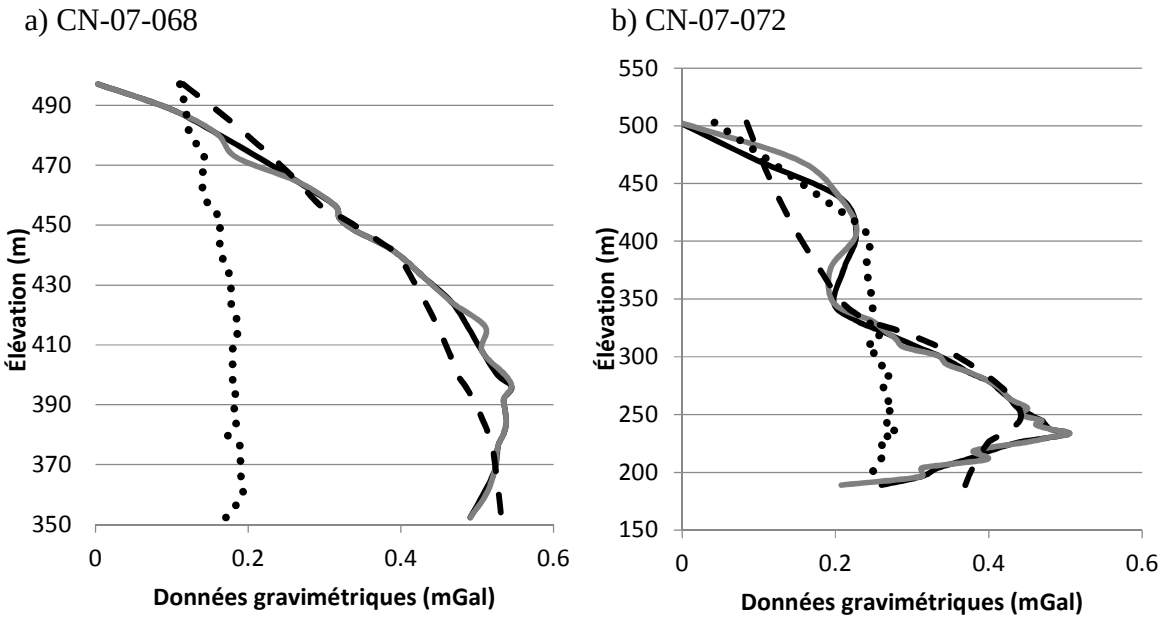


Figure 5.7 : Régionales calculées à l'aide du filtre non-linéaire (gris), régionales calculées à l'aide d'ondelettes (tirets), régionales calculées graphiquement (pointillé) et anomalies de Bouguer (noir). a) Forage CN-07-068, b) Forage CN-07-072, c) Forage CN-08-128

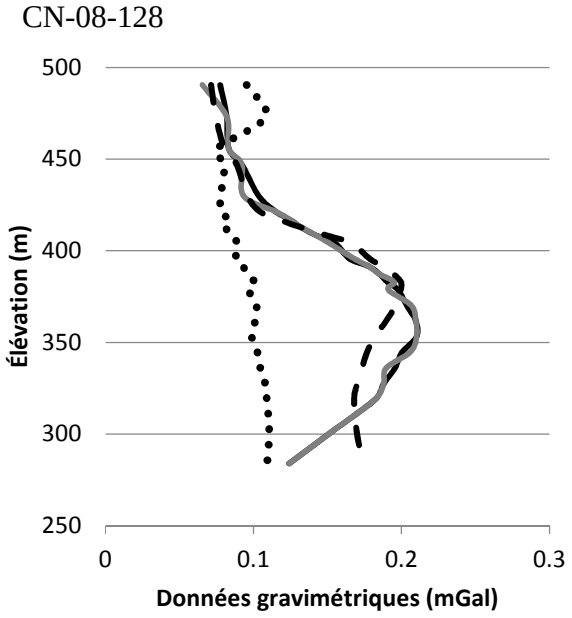


Figure 5.8 : Régionales calculées à l'aide du filtre non-linéaire (gris), régionales calculées à l'aide d'ondelettes (tirets), régionales calculées graphiquement (pointillé) et anomalies de Bouguer (noir).

5.2.4 Résiduelles

Les trois résiduelles calculées sont présentées à la figure 5.9. Les résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire (gris) ont les plus courtes longueurs d'onde et les anomalies de plus petite amplitude. Sur le forage 068, il est possible d'observer deux anomalies de courte longueur d'onde entre les élévations 430m et 400m (anomalie A). C'est à ces élévations que le forage passe le plus près du gisement. Sur le forage 072, plusieurs petites anomalies sont observées, mais celle avec la plus grande amplitude est située en surface (anomalie B). En ce qui concerne le forage 128, les anomalies semblent avoir de très petites amplitudes si elles sont comparées aux autres résiduelles. Toutefois, les anomalies de plus grandes amplitudes sont situées en profondeur.

Les résiduelles calculées à l'aide d'ondelettes (noir) ont des anomalies semblables à celles des résiduelles par filtre non-linéaire. Toutefois, elles ont des amplitudes plus grandes. Sur le forage 068, où le forage passe le plus proche du gisement, les mêmes deux petites anomalies observées sur la résiduelle par filtre non-linéaire peuvent être observées (anomalie C). Le forage 072, quant à lui, comporte quelques petites différences. Comme pour la résiduelle calculée par filtre non-linéaire, il est possible d'observer une anomalie en surface (anomalie D). Là où le forage intercepte le gisement, une deuxième anomalie de plus faible amplitude peut être observée (anomalie E). Une anomalie peut

être observée sur le forage 128 entre les élévations 300m et 370m, là où le forage passe le plus près du gisement (anomalie F).

Les résiduelles calculées graphiquement sont très différentes des résiduelles calculées à l'aide des filtres. Elles ont des anomalies de plus grande longueur d'onde et de plus grandes amplitudes avec des petites variations. Sur le forage 068, une anomalie de grande amplitude et de longueur d'onde est observée, mais située entre 350m et 400, deux petites anomalies de courtes longueurs d'onde peuvent être observées. Ces deux petites anomalies sont très semblables à celles observées sur les deux autres résiduelles (anomalie G). Sur le forage 072, en surface il est possible d'observer une anomalie asymétrique, typique d'une structure sphérique (anomalie H). Situé directement sous cette dernière anomalie, une deuxième peut être observée (anomalie I). Cette anomalie est semblable à l'anomalie E, mais elle a une amplitude plus grande. Sur le forage 128, une anomalie peut être observée entre 300m et 400m (anomalie J). Cette dernière est semblable à l'anomalie F.

Sur aucun des forages, une anomalie asymétrique n'est observée lorsque les forages approchent ou intercepte le gisement. Puisque les forages ne sont pas assez longs, les anomalies ne sont pas totalement visibles sur les données gravimétriques mesurées. Il se pourrait que ceci affecte les résultats d'inversion.

5.3 Paramètres d'inversion

Une grille de 352 500 m à 353 100 m en x, 6 072 800 m à 6 073 700 m en y (coordonnées UTM NAD 83 Zone 17) et -300 m à 550 m en z a été utilisée pour inverser les données des forages. Le sous-sol a été découpé en prismes de 10x25x25m.

Les modèles de covariance ont été calculés à l'aide de la méthode graphique v-v. D'abord, des portées de 20m pour a_x, 400m pour a_y et 600m pour a_z ont été choisies d'après les dimensions du gisement modélisé, puis l'effet de pépite et la covariance ont été choisis en minimisant la MAE et R. Finalement, un dernier ajustement des portées a été fait d'après les résultats obtenus. Les modèles de covariance utilisés pour les inversions sont présentés aux tableaux 5.3, 5.4, 5.5 et 5.6.

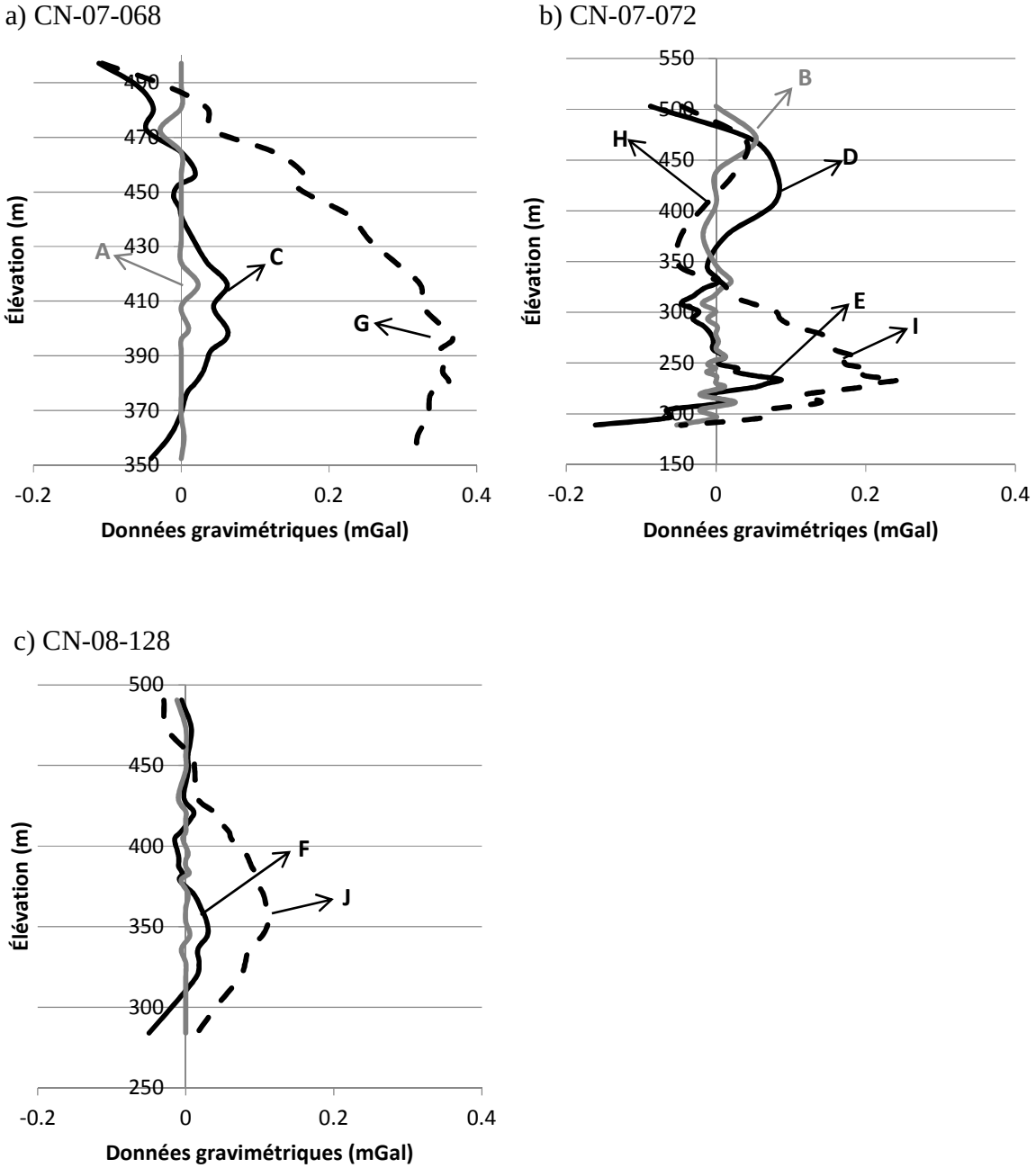


Figure 5.9 : Résiduelles calculées à l'aide du filtre non-linéaire (gris), résiduelles calculées à l'aide d'ondelettes (noir) et résiduelles calculées à l'aide de la méthode graphique (tirets).

Tableau 5.3 : Modèles de covariance pour les résiduelles calculées à l'aide de la méthode graphique. (var.: variogramme, spher.: sphérique)

Forages	Modèle de var.	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(kg/m^3)^2$	C $(kg/m^3)^2$	MAE (kg/m^3)	R
128, 068, 072	Spher.	20	300	500	0	0	0	1e-03	8000	0.012	0.70

Tableau 5.4 : Modèles de covariance pour les gradients verticaux.

Forages	Modèle de var.	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(kg/m^3)^2$	C $(kg/m^3)^2$	MAE (kg/m^3)	R
128, 068, 072	Spher.	40	400	400	0	0	0	1e-03	1000	1.15	0.70

Tableau 5.5 : Modèles de covariance pour les résiduelles par filtre non-linéaire

Forages	Modèle de var.	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(kg/m^3)^2$	C $(kg/m^3)^2$	MAE (kg/m^3)	R
128, 068, 072	Spher.	50	300	600	0	0	0	1e-03	55000	0.0676	0.22

Tableau 5.6 : Modèles de covariance pour les résiduelles par filtre ondelettes

Forages	Modèle de var.	Ax (m)	Ay (m)	Az (m)	ϕ (°)	θ (°)	Vert (°)	C0 $(kg/m^3)^2$	C $(kg/m^3)^2$	MAE (kg/m^3)	R
128, 068, 072	Spher.	50	500	500	0	0	0	1e-03	5000	0.0089	0.40

5.4 Résultats des inversions

Les inversions des données gravimétriques des forages CN-08-128, CN-07-068 et CN-07-072 ont été comparés au modèle du gisement établi à partir des descriptions géologiques de forage et des levés EM en forage. Comme dans les cas synthétiques, puisqu’aucune erreur n’a été ajoutée aux données, l’inversion reproduit exactement les anomalies mesurées (figure 5.10).

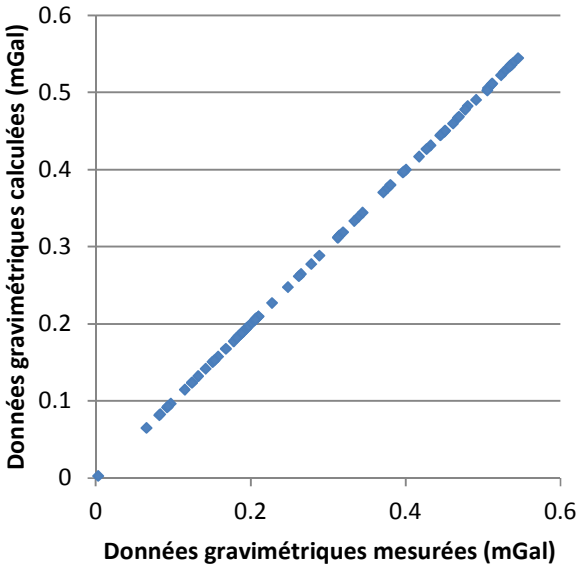


Figure 5.10 : Comparaison des données gravimétriques mesurées et calculées

Les sections suivantes présenteront les résultats obtenus à l'aide des quatre méthodes de séparation régional-résiduelle. Ensuite, ils seront discutés plus en détails à la section 6.3.

5.4.1 Méthode graphique

Deux structures peuvent être observées sur les résultats obtenus par méthode graphique. Les deux structures sont situées près du gisement, mais l'une d'entre elle est située en profondeur et l'autre plus en surface. Si les deux structures sont prises en compte et une limite de densité de 1 g/cm^3 est utilisée, l'excès de masse calculé est de 18 Mt. Puisqu'aucune densité n'est connue, il a été difficile de choisir une limite de densité. Celle choisie représente une limite de densité réaliste si l'effet de lissage est pris en compte et la structure calculée est semblable en volume au gisement modélisé. La structure en surface est créée par l'anomalie asymétrique H observée sur le forage CN-07-072 (figure 5.9). D'après le modèle du gisement et de la géologie en surface, nous savons que le gisement ne se rend pas jusqu'en surface. Un autre excès de masse a été calculé en utilisant seulement les données situées sous l'élévation de 400m (haut du gisement modélisé) et en utilisant la même limite de densité. Ce nouvel excès de masse est de 15.4 Mt.

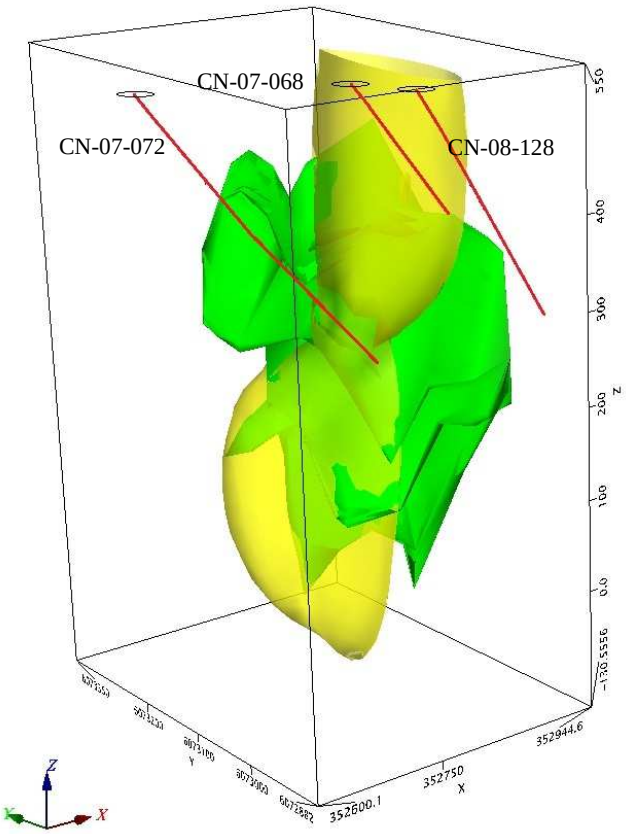


Figure 5.11 : Inversion des données de la résiduelle graphique : En vert, le gisement Lens44 de Coulon modélisé à l'aide des descriptions de forages et des résultats des levés électromagnétiques. En jaune, les résultats de l'inversion gravimétrique utilisant les forages 068, 128, 072 (en rouge) sont montrés sous la forme d'une isosurface de 1 g/cm^3. Cette surface délimite un excès de masse de 18 MT.

5.4.2 Gradients verticaux

Les contrastes de densité calculés sont un peu moins élevés que le modèle précédent. Cependant, les contrastes de densité sont réalistes contrairement aux modèles synthétiques pour lesquels les contrastes de densité calculés à l'aide des gradients verticaux étaient grandement sous-estimés. Une structure peut être observée sur les résultats obtenus à l'aide des gradients verticaux au bas du gisement modélisé. Si les résultats sont comparés aux gradients verticaux présentés à la figure 5.6, la structure est située en profondeur puisque les anomalies de gradients ayant les plus grandes amplitudes étaient situées en profondeur elles aussi. Un excès de masse de 6.8 Mt a été calculé à l'aide d'une limite de densité de 1 g/cm^3. La même limite de densité utilisée dans le cas précédent a

été choisie pour mieux comparer la forme, le volume et l'excès de masse de la structure calculée. Cet excès de masse est beaucoup plus petit que celui calculé précédemment, puisque les contrastes de densité sont plus faibles. Si une limite de densité plus petite est utilisée, l'excès de masse est plus réaliste. En utilisant une limite de 0.5 g/cm^3, un excès de masse de 17.3 Mt est calculé. Cette limite de densité calcule un volume plus grand et une forme qui se rapproche plus du gisement modélisé.

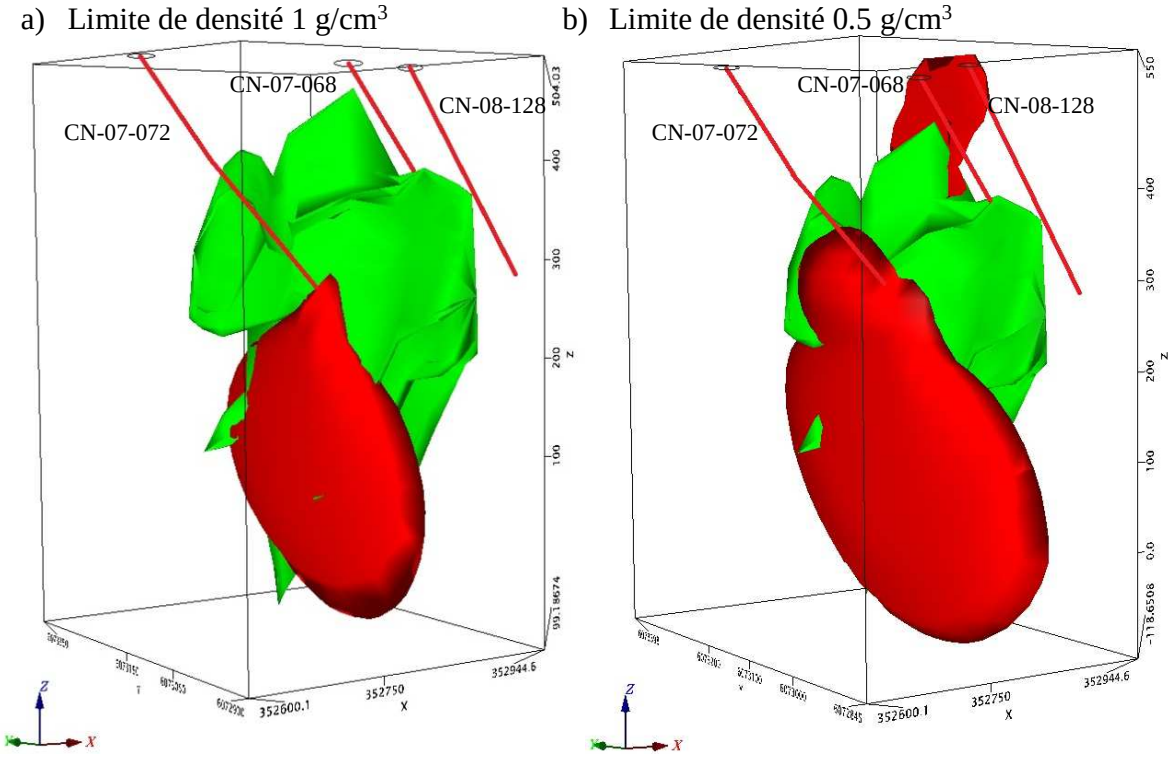


Figure 5.12 : Inversion des données du gradient vertical : En vert, le gisement Lens44 de Coulon modélisé à l'aide des descriptions de forages et des levés électromagnétiques. a) En rouge, les résultats de l'inversion gravimétrique utilisant les forages 068, 072 et 128 sont présentés sous forme d'une isosurface de 1 g/cm^3 Cette surface délimite un excès de masse 6.8 MT, b) En rouge, les résultats de l'inversion gravimétrique sont présentés sous forme d'une isosurface de 0.5 g/cm^3. Cette surface délimite un excès de masse 17.3 MT

5.4.3 Filtre non-linéaire

Une structure située près du gisement peut être observée sur les résultats d'inversion obtenus à l'aide des données de la résiduelle obtenue par le filtre non-linéaire. Les contrastes de densité calculés sont un peu plus élevés que ceux calculés à l'aide des gradients, mais plus petits que ceux calculés à

l'aide de la méthode graphique. Deux petites anomalies aberrantes sont observées en surface. Celles-ci sont probablement causées par l'anomalie B observée sur le forage 072 et les autres petites anomalies observées sur les autres forages (figure 5.9). Si une limite de densité de 1 g/cm^3 est utilisée, la même limite que celle utilisée pour la méthode graphique, la forme de la structure est semblable à celle des résultats obtenus à l'aide de la méthode graphique. Cependant, la structure observée utilisant cette dernière limite de densité est un peu plus petite que le gisement modélisé et est située plus en profondeur. L'excès de masse calculé est de 14.7 Mt. Cet excès de masse est comparable à celui obtenu à l'aide de la méthode graphique lorsque seulement les résultats situés sous 400m sont utilisés.

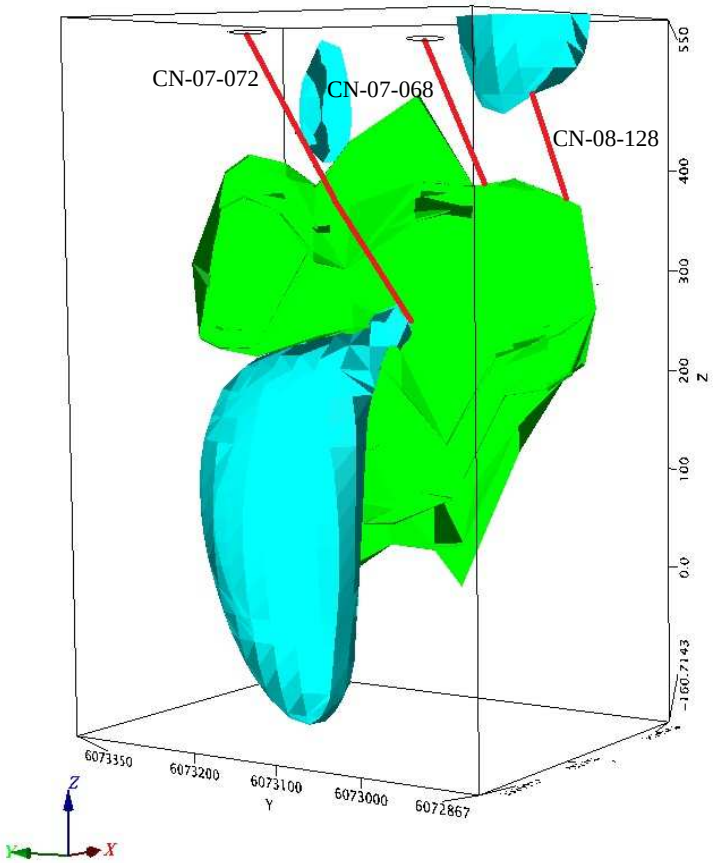


Figure 5.13 : Inversion des données du gradient vertical : En vert, le gisement Lens44 de Coulon modélisé à l'aide des descriptions de forages et des levés électromagnétiques. En rouge, les résultats de l'inversion gravimétrique utilisant les forages 068, 072 et 128 sont présentés sous forme d'une isosurface de 1 g/cm^3. Cette surface délimite un excès de masse 14.7 MT.

5.4.4 Filtre par ondelettes

La forme de la structure obtenues avec des résiduelles calculées à l'aide d'ondelettes sont semblables à ceux obtenus par méthode graphique. Deux structures peuvent être observées ; une en surface et l'autre en profondeur. Si une limite de densité de 1 g/cm^3 est utilisée comme pour les résultats précédents, un excès de masse de 1 Mt est calculé, ce qui n'est pas réaliste. En utilisant une limite de densité de 0.5 g/cm^3, un excès de masse plus réaliste de 10.2 Mt a été calculé. Le volume de la structure est semblable à celui calculé à l'aide des données traitée par la méthode graphique, mais les contrastes de densités calculés sont moins élevés. La structure en surface est probablement créée par l'anomalie D observée sur le forage 072 (figure 5.9). La structure en profondeur est plutôt due aux anomalies C, E et F.

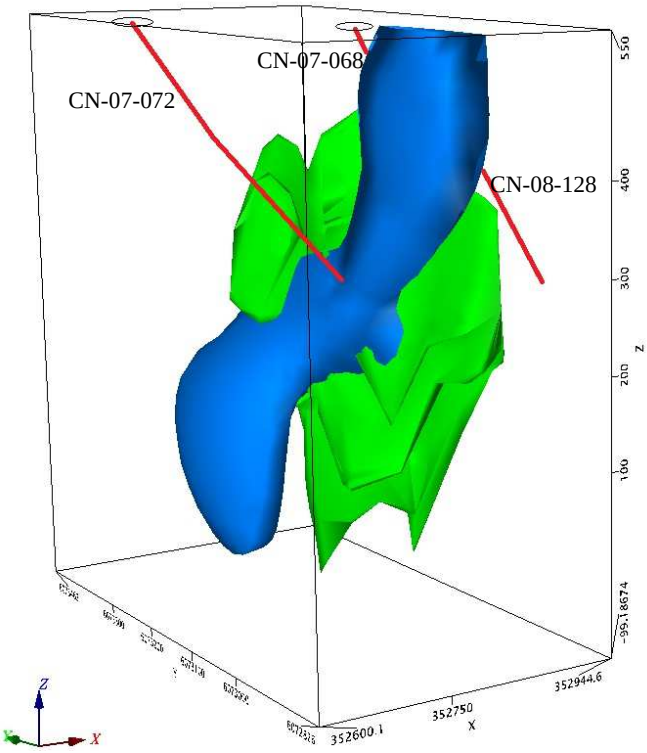


Figure 5.14 : Inversion des données du gradient vertical : En vert, le gisement Lens44 de Coulon modélisé à l'aide des descriptions de forages et des levés électromagnétiques. En rouge, les résultats de l'inversion gravimétrique utilisant les forages 068, 072 et 128 sont présentés sous forme d'une isosurface de 0.5 g/cm^3. Cette surface délimite un excès de masse 10.2 MT.

CHAPITRE 6 DISCUSSION ET CONCLUSION

Dans ce chapitre, les résultats sont résumés, comparés, discutés et expliqués. Premièrement, à la section 6.1, les limitations des codes développés sont présentées pour bien comprendre leur influence sur les résultats. La section 6.2 résume les résultats obtenus et discute de l'influence de certains paramètres importants sur les résultats d'inversion : les paramètres d'acquisition, les données de surface, les contraintes, la géologie encaissante et les différentes méthodes de séparation régionale-résiduelle. Pour bien résumer les résultats obtenus, une comparaison des excès de masse calculés sera présentée à la section 6.2.4.

L'étude de cas de Coulon a démontré que la gravimétrie en forage est une méthode bien adaptée à la géologie du Bouclier Canadien. Un résumé des résultats et une analyse de ceux-ci seront présentés à la section 6.3. Puisque quelques questions restent sans réponse, la section 6.4 est consacrée aux étapes suivantes qui devraient être étudiées. La section 6.5 présentera nos conclusions et recommandations tirées à la lumière des analyses faites dans les sections précédentes.

6.1 Limitations du code

L'inversion stochastique est très robuste, rapide et non-itérative. S'il n'y a aucune erreur sur les données gravimétriques mesurées, l'inversion reproduit précisément l'anomalie mesurée. Les résultats issus des modélisations et des inversions aident à mieux cerner les avantages et les limites de la gravimétrie en forage. Cependant, ils sont intrinsèquement liés aux codes de modélisation et d'inversion utilisés et ceux-ci ont leurs limitations. Premièrement, les codes ne sont pas optimisés pour des maillages de grande taille et la résolution de l'inversion pourrait exiger un temps de calcul et une mémoire vive importants. Il est important de choisir judicieusement les dimensions des prismes pour ne pas avoir des prismes trop grands et perdre ainsi de la précision. Un bon compromis est d'utiliser une zone tampon. Cependant, il faut faire attention puisque les équations utilisées pour le calcul des matrices de covariance sont conçues pour des pas réguliers. Une zone tampon a été utilisée dans les modèles synthétiques afin de bien distinguer l'anomalie créée par le gisement. Si la zone tampon n'avait pas été utilisée, les inversions auraient été trop longues ou des effets de bord auraient été observés.

L'autre limitation importante du code est le modèle de covariance. Le calcul du modèle de covariance n'a pas été optimisé: c'est la partie du code qui demande le plus temps. Cependant, pour pouvoir calculer l'inversion, il faut un modèle de covariance et pour calculer ce modèle, il faut faire quelques itérations. Ces itérations peuvent varier et dépendent du modèle initial. Si la géologie encaissante et/ou le gisement est bien connu, un modèle initial plus représentatif peut être utilisé et l'optimisation peut se faire en trois ou quatre itérations. Si ce n'est pas le cas, l'optimisation peut prendre plus de temps. Le temps de calcul dépend de la puissance de l'ordinateur utilisé et de la taille de la matrice $C_{\rho\rho}$. Dans les cas synthétiques, une itération pouvait prendre jusqu'à 15 minutes. Pour bien optimiser un modèle, les calculs pouvaient prendre jusqu'à une demi-journée maximum. En plus, c'est l'étape de l'inversion qui est la plus longue et qui contient le plus d'incertitude parce que la MAE doit être minimisée. Toutefois, il peut y avoir plusieurs minimums locaux et trouver le minimum global peut être non trivial. La méthode décrite à la section 3.3.3.1 permet de comparer plusieurs minimums locaux, mais il est difficile de choisir lequel est le plus près de la réalité.

Lors des inversions, il a été observé que les paramètres qui affectent le plus les résultats sont les portées et les angles de direction. L'effet de pépite et la covariance dépendent du nombre de données gravimétriques. Elles n'affectent pas beaucoup les résultats, à moins de choisir des valeurs en deçà ou au-delà de celles raisonnables. Les portées et les angles de direction affectent considérablement les dimensions et les formes des structures calculées. Les angles de direction doivent généralement être précis à la dizaine de degré et les portées à la dizaine de mètres. Cependant, les effets de ces paramètres varient dépendamment de la dimension du modèle et de l'anisotropie du modèle. Si peu d'éléments sont connus sur la géologie ou le gisement, il est fortement recommandé de commencer par un modèle isotrope. Si, comme dans le cas de Coulon, le gisement est mieux connu, un modèle anisotrope peut constituer un bon modèle initial, ce qui permet de sauver du temps. Ensuite, il suffit d'ajuster un peu les portées et la covariance d'après les résultats obtenus.

6.2 Résultats des modèles synthétiques

6.2.1 Optimisation des paramètres de prise de données

Il a déjà été mentionné que les paramètres d'acquisition affectent beaucoup les données et l'objectif principal de ce projet est de mieux comprendre leur impact. Le paramètre le plus important est la position des forages par rapport au gisement ou à la structure recherchée. Même si cinq forages sont utilisés, s'ils ne sont pas distribués correctement et s'ils sont à une distance plus élevée que la portée,

leurs données ne seront d'aucune aide. De façon optimale, les forages sont distribués uniformément autour du gisement. Cependant, en réalité c'est rarement le cas. Dans les modèles étudiés, les forages ne sont pas distribués uniformément autour du gisement pour mieux refléter la réalité; par exemple, le forage D3 est situé plus près du gisement que le forage D2. Aussi, le cas où les forages entourent le gisement et le cas où les forages sont tous situés d'un côté du gisement ont été étudiés.

Le cas où l'inversion n'utilise que trois forages qui ne sont pas distribués uniformément autour du gisement a donné des résultats concluants. Même si quelques anomalies aberrantes causées par l'effet de lissage peuvent être observées, une structure peut être observée près du gisement original. Cependant, puisque le forage D3 est situé plus près du gisement, la structure tend à être située un peu plus à l'est, se rapprochant de D3. Aussi, les anomalies aberrantes peuvent avoir des contrastes de densité semblables à ceux de la structure située près du gisement. Un premier réflexe est d'ajouter un forage, mais d'après les résultats, cela ne constitue pas nécessairement une bonne approche. Si un forage est ajouté, il faut qu'il soit près du gisement et, préférablement, de façon à ce que les forages entourent le gisement.

Généralement, le fait d'ajouter un forage situé plus loin du gisement fait apparaître de nouvelles anomalies aberrantes ou diminue les contrastes de densités de la structure située près du gisement. Ces cas ont surtout été observés lorsque la géologie encaissante a été ajoutée ou lorsqu'une régionale a été ajoutée. Le forage situé plus loin, dans notre cas le forage D4, amène des informations qui semblent contradictoires avec les informations des autres forages (D1, D2 et D3). Ceci contribue à diminuer les contrastes de densité de la structure située près du gisement et à augmenter ceux situés entre le gisement et le forage D4. Puisque les contrastes de densité de la structure située près du gisement sont plus petits, l'excès de masse calculé est par conséquent plus petit. L'ajout de forages doit donc être considéré avec précaution et la position des forages projetés doit être bien étudiée. C'est dans ces cas-ci que le calcul de la portée, comme démontré à la section 4.5, peut être intéressant comme préparation au levé. La portée du nouveau forage peut être calculée, puis insérer au modèle pour anticiper son influence sur les résultats d'inversion. Si aucun autre forage n'est accessible près du gisement, l'ajout de contraintes de densités fixes ou de gradients de densités sont de bonnes options. Les anomalies aberrantes seront encore présentes, mais les contrastes de densités de la structure située près du gisement devraient approcher ceux réels.

Une autre conséquence de la localisation des forages est l'apparition d'une structure de contraste de densité négatif. Lorsque trois forages sont utilisés ou qu'ils sont situés tous du même côté du

gisement, cette structure est bien visible. Bien que des contrastes de densité négatifs puissent être observés lorsque les forages entourent le gisement, ces contrastes sont beaucoup mieux distribués et ils sont plus près de zéro. Ces contrastes de densité négatifs peuvent être causés par trois raisons. Premièrement, si une formation de densité plus faible est située sous le gisement (ce qui est très fréquent dans les cas de SMV en Abitibi), une structure de contrastes de densité négatifs peut être observée sous le gisement. Deuxièmement, il se pourrait que les forages ne dépassent pas assez le gisement, alors l'anomalie gravimétrique mesurée sur les forages n'est pas totalement visible et par conséquent est déformée. En allongeant les forages, il a été observé que ces structures ne disparaissent pas entièrement, mais que leurs contrastes de densités sont plus près de zéro. La dernière raison pourrait être que ce phénomène soit créé par l'inversion. Lors de l'inversion du modèle ayant la géologie encaissante seulement, cette structure n'est pas observée. Elle semble apparaître seulement lorsqu'il y a le gisement.

Le nombre de forages affecte aussi grandement les excès de masse calculés et la forme des structures créées par le gisement. Si le but de l'utilisation de la gravimétrie en forage est seulement de détecter un gisement, d'après les modèles synthétiques, seulement trois forages sont nécessaires. Cependant, lorsque la géologie encaissante est plus complexe, elle peut créer des structures ayant un contraste de densité semblable à la structure créée par le gisement. En réalité, il est rare que la gravimétrie soit utilisée au tout début d'une campagne d'exploration, alors plusieurs informations sont déjà connues sur la géologie encaissante. En supposant que c'est le cas, seulement trois forages sont requis pour positionner un gisement. Cependant, si la gravimétrie est utilisée pour analyser la forme, le pendage et l'excès de masse, plus de quatre forages sensibles au gisement, c'est-à-dire à l'intérieur de la portée nécessaire à la détection, sont requis. Au moins l'un des forages doit intercepter le gisement et les autres doivent être situés près du gisement. En ajoutant un forage, plus d'information est accessible à l'inversion et devrait aider à bien positionner le gisement. Cependant, comme mentionné précédemment, la position du forage ajoutée affecte beaucoup les résultats. Si un forage est ajouté, il doit être situé près du gisement ou l'intercepter pour que son information soit vraiment utile.

Les pas de mesure dans les forages n'ont été que brièvement abordés dans le chapitre 4. Cependant, il a été facile d'observer que les résultats obtenus à l'aide des intervalles de 10m sont beaucoup plus clairs et précis que ceux avec des intervalles de 20 m. Les contrastes de densités sont plus élevés et, par conséquent, les excès de masse calculés sont plus élevés et plus près de ceux réels. En plus,

moins d'anomalies aberrantes sont observées ou elles ont des contrastes de densités moins élevés que ceux de la structure située près du gisement.

En théorie, les données de surface devraient aider à positionner la ou les structures recherchées dans le plan horizontal. Des données de surface ont été ajoutées lors des inversions des modèles sans régionale. Lorsque la matrice entourant le gisement est homogène, il a été observé que les données de surface n'aident pas à positionner le gisement en plan. L'anomalie gravimétrique en surface a un maximum de 0.11 mGal. Contrairement aux anomalies en forage qui ont des amplitudes entre 0.3 et 1 mGal, alors lors de l'inversion, les données de surface jouent un rôle secondaire pour positionner la structure. La même chose se produit lorsque la géologie encaissante est complexe. Puisque le gisement ne produit pas d'anomalie en surface, les données de surface n'aident pas à positionner le gisement. Cependant, les données de surface aident à calculer des contrastes de densités plus élevés et donc, plus près de ceux réels. Les données de surface donnent de l'information sur la géologie en surface et ceci aide à mieux définir les formes et les contrastes de densités du modèle. Les données de surface sont surtout intéressantes lorsque le but de la gravimétrie en forage est la caractérisation du gisement.

Dans le cas de détection d'un gisement, lorsque des contraintes sont ajoutées, les différences ne sont pas très grandes. Les structures ont les mêmes formes que celles sans contrainte. Cependant, les contrastes de densités de la structure près du gisement augmentent quelque peu et ceux des anomalies aberrantes diminuent. Ceci permet de positionner le gisement avec un peu plus de certitude. Les contraintes sont surtout importantes pour la caractérisation du gisement. Sans les contraintes, les excès de masse sont sous-estimés dans tous les cas. Aussi, lorsqu'un forage intercepte le gisement, les contraintes aident à mieux retrouver les dimensions du gisement et son pendage.

6.2.2 Influence de la géologie encaissante

Dans l'industrie, plusieurs fois le problème de bruits causés par la géologie encaissante a été soulevé. Il est difficile d'analyser les réponses gravimétriques mesurées lorsque la géologie encaissante crée des anomalies de mêmes amplitudes que celles créées par le gisement. Pour mieux analyser cette problématique, deux modèles ont été conçus. Le premier est un modèle d'une géologie encaissante seulement n'ayant aucun gisement et le deuxième est un modèle d'un gisement dans une géologie encaissante plus complexe.

Seulement deux inversions ont été produites pour le premier modèle. Ces inversions utilisent trois forages pour le cas sans contrainte et le cas utilisant des contraintes de densités fixes le long des forages. Les dykes et le contact entre les formations d'andésite et de rhyolite peuvent être observés, mais seulement près des forages. Ceci est causé par la portée limitée de la gravimétrie en forage. Puisque les extrémités du modèle sont hors portée des forages, l'inversion n'a pas suffisamment d'information. Par conséquent, l'inversion considère ces régions comme homogène et les dykes et le contact entre les deux formations ne sont pas totalement observés. Cependant, où les forages interceptent les différentes formations, l'inversion calcule des structures représentant bien le modèle initial. Le pendage des dykes et du contact peut être observé. En plus, si les résultats sont comparés à ceux ayant un gisement, il est possible de remarquer l'absence de la structure de densité négative sur les résultats du modèle sans gisement.

Sur trois des forages, les réponses gravimétriques modélisées ne permettent pas de bien observer la réponse du gisement. Cependant, même si quelques structures créées par les dykes de gabbro sont observées sur les résultats des inversions, le gisement a pu être localisé. Lorsque des contraintes sont ajoutées, les structures créées par les dykes peuvent encore être observées, mais leurs contrastes de densités sont beaucoup plus petits que ceux du gisement. Il est alors possible de ne pas prendre en compte ces structures et de calculer l'excès de masse du gisement seulement.

L'influence de la géologie encaissante se complique lorsqu'une régionale est ajoutée. Théoriquement, ces réponses ont des longueurs d'onde plus courtes que celles de la régionale, mais plus longues que celles de la structure étudiée. En pratique, il est très difficile de différencier les trois réponses.

6.2.3 Séparation de la régionale-résiduelle

Trois méthodes de séparation ont été utilisées pour analyser leur effet sur les inversions. La première méthode est le gradient vertical, qui à proprement parlé, ne sépare pas l'anomalie résiduelle de la régionale mais aide à détecter les structures locales. Cette méthode est souvent utilisée en industrie. Les deux autres méthodes sont le filtrage non-linéaire et le filtrage par ondelettes. Ces deux filtres sont utilisés un peu moins fréquemment, mais ils demeurent très faciles à utiliser et sont très intéressants pour le cas en forage.

Les trois méthodes ont en commun qu'elles sous-estiment les contrastes de densités calculés, en particulier le gradient vertical, lorsqu'ils sont appliqués sur des données mesurées. Lorsqu'aucun

forage n'intercepte le gisement et qu'aucune contrainte n'est utilisée, les contrastes de densités sont sous-estimés par un facteur de dix. Ces contrastes grandement sous-estimés sont calculés seulement lorsqu'aucun forage n'intercepte le gisement. Si les gradients verticaux sont comparés (figures 4.37 et 4.38), ceux du forage D1 sont beaucoup plus élevés. La réponse des gradients verticaux décroit plus rapidement que celle des données gravimétriques, alors leur portée est plus petite. Le gisement est probablement situé à portée des forages D3 et D5, mais il faut au moins un autre forage pour bien positionner le gisement et calculer des contrastes de densité plus réalistes. Il est important que les forages soient situés à proximité de la structure recherché ou l'intercepte si les gradients verticaux veulent être utilisés. En ajoutant des contraintes, ces contrastes ne font que doubler, alors ils sont encore largement sous-estimés. Toutefois, des structures peuvent quand même être observées, dont une près du gisement. Cette dernière est située un peu plus à l'est, mais l'inversion la situe correctement en profondeur. Lorsqu'un forage intercepte le gisement, les contrastes de densité augmentent significativement. Cependant, des anomalies sont observées sous le gisement et peuvent être trompeuses lors de l'interprétation et du calcul de l'excès de masse. Cette structure peut être causée par deux raisons. Premièrement, il se pourrait que la réponse de la régionale n'ait pas été totalement éliminée à l'aide des gradients verticaux. Sur les figures 4.37 et 4.38, il est difficile de l'observer, mais il semble y avoir une anomalie de longue longueur d'onde. Sur la figure suivante, cette anomalie est mieux observée sur le forage D3. Elle est aussi observée sur les autres forages et cette anomalie pourrait créer la structure observée en profondeur.

c) Forage D3

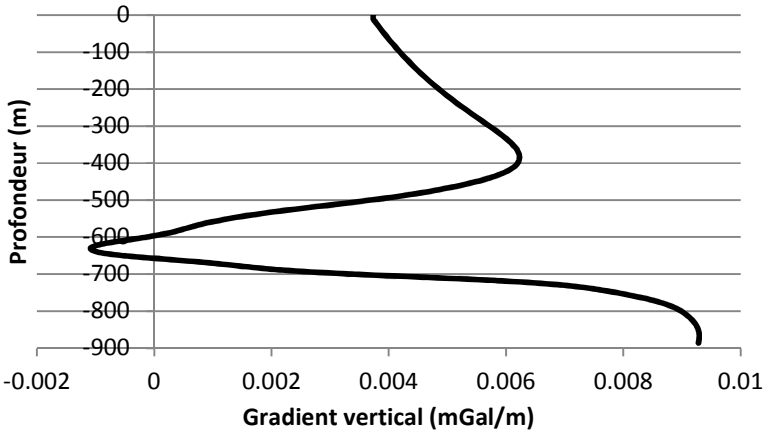


Figure 6.1 : Gradients verticaux du forage D3.

La deuxième raison peut être que les forages ne dépassent pas assez le gisement. L'anomalie gravimétrique mesurée sur les forages n'est pas totalement visible et par conséquent affecte les

résultats des inversions et crée cette structure en profondeur. Pour vérifier ces hypothèses, des inversions utilisant des forages plus longs ont été effectuées. Lors du cas de détection, l'anomalie en profondeur a été éliminée, mais les contrastes de densité calculés sont plus petits que ceux des inversions ayant des forages plus courts. Lors du cas de caractérisation, la structure située directement sous le gisement est encore observée. En ajoutant des contraintes, les contrastes de densité sont plus près de la valeur attendue. Toutefois, la structure calculée a une forme de plaque mince plutôt qu'un disque plat ayant un pendage et les excès de masse calculés sont sous-estimés.

La première analyse des données gravimétriques traitées à l'aide du filtrage non-linéaire semblait montrer que ce filtre n'était pas très adapté aux données en forage (figures 4.43 et 4.44). Lorsqu'aucun forage n'intercepte le gisement, les résultats sont mitigés. Deux structures peuvent être observées sur les résultats : une première située près du gisement et une deuxième située plus en profondeur. Celle située en profondeur a des contrastes de densités plus élevés que ceux de la structure située près du gisement. En plus, la forme de cette dernière ne représente pas très bien celle du gisement. Aucun pendage n'est observé, les contrastes les plus élevés sont plus à l'ouest du gisement et la structure a une forme plus allongée dans l'axe x que le gisement. Cependant, lorsqu'un forage intercepte le gisement, les résultats sont beaucoup plus intéressants. Bien que les contrastes de densités soient sous-estimés, la forme de la structure représente bien un disque plat ayant un pendage d'environ 80°. En ajoutant des contraintes, quelques anomalies aberrantes peuvent être observées, mais si elles sont ignorées, les excès de masse calculés sont très près du contraste réel. En utilisant cinq forages et des contraintes de densités fixes le long des forages, l'excès de masse calculé est exactement 5.8 Mt, soit l'excès de masse réel.

D'après les résiduelles obtenues (figures 4.43 et 4.44), les contrastes de densités calculés à l'aide des données traitées au filtre par ondelettes devraient être un peu plus élevés que ceux obtenus précédemment. Aussi, les résultats devraient être semblables à ceux obtenus à l'aide des données traitées par filtre non-linéaire puisque les résiduelles sont similaires. Cependant, c'est plus ou moins le cas. Bien que les structures près du gisement aient une forme allongée dans l'axe x comme celles calculées précédemment, leurs contrastes de densités sont un peu plus élevés et mieux distribués. Aussi, les structures situées en profondeur ne sont pas observées sur ces résultats-ci. Au lieu de cela, quelques petites anomalies aberrantes de faibles contrastes de densités peuvent être observées. Dans ce cas, il est plus facile de bien positionner le gisement, quoique la forme et le pendage ne soient pas exacts. Toutefois, lorsqu'aucun forage n'intercepte le gisement, mais que quatre forages entourent le

gisement, la forme de plaque mince est bien retrouvée, mais pas le pendage. Aussi les contrastes de densités sont beaucoup plus près de la réalité. Lorsqu'un forage intercepte le gisement, une structure de fort contraste de densités peut être observée près du gisement. Sa forme est un disque plat et son pendage est d'environ 80°, comme le gisement réel. Toutefois, le haut du gisement ne peut être observé et quelques anomalies aberrantes de faible contraste peuvent être observées. Sans contraintes, les excès de masse calculés sont plus élevés que les résultats précédents, mais ils sont moins élevés lorsque des contraintes sont ajoutées bien que la forme de la structure soit très semblable au gisement réel.

Pour les données synthétiques, il semblerait qu'un polynôme d'ordres 1, 2 ou 3 pourrait être utilisé. Toutefois, en réalité ceci est rarement le cas et le but de ce mémoire est d'analyser des méthodes utilisées dans des cas réels. Les polynômes d'ordre faible ont l'avantage de seulement éliminer les longueurs d'ondes plus grandes. Le choix de l'ordre du polynôme est subjectif et la restitution de la résiduelle va en dépendre. Le polynôme tend à passer par l'ensemble des points alors que le filtrage non linéaire et le filtrage par ondelettes préserve le niveau régional.

6.2.4 Comparaison des excès de masse calculés

Les tableaux suivants comparent les excès de masse calculés. Rappelons que l'excès de masse du gisement modélisé est de 5.8 Mt dans une matrice homogène et ayant une régionale. L'excès de masse du gisement dans une géologie encaissante plus complexe est de 6.4 Mt.

Tableau 6.1: Comparaison des excès de masse calculés sans contrainte

Forages	**Matrice homogène**	**Géologie complexe**	**Gradient vertical**	**Filtre non-linéaire**	**Filtre par ondelettes**
D1, D2, D3	2.5	3.4	2.5	2.0	3.9
D1, D2, D3, D4	2.9	3.7	2.2	2.8	2.8
D1, D2, D3, D4, D5	3.7	5.2	2.4	3.2	3.7

Tableau 6.2 : Comparaison des excès de masse calculés avec contraintes de densité fixes le long des forages

Forages	**Matrice homogène**	**Géologie complexe**	**Gradient vertical**	**Filtre non-linéaire**	**Filtre par ondelettes**
D1, D2, D3	3.4	4.5	3.5	4.4	4.1
D1, D2, D3, D4	3.7	4.5	3.3	4.4	4.3
D1, D2, D3, D4, D5	4.3	6.0	3.4	5.8	4.6

Lorsque trois forages sont utilisés et aucune contrainte n'est ajoutée, les excès de masse calculés varient beaucoup. Le gradient vertical est celui avec lequel les excès de masse obtenus sont les moins élevés. Les excès de masse calculés avec quatre et cinq forages à l'aide du filtre non-linéaire et des ondelettes sont semblables à ceux pour une matrice homogène. Lorsque des contraintes de densité sont ajoutées le long des forages, les excès de masse calculés à l'aide du filtre non-linéaire et des ondelettes montrent les valeurs les plus élevées.

Ces excès de masse sont sous-estimés à cause de la méthode utilisée. À cause de l'effet de lissage, la masse n'est pas totalement concentrée près du gisement. Dans le cas où la géologie encaissante est homogène, si tous les contrastes de densités plus élevés que 0 g/cm^3 sont considérés, théoriquement, l'excès de masse réel devrait être retrouvé. Dans le cas où la géologie encaissante est plus complexe, les excès de masse sont sous-estimés parce qu'une partie de la masse du gisement est probablement incorporée dans celle des dykes de gabbro et de la formation d'andésite.

6.3 Étude de cas : Coulon

À première vue, les réponses gravimétriques mesurées semblaient difficiles à traiter et à analyser. Cependant, les réponses obtenues sont concluantes. Dans tous les cas, une ou deux structures sont observées près du modèle de gisement. En plus, ce n'est seulement sur les résultats obtenus à l'aide des données traitées par filtrage non-linéaire que deux petites anomalies aberrantes ont été observées. Ceci peut être expliqué par le fait que les forages sont situés près du gisement, alors les structures sont concentrées près de ces forages. Aussi, les contrastes de densités et les excès de masse calculés semblent réalistes. En ce qui concerne la forme, les gradients verticaux calculent une structure qui se rapproche le plus de la forme du gisement. Ce sont les données traitées à l'aide de la méthode

graphique qui calculent les contrastes de densité les plus élevés, puisque c'est sur ces résiduelles que les anomalies ayant les plus grandes amplitudes sont observées.

La méthode graphique calcule des excès de masse plus élevés puisque les contrastes de densité utilisés sont plus élevés. Cependant, l'excès de masse calculé par filtrage non-linéaire est semblable à ce dernier, même si les amplitudes des anomalies sur les résiduelles sont plus petites. Les excès de masse calculés par gradients verticaux sont plus faibles, mais semblent être réalistes, comme les résultats des modèles synthétiques lorsqu'au moins un forage intercepte le gisement. De façon surprenante, ce sont les excès de masse calculés à l'aide des données traitées par ondelettes qui sont les plus faibles. Ceci est contradictoire avec les modèles synthétiques puisque c'est avec cette méthode que les excès de masse les plus réalistes sont calculées. Il s'agit peut-être des ondelettes utilisées. Il serait intéressant de comparer d'autres résultats obtenus. Puisqu'aucune contrainte n'a été utilisée, il est difficile de s'assurer quels excès de masse sont exacts. Pour caractériser adéquatement le gisement, il faudrait plus de données gravimétriques en forage et/ou en surface et des contraintes. D'après les modèles synthétiques sans contraintes, il est possible de supposer que ces excès de masse sont sous-estimés et qu'ainsi il soit très probable que l'excès de masse réel soit plus élevé.

Bien que les résultats obtenus aient démontrés que la gravimétrie en forage est une méthode adaptée à l'exploration minière dans un contexte de géologie du Bouclier Canadien, il faut garder en tête que les données mesurées dans les forages n'ont pas été reliées entre elles. Ce qui veut dire que certaines corrections n'ont pas pu être faites sur les données. Ceci a probablement affecté les excès de masse calculés et la forme des structures calculées. Cependant, ces erreurs ne semblent pas avoir affecté grandement la position des structures calculées. Aussi, puisque les forages sont trop courts, l'anomalie gravimétrique créée par le gisement n'est pas observée entièrement.

6.4 Étapes suivantes

L'ajout de données de surface a été analysé seulement dans les cas où il n'y a pas de régionale. Cependant, dans les cas où les données de surface ont été ajoutées, il a été observé que ces données peuvent grandement aider à calculer précisément l'excès de masse et la forme du gisement. Il serait intéressant d'analyser l'ajout de données de surface lors des cas avec régionale. Les données seraient traitées avec les différentes méthodes de séparation régionale-résiduelle et utilisées lors des inversions. Théoriquement, ceci permettrait de calculer des excès de masse plus élevés, alors plus près de ceux réels.

Deux irrégularités ont été observées sur les résultats synthétiques. Premièrement, des structures de contrastes de densité négatifs ont été observées sur certains résultats. Deuxièmement, sur les résultats de gradients verticaux une structure de contrastes de densité élevés peut être observée en profondeur. Ces deux phénomènes pourraient être créés par les forages qui ne vont pas assez profondément. Les anomalies gravimétriques calculées sont peut-être déformées, alors ces structures apparaissent. Il serait intéressant d'allonger les forages et calculer les nouveaux résultats d'inversion. Ensuite, ces résultats pourront être comparés aux résultats précédents pour savoir si ces phénomènes sont bien créés par les forages ayant des longueurs trop courtes.

Le problème de la séparation de la régionale-résiduelle-roche encaissante peut être mieux analysé. Il suffirait de construire un nouveau modèle synthétique incluant une géologie encaissante complexe et une structure régionale. Les réponses gravimétriques seraient modélisées, puis analysées. Comme pour les réponses gravimétriques modélisées avec une régionale, différents traitements seraient appliquées aux données, puis ces nouvelles données pourront être inversées. Ceci nous permettrait d'analyser ces traitements sur les réponses de la géologie encaissante.

Dans le cas de la lentille 44 du projet Coulon, aucune contrainte n'a été utilisée, puisqu'aucune densité moyenne n'était connue. Il serait intéressant d'inclure les densités des carottes de forage pour pouvoir calculer les densités des différentes formations interceptées ou de faire un levé gamma-gamma dans les forages situés dans cette région. En plus, en connaissant la densité moyenne du gisement et de la géologie encaissante, il serait possible de calculer le tonnage du gisement plus précisément. De nouvelles données gravimétriques seront mesurées sur le site de Coulon dès cet été 2013. Cette fois-ci les forages seront reliés entre eux par un levé de rattachement.

La cosimulation n'a pas été abordée dans ce projet. Cependant, c'est une méthode stochastique d'inversion très intéressante qui peut être facilement appliquée à la gravimétrie en forage. Il serait intéressant de comparer les inversions par cosimulation et par cokrigeage.

Un dernier aspect de l'inversion par cokrigeage qui n'a pas été abordé dans ce mémoire, mais qui serait intéressant est l'erreur sur les données. Dans les cas synthétiques, aucune erreur n'a été associée aux données gravimétriques. Dans le cas de Coulon, les erreurs sont de l'ordre de 10 microGal, jusqu'à 50 fois plus petites que les données associées à l'anomalie du gisement; elles n'ont pas affectées les inversions de manière significative. Cependant, ceci n'est pas toujours le cas, alors il serait intéressant d'analyser le cas où des erreurs plus grandes sont ajoutées aux données.

6.5 Conclusion

La gravimétrie en forage peut être utilisée pour plusieurs applications. Pour ce projet, nous voulions savoir si elle est adaptée à l'exploration minière et comment les paramètres d'acquisitions et le traitement des données affectent les résultats d'inversion. Quelques scénarios typiques d'un SMV dans un contexte du Bouclier Canadien ont été étudiés. En général, la méthode permet de détecter et de caractériser un gisement. La gravimétrie en forage comporte deux limitations majeures lorsque la méthode est utilisée pour caractériser un gisement et lors du traitement des données. Pour caractériser adéquatement un gisement et conclure s'il est économiquement exploitable, les contraintes sont de mise et quatre forages sont requis dont au moins l'un d'entre eux doit intercepter le gisement. Les contraintes diminuent le nombre de forages nécessaires pour calculer un excès de masse précis et retrouver les dimensions du gisement, ce qui peut diminuer le coût et le temps d'une campagne de forage. Il est aussi recommandé que les forages entourent le gisement et/ou qu'ils soient situés le plus près possible du gisement. Les portées des forages peuvent être calculées pour confirmer s'ils sont suffisamment près du gisement. Aussi, le modèle de covariance qui affecte les résultats des inversions est difficile et long à bien calculer. En ayant une bonne connaissance de la géologie encaissante, un modèle de covariance initiale adéquat peut être utilisé et réduire le temps de calcul pour trouver et comparer plusieurs modèles de covariance.

La séparation de la régionale-résiduelle est une problématique réelle et difficile à résoudre. Dans ce projet, le but d'analyser différentes méthodes est de connaître leur impact sur les résultats d'inversion. Lorsqu'aucun forage n'intercepte le gisement et qu'ils sont tous situés d'un même côté du gisement, les méthodes ne retrouvent pas la forme du gisement. Cependant, il est à noter que c'est aussi le cas lorsqu'il n'y a pas de régionale. Aussi, comme pour les résultats obtenus sans régionale, des anomalies aberrantes peuvent être observées autour du gisement. La plus grande différence entre les résultats sans et ayant une régionale réside dans les contrastes de densités. Les contrastes de densités calculés sans la régionale sont un peu plus élevés que ceux avec la régionale. Ceci est dû aux amplitudes plus grandes des anomalies gravimétriques des résiduelles réelles. Cependant, lorsque des contraintes sont ajoutées, la différence de contrastes de densité diminue significativement.

Gradient vertical : Le gradient vertical est facile à calculer et ne requiert aucune information *à priori*. Cependant, il a été observé dans les cas synthétiques et dans le cas de Coulon que ce sont les résultats calculés à l'aide des gradients verticaux qui calculent les contrastes de densité les plus

faibles et par conséquent les excès de masse les plus faibles. La réponse des gradients verticaux décroit plus rapidement que celle des données gravimétriques, alors pour que la méthode soit efficace, il faut qu'il y ait au moins un forage qui intercepte le gisement.

Filtre par ondelettes : Le filtre par ondelettes est facile à appliquer, mais plusieurs ondelettes peuvent être utilisées. Pour calculer la résiduelle, il faut essayer plusieurs ondelettes et comparer leurs résultats d'inversion ce qui requiert un peu de temps. Dans les cas synthétiques, le filtre par ondelette calcule la résiduelle qui est la plus similaire à la réponse gravimétrique du gisement. Cependant, dans le cas de Coulon, la forme de la structure située près du gisement est similaire à celle obtenue par filtre non-linéaire et par méthode graphique. Toutefois, les contrastes de densités calculés sont plus faibles que ceux calculés à l'aide de ces deux méthodes.

Filtre non-linéaire : Le filtre non-linéaire est plus facile à calculer que le filtre par ondelettes puisqu'il y a seulement deux paramètres qui varient. Les données traitées à l'aide de la méthode graphique et par filtre non-linéaire semblent calculer des résultats semblables puisque les deux méthodes n'utilisent que des informations de types géométriques pour calculer les résiduelles. Les contrastes de densité sont réalistes même lorsqu'aucun forage n'intercepte le gisement.

Ces méthodes comportent leurs avantages et leurs inconvénients. Si le but de la gravimétrie en forage est de détecter un gisement, il est recommandé d'utiliser les méthodes de filtre non-linéaire ou par ondelettes plutôt que le gradient vertical. Si le but de la gravimétrie est de caractériser un gisement, les trois méthodes semblent être adéquates, mais calculent des résultats quelque peu différents l'une de l'autre. Il est recommandé de comparer les résultats des différentes méthodes et surtout d'utiliser des contraintes. En utilisant des contraintes, certaines ambigüités peuvent être dissipées et alors les inversions sont beaucoup plus robustes.

L'étude de cas de Coulon a pu démontrer que la gravimétrie en forage est bien adaptée pour localiser un gisement. Une structure a été positionnée près du gisement modélisé même si peu d'informations sont connues sur la géologie encaissante, qu'aucune contrainte n'a été utilisée et que les anomalies gravimétriques créées par le gisement ne sont pas totalement observées sur les forages. Les excès de masse calculés sont probablement sous-estimés et nous indiquent plutôt un seuil minimum de l'excès de masse. Cet exercice a pu démontrer l'importance des contraintes et des informations *a priori* et les limitations de la gravimétrie en forage pour bien caractériser un gisement.

RÉFÉRENCES

Asli, M., Marcotte, D., and Chouteau, M. (2000). Direction inversion of gravity data by Cokriging. In Kleingeld and Krige, editors, 6th International Geostatistics Congress, Cape Town, South Africa, 64-73.

Barbosa, V. C. and Silva, J. (1994). Generalized compact gravity inversion. Geophysics, 59(1), 57-68.

Barrett, T. J., MacLean, W. H., Cattalani, S., Hoy, L., & Riverin, G. (1991). Massive sulfide deposits of the Noranda area, Quebec. III. The Ansil mine. Canadian Journal of Earth Sciences, 28(11), 1699-1730.

Barrett, T. J., MacLean, W. H., Cattalani, S., & Hoy, L. (1993). Massive sulfide deposits of the Noranda area, Quebec. V. The Corbet mine. Canadian Journal of Earth Sciences, 30(9), 1934-1954.

Black, A. (1996). Borehole Gravity Handbook. Mississauga : Edcon Worldwide Gravity & Magnetics.

Blakely, R. (1995). Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. Cambridge University Press.

Boulanger, O. and Chouteau, M. (2001). Constraints in 3D gravity inversion. Geophysical Prospecting, 49(2), 265-280.

Brown, A.R. and Lautzenhiser, T.V. (1982). The effect of dipping beds on a borehole gravimeter survey. Geophysics, 47(1), 25-30.

Chasseriau, P., and Chouteau, M., (2003). 3D gravity inversion using a model of parameter covariance. Journal of Applied Geophysics, 52, 59-74.

Farquharson, C.G. and Mosher, C.R.W. (2009). Three-dimensional modelling of gravity data using finite differences. Journal of Applied Geophysics, 68, 417-422.

Fedi, M. and Quarta, T. (1998). Wavelet analysis for the regional-residual and local separation of potential field anomalies. Geophysical Prospecting, 46, 507-525.

Galley, A. G., Hannington, M. D., & Jonasson, I. R. (2007). Volcanogenic massive sulphide deposits. Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny,

the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, (5), 141-161.

Giroux, B., Chouteau, M., Seigel, S., Nind, C. (2007). A program to Model and Interpret Borehole Gravity Data. Poster presented at Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, Toronto, ON.

Gloaguen, E., Marcotte, D., Chouteau, M. and Perroud, H. (2005). Borehole radar velocity inversion using cokriging and cosimulation. Journal of Applied Geophysics, 57, 242-259.

Gupta, V. and Ramani, N. (1980). Some aspects of regional-residual separation of gravity anomalies in a Precambrian terrain. Geophysics, 45, 1412-1426.

Haáz, I. (1953). Relation between the potential of the attraction of the mass contained in a

finite rectangular prism and its first and second derivatives. *Geophysical Transactions II*, 7, 57-66. (in Hungarian)

Hearst, J.R. (1977). Estimation of dip and lateral extent of beds with borehole gravimetry. Geophysics, 42(5), 990-994.

Ioannou, S.E., and Spooner, E. (2007). Fluid Temperature and Salinity Characteristics of the Matagami Volcanogenic Massive Sulfide District, Quebec. Economic Geology, 102, 691-715.

Jacobsen, B.H. (1987). A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps. Geophysics, 52(8), 1138-1148.

Keating, P. and Pinet, N. (2011). Use of non-linear filtering for the regional-residual separation of potential field data. Journal of Applied Geophysics, 73, 315-322.

LaFehr, T.R. (1983). Rock density from borehole gravity surveys. Geophysics, 48(3), 341-356.

Last, B.J. and Kubik, K. (1983). Compact gravity inversion. Geophysics, 48(6), 713-721.

Li, Y. and Oldenburg, D. (1996). 3-D inversion of magnetic data. Geophysics, 61(2), 394-408.

Li, Y. and Oldenburg, D. (1998). 3-D inversion of gravity data. Geophysics, 63(1), 109-119.

Li. Y. and Oldenburg, D. (1998). Separation of regional and residual magnetic field data. Geophysics, 63(2), 431-439.

Li, X. and Chouteau, M. (1998). Three-Dimensional Gravity Modeling in all Space. Surveys in Geophysics, 19, 339-368.

Li, X. and Chouteau, M. (1999). On density derived from borehole gravity. Log Analyst, 40, 33-37.

Marcotte, D. (1991). Cokriging with Matlab. Computers & Geosciences, 17(9), 1265-1280.

Menke, W. (1989). Geophysical data analysis: discrete inverse theory. Academic press.

Mosher. C.R.W., Farquharson, C.G and Hurich, C.A. (2008) Minimum-structure borehole gravity inversion. Presented at SEG Las Vegas 2008 Annual Meeting.

Naudy, H. and Dreyer, H. (1968). Essai de filtrage non-lineaire applique aux profils aeromagnetiques. Geophysical Prospecting, 16, 171-178.

Nettleton. L.L. (1954). Regionals, residuals and structures. Geophysics, 19(1), 1-22.

Nind, C., Seigel, H., Chouteau, M. and Giroux, B. (2007). Devolepment of a borehole gravimeter for mining applications. First break, 25, 71-77.

Piché, M., Guha, J., and Daigneault, R. (1993). Stratigraphic and Structural Aspects of the Volcanic Rocks of the Matagami Mining Camp; Québec: Implications for the Norita Ore Deposit. Economic Geology, 88, 1542-1558.

Pilkington, M. (1997). 3-D magnetic imaging using conjugate gradients. Geophysics, 62(4), 1132-1142.

Shamsipour, P., Marcotte, D., Chouteau, M. and Keating, P. (2010) 3D Stochastic Inversion of Gravity Data using Cokriging and Cosimulation. Geophysics, 75, I1-I10.

Shamsipour, P., Marcotte, D., Chouteau, M. and Allard, M. (2011) Stochasic inverison of a gravity field on multiple scale parameters using surface and borehole data. Geophysical Prospecting, 59, 998-1012.

Singh, B. and Guptasarma, D. (2001). New method for fast computation of gravity and magnetic anomalies from arbitrary polyhedron. Geophysics, 66, 521-526.

Smith, N. J. (1950). The case for gravity data from boreholes. Geophysics, 15(4), 605-636.

Snyder, D. (1976). Borehole Bouguer Gravity Anomaly – Application to interpreting borehole gravity surveys. Presented at SPWLA Seventeenth annual logging symposium.

Tarantola, A., & Valette, B. (1982). Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion. Reviews of Geophysics, 20(2), 219-232

Telford, W. W. M., & Sheriff, R. E. (1990). Applied geophysics (Vol. 1). Cambridge University Press.