

**LEVÉS MAGNÉTIQUE ET GRAVIMÉTRIQUE AÉROPORTÉS  
RÉGION DE LA GASPÉSIE - ÎLES-DE-LA-MADELEINE, QUÉBEC**

**CARTES NTS 011K, 011L, 011M, 011N, 012C, 012D ET 022A**

**INTERPRÉTATION DES DONNÉES  
RAPPORT FINAL**

**Présentée au :**

**MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES RESSOURCES NATURELLES**

Direction générale des hydrocarbures et des biocombustibles

5700 – 4<sup>e</sup> Avenue Ouest – A.422

Québec (Québec)

G1H 6R1

**Présentée par :**

**Géophysique Camille St-Hilaire Inc.**

678 Route des Pionniers, CP53

Rouyn-Noranda (Québec)

J9X 5C1

**5 octobre 2015**

## TABLE DES MATIÈRES

Sommaire.....	1
Remerciements.....	4
Avant-propos.....	5
1.0 INTRODUCTION.....	6
2.0 CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE.....	9
3.0 TRAVAUX D'EXPLORATION ET CONTEXTE JURIDIQUE.....	10
4.0 CONTEXTE GÉOLOGIQUE.....	14
4.1 Potentiel économique.....	14
4.2 Bassins sédimentaires.....	14
4.3 Puits Shell-Amoco Cap Rouge F52.....	16
4.4 La structure Old Harry.....	16
5.0 TECHNIQUES GÉOPHYSIQUES UTILISÉES.....	19
6.0 AUTRES DONNÉES UTILISÉES.....	20
6.1 Carte bathymétrique.....	20
6.2 Carte de l'Anomalie de Bouguer (terrestres et off-shore).....	20
7.0 INTERPRÉTATION DES DONNÉES.....	23
7.1 Introduction.....	23
7.2 Domaines Géophysiques.....	25
7.3 Linéaments magnétiques.....	27
7.3.1 Domaine Nord-Ouest.....	27
7.3.2 Domaine Nord-Est.....	28
7.3.3 Dykes.....	30
7.4 Intrusion de roches volcaniques mafiques, Domaine Nord.....	31
7.5 Anomalies magnétiques/gravimétriques arrondies, Domaine Sud.....	33
7.5.1 Région des Dômes.....	33
7.5.2 Plis géologique.....	40
7.6 Hauts magnétiques de formes indéfinies.....	42
7.7 Méthode de déconvolution d'Euler.....	44
7.8 Analyse Spectrale.....	46
7.9 Inversion 3D.....	54
7.10 Modélisation 3D, Old Harry.....	59
8.0 RÉSULTATS ET RECOMMANDATIONS.....	63
8.1 Introduction.....	63
8.2 Cibles proposées.....	63
8.2.1 Région des dômes.....	63
8.2.2 Hauts magnétiques de forme indéfinie (Zone turbulente).....	63
8.2.3 Plis géologique.....	64
8.2.4 Structure Old Harry.....	64
8.2.5 Structure similaire à Old Harry.....	64
9.0 CONCLUSIONS.....	65
10.0 RÉFÉRENCES GÉNÉRALES.....	66

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Feuilles SNRC couverts en tout ou en partie .....	6
Tableau 2 : Système de référence géodésique utilisé .....	7
Tableau 3 : Profondeurs obtenues sur les profils A, B et B2 .....	36
Tableau 4 : Résultats de l'analyse spectrale par domaine (mag) .....	47
Tableau 5 : Résultats de l'analyse spectrale par domaine (grav).....	47

## Liste des figures

Figure 1 : Limites des travaux, Bloc A : mag seul; Bloc B : mag/grav.....	8
Figure 2 : Le fleuve, l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent .....	9
Figure 3 : Détroits de Cabot et de Belle-Isle .....	10
Figure 4 : Lignes sismiques et puits dans le golfe du Saint-Laurent .....	11
Figure 5 : Forages réalisés dans le golfe.....	11
Figure 6 : Bassins Anticosti et Madeleine.....	15
Figure 7 : Modèle de piège « dôme de sel ».....	18
Figure 8 : Formation des dômes à partir d'un horizon de sel d'épaisseur constante .....	18
Figure 9 : La structure géologique Old Harry.....	19
Figure 10 : Carte Bathymétrique/Topographique du golfe du Saint-Laurent .....	21
Figure 11 : Anomalie de Bouguer, données de RNC .....	22
Figure 12 : Solution non-unique, exemple gravimétrique.....	24
Figure 13 : Domaines Géophysiques, Carte du Gain Automatique Corrigé .....	26
Figure 14 : Carte de localisation des différents profils (en rouge).....	27
Figure 15 : Profil C, Domaine Nord-Ouest .....	28
Figure 16 : Profil F, Domaine Nord-Est.....	29
Figure 17 : Profil G, Domaine Nord-Ouest .....	30
Figure 18 : Profil G2, Domaine Nord-Ouest .....	31
Figure 19 : Intrusion mafique arrondie .....	32
Figure 20 : La Région des Dômes, Mag Résiduel RAP et anomalies mag. circulaires .....	34
Figure 21 : Anomalie de Bouguer et sa première dérivée, Zone des Dômes .....	35
Figure 22 : Profil A, Région des Dômes .....	37
Figure 23 : Profil B, Région des Dômes .....	38
Figure 24 : Profil B2, Région des Dômes .....	39
Figure 25 : Profil B, Modèle géologique proposé.....	40
Figure 26 : Profil I et I2, Plis géologiques.....	41
Figure 27 : Profil Zone Bruyante, Région des Dômes .....	43
Figure 28 : Secteur Ouest du Domaine Sud, Plis géologiques.....	44
Figure 29 : Profondeurs d'Euler calculées.....	45
Figure 30 : Spectre de Puissance pour l'ensemble des données.....	48
Figure 31 : Spectre de Puissance pour le Domaine Sud.....	49
Figure 32 : Spectre de Puissance pour le Domaine Nord-Ouest .....	50
Figure 33 : Spectre de Puissance pour le Domaine Nord.....	51

Figure 34 : Spectre de Puissance pour le Domaine Nord-Est.....	52
Figure 35 : Spectre de Puissance de l'Anomalie de Bouguer.....	53
Figure 36 : Inversion 3D gravimétrique, vue du dessus, du Sud vers le Nord.....	55
Figure 37 : Inversion 3D gravimétrique, vue du dessus, de l'Est vers l'Ouest.....	56
Figure 38 : Inversion 3D gravimétrique, vue du dessous, de l'Est vers l'Ouest.....	57
Figure 39 : Inversion 3D gravimétrique, vue du dessus, du Nord vers le Sud.....	58
Figure 40 : Old Harry, Localisation du secteur modélisé .....	59
Figure 41 : Old Harry, modélisation 3D, Vue du dessus, du S-O vers le N-E.....	60
Figure 42 : Old Harry, modélisation 3D, Vue du dessus, du N-E vers le S-O.....	61
Figure 43 : Old Harry, modélisation 3D, Vue du dessous, du N-E vers le S-O.....	62

### ANNEXE A : Description de la technique magnétique

A1 INTRODUCTION.....	1
A2 APPLICATION DE FILTRES DE REHAUSSEMENT D'IMAGE.....	2
A3 LA PROSPECTION MAGNÉTIQUE .....	3
A4 INTERPRÉTATION QUALITATIVE.....	3
A5 INTERPRÉTATION QUANTITATIVE .....	8
A5.1 Analyse Spectrale .....	8
A5.2 Méthode de Déconvolution d'Euler .....	11
A5.3 Calcul de la profondeur d'un dyke par la Méthode de Peters.....	12
A5.4 Modélisation 2.5D .....	14
A5.5 Inversion 3D.....	14
A5.6 Modélisation 3D.....	14

### ANNEXE B : Description de la technique gravimétrique

B.1 INTRODUCTION.....	1
B.2 UTILISATION DE MODÈLES GÉOMÉTRIQUES SIMPLES .....	2
B.3 INVERSION DES ANOMALIES GRAVIMÉTRIQUES .....	3
B.4 AUTRES TECHNIQUES D'INTERPRÉTATION.....	3

### ANNEXE C : Cartes produites et utilisées lors de l'interprétation des données

Étant donné le nombre de méga-octets que constitue cette annexe, elle est fournie dans un fichier séparé du rapport final. Elle contient les cartes suivantes réduites au format 8½ X 11.

- Carte couleur du Champ Magnétique Total Résiduel Réduit au Pôle (RAP);
- Carte en relief ombragé du Champ Magnétique Total Résiduel Réduit au Pôle;
- Carte couleur du Gradient Vertical Calculé;
- Carte couleur de la Deuxième Dérivée Verticale Calculée;
- Carte couleur du Signal Analytique;
- Carte couleur du Tilt Magnétique;
- Carte couleur du Gain Automatique Contrôlé;
- Carte couleur de l'Anomalie de Bouguer;
- Carte en relief ombragé de l'Anomalie de Bouguer;
- Carte du gradient vertical de l'Anomalie de Bouguer;
- Carte en relief ombragé du gradient vertical de l'Anomalie de Bouguer.

## Sommaire

Le présent document concerne l'interprétation détaillée des données magnétiques et gravimétriques aéroportées acquises du 24 août au 11 novembre 2010 au-dessus du golfe du Saint-Laurent pour le compte du **Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles** (MERN), **Direction générale des hydrocarbures et des biocombustibles** (DGHB). L'objectif premier des travaux d'acquisition et d'interprétation était de définir des structures géologiques potentiellement favorables à la présence et à l'accumulation d'hydrocarbures.

Après une courte présentation des conditions hydrographiques régionales (section 2.0), d'un bref historique des travaux d'exploration et du contexte juridique (section 3.0), la section 4.0 présente une description du potentiel économique de la zone d'étude.

Par la suite, la section 5.0 discute de l'intérêt d'utiliser les techniques géophysiques faisant intervenir la mesure des champs magnétique et gravimétrique pour la recherche d'hydrocarbures. Des données complémentaires constituées d'une carte bathymétrique du golfe du Saint-Laurent et d'une carte de l'anomalie de Bouguer réalisée à partir de données terrestres et off-shore furent aussi utilisées comme outil lors de l'interprétation des données géophysiques (section 6.0).

La section 7.0 constitue en fait le cœur de ce document puisqu'elle concerne l'interprétation des données géophysiques proprement dite. En fonction de leurs signatures magnétiques (intensités et textures de magnétisation), la zone d'étude fut divisée en 4 domaines qui furent nommés selon leurs localisations géographiques (**Nord**, **Nord-Ouest**, **Nord-Est** et **Sud**).

Les **Domaines Nord**, **Nord-Ouest** et **Nord-Est** présentent un champ magnétique beaucoup plus intense que celui observé dans le **Domaine Sud**. La différence d'intensité du champ magnétique résiduel est de l'ordre de 550 nT et la démarcation est si nette qu'on pourrait soupçonner la présence d'une cassure majeure.

### Domaine Nord-Ouest (section 7.3.1)

Tout un réseau de linéaments magnétiques orientés Ouest-Nord-Ouest à Nord-Ouest fut identifié dans le **Domaine Nord-Ouest**. Leurs amplitudes varient entre 5 et 20 nT et certains ont jusqu'à 70 km de longueur. Leurs largeurs sont de l'ordre du kilomètre. D'après nos observations, ces linéaments seraient associés à des dépôts fluviaux charriés par le fleuve Saint-Laurent. Ceux-ci contiendraient entre autre des minéraux lourds ferromagnésiens qui se seraient déposés dans le lit du fleuve. Cette conclusion est basée sur 2 résultats :

- Les linéaments semblent directement reliés à la présence du chenal;
- Le calcul de leurs profondeurs donne des valeurs qui correspondent exactement aux profondeurs obtenues par le levé bathymétrique du Service Hydrographique de Pêche et Océan Canada.

### **Domaines Nord-Est et Nord** (sections 7.3.2)

Dans le **Domaine Nord-Est**, une autre série de linéaments magnétiques, cette fois parallèles et orientés Nord-Est, est observée. Malheureusement, ces linéaments sont aussi orientés subparallèles aux lignes de vol et plus ou moins bien définis. Pour cette raison il fut très difficile d'évaluer leur profondeur et surtout d'expliquer quelle en serait l'origine. Ils se présentent comme d'immenses vagues de longueurs d'onde variant entre 2 et 6 km. L'amplitude maximale des anomalies magnétiques est de l'ordre d'une centaine de nT, ce qui est assez élevé.

### **Domaines Nord** (sections 7.4)

Le **Domaine Nord** est surtout caractérisé par la présence présumée d'une intrusion de roches volcaniques mafiques de forme circulaire caractérisée par son intense signature magnétique (amplitude de 1 200 nT). Sa profondeur estimée à partir du modèle d'un cylindre vertical infini serait approximativement de 3 400 mètres, son diamètre de 26 km et son inclinaison sub-verticale. Vraisemblablement, il pourrait s'agir ici d'un batholite ayant traversé en partie la colonne sédimentaire.

### **Domaines Sud** (section 7.5)

Le **Domaine Sud** comprend ce que nous avons désigné par la « **Région des Dômes** » où pas moins de 34 anomalies magnétiques **positives** de forme arrondie ont pu être cartographiées. L'ensemble de ces anomalies semble tracer un arc de cercle autour des Îles-de-la-Madeleine et pratiquement toutes sont associées à des anomalies gravitationnelles **négatives**.

Géophysiquement parlant, une masse de sel est diamagnétique et produit de faibles anomalies magnétiques négatives qui sont le plus souvent masquées par un phénomène plus intense (chapeau de roche para ou ferromagnétique). Étant donné qu'on se situe ici dans un environnement sédimentaire, donc magnétiquement très calme, ces anomalies apparaissent positives si elles présentent un chapeau de roches volcaniques mafiques et négatives ou nulles si elles n'en possèdent pas. Par ailleurs, le sel étant de faible densité, les anomalies magnétiques positives ou négatives sont accompagnées d'anomalies gravimétriques négatives.

Dans le cas de la structure **Old Harry** aucune anomalie magnétique positive n'est superposée au bas gravimétrique. C'est donc dire qu'aucun chapeau de roche ne lui est associé. Ce n'est pas tout à fait une exception car nous avons observé quelques autres, quoique rares, anomalies gravimétriques négatives qui ne se superposent à aucune anomalie magnétique positive.

Nous avons observé aussi que pratiquement toutes les anomalies magnétiques ou gravimétriques de forme arrondie situées dans la **Région des Dômes**, sont enclavées dans un amalgame d'anomalies magnétiques de hautes fréquences (longueur d'onde de l'ordre du kilomètre) et présentant une texture particulièrement turbulente. Au Nord-Ouest de la **Région des Dômes**, quelques unes de ces anomalies sont encore présentes, s'étirant en de

longs et larges rubans sur des dizaines de kilomètres. Ces rubans pourraient correspondre à des reliquats d'halite déformés, reliant le plus souvent entre eux plusieurs dômes de sel, créant ainsi un patron anomal désordonné, chaotique. Ces reliquats pourraient entre autre constituer des couloirs de migration pour les hydrocarbures.

### Plis géologiques

Toujours dans le **Domaine Sud**, et à l'extrême Ouest de la **Région des Dômes**, les résultats semblent indiquer la présence d'une série de synclinaux-anticlinaux. L'un de ces anticlinaux, en forme de cacahouète et orienté Est-Ouest, est long de 58 km et large de 20 km. Les profondeurs, obtenues par la Méthode d'Euler, varient entre 600 à 800 mètres sur le toit de l'anticlinal, à plus de 2 000 mètres lorsqu'on s'éloigne sur ses flancs. Ce pli pourrait être d'un intérêt capital pour l'exploration des hydrocarbures. Si cette structure est confirmée, l'anomalie magnétique, pourrait représenter un piège gigantesque, d'autant plus que celui-ci est situé à la limite Ouest de la **Région des dômes** et que les larges rubans, dont il est question plus haut, pourraient avoir servi de couloirs de migration pour les hydrocarbures et alimenter cet immense anticlinal.

À noter que quelques vieilles lignes sismiques quadrillent ce secteur et il pourrait être facile de confirmer ou pas la présence et la géométrie de l'anticlinal. Même si ces données sismiques datent de 40 à 50 ans, il est possible d'en augmenter la résolution et la définition en les reprocessant avec des ordinateurs et des logiciels plus performants.

### Conclusion et recommandations

En conclusion il est proposé de nombreuses cibles d'exploration, toutes aussi prioritaires les unes des autres. Il suffit de mentionner :

- les différentes anomalies géophysiques circulaires qui correspondent à des dômes de sel;
- l'immense anticlinal présumé situé dans le secteur ouest du **Domaine Sud**;
- les longs et larges rubans magnétiques qui relient entre eux plusieurs dômes de sel;
- la structure **Old Harry** et sa jumelle (profil B2) qui présentent sensiblement la même forme (chameau à 2 bosses), les mêmes dimensions (25 X 11 km) et la même signature géophysique.

## Remerciements

Le présent rapport a été réalisé grâce au support de l'équipe de la **Direction générale des hydrocarbures et des biocombustibles** et nous tenons à remercier Pierre Rhéaume, géologue coordonnateur au **MERN**, pour son apport pour son encadrement et pour la documentation géoscientifique.

Nous remercions aussi les auteurs de l'étude GTEC01, messieurs Michel Malo, Félix-Antoine Comeau et Stephan Séjourné. Cette étude, qui concerne la recherche de bassins sédimentaires présentant des structures géologiques analogues à celles présentes en Gaspésie, dans le Bas-Saint-Laurent et dans le golfe du Saint-Laurent, nous a été remise préalablement à sa publication et nous fut très utile.

## Avant-propos

Le 30 mai 2014, le gouvernement du Québec a rendu public son plan d'action gouvernemental sur les hydrocarbures. Lequel inclut la réalisation de deux évaluations environnementales stratégiques (**ÉES**) :

- Une **évaluation globale** sur l'ensemble de la filière des hydrocarbures;
- Une **évaluation spécifique** à l'île d'Anticosti. Cette dernière devant être intégrée à l'**ÉES** globale.

La réalisation des **ÉES** se traduit en cinq grands chantiers : environnement, société, économie, transport et aspects techniques.

Le présent rapport s'adresse à la **Direction générale des hydrocarbures et des biocombustibles** (DGHB) du **Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec** (MERN). Il a été réalisé suite à un mandat donné le 14 avril 2015 par la **DGHB** à Géophysique Camille St-Hilaire Inc. Il s'inscrit dans le cadre de l'**ÉES globale** et concerne plus spécifiquement l'aspect technique visant à évaluer le potentiel en hydrocarbures de la zone d'étude et surtout à combler le manque d'information.

Le travail consistait essentiellement à réaliser une interprétation détaillée des données magnétiques et gravimétriques aéroportées acquises entre le 24 août et le 11 novembre 2010 au-dessus du golfe du Saint-Laurent pour le compte du **MERN**. Le secteur concerné couvre la région située entre l'extrême Est de la Gaspésie et au-delà des Îles-de-la-Madeleine, au Québec. Les feuillets SNRC 011K, 011L, 011M, 011N, 012C, 012D et 022A ont en tout ou en partie été couverts par l'étude.

Le contenu de ce document est celui de l'auteur et n'engage en rien le gouvernement du Québec.

## 1.0 INTRODUCTION

Ce document présente une interprétation détaillée des données magnétiques et gravimétriques aéroportées acquises au-dessus du golfe du Saint-Laurent pour le compte du **Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN), Direction générale des hydrocarbures et des biocombustibles (DGHB)**. Le secteur concerné couvre la région située entre l'extrême Est de la Gaspésie et au-delà des Îles-de-la-Madeleine, au Québec. Les feuillets SNRC 011K, 011L, 011M, 011N, 012C, 012D et 022A ont en tout ou en partie été couverts par cette étude (Tableau 1).

Tableau 1 : Feuillet SNRC couverts en tout ou en partie			
Feuillet no.	Longitude W	Latitude N	Nom de la carte
11K-no	61°30'	46°45'	pas de titre
11L-ne	62°30'	46°45'	pas de titre
11M-ne	62°30'	47°45'	pas de titre
11M-no	63°30'	47°45'	pas de titre
11M-se	62°30'	47°15'	pas de titre
11M-so	63°30'	47°15'	pas de titre
11N-ne	60°30'	47°45'	pas de titre
11N-no	61°30'	47°45'	pas de titre
11N-se	60°30'	47°15'	pas de titre
11N-so	61°30'	47°15'	pas de titre
12C-ne	60°30'	48°45'	pas de titre
12C-no	61°30'	48°45'	pas de titre
12C-se	60°30'	48°15'	pas de titre
12C-so	61°30'	48°15'	pas de titre
12D-ne	62°30'	48°45'	pas de titre
12D-no	63°30'	48°45'	pas de titre
12D-se	62°30'	48°15'	pas de titre
12D-so	63°30'	48°15'	pas de titre
22A-ne	64°30'	48°45'	Gaspé
22A-se	64°30'	48°15'	Chandler

Les travaux d'acquisitions de données se sont déroulés du 24 août au 11 novembre 2010. Pour chacun des feuillets SNRC touchés par le levé, les cartes suivantes ainsi que les bases de données numériques ont été remises au **MERN** au cours du mois de février 2011 :

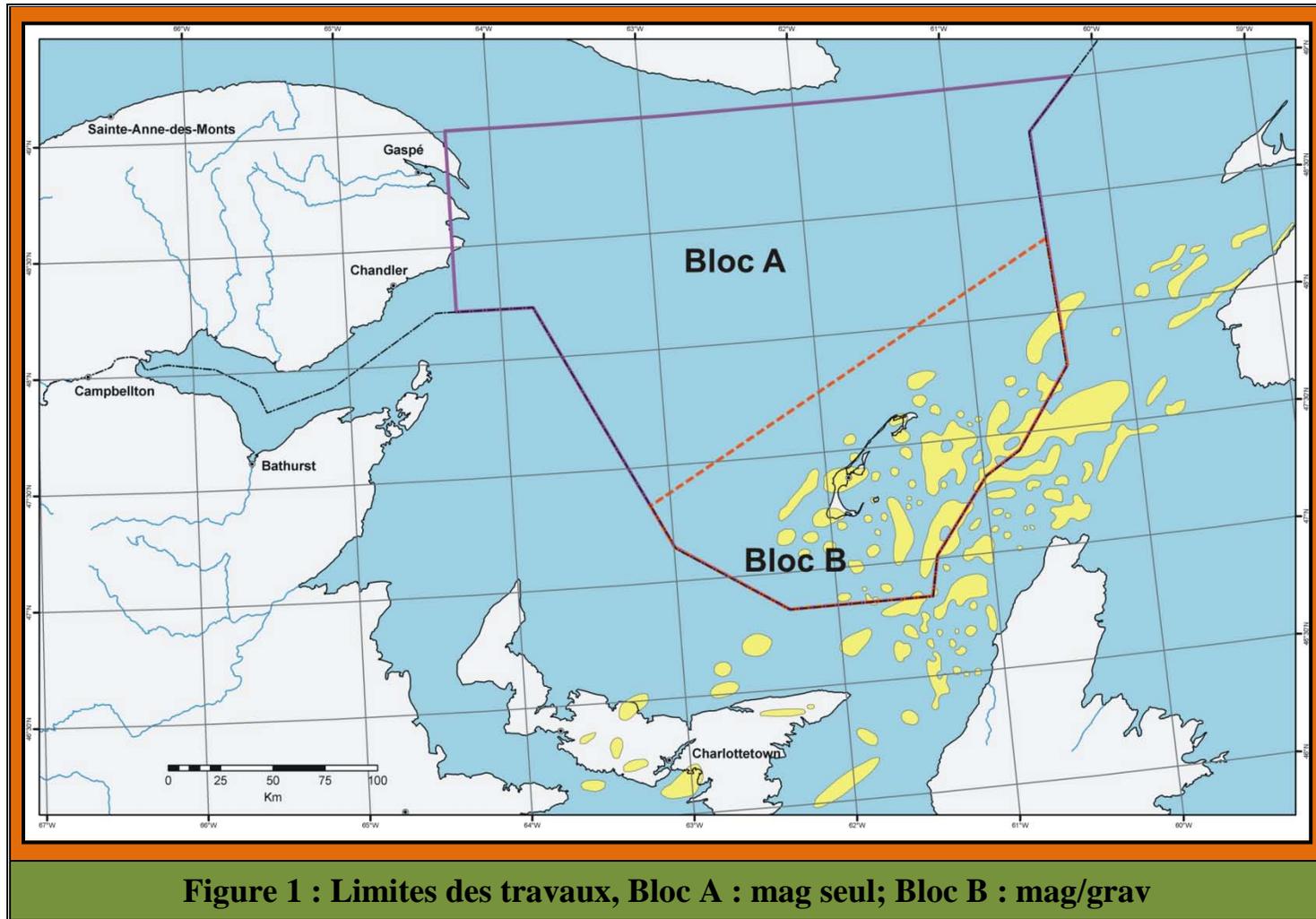
- Champ magnétique total résiduel (ombrée couleur)
- Dérivée première verticale du champ magnétique résiduel (ombrée couleur)
- Dérivée seconde verticale du champ magnétique résiduel (ombrée couleur)
- Anomalie de Bouger (ombrée couleur)
- Dérivée première verticale de l'anomalie de Bouger (ombrée couleur)

Une série de cartes, à l'échelle 1:500 000, présente les mêmes paramètres géophysiques mais cette fois-ci sur l'ensemble du territoire étudié. Le système de référence géodésique utilisé lors de la production des produits finaux est présenté au tableau 2.

<b>Tableau 2 : Système de référence géodésique utilisé</b>	
Système de référence géodésique:	NAD83 compatible avec le système mondial WGS 84
Surface de référence géodésique:	Ellipsoïde GRS-80
Modèle du géoïde:	HT2_0
Projection cartographique:	UTM
Zone:	20N
Méridien central:	-63°
Abscisse d'origine:	500 000
Ordonnée d'origine:	0
Facteur d'échelle:	0.9996

Au total, 119 073 km-linéaires de levé magnétique et 20 839 km-linéaires de levé gravimétriques furent nécessaires pour couvrir les surfaces requises (figure 1). L'espacement des traverses était de 500 mètres, pour le levé magnétique, et 1 000 mètres pour le levé gravimétrique. La hauteur nominale de vol était de 120 mètres.

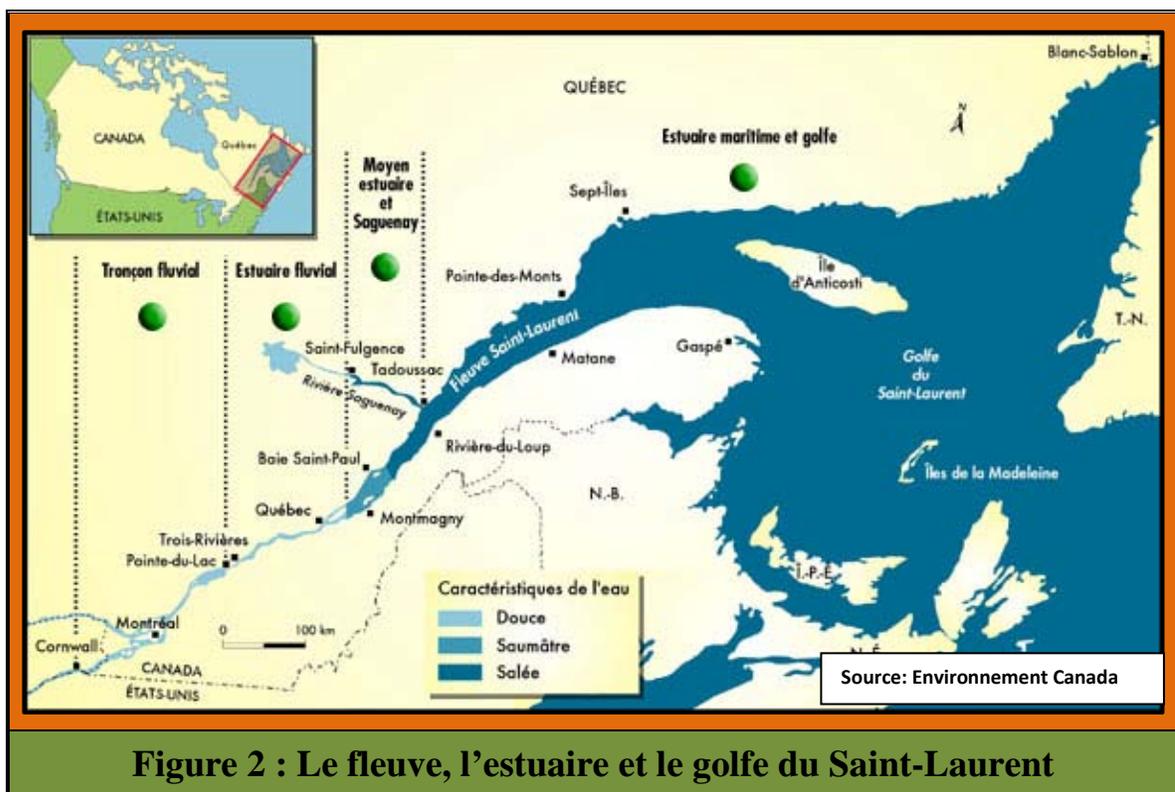
Les travaux d'acquisition et d'interprétation avaient pour objectifs d'évaluer le potentiel en hydrocarbures de la zone d'étude et aussi de combler le manque d'information (voir l'Avant Propos).



## 2.0 CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE

Le fleuve Saint-Laurent est composé de trois grandes sections : le fleuve, l'estuaire et le golfe (figures 2 et 3). À la sortie du lac Ontario, le fleuve est une grande rivière tranquille dont le cours s'évase parfois pour former des lacs. Les premières marées sont perceptibles au lac Saint-Pierre, un peu avant Trois-Rivières. L'estuaire commence à la pointe Est de l'Île d'Orléans, là où l'eau commence à être salée, et s'étend jusqu'à la hauteur de Pointe-des-Monts sur la Côte-Nord, là où un élargissement brusque marque le début du golfe. Lieu de transition, l'estuaire correspond à la zone où l'eau douce du fleuve et l'eau salée de l'océan se rencontrent et se mélangent (Hamel et al., 2000; Rossignol, 1998).

Le Saint-Laurent impressionne par son immensité et son débit. Sa largeur et sa profondeur moyennes en témoignent. Ainsi, il est large de 1 à 5 km dans sa partie fluviale, de 40 à 60 km dans l'estuaire et de plus de 300 km dans le golfe. Quant à sa profondeur, elle est de 2 à 20 m dans le fleuve, plus de 300 m dans l'estuaire et environ 500 m dans le golfe.



Le golfe du Saint-Laurent débute donc à la hauteur de Pointe-des-Monts. Il est délimité à l'ouest et au nord par le Québec, au sud-ouest par le Nouveau-Brunswick, au sud par l'Île-du-Prince-Édouard et la Nouvelle-Écosse et à l'est par Terre-Neuve-et-Labrador. À demi fermé par l'île de Terre-Neuve, le golfe est considéré comme une mer intérieure de 220 000 km<sup>2</sup>. Il est relié à l'Atlantique par le détroit de Cabot, situé entre la Nouvelle-Écosse et Terre-Neuve-et-Labrador, et le détroit de Belle-Isle, situé entre Terre-Neuve-et-Labrador et le Québec (figure 3).

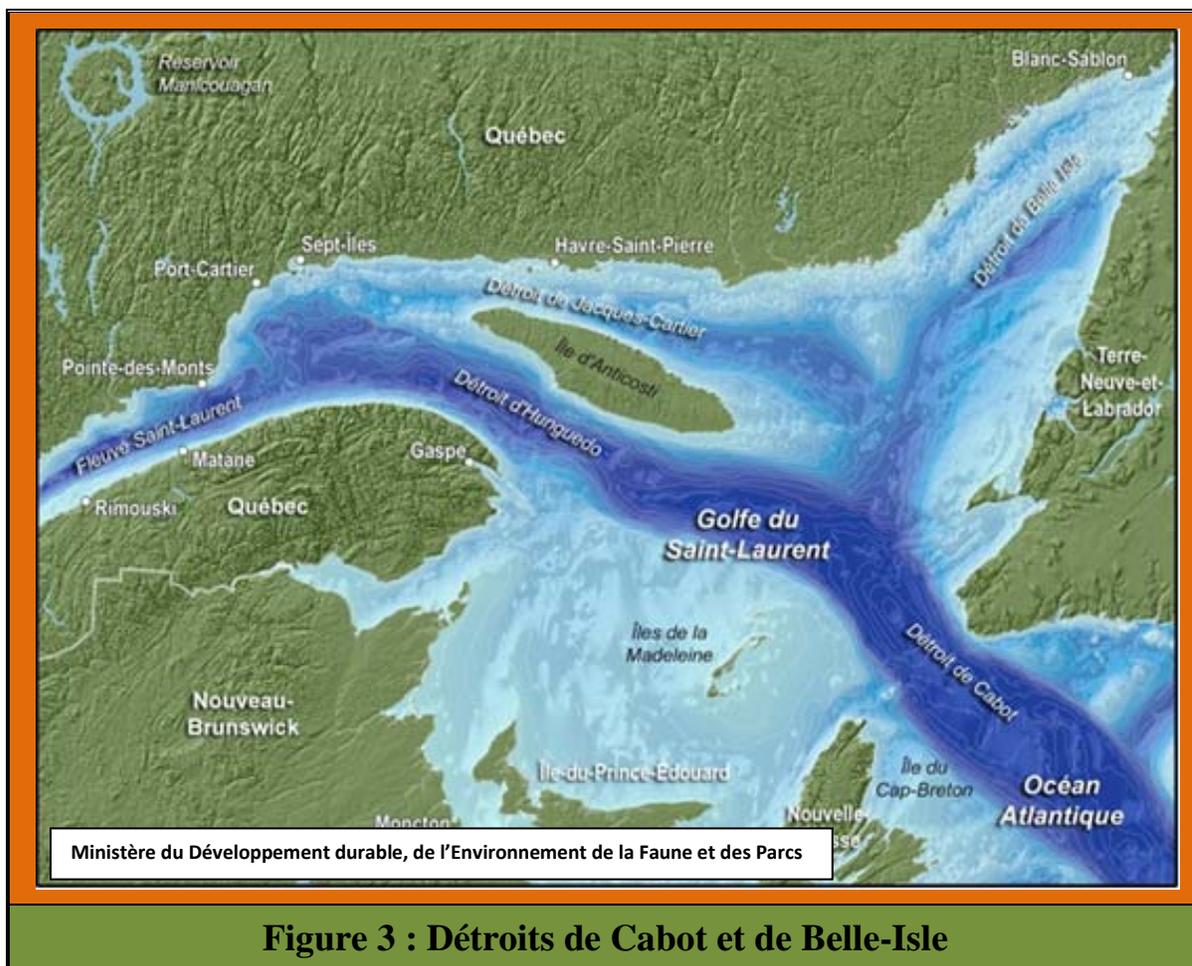


Figure 3 : Détroits de Cabot et de Belle-Isle

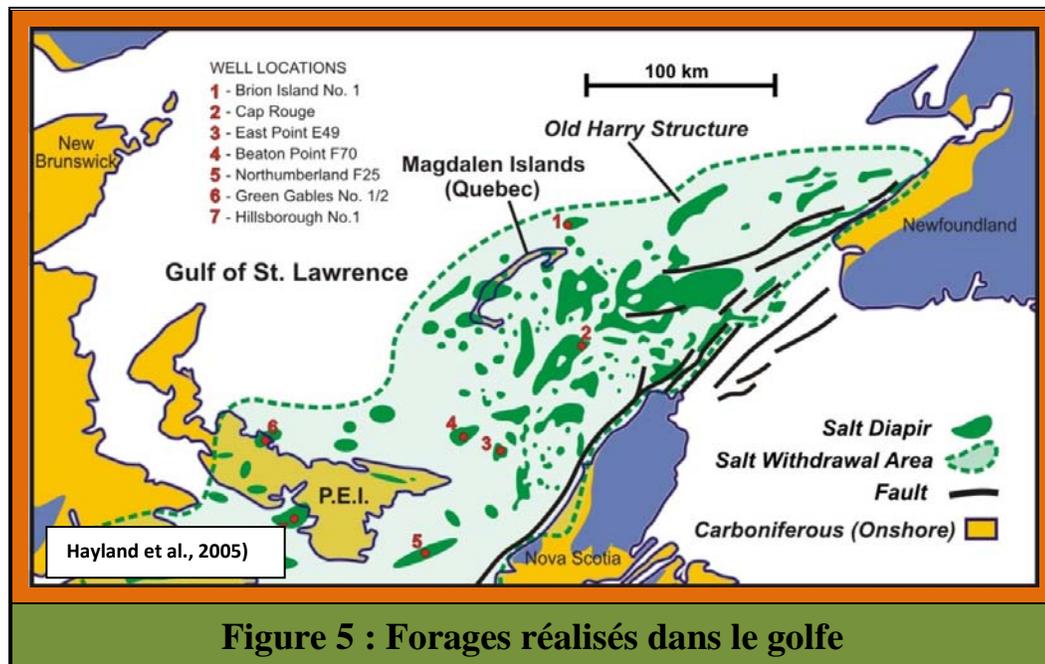
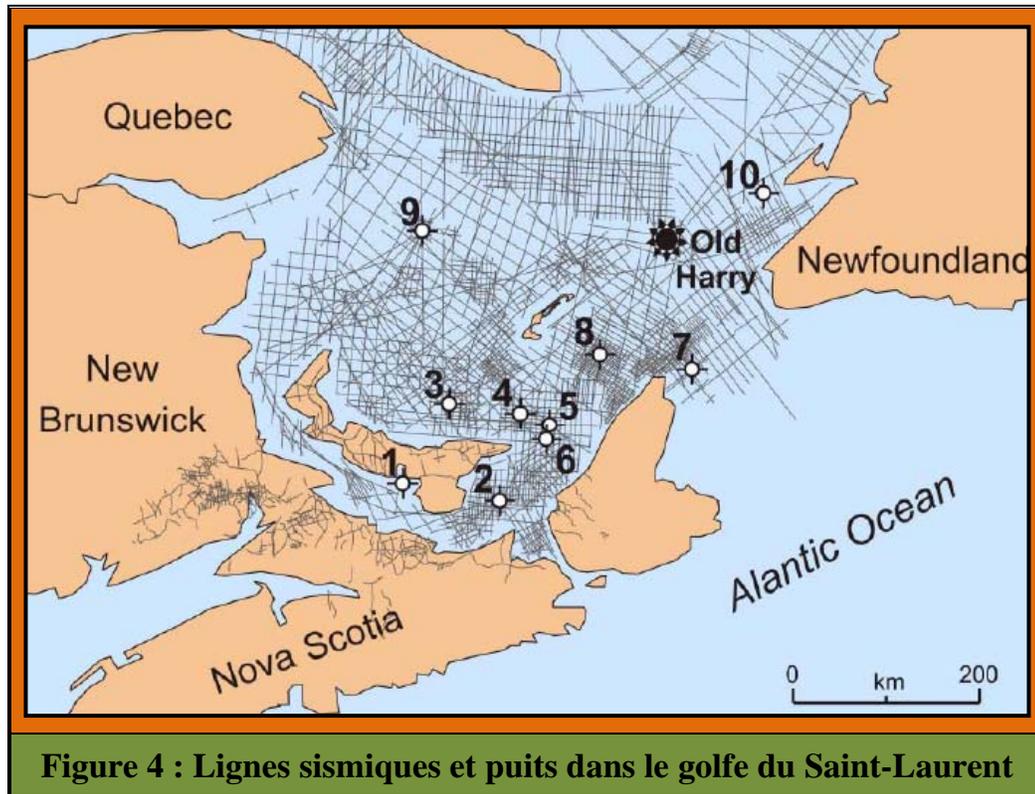
### 3.0 TRAVAUX D'EXPLORATION ET CONTEXTE JURIDIQUE

(En partie tiré et adapté de Turmel, 2011)

C'est en 1860, en Gaspésie, qu'a été effectué le premier forage pétrolier au Québec. Toutefois, l'exploration pétrolière a vraiment débuté dans les années 1960 grâce à la sismique réflexion. Plus de 80 000 km linéaires furent réalisés dans le golfe du Saint-Laurent entre 1960 et le milieu des années 80 (figure 4).

En 1963, **Hydro-Québec** a été chargé d'effectuer des travaux d'exploration dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent et a reçu les permis d'exploration requis.

Le premier forage dans le golfe a été exécuté en 1970 à l'Île Brion, au nord des Îles de la Madeleine. Par la suite, 6 autres forages furent implantés. Tous avaient pour objectif de vérifier la présence de pièges d'hydrocarbures associés à des diapirs de sel (figures 4 et 5).



En 1969, la **SOQUIP** (Société québécoise d'initiatives pétrolières) a été créée pour évaluer le potentiel d'hydrocarbures du Québec. Les permis d'exploration du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent lui ont alors été transférés. Ses travaux d'exploration exécutés au large des côtes n'ont pas donné les résultats escomptés et dans son rapport de 1984, la **SOQUIP** a jugé qu'il n'y avait qu'un faible potentiel d'hydrocarbures au Québec. En 1997, après la création de la division du pétrole et du gaz d'**Hydro-Québec**, les permis ont été retournés à **Hydro-Québec**.

En 1995, la découverte de pétrole à **Port-au-Port**, sur la côte ouest de Terre-Neuve, a stimulé l'exploration pétrolière dans la région. En 1996 et 1997, le **MERN** a octroyé des permis d'exploration sur 200 768 hectares dans le golfe du Saint-Laurent. La compagnie **Corridor Resources**, qui avait acquis les permis relatifs au secteur **Old Harry**, a confirmé par la suite le potentiel de la région. À l'époque, malgré la demande de **Corridor Resources**, le gouvernement fédéral n'a pas reconnu la validité des permis octroyés par le gouvernement du Québec dans le golfe du Saint-Laurent.

En 1997, afin de conclure une entente avec le gouvernement fédéral, le gouvernement du Québec a modifié sa législation. La loi 182, instaura un système d'appels d'offres harmonisant sa législation de l'environnement marin avec la législation fédérale.

Afin d'empêcher les sociétés intéressées d'acquérir tous les territoires marins avant l'entrée en vigueur du nouveau système d'appels d'offres, un moratoire fut instauré au moment de la présentation du projet de loi, le 2 décembre 1997. Le moratoire sur la délivrance de permis d'exploration pétrolière et gazière dans l'environnement marin est toujours en vigueur.

En 2002, la division du pétrole et du gaz d'**Hydro-Québec** a présenté le « Plan d'exploration pétrole et gaz naturel au Québec 2002-2010 ». Ce plan soulignait la nécessité de recueillir plus de données au moyen de levés géophysiques afin d'évaluer le potentiel de pétrole et de gaz du Saint-Laurent.

Ce besoin de recueillir des données complémentaires s'expliquait à la suite de récentes découvertes dans les formations de schiste situées à l'est des États-Unis, en plus des résultats encourageants découverts sur la côte Est du Canada (Île de Sable, Hibernia, Terra Nova). Toute cette activité stimula alors l'exploration dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent. Aussi, des améliorations technologiques permettaient d'exécuter des travaux d'exploration et d'extraction à de plus grandes profondeurs. Par contre, les connaissances sur les formations rocheuses du Québec demeuraient très limitées et c'est ce qui explique que les résultats obtenus jusque-là aient été décevants.

À la suite d'un processus de consultation qui a débuté en novembre 2004, le ministre des ressources naturelles et de la faune du Québec a présenté en 2006 son plan de stratégie énergétique pour les dix années suivantes. Le gouvernement considérait que le potentiel en hydrocarbures du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent constituait toujours la plus prometteuse des sources éventuelles d'hydrocarbures au Québec.

**Hydro-Québec** reçut alors pour mandat d'évaluer ce potentiel pétrolier, cette fois, en partenariat avec le secteur privé. Le gouvernement estimait que cette façon de procéder

enverrait un signal clair et positif à l'industrie sur l'intérêt du gouvernement à promouvoir la production éventuelle de pétrole et de gaz naturel sur son territoire. De plus, cela rendait possible la poursuite des travaux déjà entrepris en Gaspésie, sur l'Île d'Anticosti et dans la zone prometteuse de **Old Harry**, augmentant par le biais la base de données géoscientifiques détenues par **Hydro-Québec**.

Toutefois, comme il a été mentionné dans son plan stratégique 2006-2010, **Hydro-Québec** décida de concentrer ses efforts sur les énergies renouvelables. La division pétrole et gaz naturel d'**Hydro-Québec** fut finalement dissoute en 2007, et les permis ont été cédés au secteur privé.

Le 18 mars 2010, l'Assemblée nationale du Québec a adopté une motion demandant au gouvernement fédéral de conclure un accord au sujet de l'exploration et de l'exploitation de pétrole et de gaz naturel dans le secteur québécois du golfe du Saint-Laurent. Le gouvernement fédéral et le gouvernement du Québec ont finalement conclu cet accord le 24 mars 2011.

Les limites de la partie du golfe du Saint-Laurent assujetties à cet accord (décrites à l'annexe 1 de l'Accord), confirment les frontières du Québec. L'Accord prévoit de plus un processus d'arbitrage en cas de différends non résolus avec une autre province sur les limites de la zone sujette à l'Accord.

Le Québec est devenu le principal bénéficiaire de l'ensemble des recettes provenant des redevances, des frais de permis et des autres revenus tirés de la mise en valeur et de l'exploitation du gaz naturel et du pétrole. L'Accord confirme la validité des permis qui ont été délivrés par le gouvernement du Québec, tels que les permis encore détenus par **Corridor Resources** pour le secteur **Old Harry**.

Finalement, le 11 juin 2015 le Québec déposait le projet de loi 49 qui assurait la mise en œuvre de l'Accord sur la gestion conjointe des hydrocarbures dans le golfe du Saint-Laurent. (<http://www.assnat.qc.ca/fr/travaux-parlementaires/projets-loi/projets-loi-41-1.html>)

## 4.0 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

La Gaspésie, le Bas-Saint-Laurent et le golfe du Saint-Laurent font partie de la province géologique des Appalaches qui sont divisées dans la région d'étude en trois grands assemblages de roches qui se succèdent dans le temps en fonction des orogénies qui ont formé les Appalaches : l'orogénie taconienne à l'Ordovicien moyen-tardif, l'orogénie acadienne au Dévonien moyen-tardif, et l'orogénie alléghanienne au Permien. Ce sont les roches du Paléozoïque inférieur qui comprend les zones de Humber et de Dunnage, les roches du Paléozoïque moyen contenues dans la ceinture de Gaspé, et les roches du Paléozoïque supérieur qui forment le bassin de Madeleine au Québec. Ces assemblages correspondent à de vastes bassins sédimentaires séparés par des discordances majeures au début des cycles de sédimentation ayant suivi les orogénies, les discordances taconienne et acadienne (Malo et al. 2015).

Les structures géologiques de Massé, de Bourque, de Galt et d'Haldimand se trouvent dans le bassin de roches siluro-dévonniennes de la ceinture de Gaspé qui a été plissée et faillée pendant l'orogénie acadienne. La structure d'**Old Harry** est géologiquement localisée dans un bassin plus jeune comprenant surtout des roches carbonifères qui ont subi des déformations (failles) pendant et après la formation du bassin sédimentaire (Malo et al., 2015).

### 4.1 Potentiel économique

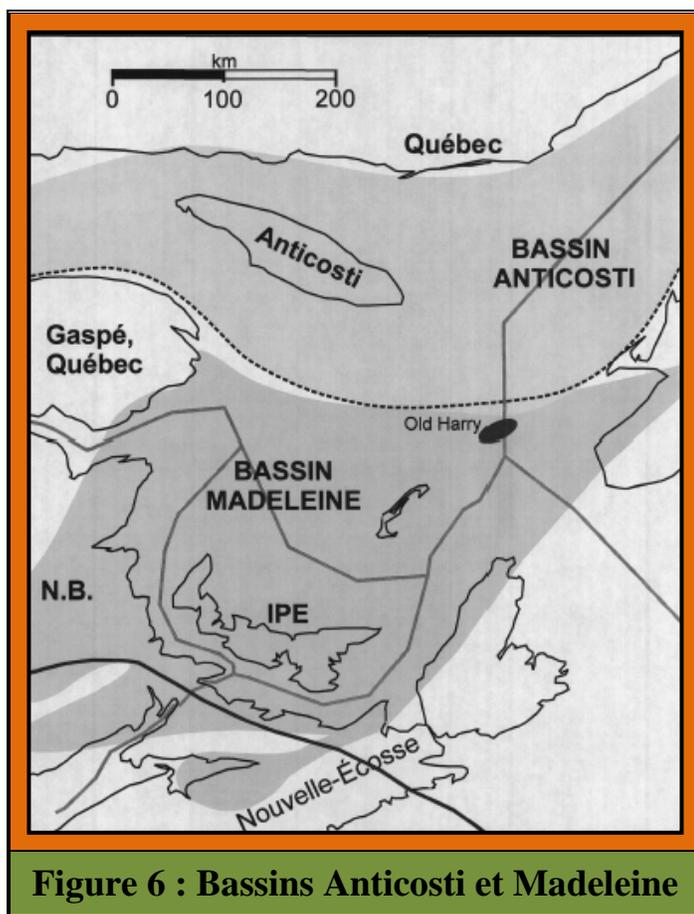
Les zones marines et l'estuaire du Saint-Laurent, de par leur géologie favorable, seront toujours au cœur de la stratégie de mise en valeur des ressources pétrolières et gazières du Québec. Les sédiments du golfe pourraient abriter d'abondantes ressources, dont des combustibles fossiles, comme le pétrole, le gaz naturel et les hydrate de méthane. Ces zones sédimentaires présentent des similitudes frappantes avec plusieurs bassins prolifiques du sud et de l'est des États-Unis : bassin d'Arkoma avec le gisement de Wilberton, le Black Warrior en Alabama et au Mississippi, le nord et l'ouest du Texas, le bassin Appalachien ainsi que celui de l'ouest de Terre-Neuve. Ces bassins partagent en partie le même âge (Ordovicien, 488,3 à 443,7 Ma) et le même environnement de dépôt. Ces ressemblances expliquent, en partie, l'intérêt grandissant pour la prospection dans le golfe du Saint-Laurent puisque les chances d'y découvrir un gisement sont très élevées.

### 4.2 Bassins sédimentaires

Le golfe du Saint-Laurent comprend deux grands bassins sédimentaires : **Anticosti** et **Madeleine** (figure 6).

Le **Bassin Anticosti**, situé dans la partie nord du golfe, présente plusieurs indices de pétrole et de gaz identifiés par les quelques puits forés jusqu'à présent sur l'Île Anticosti. La partie marine de ce bassin, qui représente un territoire plusieurs fois l'étendue de l'île, n'a encore jamais été forée.

Les parties centrale et Sud du golfe du Saint-Laurent sont occupées par le **Bassin Madeleine**. Elles présentent un potentiel important de découverte sur chacune des cibles que constituent la multitude de structures de sel qui s'y retrouvent (figure 5). Le **Bassin Madeleine** est comparable sur bien des points à la prolifique région du sud de la Mer du Nord où d'importantes découvertes de gaz naturel ont été faites et dont l'exploitation a débuté au milieu des années 1970. L'étude récente GTEC01 (Malo et al., 2015) ayant pour mission la recherche d'analogues au **Bassin Madeleine** en général et de **Old Harry** en particulier appuie cette comparaison. Les principaux réservoirs d'hydrocarbures qui sont exploités dans le sud de la Mer du Nord sont reliés à la présence de chenaux fluviatiles dans les grès de la formation de Schooner.



L'archipel des îles de la Madeleine constitue le seul emplacement dans le Centre-Nord du golfe du Saint-Laurent où des affleurements en surface du Groupe de Windsor permettent une comparaison stratigraphique avec le groupe type de Windsor et le groupe corrélatif de Codroy de l'Ouest de Terre-Neuve (Giles, 2008). Le Groupe de Windsor constitue un intervalle de référence marin déterminant du Mississippien (Viséen) à l'intérieur de l'épaisse couche de remplissage du Dévonien tardif - Permien précoce du bassin des Maritimes. La présence de roches volcaniques associées à des couches rouges à grains fins, des évaporites et des roches carbonatées marines plus typiques à l'échelle régionale, rendent cette succession locale du Groupe de Windsor unique dans l'Est du Canada. Les roches volcaniques, notamment des

basaltes vésiculaires et amygdaloïdes accompagnés d'une quantité modeste de roches pyroclastiques, sont interstratifiées avec de la siltite, du calcaire et du gypse de la partie médiane du Groupe de Windsor dans des affleurements en surface remontant à l'Asbien tardif.

Les dépôts épais de sel dépourvus de roches carbonatées intercalées, sous-jacents, qu'on suppose avoir pénétré diapiriquement les strates médianes et supérieures du Groupe de Windsor, représenteraient le produit du premier cycle important de sédimentation marine mississippienne dans la région. La succession du Groupe de Windsor et des îles de la Madeleine a, mis à part sa composante volcanique unique à l'échelle régionale, un caractère général comparable à celle du Centre-Sud et de l'Est de la Nouvelle-Écosse (Giles, 2008).

### **4.3 Puits Shell-Amoco Cap Rouge F52**

Le puits 8 de la figure 4 correspond en fait au forage Shell-Amoco Cap Rouge F52 réalisé en 1973. Il a atteint une profondeur de 5 059 mètres et a traversé le Groupe de Mabou Inférieur, entièrement le Groupe de Windsor et la portion supérieure du Groupe de Horton. Le puits fut classé comme sec puisqu'aucune venue d'hydrocarbure ne fut interceptée. Bien que négatif, le puits a toutefois permis d'obtenir de précieuses informations stratigraphiques concernant le vaste Bassin des Maritimes. Entre autre il a permis d'établir une corrélation du Groupe de Windsor présent dans la partie centrale de l'île du Cap Breton et dans le bassin Shubenacadie du sud de la Nouvelle Écosse, démontrant ainsi la remarquable étendue régionale de cette formation (Giles et Utting, 2001).

### **4.4 La structure Old Harry**

La structure **Old Harry** constituerait elle-même un piège d'hydrocarbure de type dôme salin. Sous le poids des couches de roches sédimentaires sus-jacentes au socle rocheux, les couches de sel ont remonté en dômes et en dorsales. Le pétrole et le gaz pourraient être piégés dans les plis et le long des failles qui surmontent le dôme ainsi que dans les couches de grès poreux retournées le long de ses flancs (figures 7 et 8).

Chaque piège d'hydrocarbures nécessite trois éléments :

- Une roche-réservoir pour accumuler le pétrole et le gaz ;
- Une couverture de roche imperméable qui empêche le pétrole et le gaz de s'échapper ;
- Une source de pétrole et de gaz qui proviendrait de la roche mère.

Actuellement, de toutes les structures géologiques connues du Québec, c'est **Old Harry**, située à 80 km au nord-est des Îles-de-la-Madeleine, qui présente le potentiel d'hydrocarbures le plus prometteur.

Enfouie à plus de 1 000 m sous le fond marin, cette structure géologique de 30 km de long par 12 km de large a la forme d'un chameau à deux bosses (figure 9).

En 2008, **Corridor Resources** a acquis auprès de l'Office Canada - Terre-Neuve-et-Labrador des Hydrocarbures Extracôtiers (OCTNLHE) le permis d'exploration pour le secteur **Old Harry**. Elle possède aussi deux permis contigus au Québec.

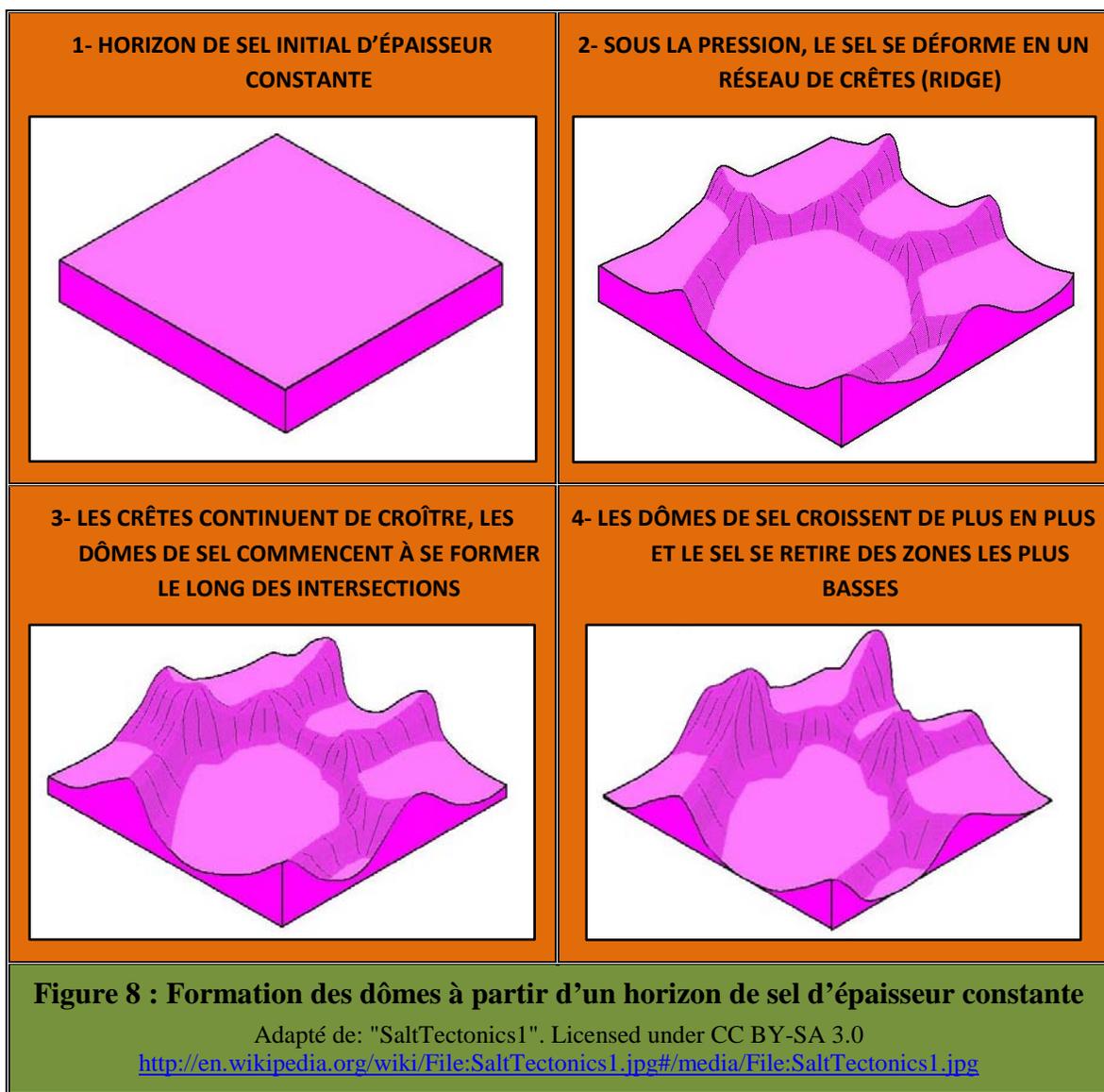
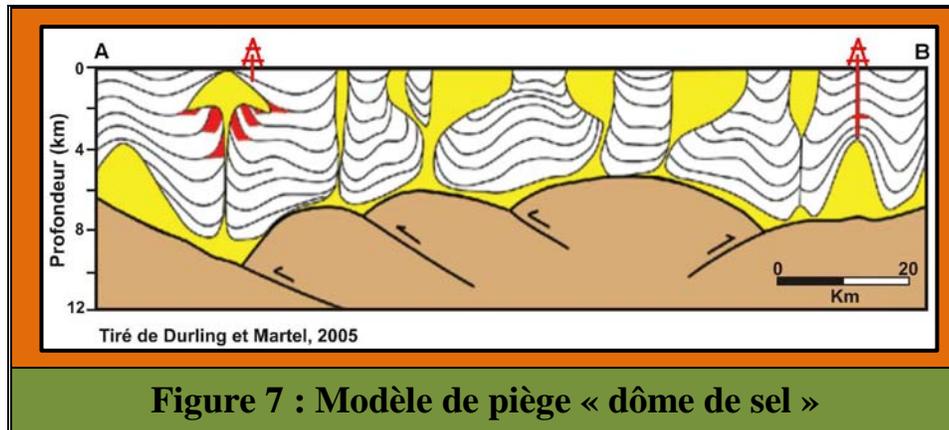
Des levés géophysiques (magnétique et gravimétrique) furent effectués en octobre 2010 et, compte tenu des bons résultats obtenus, un projet concernant le forage d'un puits d'exploration a été déposé en 2012 auprès de l'OCTNLHE. Toutefois, à cause du nombre inhabituel de commentaires reçus du public, l'OCTNLHE décida de recommander une évaluation environnementale préalable au ministre fédéral de l'Environnement. Au même moment, dans l'attente des conclusions d'une évaluation environnementale stratégique (ÉES) qu'il avait lui aussi commandée, le gouvernement du Québec imposait un moratoire sur l'exploration dans le golfe dans la partie qu'il contrôle. Cette étude fut rendue publique fin 2013 (Genivar Inc., 2013).

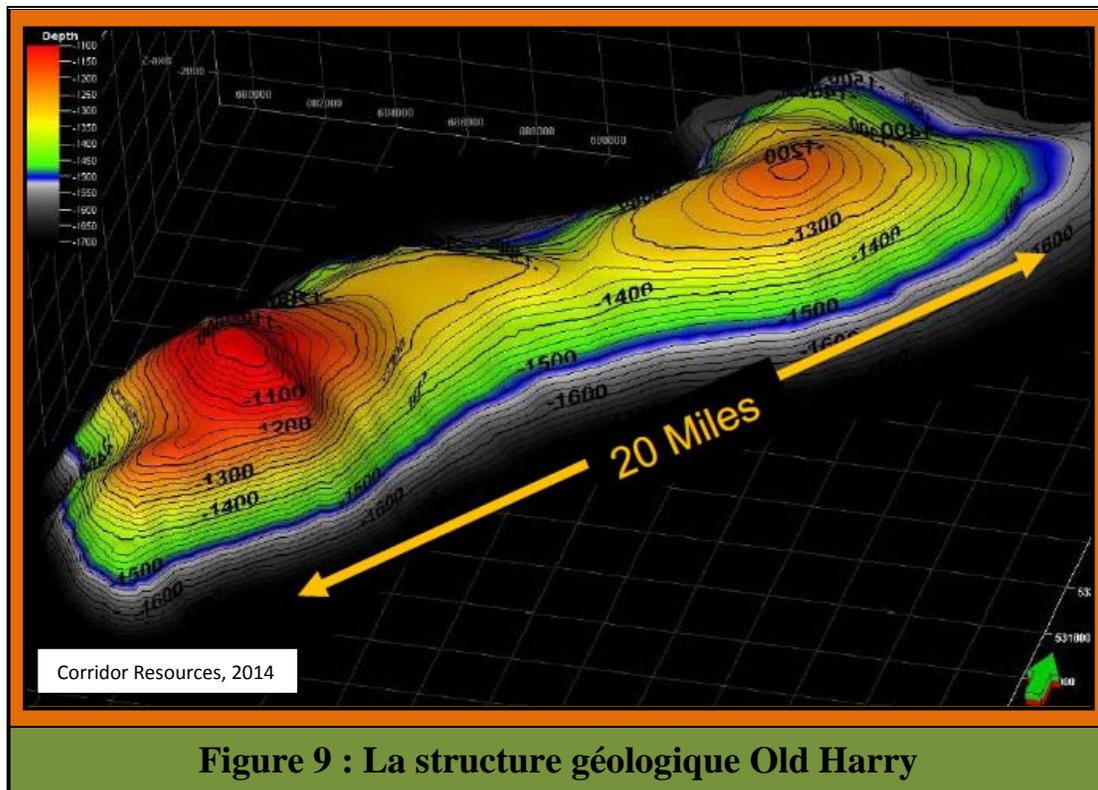
### **Géologie de la structure Old Harry**

(Tiré de Malo et al., 2015)

Les unités réservoirs ciblées dans la structure d'**Old Harry** se situent dans des formations silicoclastiques des groupes de Macumber et de Pictou au-dessus des unités du Groupe de Windsor. Ce sont des roches du Carbonifère supérieur. Il n'y a eu aucun forage dans la structure d'**Old Harry** et il n'est pas possible de donner les caractéristiques du réservoir. On peut toutefois donner les caractéristiques pétrographiques et stratigraphiques des unités lithostratigraphiques potentielles pour la roche réservoir et de couverture. C'est la Formation de Bradelle qui pourrait constituer le réservoir. Cette formation est constituée de grès d'une épaisseur de 30 mètres dans les autres puits déjà forés dans le golfe du Saint-Laurent et on a noté une porosité primaire pouvant atteindre 10%. Les grès de la Formation de Brion Island du Groupe de Cumberland pourraient aussi être un réservoir potentiel. La Formation de Green Gables constituée de shales dans le secteur de la structure d'**Old Harry** représente la roche couverture.

Les grès fluviatiles carbonifères de la partie sud de la Mer du Nord représentent l'analogie choisi pour la structure d'**Old Harry**. Ces grès fluviatiles se retrouvent dans le Groupe de Conybeare, plus particulièrement dans la Formation de Schooner. Les réservoirs sont dans des pièges stratigraphiques constitués de chenaux de grès à l'intérieur d'une séquence de mudstones qui assurent l'étanchéité des réservoirs. Les lits de grès varient de 1 à 25 mètres pouvant atteindre 50 mètres. La porosité primaire est en moyenne de 12%. La couverture ultime des réservoirs est assurée par les évaporites des groupes de Rotliegend et d Zechstein.





## 5.0 TECHNIQUES GÉOPHYSIQUES UTILISÉES

Dans une campagne d'exploration des hydrocarbures, les techniques géophysiques faisant intervenir la mesure des champs magnétique et gravitationnel terrestres permet de réduire les risques et les coûts lors de l'évaluation d'un bassin sédimentaire (Pawlowski, 1997).

La reconnaissance d'un bassin sédimentaire représente l'étape où un organisme gouvernemental ou une firme privée démontre son intérêt dans une région donnée. L'acquisition et l'interprétation de données magnétiques et gravimétriques permet de diminuer le facteur risque, entre autre de :

- Cartographier les structures géologiques présentes dans le socle rocheux;
- Rechercher les structures géologiques régionales présentes dans la colonne sédimentaire et qui pourraient constituer des pièges pour les hydrocarbures (trapping);
- Obtenir la géométrie (profondeurs, épaisseurs, étendue) de ces structures;
- Identifier les possibles couloirs de migration des hydrocarbures;
- Positionner de façon optimale les traverses sismiques.

L'étude des structures géologiques associées au socle rocheux représente une étape indispensable en exploration car ces structures sont très souvent reliées aux structures

présentes dans la colonne sédimentaire qui, elles, pourraient piéger les hydrocarbures. Pour la cartographie structurale, l'utilisation de la gravimétrie et du magnétisme est incontournable car ces techniques ont prouvé dans de nombreux cas qu'elles permettent en plus d'en définir la géométrie.

## **6.0 AUTRES DONNÉES UTILISÉES**

### **6.1 Carte bathymétrique**

En plus des cartes énumérées à la section 7.1, une carte bathymétrique du golfe du Saint-Laurent fut réalisée. Cette dernière apparaît à la figure 10.

Les données utilisées proviennent du Service Hydrographique de Pêche et Océan Canada. (<http://geoportal.gc.ca/fra/Gallery/MapProfile/9>).

Cette carte fut très utile car elle a permis :

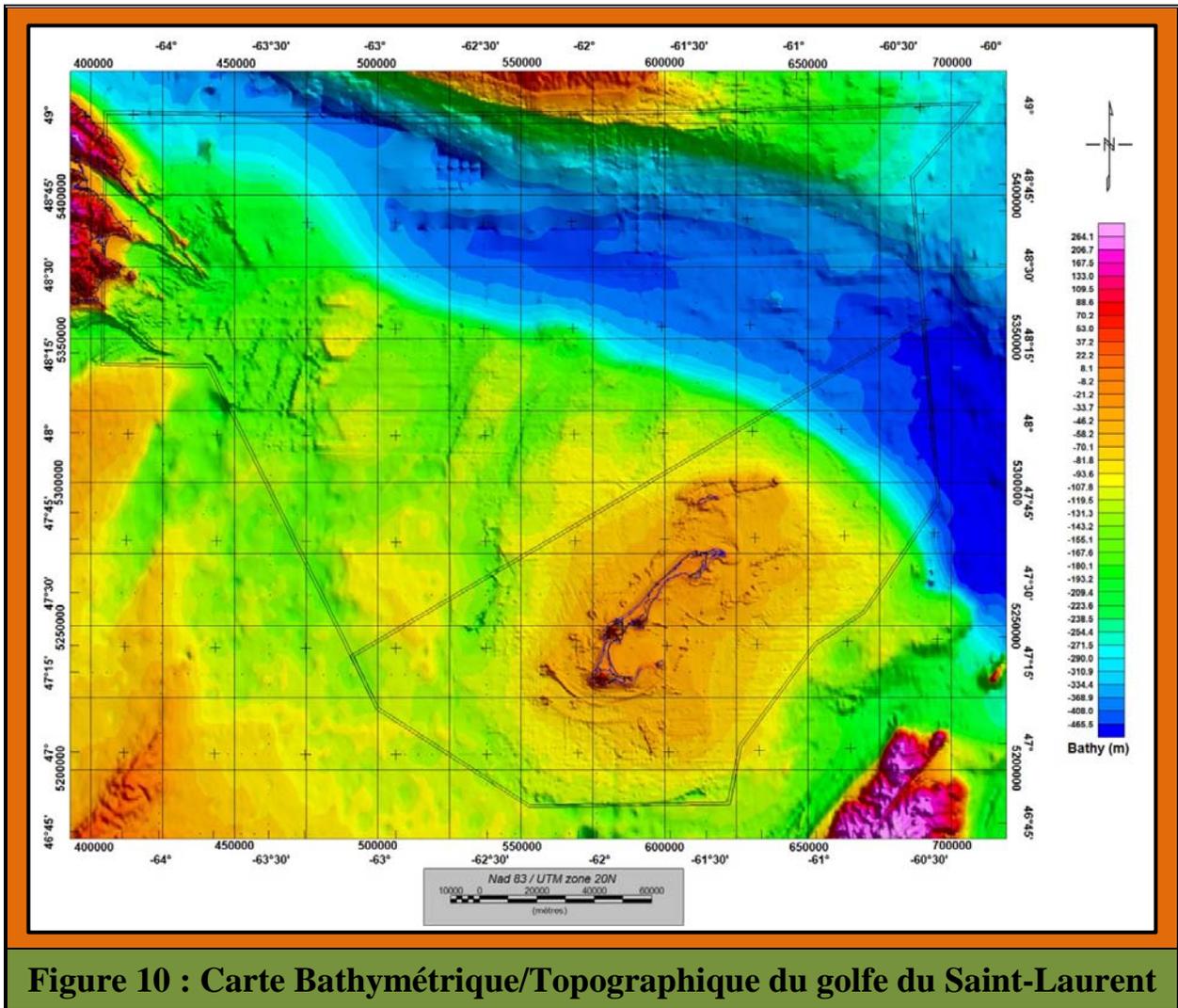
- D'évaluer les épaisseurs d'eau présentes dans le golfe;
- De localiser exactement le chenal du golfe du Saint-Laurent;
- De vérifier les résultats des calculs de profondeur de certaines anomalies magnétiques et de préciser quelles étaient leurs origines.

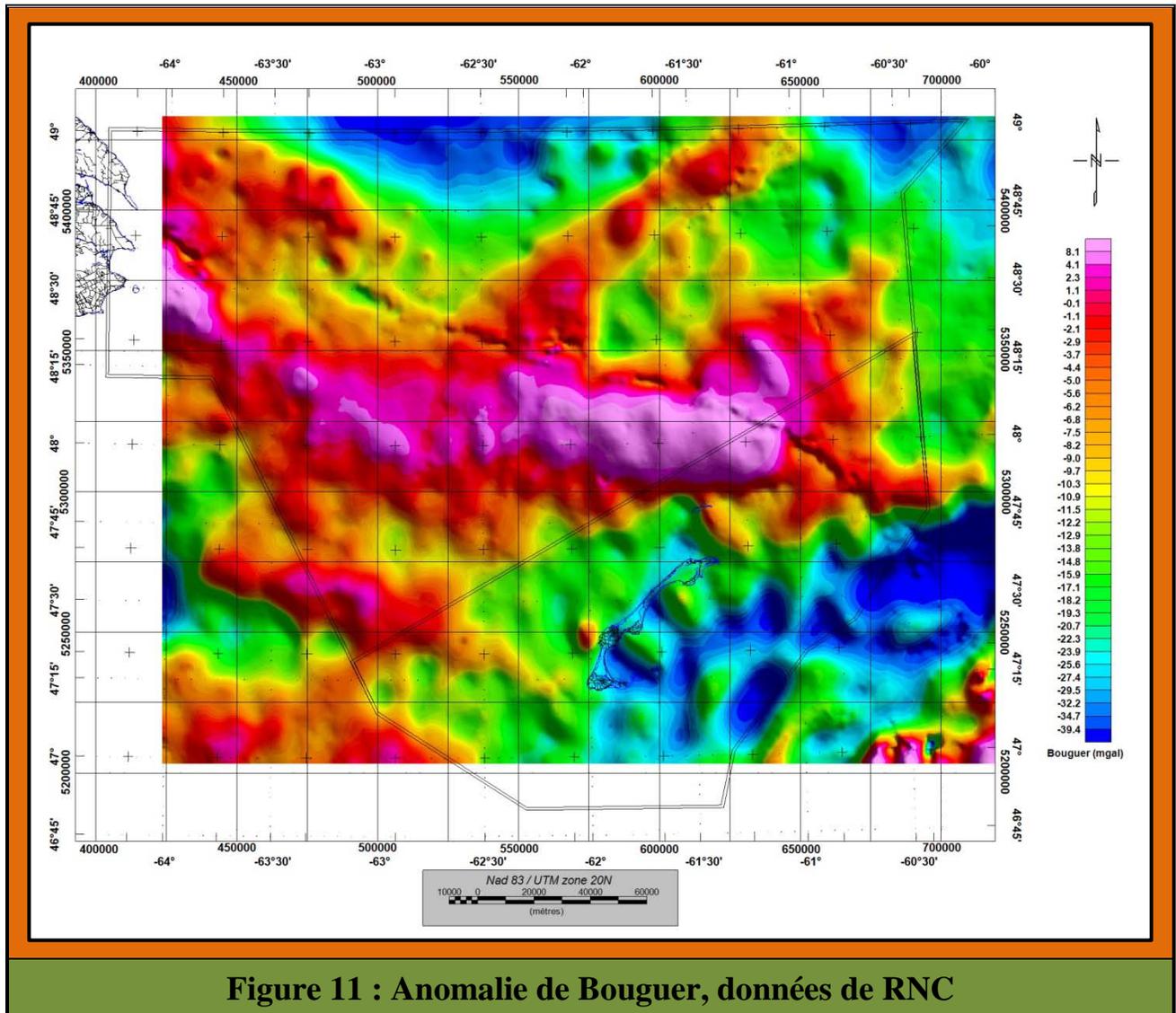
### **6.2 Carte de l'Anomalie de Bouguer (terrestres et off-shore)**

Les données gravimétriques acquises par **Ressources Naturelles Canada** (RNC) à partir de levés terrestres et off-shore furent utilisées. Une carte de l'Anomalie de Bouguer a été réalisée et est présentée à la figure 11. La maille de cette carte est de 2 km.

Cette carte couvre un secteur au moins 3 fois plus grand que le levé gravimétrique aéroporté. En fait elle couvre pratiquement toute la zone étudiée par le levé magnétique en plus des secteurs Sud-Ouest et Sud-Est.

Lors de l'interprétation, bien que sa résolution soit inférieure à celle obtenue par le levé aéroporté, elle fut utilisée en tandem avec le levé aéromagnétique. Elle permit de valider certaines structures non identifiées par le levé gravimétrique aéroporté car elles étaient situées à l'extérieur de la zone couverte.





## 7.0 INTERPRÉTATION DES DONNÉES

Pour une meilleure compréhension de cette section, les lecteurs non familiers avec les techniques magnétique et gravimétrique sont priés de consulter les annexes A et B.

### 7.1 Introduction

Avant que débute l'interprétation des données magnétiques et gravimétriques, les cartes suivantes, présentées en Annexe C en version réduite 8½ X 11", ont d'abord été tracées à l'échelle originale 1:500 000 dans le système de référence UTM Nad83, Zone 20N:

- Carte couleur du Champ Magnétique Total Résiduel Réduit au Pôle (RAP);
- Carte en relief ombragé du Champ Magnétique Total Résiduel Réduit au Pôle;
- Carte couleur du Gradient Vertical Calculé;
- Carte couleur de la Deuxième Dérivée Verticale Calculée;
- Carte couleur du Signal Analytique;
- Carte couleur du Tilt Magnétique;
- Carte couleur du Gain Automatique Corrigé;
- Carte couleur de l'Anomalie de Bouguer;
- Carte en relief ombragé de l'Anomalie de Bouguer;
- Carte du gradient vertical de l'Anomalie de Bouguer;
- Carte en relief ombragé du gradient vertical de l'Anomalie de Bouguer.

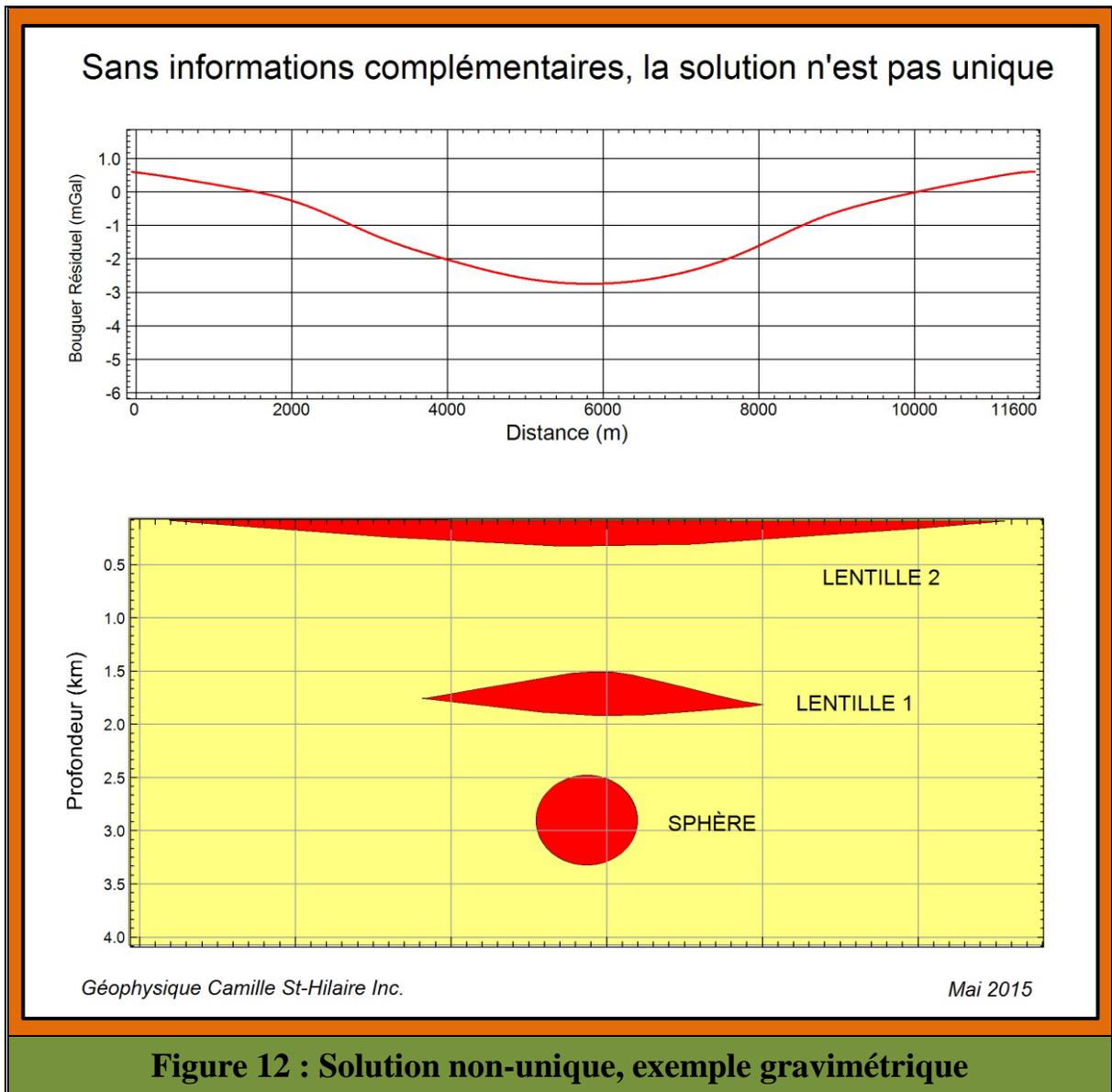
Les versions numériques originales de toutes ces cartes, au format JPG, ont été remises au **MERN**.

Par la suite, une carte de compilation/interprétation résumant à la fois les résultats de l'interprétation des levés magnétiques et gravimétriques, fut réalisée à la même échelle. Cette carte est aussi présentée en version réduite 8½ X 11" à l'Annexe C.

Précisons que toutes les cartes mentionnées ci-haut, qui représentent en fait les données géophysiques originales auxquelles divers filtres de rehaussement d'image furent appliqués, ont toutes été utilisées lors de l'interprétation des données.

Les techniques magnétique et gravimétrique font partie des techniques dites de potentiel. Sans informations complémentaires une **infinité de solutions** (modèles) pourraient donner le même résultat. La figure 12 présente le cas d'une anomalie gravimétrique négative qui pourrait par exemple résulter d'une lentille ou bien d'une sphère de halite enfouie. Pour cet exemple, la sphère est le corps le plus profond qui peut produire l'anomalie gravimétrique mesurée. Des corps plus superficiels et plus larges, comme les deux lentilles qui sont représentées, pourraient aussi reproduire la même anomalie. Tous ces corps auraient le même déficit de masse total.

Les informations complémentaires qui pourraient nous permettre de trancher le modèle qui serait le plus réaliste pourraient provenir par exemple de levés sismiques, de forages ou d'études géologiques.



## 7.2 Domaines Géophysiques

Au premier coup d'œil, la carte du champ magnétique total résiduel peut être divisée en quatre domaines présentant des intensités et des textures de magnétisation bien distinctes. Sur la carte d'interprétation, ces domaines ont été identifiés en fonction de leurs localisations relatives par **Nord, Nord-Ouest, Nord-Est** et **Sud**.

La carte du gain automatique corrigé est celle qui délimite le mieux les frontières entre chacun des domaines. Cette carte est reproduite à la figure 13.

Les **Domaines Nord, Nord-Ouest** et **Nord-Est** présentent un champ magnétique beaucoup plus intense que celui observé dans le **Domaine Sud**. La différence d'intensité du champ magnétique résiduel est de l'ordre de 550 nT.

Cette différence implique que le développement de la colonne sédimentaire est beaucoup plus important dans le **Domaine Sud**. Ce domaine correspond à la présence du bassin carbonifère et on pourrait ici soupçonner la présence d'un graben. Par ailleurs, il est très intéressant de noter que tous les linéaments magnétiques situés dans le **Domaine Nord-Ouest** ne se prolongent pas au-delà de la limite avec le **Domaine Sud** (voir la section 7.3.1). Aussi, le **Domaine Nord** semble présenter en profondeur plusieurs unités volcaniques mafiques dont une est presque parfaitement circulaire (voir les figures 13 et 19 ainsi que la section 7.4).

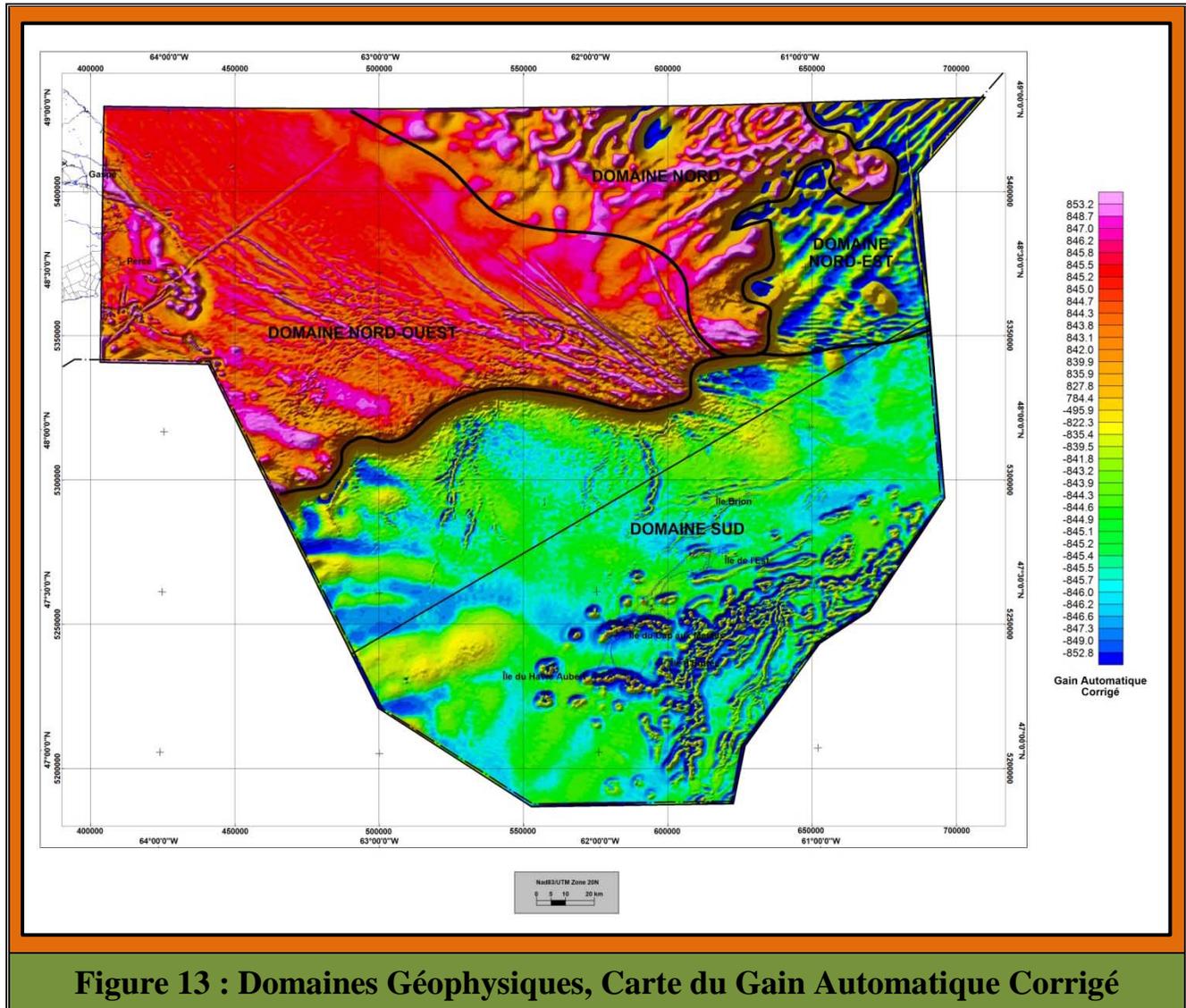
Nous nous permettons ici d'ouvrir une parenthèse concernant l'importance des grabens pour l'exploration des hydrocarbures.

Un graben est un fossé tectonique d'effondrement entre des failles normales. Le compartiment surélevé par rapport au graben est appelé « horst ». Ce phénomène résulte d'une remontée de matériel chaud provenant de l'asthénosphère, créant une tension au niveau de la surface de la lithosphère. Cette tension se traduit par un bombement de la croûte qui induit un effondrement du relief. À terme, le matériel chaud peut perforer la surface, on parle alors de dorsale océanique qui, par extension de la lithosphère donnera naissance à un océan.

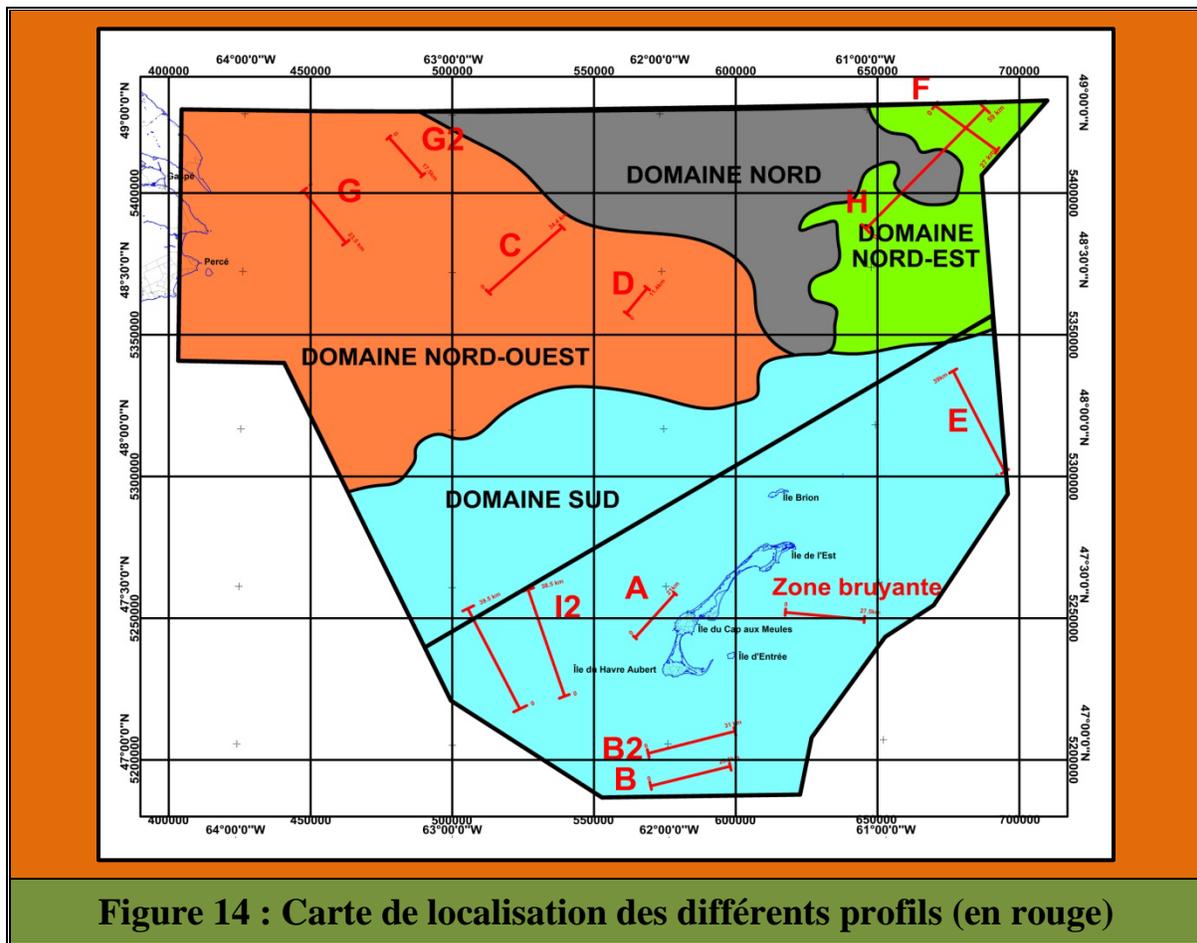
Il existe des contextes d'inversion tectonique de bassins sédimentaires produisant ce que les géologues pétroliers appellent « graben inversé ». C'est le cas par exemple dans le Sud de la Mer du Nord où les grabens ont une forme anormale, formant des hauts structuraux par rapport à leurs plates-formes (Nalpas, 1994).

Les géologues pétroliers supposent que les grabens de la Mer du Nord se sont formés dans ou sous l'actuel plateau continental entre le Trias et le Crétacé inférieur puis qu'ils se sont inversés (avec changement d'orientation pour certains d'entre eux et parfois avec un « décollement supracrustal » comme avec la couche de sel thuringien, dit « sel Zechstein ») sous l'effet de processus tectoniques qui se sont déroulés du Crétacé supérieur au Tertiaire (Kern, 1992).

Ces « anomalies » de la géodynamique des fonds marins sont étudiées avec attention, pour des raisons de recherche fondamentale d'une part mais aussi pour l'exploration des hydrocarbures.



Lors de l'interprétation, plusieurs profils du champ magnétique résiduel et/ou de l'Anomalie de Bouguer (incluant les différents filtres de rehaussement), furent réalisés pour obtenir soient des profondeurs ou d'autres données utiles. La localisation de ces profils est présentée dans son ensemble à la figure 14.



## 7.3 Linéaments magnétiques

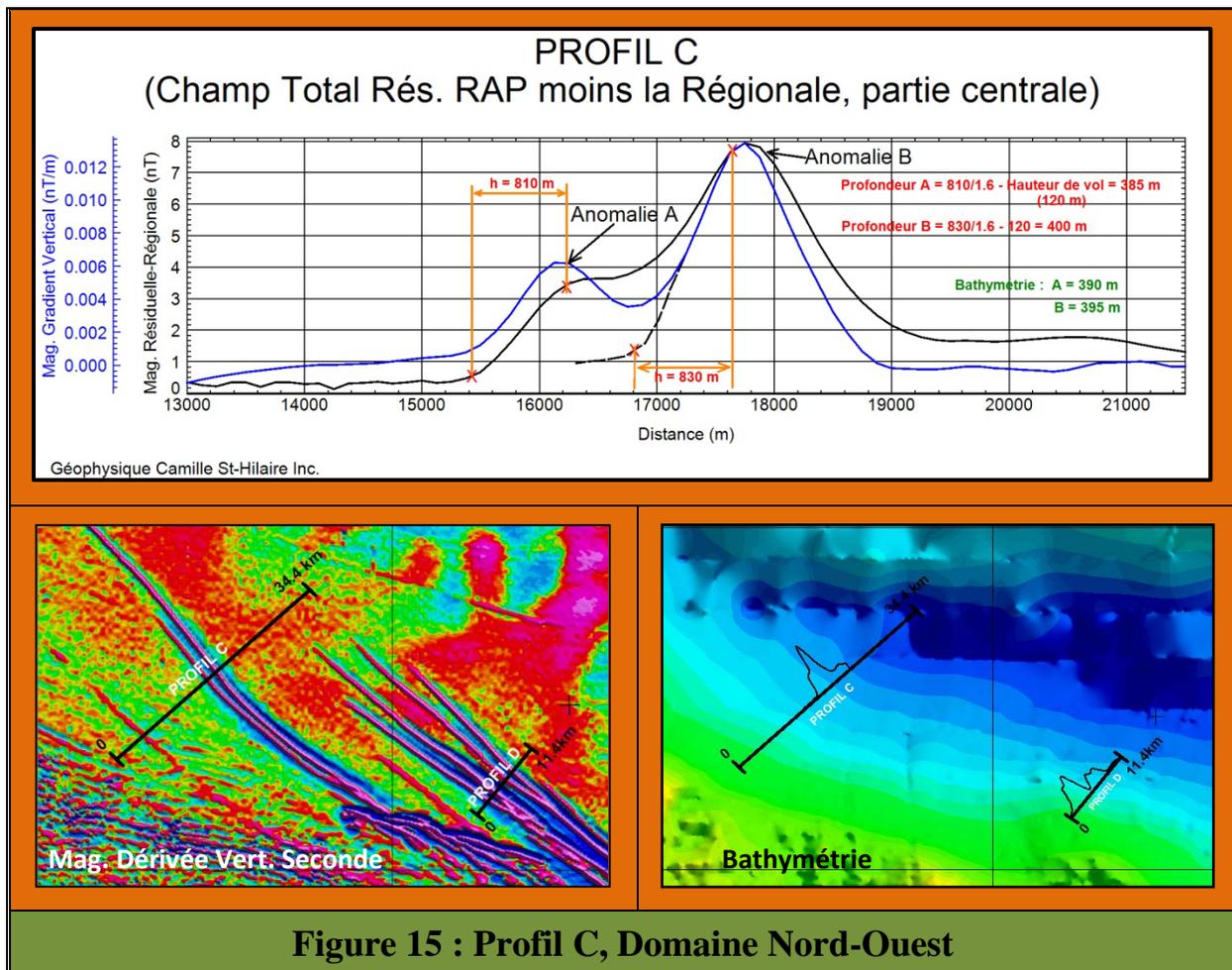
### 7.3.1 Domaine Nord-Ouest

Tout un réseau de linéaments magnétiques a été identifié dans le **Domaine Nord-Ouest**. Ces linéaments sont orientés Ouest-Nord-Ouest à Nord-Ouest (figure 15). Leurs amplitudes varient entre 5 et 20 nT et certains ont jusqu'à 70 km de longueur. Leurs largeurs sont de l'ordre du kilomètre.

D'après nos observations, ces linéaments seraient associés à des dépôts fluviaux charriés par le fleuve Saint-Laurent. Ceux-ci contiendraient entre autre des minéraux lourds ferromagnésiens qui se seraient déposés dans le lit du fleuve. Cette conclusion est basée sur 2 résultats :

- Les linéaments semblent directement reliés à la présence du chenal;
- Le calcul de leurs profondeurs par la méthode de Peters (demi-pente maximale) donne des valeurs qui correspondent exactement aux profondeurs obtenues par le levé bathymétrique du Service Hydrographique de Pêche et Océan Canada.

La figure 15 illustre les résultats obtenus à partir d'un profil du champ magnétique résiduel réduit au pôle et du gradient vertical (Profil C, partie centrale). Deux anomalies (A et B) correspondant chacune à un linéament y sont représentées. La méthode de Peters donne une profondeur de 385 m pour l'anomalie A et 400 m pour l'anomalie B. Par ailleurs, la bathymétrie donne 390 m pour l'anomalie A et 395 m pour l'anomalie B, soit une erreur de  $\pm 5$  m. Ce qui est étonnamment très précis.

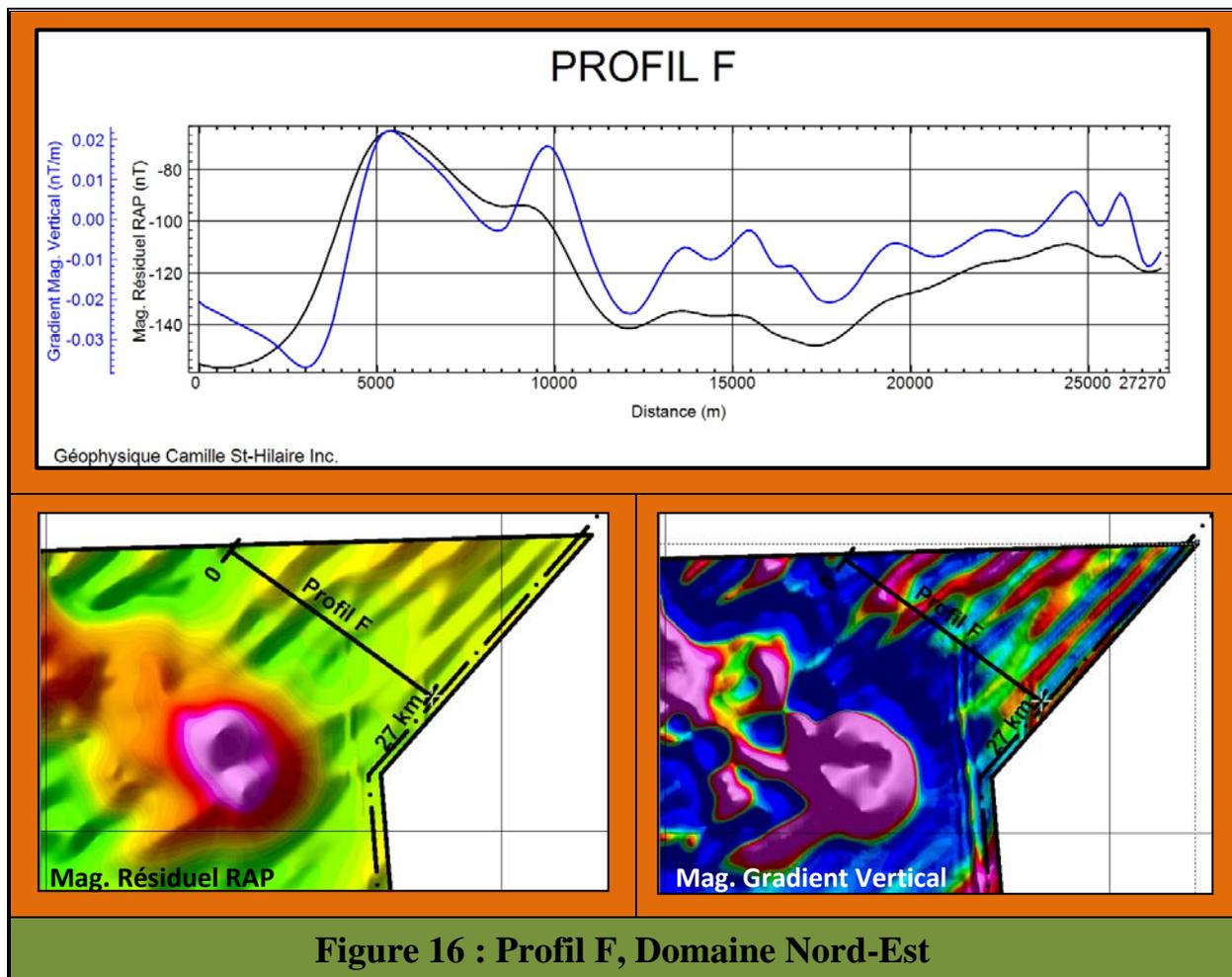


### 7.3.2 Domaine Nord-Est

Dans le **Domaine Nord-Est**, une autre série de linéaments magnétiques, cette fois parallèles et orientés Nord-Est, est observée (Profil F de la figure 16). Malheureusement, ces linéaments sont aussi orientés sub-parallèles aux lignes de vol et plus ou moins bien définis. Pour cette raison il est difficile d'évaluer leur profondeur et surtout d'expliquer quelle serait leur origine. Ils se présentent comme d'immenses vagues de longueurs d'onde variant entre 2 et 6 km. L'amplitude maximale des anomalies magnétiques est de l'ordre d'une centaine de nT, ce qui est assez élevé.

Concernant leurs origines, deux hypothèses sont ici proposées :

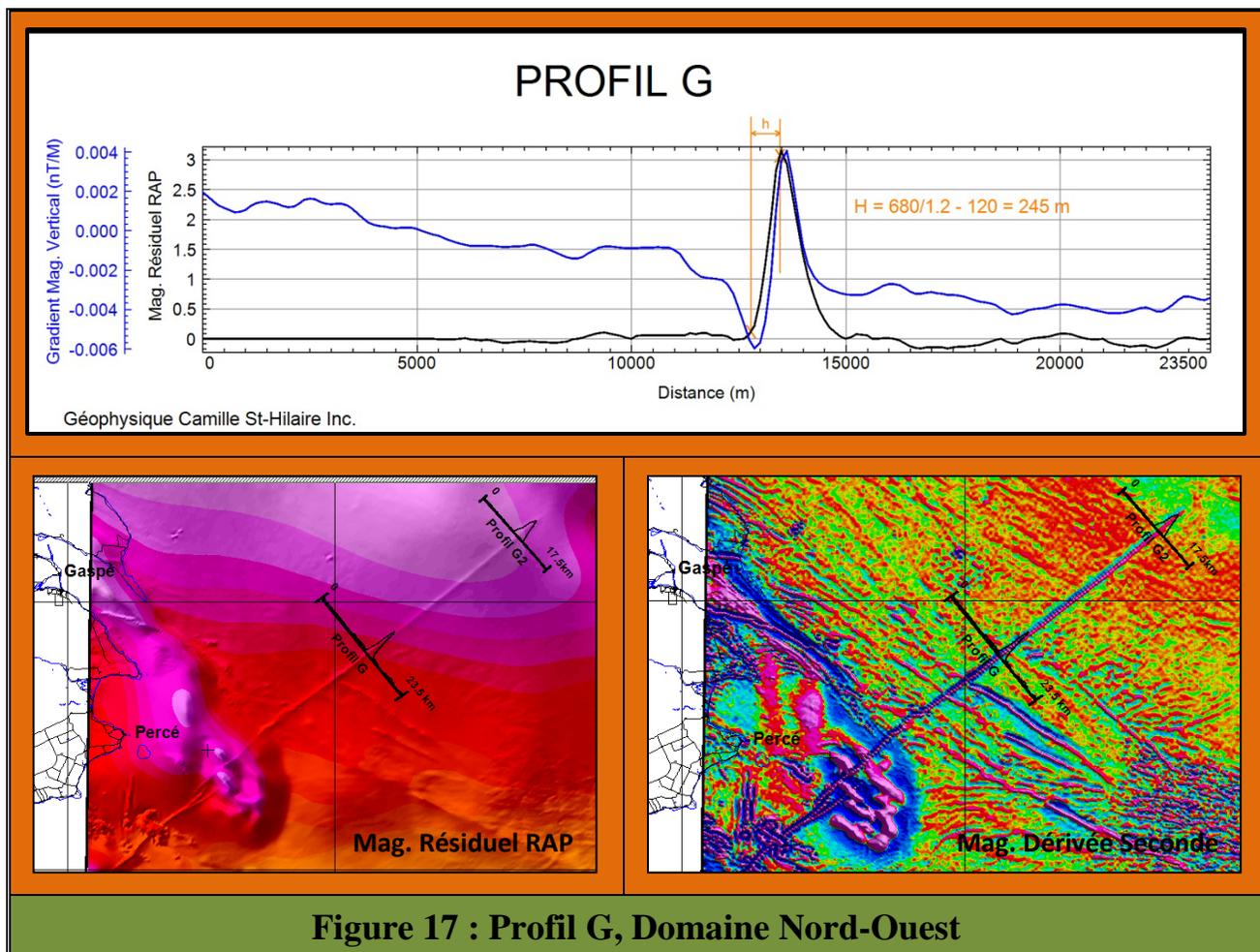
- A- Les linéaments pourraient correspondre eux aussi à des dépôts sédimentaires non-consolidés situés au fond du golfe. Étant donné que nous nous situons ici dans le couloir constitué par le détroit de Belle-Isle, situé entre Terre-Neuve-et-Labrador et le Québec, cette hypothèse est parfaitement plausible (voir la figure 3).
- B- Ces linéaments pourraient refléter la présence d'une alternance d'horizons géologiques présents dans le socle sous-jacent et présentant de forts contrastes de susceptibilité magnétique. Leurs profondeurs seraient de l'ordre de 1200 à 1800 mètres. Cette hypothèse est appuyée par le fait que les linéaments semblent interrompre brusquement leurs parcours au contact de ce qui pourrait être une intrusion mafique circulaire pour par la suite poursuivre leur route plus au Sud (figures 13 et 16). Cette intrusion de roches volcaniques mafiques circulaire appartient au **Domaine Nord** et nous y reviendrons à la section 7.4.

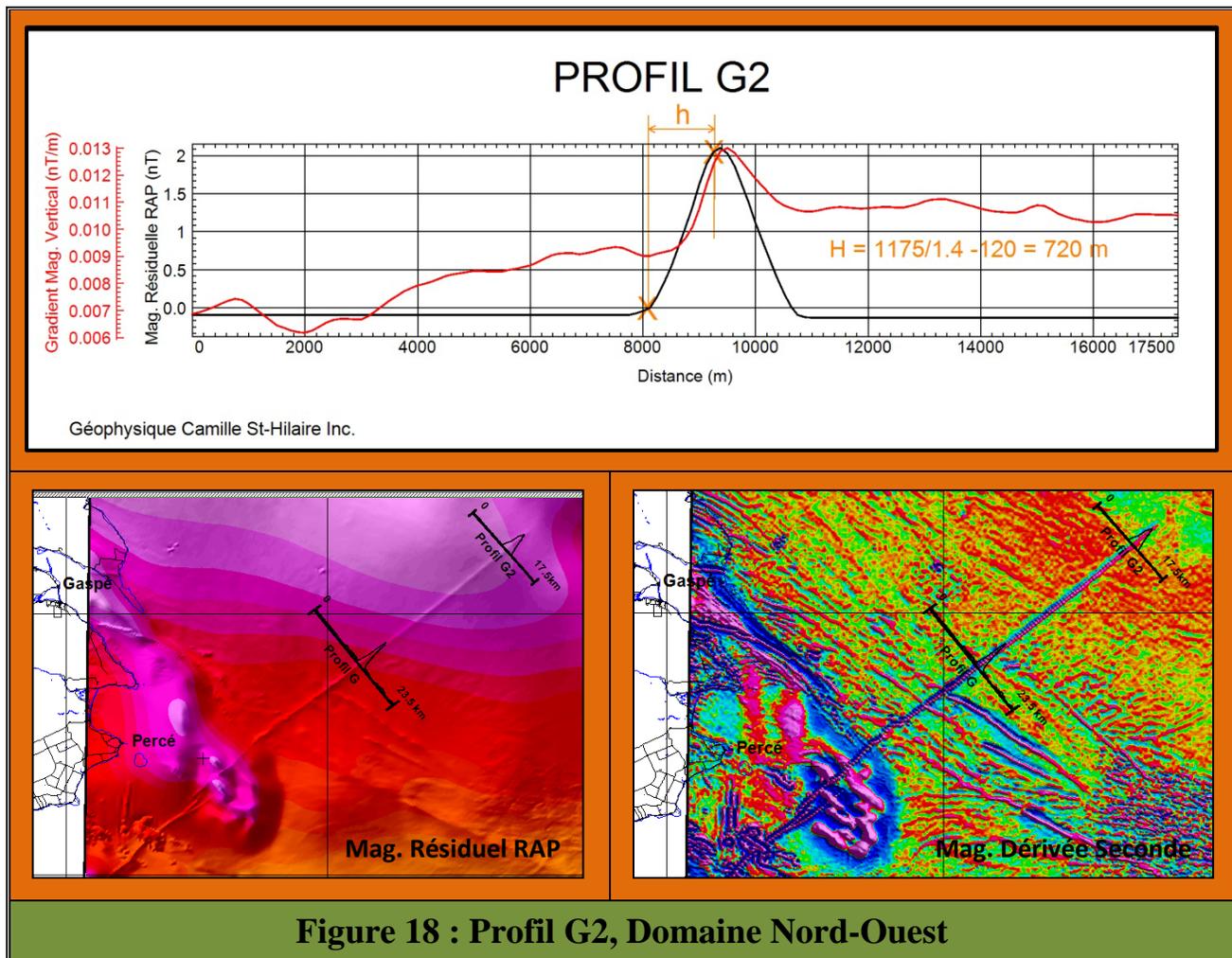


### 7.3.3 Dykes

Un très long dyke, situé au large de la ville de Percé, traverse presque entièrement tout le **Domaine Nord-Ouest**. Très linéaire et orienté Nord-Est, il est aisément visible sur une distance de plus de 110 km. Ce dyke se poursuit à l'extérieur du levé, vers le Sud-Ouest.

Les figures 17 et 18 présentent deux profils (G et G2) du champ magnétique résiduel réduit au pôle (RAP) qui furent tracés perpendiculairement au dyke. Les amplitudes du champ magnétique résiduel sont très faibles, 3 nT pour le profil G et 2 nT pour le profil G2. Suite à une interprétation par la méthode de Peters, des profondeurs de 245 m (profil G) et 720 m (profil G2) furent obtenues. La bathymétrie donne respectivement des profondeurs de 155 m et 350 m pour le fond marin. C'est donc dire que le toit du dyke est situé sous les sédiments non-consolidés. De plus, les 2 profils ayant été positionnés à 47 km et 82 km à l'est-nord-est de la ville de Percé, nous pouvons conclure que plus on s'éloigne vers le large dans le golfe et plus la profondeur du dyke est élevée.

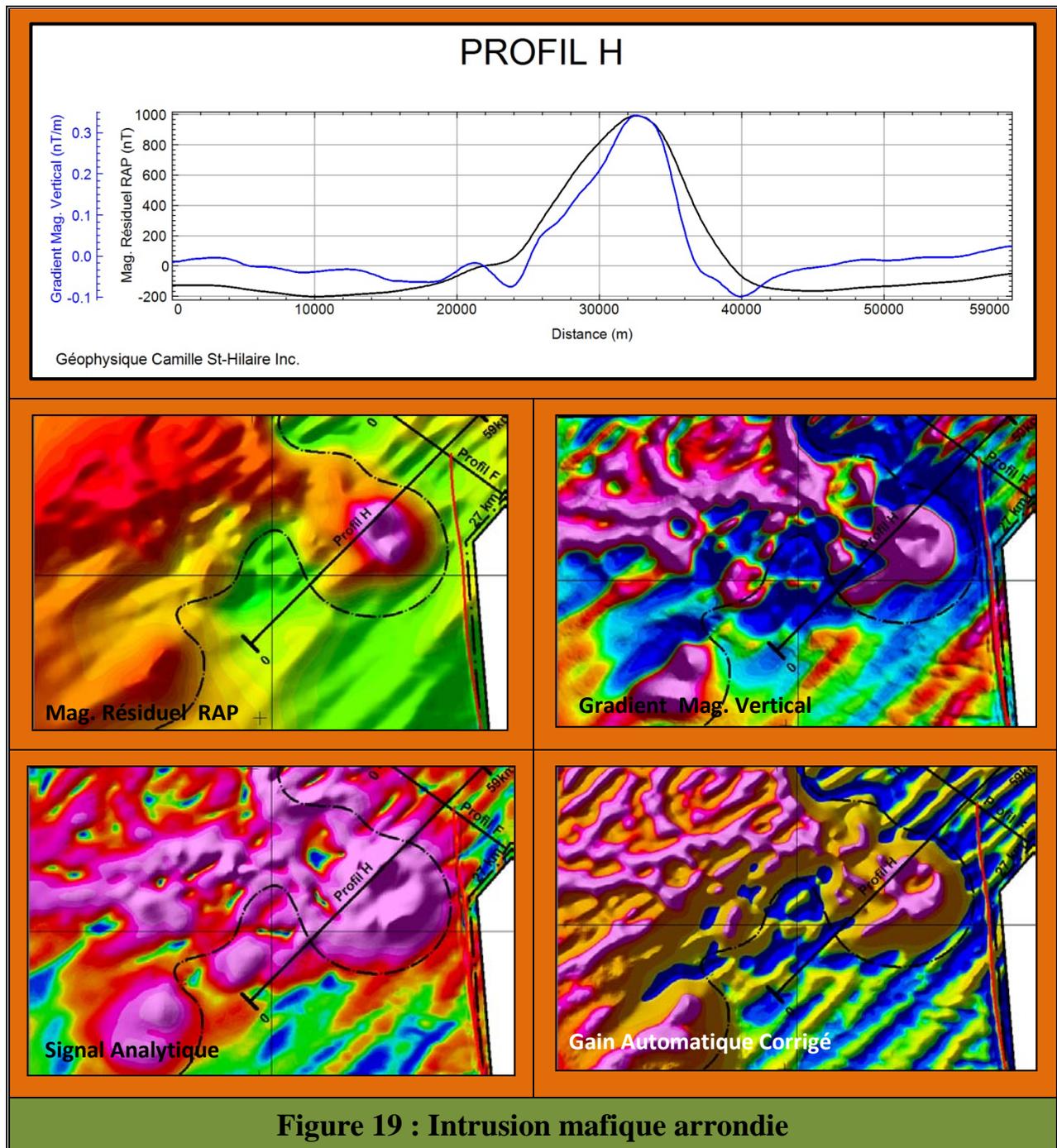




#### 7.4 Intrusion de roches volcaniques mafiques, Domaine Nord

Comme il fut mentionné à la section 7.3.2, une intrusion de roches volcaniques mafiques de forme circulaire caractérisée par son intense signature magnétique (amplitude de 1 200 nT) est observée dans le **Domaine Nord**.

Une anomalie magnétique RAP produite par un cylindre vertical infini (monopôle magnétique) a la forme d'une cloche et est symétrique. Ce qui correspond ici à notre situation (figure 19, profil H). D'après notre interprétation, la profondeur de l'intrusif serait approximativement de 3 400 mètres, son diamètre de 26 km et son inclinaison sub-verticale. Vraisemblablement, il pourrait s'agir ici d'un batholite ayant traversé en partie la colonne sédimentaire.



## 7.5 Anomalies magnétiques/gravimétriques arrondies, Domaine Sud

### 7.5.1 Région des Dômes

Pas moins de 34 anomalies magnétiques positives de forme arrondie ont pu être cartographiées dans le **Domaine Sud**. Ces anomalies sont toutes situées dans ce que nous nommons ici la « **Région des Dômes** » (figure 20). L'ensemble de ces anomalies semble tracer un arc de cercle autour des Îles-de-la-Madeleine. La figure 20 identifie aussi chacun des dômes magnétiquement positifs (en orangé) et localise les 3 profils géophysique (A, B et B2) qui y ont été étudiés. Ces profils apparaissent aux figures 22, 23 et 24.

La figure 21 présente le même secteur mais cette fois-ci c'est l'Anomalie de Bouguer et sa dérivée verticale qui y sont représentées. Même si dans le cas du levé gravimétrique, les traverses étaient espacées de 1 000 mètres, contre 500 mètres pour le levé magnétique, on observe étonnamment à peu près le même patron anomal que celui présenté à la figure 20. Ici toutefois, nous reconnaissons très clairement la structure **Old Harry** située dans le coin Nord-Est et qui correspond à un bas gravimétrique. On y retrouve aussi plusieurs anomalies circulaires assez isolées. Toutes ces anomalies gravitationnelles sont négatives et représentent donc des baisses de densité dans les unités géologiques. Il ne faut pas oublier que la densité de l'halite est de 2.16 contre 2.7 g/cm<sup>3</sup> en moyenne pour la croûte supérieure.

Un dôme de sel ou dôme salin est une structure naturelle formée par la remontée de l'halite, très ductile et plus légère que les roches avoisinantes. Le sel en remontant peut former différentes structures de tailles kilométriques (diapirs, dômes, feuillets, piliers etc.). La figure 8, adaptée par l'auteur, illustre la formation de dômes et piliers à partir d'un feuillet d'halite d'épaisseur constante. Géophysiquement parlant, une masse de sel est diamagnétique et produit de faibles anomalies magnétiques négatives qui sont le plus souvent masquées par un phénomène plus intense (chapeau de roche para ou ferromagnétique). Étant donné qu'on se situe ici dans un environnement sédimentaire, donc magnétiquement très calme, ces anomalies apparaissent positives si elles présentent un chapeau de roches volcaniques mafiques (voir la section 4.2) et négatives ou nulles si elles n'en possèdent pas. Par ailleurs, le sel étant de faible densité, les anomalies magnétiques positives ou négatives devraient être accompagnées d'anomalies gravimétriques négatives.

Nous observons ici que plusieurs des anomalies gravimétriques négatives se superposent aux hauts magnétiques arrondis. Celles-ci seraient donc dotées de chapeaux de roches volcaniques mafiques. Les figures 22 (Profil A) et 23 (Profil B) en sont des exemples.

Toutefois, il existe quelques exceptions pour lesquelles nous observons que des anomalies gravimétriques négatives ne se superposent à aucune anomalie magnétique ou se superposent à des anomalies magnétiques elles aussi négatives. C'est le cas de la structure **Old Harry**. La figure 24 (Profil B2) en est un autre exemple. Il n'y a donc pas ici présence de chapeau de roches volcaniques mafiques.

Nous notons aussi que les anomalies (gravimétriques ou magnétiques) circulaires et isolées sont souvent entourées de larges et longues zones turbulentes. Nous discuterons plus en détail de ces zones à la section suivante (7.6).

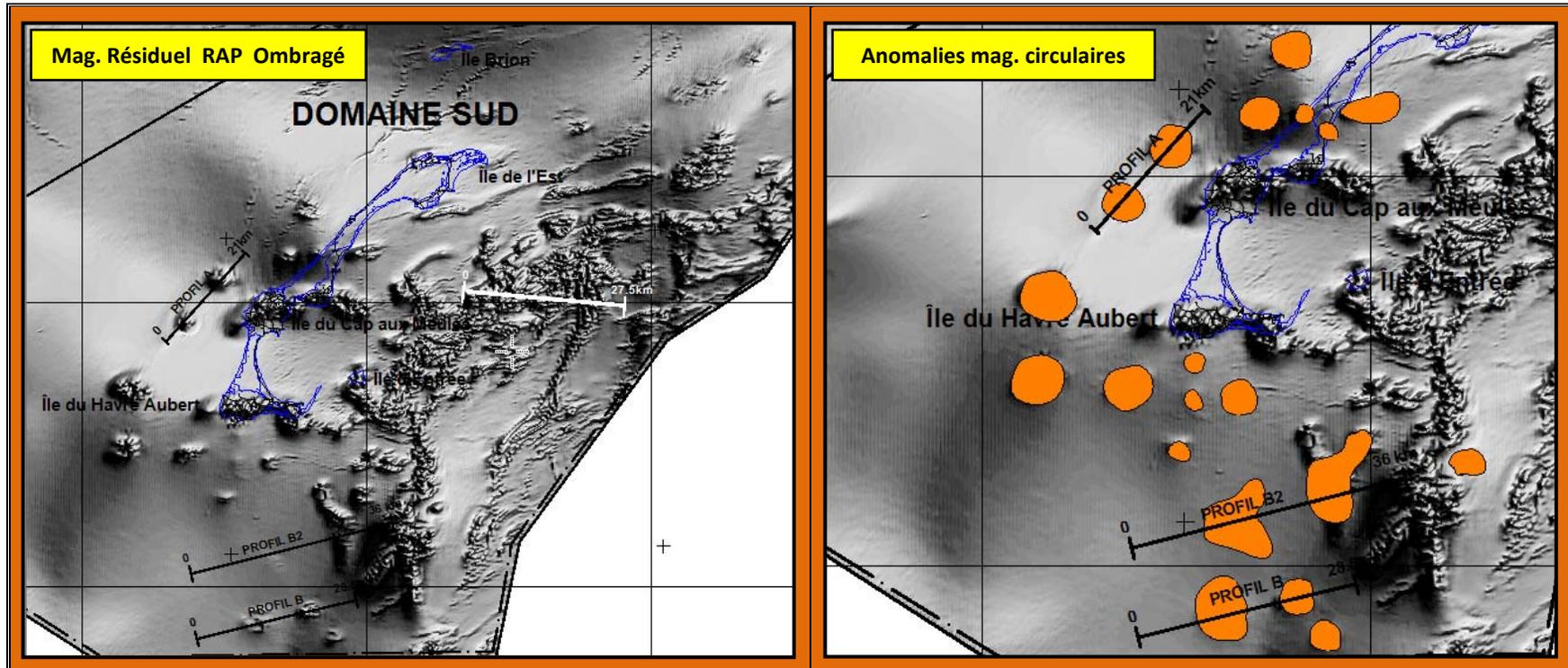


Figure 20 : La Région des Dômes, Mag Résiduel RAP et anomalies mag. circulaires

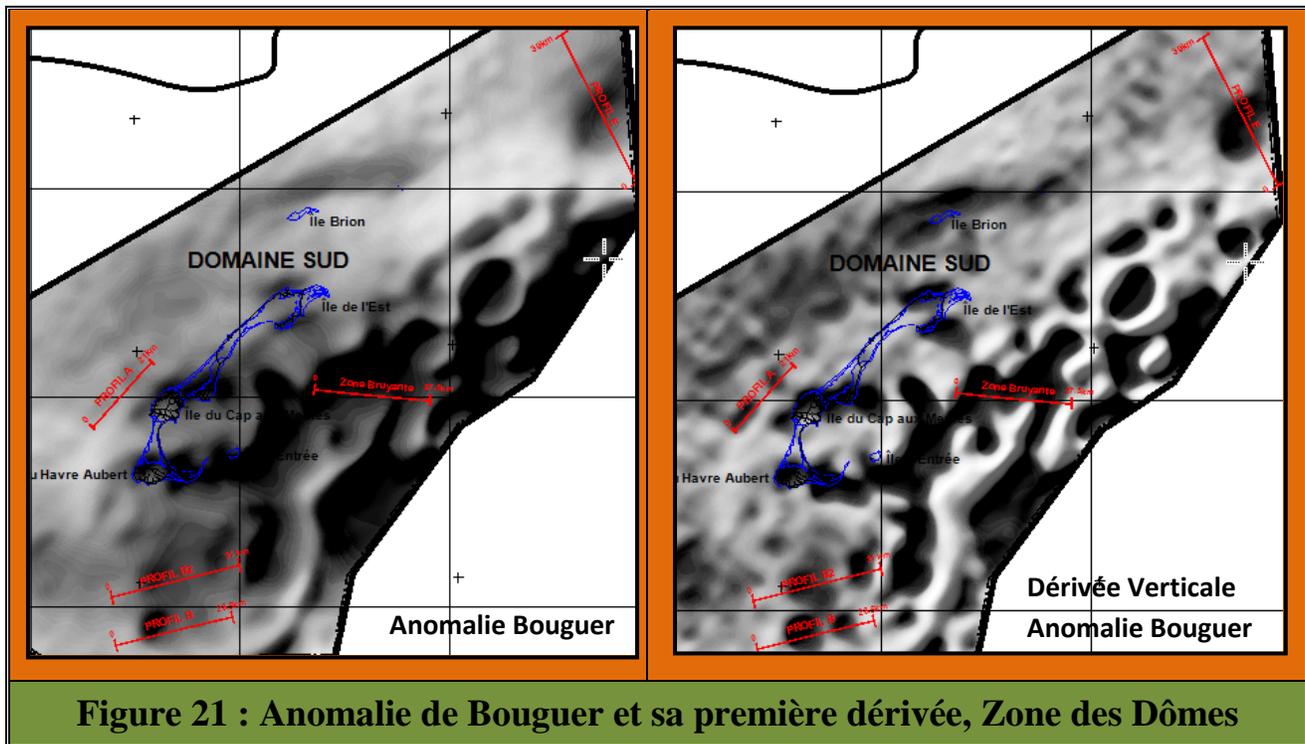


Figure 21 : Anomalie de Bouguer et sa première dérivée, Zone des Dômes

Pour obtenir la profondeur de ces dômes de sel, utilisons le **modèle simple d'un cylindre vertical infini** (monopôle magnétique). Pour une anomalie magnétique, le calcul des profondeurs s'obtient alors à partir de la formule :

$$H = 1.3 x_{1/2}$$

Dans le cas d'une anomalie gravimétrique, cette formule devient :

$$H = x_{1/2}$$

Où dans les 2 cas,  $x_{1/2}$  est égal à la demi-largeur de l'anomalie à la moitié de son amplitude.

Pour les profils A et B, nous retrouvons 2 zones anomales constituées chacune de 2 anomalies magnétiques qui se superposent en partie. Une fois séparées graphiquement, nous obtenons donc pour chaque profil 4 anomalies pour lesquelles il est possible d'obtenir les profondeurs par les équations décrites ci-dessus.

La zone magnétiquement anormale et négative décelée sur le profil B2 est elle aussi constituée de 2 anomalies mais elles sont si emboîtées l'une dans l'autre qu'il devient pratiquement impossible de les séparer et d'obtenir des profondeurs valides.

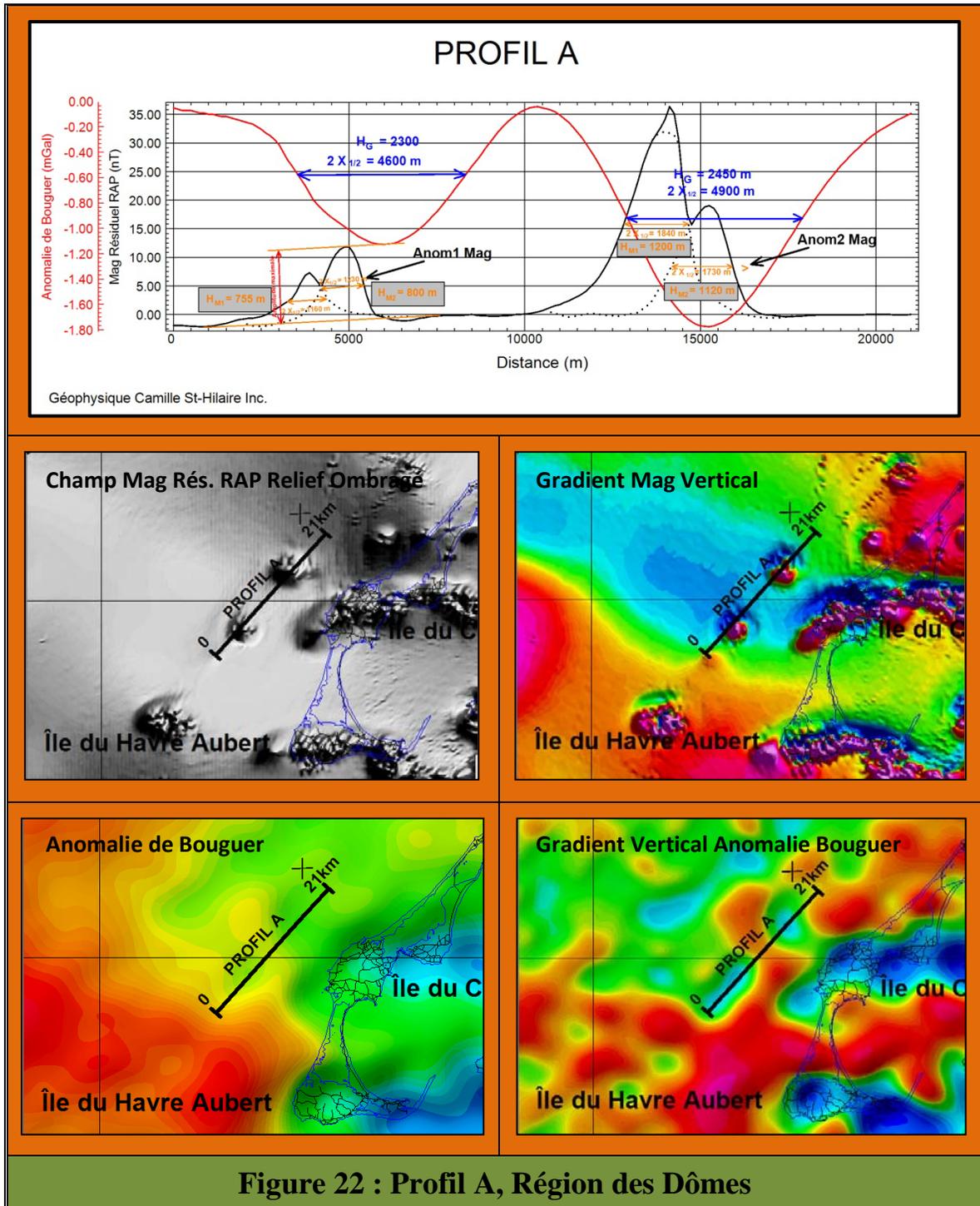
Le tableau 3 résume les résultats obtenus.

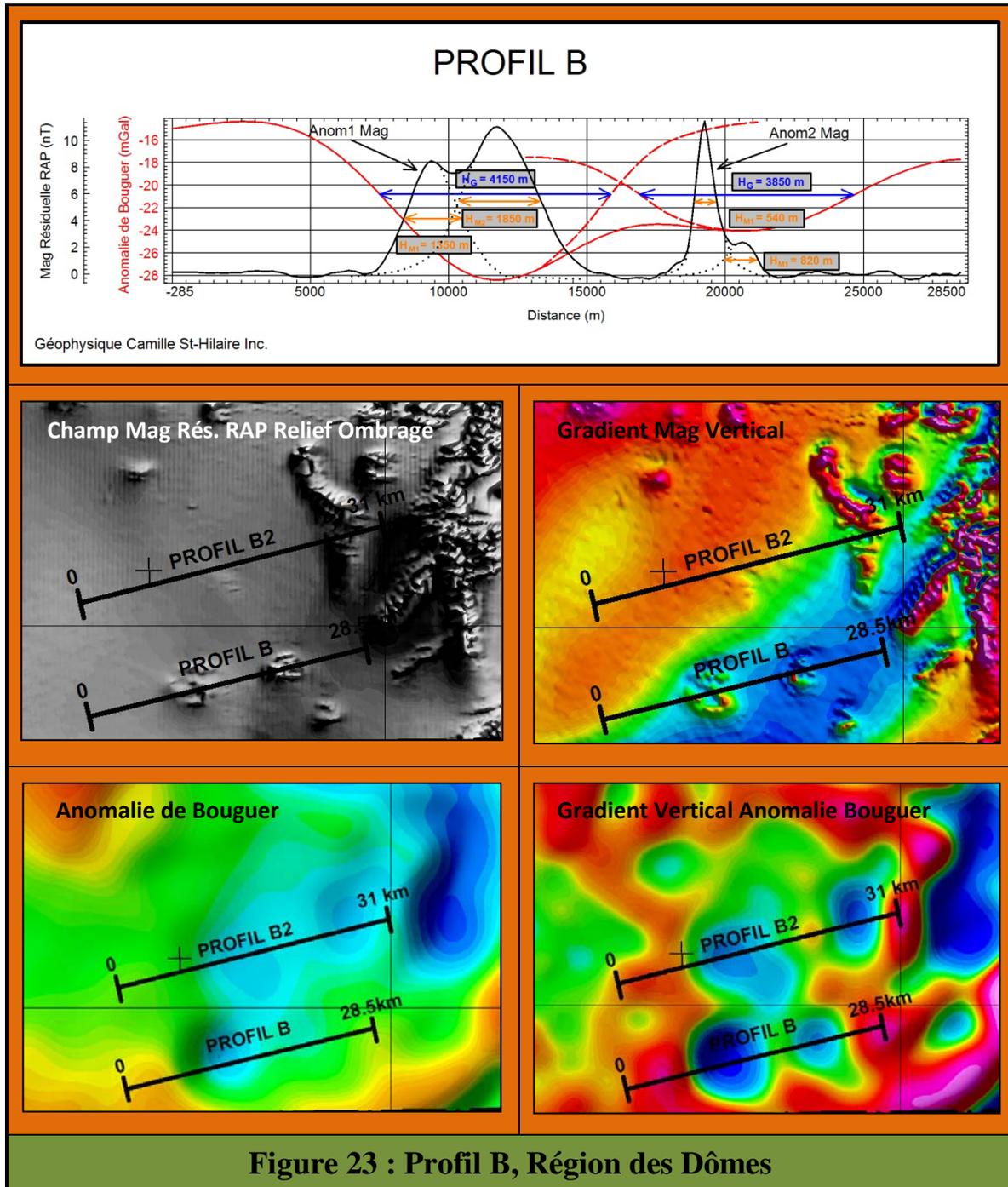
Il faut préciser que le calcul des profondeurs pour une anomalie gravitationnelle donne des résultats beaucoup plus élevés car la technique gravitationnelle fournit avant tout la profondeur du centre de masse du dôme de sel tandis que l'interprétation des anomalies magnétiques nous donne la profondeur du toit du chapeau mafique.

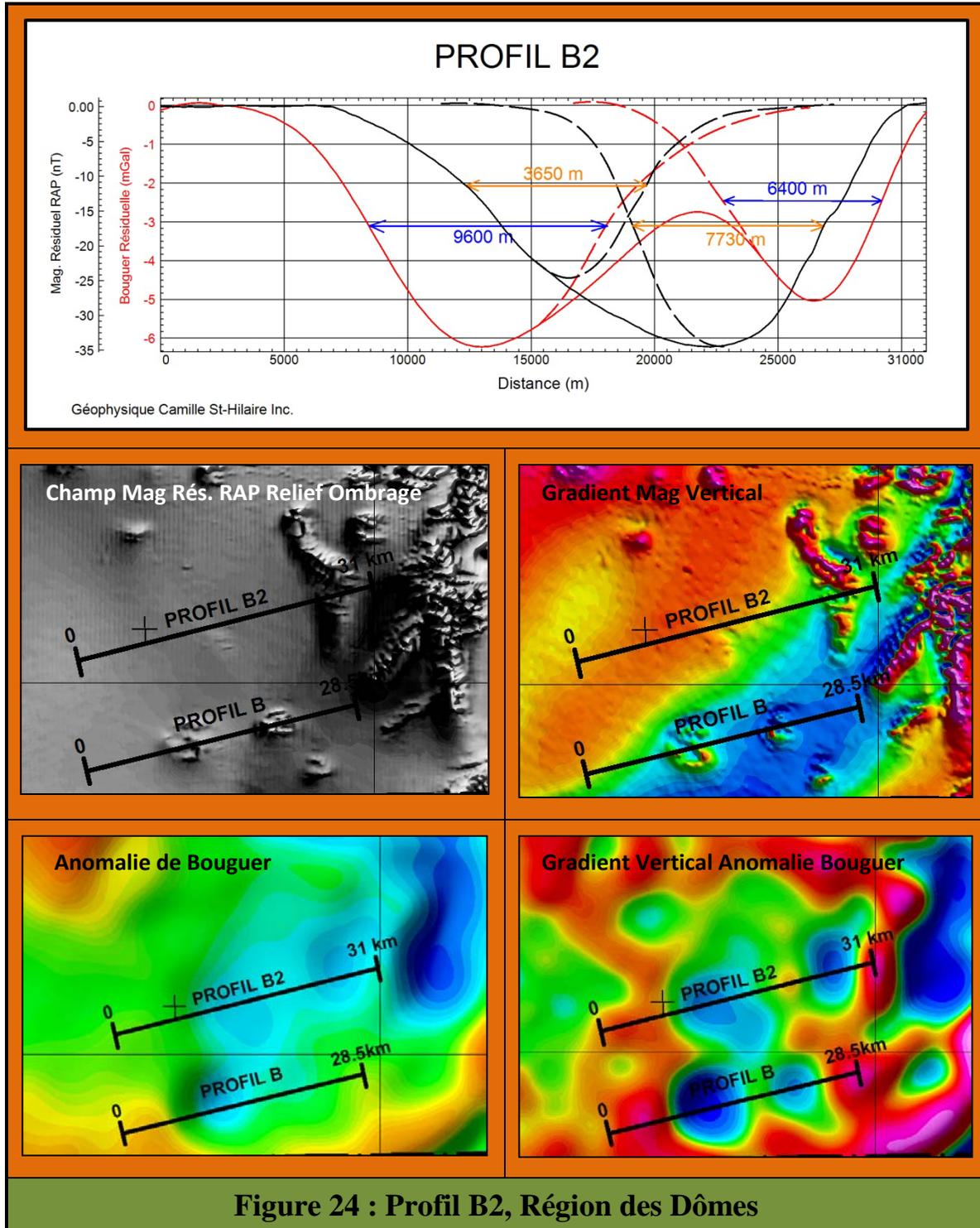
Ces calculs ont été réalisés sur d'autres profils, recoupant d'autres anomalies arrondies. Si l'on exclut les cas où une interférence prononcée entre deux anomalies trop rapprochées ne permet pas d'obtenir des résultats fiables, on obtient des profondeurs variant entre 500 et 1900 mètres pour les anomalies magnétiques, et des profondeurs variant entre 2200 à 5000 mètres pour les anomalies gravimétriques.

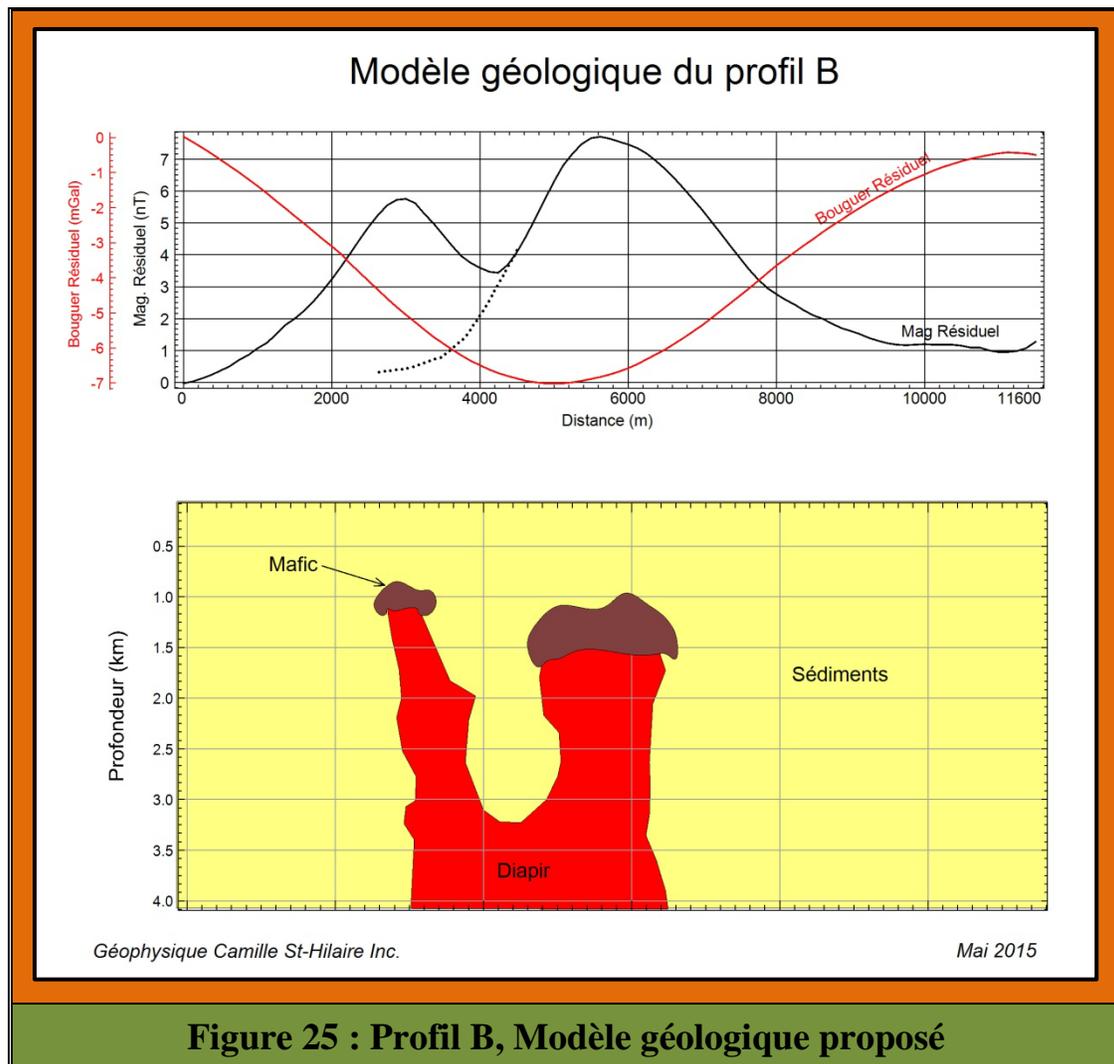
La figure 25 propose un modèle géologique en prenant comme exemple l'anomalie magnétique M1 du profil B. Ce modèle est en mesure de satisfaire à la fois les résultats du levé magnétique et ceux du levé gravimétrique.

<b>Tableau 3 : Profondeurs obtenues sur les profils A, B et B2</b>					
<b>Profil</b>	<b>Anom1 Mag</b>	<b>Anom2 Mag</b>	<b>Anom1 Grav</b>	<b>Anom2 Grav</b>	<b>Commentaires</b>
<b>A</b>	755 m 800 m	1200 m 1120 m	2300 m	2450 m	Les 2 anomalies magnétiques 1 et 2 étant doubles, nous obtenons donc ici 4 profondeurs.
<b>B</b>	1350 m 1850 m	540 m 820 m	4150 m	3850 m	Les 2 anomalies magnétiques 1 et 2 étant doubles, nous obtenons donc ici 4 profondeurs.
<b>B2</b>	2400 m	5000 m	4800 m	3200 m	Trop grande interférence entre les 2 anomalies magnétiques.









### 7.5.2 Plis géologique

Dans le secteur Sud-Ouest du **Domaine Sud**, une large et longue anomalie magnétique (58 km X 61 km) orientée Est-Nord-Est est observée. La figure 26 présente les deux profils (I et I2) qui la recoupent perpendiculairement. L'amplitude de l'anomalie est d'environ 300 nT et elle est accompagnée plus au nord par une autre anomalie, plus étroite, qui lui est parallèle. L'immense bas magnétique qui sépare ces deux anomalies nous suggère qu'elles pourraient indiquer la présence de plis géologiques. La section 7.7, qui concerne l'application de la technique d'interprétation par déconvolution d'Euler, étudie plus en détail cette hypothèse.

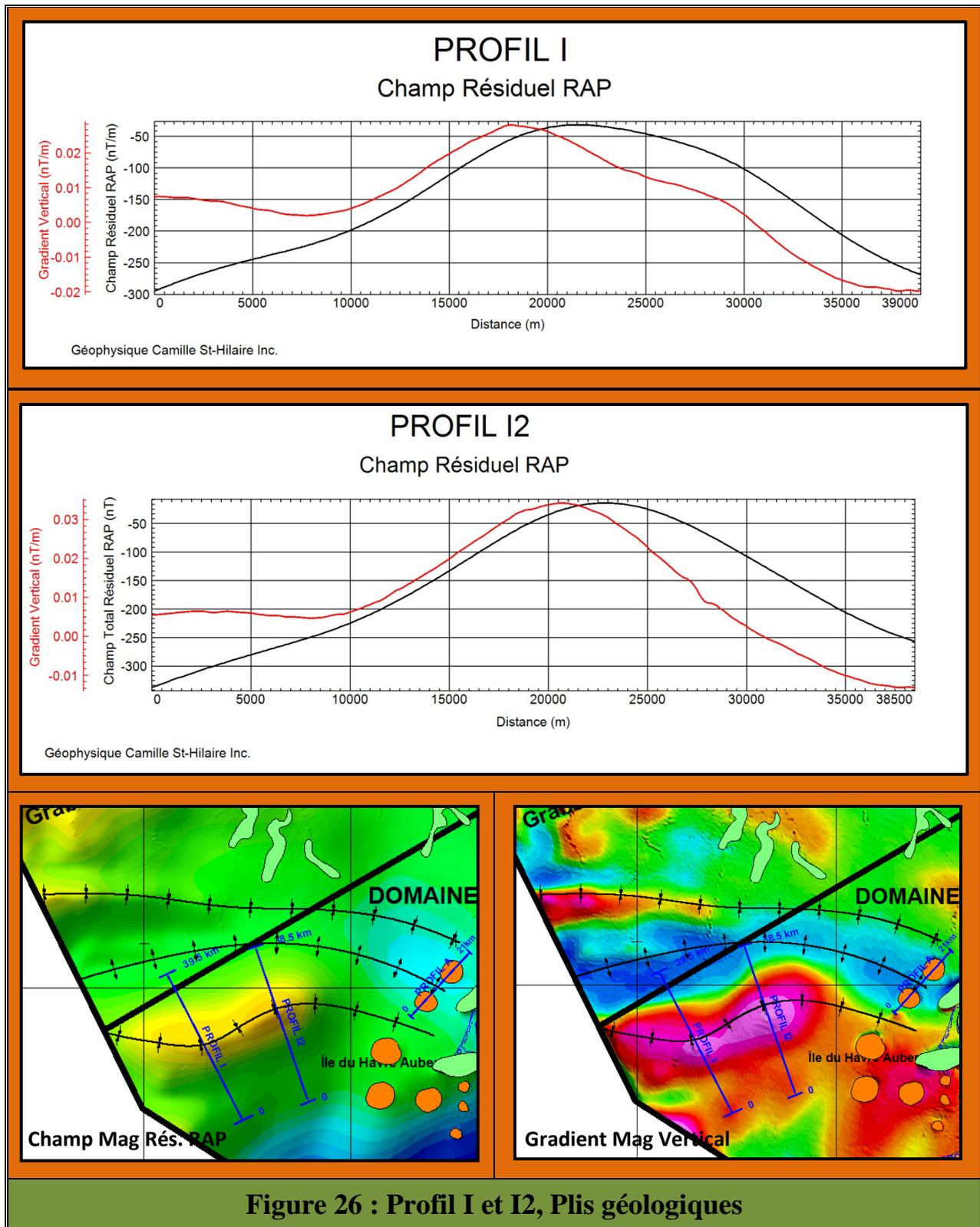


Figure 26 : Profil I et I2, Plis géologiques

## 7.6 Hauts magnétiques de formes indéfinies

Pratiquement toutes les anomalies magnétiques ou gravimétriques de forme arrondie situées dans la **Région des Dômes**, sont enclavées dans un amalgame d'anomalies magnétiques de hautes fréquences (longueur d'onde de l'ordre du kilomètre) et présentant une texture particulièrement turbulente.

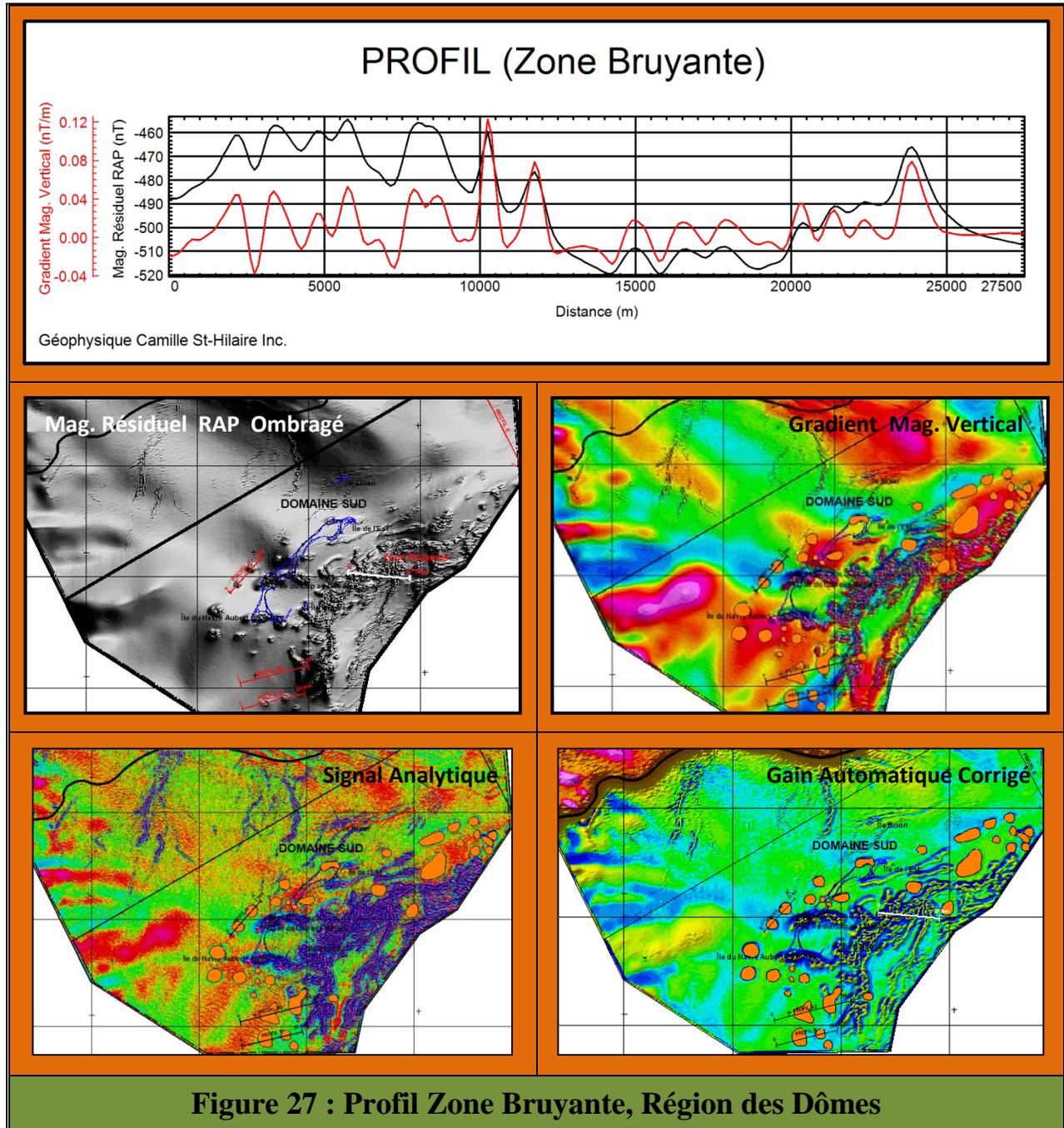
Au Nord-Ouest de la **Région des Dômes**, quelques unes de ces anomalies sont encore présentes, s'étirant en de longs et larges rubans sur des dizaines de kilomètres.

La figure 27 présente un profil du champ magnétique traversant l'une de ces zones turbulentes. Quatre filtres de rehaussement y sont représentés, soient le Champ Magnétique Résiduel RAP Ombragé, le Gradient Magnétique Vertical, le Signal Analytique et le Gain Automatique Corrigé. La position du profil est illustrée en blanc sur la carte du Champ Magnétique Résiduel RAP Ombragé et sur le Gain Automatique Corrigé.

Le profil permet de visualiser le type d'anomalie magnétique haute fréquence qui caractérise ces zones anormales turbulentes.

Comme le laisse supposé la figure 8, ces larges anomalies pourraient correspondre à des reliquats d'halite déformés, reliant le plus souvent entre eux plusieurs dômes de sel, créant ainsi un patron anomal désordonné, chaotique. Ces reliquats pourraient entre autre constituer des couloirs de migration pour les hydrocarbures. Il est intéressant de rappeler ici que les principaux réservoirs d'hydrocarbures qui sont exploités dans le sud de la Mer du Nord sont reliés à la présence de chenaux fluviaux dans les grès de la formation de Schooner (Malo et al., 2015).

Les différents filtres de rehaussement (et plus particulièrement le signal analytique) présentés à la figure 27, délimitent parfaitement ces couloirs turbulents.

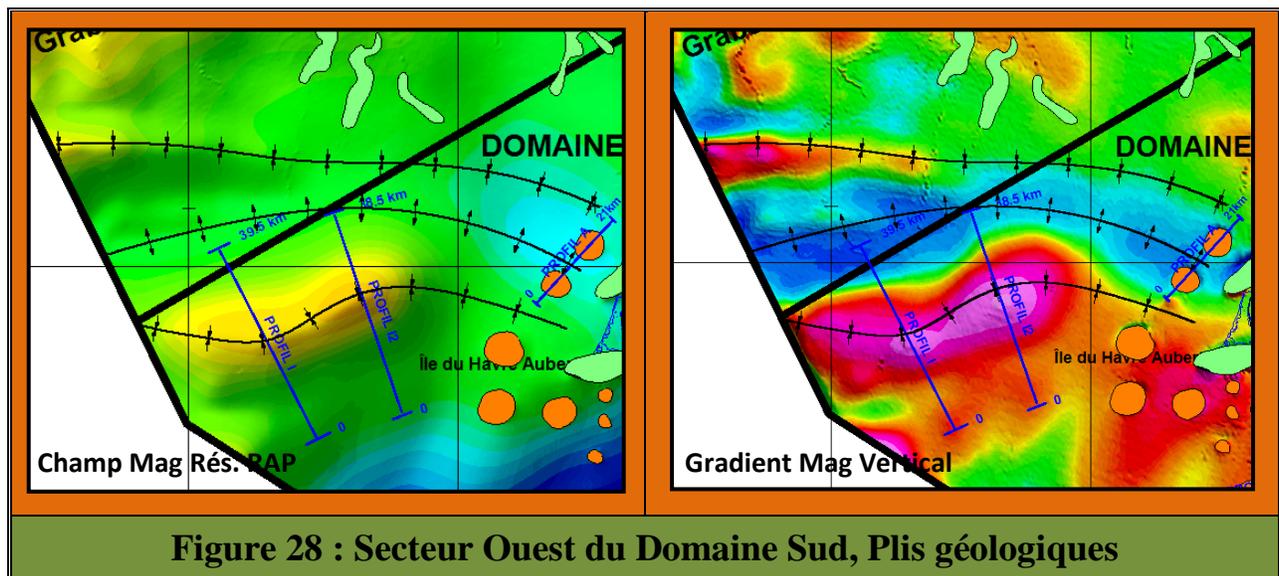


## 7.7 Méthode de déconvolution d'Euler

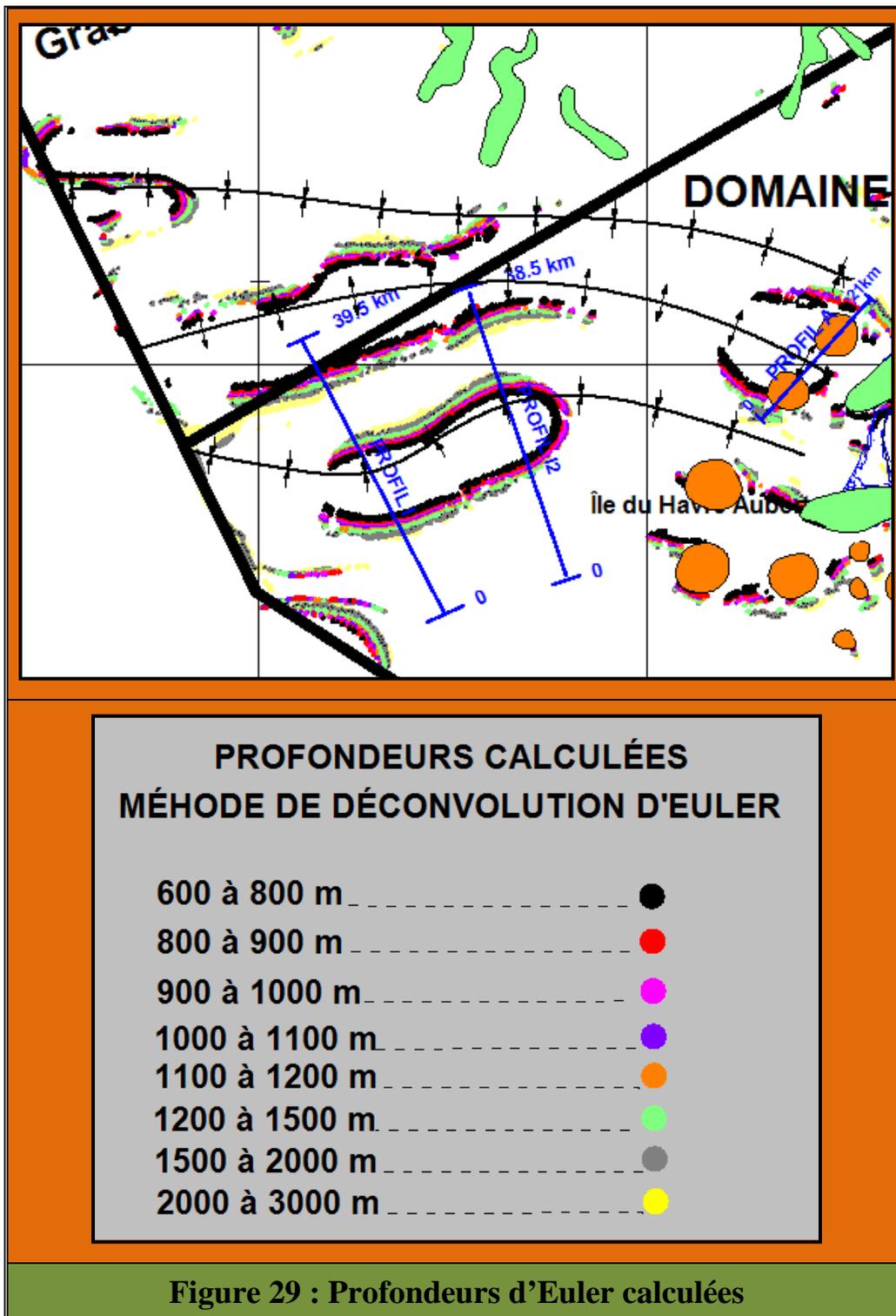
La méthode de déconvolution d'Euler est la technique la plus utilisée pour l'évaluation automatique des profondeurs. Elle fournit des solutions en ce qui concerne les profondeurs, susceptibilités et pendages d'un modèle initialement choisi, comme par exemple un dyke ou un contact. La section A.5.2 de l'annexe A explique plus en détail les fondements mathématiques de cette technique. Nous allons l'appliquer ici afin de vérifier l'hypothèse concernant la présence de plis géologiques situés à l'extrême Ouest du **Domaine Sud** (section 7.5.2).

La figure 28 présente le champ magnétique résiduel réduit au pôle ainsi que le gradient magnétique vertical du secteur retenu. On y distingue clairement une succession de hauts alternant avec des bas magnétiques. Les plis géologiques présumés qui pourraient produire cette alternance y ont aussi été tracés.

La méthode de déconvolution d'Euler a été appliquée afin d'évaluer leurs profondeurs. L'index structural utilisé est de 1 avec une fenêtre de longueur 1 125 mètres (10 points de lecture). Le résultat est présenté à la figure 29. Il indique une augmentation des profondeurs obtenues au fur et à mesure qu'on s'éloigne des 2 arêtes des anomalies magnétiques. Ces profondeurs passent de 600 à 800 mètres jusqu'à plus de 2000 mètres. Ce qui semble indiquer la présence d'une succession de synclinaux-anticlinaux orientés Est-Ouest.



Si ces résultats sont confirmés par sismique ou par forage, la présence de plis géologiques seraient d'un intérêt capital pour l'exploration des hydrocarbures puisque, l'anomalie magnétique en forme de cacahouète et longue de 58 km correspondrait au toit d'un immense anticlinal qui pourrait représenter un piège gigantesque. D'autant plus que celui-ci est situé à la limite Ouest de la **Région des dômes**. Les larges rubans magnétiques désordonnés observés au Nord et à l'Est et reliant le plus souvent entre eux plusieurs dômes de sel (section 7.6) pourraient avoir servi de couloirs de migration pour les hydrocarbures et avoir alimenté cet immense anticlinal.



## 7.8 Analyse Spectrale

Le **Spectre de Puissance** d'un ensemble de données aéromagnétiques peut être utilisé dans le but de déterminer les profondeurs moyennes des différentes formations géologiques (Spector, 1967; Spector et al., 1970; Battacharya, 1966).

Ces profondeurs sont obtenues à partir des pentes observées aux plus faibles **Nombre d'Onde** sur le **Spectre de Puissance**. La méthode est basée sur l'hypothèse que chaque unité géologique peut-être associée à une distribution de blocs non-corrélée, de profondeurs, d'épaisseurs, de largeurs et de magnétisation variables.

Sur le **Spectre de Puissance** (dont les axes sont logarithmiques), chaque groupement de blocs présentant des profondeurs similaires sera représenté par une droite de pente constante. Les différentes unités géologiques pourront alors être identifiées sur le **Spectre de Puissance** en fonction de leur profondeur. De plus, la valeur de chaque pente nous donnera la profondeur moyenne d'un ensemble de blocs. La profondeur des différentes unités géologiques est obtenue à partir de la pente de chacun des segments de droite et l'équation suivante (Cowan, 1993):

$$\text{Profondeur} = \text{Pente} / 4 \pi$$

La technique est très utile pour l'évaluation rapide des conditions générales d'un territoire. Elle permet ainsi de séparer grossièrement les différentes unités présentes en fonction de leurs profondeurs moyennes. Elle ne peut-être toutefois utilisée dans la détermination des profondeurs d'anomalies individuelles.

Une de ses applications importante est qu'elle peut fournir les paramètres des filtres numériques qui nous permettront de séparer les contributions au champ magnétique provenant de sources superficielles de celles provenant de sources plus profondes.

La figure 30 présente le **Spectre de Puissance** obtenu pour l'ensemble des données du champ magnétique résiduel RAP acquises aux Îles-de-la-Madeleine. D'après les pentes des 4 segments de droite tangentes au spectre de puissance nous obtenons les profondeurs suivantes :

**7.7 km 3.0 km 1.9 km 1.0 km**

À la section 7.2 nous avons vu que la carte du champ magnétique total résiduel pouvait être divisée en quatre domaines présentant des intensités et des textures de magnétisation bien distinctes. De plus, les profondeurs et les épaisseurs de roches sédimentaires propres à chacun de ces domaines étaient tellement différentes que l'on s'est mis à soupçonner la présence d'un graben (plus particulièrement entre le **Domaine Nord-Ouest** et le **Domaine Sud**). C'est pour cette raison que plutôt que de faire une analyse spectrale pour l'ensemble du levé (comme nous venons de le faire), nous avons décidé de faire une analyse spectrale propre à chacun des 4 domaines. Le levé aéromagnétique fut donc divisé suivant les limites de chaque domaine et l'analyse spectrale réalisée séparément pour chacun d'entre eux.

Les figures 31 à 34 présentent les résultats de ces analyses et le tableau 4 compile les profondeurs obtenues.

À la lumière de ces résultats, il semble assez évident que l'unité 1 est beaucoup plus profonde dans le **Domaine Sud** que dans tous les autres domaines. En effet, sa profondeur de 14 km est le double de la moyenne des 3 autres domaines. Ces profondeurs correspondent au socle rocheux présent sous la colonne sédimentaire.

De façon tout à fait identique, l'unité 2 présente dans le **Domaine Sud** est elle aussi 2 fois plus profonde que la moyenne des 3 autres domaines (5.3 contre 2.6 km).

Ces 2 observations nous incitent à conclure qu'il existe vraiment un décrochement majeur entre le **Domaine Sud** et les 3 autres domaines.

<b>Tableau 4 : Résultats de l'analyse spectrale par domaine (mag)</b>				
<b>Domaine</b>	<b>Profond. 1 (km)</b>	<b>Profond. 2 (km)</b>	<b>Profond. 3 (km)</b>	<b>Profond. 4 (km)</b>
<b>Sud</b>	<b>14.0</b>	<b>5.3</b>	<b>2.6</b>	<b>0.73</b>
<b>Nord-Ouest</b>	<b>6.5</b>	<b>2.6</b>	<b>0.9</b>	<b>0.48</b>
<b>Nord-Est</b>	<b>7.8</b>	<b>2.7</b>	<b>1.7</b>	<b>0.66</b>
<b>Nord</b>	<b>7.2</b>	<b>2.6</b>	<b>1.1</b>	<b>0.56</b>

Une analyse spectrale a aussi été réalisée pour les données gravimétriques (figure 35). Ces données n'ont été acquises que dans le **Domaine Sud**. Les profondeurs obtenues pour les unités 1, 2 et 3 sont presque identiques à celles obtenues avec les données magnétiques. Ces résultats renforcent encore plus l'hypothèse d'un immense décrochement entre le **Domaine Sud** et les autres domaines.

<b>Tableau 5 : Résultats de l'analyse spectrale par domaine (grav)</b>				
<b>Domaine</b>	<b>Profond. 1 (km)</b>	<b>Profond. 2 (km)</b>	<b>Profond. 3 (km)</b>	<b>Profond. 4 (km)</b>
<b>Sud</b>	<b>15.5</b>	<b>5.5</b>	<b>2.2</b>	<b>--</b>

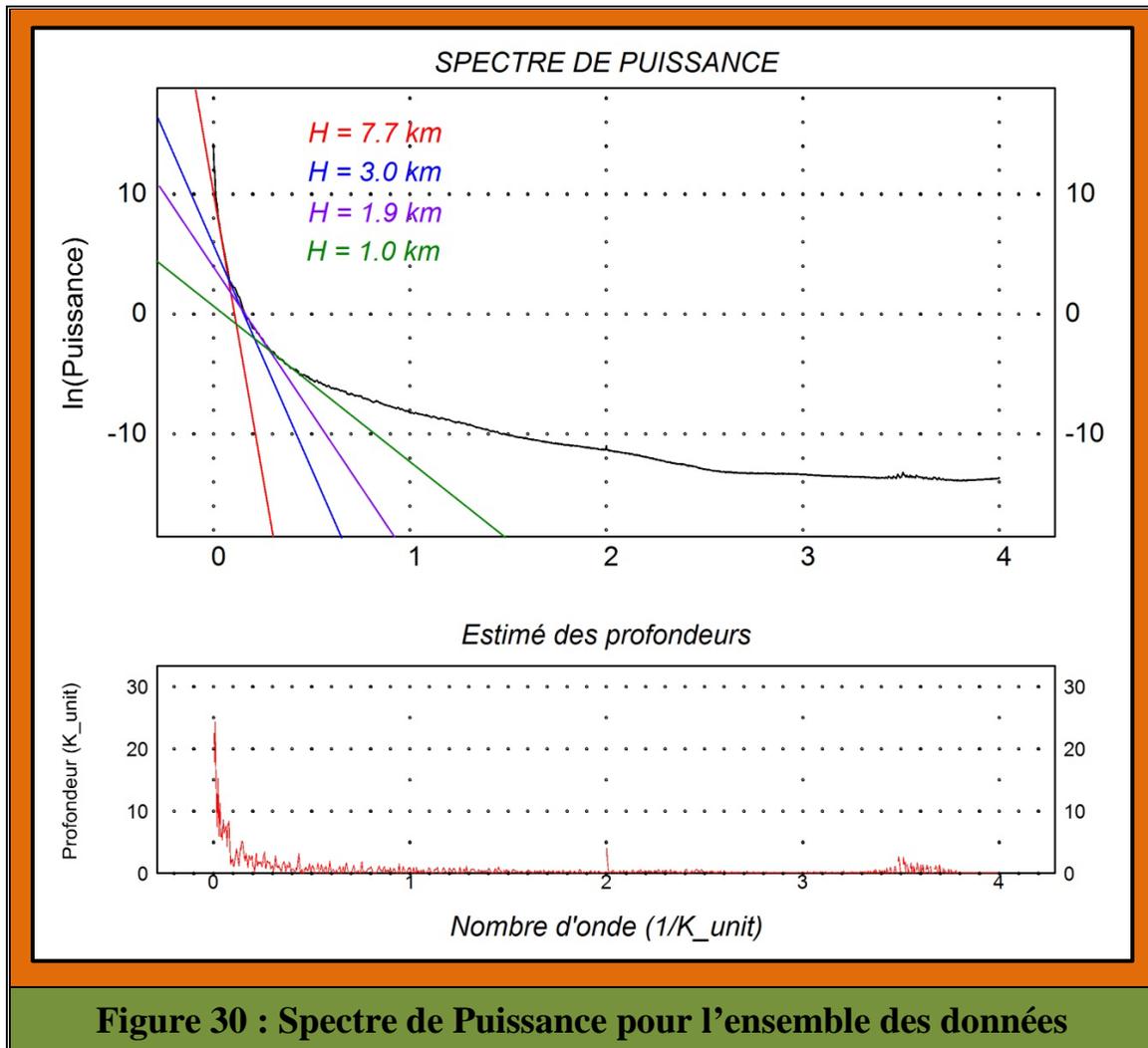
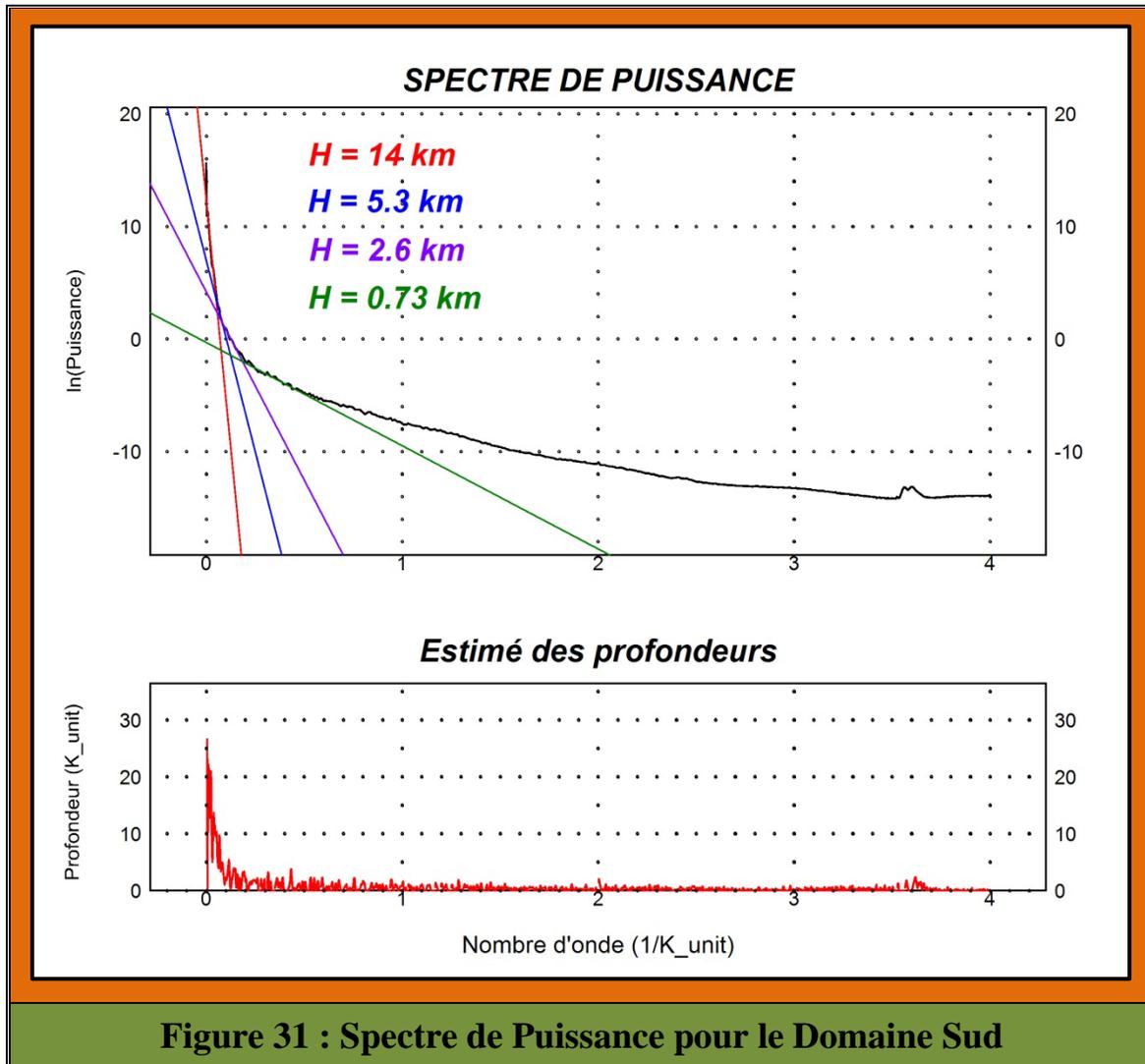
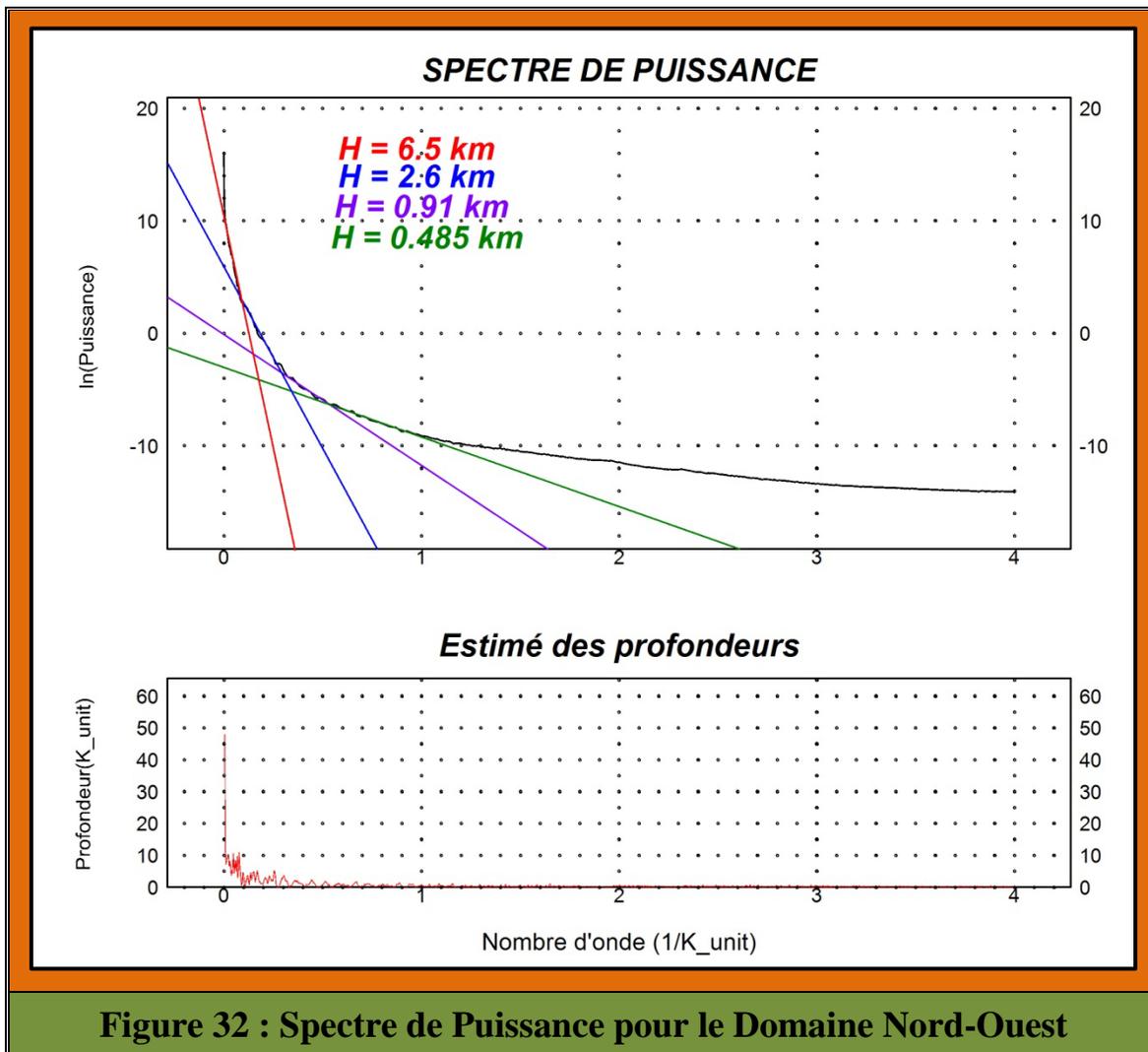
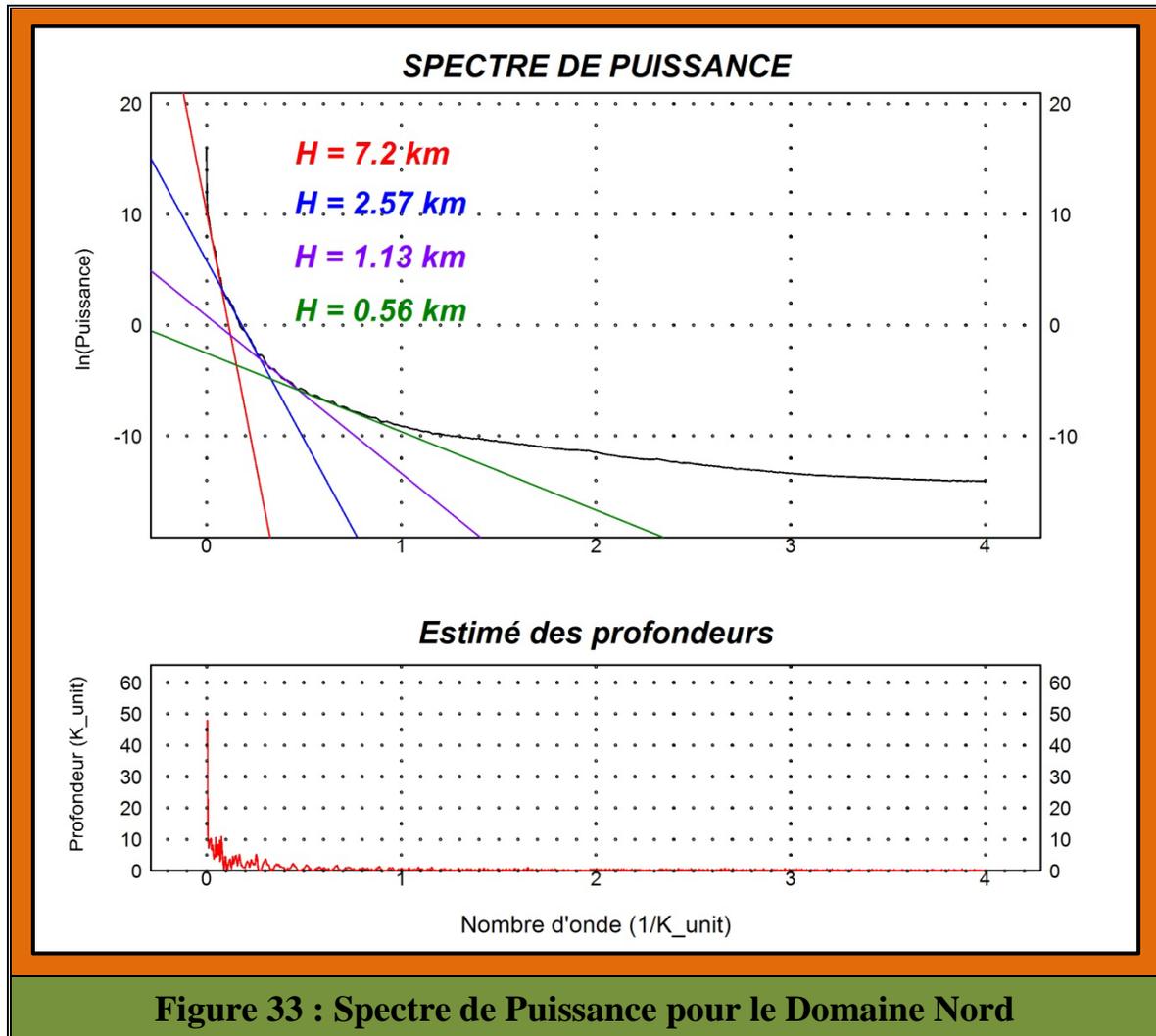
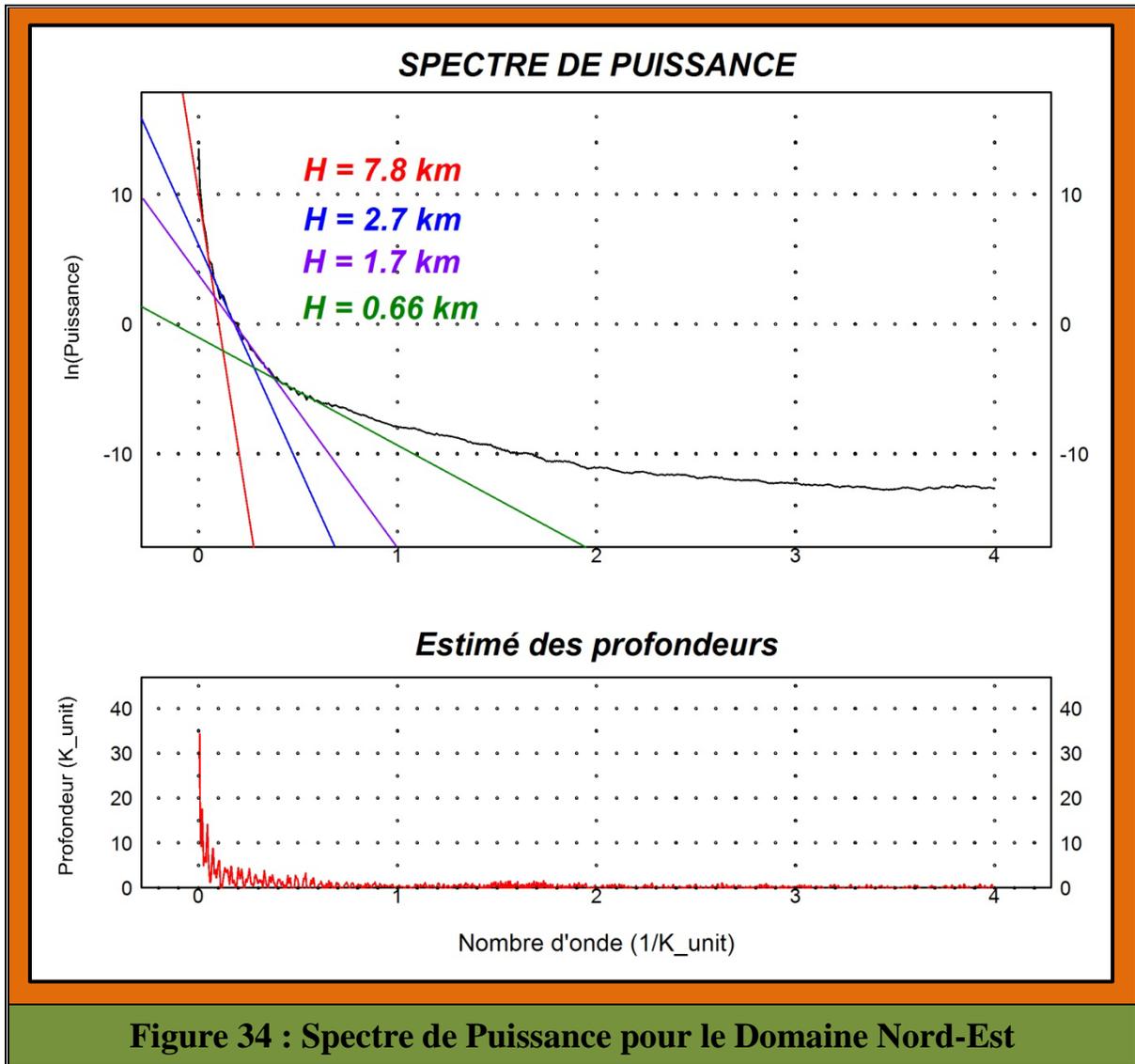


Figure 30 : Spectre de Puissance pour l'ensemble des données









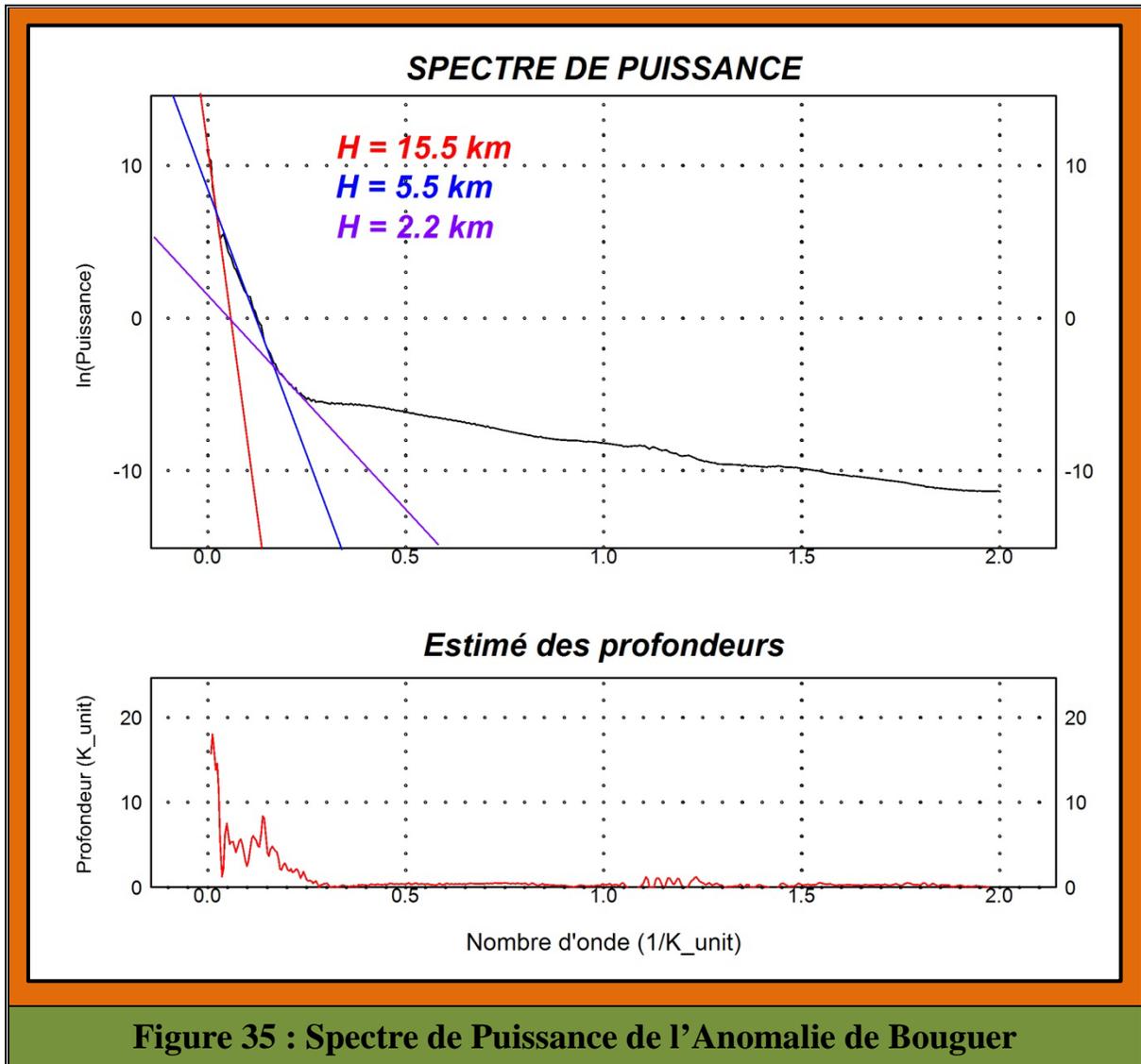


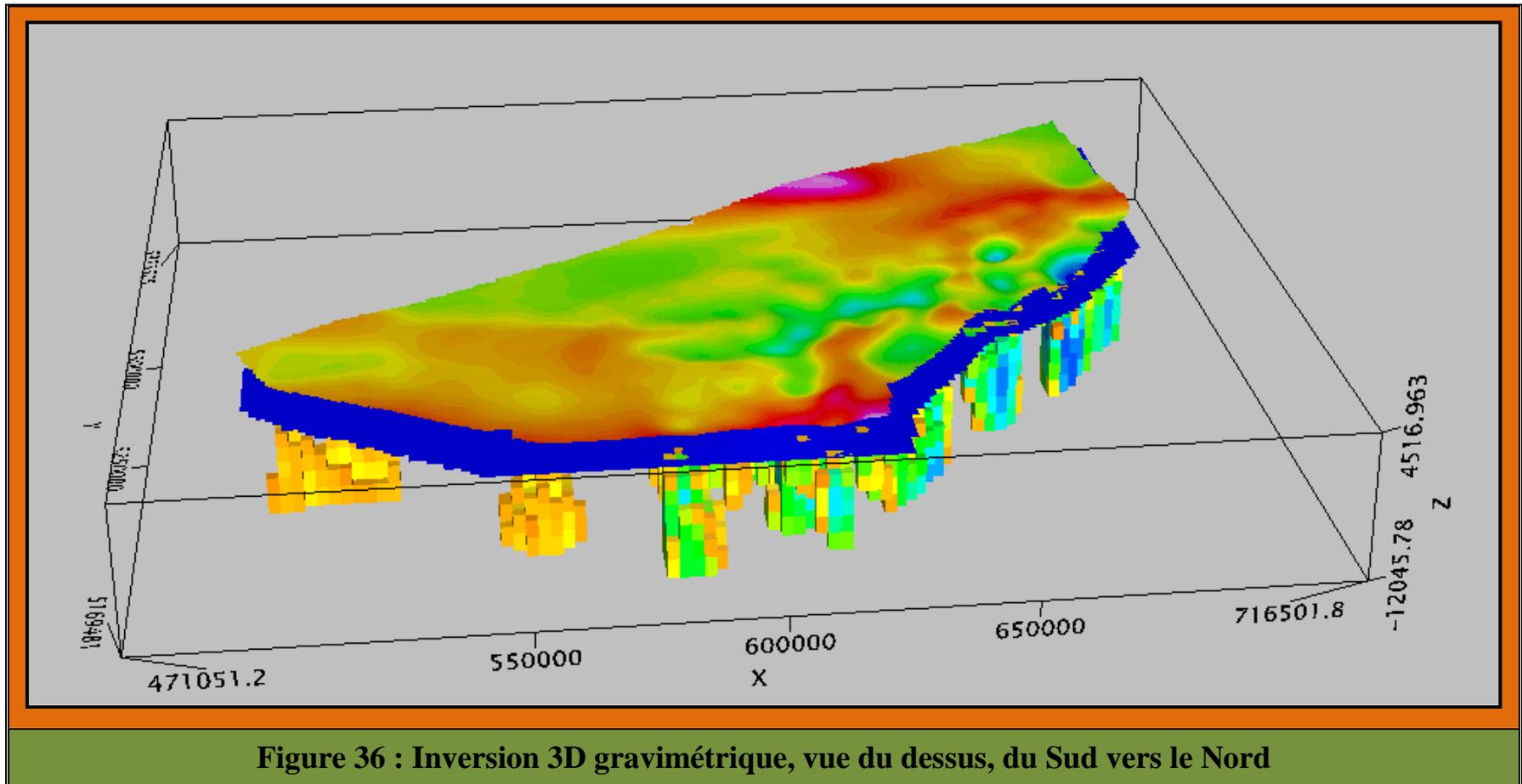
Figure 35 : Spectre de Puissance de l'Anomalie de Bouguer

## 7.9 Inversion 3D

En 2012, **Geosoft** introduisit le logiciel **VOXI Earth Modelling**, un logiciel d'inversion géophysique générant des modèles 3D de données gravimétriques ou magnétiques aéroportées. Un des avantages importants de convertir des données gravimétriques ou magnétiques en un modèle à trois dimensions du sous sol est que le produit final, très visuel, permet aux explorateurs de voir et comprendre la distribution de la densité ou de la susceptibilité magnétique du sol à l'aide de plateformes comme par exemple un fichier PDF parfaitement orientable (MacLeod, 2012). **VOXI** produit ainsi un modèle des propriétés de la roche, qui peut être confronté à des observations géologiques de surface et par les forages existants.

Pour être réaliste, le modèle doit par contre être contraint par d'autres informations géologiques (cartographie, forages, tranchées, analyses...) ou géophysiques. La possibilité de convertir des données géophysiques directement en images 3D, permet aux explorateurs d'obtenir un aperçu beaucoup plus clair du sous-sol et ainsi améliorer l'identification de cibles de forage dans des environnements souvent complexes.

Les résultats de l'inversion 3D sont illustrés aux figures 36 à 39. Un fichier PDF (Inversion\_3D\_Gravité.pdf) de l'inversion a été réalisé et remis au MERN. Ce fichier permet de faire tourner le modèle dans toutes les directions en plus de pouvoir agrandir un secteur jugé d'intérêt. Il permet entre autre de visualiser les différents dômes et murs de sel et de définir les liens qui les unissent.



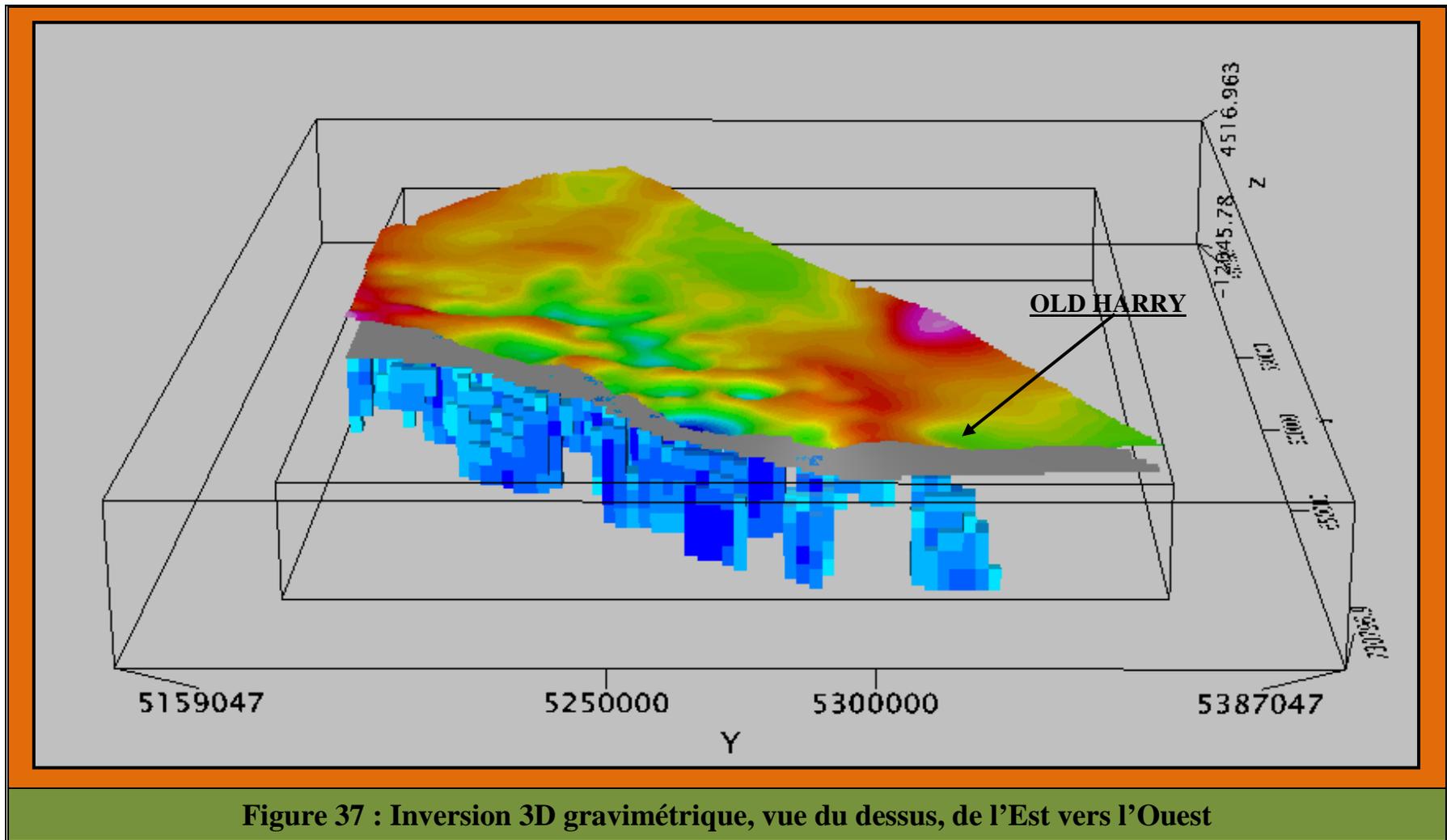
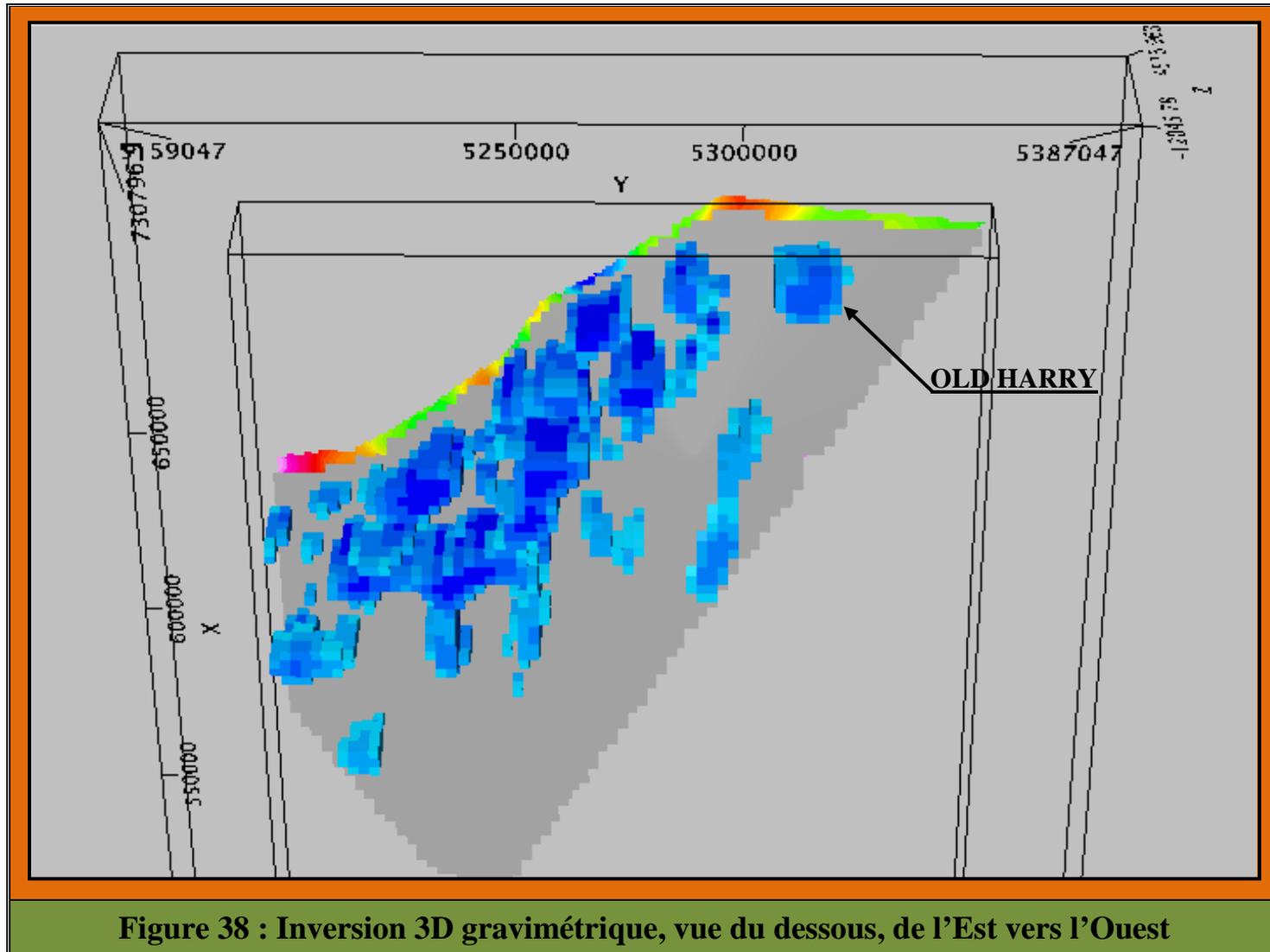
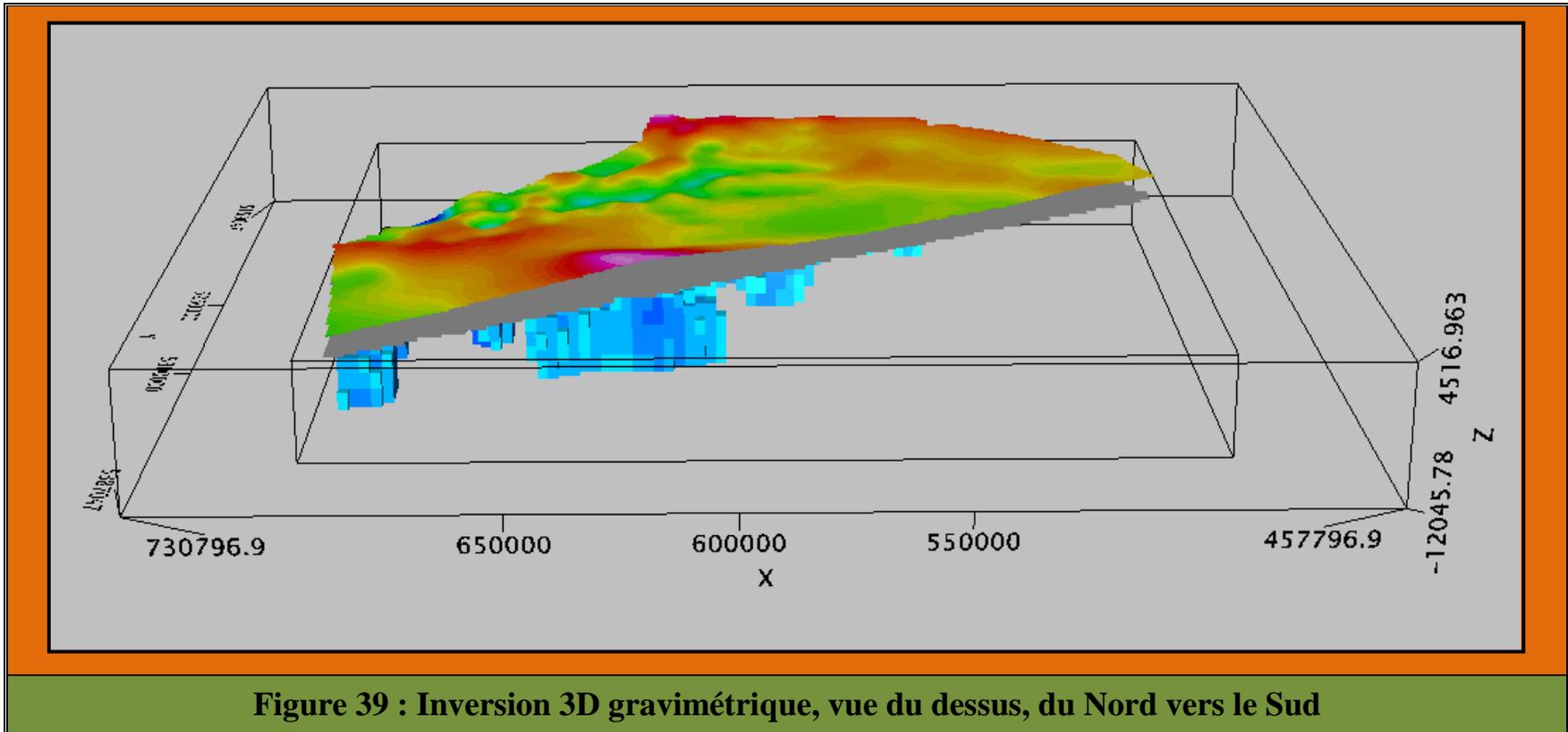


Figure 37 : Inversion 3D gravimétrique, vue du dessus, de l'Est vers l'Ouest

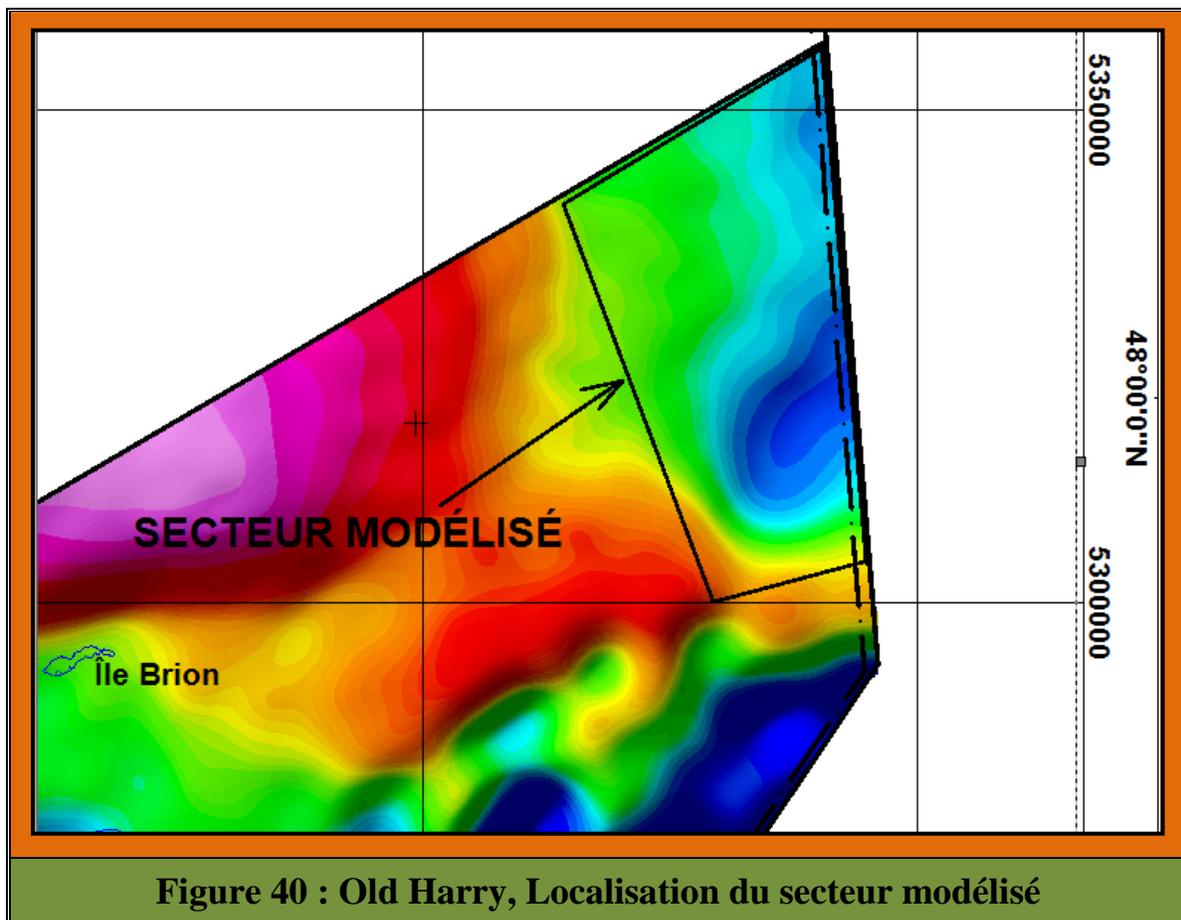


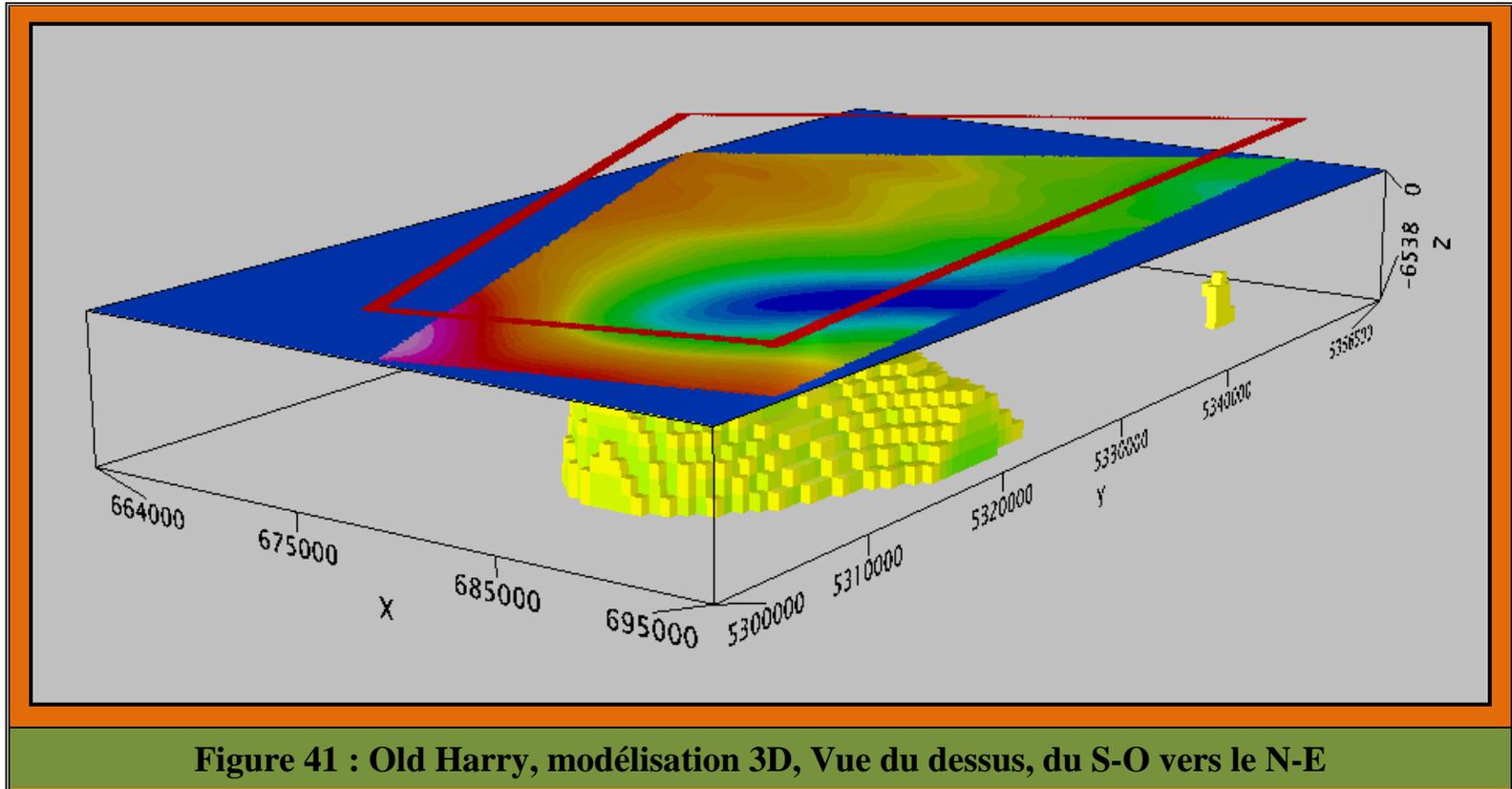


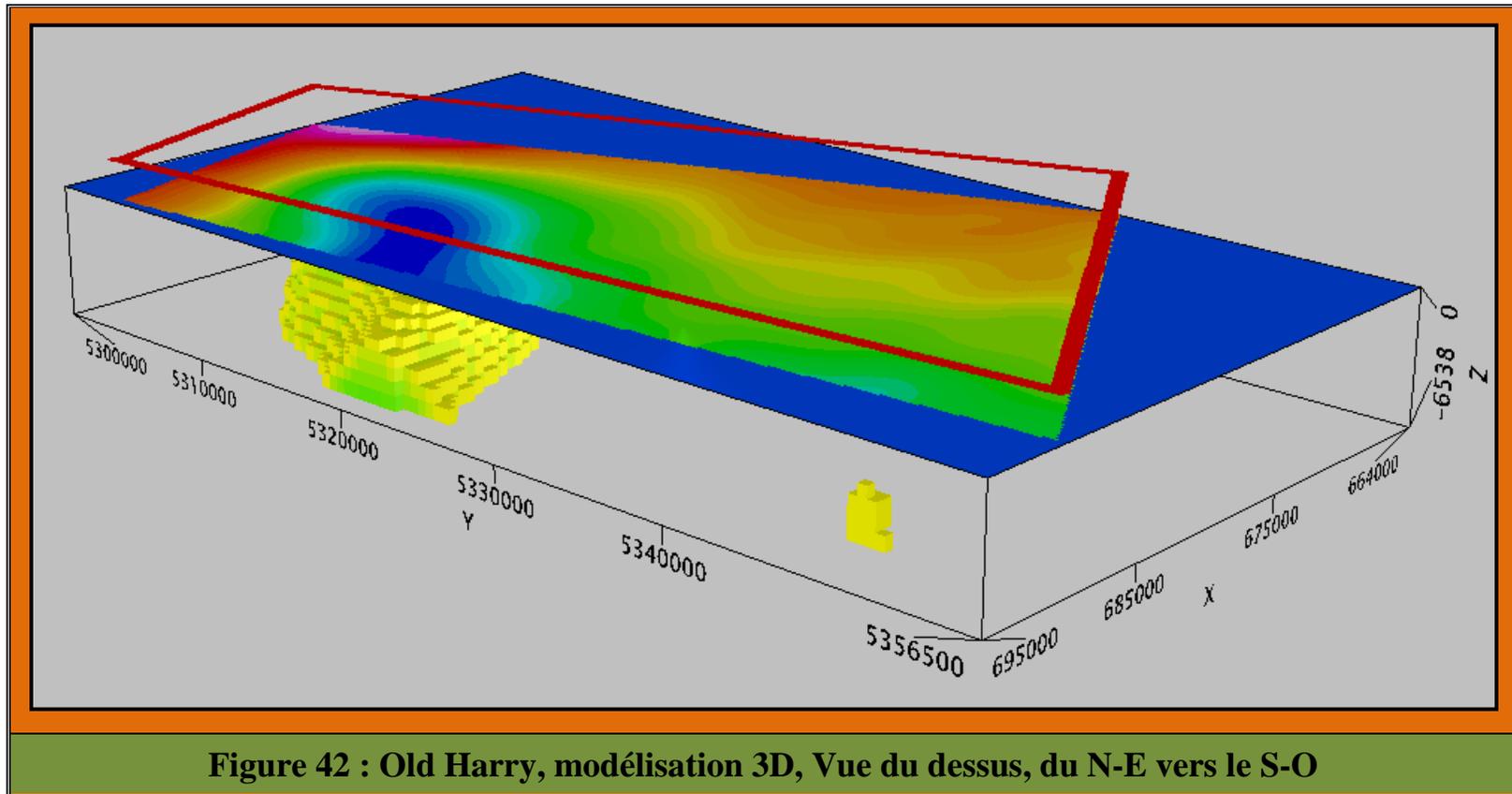
## 7.10 Modélisation 3D, Old Harry

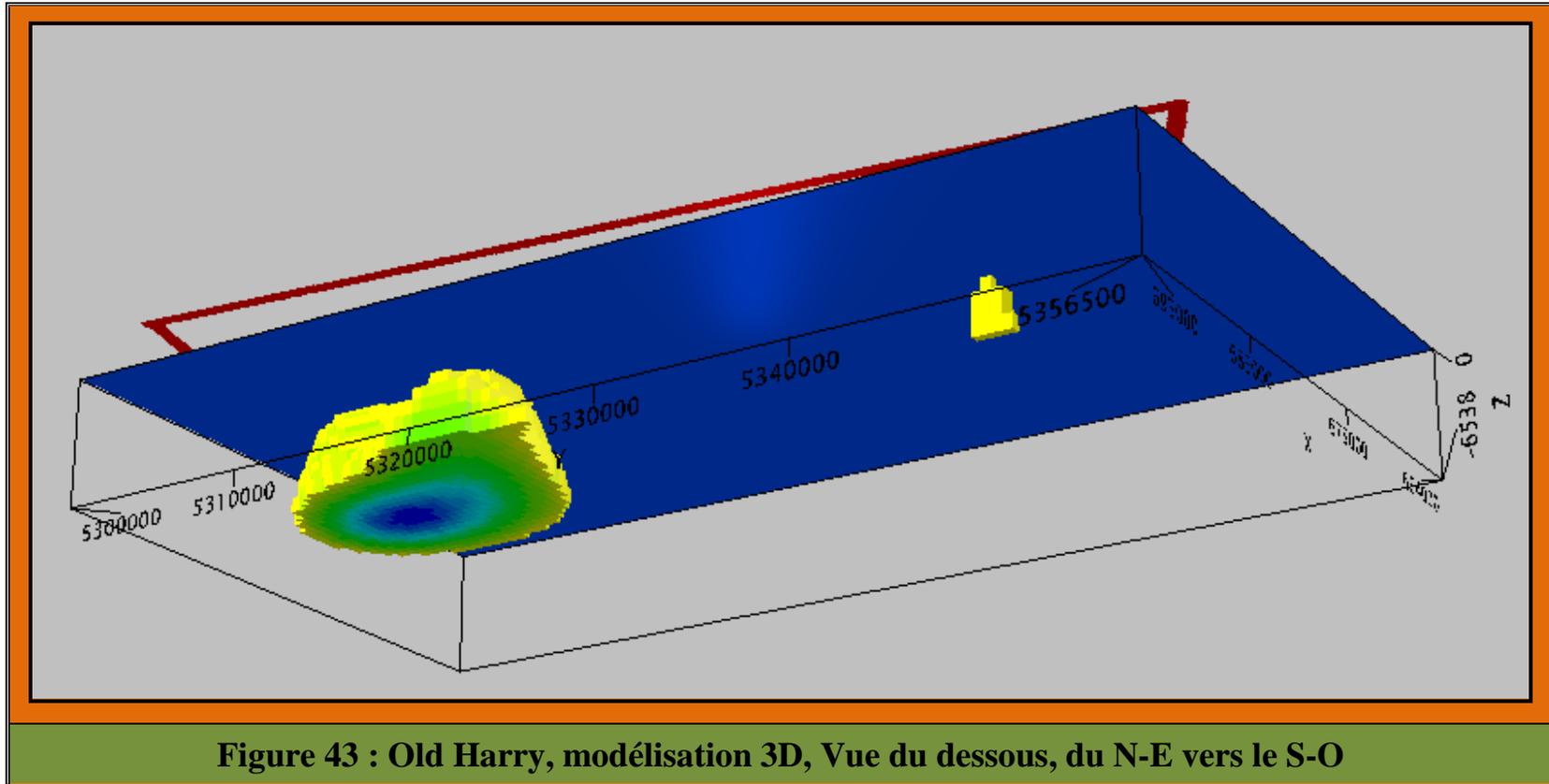
Une modélisation 3D a été réalisée sur la structure **Old Harry**. Cette structure est située à la limite Nord-Est du levé gravimétrique. Ce dernier ne la recouvre qu'en partie car environ le tiers est situé sur le territoire de Terre-Neuve-et-Labrador. Le secteur ayant fait l'objet d'une inversion est présenté à la figure 40. Les résultats obtenus sont présentés aux figures 41, 42 et 43.

La profondeur de cette structure est d'environ 1 000 m et la section qui est située au Québec fait plus de 20 km de longueur par 10 km de large. Elle est en forme d'arc de cercle et après être sortie du Québec elle semble y revenir à environ 24 km plus au Nord. Un fichier PDF (Old\_Harry.pdf) de la modélisation a été réalisé et remis au MERN. Ce fichier permet de faire tourner le modèle dans toutes les directions en plus de pouvoir agrandir un secteur jugé d'intérêt.









## 8.0 RÉSULTATS ET RECOMMANDATIONS

### 8.1 Introduction

En fonction de leurs intensités et textures magnétique bien distinctes, le secteur étudié fut divisé en quatre domaines, soient **Nord**, **Nord-Ouest**, **Nord-Est** et **Sud**.

Les **Domaines Nord**, **Nord-Ouest** et **Nord-Est** présentent un champ magnétique beaucoup plus intense que celui observé sur le **Domaine Sud**. La différence d'intensité du champ magnétique résiduel est de l'ordre de 550 nT. L'explication la plus simple, qui vient tout de suite à l'esprit, est que le développement de la colonne sédimentaire est beaucoup plus important dans le **Domaine Sud**. La démarcation entre ces domaines est si importante qu'on pourrait soupçonner la présence d'un graben. Un autre argument qui vient étayer la thèse d'un graben est que l'analyse spectrale a démontré que l'épaisseur de la colonne sédimentaire dans le **Domaine Sud** représente plus du double de celle observée dans les autres domaines.

Pour des raisons de recherche fondamentale d'une part mais aussi pour l'exploration des hydrocarbures, les grabens sont étudiés avec attention par les géologues pétroliers (exemple de la Mer du Nord). L'intérêt pour l'exploration des hydrocarbures dans le Golfe du St-Laurent en est d'autant plus renforcé.

### 8.2 Cibles proposées

#### 8.2.1 Région des dômes

Les 34 anomalies magnétiques/gravimétriques de forme arrondie cartographiées dans le **Domaine Sud** semblent nettement associées à des dômes de sel. Ce secteur immense a été surnommé par l'auteur comme étant la **Région des Dômes**. Chacune de ces anomalies pourraient constituer en soi des cibles d'intérêt pour l'exploration des hydrocarbures et la résolution du levé magnétique/gravimétrique fait que les coordonnées et l'étendue de chacune sont maintenant connues avec précision.

#### 8.2.2 Hauts magnétiques de forme indéfinie (Zone turbulente)

Pratiquement toutes les anomalies arrondies qu'on présume être produites par la présence de dômes de sel sont enclavées dans un amalgame d'anomalies magnétiques de hautes fréquence et présentant une texture particulièrement turbulente. Ces longs et larges rubans pourraient correspondre aux reliquats d'halite déformés, reliant le plus souvent entre eux plusieurs dômes de sel, créant ainsi un patron anomal désordonné, pratiquement chaotique. Ces reliquats pourraient entre autre constituer des couloirs de migration pour les hydrocarbures. Si l'on tient compte de l'analogie avec les réservoirs d'hydrocarbures exploités dans le sud de la Mer du Nord, d'après Malo et al. (2015), ces derniers sont reliés à la présence de chenaux fluviaux dans les grès de la formation de Schooner.

### 8.2.3 Plis géologique

Toujours dans le **Domaine Sud**, et à l'extrême Ouest de la **Région des Dômes**, les résultats semblent indiquer la présence d'une série de synclinaux-anticlinaux. L'un de ces anticlinaux, orienté Est-Ouest, est long de 58 km et large de 20 km. Les profondeurs obtenues par la Méthode d'Euler indiquent que sa profondeur varie de 600 à 800 mètres, sur le toit de l'anticlinal, à plus de 2000 mètres lorsqu'on s'éloigne sur ses flancs. S'ils sont confirmés par sismique ou par forage, ces résultats pourraient être d'un intérêt capital pour l'exploration des hydrocarbures. L'anomalie magnétique, en forme de cacahouète, pourrait représenter un piège gigantesque, d'autant plus que celui-ci est situé à la limite Ouest de la **Région des dômes** et que les larges rubans, dont il est question à la section 8.2.2, situés au Nord et à l'Est, pourraient avoir servi de couloirs de migration pour les hydrocarbures et alimenter cet immense anticlinal.

Quelques vieilles lignes sismiques quadrillent ce secteur et il pourrait être facile de confirmer la présence et la géométrie de l'anticlinal. Même si ces données sismiques datent de 40 ou 50 ans, il est possible d'en augmenter la résolution et la définition en les reprocessant avec des ordinateurs et des logiciels plus performants.

### 8.2.4 Structure Old Harry

Les données gravimétriques couvrant la structure **Old Harry** au Québec ont été modélisées en 3D. Sa profondeur serait d'environ 1 000 mètres et son point le plus haut (sommets du dôme) au Québec serait situé aux coordonnées suivantes :

$$X = 684\ 329 \quad Y = 5\ 314\ 644$$

Actuellement, de toutes les structures géologiques connues du Québec, c'est **Old Harry** qui présente le potentiel d'hydrocarbures le plus prometteur. Selon plusieurs sources, elle pourrait contenir des réserves récupérables d'hydrocarbures qui produiraient des quantités de gaz naturel équivalentes aux besoins actuels du Québec pendant environ 25 ans.

### 8.2.5 Structure similaire à Old Harry

La signature magnétique et gravimétrique obtenue sur la structure **Old Harry** a été retrouvée ailleurs dans la **Région des Dômes**. Par exemple, le profil B2 présente une anomalie magnétique faiblement négative associée à une nette anomalie gravimétrique elle aussi négative, comme pour **Old Harry**. De plus, ses dimensions (25 X 11 km) sont similaires à celles de **Old Harry**, elle a aussi la forme d'un chameau à 2 bosses, mais sa profondeur est plus élevée, de l'ordre de 2 000 mètres.

Ici aussi, quelques lignes sismiques ont été réalisées dans ce secteur et il est possible qu'elles aient traversé l'anomalie B2. Encore une fois, même si ces données ont été acquises il y a 40 ou 50 ans, il est possible d'en augmenter la résolution et la définition en les reprocessant avec des ordinateurs et des logiciels plus performants. L'auteur a participé à une telle étude en 2006-2007 avec des données provenant de l'Île d'Anticosti et fournies par **Hydro-Québec**. Les résultats obtenus furent plus que satisfaisants.

## 9.0 CONCLUSIONS

Ce rapport concerne l'interprétation détaillée des données géophysiques aéroportées acquises en 2010 au-dessus du golfe du Saint-Laurent, entre l'extrême Est de la Gaspésie et au-delà des Îles-de-la-Madeleine, par le **Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec**, Direction générale des hydrocarbures et des biocarburants. Il a pour objectif premier de stimuler l'intérêt des différents intervenants de l'industrie pétrolière et gazière impliqués en exploration.

Les outils qui furent utilisées lors de l'interprétation des données magnétiques et gravimétriques, qui soit dit en passant sont d'une résolution et d'une qualité sans égales sur ce territoire, sont considérés par la communauté géoscientifique internationale comme étant parmi les plus récents et les plus efficaces. Parmi ceux-ci il suffit de mentionner les différents filtres de rehaussement d'image (dérivées verticales, signal analytique, tilt magnétique, gain automatique corrigé...) ainsi que les différentes techniques d'interprétation (analyse spectrale, déconvolution d'Euler, modélisation 3D...).

Une fois réalisée, l'interprétation fut confrontée aux informations complémentaires disponibles et susceptibles de la raffiner (bathymétrie, gravimétrie terrestre et off-shore de RNC, données géologiques, forages existants). Toutefois, une étape complémentaire devra être ajoutée, celle de compléter et calibrer les résultats avec les données sismiques existantes.

Avant de clore ce rapport, il convient de préciser que plusieurs cibles de première priorité furent retenues. Il suffit de mentionner les nombreux dômes de sel, l'immense anticlinal présumé situé au sud-ouest de la **Région des Dômes**, la structure **Old Harry** et sa jumelle **B2**, ainsi que les nombreux rubans reliant entre eux plusieurs dômes et qui, par analogie avec la Mer du Nord, pourraient correspondre aux chenaux fluviaux présents dans les grès et constituant les réservoirs qui y sont exploités.

Tous ces résultats constituent en soit un argument sans équivoque pour l'intérêt que devra porté l'industrie pétrolière à l'immense territoire que constitue le golfe du Saint-Laurent.

Respectueusement soumis, ce 5 octobre, 2015.



Camille St-Hilaire, Géo. 339  
Géophysicien, M.Sc.A.

## **10.0 RÉFÉRENCES GÉNÉRALES**

Airborne Gravity 2004. Abstracts from ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop. Geoscience Australia, Australian Government. Record 2010/23. Edited by Richard Lana

Airborne Gravity 2010. Abstracts from ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop. Geoscience Australia, Australian Government. Record 2004/18. Edited by Richard Lana

Auger, D., Desilets, H., 2003. Les impacts environnementaux de l'exploration pétrolière et gzière dans le golfe du Saint-Laurent. Mémoire, UQCN.

Beausoleil, C., Malo, M., Morin, C., Lalibeté, J.Y. et Brisebois, D. 2002. Contrasting Taconian and Acadian structural styles along the new geophysical seismic reflection profiles in western Gaspé Appalachians, Matapedia Valley. Canadian Society of Petroleum Geologists, Diamond Jubilee Convention, Calgary, Program and Abstracts, p. 67.

Bêche, M., 2009. Architecture structurale de la ceinture de Gaspé (Canada): Imagerie sismique intégrée et application à l'évaluation pétrolière. Département de géologie et de génie géologique, Faculté des sciences et de génie, Université Laval.

Béland, J. 1980. Faille du Bassin Nord-Ouest et faille du Troisième Lac dans la partie est de la Gaspésie. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Rapport intérimaire DP-740, 20 p.

Berger, J. et Ramsay, E. 1993. Étude structurale et pétrologique de la région du mont de la Serpentine. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Rapport MB 93-22, 44 p.

Bhattacharya, B..K., 1966. Continuous Spectrum of Total Magnetic Field due to a Rectangular Body. Geophysics, vol.31, p.97-121.

Blakely, R.J., 1995. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University press.

Bourque, P.A., Malo, M., Kirkwood, D., 2001. Paleogeography and tectonosedimentary history at the margin of Laurentia during Silurian to Earliest Devonian time; the Gaspé Belt. Geological Society of America Bulletin. v. 112, p 4-20.

Bourque, P.A., Malo, M. et Kirkwood, D., 2001. Stratigraphy, tectono-sedimentary evolution and paleogeography of the post-Taconian - Pre-Carboniferous Gaspé Belt: an overview. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 49, No 2: 186-201.

Bourque, P.A., Savard, M., Chi, G., et Dansereau, P., 2001. Diagenetic history and porosity evolution of the Upper Silurian-Lowermost Devonian West Point reef limestones, Gaspé Belt, Québec Appalachians. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, v. 49, p. 299-326.

Briggs, I., 1974. Machine contouring using minimum curvature, Geophysics, v.39, pp.39-48.

Brisebois, D., Chev , S., Beausoleil, C. et Morin, C. 2000. Le synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé dans l'Ouest de la Gaspésie. Dans Documents synthèses couleur de l'Abitibi et de la Gaspésie, Séminaire d'information sur la recherche géologique 2000, Géologie Québec, PRO 2000-12.

Canadian Geodetic Service Model. Canadian Spatial Reference System (27 December 2007). Ressources Naturelles Canada. Earth Sciences Sector, Ottawa, ON. 24 février 2010 [http://www.geod.nrcan.gc.ca/apps/gpsh/help/model1\\_e.php](http://www.geod.nrcan.gc.ca/apps/gpsh/help/model1_e.php)

Castonguay, S., Wilson, R.A., Brisebois, D., Desrochers, A. Malo, M., 2005. Compilation géologique. Anticosti-Gaspé-Campbellton. Les ponts géologiques de l'est du Canada. Transect 4, Québec - Nouveau-Brunswick; Commission géologique du Canada, Dossier public no. 4883, échelle 1/125 000..

Chakravarthi. V., Sundararajan, N., 2004. Gravity Anomalies of 2.5-D Multiple Prismatic Structures with Variable Density: A Marquardt Inversion. Pure and Applied Geophysics. Vol. 63, no. 1. Pp. 229-242.

Cowan, D.R. et Cowan S., 1993. Separation Filtering Applied to Aeromagnetic Data. Exploration Geophysics, vol 24, 429-436.

Cook, L.A., Dehler, A.A. et Barr, S.M., 2007. Geophysical modeling of Devonian plutons in the southern Gulf of St. Lawrence: implications for Appalachian terrane boundaries in Maritime Canada. Canadian Journal of Earth Sciences, vol 44, pp 1551-1565.

Corridor Resources Inc., 2005. Le secteur énergétique du Québec. Contexte, enjeux et questionnements. Une opportunité énergétique pour le Québec. Mémoire présenté à la Commission de l'économie et du travail. 5 janvier 2005.

Cowan, D.R. Cowan S., 1993. Separation Filtering Applied to Aeromagnetic Data. Exploration Geophysics, vol 24, 429-436.

David, J., Chabot, N., Marcotte, C., Lajoie, J. et Lespérance, P.J., 1985. Stratigraphy and sedimentology of the Cabano, Pointe aux Trembles, and Lac Raymond Formations, Témiscouata and Rimouski Counties, Québec, in Current Research, Part B, Geological Survey of Canada, Paper 85-1B, p 481-497.

Dion, D.J., 2004. Nouvelles données gravimétriques dans la portion est de la Gaspésie. Ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec. DP-2004-04, Québec Exploration 2004, Résumés des conférences, p. 36.

Dion, D.J., Bélanger, J., Rioux, B., Bourque, M., and Hoffmann, E., 2005. Nouvelles données gravimétriques dans la portion est de la Gaspésie. Québec Exploration 2004, Résumés des conférences, p. 36.

- Doyon, M. et Berger, J., 1997. Distribution et contrôles structuraux des roches magmatiques siluro-dévonniennes de la Gaspésie. Ministère des Ressources Naturelles du Québec. Document ET97-01.
- Ducharme, D. 1979. Pétrographie du flysch de l'Ordovicien supérieur et du Silurien inférieur - Anticlinorium d'Aroostook-Percé, Gaspésie, Québec: Mémoire de M.Sc., Université de Montréal, Montréal.
- Durling, P.W. and Marillier, F., 1990. Structural trends and basement rock subdivisions in the western Gulf of St. Lawrence, northern Appalachians. Geological Survey of Canada, Atlantic Geoscience Centre.
- Durling, P.W. and Marillier, F., 1994. Tectonic setting of Middle Devonian to Lower Carboniferous rocks in the Magdalen Basin. Geological Survey of Canada, Atlantic Geoscience Centre.
- Gallardo, L.A., Meju, A.M., Pérez-Flores, M.A., 2005. A quadratic programming approach for joint image reconstruction: mathematical and geophysical examples. 2005 *Inverse Problems* 21 435
- Giles, P.S. and Utting, J., 2001. Shell-Amoco Cap Rouge F-52, Gulf of St. Lawrence, eastern Canada. Geological Survey of Canada, Open File 3204.
- Genivar Inc., 2013. Évaluation environnementale stratégique sur la mise en valeur des hydrocarbures dans les bassins d'Anticosti, de Madeleine et de la Baie des Chaleurs; Bilan de l'approche participative. Septembre 2013. 091-51078-00.  
[http://www.mern.gouv.qc.ca/publications/energie/ees/EES2\\_Bilan\\_approche\\_participative.pdf](http://www.mern.gouv.qc.ca/publications/energie/ees/EES2_Bilan_approche_participative.pdf)
- Giles, P.S., 2008. Windsor Group (Late Mississippian) stratigraphy, Magdalen Islands, Québec : a rare eastern Canadian record of late Visean basaltic volcanism. *Natural Resources Canada, Geological Survey of Canada, Atlantic Geology, Vol., 44; 2008.*
- Goodacre, A.K., 1996. Some Basic Concepts in Gravity Interpretation. In *Interpretation of Gravity and Magnetic Anomalies for Non-Specialists*. Geological Survey of Canada.
- Green, A., and Lane, R., 2003. Estimating Noise Levels in AEM Data. Extended Abstract, ASEG 16th Geophysical Conference and Exhibition, February 2003, Adelaide.
- Hall, E.L., 1979. *Computer Image Processing and Recognition*: Academic press, Toronto.
- Hamel, J-F., Mercier, A., 2000. *Le Saint-Laurent: beautés sauvages du grand fleuve*. Environnement Canada. Les Éditions de l'homme.
- Hesse, R. et Dalton, E., 1989. The Devonian Fortin Formation, in Bourque, P.-A., Hesse, R. and Rust, B., eds., *Sedimentology, paleoenvironments and paleogeography of the Taconian to Acadian rock sequence of Gaspe Peninsula*: Geological Association of Canada, Annual Meeting, Montréal, Guidebook to fieldtrip B8, p. 57-70.

Hesse, R. et Dalton, E., 1995. Turbidite channel/overbank deposition in a Lower Devonian orogenic shale basin, Fortin Group of Gaspe Peninsula, Northern Appalachians and Canada. *Journal of Sedimentary Research*, v. B65, p. 44-60.

Kern, G., 1992. Interprétation des structures salifères : difficultés et progrès. (Cas pétroliers des Pays-Bas). *Petroleum exploration in The Netherlands; 1992*, vol. 161, pp. 103-117.

Kirkwood, D. 1993. Étude qualitative et quantitative de la déformation acadienne du bassin siluro-dévonien de la péninsule gaspésienne, Appalaches du nord. Thèse de Ph.D., Université Laval, Québec, 178 p.

Kirkwood, D. et Malo, M. 1993. Across strike geometry of the Grand Pabos fault zone: evidence for Devonian dextral transpression in the Québec Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 30, p. 1363-1373.

Kirkwood, D., Malo, M., St-Julien, P. et Therrien, P. 1995. Vertical and fold-axis parallel extension within a slate belt in a transpressive setting, Northern Appalachians. *Journal of Structural Geology*, v. 17, p. 329-343.

Kirkwood, D., Lavoie, M., Desaulniers, E., Malo, m., Beausoleil, C., Morin, C., Laliberté, J-Y., 2003. Nouveau modèle tectonique pour la ceinture de Gaspé. *Québec Exploration 2003*.

Kirkwood, D., Lavoie, M. et Marcil, J.S. 2004. Structural style and hydrocarbon potential in the Acadian foreland thrust and fold belt, Gaspe Appalachians, Canada. In Swennen, R., Roure, F. et Granath, J.W. (éds.), *Deformation, fluid flow and reservoir appraisal in foreland fold and thrust belts*. AAPG Hedberg Series, no. 1, pp. 412-430.

LaFehr, T.R, 1991. Standardization in gravity reduction. *Geophysics*, vol. 56, no. 8, p. 1170-1178.

Lavoie D., Bourque, P.-A., 2001. The history of hydrocarbon exploration in the Silurian-Devonian Gaspé Belt: 100 years of modest success. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, v. 49, p. 180-185.

Leblanc, G.E et Morris, W.A., 1999. Aeromagnetics of Southern Alberta within areas of hydrocarbon accumulation. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*. Vol. 47, no 4, pp 439-454.

Lespérance, P.J. et Greiner, H.R., 1969. Squateck-Cabano area. Ministère des Ressources naturelles, Québec, Rap. Géol. 128, 122 p.

Lespérance, P.J., 1980. Calcaires Supérieurs de Gaspé. Les aires-types et le prolongement vers l'ouest: Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, DPV-595, 92 p.

Lespérance, P.J. et Greiner, H.R., 1969. Squateck-Cabano area. Ministère des Ressources naturelles, Québec, Rap. Géol. 128, 122 p.

- MacLeod, I., 2012. VOXI - A Cloud Approach to Earth Modelling for Exploration. Presentation at the Geophysical Technical Session, PDAC, Toronto.
- Malo, M., 1988. Stratigraphy of the Aroostook-Percé anticlinorium in the Gaspé Peninsula, Québec: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 25, p. 893-908.
- Malo, M. et Béland, J. 1989. Acadian strike-slip tectonics in the Gaspé region, Québec Appalachians. Canadian Journal of Earth Sciences, v. 26, p. 1764-1777.
- Malo, M. et Bourque, P.-A., 1993. Timing of the deformation events from Late Ordovician to Mid-Devonian in the Gaspé Peninsula. In: Roy, D. et Skehan, S.J. (éds), The Acadian Orogeny: Recent Studies in New England, Maritime Canada, and the Autochthonous Foreland. Geological Society of America Special Paper 275, p. 101-122.
- Malo, M. et Pelchat, C., 1994. Géologie et gîtologie de l'indice de Patapédia no. 1 (Gîte de Mid-Patapédia), canto de Patapédia, Gaspésie. Ministère des Ressources Naturelles du Québec. Document M B94-35.
- Malo, M. et Kirkwood, D. 1995. Faulting and progressive strain history of the Gaspé Peninsula in post-Taconian time: A review. In J.P. Hibbard, C.R. van Staal and P.A. Cawood (eds), Current Perspectives in the Appalachian- Caledonian Orogen. Geological Association of Canada, Special Volume 41, pp. 267-282.
- Malo, M., Tremblay, A., Kirkwood, D. et Cousineau, P. 1995. Along-strike structural variations in the Quebec Appalachians: consequence of a collision along an irregular margin. Tectonics, v. 14, p. 1327-1338.
- Malo, M., Comeau, F-A., et Séjourné, S., 2015. Établissement des bassins géologiques analogues aux structures géologiques en Gaspésie, dans le Bas-Saint-Laurent et dans le golfe du Saint-Laurent. Rapport GTEC01 de l'Institut national de la recherche scientifique du Québec.
- Milligan, P.R. and Gunn, P.J., 1997 Enhancement and presentation of airborne geophysical data. Journal of Australian Geology and Geophysics 17(2), pp 63-75.
- Morales, R., 2004. Anomalías Magnéticas Superficiales en Exploración de Hidrocarburos. Total E&P Bolivia.
- Morin, C. et Laliberté, J.Y. 2001. Une nouvelle image structurale: résultats des mégatranssects de la sismique réflexion à travers la ceinture appalachienne de la péninsule gaspésienne. Ministère des Ressources naturelles du Québec, CIM.
- Morin, C. et Laliberté, J.-Y. 2001. Levé géophysique de sismique réflexion, Val-Brillant, partie ouest de la péninsule de la Gaspésie. Minespace 2001 Québec, 103e réunion annuelle - ICM, Programme.

Morin, C., Laliberté, J.-Y., Deschênes, D., et Lévesque, L., 2001. Levé géophysique de sismique réflexion, Val-Brillant: Sismostratigraphie, Structures géologiques, failles majeures Shickshock – Causapscal – Ste-Florence (données brutes)

Morin, C. et Laliberté, J.-Y. 2002. The Unexpected Silurian-Devonian Structural Style in Western Gaspe. New Insight for Promising Hydrocarbon Plays. CSPG June 2002, Calgary, Alberta.

Nalpas, T., 1994. Inversion des grabens du Sud de la Mer du Nord. Données de sub-surface et modélisation analogique. Thèse, Université de Rennes, 245 p., 110 fig.

Norman, C., 1993. New developments in the Aeromagnetic Technique for Sedimentary Basin Evaluation. ASEG Preview, February 1993.

Pawlowski, R., 1998. Integration of Gravity and Magnetic Methods in the Risk-weighted Exploration Process: Basin Reconnaissance. In Geologic Applications of Gravity and Magnetic: Case Histories. SEG Geophysical References Series No.8. AAPG Studies in Geology No. 43. Edited Gibson, R.I. and Millegan, P.S.

Peters, L., 1949. The direct Approach to Magnetic Interpretation and its Practical Application. Geophysics, vol.14, p. 290-320.

Pilkington, M. et Keating, P., 1991. Recent advances in interpretation techniques for magnetic and gravity anomalies. In Interpretation of Gravity and Magnetic Anomalies for Non-Specialists. Note for Canadian Geophysical Union Short Course, January 23 and 24, 1991. Geological Survey of Canada.

Pinet, N., Lavoie, D., Brouillette, P., Dion, D.J., Keating, P., Brisebois, D., Malo, M., Castonguay, S., 2005. Gravity and aeromagnetic atlas of the Gaspé Peninsula. Geological Survey of Canada, Open File 5020, 68 p.

Powell, M.J.D., 1965. A method for minimizing a sum of squares of non-linear functions without calculating derivatives. Computer Journal, vol. 7. p. 303-307.

Prieto, C., 1998. Gulf of Mexico Continental Slope – Undertaking the Magnetic Response Due to the Salt Intrusion. Article paru dans Geologic Applications of Gravity and Magnetics: Case Histories.

Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologist, 1998. No. 43. Edited Gibson, R.I. and Millegan, P.S.

Rasmussen, R. and Pederson, L.B., 1979. End corrections in potential field modelling. Geophysical Prospecting, vol. 27, no. 4, p. 749-760.

Reford, M.S., 1964. Magnetic anomalies over thin sheets, Geophysics vol. 29, p. 532-536.

Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millet, A.J. and Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, vol.55, p. 88-91

Riddihough, R., 1996. What Gravity and Magnetic Data Can do for you. In *Interpretation of Gravity and Magnetic Anomalies for Non-Specialists*. Geological Survey of Canada.

Ressources Naturelles Canada. Données gravimétriques de l'anomalie de Bouguer et de son Gradient vertical. <http://gdr.agg.nrcan.gc.ca/gdrdap/dap/search-fra.php>

Roest, R.R., Verhoef, J., Pilkington, M., 1992. Magnetic Interpretation Using the 3-D Analytic Signal. *Geophysics*, vol. 57, no.1, p. 116-125.

Rossignol, A., 1998. L'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent: Carnet d'océanographie. Institut national de la recherche scientifique- Océanologie.

Roy, S. 2008. Maturation thermique et potentiel pétrologène de la Ceinture de Gaspé, Gaspésie, Québec, Canada. Thèse de Ph.D., INRS-ETE, Université du Québec.

Sacks, P. E., Malo, M., Trzcienski, W. E., Jr., Pincivy, A. et Gosselin P. 2004. Taconian and Acadian transpression between the internal Humber zone and the Gaspé Belt in the Gaspé Peninsula: tectonic history of the Shickshock Sud fault zone. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 41, p. 635-653.

Shuey, R.T. and Pasquale, A.S., 1973. End correction in magnetic profile interpretation. *Geophysics*, vol. 38, no. 3, p. 507-512.

Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologist, 1998. *Geologic Applications of Gravity and Magnetic: Case Histories*. SEG Geophysical References Series No.8. AAPG Studies in Geology No. 43. Edited Gibson, R.I. and Millegan, P.S.

Spector, A., 1968. Spectral Analysis of Aeromagnetic Data, Ph.D. Thesis. University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada.

Spector, A. and Grant, F.S., 1970. Statistical Methods for Interpreting Aeromagnetic Data, *Geophysics*, vol.35, p. 293-302.

St-Laurent, C., Lebel, D., Lavoie, D., Malo, M., St-Hilaire, C., 2003. Integration and Spatial Analysis of High-Resolution Geophysical and Geological Data, Eastern Gaspé Peninsula. Geological Survey of Canada Contribution 2003043.

Talwani, M. and Heirtzler, J.R., 1964. Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional structures of arbitrary shape. In "Computers in the Mineral Industries, part 1", Stanford University Publications Geological Sciences, vol. 9, p. 464-480.

Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1995. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.

Thériault, R., Laliberté, J-Y, 2006. Perspectives et concepts d'exploration en hydrocarbures au Québec. Un horizon de découvertes. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Direction générale du développement des hydrocarbures. Présentation à Québec Explo 2006.

Thompson, D.T., 1982. A new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data, *Geophysics*, vol.47, p.31-37.

Trudel, C. et Malo, M. 1993. Analyse des contraintes par méthodes graphiques dans une zone de coulissage: exemple de la région de Matapédia, Gaspésie, Appalaches du Québec. *Revue Canadienne des Sciences de la Terre*, v. 30, p. 591-602.

Turmel, A., 2011. Pétrole et gaz dans le golfe du Saint-Laurent : de l'exploration à la production. *Bulletin du groupe Énergie*. Fasken-Martineau, 17 août 2011.

William, H., 1979. Appalachian Orogen in Canada. *Revue canadienne des sciences de la Terre*; volume 16, pages 688-693.

## **ANNEXE A**

# **DESCRIPTION DE LA TECHNIQUE MAGNÉTIQUE**

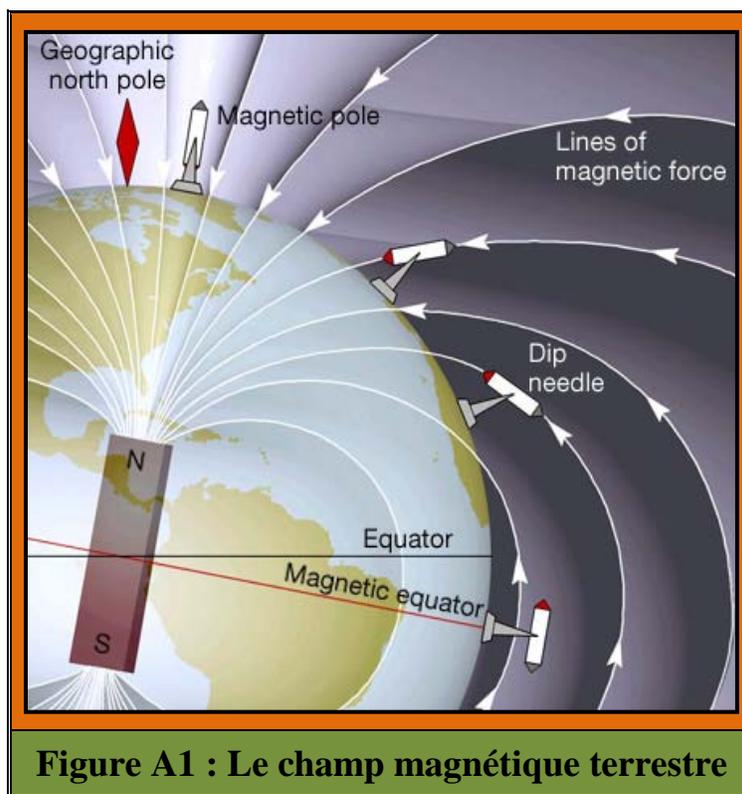
# PRÉSENTATION DE LA TECHNIQUE MAGNÉTIQUE

## A1 INTRODUCTION

Cette technique géophysique est utilisée au sol depuis plus de 70 ans et est appliquée par avion ou hélicoptère depuis près de 55 ans. Elle a contribué à la découverte de nombreuses mines et dépôts d'hydrocarbures exploités un peu partout à travers le monde.

Le champ magnétique terrestre peut être comparé à un barreau aimanté situé en son centre et orienté suivant l'axe des pôles magnétiques (figure A1). Cet aimant génère un champ magnétique dipolaire qui joue le rôle d'un champ magnétique inducteur.

La technique magnétique, qui fait intervenir la mesure de ce champ magnétique naturel, est basée sur l'existence de contrastes de susceptibilité magnétique dans l'écorce terrestre. La susceptibilité magnétique est la propriété qu'ont certains matériaux à devenir aimantés en présence d'un champ magnétique externe et ainsi à créer un champ magnétique induit.



La plupart des minéraux ont une susceptibilité magnétique très faible, ou même nulle, sauf la magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) et quelques minéraux moins abondants (ilménite, hématite, pyrrhotite, franklinite, chromite, arsénopyrite, limonite, pyrite). Heureusement, la magnétite est présente dans presque toutes les roches en quantité plus ou moins grande, et une fraction de 1% seulement est détectable. De plus, la teneur en magnétite a tendance à être à peu près constante dans une même formation, quoiqu'elle puisse varier d'une formation de même type de roche à une autre.

Suite à un levé aéromagnétique, les données recueillies sont d'abord nivelées et corrigées de certains effets indésirables et perturbateurs (dérive diurne, bruit instrumental, hauteur de vol variable, bruit tellurique). Le champ magnétique normal (composante dipolaire), dont la valeur est fonction de la latitude, longitude et altitude du point de mesure, est par la suite soustrait et on obtient ce que l'on appelle alors le **champ magnétique résiduel**. Les variations du champ résiduel constituent l'ensemble des anomalies qui reflètent essentiellement la distribution des minéraux ferromagnétiques dans les différentes formations géologiques. Il est alors possible de réaliser une interprétation soit qualitative (identification des contacts géologiques, failles, plis, section A4) ou soit quantitative des données (calcul de la profondeur et des dimensions des différentes sources magnétiques décelées, section A5).

## A2 APPLICATION DE FILTRES DE REHAUSSEMENT D'IMAGE

Après l'obtention des données du champ magnétique résiduel **T**, il est possible de calculer numériquement, à l'aide d'un algorithme mathématique, les **première** et **seconde dérivées verticales** ( $dT/dz$  et  $d^2T/dz^2$ ) et **horizontales** ( $dT/dx$  et  $dT/dy$ ). La première dérivée verticale est souvent désignée par le **gradient vertical** du champ magnétique.

Le calcul des **dérivées première** et **seconde verticales** permet de réduire la contribution provenant des grandes longueurs d'onde (unités géologiques régionales et plus profondes) et améliore considérablement la résolution des anomalies plus faibles, rapprochées ou superposées situées plus près de la surface. D'autre part, la **dérivée horizontale** permet d'identifier plus facilement les failles et contacts géologiques (Blakely, 1995).

À l'aide d'un autre filtre numérique il est possible aussi de calculer ce que l'on désigne comme étant le **Signal Analytique**. On définit l'amplitude du signal analytique par l'expression:

$$|A(x,y)| = \left[ \left( \frac{dT}{dx} \right)^2 + \left( \frac{dT}{dy} \right)^2 + \left( \frac{dT}{dz} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Le Signal Analytique est donc la somme des gradients vertical et horizontal du champ magnétique résiduel. Ses propriétés sont assez exceptionnelles. Pour un contact géologique nous savons que:

- la courbe anormale est symétrique
- Sa forme est indépendante des vecteurs de magnétisation et d'induction
- Le maximum indique l'arête du contact
- La profondeur est fonction de la largeur de l'anomalie à la demi-amplitude
  - Profondeur d'un contact:  $x^{1/2} = 3.46 h$
  - Profondeur d'un feuillet mince:  $x^{1/2} = 2 h$
  - Profondeur d'un cylindre horizontal:  $x^{1/2} = 1.53 h$

Où  $x^{1/2}$  est la largeur de l'anomalie à la demi-amplitude et  $h$  est la profondeur du corps.

Un autre algorithme mathématique permet aussi de transformer les données mesurées comme si la zone étudiée était située au pôle magnétique (**Réduction au Pôle**). Le champ inducteur est alors vertical et l'interprétation des anomalies est grandement facilitée.

D'autres filtres furent utilisés ici dont le **Gain Automatique Corrigé**, le **Tilt du Champ Magnétique** et les **Relief Ombragé** du Champ Total et du Gradient Vertical.

### A3 LA PROSPECTION MAGNÉTIQUE

La prospection magnétique consiste à localiser et cartographier les différentes unités géologiques, gisements potentiels, pièges à hydrocarbures..., en se servant des variations locales qu'ils produisent dans le champ magnétique terrestre. La carte du champ magnétique résiduel réduit au pôle ainsi que toutes les autres cartes obtenues à partir des filtres présentés précédemment, représentent alors des images à haute résolution des propriétés magnétiques des différentes unités et structures géologiques présentes, servant ainsi de guide au géologue dans ses travaux de cartographie géologique et structurale.

Même si la présence de minéraux magnétiques est facilement détectable par le magnétomètre, il est généralement impossible d'évaluer les possibilités économiques d'un gisement en se basant sur les données magnétiques seules. La magnétite a une susceptibilité de beaucoup supérieure aux autres matériaux ferriques et les cartes magnétiques reflètent surtout sa concentration. Ainsi, une faible quantité de magnétite dans une roche non-magnétique peut donner une anomalie magnétique beaucoup plus importante qu'un dépôt.

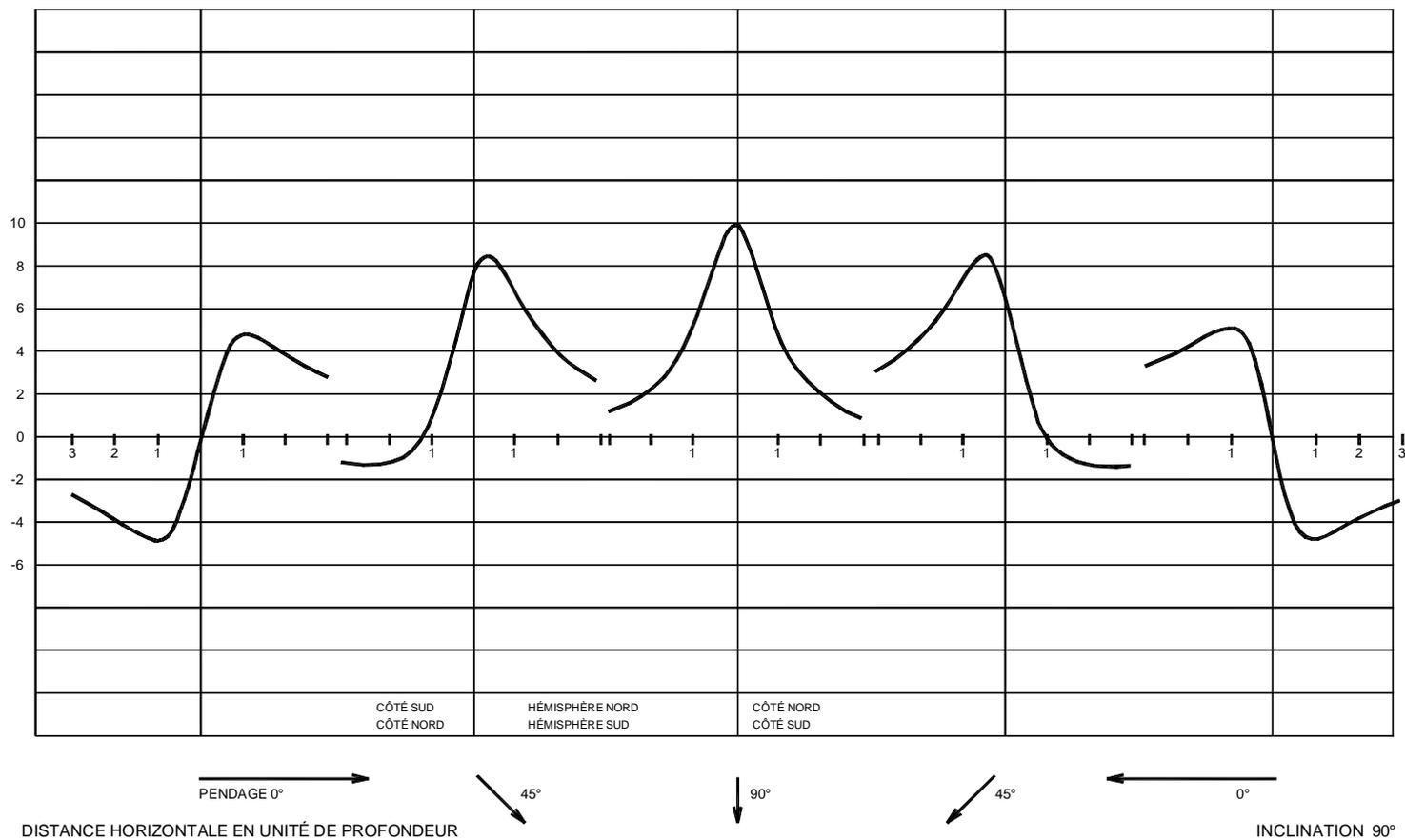
### A4 INTERPRÉTATION QUALITATIVE

Une anomalie magnétique peut être produite par un changement lithologique, une variation d'épaisseur dans une unité magnétique, une faille, un pli et le relief topographique.

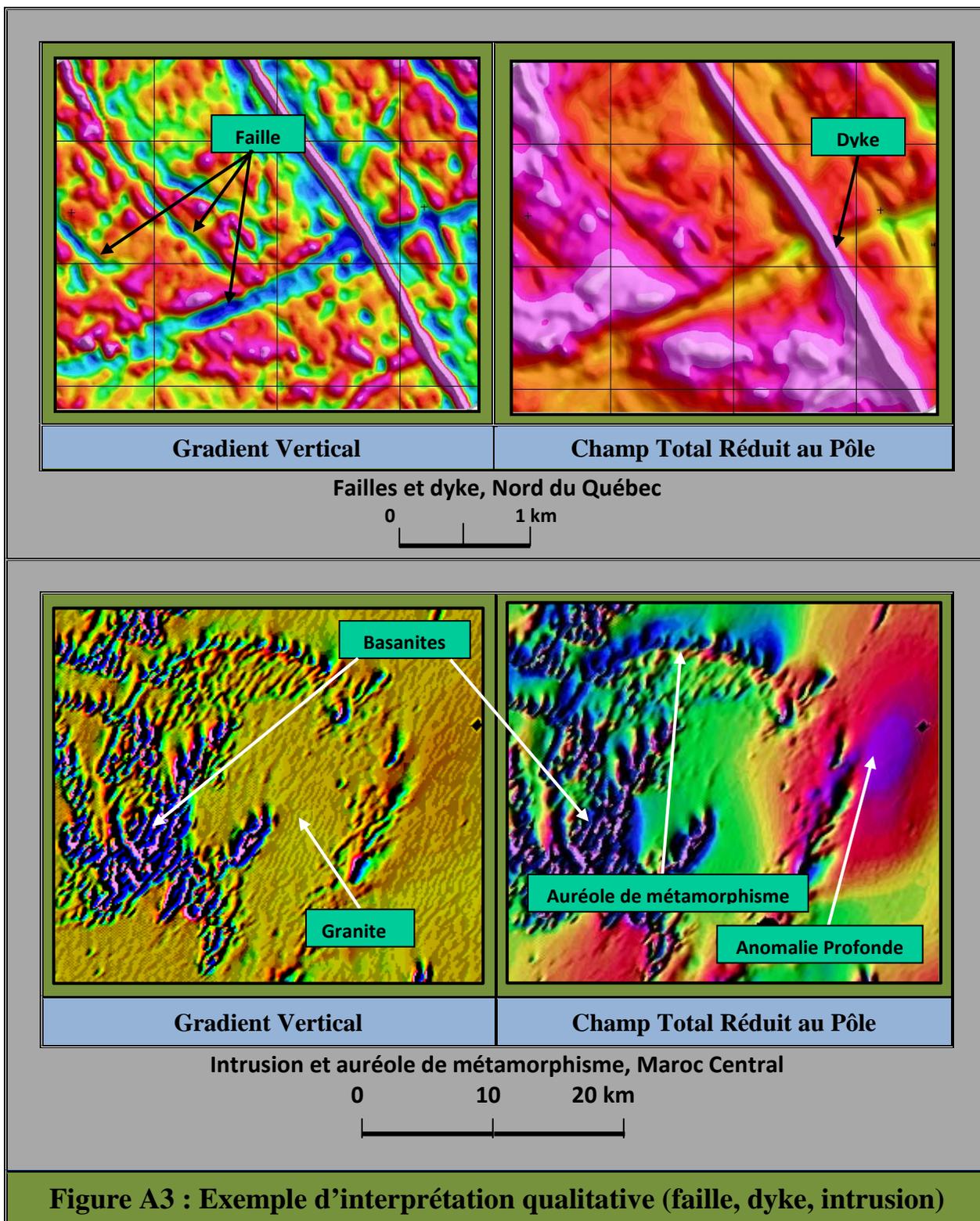
En général, plus une roche est basique et plus sa teneur en magnétite (et donc sa susceptibilité) est élevée. Par exemple, les gabbros et les roches ultrabasiques sont généralement plus magnétiques qu'un granite. Toutefois, la gamme de valeurs possibles de susceptibilité d'une roche donnée est relativement large et recouvre les valeurs d'autres types de roches. Il est donc impossible d'identifier avec certitude une roche en se basant seulement sur sa susceptibilité.

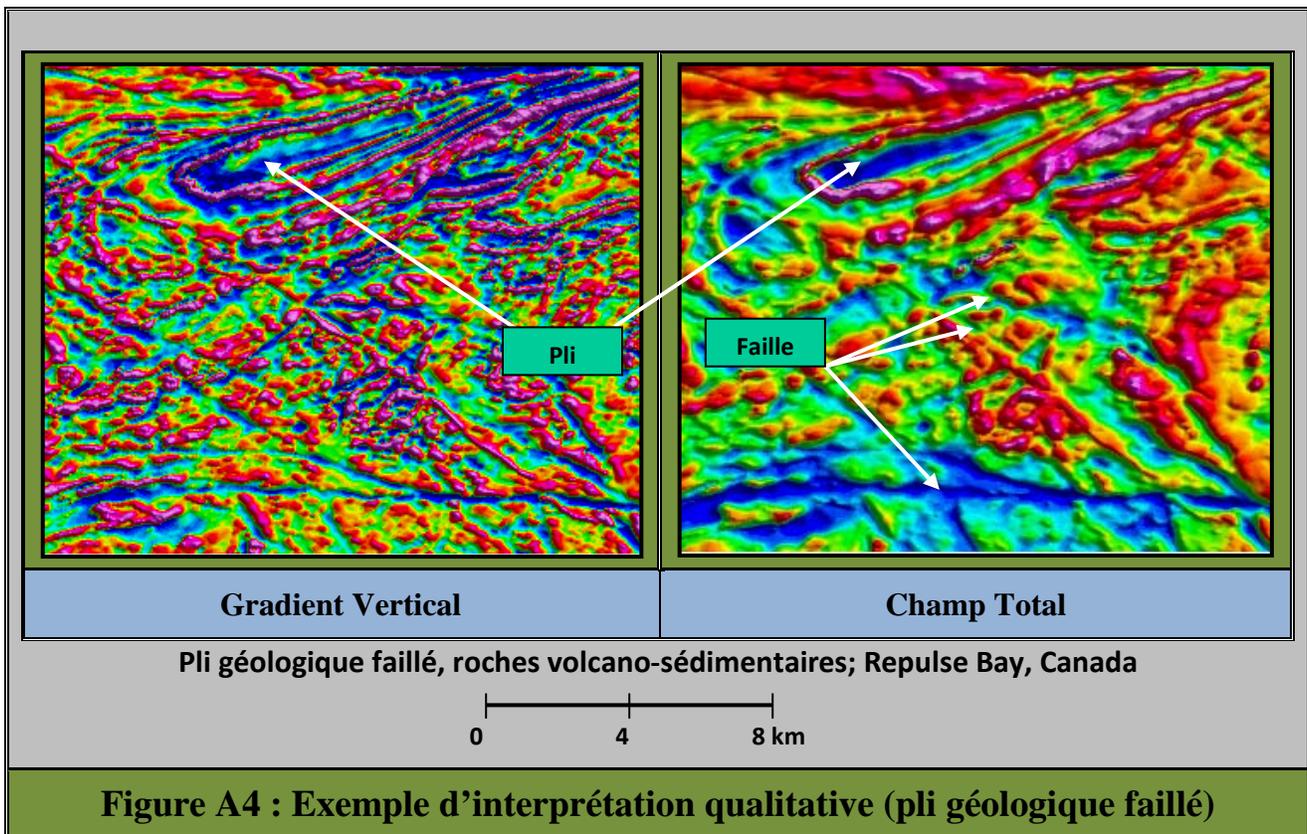
Pour une source magnétique, l'inclinaison du champ magnétique local, l'orientation et le pendage de la source, influencent la forme de l'anomalie magnétique obtenue. Le géophysicien doit donc tenir compte de ce phénomène lors de l'interprétation des données. La figure A2 (Reford, 1964) illustre les changements de forme d'une anomalie magnétique réduite au pôle (produite par un dyke mince infini) en fonction de son pendage. Étant donné que l'anomalie est réduite au pôle, l'inclinaison et la déclinaison du champ magnétique local, ainsi que l'orientation du dyke, n'ont plus d'influence sur la forme de l'anomalie. Cette forme ne dépend plus que du pendage du dyke, ce qui facilite grandement le travail d'interprétation du géophysicien. Ce phénomène nous incite donc à appliquer systématiquement une **Réduction au Pôle** à tout levé magnétique avant d'en entreprendre l'interprétation.

Les figures A3 et A4 présentent des exemples illustrant les différentes signatures magnétiques de quelques formations et structures géologiques.



**Figure A2 : Patron anomal d'un dyke mince infini réduit au pôle**

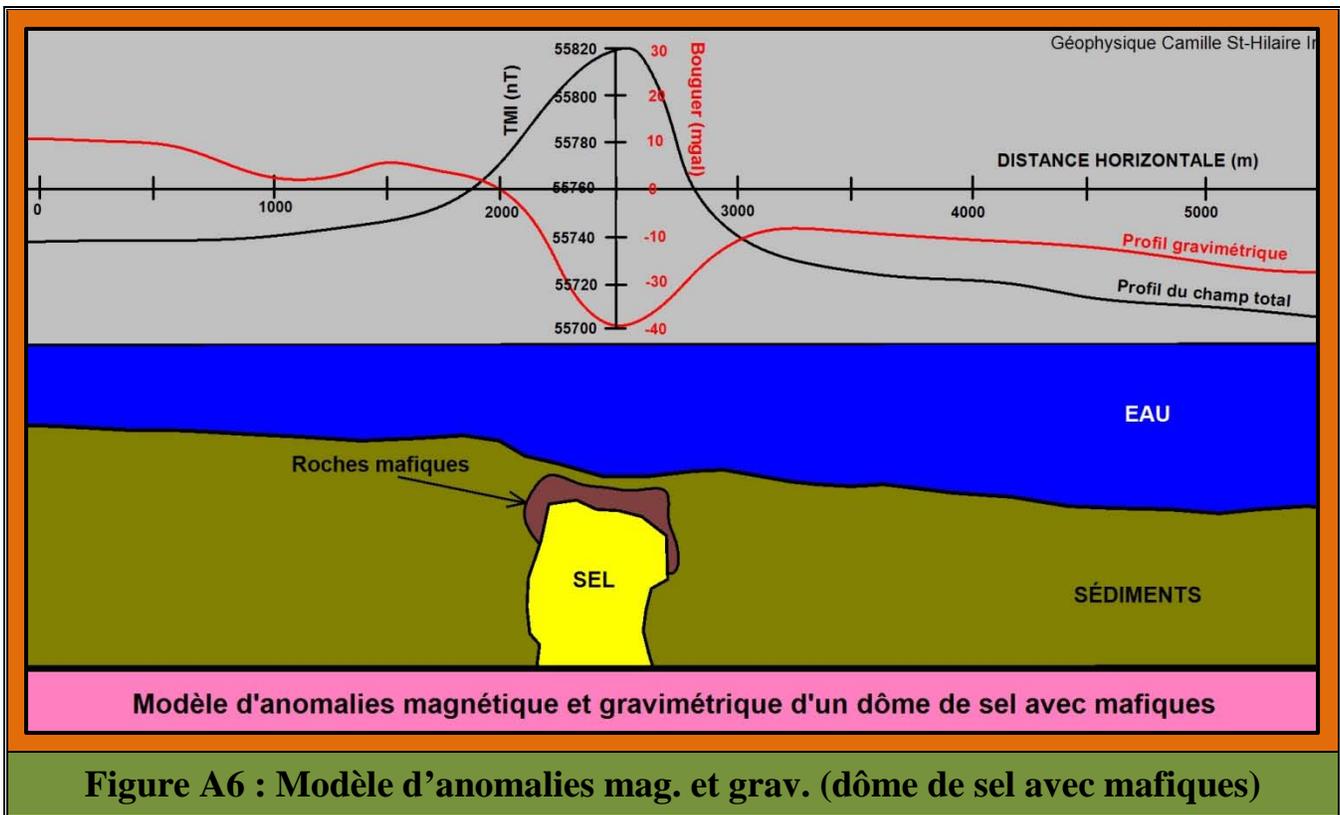
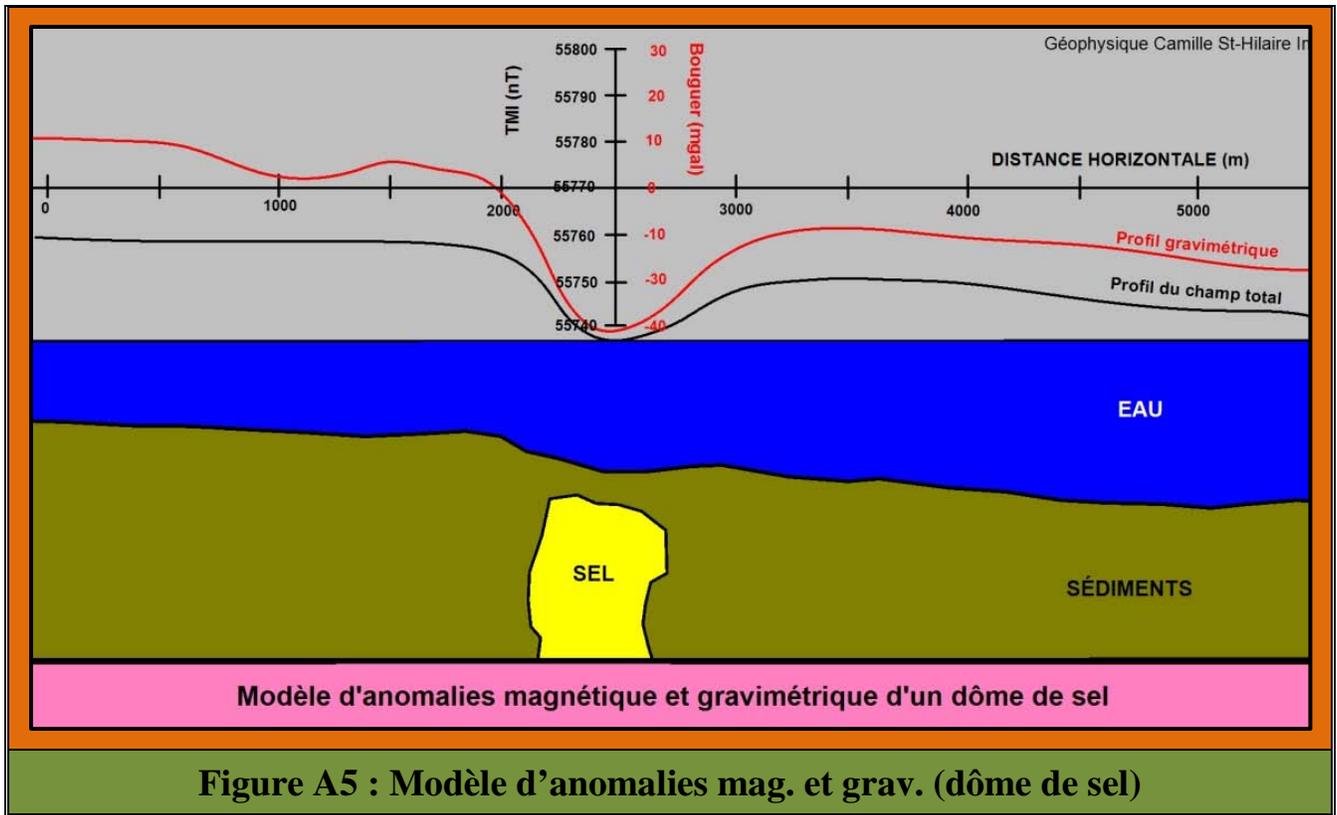




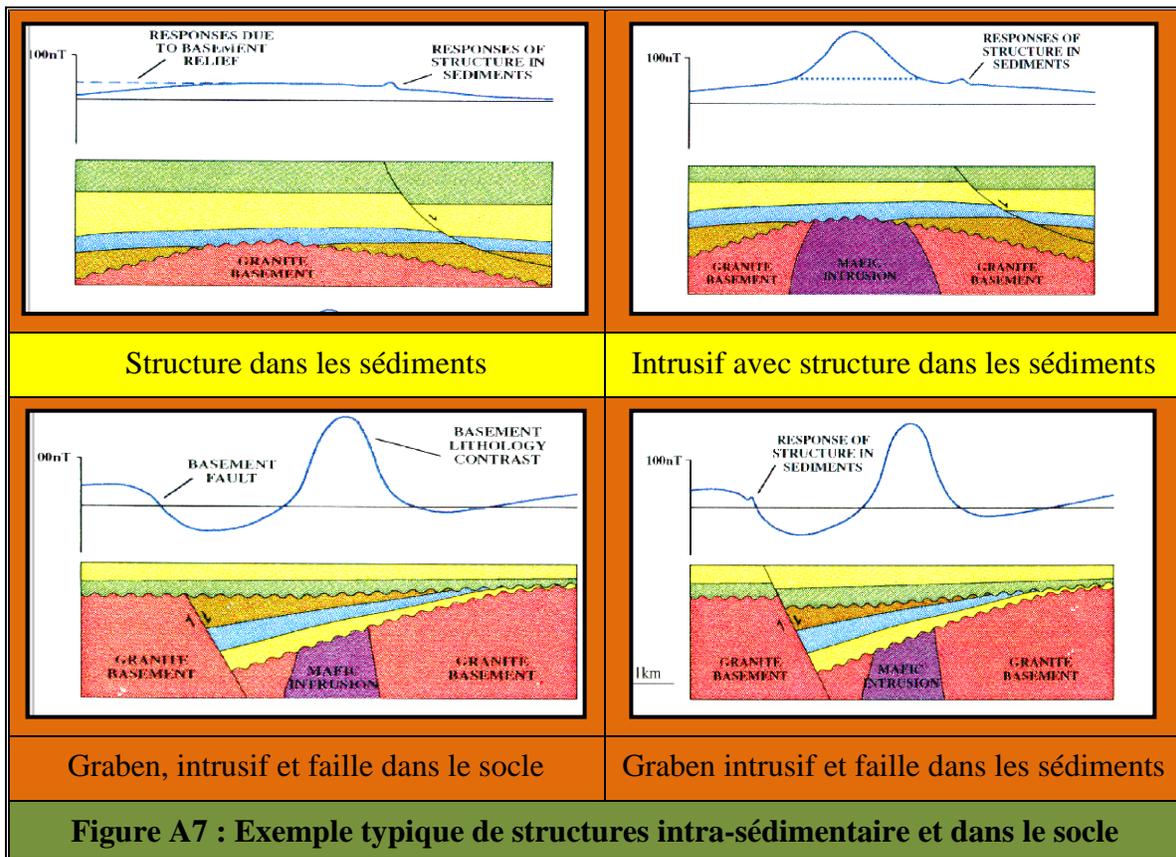
### Exemple : Modèle du Dôme de Sel

Le sel présente des propriétés diamagnétiques (Nettleton, 1976) avec une susceptibilité négative ( $k$ ) moyenne de  $-0.8 \times 10^{-6}$  en unités cgs. Par comparaison, dans le cas de formations sédimentaires, nous aurions par exemple pour un shale et un grès des susceptibilités respectives de  $50 \times 10^{-6}$  et  $35 \times 10^{-6}$  (Prieto, 1998). C'est donc dire qu'un dôme de sel traversant ces formations sédimentaires devrait produire une très nette anomalie magnétique négative. La figure A5 illustre bien cette situation où nous avons aussi ajouté l'anomalie gravimétrique équivalente. Étant donné que le sel présente une densité inférieure aux sédiments, nous obtenons aussi une anomalie négative.

La présence d'un chapeau de roches volcaniques mafiques qui possède des susceptibilités magnétiques positives et beaucoup plus élevées changerait complètement le patron anomal. La figure A6 représente une telle situation.



## Exemple : Réponse de structures intra-sédimentaire et dans le socle



## A5 INTERPRÉTATION QUANTITATIVE

### A5.1 Analyse Spectrale

Le maillage (Gridage) de données aéromagnétiques représente la digitalisation d'une fonction continue. Le contenu en fréquence du Grid peut être décrit en termes de fréquence et les unités sont des radian/intervalle d'échantillonnage. Autrement dit le contenu en fréquence peut-être exprimé en **nombre d'onde** dont les unités sont des cycles/intervalle de gridage.

Il peut être démontré (Hall, 1979) que le **nombre d'onde** maximal utile, qu'on appelle le nombre d'onde de **Nyquist**, qu'il est possible d'obtenir d'un Grid de maille carrée, est égal à la moitié d'une maille.

Le nombre d'onde de **Nyquist** est important car il représente le nombre d'onde maximal utile. Au-delà de ce nombre aucune information utile n'est disponible. C'est donc dire que la gamme complète des nombre d'onde présente dans un Grid sera de zéro, pour un signal non-oscillant ou constant, à 0.5 cycle/cellule de gridage.

Par exemple, si nous avons un grid présentant une maille de gridage de 50 mètres, le nombre d'onde de Nyquist sera de 0.5 cycle/50 mètres (0.01 cycle/m).

Les données gridées dans le domaine de l'espace peuvent être transformées dans le domaine des fréquences, ou nombre d'onde, par l'application de transformée de Fourier à 2 dimensions (Fast Fourier Transform, FFT). Toute l'information présente dans le Grid original est conservée dans le domaine des fréquences, mais est décrite en terme de contenu fréquentiel plutôt qu'en terme de positionnement (x,y,z).

Le spectre complexe du nombre d'onde  $F(u,v)$ , résultant de l'application de l'algorithme FFT, peut être plus facilement étudié si nous calculons le **Spectre de Puissance**:

$$E(u,v) = a^2 + b^2$$

où: a = partie réelle de  $F(u,v)$ , qui contient l'information sur l'amplitude du signal  
b = partie imaginaire de  $F(u,v)$ , qui contient l'information sur la phase

Le **Spectre de Puissance**  $E(u,v)$  représente la distribution de l'énergie spectrale des données en terme de nombre d'onde. Le **Spectre de Puissance** d'un ensemble de données aéromagnétiques peut être utilisé dans le but de déterminer les profondeurs moyennes des différentes formations géologiques (Spector, 1967; Spector et al., 1970; Battacharya, 1966).

Ces profondeurs sont obtenues à partir des pentes observées aux plus faibles nombre d'onde sur le **Spectre de Puissance**. La méthode est basée sur l'hypothèse que chaque unité géologique peut-être associée à une distribution de blocs non-corrélée, de profondeurs, d'épaisseurs, de largeurs et de magnétisation variables.

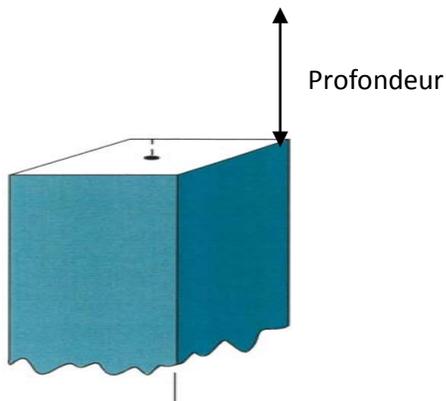
Sur le **Spectre de Puissance** (dont les axes sont logarithmiques), chaque groupement de blocs présentant des profondeurs similaires, sera représenté par une droite de pente constante. Les différentes unités géologiques pourront alors être identifiées sur le **Spectre de Puissance** en fonction de leur profondeur. De plus, la valeur de chaque pente nous donnera la profondeur moyenne d'un ensemble de blocs.

La technique est très utile pour l'évaluation rapide des conditions générales d'un territoire. Elle permet ainsi de séparer grossièrement les différentes unités présentes en fonction de leurs profondeurs moyennes. Elle ne peut-être toutefois utilisée dans la détermination des profondeurs d'anomalies individuelles.

Une de ses applications importante est qu'elle peut fournir les paramètres des filtres numériques qui nous permettront de séparer les contributions au champ magnétique provenant de sources superficielles de celles provenant de sources plus profondes.

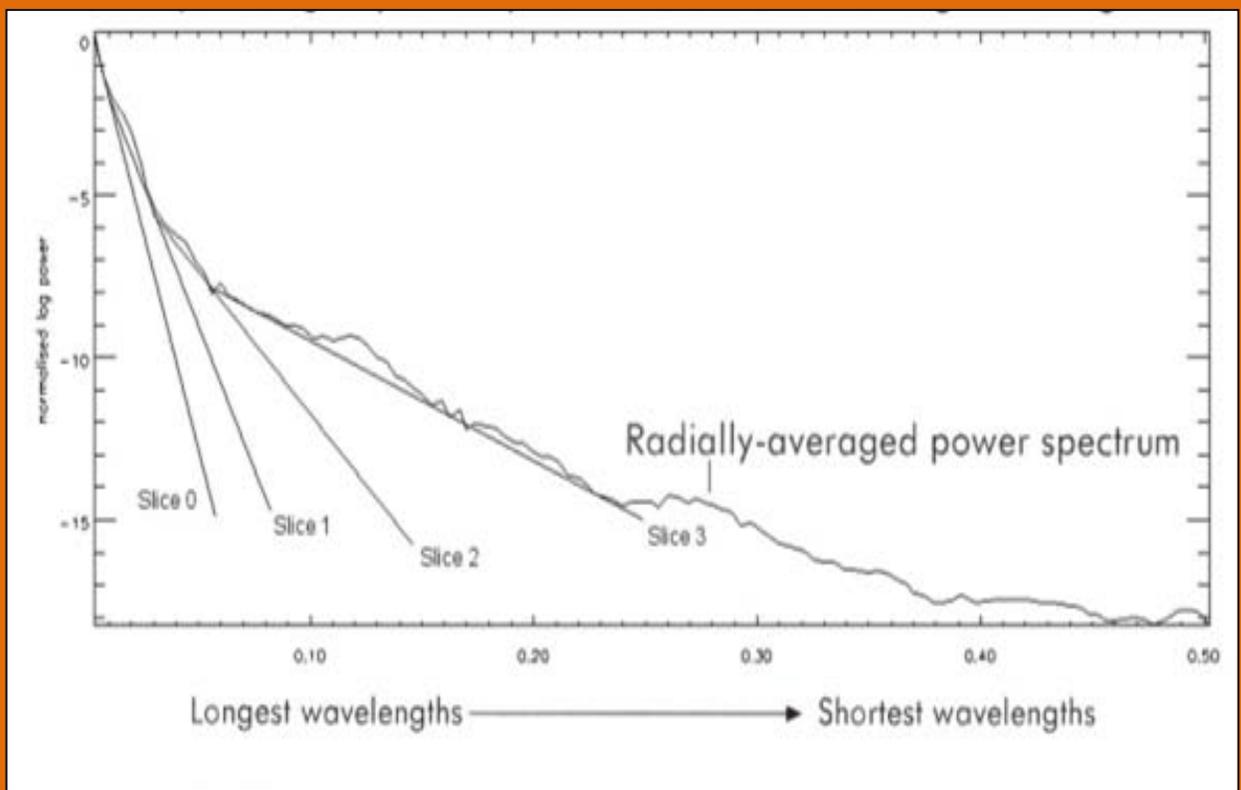
La figure A8 présente un exemple de **Spectre de Puissance**. La profondeur des différentes surfaces est obtenue à partir de la pente de chacun des segments de droite et l'équation suivante (Cowan, 1993):

$$\text{Profondeur} = \text{Pente} / 4 \pi$$



### Modèle Utilisé

Prisme vertical de longueur infinie. Le traitement FFT suppose un nombre très grand de ces prismes ayant différentes susceptibilités et ce pour chaque profondeur modélisée.



**Figure A8 : Exemple de Spectre de Puissance**

## A5.2 Méthode de Déconvolution d'Euler

La méthode de déconvolution d'Euler est la technique la plus utilisée pour l'évaluation automatique des profondeurs. Elle fournit des solutions en ce qui concerne les profondeurs, susceptibilités et pendages d'un modèle initialement choisi, comme par exemple un dyke ou un contact. Elle est basée sur l'équation d'Euler:

$$(\mathbf{x}-\mathbf{x}_0)\partial\mathbf{T}/\partial\mathbf{x} + (\mathbf{y}-\mathbf{y}_0) \partial\mathbf{T}/\partial\mathbf{y} + (\mathbf{z}-\mathbf{z}_0) \partial\mathbf{T}/\partial\mathbf{z} = \mathbf{N} (\mathbf{B}-\mathbf{T})$$

- où: -  $(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0)$  est la position d'une source magnétique pour laquelle le champ total  $\mathbf{T}$  est observé au point  $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$
- $\mathbf{B}$  est le champ régional
  - $\mathbf{N}$  est le degré d'homogénéité ou **Index Structural** qui caractérise la source
  - $\partial\mathbf{T}/\partial\mathbf{x}$ ,  $\partial\mathbf{T}/\partial\mathbf{y}$  and  $\partial\mathbf{T}/\partial\mathbf{z}$  sont les dérivées du champ total, facilement calculables à partir des transformées de Fourier.

Si le champ total  $\mathbf{T}(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z})$  présente la forme générale suivante :

$$\mathbf{T}(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z}) = \mathbf{G} / \mathbf{r}^{\mathbf{N}} \quad (1)$$

où:

- $\mathbf{r} = (\mathbf{x}^2 + \mathbf{y}^2 + \mathbf{z}^2)^{1/2}$
- $\mathbf{N} = 1,2,3,\dots$
- $\mathbf{G}$  ne dépend pas de  $(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z})$

Alors  $\mathbf{T}$  satisfait l'équation d'Euler.

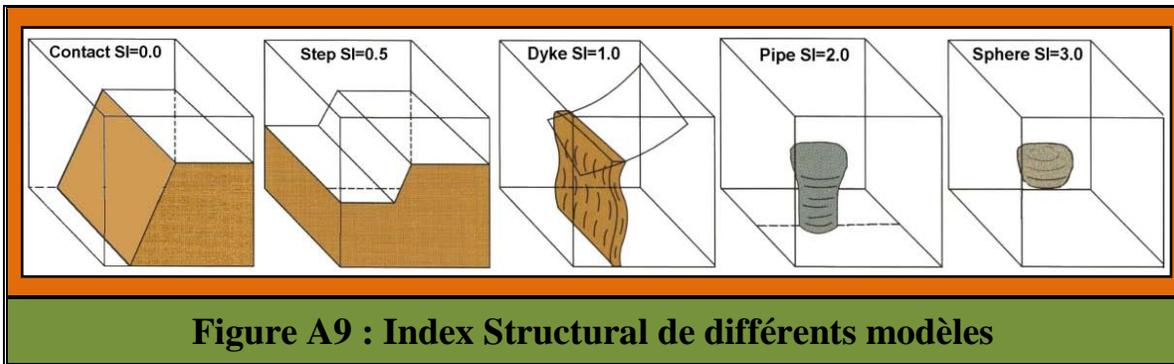
L'index structural  $\mathbf{N}$  contrôle le taux de décroissance du champ magnétique avec la distance. Si  $\mathbf{N}$  est plus élevé, le taux de décroissance est plus grand (figure A9). Par exemple,

- Pour un contact géologique  $\mathbf{N}=0$
- Pour un dyke  $\mathbf{N}=1$
- Pour un corps en 3D  $\mathbf{N}=3$

En théorie, comme nous n'avons que 4 inconnues dans l'équation, il suffirait donc de choisir 4 points le long d'un profil et résoudre simultanément les 4 équations pour obtenir la position de la source  $\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0$  et  $\mathbf{B}$  (car  $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \partial\mathbf{T}/\partial\mathbf{x}, \partial\mathbf{T}/\partial\mathbf{y}, \partial\mathbf{T}/\partial\mathbf{z}$  et  $\mathbf{T}$  sont connus).

Mais comme les données sont souvent bruyantes, il est utiles d'utiliser plus de points (généralement 7 et plus) et résoudre le système d'équations surdéterminé en se servant des moindres carrés pour obtenir l'erreur minimale.

Une fenêtre de longueur fixe de 7 points et plus est alors choisie et déplacée le long de chaque profil, avec un intervalle égal à l'espacement des données, et seules les solutions ayant une erreur inférieure à un niveau choisi, seront conservées.



### A5.3 Calcul de la profondeur d'un dyke par la Méthode de Peters

La méthode de Peters est ici présentée sous forme graphique. Elle est très utile car elle ne nécessite qu'un crayon et une règle.

Soit un dyke infini suivant les coordonnées "y" et "z". Ce dyke produira une anomalie magnétique (symétrique ou pas) comme celle présentée à la figure 10. Il peut mathématiquement être démontré (Peters, 1949) que la position des points où la pente de la courbe est égale à la demi-pente maximale n'est fonction que de la demi-largeur du dyke (m) et de sa profondeur (H). En suivant les étapes A à E de la figure 10 il est possible d'obtenir cette profondeur..

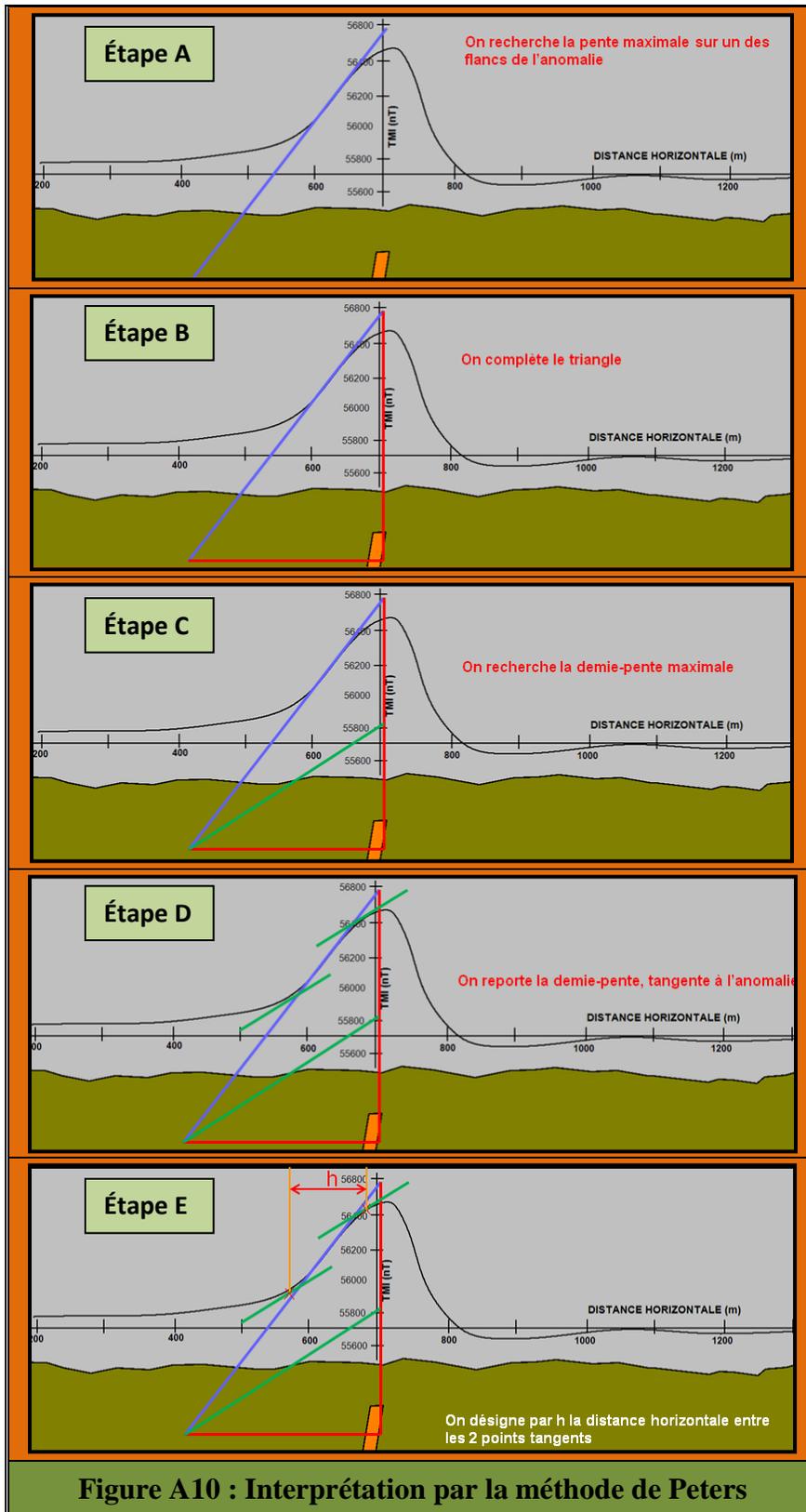
- Étape A : Choisir un des flancs de l'anomalie et tracer la pente maximale tangente au profil. La pente maximale s'obtient aux points d'inflexion. À ces points, la dérivée de la pente est nulle.
- Étape B : Compléter le triangle rectangle ayant pour l'hypoténuse la ligne représentant la demi-pente maximale. Cette ligne peut être tracée aussi longue que l'on veut. Plus elle est longue et plus la précision graphique sera améliorée.
- Étape C : Obtenir graphiquement la valeur de la demi-pente maximale en traçant une autre ligne reliant le sommet représentant la pente maximale au milieu du segment du triangle qui lui est opposé.
- Étape D : On trace deux segments de lignes parallèlement à la ligne de demi-pente et tangents au profil.
- Étape E : La distance horizontale entre ces 2 points tangents au profil est représentée par h.

La profondeur H du dyke est obtenue par l'équation suivante:

$$H = h/n$$

Pour évaluer n, on se sert de la forme de la courbe :

- Lorsque la courbe est aiguë et les points d'inflexion sont près du sommet, on choisit **n = 1.2**
- Lorsque la courbe est modérément aiguë et les points d'inflexion sont vers le centre des flancs, on choisit **n = 1.6**
- Lorsque la courbe montre nettement un plateau, on choisit **n = 2.0**



#### A5.4 Modélisation 2.5D

L'interprétation de données magnétiques impliquant des logiciels de modélisation existe depuis que les ordinateurs nous permettent de le faire. Le plus souvent, un modèle faisant intervenir un polygone infini ayant « n » cotés (modèle 2-D) est ajusté par itérations successives afin de satisfaire les données recueillies (lissage). Un modèle plus élaboré, conçu par Talwani et Heirtzler (1964), est également utilisé. L'extension latérale du polygone n'est alors plus infinie et il est dit que le modèle est à deux dimensions et demie (2.5D). Les expressions mathématiques d'un polygone de 2.5D ont été développées par Shuey et Pasquale en 1973 (équation 19, p.510). Pour adapter la courbe théorique du modèle aux données mesurées, la géométrie du polygone est progressivement modifiée, soit manuellement, soit par itérations successives (mode semi-automatique) à l'aide de la méthode des moindres carrés non linéaires (Powell, 1965).

En 2012, **Geosoft** introduisit le logiciel **VOXI Earth Modelling**, un logiciel d'inversion géophysique générant des modèles 3D de données gravimétriques ou magnétiques aéroportées. Un des avantages importants de convertir des données gravimétriques ou magnétiques en un modèle à trois dimensions du sous sol est que le produit final, très visuel, permet aux explorateurs de voir et comprendre la distribution de la densité ou de la susceptibilité magnétique du sol à l'aide de plates-formes comme par exemple un fichier PDF parfaitement orientable (MacLeod, 2012). **VOXI** produit un modèle des propriétés de la roche, qui peut être confronté à des observations géologiques de surface et par forage.

Pour être réaliste, le modèle doit par contre être contraint par d'autres informations géologiques (cartographie, forages, tranchées, analyses...) ou géophysiques. La possibilité de convertir des données géophysiques directement en images 3D, permet aux explorateurs d'obtenir un aperçu beaucoup plus clair du sous-sol et ainsi améliorer l'identification de cibles de forage dans des environnements souvent complexes.

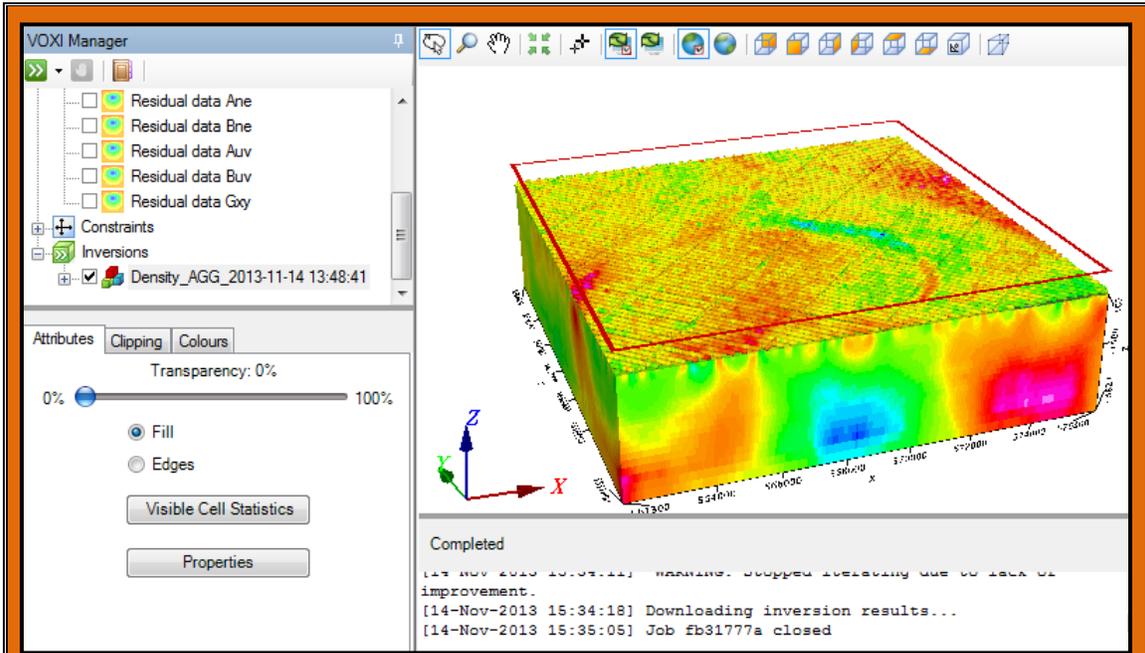
#### A5.5 Inversion 3D

Grâce au logiciel **VOXI**, une inversion 3D de données magnétiques acquises sur une vaste région, comme par exemple une propriété minière ou un bassin sédimentaire, est possible. L'inversion produit un modèle en 3 dimensions de la susceptibilité magnétique du sous sol. Des produits finaux, très visuels, permettent aux explorateurs de mieux voir et comprendre la distribution des différentes formations géologiques de leur propriété. Ces produits, en format PDF ou CAD, permettent de faire tourner le modèle dans toutes les directions, en plus de pouvoir agrandir un secteur jugé d'intérêt. Un exemple d'inversion 3D est présenté à la figure A11.

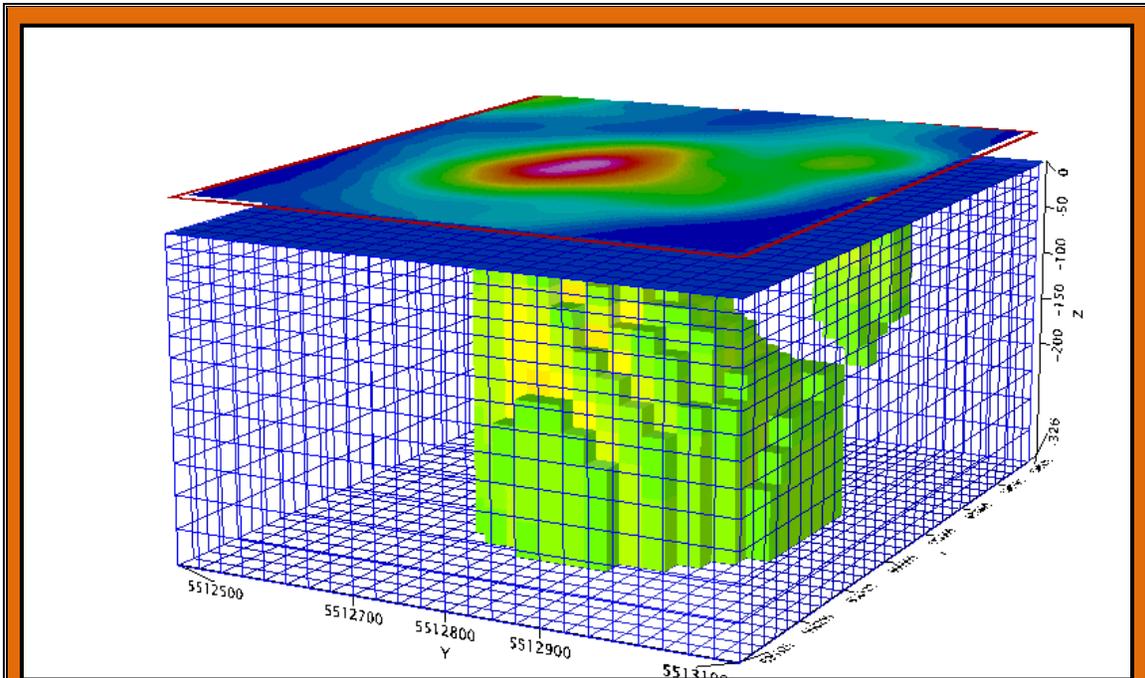
#### A5.6 Modélisation 3D

La modélisation 3D d'une zone particulière présentant plus d'intérêt est également possible avec le logiciel **VOXI**. Contrairement à l'inversion-3D, la modélisation fournit une estimation encore plus précise de la distribution des différentes formations magnétiques présentes dans le sol. Mais les cibles à modéliser doivent être simples,

comme des dykes ou des anomalies magnétiques isolées. Un exemple de modélisation 3D est présenté à la figure A12.



**Figure A11 : Exemple d'inversion 3D**



**Figure A12 : Exemple de modélisation 3D**

## **ANNEXE B**

# **DESCRIPTION DE LA TECHNIQUE GRAVIMÉTRIQUE**

# PRÉSENTATION DE LA TECHNIQUE GRAVIMÉTRIQUE

## B.1 INTRODUCTION

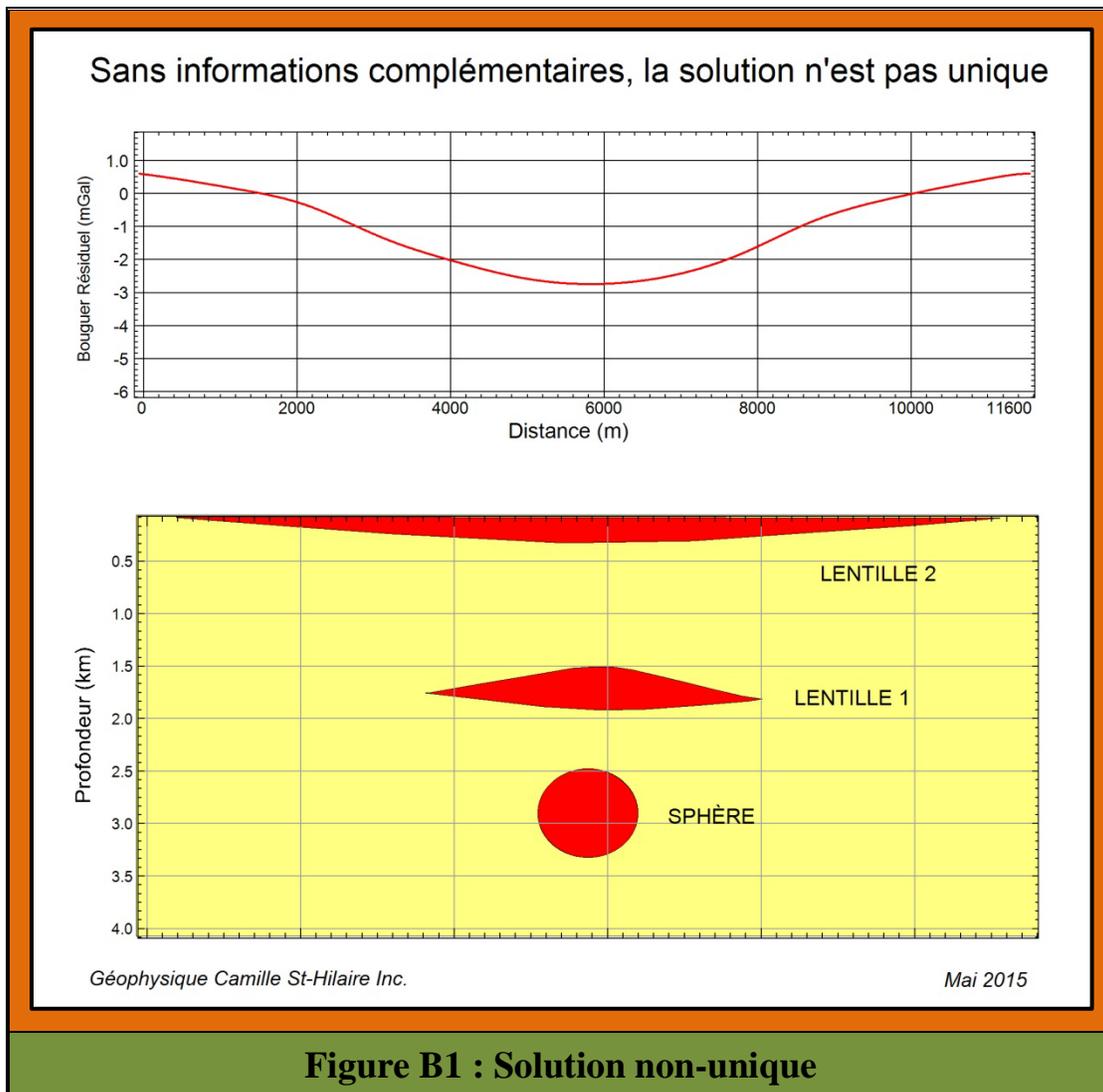
Les méthodes gravimétrique, comme la méthode magnétique, est une technique de télédétection. Elle permet de déterminer à distance les propriétés des roches à partir du haut des airs, au sol ou à la surface de la mer (Riddihough, 1996).

Les variations de la valeur du champ gravitationnel constituent des anomalies qui sont le reflet de changements de densité dans le sol. L'intensité de ces anomalies est fonction de la distance entre le détecteur (gravimètre) et la source (contraste de densité). L'interprétation des données gravimétriques a pour objectif de définir au mieux la distribution des masses produisant une anomalie considérée.

En utilisant la loi de la gravitation de Newton, le calcul numérique de l'attraction gravitationnelle d'une distribution de masses donnée est un problème relativement simple. Malheureusement, le problème inverse, qui consiste à définir la distribution de densité produisant l'attraction gravitationnelle mesurée, est le véritable problème à résoudre et est beaucoup plus complexe. Par contre, l'interprétation des données peut être considérablement simplifiée si nous pouvons spécifier la géométrie de la source de l'anomalie de gravité. Dans ce cas, il sera possible d'utiliser la méthode des moindres carrés.

Les techniques gravimétrique et magnétique sont deux techniques dites de potentiel. Sans informations complémentaires, il y a une **infinité de modèles géométriques** qui permettent de reproduire une anomalie gravimétrique donnée. La figure B1 présente le cas d'une anomalie gravimétrique négative qui pourrait par exemple résulter d'une lentille ou bien d'une sphère de halite enfouie. Ici, la sphère est le corps le plus profond qui peut produire l'anomalie gravimétrique mesurée. Des corps plus superficiels et plus larges, comme les deux lentilles qui sont représentées, pourraient aussi reproduire la même anomalie. Tous auraient le même déficit de masse total.

En pratique, en s'aidant d'informations complémentaires, tels des forages, des informations géologiques et géophysiques existantes, il est possible de limiter le choix à un nombre restreint de modèles.



## B.2 UTILISATION DE MODÈLES GÉOMÉTRIQUES SIMPLES

Souvent, le géophysicien qui interprète des données gravimétriques fait intervenir des corps de formes géométriques simples, comme une sphère, un cylindre vertical ou horizontal, une couche mince présentant différents pendages, etc. (figure B2)

Une anomalie gravimétrique n'est pas très sensible à des variations mineures de la forme d'une masse minéralisée. C'est pourquoi les modèles simples énumérés ci-dessus produisent des résultats qui se rapprochent étonnamment de la réalité (Telford and al., 1995).

### **B.3 INVERSION DES ANOMALIES GRAVIMÉTRIQUES**

La mise en plan de données gravimétriques nous permet d'obtenir le patron anomal correspondant à la distribution des différentes formations rocheuses présentes. Cette mise en plan permet de réaliser une rapide évaluation de l'orientation des différentes unités géologiques et des éventuelles discontinuités qui leur sont associées, ce qui en soit constitue une **interprétation qualitative**. D'autre part, le patron d'une anomalie individuelle peut être utilisé dans le but de définir la forme, la position des contrastes de densité, le surplus ou le déficit de masse, ce qui constitue une **interprétation quantitative**.

Une des façons de parvenir à définir la distribution des masses sous-terraines est de supposer une masse présentant une densité, une forme et une profondeur donnée et de calculer le profil de l'anomalie gravitationnelle qu'elle produit. Ensuite, il suffit de comparer cette anomalie théorique avec celle obtenue lors du levé de gravité et de modifier petit à petit les paramètres de la masse afin d'obtenir la meilleure correspondance possible. Une fois satisfait de cette correspondance entre le profil calculé et le profil mesuré, nous pouvons alors supposer que notre modèle correspond à une des possibles représentations de la structure géologie présente. Comme il a déjà été dit, cette solution n'est pas unique et il sera nécessaire de tenir compte de d'autres sources d'information (géophysiques, géologiques, forages) afin de valider le modèle.

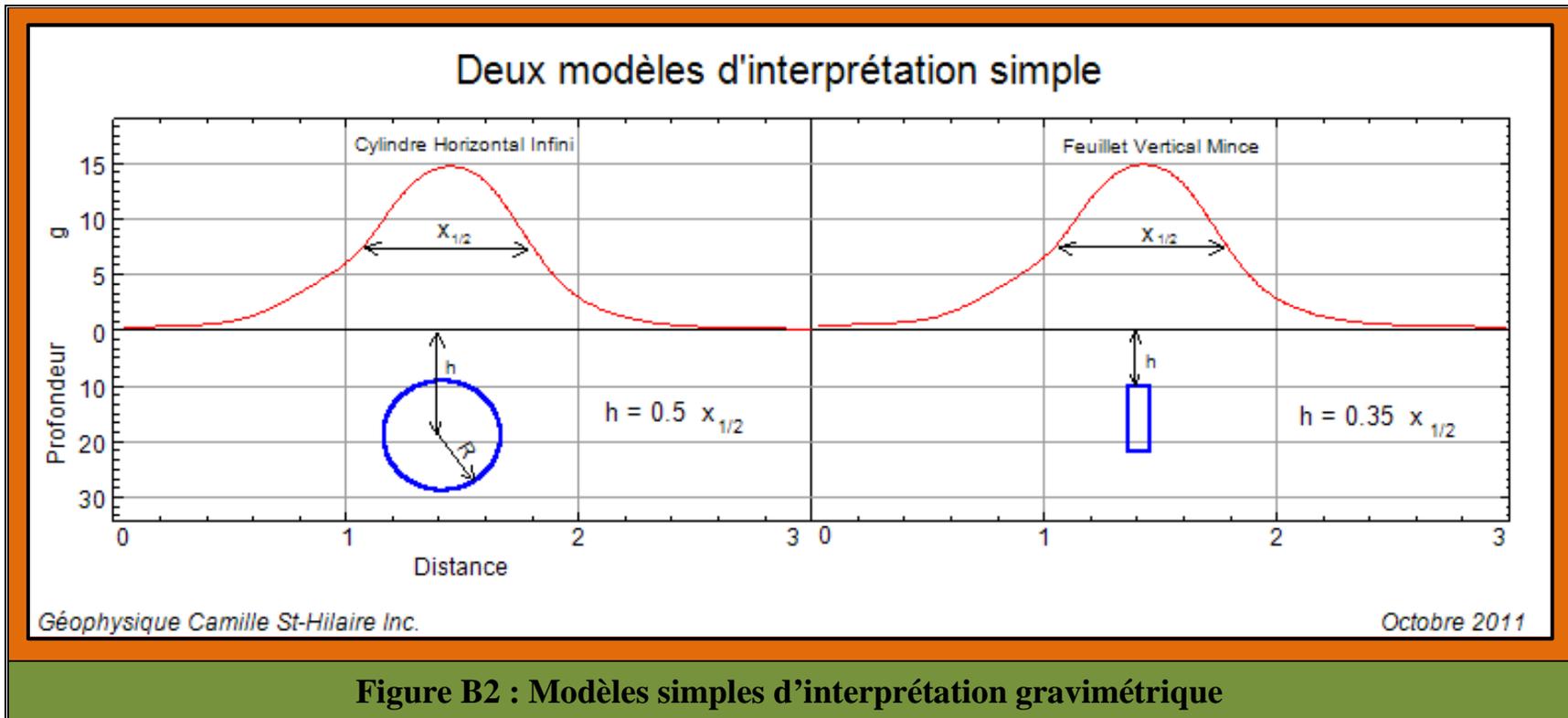
Cette technique fonctionne aussi dans le cas de la méthode magnétique et plus de détails sont présentés à la section A5 de l'annexe A.

### **B.4 AUTRES TECHNIQUES D'INTERPRÉTATION**

Il est important ici de noter que les techniques d'interprétation présentées à l'annexe A et concernant la méthode magnétique, telles :

- L'analyse spectrale (présentée à la section A5.1)
- La déconvolution d'Euler (présentée à la section A5.2)
- La modélisation 2.5D (présentée à la section A5.4)
- L'inversion 3D (présentée à la section A5.5)
- La modélisation 3D (présentée à la section A5.6)

s'appliquent aussi aux données gravimétriques. Elles furent d'ailleurs utilisées lors de l'interprétation des données gravimétriques acquises dans le golfe du Saint-Laurent. Le lecteur est prié de se référer à ces sections pour une description plus détaillée.



Dans le cas de la sphère, on aurait que  $h = 0.65 x_{1/2}$

## ANNEXE C

### **CARTES PRODUITES ET UTILISÉES LORS DE L'INTERPRÉTATION DES DONNÉES**

*Étant donné le nombre de méga-octets que constitue cette annexe, elle est fournie dans un fichier séparé du rapport final. Elle contient les cartes suivantes réduites au format 8½ X 11.*

- Carte couleur du Champ Magnétique Total Résiduel Réduit au Pôle (RAP);
- Carte en relief ombragé du Champ Magnétique Total Résiduel Réduit au Pôle;
- Carte couleur du Gradient Vertical Calculé;
- Carte couleur de la Deuxième Dérivée Verticale Calculée;
- Carte couleur du Signal Analytique;
- Carte couleur du Tilt Magnétique;
- Carte couleur du Gain Automatique Contrôlé;
- Carte couleur de l'Anomalie de Bouguer;
- Carte en relief ombragé de l'Anomalie de Bouguer;
- Carte du gradient vertical de l'Anomalie de Bouguer;
- Carte en relief ombragé du gradient vertical de l'Anomalie de Bouguer;
- Interprétation magnétique et gravimétrique.