Beauchamp S, 2015, Étude de données magnétiques 3D en forage, MSc Thesis, École Polytechnique, QC, 68 p.

NSERC-CMIC Mineral Exploration Footprints Project Contribution 056.

Étude de données magnétiques 3D en forage

GML6914 - Projet de maîtrise IV

Présenté à Michel Chouteau

Par Sandra Beauchamp, 1444149

Le 7 mai 2014

École Polytechnique de Montréal

RÉSUMÉ

Lors de la dernière réunion du *Canada Mining Innovation Council- Exploration Innovation Consortium (CMIC-EIC)*, du 9 au 11 décembre 2013, il a été proposé que des données magnétiques ayant servis dans le cadre d'une campagne de forages soient réutilisées à des fins de cartographie. Cette idée a été mise de l'avant et la première étape de traitement des données fait l'objet de ce rapport.

Les données appartiennent à la minière Osisko dont la propriété est située au sud de la ville de Malartic (latitude 48º 7' 45" N, longitude 78º 7' 00'' O). Jusqu'à maintenant, les différents levés géophysiques qui ont été effectués sur ce site se sont soldés par un échec, la minéralisation du gisement ne semblant pas avoir de signature géophysique particulière.

Entre 2005 et 2008, la corporation a réalisé environ 1 700 sondages (1673 fichiers disponibles) dont une grande partie a été orientée à l'aide de l'appareil SensiT de Flexit, un appareil qui permet notamment d'obtenir une mesure du champ total. Sur les 1673 fichiers disponibles, 1 353 fichiers se sont révélés contenir des données magnétiques. A la première lecture, il apparaissait évident qu'un contrôle de la qualité des données était de mise. Les 1353 fichiers contenaient, au total, 93 220 données dont les valeurs du champ magnétique s'étalaient de 30 618nT à 98 795nT. Or, il était entendu qu'étant donné le contexte géologique peu magnétique de la région, les valeurs du champ magnétique ne devraient pas osciller au-delà de quelques centaines de nano tesla de part et d'autre de la valeur du champ total (environ 56 500nT en 2007) (Ressources naturelles Canada, 2014).

Les données aberrantes (NaN, zéros), de même que les valeurs extrêmes (>65 000nT, <50 000nT) ont été soustraites. Une zone plus restreinte où les données étaient regroupées de façon plus dense a été délimitée. Des corrections plus pointues ont ensuite été appliquées. Les valeurs ponctuelles non cohérentes ont été soustraites et une attention particulière a été accordée aux premières données de chaque sondage. Aussi, une condition de rejet a été appliquée sur la profondeur maximale de la première donnée afin de limiter les erreurs d'extrapolation. Un total de 455 fichiers a ainsi été retenu, soit 29 485 données dont les valeurs du champ magnétique s'étalaient de 54 424nT à 58 923nT (Moyenne : 56 139nT, Écart-type : 172nT). En moyenne, les sondages retenus contenant 68 données allant d'une profondeur minimale de 4m à une profondeur maximale de 222m.

Les données restantes ont ensuite été repositionnées à leurs positions vraies par interpolation verticale linéaire, ce qui a généré quelques données artificiellement. Un nivelage des données a ensuite été réalisé à l'aide de données provenant d'un levé magnétique aéroporté réalisé en 1994 et couvrant l'ensemble de la zone. Un prolongement vers le bas d'une hauteur égale à l'altitude de vol moyenne dans la zone a été appliqué à ces données avant le nivellement. Les données ont ensuite été nivelées en utilisant la première valeur de chaque forage afin de vérifier que la carte du levé en surface était bien retrouvée avec cette opération en traçant la carte des premières valeurs de chaque sondage. Pour assurer plus de stabilité, la première valeur a ensuite été remplacée par la valeur moyenne pour le forage.

Une fois les données corrigées, celles-ci ont été krigées sur un volume régulier de maille élémentaire 10m x 10m x 10m, soit un volume total de 2130m x 950m x 410m. Un variogramme isotrope de longue portée a été utilisé pour cette opération. Finalement, un filtre passe-bas (~100m) et un filtre de type tendance linéaire ont été appliqués sur le volume krigé afin d'isoler les composantes locales du champ.

En dernier lieu, les résultats pour différentes coupes sont présentés et juxtaposés aux cartes des teneurs en or correspondantes. Une brève étude des corrélations existantes est présentée. Les corrélations entre la

susceptibilité et les données magnétiques sont aussi présentées pour trois forages, soit les seules données de susceptibilités disponibles à l'heure actuelle pour la zone délimitée.

Il est à noter que l'objectif initial de ce projet était de mener à terme une inversion 3D du volume krigé. À la date de soumission de ce rapport, les opérations d'inversion avaient été amorcées, mais aucun résultat probant n'avait encore été obtenu.

Table des matières

1 Introduction 1

2 Contexte géologique de la région 2

2.1 Gisement et minéralisation 2

2.2 Levés géophysiques 3

2.3 Sondages 4

3 Concepts théoriques 5

3.1 Magnétisme 5

3.2 Utilisation de filtres 6

3.2.1 Obtention de la régionale par un prolongement vers le haut 6

3.2.1 Obtention de la régionale par d'autres techniques 7

3.2.2 Gradient du champ magnétique 7

3.3 Krigeage 8

3.4 Appareil de sondages magnétiques et forages 8

4 Traitement des données 9

4.1 Origine des données 9

4.2 État des données brutes 10

4.3 Édition des données magnétiques 12

4.3.1 Correction 1A : données aberrantes 12

4.3.1 Correction 1B : nivellement 15

4.3.2 Correction 2A : filtrage supplémentaire des données 21

4.3.3 Correction 2B : nivellement 23

4.3.4 Correction 3A : repositionnement des données à leur position vraie 24

4.3.5 Correction 3B : nivellement 26

4.3.6 Correction 4 : nivellement avec une valeur moyenne comme référence 27

4.4 Krigeage des données sur un volume 3D 29

4.5 Soustraction de la régionale 35

5 Présentation des résultats 41

5.1 Corrélation entre le champ total et la teneur en or 41

5.2 Corrélation entre la résiduelle du champ magnétique et la teneur en or 47

5.1 Susceptibilités 49

6 Discussion 52

7 Conclusion 53

8 Références 55

9 Annexe 57
9.1 levé magnétique aéroporté 57
9.2 État des données brutes (après corrections manuelles de certaines séries) 59
9.3 État des données après la correction 1 61
9.4 État des données après la correction 2 66
9.5 État des données après la correction 3 70
9.6 État des données après la correction 4 76
9.7 Tableau récapitulatif des corrections 82
9.8 Profils de susceptibilité 83
9.9 Décomposition par ondelettes 88
9.10 Prolongement vers le haut 92
9.1 Coupe verticale x=715240m 94
9.2 Coupe verticale x=713340m 96
9.1 Coupe verticale x=713800m 97
9.1 Coupe verticale x=714310m 98
9.1 Coupe verticale x=714460m 99

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Susceptibilités types pour la roche encaissante et de la minéralisation du gisement (Giroux, Notes de cours GML6201A - Proprietes physiques, 2013) (Giroux, Notes de cours GML8201 - Techniques géophysiques de proche, 2008) 3
Tableau 2 : Susceptibilités types de minéraux qui présentent généralement une anomalie magnétique détectable (Giroux, Notes de cours GML6201A - Proprietes physiques, 2013) 3
Tableau 3 : Nombre de fichiers de forage disponible par numéro de série (année) 4
Tableau 4 : Statistiques pour les données brutes (levé magnétique en forage) 10
Tableau 5 : Statistiques sur la distribution des données par forage après la première correction (levé magnétique en forage) 13
Tableau 6 : Statistiques sur les valeurs du champ magnétique après la première correction (levé magnétique en forage) 14
Tableau 7 : Statistiques pour le levé magnétique aéroporté DP9617 16
Tableau 8 : Modèle IGRF pour le levé magnétique aéroporté DP9617 (Ressources naturelles Canada, 2014) 16
Tableau 9 : Paramètres du variogramme anisotrope et du variogramme isotrope du levé magnétique aéroporté DP9617 19
Tableau 10 : Statistiques sur les valeurs du champ magnétique après la première correction (levé magnétique en forage) 20
Tableau 11 : Statistiques sur la distribution des données par forage après la deuxième correction (levé magnétique en forage) 22
Tableau 12 : Statistiques sur les valeurs du champ magnétique après la deuxième correction (levé magnétique en forage) 22
Tableau 13 : Statistiques sur les valeurs du champ magnétique après la deuxième correction (levé magnétique en forage) 24
Tableau 14 : Statistiques sur la distribution des données par forage après la troisième correction (levé magnétique en forage) 26
Tableau 15 : Statistiques sur les valeurs du champ magnétique après la quatrième correction (levé magnétique en forage) 28
Tableau 16 : Paramètres utilisés pour l'interpolation par krigeage sur un volume 3D 29
Tableau 17 : Paramètres du variogramme anisotrope et du variogramme isotrope des données magnétiques en forage 30
Tableau 18 : Coefficients de corrélation moyens et maximums entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils horizontaux ou verticaux 41
Tableau 19 : Coefficients de corrélation moyens et maximums entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils horizontaux ou verticaux 44
Tableau 20 : Coefficients de corrélation moyens et maximums entre le champ magnétique total (ou la résiduelle du champ magnétique) et la teneur en or selon des profils horizontaux ou verticaux 47
Tableau 21 : Coefficients de corrélation entre le champ magnétique total (ou la résiduelle du champ magnétique) et la susceptibilité 49
Tableau 22 : Statistique pour le levé magnétique aéroporté DP9617 57
Tableau 23 : Statistiques pour les données brutes (levé magnétique en forage) 59
Tableau 24 : Statistiques sur la distribution des données par forage après la première correction (levé magnétique en forage) 61
Tableau 25 : Statistiques sur les valeurs du champ magnétique après la première correction (levé magnétique en forage) 61

Tableau 26 : Statistique sur la distribution des données par forage après la deuxième correction (levé magnétique en forage) 66
Tableau 27 : Statistique sur les valeurs du champ magnétique après la deuxième correction (levé magnétique en forage) 66
Tableau 28 : Statistique sur la distribution des données par forage après la troisième correction (levé magnétique en forage) 70
Tableau 29 : Statistique sur les valeurs du champ magnétique après la troisième correction (levé magnétique en forage) 70
Tableau 30 : Statistique sur la distribution des données par forage après la quatrième correction (levé magnétique en forage) 76
Tableau 31 : Statistique sur les valeurs du champ magnétique après la quatrième correction (levé magnétique en forage) 76
Tableau 32 : Coefficients de corrélation moyens et maximums entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils horizontaux ou verticaux 79
Tableau 33 : Récapitulatif des corrections 82
Tableau 34 : Coefficients de corrélation moyens et maximums entre le champ magnétique total (ou la résiduelle du champ magnétique) et la teneur en or selon des profils horizontaux ou verticaux - X715240 95

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte géologique du site Canadian Malartic (Wares & Prud'homme, 2013) – la légende a été recopiée en format agrandi pour faciliter la lecture 2
Figure 2: Spectre de Fourier arbitraire avant (gauche) et après (droite) prolongement vers le haut (Mathematica) 7
Figure 3 : Schéma de l'appareil SensIT de Flexit (GeoMEM, 2014) 9
Figure 4 : Champ magnétique en surface des données en forages (sans traitement) 11
Figure 5 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (sans traitement) 11
Figure 6 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (sans traitement) 12
Figure 7 : Délimitation de la zone d'intérêt 13
Figure 8 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forage (après une première édition des données – sans nivellement) 14
Figure 9 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après une première édition des données – sans nivellement) 14
Figure 10 : Champ magnétique en surface des données en forages (après une première édition des données – sans nivellement) 15
Figure 11 : Position des données magnétiques en forage et aéroportées pour la zone d'intérêt délimitée 16
Figure 12 : Champ magnétique total pour le levé magnétique aéroporté DP9617 17
Figure 13 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique aéroporté de référence (DP9617) 17
Figure 14 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique aéroporté de référence (DP9617) 18
Figure 15 : Schéma des opérations de corrections/nivellement 18
Figure 16 : Variogramme anisotrope du levé magnétique aéroporté DP9617 19
Figure 17 : Variogramme isotrope du levé magnétique aéroporté DP9617 19
Figure 18 : Champ magnétique en surface des données en forages nivelées avec un variogramme isotrope a= $1.845E^{7}$m 20
Figure 19 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après une première édition des données – avec nivellement) 21
Figure 20 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après une première édition des données – avec nivellement) 21
Figure 21 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forage (après la correction 2 – sans nivellement) 22
Figure 22 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après la correction 2 – sans nivellement) 23
Figure 23 : Schéma des opérations de corrections/nivellement 23
Figure 24 : schéma du repositionnement des données aux positions vraies par interpolation verticale linéaire ..24
Figure 25 : Exemple de repositionnement des données aux positions vraies par interpolation verticale linéaire – CM07-1205 25
Figure 26 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après la correction 3 – sans nivellement) 25
Figure 27 : Schéma des opérations de corrections/nivellement 26
Figure 28 : Champ magnétique en surface des données en forages (après la correction 3 – avec nivellement) 27
Figure 29 : Schéma des opérations de corrections/nivellement 27
Figure 30 : Champ magnétique en surface des données en forages (après la correction 4 – avec nivellement) 28
Figure 31 : Variogramme anisotrope des données magnétiques en forage 29
Figure 32 : Variogramme isotrope des données magnétiques en forage 30

Figure 33 : Coupe x=714140m, avant l'interpolation sur le volume 3D (interpolation 2D seulement) 31
Figure 34 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m 31
Figure 35 : Coupe x=714140m, variogramme anisotrope, ax=20m, ay=44m, az=957m 32
Figure 36 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de moyenne portée, a=180m 32
Figure 37 : Coupe z=0m, avant l'interpolation sur le volume 3D (interpolation 2D seulement) 33
Figure 38 : Coupe z=0m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m 33
Figure 39 : Coupe z=0m, variogramme anisotrope, ax=20m, ay=44m, az=957m 34
Figure 40 : Coupe z=0m, variogramme isotrope, a=180m 34
Figure 41 : Coupe z=0, variogramme isotrope, champ magnétique total 35
Figure 42 : Coupe z=0, variogramme isotrope, régionale 36
Figure 43 : Coupe z=0, variogramme isotrope, résiduelle du champ magnétique après soustraction de la régionale 36
Figure 44 : Coupe z=0, variogramme isotrope, résiduelle du champ magnétique après soustraction de la régionale et application d'un filtre passe-bas (150m) 37
Figure 45 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope, champ magnétique total 37
Figure 46 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope, régionale du champ magnétique 38
Figure 47 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope, résiduelle du champ magnétique après soustraction de la régionale –tendance linéaire 38
Figure 48 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope, résiduelle du champ magnétique après soustraction de la régionale et application d'un filtre passe-bas (150m) 39
Figure 49 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope, résiduelle du champ magnétique obtenue par décomposition par ondelette 39
Figure 50 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope longue portée, résiduelle obtenue par prolongement vers le haut 40
Figure 51 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, champ total 41
Figure 52 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or 42
Figure 53 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon pour différents profils verticaux 42
Figure 54 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon pour différents profils horizontaux 43
Figure 55 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite) 43
Figure 56 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite) 44
Figure 57 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, champ total (après la correction 3 – avec nivellement) 45
Figure 58 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, champ total (après la correction 4 – avec nivellement) 45
Figure 59 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or 46
Figure 60 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite) - (avant la correction 4 – avec nivellement) 46
Figure 61 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite) - (après la correction 4 – avec nivellement) 47
Figure 62 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, résiduelle du champ magnétique 48
Figure 63 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or 48

Figure 64 : Coupe x=714140m, corrélation entre la résiduelle du champ magnétique et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite) 49
Figure 65 : Gradient du champ magnétique total et susceptibilité pour le forage CM07-1216 50
Figure 66 : Intégrale du gradient du champ magnétique total et susceptibilité pour le forage CM07-1216 50
Figure 67 : Gradient de la résiduelle du champ magnétique (après filtre tendance linéaire et filtre passe-bas) et susceptibilité pour le forage CM07-1216 51
Figure 68 : Intégrale du gradient de la résiduelle du champ magnétique et susceptibilité pour le forage CM07-1216 51
Figure 69 : Champ magnétique total pour le levé magnétique aéroporté DP9617 57
Figure 70 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique aéroporté de référence (DP9617) 58
Figure 71 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique aéroporté de référence (DP9617).....58
Figure 72 : Champ magnétique en surface des données en forages (sans traitement) 59
Figure 73 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (sans traitement) ...60
Figure 74 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (sans traitement).....60
Figure 75 : Champ magnétique en surface des données en forages (après une première édition des données – sans nivellement).....62
Figure 76 : Champ magnétique en surface des données en forages nivelées avec un variogramme anisotrope ...62
Figure 77 : Champ magnétique en surface des données en forages nivelées avec un variogramme isotrope a=3448m 63
Figure 78 : Champ magnétique en surface des données en forages (après une première édition des données – avec nivellement) 63
Figure 79 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après une première édition des données – sans nivellement) 64
Figure 80 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après une première édition des données – sans nivellement) 64
Figure 81 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après une première édition des données – avec nivellement).....65
Figure 82 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après une première édition des données – avec nivellement) 65
Figure 83 : Champ magnétique en surface des données en forages (après la correction 2) 67
Figure 84 : Champ magnétique en surface des données en forages (après la correction 2 – avec nivellement)....67
Figure 85 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après la correction 2 – sans nivellement).....68
Figure 86 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après la correction 2 – sans nivellement).....68
Figure 87 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après la correction 2 – avec nivellement) 69
Figure 88 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après la correction 2 – avec nivellement).....69
Figure 89 : Champ magnétique en surface des données en forages (après la correction 3) 71
Figure 90 : Champ magnétique en surface des données en forages (après la correction 3 – avec nivellement)....71
Figure 91 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, champ total (après la correction 3 – avec nivellement) 72
Figure 92 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnéti que total et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite) - (après la correction 3 – avec nivellement) 72

Figure 93 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnéti que total et la teneur en or selon pour différents profils verticaux - (après la correction 3 – avec nivellement) 73
Figure 94 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnéti que total et la teneur en or pour différents profils horizontaux - (après la correction 3 – avec nivellement) 73
Figure 95 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après la correction 3 – sans nivellement)....74
Figure 96 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après la correction 3 – sans nivellement)....74
Figure 97 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après la correction 3 – avec nivellement) 75
Figure 98 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après la correction 3 – avec nivellement)....75
Figure 99 : Champ magnétique en surface des données en forages (après la correction 4 – avec nivellement)....77
Figure 100 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, champ total (après la correction 4 – avec nivellement) 77
Figure 101 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite) - (après la correction 4 – avec nivellement) 78
Figure 102 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon pour différents profils verticaux (après la correction 4 – avec nivellement)....78
Figure 103 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon pour différents profils horizontaux (après la correction 4 – avec nivellement) 79
Figure 104 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après la correction 4 – sans nivellement)....79
Figure 105 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après la correction 4 – sans nivellement)....80
Figure 106 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après la correction 4 – avec nivellement)....80
Figure 107 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après la correction 4 – avec nivellement)....81
Figure 108 : Gradient du champ magnétique total et susceptibilité pour le forage CM02-1205 83
Figure 109 : Gradient de la résiduelle du champ magnétique et susceptibilité pour le forage CM07-1205 83
Figure 110 : Gradient du champ magnétique total et susceptibilité pour le forage CM02-1705 84
Figure 111 : Gradient de la résiduelle du champ magnétique et susceptibilité pour le forage CM07-1205 84
Figure 112 : Gradient du champ magnétique total et susceptibilité pour le forage CM07-1216 85
Figure 113 : Gradient de la résiduelle (après filtre tendance linéaire seulement) du champ magnétique et susceptibilité pour le forage CM07-1216 85
Figure 114 : Gradient de la résiduelle du champ magnétique (après filtre tendance linéaire et filtre passe-bas) et susceptibilité pour le forage CM07-1216 85
Figure 115 : Intégrale du gradient du champ magnétique total et susceptibilité pour le forage CM07-1216 86
Figure 116 : Intégrale du gradient de la résiduelle du champ magnétique et susceptibilité pour le forage CM07-1216 86
Figure 117 : Position des forages et positions des données de susceptibilités (couleur doré pâle à droite) 87
Figure 118 : Coupe z=323m (données de surface), variogramme isotrope longue portée, régionale obtenue par décomposition par ondelettes 88
Figure 119 : Coupe z=323m (données de surface), variogramme isotrope longue portée, résiduelle du champ magnétique obtenue par décomposition par ondelette....88

Figure 120 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope longue portée, régionale obtenue par décomposition par ondelettes....89
Figure 121 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope longue portée, résiduelle du champ magnétique obtenue par décomposition par ondelette....89
Figure 122 : Décomposition par ondelette, signal original et reconstruit, x=714140m, z=54m....90
Figure 123 : Décomposition par ondelette, signal original et reconstruit, x=714140m, z=303m....90
Figure 124 : Décomposition par ondelette, signal original et reconstruit, x=714140m, z=323m....90
Figure 125 : Décomposition par ondelette, signal original et reconstruit, x=714140m, z=-87m....91
Figure 126 : Coupe z=323m (données de surface), variogramme isotrope longue portée, régionale obtenue par prolongement vers le haut....92
Figure 127 : Coupe z=323m (données de surface), variogramme isotrope longue portée, résiduelle obtenue par prolongement vers le haut....92
Figure 128 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope longue portée, régionale obtenue par prolongement vers le haut....93
Figure 129 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope longue portée, résiduelle obtenue par prolongement vers le haut....93
Figure 130 : Coupe x=715240m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, champ magnétique total 94
Figure 131 : Coupe x=714540m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, résiduelle du champ magnétique....94
Figure 132 : Coupe x=715240m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or....95
Figure 133 : Coupe x=715240m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite)....95
Figure 134 : Coupe x=713340m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, résiduelle du champ magnétique....96
Figure 135 : Coupe x=713340m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or....96
Figure 136 : Coupe x=713800m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, résiduelle du champ magnétique....97
Figure 137 : Coupe x=713800m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or....97
Figure 138 : Coupe x=714310m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, résiduelle du champ magnétique....98
Figure 139 : Coupe x=714310m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or....98
Figure 140 : Coupe x=714460m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, résiduelle du champ magnétique....99
Figure 141 : Coupe x=714460m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or....99

1 INTRODUCTION

Le site appartenant à la minière Osisko est situé au sud de la ville de Malartic (latitude 48º 7’ 45” N, longitude 78º 7’ 00’’ O), une zone aurifère reconnue de la région de l’Abitibi. Le gisement Canadian Malartic a été exploité une première fois après sa découverte en 1926. De 1935 à 1965, 9,93 Mt de minerai ont ainsi été exploités, soit 1,076 millions d’onces d’or. Durant cette première phase d’exploitation, l’extraction a alors été limitée aux zones minéralisées à haute teneur. Ces zones minéralisées étaient recouvertes d’une large enveloppe minéralisée de basse teneur qui n’a pas été exploitée durant cette première phase. Après la fermeture de la mine en 1965, la propriété a été rachetée à plusieurs reprises, notamment par Minéraux Lac qui exploita de l’or sur deux petites fosses de 1981 à 1983 et conduit une vaste campagne d’exploration. C’est néanmoins avec le rachat de la propriété par Osisko en 2004 que l’exploitation de la mine fut réellement relancée (Wares & Prud’homme, 2013).

C’est la recherche d’un gisement d’or à basse teneur et fort tonnage qui a mené la corporation Osisko à considérer l’acquisition de cette propriété dont le potentiel d’exploitation avait alors été évalué comme faible par une grande partie de l’industrie. Une stratégie bien ficelée a toutefois permis à Osisko de rendre le projet viable et de débuter ses activités de production commerciale en 2011 (Wares & Prud’homme, 2013). Selon le site même de la minière, le sous-sol du site renfermerait 9,37 millions d’onces en réserves prouvées et probables, et 11,10 millions d’onces en ressources globales mesurées et indiquées. Selon les réserves actuelles estimées, une durée d'exploitation de 16 ans est prévue. (Osisko, 2014)

Comme travaux de mise en valeur, la corporation a réalisé environ 1 700 sondages entre 2005 et 2008. Une grande partie de ces sondages ont été orientés à l’aide de sondes magnétiques. Les valeurs du champ total en forage ont été enregistrées et conservées jusqu’à maintenant. Lors de la dernière réunion du *Canada Mining Innovation Council- Exploration Innovation Consortium (CMIC-EIC)*, du 9 au 11 décembre 2013, il a été proposé que ces données soient réutilisées à des fins de cartographie. Cette idée a été mise de l’avant et la première étape de traitement des données fait l’objet de ce rapport.

Jusqu’à maintenant, les différents levés géophysiques effectués sur le site se sont soldés par un échec, la minéralisation du gisement ne semblant pas avoir de signature géophysique facilement détectable. Étant donné l’abondance et la disponibilité des données magnétiques en forage, il demeurait intéressant de vérifier cette avenue.

Un bémol quant à la précision et l’exactitude de ces données doit toutefois être souligné dès maintenant. En effet, étant donné que l’objectif premier visé lors de l’enregistrement de ces données n’était pas l’acquisition en soi de celles-ci, il est permis de douter de leur qualité. Aucune information quant aux conditions dans lesquelles celles-ci ont été recueillies n’est disponible.

2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION

2.1 GISEMENT ET MINÉRALISATION

Le gisement d'or exploité par mine Canadian Malartic (Figure 1) est un gisement à basse teneur et fort tonnage qui résulterait probablement d'un système magmatique-hydrothermal associé à des intrusions porphyriques à proximité de la Faille Larder Lake-Cadillac (Jébrak & Beaulieu, 2007). La minéralisation du gisement d'or est principalement encaissée dans les roches métasédimentaires du Groupe de Pontiac (30%), ainsi que dans des intrusions monzodioritiques à granodioritiques porphyriques à l'intérieur des roches sédimentaires clastiques altérées du Groupe de Pontiac (70 %) au sud de la Zone de faille Larder Lake-Cadillac (Wares & Prud'homme, 2013). Les roches sédimentaires clastiques altérées du Groupe de Pontiac sont principalement composées de grauwacke turbiditique, mudstone et un peu de siltstone.

Les roches minéralisées dans lesquelles se trouve l'or natif microscopique, rarement visible (15 microns en moyenne), contiennent de la calcite et des traces de pyrite disséminée (1 à 3 %) sous forme de chalcopyrite, sphalérite, molybdénite et tellurures. La minéralisation contient également des traces de bismuth, de tellure, de tungstène et localement de molybdène. Ces minéralisations sont majoritairement dans des roches métasédimentaires (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2013).

Trois grands types de brèches ont été mis en évidence, soit des brèches de type calcite-biotite-quartz, des brèches de silice, et des brèches de carbonates-feldspath-biotite. Ce sont les veines de type calcite-biotite-quartz qui contiendrait la plus grande teneur en or (Jébrak & Beaulieu, 2007). La géométrie des différentes intrusions felsiques, quant à elle, est variable (dykes, filons-couches, lentilles discontinues, petits stocks isolés). (Wares & Prud'homme, 2013)

Une zone de faille composée de métavolcanites mafiques-ultramafiques du Groupe de Piché est couverte par la partie centre nord de la propriété. Cette zone contient également des intrusions porphyriques, ainsi que des roches métasédimentaires du Groupe de Cadillac (nord de la zone de faille). (Wares & Prud'homme, 2013)

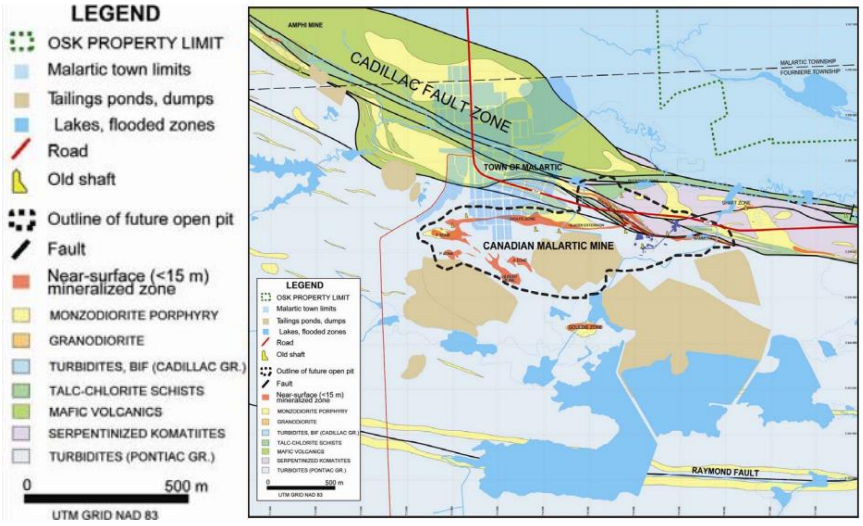

Figure 1 : Carte géologique du site Canadian Malartic (Wares & Prud'homme, 2013) – la légende a été recopiée en format agrandi pour faciliter la lecture

2.2 LEVÉS GÉOPHYSIQUES

Plusieurs levés géophysiques au sol ont été réalisés par Minéraux Lac (1980-1988) alors qu'elle était encore propriétaire du site. Des levés magnétiques et électromagnétiques à boucle horizontale, des levés électromagnétiques VLF, ainsi que des levés de polarisation provoquée pôle-dipôle et dipôle-dipôle. Aucune signature géophysique particulière n'a alors pu être corrélée aux zones minéralisées. Suite à ces résultats décevants, les techniques géophysiques ont été délaissées par Minéraux Lac, laquelle a préféré concentrer ses efforts sur d'autres techniques d'exploration donnant plus de résultats. (Wares & Prud'homme, 2013).

Après le rachat de la propriété par Osisko, une seconde tentative de caractérisation du sol à l'aide de techniques géophysiques a été mise de l'avant. Un levé géophysique aéroporté visant, notamment, à recueillir des données sur le champ magnétique total a été réalisé en 2006. Cette deuxième tentative fut également considérée comme un échec. En effet, il y a très peu de contraste magnétique entre la roche encaissante (roches métasédimentaires et sédimentaires clastiques altérées) et la minéralisation dans laquelle se trouve l'or (calcite, traces de pyrite disséminée) puisque cette dernière est très peu magnétique. À titre indicatif, le Tableau 1 présente les susceptibilités types pour la roche encaissante et de la minéralisation du gisement et le Tableau 2 présente les susceptibilités types de minéraux qui présentent généralement une anomalie magnétique détectable. Il est à noter que la pyrite est présente en très faible proportion dans la minéralisation et que la susceptibilité associée est donc moindre. Le complexe minéralogique associé au gisement d'or ne contient pas de pyrrhotite et contient très peu de magnétite. (Wares & Prud'homme, 2013).

Tableau 1 : Susceptibilités types pour la roche encaissante et de la minéralisation du gisement (Giroux, Notes de cours GML6201A - Proprietes physiques, 2013) (Giroux, Notes de cours GML8201 - Techniques géophysiques de proche, 2008)

	Type	K [Si]
Roche encaissante	Métasédiments	$10^{-4} – 10^{-2}$
	Sédiments	$10^{-5} – 10^{-3}$
Minéralisation	Calcite	$-1x10^{-6} – -1x10^{-5}$
	Pyrrite	$5x10^{-5} – 5x10^{-3}$

Tableau 2 : Susceptibilités types de minéraux qui présentent généralement une anomalie magnétique détectable (Giroux, Notes de cours GML6201A - Proprietes physiques, 2013)

Type	K [Si]
Pyrrhotite	0.001 – 6.0
Magnétite	1.2 – 19.2

Il est à noter que des données radiométriques et électromagnétiques en domaine temporel ont également été recueillies lors de ce levé, sans plus de résultats.

Ainsi, la corporation a conclu dans un rapport de 2013 que le gisement ne pouvait « […] être décelé par des levés magnétiques, électromagnétiques ou de polarisation provoquée au sol et [qu'il était] invisible sur les levés géophysiques aéroportés […] ». Elle laisse la porte entre ouverte pour la radiométrie qui, en principe, devrait permettre de révéler une signature en potassium du gisement, mais cela n'a pas pu être démontré dû aux bruits occasionnés sur la lecture par les parcs à résidus. (Wares & Prud'homme, 2013)

2.3 SONDAGES

L'histoire du site minier est caractérisée par trois phases de forages. Une première, de 1928 à 1963, où plus de 5 000 sondages en surface et sous terre ont été réalisés par Canadian Malartic Mines Ltd, puis une seconde entre 1981 et 1985 où 502 sondages ont été complétés par Minerais Lac et ont permis de mieux caractériser le sous-sol peu profond. La troisième phase, quant à elle, fut réalisée par Osisko de 2005 à 2008. Durant cette phase, environ 1 700 sondages ont été réalisés, ce qui représente 386 760 mètres de carottes recueillis. Sur les 1700 sondages réalisés, une grande partie (plus de 1300) a été orientée à l'aide de sondes magnétiques. Les forages réalisés en durant l'année 2006 et à l'hiver 2006-2007 et ceux réalisés en 2007 (330 000 mètres) ont respectivement été forés selon un espacement nominal de 60 m x 60 m et de 30 m x 30 m (BBA, 2012). Un aperçu général du nombre de forages réalisés par année est présenté au Tableau 3.

La zone aurifère délimitée par les travaux de forage s'étale sur 1900 mètres x 350 mètres et elle a une épaisseur variant de 40 à 270 mètres, la profondeur verticale maximale étant de 320 mètres (Osisko, 2014).

Tableau 3 : Nombre de fichiers de forage disponible par numéro de série (année)

	Nombre de fichiers de forage
CM05	42
CM06	287
CM07	786
CM08	292
CM09	174
CM10	91
CM11	1
Total	**1 673**

3 CONCEPTS THÉORIQUES

3.1 MAGNÉTISME

Pour un système à l'équilibre, l'ensemble des groupements atomiques doit tendre vers un potentiel de plus basse énergie et il en va de même pour la réponse du moment magnétique global de l'ensemble d'un corps. Le potentiel magnétostatique d'un corps est donné par l'intégrale de volume de l'intensité d'aimantation M par le gradient du potentiel (expression (1)).

$$W = -\int_V M \bullet \nabla\left({}^{1}/_{r}\right) dv \tag{1}$$

Lorsqu'un agent extérieur génère une perturbation magnétique du système par l'ajout d'un champ magnétique externe, le corps utilise diverses configurations électroniques de ses groupements atomiques pour pallier au problème du retour à l'énergie minimum du système. Le champ magnétique terrestre et la proximité d'un autre corps magnétique sont des exemples de perturbations potentielles.

Lors d'une lecture magnétométrique de l'anomalie d'un corps, ces facteurs doivent être pris en compte puisqu'ils influenceront la réponse mesurée. Notamment, l'intensité et l'inclinaison du champ magnétique terrestre, l'orientation du corps dans le sol, la profondeur d'enfouissement et l'extension latérale de ce dernier doivent être pris en considération. (Chouteau, 2013)

Contraste de susceptibilité magnétique

Un corps placé dans le champ magnétique de la terre acquiert une magnétisation induite proportionnelle au champ inducteur, le facteur de proportionnalité est fonction de la susceptibilité du corps en question. Ce qui sera mesuré lors d'un levé magnétique, c'est le champ total donné par la somme du champ terrestre, de la magnétisation induite et de la magnétisation rémanente. (Chouteau, 2013)

$$\mathbf{H}_T = \mathbf{H} + 4\pi k\mathbf{H} + \mathbf{M}_R \tag{2}$$

Où B = induction magnétique
I = intensité de la magnétisation
k = susceptibilité magnétique du corps

Pour un corps dans le vide, la contribution de la magnétisation induite pourrait en principe être isolée. Ce n'est pas le cas pour un corps qui n'est pas dans le vide puisque le milieu qui l'entoure dispose aussi d'une susceptibilité qui lui est propre et il aura donc lui aussi une réponse magnétique. C'est la somme des différentes contributions qui sera perçue lors d'un levé magnétique, soit le contraste de susceptibilité entre le corps et le milieu environnant. Le succès d'un levé magnétique repose donc sur la différence de susceptibilité entre le corps recherché, un gisement par exemple, et la roche encaissante.

Inclinaison du champ magnétique terrestre

Pour minimiser son énergie, le corps se polarisera dans la direction du champ magnétique terrestre. Ainsi, la forme du champ local mesuré sera fonction de l'inclinaison des lignes de champ qui sortent du corps, lesquels sont fonction de l'inclinaison du champ magnétique terrestre. Par exemple, une inclinaison de 0° du champ terrestre produira une anomalie symétrique négative pour un dyke typique, alors qu'une inclinaison de 90° produira une anomalie symétrique positive. (Chouteau, 2013)

Variation du pendage

Le même principe s'applique pour la variation du pendage d'un corps que pour la variation de l'inclinaison du champ magnétique terrestre. Ce qui prédomine, en fin de compte, c'est la direction de la polarisation du corps et sa forme. Si l'orientation du corps est modifiée plutôt que la direction du champ, la polarisation demeurera dans le même axe, mais la longueur de cet axe et l'environnement immédiat sera modifié. (Chouteau, 2013)

Profondeur du corps

La profondeur du corps influence l'amplitude de l'anomalie mesurée et la largeur à mi-hauteur de celle-ci. De façon générale, l'anomalie sera d'autant plus étroite et d'amplitude d'autant plus importante pour un corps peu profond. Des règles simples, développées à partir des modèles élaborés pour les anomalies gravimétriques et converties à l'aide de la relation de poisson pour être appliquées aux anomalies magnétiques, permettent d'approximer la profondeur d'un corps à partir de la largeur à mi-hauteur de son anomalie. (Chouteau, 2013)

3.2 UTILISATION DE FILTRES

L'application de filtres et certaines manipulations mathématiques peuvent être utilisées pour faciliter l'étude des structures locales du terrain. Notamment, un prolongement vers le haut de l'anomalie permet d'isoler les sources principales par l'atténuation des hautes fréquences, la résultante de cette manipulation étant la régionale du champ magnétique. L'application d'un gradient vertical permet, quant à elle, de mieux délimiter les structures d'intérêts.

3.2.1 OBTENTION DE LA RÉGIONALE PAR UN PROLONGEMENT VERS LE HAUT

Les variations régionales, soit des variations du champ magnétique sur de grandes distances, correspondent à des basses fréquences. À l'opposé, les perturbations locales du champ magnétique correspondent à des fréquences élevées. Il est donc possible d'isoler l'une ou l'autre de ces perturbations en appliquant différents filtres dans le domaine des fréquences. Un prolongement vers le haut permet d'atténuer les hautes fréquences, accentuant ainsi les basses fréquences. En effet, soit $\mathcal{F}(\mathrm{f_x}, \mathrm{f_y})$ la transformée de Fourier des données magnétiques et $\mathrm{P}(\mathrm{f_x}, \mathrm{f_y})$ le prolongement vers le haut d'une hauteur z, la régionale sera obtenue par la multiplication de ces deux termes dans l'espace des fréquences de Fourier où $\mathrm{P}(\mathrm{f_x}, \mathrm{f_y})$ est donné par l'expression (3) et $\mathcal{F}(\mathrm{f_x}, \mathrm{f_y})$ est donné par l'expression (4).

$$\mathrm{P}(\mathrm{f_x}, \mathrm{f_y}) = \mathrm{e}^{-2\pi \mathrm{i} z \sqrt{\mathrm{f_x^2} + \mathrm{f_y^2}}} \tag{3}$$

$$\mathcal{F}(\mathrm{f_x}, \mathrm{f_y}) = \sum_{x=0}^{N_x - 1} \sum_{y=0}^{N_y - 1} f(x, y)\, e^{-i2\pi\left(\frac{f_x x}{N_x} + \frac{f_y y}{N_y}\right)} \tag{4}$$

Ainsi, l'exponentielle décroissante de l'expression (3) sera d'autant plus rapide et atténuera davantage les hautes fréquences avec un z élevé. La Figure 2 montre la superposition d'un spectre de Fourier et d'un filtre de type prolongement vers le haut (gauche), ainsi que la résultante (droite) de la multiplication de

ces deux composantes. Il est possible de constater que les hautes fréquences ont effectivement été atténuées relativement aux basses fréquences.

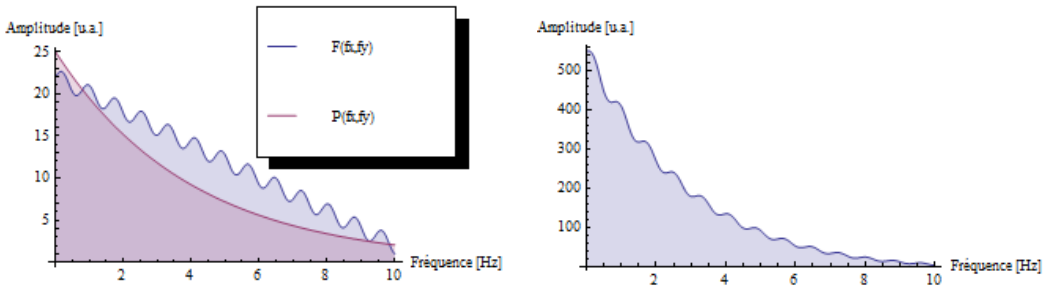

Figure 2: Spectre de Fourier arbitraire avant (gauche) et après (droite) prolongement vers le haut (Mathematica)

3.2.1 OBTENTION DE LA RÉGIONALE PAR D'AUTRES TECHNIQUES

Le prolongement vers le haut est une technique communément utilisée pour l'obtention de régionale puisqu'elle est conceptuellement significative. Une carte du champ est reproduite «comme si» les mesures avaient été prises en altitude, dressant ainsi un portrait plus grossier des structures. Ce concept perd un peu de son sens pour des données mesurées à l'intérieur d'un volume.

Les valeurs du champ magnétique mesurées à la surface du sol sont l'expression de la somme des contributions dans le sol, en accord avec le théorème de Gauss. Ainsi, une transformation qui implique une translation du point observation d'un point à l'extérieur du volume vers un second point également à l'extérieur du volume est physiquement acceptable. Lorsque le point d'observation est à l'intérieur même du volume étudié, la relation n'est plus linéaire. Le concept de prolongement vers le haut est alors moins justifié. Si un prolongement vers le haut est néanmoins appliqué, il devrait, au minimum, être de l'ordre de grandeur de la profondeur de la dernière donnée afin de s'assurer que celle-ci soit prolongée à l'extérieur du volume. Dans le cas présent, étant donnée la profondeur importante des données, le prolongement vers le haut donne alors un résultat équivalent à la soustraction d'une simple tendance linéaire.

Dans tous les cas, l'idée reste d'isoler les hautes fréquences des plus basses. Différents filtres passe-bas ou passe-haut permettent d'arriver à cette fin. La décomposition par ondelettes est aussi une option intéressante.

3.2.2 GRADIENT DU CHAMP MAGNÉTIQUE

Pour isoler les sources superficielles de champ des sources principales et ainsi mieux visualiser les contours des anomalies étudiées, un gradient vertical des variations du champ magnétique peut être utilisé. La méthode de calcul à la base de ce gradient est l'application de la dérivée sur la transformée de Fourier discrète des anomalies calculées (expression (5)).

$$\partial_z g_{[z]}(x,y) = \frac{1}{N}\sum_{f=0}^{N-1} \partial_z \left[G(f) e^{2i\pi z \frac{f}{N}} \right] = \frac{1}{N}\sum_{f=0}^{N-1} (2i\pi \frac{f}{N}) \left[G(f) e^{2i\pi z \frac{f}{N}} \right] \quad (5)$$

Avec $$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$$

Ainsi, comme les sources superficielles présentent des fréquences plus élevées que la régionale, celles-ci seront d'autant plus accentuées par l'application d'une dérivée, conformément à l'expression (5), et l'importance de la régionale apparaîtra comme moindre. Toutefois, les fréquences plus élevées encore que le sont les sources ponctuelles seront également amplifiées par cette transformation, ce qui n'est pas souhaitable puisque ces manifestations sont souvent associées à du bruit. L'application d'un léger prolongement vers le haut permet d'atténuer ces hautes fréquences sans éliminer les fréquences d'intérêts. Il est à noter que l'application d'une dérivée verticale dans le domaine spatial agit comme un filtre passe-haut sans phase. (Chouteau, 2013)

Notons aussi que, étant donné que l'application d'une dérivée sur une matrice cause la troncation de certaines des données relatives aux extrémités de la fonction représentative, il est nécessaire de générer une extension des données de base pour ne pas perdre d'information sur le signal principal avant l'application du filtre.

3.3 KRIGEAGE

Le krigeage une méthode d'estimation linéaire recherchant le minimum de variance. Elle tient compte de la distance entre les données et le point d'estimation, et des distances entre les données deux à deux. L'outil principal de cette méthode est le variogramme, une fonction mathématique décrivant l'influence d'une donnée sur la réponse calculée à une position spatiale donnée. Le variogramme est défini par une portée (longueur d'influence) et un plateau (écart-type). Un variogramme expérimental est généralement obtenu à partir des données disponibles, suite à quoi un variogramme théorique est obtenu par ajustement au variogramme expérimental. Deux types de krigeages sont majoritairement utilisés, soit le krigeage ordinaire et le krigeage simple. Le premier est utilisé lorsque la moyenne du processus est inconnue. (Marcotte, Notes de cours GML6402A, 2013)

3.4 APPAREIL DE SONDAGES MAGNÉTIQUES ET FORAGES

Les sondes magnétiques permettent la mesure des trois composantes du champ, de sorte que l'orientation de la sonde peut être obtenue. En effet, pour un champ magnétique constant (champ secondaire nul), le champ magnétique vectoriel peut être associé directement à une position terrestre. Ainsi, l'utilisation d'une sonde magnétique permet de guider l'orientation du trou de forage. Lorsque des sources locales influencent le champ (ajout d'un champ magnétique secondaire), des variations plus brusques du champ magnétique sont alors enregistrées. Dans ces zones, l'orientation calculée de la sonde est moins précise. (Marcotte, Géostatistique et géologie minières)

4 TRAITEMENT DES DONNÉES

Une sous-section explicative de l'origine des données, un constat de l'état des données brutes, le détail des différentes corrections, les étapes de krigeage des données sur un volume 3D, ainsi que les étapes de soustraction de la régionale sont présentés dans cette section.

4.1 ORIGINE DES DONNÉES

Les données utilisées dans le cadre de ce projet sont des données enregistrées lors de forages. Une grande partie des forages creusées par Canadian Malartic ont, en effet, été orientés à l'aide de sondes magnétiques de type «Flexit tool» (Belzile & Gignac, 2010)

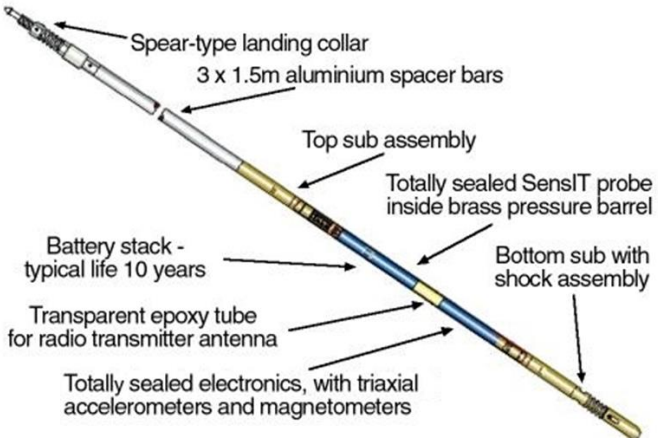

Figure 3 : Schéma de l'appareil SensIT de Flexit (GeoMEM, 2014)

Les sondages sur le site de Canadian Marlartic ont été réalisés à l'aide de différentes techniques au cours du projet. Les données de déviation-pendage des premiers sondages ont été obtenues par des tests acides à environ 100 m d'intervalle. Le contacteur en charge des forages a, par la suite, acheté un appareil «Flexit tool» pour les mesures de déviation de forages (Belzile & Gignac, 2010). L'appareil est considéré obsolète depuis 2008, mais de la documentation et un support en ligne sont encore dispensés par la compagnie GeoMEM qui avait racheté les droits de l'appareil. (GeoMEM, 2014)

La sonde SensIT de Flexit (Figure 3) est une unité autonome comprenant, entre autre, trois accéléromètres montés orthogonalement et trois magnétomètres également disposés orthogonalement, ainsi qu'un capteur de température. La sonde mesure simultanément l'azimut (± 0,3 °), l'inclinaison (± 0,2 °), le champ magnétique total (± 50 nT), l'inclinaison magnétique (± 0,3 °) et la température du trou (± 0,2 °). Les données de la sonde sont directement transférées à une unité de collecte de données mobile. (Belzile & Gignac, 2010)

Il est bon de souligner qu'aucune information quant aux conditions dans lesquelles les données ont été recueillies n'est disponible. L'objectif premier visé lors de l'enregistrement de ces données n'étant pas l'acquisition en soi de celles-ci, il est permis de douter de leur qualité. A titre comparatif, les appareils de mesures modernes du champ magnétique ont une sensibilité de l'ordre de 0.01 nT (Chouteau, 2013).

4.2 ÉTAT DES DONNÉES BRUTES

Les données brutes étaient réparties dans 1 673 fichiers Excel, chaque fichier correspondant à un forage donné comprenant un peu moins qu'une centaine de données en moyenne. Le format d'écriture étant parfois différent d'une série de forage à l'autre, un travail de familiarisation a d'abord été effectué afin d'importer adéquatement l'ensemble des données dans un format plus malléable. Les données ont ensuite été importées vers le logiciel Matlab sous un format «.mat». Le Tableau 4 présente les statistiques principales en ce qui a trait l'état des données brutes. Il est possible de constater que sur les 1 673 fichiers Excel disponibles, seulement 1 353 contenaient des données magnétiques valides et que c'est la série CM07 qui en contenait le plus avec 46 855 données magnétiques réparties dans 678 forages. Sur l'ensemble des séries disponibles, un forage contient en moyenne 72 données magnétiques réparties sur une plage de profondeur allant de 16m à 241m en moyenne. Les valeurs du champ magnétique, quant à elles, s'étalent en moyenne de 30 618nT à 98 795nT, la valeur la plus élevée étant de 112 483nT et la valeur la plus faible étant de 14 813nT (voir Figure 5 pour la distribution du champ magnétique). Étant donné que le contexte géologique de la région ne laisse pas supposer de fortes variations du champ magnétique local, les variations autour du champ régional ne devraient pas dépasser quelques centaines de nano teslas. Il apparait évident qu'un travail vis-à-vis la sélection des données doit donc être réalisé dans un premier temps. Il en est de même pour la distribution spatiale des données. Alors que la majorité des données sont concentrées dans un périmètre restreint, quelques forages solitaires sont positionnés en marge de cette zone dense (voir Figure 6). Pour fin de comparaison visuelle, la Figure 4 présente le champ magnétique en surface des données brutes. Les différentes corrections appliquées et les résultats intermédiaires font l'objet des sections suivantes.

Tableau 4 : Statistiques pour les données brutes (levé magnétique en forage)

	Nombre de forage	Nombre de données	Distribution des données par forage (moyenne)			Valeurs du champ magnétique	
			Nombre	Début [m]	Fin [m]	Minimum [nT]	Maximum [nT]
CM05	25	2 473	99	13	308	44 628	112 483
CM06	255	20 651	81	12	256	14 813	102 537
CM07	678	46 855	69	11	224	16 340	112 424
CM08	256	16 866	66	19	250	25 443	64 508
CM09	139	6 375	46	23	168	51 866	102 021
Moyenne	**271**	**18 644**	**72**	**16**	**241**	**30 618**	**98 795**
Total	**1 353**	**93 220**					

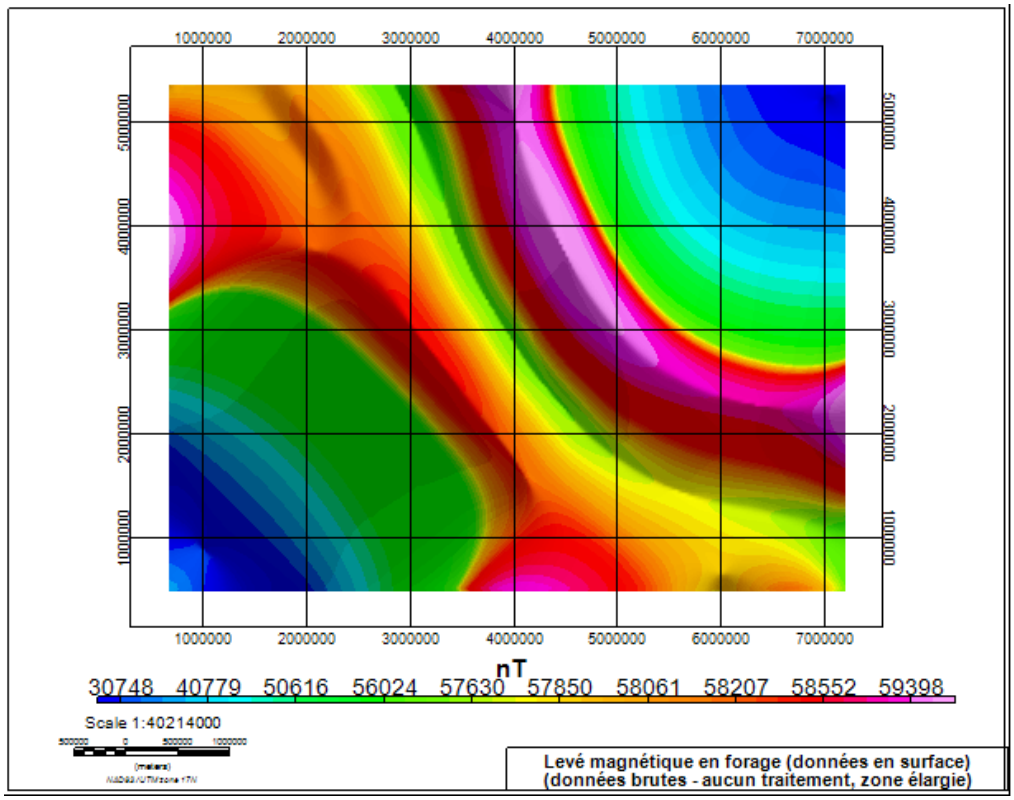

Figure 4 : Champ magnétique en surface des données en forages (sans traitement)

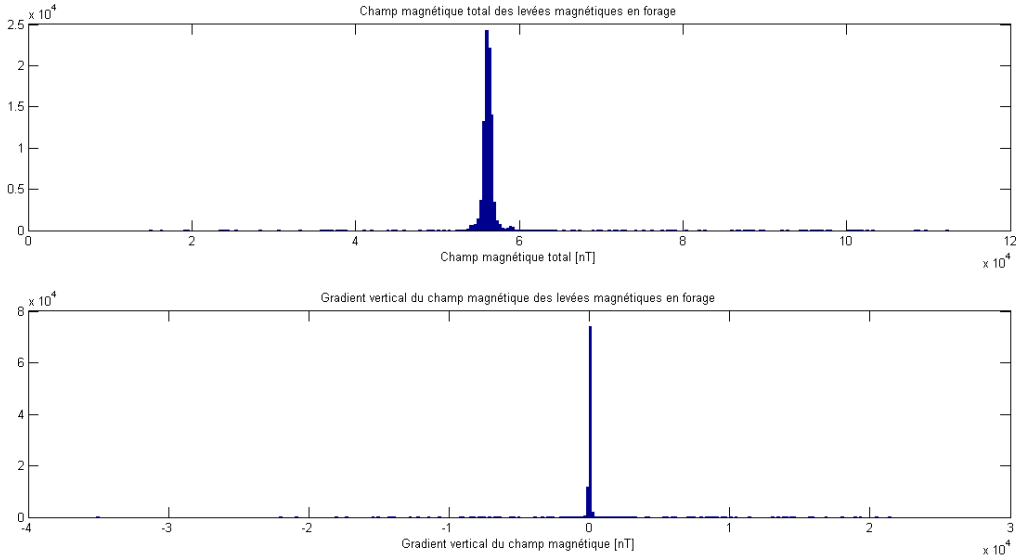

Figure 5 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (sans traitement)

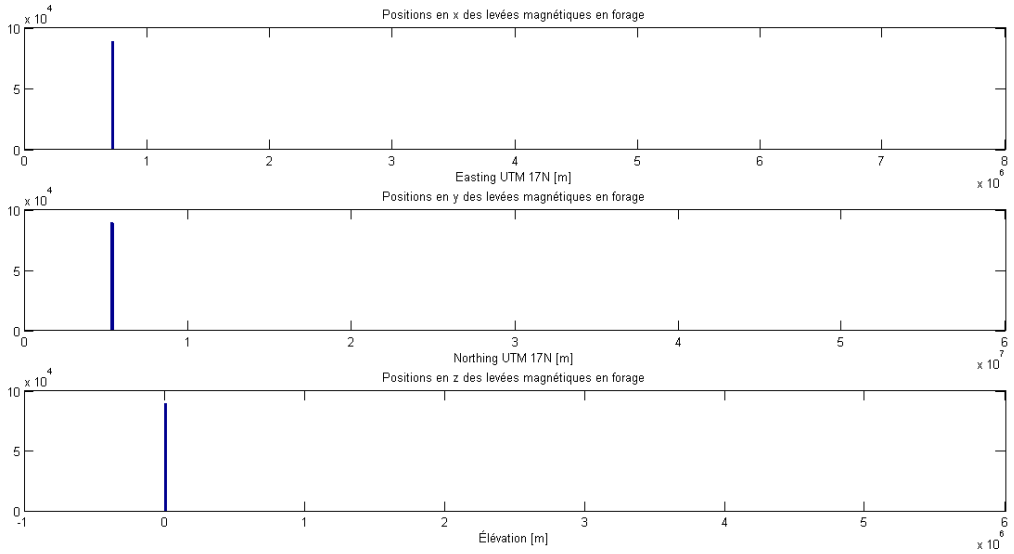

Figure 6 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (sans traitement)

4.3 ÉDITION DES DONNÉES MAGNÉTIQUES

Une première sélection vis-à-vis des forages eux-mêmes a d'abord été réalisée. Les fichiers de forage dont les données magnétiques n'ont pas été enregistrées ou pour lesquels celles-ci sont aberrantes (valeur nulle, NaN), de même que les valeurs extrêmes (>65 000nT, <50 000nT), ont été écartés. Aussi, dû au nombre important de données disponibles et à la densité de celle-ci, il a été proposé de ne conserver que les séries de données pour lesquelles les valeurs du champ magnétique sont connues près de la surface, et ce, dans un dessein d'optimiser la qualité de la représentation finale. Un travail plus local sur chacun des forages restant suite à la première sélection a ensuite été effectué. Pour chacun des forages, les données ponctuelles aberrantes (valeurs extrêmes) ont été soustraites. Les variations très brusques du champ (+500nT) ont été traitées au cas par cas. Lorsqu'il ne s'agissait que d'une donnée solitaire, celle-ci a simplement été éliminée. Dans certains cas, cette opération a permis de déceler des séries de données ayant un comportement erratique ou non monotone sur toute la profondeur. Une portion ou la totalité de la série a alors été écartée, selon que le comportement était généralisé sur une section du forage seulement ou sur l'ensemble. Dans tous les cas, les premières données de chaque forage ont été traitées avec davantage de soin, les sources d'erreur étant plus importantes à cet endroit (délai de stabilisation de l'appareil et bruits environnants à la surface). La présente section présente le détail des corrections appliquées et les résultats intermédiaires.

4.3.1 CORRECTION 1A : DONNÉES ABERRANTES

La première étape consistait à délimiter la zone d'intérêt pour une future inversion 3D des données. La zone ou les données sont plus densément réparties, soit de 713 130m à 715 480m et de 5 334 025m à 5 334 999m, a donc été conservée (Figure 7). La Figure 8 présente la distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forage.

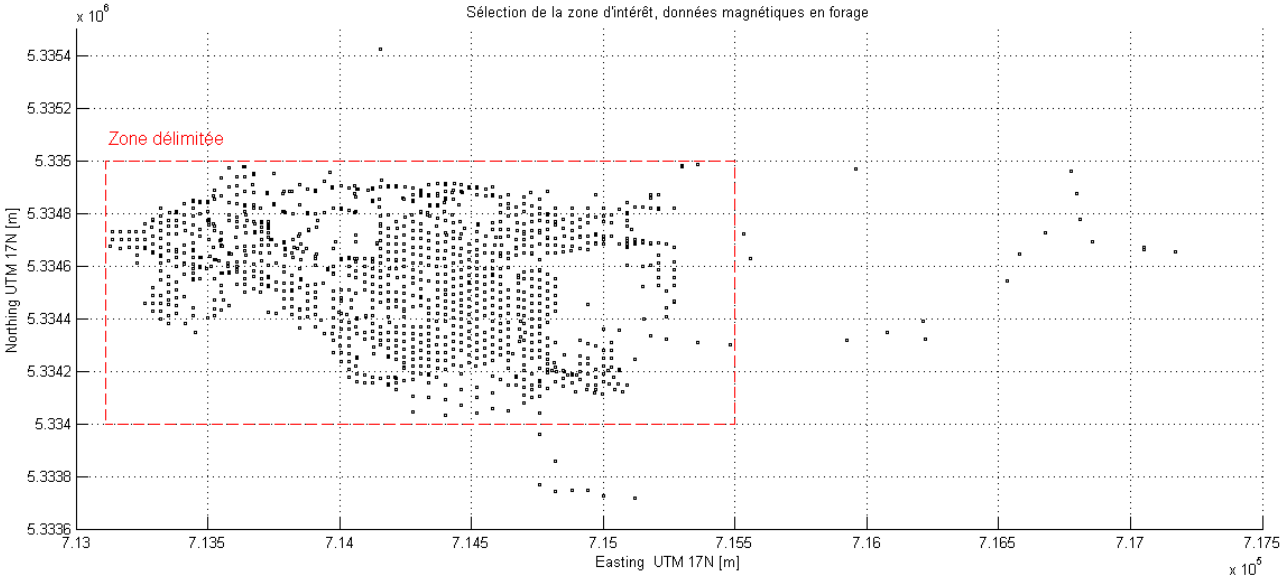

Figure 7 : Délimitation de la zone d'intérêt

Cette première étape de correction a aussi servi à éliminer les données aberrantes, soit les données dont le champ magnétique est anormalement très élevé ou très faible, de même que les données non valides (NaN, nulle). Ces données aberrantes peuvent être attribuables, par exemple, à des problèmes lors de l'enregistrement des mesures, à l'incertitude des instruments de mesure ou encore à un bruit environnant trop important. Si elles sont conservées, elles amoindrissent la qualité générale de la représentation finale et elles peuvent conduire à de fausses interprétations. Le Tableau 5 présente les statistiques principales en ce qui a trait l'état des données après la première correction.

D'abord, il est possible de constater que sur les 1 353 forages conservés initialement, 42 ont été éliminés après cette correction (1 311 forages restants). Ainsi, sur les 93 220 données initiales, 89 936 ont été conservées. Les valeurs du champ magnétique, quant à elles, s'étalent maintenant de 52 187nT à 61 546nT en moyenne, la valeur moyenne étant de 56 264nT avec un écart-type de 219nT (voir Figure 9 pour la distribution du champ magnétique).

Tableau 5 : Statistiques sur la distribution des données par forage après la première correction (levé magnétique en forage)

	Nombre de forage	Nombre de données	Distribution des données par forage (moyenne)		
			Nombre	Début [m]	Fin [m]
CM05	25	2 471	99	13	308
CM06	250	20 240	81	13	255
CM07	651	44 429	68	11	222
CM08	252	16 751	66	18	252
CM09	133	6 045	45	24	168
Moyenne	262	17 987	72	16	241
Total	1 311	89 936			

Tableau 6 : Statistiques sur les valeurs du champ magnétique après la première correction (levé magnétique en forage)

	Valeurs du champ magnétique après la correction 1			
	Moyenne [nT]	**Écart type [nT]**	**Minimum [nT]**	**Maximum [nT]**
CM05	56 407	231	53 399	59 527
CM06	56 577	203	50 635	63 057
CM07	56 042	214	52 710	60 533
CM08	56 116	215	52 326	64 508
CM09	56 177	230	51 866	60 103
Moyenne	56 264	219	52 187	61 546

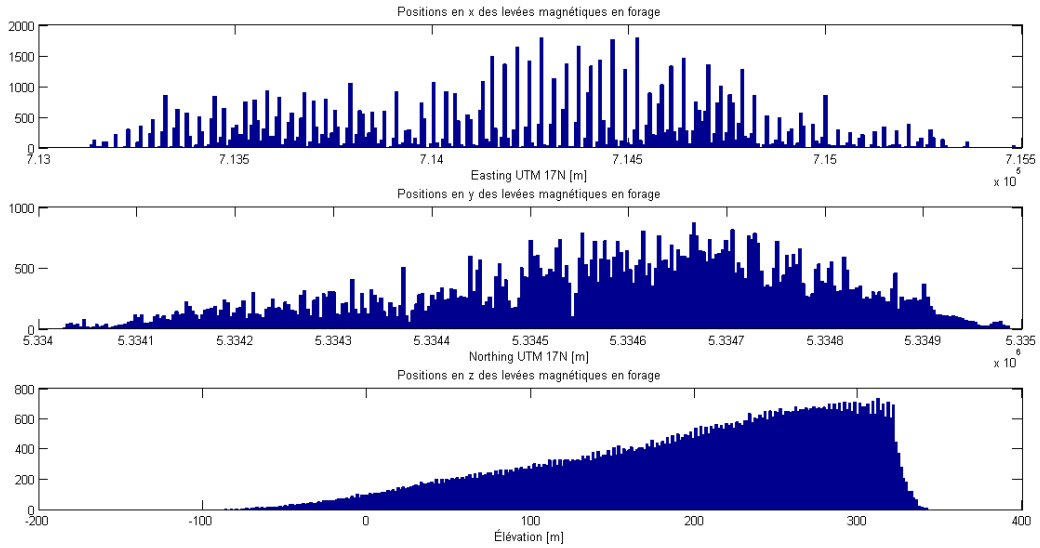

Figure 8 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forage (après une première édition des données – sans nivellement)

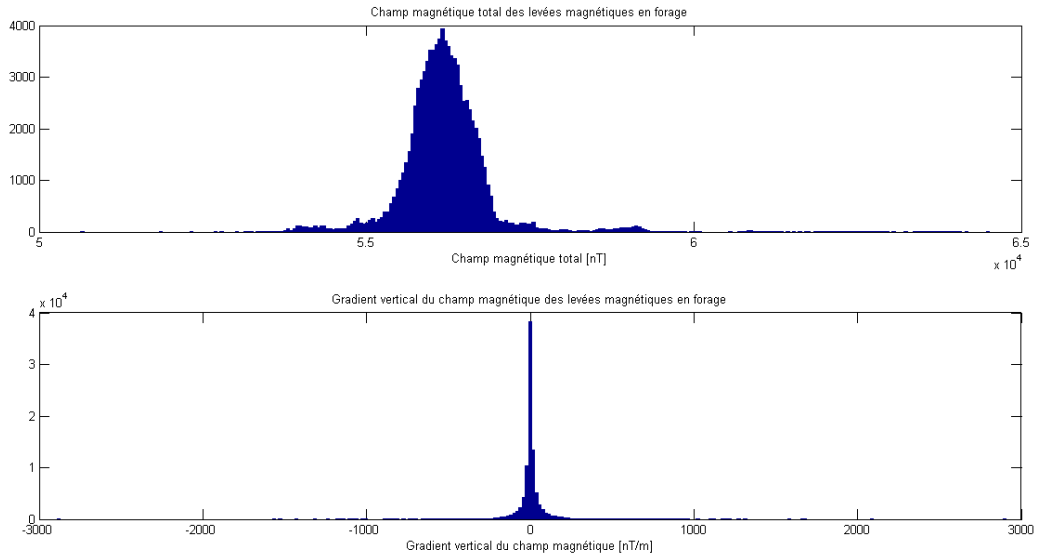

Figure 9 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après une première édition des données – sans nivellement)

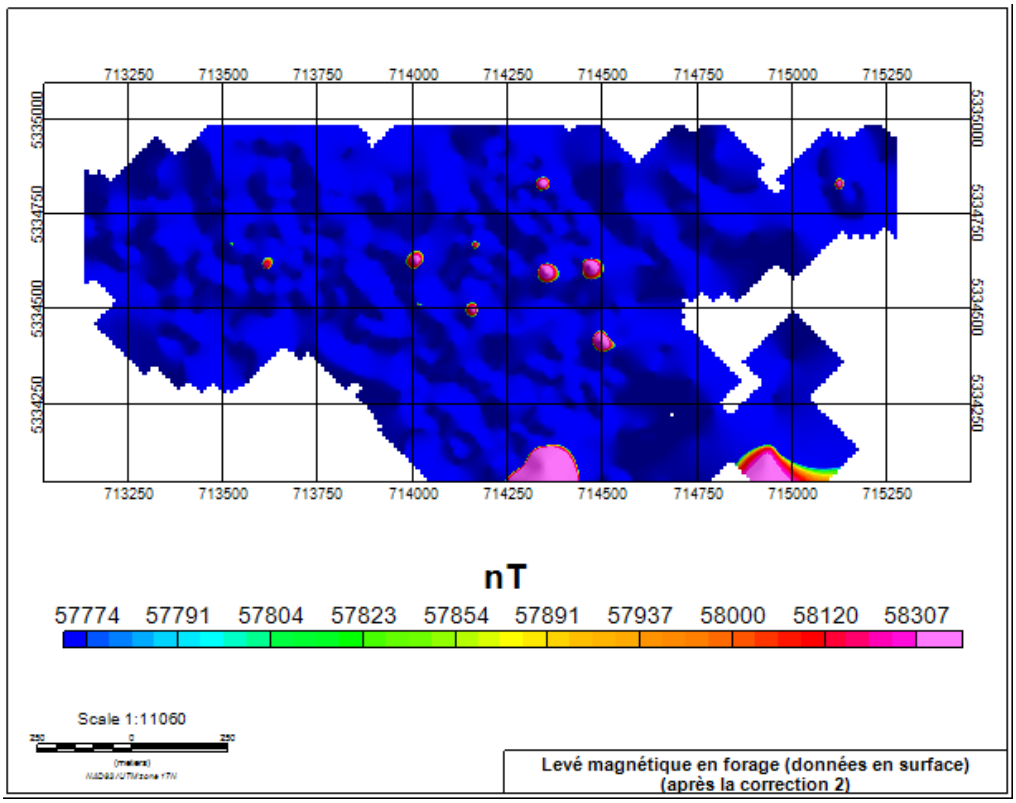

Figure 10 : Champ magnétique en surface des données en forages (après une première édition des données – sans nivellement)

4.3.1 CORRECTION 1B : NIVELLEMENT

Les sources d'erreurs des données provenant de différents forages sont hétérogènes. Les mesures en forages ont été obtenues à des moments et à des endroits différents, de sorte que des sources d'erreur différentes ont pu affecter les différentes séries de données. Aussi, les premières valeurs disponibles des différentes séries de données ne sont pas toutes situées à la même profondeur. Afin d'utiliser conjointement toutes les données, il était donc nécessaire de les ramener à un même niveau de référence. Pour assurer une consistance entre les différentes séries de données, un nivellement des données à l'aide d'un levé magnétique aéroporté de la région a donc été effectué.

Données du levé magnétique aéroporté

Les données magnétiques aéroportées couvrent l'ensemble de la zone d'intérêt délimitée telle qu'illustré à la Figure 11. Il s'agit d'un levé effectué par le *Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles* et datant de 1994.

Dans un premier temps, les données du levé magnétique aéroporté ont été converties du système de coordonnées NAD27-UTM18 vers le système de coordonnées NAD83-UTM17, soit le système de coordonnées utilisé pour les levés magnétiques en forage. Les données du levé magnétique aéroporté ont ensuite été ramenées à la hauteur du sol à l'aide d'un prolongement vers le bas de 50m, soit une hauteur équivalente à l'altitude de vol moyenne pour laquelle les mesures ont été enregistrées dans la zone d'intérêt délimitée (voir Figure 7 pour la distribution des positions). Cette opération a été effectuée à l'aide du logiciel *Oasis Montaj* de *Geosoft*.

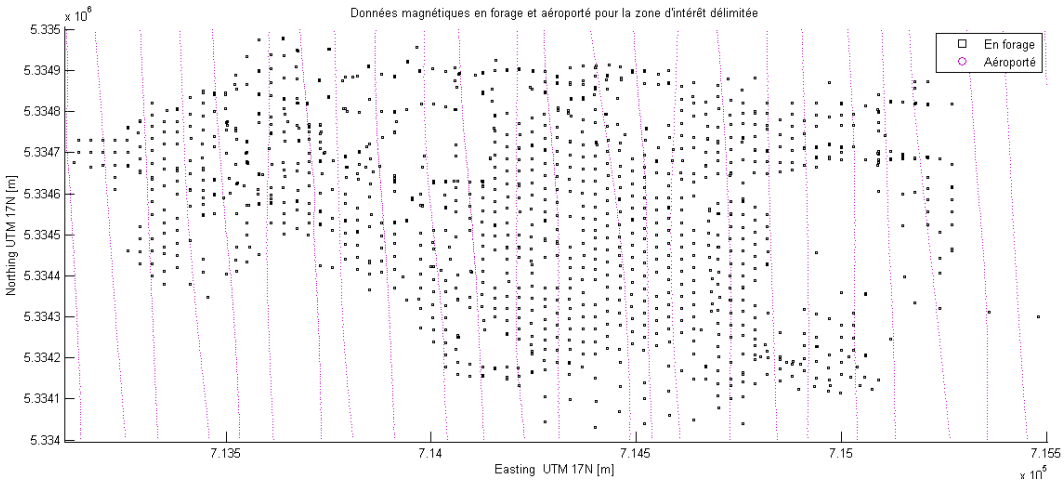

Figure 11 : Position des données magnétiques en forage et aéroportées pour la zone d'intérêt délimitée

Le Tableau 7 présente la valeur moyenne et l'écart-type du champ magnétique pour cette région avant et après le prolongement vers le bas. Le modèle IGRF pour le levé magnétique aéroporté est présenté au Tableau 8. La Figure 12 présente une vue en carte du champ magnétique total après prolongement vers le bas pour le levé magnétique aéroporté. La Figure 13 et la Figure 14 présente respectivement la distribution des données selon la direction et la distribution du champ magnétique.

Tableau 7 : Statistiques pour le levé magnétique aéroporté DP9617

	Levé magnétique aéroporté	
	Champ magnétique brut [nT]	Champ magnétique prolongé vers le bas [nT]
Moyenne	57 987	57 977
Écart-Type	395	441

Tableau 8 : Modèle IGRF pour le levé magnétique aéroporté DP9617 (Ressources naturelles Canada, 2014)

Paramètres latitude 48º 7' 45" N, longitude 78º 7' 00'' O Date : 1994-06-21							
	D [°]	**I [°]**	**H [nT]**	**Z [°]**	**F [°]**	**X [°]**	**Y [°]**
Composantes	-13.585	74.689	15278	55808	57862	14851	-3589
	D [min/a]	**I [min/a]**	**H [nT/a]**	**Z [nT/a]**	**F [nT/a]**	**X [nT/a]**	**Y [nT/a]**
Changement annuel	0.5	-4.4	46	-114	-98	45	-9

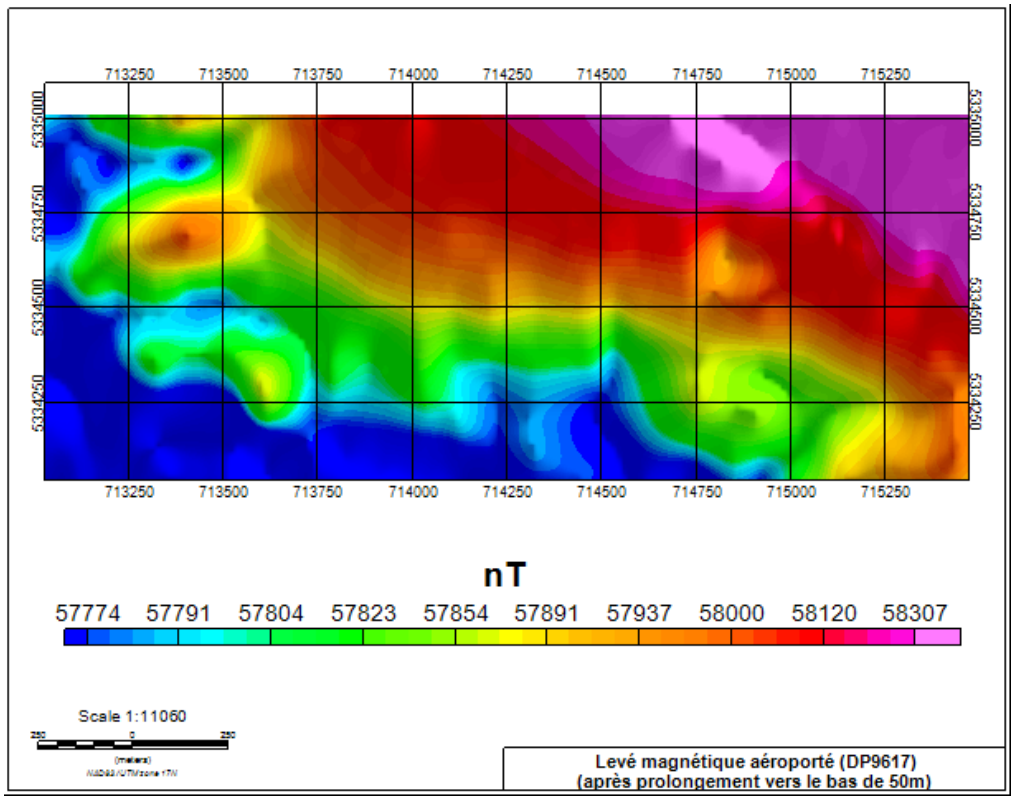

Figure 12 : Champ magnétique total pour le levé magnétique aéroporté DP9617

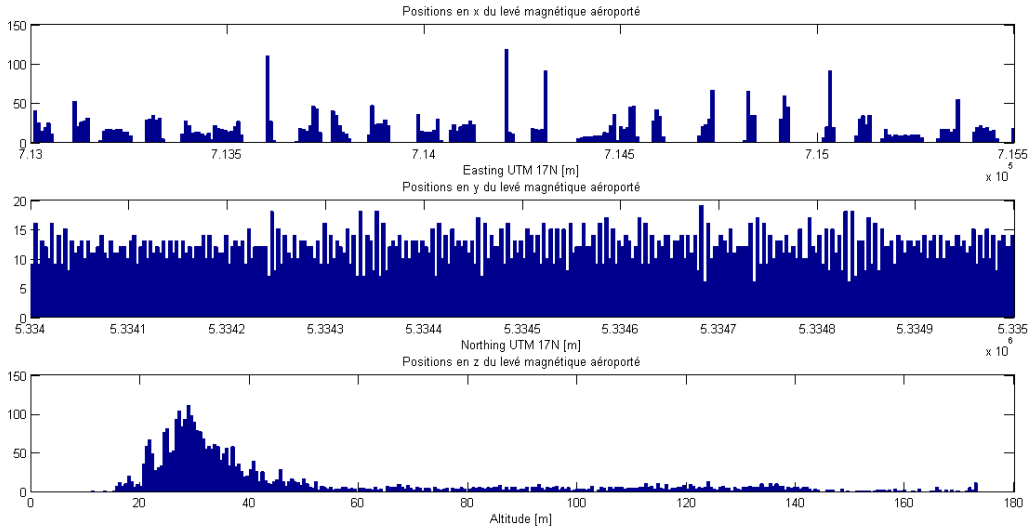

Figure 13 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique aéroporté de référence (DP9617)

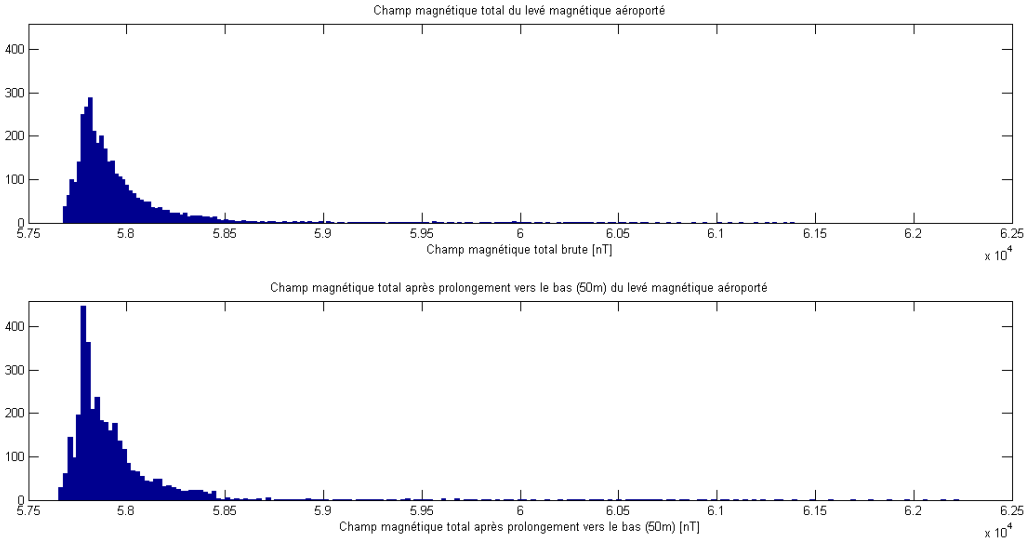

Figure 14 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique aéroporté de référence (DP9617)

Application de la correction

Une fois le levé magnétique aéroporté de référence ramené au niveau du sol (étape 1 à la Figure 15) et la sélection des forages effectuée, soit la correction 1 dans le cas présent, les données ont été nivelées selon le détail illustré à l'étape 3 de la Figure 15.

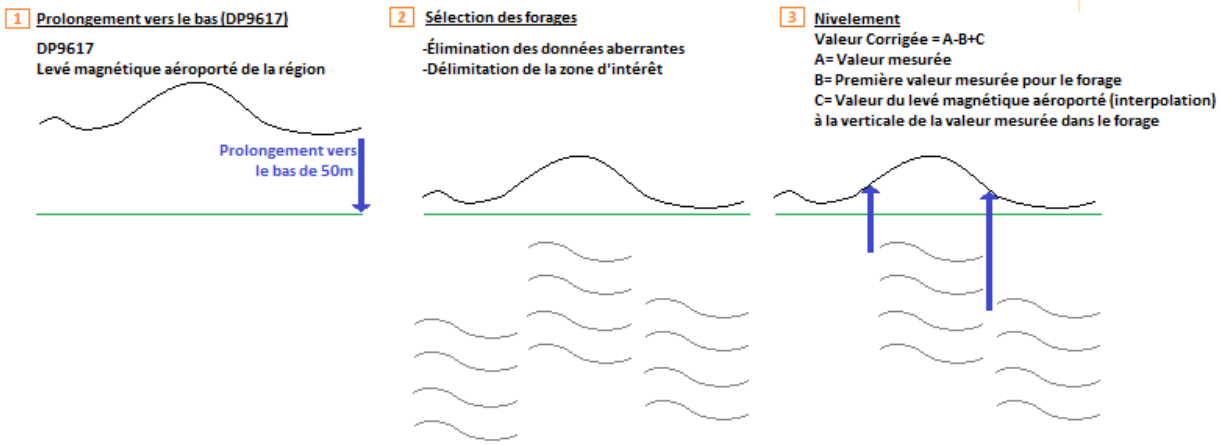

Figure 15 : Schéma des opérations de corrections/nivellement

Conceptuellement, le nivellement a ensuite été effectué en ramenant la première donnée de chaque série à la valeur du levé magnétique aéroporté prolongé à la hauteur du sol, c'est-à-dire en appliquant une correction équivalente à cet écart pour chacune des données de chaque forage. Pour la dernière correction (correction 4), la valeur de la première donnée du forage sera remplacée par la valeur moyenne pour l'ensemble du forage puisque les premières données sont souvent davantage bruitées dû à la présence de nombreuses sources de contaminations externes et à l'erreur intrinsèque de l'appareil (période de stabilisation). Le remplacement n'a pas été effectué en début de correction simplement pour s'assurer que la carte du levé magnétique aéroporté était bien retrouvée en produisant la carte des données de forage en surface après nivellement (Figure 12).

Aussi, il est à noter que les valeurs du levé magnétique aéroporté prolongé vers le bas ont été interpolées par krigeage isotrope pour obtenir des valeurs dont les positions correspondaient aux positions des forages. Des variogrammes isotropes (Figure 16 – Annexe 9.3) et anisotropes (Figure 17 – Annexe 9.3) ont été calculés sur les données du levé magnétique aéroporté. Leurs paramètres respectifs sont présentés au Tableau 9. Cependant, c'est un variogramme isotrope de plus grande portée (valeur proposée par le logiciel Oasis Montaj) que celui calculé qui a finalement été utilisé pour l'interpolation puisque les variogrammes calculés ne permettaient pas de retrouver la carte du champ magnétique du levé magnétique aéroportée avec les données magnétiques en forage de surface (Figure 76).

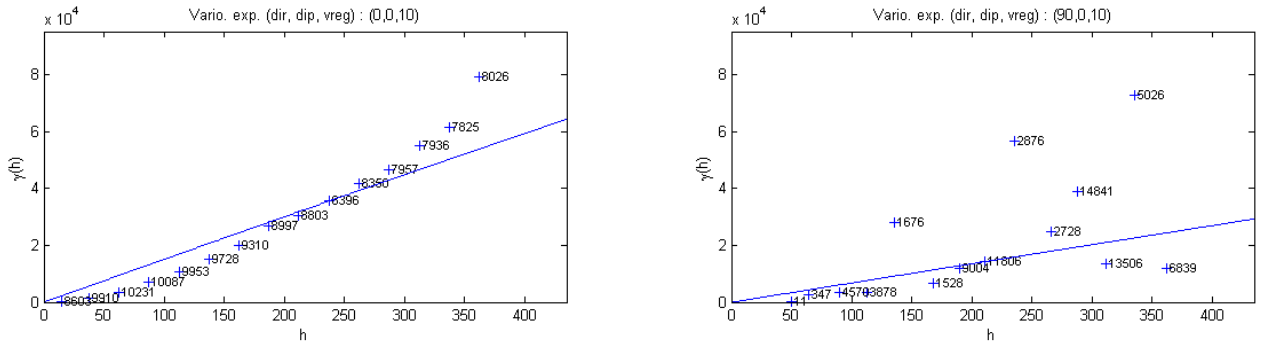

Figure 16 : Variogramme anisotrope du levé magnétique aéroporté DP9617

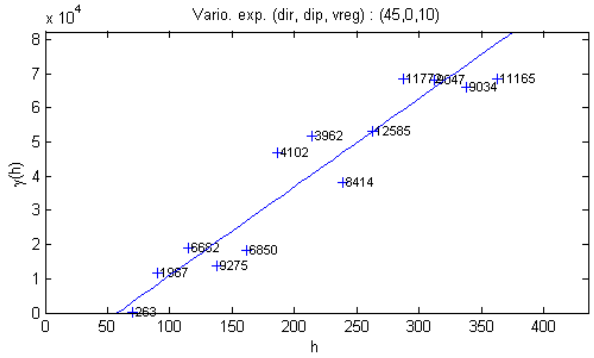

Figure 17 : Variogramme isotrope du levé magnétique aéroporté DP9617

Tableau 9 : Paramètres du variogramme anisotrope et du variogramme isotrope du levé magnétique aéroporté DP9617

	Type	Modèle	Portée x (m)	Portée y (m)	Palier (variance)
Calculé	**Anisotrope**	Sphérique	4127	1851	1.861×10^5
	Isotrope	Sphérique	3448	3448	5.973×10^5
		Effet de pépites	-	-	-1.5×10^4
Retenu	**Isotrope**	Sphérique	$1.845E^7$	$1.845E^7$	1.707×10^9

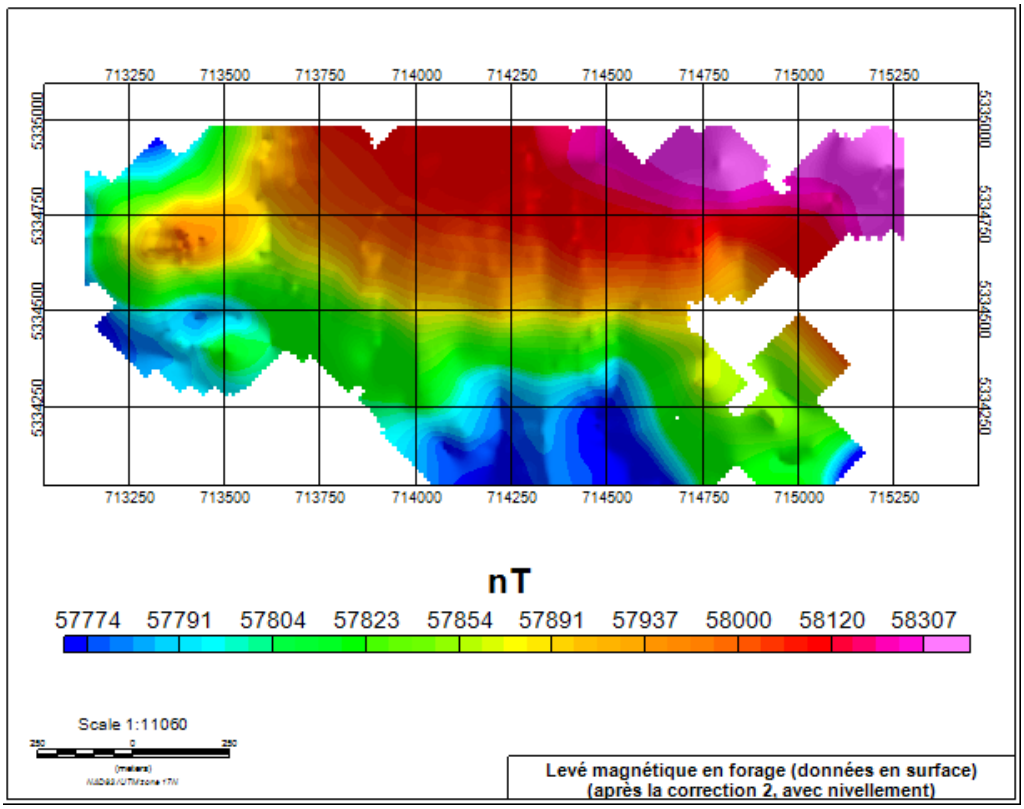

Figure 18 : Champ magnétique en surface des données en forages nivelées avec un variogramme isotrope a= 1.845E^{7}m

État des données après le nivellement

Une représentation des données en surface avant (Figure 10) et après (Figure 18) nivellement permet de constater l'effet de consistance apporté par le nivellement. Le Tableau 10 présente les statistiques principales en ce qui a trait l'état des données après la première correction selon qu'un nivellement est appliqué (droite) ou non (gauche). Comme il s'agit d'une correction DC, la distribution individuelle du champ magnétique de chaque forage n'est pas affectée, elle est simplement déplacée vers des plus hautes valeurs dans le cas présent. Comme la correction n'est pas uniforme d'un forage à l'autre, la forme générale de la distribution totale du champ magnétique (ensemble des forages) en sera affectée, comme en témoigne la Figure 82 (voir Figure 9 pour la distribution initiale).

Tableau 10 : Statistiques sur les valeurs du champ magnétique après la première correction (levé magnétique en forage)

	Valeurs du champ magnétique après la correction 1				Valeurs du champ magnétique nivelé après la correction 1			
	Moyenne [nT]	Écart type [nT]	Minimum [nT]	Maximum [nT]	Moyenne [nT]	Écart type [nT]	Minimum [nT]	Maximum [nT]
CM05	56 407	231	53 399	59 527	57 791	231	54 218	61 057
CM06	56 577	203	50 635	63 057	57 574	203	51 452	64 403
CM07	56 042	214	52 710	60 533	57 512	214	52 473	61 988
CM08	56 116	215	52 326	64 508	57 336	215	53 465	60 810
CM09	56 177	230	51 866	60 103	57 597	230	55 546	64 476
Moyenne	56 264	219	52 187	61 546	57 562	219	53 431	62 546

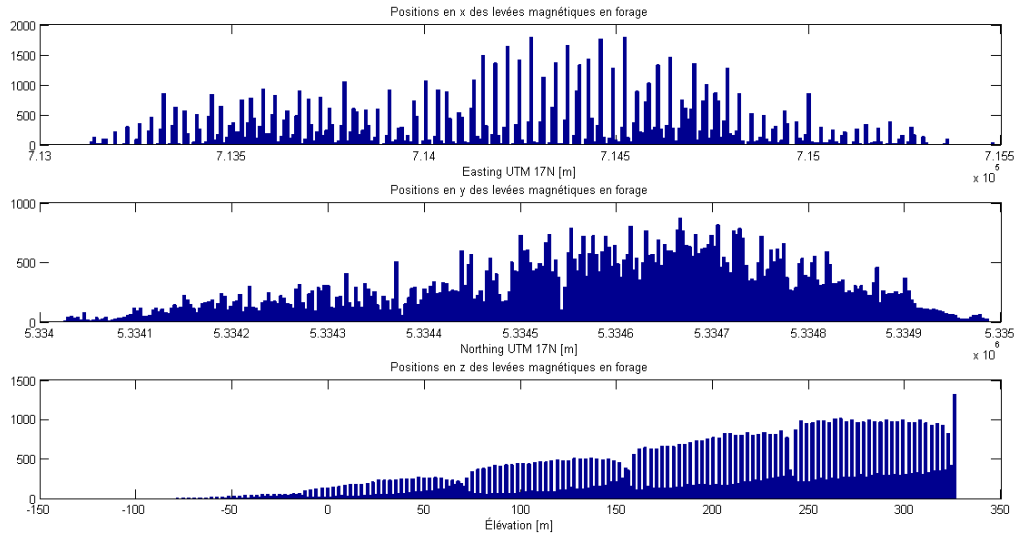

Figure 19 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après une première édition des données – avec nivellement)

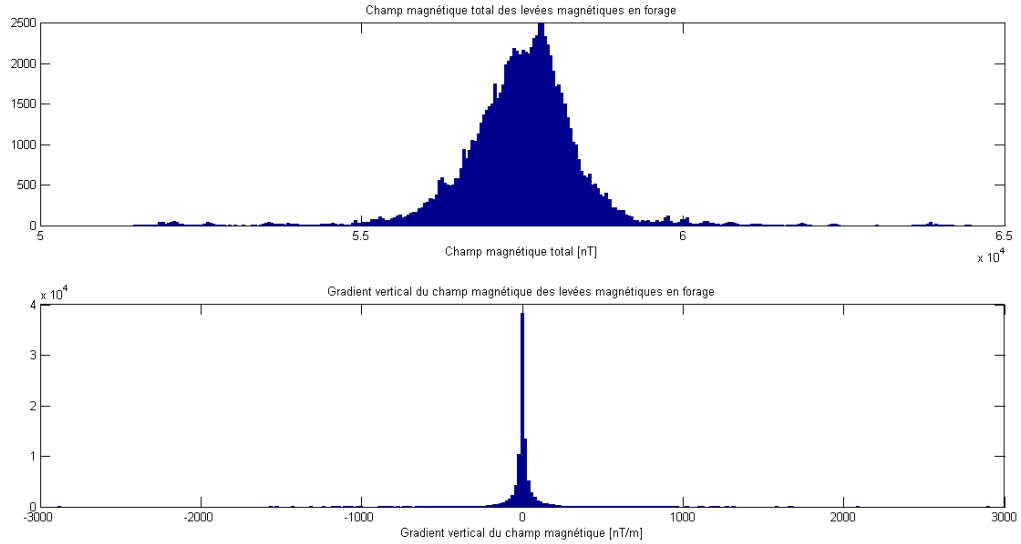

Figure 20 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après une première édition des données – avec nivellement)

4.3.2 CORRECTION 2A : FILTRAGE SUPPLÉMENTAIRE DES DONNÉES

Étant donné l'abondance de données, il a été établi que seulement les séries de données complètes et de meilleures qualités seraient conservées dans un premier temps. Ainsi, une fois la première étape de sélection complétée (correction 1), les séries dont la première donnée était située trop loin de la surface ont aussi été écartées, de façon à limiter les erreurs d'extrapolation. Une limite jugée raisonnable de 10m a ainsi été fixée. A cette étape, les données ponctuelles trop fortes ou aberrantes ont été éliminées. Une attention particulière a été accordée aux premières données de chaque forage.

Il est possible de constater que sur les 1 311 forages restant après la première correction, seulement 455 sont conservés après cette deuxième correction. Ainsi, sur les 89 936 données restantes, 29 485 ont été conservées. Les valeurs du champ magnétique, quant à elles, s'étalent maintenant en moyenne de

54 424nT à 58 923nT (contre 52 187nT à 61 546nT après la première correction), la valeur moyenne étant de 56 139nT (contre 56 264nT après la première correction) avec un écart-type de 172nT (219nT après la première correction). La Figure 21 et la Figure 22 présente respectivement la distribution des données selon la direction et la distribution du champ magnétique pour le levé magnétique après cette correction (sans nivellement). Le champ magnétique en surface des données en forages après cette deuxième correction est présenté à l'Annexe 9.4.

Tableau 11 : Statistiques sur la distribution des données par forage après la deuxième correction (levé magnétique en forage)

	Nombre de forage	Nombre de données	Distribution des données par forage (moyenne)		
			Nombre	Début [m]	Fin [m]
CM05	14	1 357	97	5	309
CM06	87	7 378	85	4	265
CM07	292	17 186	59	5	197
CM08	50	3 147	63	5	228
CM09	12	417	35	3	110
Moyenne	91	5 897	68	4	222
Total	455	29 485			

Tableau 12 : Statistiques sur les valeurs du champ magnétique après la deuxième correction (levé magnétique en forage)

	Valeurs du champ magnétique après la correction 1 (sans nivellement)			
	Moyenne [nT]	Écart type [nT]	Minimum [nT]	Maximum [nT]
CM05	56 304	185	55 265	57 072
CM06	56 543	130	55 034	59 312
CM07	56 005	161	53 032	57 907
CM08	56 088	165	54 735	62 963
CM09	55 753	218	54 052	57 360
Moyenne	56 139	172	54 424	58 923

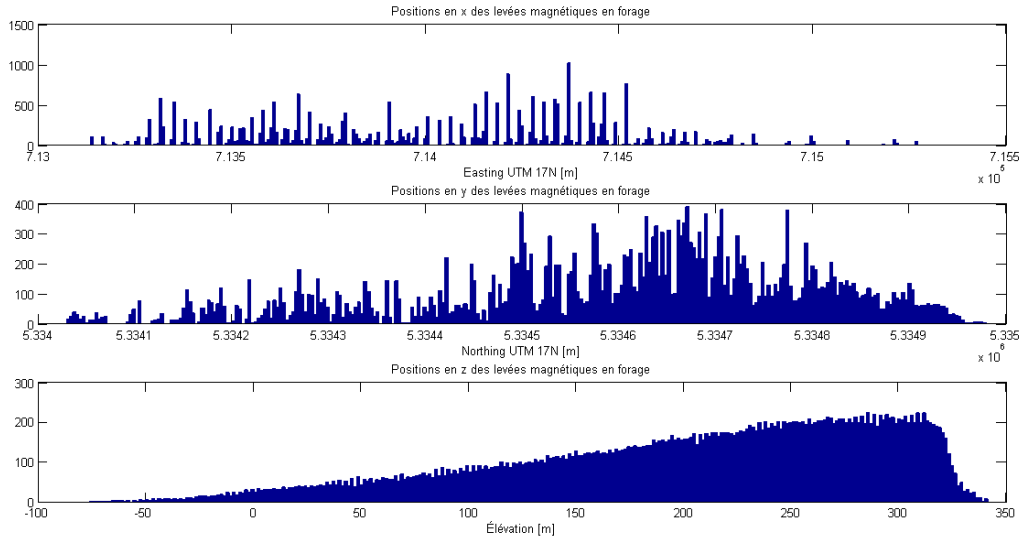

Figure 21 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forage (après la correction 2 – sans nivellement)

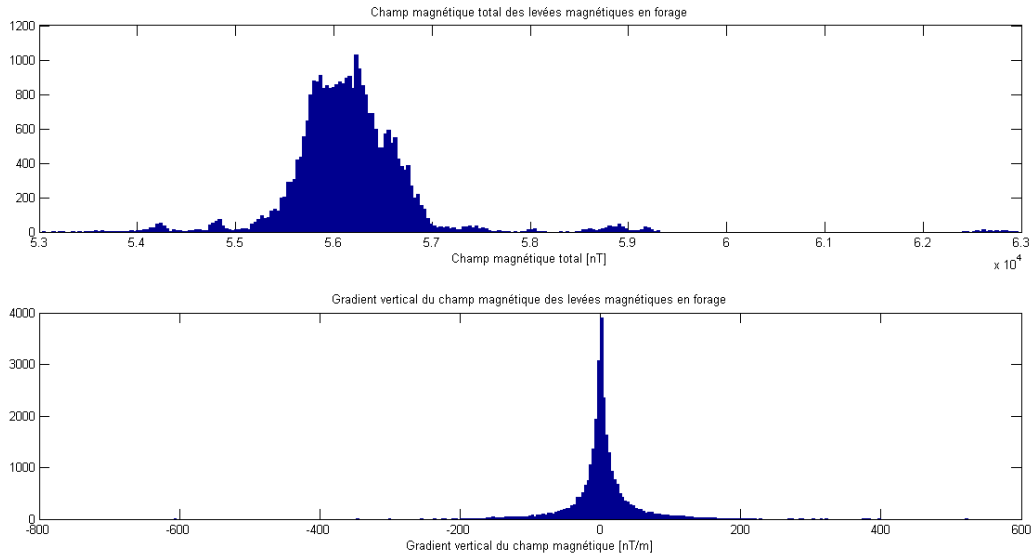

Figure 22 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après la correction 2 – sans nivellement)

4.3.3 CORRECTION 2B : NIVELLEMENT

La Figure 23 résume les étapes de traitement jusqu'au nivellement après cette deuxième correction et le Tableau 13 compare les valeurs du champ magnétique avant et après nivellement suite à cette deuxième correction. Le champ magnétique en surface des données en forages après cette deuxième correction, de même que la distribution du champ magnétique et la distribution des positions des données sont présentées à l'Annexe 9.4.

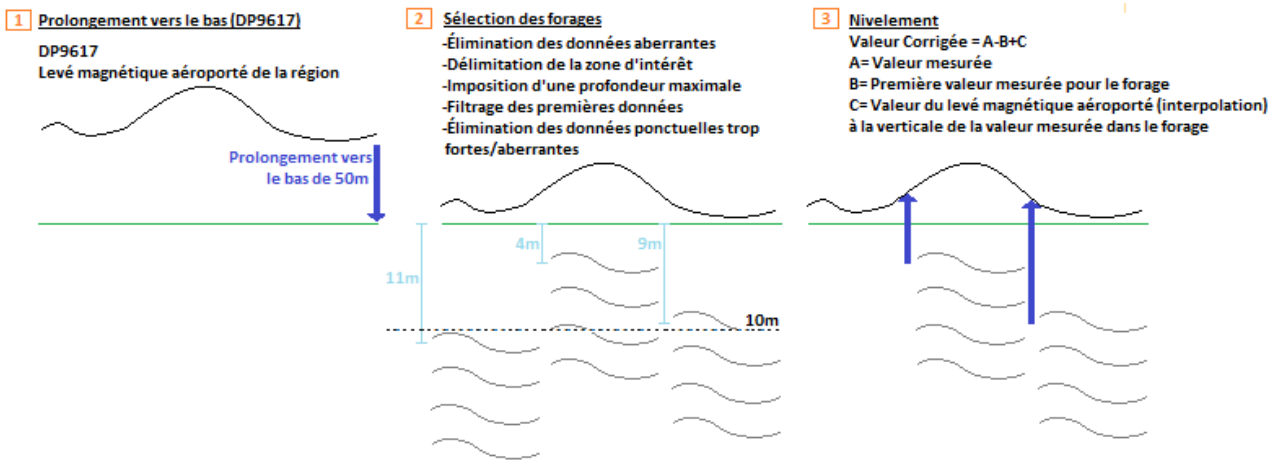

Figure 23 : Schéma des opérations de corrections/nivellement

Tableau 13 : Statistiques sur les valeurs du champ magnétique après la deuxième correction (levé magnétique en forage)

	Valeurs du champ magnétique après la correction 1				Valeurs du champ magnétique nivelé après la correction 1			
	Moyenne [nT]	Écart type [nT]	Minimum [nT]	Maximum [nT]	Moyenne [nT]	Écart type [nT]	Minimum [nT]	Maximum [nT]
CM05	56 304	185	55 265	57 072	57 618	185	56 547	58 651
CM06	56 543	130	55 034	59 312	57 799	130	56 341	59 422
CM07	56 005	161	53 032	57 907	57 700	161	55 285	59 308
CM08	56 088	165	54 735	62 963	57 655	165	56 358	58 921
CM09	55 753	218	54 052	57 360	57 931	218	56 524	59 542
Moyenne par série	56 139	172	54 424	58 923	57 741	172	56 211	59 169

4.3.4 CORRECTION 3A : REPOSITIONNEMENT DES DONNÉES À LEUR POSITION VRAIE

Les positions vraies des forages ont été obtenues ultérieurement et inscrites dans un fichier maître, un travail d'association a donc dû être effectué. Or, pour un forage donné, le nombre de données disponibles pour les positions vraies était souvent bien supérieur (le double) au nombre de données dans le fichier initial. Pour limiter les erreurs d'interpolation, deux règles ont été appliquées. D'abord, l'interpolation des données magnétiques aux positions vraies a été limitée à l'intervalle borné par les valeurs extrêmes de profondeur des données originales afin de ne pas devoir extrapoler les données (Figure 24). Ensuite, puisque la quantité plus importante de données de positions vraies est due à une fréquence d'échantillonnage plus grande verticalement, seulement une donnée sur deux a été conservée pour l'interpolation. En respectant ces deux règles, un ensemble de positions vraies se rapprochant davantage de l'ensemble d'origine a été mis de l'avant pour l'interpolation des positions.

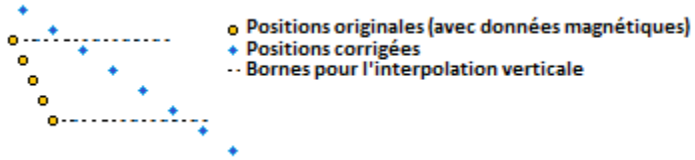

Figure 24 : schéma du repositionnement des données aux positions vraies par interpolation verticale linéaire

Il est à noter que l'interpolation a été effectuée vis-à-vis de la composante verticale z seulement. C'est-à-dire que, pour toute nouvelle coordonnée XYZ corrigée, une valeur du champ magnétique a été interpolée linéairement en prenant les positions verticales originales et corrigées comme variables dépendantes. La distribution des positions des données après cette correction est présentée à la Figure 26. La Figure 25 présente un exemple de de repositionnement des données aux positions vraies pour le sondage CM07-1205.

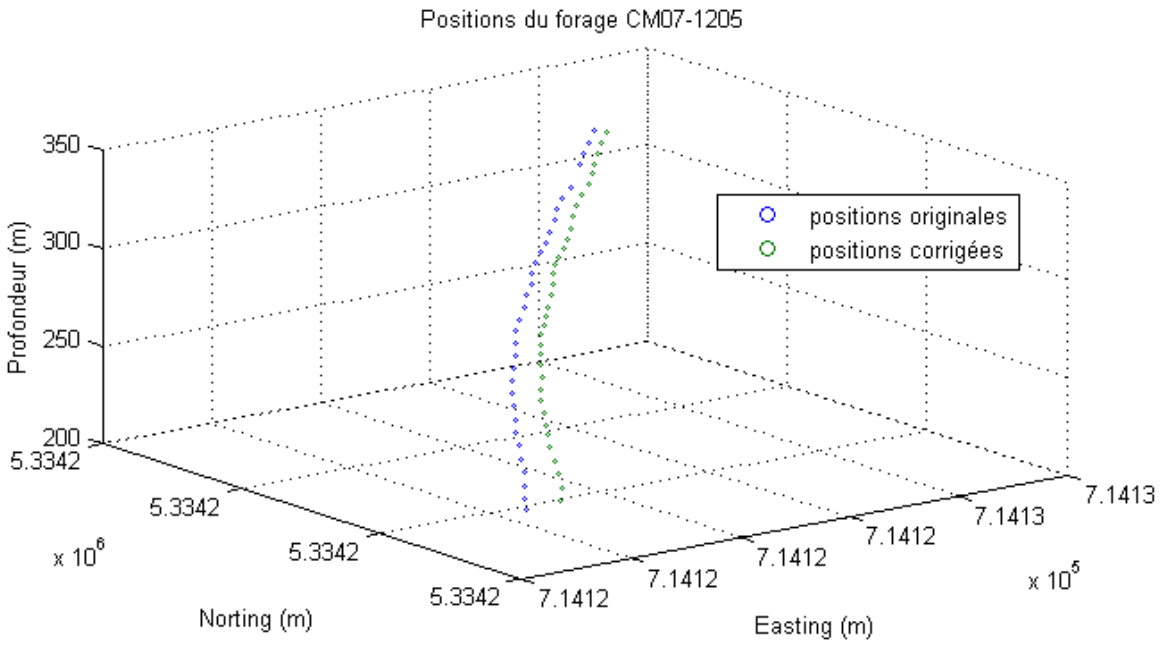

Figure 25 : Exemple de repositionnement des données aux positions vraies par interpolation verticale linéaire – CM07-1205

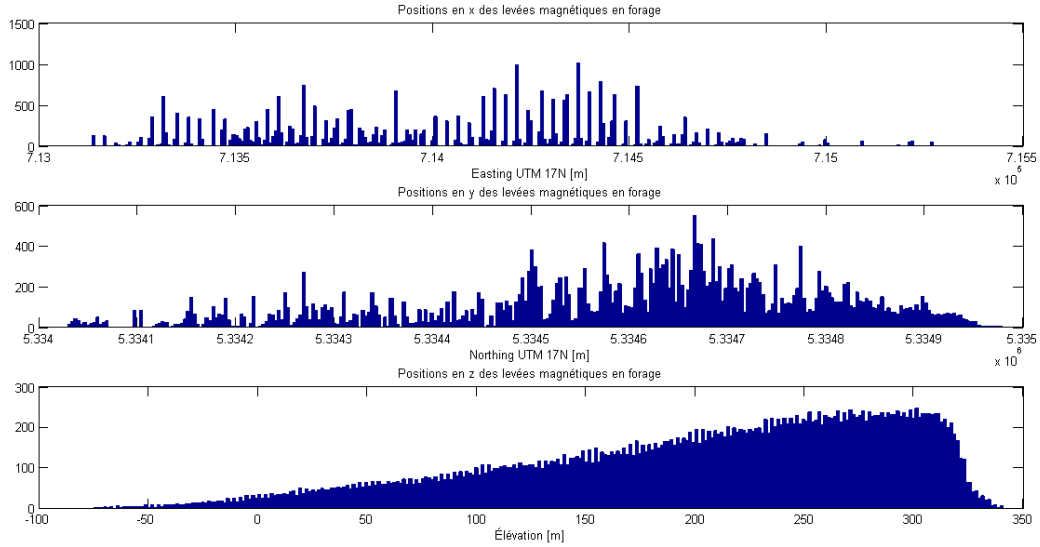

Figure 26 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après la correction 3 – sans nivellement)

Cette correction n'a toutefois pas pu être réalisée sans la perte de quelques séries de données. En effet, quelques rares séries isolées n'ayant pas de données corrigées associées, elles ont dû être écartées. Dans le cas présent, 7 forages ont ainsi été écartés. Malgré une diminution du nombre de forages disponibles, la quantité de données a, quant à elle, augmenté dû à l'interpolation verticale sur un échantillon de positions corrigées plus volumineux (32 232 contre 29 485 données après la correction 2). Le Tableau 14 présente les statistiques sur la distribution des données par forage après la troisième correction. Le champ magnétique en surface des données en forages après cette troisième correction, de même que la distribution du champ magnétique et les statistiques associées sont présentées à l'Annexe 709.5.

Tableau 14 : Statistiques sur la distribution des données par forage après la troisième correction (levé magnétique en forage)

	Nombre de forage	Nombre de données	Distribution des données par forage (moyenne)		
			Nombre	Début [m]	Fin [m]
CM05	14	1 460	104	2	302
CM06	85	7 703	91	3	259
CM07	289	19 045	66	3	190
CM08	48	3 602	75	4	222
CM09	12	422	35	5	105
Moyenne par série	90	6 446	74	3	216
Total	448	32 232			

4.3.5 CORRECTION 3B : NIVELLEMENT

La Figure 27 résume les étapes de traitement jusqu'au nivellement après cette troisième correction et la Figure 28 présente le champ magnétique en surface des données en forages. Les valeurs du champ magnétique avant et après nivellement suite à cette correction, de même que la distribution du champ magnétique et la distribution des positions des données sont présentées à l'Annexe 9.5.

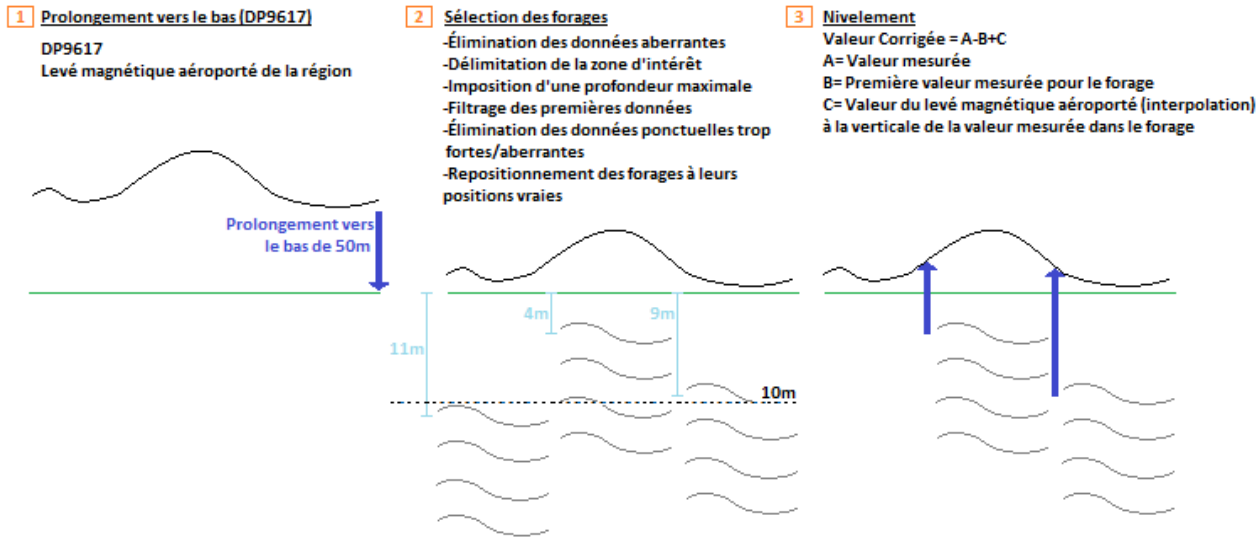

Figure 27 : Schéma des opérations de corrections/nivellement

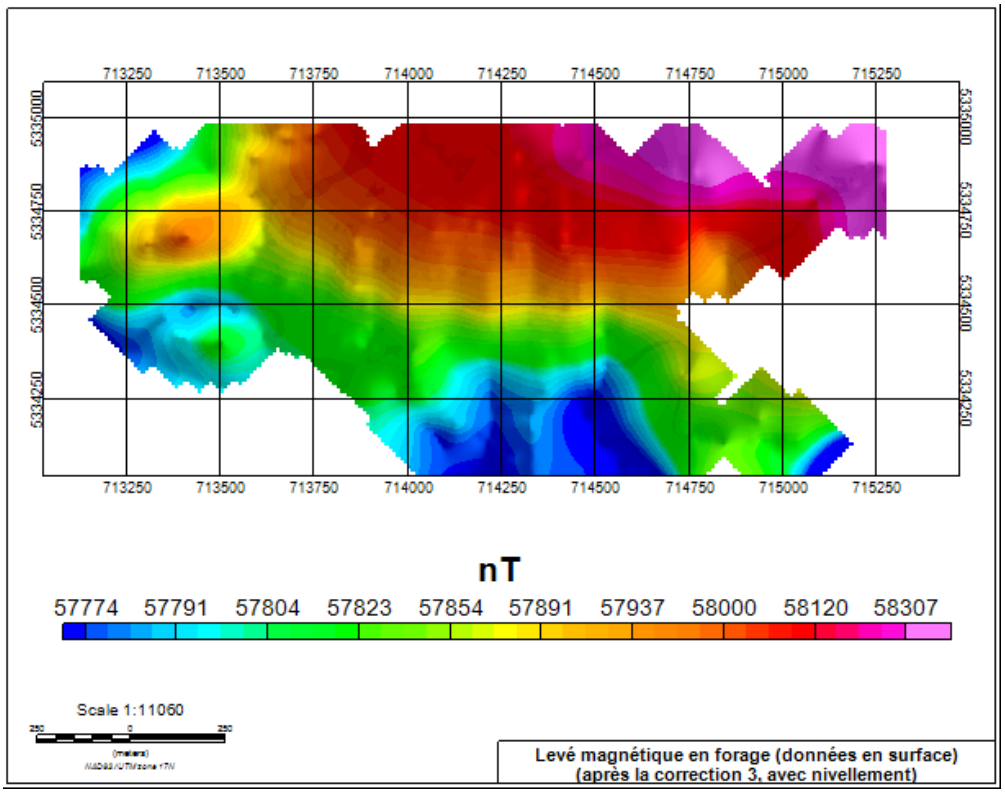

Figure 28 : Champ magnétique en surface des données en forages (après la correction 3 – avec nivellement)

4.3.6 CORRECTION 4 : NIVELLEMENT AVEC UNE VALEUR MOYENNE COMME RÉFÉRENCE

Pour cette dernière correction, la valeur de la première donnée du forage sera remplacée par la valeur moyenne pour l'ensemble du forage pour l'opération de nivellement. Les premières données étant souvent davantage bruitées dû à la présence de nombreuses sources de contaminations externes et à l'erreur intrinsèque de l'appareil (période de stabilisation), il est préférable d'utiliser une valeur plus stable comme référence.

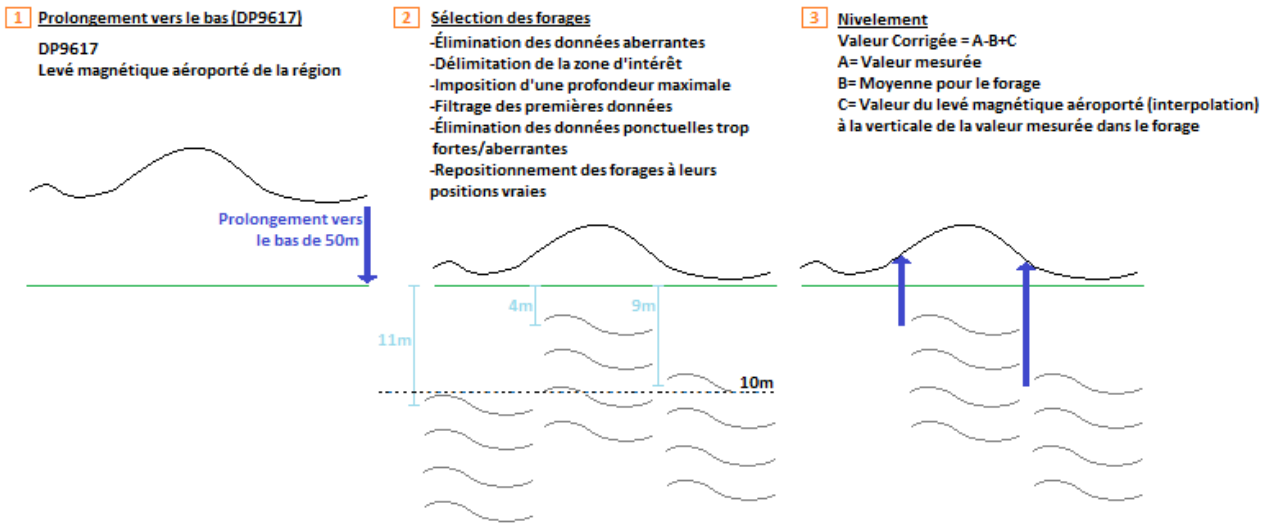

Figure 29 : Schéma des opérations de corrections/nivellement

Le remplacement n'a pas été effectué en début de correction simplement pour vérifier que la carte du levé magnétique aéroporté était bien retrouvée en produisant la carte des données de forage en surface après nivellement (Figure 28), ce qui n'aurait pas été le cas en utilisant dès le début une valeur moyenne comme valeur de référence. La Figure 30, soit la carte du champ magnétique en surface des données en forages après cette dernière correction, en témoigne. Les statistiques sur les valeurs du champ magnétique après cette dernière correction sont présentées au Tableau 15. Les autres données pertinentes (distributions des données et autres statistiques) sont présentées à l'Annexe 9.6. Une étude de l'effet de ce choix (correction 4) sur la représentation des coupes verticales et, indirectement, sur la corrélation des données avec les teneurs en or sera présentée à la section suivante.

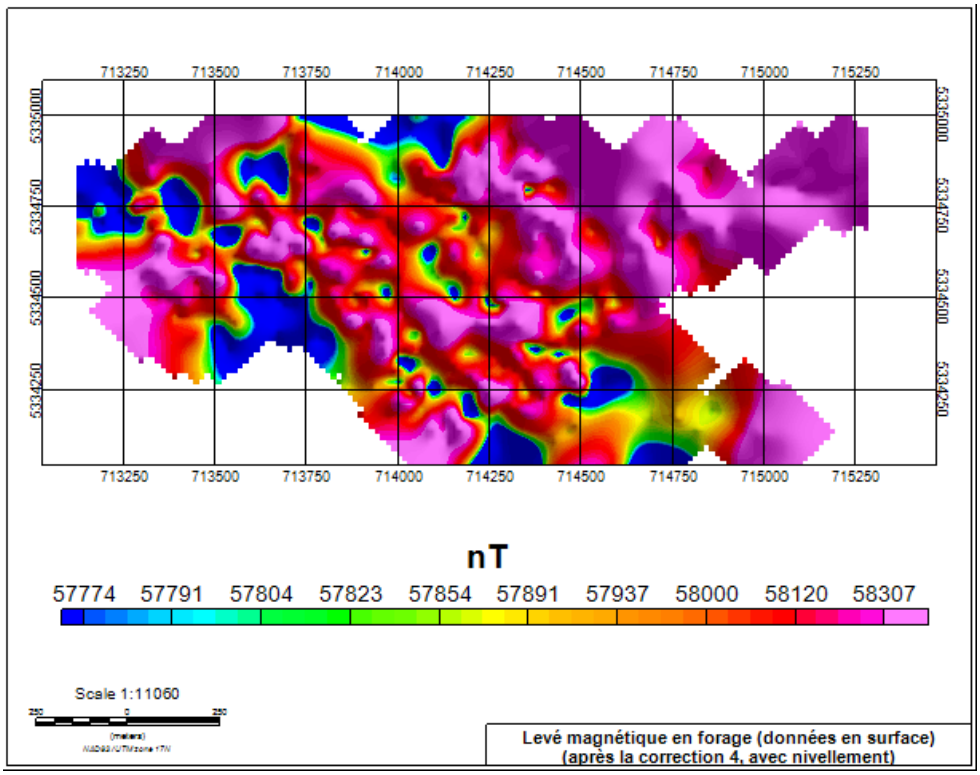

Figure 30 : Champ magnétique en surface des données en forages (après la correction 4 – avec nivellement)

Tableau 15 : Statistiques sur les valeurs du champ magnétique après la quatrième correction (levé magnétique en forage)

	Valeurs du champ magnétique après la correction 1				Valeurs du champ magnétique nivelé après la correction 1			
	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Écart type [nT]	Minimum [nT]	Maximum [nT]
CM05	56 300	175	55 271	57 048	57 917	175	57 149	58 591
CM06	56 549	118	55 107	59 304	57 920	118	56 872	58 981
CM07	56 000	143	53 084	57 798	57 900	143	56 856	59 508
CM08	56 084	152	54 735	62 945	57 949	152	56 874	59 176
CM09	55 748	198	54 071	57 356	58 374	198	57 591	60 217
Moyenne par série	56 136	157	54 454	58 890	58 012	157	57 068	59 295

4.4 KRIGEAGE DES DONNÉES SUR UN VOLUME 3D

Une fois les données corrigées, celles-ci ont été krigées sur un volume régulier de maille élémentaire 10m x 10m x 10m, soit un volume total de 2130m x 950m x 410m (Tableau 16). Un variogramme isotrope de longue portée (950m) a été utilisé pour cette opération (Tableau 17).

Les variogrammes expérimentaux anisotropes et anisotropes sont présentés respectivement à la Figure 31 et à la Figure 32. Le variogramme anisotrope a été écarté dans un premier temps puisque celui-ci est fortement anisotrope (longue portée verticale), de sorte que l'information disponible sur un plan horizontal était pratiquement perdue au profit des variations verticales lentes. Cette très longue portée verticale pourrait être occasionnée par des structures plus en profondeur. Il a donc été décidé d'opter pour un variogramme isotrope pour accorder une importance similaire aux données à la verticale et aux données dans le plan. Étant donné qu'un variogramme de longue portée avait donné de bons résultats pour les données en surface (levé magnétique aéroporté), il a été décidé d'opter pour un variogramme isotrope ayant les paramètres du variogramme anisotrope pour la direction verticale (Figure 31 – dans le bas). Celui-ci n'a cependant pas pu être adéquatement reproduit sur un variogramme isotrope expérimental, lequel est de plus courte portée (Figure 32)

Tableau 16 : Paramètres utilisés pour l'interpolation par krigeage sur un volume 3D

	Est	Nord [m]	Élévation [m]
Coordonnées minimum [m]	713 135.17	5 334 029.87	-86.91
Coordonnées maximum [m]	715 265.17	5 334 979.87	323.09
Maillage (pas) [m]	10	10	10
Nombre de mailles	213	95	41
Rotation [°]	0	0	0

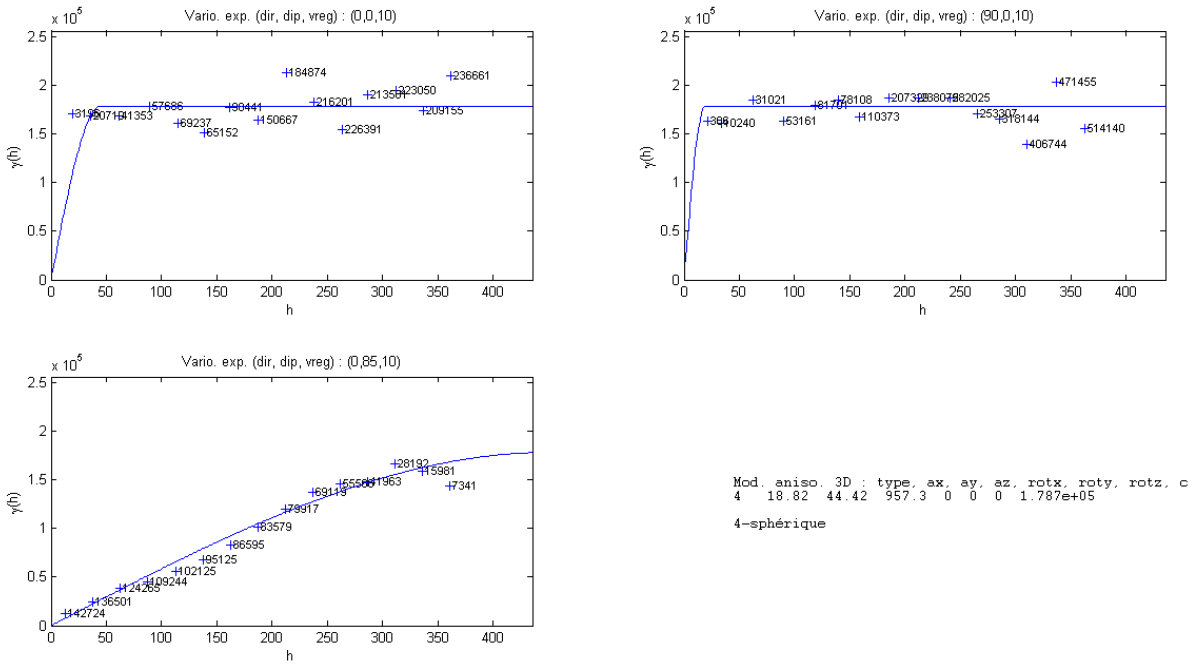

Figure 31 : Variogramme anisotrope des données magnétiques en forage

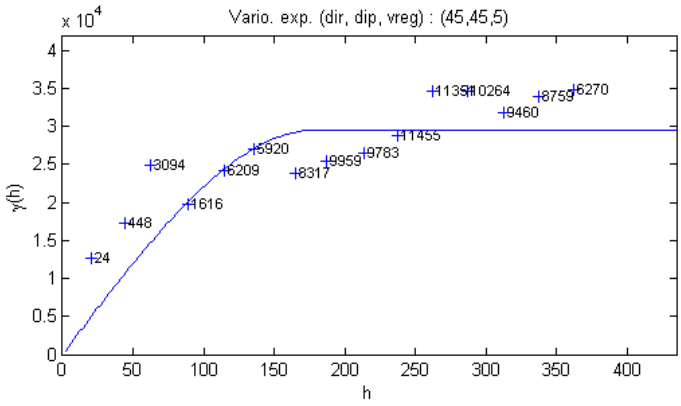

Figure 32 : Variogramme isotrope des données magnétiques en forage

Tableau 17 : Paramètres du variogramme anisotrope et du variogramme isotrope des données magnétiques en forage

	Type	Modèle	Portée x (m)	Portée y (m)	Portée z (m)	Palier (variance)
Calculé	**Anisotrope**	Sphérique	18.82	44.42	957.3	$1.787x10^5$
	Isotrope	Sphérique	180	180	180	$2.954x10^4$
Retenu	**Isotrope**	Sphérique	957.3	957.3	957.3	$1.785x10^5$

A titre de comparaison, des exemples de représentations obtenues (coupe x= 714140m) après krigeage sur le volume 3D selon différents variogrammes sont présentés aux figures suivantes. La Figure 33 présente la coupe avant le krigeage sur le volume 3D. La Figure 35, la Figure 36 et la Figure 34 présente respectivement la coupe obtenue après un krigeage anisotrope, un krigeage isotrope de moyenne portée et un krigeage isotrope de longue portée. Le même type de comparaison est également présenté pour une coupe horizontale (Figure 37, Figure 38 , Figure 39 et Figure 40). Les résultats visuellement peu intéressants pour la coupe des données en surfaces lorsque le variogramme est isotrope de courte portée ou anisotropes ont contribués au choix du variogramme retenu.

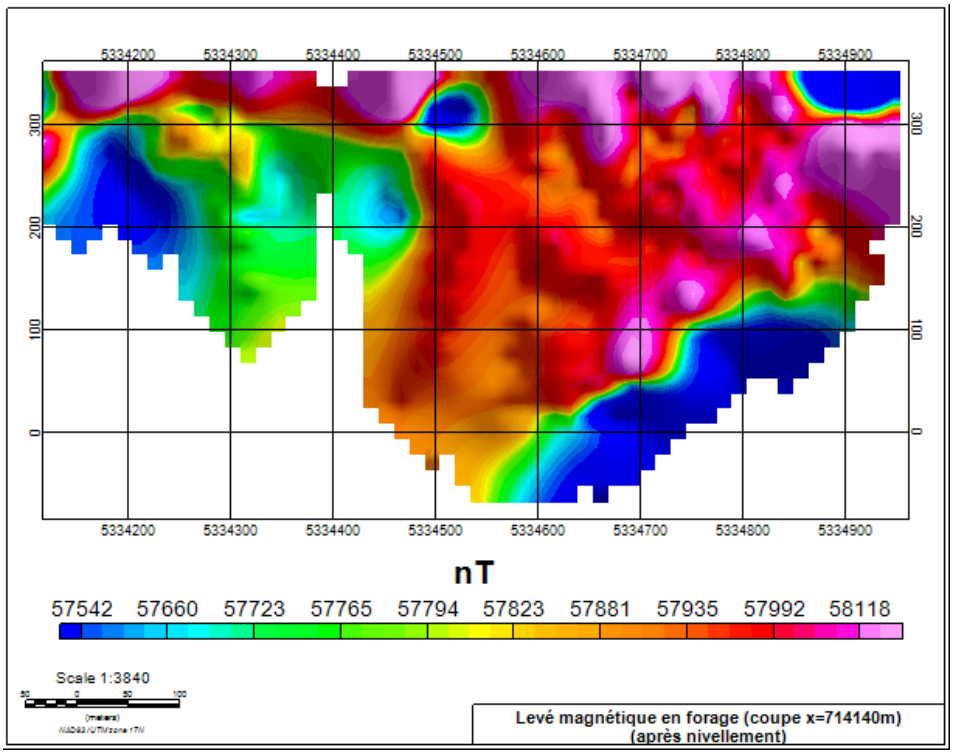

Figure 33 : Coupe x=714140m, avant l'interpolation sur le volume 3D (interpolation 2D seulement)

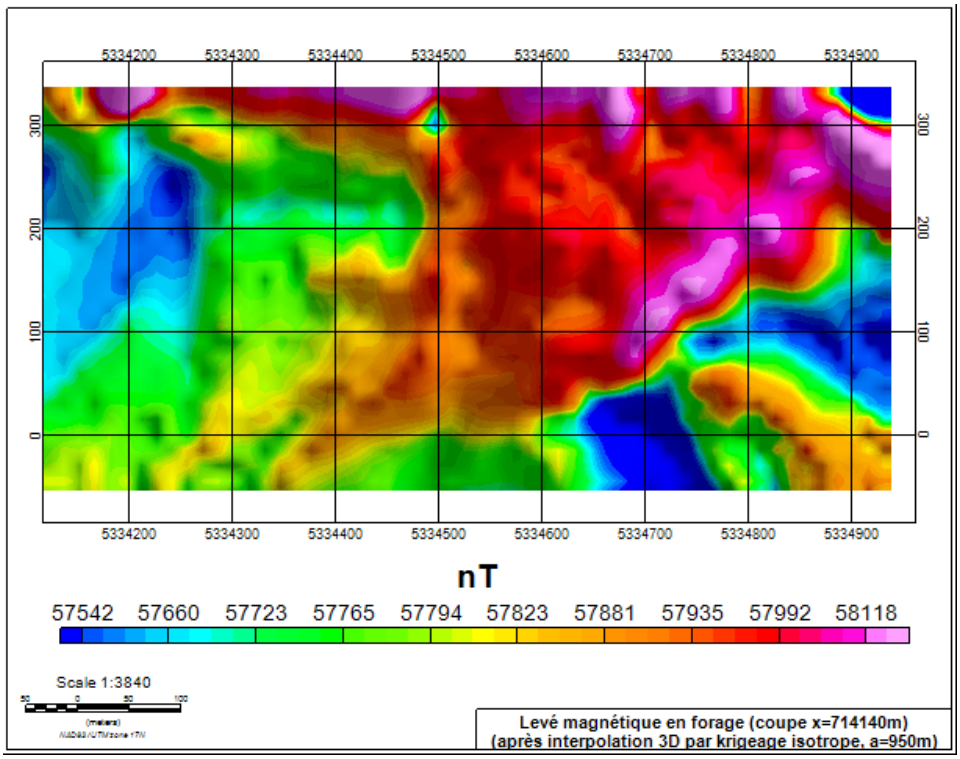

Figure 34 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m

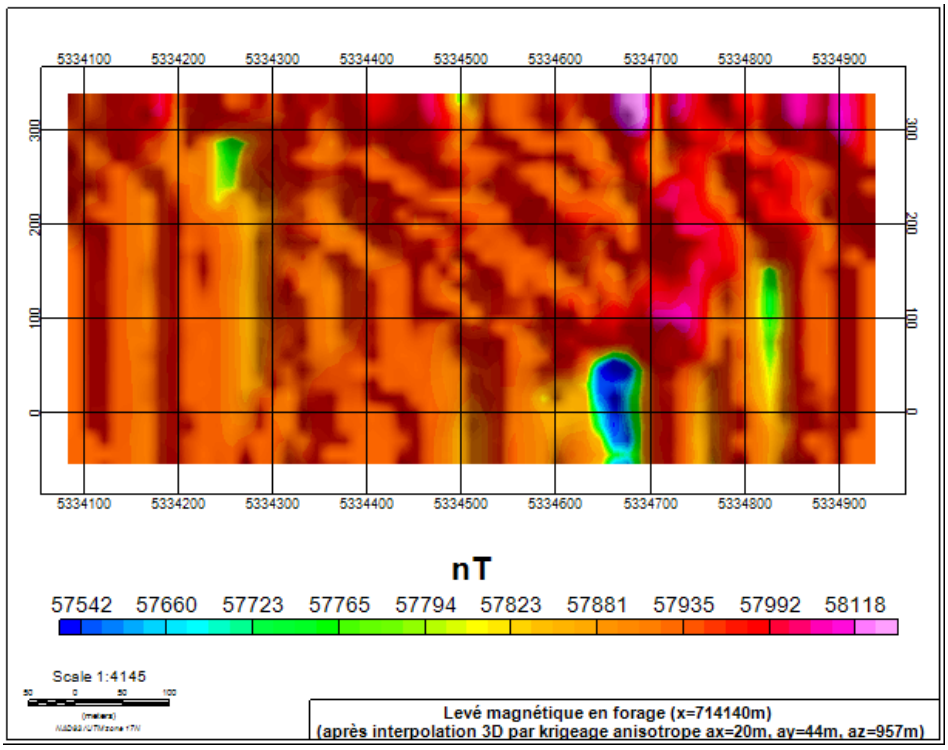

Figure 35 : Coupe x=714140m, variogramme anisotrope, ax=20m, ay=44m, az=957m

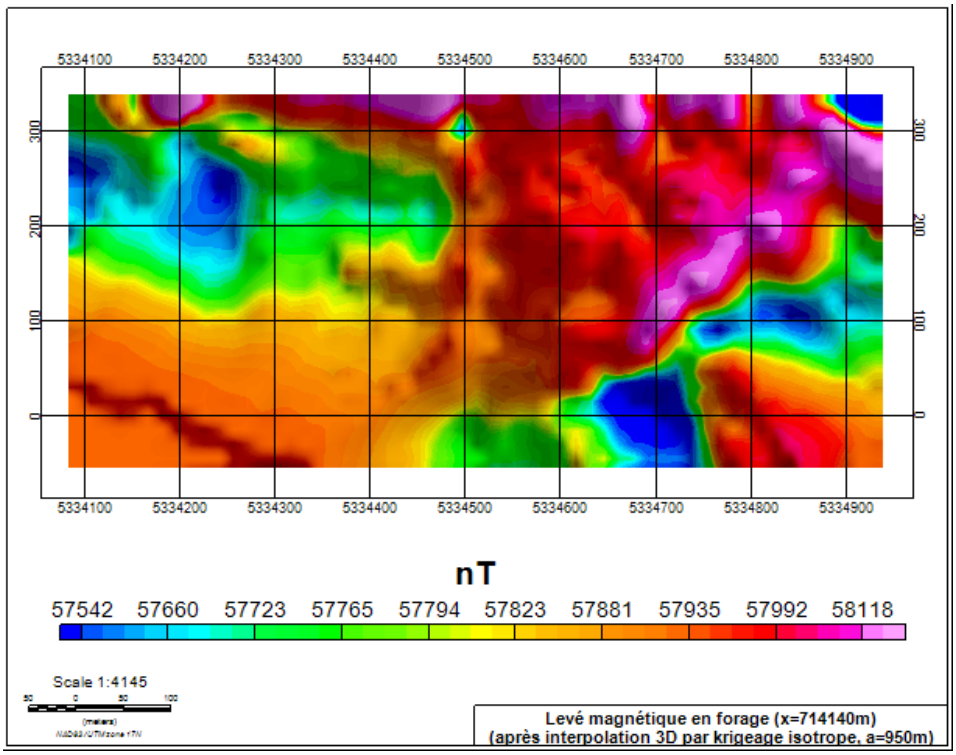

Figure 36 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de moyenne portée, a=180m

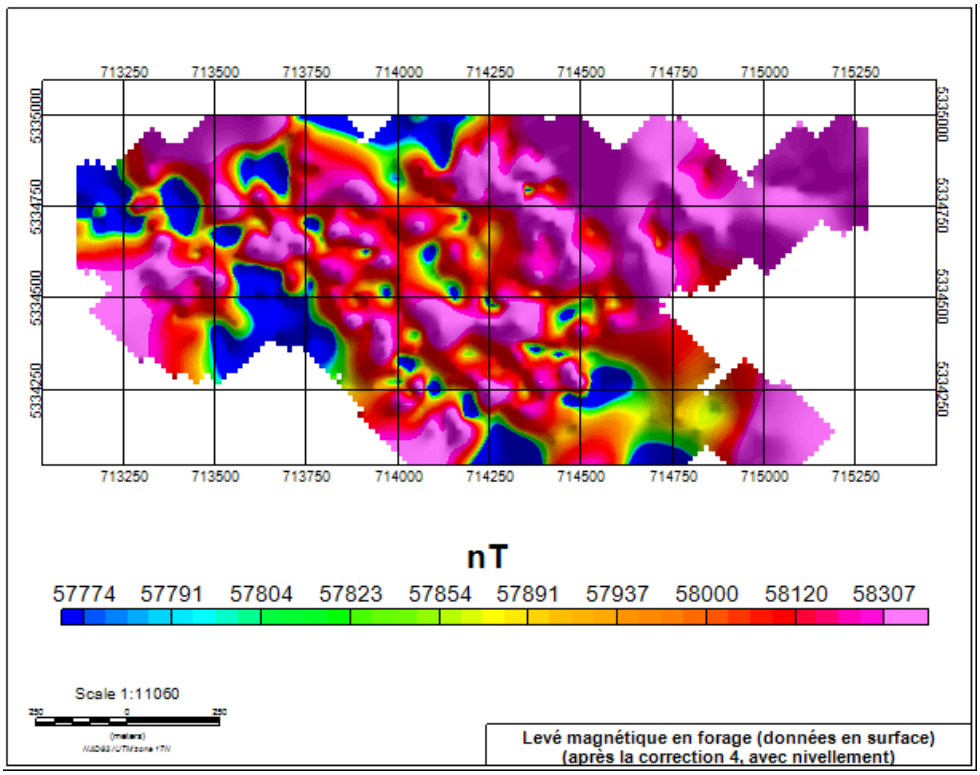

Figure 37 : Coupe z=0m, avant l'interpolation sur le volume 3D (interpolation 2D seulement)

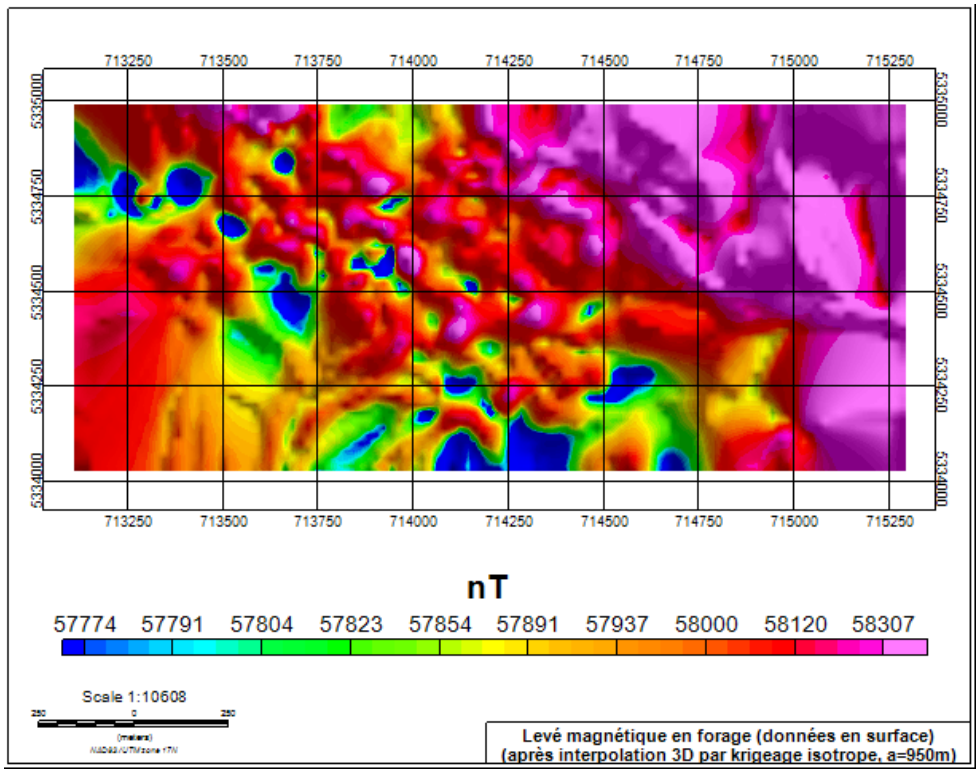

Figure 38 : Coupe z=0m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m

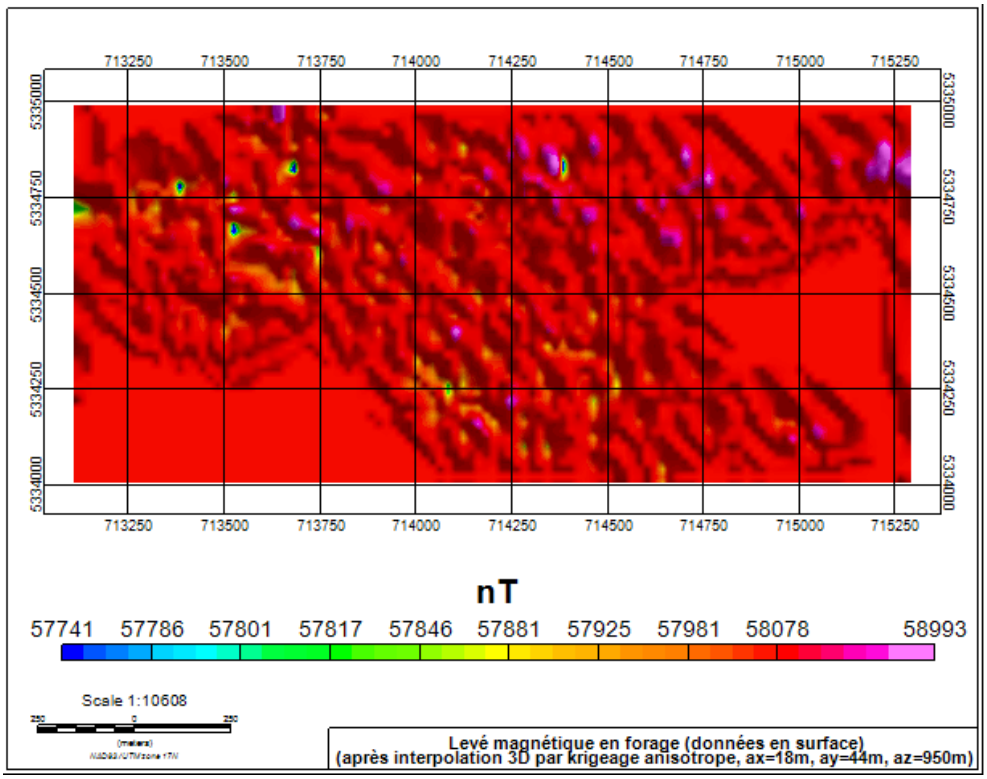

Figure 39 : Coupe z=0m, variogramme anisotrope, ax=20m, ay=44m, az=957m

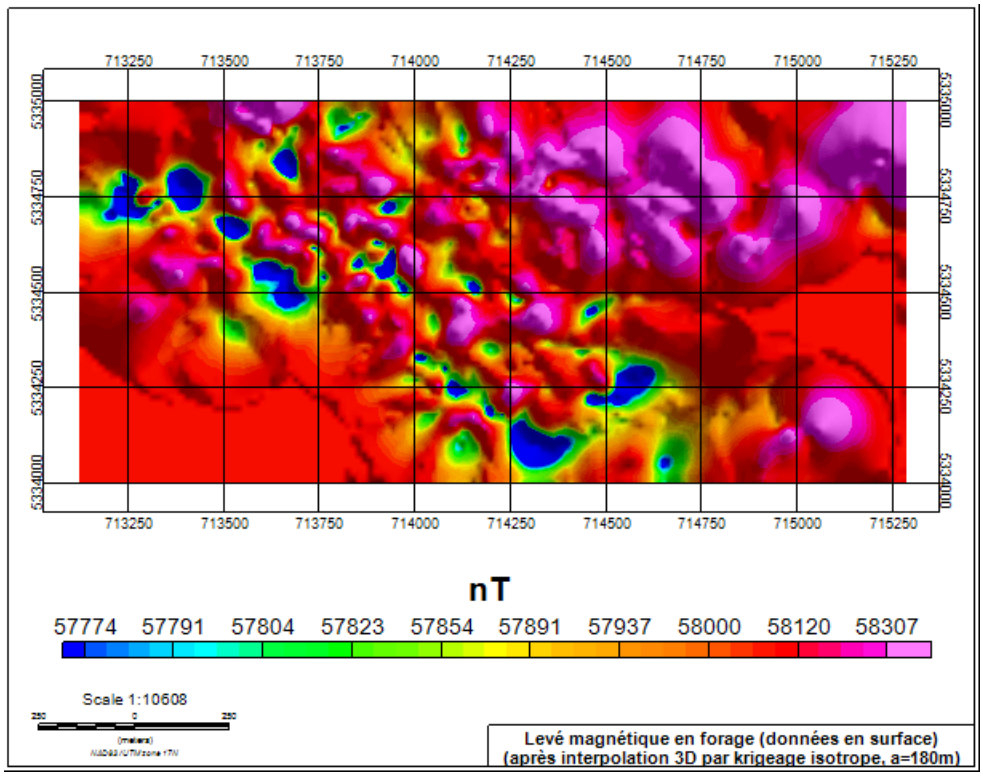

Figure 40 : Coupe z=0m, variogramme isotrope, a=180m

4.5 SOUSTRACTION DE LA RÉGIONALE

Pour isoler les anomalies magnétiques locales des effets du champ magnétique régional, un filtre passe-bas (~100m) ainsi qu'un filtre de type tendance linéaire ont été appliqués aux données nettoyées et krigées sur le volume 3D. Les résultats pour les données de surface sont présentées à la Figure 41 (champ total, z=0m), à la Figure 42 (champ régional, z=0m), et à la Figure 44 (champ résiduel, z=0m). La Figure 45 (champ total, x=714140m), la Figure 46 (champ régional, x=714140m), et la Figure 48 (champ résiduel, x=714140m) présente les résultats pour la coupe à x=714140m.

Il est à noter que d'autres techniques ont été testées. Notamment, la décomposition par ondelettes a été testée une première fois et a été écarté par manque de résultats convaincants. Toutefois, ceci était certainement dû au choix initialement retenu pour le variogramme dans le krigeage (un variogramme anisotrope avait alors été appliqué). Une seconde tentative a été faite par la suite et les résultats obtenus sont très près de ceux fournis par la méthode retenue (voir Figure 49 – à comparer avec la Figure 47). Des exemples de décomposition du signal sur la coupe x=714140m sont joints à l'Annexe 9.9. Une ondelette de Morlet, soit une exponentielle complexe multipliée par une enveloppe gaussienne, a été utilisée pour l'opération.

Un prolongement vers le haut (1000m) a également été testé et avait initialement été écarté pour la même raison que plus haut. Cette opération s'est finalement révélée produire un résultat similaire aux autres techniques (Figure 50). Le détail de ce traitement pour la coupe x=714140m est joint à l'Annexe 9.10.

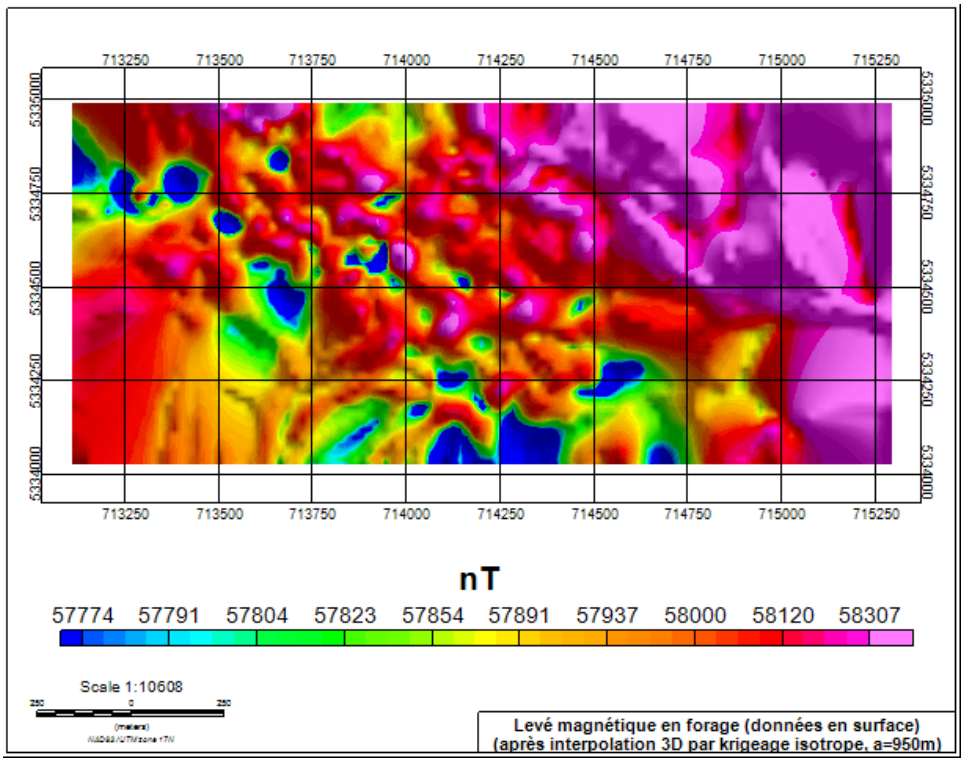

Figure 41 : Coupe z=0, variogramme isotrope, champ magnétique total

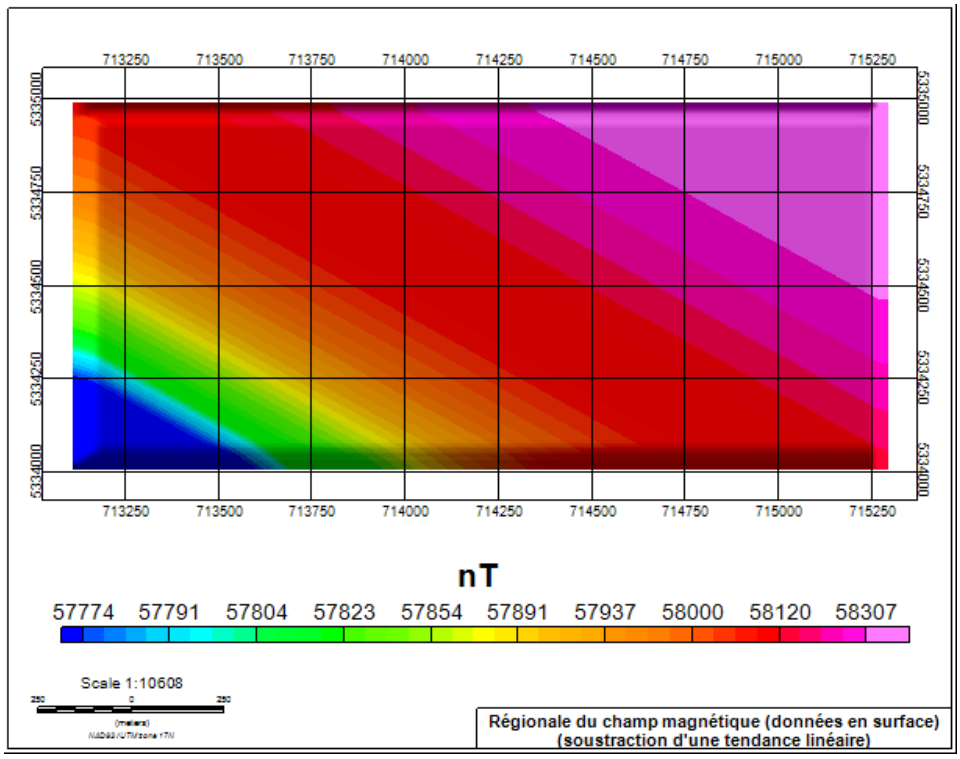

Figure 42 : Coupe z=0, variogramme isotrope, régionale

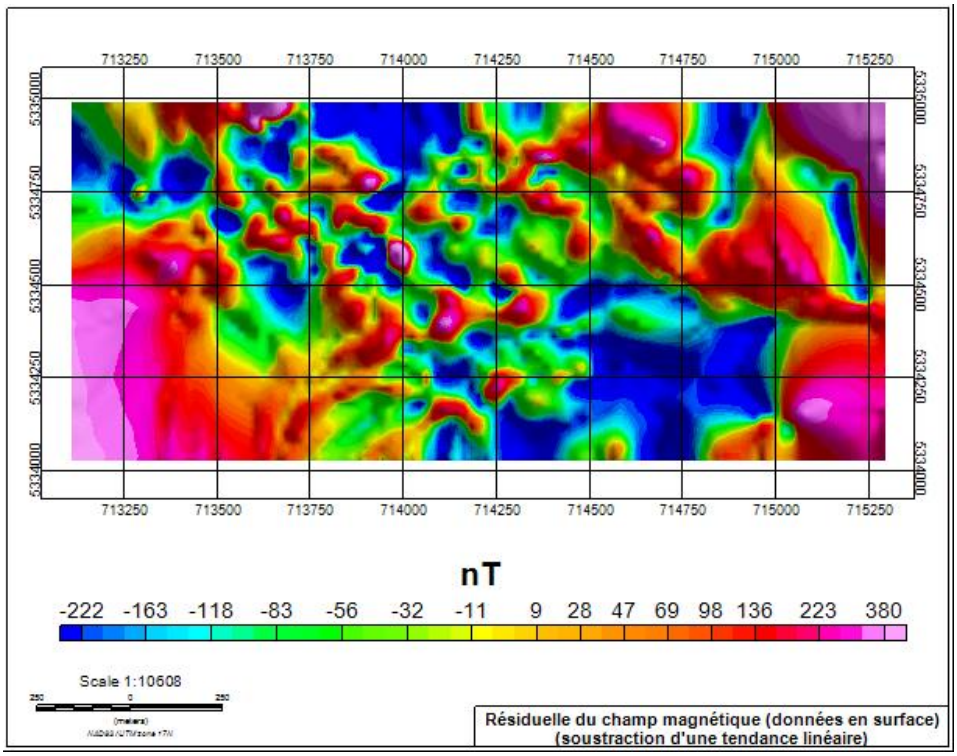

Figure 43 : Coupe z=0, variogramme isotrope, résiduelle du champ magnétique après soustraction de la régionale

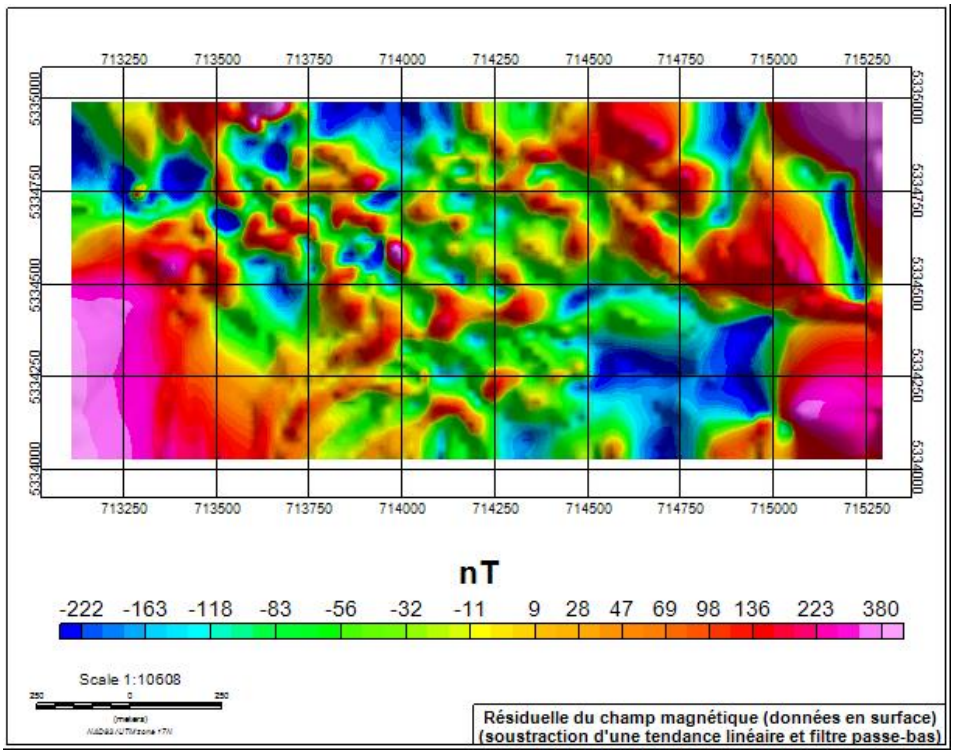

Figure 44 : Coupe z=0, variogramme isotrope, résiduelle du champ magnétique après soustraction de la régionale et application d'un filtre passe-bas (150m)

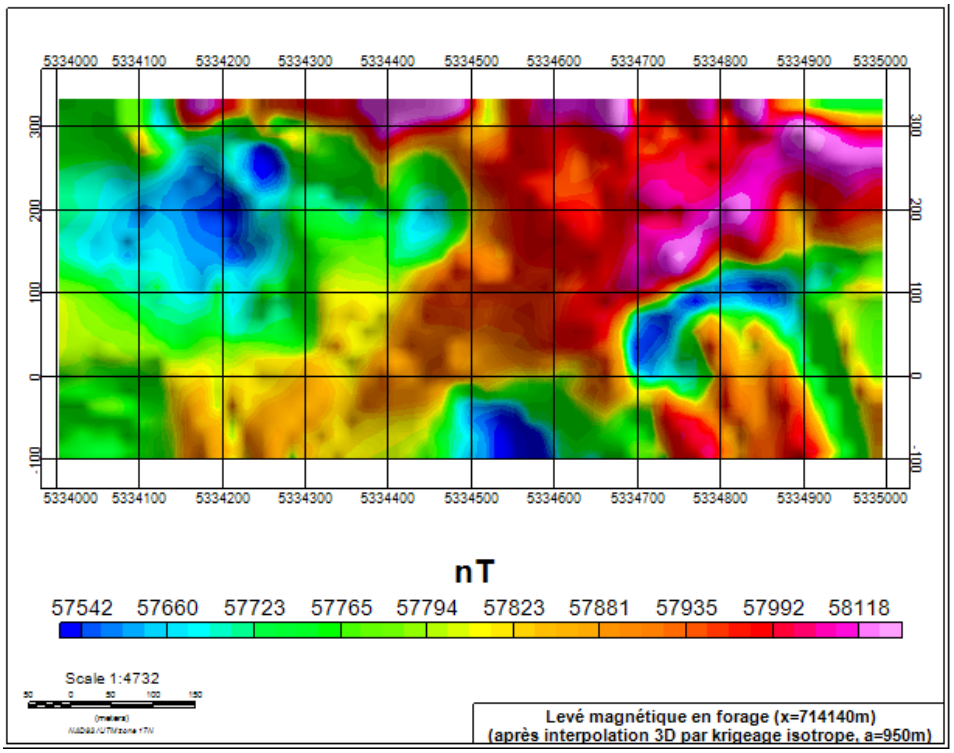

Figure 45 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope, champ magnétique total

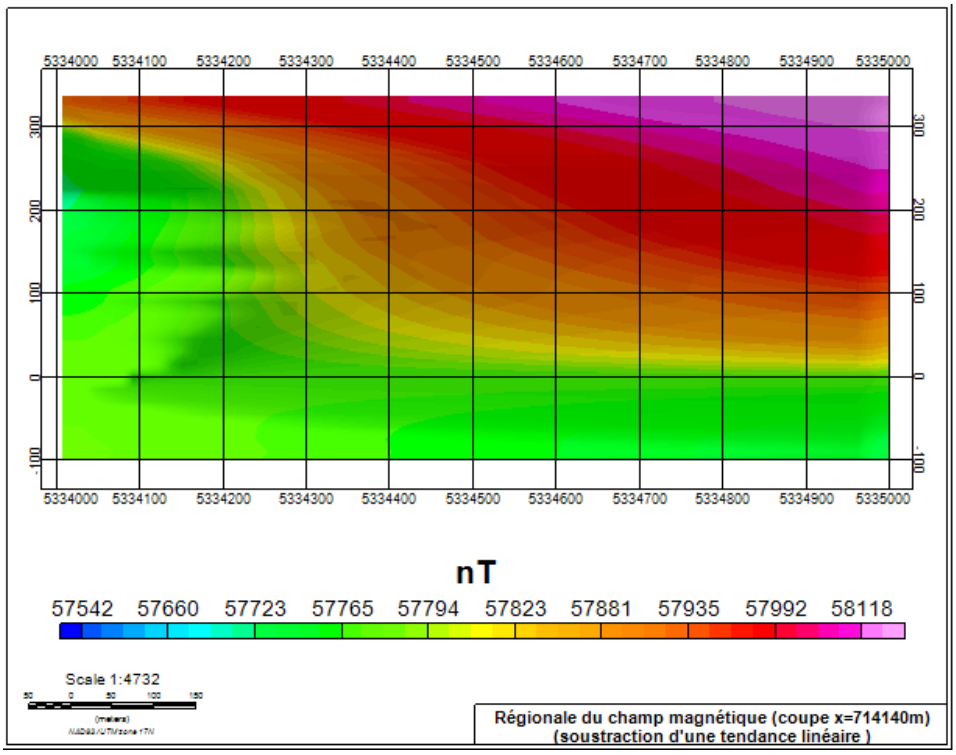

Figure 46 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope, régionale du champ magnétique

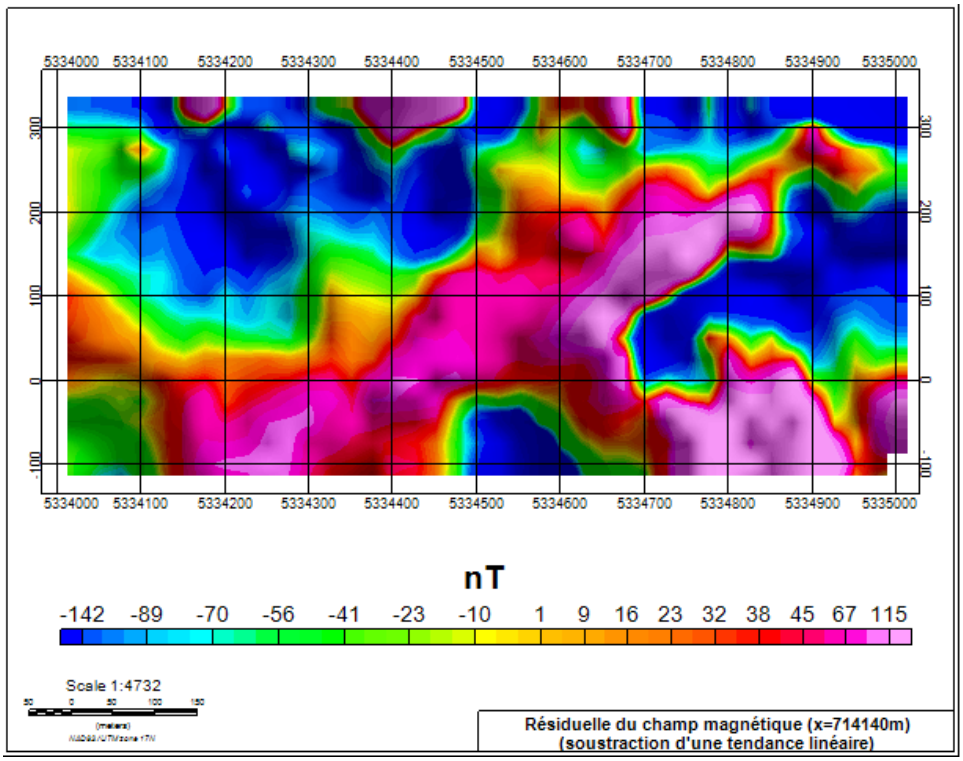

Figure 47 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope, résiduelle du champ magnétique après soustraction de la régionale – tendance linéaire

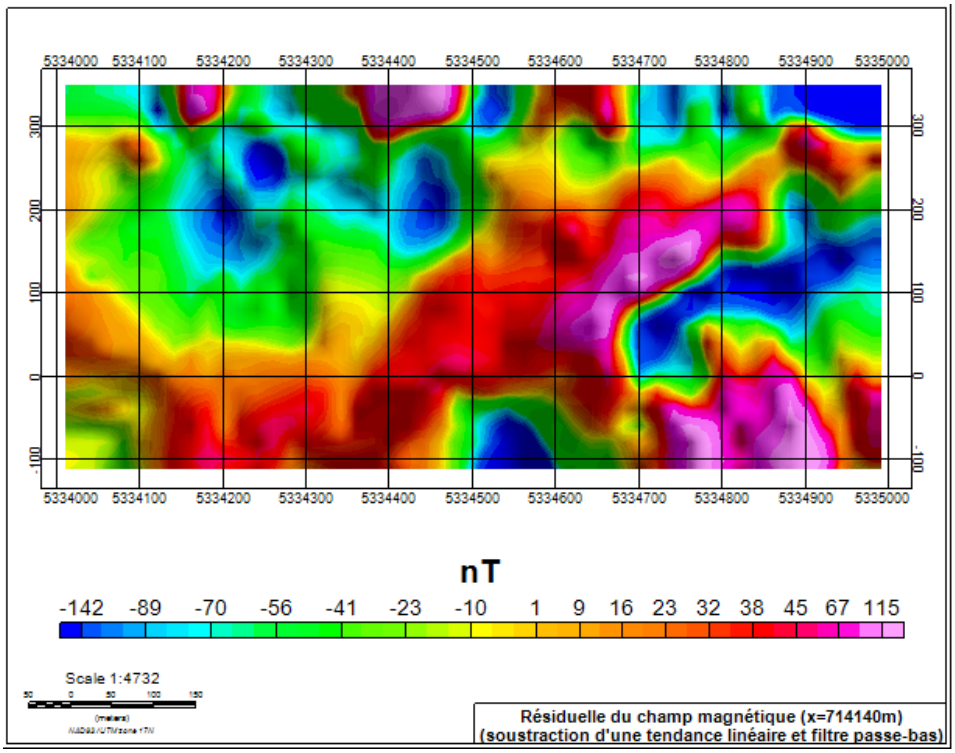

Figure 48 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope, résiduelle du champ magnétique après soustraction de la régionale et application d'un filtre passe-bas (150m)

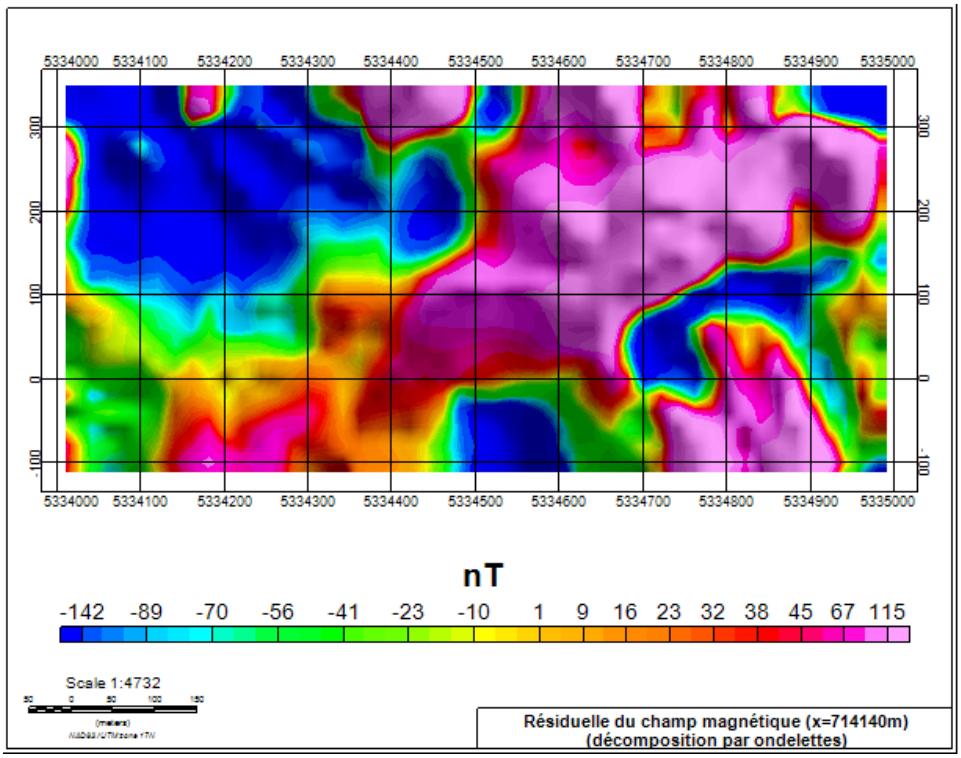

Figure 49 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope, résiduelle du champ magnétique obtenue par décomposition par ondelette

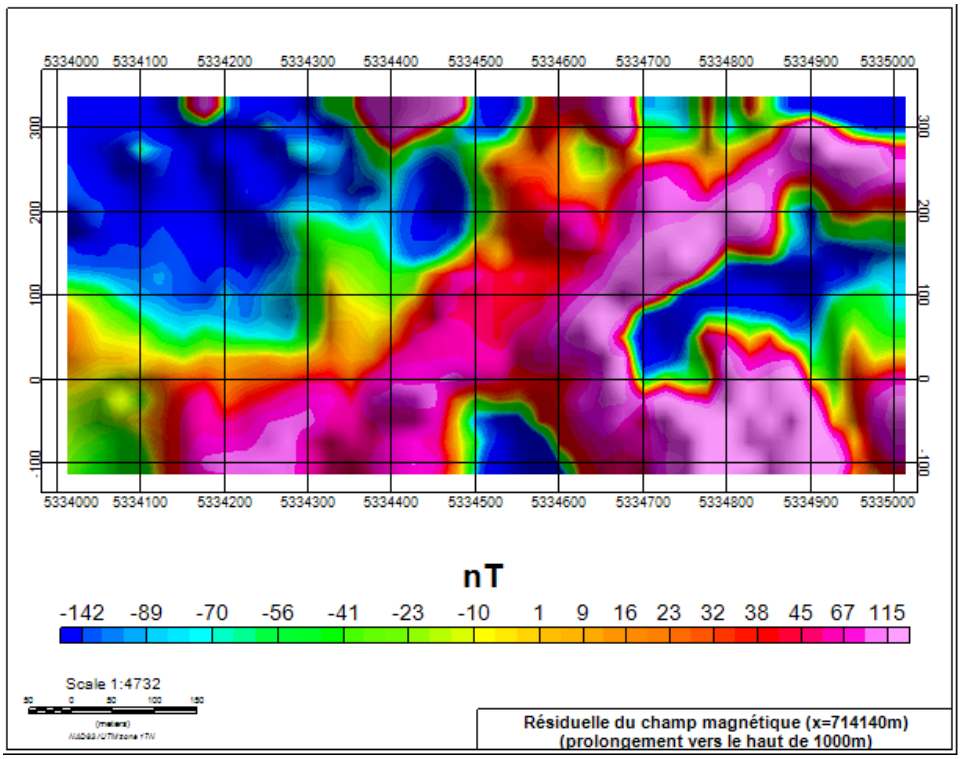

Figure 50 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope longue portée, résiduelle obtenue par prolongement vers le haut

5 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Plusieurs coupes verticales du champ magnétique résiduel et total, de même que la coupe correspondante des teneurs en or et les corrélations entre la teneur et la réponse magnétique selon différents profils ont été obtenus et sont présentés, pour la plupart, en annexe. La coupe à x=714140m est présentée ici en guise d'exemple. Les cartes des susceptibilités sont également présentées pour les forages dont les données étaient disponibles.

5.1 CORRÉLATION ENTRE LE CHAMP TOTAL ET LA TENEUR EN OR

La Figure 51 et la Figure 52 présente respectivement une carte du champ total et de la teneur en or pour la coupe x=714140m. La Figure 53 et la Figure 54 présente différents profils verticaux et horizontaux obtenus à partir de ces deux cartes, ainsi que les coefficients de corrélations associés. La Figure 55 présente l'évolution des coefficients de corrélation des différents profils selon la direction. La Figure 56 est un rappel de la Figure 55, mais la carte du champ total lui a été superposé afin d'obtenir un repère spatial visuel. Les deux cartes ont été incluses par souci de clarté. Finalement, le Tableau 18 présente les coefficients de corrélation moyens et maximums entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils horizontaux ou verticaux.

Tableau 18 : Coefficients de corrélation moyens et maximums entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils horizontaux ou verticaux

Profils verticaux		Profils horizontaux	
Corrélation moyenne	**Corrélation maximale**	**Corrélation moyenne**	**Corrélation maximale**
0.19	0.84	0.32	0.73

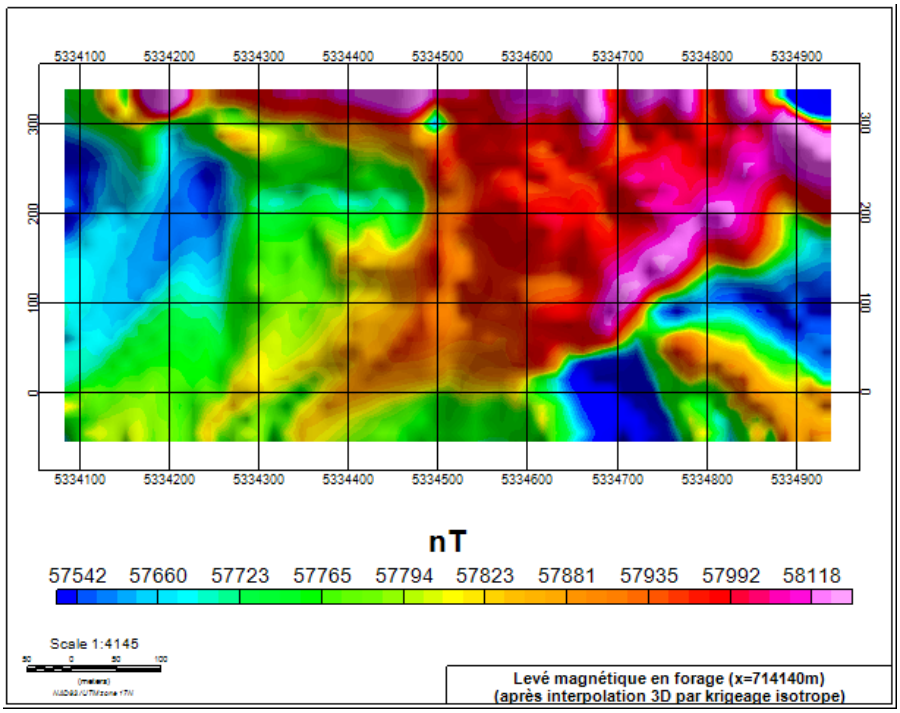

Figure 51 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, champ total

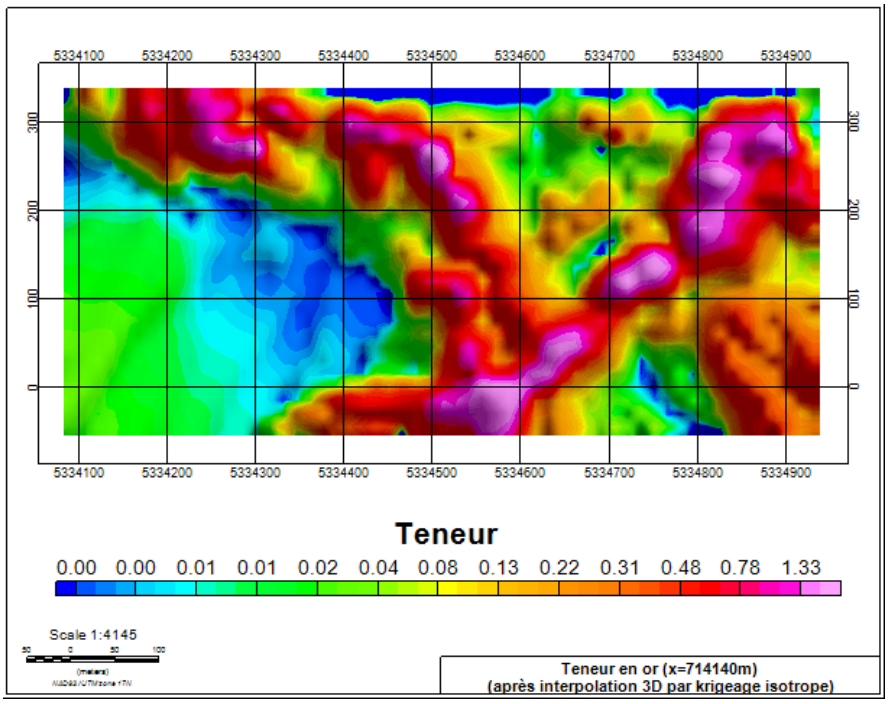

Figure 52 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or

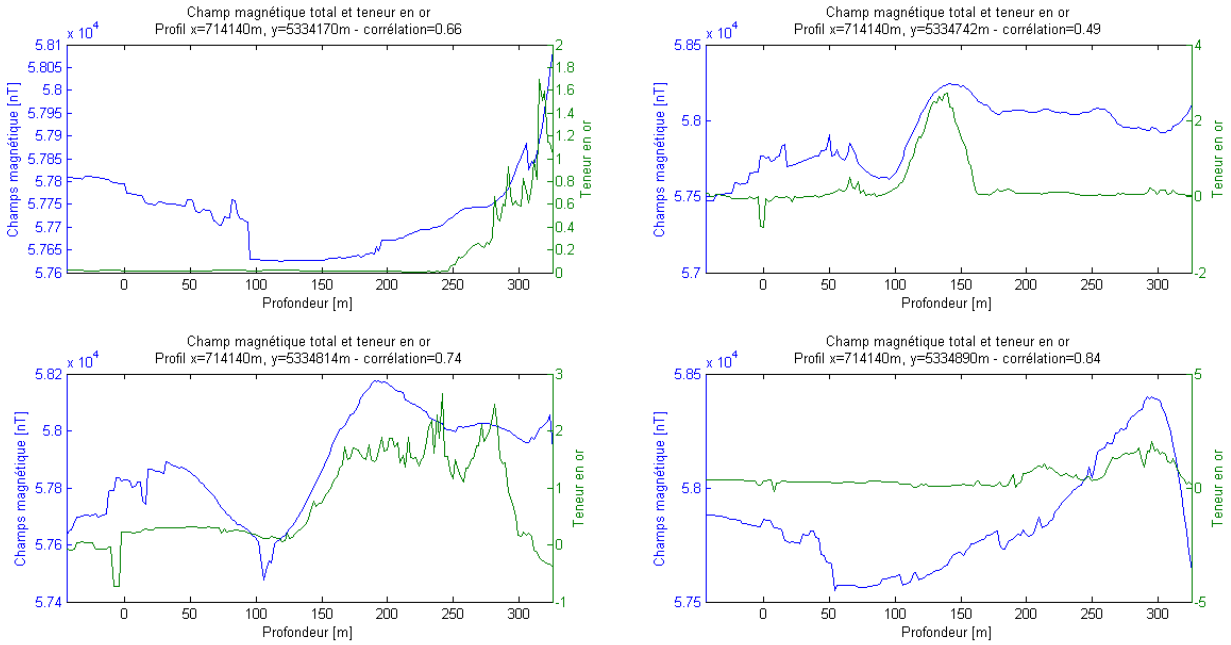

Figure 53 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnéti que total et la teneur en or selon pour différents profils verticaux

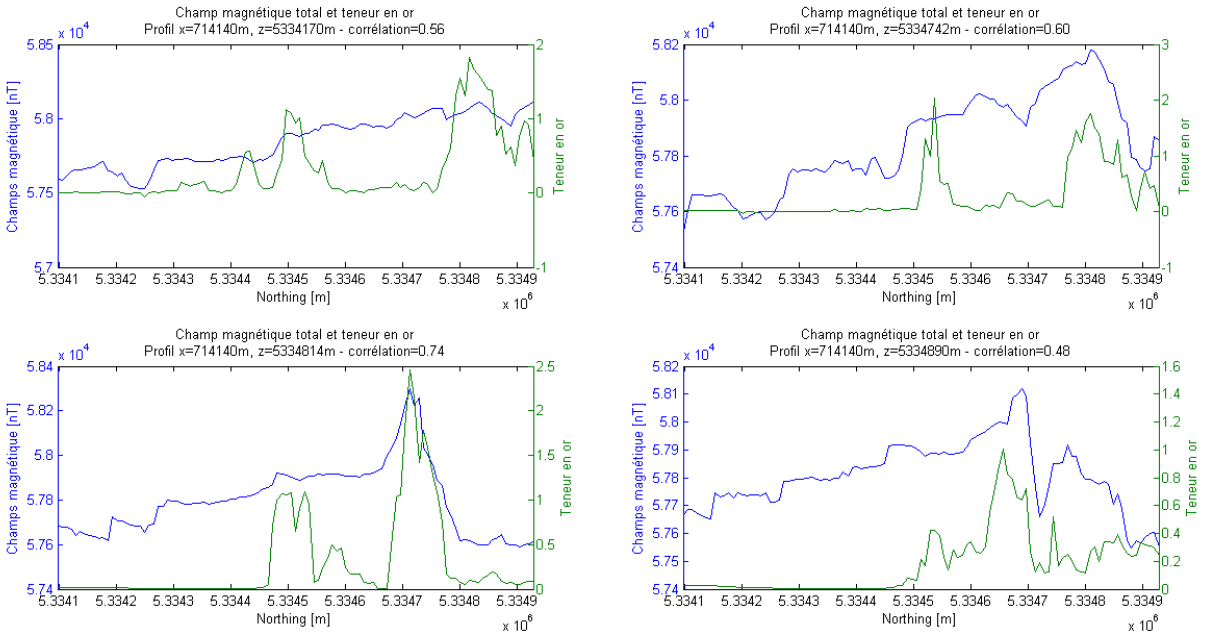

Figure 54 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnéti que total et la teneur en or selon pour différents profils horizontaux

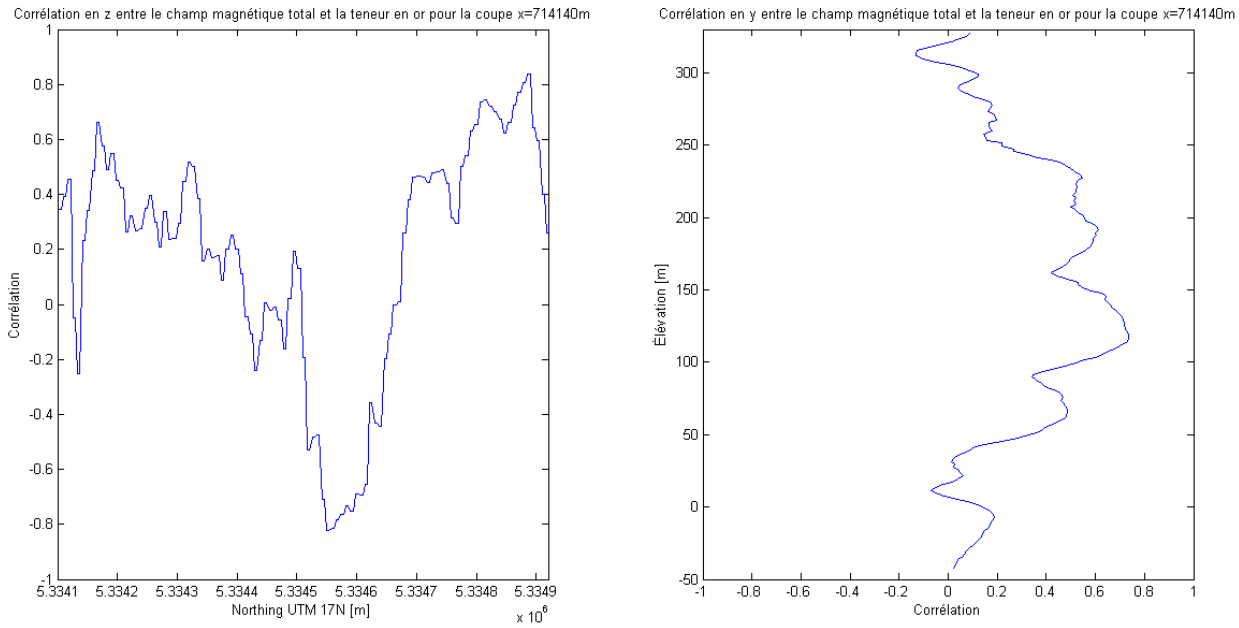

Figure 55 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite)

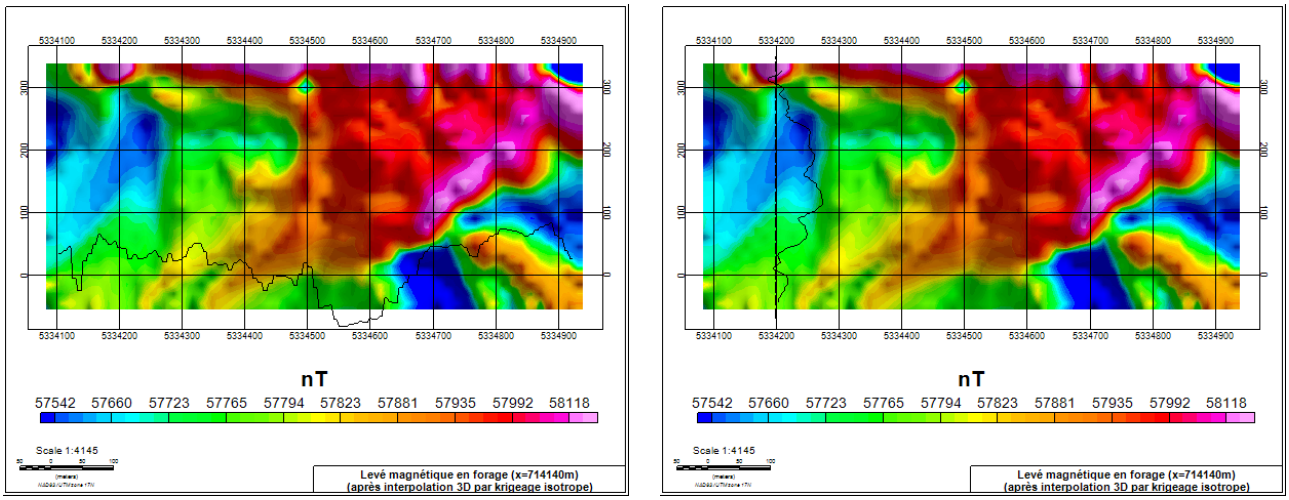

Figure 56 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite)

Effet de la correction 4 sur la représentation des données

La correction 4 a un effet notable sur la représentation finale des données tel que l'illustre la Figure 57 et la Figure 59 qui représente respectivement la coupe à x=714140m obtenue avant et après la correction 4. Pour fin de comparaison, la Figure 58 présente les teneurs en or pour cette même coupe. La distribution des coefficients de corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils verticaux ou des profils horizontaux ont été obtenus pour les deux cas et sont présentés à la Figure 60 (avant la correction 4) et à la Figure 61 (après la correction 4). Les coefficients de corrélation moyens et maximums sont présentés au Tableau 19. Il est possible de constater que la corrélation est fortement améliorée après la correction 4. En guise de comparaison visuelle, plusieurs profils individuels ont été obtenus et sont disponibles à l'Annexe 9.5 (avant la correction 4) et à l'Annexe 9.6 (après la correction 4).

Tableau 19 : Coefficients de corrélation moyens et maximums entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils horizontaux ou verticaux

	Profils verticaux		Profils horizontaux	
	Corrélation moyenne	**Corrélation maximale**	**Corrélation moyenne**	**Corrélation maximale**
Après la correction 3	0.08	0.85	0.18	0.57
Après la correction 4	0.19	0.84	0.32	0.73

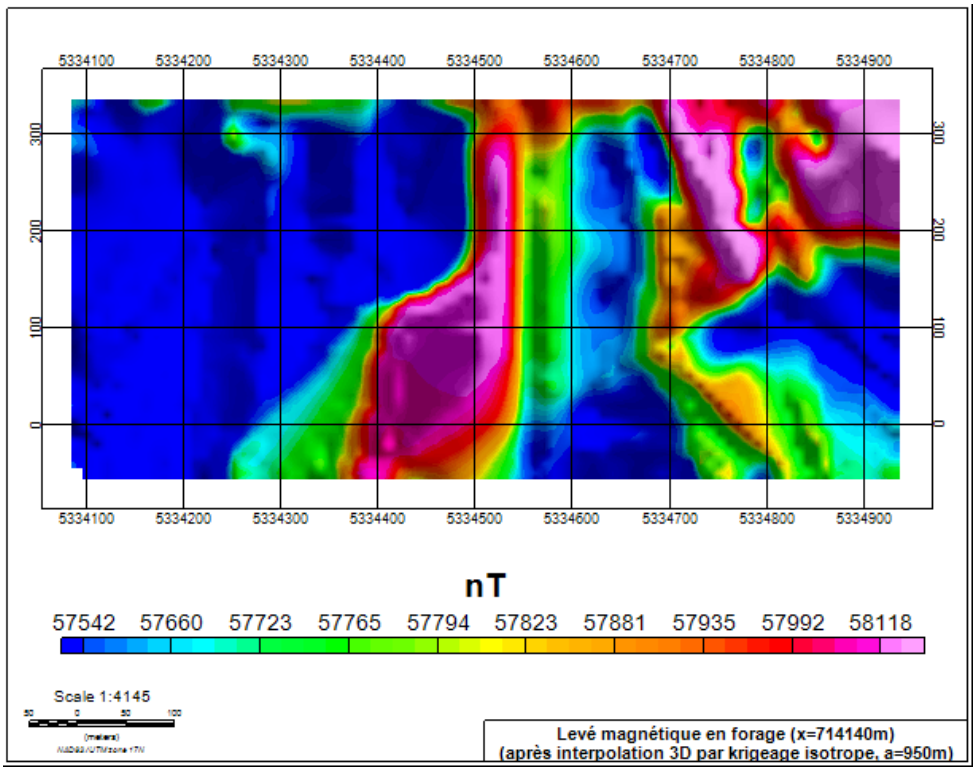

Figure 57 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, champ total (après la correction 3 – avec nivellement)

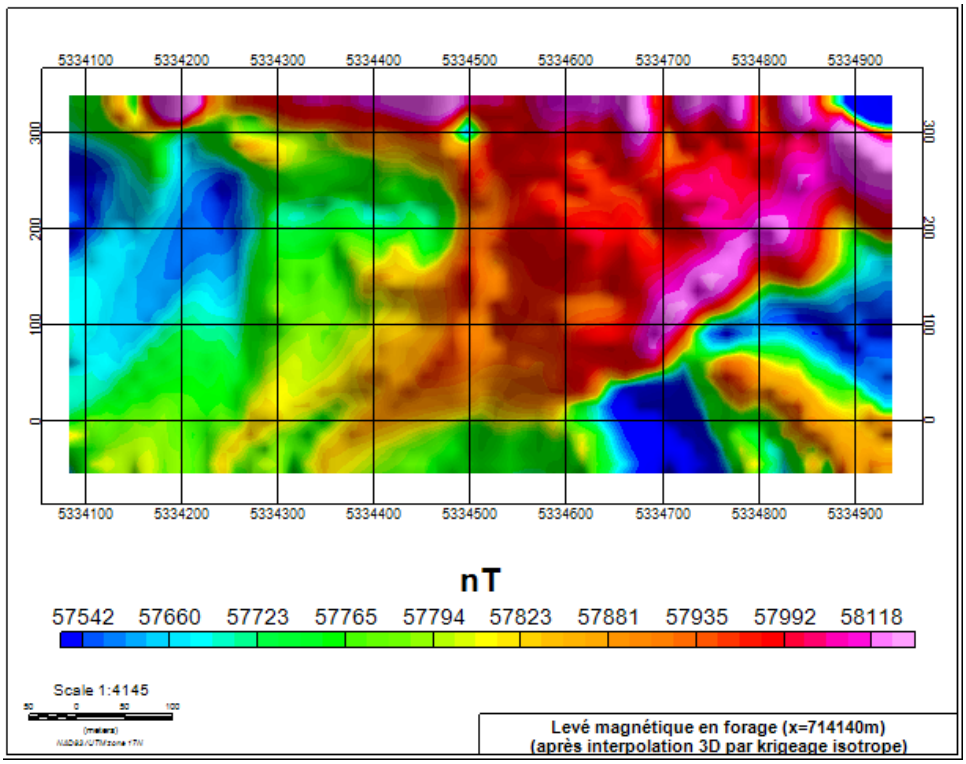

Figure 58 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, champ total (après la correction 4 – avec nivellement)

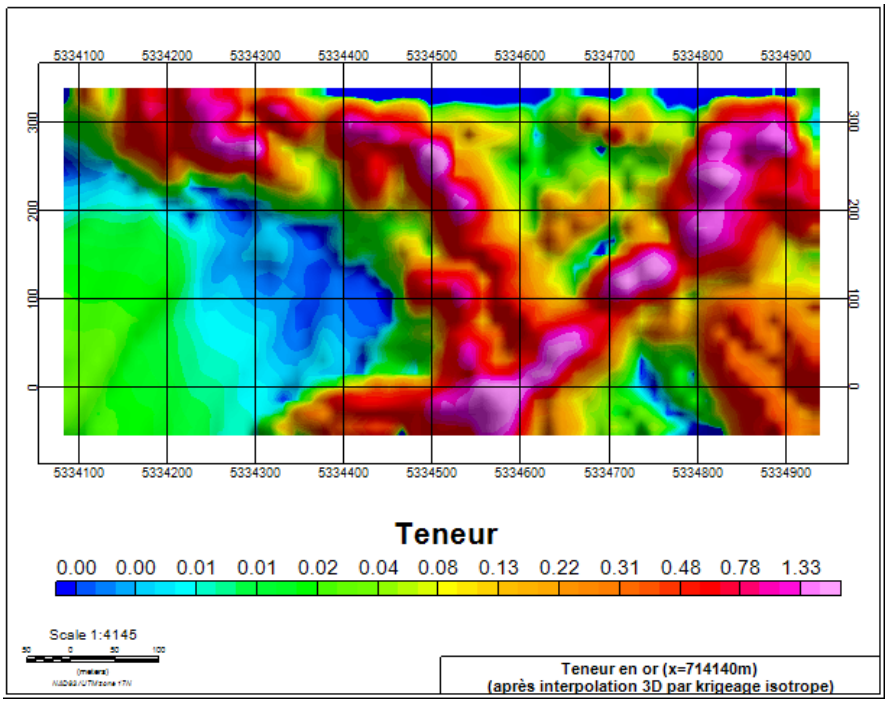

Figure 59 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or

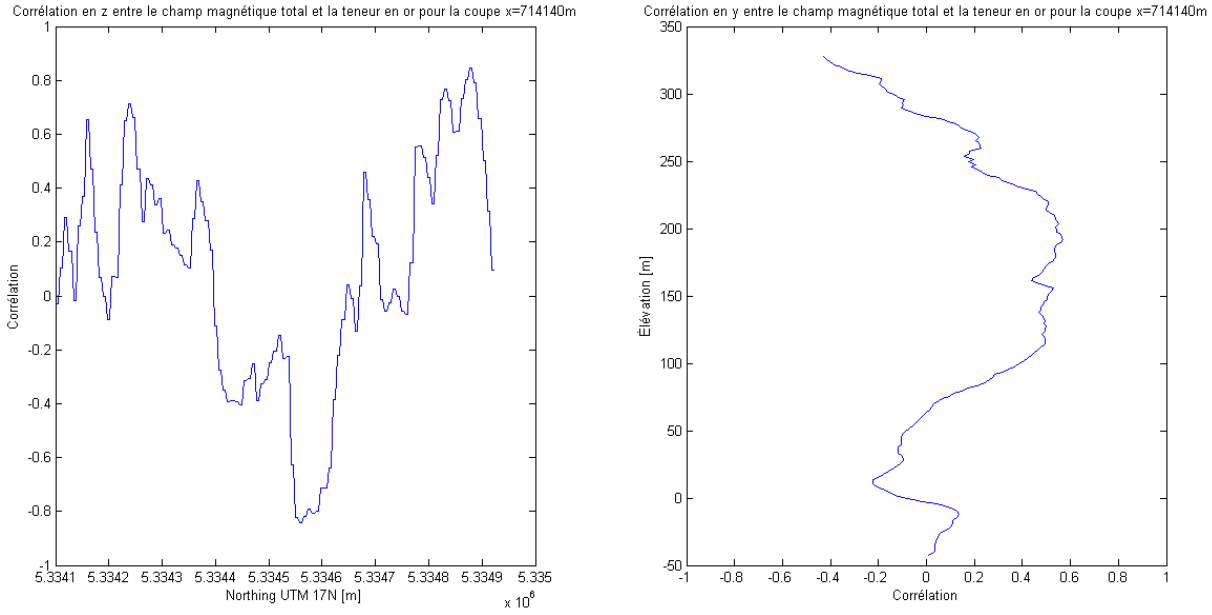

Figure 60 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnéti que total et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite) - (avant la correction 4 – avec nivellement)

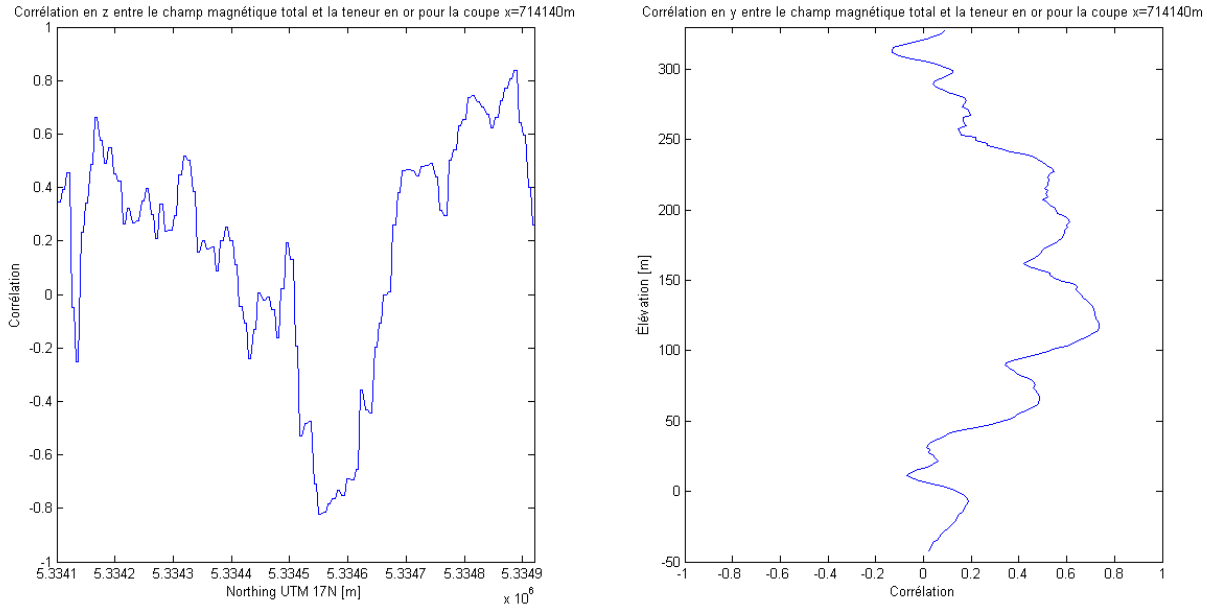

Figure 61 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnéti que total et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite) - (après la correction 4 – avec nivellement)

5.2 CORRÉLATION ENTRE LA RÉSIDUELLE DU CHAMP MAGNÉTIQUE ET LA TENEUR EN OR

La Figure 62 et la Figure 63 présente respectivement une carte de la résiduelle du champ total et de la teneur en or pour la coupe x=714140m. La Figure 64 présente l'évolution des coefficients de corrélation des différents profils selon la direction. Finalement, le Tableau 18 présente les coefficients de corrélation moyens et maximums entre la résiduelle du champ magnétique et la teneur en or, puis entre le champ total et la teneur en or, selon des profils horizontaux ou verticaux. Il est possible de constater que, dans ce cas-ci du moins, l'utilisation de la résiduelle plutôt que le champ total ne semble pas améliorer la corrélation entre les données.

Tableau 20 : Coefficients de corrélation moyens et maximums entre le champ magnétique total (ou la résiduelle du champ magnétique) et la teneur en or selon des profils horizontaux ou verticaux

	Profils verticaux		Profils horizontaux	
	Corrélation moyenne	**Corrélation maximale**	**Corrélation moyenne**	**Corrélation maximale**
Champ total	0.19	0.84	0.32	0.73
Résiduelle	0.12	0.60	0.17	0.56

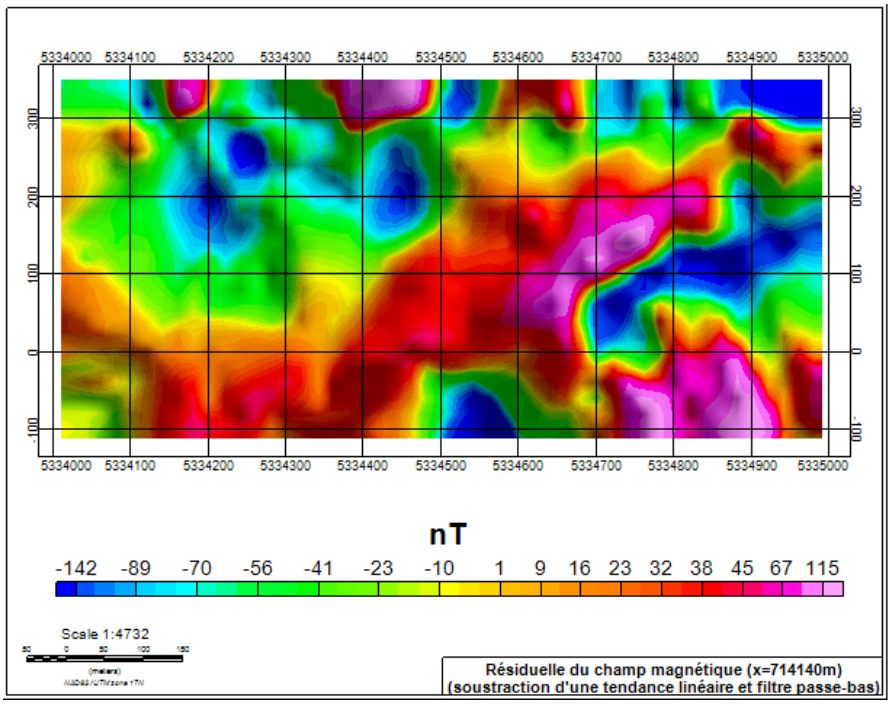

Figure 62 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, résiduelle du champ magnétique

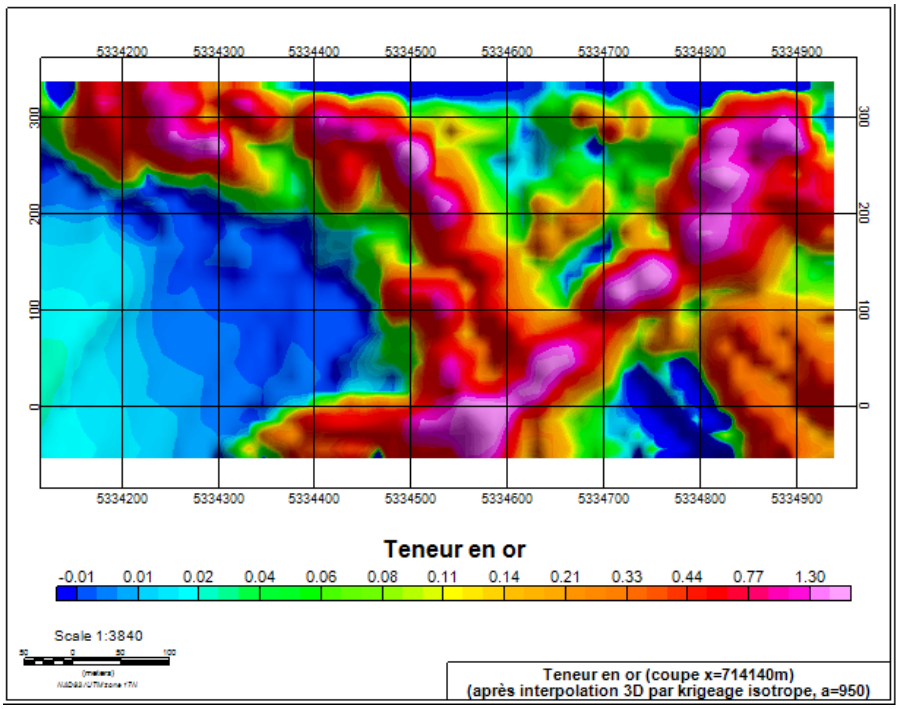

Figure 63 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or

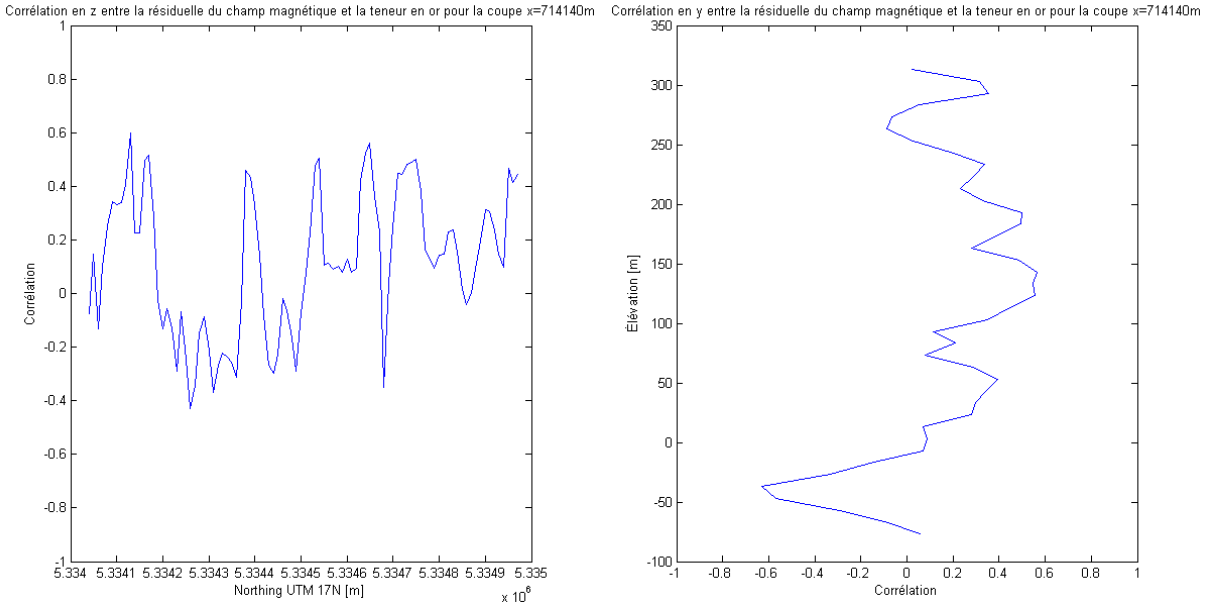

Figure 64 : Coupe x=714140m, corrélation entre la résiduelle du champ magnétique et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite)

5.1 SUSCEPTIBILITÉS

Les données de susceptibilités étaient disponibles pour trois forages dans la zone d'intérêts ciblée (CM07-1216, CM07-1705, CM07-1205 – voir annexe 9.8 pour la disposition spatiale des données). Le profil pour le forage CM07-1216 est présenté ici et les deux autres profils sont joints en annexe. Le gradient vertical du champ magnétique total et la résiduelle du champ magnétique sont juxtaposés aux profils de susceptibilités pour fins de corrélation. Le gradient de la résiduelle obtenue avant et après l'application du filtre passe-bas est également joint à des fins de comparaison (en annexe).

Le Tableau 21 synthétise les différents coefficients de corrélation obtenus pour les trois forages. Il est à noter que les données pour les deux profils joints en annexe étaient peu nombreuses, ce qui affecte certainement la qualité du résultat. La Figure 65 et la Figure 67 présente les profils pour le forage CM07-1216 (gradient du champ magnétique total, gradient de la résiduelle du champ magnétique). L'intégrale des gradients a aussi été produite pour chacun des deux profils et est présentée à la Figure 66 (intégrale du gradient du champ magnétique total) et à la Figure 68 (intégrale du gradient de la résiduelle du champ magnétique).

Tableau 21 : Coefficients de corrélation entre le champ magnétique total (ou la résiduelle du champ magnétique) et la susceptibilité

	Gradient du champ magnétique		Intégrale du gradient du champ magnétique	
Forage	**total**	**résiduel**	**total**	**résiduel**
CM07-1216	0.1706	0.1715	0.2689	0.3019
CM07-1705	-0.6066	-0.1995	-0.3958	-0.2364
CM07-1205	-0.2382	-0.5038	-0.2762	-0.5454

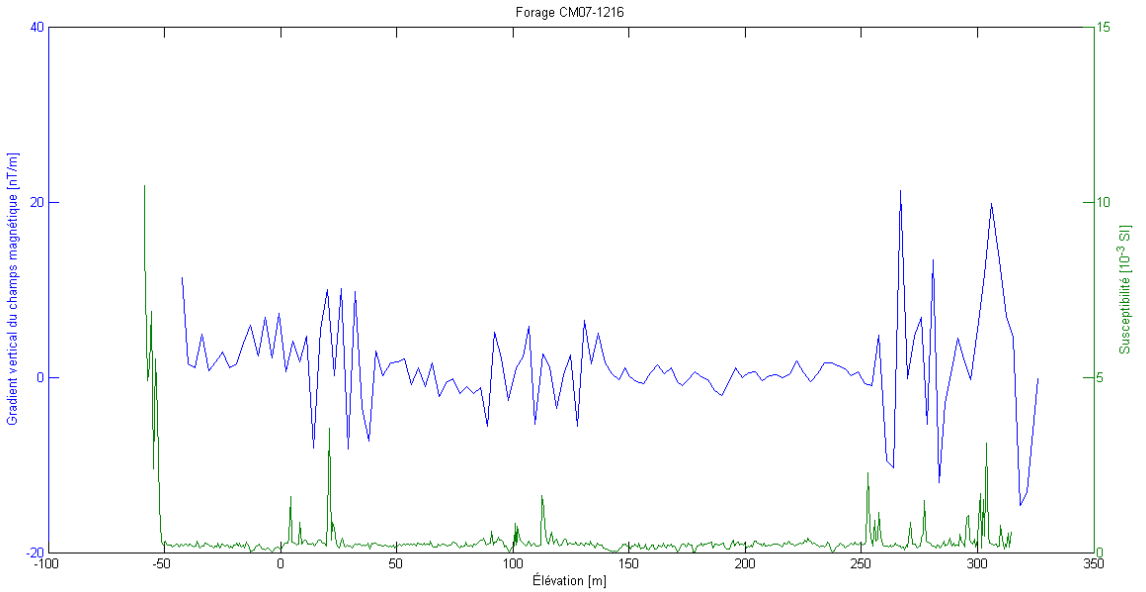

Figure 65 : Gradient du champ magnétique total et susceptibilité pour le forage CM07-1216

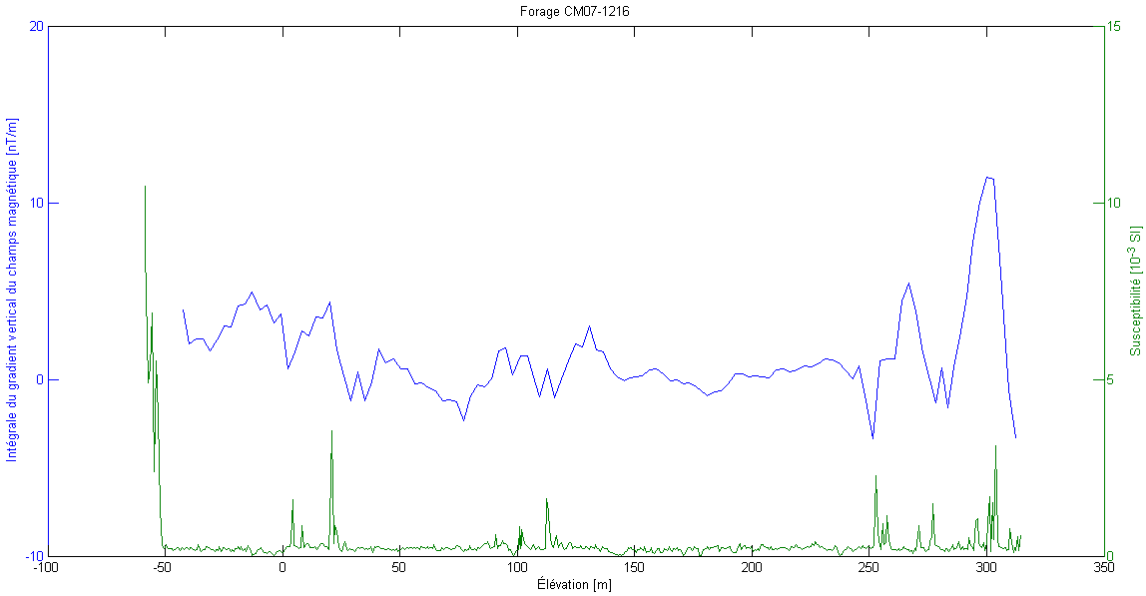

Figure 66 : Intégrale du gradient du champ magnétique total et susceptibilité pour le forage CM07-1216

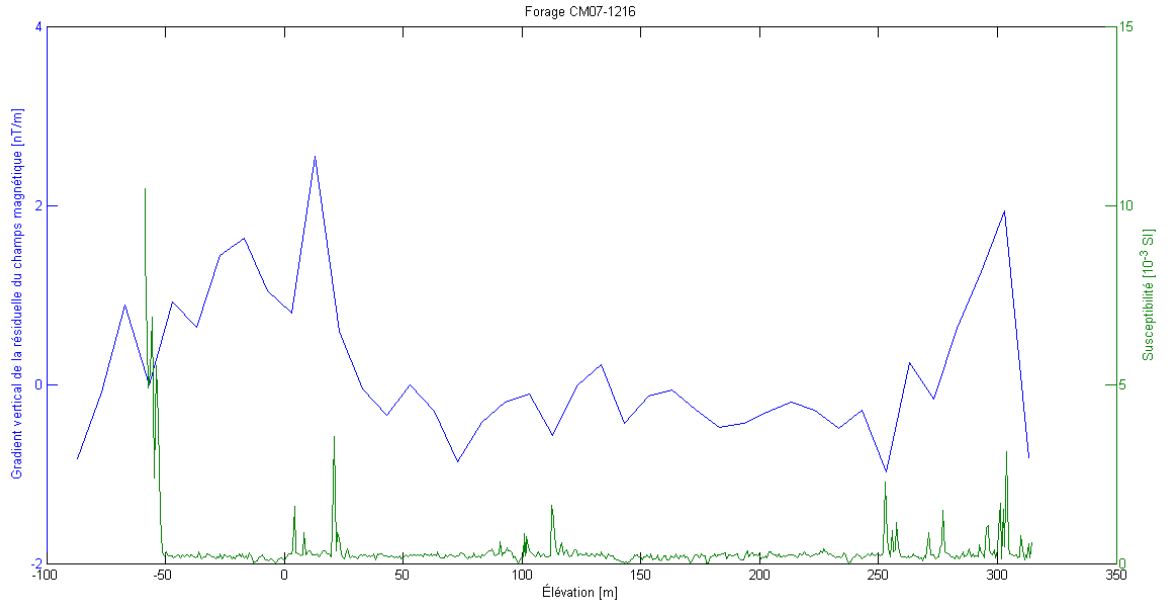

Figure 67 : Gradient de la résiduelle du champ magnétique (après filtre tendance linéaire et filtre passe-bas) et susceptibilité pour le forage CM07-1216

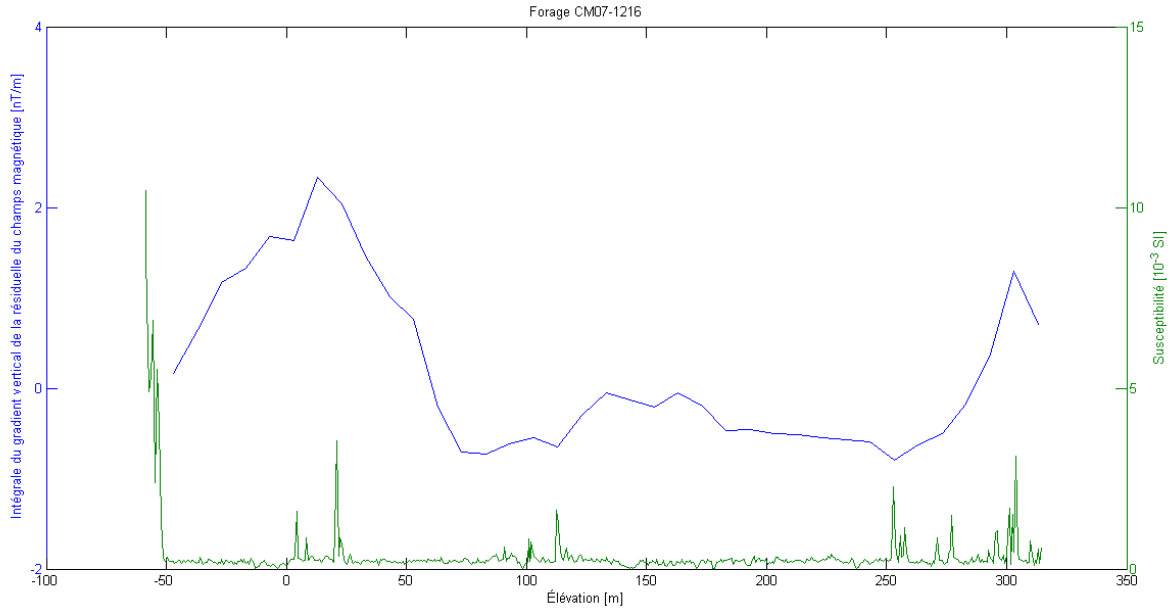

Figure 68 : Intégrale du gradient de la résiduelle du champ magnétique et susceptibilité pour le forage CM07-1216

6 DISCUSSION

Étant donné que le travail d'inversion n'a pas été complété, il sera nécessaire de poursuivre le travail avant de se prononcer quant aux significations des résultats. En effet, il est difficile de tirer des conclusions à partir seulement des coupes du champ magnétique total et de sa résiduelle.

Ce qui est étonnant de constater néanmoins, c'est qu'il était attendu que la minéralisation dans laquelle se trouve l'or produise un contraste d'anomalie magnétique négative par rapport à la roche encaissante (sédiments, métasédiments). Or, ça ne semble pas être le cas. En effet, autant sur les cartes de la résiduelle (Figure 62 par exemple) que sur les cartes du champ total (Figure 51 par exemple), les zones de fortes teneurs en or présentent généralement des contrastes positifs avec les zones environnantes.

Aussi, notons que la corrélation entre le champ magnétique et la teneur en or, bien que faible, semble présente et positive. Évidemment, une investigation plus en profondeur est nécessaire avant de tirer des conclusions.

En ce qui a trait la validité des données, il est intéressant de constater que la corrélation entre le champ magnétique et la susceptibilité semble acceptable pour le profil dont les données de susceptibilités étaient disponibles et complètes (CM07-1216), et ce, malgré l'incertitude importante sur les données du champ magnétique (±50nT). Il serait nécessaire d'obtenir davantage de données de susceptibilités afin de valider, éventuellement, les modèles d'inversion.

Finalement, rappelons que certaines étapes du traitement ont un effet appréciable sur la représentation finale et que les choix retenus ne sont pas les seules solutions possibles. La correction 4, le choix du variogramme et le choix du filtre pour l'obtention de la résiduelle sont des exemples d'étapes du traitement qui ont un effet considérable sur les résultats.

7 CONCLUSION

Jusqu'à maintenant, les différents levés géophysiques qui ont été effectués sur le site de Canadian Malartic se sont soldés par un échec, la minéralisation du gisement ne semblant pas avoir de signature géophysique particulière. Plusieurs investigations sont donc faites présentement en ce sens. Dans ce rapport, il est question de réutiliser des données magnétiques ayant servi dans le cadre d'une campagne de forages entre 2005 et 2008. La première étape de traitement des données a fait l'objet de ce rapport.

Ainsi, 1 353 fichiers Excel sur un ensemble de 1673 fichiers disponibles ont été identifiés comme contenant des données magnétiques. Ces fichiers bruts contenaient au total 93 220 données dont les valeurs du champ magnétique s'étalaient de 30 618nT à 98 795nT. Comme il était entendu qu'étant donné le contexte géologique peu magnétique de la région les valeurs du champ magnétique ne devraient pas osciller au-delà de quelques centaines de nano tesla de part et d'autre de la valeur du champ total (environ 56 500nT en 2007), ces données ont dû être corrigées. Un premier filtrage des données aberrantes et une délimitation d'une zone plus restreinte a permis d'obtenir un premier échantillon de données plus acceptable. Des corrections plus pointues ont ensuite été appliquées. Les valeurs ponctuelles non cohérentes ont été soustraites et une attention particulière a été accordée aux premières données de chaque sondage. Aussi, une condition de rejet a été appliquée sur la profondeur maximale de la première donnée afin de limiter les erreurs d'extrapolation. Un total de 455 fichiers a ainsi été retenu, soit 29 485 données dont les valeurs du champ magnétique s'étalaient de 54 424nT à 58 923nT (Moyenne : 56 139nT, Écart-type : 172nT). Les données restantes ont ensuite été repositionnées à leurs positions vraies par interpolation verticale linéaire, ce qui a généré quelques données artificiellement. Un nivelage des données a ensuite été réalisé à l'aide de données provenant d'un levé magnétique aéroporté réalisé en 1994 et couvrant l'ensemble de la zone. Les données ont ensuite été nivelées en utilisant la première valeur de chaque forage afin de vérifier que la carte du levé en surface était bien retrouvée avec cette opération en traçant la carte des premières valeurs de chaque sondage. Pour assurer plus de stabilité, la première valeur a ensuite été remplacée par la valeur moyenne pour le forage pour l'opération de nivellement.

Une fois les données corrigées, celles-ci ont été krigées sur un volume régulier (maille élémentaire de 10m x 10m x 10m) à l'aide d'un variogramme isotrope de longue portée (a=950m). Finalement, un filtre passe-bas (~100m) et un filtre de type tendance linéaire ont été appliqués sur le volume krigé afin d'isoler les composantes locales du champ.

Plusieurs coupes verticales du champ magnétique total et de sa résiduelle, de même que les coupes correspondantes des teneurs en or ont été obtenues et sont présentées dans ce rapport. Il a été possible de démontrer que certaines étapes du traitement ont un effet appréciable sur la représentation finale. Notamment, la correction 4, le choix du variogramme et le choix du filtre pour l'obtention de la résiduelle sont des exemples d'étapes du traitement qui ont un effet considérable sur les résultats.

Il a aussi été intéressant de constater les zones de fortes teneurs en or présentent généralement des contrastes positifs avec les zones environnantes sur les cartes de la résiduelle et du champ magnétique total, alors qu'il était attendu que le contraste soit négatif étant donné les susceptibilités respectives de la minéralisation et de la roche encaissante. La corrélation potemtielle entre le champ magnétique et la teneur en or reste un élément intéressant à investiguer.

Notons aussi qu'une corrélation acceptable entre le champ magnétique et la susceptibilité a été obtenue pour le profil dont les données de susceptibilités étaient disponibles et complètes (CM07-1216).

Finalement, rappelons que le travail n'est pas terminé et qu'il sera nécessaire de produire l'inversion du volume krigé avant de se prononcer quant aux significations des résultats. Il sera aussi nécessaire d'obtenir davantage de données de susceptibilités afin de valider, éventuellement, les modèles d'inversion.

8 RÉFÉRENCES

Allard, M. (1999). *La géophysique appliquée à l'exploration minérale.* Montréal: Centre collégial de développement de matériel didactique (CCDMD).

BBA. (2012). *Rapport surl'étude de faisabilité - Projet Canadian Malartic .*

Beaulieu, C. (2010). *Le gisement aurifère péri-granitique de canadian malartic (quebec) : apport de la modélisation 3d à l'interprétation Métallogénique.* Montréal: Université du Québec à Montréal.

Belzile, E., & Gignac, L.-P. (2010). *Updated resource and reserve estimates for the Canadian Malartic Project Malartic, Quebec on behalf of Osisko Mining Corporation.* Rouyn-Noranda: Belzile Solution Inc.

Chouteau, M. (2013). *Notes de cours GLQ2201 - Géophysique I.* Montréal: École Polytechnique de Montréal.

DIVEX. (2014). *Les minéralisations porphyriques à or de Malartic Projet DIVEX SC23.* Récupéré sur DIVEX: http://www.divex.ca/projets/sc23.php

GeoMEM. (2014). *"FlexIT" SmartTool (EMS) Support zone, PPTMS.* Récupéré sur GeoMEM: http://www.geomem.com/support/smarttool.html

Giroux, B. (2008). *Notes de cours GML8201 - Techniques géophysiques de proche.* Montréal: Ecole Polytechnique de Montréal.

Giroux, B. (2013). *Notes de cours GML6201A - Proprietes physiques.* Montréal: École Polytechnique de Montréal.

Jébrak, M., & Beaulieu, C. (2007). *Les minéralisations porphyriques aurifères de Malartic.* Québec: Département de des Sciences de la Terre et de l'Atmosphère, Université du Québec à Montréal .

Lafrance, B. (2013). *Typologie des intrusions associées aux grands couloirs de déformation de l'Abitibi et relation avec les minéralisations aurifères.* Récupéré sur Consorem: https://consorem.uqac.ca/presentation_pub/forum_tecno_2013/Benoit_Lafrance.pdf

Li, Y., & W. Oldenburg, D. (1996). 3-D inversion of magnetic data. *GEOPHYSICS, VOL. 61, NO. 2*, P. 394-408.

Marcotte, D. (2013). *Notes de cours.* Montréal: École Polytechnique de Montréal.

Marcotte, D. (2013). *Notes de cours GML6402A.* Montréal: École Polytechnique de Montréal.

Marcotte, D. (s.d.). *Géostatistique et géologie minières.* Consulté le 2014, sur Géostatistique: http://geo.polymtl.ca/~marcotte/glq3401min/chapitre3.pdf

Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. (2013). *La mine Canadian Malartic, Abitibi, Québec : caractéristiques géologiques et chronologie relative de la minéralisation aurifère à basse teneur et fort tonnage.* Récupéré sur Québec Mines: http://quebecmines.mrn.gouv.qc.ca/2013/programme/pdf/s02_02_desouza.pdf

Oldenburg, D., & Pratt, D. (2007). Geophysical Inversion for Mineral Exploration: a Decade of Progress in Theory and Practice. *Plenary Session: The Leading Edge*, 61-95.

Osisko. (2014). *Canadian Malartic en bref*. Récupéré sur Osisko: http://www.osisko.com/fr/mines-et-projets/canadian-malartic/canadian-malartic-en-bref/

Reed, L. (2005). *Gravity and Magnetic Three-Dimensional (3D) Modelling: Discover Abitibi Initiative.* Discover Abitibi Initiative; Ontario Geological Survey, Open File Report 6163, 40p.

Ressources naturelles Canada. (2014). *http://geomag.nrcan.gc.ca/calc/mfcal-fra.php.* Récupéré sur Ressources naturelles Canada: http://geomag.nrcan.gc.ca/calc/mfcal-fra.php

SIDEX. (2007). *Explorer pour le molybdène au Québec.*

Wares, R., & Prud'homme, S. (2013). *La mine Canadian Malartic, partie sud de la Ceinture de l'Abitibi, Québec, Canada : découverte et mise en valeur d'un gisement aurifère archéen à fort tonnage .* Montréal: Corporation minière Osisko.

9 ANNEXE

9.1 LEVÉ MAGNÉTIQUE AÉROPORTÉ

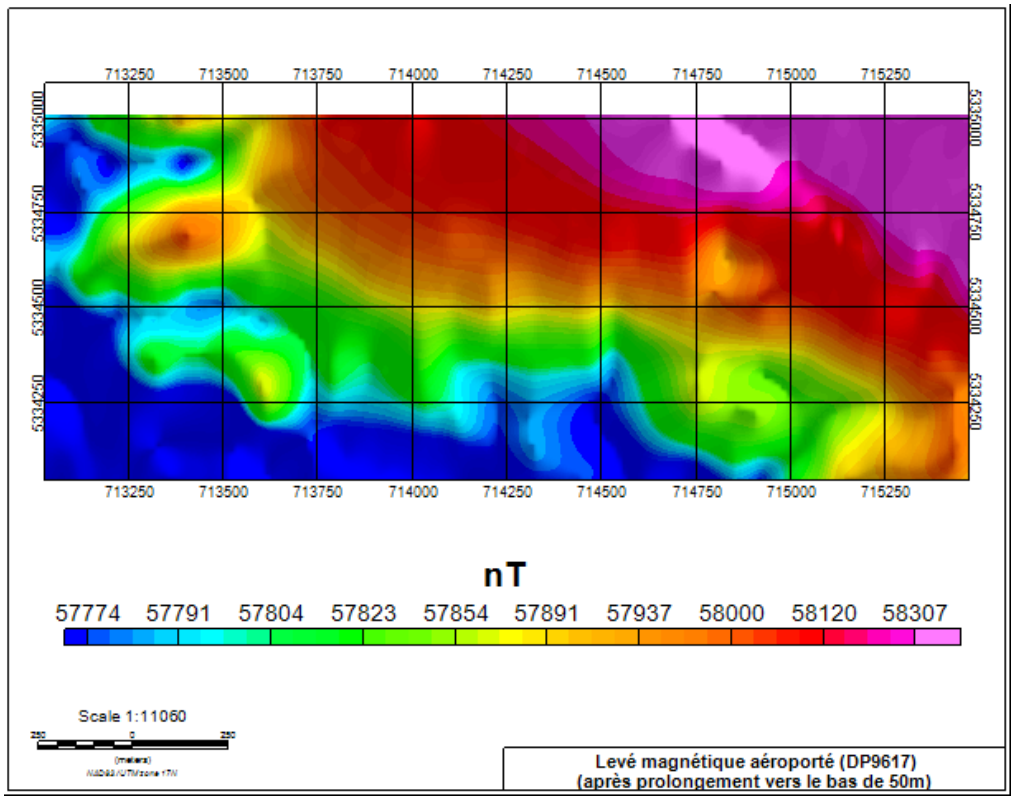

Figure 69 : Champ magnétique total pour le levé magnétique aéroporté DP9617

Tableau 22 : Statistique pour le levé magnétique aéroporté DP9617

	Levé magnétique aéroporté	
	Champ magnétique brut [nT]	Champ magnétique (prolongé vers le bas) [nT]
Moyenne	57 987	57 977
Écart-Type	395	441

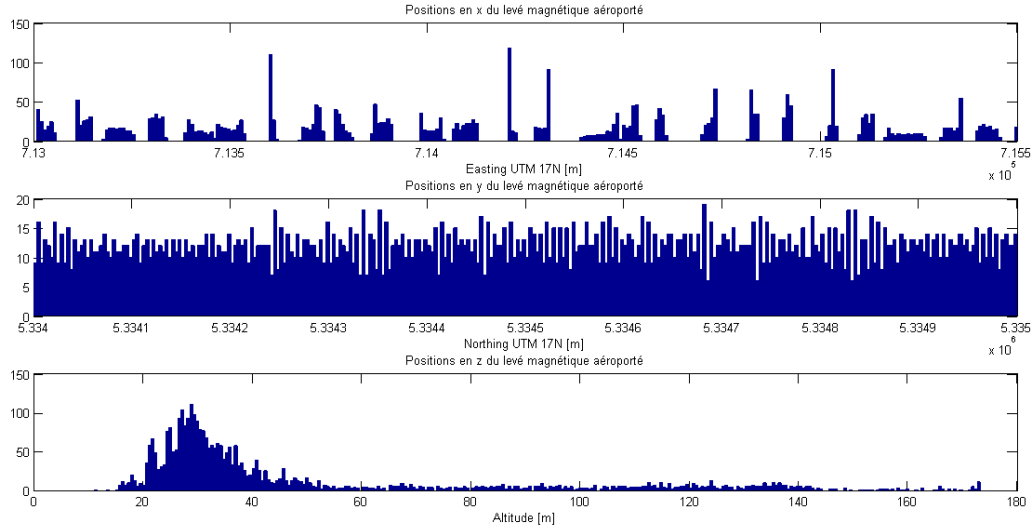

Figure 70 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique aéroporté de référence (DP9617)

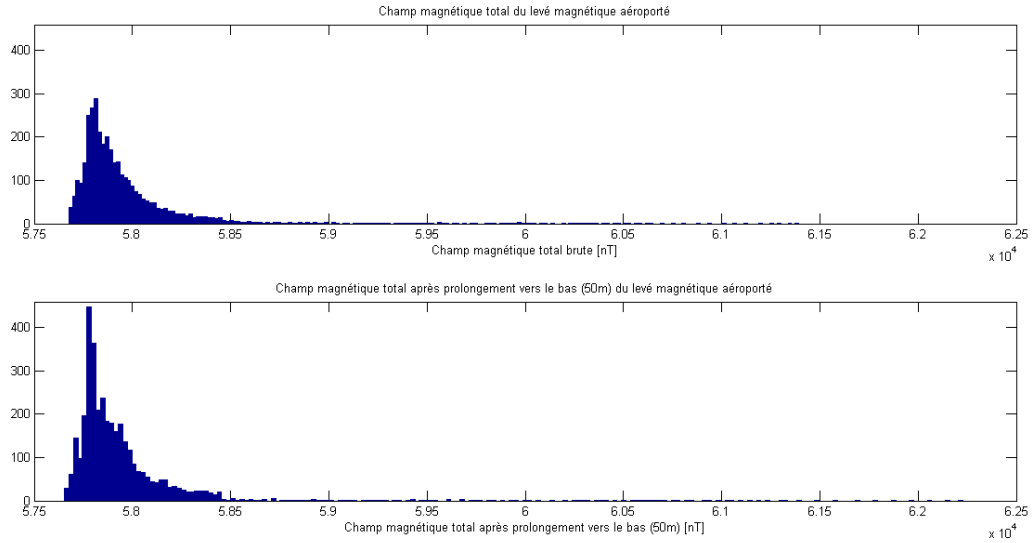

Figure 71 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique aéroporté de référence (DP9617)

9.2 ÉTAT DES DONNÉES BRUTES (APRÈS CORRECTIONS MANUELLES DE CERTAINES SÉRIES)

Tableau 23 : Statistiques pour les données brutes (levé magnétique en forage)

	Nombre de forage	Nombre de données	Distribution des données par forage (moyenne)			Valeurs du champ magnétique			
			Nombre	Début [m]	Fin [m]	Moyenne [nT]	Écart type [nT]	Minimum [nT]	Maximum [nT]
CM05	25	2 473	99	13	308	56 428	495	44 628	112 483
CM06	255	20 651	81	12	256	NaN	NaN	14 813	102 537
CM07	678	46 855	69	11	224	NaN	NaN	16 340	112 424
CM08	256	16 866	66	19	250	NaN	NaN	25 443	64 508
CM09	139	6 375	46	23	168	NaN	NaN	51 866	102 021
Moyenne par série	**271**	18 644	72	16	241	56 428	495	30 618	98 795
Total	**1 353**	93 220							

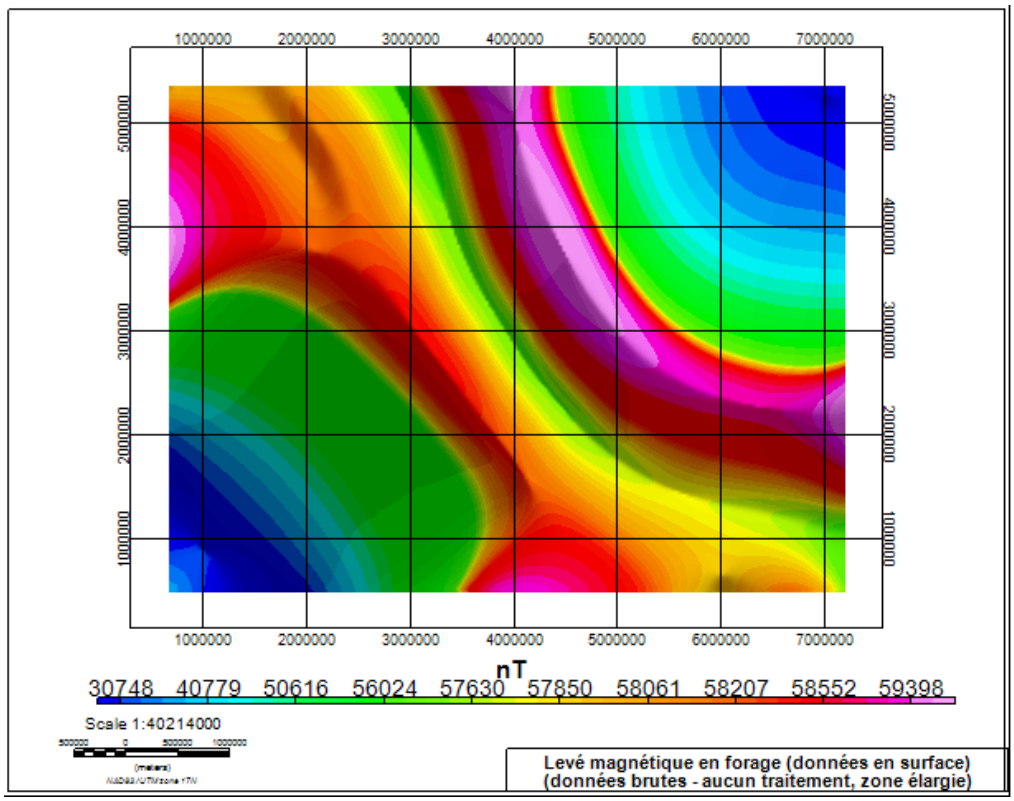

Figure 72 : Champ magnétique en surface des données en forages (sans traitement)

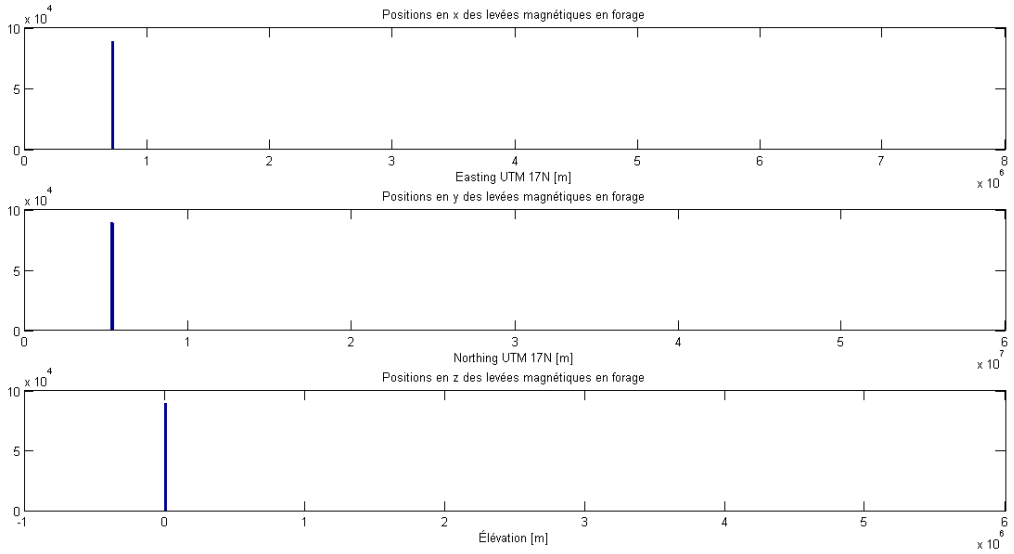

Figure 73 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (sans traitement)

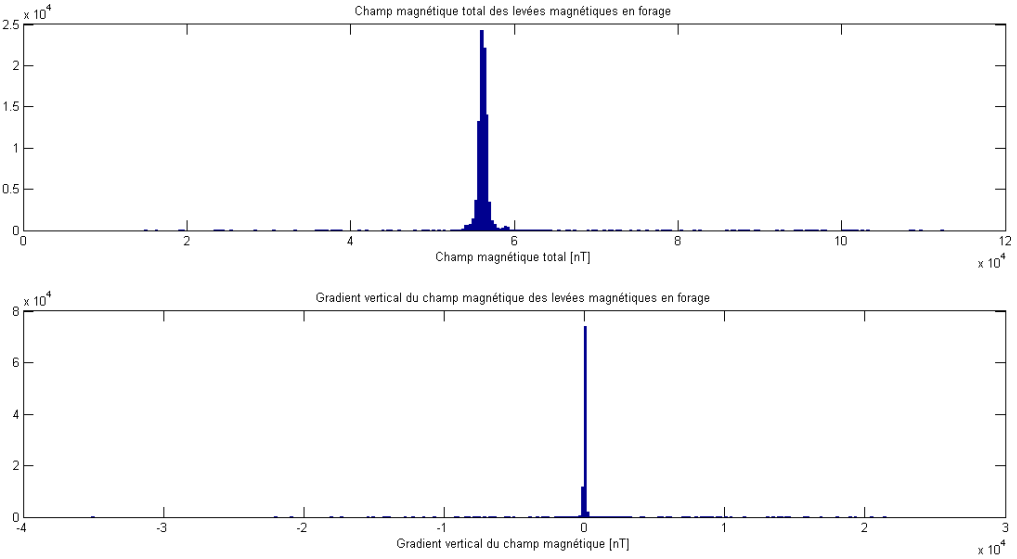

Figure 74 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (sans traitement)

9.3 ÉTAT DES DONNÉES APRÈS LA CORRECTION 1

Tableau 24 : Statistiques **sur la distribution des données par forage après la première correction (levé magnétique en forage)**

	Nombre de forage	Nombre de données	Distribution des données par forage (moyenne)		
			Nombre	Début [m]	Fin [m]
CM05	25	2 471	99	13	308
CM06	250	20 240	81	13	255
CM07	651	44 429	68	11	222
CM08	252	16 751	66	18	252
CM09	133	6 045	45	24	168
Moyenne par série	262	17 987	72	16	241
Total	1 311	89 936	359	80	1 205

Tableau 25 : Statistiques sur les **valeurs du champ magnétique après la première correction (levé magnétique en forage)**

	Valeurs du champ magnétique après la correction 1				Valeurs du champ magnétique nivelé après la correction 1			
	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Écart type [nT]	Minimum [nT]	Maximum [nT]
CM05	56 407	231	53 399	59 527	57 791	231	54 218	61 057
CM06	56 577	203	50 635	63 057	57 574	203	51 452	64 403
CM07	56 042	214	52 710	60 533	57 512	214	52 473	61 988
CM08	56 116	215	52 326	64 508	57 336	215	53 465	60 810
CM09	56 177	230	51 866	60 103	57 597	230	55 546	64 476
Moyenne par série	56 264	219	52 187	61 546	57 562	219	53 431	62 546

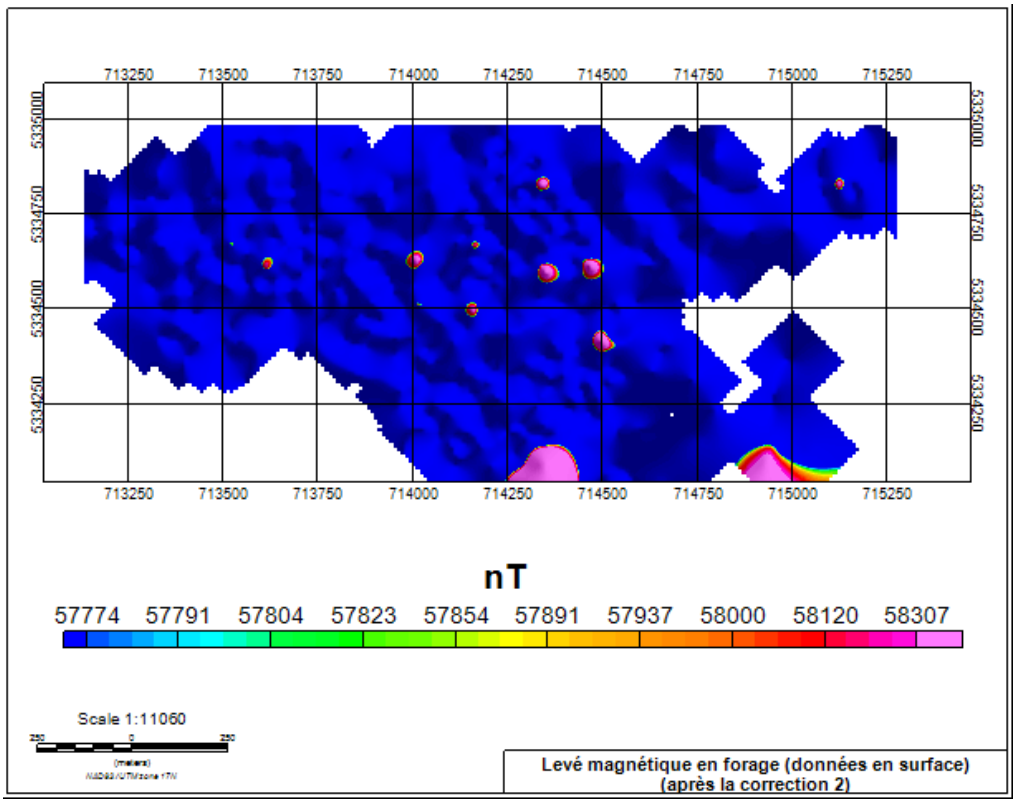

Figure 75 : Champ magnétique en surface des données en forages (après une première édition des données – sans nivellement)

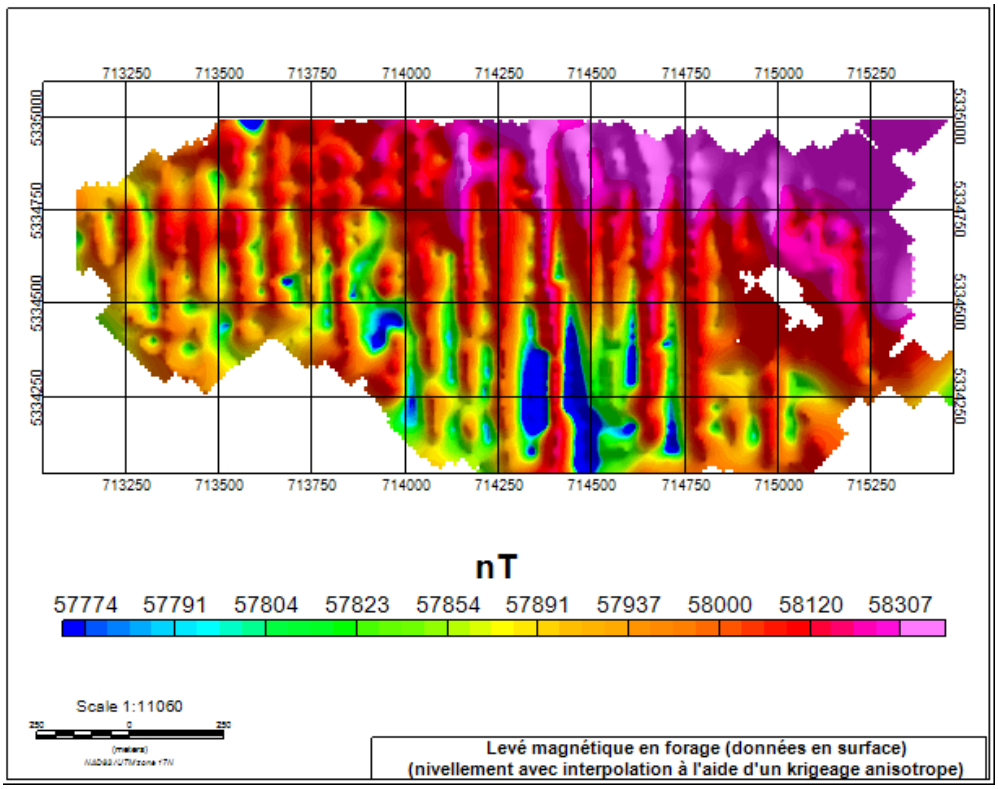

Figure 76 : Champ magnétique en surface des données en forages nivelées avec un variogramme anisotrope

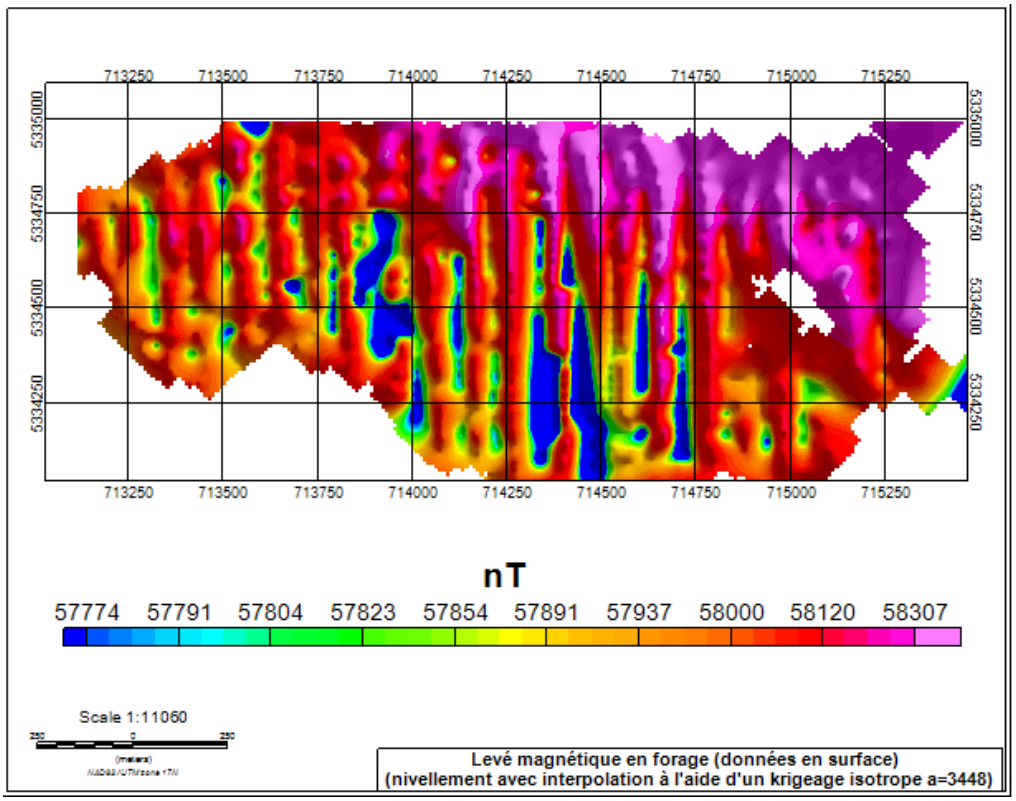

Figure 77 : Champ magnétique en surface des données en forages nivelées avec un variogramme isotrope a=3448m

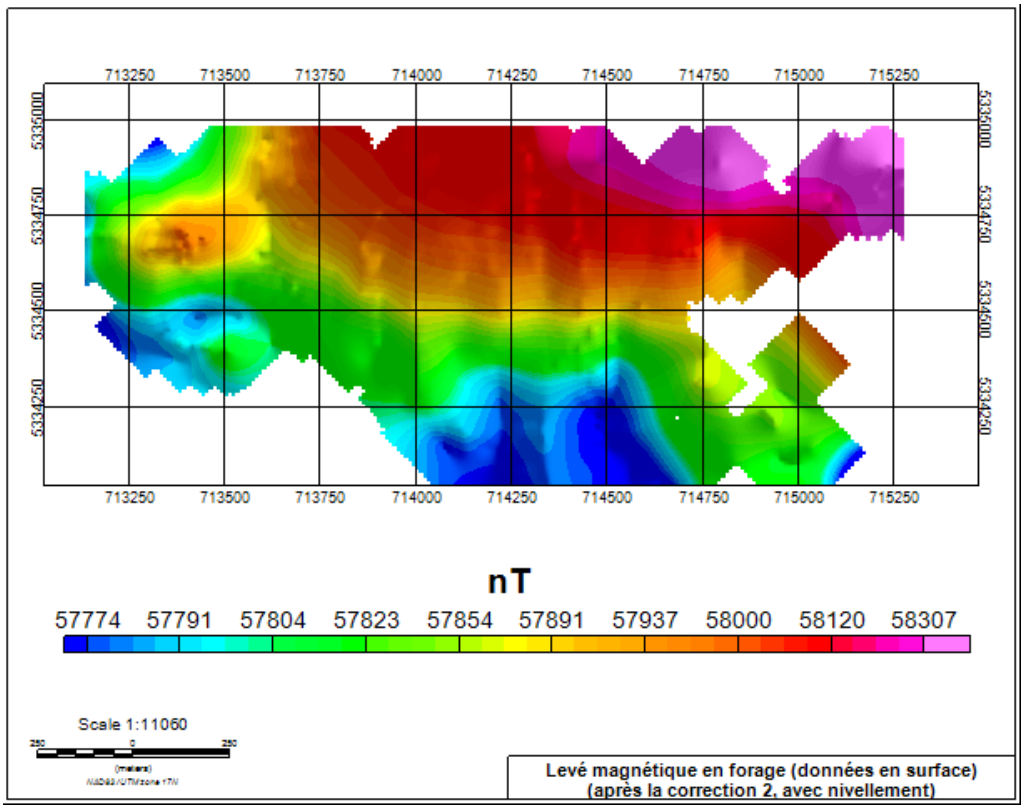

Figure 78 : Champ magnétique en surface des données en forages (après une première édition des données – avec nivellement)

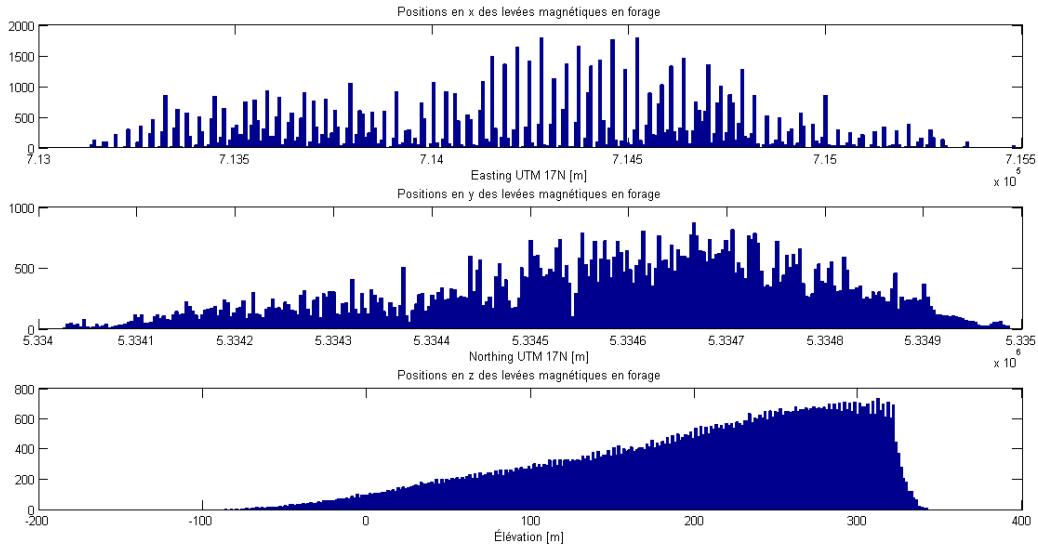

Figure 79 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après une première édition des données – sans nivellement)

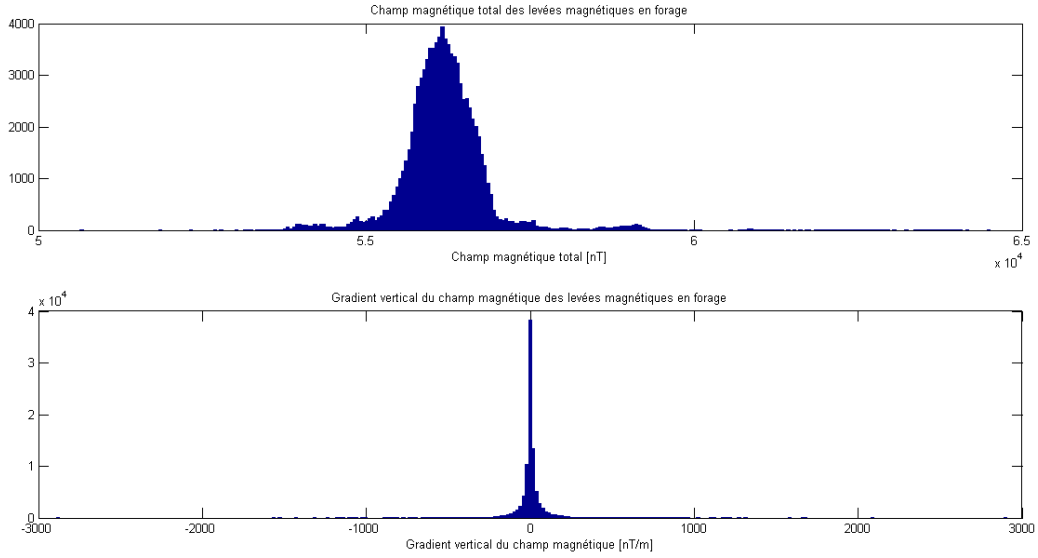

Figure 80 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après une première édition des données – sans nivellement)

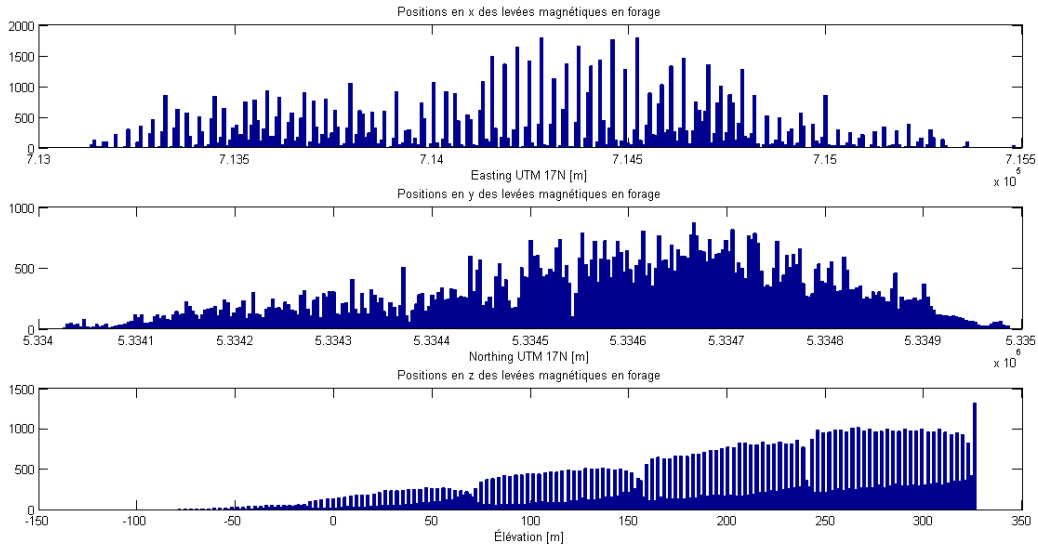

Figure 81 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après une première édition des données – avec nivellement)

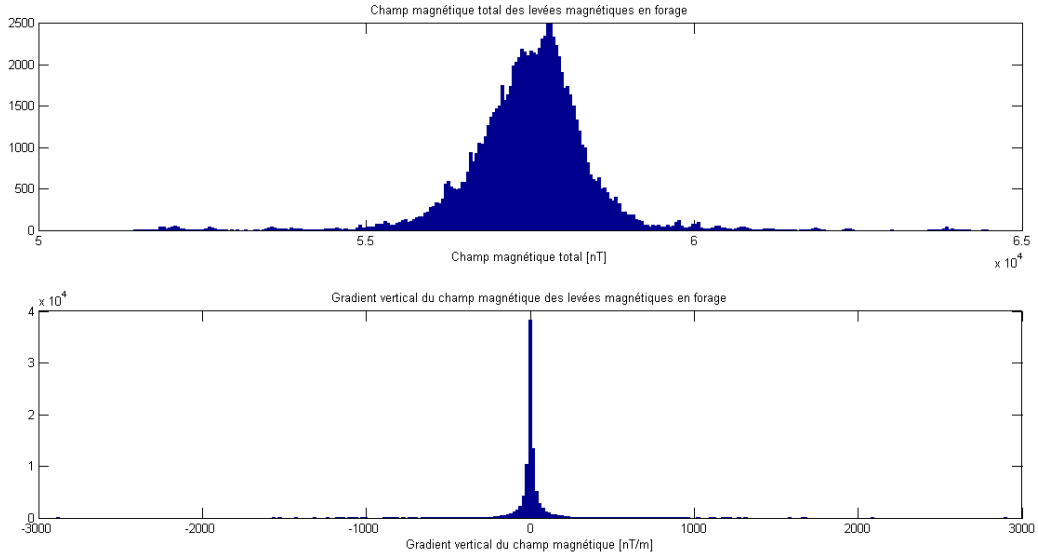

Figure 82 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après une première édition des données – avec nivellement)

9.4 ÉTAT DES DONNÉES APRÈS LA CORRECTION 2

Tableau 26 : Statistique sur la distribution des données par forage après la deuxième correction (levé magnétique en forage)

	Nombre de forage	Nombre de données	Distribution des données par forage (moyenne)		
			Nombre	Début [m]	Fin [m]
CM05	14	1 357	97	5	309
CM06	87	7 378	85	4	265
CM07	292	17 186	59	5	197
CM08	50	3 147	63	5	228
CM09	12	417	35	3	110
Moyenne par série	91	5 897	68	4	222
Total	455	29 485			

Tableau 27 : Statistique sur les valeurs du champ magnétique après la deuxième correction (levé magnétique en forage)

	Valeurs du champ magnétique après la correction 1				Valeurs du champ magnétique nivelé après la correction 1			
	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Écart type [nT]	Minimum [nT]	Maximum [nT]
CM05	56 304	185	55 265	57 072	57 618	185	56 547	58 651
CM06	56 543	130	55 034	59 312	57 799	130	56 341	59 422
CM07	56 005	161	53 032	57 907	57 700	161	55 285	59 308
CM08	56 088	165	54 735	62 963	57 655	165	56 358	58 921
CM09	55 753	218	54 052	57 360	57 931	218	56 524	59 542
Moyenne par série	56 139	172	54 424	58 923	57 741	172	56 211	59 169

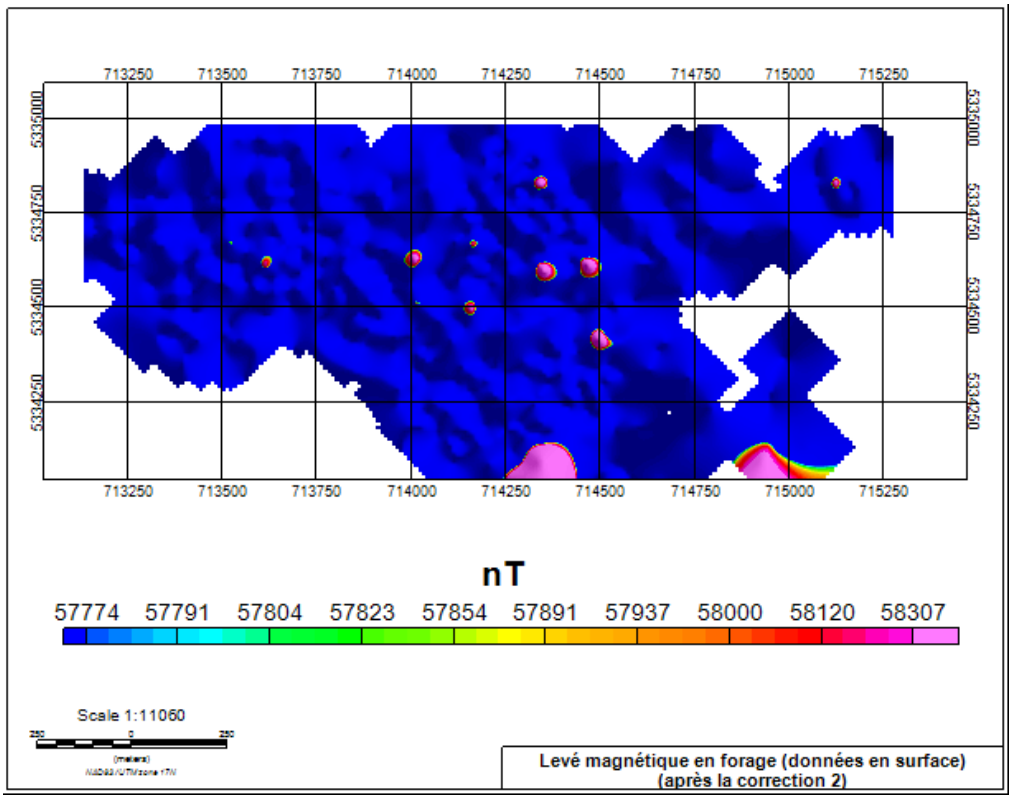

Figure 83 : Champ magnétique en surface des données en forages (après la correction 2)

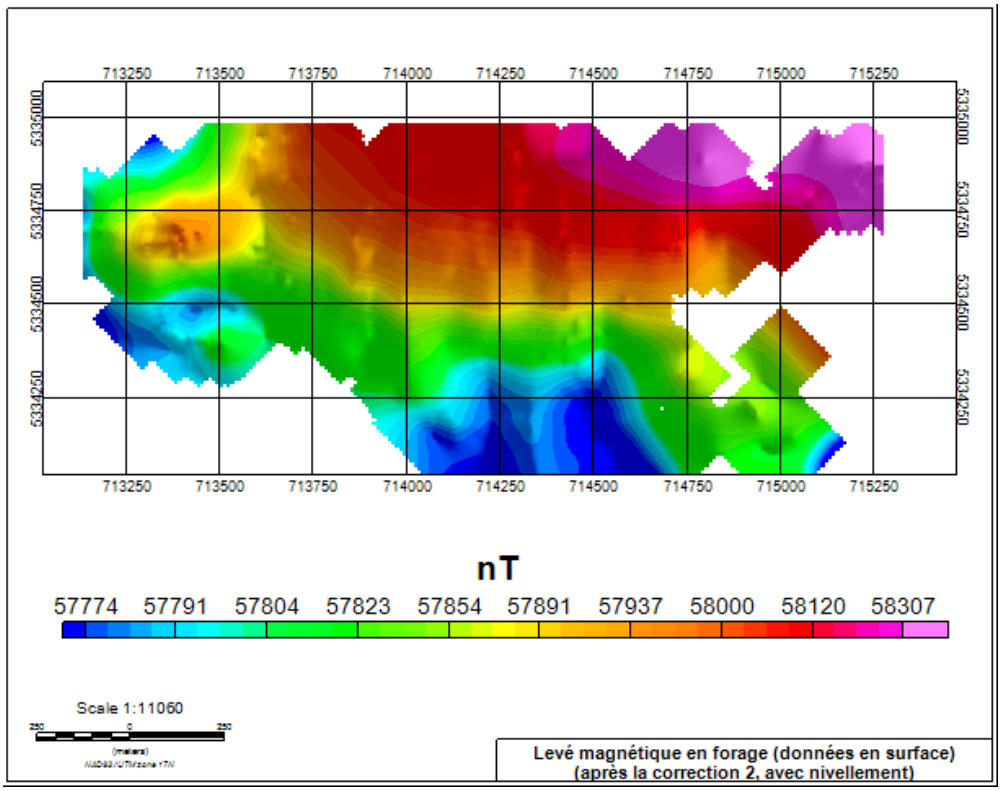

Figure 84 : Champ magnétique en surface des données en forages (après la correction 2 – avec nivellement)

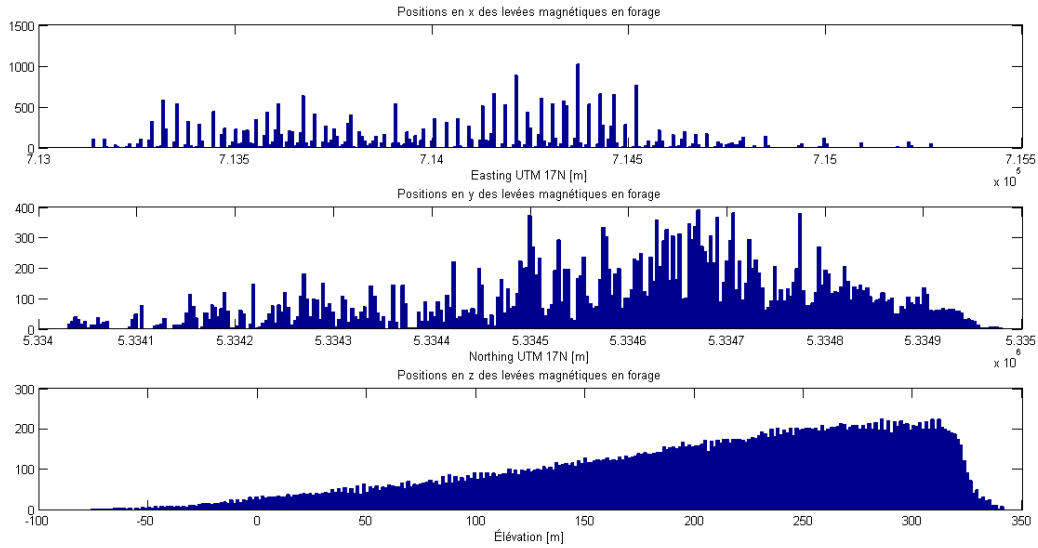

Figure 85 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après la correction 2 – sans nivellement)

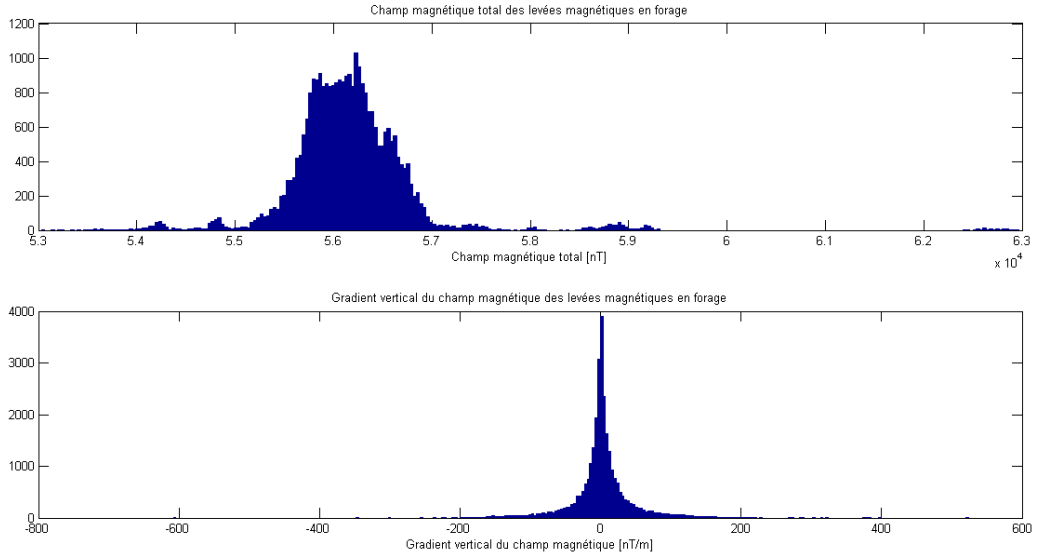

Figure 86 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après la correction 2 – sans nivellement)

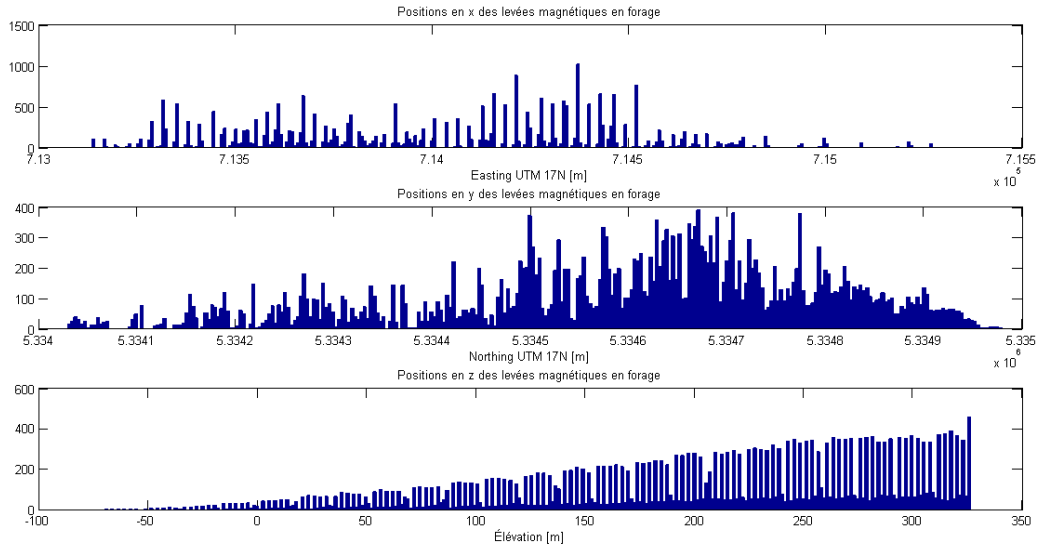

Figure 87 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après la correction 2 – avec nivellement)

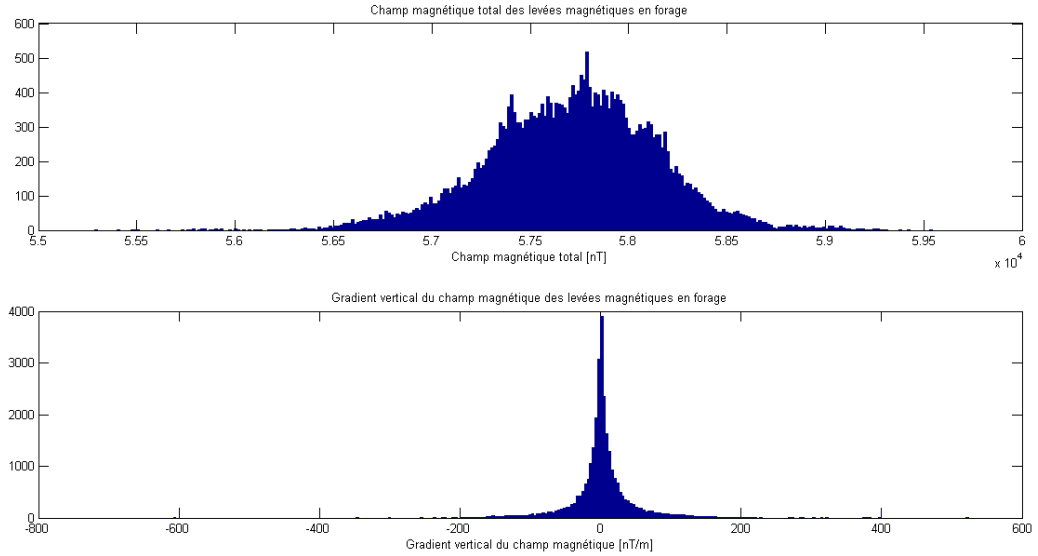

Figure 88 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après la correction 2 – avec nivellement)

9.5 ÉTAT DES DONNÉES APRÈS LA CORRECTION 3

Tableau 28 : Statistique sur la distribution des données par forage après la troisième correction (levé magnétique en forage)

	Nombre de forage	Nombre de données	Distribution des données par forage (moyenne)		
			Nombre	Début [m]	Fin [m]
CM05	14	1 460	104	2	302
CM06	85	7 703	91	3	259
CM07	289	19 045	66	3	190
CM08	48	3 602	75	4	222
CM09	12	422	35	5	105
Moyenne par série	90	6 446	74	3	216
Total	448	32 232			

Tableau 29 : Statistique sur les valeurs du champ magnétique après la troisième correction (levé magnétique en forage)

	Valeurs du champ magnétique après la correction 1				Valeurs du champ magnétique nivelé après la correction 1			
	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Écart type [nT]	Minimum [nT]	Maximum [nT]
CM05	56 300	175	55 271	57 048	57 631	175	56 600	58 526
CM06	56 549	118	55 107	59 304	57 794	118	56 645	59 319
CM07	56 000	143	53 084	57 798	57 669	143	55 335	59 051
CM08	56 084	152	54 735	62 945	57 659	152	56 376	58 854
CM09	55 748	198	54 071	57 356	57 930	198	56 540	59 498
Moyenne par série	56 136	157	54 454	58 890	57 737	157	56 299	59 050

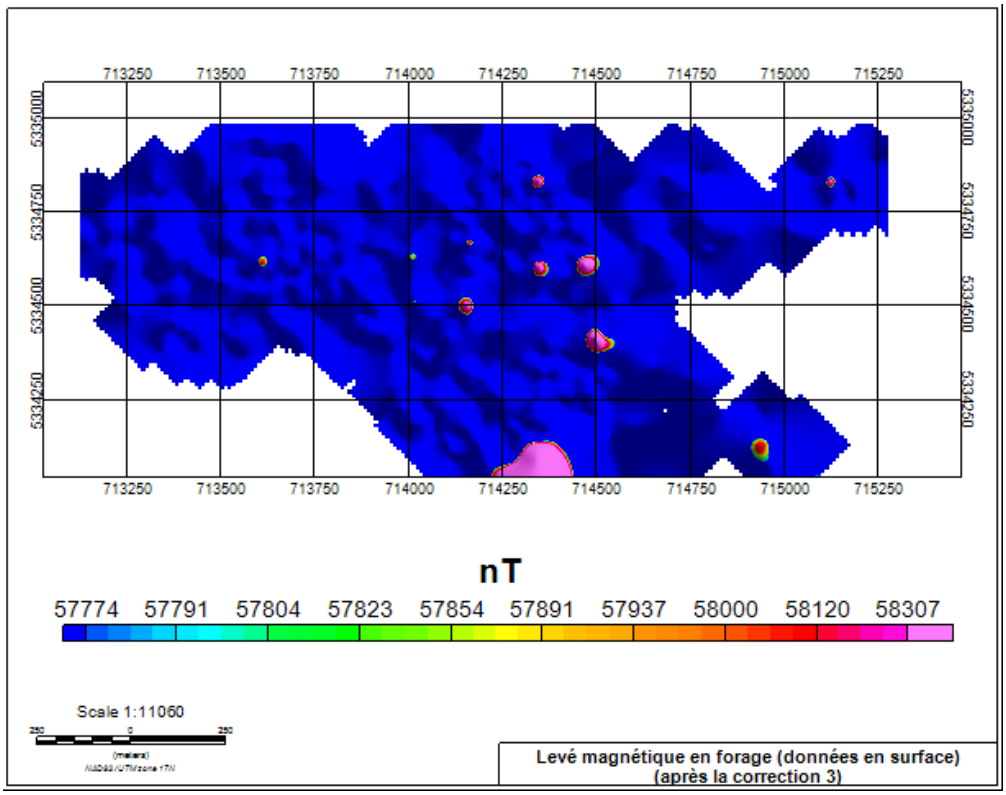

Figure 89 : Champ magnétique en surface des données en forages (après la correction 3)

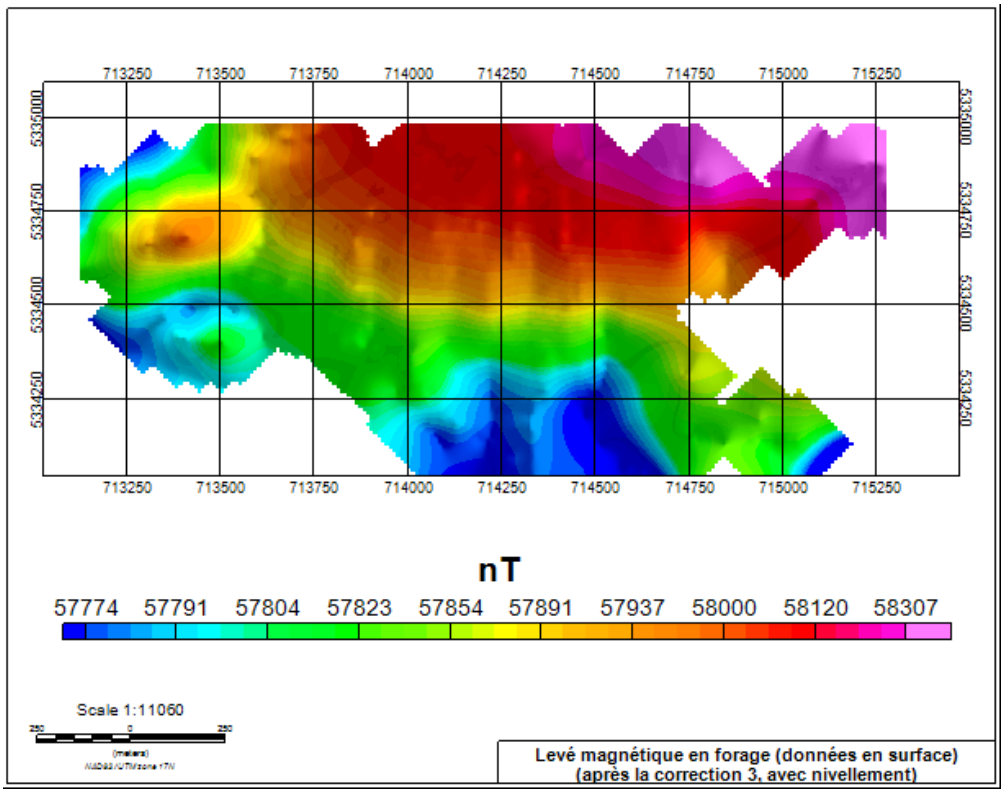

Figure 90 : Champ magnétique en surface des données en forages (après la correction 3 – avec nivellement)

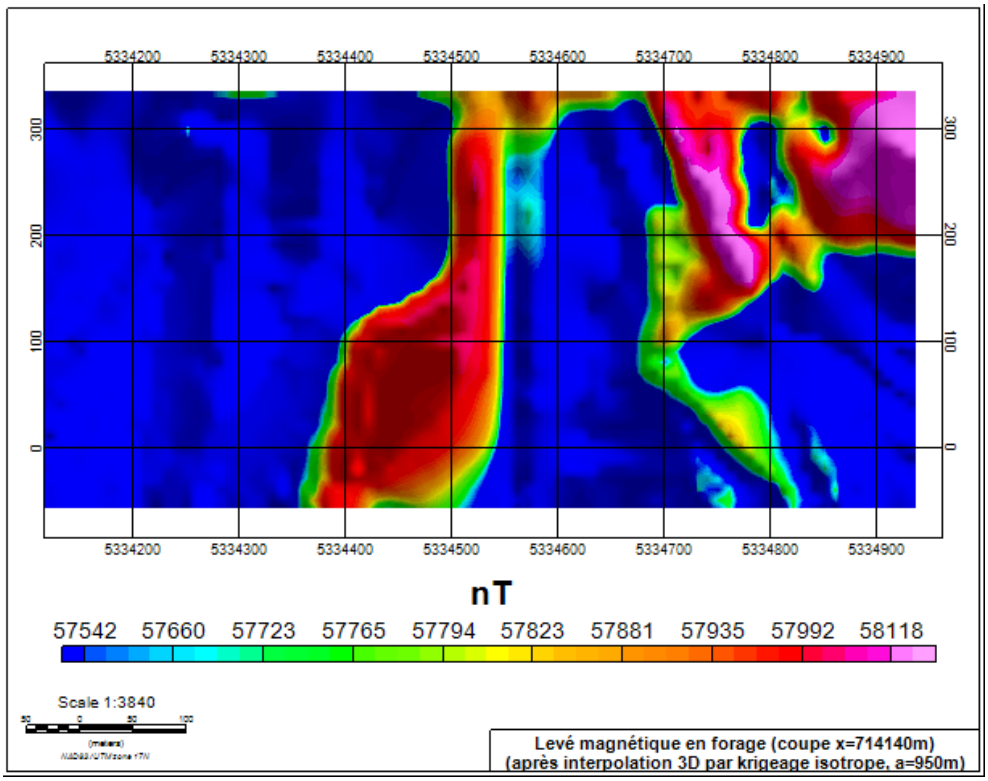

Figure 91 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, champ total (après la correction 3 – avec nivellement)

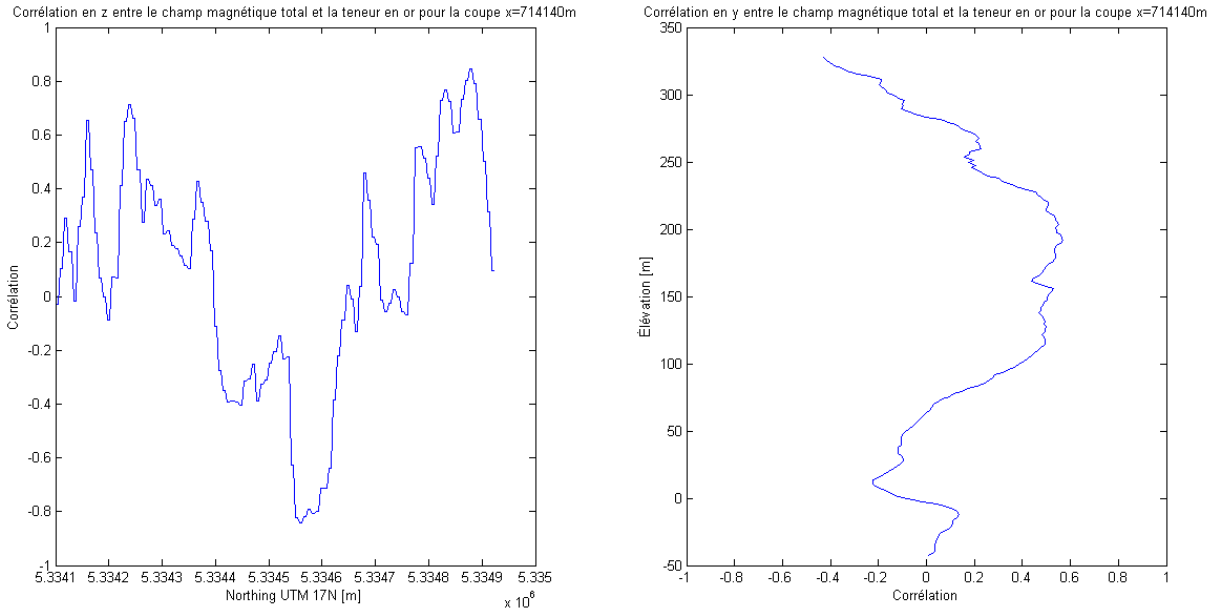

Figure 92 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnéti que total et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite) - (après la correction 3 – avec nivellement)

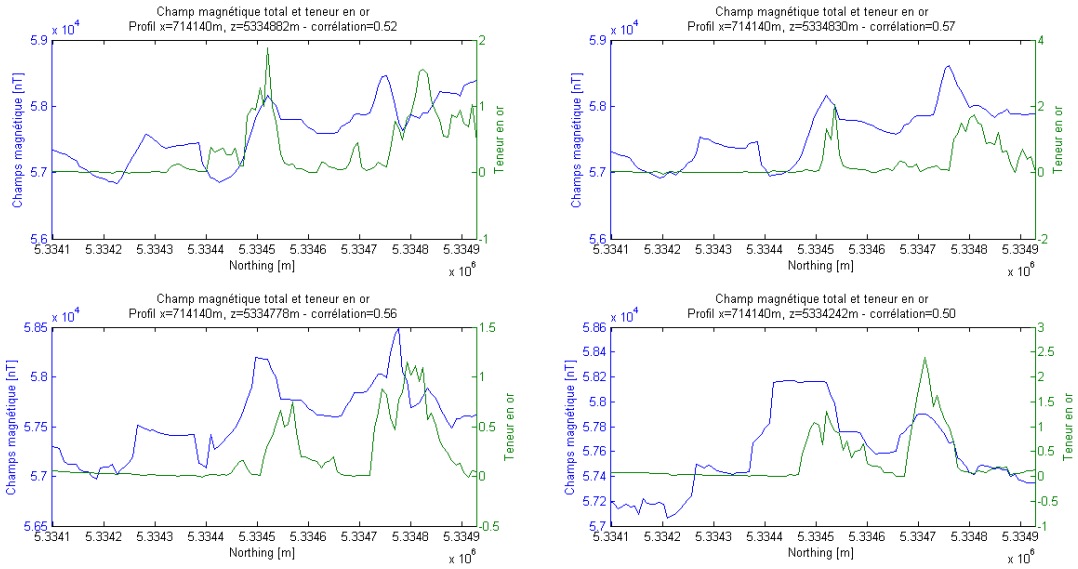

Figure 93 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnéti que total et la teneur en or selon pour différents profils verticaux - (après la correction 3 – avec nivellement)

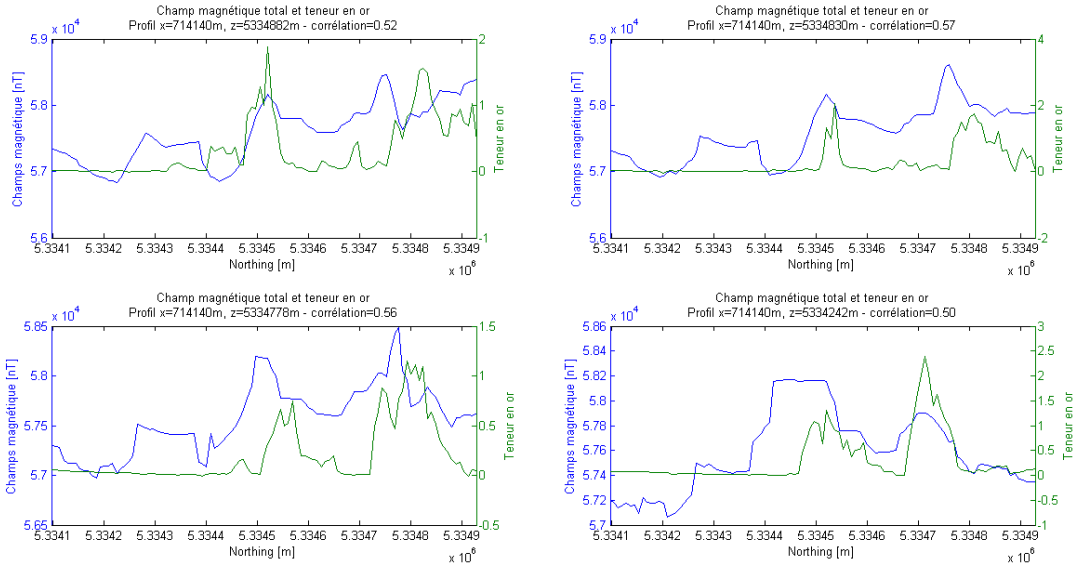

Figure 94 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnéti que total et la teneur en or pour différents profils horizontaux - (après la correction 3 – avec nivellement)

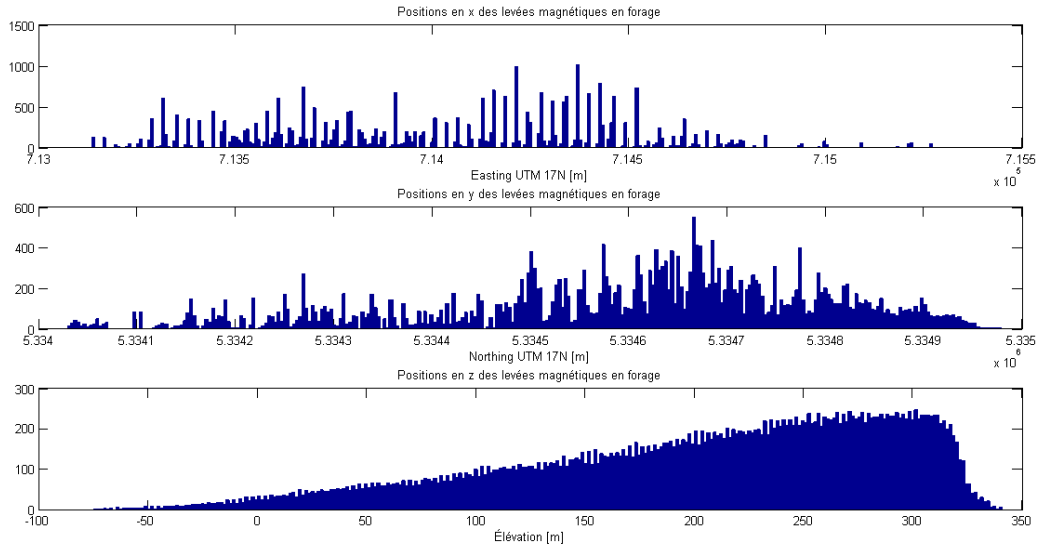

Figure 95 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après la correction 3 – sans nivellement)

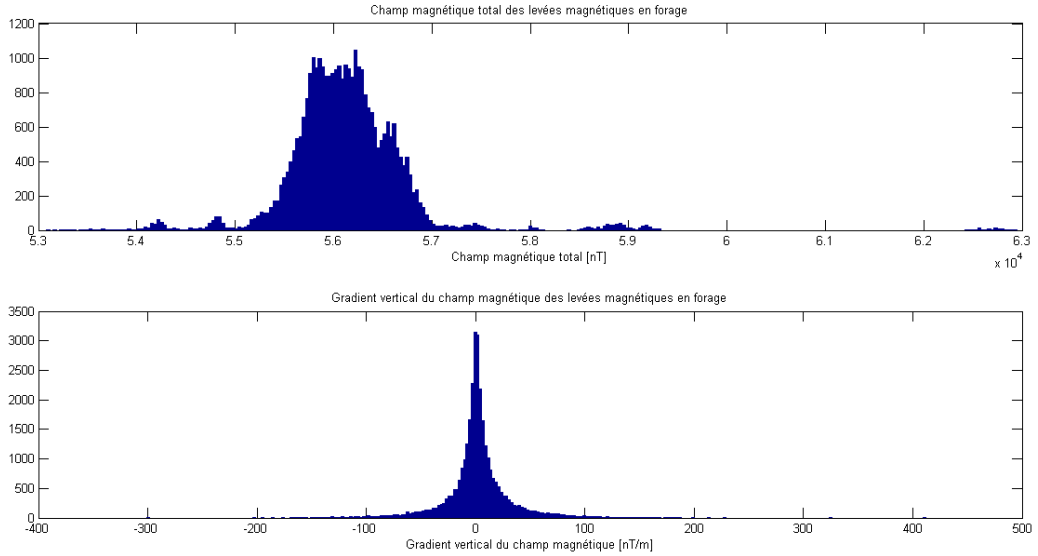

Figure 96 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après la correction 3 – sans nivellement)

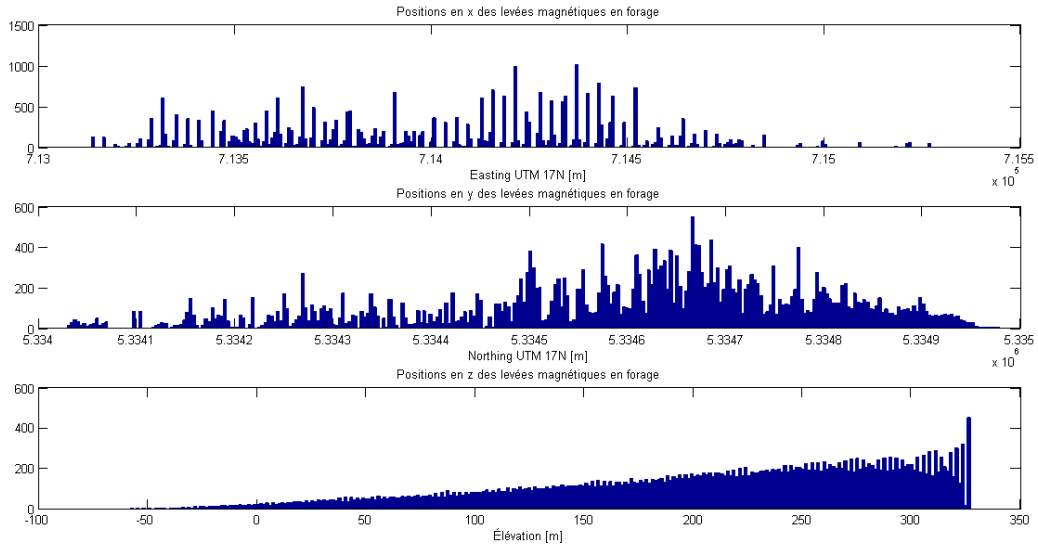

Figure 97 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après la correction 3 – avec nivellement)

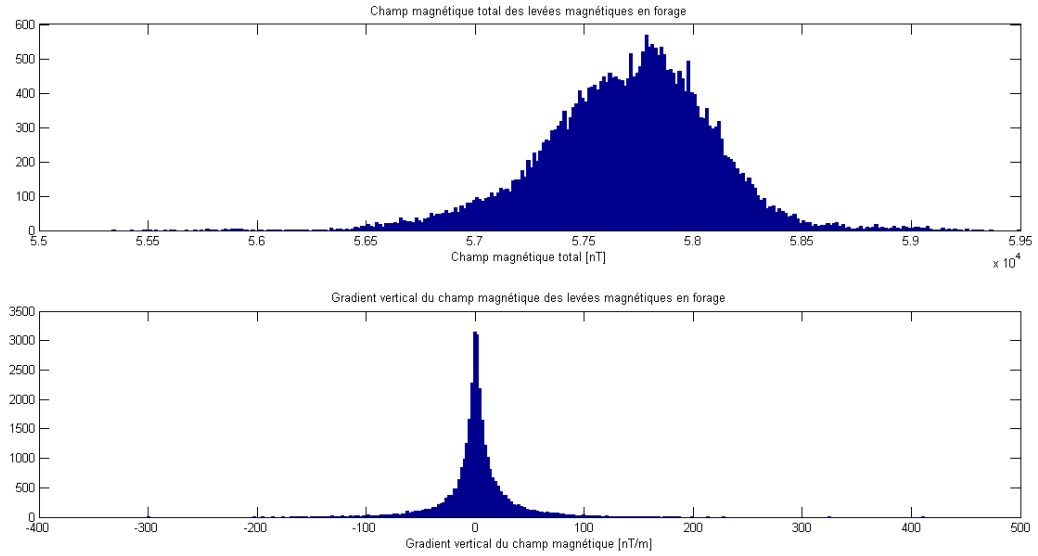

Figure 98 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après la correction 3 – avec nivellement)

9.6 ÉTAT DES DONNÉES APRÈS LA CORRECTION 4

Tableau 30 : Statistique sur la distribution des données par forage après la quatrième correction (levé magnétique en forage)

	Nombre de forage	Nombre de données	Distribution des données par forage (moyenne)		
			Nombre	Début [m]	Fin [m]
CM05	14	1 460	104	2	302
CM06	85	7 703	91	3	259
CM07	289	19 045	66	3	190
CM08	48	3 602	75	4	222
CM09	12	422	35	5	105
Moyenne par série	90	6 446	74	3	216
Total	448	32 232			

Tableau 31 : Statistique sur les valeurs du champ magnétique après la quatrième correction (levé magnétique en forage)

	Valeurs du champ magnétique après la correction 1				Valeurs du champ magnétique nivelé après la correction 1			
	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Moyenne [nT]	Écart type [nT]	Minimum [nT]	Maximum [nT]
CM05	56 300	175	55 271	57 048	57 917	175	57 149	58 591
CM06	56 549	118	55 107	59 304	57 920	118	56 872	58 981
CM07	56 000	143	53 084	57 798	57 900	143	56 856	59 508
CM08	56 084	152	54 735	62 945	57 949	152	56 874	59 176
CM09	55 748	198	54 071	57 356	58 374	198	57 591	60 217
Moyenne par série	56 136	157	54 454	58 890	58 012	157	57 068	59 295

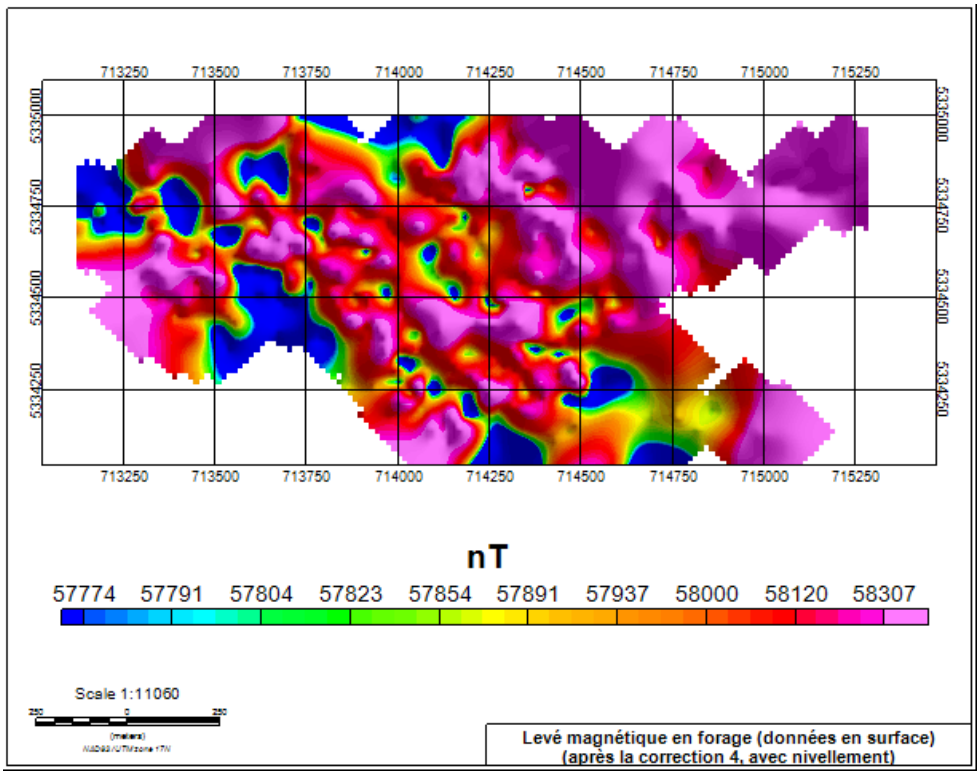

Figure 99 : Champ magnétique en surface des données en forages (après la correction 4 – avec nivellement)

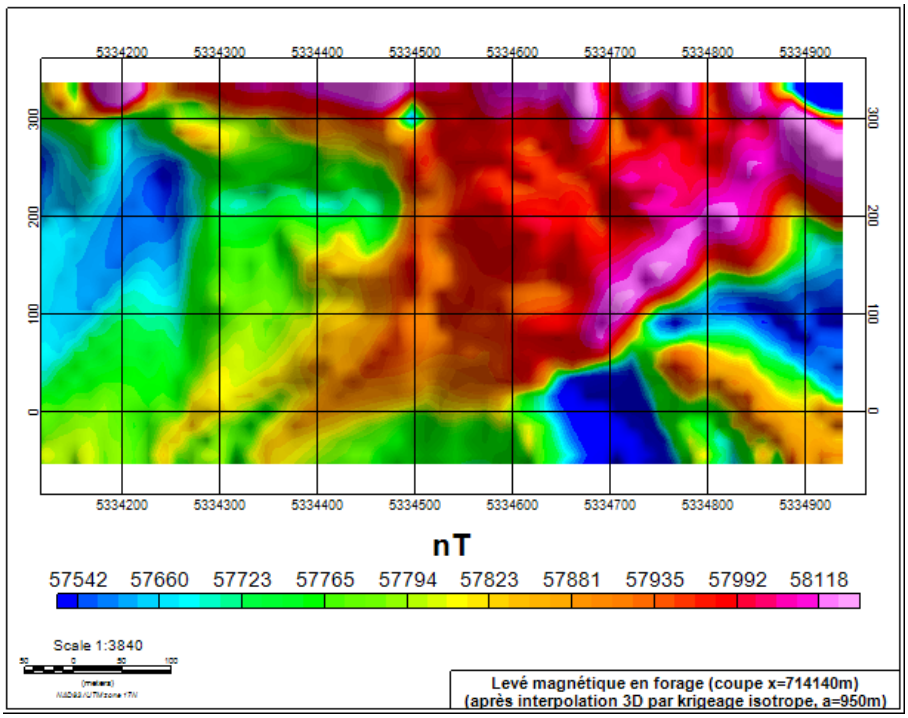

Figure 100 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, champ total (après la correction 4 – avec nivellement)

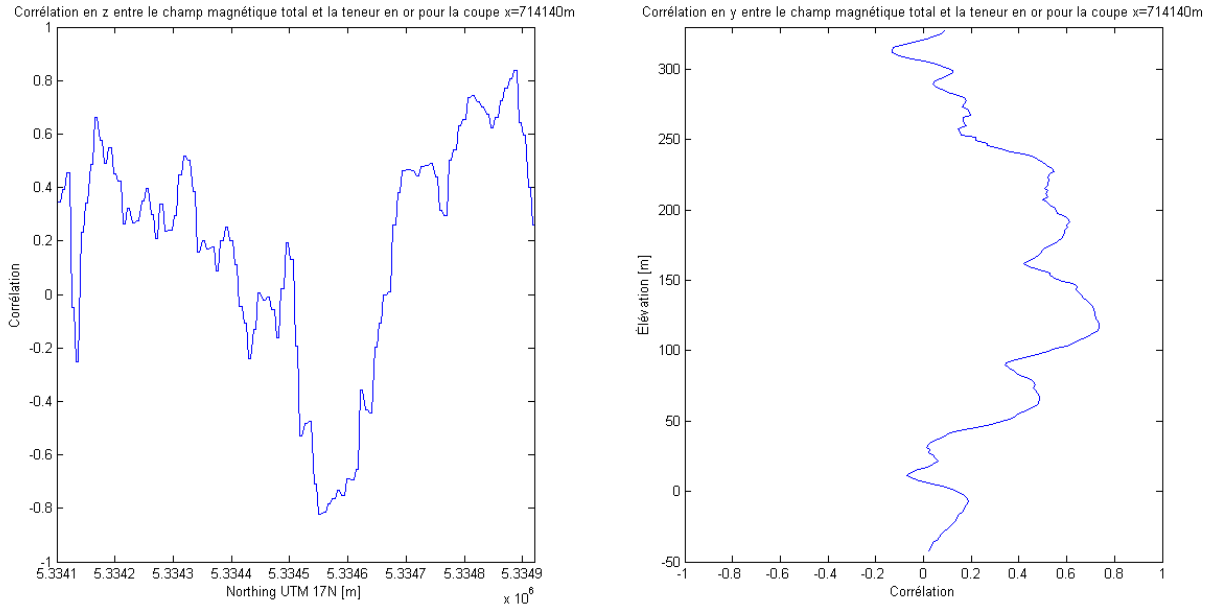

Figure 101 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite) - (après la correction 4 – avec nivellement)

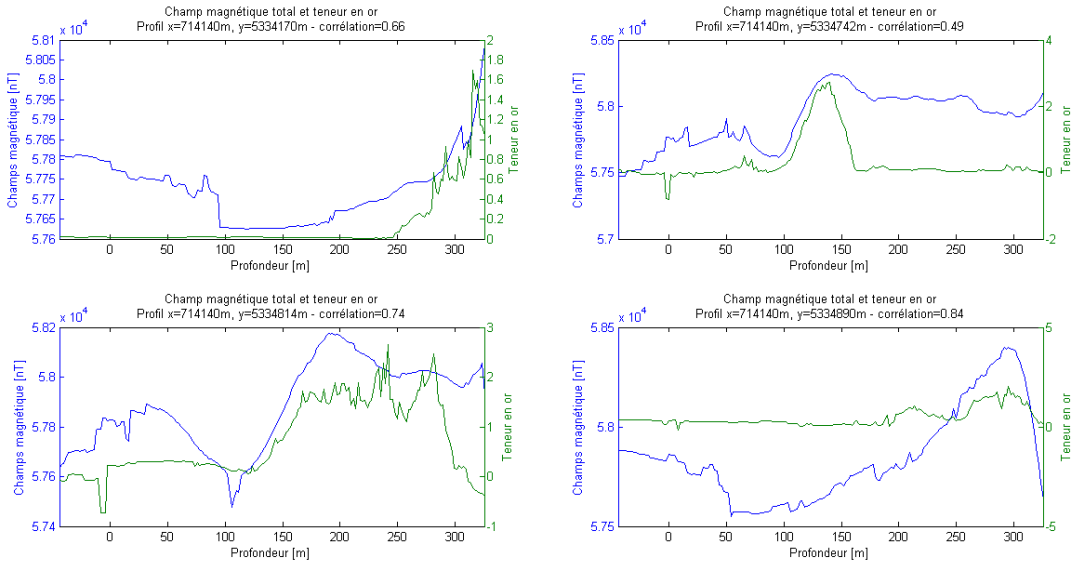

Figure 102 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon pour différents profils verticaux (après la correction 4 – avec nivellement)

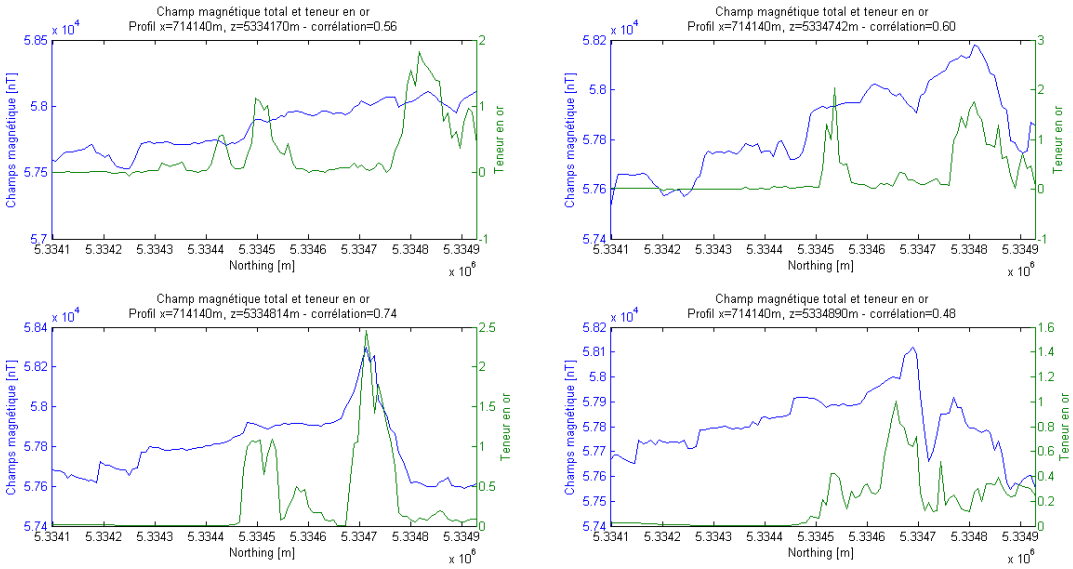

Figure 103 : Coupe x=714140m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon pour différents profils horizontaux (après la correction 4 – avec nivellement)

Tableau 32 : Coefficients de corrélation moyens et maximums entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils horizontaux ou verticaux

	Profils verticaux		Profils horizontaux	
	Corrélation moyenne	Corrélation maximale	Corrélation moyenne	Corrélation maximale
Après la correction 3	0.08	0.85	0.18	0.57
Après la correction 4	0.19	0.84	0.32	0.73

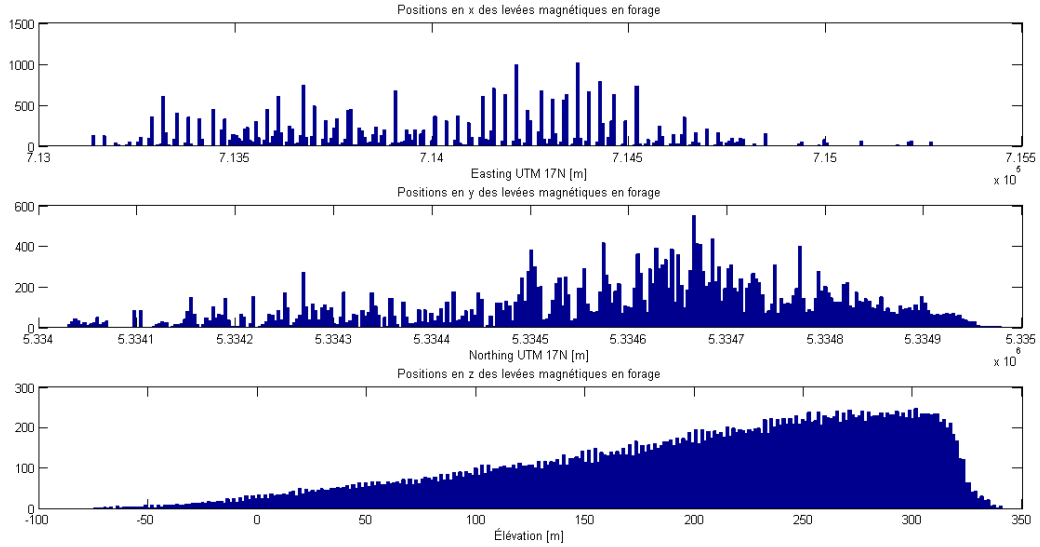

Figure 104 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après la correction 4 – sans nivellement)

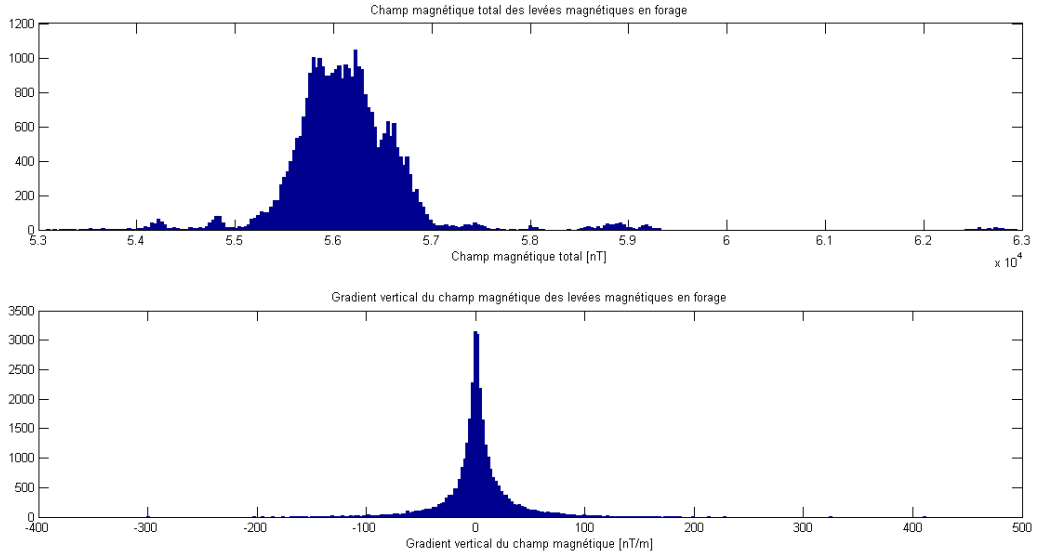

Figure 105 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après la correction 4 – sans nivellement)

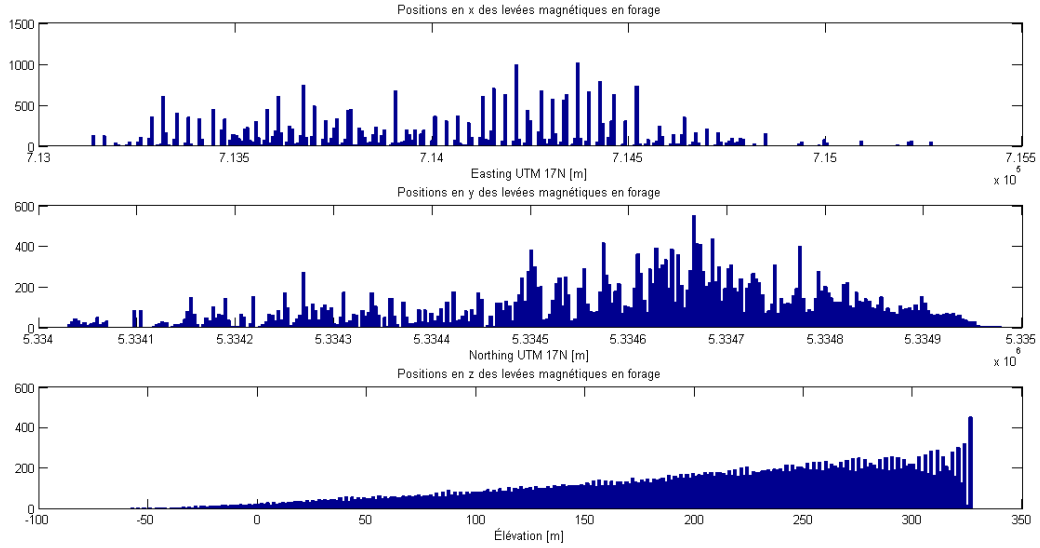

Figure 106 : Distribution des données selon la direction pour le levé magnétique en forages (après la correction 4 – avec nivellement)

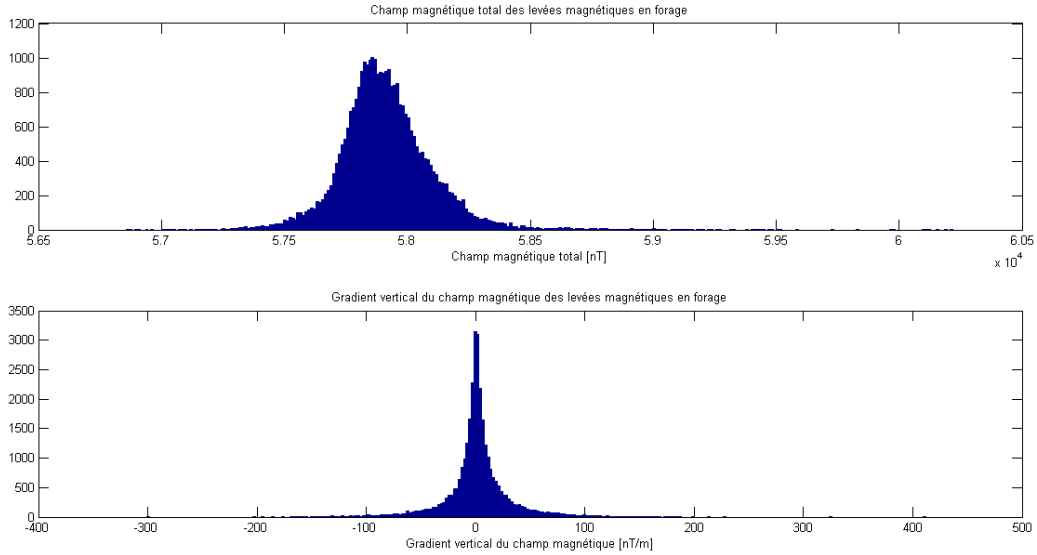

Figure 107 : Distribution du champ magnétique pour le levé magnétique en forages (après la correction 4 – avec nivellement)

9.7 TABLEAU RÉCAPITULATIF DES CORRECTIONS

Tableau 33 : Récapitulatif des corrections

	Détails de la correction
Données brutes	Inclus corrections manuelles de certaines séries de données
Correction 1	Élimination des données aberrantes (NaN, nulle), imposition d'un intervalle pour les valeurs du champ magnétique et délimitation de la zone d'intérêt
Correction 2	Filtrage des données ponctuelles aberrantes et imposition d'une profondeur maximale pour la première donnée de chaque série
Correction 3	Correction des positions à l'aide du fichier de référence
Correction 4	Utilisation de la moyenne des valeurs du champ magnétique pour un forage donnée comme valeur de référence dans le nivellement (plutôt que la première valeur de chaque forage)

9.8 PROFILS DE SUSCEPTIBILITÉ

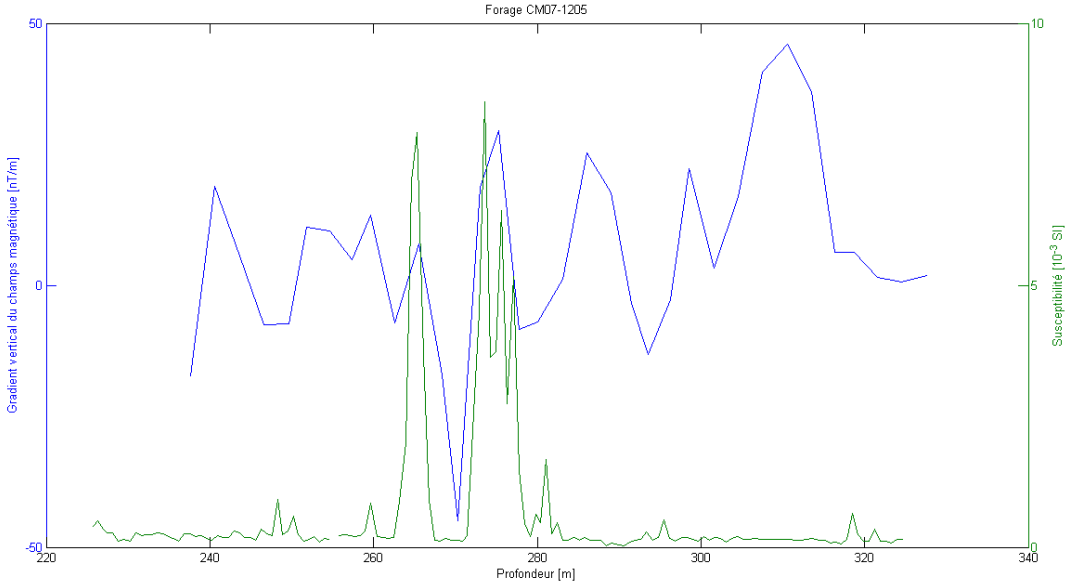

Figure 108 : Gradient du champ magnétique total et susceptibilité pour le forage CM02-1205

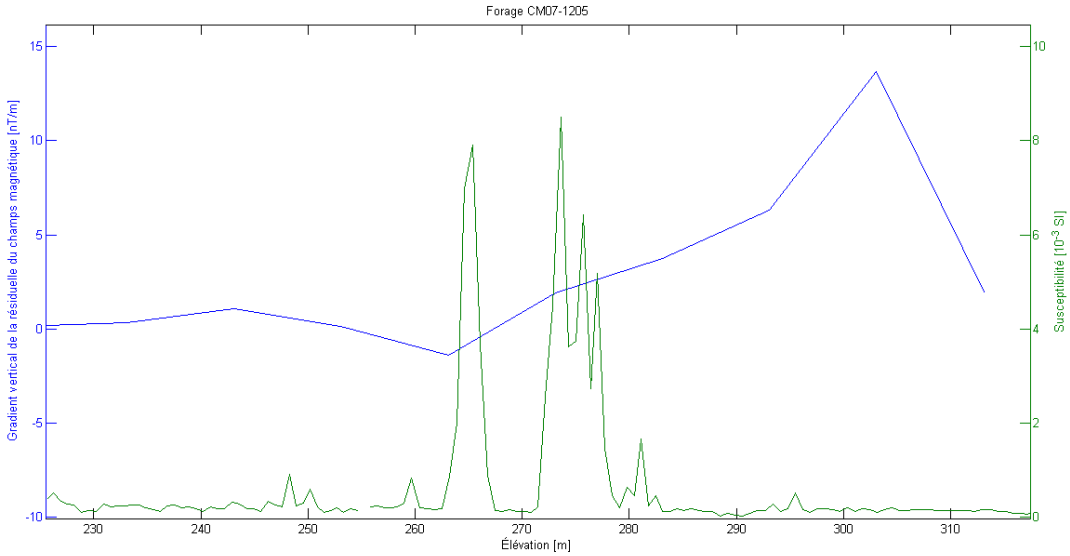

Figure 109 : Gradient de la résiduelle du champ magnétique et susceptibilité pour le forage CM07-1205

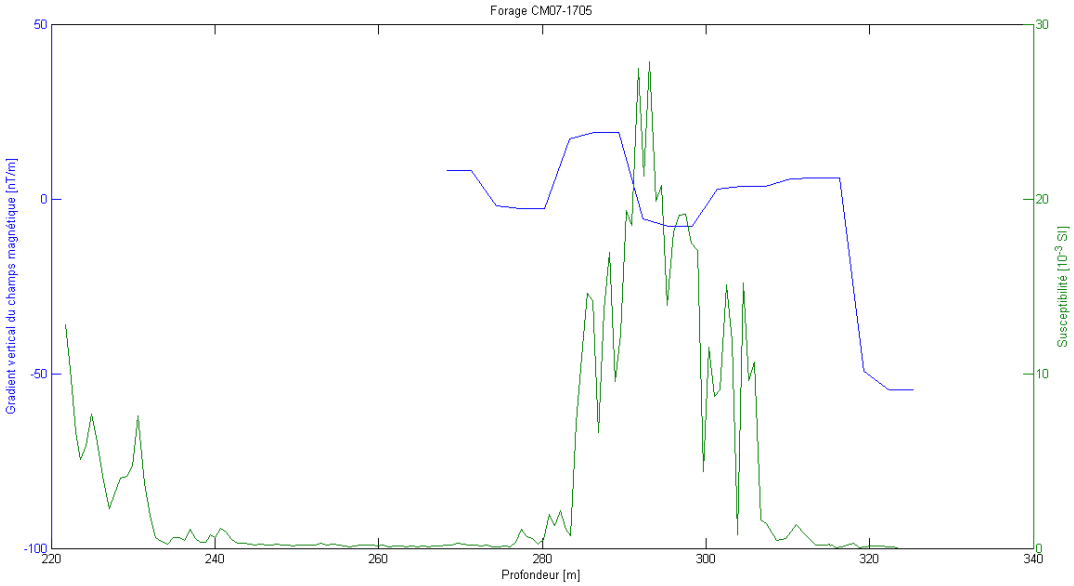

Figure 110 : Gradient du champ magnétique total et susceptibilité pour le forage CM02-1705

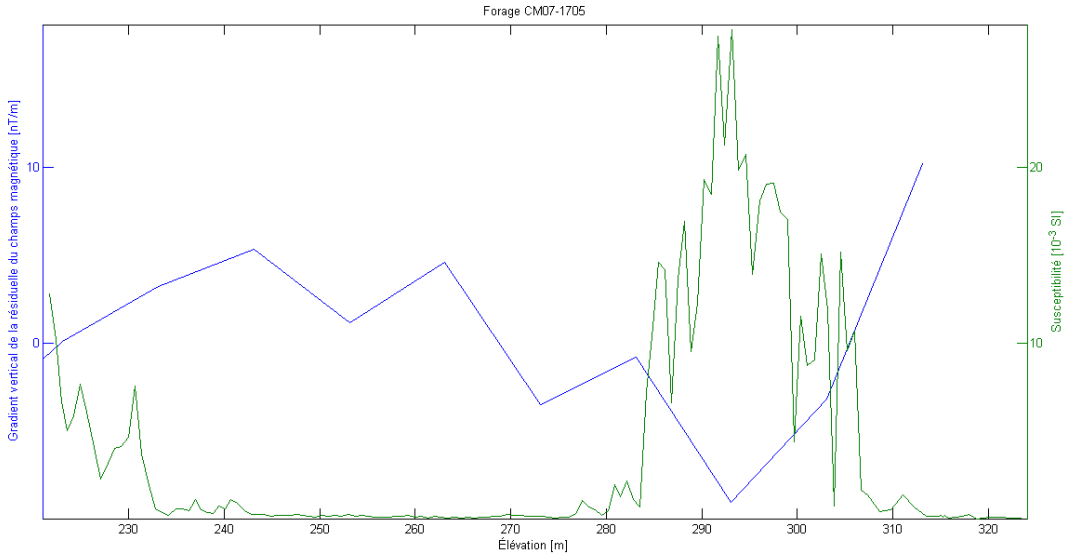

Figure 111 : Gradient de la résiduelle du champ magnétique et susceptibilité pour le forage CM07-1205

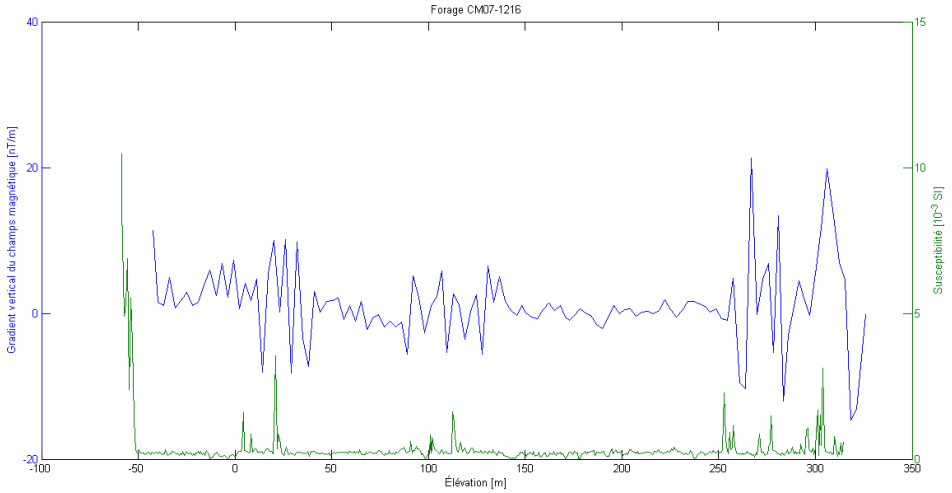

Figure 112 : Gradient du champ magnétique total et susceptibilité pour le forage CM07-1216

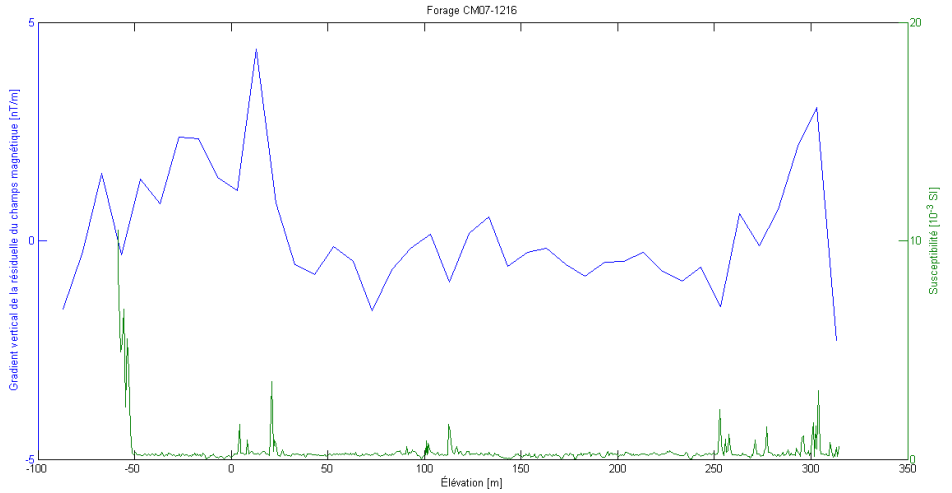

Figure 113 : Gradient de la résiduelle (après filtre tendance linéaire seulement) du champ magnétique et susceptibilité pour le forage CM07-1216

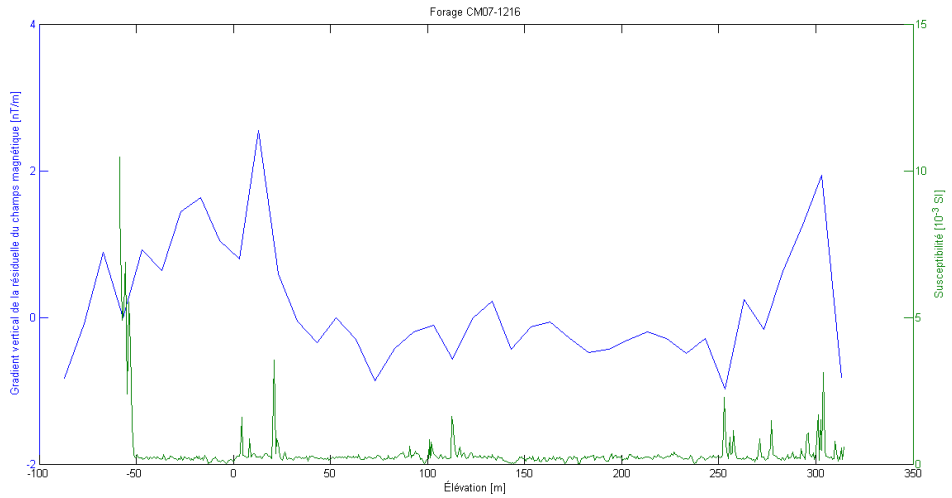

Figure 114 : Gradient de la résiduelle du champ magnétique (après filtre tendance linéaire et filtre passe-bas) et susceptibilité pour le forage CM07-1216

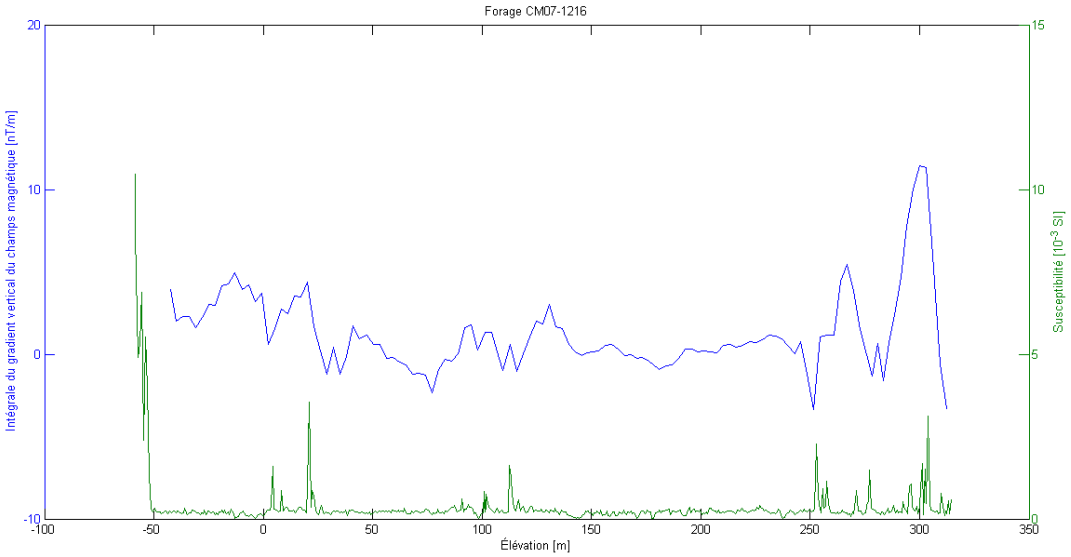

Figure 115 : Intégrale du gradient du champ magnétique total et susceptibilité pour le forage CM07-1216

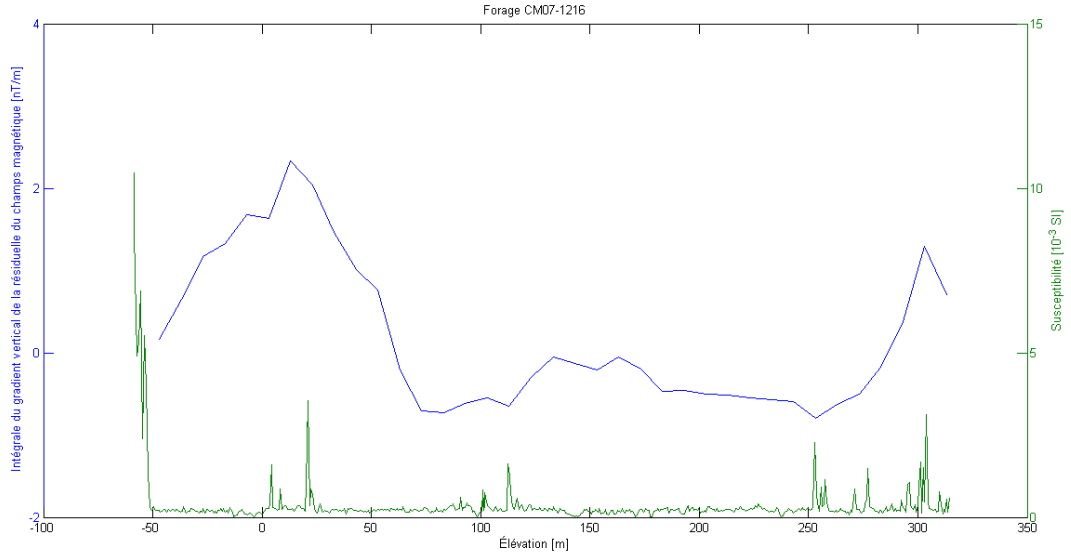

Figure 116 : Intégrale du gradient de la résiduelle du champ magnétique et susceptibilité pour le forage CM07-1216

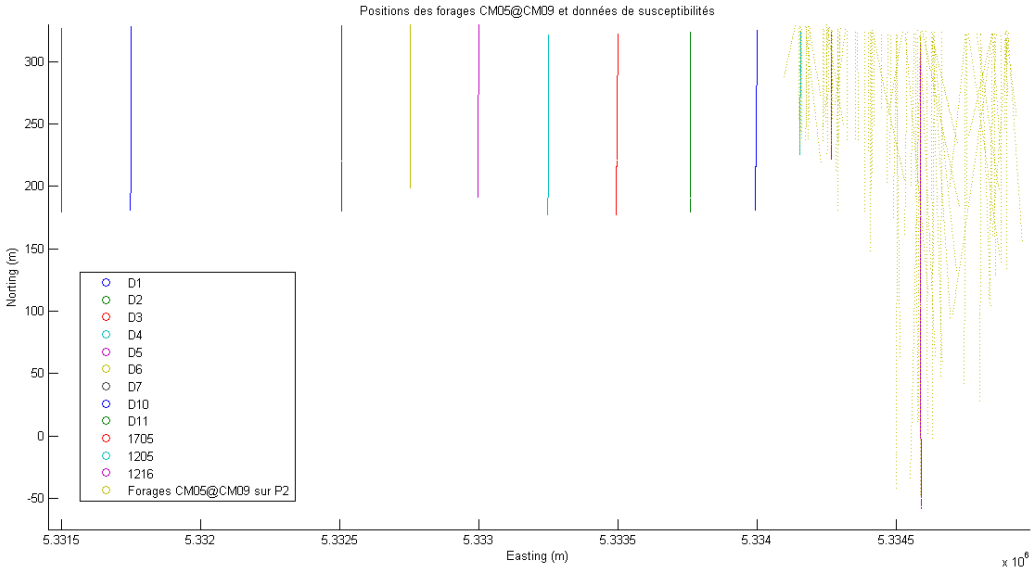

Figure 117 : Position des forages et positions des données de susceptibilités (couleur doré pâle à droite)

9.9 DÉCOMPOSITION PAR ONDELETTES

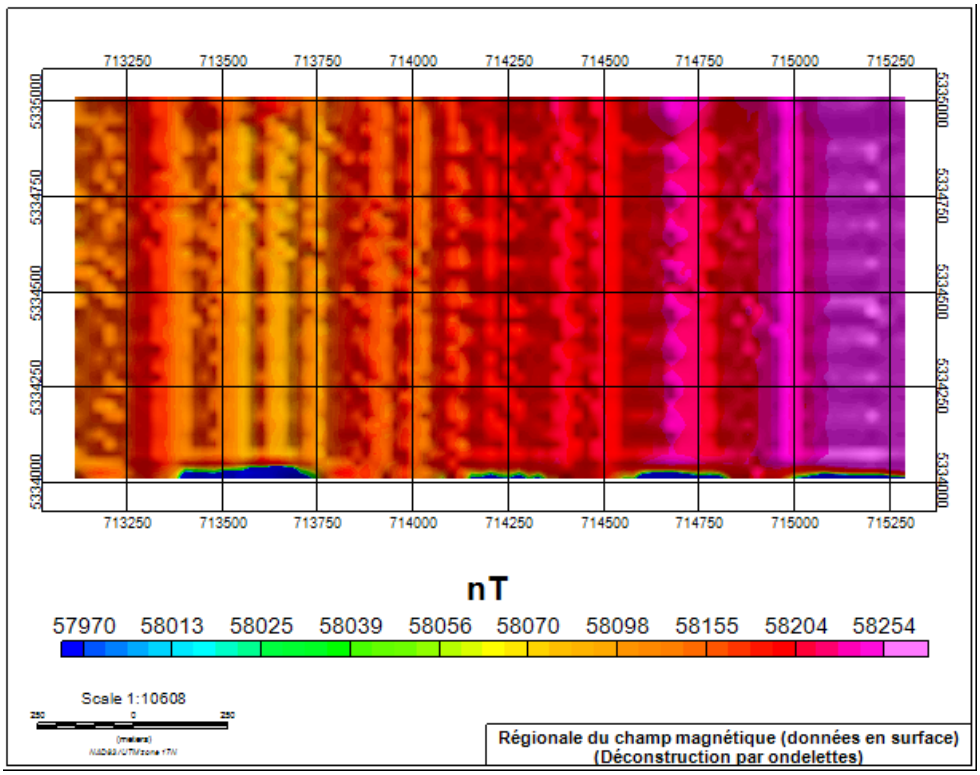

Figure 118 : Coupe z=323m (données de surface), variogramme isotrope longue portée, régionale obtenue par décomposition par ondelettes

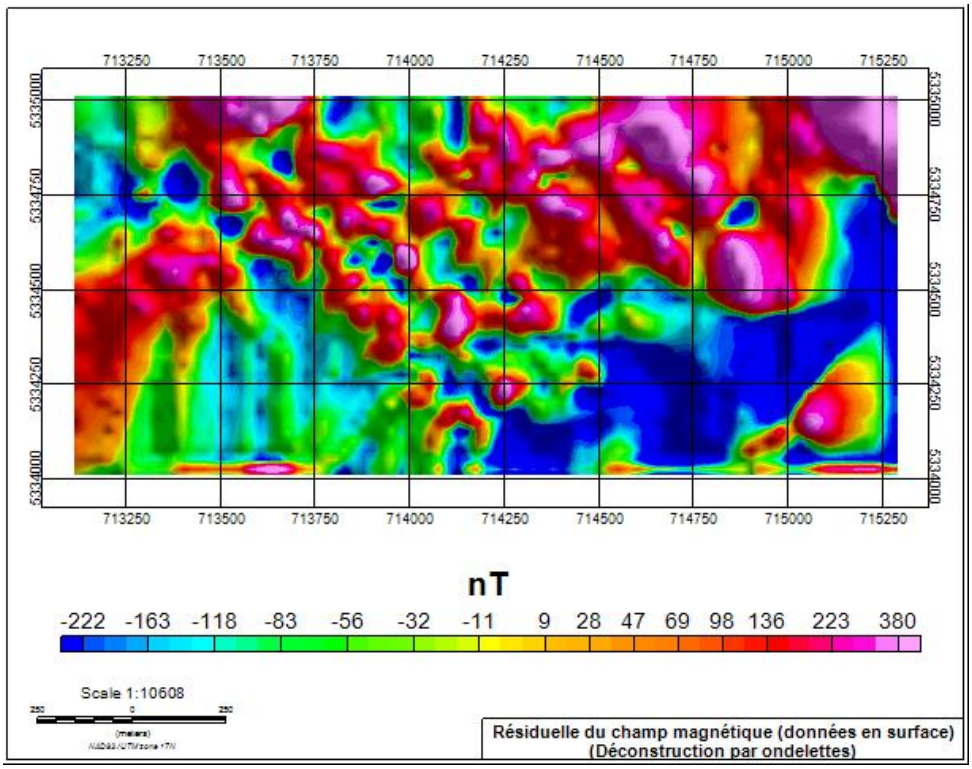

Figure 119 : Coupe z=323m (données de surface), variogramme isotrope longue portée, résiduelle du champ magnétique obtenue par décomposition par ondelette

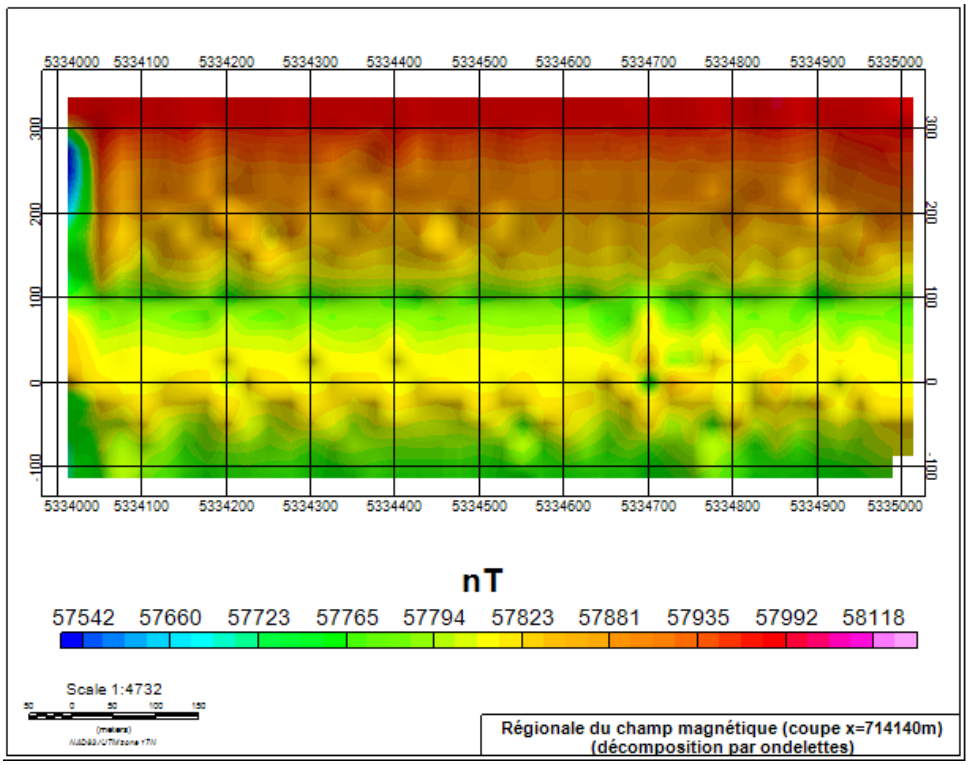

Figure 120 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope longue portée, régionale obtenue par décomposition par ondelettes

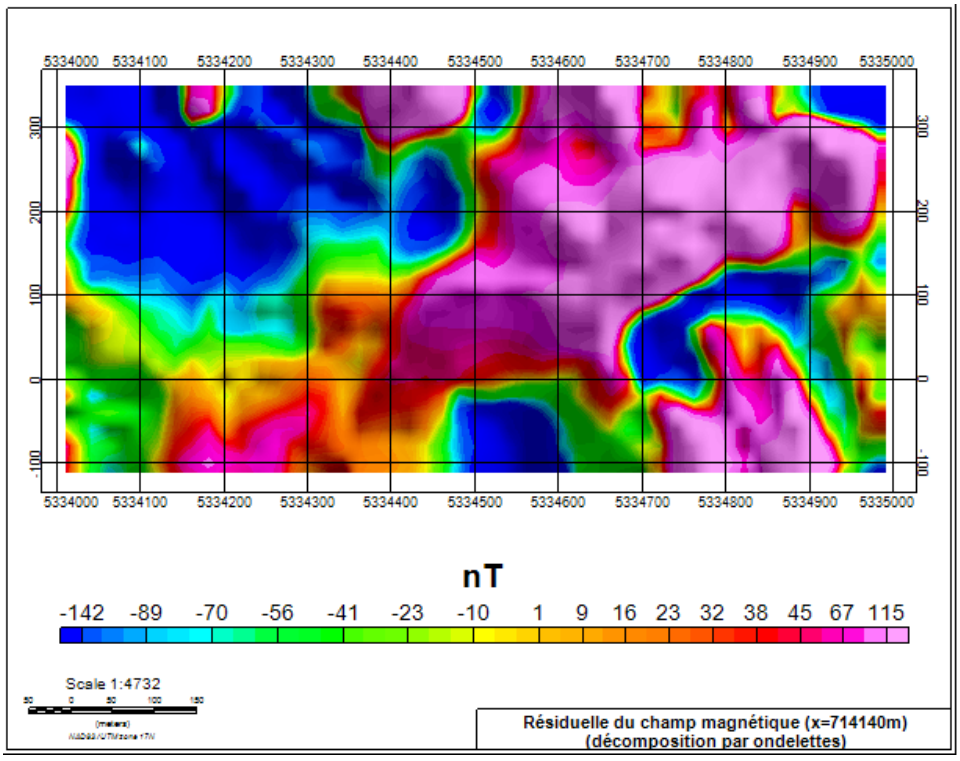

Figure 121 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope longue portée, résiduelle du champ magnétique obtenue par décomposition par ondelette

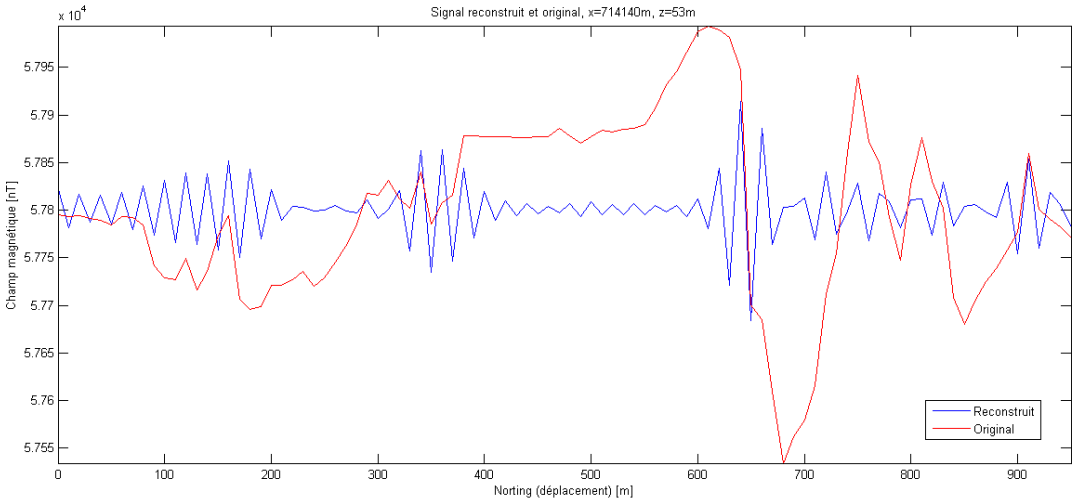

Figure 122 : Décomposition par ondelette, signal original et reconstruit, x=714140m, z=54m

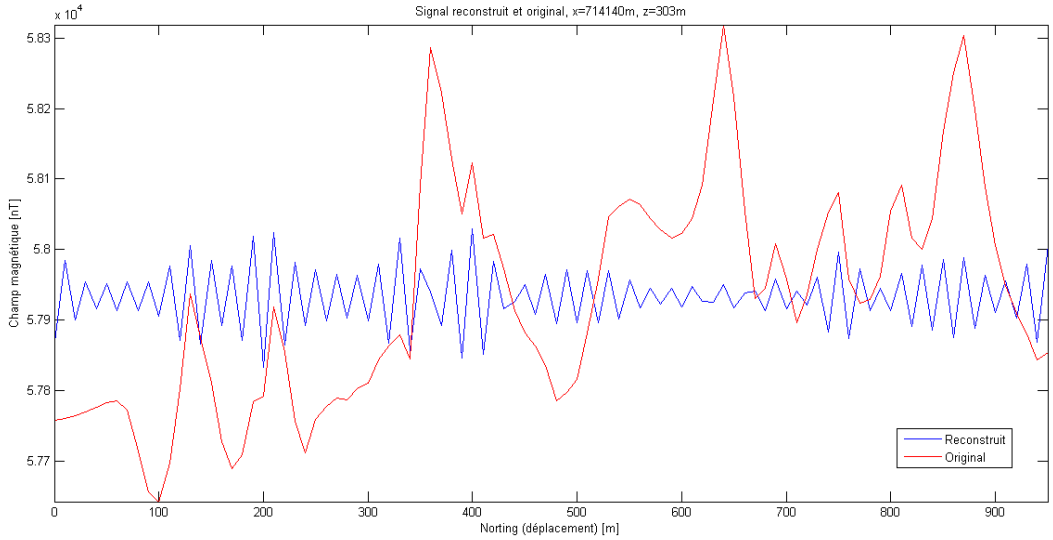

Figure 123 : Décomposition par ondelette, signal original et reconstruit, x=714140m, z=303m

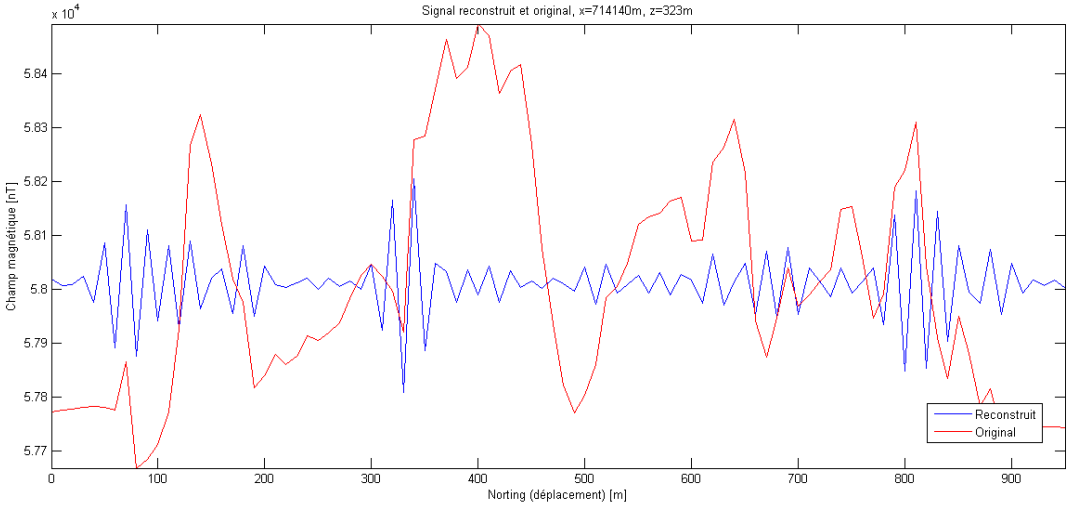

Figure 124 : Décomposition par ondelette, signal original et reconstruit, x=714140m, z=323m

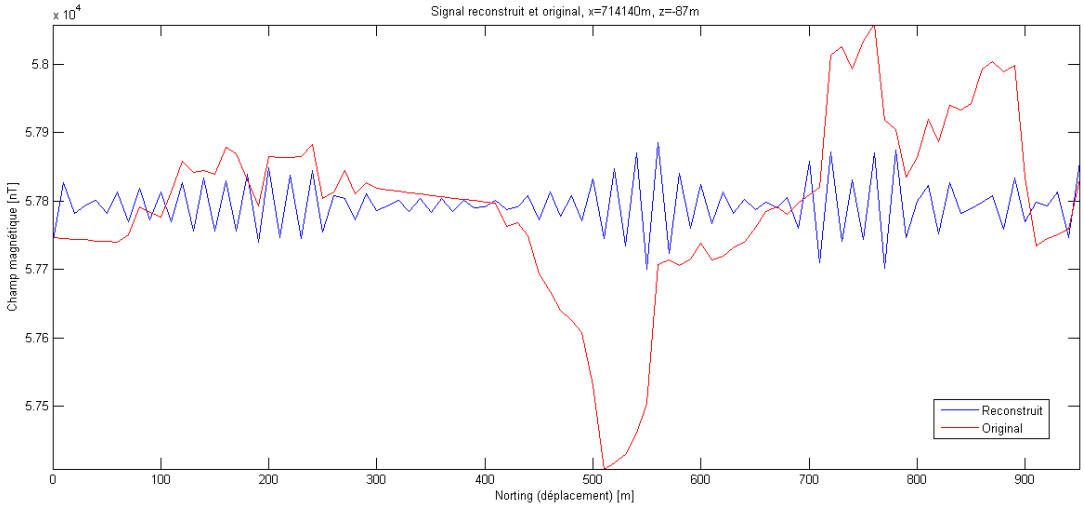

Figure 125 : Décomposition par ondelette, signal original et reconstruit, x=714140m, z=-87m

9.10 PROLONGEMENT VERS LE HAUT

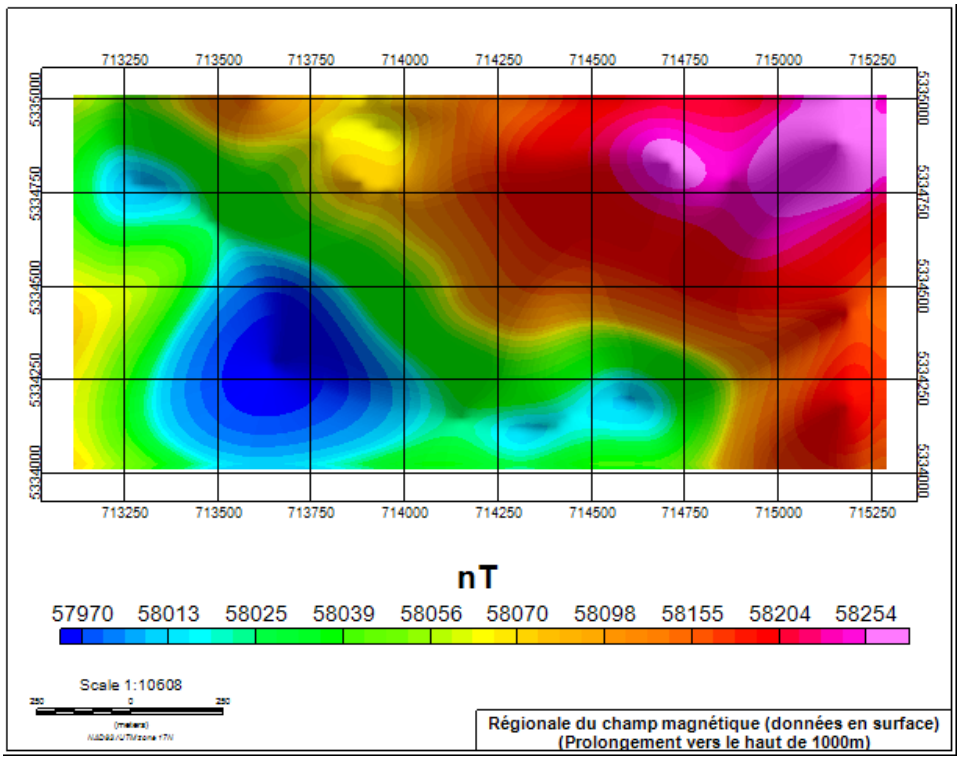

Figure 126 : Coupe z=323m (données de surface), variogramme isotrope longue portée, régionale obtenue par prolongement vers le haut

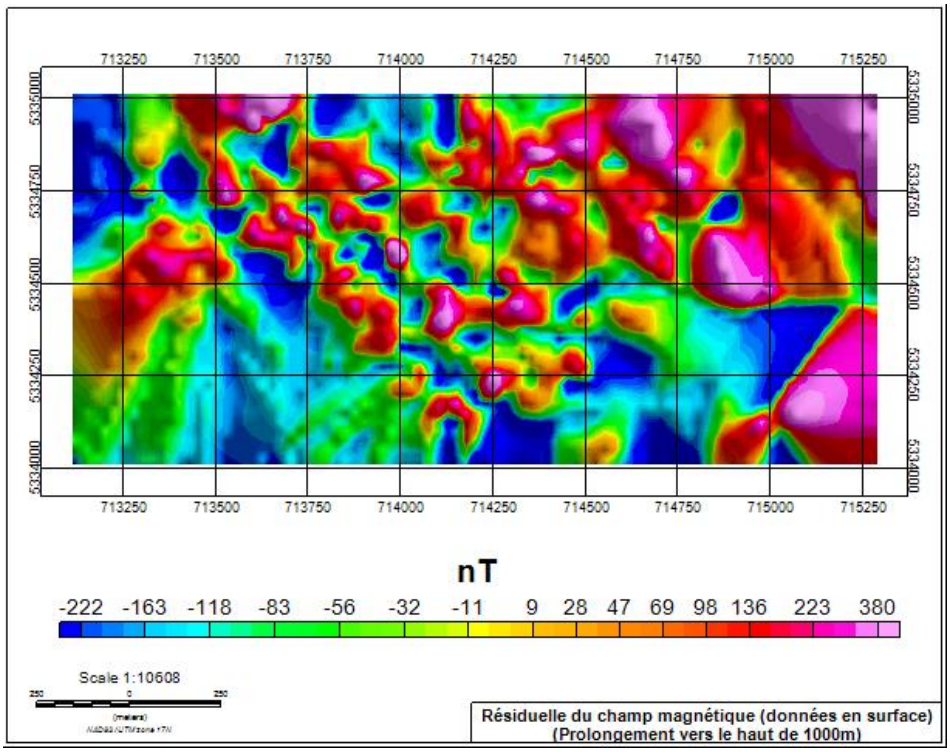

Figure 127 : Coupe z=323m (données de surface), variogramme isotrope longue portée, résiduelle obtenue par prolongement vers le haut

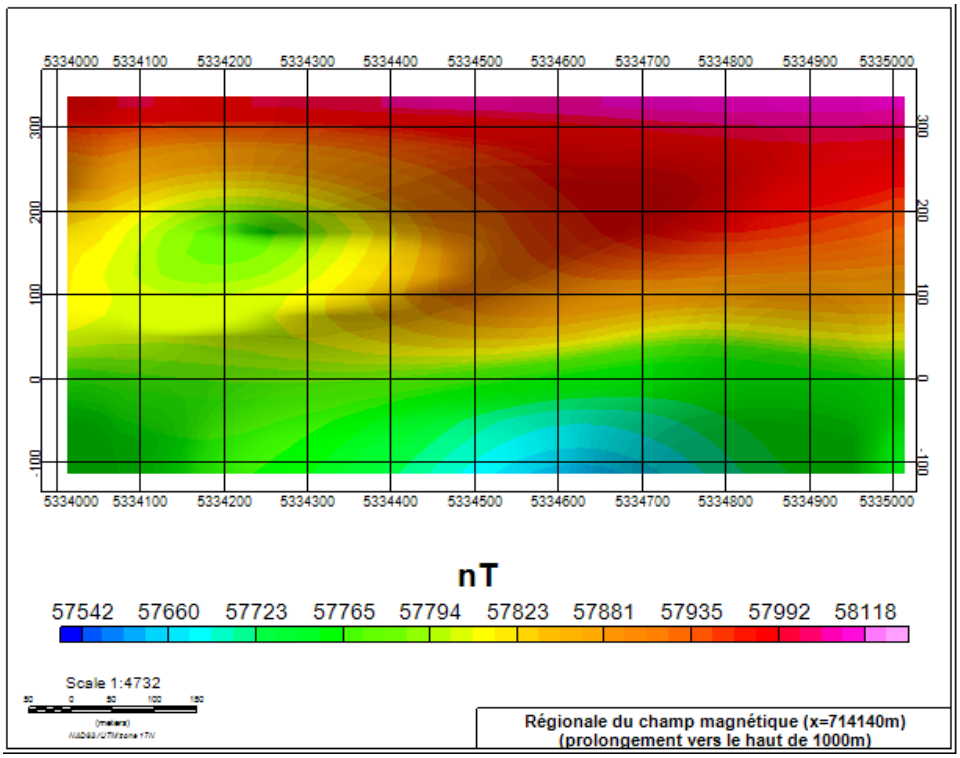

Figure 128 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope longue portée, régionale obtenue par prolongement vers le haut

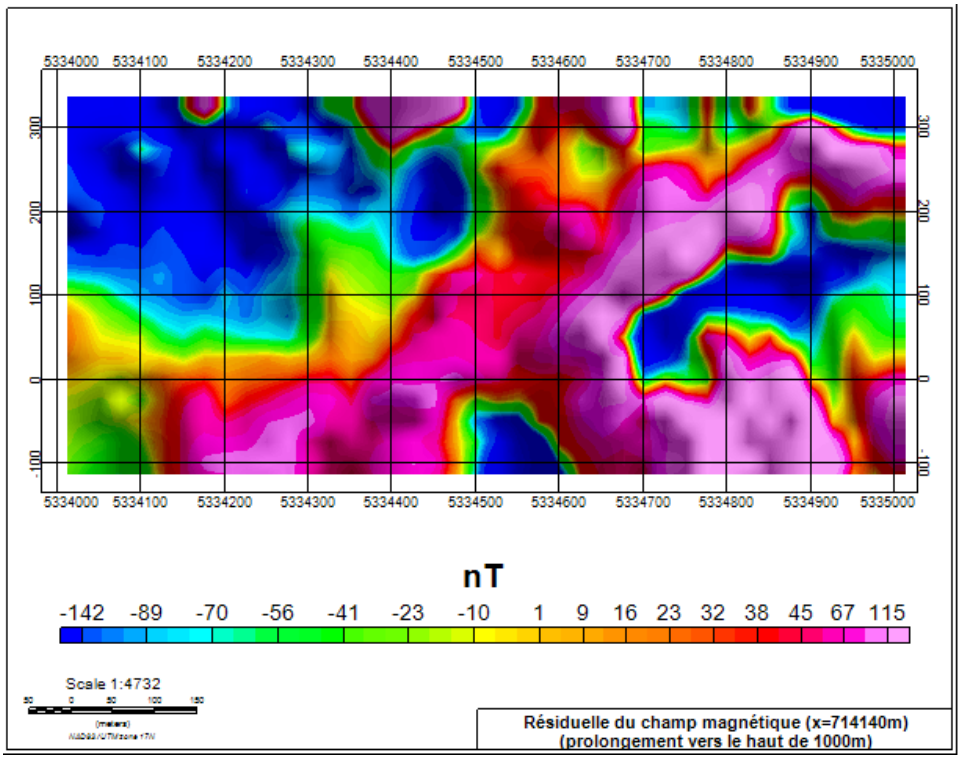

Figure 129 : Coupe x=714140m, variogramme isotrope longue portée, résiduelle obtenue par prolongement vers le haut

9.1 COUPE VERTICALE X=715240M

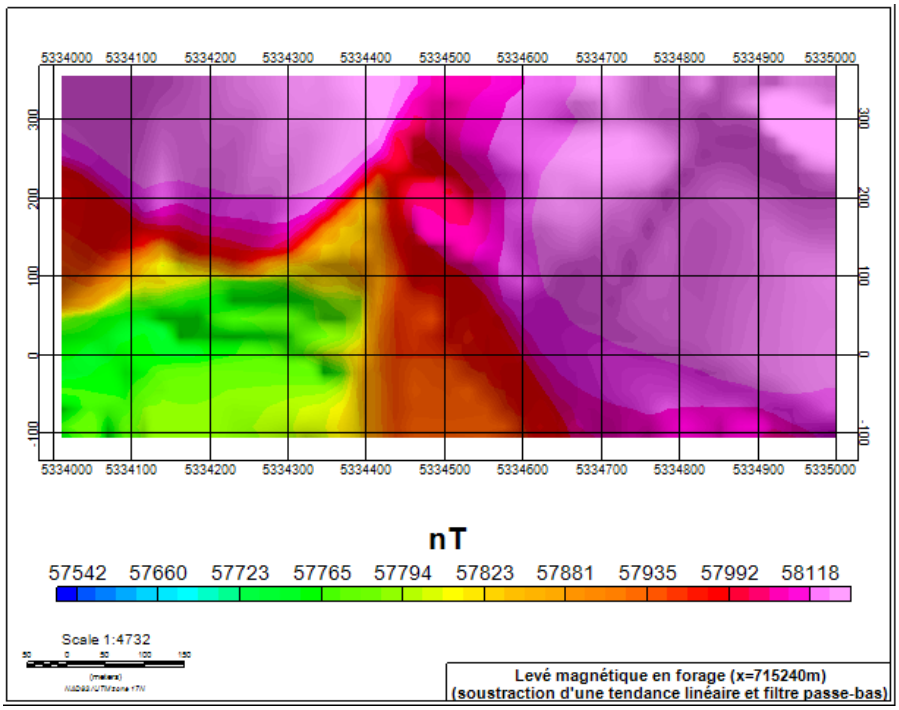

Figure 130 : Coupe x=715240m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, champ magnétique total

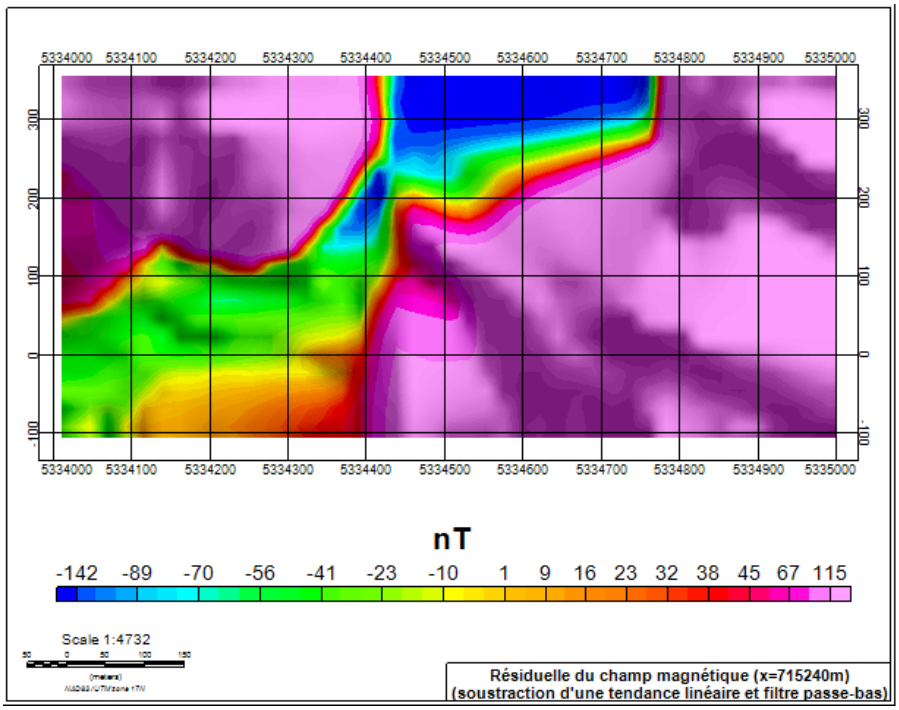

Figure 131 : Coupe x=714540m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, résiduelle du champ magnétique

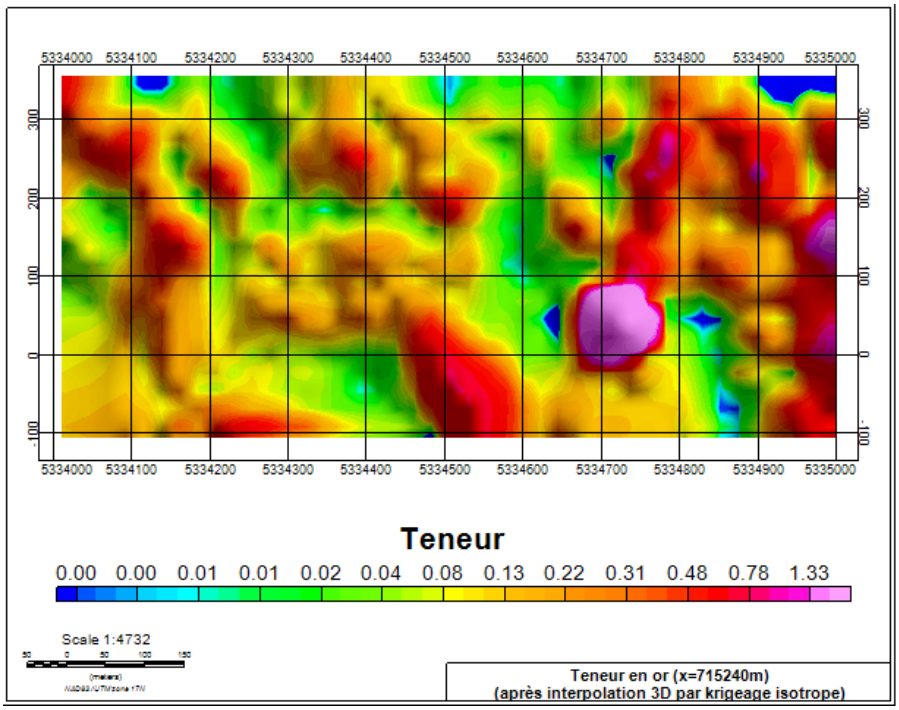

Figure 132 : Coupe x=715240m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or

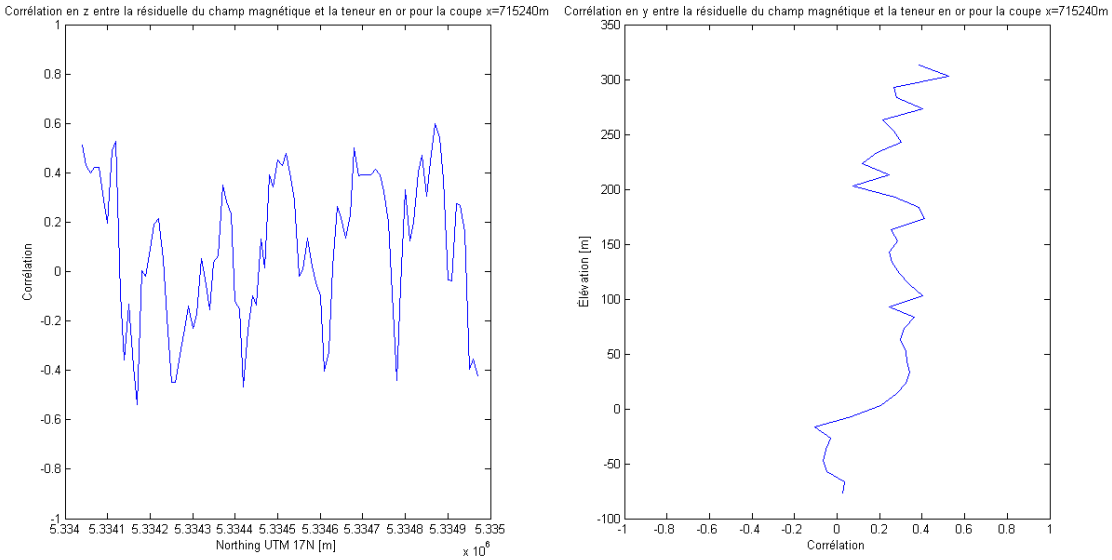

Figure 133 : Coupe x=715240m, corrélation entre le champ magnétique total et la teneur en or selon des profils verticaux (gauche) ou des profils horizontaux (droite)

Tableau 34 : Coefficients de corrélation moyens et maximums entre le champ magnétique total (ou la résiduelle du champ magnétique) et la teneur en or selon des profils horizontaux ou verticaux - X715240

	Profils verticaux		Profils horizontaux	
	Corrélation moyenne	**Corrélation maximale**	**Corrélation moyenne**	**Corrélation maximale**
Résiduelle	0.10	0.60	0.23	0.53

9.2 COUPE VERTICALE X=713340M

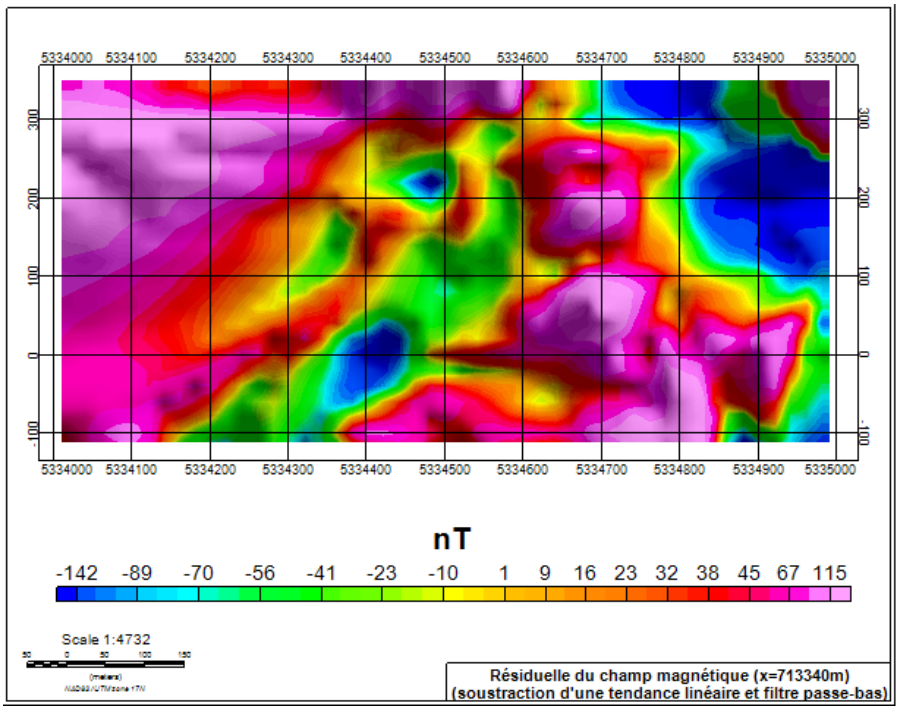

Figure 134 : Coupe x=713340m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, résiduelle du champ magnétique

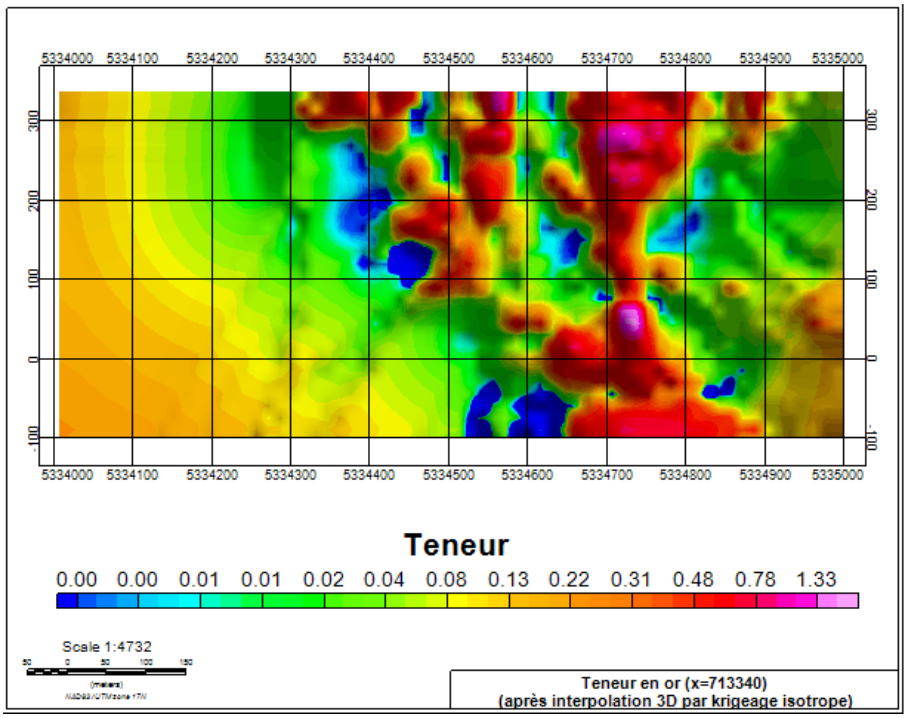

Figure 135 : Coupe x=713340m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or

9.1 COUPE VERTICALE X=713800M

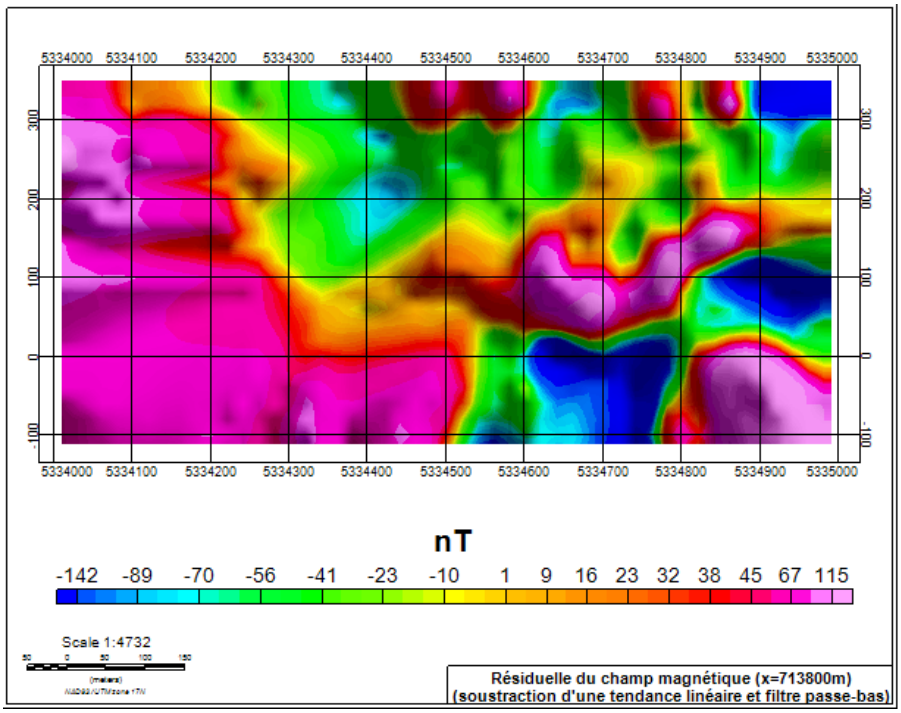

Figure 136 : Coupe x=713800m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, résiduelle du champ magnétique

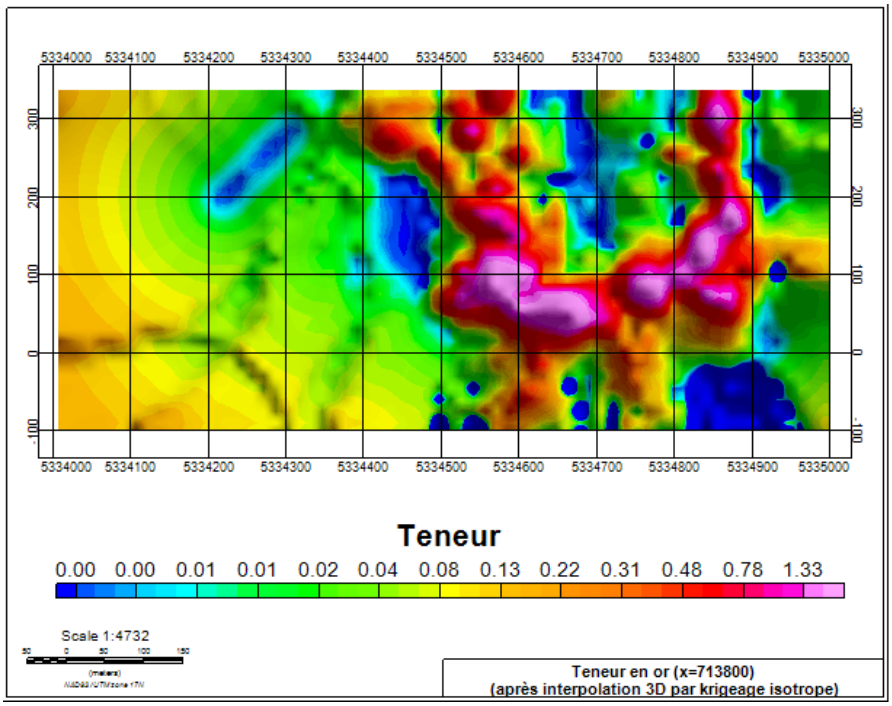

Figure 137 : Coupe x=713800m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or

9.1 COUPE VERTICALE X=714310M

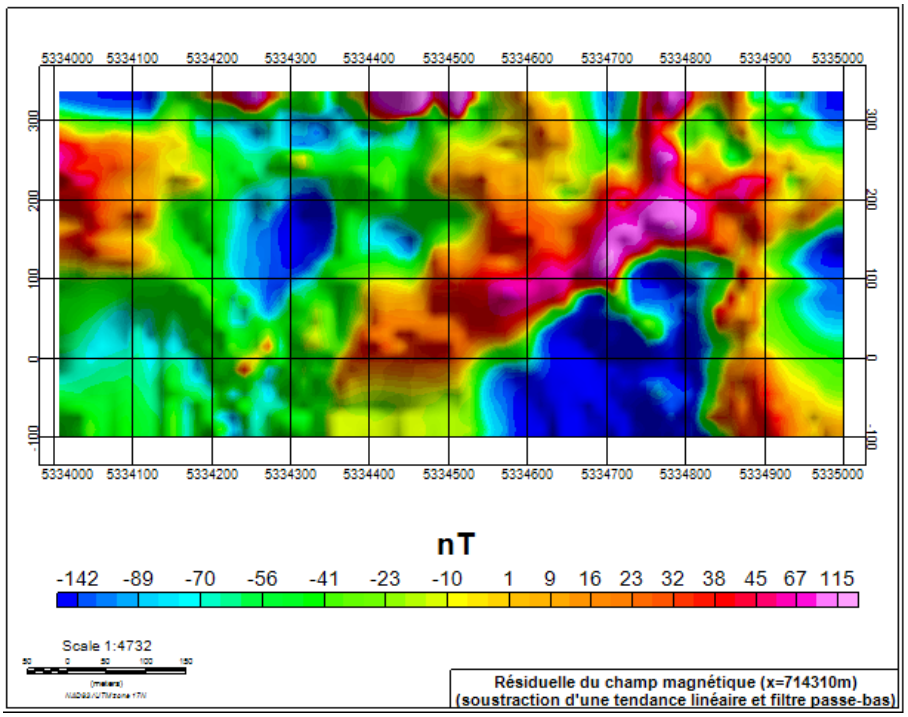

Figure 138 : Coupe x=714310m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, résiduelle du champ magnétique

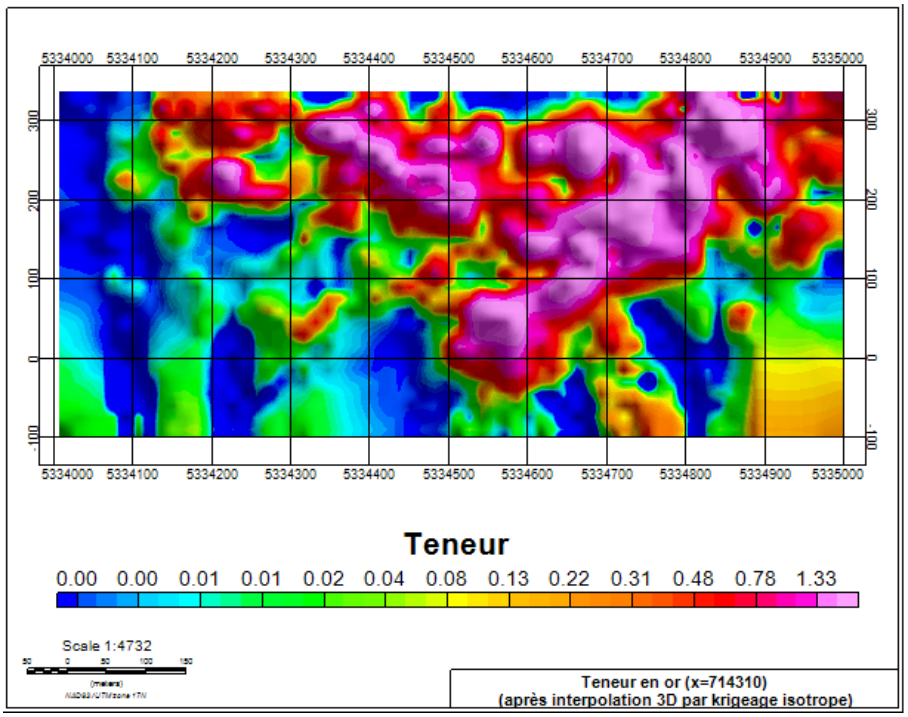

Figure 139 : Coupe x=714310m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or

9.1 COUPE VERTICALE X=714460M

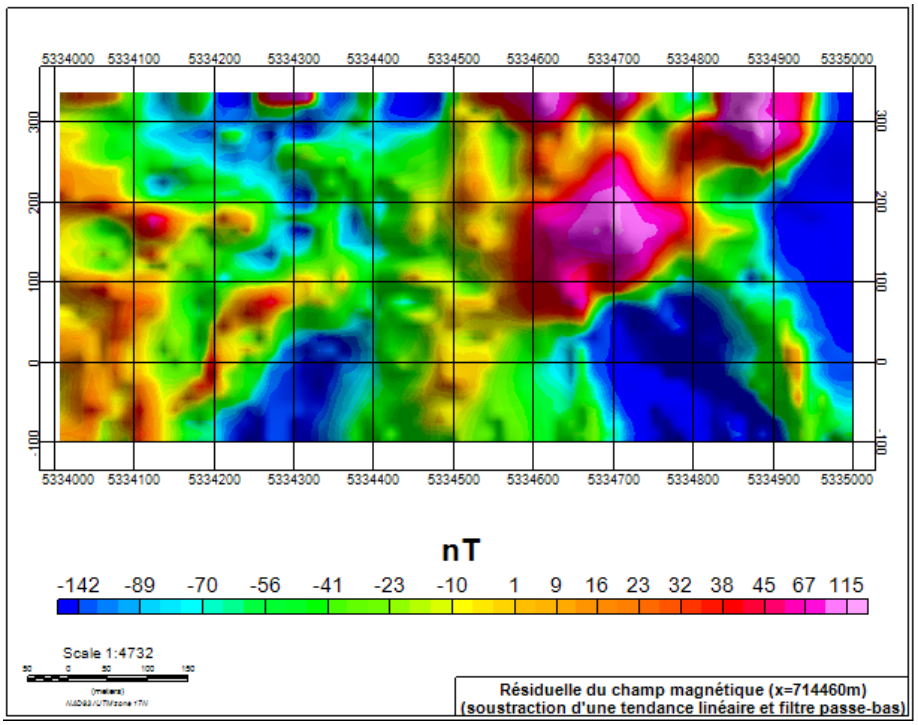

Figure 140 : Coupe x=714460m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, résiduelle du champ magnétique

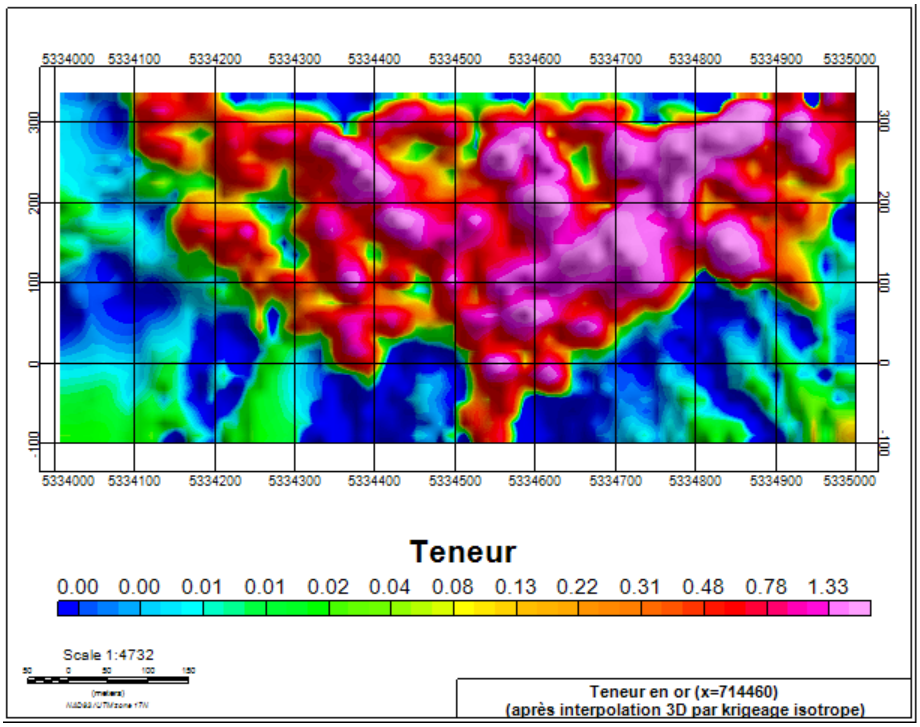

Figure 141 : Coupe x=714460m, variogramme isotrope de longue portée, a=950m, teneur en or