

RAPPORT LOGISTIQUE ET TECHNIQUE

LEVÉ HÉLIporté DE MESURES MAGNÉTIQUES ET SPECTROMÉTRIQUES SUR LE CENTRE DU MASSIF CENTRAL (FRANCE)

réalisé pour

le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)



Références BRGM :

Projet : HADGR211022

Bureau de Recherches Géologiques et Minières

3 Avenue Claude Guillemin

BP 36009, 45060 Orléans, Cedex 02

Chef de projet : Guillaume Martelet

Courriel : g.martelet@brgm.fr

Tel : +33 (0)2 38 64 47 32

Références Novatem :

Contrat : C22172 (S220106)

Novatem Inc.

1087 Chemin de la Montagne

Mont-Saint-Hilaire, Québec, Canada, J3G 4S6

Chef de projet : Pascal Mouge

Courriel : mouge@Novatem.com

Tel : +1 450 467 0424

*Période de réalisation du levé : du 5 au 30 juin 2023
Date de livraison des données et du rapport : août 2023*

TABLE DES MATIÈRES

1	<u>INTRODUCTION</u>	5
2	<u>LOCALISATION ET SPÉCIFICATIONS DU LEVÉ</u>	6
2.1	LOCALISATION DU LEVÉ	6
2.2	ÉTENDUE DU LEVÉ	10
2.3	PARAMÈTRES DE VOL ET D'ACQUISITION DES DONNÉES	10
2.3.1	ESPACEMENT ET ORIENTATION DES LIGNES DE VOL	10
2.3.2	HAUTEUR DE VOL AU-DESSUS DU SOL	10
2.3.3	VITESSE	11
2.3.4	TOLÉRANCES SUR LA NAVIGATION	11
2.3.5	TOLÉRANCE SUR LE NIVEAU DE BRUIT DES MESURES	11
2.3.6	TOLÉRANCE SUR LES VARIATIONS TEMPORELLES DU CHAMP MAGNÉTIQUE (DIURNE ET SPHÉRIQUES)	11
2.4	KILOMÉTRAGE	12
2.5	LIGNES DE VOL RESTITUÉES À L'ISSUE DES VOLS	13
2.6	DISTANCE CUMULÉE INCLUANT LES REVOLS	14
3	<u>TESTS ET CALIBRATIONS</u>	14
3.1	TESTS ET CALIBRATIONS DES INSTRUMENTS DE MESURES MAGNÉTIQUES	14
3.2	TESTS ET CALIBRATIONS DES INSTRUMENTS DE MESURES SPECTROMÉTRIQUES	14
4	<u>LOGISTIQUE</u>	15
4.1	SERVICES GÉOPHYSIQUES ET LOGISTIQUES	15
4.2	BASE D'OPÉRATION	15
4.3	STATIONS DE BASE	16
4.4	RESSOURCES HUMAINES AFFECTÉES AUX TRAVAUX GÉOPHYSIQUES	16
4.5	RESSOURCES HUMAINES AFFECTÉES AU PILOTAGE DES HÉLICOPTÈRES	16
4.6	CALENDRIER DES TRAVAUX	16
5	<u>INSTRUMENTATION</u>	17
5.1	AÉRONEF	17
5.2	MAGNÉTOMÈTRES	20
5.2.1	MAGNÉTOMÈTRE SCALAIRE EN VOL	20
5.2.2	MAGNÉTOMÈTRE VECTORIEL EN VOL	20
5.2.3	STATION DE BASE MAGNÉTOMÉTRIQUE	20
5.3	SPECTROMÈTRES DE MESURES DU RAYONNEMENT GAMMA	21
5.4	SYSTÈME DE POSITIONNEMENT	22
5.4.1	NAVIGATION	22
5.4.2	SYSTÈME GNSS EN VOL	23
5.5	MESURES INERTIELLES ('INERTIAL MEASUREMENT UNIT')	23
5.6	SONDE BAROMÉTRIQUE	24
5.7	ALTIMÈTRE RADAR	24
5.8	SYSTÈME D'ACQUISITION ET D'ENREGISTREMENT DES DONNÉES	24
5.9	SYSTÈME D'ACQUISITION VIDÉO	24
5.10	CALCULATEURS DE TERRAIN	25
5.11	PIÈCES DE RECHANGE	25

6	CONTRÔLES DE LA QUALITÉ DES DONNÉES	26
6.1	CONTRÔLE DES SPÉCIFICATIONS DE VOL	26
7	TRAITEMENTS DES DONNÉES	27
7.1	TRAITEMENT DES DONNÉES MAGNÉTIQUES	27
7.1.1	RÉSUMÉ DES TRAITEMENTS APPLIQUÉS AUX MESURES MAGNÉTIQUES	27
7.1.2	COMPENSATION	27
7.1.3	CORRECTION DES VARIATIONS TEMPORELLES (VARIATIONS DIURNES)	27
7.1.4	CORRECTION DU RETARD INSTRUMENTAL (LAG)	28
7.1.5	CORRECTION D'ALTITUDE	28
7.1.6	NIVELLEMENT	28
7.1.7	MICRO-NIVELLEMENT	29
7.1.8	CHAMP RÉSIDUEL (ANOMALIES)	29
7.1.9	CARTES TRANSFORMÉES	29
7.2	TRAITEMENT DES DONNÉES SPECTROMÉTRIQUES	30
7.2.1	RÉSUMÉ DES CORRECTIONS APPLIQUÉES AUX MESURES DE SPECTROMÉTRIE GAMMA	30
7.2.2	FILTRAGE DES DIFFÉRENTES RÉGIONS D'INTÉRÊTS	30
7.2.3	CORRECTION DU TEMPS D'ACQUISITION PAR SECONDE	30
7.2.4	CORRECTION DU RAYONNEMENT COSMIQUE ET DU BRUIT DE FOND DE L'HÉLICOPTÈRE	30
7.2.5	SUPPRESSION DU RADON	31
7.2.6	RÉDUCTION À PRESSION ET TEMPÉRATURE STANDARDS (STP)	32
7.2.7	CORRECTION DE LA DIFFUSION COMPTON	32
7.2.8	CORRECTION DE L'ATTÉNUATION DE L'AIR	33
7.2.9	CONVERSION EN CONCENTRATION DE RADIOÉLÉMENTS	33
7.2.10	MICRO-NIVELLEMENT	33
8	DONNÉES FINALES	34
8.1	PRODUITS FINAUX DÉLIVRÉS	34
8.2	BASE DE DONNÉES MAGNÉTIQUES	35
8.3	BASE DE DONNÉES SPECTROMÉTRIQUES	36
9	RÉFÉRENCES DU PROJET	37
10	ATTESTATION DE QUALIFICATION	38
	ANNEXES	39
	ANNEXE A : PARAMÈTRES GÉODÉSIQUES UTILISÉS DANS LES PROJECTIONS	40
	ANNEXE B : PARAMÈTRES DES GRILLES	41
	ANNEXE C : TEST DU RETARD INSTRUMENTAL	42
	ANNEXE D : COMPENSATION - FIGURE DE MÉRITE (FOM)	44
	TESTS DE CALIBRATIONS SPECTROMÉTRIQUES	50
	ANNEXE E : LIGNE TEST DES CALIBRATIONS SPECTROMÉTRIQUES	50
	ANNEXE F : COEFFICIENTS D'ATTÉNUATION ET SENSIBILITÉ DU SYSTÈME DE MESURES	53
	ANNEXE G : COEFFICIENTS DE DÉPOUILLEMENT COMPTON	56
	ANNEXE H : ÉTALONNAGE DE LA FENÊTRE COSMIQUE ET BRUIT DE L'HÉLICOPTÈRE	58
	ANNEXE I : COEFFICIENTS DE LA CORRECTION DU RADON	62

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : HÉLICOPTÈRE À L'AÉROPORT DE SAINT-FLOUR	5
FIGURE 2 : LOCALISATION DU BLOC CLERMONT	7
FIGURE 3 : LOCALISATION DU BLOC CLERMONT (ZOOM)	8
FIGURE 4 : LOCALISATION DU BLOC CLERMONT SUR FOND TOPOGRAPHIQUE SRTM1	9
FIGURE 5 : DISTRIBUTION DES VITESSES SUR L'ENSEMBLE DU LEVÉ	11
FIGURE 6 : LIGNES DE VOL DU BLOC CLERMONT	13
FIGURE 7 : HÉLICOPTÈRE AS350 B3E EN VOL ET LORS D'UN RAVITAILLEMENT À L'AÉRODROME DE SAINT-FLOUR.	18
FIGURE 8 : SPECTROMÈTRES À BORD DE L'HÉLICOPTÈRE	21
FIGURE 9 : SYSTÈME DE NAVIGATION EMBARQUÉ	22
FIGURE 10 : STATISTIQUES SUR LES DIFFÉRENCES DE HAUTEUR DE VOL AUX INTERSECTIONS DES TRAVERSES ET DES LIGNES DE CONTRÔLES	28
FIGURE 11 : LOCALISATION DU TEST DU RETARD INSTRUMENTAL	42
FIGURE 12 : LOCALISATION DU TEST DE COMPENSATION	44
FIGURE 13 : PROFILS N 0°	46
FIGURE 14 : PROFILS N 90°	47
FIGURE 15 : PROFILS N 180°	48
FIGURE 16 : PROFILS N 270°	49
FIGURE 17 : LOCALISATION DE LA LIGNE TEST	51
FIGURE 18 : LOCALISATION DE LA LIGNE TEST	53
FIGURE 19 : ATTÉNUATION EXPONENTIELLE AVEC LA HAUTEUR POUR LES QUATRE FENÊTRES	55
FIGURE 20 : LOCALISATION DE LA LIGNE D'ÉTALONNAGE	58
FIGURE 21 : COEFFICIENTS COSMIQUES POUR LE COMPTE TOTAL	59
FIGURE 22 : COEFFICIENTS COSMIQUES POUR LE POTASSIUM	60
FIGURE 23 : COEFFICIENTS COSMIQUES POUR L'URANIUM	60
FIGURE 24 : COEFFICIENTS COSMIQUES POUR LE THORIUM	61
FIGURE 25 : COEFFICIENTS COSMIQUES POUR L'URANIUM VERS LE HAUT	61
FIGURE 26 : COEFFICIENTS DE CORRECTION DU RADON POUR LE COMPTE TOTAL	63
FIGURE 27 : COEFFICIENTS DE CORRECTION DU RADON POUR LE POTASSIUM	63
FIGURE 28 : COEFFICIENTS DE CORRECTION DU RADON POUR LE THORIUM	64
FIGURE 29 : COEFFICIENTS DE CORRECTION DU RADON POUR L'URANIUM VERS LE HAUT	64

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : COORDONNÉES GÉOGRAPHIQUES ET RGF93 DU BLOC CLERMONT	6
TABLEAU 2 : PÉRIMÈTRE ET SURFACE DU BLOC	10
TABLEAU 3 : PARAMÈTRES DE VOL	10
TABLEAU 4 : KILOMÉTRAGE CALCULÉ SUR LES COORDONNÉES PROJÉTÉES	12
TABLEAU 5 : DISTANCE LINÉAIRE RÉELLEMENT VOLÉE	14
TABLEAU 6 : SPÉCIFICATIONS DE L'HÉLICOPTÈRE UTILISÉ POUR CE LEVÉ	19
TABLEAU 7 : PERFORMANCES DE L'HÉLICOPTÈRE UTILISÉ POUR CE LEVÉ	19
TABLEAU 8 : SPÉCIFICATIONS DU MAGNÉTOMÈTRE EN VOL G-822A	20
TABLEAU 9 : SPÉCIFICATIONS DU MAGNÉTOMÈTRE VECTORIEL FLUXGATE	20
TABLEAU 10 : SPÉCIFICATIONS DES MAGNÉTOMÈTRES DES STATIONS SOL	20
TABLEAU 11 : SPÉCIFICATIONS DES SPECTROMÈTRES RSI RSX-5	21
TABLEAU 12 : SPÉCIFICATIONS DU SYSTÈME GNSS	23
TABLEAU 13 : SPÉCIFICATIONS DU SYSTÈME DE MESURES INERTIELLES	23
TABLEAU 14 : SPÉCIFICATIONS DES ALTIMÈTRES RADAR	24
TABLEAU 15 : SPÉCIFICATIONS DU SYSTÈME VIDÉO	25
TABLEAU 16 : PROCÉDURE DE NIVELLEMENT	29
TABLEAU 17 : INCLINAISON ET DÉCLINAISON UTILISÉES DANS LA RÉDUCTION AU PÔLE	29
TABLEAU 18 : RÉSUMÉ DES CORRECTIONS APPLIQUÉES AUX DONNÉES SPECTROMÉTRIQUES	30
TABLEAU 19 : CORRECTION DE LA DIFFUSION COMPTON	32
TABLEAU 20 : PARAMÈTRES DU MICRO-NIVELLEMENT DES DONNÉES SPECTROMÉTRIQUES	33
TABLEAU 21 : PRODUITS DÉLIVRÉS	34
TABLEAU 22 : CONTENU DE LA BASE DE DONNÉES MAGNÉTIQUES	35
TABLEAU 23 : CONTENU DE LA BASE DE DONNÉES SPECTROMÉTRIQUES	36
TABLEAU 24 : PARAMÈTRES GÉODÉSIIQUES UTILISÉS DANS LES PROJECTIONS PLANES	40
TABLEAU 25 : PARAMÈTRES DES GRILLES POUR LE BLOC CLERMONT	41
TABLEAU 26 : TEST DE PARALLAXE	43
TABLEAU 27 : RÉSULTATS DE LA FOM	45
TABLEAU 28 : VARIATION DES COMPTES DU THORIUM SUR LA LIGNE TEST	52
TABLEAU 29 : COEFFICIENTS D'ATTÉNUATION ET SENSIBILITÉ À 80M	54
TABLEAU 30 : COMPTES CORRIGÉS DU BRUIT DE FOND ET DE L'EFFET COMPTON	54
TABLEAU 31 : TAUX DE COMPTE MOYEN SUR LES PALIERS COSMIQUES	59
TABLEAU 32 : COEFFICIENTS DU BRUIT DE FOND	59
TABLEAU 33 : COEFFICIENTS DE CALIBRATION DES COMPOSANTES OBSERVÉES AU SOL	62
TABLEAU 34 : COEFFICIENTS DE CORRECTION DU RADON	64

1 INTRODUCTION

Novatem Inc. a été mandatée par le **Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)** pour réaliser un levé hélicoptéré de mesures magnétiques et spectrométriques du rayonnement gamma sur un bloc situé dans le centre du Massif Central (France). Ce rapport décrit la réalisation du levé qui totalise 7 255.2 km linéaires. La production a débuté le 5 juin 2023 et s'est achevée le 30 juin 2023.

En réponse à la demande du BRGM, Novatem a mis en œuvre un système hélicoptéré complet, comprenant notamment un capteur magnétique scalaire de très haute résolution à pompage optique de vapeur de césium fabriqué par Geometrics, monté à l'extrémité d'une perche magnétométrique ('stinger'); deux spectromètres de mesure du rayonnement gamma RSX5 fabriqués par Radiation Solutions; un capteur magnétique vectoriel, fabriqué par Billingsley; une centrale d'attitude, fabriquée par Microstrain; un système de navigation et de compensation magnétique développés par Novatem; un altimètre radar TRA 4000, fabriqué par Free Flight Systems; un système de positionnement GNSS différentiel Hemisphere RS632; une caméra digitale Commander Video Recorder fabriquée par Rugged Video.

Novatem était associée pour ce projet avec la compagnie Savoie Hélicoptères. L'hélicoptère a été modifié conformément aux conditions et aux spécifications d'exploitation du Supplemental Type Certificate (STC) de Novatem.

Ce rapport décrit le déroulement des opérations lors du levé, les équipements utilisés, les modes opératoires de l'acquisition et résume le traitement des données.



Figure 1 : Hélicoptère à l'aéroport de Saint-Flour

2 LOCALISATION ET SPÉCIFICATIONS DU LEVÉ

2.1 LOCALISATION DU LEVÉ

Le levé comprend un bloc localisé au centre du Massif central. Les sommets du polygone ont été fournis par le **BRGM** dans le système de coordonnées France RGF93.

<i>Géographiques WGS84</i>		<i>Lambert France RGF93</i>	
<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>
3.2872325990	44.958893040	722650.31	6428894.61
3.2858335559	44.886373179	722569.14	6420839.68
3.2217549778	44.886567644	717509.51	6420845.01
2.9939122286	44.796172398	699518.54	6410780.22
2.7471109894	44.797143863	680000.38	6410920.13
2.7471885138	44.896021452	680041.67	6421902.40
2.8012832859	44.896498291	684312.33	6421943.15
2.8693355124	45.036170848	689710.37	6437444.79
2.8691708149	45.155205745	689719.31	6450665.06
2.7651435486	45.253279587	681577.15	6461575.94
2.4130884537	45.252234301	653960.38	6461603.56
2.4109816737	45.414479608	653929.52	6479622.67
2.6949860219	45.415611885	676143.44	6479622.66
2.6930477049	45.667254516	676100.47	6507568.71
2.8858317566	45.668031797	691110.88	6507615.00
2.9122039421	45.766653427	693176.39	6518564.41
2.9876844001	45.766608738	699042.82	6518555.73
3.0489997911	45.802461463	703805.85	6522538.31
3.0720967398	45.802475966	705599.81	6522541.29
3.0774421025	45.766297736	706018.92	6518524.07
3.1152143024	45.489803380	708999.44	6487822.43
3.2238250293	45.397133460	717512.23	6477549.28
3.2239699584	45.365355293	717533.58	6474020.19
2.9796490558	45.366801163	698406.86	6474156.10
2.9760750651	45.141633182	698119.50	6449149.45
3.0837462036	45.140500906	706582.60	6449026.90
3.2872325990	44.958893040	722650.31	6428894.61

Tableau 1 : Coordonnées géographiques et RGF93 du bloc Clermont

Les figures qui suivent localisent les limites du bloc Clermont et précisent son appellation dans le texte qui suit.



Figure 2 : Localisation du bloc Clermont



Figure 3 : Localisation du bloc Clermont (zoom)

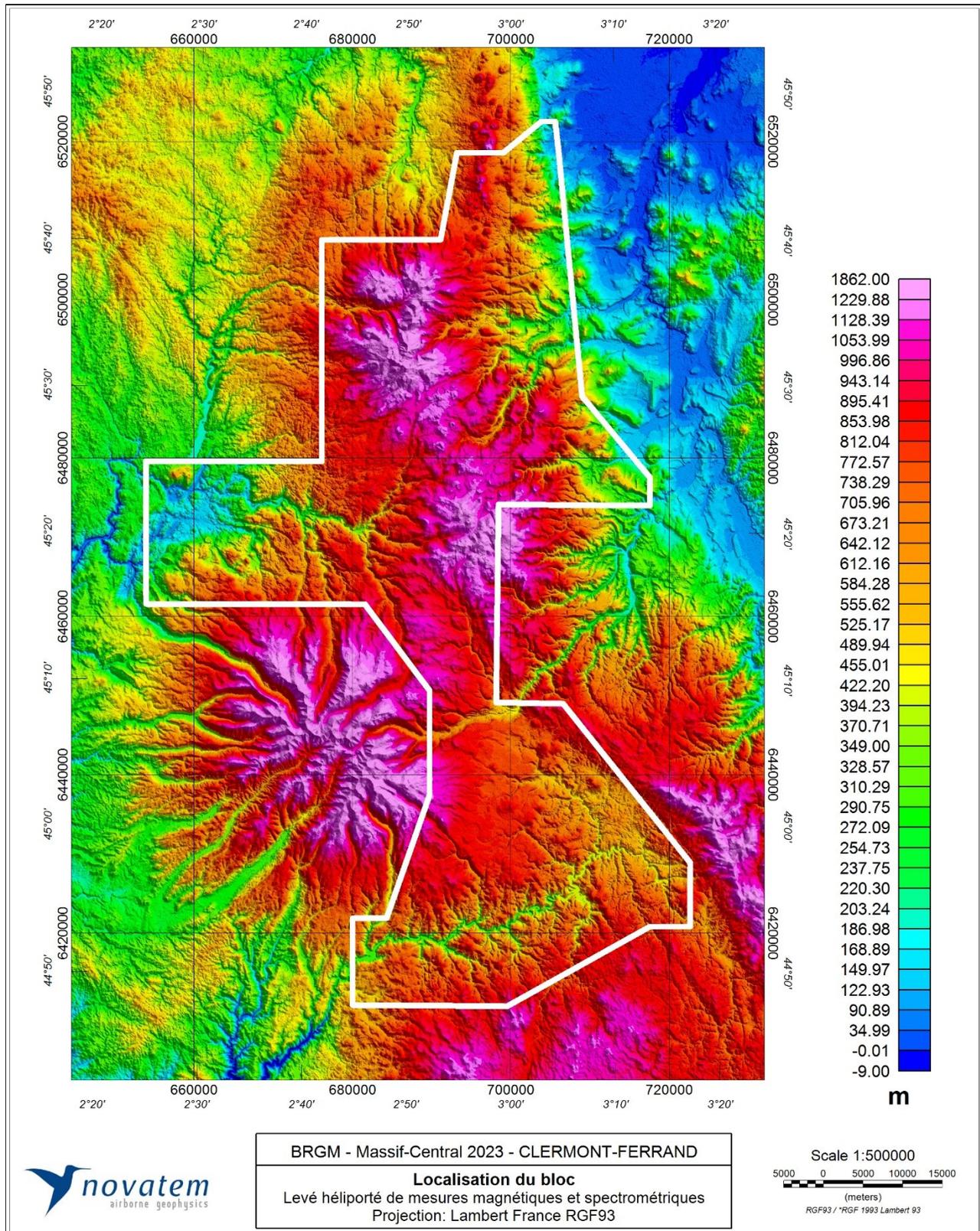


Figure 4 : Localisation du bloc Clermont sur fond topographique SRTM1

2.2 ÉTENDUE DU LEVÉ

L'étendue du bloc est résumée ici à l'aide du périmètre et de la surface mesurés en coordonnées géographiques à l'aide des coordonnées fournies par le **BRGM** :

<i>Bloc</i>	<i>Périmètre</i>	<i>Surface</i>
Clermont	382 km	3 283 km ²

Tableau 2 : Périmètre et surface du bloc

2.3 PARAMÈTRES DE VOL ET D'ACQUISITION DES DONNÉES

2.3.1 ESPACEMENT ET ORIENTATION DES LIGNES DE VOL

Les paramètres de vol utilisés pour le projet sont résumés dans le tableau qui suit.

<i>Bloc</i>	<i>Traverses</i>		<i>Lignes de contrôles</i>	
	<i>Espacement</i>	<i>Direction</i>	<i>Espacement</i>	<i>Direction</i>
Clermont	500 m	N0/N180	5 000 m	N90/N270

Tableau 3 : Paramètres de vol

2.3.2 HAUTEUR DE VOL AU-DESSUS DU SOL

La hauteur de vol demandée par le BRGM était de **80 m (262 pieds)** au-dessus du sol. Compte tenu des très fortes variations topographiques, il a finalement été décidé de suivre une surface drapée la plus proche possible de la topographie, c'est-à-dire la surface topographique augmentée de 80m.

2.3.3 VITESSE

La vitesse moyenne de l'hélicoptère mesurée sur l'ensemble du levé est de **106 km/h** (29.58 m/s).

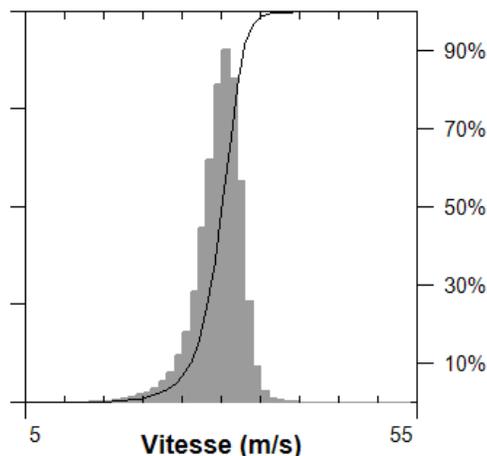


Figure 5 : Distribution des vitesses sur l'ensemble du levé

Les pilotes se sont efforcés de suivre les spécifications au mieux de leurs possibilités. Les paramètres envisagés ont pu être modifiés temporairement par les pilotes, seuls juges de la sécurité des vols, en fonction des conditions locales de vol (proximité des zones habitées, des lignes électriques, des constructions industrielles, etc). En outre, la facilité pour les pilotes de suivre ces paramètres a pu varier, principalement en fonction de la topographie des lieux et des courants d'air. **Il est important de noter que la densité des installations industrielles et des lignes électriques a été particulièrement élevée, ce qui explique les écarts parfois importants observés sur les lignes de vol.**

2.3.4 TOLÉRANCES SUR LA NAVIGATION

La déviation acceptable, par rapport aux lignes de vol théoriques, a été fixée à **+/- 20 m** dans le plan horizontal, et à **+/-10 m** sur l'altitude, mesurés sur une ligne d'au moins 1 km. Toutefois ces valeurs ont pu être localement dépassées en fonction de la végétation, des habitations, des lignes électriques, etc.

Les segments de traverse revolés recoupent les lignes de contrôle à chaque extrémité en rejoignant les traverses préexistantes, avec un angle faible. De même, les lignes de contrôle revolées recoupent les traverses à chaque extrémité et rejoignent les traverses préexistantes, avec un angle faible. Toutes les traverses commencent et se terminent en recoupant une ligne de contrôle.

2.3.5 TOLÉRANCE SUR LE NIVEAU DE BRUIT DES MESURES

Les mesures brutes ont été filtrées des perturbations parasites anthropiques lorsque nécessaire. Le niveau de bruit des mesures résiduelles magnétiques, mesuré sur la quatrième différence est normalement en dessous de **± 0.1 nT** pour un échantillonnage de 10 mesures par secondes.

2.3.6 TOLÉRANCE SUR LES VARIATIONS TEMPORELLES DU CHAMP MAGNÉTIQUE (DIURNE ET SPHÉRIQUES)

La déviation maximum à chaque station de base sur les variations temporelles du champ magnétique a été fixée par le BRGM, soit : une variation de **3 nT** crête à crête sur une période d'une minute ; **0.5 nT** crête à crête sur une période de 15 secondes. Le bruit des oscillations de haute fréquence a été filtré des données et les lignes de vols affectées par un niveau trop important ont été refaites. Les mesures ont été faites en continue, à la cadence d'une mesure par seconde, avec une extension d'au moins une heure de mesure avant et après chaque vol.

2.4 KILOMÉTRAGE

Le tableau qui suit donne le kilométrage calculé sur les coordonnées projetées dans le système rectangulaire Lambert France RGF93.

<i>Kilométrage</i>	<i>Traverses</i>	<i>Lignes de contrôle</i>	<i>Total</i>
Clermont	6 596.2	659.0	7255.2

Tableau 4 : Kilométrage calculé sur les coordonnées projetées

2.5 LIGNES DE VOL RESTITUÉES À L'ISSUE DES VOLS

La figure qui suit présente les lignes de vol sur fond topographique, pour le bloc Clermont.

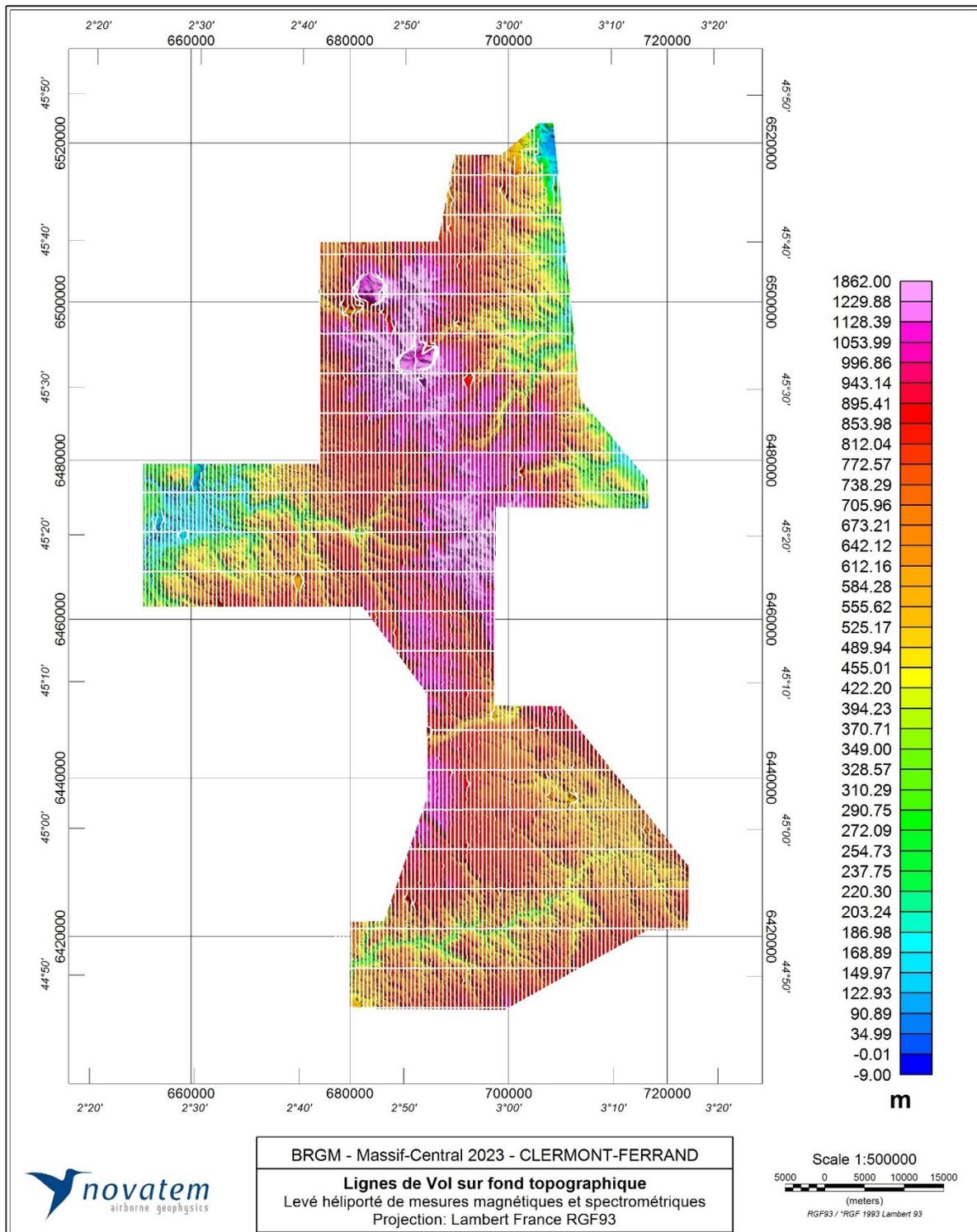


Figure 6 : lignes de vol du bloc Clermont

2.6 DISTANCE CUMULÉE INCLUANT LES REVOLS

Les plans de vol présentés sur les figures précédentes n'incluent pas les revols. Le nombre de kilomètres effectivement volés est finalement le suivant :

<i>Kilométrage</i>	<i>Total</i>
Réel	7 310
Mesuré sur les données finales	7 255
Différence	55

Tableau 5 : Distance linéaire réellement volée

3 TESTS ET CALIBRATIONS

Tous les instruments, y compris ceux de rechange, ont été testés et calibrés avant la mobilisation. La configuration a ensuite été testée sur le lieu du levé. Les tests suivants ont été complétés et les résultats sont présentés en annexe de ce présent rapport.

3.1 TESTS ET CALIBRATIONS DES INSTRUMENTS DE MESURES MAGNÉTIQUES

Les tests suivants sont effectués sur le site des travaux :

- Les systèmes de synchronisation du temps et des enregistrements ont été vérifiés en survolant une source magnétique intense et isolée (un pont ferroviaire) dans des directions opposées et à la hauteur nominale du levé. Ce retard, s'il est observé, est ensuite corrigé lors du traitement des données.
- La FOM de l'hélicoptère a été volée dès que les conditions météorologiques ont été favorables. Elle a été volée à haute altitude, au-dessus d'une zone de faible gradient magnétique. La FOM comprenait au moins : 3 roulis de $\pm 10^\circ$; 3 tangages de $\pm 5^\circ$; 3 lacets de $\pm 5^\circ$ et ce dans chaque direction des lignes de vol du levé, soit nord, sud, est et ouest. Chaque manœuvre a été effectuée sur une période d'au moins 45 secondes. La FOM a été calculée en additionnant les amplitudes crête à crête des 12 réponses magnétiques créées par les manœuvres de l'hélicoptère.

3.2 TESTS ET CALIBRATIONS DES INSTRUMENTS DE MESURES SPECTROMÉTRIQUES

La méthodologie d'analyse spectrométrique du rayonnement gamma mise en œuvre par Novatem est rigoureusement conforme aux recommandations de l'**AIEA**. Les spectromètres ont été entièrement recalibrés avant le démarrage des travaux (le 4 mars 2022), puis les tests suivants sont effectués sur le site des travaux :

- Calibration sur un ensemble de blocs appartenant au fabricant Radiation Solution Inc. afin de déterminer les rapports de corrélation (stripping ratios)
- Des vols au-dessus d'une zone d'étalonnage établie à proximité du lac de Naussac en France sont effectués sur des paliers constants aux 20 mètres, entre 85 et 205 m AGL. Ces paliers sont utilisés pour évaluer l'effet des variations de hauteur (coefficients d'atténuation de l'air et constantes de sensibilité) à partir de concentrations connues de sources radioactives au sol. Des mesures au sol ont ainsi été effectuées simultanément aux vols, à l'aide d'un spectromètre calibré fourni par le BRGM. Ce test peut être répété si des changements sont apportés au système de mesures spectrométriques, ce qui n'a pas été le cas ici.
- Afin de déterminer les coefficients du bruit cosmique ainsi que le bruit de fond de l'hélicoptère, quatre paliers de calibration équidistants, entre 2500 et 4000 m AMSL, ont été réalisés au-dessus du sol. Sur chaque palier, le système enregistre au moins 5 minutes de données sur chacun des paliers.

- Afin de vérifier la sensibilité du système, détecter tout changement du niveau de radioactivité de l'hélicoptère, et enfin suivre l'effet des variations d'humidité du sol sur le levé (variation de la concentration du Thorium inférieure à 10% après correction), des survols quotidiens d'une même ligne test à proximité de la base d'opération, à la hauteur nominale du levé et d'une durée d'au moins 60 secondes, ont été réalisés au début et à la fin de chaque journée de vol.
- Afin de procéder à la calibration du détecteur regardant vers le haut des effets du radon atmosphérique, les lignes tests ont été utilisées pour évaluer les variations des concentrations de radon dans chacune des fenêtres d'intérêt du rayonnement gamma. Le pilote effectuait tous ses vols à la même altitude pour minimiser l'erreur sur les variations du taux de compte. Étant donné que l'humidité du sol est contrôlée dans la fenêtre du thorium, les variations résiduelles ne sont dues qu'à des changements quotidiens dans le radon atmosphérique, une fois corrigées du rayonnement cosmique et du bruit de fond de l'hélicoptère en soustrayant la moyenne sur toute la période du levé.

4 LOGISTIQUE

4.1 SERVICES GÉOPHYSIQUES ET LOGISTIQUES

Novatem Inc. a pris en charge les éléments suivants du projet :

- Obtention des autorisations de vol
- Mise à disposition du personnel qualifié nécessaire au bon déroulement du levé jusqu'à son terme
- Fourniture des équipements techniques nécessaires ainsi que des pièces de rechange pour réaliser le levé dans les meilleurs délais
- Fourniture des hélicoptères et du carburant
- Fourniture du gîte et du couvert des employés
- Maintenance et supervision du bon fonctionnement des hélicoptères
- Traitements préliminaires et contrôles de la qualité des données géophysiques sur le site
- Préparation et fourniture des produits préliminaires et finaux

4.2 BASE D'OPÉRATION

L'aéroport de Clermont-Ferrand Auvergne, situé en bordure de la ville à Aulnat, a été utilisé pour la réalisation du bloc Clermont.

Aéroport Clermont-Ferrand Auvergne	Code IATA : CFE Code OACI : LFLC (Lat, Long) = (45° 47' 09" N, 3° 09' 45" E) Altitude = 1 092 ft. (333 m) Longueur de la piste : 9 885 ft (3 013 m) Surface : asphalte Carburant : JET-A1
------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Le personnel était logé dans un hôtel à Aubière (Hôtel The Original). Une connexion internet haut-débit était disponible permettant l'envoi quotidien des données.

L'équipe est arrivée sur place le **4 juin 2023** (pour un début de production le 5 juin) et a quitté les lieux le **1 juillet 2023** (pour une fin de production le 30 juin).

4.3 STATIONS DE BASE

Le lieu d'implantation de la station de base a été choisi selon les spécifications du BRGM : localisation loin des perturbations anthropiques et faible gradient local. Ces mesures de validation ont été effectuées à l'aide de la station-sol (GSM 19).

La station de base magnétique a été installée dans une vaste friche appartenant à l'entreprise Mediaco. La station était alimentée en courant par une batterie. Les données pouvaient être récupérées et la batterie rechargée quotidiennement par le responsable de Novatem, grâce à un accès prévu avec l'entreprise Mediaco (propriétaire des lieux).

Les coordonnées géographiques de la station-de-base magnétique, ainsi que la moyenne mesurée sont les suivantes :

Base 1 : Friche Mediaco

Latitude : 45.6289355 O

Longitude : 6.3308803 N

Moyenne mesurée pendant la durée du levé : 46 977 nT

4.4 RESSOURCES HUMAINES AFFECTÉES AUX TRAVAUX GÉOPHYSIQUES

Le personnel suivant était affecté à l'acquisition, aux contrôles de la qualité, aux prétraitements et aux traitements finaux des données :

Gestionnaire scientifique et responsable du projet: **Pascal MOUGE, Geo., Ph. D.** Membre de l'Ordre des Géologues du Québec.

Responsable du traitement des données : **Olivier SAVIGNET, Ing.** Membre de l'Ordre des Ingénieurs du Québec.

Responsable des équipements : **Morten SKOVGAARD, M.Sc.**

Responsable de l'acquisition sur le terrain : **Valentin MULLIEZ, M.Sc**

4.5 RESSOURCES HUMAINES AFFECTÉES AU PILOTAGE DES HÉLICOPTÈRES

Tous les pilotes ayant travaillé sur ce projet sont titulaires d'un permis commercial valide pour les hélicoptères AS-350 d'Eurocopter.

Pour des raisons de sécurité, les hélicoptères ont été pilotés par un pilote commandant de bord assisté d'un navigateur/opérateur. Chaque instrument était scruté en temps réel à l'aide des indices de qualité : si la valeur d'un de ces indices passait en dessous des spécifications, le voyant correspondant passait du vert au rouge sur l'écran du pilote qui cessait immédiatement son vol et rentrait à sa base.

Novatem a réalisé ce projet avec l'aide de deux pilotes tous ayant les qualifications de Commandant de bord et les formations pour les vols de géophysique à basse hauteur (vols dits à hauts risques).

- **Régis TEISSONIERE**, Commandant
- **Thibaut MONNET**, Commandant
- **Antoine ROSSI**, AME

4.6 CALENDRIER DES TRAVAUX

La production a débuté le **5 juin 2023** et s'est terminée le **30 juin 2023**. Les données préliminaires ont été produites sur le terrain au fur et à mesure de la progression du travail. Toutes les phases du levé, en particulier de planification et le suivi de la production ont été coordonnées avec le représentant du BRGM.

5 INSTRUMENTATION

5.1 AÉRONEF

Novatem a mis en œuvre pour ce projet, **un hélicoptère à turbine Astar AS-350 B3e d'Eurocopter (aujourd'hui Airbus)** de la société Savoie Hélicoptères.

L'hélicoptère était muni d'une perche magnétométrique (« stinger ») validée par un STC, dont Novatem est le propriétaire, délivré par Transport Canada. Ce « stinger » a une longueur hors tout de 25 pieds (7.5 m). Les équipements de mesure géophysique montés à bord de l'hélicoptère pour cette campagne incluaient principalement :

- Un capteur magnétique scalaire de très haute résolution à pompage optique de vapeur de césium, fabriqué par Geometrics, monté à l'extrémité de la perche magnétométrique.
- Un capteur magnétique vectoriel fluxgate de très haute résolution, fabriqué par Billingsley, monté à l'extrémité de la perche magnétométrique.
- Deux spectromètres digitaux de mesure du rayonnement gamma RSX-5 fabriqués par Radiation Solutions Inc. (RSI). Chaque spectromètre comprenait 5 cristaux de NaI, soit 41.8 litres au total.
- Un système de navigation « drapée » développé par Novatem, permettant de suivre une surface de vol continue, calculée à l'avance, et donc de minimiser les écarts aux intersections des traverses et des lignes de contrôle;
- Un altimètre radar TRA 4000, fabriqué par Free Flight Systems, dont la calibration est faite par des mesures conjointes barométriques et GNSS;
- Un système de mesure des angles d'attitude (Inertial Measurement Unit), fabriqué par Microstrain, pour la compensation magnétique;
- Un système de compensation développé par Novatem pour la très haute résolution utilisant conjointement les composantes fournies par le magnétomètre vectoriel fluxgate, les angles mesurés par la centrale d'attitude, et des algorithmes d'inversion très performants pour le calcul des coefficients;
- Un récepteur haute résolution Hemisphere R632, temps réel multi-fréquences GPS, GLONASS, BeiDou (incluant la phase 3), Galileo, IRNSS, QZSS et Atlas L-band. En France, ce système est précis en temps réel à un décimètre dans le plan horizontal et un centimètre après corrections à l'aide des mesures de la station sol;
- Une caméra digitale Commander Recorder Video fabriquée par Rugged Video utilisant une optique à vision grand angle HDX, synchronisée avec le système de positionnement
- Une station de base magnétométrique GEM GSM-19, équipée d'un capteur de haute résolution pour la correction des variations temporelles du champ magnétique externe;
- Une station de base GNSS utilisant un capteur Hemisphere similaire à celui embarqué à bord des hélicoptères pour le calcul des corrections différentielles de positionnement à l'aide du logiciel Waypoint GrafNav de Novatel.

Avant le début des opérations, les équipements ont tous été testés au sol afin d'assurer que les paramètres d'acquisition étaient dans les spécifications du contrat. Tout au long du projet, des contrôles qualité ont été réalisés quotidiennement sur les données.



Figure 7 : hélicoptère AS350 B3e en vol et lors d'un ravitaillement à l'aérodrome de Saint-Flour.

Immatriculation	F-GNEP
Fabricant	Aérospatiale / Eurocopter / Airbus
Modèle	Astar AS350, renommé H125
Type	B3e
Turbine	Turbomeca Arriel 2D
Rotor	Eurocopter 3 pales en composite
Type d'immatriculation	Commerciale
Opérateur	Savoie Hélicoptères

Tableau 6 : Spécifications de l'hélicoptère utilisé pour ce levé

Astar AS350 B3	
Turbine	Turbomeca Arriel 2D
Puissance au décollage	952 shp (710 kW)
Altitude maximum premise en opération	23 000 ft (7 010 m)
Température minimum em opération	- 40 °F (- 40 °C)
Masse maximale (interne)	4 960 lbs. (2 250 kg)
Masse maximale avec charge externe (sling)	6 172 lbs. (2 800 kg)
Masse à vide (lbs.)	2 736 lbs. (1 241 kg)
Charge utile (interne)	2 224 lbs. (1 009 kg)
Charge utile (externe/sling)	3 086 lbs. (1 400 kg)
Autonomie de vol avec 1 pilote + 1 co-pilote + 2 spectromètres	3 h
Rayon d'action avec 1 pilote + 1 co-pilote + 2 spectromètres	600 km
Capacité - réservoir de carburant	143 gal.
Capacité - réservoir de carburant	2090 lbs.
Capacité - réservoir de carburant	540 litres
Consommation en carburant	43 gal/h (160 litres/h)
Consommation en carburant en survey	38 gal/h (145 litres/h)
Vitesse croisière	125 kts (230 km/h)
Vitesse max	155 kts (287 km/h)
Vitesse en survey	65 kts (120 km/h)
Taux de montée en survey	2 100 ft/mn (10.7 m/s)

Tableau 7 : Performances de l'hélicoptère utilisé pour ce levé

Remarque : Les hélicoptères Astar n'emportent pas de carburant dans le plancher et sont donc totalement transparents au rayonnement mesuré. Ce type d'hélicoptère est donc particulièrement bien adapté pour réaliser des missions de spectrométrie.

5.2 MAGNÉTOMÈTRES

5.2.1 MAGNÉTOMÈTRE SCALAIRE EN VOL

L'hélicoptère était équipé d'un capteur scalaire G822A à pompage optique de vapeur de Césium, fabriqué par **Geometrics**, mesurant le champ total avec une sensibilité de 0.0005 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ et un "heading error" de ± 0.15 nT. Ces magnétomètres sont opérationnels y compris sur les zones de fort gradient sur une gamme de 20 000 – 100 000 nT.

Spécifications	
Taux d'échantillonnage	10 Hz
Précision en vol	< 0.1 nT
Sensibilité	< 0.002 nT à 10 Hz
Résolution	0.0001 nT
Plage de fonctionnement	20 000 à 100 000 nT
"Heading error"	± 0.15 nT

Tableau 8 : Spécifications du magnétomètre en vol G-822A

5.2.2 MAGNÉTOMÈTRE VECTORIEL EN VOL

Un capteur magnétique vectoriel fabriqué par **Billingsley**, mesurant les trois composantes du champ magnétique total a été utilisé sur chaque hélicoptère. Ce magnétomètre de dernière génération est le plus performant des magnétomètres vectoriels existants.

Spécifications	
Échantillonnage	125 Hz
Orthogonalité des axes	Meilleure que 0.2 degrés
Précision	0.1 nT
Sensibilité	< 0.3 nT
Résolution	0.1nT
Fonctionnement	> 65 000 nT
'Heading error'	± 1 nT

Tableau 9 : Spécifications du magnétomètre vectoriel fluxgate

5.2.3 STATION DE BASE MAGNÉTOMÉTRIQUE

Une station de base magnétique **GEM** GSM19, équipée d'une carte d'acquisition et d'une antenne GPS ont enregistré les variations du champ magnétique externe durant toute la période du levé. La station était équipée d'une batterie externe afin d'augmenter l'autonomie d'acquisition et ainsi assurer une prise de données en continu.

Spécifications	
Taux d'échantillonnage	1 Hz
Précision	0.2 nT
Résolution	0.01 nT

Tableau 10 : Spécifications des magnétomètres des stations sol

5.3 SPECTROMÈTRES DE MESURES DU RAYONNEMENT GAMMA

Deux spectromètres digitaux de mesure du rayonnement gamma RSX-5 fabriqués par Radiation Solutions Inc. (RSI) ont été utilisés pour ce projet. Chaque spectromètre comprenait 5 cristaux de NaI, dont 4 dirigés vers le bas (16.72 litres = 1024 in³), et un cristal regardant vers le haut (4.18 litres = 256 in³). L'hélicoptère disposait donc de 33.44 litres dirigés vers le bas et 8.36 litres dirigés vers le haut, soit 41.8 litres au total.

Spécifications	
Taux d'échantillonnage	1 Hz
Canaux	1024
Non linéarité différentielle	Moins de 0.2% sur 99.5%
Non linéarité intégrale	Moins de 0.1% sur 99.5%
Résolution	Mieux que 8.5%

Tableau 11 : Spécifications des spectromètres RSI RSX-5

Chaque spectromètre était relié à sa propre sonde thermique et barométrique (**Honeywell**) ayant respectivement une résolution de 0.1 °C et de 0.01 kPa.

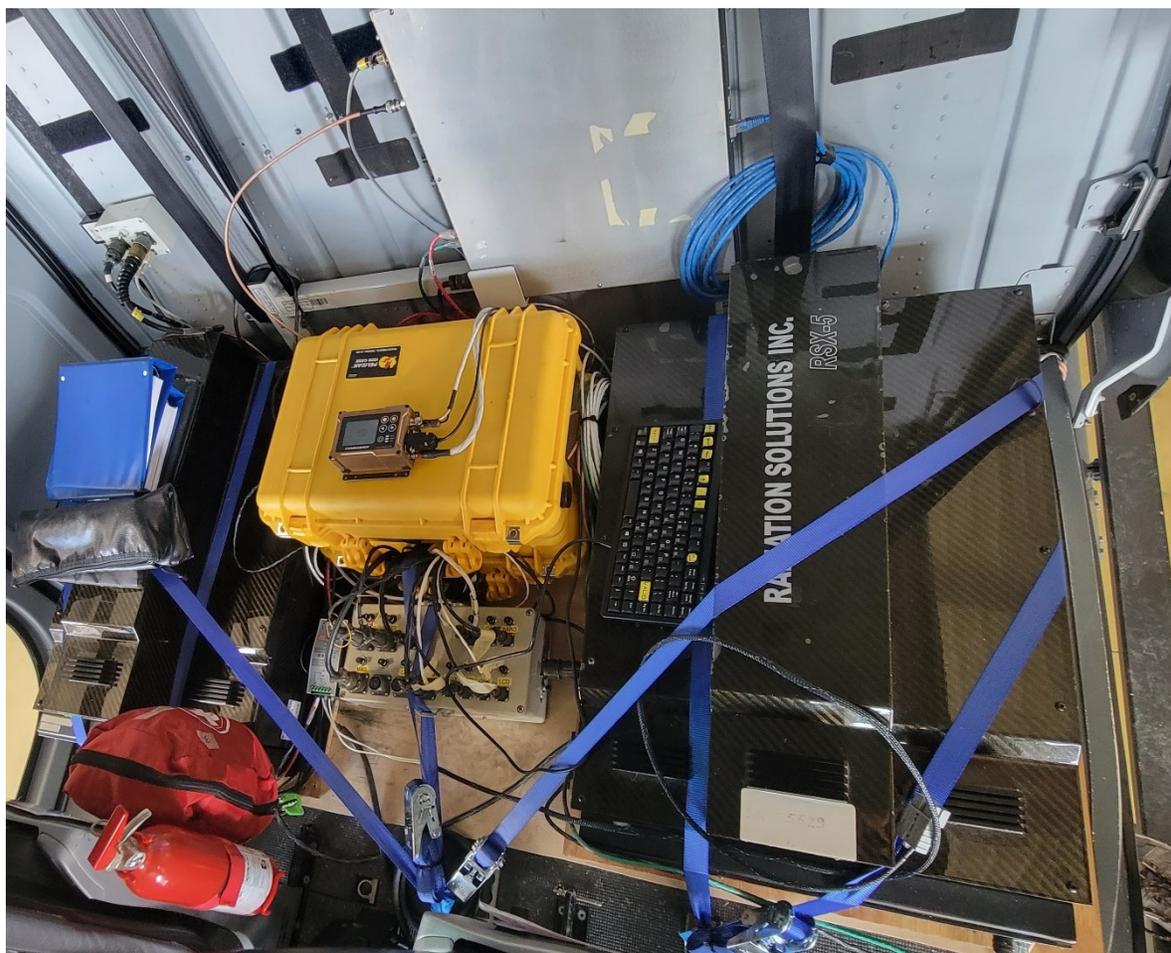


Figure 8 : Spectromètres à bord de l'hélicoptère

5.4 SYSTÈME DE POSITIONNEMENT

5.4.1 NAVIGATION

Un système de navigation développé par Novatem, spécifiquement pour les levés géophysiques héliportés, a été utilisé. Le pilote disposait face à lui de toutes les informations nécessaires pour suivre ses lignes de vol et sa surface drapée sur un écran de haute luminosité. Le système fournit en outre au pilote des indices sur la qualité des mesures : si un au moins un de ces indices passe au rouge, le pilote cesse immédiatement son vol et rentre à sa base. Un premier contrôle de la qualité des 7 instruments principaux d'acquisition est donc fait en temps réel.



Figure 9 : Système de navigation embarqué

5.4.2 SYSTÈME GNSS EN VOL

Un récepteur haute résolution **Hemisphere R632**, temps réel multi-fréquences GPS, GLONASS, BeiDou (incluant la phase 3), Galileo, IRNSS, QZSS et Atlas L-band a été utilisé pour le positionnement en vol.

Spécifications		
Acquisition	20 Hz	
Fréquences	GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, QZSS, IRNSS, Atlas L-band	
Signaux reçus	GPS L1CA/L1P/L1C/L2P/L2C/L5 GLONASS G1/G2/G3, P1/P2 BeiDou B1i/B2i/B3i/B10C/B2A/B2B/ ACEBOC GALILEO E1BC/E5a/E5b/E6BC/ALTBOC QZSS L1CA/L2C/L5/L1C/LEX IRNSS L5 Atlas L-band	
Précision (RMS)	Horizontale	Verticale
Brute	1,2 m	2,4 m
SBAS	0,3 m	0,6 m
Atlas standard	0,5 m	1,0 m
Atlas H10	0,04 m	0,08 m
Atlas H30	0,15 m	0,3 m
RTK	8 mm	15 mm
Précision du temps	20 ns	
Plage de températures	-40°C à +75 °C	
Altitude	18 000 m (59 000 ft)	

Tableau 12 : Spécifications du système GNSS

5.5 MESURES INERTIELLES ('INERTIAL MEASUREMENT UNIT')

Une centrale inertielle **Microstrain**, a été utilisée pour la mesure des angles d'attitude (roulis, tangage et lacet) nécessaires à la correction des gradients magnétiques. Les trois angles d'attitude sont mesurés avec une très grande vitesse d'échantillonnage (entre 100 et 600Hz) puis ramenés à la même cadence que les autres mesures (10Hz).

Spécifications	
Échantillonnage	10 Hz (600Hz max)
Précision (roulis, tangage, lacet)	0.001 degré

Tableau 13 : Spécifications du système de mesures inertielles

5.6 SONDE BAROMÉTRIQUE

Chaque hélicoptère était muni d'une sonde de température et de pression fabriquée par **Honeywell** ayant une résolution respectivement de 0.1 °C et de 0.1 mbars.

5.7 ALTIMÈTRE RADAR

L'hélicoptère était équipé d'un altimètre radar **TRA-4000** fabriqué par **Free Flight Systems**. Cet altimètre a été étalonné par des vols au-dessus d'une bande de terrain d'altitude connue (piste de l'aéroport d'Aurillac).

Spécifications	
Modèle	TRA-4000
Échantillonnage	10 Hz
Gamme d'altitude	0 – 2 600 pieds
Gamme de précision	Entre 0 et 100 pieds : ≤ 3ft Entre 100 et 500 pieds : ≤ 3% Entre 500 et 2 500 pieds : ≤ 5%
Gamme de températures	-55 à +70 °C

Tableau 14 : Spécifications des altimètres radar

5.8 SYSTÈME D'ACQUISITION ET D'ENREGISTREMENT DES DONNÉES

Un système d'acquisition développé par Novatem a été utilisé. Toutes les données ont été synchronisées en temps réel avec le récepteur GNSS. Cette synchronisation est ensuite vérifiée après les vols. Les données sont enregistrées et sauvegardées à l'issue de chaque vol.

Les données suivantes sont enregistrées :

- Numéro de ligne
- Temps GNSS
- Fiduice
- Facteurs de qualité (GDOP, etc)
- Latitude, longitude, altitude GNSS (WGS84)
- Hauteur radar
- Angles d'attitude (roulis, tangage, lacet)
- Composantes du champ magnétique (X, Y, Z) mesurées par le fluxgate
- Surface drapée théorique
- Surface de vol réelle
- Mesures du champ magnétique total pour le capteur Césium
- Mesures du champ compensées en temps réel
- Mesures spectrométriques (comptes, spectres, etc)

Les mesures de la station-sol et des coordonnées rectangulaires (UTM) sont intégrées lors des traitements préliminaires.

5.9 SYSTÈME D'ACQUISITION VIDÉO

Une caméra digitale Commander Recorder Video fabriquée par Rugged Video, utilisant une optique à vision grand angle HDX, était installée dans la base inférieure de l'emplanture du stinger. Les images sont synchronisées avec le système de positionnement GNSS. Le défilement sous l'hélicoptère est enregistré en continu au format mp4. Le positionnement et l'heure (temps universel, en heures, minutes et secondes après minuit) sont incrustés sur chaque image.

Spécifications	
CAMERA	HDX
Image Sensor	1/3" Panasonic CMOS
Pixels	1,956 x 1,266 2.48 Megapixel
Output Resolution	1080p30
Shutter Speed	AUTO 1/60 - 1/50,000

Tableau 15 : Spécifications du système vidéo

5.10 CALCULATEURS DE TERRAIN

Trois calculateurs Dell dédiés aux mesures de terrain ont servi à l'analyse de la qualité des données, au tracé de la navigation et des mesures brutes ainsi qu'à l'archivage immédiatement après les vols. Le contrôle de la qualité était fait quotidiennement et le rapport d'avancement et de production était mis à jour des dernières données. À l'issue des contrôles, les grilles préliminaires étaient recalculées puis un tracé était produit à l'échelle de la compilation afin de s'assurer de la qualité des données et du positionnement.

5.11 PIÈCES DE RECHANGE

Un jeu normal de pièces de rechange et d'instrumentation nécessaires au bon fonctionnement et à la vérification des appareils était disponible sur le terrain. Un jeu complet de pièces de rechange était disponible dans les locaux de Novatem, à Vesoul.

6 CONTRÔLES DE LA QUALITÉ DES DONNÉES

Pendant le levé, le contrôle de la qualité des données est effectué par le Chef des opérations sur le terrain. Les contrôles sur la qualité des données sont intégrés dans le processus normal d'acquisition et commencent dès l'établissement des plans de vol pour se terminer avec la livraison des produits finis au client.

Avant le levé, les contrôles servent à s'assurer notamment que :

- Les spécifications sont appropriées pour les cibles considérées
- Les spécifications sont sécuritaires pour le personnel et les équipements
- La navigation est sécuritaire compte tenu de la topographie et des conditions météorologiques locales
- Les équipements et les instruments sont conformes au cahier des charges (y compris pour les logiciels)
- Les pièces détachées et l'instrumentation sont en quantité suffisante pour réaliser le levé dans les délais attendus
- Les outils de maintenance et les pièces détachées de l'hélicoptère sont disponibles
- La maintenance des aéronefs sera faite dans des conditions sécuritaires et dans les meilleurs délais

En vol, les données sont analysées en temps réel. Le pilote est informé par des diodes lumineuses du bon fonctionnement des appareils afin qu'il puisse suspendre son vol et retourner à la base si nécessaire, où les modifications appropriées pourront être faites. La présence d'un opérateur/navigateur permet également de résoudre les éventuels soucis directement en vol et ainsi gagner du temps.

6.1 CONTRÔLE DES SPÉCIFICATIONS DE VOL

Après chaque vol, les données brutes sont inspectées afin de s'assurer d'une part de la qualité des données et d'autre part que toutes les données attendues sont présentes, puis sauvegardées sur un support indépendant et sécuritaire. Pour chaque vol, les traitements suivants sont réalisés sur le terrain :

- Reconstitution de la trajectoire de l'aéronef
- Contrôle de la trajectoire volée par rapport au plan théorique
- Détermination des lignes à revoler

Les contrôles sont ensuite effectués en priorité, pour s'assurer de :

- L'espacement entre les points de mesure (vitesse de l'hélicoptère)
- La déviation de part et d'autre des lignes de vol
- La déviation des lignes de vol en altitude
- La continuité des profils
- Le niveau de bruit des données

On s'assure en particulier que chaque ligne de vol recoupe proprement au moins deux lignes de contrôle et que les tronçons éventuels se rejoignent suivant un angle faible, sans discontinuité.

Toutes les données digitales synchronisées sont fusionnées dans un fichier au format Geosoft. Les profils sont ensuite édités pour s'assurer que toutes les données attendues sont présentes et que leur qualité est conforme à la demande. Les données sont finalement archivées, traitées, puis délivrées dans une base de données compatible avec les logiciels du client.

7 TRAITEMENTS DES DONNÉES

7.1 TRAITEMENT DES DONNÉES MAGNÉTIQUES

7.1.1 RÉSUMÉ DES TRAITEMENTS APPLIQUÉS AUX MESURES MAGNÉTIQUES

Les données mesurées en vol sont éditées quotidiennement puis archivées dans une base de données *Geosoft Oasis Montaj*. Les profils sont ensuite dessinés et contrôlés. Comme l'antenne GNSS (passive) est située à 8 cm du senseur magnétique, aucun décalage spatial n'a été appliqué aux coordonnées (voir annexe C). Les mesures magnétiques sont ensuite corrigées des perturbations dues à l'hélicoptère (compensation) à l'aide des informations vectorielles fournies par le Fluxgate et inertielles fournies par l'IMU. Les mesures compensées sont ensuite corrigées des variations du champ magnétique externe (variations diurnes principalement et pulsations) à l'aide des mesures de la station de base magnétométrique. L'erreur directionnelle intrinsèque de chaque magnétomètre (« heading error ») est estimée lors de la compensation et retranchée des mesures, et ce pour chaque direction de vol. Enfin, une procédure de nivellement est appliquée, d'abord sur les lignes de contrôle, puis sur les lignes régulières, afin d'éliminer les erreurs résiduelles engendrées principalement par les variations de hauteur de l'hélicoptère.

7.1.2 COMPENSATION

Un vol de calibration, obéissant à une géométrie précise et reproductible (FOM), a été réalisé par temps clair sans vent à très haute altitude, loin des perturbations magnétiques générées par la croûte terrestre (voir annexe D). Un ensemble de coefficients a été calculé par inversion, sur la base du modèle physique des perturbations magnétiques de l'hélicoptère (le modèle est une combinaison linéaire de 18 termes, construits à partir des cosinus des angles d'orientation et du champ terrestre et des variations de gradients inhérents au déplacement du capteur dans le champ terrestre). L'inversion est faite sur chaque direction. Un jeu de coefficients est finalement obtenu pour chaque direction. Ces coefficients sont ensuite utilisés pour reconstruire le champ des perturbations magnétiques de l'hélicoptère à partir des angles d'attitude fournis par la centrale inertielle et du magnétomètre Fluxgate. Les bruits magnétiques de l'hélicoptère (aimantation induite, permanente et courants de Foucault) sont ainsi mesurés et corrigés en temps réel.

Lors des essais à Albertville, on s'est assuré que la FOM de l'hélicoptère était bien autour de 1nT. Ce seuil est en effet la valeur habituellement observée pour ce type d'hélicoptère et pour les instruments utilisés. Tous les résultats sont présentés dans le *Rapport de calibration*.

7.1.3 CORRECTION DES VARIATIONS TEMPORELLES (VARIATIONS DIURNES)

Les données mesurées aux stations de base (1Hz) ont été éditées puis archivées dans un fichier ASCII, puis interpolées linéairement aux instants de l'acquisition en vol (10Hz). La stations de base étant fixe et loin de toutes variations parasites artificielles, les variations enregistrées sont supposées être un modèle représentant fidèlement les variations temporelles dues à l'activité solaire (variation diurne, pulsations, etc.).

Les données mesurées à l'observatoire de Clermont-Ferrand ont été utilisées comme référence. Ces données ont été récupérées afin d'évaluer la qualité de la station de base et assurer qu'aucune anomalie anthropique ne venait perturbées les mesures.

Le lieu d'implantation de la station de base et sa moyenne sont précisés au paragraphe 4.3.

Compte tenu du bruit local observé (ainsi qu'à l'observatoire de Clermont-Ferrand), une moyenne glissante de période équivalente à 60 secondes a été appliquée aux données brutes afin d'éliminer les pulsations de hautes fréquences et généralement de faible amplitude. La station de base utilisée étant à plusieurs dizaines de kilomètres du levé, ces pulsations sont par ailleurs légèrement déphasées et d'amplitude différente de celles mesurées par l'hélicoptère. Un tel filtre permet ainsi de limiter ce bruit qui pourrait dégrader la qualité des données mesurées en vol.

7.1.4 CORRECTION DU RETARD INSTRUMENTAL (LAG)

Des erreurs résiduelles de positionnement, principalement engendrées par le “retard de temps” (lag) entre l’instant où la position est mesurée et celle où elle est assignée au magnétomètre, peuvent engendrer un décalage systématique dans chacune des directions de vol. Les résultats des tests de « lag » conduits préalablement au levé montrent que cet écart reste généralement minime, presque toujours inférieur à une fitude, soit moins de 0,1 s (voir l’annexe C).

7.1.5 CORRECTION D’ALTITUDE

Les vols ayant été réalisés à hauteur constante (80m au-dessus du sol), les écarts aux points de croisement sont nécessairement plus importants et plus variables que si on avait utilisé une drappe lisse destinée à minimiser ces écarts. Ce choix résulte de la volonté de favoriser les mesures spectrométriques en volant le plus près possible du sol.

La figure suivante montre les statistiques sur les différences de hauteurs de vol aux intersections.

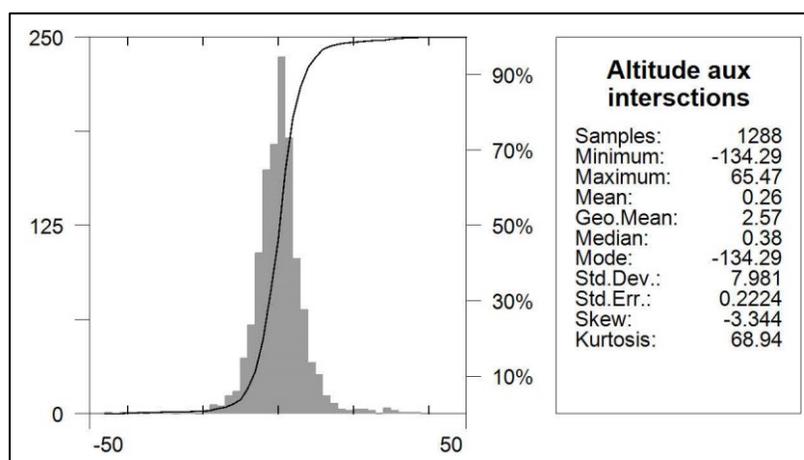


Figure 10 : Statistiques sur les différences de hauteur de vol aux intersections des traverses et des lignes de contrôles

Compte tenu de l’importance de ces écarts, découlant de la méthode de navigation choisie (destinée à favoriser les mesures spectrométriques), une procédure de prolongement par développement en série de Taylor a été appliquée sur les mesures magnétiques (après correction des variations temporelles). Dans la pratique, le développement est limité à l’ordre deux en raison de l’approximation utilisée pour le calcul des dérivées verticales à ce stade des traitements :

$$f(x,y,z_d) = f(x,y,z) + \frac{\partial f}{\partial z} * (z-z_d) + 0.5 * \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} * (z-z_d)^2$$

où z_d est l’altitude de la surface drapée (ici la surface topographique plus 80 m) et z l’altitude du point de mesure.

Les dérivées sont évaluées en chaque point du profil par différences finies dans un rayon égal à 3 fois l’espacement entre les profils.

7.1.6 NIVELLEMENT

Une procédure de nivellement des données corrigées des variations temporelles, basée sur les différences observées à l’intersection des traverses et des lignes de contrôle a été appliquée, d’abord sur les lignes de contrôle puis sur les lignes régulières. Les lignes régulières étant les plus nombreuses, elles offrent en effet un meilleur support statistique en première approche.

À chaque étape du nivellement, la table des intersections aux points de croisement est recalculée. Une vérification rigoureuse de la table est alors réalisée afin d'éliminer tout point d'intersection dont le gradient serait trop important, ce qui aurait pour conséquence d'altérer l'ensemble du profil.

La procédure précédente est ensuite répétée en rabattant les traverses sur les lignes de contrôle.

Le tableau suivant résume la méthode utilisée.

<i>Nivellement</i>	
Correction des lignes	Ordre des corrections
Lignes de contrôle	1 ^{er} degré
Traverses	1 ^{er} degré

Tableau 16 : Procédure de nivellement

7.1.7 MICRO-NIVELLEMENT

Compte tenu de la très forte anisotropie due à l'espacement entre les profils (400 ou 500 m, suivant le bloc), il n'a pas été appliqué de micro-nivellement.

7.1.8 CHAMP RÉSIDUEL (ANOMALIES)

Les anomalies du champ magnétique total ont été calculées en retranchant un modèle d'IGRF 2020 calculé à la hauteur SRTM plus 80m et pour la date médiane du levé, soit le 15 juin 2023.

7.1.9 CARTES TRANSFORMÉES

Toutes les cartes dérivées (Réduction au Pôle, Gradients, Tilt Derivative, Signal analytique) ont été calculées dans l'espace Fourier à l'aide du programme propriétaire LEMM de NOVATEM.

La réduction au pôle a ensuite été calculée sur les anomalies en utilisant respectivement la moyenne de l'inclinaison et la moyenne de la déclinaison fournies par le modèle IGRF-2020, soit :

Bloc	Inclinaison (degrés)	Déclinaison (degrés)
Clermont	61.0	1.9

Tableau 17 : Inclinaison et Déclinaison utilisées dans la Réduction au Pôle

La même direction d'aimantation a été utilisée pour le champ principal et pour le champ induit. Autrement dit, on a supposé que toutes les anomalies étaient le résultat d'une aimantation induite.

7.2 TRAITEMENT DES DONNÉES SPECTROMÉTRIQUES

7.2.1 RÉSUMÉ DES CORRECTIONS APPLIQUÉES AUX MESURES DE SPECTROMÉTRIE GAMMA

Le tableau suivant résume les corrections appliquées au cours du traitement des données de spectrométrie.

<i>Correction</i>	<i>Paramètre traité</i>	<i>Type de filtre</i>	<i>Effet</i>
Pré-filtrage	Rayonnement cosmique	Moyenne sur 15 points	Réduction du bruit statistique
Pré-filtrage	Température Pression	Moyenne sur 15 points	Lissage
Suppression du radon	Uranium Haut/Bas corrigé	Moyenne sur 300 points	Réduction du bruit statistique

Tableau 18 : Résumé des corrections appliquées aux données spectrométriques

7.2.2 FILTRAGE DES DIFFÉRENTES RÉGIONS D'INTÉRÊTS

La stabilité des spectres est vérifiée, et si nécessaire, un décalage du spectre peut être appliqué durant le post-traitement afin que les énergies des radionucléides soient cohérentes. Aucune sommation des spectres n'est appliquée aux données brutes, excepté pour la détermination des coefficients. D'autre part, aucun pré-filtrage a été effectué pour réduire le niveau de bruit des régions d'intérêts.

La méthode d'analyse en composante principale (NASVD), n'a pas été utilisée pour reconstituer les spectres (lissage). L'utilisation du logiciel **Praga** de **Geosoft** n'a pas permis de déterminer suffisamment de vecteurs propres pour reconstituer l'ensemble des données de façon rigoureuse.

7.2.3 CORRECTION DU TEMPS D'ACQUISITION PAR SECONDE

Comme les spectromètres ont besoin d'un temps fini pour traiter les comptes des détecteurs, le temps d'accumulation n'est donc pas, par conséquent, une seconde complète. Les spectromètres RS500 possèdent un système de traitement performant qui réduit le temps d'inactivité à 1 ms en moyenne. Néanmoins, le spectromètre enregistre de manière automatique ce temps d'activité, qui est utilisé pour augmenter et normaliser les comptes pour une seconde entière à l'aide de la formule suivante :

$$N_L = \frac{N_{FILT}}{L}$$

où :

N_L est la fenêtre corrigée du temps d'activité (cps)

N_{FILT} est la fenêtre reconstituée par filtrage (cps)

L est le temps d'activité du détecteur (sec)

7.2.4 CORRECTION DU RAYONNEMENT COSMIQUE ET DU BRUIT DE FOND DE L'HÉLICOPTÈRE

Les variations du rayonnement cosmique qui atteint la Terre, accroissent artificiellement les taux de comptes dans toutes les fenêtres spectrales. Les spectromètres utilisés enregistrent une fenêtre cosmique pour toute les particules incidentes de niveau d'énergie supérieur à 3 MeV; niveau à partir duquel il n'existe

pas de rayonnement gamma d'origine terrestre. Comme les comptes dus au rayonnement cosmique dans les différentes fenêtres dépendent linéairement du rayonnement cosmique, on peut donc utiliser l'approximation linéaire suivante pour la correction :

$$N_{ac} = N_L - (a_N + b_N C)$$

où :

N_{ac} est la fenêtre corrigée du cosmique et du bruit de fond de l'hélicoptère (cps)

N_L est la fenêtre corrigée du temps d'activité (cps)

C est la fenêtre de cosmique après sommation (cps)

a_N est le coefficient du bruit de fond de l'hélicoptère pour cette fenêtre

b_N est le coefficient du cosmique pour cette fenêtre

Notons que pour le détecteur orienté vers le haut, il est plus rigoureux d'utiliser les valeurs supérieures à 3 MeV pour ce même détecteur plutôt que les résultats de ceux vers bas, puisque chaque détecteur possède ses propres caractéristiques physiques.

7.2.5 SUPPRESSION DU RADON

Puisque la contamination par le radon est plus significative dans la fenêtre de l'uranium, en raison de la corrélation de leur niveau d'énergie, un détecteur orienté vers le haut est utilisé pour mesurer les variations dues au radon dans la fenêtre de l'uranium. On peut ainsi évaluer les variations de niveau de radon dans la fenêtre de l'uranium avec la formule suivante :

$$U_r = \frac{u_{ac} - a_1 U_{ac} - a_2 Th_{ac}}{a_u - a_1 - a_2 a_{Th}}$$

où :

U_r est la composante due au radon dans la fenêtre U orientée vers le bas (cps)

U_{ac} est la fenêtre U vers le bas, corrigée du cosmique et de l'hélicoptère (cps)

u_{ac} est la fenêtre U vers le haut, corrigée du cosmique et de l'hélicoptère (cps)

Th_{ac} est la fenêtre Th, corrigée du cosmique et de l'hélicoptère (cps)

a_u, a_{Th} sont les coefficients de normalisation haut/bas de l'uranium et du thorium

a_1, a_2 sont les coefficients de calibration des composantes observées au sol

La composante due au radon dans la fenêtre de l'uranium est ensuite filtrée sur une moyenne glissante de 300 fiduces afin de réduire le bruit statistique. La méthode employée est conforme aux recommandations du rapport #323 de l'IAEA.

La prochaine étape du traitement consiste à déterminer les composantes dues au radon dans les quatre autres fenêtres à l'aide des équations linéaires suivantes :

$$u_r = a_u U_r + b_u$$

$$K_r = a_k U_r + b_k$$

$$Th_r = a_{Th} U_r + b_{Th}$$

$$TC_r = a_{TC} U_r + b_{TC}$$

où :

u_r est la composante due au radon dans la fenêtre de l'uranium du détecteur vers le haut

TC_r, K_r, U_r and Th_r sont les composantes dues au radon dans les différentes fenêtres des détecteurs regardant vers le bas.

a, b sont les coefficients de linéarité

Finalement, les taux de comptes obtenus sont ensuite soustraits aux comptes des fenêtres des radionucléides respectives.

7.2.6 RÉDUCTION À PRESSION ET TEMPÉRATURE STANDARDS (STP)

L'altimètre radar est utilisé pour la correction de la hauteur. Comme les propriétés d'atténuation du rayonnement gamma dans l'air sont affectées par sa densité, la hauteur doit être corrigée de la température et de la pression ambiante :

$$h_{STP} = h_{obs} \times \frac{273.15}{T + 273.15} \times \frac{P}{1013.25}$$

où :

- h_{STP} est la hauteur équivalente à STP (mètres)
- h_{obs} est la hauteur mesurée par l'altimètre laser (mètres)
- T est la température de l'air (°C)
- P est la pression barométrique (mbar)

7.2.7 CORRECTION DE LA DIFFUSION COMPTON

La correction de la diffusion Compton consiste à supprimer les chevauchements de spectres après les corrections de bruit de fond. Les rapports d'enlèvement ou « stripping ratio » sont mesurés sur des blocs de calibration. Les résultats sont présentés dans le rapport de calibration. Ces valeurs correspondent au ratio des comptes d'un radionucléide détecté dans une autre fenêtre que celui-ci, pour des sources pures de K, U et Th.

Coefficients	F-GNEP
Alpha	0.327
Beta	0.481
Gamma	0.817
A	0.043
B	-0.001
G	-0.003

Tableau 19 : Correction de la diffusion Compton

En raison de la diffusion dans l'air, les rapports d'enlèvement augmentent avec l'altitude. Ils sont donc préalablement ramenés à une hauteur STP grâce à la relation linéaire suivante :

$$\alpha_{STP} = \alpha + h_{STP} \times 0.00049[\text{m}^{-1}]$$

$$\beta_{STP} = \beta + h_{STP} \times 0.00065[\text{m}^{-1}]$$

$$\gamma_{STP} = \gamma + h_{STP} \times 0.00069[\text{m}^{-1}]$$

où :

- α , β , γ sont de coefficients de diffusion Compton
- α_{STP} , β_{STP} , γ_{STP} sont les rapports d'enlèvement corrigés à une hauteur STP
- h_{STP} est la hauteur équivalente STP (mètres)

A l'aide des six rapports d'enlèvement, les taux de comptes corrigés du bruit de fond peuvent être corrigés de l'effet Compton à l'aide des formules suivantes :

$$K_{strip} = \frac{Th_{rc}(\alpha\gamma - \beta) + U_{rc}(\alpha\beta - \gamma) + K_{rc}(1 - \alpha\alpha)}{1 - g\gamma - a(\gamma - gb) - b(\beta - \alpha\gamma)}$$

$$U_{strip} = \frac{Th_{rc}(g\beta - \alpha) + U_{rc}(1 - b\beta) + K_{rc}(ba - g)}{1 - g\gamma - a(\gamma - gb) - b(\beta - \alpha\gamma)}$$

$$Th_{strip} = \frac{Th_{rc}(1 - g\gamma) + U_{rc}(b\gamma - a) + K_{rc}(ag - b)}{1 - g\gamma - a(\gamma - gb) - b(\beta - \alpha\gamma)}$$

7.2.8 CORRECTION DE L'ATTÉNUATION DE L'AIR

Les taux de comptes corrigés de l'effet Compton sont ensuite ramenés à la hauteur nominale du levé à l'aide de l'équation suivante:

$$N_{cor} = N_{strip} e^{\mu(H-h_{STP})}$$

où :

N_{cor} est les taux de comptes pour une fenêtre, corrigé de l'altitude (cps)

N_{strip} est les taux de comptes pour une fenêtre, corrigé de l'effet Compton (cps)

μ est le coefficient d'atténuation (mètres⁻¹)

h_{STP} est la hauteur équivalente STP (mètres)

H est la hauteur nominale du levé, utilisée comme niveau de référence (mètres)

7.2.9 CONVERSION EN CONCENTRATION DE RADIOÉLÉMENTS

L'étape finale consiste à convertir les taux de comptes corrigés de chaque fenêtre, en valeur de concentration de ce radioélément dans le sol, avec la formule :

$$eN = \frac{N_{cor}}{S}$$

où :

eN est la concentration en % pour K ou la concentration équivalente en ppm pour U, Th

N_{cor} est les taux de comptes pour une fenêtre corrigée de l'altitude (cps)

S est la sensibilité de la source pour la fenêtre spécifiée

Le taux naturel d'absorption de l'air est déterminé par le compte total.

7.2.10 MICRO-NIVELLEMENT

Un bruit directionnel résiduel causé par les erreurs dans l'estimation des différents coefficients de corrections, particulièrement dans le cas de l'uranium, a été observé. Dans le but de corriger ces erreurs, une procédure propriétaire de micro-nivellement adapté à la spectrométrie, a été appliquée sur les résultats finaux des quatre fenêtres traitées.

Filtre Buttworth		Filtre directionnel	
Seuil max.	Ordre du filtre	Direction	Ordre du filtre
1500 m	8	N0°	1

Tableau 20 : Paramètres du micro-nivellement des données spectrométriques

8 DONNÉES FINALES

8.1 PRODUITS FINAUX DÉLIVRÉS

Les produits finaux délivrés sont résumés dans le tableau suivant :

<i>Produit</i>	<i>Données</i>	<i>Format Projection</i>
Base de données du champ magnétique	Magnétiques	GDB Lambert France RGF93
Base de données spectrométriques	Spectrométriques	GDB Lambert France RGF93
Grilles et cartes au format jpeg	<ul style="list-style-type: none"> - Intensité du champ magnétique total - Anomalies - Réduction au Pôle des anomalies - 1^{ère} dérivée verticale (GV1) des anomalies - Signal Analytique - Tilt Derivative - Modèle Numérique de Terrain - Taux d'absorption naturel - Concentration équivalente en Uranium - Concentration équivalente en Thorium - Concentration en Potassium 	Oasis Montaj Lambert France RGF93
Rapport	Logistique, traitements et documentation des produits	pdf

Tableau 21 : Produits délivrés

8.2 BASE DE DONNÉES MAGNÉTIQUES

Les données ont été archivées dans le format Geosoft Oasis Montaj (fichier *.gdb). Les canaux dans ces fichiers sont les suivants :

	<i>Nom du champ</i>	<i>Description</i>	<i>Unité</i>
1	DATE	Date locale	AAAA/MM/JJ
2	AIRCRAFT	Immatriculation de l'avion	F-GNEP
3	FLIGHT	Numéro de vol	
4	LINE	Numéro complet de la ligne de vol	
5	TIME_SEC	Temps universel en secondes	s
6	TIME	Temps universel UTC	HH :MM :SS
7	X	Coordonnées X LAMBERT RGF93	m
8	Y	Coordonnées Y LAMBERT RGF93	m
9	MASK_MAX	Mask sur les déviations horizontales supérieures à 200m	1 ou 0
10	MASK_MIN	Mask sur les déviations horizontales supérieures à 50m	1 ou 0
11	X_MASK	Coordonnées X LAMBERT RGF93 avec masque	m
12	Y_MASK	Coordonnées Y LAMBERT RGF93 avec masque	m
13	LONGITUDE	Longitude GNSS WGS84	Degré décimal
14	LATITUDE	Latitude GNSS WGS84	Degré décimal
15	ALTITUDE	Altitude GNSS WGS84	m ASL
16	SPEED	Vitesse de vol	m/s
17	COG	Direction de vol (Course Over Ground)	Degré
18	GC	Hauteur sol	m
19	DEM	Modèle Numérique de Terrain (ALTITUDE – GC)	m
20	CLERMONT	Données de la station permanente de Clermont-Ferrand interpolées (0.1s)	nT
21	MB	Données de la station de base brut (1s)	nT
22	MB_FILT_15sec	Données de la station de base brut moyennées sur 15 sec	nT
23	MB_INT	Données de la station de base interpolée (0.1s)	nT
24	MB_FILT_2min	Données de la station de base moyennées sur 2 minutes	nT
25	COR_BASE	Correction diurne donnée par la base	nT
26	IGRF	IGRF calculé le 15 juin à une hauteur de 80m AGL	nT
27	INC	Inclinaison fournie par l'IGRF	Degré
28	DEC	Déclinaison fournie par l'IGRF	Degré
29	MAGR	Intensité du champ magnétique total brut	nT
30	MAGC	Intensité du champ magnétique total compensé	nT
31	MAGCL	MAGC corrigé du lag	nT
32	MAGCLB	MAGCL corrigé de la diurne (MB_FILT_2min)	nT
33	ANO	Anomalie (MACLB-IGRF)	nT
34	ANOT	ANO corrigé de la hauteur (série de Taylor)	nT
35	ANOTLEV	ANOT nivelée	nT
36	ANOMALIE	ANOTLEV micronivelé	1 ou 0
37	TMI	Intensité du champ magnétique total (ANOMALIE+IGRF)	nT
38	VG1	Première dérivée verticale des anomalies	nT/m
39	VG2	Deuxième dérivée verticale des anomalies	nT/m ²
40	Signal_Analytique	Signal Analytique	nT/m
41	Tilt_Derivative	Tilt Derivative (phase)	radian

Tableau 22 : Contenu de la base de données magnétiques

8.3 BASE DE DONNÉES SPECTROMÉTRIQUES

Comme les données magnétiques, les données ont été archivées dans le format Geosoft Oasis Montaj (fichier *.gdb). Les canaux dans ces fichiers sont les suivants :

	Nom	Description	Unité
1	DATE	Date locale	AAAA/MM/JJ
2	AIRCRAFT	Immatriculation de l'avion	F-GNEP
3	FLIGHT	Numéro de vol	
4	LINE	Numéro complet de la ligne de vol	
5	TIME_SEC	Temps universel en secondes	s
6	TIME	Temps universel UTC	HH :MM :SS
7	X	Coordonnées X LAMBERT RGF93	m
8	Y	Coordonnées Y LAMBERT RGF93	m
9	MASK_MAX	Mask sur les déviations horizontales supérieures à 200m	1 ou 0
10	MASK_MIN	Mask sur les déviations horizontales supérieures à 50m	1 ou 0
11	X_MASK	Coordonnées X LAMBERT RGF93 avec masque	m
12	Y_MASK	Coordonnées Y LAMBERT RGF93 avec masque	m
13	LONGITUDE	Longitude GNSS WGS84	Degré décimal
14	LATITUDE	Latitude GNSS WGS84	Degré décimal
15	ALTITUDE	Altitude GNSS WGS84	m ASL
16	SPEED	Vitesse de vol	m/s
17	COG	Direction de vol (Course Over Ground)	Degré
18	GC	Hauteur sol	m
19	TEMP	Température brut	degré Celsius
20	TEMPF	Température filtrée (15 fid)	degré Celsius
21	BARO	Pression brut	mBar
22	BAROF	Pression filtrée (15 fid)	mBar
23	STP	Hauteur aux conditions standard de température et de pression	m
24	DETDN	Nombre de détecteurs actifs vers le bas	
25	DETUP	Nombre de détecteurs actifs vers le haut	
26	LIVEDN	Temps de vie des détecteurs vers le bas	ms
27	LIVEUP	Temps de vie des détecteurs vers le haut	ms
28	RCCD	Compte cosmique brut vers le bas	cps
29	RCCU	Compte cosmique brut vers le haut	cps
30	RTOT	Compte total brut	cps
31	RKAL	Compte Potassium brut	cps
32	RURD	Compte Uranium brut vers le bas	cps
33	RURU	Compte Uranium vers le haut	cps
34	RTHO	Compte Thorium brut	cps
35	TOT_CPS	Compte total corrigé	cps
36	KAL_CPS	Compte Potassium corrigé	cps
37	URD_CPS	Compte Uranium corrigé	cps
38	THO_CPS	Compte Thorium corrigé	cps
39	TOT_nGy/h	Compte total du taux d'absorption	nGy/h
40	TOTML_nGy/h	Compte total du taux d'absorption micronivélé	nGy/h
41	DOSE_nGy/h	Taux d'absorption calculé en fonction des éléments	nGy/h
42	DOSEML_nGy/h	Taux d'absorption calculé en fonction des éléments	nGy/h
43	KAL_PCTS	Concentration de Potassium	%
44	KALML_PCTS	Concentration de Potassium micronivélée	%
45	URD_PPM	Concentration équivalente d'Uranium	ppm
46	URDML_PPM	Concentration équivalente d'Uranium micronivélée	ppm
47	THO_PPM	Concentration équivalente de Thorium	ppm
48	THOML_PPM	Concentration équivalente de Thorium micronivélée	ppm

Tableau 23 : Contenu de la base de données spectrométriques

9 RÉFÉRENCES DU PROJET

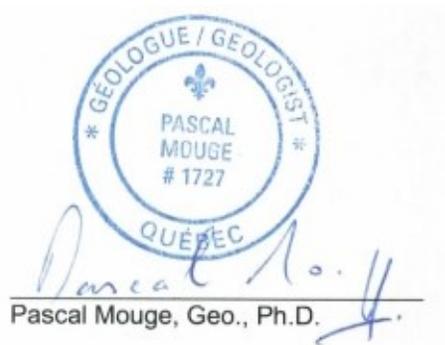
<i>Références Client</i>	
Projet	<i>HADGR211022</i>
Adresse	Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) <i>3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans, Cedex 02</i>
Chef de projet	Guillaume Martelet
Courriel	<i>g.martelet@brgm.fr</i>
Téléphone	<i>+33 (0)2 38 64 47 32</i>
<i>Références Novatem</i>	
Contrat	<i>C22172 (S220106)</i>
Adresse	<i>1087 Chemin de la Montagne Mont-Saint-Hilaire, Québec, Canada, J3G 4S6</i>
Chef de projet	Pascal Mouge
Courriel	<i>mouge@novatem.com</i>
Téléphone	<i>+1 514 966 8000 / +1 450 467 04 24</i>
<i>Références Projet</i>	
Localisation	Centre du Massif Central (France)
Méthode	<i>Levé hélicopté magnétique et spectrométrie</i>
Période du levé	<i>Du 5 au 30 juin 2023</i>
Date de livraison des données	<i>août 2023</i>
Date de livraison du rapport	<i>août 2023</i>
Gestionnaire du projet et responsable de la qualité des données	- <i>Pascal Mouge, Ph.D., Géo. numéro 1727</i>
Responsable du traitement des données	- <i>Olivier Savignet, Ing.</i>
Responsable des équipements	- <i>Morten Skovgaard, M.Sc.</i>
Responsable de l'acquisition sur le terrain	- <i>Valentin Mulliez, M.Sc.</i>
Commandants et AME	- <i>Régis TEISSONIERE, Commandant</i> - <i>Thibaut MONNET, Commandant</i> - <i>Antoine ROSSI, AME</i>

10 ATTESTATION DE QUALIFICATION

Ce rapport a été rédigé par Pascal Mouge, Ph.D. membre de l'Ordre des Géologues du Québec, Président de la compagnie Novatem Inc, assisté d'Olivier Savignet, Ingénieur, membre de l'Ordre des Ingénieurs du Québec, et de Valentin Mulliez, M.Sc.

Je soussigné Pascal Mouge, certifie que :

- Je suis membre en règle de l'Ordre des Géologues du Québec
- Je suis titulaire d'un doctorat en géophysique, délivré par l'Institut de Physique du Globe de Paris
- Je travaille dans le domaine de la géophysique depuis 1985
- Je suis présentement Président de la compagnie Novatem
- J'ai supervisé et contribué activement au travail décrit dans ce rapport et déclare qu'il a été réalisé selon les règles et pratiques de l'industrie
- Les données livrées sont exactes et n'ont subi aucun traitement autre que les traitements décrits au présent rapport



Pascal Mouge, Geo., Ph.D.

Pascal Mouge, Ph.D., Géo. numéro 1727

ANNEXES

ANNEXE A : PARAMÈTRES GÉODÉSQUES UTILISÉS DANS LES PROJECTIONS

Le tableau ci-dessous résume les paramètres géodésiques utilisés pour la projection plane. Ces paramètres ont été appliqués pour toutes les transformations de coordonnées.

Projection	RGF93 Lambert
Type	Lambert Conique Conforme
Latitude origine	46.5
Longitude origine	3
Latitude du premier parallèle standard	49
Latitude du second parallèle standard	44
Coordonnées de l'origine des abscisses	700 000
Coordonnées de l'origine des ordonnées	6 600 000
Ellipsoïde	GRS 1980
Rayon du grand axe	6 378 137
Inverse de l'aplatissement	298.25772
Méridien de référence	0
Datum local	RGF93 France (1m)

Tableau 24 : Paramètres géodésiques utilisés dans les projections planes

ANNEXE B : PARAMÈTRES DES GRILLES

Les tableaux qui suivent précisent paramètres des grilles :

Type des valeurs	FLOAT
Séparation entre deux points le long de l'axe X, en m:	100
Séparation entre deux points le long de l'axe Y, en m:	100
Nombre de points le long de l'axe X :	683
Nombre de points le long de l'axe Y:	1 115
Origine de la grille (min X, min Y):	X = 654 100 Y= 6 410 700
Système de coordonnées planes	Lambert France RGF93
Azimut des colonnes:	0

Tableau 25 : Paramètres des grilles pour le bloc Clermont

ANNEXE C : TEST DU RETARD INSTRUMENTAL

Date :	2023.05.11
Emplacement :	Pont de Grésy, Savoie, FR
Aéronef :	AS-350 B3 / F-GZSH
Instrument :	Magnétomètres embarqués G-822, 10 Hz
Température :	N/A
Pression :	N/A
Hauteur :	80 m AGL

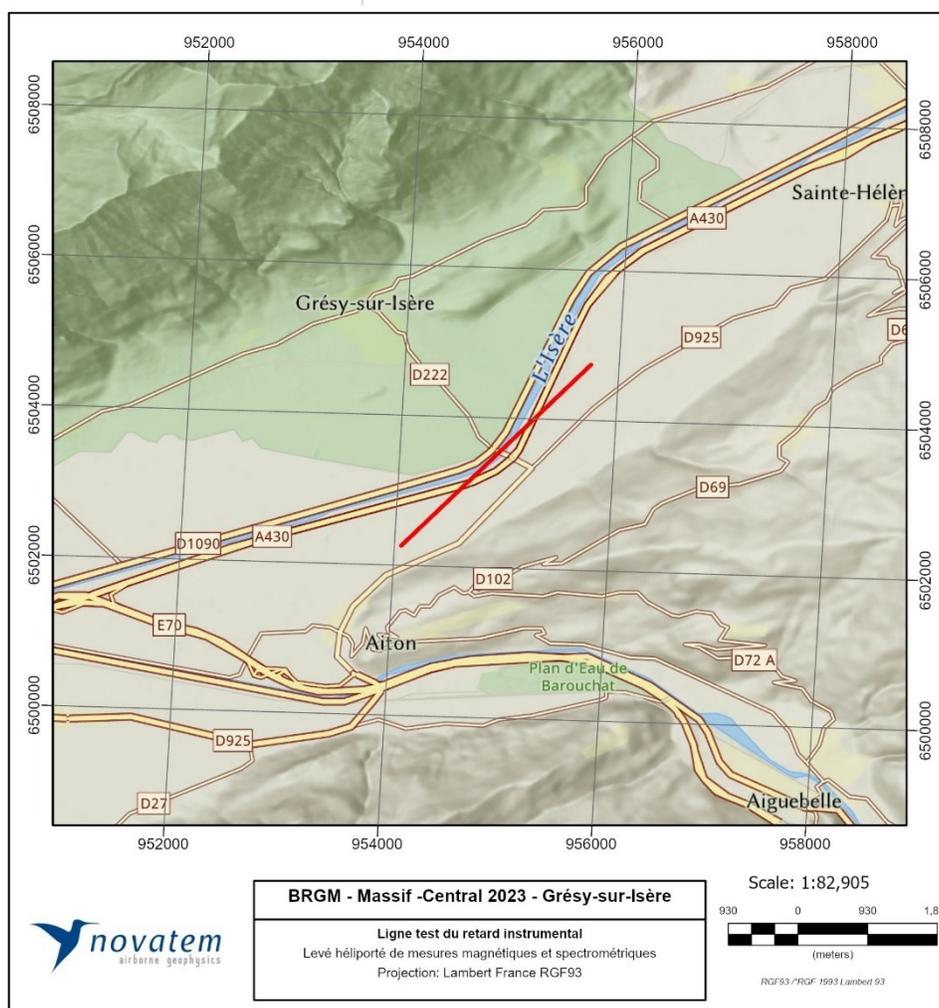


Figure 11 : Localisation du test du retard instrumental

Le test du retard instrumental a pour but de mesurer la différence de temps résultant de la distance entre le capteur magnétique et l'antenne GNSS d'une part et du retard dû à l'électronique d'acquisition d'autre part. Dans la figuration utilisée, l'antenne (passive) était placée dans la bulle du stinger, soit à 8 cm du capteur magnétique. Ce retard est donc a priori négligeable.

Le test consiste à voler une anomalie de très forte intensité dans deux directions opposées. Ce test a été répété à 3 reprises.

Les résultats suivants montrent que le décalage temporel dans les enregistrements des données est de 0.1012 secondes (1.012 fitude), c'est-à-dire d'environ 3.0 m à la vitesse du levé.

Tableau 26 : Test de Parallaxe

Ligne	Cap (°)	Altitude (m)	Temps (hhmmss)	X (m)	Y (m)	Vitesse (m/s)	Mag (nT)
L1:0	217,62	412,67	15:39:27,4	954922,5	6503524,6	30,14	47479,64
L2:0	34,8	409,12	15:41:39,3	954919,9	6503529,1	29,85	47498,76

Vitesse moyenne = 29,995 m/s
 Distance = 5,204 m
Décalage = 0,173 sec

Ligne	Cap (°)	Altitude (m)	Temps (hhmmss)	X (m)	Y (m)	Vitesse (m/s)	Mag (nT)
L3:0	216,59	410,43	15:43:53,1	954915,8	6503523,8	29,89	47476,94
L4:0	37,51	410,12	15:46:03,6	954920	6503533,1	30,08	47496,98

Vitesse moyenne = 29,985 m/s
 Distance = 10,153 m
Décalage = 0,339 sec

Ligne	Cap (°)	Altitude (m)	Temps (hhmmss)	X (m)	Y (m)	Vitesse (m/s)	Mag (nT)
L5:0	216,97	410,29	48:16,0	954917,7	6503523,8	30,98	47477,01
L6:0	35,3	411,68	50:25,4	954915,3	6503525,4	28,97	47495,16

Vitesse moyenne = 29,975 m/s
 Distance = 2,851 m
Décalage = 0,095 sec

ANNEXE D : COMPENSATION - FIGURE DE MÉRITE (FOM)

Date :	2023.06.28
Emplacement :	Au Nord de Brioude, Haute-Loire
Aéronef :	AS-350 B3E : F-GNEP
Instruments :	Magnétomètres scalaires embarqués G-822, 10 Hz Magnétomètre vectoriel Billingsley, 20 Hz Centrale d'attitude Microstrain, 100 Hz
Température :	N/A
Pression :	N/A
Hauteur :	3 000 m

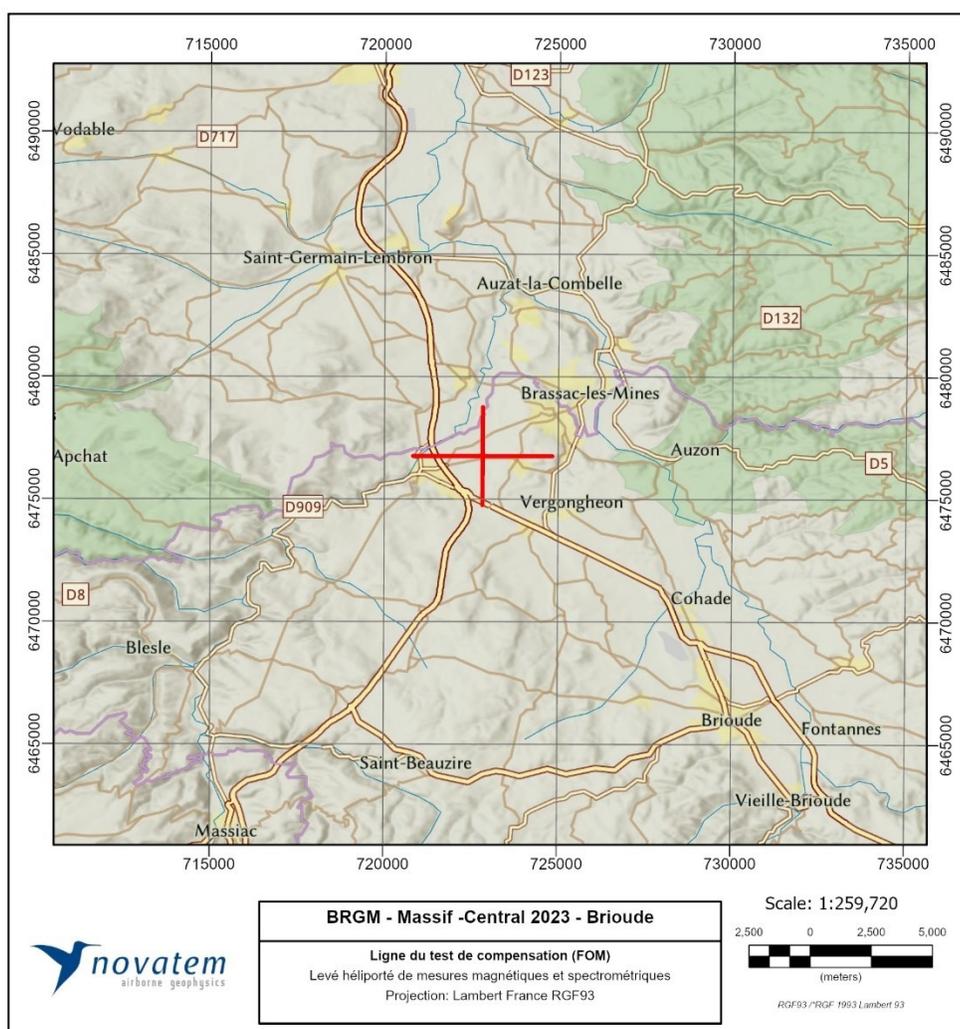


Figure 12 : Localisation du test de compensation

Un vol de calibration, obéissant à une géométrie précise et reproductible (FOM), a été réalisé par temps clair sans vent à très haute altitude, le plus loin possible des perturbations magnétiques générées par la croûte terrestre. Comme le levé se fait suivant les directions cardinales Nord-Sud et Est-Ouest, les directions N0, N180, N90 et N270 ont été volées.

Un ensemble de coefficients a été calculé par inversion, sur la base du modèle physique des perturbations magnétiques de l'hélicoptère (le modèle est une combinaison linéaire de 18 termes, construits à partir des cosinus directeurs des angles d'orientation et du champ terrestre). L'inversion est faite sur chaque direction. Un jeu de coefficients est donc obtenu pour chaque direction. Ces coefficients sont ensuite utilisés pour reconstruire le champ des perturbations magnétiques de l'hélicoptère à partir des angles d'attitude fournis par la centrale inertielle et le magnétomètre Fluxgate.

Les bruits magnétiques de l'hélicoptère (aimantation induite, permanente et courants de Foucault) sont mesurés en temps réel. Une compensation après vols utilisant les meilleurs paramètres des variations d'attitudes, mesurés par la centrale inertielle et le magnétomètre Fluxgate, est faite lors des traitements finaux.

La compensation utilise un filtre passe-bande afin de ne travailler que sur les variations dues aux perturbations de l'hélicoptère. Le filtre utilisé doit éliminer le champ terrestre, qui est presque constant, et conserver le champ du porteur, qui est variable. Afin de réduire au maximum les variations temporelles parasites du champ, il est également utile de filtrer les plus hautes fréquences dont les variations sont trop hautes pour correspondre aux perturbations de l'hélicoptère. Le filtre retenu est donc un filtre passe-bande. Ses fréquences de coupure basse et haute dépendent des périodes d'oscillation imprimées à l'hélicoptère lors de la phase de calibration. Typiquement, on conservera la bande entre 0,05 Hz et 0,9 Hz lorsqu'on mesurera 20 échantillons par seconde (entre 0,1 et 0,9 Hz quand on mesure 10 échantillons par seconde). Ainsi les variations du signal filtré seront uniquement dues aux perturbations de l'hélicoptère.

Il est important de noter que lors du calcul des termes du modèle, on ne filtre pas le champ terrestre car les champs induits et les courants de Foucault dépendent de la valeur continue de ce champ.

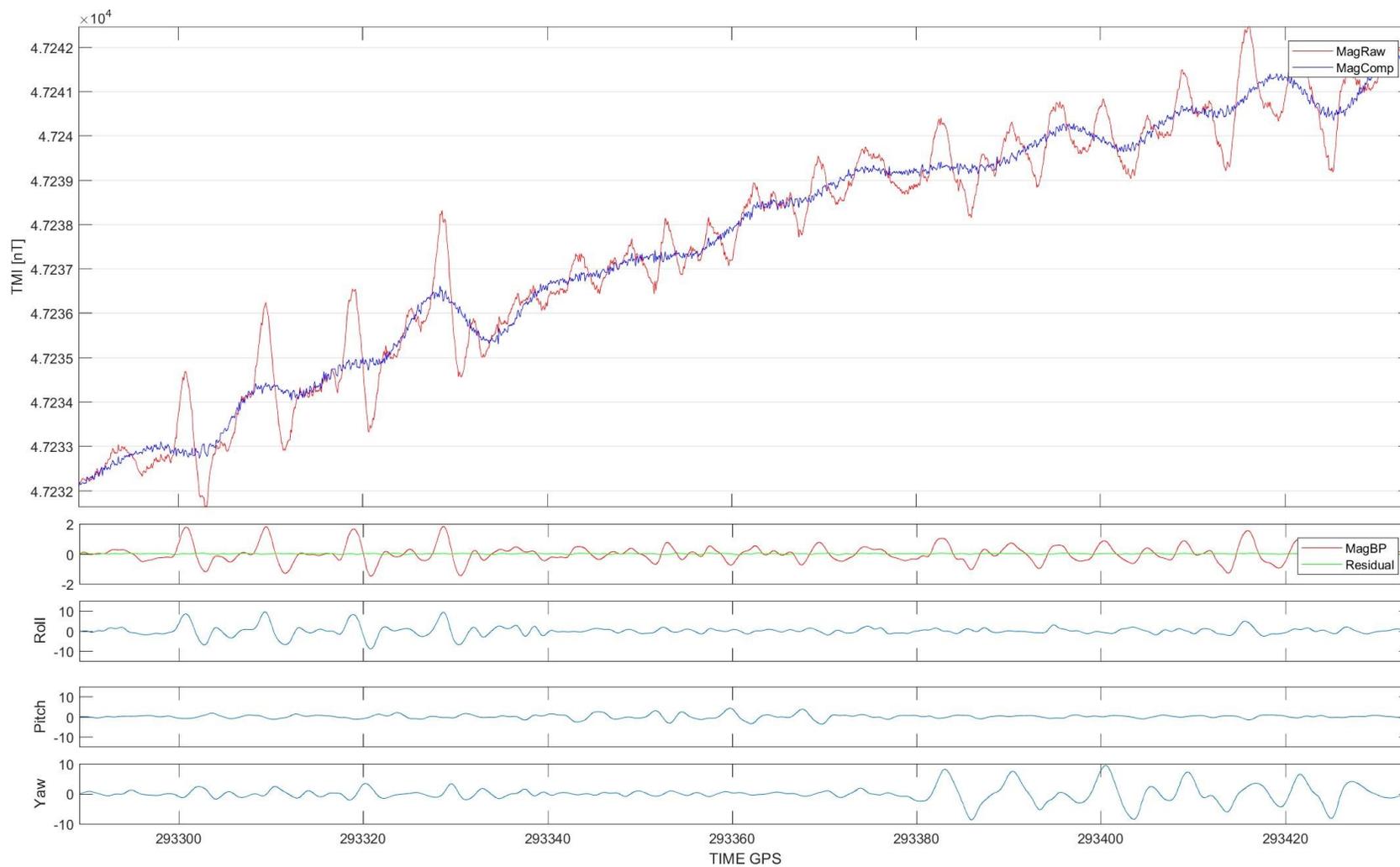
Le filtre implémenté dans le système de compensation développé par Novatem est un filtre digital sans déphasage ("zero-phase digital Infinite Impulse Response"). Afin de ne pas introduire de retard de phase, le filtre est implémenté dans les deux directions.

Les résultats de la FOM sont résumés dans le tableau suivant (intensité maximum pic à pic pour chaque mouvement de l'hélicoptère).

	0°N	90°N	180°N	270°N	Somme
Roulis	0.10	0.06	0.08	0.11	0.35
Tangage	0.11	0.12	0.15	0.16	0.54
Lacet	0.15	0.10	0.12	0.11	0.48
Somme	0.36	0.28	0.35	0.38	1.37

Tableau 27 : Résultats de la FOM

Figure 13 : Profils N 0°



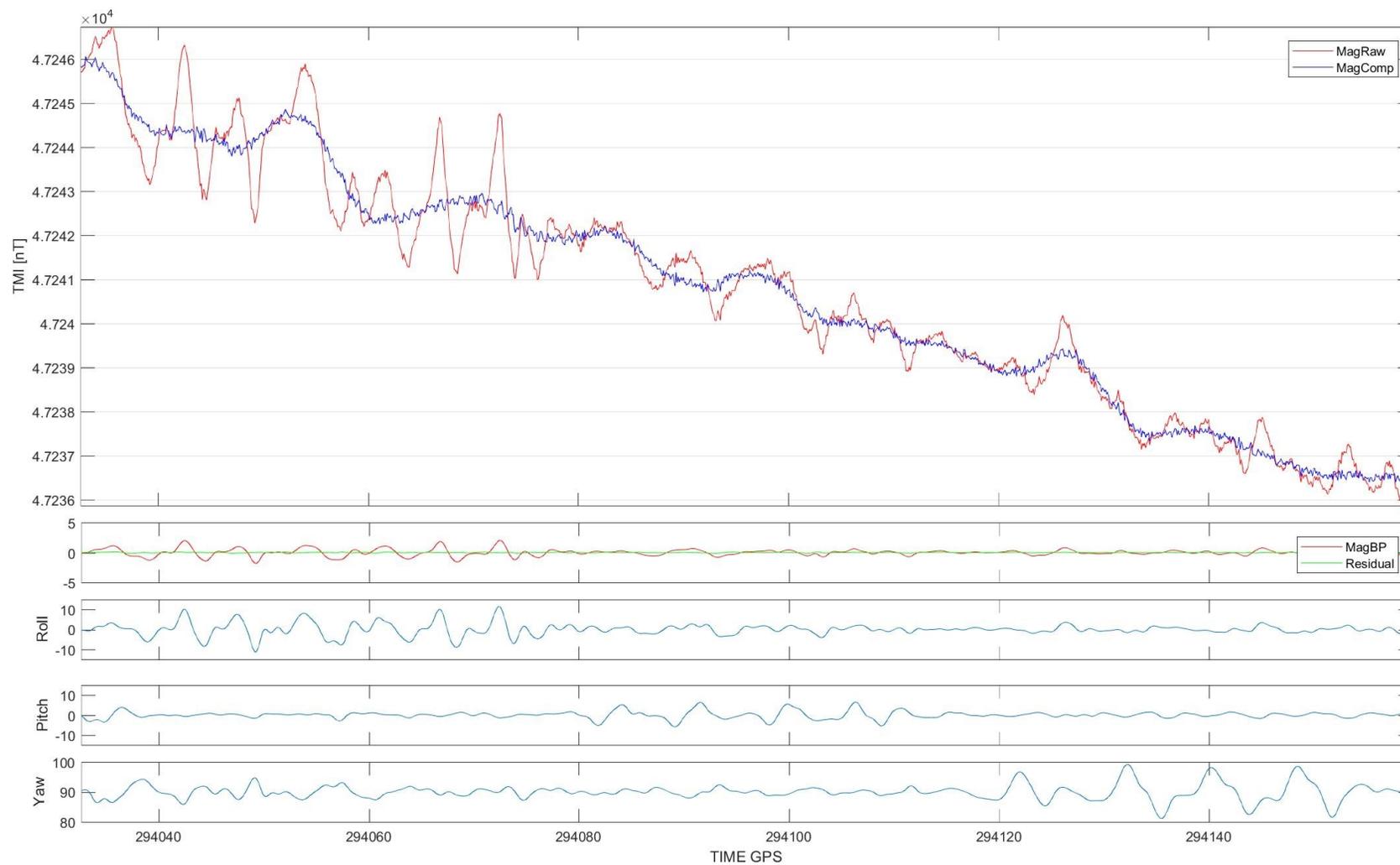
— MagR
Données brutes (Raw data);

— MagC
Données compensées

— MagBP
Champ généré par l'hélicoptère

— Residual
Résidu après compensation

Figure 14 : Profils N 90°



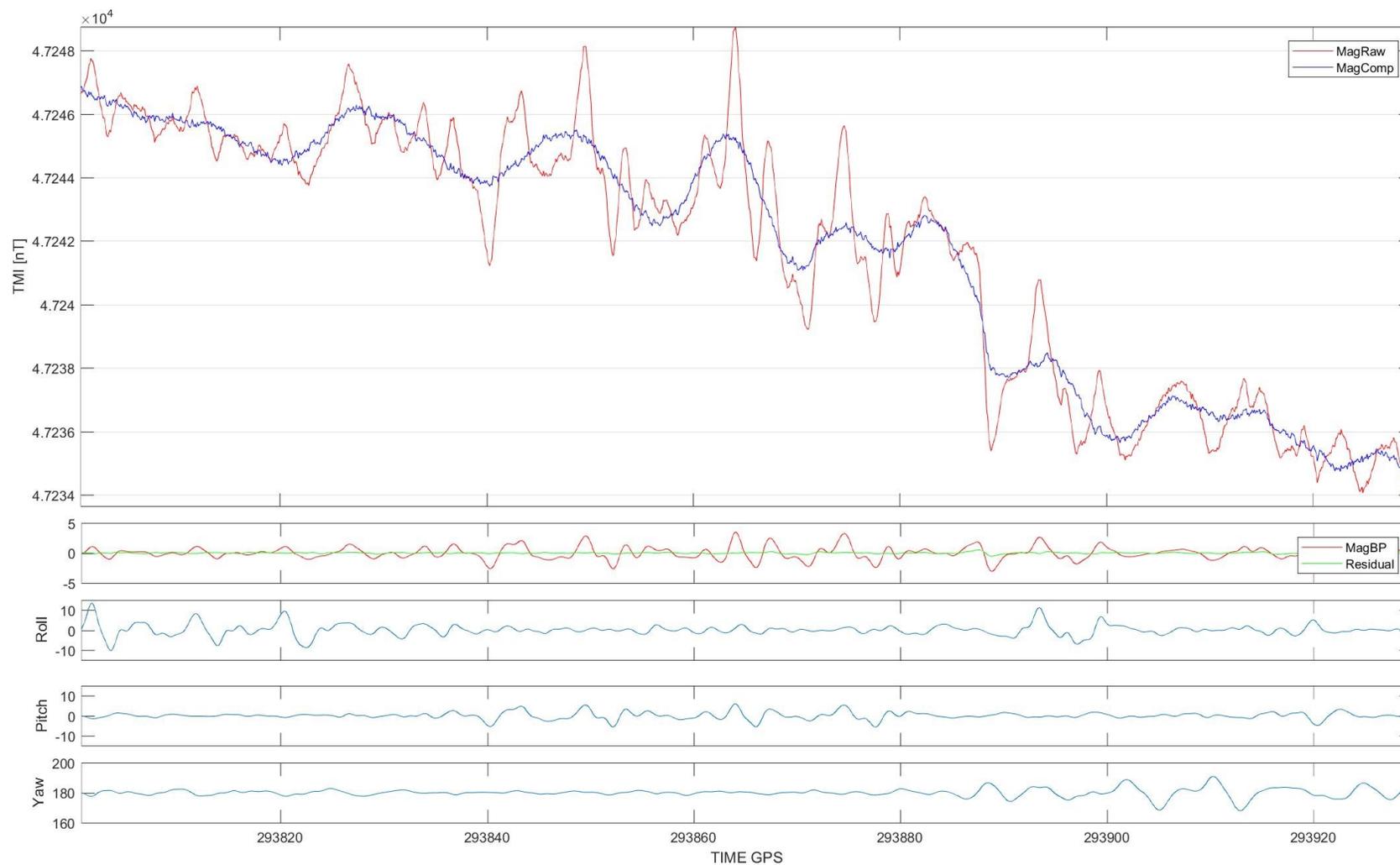
— MagR
Données brutes (Raw data);

— MagC
Données compensées

— MagBP
Champ généré par l'hélicoptère

— Residual
Résidu après compensation

Figure 15 : Profils N 180°



— MagR
Données brutes (Raw data);

— MagC
Données compensées

— MagBP
Champ généré par l'hélicoptère

— Residual
Résidu après compensation

Figure 16 : Profils N 270°



— MagR
Données brutes (Raw data);

— MagC
Données compensées

— MagBP
Champ généré par l'hélicoptère

— Residual
Résidu après compensation

TESTS DE CALIBRATIONS SPECTROMÉTRIQUES

ANNEXE E : LIGNE TEST DES CALIBRATIONS SPECTROMÉTRIQUES

La ligne test est survolée au début et à la fin de chaque journée de vol afin de vérifier la sensibilité du système, la stabilité des spectromètres, et contrôler l'effet de l'humidité du sol dans la région (variation de la concentration de thorium de moins de 10% entre les journées de vol successives).

Les contrôles radiométriques suivants sont effectués régulièrement pour assurer la constance des spectres :

- Stabilisation meilleure que ± 25 keV mesurée sur le pic ^{208}Tl de 2,62 MeV
- FWHM mieux que 200 keV mesuré sur le pic ^{208}Tl de 2,62 MeV
- Vérification de chaque profil (et spectres) pour repérer des pics, des sauts ou des interruptions dans les lectures
- Le calcul statistique des spectres moyens pour chaque ligne afin d'assurer la stabilité des pics du potassium et du thorium (dérive inférieure à 4 canaux sur le pic du thorium)
- Corrections préliminaires et des grilles pour évaluer la cohérence des données.

Les tableaux suivants présentent les résultats obtenus en fonction des variations des comptes de thorium au sol.

Ligne test

Date :	2023.06.05 – 2023.06.30
Emplacement :	Cournon-d'Auvergne / Hauteur moyenne = 79 m
Aéronef :	AS-350 B3e : F-GNEP
Instruments :	Deux spectromètres RSI RSX500 33.44L down, 8.36L up, 1 Hz
Température :	N/A
Pression :	N/A
Hauteur :	80 m AGL

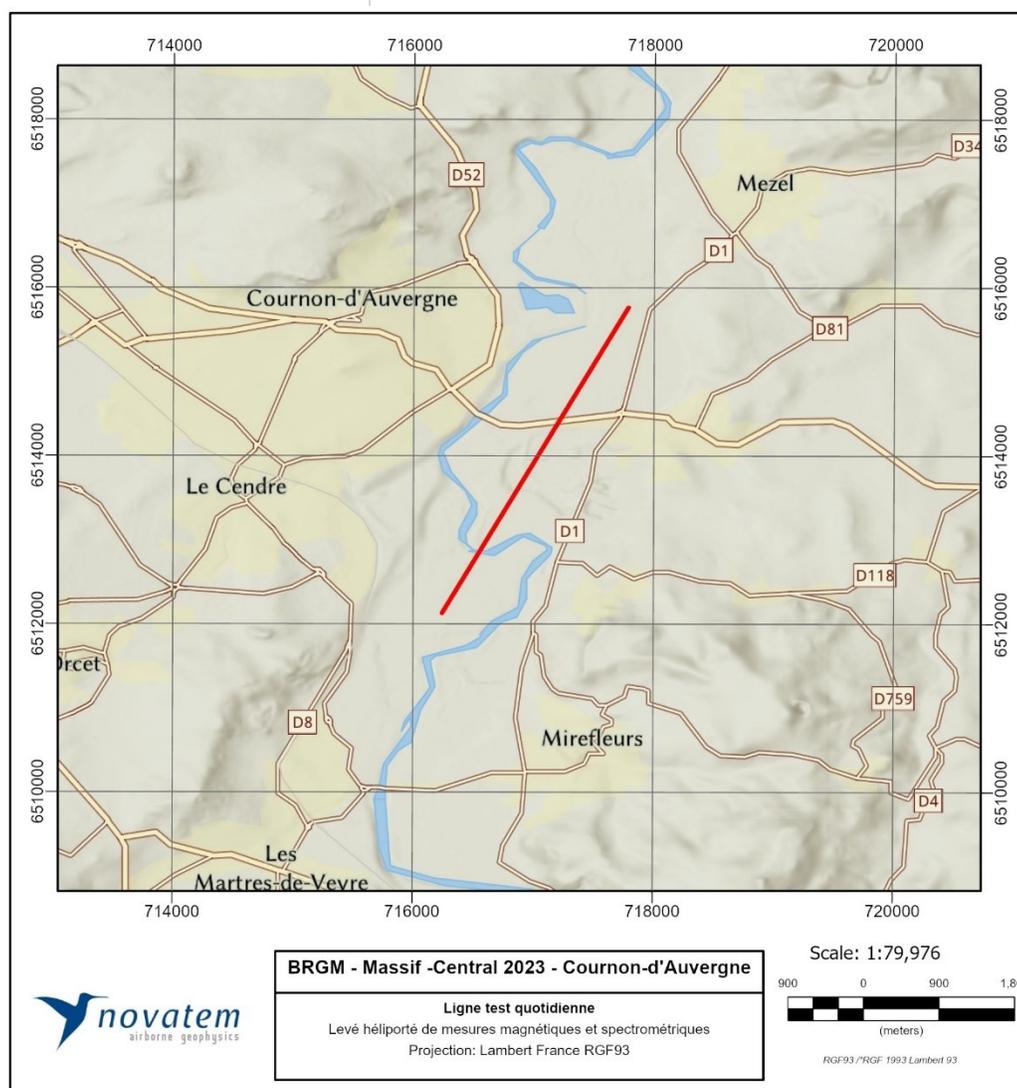


Figure 17 : Localisation de la ligne test

Ligne	Hauteur radar m	Thorium cps	%
L23060515:0	81,82	67,65	0,70%
L23060607:0	80,90	66,37	-1,21%
L23060615:0	79,35	66,71	-0,70%
L23060707:0	79,25	65,51	-2,49%
L23060715:0	79,25	69,63	3,65%
L23060806:0	78,81	68,01	1,24%
L23060815:0	79,60	68,99	2,69%
L23060906:0	79,78	67,89	1,06%
L23061110:0	79,63	64,14	-4,52%
L23061206:0	79,96	66,94	-0,36%
L23061406:0	79,50	65,11	-3,08%
L23061417:0	79,23	70,36	4,73%
L23061513:0	78,92	69,10	2,86%
L23061519:0	80,14	70,14	4,41%
L23061609:0	79,14	68,86	2,50%
L23062507:0	80,13	65,03	-3,20%
L23062516:0	79,98	66,37	-1,21%
L23062606:0	78,79	63,86	-4,94%
L23062616:0	78,24	68,23	1,56%
L23062707:0	77,67	68,00	1,22%
L23062716:0	79,75	67,84	0,98%
L23062807:0	79,00	64,81	-3,53%
L23062815:0	78,54	67,40	0,33%
L23062906:0	78,18	66,85	-0,49%
L23063014:0	80,11	66,08	-1,64%
L23063018:0	79,45	66,79	-0,58%
ALL	79,43	67,18	0,00%

Tableau 28 : Variation des comptes du Thorium sur la ligne test

ANNEXE F : COEFFICIENTS D'ATTÉNUATION ET SENSIBILITÉ DU SYSTÈME DE MESURES

Date :	2023.06.29
Emplacement :	Lac de Naussac, Lozère
Aéronef :	AS-350 B3e : F-GNEP
Instruments :	Deux spectromètres, RSI RSX500, 33.44L down, 8.36L up, 1 Hz Spectromètre portatif pour les mesures au sol
Température :	N/A
Pression :	N/A
Hauteur :	50 - 170 m AGL

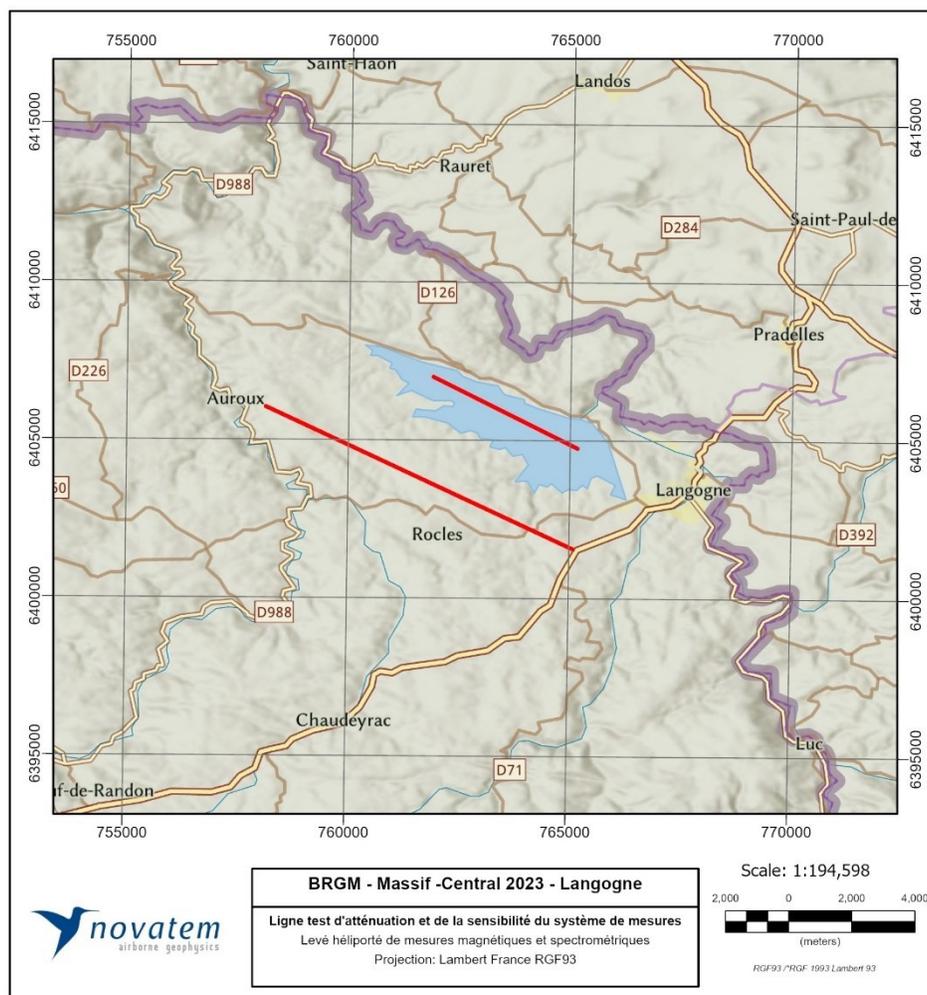


Figure 18 : Localisation de la ligne test

Les coefficients d'atténuation et la sensibilité du système spectrométrique sont estimés en volant deux lignes respectivement au-dessus de l'eau puis au-dessus du sol. Pour une hauteur donnée, l'avion vole d'abord la ligne au-dessus de l'eau puis celle au-dessus du sol, puis monte à l'altitude suivante. Les mesures spectrométriques ont été volées à des hauteurs au-dessus du sol de 50, 70, 90, 110, 130, 150 et 170 mètres AGL.

Après les corrections du temps mort, les taux de compte moyens des quatre fenêtres sont corrigés des radiations cosmiques, du radon atmosphérique et du bruit de fond de l'hélicoptère en soustrayant les valeurs voisines mesurées au-dessus de l'eau. Les taux de comptes corrigés de l'effet Compton, pour chaque hauteur de vol STP, sont ensuite modélisés par une fonction exponentielle afin de déterminer les coefficients d'atténuation par rapport à la hauteur. Les figures suivantes montrent les courbes d'atténuation obtenues pour les quatre fenêtres à partir des tests conduits sur le site.

Dans le même temps (ie pendant le vol de la ligne test par l'avion), des mesures spectrométriques au sol ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre du BRGM. La sensibilité est calculée pour chaque fenêtre à partir de la concentration en radioéléments ramenée ensuite à une hauteur de 80 m, soit la hauteur de vol nominale sur la zone du levé. Tous les résultats sont regroupés dans les tableaux suivants.

	Total Count	Potassium	Uranium	Thorium
ATTENUATION	-0.007289 /m	-0.009122 /m	-0.007867 /m	-0.007180 /m
CONCENTRATION AU SOL	74.48 nGy/h	1.82 %	3.30 ppm	5.65 ppm
SENSITIVITY	31.2 cps/(nGy/h)	113.19 cps/%	18.70 cps/ppm	4.56 cps/ppm

Tableau 29 : Coefficients d'atténuation et sensibilité à 80m

Hauteur sol (m)	Hauteur stp (m)	Total Count	Potassium	Uranium	Thorium
87.43	69.26	2539.16	230.78	27.28	70.70
107.27	84.71	2227.58	196.36	22.21	62.61
127.95	100.86	1976.56	169.22	20.11	55.75
148.25	116.56	1782.71	147.15	19.10	50.08
167.66	131.41	1593.14	127.98	16.67	45.69
187.41	146.55	1430.41	112.01	15.04	39.85
208	162.76	1274.87	98.19	12.05	36.06

Tableau 30 : Comptes corrigés du bruit de fond et de l'effet Compton

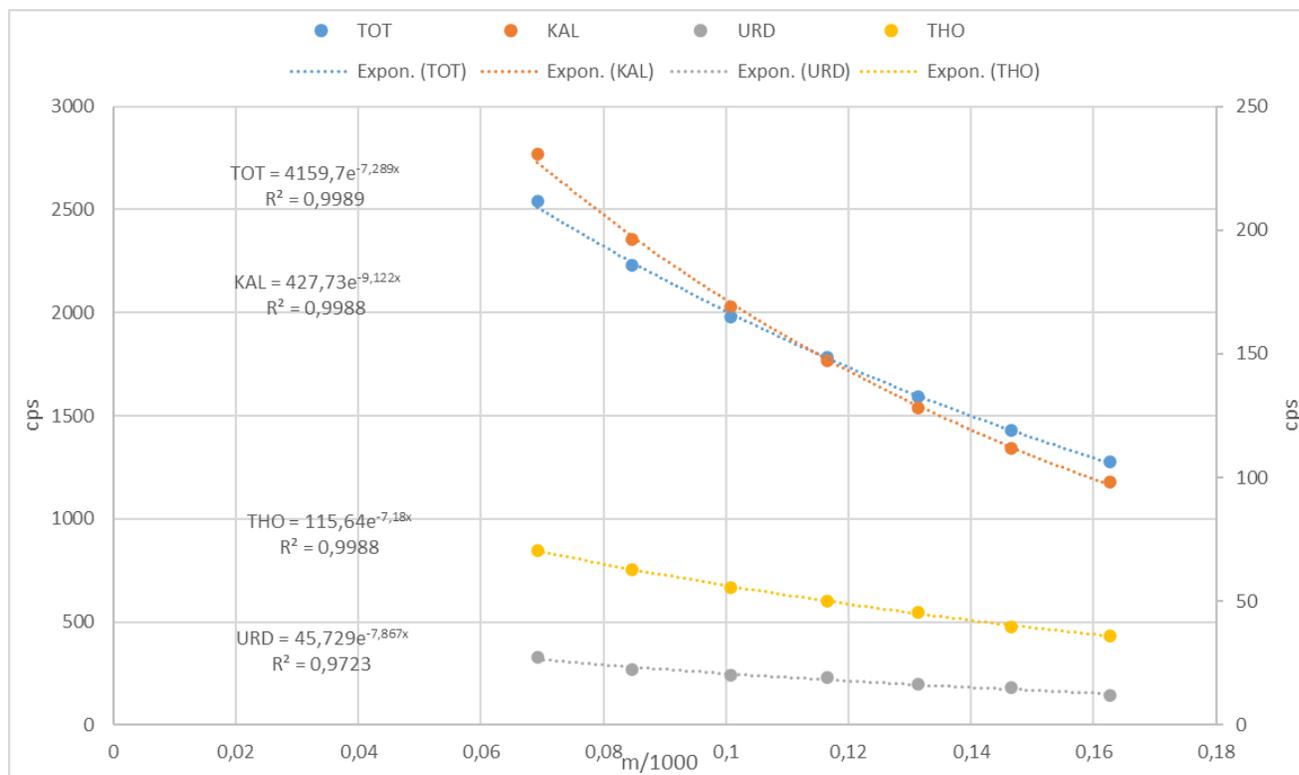


Figure 19 : Atténuation exponentielle avec la hauteur pour les quatre fenêtres

ANNEXE G : COEFFICIENTS DE DÉPOUILLEMENT COMPTON



RADIATION SOLUTIONS INC

CALIBRATION SHEET

Instrument: **RSX-5**

Customer: NovaTem
 Contact: Morten Skovgaard
 Console : N/A
 Detector 1: 5629
 Detector 2: N/A

Date: March 4, 2022
 Tech.: RA
 Job Order: RMA# 12015
 Customer PO: PO#

Channels: 1024 ADC Offset: N/A

	A1	A2	A3	A4	A5
High Voltages	679	723	645	708	775

Stripping Constant	"this system"	"normal"
Alpha	0.278	0.250
Beta	0.412	0.400
Gamma	0.768	0.810
a	0.046	0.060
b	-0.001	0.000
g	-0.001	0.003

ROI#	Channel	IAEA Specification [keV]	Label
1	137-937	410-2810	Total Count
2	457-523	1370-1570	Potassium K
3	553-620	1660-1860	Uranium U
4	803-937	2410-2810	Thorium Th
5			
6			
7			
8	553-620	1660-1860	Uranium Upper U

Det#	Peak Cs	Cs FWHM	Peak Th	Th FWHM
A1	219.45	7.69	872.21	4.31
A2	218.75	8.76	871.77	4.94
A3	220.24	7.86	872.31	4.59
A4	219.37	8.04	871.89	4.57
Sum Dn	219.47	8.08	872.23	4.57
Sum Up	219.42	9.25	871.80	5.20



RADIATION SOLUTIONS INC

CALIBRATION SHEET

Instrument: **RSX-5**

Customer: NOVATEM
Contact: Morten Skovgaard
Console: N/A
Detector 1: 5630
Detector 2: N/A

Date: March 4, 2022
Tech.: JG
Job Order: RMA# 12015
Customer PO: N/A

Channels: 1024 **ADC Offset:** N/A

	A1	A2	A3	A4	A5
High Voltages	661	636	612	622	625

Stripping Constant	"this system"	"normal"
Alpha	0.375	0.250
Beta	0.549	0.400
Gamma	0.866	0.810
a	0.039	0.060
b	-0.001	0.000
g	-0.004	0.003

ROI#	Channel	IAEA Specification [keV]	Label
1	137-937	410-2810	Total Count
2	457-523	1370-1570	Potassium K
3	553-620	1660-1860	Uranium U
4	803-937	2410-2810	Thorium Th
5			
6			
7			
8	553-620	1660-1860	Uranium Upper U

Det#	Peak Cs	Cs FWHM	Peak Th	Th FWHM
A1	221.56	7.96	873.48	4.88
A2	221.31	7.50	871.93	4.36
A3	220.31	7.65	871.99	4.33
A4	221.13	7.30	871.72	4.06
Sum Dn	221.07	7.60	872.28	4.40
Sum Up	220.87	8.06	872.27	4.09

ANNEXE H : ÉTALONNAGE DE LA FENÊTRE COSMIQUE ET BRUIT DE L'HÉLICOPTÈRE

Date :	2023.06.28
Emplacement :	Au Nord de Brioude, Haute-Loire
Aéronef :	AS-350 B3e : F-GNEP
Instruments :	Deux spectromètres, RSI RSX500, 33.44L down, 8.36L up, 1 Hz
Température :	N/A
Pression :	N/A
Hauteur :	2500 m - 4000 m ASL

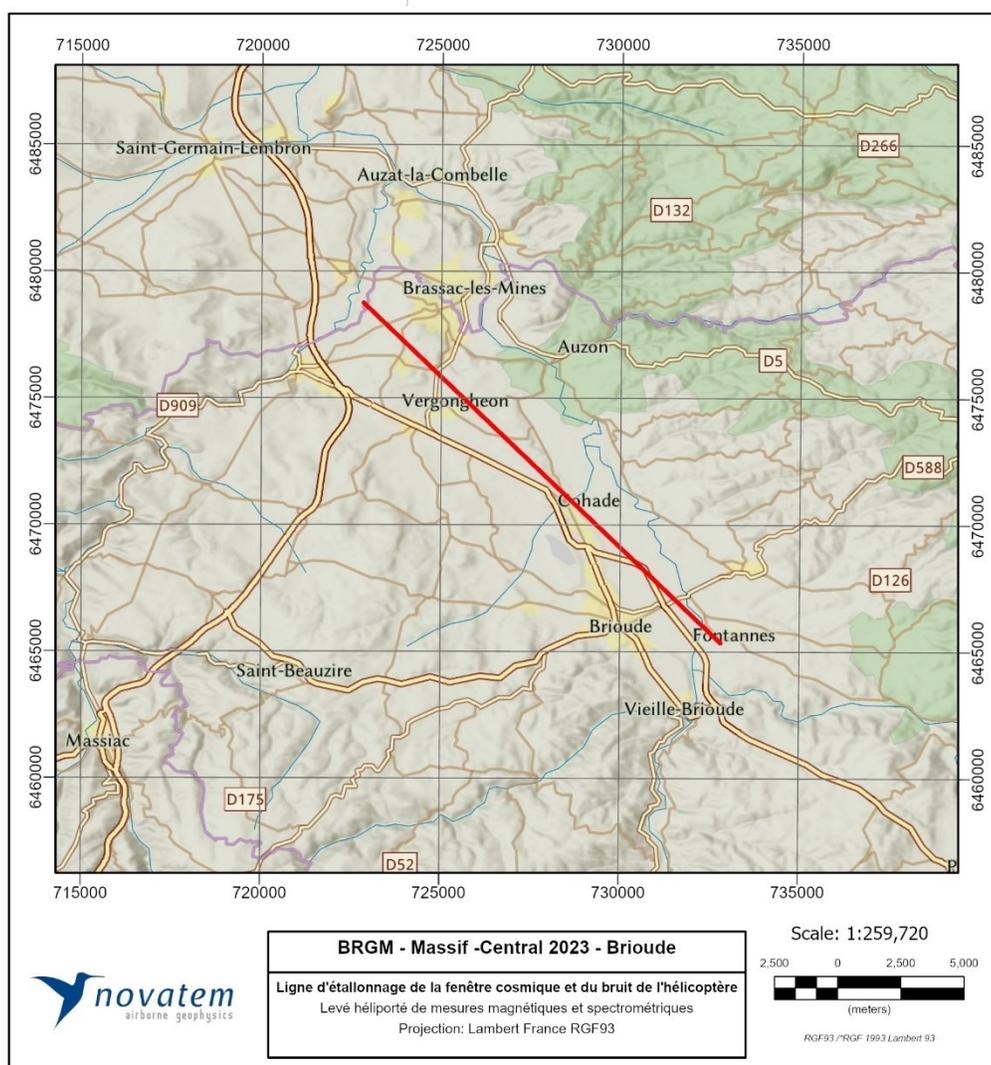


Figure 20 : Localisation de la ligne d'étalonnage

Pour déterminer le bruit de fond associé à l'hélicoptère ainsi que celui d'origine cosmique, les spectromètres utilisés enregistrent toutes les particules incidentes au-dessus de 3MeV dans la fenêtre du cosmique. Des paliers ont été volés à 4 hauteurs équidistantes, de 2500 m à 4000 m. L'hélicoptère a volé à chaque hauteur pendant environ 5 minutes sur chaque palier afin de minimiser les erreurs statistiques.

Il a été démontré l'année passée (2022) lors de ce même test, qu'en-dessous de 2000 m une contamination des concentrations au sol était observée. Il avait donc été choisi de ne prendre en compte que les 4 paliers les plus haut. À la suite de cela, il a été choisi cette année (2023) de ne voler que les 4 paliers supérieurs pour obtenir le bruit de fond cosmique et celui de l'aéronef.

Altitude (m)	Cosmic Dn	Cosmic Up	Total Count	Potassium	Uranium	Thorium	Up Uranium
2499.59	343,24	91,19	489,43	37,54	20,70	21,90	5,56
2999.85	430,66	114,91	592,26	43,96	25,52	27,93	6,91
3499.72	546,57	144,46	727,02	51,67	31,86	35,28	8,37
3999.31	689,00	182,87	895,92	61,00	39,98	45,03	10,35

Tableau 31 : Taux de compte moyen sur les paliers cosmiques

Background	Total Count	Potassium	Uranium	Thorium	Up Uranium
Aircraft	86.072	14.598	1.5213	-0.9039	0.8801
Cosmic	1.1746	0.0684	0.0557	0.0666	0.0519

Tableau 32 : Coefficients du bruit de fond

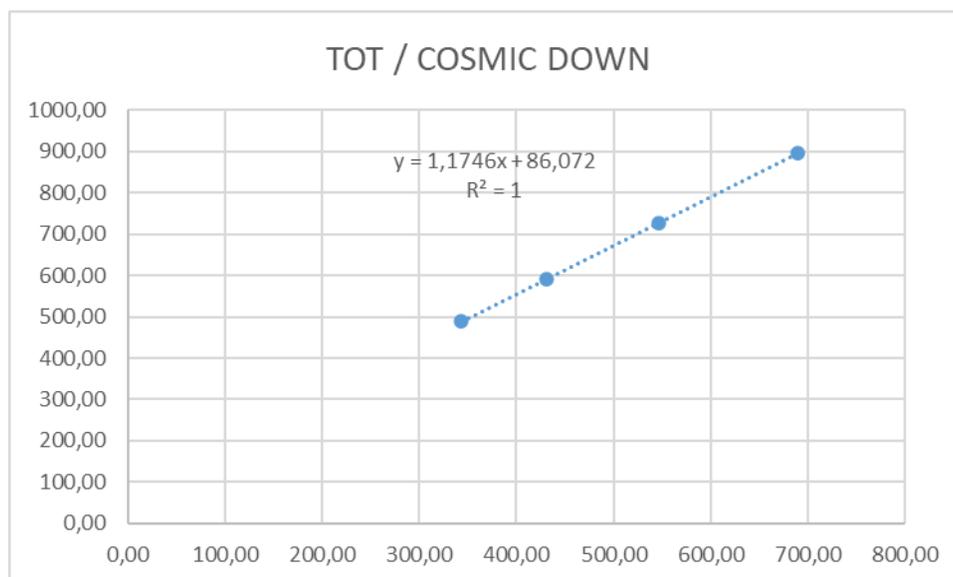


Figure 21 : Coefficients cosmiques pour le compte total

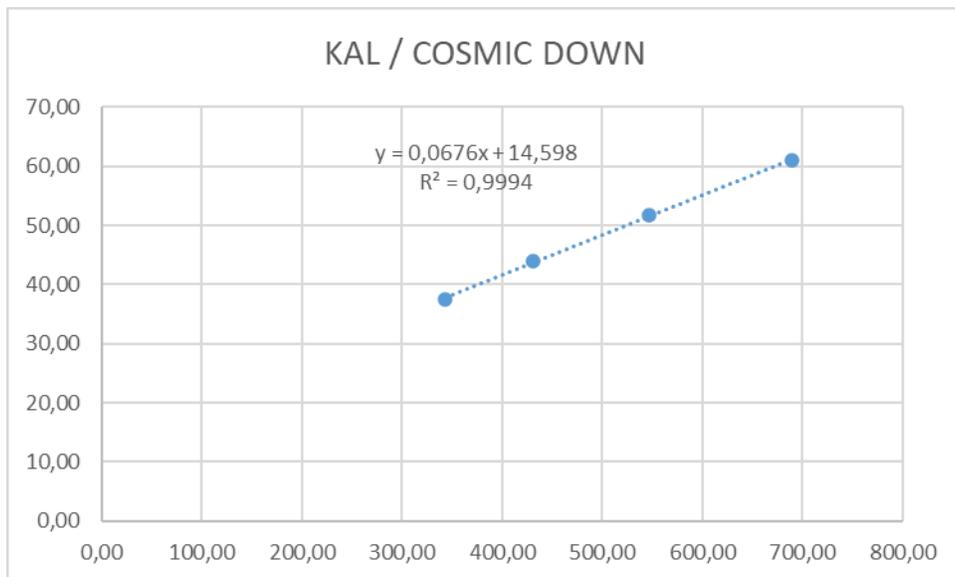


Figure 22 : Coefficients cosmiques pour le potassium

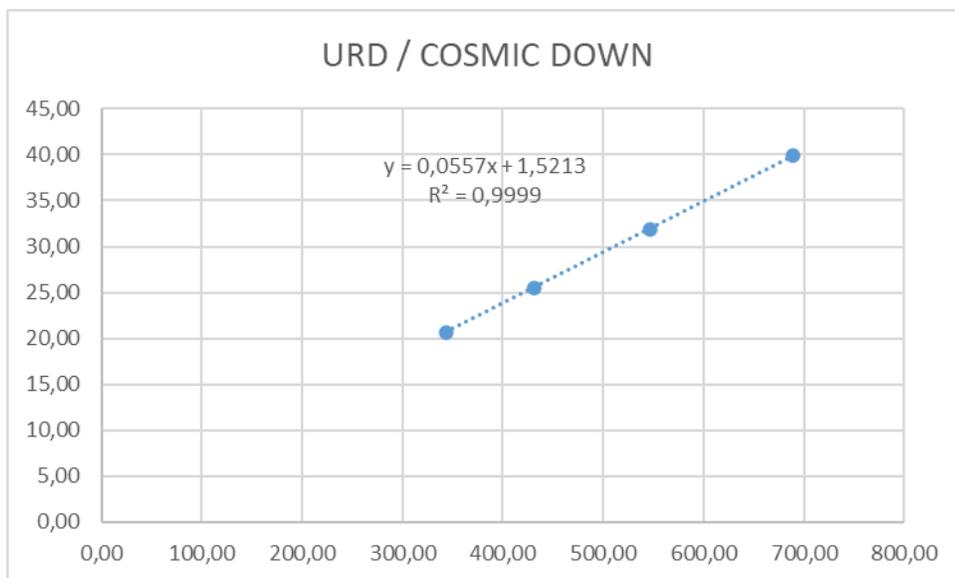


Figure 23 : Coefficients cosmiques pour l'uranium

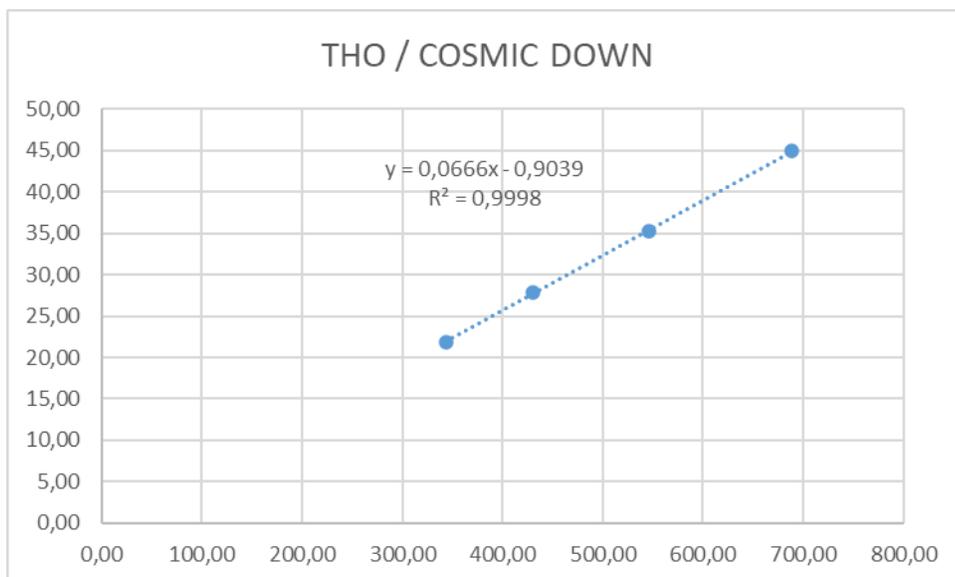


Figure 24 : Coefficients cosmiques pour le thorium

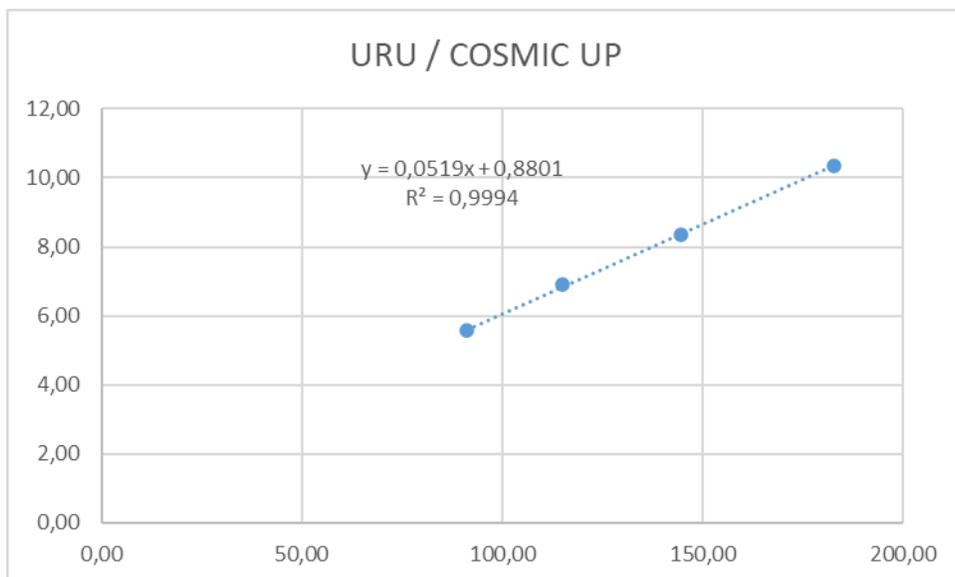


Figure 25 : Coefficients cosmiques pour l'uranium vers le haut

ANNEXE I : COEFFICIENTS DE LA CORRECTION DU RADON

Date :	2023.06.05 – 2023.06.30
Emplacement :	Cournon-d'Auvergne, FR
Aéronef :	AS-350 B3e : F-GNEP
Instruments :	Spectromètres, RSI RSX500, 33.44L down, 8.36L up, 1 Hz
Température :	N/A
Pression :	N/A
Hauteur :	80 m AGL

Afin de déterminer la relation entre les taux de compte du détecteur vers le haut et vers le bas pour le radon atmosphérique, nous avons utilisé les données recueillies sur les lignes test volées quotidiennement. Nous avons donc retiré la moyenne des comptes dans chaque fenêtre d'intérêt et sur toute la durée du levé. Les variations résiduelles dans chaque fenêtre d'une ligne test à l'autre ne sont ainsi dues qu'aux variations du radon atmosphérique, les composantes du bruit de fond de l'hélicoptère et celle du bruit cosmique ayant été retirées. Une régression linéaire de ces résultats permet de déterminer avec précision les coefficients nécessaires à la correction du radon sur le levé. Les résultats sont présentés dans les graphiques des pages suivantes.

La composante du taux de compte du détecteur regardant vers le haut et provenant du sol, U_g , dépendra de la concentration de U et Th dans le sol, de même que les composantes des taux de compte des fenêtres regardant vers le bas U et Th, U_g et Th_g , qui proviennent du sol. Afin de minimiser les erreurs statistiques, les trois composantes ont été calculées en soustrayant des sections de lignes adjacentes. Enfin, à partir de la série des valeurs calculées de U_g , U_g et Th_g , les coefficients de calibration, a_1 et a_2 , sont déterminés selon la méthode des moindres carrés décrite dans la série de rapports techniques n° 323 de l'AIEA.

Coefficient	GZSH
a_1	0.045
a_2	0.025

Tableau 33 : Coefficients de calibration des composantes observées au sol

Remarque : La méthode employée s'est révélée meilleure que celle consistant à utiliser les mesures du rayonnement gamma au-dessus d'un plan d'eau proche comme il est parfois recommandé (en raison du rayonnement des rives).

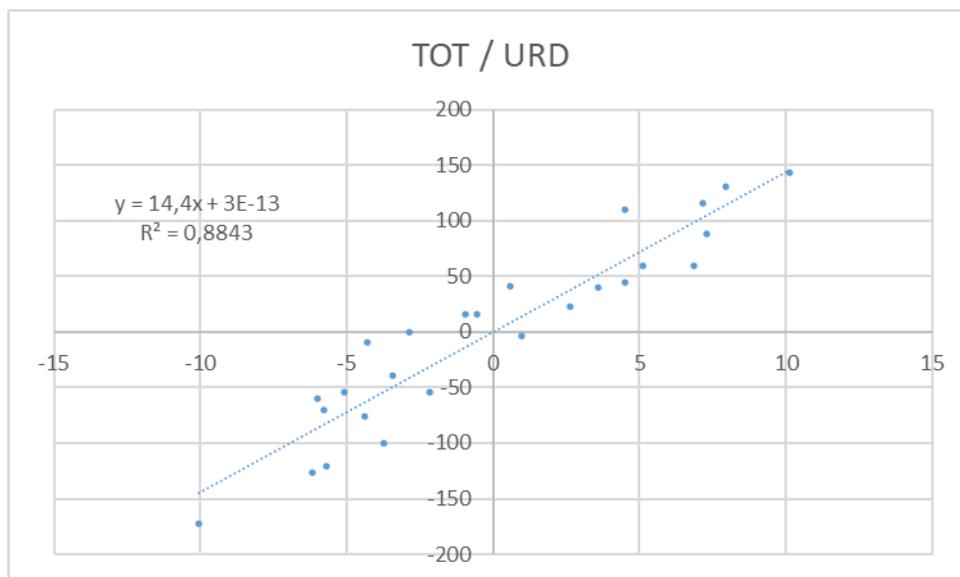


Figure 26 : Coefficients de correction du radon pour le compte total

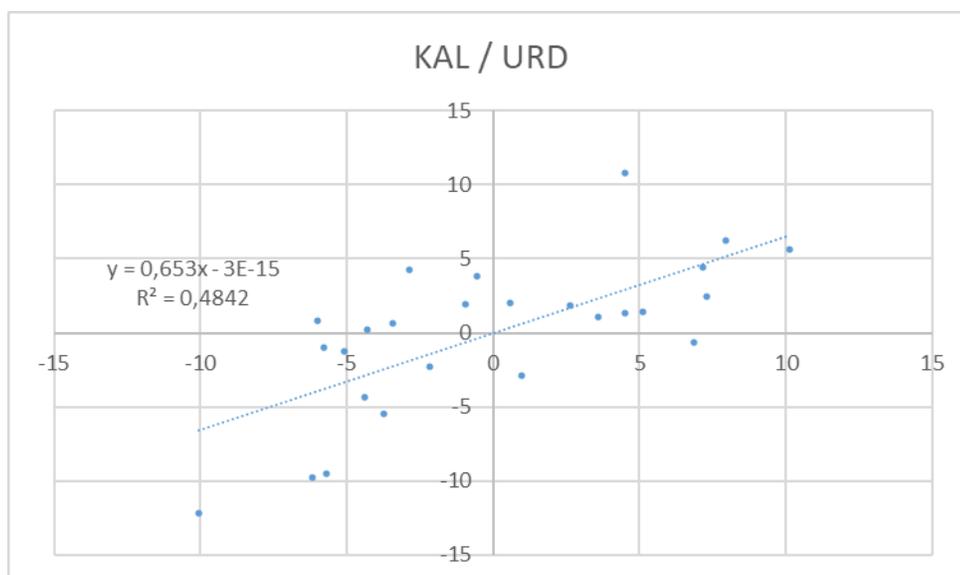


Figure 27 : Coefficients de correction du radon pour le potassium

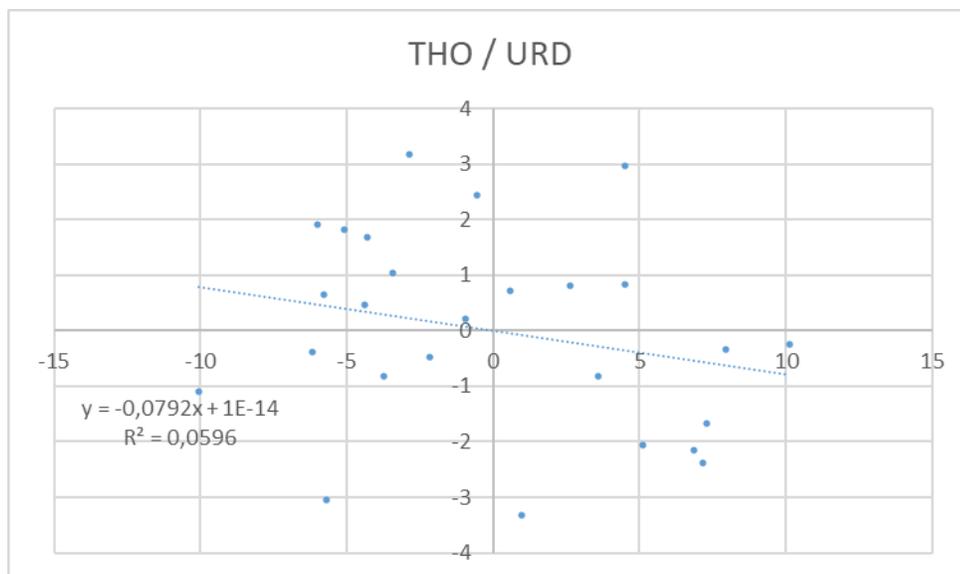


Figure 28 : Coefficients de correction du radon pour le thorium

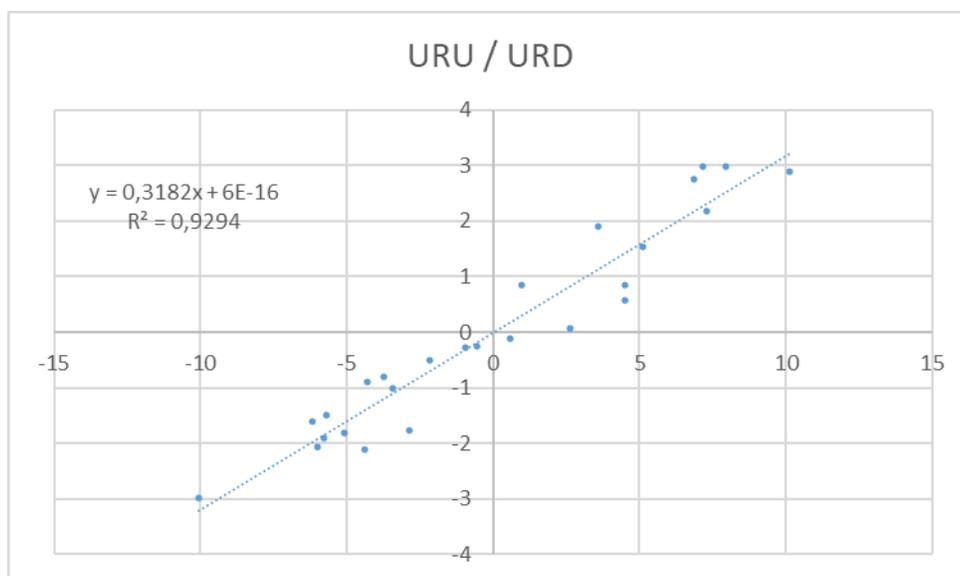


Figure 29 : Coefficients de correction du radon pour l'uranium vers le haut

Coefficient	Total Count	Potassium	Thorium	Up Uranium
a_n	14.4	0.653	-0.0792	0.318
b_n	0	0	0	0

Tableau 34 : Coefficients de correction du radon