

RAPPORT LOGISTIQUE ET TECHNIQUE

LEVÉS HÉLIPORTÉS DE MESURES MAGNÉTIQUES ET SPECTROMÉTRIQUES SUR L'OUEST ET LE SUD 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 22 août au 27 novembre 2022
Date de livraison des données et du rapport : décembre 2022 et janvier 2023*

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	5
2	LOCALISATION ET SPÉCIFICATIONS DU LEVÉ	6
2.1	LOCALISATION DU LEVÉ	6
2.2	ÉTENDUE DU LEVÉ	11
2.3	PARAMÈTRES DE VOL ET D'ACQUISITION DES DONNÉES	11
2.3.1.	ESPACEMENT ET ORIENTATION DES LIGNES DE VOL	11
2.3.2.	HAUTEUR DE VOL AU-DESSUS DU SOL	11
2.3.3.	VITESSE	11
2.3.4	TOLÉRANCES SUR LA NAVIGATION	12
2.3.5	TOLÉRANCE SUR LE NIVEAU DE BRUIT DES MESURES	12
2.3.6	TOLÉRANCE SUR LES VARIATIONS TEMPORELLES DU CHAMP MAGNÉTIQUE (DIURNE ET SPHÉRIQUES)	12
2.4	KILOMÉTRAGE	13
2.5	LIGNES DE VOL RESTITUÉES À L'ISSUE DES VOLS	14
2.6	DISTANCE CUMULÉE INCLUANT LES REVOLS	17
3	TESTS ET CALIBRATIONS	18
3.1	TESTS ET CALIBRATIONS DES INSTRUMENTS DE MESURES MAGNÉTIQUES	18
3.2	TESTS ET CALIBRATIONS DES INSTRUMENTS DE MESURES SPECTROMÉTRIQUES	18
4	LOGISTIQUE	19
4.1	SERVICES GÉOPHYSIQUES ET LOGISTIQUES	19
4.2	BASES D'OPÉRATION	19
4.2.1	AURILLAC	19
4.2.2	LE PUY-EN-VELAY	20
4.2.3	CASTRES	20
4.3	STATIONS DE BASE	21
4.4	RESSOURCES HUMAINES AFFECTÉES AUX TRAVAUX GÉOPHYSIQUES	21
4.5	RESSOURCES HUMAINES AFFECTÉES AU PILOTAGE DES HÉLICOPTÈRES	21
4.6	CALENDRIER DES TRAVAUX	22
5	INSTRUMENTATION	23
5.1	AÉRONEF	23
5.2	MAGNÉTOMÈTRES	26
5.2.1	MAGNÉTOMÈTRE SCALAIRE EN VOL	26
5.2.2	MAGNÉTOMÈTRE VECTORIEL EN VOL	26
5.2.3	STATION DE BASE MAGNÉTOMÉTRIQUE	26
5.3	SPECTROMÈTRES DE MESURES DU RAYONNEMENT GAMMA	27
5.4	SYSTÈME DE POSITIONNEMENT	28
5.4.1	NAVIGATION	28
5.4.2	SYSTÈME GNSS EN VOL	29
5.4.3	STATION DE BASE MULTI FRÉQUENCES GNSS	29
5.5	MESURES INERTIELLES ('INERTIAL MEASUREMENT UNIT')	30
5.6	SONDE BAROMÉTRIQUE	30
5.7	ALTIMÈTRE RADAR	30
5.8	SYSTÈME D'ACQUISITION ET D'ENREGISTREMENT DES DONNÉES	30

5.9	SYSTÈME D'ACQUISITION VIDÉO	31
5.10	CALCULATEURS DE TERRAIN	31
5.11	PIÈCES DE RECHANGE	31
6	CONTRÔLES DE LA QUALITÉ DES DONNÉES	32
6.1	CONTRÔLE DES SPÉCIFICATIONS DE VOL	32
7	TRAITEMENTS DES DONNÉES	33
7.1	TRAITEMENT DES DONNÉES MAGNÉTIQUES	33
7.1.1	RÉSUMÉ DES TRAITEMENTS APPLIQUÉS AUX MESURES MAGNÉTIQUES	33
7.1.2	COMPENSATION	33
7.1.3	CORRECTION DES VARIATIONS TEMPORELLES (VARIATIONS DIURNES)	33
7.1.4	CORRECTION DU RETARD INSTRUMENTAL (LAG)	34
7.1.5	CORRECTION D'ALTITUDE	34
7.1.6	NIVELLEMENT	35
7.1.7	MICRO-NIVELLEMENT	36
7.1.8	CHAMP RÉSIDUEL (ANOMALIES)	36
7.1.9	FILTRAGE DU BRUIT ANTHROPIQUE	36
7.1.10	CARTES TRANSFORMÉES	36
7.2	TRAITEMENT DES DONNÉES SPECTROMÉTRIQUES	37
7.2.1	RÉSUMÉ DES CORRECTIONS APPLIQUÉES AUX MESURES DE SPECTROMÉTRIE GAMMA	37
7.2.2	FILTRAGE DES DIFFÉRENTES RÉGIONS D'INTÉRÊTS	37
7.2.3	CORRECTION DU TEMPS D'ACQUISITION PAR SECONDE	37
7.2.4	CORRECTION DU RAYONNEMENT COSMIQUE ET DU BRUIT DE FOND DE L'HÉLICOPTÈRE	37
7.2.5	SUPPRESSION DU RADON	38
7.2.6	RÉDUCTION À PRESSION ET TEMPÉRATURE STANDARDS (STP)	39
7.2.7	CORRECTION DE LA DIFFUSION COMPTON	39
7.2.8	CORRECTION DE L'ATTÉNUATION DE L'AIR	40
7.2.9	CONVERSION EN CONCENTRATION DE RADIOÉLÉMENTS	40
7.2.10	MICRO-NIVELLEMENT	40
8	DONNÉES FINALES	41
8.1	PRODUITS FINAUX DÉLIVRÉS	41
8.2	BASE DE DONNÉES MAGNÉTIQUES	42
8.3	BASE DE DONNÉES SPECTROMÉTRIQUES	43
9	RÉFÉRENCES DU PROJET	45
10	ATTESTATION DE QUALIFICATION	46
	ANNEXES	47
	ANNEXE A : PARAMÈTRES GÉODÉSIQUES UTILISÉS DANS LES PROJECTIONS	48
	ANNEXE B : PARAMÈTRES DES GRILLES	49
	ANNEXE C : TEST DU RETARD INSTRUMENTAL	51
	ANNEXE D : COMPENSATION - FIGURE DE MÉRITE (FOM)	53
	ANNEXE E : LIGNE TEST DES CALIBRATIONS SPECTROMÉTRIQUES	55
	ANNEXE F : COEFFICIENTS D'ATTÉNUATION ET SENSIBILITÉ DU SYSTÈME DE MESURES	64
	ANNEXE G : COEFFICIENTS DE DÉPOUILLEMENT COMPTON	67
	ANNEXE H : ÉTALONNAGE DE LA FENÊTRE COSMIQUE ET BRUIT DE L'HÉLICOPTÈRE	69
	ANNEXE I : COEFFICIENTS DE LA CORRECTION DU RADON	74

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Hélicoptère sur le tarmac de l'aéroport d'Aurillac	5
Figure 2 : Localisation des blocs :	8
Figure 3 : Localisation des blocs (zoom) :	9
Figure 4 : Localisation des blocs sur fond topographique SRTM1 :	10
Figure 5 : Distribution des vitesses sur l'ensemble du levé	12
Figure 6 : lignes de vol pour le bloc d'Aurillac	14
Figure 7 : lignes de vol pour le bloc du Cantal	15
Figure 8 : lignes de vol pour le bloc du Puy	16
Figure 9 : lignes de vol pour le bloc de Castres	17
Figure 10 : hélicoptère AS350 B3 en vol et lors des tests à Albertville (base de SAF).	24
Figure 11 : Spectromètres à bord de l'hélicoptère	27
Figure 12 : Système de navigation embarqué	28
Figure 13 : Statistiques sur les différences de hauteur de vol aux intersections des traverses et des lignes de contrôles	34
Figure 14 : Localisation du test du retard instrumental	51
Figure 15 : Localisation du test de compensation	53
Figure 16 : Localisation de la ligne test (Aurillac 1)	56
Figure 17 : Localisation de la ligne test (Aurillac 2)	58
Figure 18 : Localisation de la ligne test (Le Puy-en-Velay)	60
Figure 19 : Localisation de la ligne test (Castres)	62
Figure 20 : Localisation de la ligne test	64
Figure 21 : Atténuation exponentielle avec la hauteur pour les quatre fenêtres	66
Figure 22 : Localisation de la ligne d'étalonnage	69
Figure 23 : Évolutions des comptes avec l'altitude	71
Figure 24 : Coefficients cosmiques pour le compte total	71
Figure 25 : Coefficients cosmiques pour le potassium	72
Figure 26 : Coefficients cosmiques pour l'uranium	72
Figure 27 : Coefficients cosmiques pour le thorium	73
Figure 28 : Coefficients cosmiques pour l'uranium vers le haut	73
Figure 29 : Localisation des lignes tests	74
Figure 30 : Coefficients de correction du radon pour le compte total	75
Figure 31 : Coefficients de correction du radon pour le potassium	75
Figure 32 : Coefficients de correction du radon pour le thorium	76
Figure 33 : Coefficients de correction du radon pour l'uranium vers le haut	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Coordonnées géographiques et RGF93 du bloc d'Aurillac	6
Tableau 2 : Coordonnées géographiques et RGF93 du bloc du Cantal	7
Tableau 3 : Coordonnées géographiques et RGF93 du bloc du Puy	7
Tableau 4 : Coordonnées géographiques et RGF93 du bloc de Castres	7
Tableau 5 : Périmètre et surface des blocs	11
Tableau 6 : Paramètres de vol pour chaque bloc	11
Tableau 7 : Kilométrage calculé sur les coordonnées projetées	13
Tableau 8 : Distance linéaire réellement volée	17
Tableau 9 : Spécifications de l'hélicoptère utilisé pour ce levé	25
Tableau 10 : Performances de l'hélicoptère utilisé pour ce levé	25
Tableau 11 : Spécifications du magnétomètre en vol G-822A	26
Tableau 12 : Spécifications du magnétomètre vectoriel fluxgate	26
Tableau 13 : Spécifications des magnétomètres des stations sol	26
Tableau 14 : Spécifications des spectromètres RSI RSX-5	27
Tableau 15 : Spécifications du système GNSS	29
Tableau 16 : Spécifications du système de mesures inertielles	30
Tableau 17 : Spécifications des altimètres radar	30
Tableau 18 : Spécifications du système vidéo	31
Tableau 19 : Statistiques sur les écarts d'altitude aux points de croisement	35
Tableau 20 : Procédure de nivellement	35
Tableau 21 : Inclinaison et Déclinaison utilisées dans la Réduction au Pôle de chaque bloc	36
Tableau 22 : Résumé des corrections appliquées aux données spectrométriques	37
Tableau 23 : Correction de la diffusion Compton	39
Tableau 24 : Paramètres du micro-nivellement des données spectrométriques	40
Tableau 25 : Produits délivrés	41
Tableau 26 : Contenu de la base de données magnétiques	42
Tableau 27 : Contenu de la base de données spectrométriques	44
Tableau 28 : Paramètres géodésiques utilisés dans les projections planes	48
Tableau 29 : Paramètres des grilles pour le bloc d'Aurillac	49
Tableau 30 : Paramètres des grilles pour le bloc du Cantal	49
Tableau 31 : Paramètres des grilles pour le bloc du Puy	49
Tableau 32 : Paramètres des grilles pour le bloc de Castres	50
Tableau 33 : Test du retard instrumental	52
Tableau 34 : Résultats de la FOM	54
Tableau 35 : Variation des comptes du Thorium sur la ligne test d'Aurillac 1	57
Tableau 36 : Variation des comptes du Thorium sur la ligne test d'Aurillac 2	59
Tableau 37 : Variation des comptes du Thorium sur la ligne test du Puy-en-Velay	61
Tableau 38 : Variation des comptes du Thorium sur la ligne test de Castres	63
Tableau 39 : Coefficients d'atténuation et sensibilité à 80m	65
Tableau 40 : Comptes corrigés du bruit de fond et de l'effet Compton	65
Tableau 41 : Taux de compte moyen sur les paliers cosmiques	70
Tableau 42 : Coefficients du bruit de fond	73
Tableau 43 : Coefficients de calibration des composantes observées au sol	74
Tableau 44 : Coefficients de correction du radon	76

1 INTRODUCTION

Novatem Inc. a été mandatée par le **Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)** pour réaliser des levés héliportés de mesures magnétiques et spectrométriques du rayonnement gamma sur quatre blocs situés dans l'ouest et le sud du Massif Central (France). Ce rapport décrit la réalisation du levé qui totalise 18 701.4 km linéaires. La production a débuté le 22 août 2022 et s'est achevée le 27 novembre 2022.

En réponse à la demande du BRGM, Novatem a mis en œuvre un système héliporté 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 Secours Aériens Français (SAF) 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 sur le tarmac de l'aéroport d'Aurillac

2 LOCALISATION ET SPÉCIFICATIONS DU LEVÉ

2.1 LOCALISATION DU LEVÉ

Le levé comprend quatre blocs localisés à l'ouest et au sud du Massif Central. Les sommets de chacun des polygones ont été fournis par le **BRGM** dans le système de coordonnées France RGF93.

Géographiques WGS84		Lambert France RGF93	
Longitude	Latitude	X	Y
2.2903950562	44.6893164525	643774.22	6399163.93
2.3810840158	44.8031234376	651058.91	6411744.07
2.7993592355	44.8020255870	684133.78	6411450.49
2.7990052640	44.6648843271	684067.01	6396217.73
2.9443322259	44.6645751259	695587.15	6396164.67
3.0790888665	44.5603747264	706281.06	6384591.74
3.0783623590	44.5114706632	706228.75	6379159.28
3.0131378045	44.4408561203	701045.58	6371312.02
2.8863377923	44.4420997410	690954.29	6371456.59
2.8853391811	44.3624792995	690861.97	6362611.74
2.6706133155	44.3626525835	673749.30	6362679.11
2.6701920645	44.5255510296	673791.31	6380775.03
2.2821514297	44.5253069567	642955.44	6380952.48
2.2829793602	44.3633577442	642857.87	6362962.13
2.2561405662	44.3631861096	640718.86	6362962.85
2.1583528285	44.1193902338	632637.35	6335957.42
1.9109101700	44.1184805678	612832.58	6336098.48
1.9102811528	44.1794318850	612875.69	6342870.41
2.0864921251	44.4610656804	627325.23	6373977.34
2.0860073133	44.4921294394	627326.61	6377428.29
1.8564022146	44.6716202186	609360.14	6397602.03
1.8542621120	44.9224884915	609594.83	6425465.98
1.7762202282	45.1366511890	603805.99	6449341.29
1.7755572023	45.2065675013	603874.28	6457106.08
1.9130541402	45.2072503182	614668.89	6457023.92
2.1156166255	44.8645392423	630144.10	6418764.95
2.2307832465	44.6892848646	639050.97	6399204.66

Tableau 1 : Coordonnées géographiques et RGF93 du bloc d'Aurillac

Géographiques WGS84		Lambert France RGF93	
Longitude	Latitude	X	Y
2.4174910787	44.9982507900	654097.64	6433394.02
2.4139293011	45.2553575589	654028.91	6461949.93
2.7701359391	45.2566299313	681969.85	6461946.87
2.8749043361	45.1568625134	690170.14	6450848.33
2.8754885493	45.0319479091	690194.17	6436974.99
2.8051833012	44.8925603627	684619.14	6421505.00
2.5566717461	44.8912027647	664998.35	6421433.50
2.4267257615	44.9783991473	654809.33	6431183.93
2.4271549866	44.9978574880	654858.84	6433344.77

Tableau 2 : Coordonnées géographiques et RGF93 du bloc du Cantal

Géographiques WGS84		Lambert France RGF93	
Longitude	Latitude	X	Y
2.9723260193	45.3711015501	697833.75	6474633.86
3.2584219010	45.3679929740	720229.69	6474321.36
3.5145506586	45.1490306826	740438.13	6450102.49
3.5127174568	45.0937004098	740333.96	6443956.63
3.6081796143	45.0439786278	747886.08	6438487.85
3.6066296644	44.9009550584	747886.08	6422602.36
3.3196246060	44.9030893177	725229.72	6422706.52
3.3197314748	44.9218465796	725229.72	6424789.87
3.0811079720	45.1384634211	706375.46	6448800.40
2.9697900316	45.1398957064	697625.42	6448956.65

Tableau 3 : Coordonnées géographiques et RGF93 du bloc du Puy

Géographiques WGS84		Lambert France RGF93	
Longitude	Latitude	X	Y
2.6551741210	43.7781261769	672235.25	6297739.24
2.8402586140	43.7774257346	687137.73	6297613.79
2.8393629537	43.6758553292	687042.65	6286326.35
2.6258274901	43.6766350079	669818.89	6286471.33
2.4009317626	43.5331945483	651557.92	6270641.62
2.3143367460	43.5332109333	644555.82	6270700.40
2.3142657563	43.7102746676	644720.97	6290378.34
2.5032349338	43.7101498744	659953.00	6290250.41
2.5035128729	43.8054322064	660042.98	6300838.65
2.6043734714	43.8052307701	668159.00	6300770.41
2.6551741210	43.7781261769	672235.25	6297739.24

Tableau 4 : Coordonnées géographiques et RGF93 du bloc de Castres

Les figures qui suivent localisent les limitent des 4 blocs et précisent leur appellation dans le texte qui suit.



Figure 2 : Localisation des blocs :

- Aurillac, en bleu
- Cantal, en rouge
- Le Puy, en jaune
- Castres, en vert

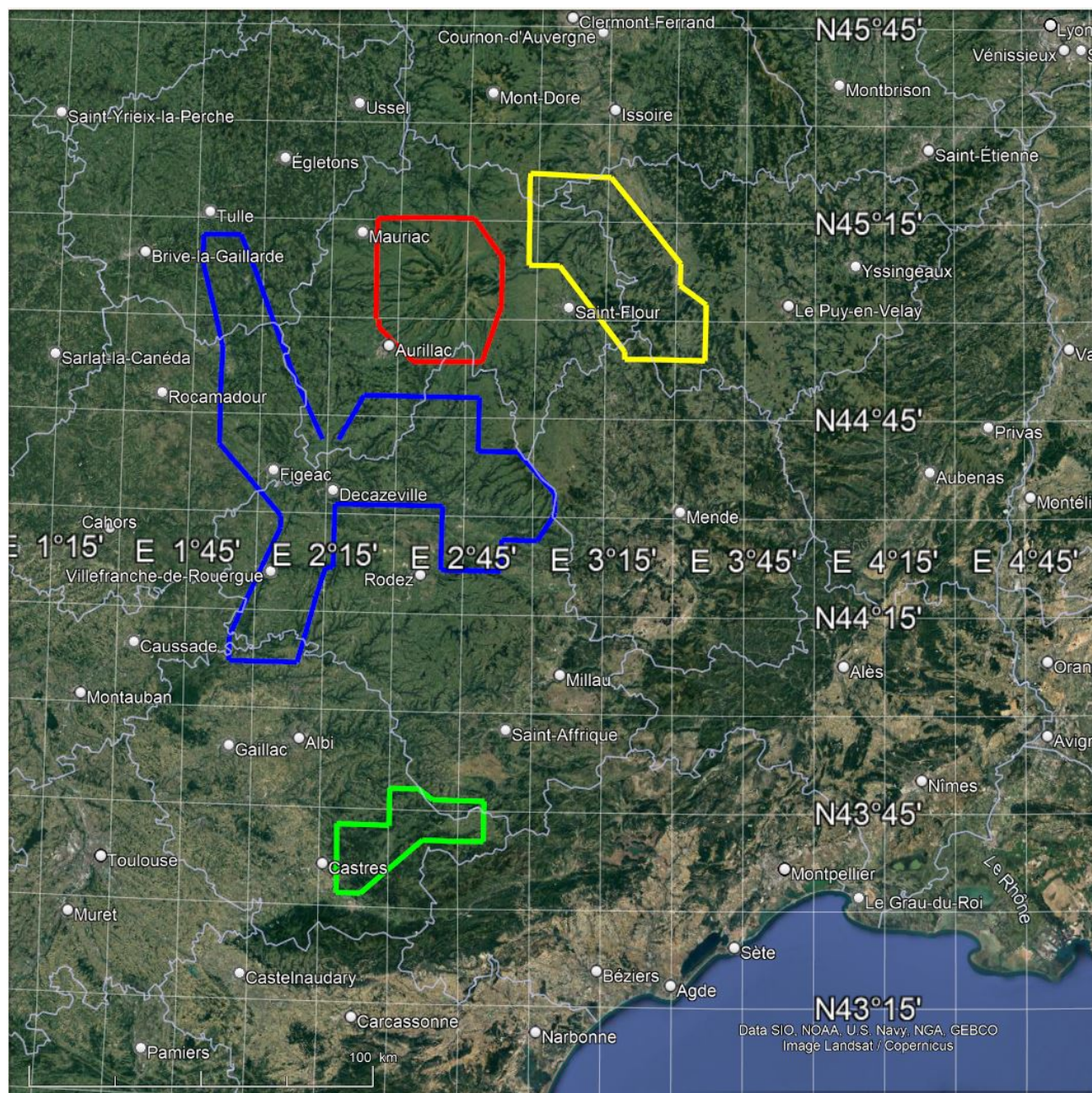


Figure 3 : Localisation des blocs (zoom) :

- Aurillac, en bleu
- Cantal, en rouge
- Le Puy, en jaune
- Castres, en vert

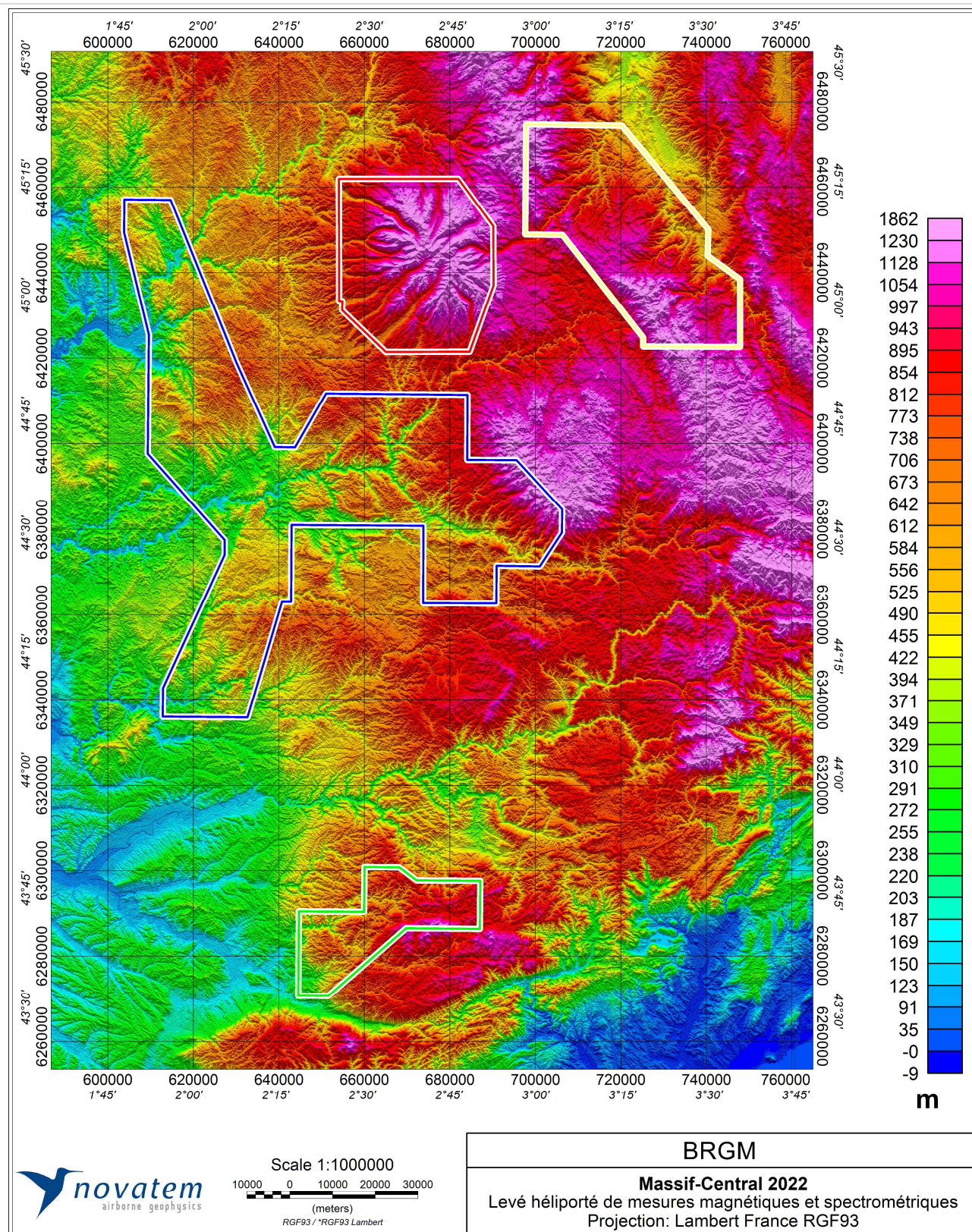


Figure 4 : Localisation des blocs sur fond topographique SRTM1 :

- Aurillac, en bleu
- Cantal, en rouge
- Le Puy, en jaune
- Castres, en vert

2.2 ÉTENDUE DU LEVÉ

L'étendue de chaque bloc est résumée ici à l'aide des périmètres et surfaces mesurés en coordonnées géographiques à l'aide des coordonnées fournies par le **BRGM** :

<i>Bloc</i>	<i>Périmètre</i>	<i>Surface</i>
Aurillac	464 km	4 412 km ²
Cantal	137 km	1 315 km ²
Le Puy	175 km	1 608 km ²
Castres	133 km	648 km ²

Tableau 5 : Périmètre et surface des blocs

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>
Aurillac	500 m	N0/N180	5 000 m	N90/N270
Cantal	400 m	N0/N180	4 000 m	N90/N270
Le Puy	500 m	N0/N180	5 000 m	N90/N270
Castres	500 m	N0/N180	5 000 m	N90/N270

Tableau 6 : Paramètres de vol pour chaque bloc

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, plusieurs essais utilisant une surface drapée ont été menés au début du levé. Ces essais ont successivement utilisés des paramètres de montée et de descente de plus en plus sévères. Afin d'optimiser la résolution des données spectrométriques, 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 **107 km/h** (29.7 m/s).

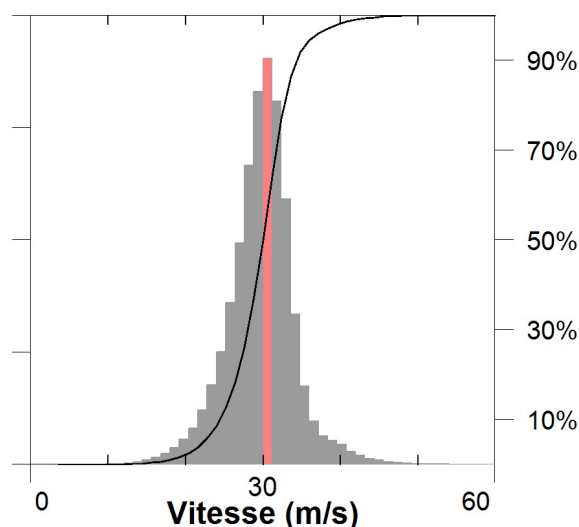


Figure 5 : Distribution des vitesses sur l'ensemble du levé

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 sur certains blocs, 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>
Aurillac	9 066.4	909.8	9 976.2
Cantal	3 305.4	348.5	3 653.9
Le Puy	3 244.5	343.7	3 588.2
Castres	1 318.7	164.4	1 483.1
Total	16 935.0	1 766.4	18 701.4

Tableau 7 : Kilométrage calculé sur les coordonnées projetées

2.5 LIGNES DE VOL RESTITUÉES À L'ISSUE DES VOLS

Les figures qui suivent présentent les lignes de vol sur fond topographique, pour chacun des 4 blocs.

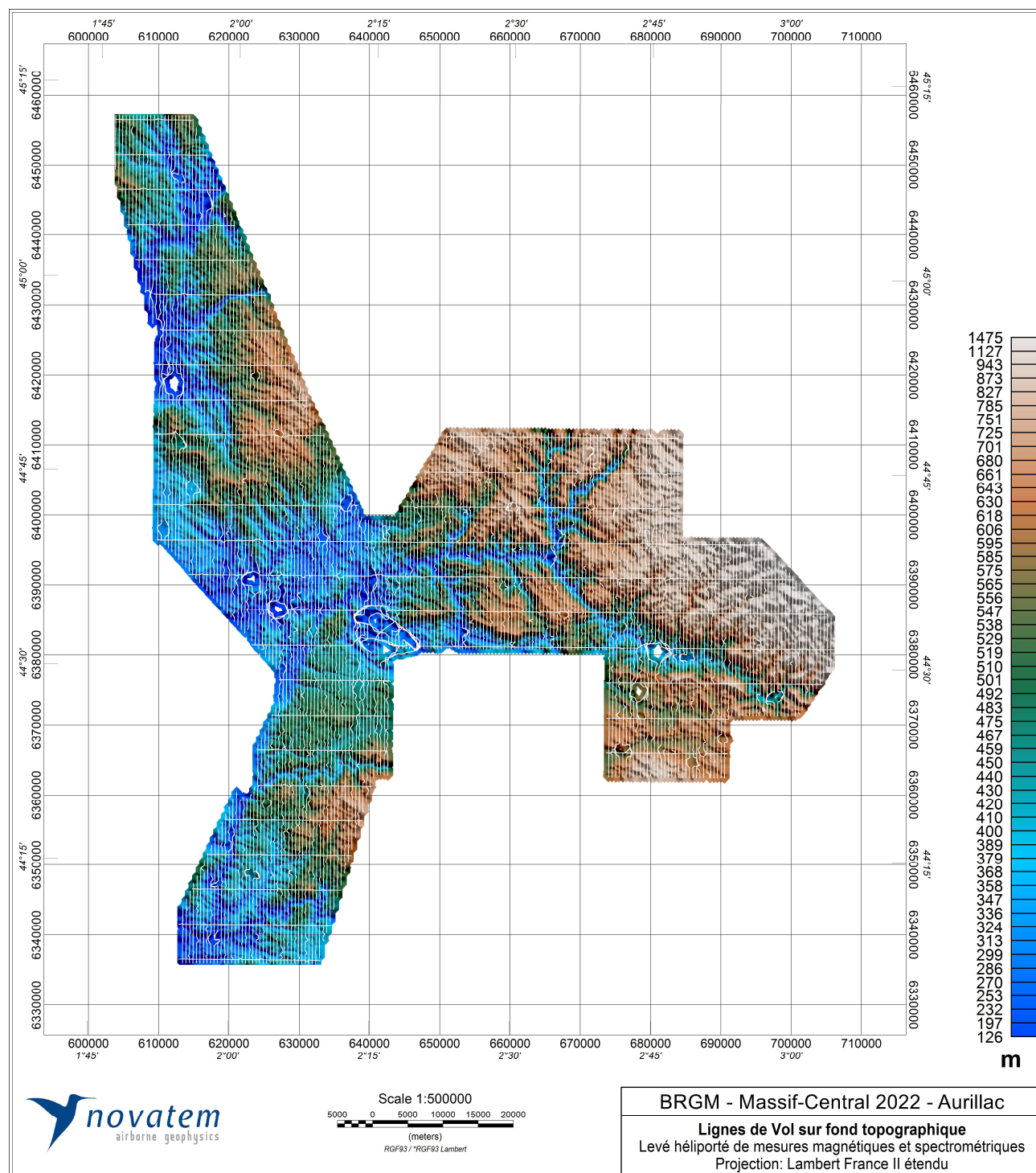


Figure 6 : lignes de vol pour le bloc d'Aurillac

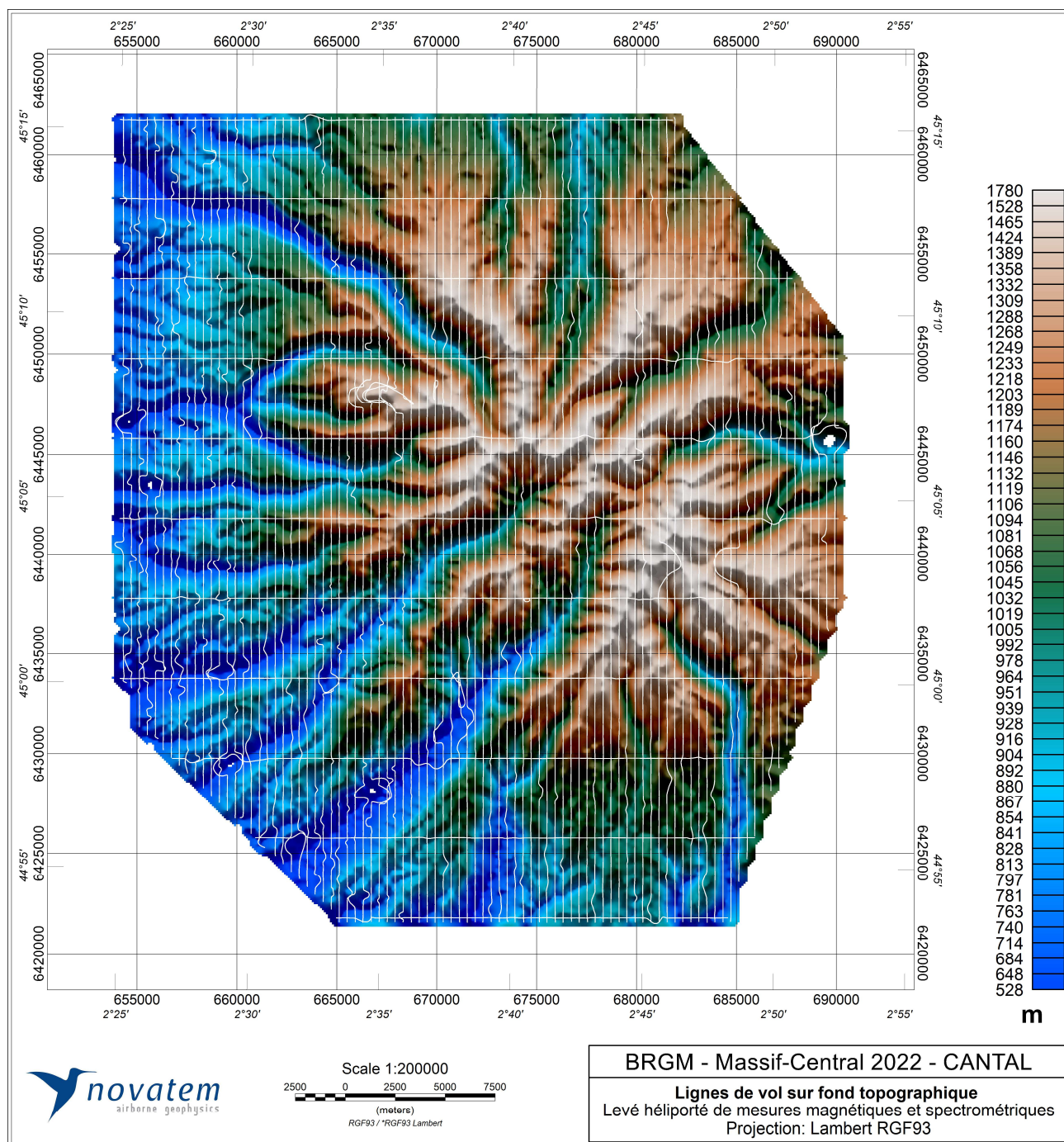


Figure 7 : lignes de vol pour le bloc du Cantal

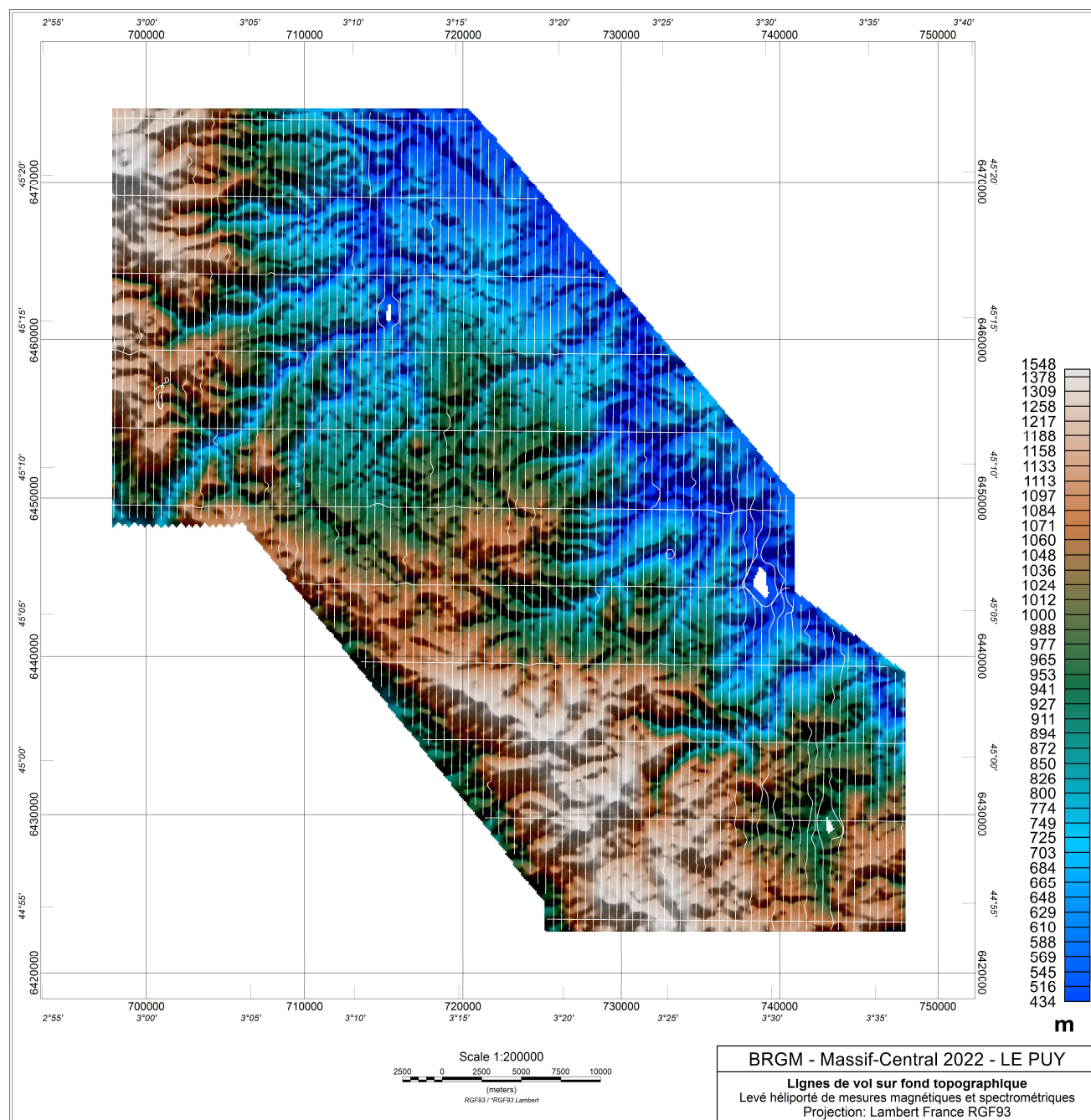


Figure 8 : lignes de vol pour le bloc du Puy

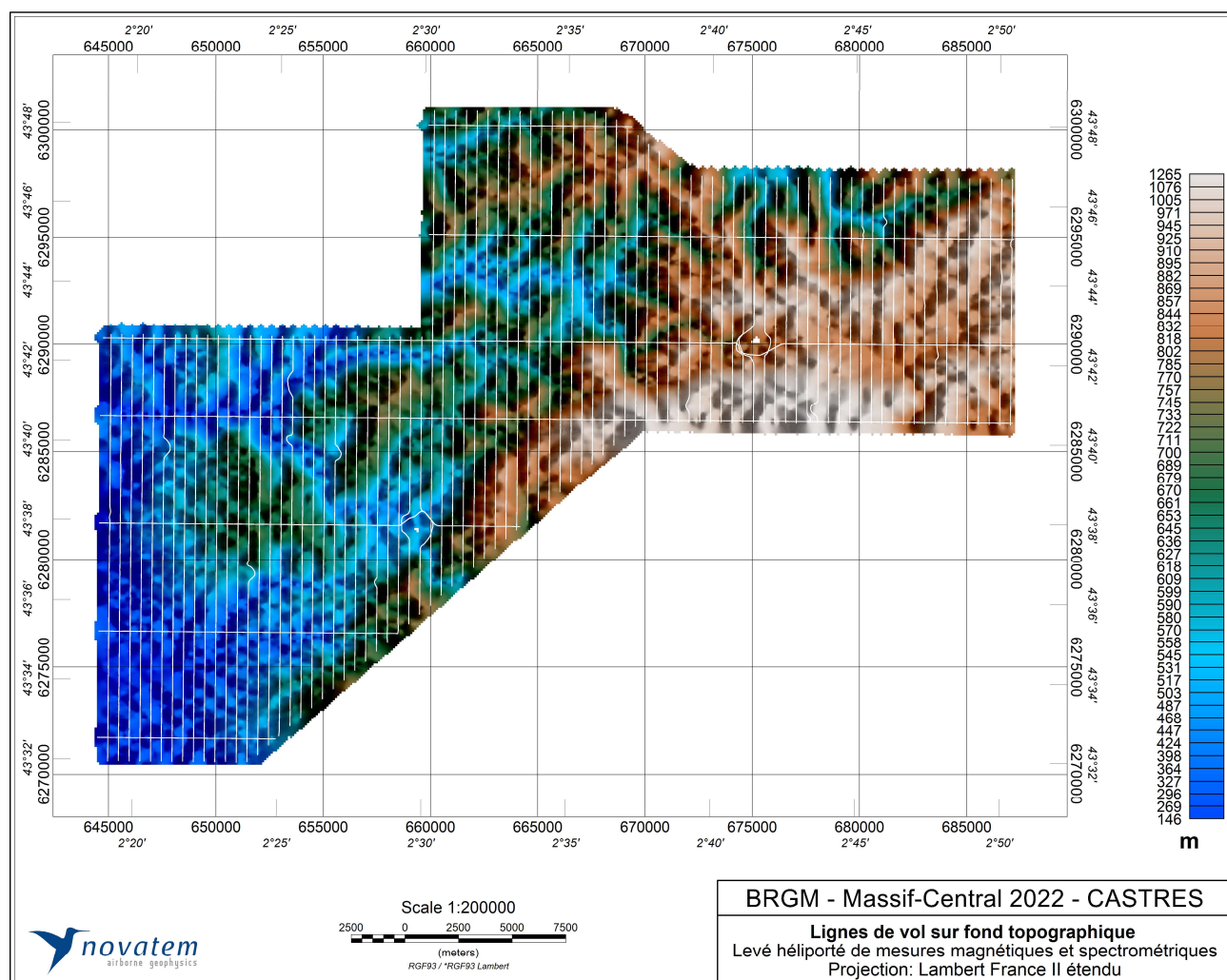


Figure 9 : lignes de vol pour le bloc de Castres

2.6 DISTANCE CUMULÉE INCLUANT LES REVOLS

Les plans de vol présentés sur les figures précédentes n'incluent pas les revols, notamment en raison des tests de surface drapée. Le nombre de kilomètres effectivement volés est finalement le suivant :

Kilométrage	Total
Réel	19 928
Mesuré sur les données finales	18 701
Différence	1 227

Tableau 8 : 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, cinq paliers de calibration équidistants, entre 1000 et 4000 m AGL, 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 BASES D'OPÉRATION

4.2.1 AURILLAC

L'aérodrome d'Aurillac, situé en bordure de la ville, a été utilisé pour la réalisation des blocs d'Aurillac et du Cantal.

Aéroport d'Aurillac	Code IATA : AUR
	Code OACI : LFLW
	(Lat, Long) = (44° 53' 51" N, 2° 25' 00" E)
	Altitude = 2 096 ft. (639 m)
	Longueur de la piste : 5 577 ft (1 700 m)
	Surface : asphalte
	Carburant : JET-A1

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

Une station de base magnétique a été installée dans un champ, à l'intérieur de l'enceinte de l'aéroport. La station était reliée au réseau électrique de l'aéroport par une très longue extension. Les données pouvaient ainsi être récupérées quotidiennement par le responsable technique de Novatem.

L'équipe est arrivée sur place le **19 août 2022** (pour un début de production le 22 août) et a quitté les lieux le **10 octobre 2022**, pour aller au Puy-en-Velay.

4.2.2 LE PUY-EN-VELAY

L'aéroport du Puy-en-Velay est situé à Loudes, à 10 km à l'ouest de la ville. Il a été utilisé pour le bloc du Puy.

Aéroport de Loudes	Code IATA : LPY
Le Puy-en-Velay	Code OACI : LFHP
	(Lat, Long) = (45° 04' 44" N, 3° 45' 45" E)
	Altitude = 2 730 ft. (832 m)
	Longueur de la piste : 4 593 ft (1 400 m)
	Surface : béton
	Carburant : JET-A1

L'aéroport de Loudes permettait le ravitaillement en carburant de l'hélicoptère, ainsi que de lieu de maintenance. Sinon, le personnel était logé dans un gîte à 15 minutes, proche d'un champ où l'hélicoptère était stationné. Un hangar était également disponible à l'aéroport pour la maintenance de l'aéronef et son stationnement en cas de mauvaise météo. La communication et l'envoi des données étaient assurés par un accès au réseau de télécommunication 4G local.

La station de base magnétique était positionnée au milieu d'un champ loin de toutes sources de perturbations et suffisamment accessible pour récupérer les données et changer la batterie tous les jours.

L'équipe est arrivée sur place le **10 octobre 2022** et a quitté les lieux le **27 octobre 2022**, pour une interruption (du 27 octobre au 16 Novembre 2022) en raison d'une météo défavorable, avant d'aller à Castres.

4.2.3 CASTRES

L'aéroport de Castres est situé à Mazamet, à environ 6 km au sud de la ville. Il a été utilisé pour les vols du bloc de Castres.

Aéroport de Castres	Code IATA : DCM
Mazamet	Code OACI : LFCK
	(Lat, Long) = (43° 33' 25" N, 2° 17' 21" E)
	Altitude = 784 ft. (239 m)
	Longueur de la piste : 5 988 ft (1 825 m)
	Surface : béton
	Carburant : JET-A1

Le personnel était logé dans un gîte à 5 minutes de l'aéroport, avec un accès internet haut-débit pour l'envoi des données.

Une station de base magnétique était installée dans l'enceinte de l'aéroport loin de toutes sources de perturbations et facilement accessible pour une récupération quotidienne des données et le changement de la batterie.

L'équipe est arrivée sur place le **16 novembre 2022** et a démobilisé le **27 novembre 2022**, pour un retour à Albertville (base d'opération de SAF Hélicoptères).

4.3 STATIONS DE BASE

Le lieu d'implantation des stations 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).

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

Base 1 : Aéroport d'Aurillac

Latitude : 44.8993275 O
 Longitude : 2.4178037 N
 Moyenne mesurée pendant la durée du levé : 47 342 nT

Base 2 : Champ 1 Loudes

Latitude : 45.1254507 O
 Longitude : 3.6628838 N
 Moyenne mesurée pendant la durée du levé : 47 032 nT

Base 3 : Champ 2 Loudes

Latitude : 45.1320171 O
 Longitude : 3.6623327 N
 Moyenne mesurée pendant la durée du levé : 46 918 nT

Base 4 : Aéroport de Mazamet

Latitude : 43.5555611 O
 Longitude : 2.2881577 N
 Moyenne mesurée pendant la durée du levé : 46 588 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 trois 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); un pilote entraîneur venu du Canada pour l'entraînement et le suivi des pilotes ; un mécanicien (AME) certifié et expérimenté pour le type d'hélicoptère mis en œuvre.

- **Fabien PETIT**, Commandant
- **Benoît LEVACHER**, Commandant
- **Gaëtan APERTET**, Commandant
- **Dominique DESCAMPE**, Pilote Entraîneur
- **Thierry MARCON**, AME

4.6 CALENDRIER DES TRAVAUX

La production a débuté le **22 août 2022** et s'est terminée le **27 novembre 2022**. 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 B3 d'Eurocopter (aujourd'hui Airbus)** de la société Secours Aériens Français (**SAF**) 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 10 : hélicoptère AS350 B3 en vol et lors des tests à Albertville (base de SAF).

Levé héliporté de mesures magnétiques et spectrométriques
sur l'ouest et le sud du Massif central
BRGM – France, 2022

Immatriculation	F-GZSH
Fabricant	Aérospatiale / Eurocopter / Airbus
Modèle	Astar AS350
Type	B3
Turbine	Turbomeca Arriel 2B1
Rotor	Eurocopter 3 pales en composite
Type d'immatriculation	Commerciale
Opérateur	Secours Aériens Français (SAF) Hélicoptères

Tableau 9 : Spécifications de l'hélicoptère utilisé pour ce levé

Astar AS350 B3	
Turbine	Turbomeca Arriel 2D1
Puissance au décollage	847 shp (632 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 10 : 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/√Hz et un "heading error" inférieur à 0.1 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 11 : 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	0.1 nT
Fonctionnement	> 65 000 nT
'Heading error'	± 1 nT

Tableau 12 : 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. Une des deux stations a été laissée fixe durant toute la durée des travaux (station de référence). Chaque station était équipée d'une batterie résistante aux très basses températures, elle-même alimentée par un panneau solaire.

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

Tableau 13 : 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 ($16.72 \text{ litres} = 1024 \text{ in}^3$), et un cristal regardant vers le haut ($4.18 \text{ litres} = 256 \text{ in}^3$). 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 14 : Spécifications des spectromètres RSI RSX-5

Chaque spectromètre était relié à sa propre sonde thermique et barométrique (**Honeywell**) ayant respectivement une résolution de $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et de 0.01 kPa .



Figure 11 : 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 12 : 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 15 : Spécifications du système GNSS

5.4.3 STATION DE BASE MULTI FRÉQUENCES GNSS

Une station de base GNSS utilisant un capteur **Hemisphere** similaire à celui embarqué à bord de l'hélicoptère a été installée à proximité de la station de base. Les positions différentielles sont recalculées après les vols à l'aide du logiciel **Waypoint GrafNav** de **Novatel**. À l'issue des traitements différentiels, une précision d'environ un centimètre est généralement observée. Compte tenu du très grand nombre de satellites (généralement plus de 30) et de la qualité du signal GNSS au-dessus de la France, cette correction n'a pas été nécessaire (précision meilleure que 10 cm sans correction).

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 16 : 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 : $\leq 3ft$ Entre 100 et 500 pieds : $\leq 3\%$ Entre 500 et 2 500 pieds : $\leq 5\%$
Gamme de températures	-55 à +70 °C

Tableau 17 : 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
- Fiducie
- 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 18 : 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.

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 capteur 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 inférieure à 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). Les stations de base étant fixes 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.).

Compte tenu du déplacement de la station de base pour chaque bloc (afin de minimiser les écarts entre le capteur en vol et celui de la station-de-base), les données mesurées à l'observatoire de Clermont-Ferrand ont été utilisées comme référence. Pour chaque bloc, la variation temporelle est ainsi la différence à chaque instant entre la valeur mesurée à la base et sa moyenne mesurée sur tout le temps (jour et nuit) où la station était proche du bloc. La constante (moyenne) observée à Clermont-Ferrand était ensuite ajoutée pour obtenir un champ total de même niveau pour tous les blocs.

Le lieu d'implantation des stations de base et leur moyenne respective sont précisés au paragraphe 4.3.

Compte tenu du bruit local observé pour toutes les implantations (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.

Les figures suivantes montrent les statistiques sur les différences de hauteurs de vol aux intersections pour chacun des blocs.

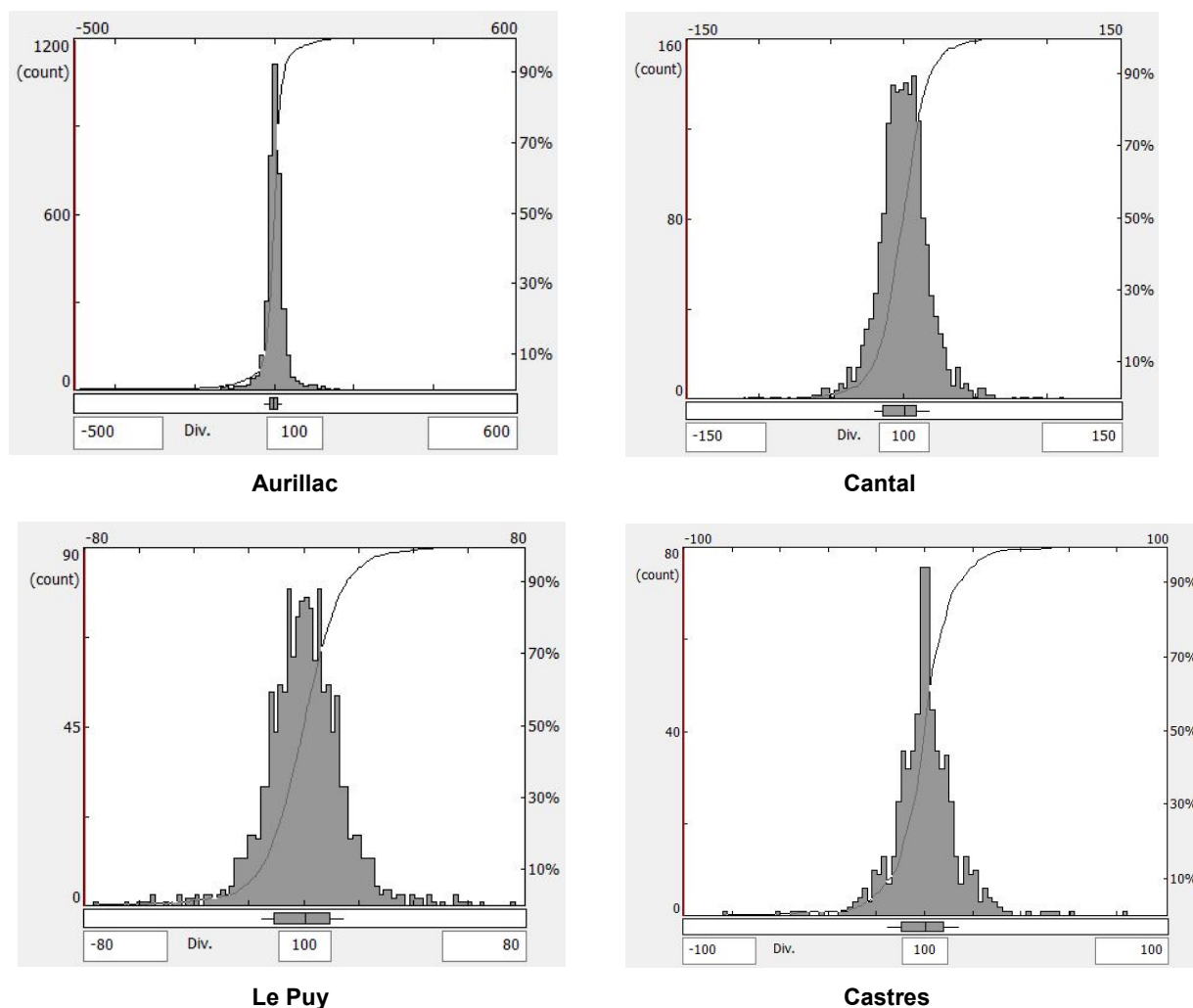


Figure 13 : Statistiques sur les différences de hauteur de vol aux intersections des traverses et des lignes de contrôles

Le tableau suivant résume les écarts d'altitude observés aux points de croisement des traverses et des lignes de contrôles pour chacun des blocs. Ces écarts reflètent surtout les blocs ayant les plus grandes variations topographiques.

Bloc	Nombre d'intersections	Moyenne	Médiane	Écart-type
Aurillac	3 920	0.3	0.1	42.09
Cantal	1 800	0.0	0.0	18.02
Le Puy	1 388	0.0	0.0	14.62
Castres	656	0.0	0.0	13.77

Tableau 19 : Statistiques sur les écarts d'altitude aux points de croisement

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 :

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

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.

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

Tableau 20 : 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 calculé à la hauteur moyenne de chaque bloc et pour la date médiane de la période de chaque bloc.

7.1.9 FILTRAGE DU BRUIT ANTHROPIQUE

Compte tenu de la très grande densité des installations industrielles et des lignes de courant électrique sur certains blocs, le pilote était assisté d'un navigateur lui indiquant à l'avance la présence de ces obstacles afin qu'il puisse anticiper le contournement latéral ou vertical (montée au-dessus de l'obstacle). Pour ce faire, le navigateur disposait face à lui d'une carte numérique à jour des dernières installations. Une analyse de ces obstacles était faite avant chaque vol conjointement par le pilote et le navigateur.

Un masque destiné à localiser le bruit anthropique a été construit en deux étapes : d'abord sur la quatrième dérivée du champ brut mesuré; puis sur les variations d'attitude de l'hélicoptère (valeur des angles de roulis, tangage et lacet excessifs). Une interpolation est ensuite appliquée lorsque les mesures retirées sont en petit nombre. Dans le cas contraire, un trou subsiste dans les données, et donc dans les cartes finales.

7.1.10 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)
Aurillac	60.0	1.7
Cantal	60.9	1.9
Le Puy	60.8	1.7
Castres	59.3	1.7

Tableau 21 : Inclinaison et Déclinaison utilisées dans la Réduction au Pôle de chaque bloc

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 22 : 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'HELICOPTERE

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-GZSH
Alpha	0.327
Beta	0.481
Gamma	0.817
A	0.043
B	-0.001
G	-0.003

Tableau 23 : 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 :

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

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

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

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 24 : 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	- 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 25 : 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-GZSH
3	FLHT	Numéro de vol	
4	LINE	Numéro complet de la ligne de vol	
5	TIME_SEC	Temps universel en secondes	s
6	TIME_UTC	Temps universel UTC	HH :MM :SS
7	X	Coordonnées X LAMBERT RGF93	m
8	Y	Coordonnées Y LAMBERT RGF93	m
9	LONGITUDE	Longitude GNSS WGS84	Degré décimal
10	LATITUDE	Latitude GNSS WGS84	Degré décimal
11	ALTITUDE	Altitude GNSS WGS84	m ASL
12	SPEED	Vitesse de vol	m/s
13	COG	Direction de vol (Course Over Ground)	Degré
14	GROUND_CLEARANCE	Hauteur sol	m
	DEM	Modèle Numérique de Terrain (Digital Elevation Model) (ALTITUDE – GROUND_CLEARANCE)	m
15	MB	Données de la station de base (1s)	nT
16	MB_INT	Données de la station de base interpolée (0.1s)	nT
17	CLERMONT	Données de la station permanente de Clermont-Ferrand interpolées (0.1s)	nT
18	IGRF	IGRF calculé pour la période médiane et la hauteur moyenne du bloc	nT
19	INC	Inclinaison fournie par l'IGRF	Degré
20	DEC	Déclinaison fournie par l'IGRF	Degré
21	MAGR	Intensité du champ magnétique total brut	nT
22	MAGC	Intensité du champ magnétique total compensé	nT
23	cor_base	Correction donnée par la base	nT
24	MAGCB	Intensité du champ magnétique total compensé corrigé du lag et de la base	nT
25	Anomalies	Anomalies (MACB-IGRF)	nT
26	Ano_finales	Anomalies nivelées	nT
27	MASK	Masque sur les zones anthropiques	1 ou 0
28	Ano_finales_Mask	Anomalies finales masquées des zones anthropiques	nT
29	TMI_final_Mask	Intensité du champ magnétique total des zones masquées : Ano_finales_Mask + IGRF	nT
30	VG1	Première dérivée verticale des anomalies	nT/m
31	Signal_Analytique	Signal_Analytique	nT/m
32	Tilt_Derivative	Tilt_Derivative (phase)	radian

Tableau 26 : 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 :

	<i>Nom</i>	<i>Description</i>	<i>Unité</i>
1	DATE	Date locale	AAAA/MM/JJ
2	AIRCRAFT	Immatriculation de l'avion	F-GZSH
3	FLHT	Numéro de vol	
4	LINE	Numéro complet de la ligne de vol	
5	TIME_SEC	Temps universel UTC	s
6	TIME_UTC	Temps universel UTC	HH :MM :SS
7	LONGITUDE	Longitude GNSS WGS84	Degré décimal
8	LATITUDE	Latitude GNSS WGS84	Degré décimal
9	ALTITUDE	Altitude GNSS WGS84	m ASL
10	X_RGF93	Coordonnées X LAMBERT RGF93	m
11	Y_RGF93	Coordonnées Y LAMBERT RGF93	m
12	SPEED	Vitesse de vol	m/s
13	COG	Direction de vol (Course Over Ground)	Degré
14	GROUND_CLEARANCE	Hauteur sol	m
15	TEMP	Température brut	degré Celsius
16	TEMPF	Température filtrée (15 fid)	degré Celsius
17	BARO	Pression brut	mBar
18	BAROF	Pression filtrée (15 fid)	mBar
19	STP	Hauteur aux conditions standard de température et de pression, calculée à partir des mesures radar, pression et température	m
20	DETDN	Nombre de détecteurs actifs vers le bas	
21	DETUP	Nombre de détecteurs actifs vers le haut	
22	LIVEDN	Temps de vie des détecteurs vers le bas	ms
23	LIVEUP	Temps de vie des détecteurs vers le haut	ms
24	RCCD	Compte cosmique brut vers le bas	cps
25	RCCU	Compte cosmique brut vers le haut	cps
26	RTOT	Compte total brut	cps
27	RKAL	Compte Potassium brut	cps
28	RURD	Compte Uranium brut vers le bas	cps
29	RURU	Compte Uranium vers le haut	cps
30	RTHO	Compte Thorium brut	cps
31	TOT_CPS	Compte total corrigé	cps
32	KAL_CPS	Compte Potassium corrigé	cps
33	URD_CPS	Compte Uranium corrigé	cps
34	THO_CPS	Compte Thorium corrigé	cps
35	TOT_nGy/h	Compte total du taux d'absorption	nGy/h
36	TOTML_nGy/h	Compte total du taux d'absorption micronivélé	nGy/h
37	DOSE_nGy/h	Taux d'absorption calculé en fonction des éléments	nGy/h
38	DOSEML_nGy/h	Taux d'absorption calculé en fonction des éléments	nGy/h
39	KAL_PCTS	Concentration de Potassium	%
40	KALML_PCTS	Concentration de Potassium micronivelée	%
41	URD_PPM	Concentration équivalente d'Uranium	ppm

42	URDML_PPM	Concentration équivalente d'Uranium micronivelée	ppm
43	THO_PPM	Concentration équivalente de Thorium	ppm
44	THOML_PPM	Concentration équivalente de Thorium micronivelée	ppm

Tableau 27 : Contenu de la base de données spectrométriques

9 RÉFÉRENCES DU PROJET

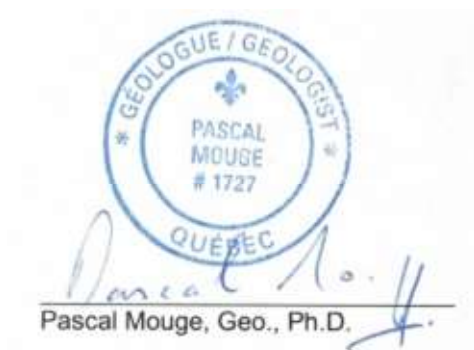
Références Client	
Projet	HADGR211022
Adresse	Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans, Cedex 02
Chef de projet	Guillaume Martelet
Courriel	g.martelet@brgm.fr
Téléphone	+33 (0)2 38 64 47 32
Références Novatem	
Contrat	C22172 (S220106)
Adresse	1087 Chemin de la Montagne Mont-Saint-Hilaire, Québec, Canada, J3G 4S6
Chef de projet	Pascal Mouge
Courriel	mouge@novatem.com
Téléphone	+1 514 966 8000 / +1 450 467 04 24
Références Projet	
Localisation	Ouest et Sud du Massif Central (France)
Méthode	Levé hélicopté magnétique et spectrométrie
Période du levé	Du 22 août au 27 novembre 2022
Date de livraison des données	Décembre 2022
Date de livraison du rapport	Janvier 2023
Gestionnaire du projet et responsable de la qualité des données	- Pascal Mouge, Ph.D., Géo. numéro 1727
Responsable du traitement des données	- Olivier Savignet, Ing.
Responsable de l'acquisition et des équipements	- Morten Skovgaard, M.Sc.
Responsable de l'acquisition sur le terrain	- Valentin Mulliez, M.Sc.
Commandants et AME	- Fabien Petit, Commandant - Benoit Levacher, Commandant - Gaëtan Apertet, Commandant - Dominique Descampe, Pilote entraîneur - Thierry Marcon, AME

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, Ph.D., Géo. numéro 1727

ANNEXES

ANNEXE A : PARAMÈTRES GÉODÉSIQUES 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 28 : 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 :	1 211
Nombre de points le long de l'axe Y:	1 478
Origine de la grille (min X, min Y):	X = 603 800 Y= 6 336 000
Système de coordonnées planes	Lambert France RGF93
Azimut des colonnes:	0

Tableau 29 : Paramètres des grilles pour le bloc d'Aurillac

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 :	369
Nombre de points le long de l'axe Y:	407
Origine de la grille (min X, min Y):	X = 653 800 Y= 6 421 400
Système de coordonnées planes	Lambert France RGF93
Azimut des colonnes:	0

Tableau 30 : Paramètres des grilles pour le bloc du Cantal

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 :	501
Nombre de points le long de l'axe Y:	517
Origine de la grille (min X, min Y):	X = 697 900 Y= 6 422 800
Système de coordonnées planes	Lambert France RGF93
Azimut des colonnes:	0

Tableau 31 : Paramètres des grilles pour le bloc du Puy

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 :	429
Nombre de points le long de l'axe Y:	306
Origine de la grille (min X, min Y):	X = 644 400 Y= 6 270 500
Système de coordonnées planes	Lambert France RGF93
Azimut des colonnes:	0

Tableau 32 : Paramètres des grilles pour le bloc de Castres

ANNEXE C : TEST DU RETARD INSTRUMENTAL

Date :	2022.10.19
Emplacement :	Viaduc de Garabit, Cantal, FR
Aéronef :	AS-350 B3 / F-GZSH
Instrument :	Magnétomètres embarqués G-822, 10 Hz
Température :	N/A
Pression :	N/A
Hauteur :	80 m AGL

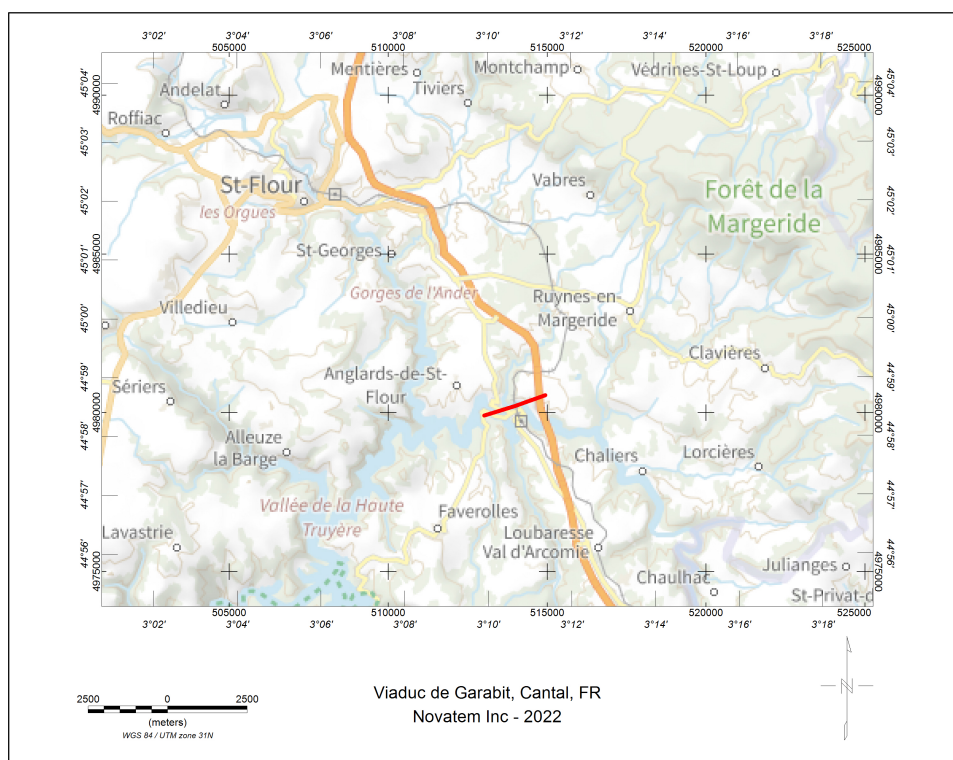


Figure 14 : Localisation du test du retard instrumental

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 4 reprises.

Les résultats suivants montrent que le décalage temporel dans les enregistrements des données est de 0.068 secondes (0.684 fitude), c'est-à-dire d'environ 2 m à la vitesse du levé.

Ligne	Cap (°)	Altitude (m)	Temps (hhmmss)	X (m)	Y (m)	Vitesse (m/s)	Mag (nT)
L1:0	248,8	883,72	13:13:27,8	713963,22	6430692,81	28,58	48014,68
L2:0	72,87	893,25	13:15:07,7	713966,09	6430693,47	28,62	47780,51

Vitesse moyenne = 28,600 m/s
 Distance = 2,945 m
 Décalage = 0,103 s

Ligne	Cap (°)	Altitude (m)	Temps (hhmmss)	X (m)	Y (m)	Vitesse (m/s)	Mag (nT)
L3:0	252,14	895,16	13:16:03,7	713959,42	6430696,58	32,85	47704,3
L4:0	71,22	896,19	13:17:39,2	713965,82	6430695,75	28,35	47722,61

Vitesse moyenne = 30,600 m/s
 Distance = 6,454 m
 Décalage = 0,211 s

Ligne	Cap (°)	Altitude (m)	Temps (hhmmss)	X (m)	Y (m)	Vitesse (m/s)	Mag (nT)
L5:0	251,06	894,09	18:59,8	713960,01	6430696,56	34,68	47727,82
L6:0	69,74	897,51	20:36,3	713964,55	6430696,4	28,97	47693,57

Vitesse moyenne = 31,825 m/s
 Distance = 4,543 m
 Décalage = 0,143 s

Ligne	Cap (°)	Altitude (m)	Temps (hhmmss)	X (m)	Y (m)	Vitesse (m/s)	Mag (nT)
L7:0	249,82	896,84	22:11,0	713962,35	6430692,7	33,4	47677,27
L8:0	72,77	889,68	24:04,5	713965,05	6430692,56	26,12	47881,43

Vitesse moyenne = 29,760 m/s
 Distance = 2,704 m
 Décalage = 0,091 s

Tableau 33 : Test du retard instrumental

ANNEXE D : COMPENSATION - FIGURE DE MÉRITE (FOM)

Date :	2022.08.28
Emplacement :	Aéroport d'Aurillac
Aéronef :	AS-350 B3 : F-GZSH
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

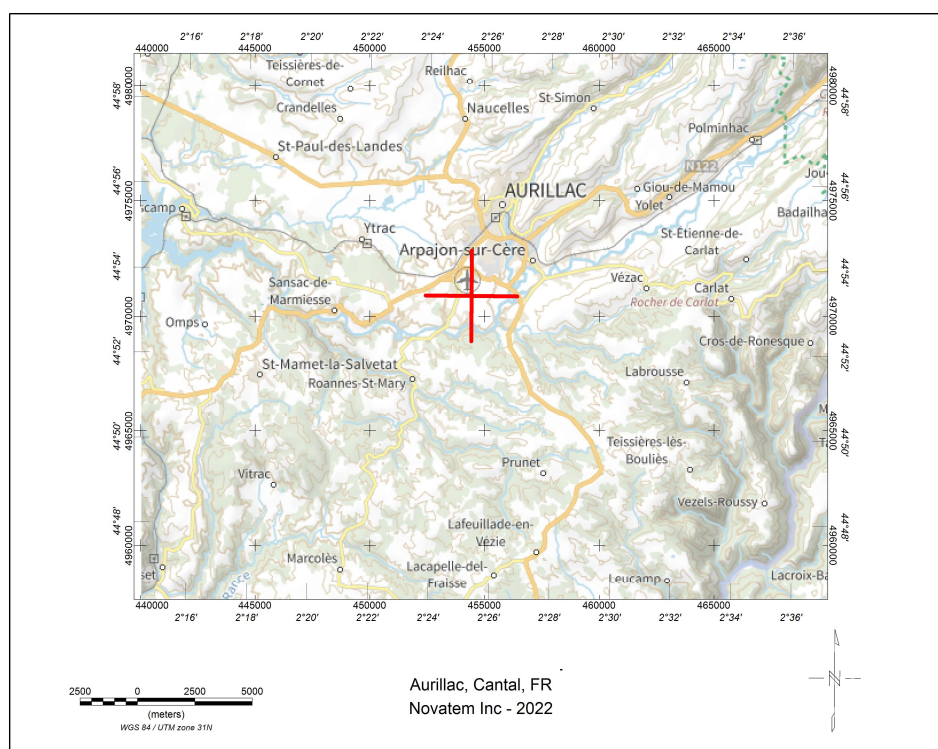


Figure 15 : Localisation du test de compensation

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	0,08	0,15	0,13	0,46
Tangage	0,12	0,15	0,06	0,15	0,48
Lacet	0,17	0,08	0,10	0,12	0,47
Somme	0,39	0,31	0,31	0,40	1,41

Tableau 34 : Résultats de la FOM

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. Les lignes surlignées n'ont pas été considérées dans le calcul des valeurs moyennes en raison des différences de hauteur au-dessus du sol trop importantes.

Ligne test pour Aurillac 1 (75 m)

Date :	2022.08.24 – 2022.11.27
Emplacement :	Aéroport d'Aurillac / Hauteur moyenne = 75 m
Aéronef :	AS-350 B3 : F-GZSH
Instruments :	Deux spectromètres RSI RSX500 33.44L down, 8.36L up, 1 Hz
Température :	N/A
Pression :	N/A
Hauteur :	80 m AGL

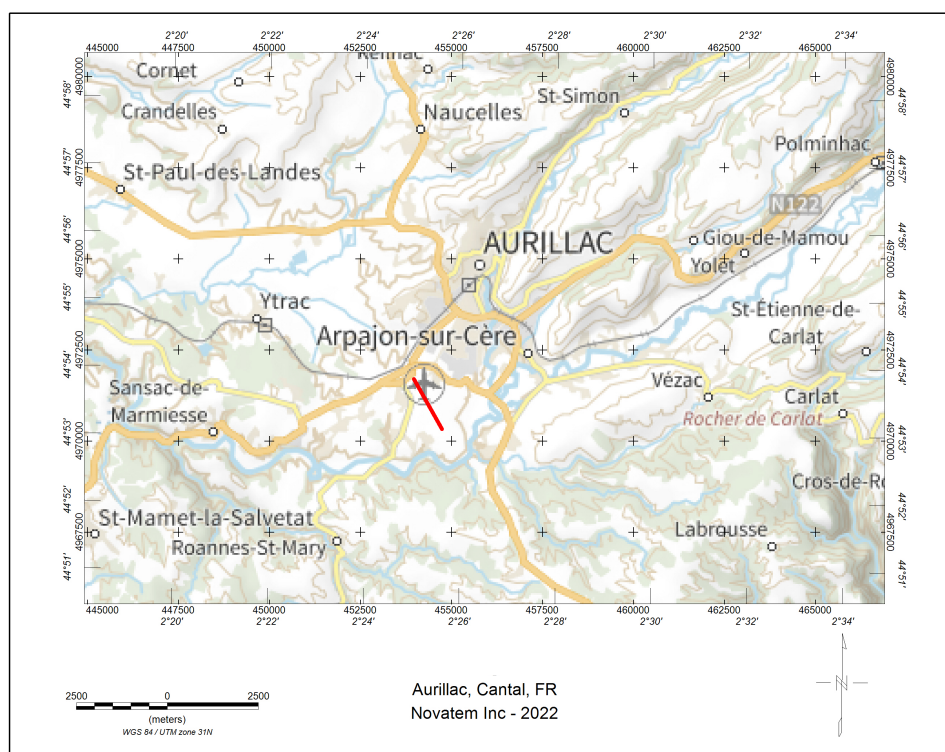


Figure 16 : Localisation de la ligne test (Aurillac 1)

Ligne	Hauteur radar m	Thorium cps	%
L22082417:0	74,55	79,41	-0,60 %
L22082506:0	75,47	76,43	-4,33 %
L22082515:0	69,46	77,68	-2,76 %
L22082608:0	74,53	79,97	0,10 %
L22082616:0	71,20	81,19	1,63 %
L22082707:0	75,75	77,37	-3,15 %
L22082907:0	75,17	79,97	0,10 %
L22083007:0	74,15	80,27	0,48 %
L22083016:0	73,50	84,00	5,15 %
L22083106:0	75,55	79,43	-0,57 %
L22083116:0	73,48	81,57	2,11 %
L22090107:0	73,85	79,40	-0,61 %
L22090115:0	67,85	84,06	5,22 %
L22090313:0	75,04	78,65	-1,55 %
L22090317:0	74,16	82,54	3,32 %
L22090412:0	75,07	80,78	1,12 %
L22090415:0	74,42	81,75	2,33 %
L22090507:0	74,31	76,92	-3,71 %
L22090515:0	75,63	80,61	0,90 %
L22090610:0	74,94	82,22	2,92 %
L22090906:0	75,35	77,63	-2,83 %
L22090914:0	74,29	76,63	-4,08 %
L22091007:0	74,67	80,42	0,67 %
L22091015:0	72,87	80,40	0,64 %
L22091107:0	74,91	76,75	-3,93 %
L22091115:0	68,62	80,24	0,44 %
L22091207:0	74,95	80,23	0,43 %
L22091215:0	73,24	84,17	5,36 %
L22091307:0	74,06	79,65	-0,30 %
L22091313:0	72,43	84,30	5,52 %
L22091407:0	74,82	77,49	-3,00 %
L22091507:0	75,29	77,28	-3,26 %
L22091515:0	75,31	78,47	-1,77 %
L22091608:0	74,81	81,50	2,02 %
L22091615:0	72,97	75,39	-5,63 %
L22091707:0	74,62	79,93	0,05 %
L22091715:0	74,57	81,02	1,42 %
L22092107:0	69,87	79,53	-0,45 %
L22092115:0	72,19	81,05	1,46 %
L22092206:0	72,52	79,20	-0,86 %
Valeur Moyenne	73,76	79,83	0,00 %

Tableau 35 : Variation des comptes du Thorium sur la ligne test d'Aurillac 1

Ligne test pour Aurillac 2 (65 m)

Date :	2022.08.24 – 2022.11.27
Emplacement :	Aéroport d'Aurillac / Hauteur moyenne = 65 m
Aéronef :	AS-350 B3 : F-GZSH
Instruments :	Deux spectromètres RSI RSX500 33.44L down, 8.36L up, 1 Hz
Température :	N/A
Pression :	N/A
Hauteur :	80 m AGL

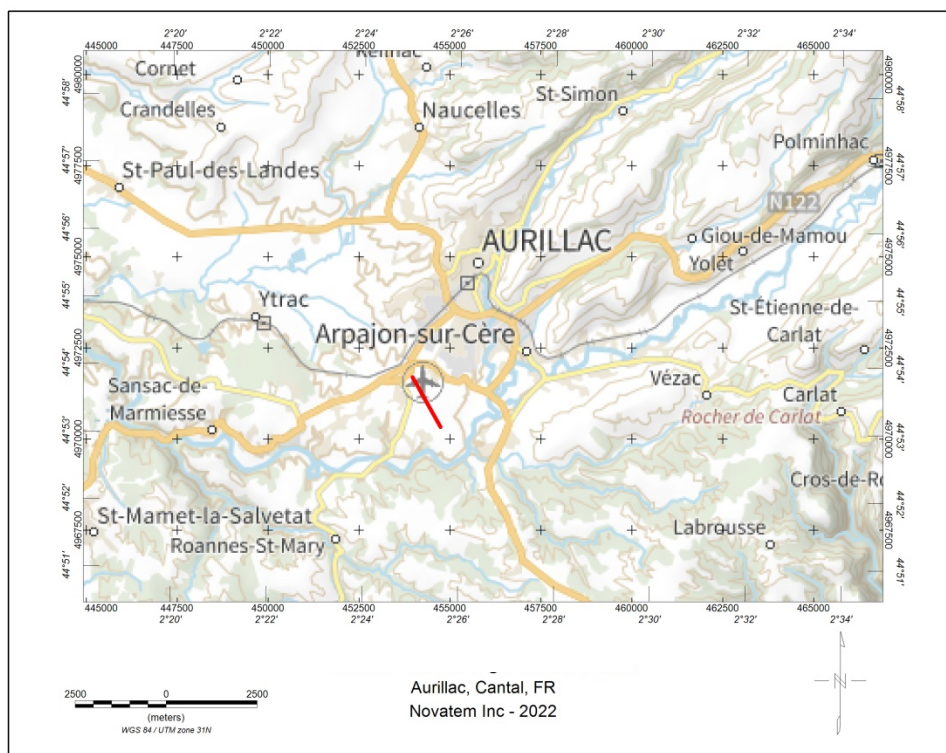


Figure 17 : Localisation de la ligne test (Aurillac 2)

Ligne	Hauteur radar m	Thorium cps	%
L22092411:0	54,14	88,27	13,11 %
L22092415:0	66,62	80,07	2,60 %
L22092611:0	66,36	78,85	1,04 %
L22100409:0	65,79	74,07	-5,08 %
L22100508:0	65,32	75,93	-2,70 %
L22100516:0	65,29	74,92	-3,99 %
L22100613:0	67,37	77,75	-0,37 %
L22100616:0	65,64	74,50	-4,53 %
L22100706:0	65,93	74,22	-4,89 %
L22100715:0	65,16	77,99	-0,06 %
L22100807:0	66,41	77,33	-0,91 %
L22100813:0	63,38	79,73	2,17 %
L22100907:0	64,34	77,30	-0,94 %
L22100915:0	60,42	80,17	2,73 %
L22101009:0	65,27	79,46	3,08 %
Valeur Moyenne	64,50	77,09	0,00 %

Tableau 36 : Variation des comptes du Thorium sur la ligne test d'Aurillac 2

Ligne test pour le Puy-en-Velay

Date :	2022.08.24 – 2022.11.27
Emplacement :	Aurillac / Loudes / Castres
Aéronef :	AS-350 B3 : F-GZSH
Instruments :	Deux spectromètres RSI RSX500 33.44L down, 8.36L up, 1 Hz
Température :	N/A
Pression :	N/A
Hauteur :	80 m AGL

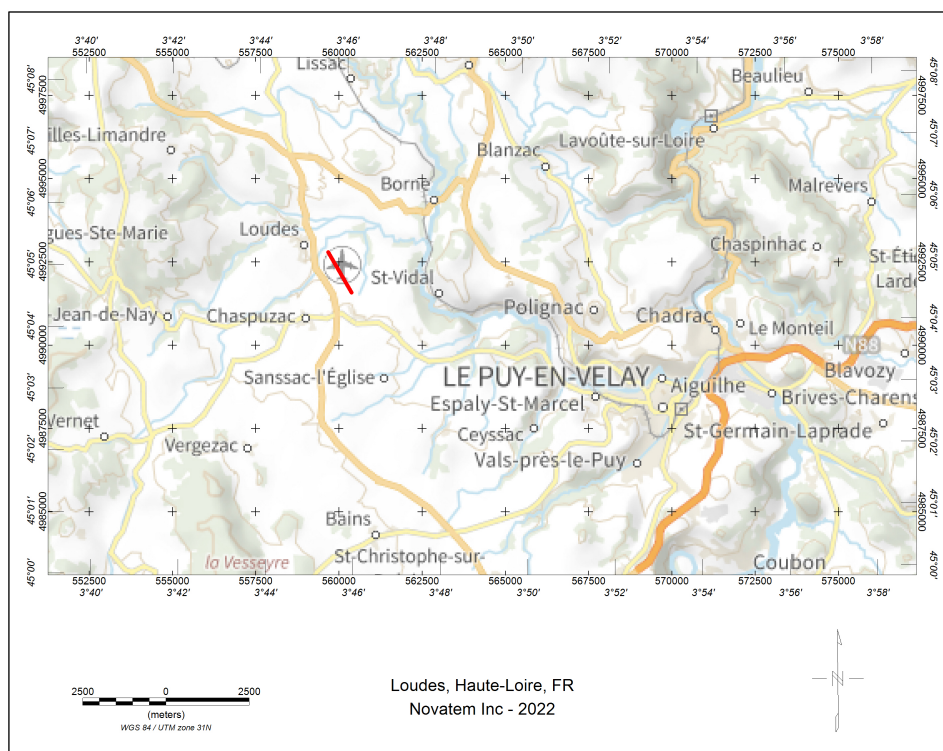


Figure 18 : Localisation de la ligne test (Le Puy-en-Velay)

Ligne	Hauteur radar m	Thorium cps	%
L22101013:0	78,77	33,17	-7,08 %
L22101110:0	73,99	35,07	-1,76 %
L22101114:0	75,31	34,60	-3,08 %
L22101213:0	71,71	35,23	-1,31 %
L22101313:0	69,78	37,71	5,63 %
L22101514:0	74,73	36,53	2,33 %
L22101611:0	74,45	36,39	1,94 %
L22101616:0	74,21	36,07	1,04 %
L22101809:0	74,99	36,47	2,16 %
L22101815:0	75,26	37,18	4,15 %
L22101907:0	74,59	35,43	-0,75 %
L22101915:0	75,00	36,82	3,14 %
L22102113:0	74,98	35,18	-1,45 %
L22102211:0	76,23	35,63	-0,19 %
L22102215:0	75,35	34,23	-4,11 %
L22102414:0	75,15	36,32	1,74 %
L22102510:0	75,60	35,24	-1,28 %
L22102512:0	73,94	36,52	2,30 %
L22102611:0	74,40	34,48	-3,41 %
Valeur Moyenne	74,65	35,73	0,00 %

Tableau 37 : Variation des comptes du Thorium sur la ligne test du Puy-en-Velay

Ligne test sur Castres

Date :	2022.08.24 – 2022.11.27
Emplacement :	Castres
Aéronef :	AS-350 B3 : F-GZSH
Instruments :	Deux spectromètres RSI RSX500 33.44L down, 8.36L up, 1 Hz
Température :	N/A
Pression :	N/A
Hauteur :	80 m AGL

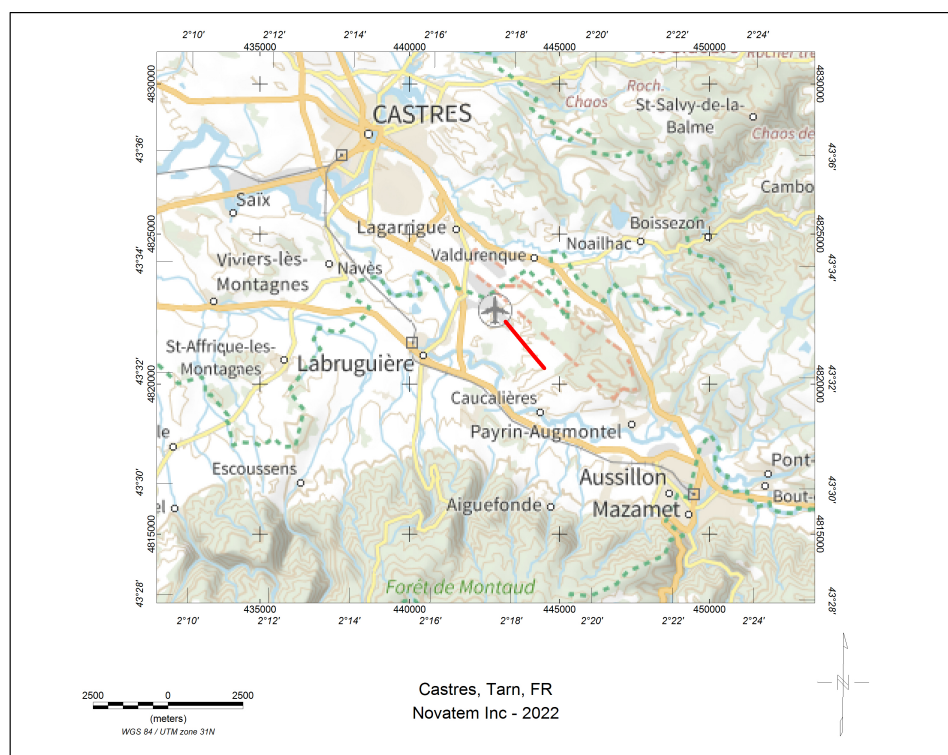


Figure 19 : Localisation de la ligne test (Castres)

Ligne	Hauteur radar m	Thorium cps	%
L22111713:0	80,52	19,32	3,02 %
L22112011:0	80,32	19,16	2,17 %
L22112014:0	78,20	17,86	-4,76 %
L22112410:0	86,31	17,70	-5,62 %
L22112413:0	77,95	19,01	1,37 %
L22112414:0	80,89	17,88	-4,66 %
L22112416:0	77,49	18,80	0,25 %
L22112612:0	80,63	18,24	-2,74 %
L22112616:0	78,45	20,62	9,95 %
L22112708:0	80,21	18,34	-2,20 %
L22112713:0	78,72	19,21	2,44 %
Valeur Moyenne	79,97	18,84	0,00 %

Tableau 38 : Variation des comptes du Thorium sur la ligne test de Castres

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

Date :	2022.10.26
Emplacement :	Lac de Naussac, Lozère
Aéronef :	AS-350 B3 : F-GZSH
Instruments :	Deux spectromètres, RSI RSX500, 33.44L down, 8.36L up, 1 Hz Spectromètre portable pour les mesures au sol
Température :	N/A
Pression :	N/A
Hauteur :	50 - 170 m AGL

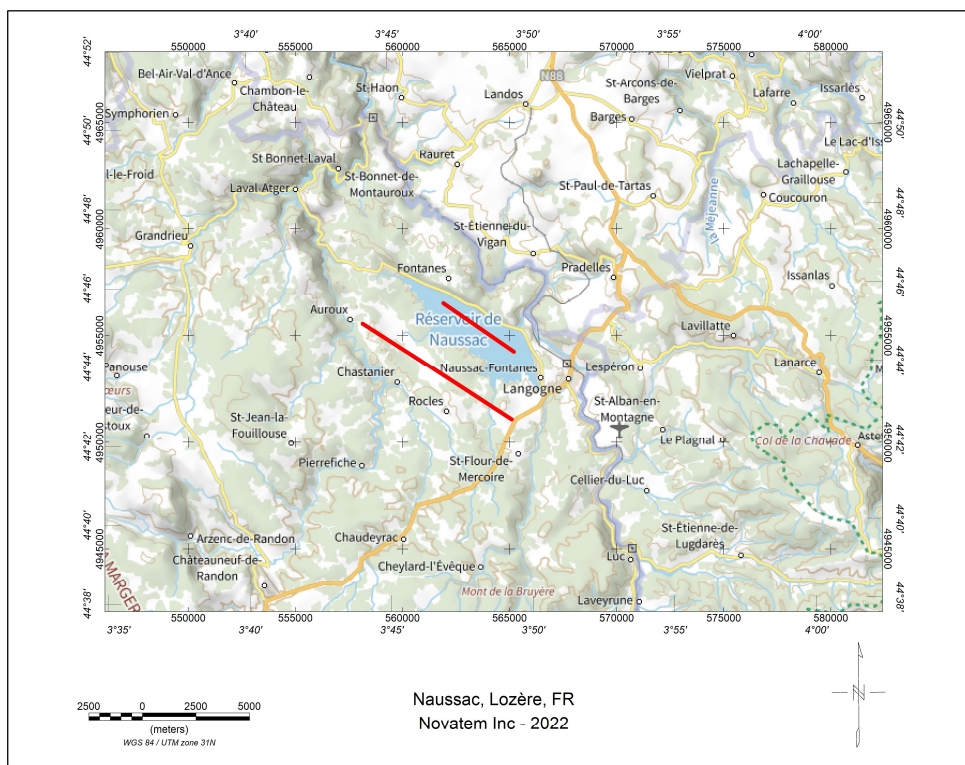


Figure 20 : Localisation de la ligne test

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	-0.00767 /m	-0.00946 /m	-0.00863 /m	-0.00748 /m
CONCENTRATION AU SOL	98.89 nGy/h	3.02 %	2.71 ppm	11.25 ppm
SENSITIVITY	25.46 cps/nGy/h	73.45 cps/%	10.94 cps/ppm	6.16 cps/ppm

Tableau 39 : Coefficients d'atténuation et sensibilité à 80m

Hauteur sol (m)	Hauteur stp (m)	Total Count	Potassium	Uranium	Thorium
85,85	70,51	2748,78	296,99	58,23	75,44
106,49	86,76	2375,85	250,48	50,85	65,29
127,26	102,97	2105,71	218,76	44,59	57,61
147,1	118,39	1850,20	188,10	38,69	50,38
167,36	134,45	1653,45	164,29	35,73	45,83
188,02	150,64	1463,44	140,39	30,93	39,96
208,24	166,40	1312,82	125,23	28,82	36,94

Tableau 40 : Comptes corrigés du bruit de fond et de l'effet Compton

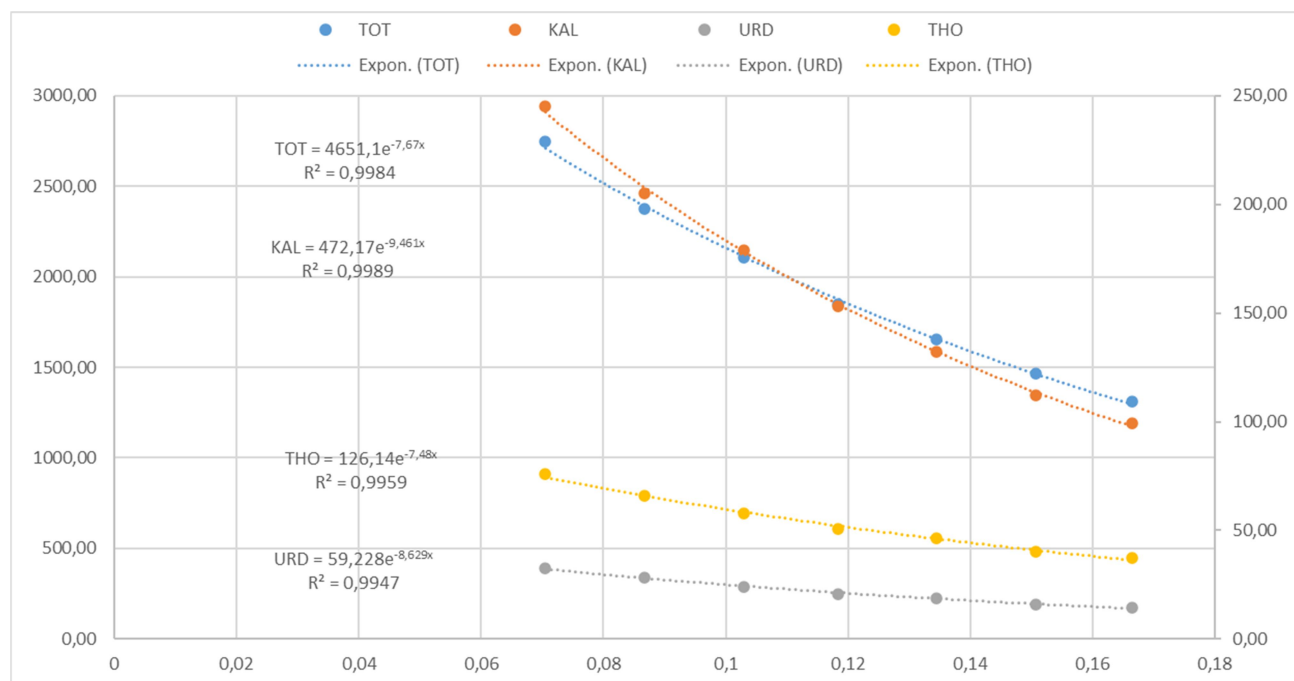


Figure 21 : Atténuation exponentielle avec la hauteur pour les quatre fenêtres

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

5875 Whittle Rd. Mississauga • Ontario Canada L4Z 2H4 • Tel (905) 890 1111 • Fax (905) 890 1964 • e-mail sales@radiationsolutions.ca



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

D-1067.00.00

Page 1 of 1

22 April 2015

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

Date :	2022.10.25
Emplacement :	Au Nord de Brioude, Haute-Loire
Aéronef :	AS-350 B3 : F-GZSH
Instruments :	Deux spectromètres, RSI RSX500, 33.44L down, 8.36L up, 1 Hz
Température :	N/A
Pression :	N/A
Hauteur :	1000 m - 4000 m ASL

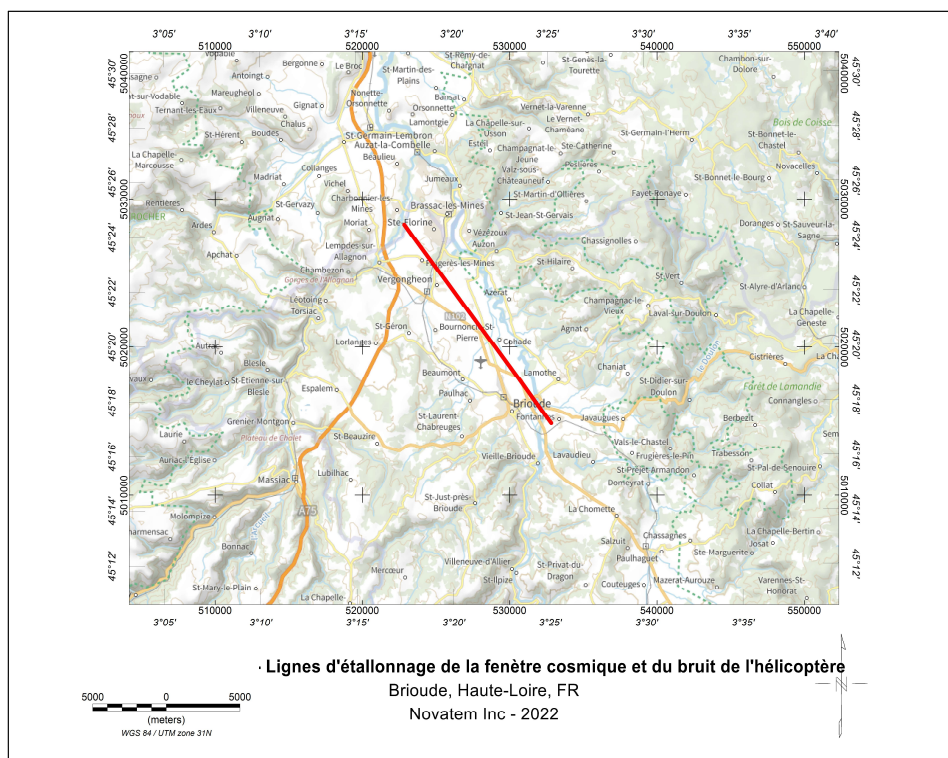


Figure 22 : Localisation de la ligne d'étalonnage

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 7 hauteurs équidistantes, de 1000 m à 4000 m. L'hélicoptère a volé à chaque hauteur pendant environ 5 minutes sur chaque palier afin de minimiser les erreurs statistiques.

Les résultats montrent une contamination des concentrations au sol uniquement sur les 3 paliers les plus bas (1000 m, 1500 m et 2000 m), visible par la rupture de pente sur les différents graphiques ci-dessous (points rouges). Il a donc été choisi de ne prendre que les 4 plus hauts paliers 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
1000	187	50	578	46	24	17	5
1500	229	60	452	37	20	15	5
2000	282	76	467	38	21	18	5
2501	354	95	511	41	22	23	6
2999	448	120	610	47	27	30	7
3501	567	154	748	54	33	37	9
4000	723	193	935	64	42	48	11

Tableau 41 : Taux de compte moyen sur les paliers cosmiques

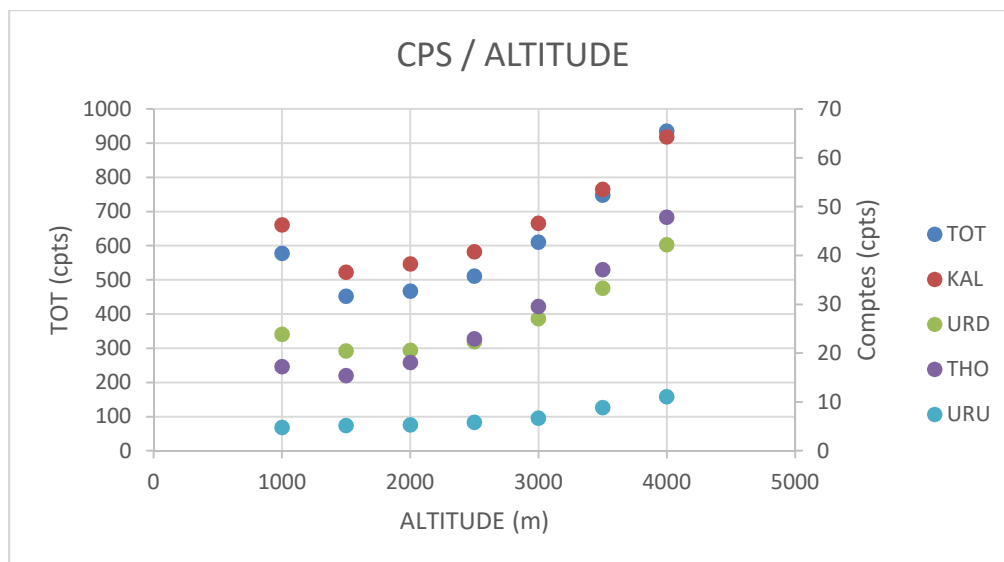


Figure 23 : Évolutions des comptes avec l'altitude

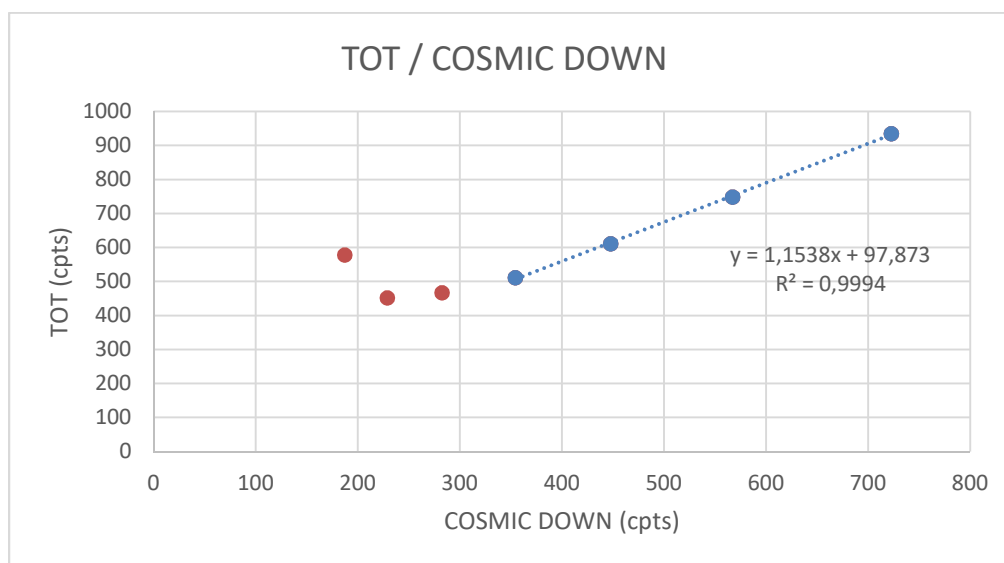


Figure 24 : Coefficients cosmiques pour le compte total

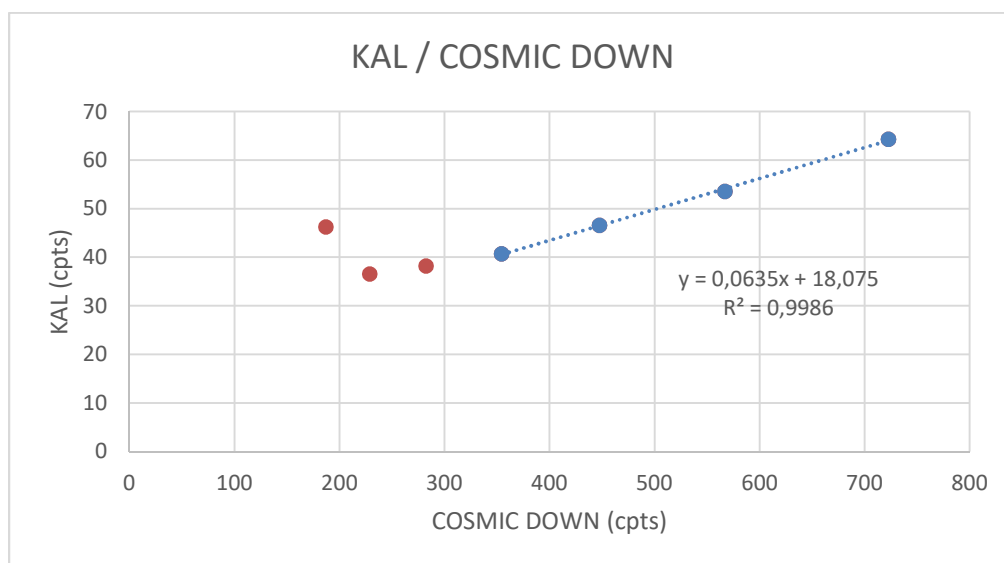


Figure 25 : Coefficients cosmiques pour le potassium

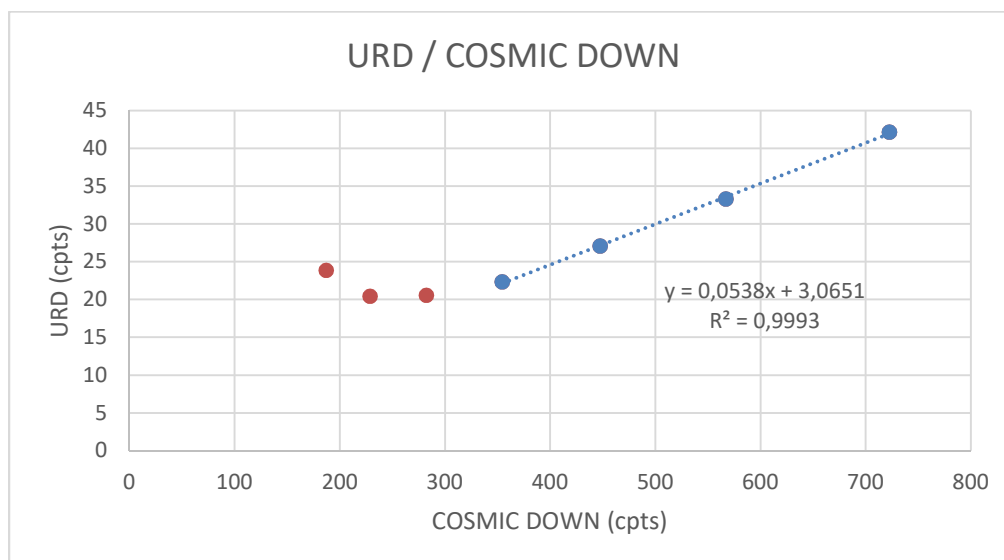


Figure 26 : Coefficients cosmiques pour l'uranium

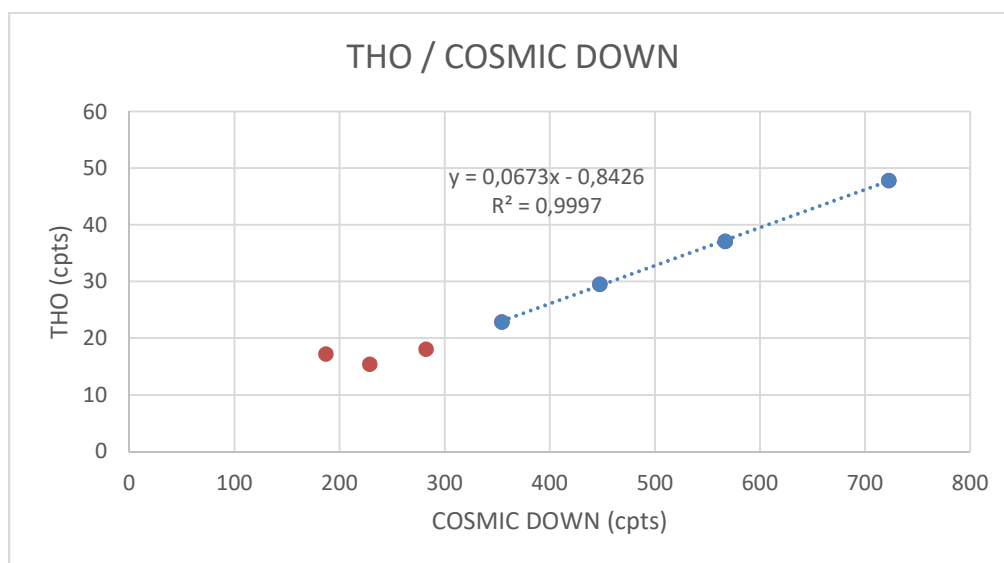


Figure 27 : Coefficients cosmiques pour le thorium

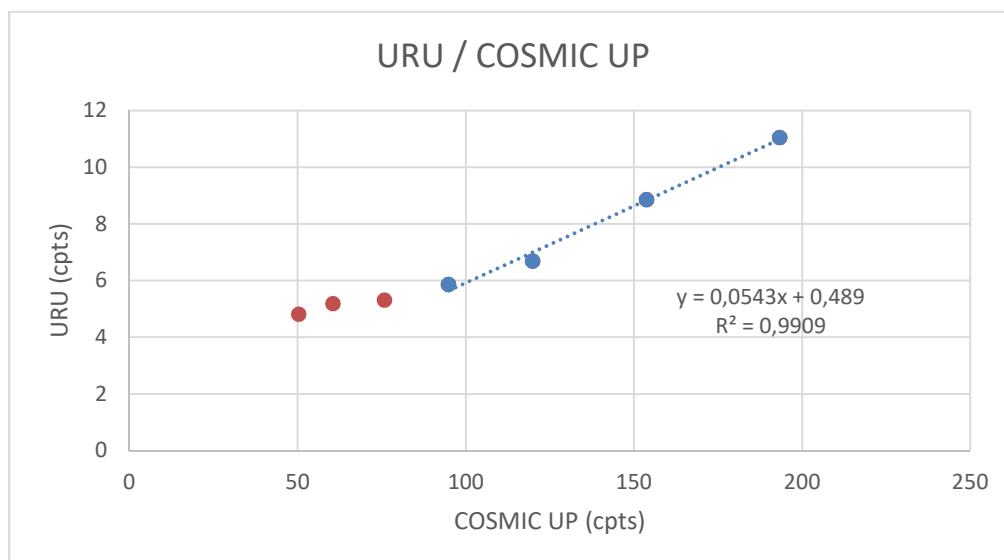


Figure 28 : Coefficients cosmiques pour l'uranium vers le haut

Background	Total Count	Potassium	Uranium	Thorium	Up Uranium
Aircraft	97.873	18.075	3.0651	0.8426	0.489
Cosmic	1.1538	0.0635	0.0538	0.0673	0.0543

Tableau 42 : Coefficients du bruit de fond

ANNEXE I : COEFFICIENTS DE LA CORRECTION DU RADON

Date :	2022.08.24 – 2022.11.27
Emplacement :	Loudes / Aurillac / Castres, FR
Aéronef :	AS-350 B3 : F-GZSH
Instruments :	Spectromètres, RSI RSX500, 33.44L down, 8.36L up, 1 Hz
Température :	N/A
Pression :	N/A
Hauteur :	80 m AGL

Figure 29 : Localisation des lignes tests

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 43 : 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).

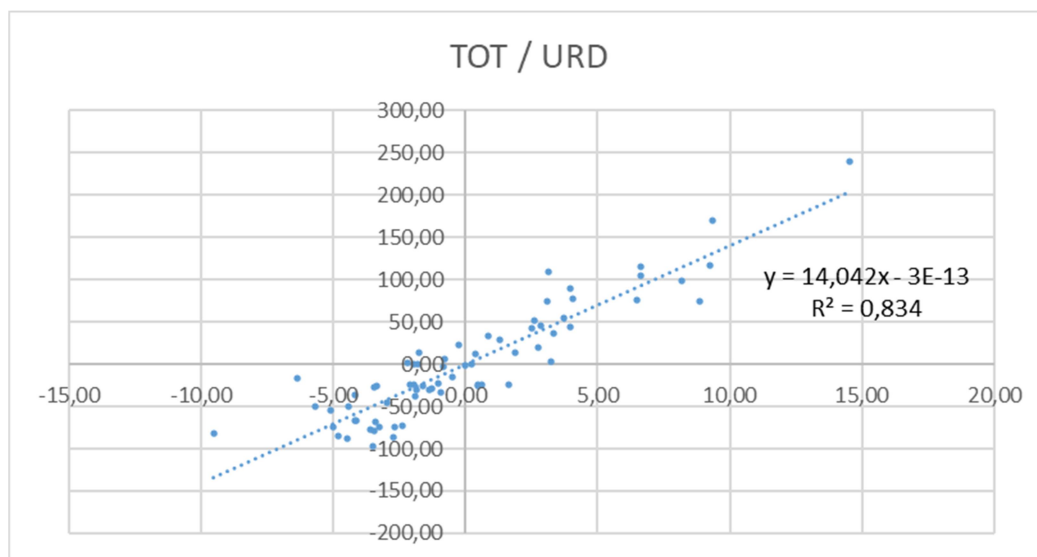


Figure 30 : Coefficients de correction du radon pour le compte total

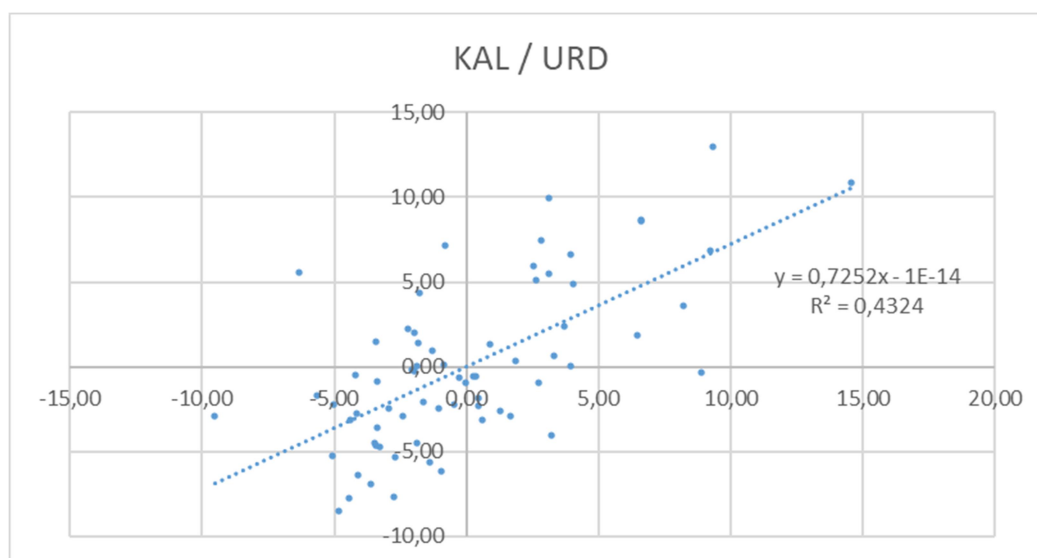


Figure 31 : Coefficients de correction du radon pour le potassium

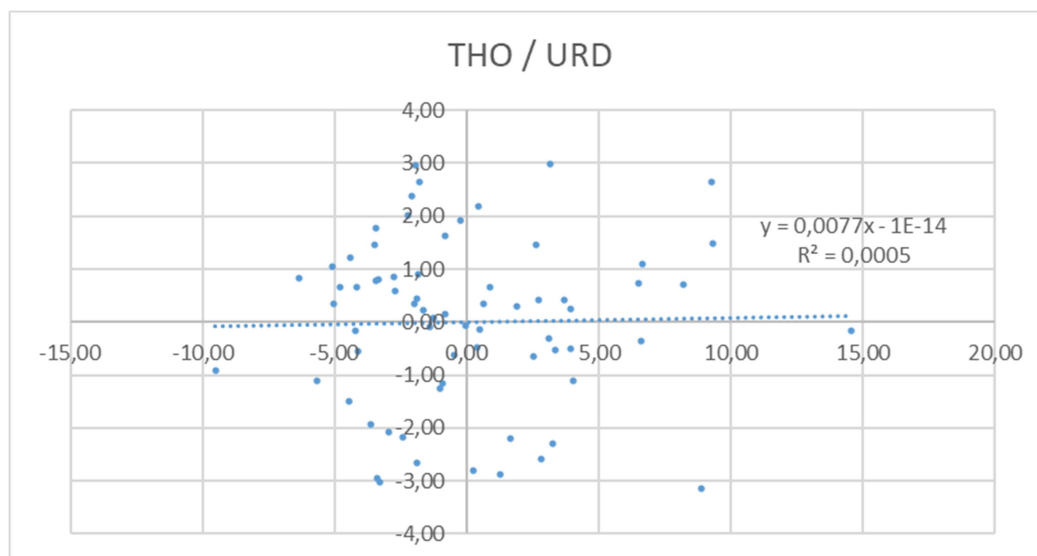


Figure 32 : Coefficients de correction du radon pour le thorium

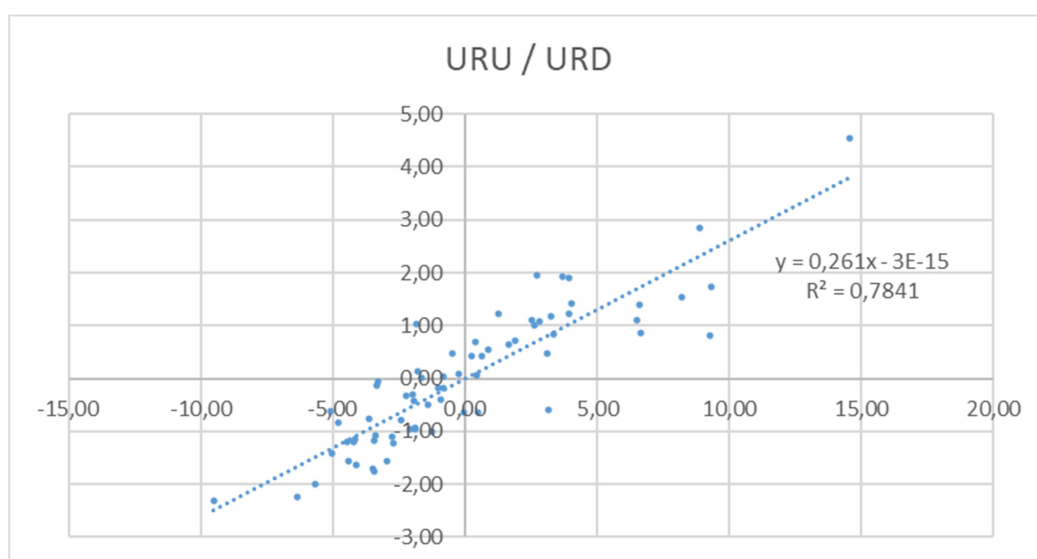


Figure 33 : Coefficients de correction du radon pour l'uranium vers le haut

Coefficient	Total Count	Potassium	Thorium	Up Uranium
a_n	14.042	0.7252	0.0077	0.2610
b_n	0	0	0	0

Tableau 44 : Coefficients de correction du radon