

GM 66045

LEVE MAGNETIQUE ET RADIOMETRIQUE AEROPORTE, CAMPAGNE DIANA

Documents complémentaires

Additional Files



Licence



Licence

Cette première page a été ajoutée
au document et ne fait pas partie du
rapport tel que soumis par les auteurs.

Énergie et Ressources
naturelles

Québec 

Octobre 2010

C10081_DIANA

**LEVER MAGNÉTIQUE ET RADIOMÉTRIQUE AÉROPORTÉ
EXPLORATION AZIMUT INC**

**CAMPAGNE DIANA
NUNAVIK, QUEBEC 2010**

NTS 24K

GM 66045

Ressources naturelles et Faune, Québec

10 JAN. 2012

DIR. INFORM. GÉOL.

MRNFP - SECTEUR DES MINES

RECU LE

9 NOV. 2011

Bureau régional - Montréal

1153454-==

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	3
2	SPÉCIFICATIONS DU LEVER	4
2.1	LOCALISATION DU LEVER	4
2.2	PARAMÈTRES DE VOL ET D'ACQUISITION DES DONNÉES	5
2.2.1.	HAUTEUR DE VOL AU-DESSUS DU SOL (SURFACE DRAPÉE)	5
2.2.2.	VITESSE	5
2.2.3	PLAN DE VOL ET DISTANCE CUMULÉE DES LIGNES DE VOL	6
3	LOGISTIQUE	7
3.1	SERVICES GÉOPHYSIQUES ET LOGISTIQUES	7
3.2	AÉRONEF	7
3.3	ÉCHÉANCIER	8
4	INSTRUMENTATION	8
4.1	SPECTROMÈTRES DU RAYONNEMENT GAMMA	8
4.2	MAGNÉTOMÈTRES	9
4.2.1	MAGNÉTOMÈTRES EN VOL	9
4.2.2	COMPENSATION	9
4.2.3	STATION DE BASE MAGNÉTOMÉTRIQUE	10
4.3	DGPS ET CALCULS DIFFÉRENTIELS APRÈS VOL	10
4.4	MESURES INERTIELLES ('INERTIAL MEASUREMENT UNIT')	10
4.5	NAVIGATION	11
4.6	ALTIMÈTRE LASER	12
4.7	SYSTÈME D'ACQUISITION ET D'ENREGISTREMENT DES DONNÉES	12
4.8	CALCULATEURS DE TERRAIN	12
4.9	PIÈCES DE RECHANGE	12
5	CONTRÔLES DE LA QUALITÉ DES DONNÉES	13
5.1	CONTRÔLE DES SPÉCIFICATIONS DE VOL	13
5.2	CONTRÔLE DES DONNÉES SPECTROMÉTRIQUES	14
6	TRAITEMENTS DES DONNÉES	14
6.1	RESTITUTION DES LIGNES DE VOL	14
6.2	TRAITEMENT DES DONNÉES MAGNÉTIQUES	15
6.2.1	CORRECTIONS DIURNES	15
6.2.2	CORRECTION DES ERREURS RÉSIDUELLES DE POSITIONNEMENT	15
6.2.3	CORRECTIONS RÉSIDUELLES	15
6.2.4	COMPENSATION	15
6.2.5	NIVELLEMENT MAGNÉTIQUE CONVENTIONNEL	17
6.2.6	NIVELLEMENT MAGNÉTIQUE DE NOVATEM INC.	17

6.3	TRAITEMENT DES DONNÉES DE SPECTROMÉTRIE DE RAYONNEMENT GAMMA	17
6.3.1	FILTRAGE PRÉLIMINAIRE	17
6.3.2	ANALYSE SPECTRALE ET LISSAGE PAR LA MÉTHODE NASVD	18
6.3.3	CORRECTION DU TEMPS D'ACQUISITION PAR SECONDE	18
6.3.4	CORRECTION DU RAYONNEMENT COSMIQUE ET DU BRUIT DE FOND DE L'AVION	18
6.3.5	SUPPRESSION DU RADON	18
6.3.6	RÉDUCTION À UNE PRESSION ET TEMPÉRATURE STANDARD (STP)	19
6.3.7	CORRECTION DE LA DIFFUSION COMPTON	19
6.3.8	CORRECTION DE L'ATTÉNUATION DE L'AIR	20
6.3.9	CONVERSION EN CONCENTRATION DE RADIOÉLÉMENTS	20
6.3.10	NIVELLEMENT	21
7	<u>DONNÉES FINALES</u>	21
7.1	DONNÉES NUMÉRIQUES (DVD)	21
7.2	CARTES	22
8	<u>CONCLUSION</u>	23
	<u>ANNEXES</u>	24
	ANNEXE A : PARAMÈTRES GÉODÉSQUES DU LEVER	24
	ANNEXE B : COORDONNÉES DES APEX DES BLOCS	25
	ANNEXE C : PARAMÈTRES DE FILTRAGE POUR LA SPECTROMÉTRIE	26
	ANNEXE D : CORRECTION DU RAYONNEMENT COSMIQUE ET DU BRUIT DE FOND DE L'AVION	27
	ANNEXE E : CALIBRATION DU DÉTECTEUR REGARDANT VERS LE HAUT POUR LA CORRECTION DU RADON	29
	ANNEXE F : ATTÉNUATION ET SENSIBILITÉ	32
	ANNEXE G : LIGNE TEST	34
	ANNEXE H : COMPENSATION BASÉE SUR UN MODÈLE PHYSIQUE	34
	PRINCIPE DE LA COMPENSATION ET DE LA CALIBRATION	35
	VOL DE CALIBRATION	35
	ESTIMATION DES COEFFICIENTS. PROBLÈMES DE COLINÉARITÉ ET "REGRESSION RIDGE"	35
	RÉSULTATS	36

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : DIANA	3
FIGURE 2 : LOCALISATION DU LEVER AU QUÉBEC, SUR FOND CARTOGRAPHIQUE	4
FIGURE 3 : PLAN DE VOL DU BLOC DIANA SUR FOND D'IMAGE SATELLITE	6
FIGURE 4 : SYSTÈME DE NAVIGATION EMBARQUÉ	11
FIGURE 5 : EXEMPLES DE COMPENSATION	16
FIGURE 6 : ATTÉNUATION EXPONENTIELLE AVEC LA HAUTEUR POUR LES QUATRE FENÊTRES	33
FIGURE 7 : FIGURE DE MÉRITE (FOM)	36

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : PARAMÈTRES DE VOL DU BLOC	5
TABLEAU 2 : DISTANCES LINÉAIRES PRÉVISIONNELLES ET VOLÉES	6
TABLEAU 3 : DESCRIPTION DES CARTES ET LEUR NUMÉRO ASSOCIÉ	22
TABLEAU 4 : PARAMÈTRES GÉODÉSQUES	24
TABLEAU 5 : PARAMÈTRES DES GRILLES MAGNÉTIQUES	24
TABLEAU 6 : PARAMÈTRES DES GRILLES RADIOMÉTRIQUES	24
TABLEAU 7 : COORDONNÉES DU BLOC DIANA	25
TABLEAU 8 : PARAMÈTRES DE FILTRAGE POUR LA SPECTROMÉTRIE	26
TABLEAU 9 : DONNÉES MOYENNÉES POUR CHAQUE PALIER	27
TABLEAU 10 : COEFFICIENTS DE BRUITS DE FOND	27
TABLEAU 11 : DONNÉES SUR LA LIGNE TEST (CPS)	32
TABLEAU 12 : DONNÉES DE BRUIT DE FOND (CPS)	32
TABLEAU 13 : COEFFICIENTS D'ENLÈVEMENT	32
TABLEAU 14 : COMPTES CORRIGÉS DU BRUIT DE FOND ET DE L'EFFET COMPTON (CPS)	33
TABLEAU 15 : COEFFICIENT D'ATTÉNUATION ET SENSIBILITÉ (100M)	33

1 INTRODUCTION

NOVATEM Inc a été mandatée par EXPLORATION AZIMUT INC pour réaliser un lever magnétique et spectrométrique aéroporté de très haute résolution dans le Nunavik, grand nord du Québec, dans le but d'évaluer les caractéristiques physiques des sols de la propriété DIANA. Cette campagne a débuté le 6 septembre 2010.

La zone survolée est localisée à une trentaine de kilomètres au nord-ouest de Kuujuaq et comprend un seul bloc : DIANA. L'ensemble du projet comptait 5 441 km linéaires. Finalement, 5 497 km linéaires ont été volés pour couvrir la totalité de la propriété.

En réponse à cette demande, NOVATEM a mis en œuvre son système aéroporté, développé spécialement pour la très haute résolution. Pour tenir compte des besoins spécifiques d'EXPLORATION AZIMUT, l'utilisation de deux spectromètres RS500 a été proposée, soit 2 x 16.72 litres de cristaux de NaI dirigés vers le bas et 2 x 4.18 litres dirigés vers le haut (41.8 litres au total). Deux magnétomètres à vapeur de Césium de GEOMETRICS ont été installés en bout d'ailes (wing tip pods). Les équipements connexes incluaient deux fluxgate d'APS, un système de positionnement DGPS de NOVATEL couplé à une centrale inertielle, un laser altimètre haute résolution d'Optech et une station de base GSM 19 magnétique et DGPS de GEM Systems.

L'avion utilisé, un Cessna C185 sur flotteurs, a un volume utile suffisant pour emporter deux spectromètres ainsi que la totalité des équipements électroniques. Il peut en outre voler lentement à basse altitude avec une réserve de puissance suffisante pour faire face à une situation dangereuse.

Ce rapport décrit le déroulement des opérations lors du lever, les équipements, les contrôles de qualité, et enfin l'acquisition et le traitement des données.



Figure 1 : Vol sur DIANA

2 SPÉCIFICATIONS DU LEVER

2.1 LOCALISATION DU LEVER

Le lever est situé à proximité de la Baie d'Ungava, à environ 30 km au nord-ouest de Kuujuaq, dans le Nunavik, dans le Grand Nord du Québec.



Figure 2 : Localisation du lever au Québec, sur fond cartographique

2.2 PARAMÈTRES DE VOL ET D'ACQUISITION DES DONNÉES

Les paramètres de vol pour chacun des blocs sont résumés dans les tableaux qui suivent.

Bloc DIANA :

Paramètres	Spécifications
Espacement entre les lignes de vol	200 m
Espacement entre les lignes de contrôle	2 000 m
Direction des lignes de vol	N 045
Direction des lignes de contrôle	N 135
Taux d'échantillonnage magnétique	10 Hz, 4.44m à 160 km/h
Taux d'échantillonnage spectrométrique	1 Hz, 44.4m à 160 km/h
Hauteur nominale de la surface drapée	100 m
Hauteur moyenne de la surface drapée	146.6 m
Hauteur moyenne réellement volée	146.7 m

Tableau 1 : Paramètres de vol du bloc

2.2.1. HAUTEUR DE VOL AU-DESSUS DU SOL (SURFACE DRAPÉE)

Les vols ont été réalisés en suivant une surface de vol préétablie selon les standards des levers aéroportés. Ces surfaces ont été calculées sous les recommandations de la Commission Géologique du Canada, et à l'aide d'un logiciel spécialement développé par cette dernière, en utilisant un modèle numérique de terrain issu de la navette spatiale américaine (fichiers SRTM, interpolés sur des mailles de 90m) et en tenant compte des capacités et de la charge réelle de l'avion. Cependant, le pilote a dû quitter sa trajectoire à quelques reprises, compte tenu de la très mauvaise résolution du SRTM dans la région. En comparant le DEM mesuré avec le SRTM disponible, on peut facilement localiser les endroits où le pilote n'a pu suivre la surface drapée. La garde au sol a toutefois été préservée au mieux à l'aide de l'altimètre laser embarqué.

La hauteur de vol proposée a été fixée à **100m** au-dessus du sol afin de couvrir toute la surface de la propriété. Ces paramètres ont pu être modifiés par le pilote, seul juge de la sécurité des vols, en fonction des conditions locales de vol (proximité des zones habitées, lignes électriques, constructions industrielles, vallée encaissée, etc.). En outre, la facilité pour le pilote de suivre ces paramètres varie principalement en fonction de la topographie des lieux et des courants d'air. La déviation acceptable, par rapport aux lignes de vol théoriques, est fixée à +/-100 m dans le plan horizontal, et à +/-30 m sur l'altitude à l'intersection des traverses et des lignes de contrôle.

2.2.2. VITESSE

Le nombre de comptes par seconde est d'autant plus élevé que la vitesse de l'avion est basse. Compte tenu de l'utilisation de deux spectromètres, soit 8 cristaux regardant vers le bas et deux cristaux orientés vers le haut, cette vitesse peut être le double de celle utilisant un seul spectromètre. Mais compte tenu par ailleurs du milieu très humide de la région à cartographier (présence de neige et de glace durant la plus grande partie de l'année), une vitesse la plus basse possible reste néanmoins très importante. Là encore l'utilisation d'un avion de type Cessna C185 est un atout puisque la vitesse de décrochage est de seulement 50 kts (93 km/h). Une vitesse en lever de **85 nœuds** (160 km/h) a donc été proposée (vitesse mesurée au-dessus d'une surface plane). Avec une cadence d'échantillonnage de 10 mesures par seconde (10 Hz), les mesures magnétiques sont ainsi espacées en moyenne d'environ 4,4 m et de 44m pour les mesures spectrométriques, mesurées à chaque seconde (1Hz).

2.2.3 PLAN DE VOL ET DISTANCE CUMULÉE DES LIGNES DE VOL

La figure qui suit présente les limites du plan de vol prévisionnel en utilisant les coordonnées fournies par EXPLORATION AZIMUT. Les plans de vol ont été calculés à l'aide des coordonnées communiquées par EXPLORATION AZIMUT dans le système rectangulaire NAD83, UTM 19N. Les paramètres géodésiques utilisés pour la projection en données planes, les transformations de coordonnées ainsi que l'ensemble des coordonnées des apex des blocs sont notés dans l'annexe B. Le tableau 2 qui suit donne le kilométrage prévisionnel, calculé pour l'ensemble des zones ci-dessus et à l'aide des paramètres envisagés par EXPLORATION AZIMUT. La figure 3 montre les plans de vol théoriques sur fond d'image satellite.

Blocs	Prévisionnel	Volé
Bloc DIANA	5 441 km	5 497 km

Tableau 2 : Distances linéaires prévisionnelles et volées

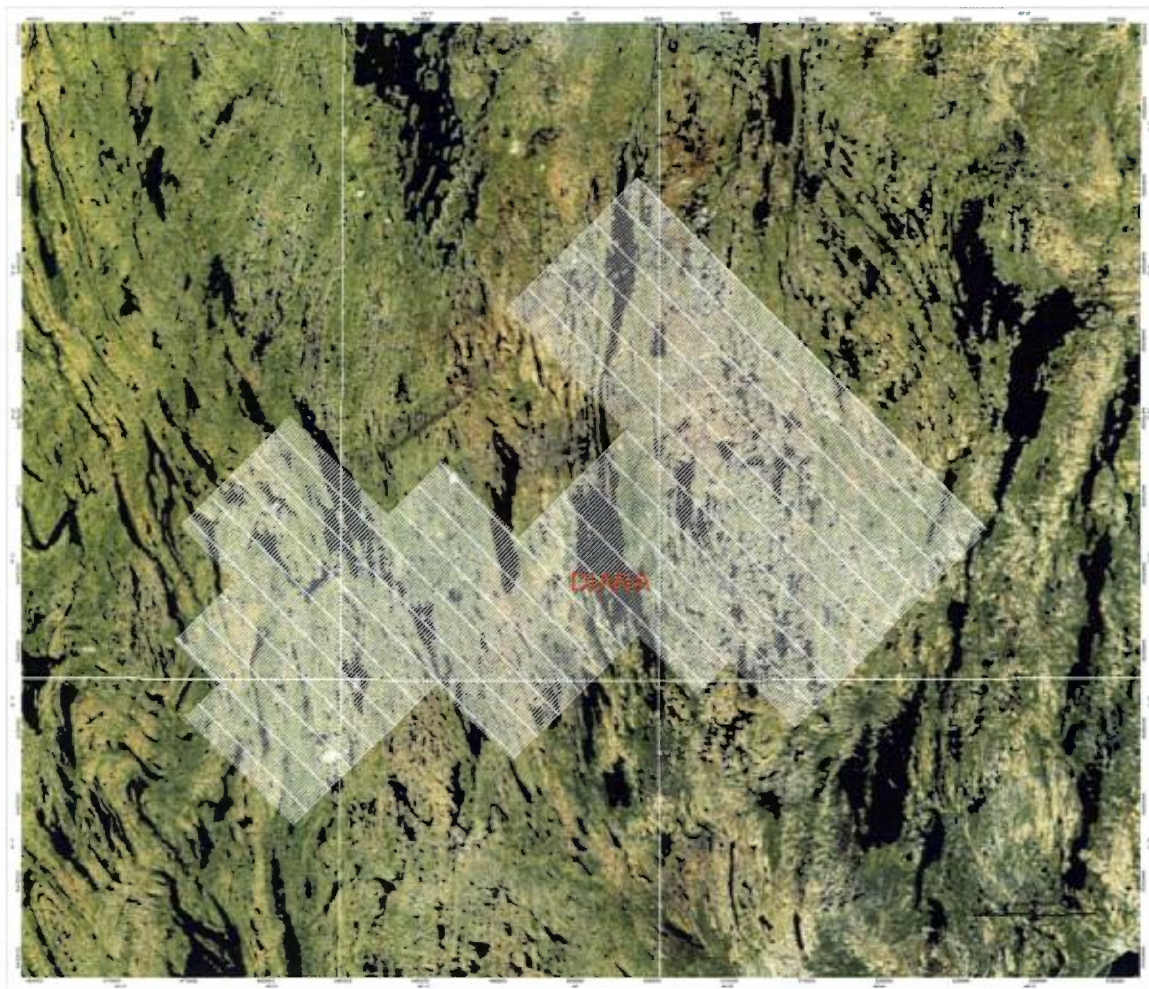


Figure 3 : Plan de vol du bloc DIANA sur fond d'image satellite

3 LOGISTIQUE

3.1 SERVICES GÉOPHYSIQUES ET LOGISTIQUES

NOVATEM a pris en charge les éléments suivants :

- Mise à disposition du personnel qualifié nécessaire au bon déroulement du lever jusqu'à son terme
- Fourniture des équipements techniques nécessaires ainsi que des pièces de rechange pour réaliser le lever dans les meilleurs délais
- Fourniture de l'avion et du carburant
- Obtention des autorisations de vol
- Supervision du bon fonctionnement de l'avion et assistance aux pilotes et mécaniciens
- Traitement préliminaire et contrôles de la qualité des données géophysiques sur le site
- Préparation et fourniture des produits définis au paragraphe 6.

La campagne aéroportée a été réalisée par le personnel listé ci-dessous. L'acquisition, le traitement et la présentation des données ont été entièrement effectués par le personnel qualifié de NOVATEM.

Pascal Mouge, Ph. D.	Géophysicien / Superviseur
Olivier Boulanger, géo, Ph. D.	Géophysicien / Contrôle qualité
Olivier Savignet, Ing. Jr.	Directeur de projet / Traitement des données
Xavier Tremblay, Ing. Jr.	Ingénieur en charge des opérations
Jérémy Largeaud, Ing. Jr.	Maintenance des équipements
Jean Blanchard	Logistique Air Tamarac
Michel Tremblay	Pilote
BL Aviation	Entretien de l'aéronef

3.2 AÉRONEF

NOVATEM a réalisé l'ensemble du lever à l'aide d'un hydravion **Cessna C185**, immatriculé C-FARU, spécialement modifié pour des levés magnétiques et radiométriques de haute résolution. Cet aéronef a l'autonomie suffisante et les capacités nécessaires pour réaliser le lever dans les meilleures conditions, les meilleurs délais et au meilleur coût. Tous les ravitaillements en carburant se sont fait sur place avec des barils livrés spécialement pour les besoins du lever.

Par ailleurs, le Cessna C185 est muni de flotteurs entièrement étanches ce qui garantit l'absence d'eau qui pourrait nuire aux mesures radiométriques. À cet effet, des trappes circulaires de grande dimension sont aménagées sur le dessus de chaque flotteur de manière à faire une inspection rigoureuse de l'étanchéité.

L'installation des équipements a été effectuée dans les locaux de BL Aviation à St-Mathias. Compte tenu des besoins de très haute résolution de la compagnie EPLORATION AZIMUT pour ce lever, deux spectromètres ont été fixés sur le plancher de l'avion. L'espace nécessaire pour loger ces équipements est largement suffisant avec cet appareil. Les équipements ont été testés au sol puis en vol avant le début des opérations afin de valider le bon fonctionnement de l'ensemble du système. Le système géophysique aéroporté COLIBRI de NOVATEM est couvert par un STC émit par Transport Canada.

3.3 ÉCHÉANCIER

Les premiers tests ont été réalisés au court de la première semaine de juillet 2010. La production a débuté le **6 septembre 2010** et s'est terminée le **12 septembre 2010**. Les données préliminaires ont été produites sur le terrain au fur et à mesure de la progression du travail au jour le jour.

Toutes les phases du lever, en particulier de planification, ont été coordonnées avec le représentant sur place d'EXPLORATION AZIMUT pour satisfaire sa demande. L'ensemble du calendrier des opérations a été détaillé dans les carnets de route livrés quotidiennement au responsable du projet chez EXPLORATION AZIMUT.

4 INSTRUMENTATION

Les équipements de mesure géophysique montés sur le système déployé pour la campagne DIANA 2010 incluent principalement :

- Deux spectromètres RS500 (Radiation Solution Inc)
- Deux magnétomètres à pompage optique à vapeur de césium (GEOMETRICS), utilisés pour mesurer en vol l'intensité du champ magnétique total
- Un système de navigation et d'acquisition de données propre à Novatem
- Un système de positionnement DGPS double fréquence (Novatel) couplé à une centrale inertielle (HONEYWELL)
- Deux magnétomètres fluxgates numériques (APS), avec un taux d'échantillonnage élevé utilisés pour la compensation
- Une station de base magnétométrique, équipée d'un capteur de haute résolution pour la correction des variations temporelles du champ magnétique, installée sur le lever durant toute la durée des travaux
- Une station de base DGPS utilisé pour le post-traitement différentiel
- Un altimètre laser mesurant la hauteur de vol par rapport au sol (Optech)

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. A la fin du lever, les instruments ont de nouveau été testés afin de valider la qualité et la constance des données.

4.1 SPECTROMÈTRES DU RAYONNEMENT GAMMA

NOVATEM utilise deux spectromètres digitaux de très grande sensibilité RS500, fabriqués par Radiation Solution Inc. Chaque spectromètre comprend un détecteur RSX-5 utilisant 4 cristaux sondant vers le bas et un cristal sondant vers le haut, soit un total pour les deux spectromètres, de 33.44 litres de NaI regardant vers le bas et 8.36 litres de NaI regardant vers le haut (41.8 litres au total ; 4.18 litres par cristal), couplés avec un système PMT qui fournit des mesures digitales précises directement interprétables par le module ADS (Advanced Digital Spectrometer).

Le module ADS traite les pulses de rayonnement gamma pour produire un spectre de 1024 canaux, complètement linéarisé. Ce même spectre peut être étudié de manière plus précise avec le logiciel Radassist.

Tous les spectres sont envoyés au processeur pour sommation et analyse du gain, via une connexion RS485 à 1Mbps/sec. Le spectromètre RSI, est capable de délivrer un spectre

proprement linéarisé, même pour des vitesses de transfert de données élevées et ce jusqu'à 10 mesures par seconde. Le format natif du système est de 1024 canaux mais l'utilisateur peut choisir d'opérer à des résolutions de 256, 512 ou 1024 canaux selon les exigences de son application particulière. Étant donnée la hauteur de vol et la vitesse à laquelle le lever a été effectué, une résolution de 512 canaux est appropriée pour repérer les pics d'Uranium avec une précision suffisante.

La console ajuste de manière automatique le gain de chacun des détecteurs pour compenser les effets de température et de dérive temporelle. Le système utilise les isotopes naturellement présents dans tous les types de sols pour stabiliser le spectromètre lors du démarrage, et ainsi maintenir ce gain de façon automatique tout au long du lever, sans aucune intervention de l'utilisateur. Cette technologie toute récente utilise une stabilisation basée sur plusieurs pics, pour une calibration typiquement de 10 à 20 fois plus rapide que des systèmes plus anciens. Le spectromètre RS500 est auto calibré, et ne nécessite donc pas de tests quotidiens avec une source radioactive.

Les spectromètres sont reliés à leur propre sonde thermique et barométrique (Honeywell) ayant des résolutions de 0.1 °C et de 0.01 kPa. Tous les spectromètres ont fait l'objet d'une calibration complète chez le constructeur, au mois de juin 2010.

4.2 MAGNÉTOMÈTRES

4.2.1 MAGNÉTOMÈTRES EN VOL

Deux capteurs scalaires Geometrics 823A mesurent le champ total en synchronisation avec les données du GPS, toutes les 0.1 secondes (10 Hz).

SPÉCIFICATIONS	
Taux d'échantillonnage	10 Hz
Précision en vol	< 0.1 nT
Sensibilité	< 0.003 nT à 10 Hz
Résolution	0.0001nT
Plage de fonctionnement	20 000 à 100 000 nT
"Heading error"	± 0.15 nT

4.2.2 COMPENSATION

Les bruits magnétiques de l'avion (aimantations induits et permanentes, et les courants de Foucault) sont mesurés en temps réel par le système de compensation. Celui-ci utilise deux fluxgates APS 1540 et des mesures d'angles d'attitude fournis par la centrale inertielle. Le logiciel de compensation utilise les composantes magnétiques qui lui sont fournies par les magnétomètres à vanne de flux avec une très grande vitesse d'échantillonnage utilisant un convertisseur digital de 24 bits.

SPÉCIFICATIONS	
Bruit magnétique	< 0.3 nT
Résolution	± 0.1 nT
Plage de fonctionnement	± 65 µT
Taux d'échantillonnage	125 mesures/sec
Orthogonalité des axes	Meilleure que ± 0.2°

4.2.3 STATION DE BASE MAGNÉTO MÉTRIQUE

Une station de base GEM Systems GSM19 équipée d'un senseur de haute résolution a été installée à l'hydrobase loin des installations électriques du camp. À l'issue de chaque vol, les données de la station étaient sauvegardées puis transférées sur l'ordinateur du camp de base pour y être inspectées et réaliser les corrections nécessaires à la production des produits préliminaires.

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

4.3 DGPS ET CALCULS DIFFÉRENTIELS APRÈS VOL

Un récepteur DGPS double fréquence Novatel Propack-V3 est utilisé pour le positionnement en vol. Une correction SBAS est calculée en temps réel à l'aide du réseau de satellites CDGPS. Les coordonnées des lignes de vol sont préprogrammées et sont comparées en temps réel avec la trajectoire donnée par le système de navigation.

Les positions différentielles ont finalement été recalculées après les vols à l'aide du logiciel Waypoint GrafNav de Novatel.

Spécifications	
Échantillonnage	10 Hz
CDGPS L1/L2	10 cm
Réacquisition L1	0.5 s
Réacquisition L2	1 s
Précision du temps	20 ns

4.4 MESURES INERTIELLES ('INERTIAL MEASUREMENT UNIT')

Une centrale inertielle Honeywell HG 1700 AG62, est utilisée pour la mesure des angles d'attitude nécessaires à la correction des gradients magnétiques. Les trois angles d'attitude (roulis, tangage, lacet) sont mesurés avec une très grande vitesse d'échantillonnage (entre 100 et 600Hz) puis ramenés à la même cadence que les autres mesures (10Hz). La centrale inertielle continue en outre de fournir le positionnement en temps réel avec une précision centimétrique en cas de perte du signal GPS.

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

La centrale inertielle proposée est utilisée sous couvert d'une 'Attestation de Sécurité du Gouvernement du Canada' conformément au 'Programme Canadien des Marchandises Contrôlées'.

4.5 NAVIGATION

Un système de navigation développé conjointement par Softnav et NOVATEM, spécifiquement pour les levés géophysiques héliportés et aéroportés, a été utilisé. Le pilote disposait face à lui de toutes les informations nécessaires pour suivre ses lignes de vol et sa surface drapée ; d'une part sur un écran de haute luminosité, et d'autre part sur un 'barre graphe' constitué de diodes lumineuses et de quatre fenêtres digitales l'informant des principaux paramètres de navigation. Le système fournit en outre au pilote des indices sur la qualité des mesures : si un au moins de ces indices passe au rouge, le pilote cesse immédiatement son vol et rentre à sa base.



Figure 4 : Système de navigation embarqué

Les figures ci-dessous montrent la navigation lors d'une phase d'approche.



Puis lors d'une phase d'acquisition une fois l'avion arrivé sur sa ligne (les deux lignes rouges représentent la distance latérale permise pour rester dans la tolérance)



4.6 ALTIMÈTRE LASER

Un altimètre laser de très haute résolution, fabriqué par Optech, interfacé numériquement avec le système d'acquisition, enregistre la hauteur de l'avion au-dessus du sol. Ce laser est placé directement sous le châssis de l'appareil pour un positionnement vertical optimum. La précision absolue du modèle utilisé est de 1cm. Il ne nécessite aucune calibration.

Spécifications	
Échantillonnage	10 Hz (100 Hz max)
Précision	1 cm
Résolution	1 mm
Couleur	904 nm (IR)
Divergence	0.3°

4.7 SYSTÈME D'ACQUISITION ET D'ENREGISTREMENT DES DONNÉES

Un système d'acquisition développé par Softnav et NOVATEM est utilisé. Les données sont enregistrées et sauvegardées à l'issue de chaque vol. Les données suivantes sont enregistrées :

- Numéro de ligne
- Temps GPS
- X, Y, NAD83 UTM 18N
- Z, WGS84
- Facteurs de qualité (PDOP, etc.)
- Roulie, lacet et tangage de l'appareil
- Latitude, Longitude, WGS84
- Hauteur laser
- Surface drapée théorique (SRTM, 90m)
- Champ magnétique total
- Composantes vectoriels du champ magnétique total
- Taux de compte des fenêtres du Potassium, de l'Uranium, du Thorium et taux de compte total ainsi que les deux spectres regardant vers le haut et vers le bas

Le retard instrumental du système d'acquisition est normalement inférieur à 0.1s, en raison des hautes performances du logiciel d'acquisition et de l'ordinateur embarqué.

- L'horloge de l'ordinateur est ajustée puis synchronisée par le signal PPS avec le temps GPS du récepteur Novatel
- La précision est supérieure à 0.001 seconde (toute latence est éliminée)
- Les données en provenance des périphériques sont traitées de manière indépendante et non séquentiellement

4.8 CALCULATEURS DE TERRAIN

Deux PC dédiés aux mesures de terrain servent à l'analyse de la qualité des données, au tracé de la navigation et des mesures brutes ainsi qu'à l'archivage après les vols.

4.9 PIÈCES DE RECHANGE

Un jeu normal de pièces de rechange et d'instrumentation nécessaire au bon fonctionnement et à la vérification des appareils est disponible sur le terrain. Un jeu complet de pièces de rechange est disponible dans les locaux de NOVATEM au Québec.

5 CONTRÔLES DE LA QUALITÉ DES DONNÉES

Pendant le lever, 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 lever, les contrôles servent à s'assurer notamment que :

- Les spécifications sont appropriées pour les cibles envisagées
- 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 lever dans les délais attendus
- Les outils de maintenance et les pièces détachées de l'avion 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 de la qualité des données et 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.

5.1 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
- Filtrage de l'altimètre laser sur des données à 10 Hz
- Contrôle de la vidéo
- Vérification des données brutes de la station DGPS de référence

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

- L'espacement entre les points de mesure (vitesse de l'avion)
- 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.

Un plan de vol préliminaire est tracé et inspecté au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

5.2 CONTRÔLE DES DONNÉES SPECTROMÉTRIQUES

Novatem Inc. effectue les tests de calibration et de contrôle qualité suivants:

- Survol quotidien d'une même ligne test, pour vérifier la sensibilité du système, détecter tout changement du niveau de radioactivité de l'avion, et enfin suivre l'effet des variations d'humidité du sol sur le lever (Variation de la concentration du Thorium inférieure à 10% après correction sur chaque vol)
- Paliers de calibration en haute altitude sur la zone de lever, afin de déterminer les coefficients de bruit cosmique et le bruit de fond de l'avion
- Détermination des coefficients d'atténuation en fonction de l'altitude à partir de vols réalisés à différentes altitudes
- Détermination des coefficients de sensibilité pour la conversion des taux de comptage mesurés en teneur équivalente
- Calibration des effets du radon atmosphérique
- Contrôle de la résolution du spectromètre gamma
- Contrôle de stabilité de la sensibilité du système par rapport aux calibrations antérieures

Les tests menés sur le terrain et les résultats obtenus pour les coefficients utilisés au cours du traitement sont détaillés dans les annexes D à G.

Les vérifications suivantes sont conduites tout au long du lever:

- Contrôle de la position des pics du potassium et thorium sur la moyenne des spectres pour chaque vol (dérive inférieure à 4 canaux sur le pic du Th)
- Contrôle des autotests journaliers
- Contrôle des résultats des lignes test (positionnement des données et réponse du spectromètre gamma)
- Applications des corrections radiométriques, calcul des grilles radiométriques préliminaires et tracé des cartes préliminaires du comptage total et de chaque radioélément (K, U, Th).

Toutes les données digitales 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. Périodiquement, des données prétraitées sont remises au client aux fins d'un dernier contrôle avant la production des données finales.

6 TRAITEMENTS DES DONNÉES

6.1 RESTITUTION DES LIGNES DE VOL

Les positions successives fournies par le système DGPS en coordonnées géographiques sont d'abord converties en coordonnées rectangulaires NTF. À l'aide des données des stations de référence de l'IGN, les positions sont recalculées à l'aide du logiciel Waypoint de Novatel. Une précision d'environ 50 cm est ainsi obtenue pour l'ensemble des données recueillies.

6.2 TRAITEMENT DES DONNÉES MAGNÉTIQUES

Les données mesurées en vol ont été éditées quotidiennement puis archivées dans une base de données *Geosoft Oasis Montaj*. Les profils sont ensuite dessinés et contrôlés. Un décalage spatial entre les senseurs magnétiques (situé en bout d'ailes) et la position de l'antenne (placée au-dessus de la cabine) est d'abord appliqué aux coordonnées DGPS. Les mesures brutes sont tout d'abord corrigées de la variation temporelle grâce à la station de base magnétométrique, puis de l'erreur directionnelle intrinsèque « heading error » des magnétomètres à pompage optique. Ensuite, les mesures magnétiques sont corrigées des perturbations dues à l'avion (compensation) grâce aux informations vectorielles fournies par les fluxgates et la centrale inertielle. Enfin, une procédure de nivellement utilisant les lignes de contrôle permet d'éliminer les erreurs résiduelles engendrées par les variations de hauteur de l'avion.

6.2.1 CORRECTIONS DIURNES

Les données mesurées à la station de base ont été éditées puis archivées dans un fichier ASCII, puis interpolées linéairement aux instants de l'acquisition en vol. La station de base étant fixe et loin de toutes variations parasites artificielles, les variations enregistrées sont exactement les variations temporelles dues essentiellement à l'activité solaire (variation diurne, pulsations, etc.).

Les corrections ont été calculées après retrait de la constante à la station de base, estimée à la fin du lever sur plusieurs jours de mesure par temps calme. Les valeurs du champ magnétique total mesurées en vol ont finalement été réduites par soustraction de ces corrections.

Au cours de ce lever, la station de base magnétique fut installée à plusieurs centaines de mètres de l'hydrobase, loin de toute source éventuelle de bruit magnétique liée à l'activité humaine. La valeur moyenne du champ magnétique tel que mesurée pendant toute la durée du lever est de 57 610 nT.

6.2.2 CORRECTION DES ERREURS RÉSIDUELLES DE POSITIONNEMENT

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, engendrent un décalage systématique dans chacune des directions de vol. Les résultats des tests de « lag » conduits préalablement au lever montrent que cet écart reste toujours en dessous d'une fiduce. L'erreur résiduelle a été réduite à une valeur négligeable lors de la conception du système d'acquisition par l'utilisation de « tags » assignés à chaque mesure.

6.2.3 CORRECTIONS RÉSIDUELLES

Une autre source d'erreur, connue sous le terme de "heading error", est intrinsèque aux magnétomètres à pompage optique : la valeur absolue du champ délivrée par le magnétomètre dépend de l'orientation du capteur (de l'attitude du capteur par rapport aux lignes du champ magnétique ambiant). Cette erreur - de l'ordre de ± 0.3 nT pour les magnétomètres à pompage optique de vapeur de Césium - est une constante pour une direction donnée (qui peut donc varier le long d'un profil en fonction du vent et de la topographie). De simples figures de mérites en haute altitude, conduits préalablement au lever, permettent de déterminer ces constantes directionnelles. Les corrections ainsi obtenues sont appliquées aux données au cours du traitement.

6.2.4 COMPENSATION

Les bruits magnétiques de l'avion (aimantation induite, permanente et courants de Foucaux) sont mesurés en temps réel et corrigés pendant les vols puis à nouveau durant les post-traitements (voir l'annexe H pour plus de détails).

Un vol de calibration, obéissant à une géométrie précise et reproductible (FOM), est d'abord réalisé à très haute altitude, loin des perturbations magnétiques générées par la croûte terrestre. Un ensemble de coefficients est ensuite calculé par inversion, sur la base du modèle physique des perturbations magnétiques de l'avion (le modèle est une combinaison linéaire de 18 termes, construits à partir des cosinus des angles d'orientation et du champ terrestre). Ces coefficients sont ensuite utilisés pour reconstruire en temps réel le champ des perturbations magnétiques de l'avion à partir des angles d'attitude fournis par la centrale inertielle.

Une très faible variation de l'orientation de l'axe du fluxgate génère en effet une très forte variation de la mesure : ainsi pour un champ principal de 53 000 nT, une différence d'orientation de 0.1° se traduit par une variation d'amplitude de plus de 100 nT. Une erreur de positionnement d'un des axes, même très petite, se traduit donc par une erreur importante, ce qui entraîne une anisotropie de la mesure. Il est donc impossible de faire des mesures de compensation précises avec le seul recours à un magnétomètre vectoriel (fluxgate). À l'inverse, on dispose aujourd'hui de centrales inertielles très performantes, capables de mesurer les angles d'attitude avec une très grande précision.

Les figures qui suivent illustrent les corrélations entre les mesures du champ magnétique et le roulis (principale composante perturbant les mesures), mesuré par la centrale inertielle. On y perçoit la correction des variations de roulis (« roll ») à l'aide des données de la centrale inertielle (IMU). Le roulis est ici la principale composante du bruit dû à l'avion. L'axe horizontal représente le temps, indiqué ici en fiduces (0.1s). Aucun filtrage n'a été appliqué sur ces données.

L'utilisation d'une centrale inertielle permet en outre de s'affranchir des principaux filtrages appliqués traditionnellement lors de la compensation. Le système de compensation commercial le plus utilisé applique ainsi un filtrage passe-bas à 0.9 Hz ou 1.8 Hz – soit respectivement plus de 10 ou 5 fiduces, à 0.1 Hz d'acquisition – sans que ces paramètres ne puissent être modifiés, ce qui ne permet pas d'acquisition et de compensation à haute fréquence.

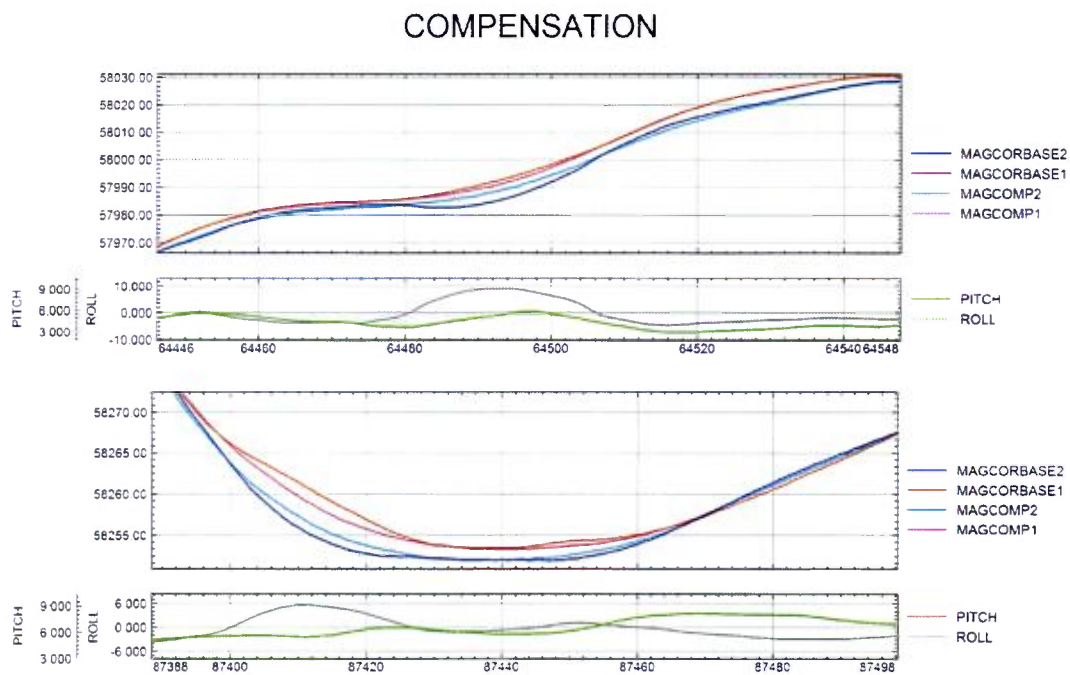


Figure 5 : Exemples de compensation

- MAGCORBASE1 est le champ magnétique mesuré par le magnétomètre gauche, corrigé des variations de la station de base.
- MAGCORBASE2 est le champ magnétique mesuré par le magnétomètre droit, corrigé des variations de la station de base.
- MAGCOMP1 est le champ mesuré par le magnétomètre gauche, compensé.
- MAGCOMP2 est le champ mesuré par le magnétomètre droit, compensé.

On voit notamment sur la figure 5 l'effet différentiel de l'avion (en première approximation, l'avion se comporte comme un « dipôle », la plupart du temps asymétrique par rapport à l'axe de l'avion, puisque dirigé dans la direction du champ magnétique local). Cette perturbation asymétrique est entièrement éliminée après compensation. En revanche, le gradient latéral "géologique" qui s'inverse durant l'avancée de l'avion est parfaitement conservé car indépendant des mouvements de l'avion.

6.2.5 NIVELLEMENT MAGNÉTIQUE CONVENTIONNEL

Une procédure de nivellement standard, basée sur les différences observées à l'intersection des lignes et des lignes de contrôle, a été appliquée en utilisant *Oasis Montaj™*.

Plusieurs type de corrections sont comparées : correction d'une constante, correction linéaire, correction Spline contrainte ou non. La correction produisant les meilleurs résultats est ainsi uniquement appliquée aux intersections où les conditions le permettent.

6.2.6 NIVELLEMENT MAGNÉTIQUE DE NOVATEM INC.

La méthode précédente est bien adaptée aux levés en avion, où la surface drapée est relativement lisse. Même si la navigation semble proche de la surface drapée, des différences locales apparaissent cependant, qui sont généralement bien corrélées avec le sommet des collines ou le fond des vallées. Les méthodes traditionnelles de nivellement échouent, parce que les corrections ne sont non plus simplement une constante ou une tendance linéaire, mais une longueur d'onde locale (variation de hauteur locale). En outre la longueur d'onde varie, en fonction de la topographie, la vitesse relative de l'avion, la direction du vent, etc... Et par conséquent la fonction Spline devrait varier localement.

Le nivellement de *Novatem Inc.* est basé sur une approche fréquentielle afin de niveler uniquement les fréquences mesurées aux points d'intersection. Une fois les longueurs d'onde à niveler identifiées, elles sont supprimées, puis rajoutées une fois nivelées. Ceci équivaut à enlever un niveau de base essentiellement variable et lui apporter des corrections locales, pour l'ajouter ensuite aux données. Cette procédure n'est pas un micro nivellement au sens de *Geosoft* car les corrections sont uniquement appliquées à un niveau de base, sans modifier les plus hautes fréquences.

Enfin, le gradient vertical, calculé par convolution, permet de rapprocher les anomalies de la verticale des sources. Cependant, cette technique renforce les petites longueurs d'onde, et peut créer des artefacts.

6.3 TRAITEMENT DES DONNÉES DE SPECTROMÉTRIE DE RAYONNEMENT GAMMA

6.3.1 FILTRAGE PRÉLIMINAIRE

Le filtrage préliminaire des données est détaillé dans l'annexe C, de même que les divers filtres successifs nécessaires au traitement.

6.3.2 ANALYSE SPECTRALE ET LISSAGE PAR LA MÉTHODE NASVD

La stabilité des spectres a été vérifiée, et aucune recalibration ne s'est avérée nécessaire durant le post-traitement. Aucune sommation des spectres n'a été appliquée aux données brutes, excepté pour la détermination des coefficients. D'autre part, la méthode d'analyse en composante principale (NASVD), qui est beaucoup plus fiable, a été utilisée pour reconstituer les spectres (lissage) à l'aide du logiciel Praga de Geosoft.

6.3.3 CORRECTION DU TEMPS D'ACQUISITION PAR SECONDE

Comme le spectromètre a besoin d'un temps fini pour traiter les comptes du détecteur, par conséquent le temps d'accumulation n'est donc pas une seconde complète. Le pack de détection du RS500 possède 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 du détecteur, qui peut être utilisé pour augmenter et normaliser les comptes pour une seconde entière à l'aide de la formule suivante :

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

- où : N_L est la fenêtre corrigée du temps d'activité (cps)
 N_{NASVD} est la fenêtre reconstituée par analyse en composante principale (cps)
 L est le temps d'activité du détecteur (sec)

6.3.4 CORRECTION DU RAYONNEMENT COSMIQUE ET DU BRUIT DE FOND DE L'AVION

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'avion (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'avion pour cette fenêtre
 b_N est le coefficient du cosmique pour cette fenêtre

Le détail des résultats obtenus est fourni à l'annexe D.

6.3.5 SUPPRESSION DU RADON

La contamination par le radon est la plus significative dans la fenêtre de l'uranium, à cause du niveau d'énergie proche. Un détecteur orienté vers le haut permet de suivre les changements 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'avion (cps)
 u_{ac} est la fenêtre U vers le haut, corrigée du cosmique et de l'avion (cps)

Th_{ac} est la fenêtre Th, corrigée du cosmique et de l'avion (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 fortement filtrée afin de réduire le bruit statistique. La méthode employée est conforme aux recommandations du rapport #323 de l'IAEA. Le détail des résultats obtenus pour les différents coefficients est fourni à l'annexe E.

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 :

$$\begin{aligned}u_r &= a_u U_r + b_u \\K_r &= a_k U_r + b_k \\Th_r &= a_{Th} U_r + b_{Th} \\TC_r &= a_{TC} U_r + b_{TC}\end{aligned}$$

où : u_r est la composante due au radon dans la fenêtre de l'uranium du détecteur regardant vers le haut
 TC_r, K_r, U_r and Th_r sont les composantes dues 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 respectives.

6.3.6 RÉDUCTION À UNE PRESSION ET TEMPÉRATURE STANDARD (STP)

L'altimètre laser est principalement utilisé pour la correction de hauteur. Comme les propriétés d'atténuation de 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)

6.3.7 CORRECTION DE LA DIFFUSION COMPTON

La correction de la diffusion Compton consiste à supprimer la composante due à un autre élément dans la fenêtre spectrale qui nous intéresse. Ainsi, après les corrections de bruit de fond, il faut aussi supprimer les chevauchements de spectres. Les rapports d'enlèvement ou « stripping ratio », fournis par le fabricant du spectromètre et présentés dans l'annexe D, correspondent au ratio des comptes détectés dans une fenêtre, sur ceux détectés dans une autre fenêtre, pour des sources pures de K, U et Th.

A cause de la diffusion dans l'air, les rapports d'enlèvement augmentent avec l'altitude, et ils sont donc préalablement ramenés à une hauteur STP grâce à la relation linéaire suivante :

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

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

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

où : α, β, γ sont de coefficients de diffusion Compton
 $\alpha_{STP}, \beta_{STP}, \gamma_{STP}$ 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 en utilisant les formules suivantes :

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

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

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

6.3.8 CORRECTION DE L'ATTÉNUATION DE L'AIR

Après correction de l'effet d'atténuation du nombre des comptes par l'air, les taux de comptes corrigés de l'effet Compton sont ramenés à la hauteur nominale du lever avec l'équation :

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

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 lever, utilisée comme niveau de référence (mètres)

La hauteur nominale du lever est spécifiée au paragraphe 2.2 du présent document.

6.3.9 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 à l'aide des concentrations calculées précédemment et de la formule suivante :

$$E = 13.08 \times K + 5.43 \times eU + 2.69 \times eTh$$

où : E est la dose absorbée (nG/H)

K est la concentration de l'élément K (%)
 eU , eTh sont les concentrations équivalentes en U et Th (ppm)

Le détail des résultats obtenus est fourni à l'annexe F.

6.3.10 NIVELLEMENT

Une procédure de nivellement standard, basée sur les différences observées à l'intersection des lignes et des lignes de contrôle, est appliquée en utilisant *Oasis Montaj™*.

Plusieurs type de corrections ont été effectuées puis comparées : correction d'une constante, correction linéaire, correction Spline contrainte ou non. La correction produisant les meilleurs résultats est ainsi uniquement appliquée aux intersections où les conditions le permettent.

7 DONNÉES FINALES

7.1 DONNÉES NUMÉRIQUES (DVD)

Une version numérique des données (base de données), les cartes ainsi que le présent rapport sont archivés sur un DVD. Un exemplaire est fourni avec chaque rapport.

Les grilles des concentrations sont calculées selon l'algorithme de la courbure minimum. Les paramètres de construction de ces grilles sont décrits dans l'Annexe A. Les données ont été archivées dans le format Geosoft Oasis Montaj (fichier *.gdb) et dans un format ASCII pouvant être relu par la plupart des éditeurs. Les canaux dans ces fichiers sont les suivants :

A. Base de Données magnétiques

X: Coordonnées est
 Y: Coordonnées nord
 DATE: aaaa/mm/jj
 TIME.UTC: Temps écoulé depuis minuit, en seconde
 LONGITUDE, LATITUDE, ALTITUDE, SPEED: Coordonnées GPS après post traitement différentiel
 CLEARANCE: Altimètre laser corrigé puis filtré (hauteur par rapport au sol)
 DEM: ALTITUDE-CLEARANCE
 MAGRAW(1,2): Champ magnétique total (TMI) mesuré par les magnétomètres (gauche, droite), en nT
 MAGBASE: Station de base magnétique moyennée sur 5 points, en nT
 MAGCORBASE(1,2): TMI corrigé des variations diurnes enregistrées (gauche, droite), en nT
 MAGCOMP(1,2): TMI après compensation du bruit magnétique de l'avion (gauche, droite), en nT.
 MAGLEV(1,2): Champ total nivelé (gauche, droite), en nT
 MAGFINAL: Moyenne des champs magnétiques totaux des deux magnétomètres, en nT

B. Base de Données radiométriques

X: Coordonnées est
 Y: Coordonnées nord
 DATE: aaaa/mm/jj
 TIME.UTC: Temps écoulé depuis minuit, en seconde
 LONGITUDE, LATITUDE, ALTITUDE, SPEED: Coordonnées GPS après post traitement différentiel
 CLEARANCE: Altimètre laser corrigé puis filtré (hauteur par rapport au sol)
 DEM: ALTITUDE-CLEARANCE
 LTIME: Temps d'activité des spectromètres
 PRESSURE: Pression brute, en mbars
 TEMPERATURE: Température, en °C

COSMIC_DOWN: ROI du cosmique vers le bas, en cps
COSMIC_UP: ROI du cosmique vers le haut, en cps
TC_ROI: Total count (Energy range: 0.400 – 2.810 MeV), en cps
K_ROI: Potassium ROI (Energy range: 1.370–1.570 MeV), en cps
U_ROI: Uranium ROI (Energy range: 1.660–1.860 MeV), en cps
Th_ROI: Thorium ROI (Energy range: 2.410–2.810 MeV), en cps
UpU_ROI: Uranium upward-looking detector ROI, en cps
Spec_Down: Full downward spectrum
Spec_Up: Full upward spectrum
DRAPE: Surface calculée théorique de vol, par rapport au WGS84
SRTM: Modèle numérique de terrain issu de la navette spatiale américaine
STP: Hauteur de vol corrigée de la pression et température ambiante
COSMIC_DOWN_STACK, COSMIC_UP_STACK: Moyenne roulante sur 15 valeurs des COSMIC
ALPHA, BETA, GAMMA, A, B, G: Stripping ratios corrigés de la hauteur
TCNASVD, KNASVD, UNASVD, THNASVD: ROI reconstitués par analyse en composante
TC1, K1, U1, TH1, UPU1: Roi corrigé du temps mort de du background de l'avion et du cosmique
Ur: Composante calculée du radon dans la fenêtre de l'uranium
Ur_STACK: Moyenne roulante sur 200 valeurs d'Ur
TCr, Kr, THr: Composantes calculées du radon dans les ROI
TC2, K2, U2, TH2: Correction du radon
TC3, K3, U3, TH3: Correction du stripping ratio
TC4, K4, U4, TH4: Correction de la hauteur
TC_DOSE: Dose absorbée par l'air à partir du compte total, en nG/h
K: Concentration équivalente de Potassium, en pourcent
eU: Concentration équivalente d'Uranium, en ppm
eTh: Concentration équivalente de Thorium, en ppm
DOSE: Dose absorbée par l'air calculée à partir des comptes totaux, en nG/h

7.2 . CARTES

Les données sont représentées en carte de nuances de couleurs et courbes de niveau à une échelle de 1:100 000. Les données numériques de chacune des cartes suivantes sont également incluses dans le DVD-ROM. Le tableau ci-après récapitule le nom des différentes cartes et le numéro qui leur est associé :

Carte	Numéro du dessin
Champ magnétique total (Portion nord)	C10081_DIANA_TMI
Première dérivé vertical (Portion nord)	C10081_DIANA_VG
équivalent Uranium (Portion nord)	C10081_DIANA_EU
équivalent Thorium (Portion nord)	C10081_DIANA_ETH
Potassium (Portion nord)	C10081_DIANA_K
Débit de dose absorbée (Portion nord)	C10081_DIANA_DOSE
Ratio eU/eTh (Portion nord)	C10081_DIANA_U_TH
Ratio eU/K (Portion nord)	C10081_DIANA_U_K
Ratio eTh/eK (Portion nord)	C10081_DIANA_TH_K
Ternaire (Portion nord)	C10081_DIANA_TER

Tableau 3 : Description des cartes et leur numéro associé

8 CONCLUSION

Un lever géophysique radiométrique a été volé en avion pour le compte de la société EXPLORATION AZIMUT au mois de septembre 2010. La campagne DIANA 2010 comportait un seul bloc : DIANA situé dans le grand nord du Québec.

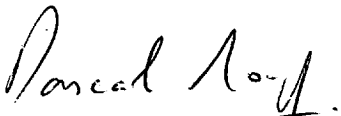
Les produits finaux sur support pdf consistent en 10 cartes à une échelle de 1 : 100 000. Les cartes finales représentent l'intensité du champ total, les concentrations des radioéléments et leurs sous-produits sur l'ensemble des blocs et doivent être examinées en parallèle avec le présent rapport. Les produits numériques consistent en des bases de données brutes et finales, les fichiers associés et les fichiers de grilles finaux. Les données numériques sont incluses sur le DVD.

La reconnaissance des principaux traits géologiques visibles sur les cartes doit être complétée par une campagne détaillée sur le terrain ainsi que par des mesures complémentaires toutes les fois où les corps reconnus ne sont pas immédiatement corrélables avec des observations de surface. L'interprétation des mesures nécessite de bien connaître les propriétés physiques des roches, dans leur contexte géologique ou culturel actuel. La campagne de terrain avec la prise d'échantillons est donc une étape incontournable pour tirer profit des cartes accompagnant ce rapport.


Ce rapport a été rédigé par Olivier Savignet, Ing. Jr., sous le contrôle de Pascal Mouge Ph. D. et Olivier Boulanger Géo, Ph. D.



Olivier Savignet, Ing. Jr. Physicien



Pascal Mouge, Ph. D. Président



Olivier Boulanger, géo. Ph. D. #1274

ANNEXES

ANNEXE A : PARAMÈTRES GÉODÉSQUES DU LEVER

Le tableau ci dessous résume les paramètres géodésiques utilisés pour le positionnement de la projection plane. Ces mêmes paramètres furent appliqués pour toutes les transformations de coordonnées.

Système de référence local:	NAD83
Ellipsoïde:	GRS 1980
Projection:	UTM
Zone:	19N
Lat0, Lon0,	0, -69
Coordonnées de l'origine en abscisses	500 000
Coordonnées de l'origine en Ordonnées	0
Facteur d'échelle:	0.9996
Axe principal, Inverse de l'aplatissement, Méridien de référence	6378137, 298.25722, 0

Tableau 4 : Paramètres géodésiques

Les tableaux suivants résument les paramètres utilisés pour calculer les grilles:

Type d'éléments	FLOAT
Séparation entre deux points le long de l'axe X, en m:	25
Séparation entre deux points le long de l'axe Y, en m:	25
Nombre de points le long de l'axe X :	2102
Nombre de points le long de l'axe Y:	1679
Origine de la grille:	X = 474 075 Y = 6 448 600
Azimut:	0

Tableau 5 : Paramètres des grilles magnétiques

Type d'éléments	FLOAT
Séparation entre deux points le long de l'axe X, en m:	50
Séparation entre deux points le long de l'axe Y, en m:	50
Nombre de points le long de l'axe X :	1052
Nombre de points le long de l'axe Y:	840
Origine de la grille:	X = 474 050 Y = 6 448 600
Azimut:	0

Tableau 6 : Paramètres des grilles radiométriques

ANNEXE B : COORDONNÉES DES APEX DES BLOCS

Projection (en mètres) dans le système rectangulaire NAD83, UTM 19N.

X (Easting)	Y (Northing)
503990	6490464
526631	6467869
514304	6454993
510032	6459234
507935	6457091
504020	6460990
495900	6452853
490957	6457806
481748	6448638
474681	6455783
476815	6457890
474018	6460690
477931	6464552
474417	6468105
481531	6475128
487862	6468736
491407	6472260
496344	6467301
503280	6474224
495498	6481992
503990	6490464

Tableau 7 : Coordonnées du bloc DIANA

ANNEXE C : PARAMÈTRES DE FILTRAGE POUR LA SPECTROMÉTRIE

Le tableau suivant résume les différents filtres appliqués au cours du traitement des données de spectrométrie.

Correction	Paramètre traité	Type de filtre	Effet
Pré-filtrage	Altimètre laser	Moyenne sur 5 points Sur des données à 10 Hz ré-échantillonnées à 1 HZ	Suppression du bruit
Pré-filtrage	Cosmic Channel	Moyenne sur 15 points	Réduction du bruit statistique
Pré-filtrage	Température Pression atmosphérique	Moyenne sur 15 points	Suppression du bruit
Pré-filtrage	Les fenêtres de tous les nucléides	AUCUN	
Suppression du radon	Uranium Haut/Bas corrigé	Moyenne sur 200 points	Réduction du bruit statistique
Reconstitution du spectre	Concentration de tous les radionucléides	NASVD avec 7 vecteurs propres pour la transformation inverse	Lissage

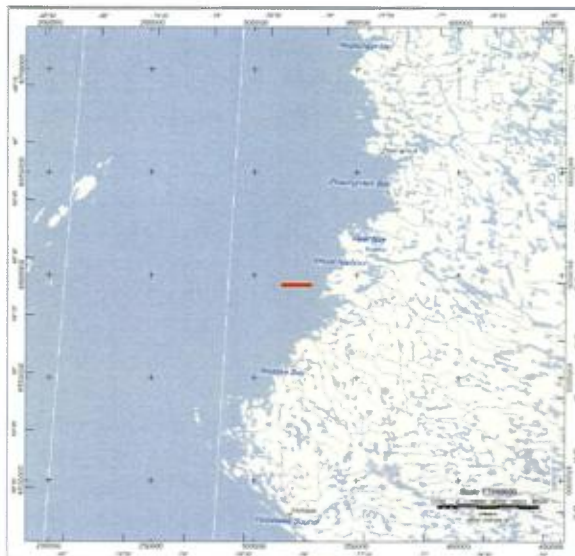
Tableau 8 : Paramètres de filtrage pour la spectrométrie

ANNEXE D : CORRECTION DU RAYONNEMENT COSMIQUE ET DU BRUIT DE FOND DE L'AVION

Instrument: Novatem Inc., RSX500 - 5577+5578, 32L down, 8L up, 1Hz
 Localisation: Ouest de Puvirnituk, Baie d'Hudson, Québec, 2010.08.12
 Température: 15.2°C au niveau de la mer
 Pression: 101.8 kPa au niveau de la mer
 Hauteur de vol: 500m-3000m

Afin de déterminer le bruit de fond associé à l'avion et d'origine cosmique, le spectromètre utilisé enregistre toutes les particules incidentes au dessus de 3MeV dans la fenêtre du cosmique. Des paliers ont été volés à 5 hauteurs équidistantes, de 500m à 2500m, au dessus de l'océan pour réduire encore la présence éventuelle de radon. En outre, l'avion est resté à chaque hauteur pendant 5 minutes, pour minimiser les erreurs statistiques.

On constate qu'aucune contamination par le radon n'est présente, ce qui aurait été visible par une coupure de la pente. Les comptes sommés, et les relations linéaires des radiations cosmiques avec les différentes fenêtres spectrales sont présentés ci-après.



Altimètre (m)	Cosmic Dn	Cosmic Up	Total Count	Potassium	Uranium	Thorium	Up Uranium
2501.505	390.06	108.95	530.93	43.55	22.07	25.67	5.83
1994.174	307.59	85.4	437.61	38.39	17.35	20.15	4.64
1497.753	245.67	68.24	359.9	33.48	13.74	15.95	3.52
1000.038	196.79	54.75	315.33	31.16	11.66	13.07	2.92
501.435	165.84	45.39	279.62	28.89	10.06	10.8	2.72

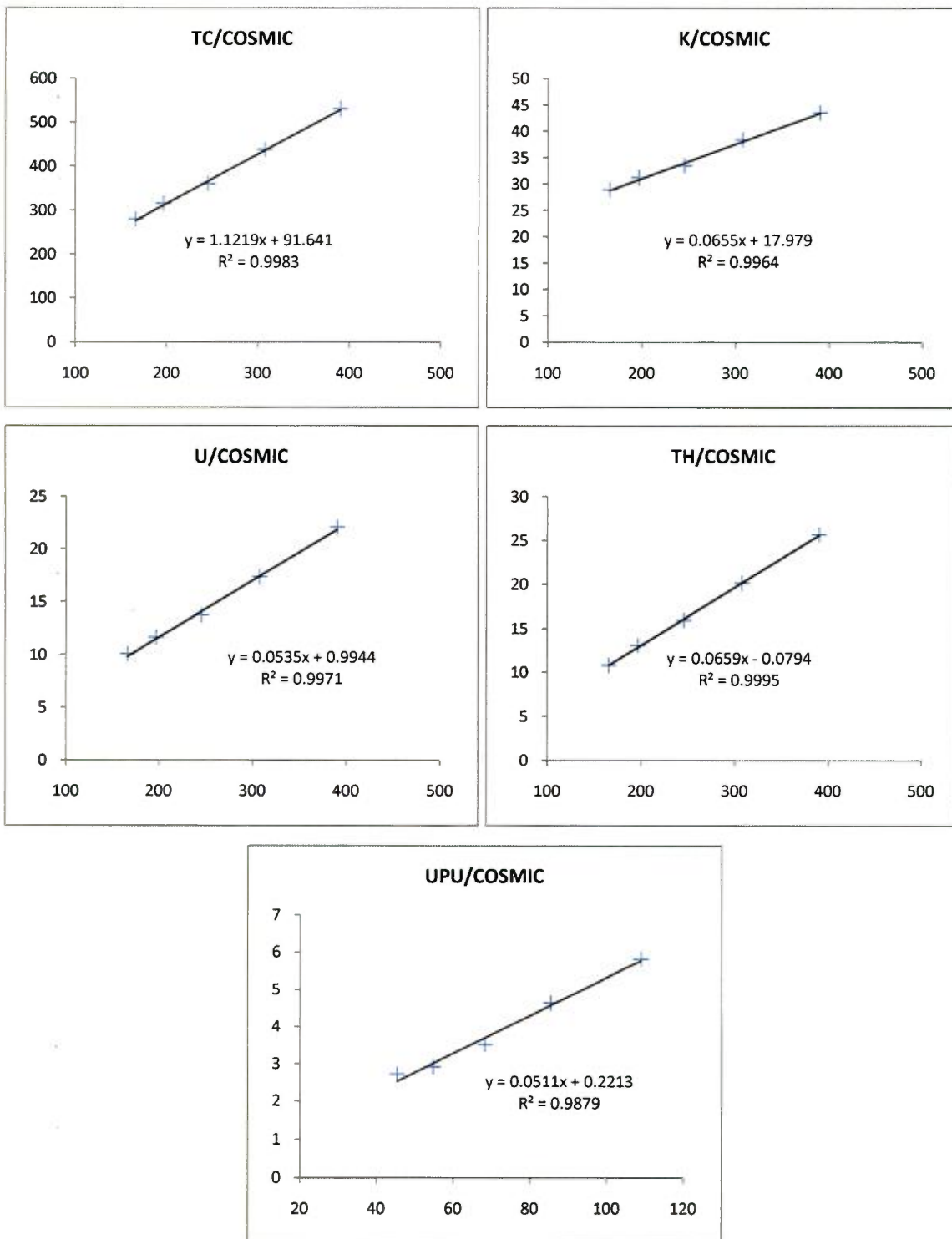
Tableau 9 : Données moyennées pour chaque palier

Background	Total Count	Potassium	Uranium	Thorium	Up Uranium
Aircraft	91.6	18.0	1.0	0.0	0.2
Cosmic	1.121	0.066	0.054	0.066	0.051

Tableau 10 : Coefficients de bruits de fond

On constate sur les graphiques de la page suivante que les coefficients de détermination sont très près de 1 pour toutes les fenêtres. Des valeurs plus faibles auraient été caractéristiques de variations de la concentration de radon dans l'air au cours du vol, car la fenêtre du Thorium est la moins affectée, et les fenêtres de comptes totaux et d'uranium sont fortement corrélées. Néanmoins, la seule influence qu'aurait une variation de radon durant les vols de calibration

cosmiques, serait d'ajouter une composante de radon inconnue, qui serait supprimée lors de la phase de correction du radon; résultat prouvé dans *Grasty and Minty, AGSO 1995/60*.



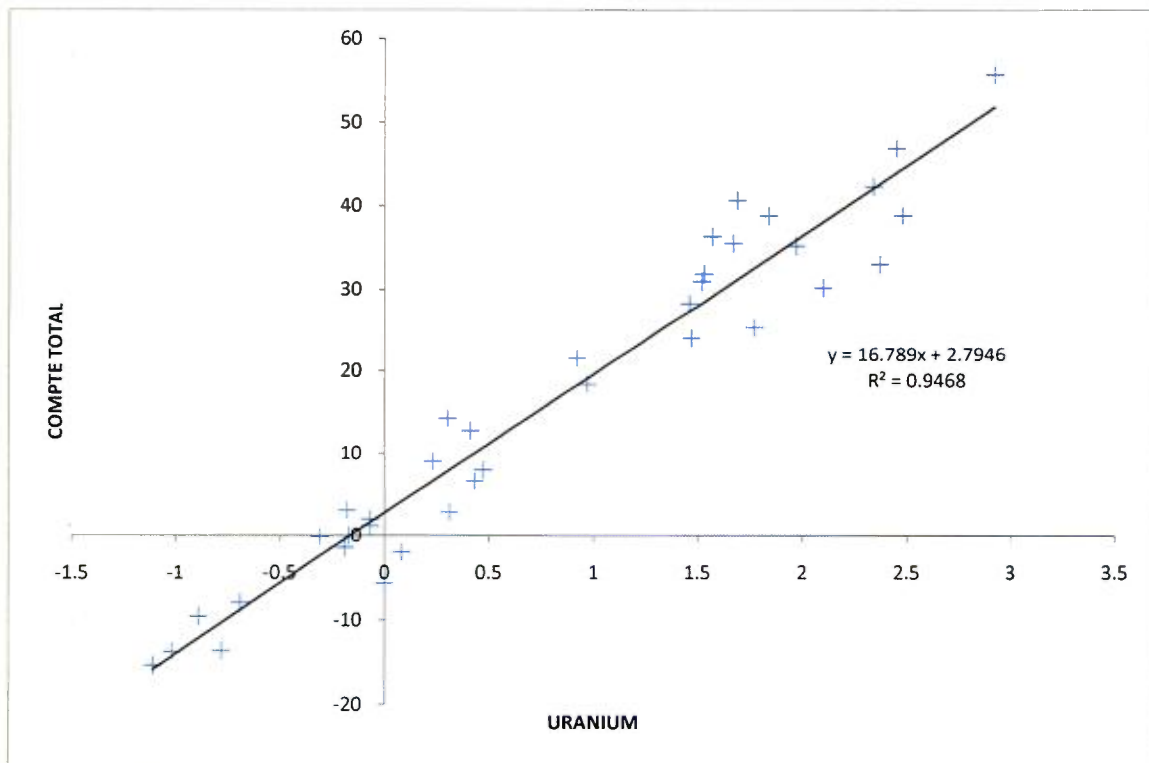
ANNEXE E : CALIBRATION DU DÉTECTEUR REGARDANT VERS LE HAUT POUR LA CORRECTION DU RADON

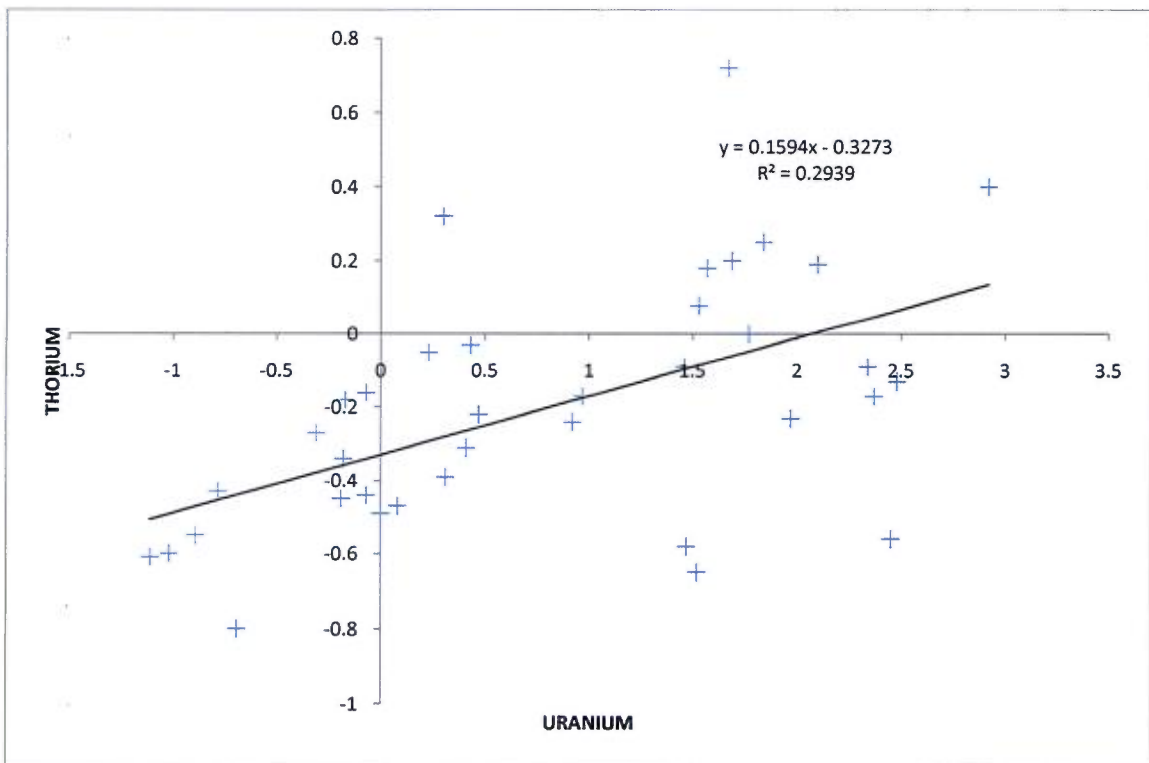
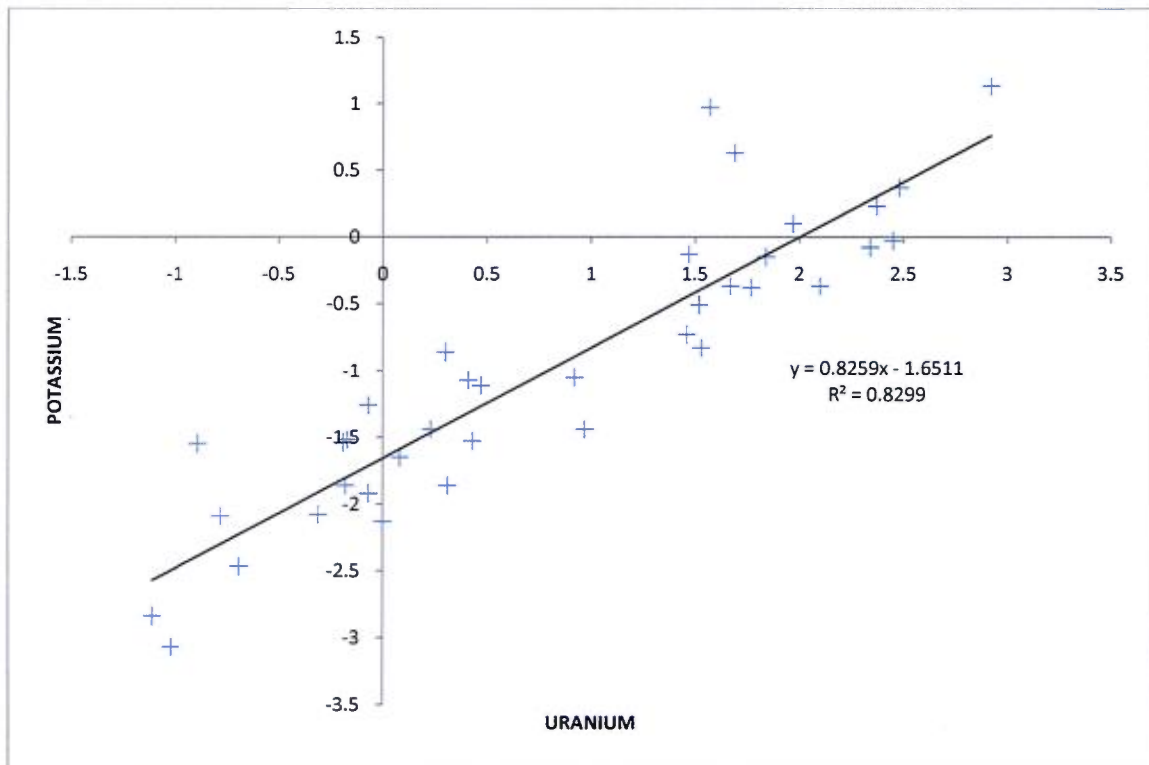
Instrument: Novatem Inc., RSX500 - 5577+5578, 32L down, 8L up, 1Hz
 Localisation: Différents Lacs, Nunavik, 2010
 Hauteur de vol: 100 m

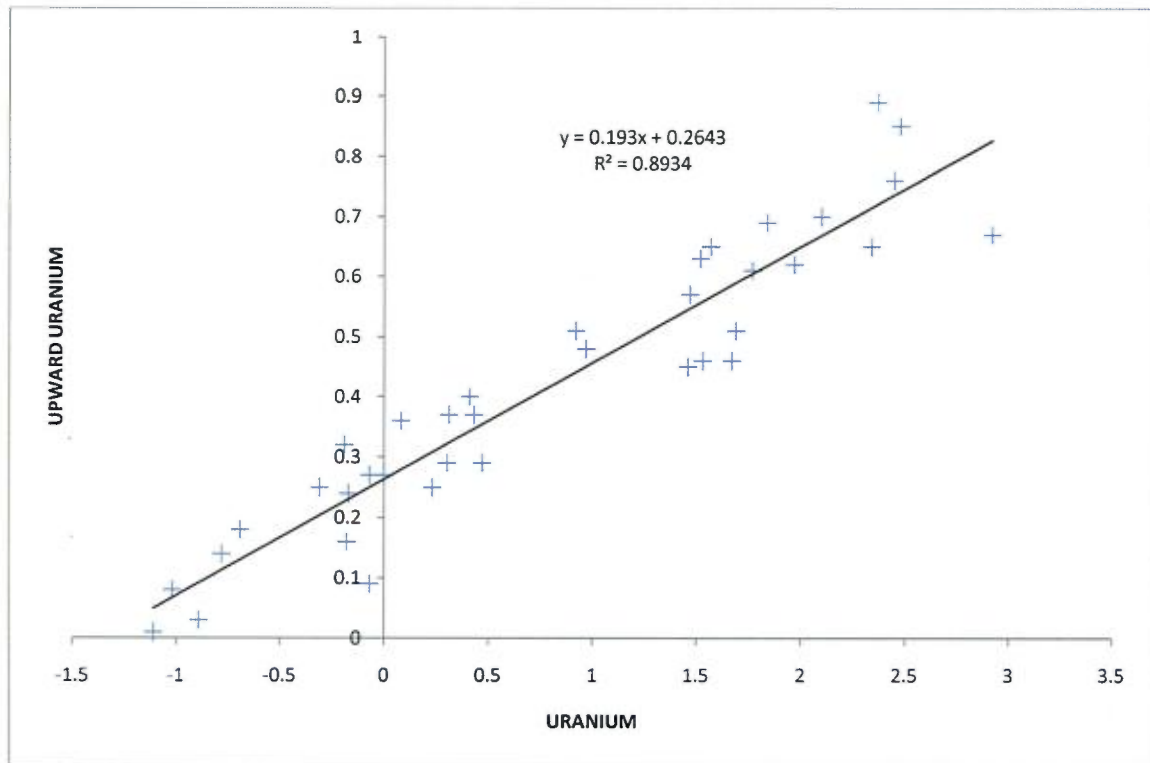
Afin de déterminer la relation entre les taux de comptes des détecteurs regardant vers le bas et ceux regardant vers le haut pour le radon dans l'air, plusieurs vols au-dessus de l'eau ont été effectués, à même la ligne test et donc avant et après chaque vol, où il n'y a pas de contribution du sol. Étant donné la taille du lever, une grande quantité de donnée a pu être recueillie à proximité des blocs. La localisation des lacs est indiquée sur les cartes des lignes test, annexe G,

Avant l'analyse des données, les taux de comptes ont été corrigés du temps mort, du bruit de fond de l'avion puis du rayonnement cosmique. La grande fiabilité des résultats obtenus pour la calibration du bruit de l'avion et du bruit cosmique, appuyée par les valeurs élevées du coefficient de détermination R_2 ainsi que par le rapport #323 de l'IAEA, nous nous attendons à ce que les constantes b_n soient près de zéro. De plus, afin de minimiser le bruit statistique, les séries de données ayant moins de 10 mesures ont été rejetées. Les résultats sont présentés dans les graphiques qui suivent.

On constatera que certains coefficients ainsi déterminés ont une valeur négative. Cela peut être expliqué par une variation de concentration de radon lors de la calibration du rayonnement cosmique. Cette composante de radon inconnue, est supprimé en considérant justement les composantes résiduelles déterminées ici lors de la phase de correction du radon ; résultat prouvé dans *Grasty and Minty, AGSO 1995/60*.







Les constantes au-dessus de l'eau pour les quatre fenêtres sont :

$$a_u, b_u = 0.193, 0.26$$

$$a_K, b_K = 0.826, -1.65$$

$$a_{Th}, b_{Th} = 0.159, -0.33$$

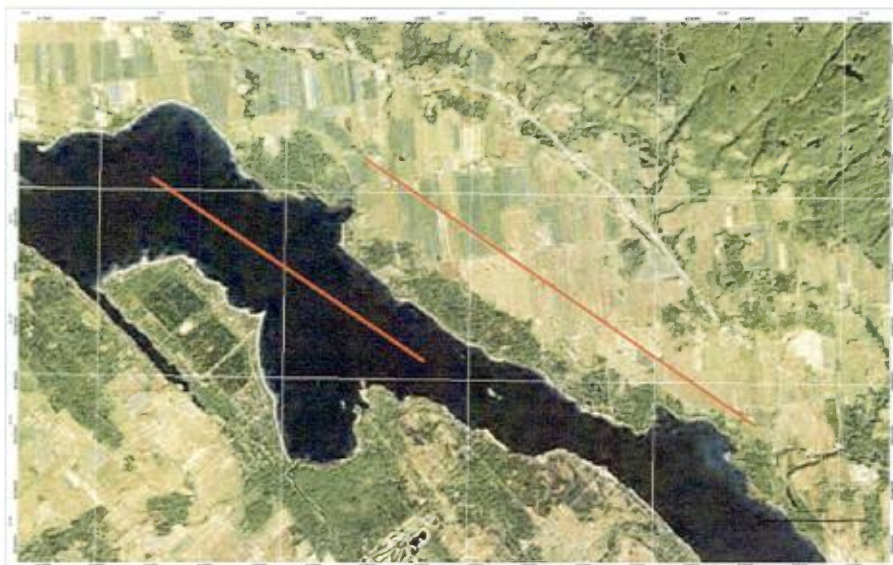
$$a_{TC}, b_{TC} = 16.789, 2.79$$

La composante d'uranium provenant du sol et qui atteint le détecteur regardant vers le haut, u_g , dépend de la concentration de U et Th dans le sol, tout comme les composantes de U et Th dans les fenêtres des détecteurs regardant vers le bas, U_g et Th_g , et provenant également du sol. Dans le but de minimiser les erreurs statistiques, les trois composantes ont premièrement été calculées en soustrayant tous les vols au-dessus de l'eau présente sur le bloc AB (le plus grand bloc) aux valeurs adjacente sur la terre ferme. Plus de 700 sites ont ainsi été évalué sur le bloc AB. Finalement, à partir des séries de valeurs calculées pour u_g , U_g et Th_g , les facteurs de calibrations, a_1 et a_2 , ont été déterminés par la méthode des moindres carrées décrite dans le rapport #323 de l'IAEA.

a_1	a_2
0.05440	0.02227

ANNEXE F : ATTÉNUATION ET SENSIBILITÉ

Instruments: Novatem Inc., RSX500 - 5577+5578, 32L down, 8L up, **1Hz**
CGC, GR820
Localisation: Breckenridge, Gatineau, Québec, 2010.10.05
Test Area: TC=52.21 nGy/h, K= 1.92 %, eU= 1.23 ppm, eTh= 8.10 ppm
Température: 14°C au niveau de la mer
Pression: 100.4 kPa au niveau de la mer
Hauteur de vol: 100 m



Altitude GPS(m)	Hauteur STP	Total Count	Potassium	Uranium	Thorium
70.003	33.908	2256.37	281.05	44.34	60.78
93.356	56.101	1929.63	231.15	37.93	52.6
122.731	83.61	1614.36	184.56	33.04	43.98
152.171	111.171	1366.47	151.82	29.17	37.4
178.707	136.627	1190.94	129.88	26.77	33.05
212.934	167.617	1007.22	105.83	23.11	28.64
240.165	193.155	889.85	91.05	21.69	25.16

Tableau 11 : Données sur la ligne test (cps)

Altitude GPS (m)	Hauteur STP	Total Count	Potassium	Uranium	Thorium
72.705	46.001	251.46	28.38	9.18	8.53
91.972	64.084	251.21	28.18	9.63	8.27
122.493	92.538	261.23	29.23	9.16	9.01
149.891	118.149	263.49	28.96	9.47	9.26
181.503	147.289	268.31	29.25	9.86	9.65
216.695	179.431	267.9	29.4	10.1	9.15
241.055	201.819	269.57	29.23	9.9	9.2

Tableau 12 : Données de bruit de fond (cps)

α	β	γ	a	b	g
0.271	0.411	0.762	0.048	0.000	0.000

Tableau 13 : Coefficients d'enlèvement

Total Count	Potassium	Uranium	Thorium
2004.91	223.550486	20.9208149	52.5431458
1678.42	178.813103	15.6702316	44.6891871
1353.13	134.872408	13.5016731	35.2090665
1102.98	105.861	10.9833344	28.3351146
922.63	85.9842304	9.38788718	23.5565185
739.32	64.7389194	6.39693772	19.6952303
620.28	51.3611159	6.22165567	16.0853191
2004.91	223.550486	20.9208149	52.5431458

Tableau 14 : Comptes corrigés du bruit de fond et de l'effet Compton (cps)

Après les corrections de temps mort, les taux de compte moyens des quatre fenêtres sont ensuite corrigés des radiations cosmiques, de la radioactivité atmosphérique et du bruit de fond de l'avion en soustrayant les valeurs voisines mesurées au dessus de l'eau. Les coefficients d'enlèvement ramenés à une hauteur STP, permettent de corriger les taux de compte de l'effet Compton. Les taux de comptes corrigés de l'effet Compton, pour chaque hauteur de vol, sont ensuite approximés par une fonction exponentielle afin de déterminer les coefficients d'atténuation par la hauteur. La figure 1 montre les courbes obtenues pour les quatre fenêtres à partir des tests conduits sur la zone.

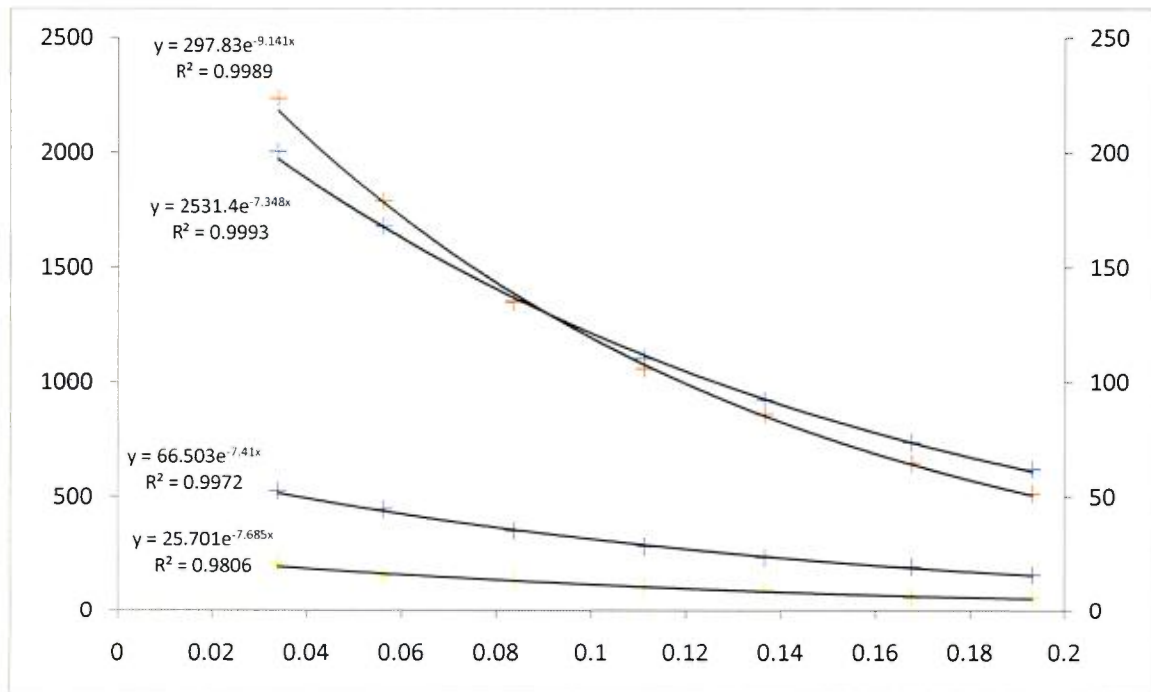


Figure 6 : Atténuation exponentielle avec la hauteur pour les quatre fenêtres

La sensibilité à une source large a été calculée pour chaque fenêtre, à partir de la concentration en radioéléments mesurée au niveau du sol le long de la zone test, pour une hauteur STP de 100 m. Tous les résultats sont regroupés dans le tableau 5.

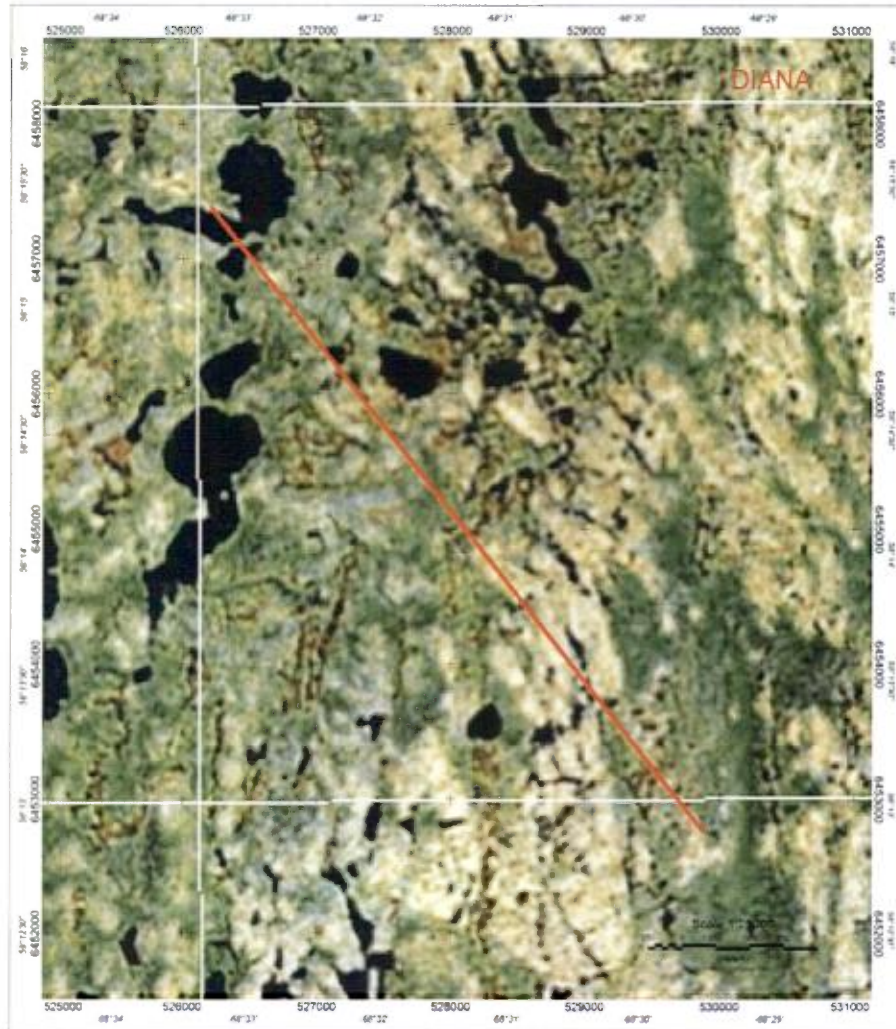
	Total Count	Potassium	Uranium	Thorium
ATTENUATION	-0.00735 m ⁻¹	-0.00914 m ⁻¹	-0.00769 m ⁻¹	-0.00741 m ⁻¹
SENSITIVITY	23.25 cps/ nGy/h	62.18 cps/%	9.69 cps/ppm	3.91 cps/ppm

Tableau 15 : Coefficient d'atténuation et sensibilité (100m)

ANNEXE G : LIGNE TEST

Instruments: Novatem Inc., RSX500 - 5577+5578, 32L down, 8L up, 1Hz
 Hauteur de vol: 100 m

Survol quotidien d'une ligne test, pour 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).



L2010090615.1:0	20.6	3.74%
L2010090615.2:0	21.4	0.00%
L2010090713.1:0	20.3	5.14%
L2010090713.2:0	21.2	0.93%
L2010090718.1:0	20.9	2.34%
L2010090718.2:0	21.7	1.40%
L2010090812.1:0	20.9	2.34%
L2010090812.2:0	22.0	2.80%

L2010090817.1:0	21.9	2.34%
L2010090817.2:0	22.1	3.27%
L2010090911.1:0	20.8	2.80%
L2010090911.2:0	21.9	2.34%
L2010090916.1:0	22.0	2.80%
L2010090916.2:0	21.8	1.87%
L2010091011.1:0	20.5	4.21%
L2010091011.2:0	21.6	0.93%

L2010091111.1:0	21.0	1.87%
L2010091111.2:0	21.8	1.87%
L2010091117.1:0	21.4	0.00%
L2010091117.2:0	21.6	0.93%
L2010091212.1:0	21.3	0.47%
L2010091212.2:0	21.8	1.87%
DIANA	21.4	

ANNEXE H : COMPENSATION BASÉE SUR UN MODÈLE PHYSIQUE

PRINCIPE DE LA COMPENSATION ET DE LA CALIBRATION

Le modèle utilisé ne prend en compte que les perturbations engendrées par le mouvement de l'avion dans le champ terrestre. Par conséquent, une perturbation magnétique qui n'est pas générée par un mouvement de l'avion ne sera pas prise en compte. Citons parmi ces dernières perturbations, l'allumage d'un circuit électrique ou le déplacement de masses magnétiques à l'intérieur ou à l'extérieur de l'avion (comme des volets ou des dérives qui seraient magnétiques). L'approche la plus classique et aussi la plus ancienne de la compensation consiste à construire un modèle à partir des différentes composantes physiques de la perturbation, à savoir le champ rémanent, le champ induit et le champ engendré par les courants de Foucault. On citera en particulier Leliak (1961, Identification and evaluation of magnetic sources of magnetic airborne detector equipped aircraft, IRE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics, Volume 8) et Leach (1979, Automatic aeromagnetic compensation, CAE, rapport technique de laboratoire).

Le champ magnétique engendré par les mouvements de l'avion est un ainsi la somme vectorielle de ces trois champs. Le modèle physique consiste à modéliser séparément chacun de ces trois champs. Sans entrer dans le détail de ces modélisations (voir Leach, 1979), le champ rémanent s'obtient facilement à l'aide des cosinus directeurs des angles d'attitude fournis par les mesures du capteur vectoriel ; le champ induit et le champ dû aux courants de Foucault font en plus appel au tenseur de susceptibilité de l'avion. Au total, le champ de perturbations est égal à la combinaison linéaire de 18 termes construits à partir des cosinus des angles d'orientation et du champ terrestre. À l'inverse, pour reconstruire le champ généré par l'avion, il suffit alors de connaître ces coefficients, les angles d'attitude et le champ terrestre. Une phase de calibration est donc nécessaire, pour déterminer les paramètres magnétiques de l'avion, avant de procéder à la compensation proprement dite. Le principe de la calibration consiste donc à isoler le champ de perturbation de l'avion du champ terrestre par un vol à haute altitude, durant lequel seront imprimés des mouvements d'oscillation suivant les trois angles d'attitude, à une fréquence mesurable. L'amplitude de ces mouvements doit être au moins égale à celle que l'on est susceptible de faire durant les levers. Ce point doit être respecté pour les trois orientations possibles de l'avion (roulis, tangage et lacet). Si en phase de lever les mouvements de roulis et de tangage sont généralement limités en amplitude, ce n'est pas le cas du lacet puisque celui-ci varie en même temps que les changements de cap lors du passage des lignes aux traverses y compris quand on passe aux directions opposées.

VOL DE CALIBRATION

En pratique, le vol de calibration obéit à une géométrie précise et reproductible, appelée Figure de Mérite (FOM) durant laquelle l'avion décrit successivement trois oscillations de roulis, trois oscillations de tangage et trois oscillations de lacet avec une période de quelques secondes et une amplitude comprise entre 5 et 10 degrés environ. Les quatre directions cardinales sont décrites et ce dans les deux sens. Les virages entre chaque branche nécessitent un roulis plus prononcé (20 à 30 degrés) qui ne sont généralement pas pris en compte lors du calcul des coefficients.

ESTIMATION DES COEFFICIENTS. PROBLÈMES DE COLINÉARITÉ ET "REGRESSION RIDGE"

Le calcul des coefficients revient à rechercher la solution mathématique qui minimise les écarts entre les signaux mesurés et ceux générés par le modèle. Le champ des perturbations étant décrit comme une combinaison linéaire des cosinus directeurs et du champ terrestre, l'algorithme des moindres carrés est particulièrement indiqué. Les problèmes de conditionnement provoqués par les corrélations entre les colonnes de la matrice à inverser sont faciles à diagnostiquer à l'aide des valeurs propres de la matrice. Pour ce faire, on calcule un indice dit de

conditionnement en faisant le rapport de la plus grande sur la plus petite valeur propre. Dans la pratique, on considère que cet indice ne doit pas dépasser 10^3 . Dans certains cas, on pourra observer des colinéarités fortes lorsque par exemple certaines variables explicatives ne sont pas utilisées, comme par exemple l'absence de courants de Foucault. Une manière efficace de résoudre ce problème de multicollinéarité consiste à utiliser la méthode dite de "regression ridge". Dans le cas où la matrice est mal conditionnée, les estimateurs (coefficients) présentent alors une variance bien plus faible que lorsqu'on utilise l'algorithme des moindres carrés. (Le principe général consiste à décaler les valeurs propres de la matrice d'une petite constante. Ainsi les valeurs propres les plus grandes, qui ont une signification réelle sont peu modifiées, alors que les valeurs propres les plus faibles – qui posent problème lors de l'inversion – sont significativement modifiées. La mise en œuvre du "regression ridge" nous a ainsi permis d'éviter les problèmes d'instabilité numérique et de rendre nos algorithmes plus robustes.

RÉSULTATS

Les figures qui suivent montrent les résultats obtenus lors des vols de calibration réalisés à 2 500m d'altitude à proximité du camp REX, au Nunavik. Comme les blocs avaient des orientations de lignes de vol différentes, trois Figures de mérite ont été respectivement volées suivant les caps :

	AB	CE	RWI
Branche 1	N 20	N 35	N 70
Branche 2	N 110	N 125	N 160
Branche 3	N 200	N 215	N 250
Branche 4	N 290	N 305	N 340

En volant les figures de calibration dans des directions semblables aux lignes de vol de production, on optimise les coefficients pour ces directions qui sont celles qui seront utilisées dans la pratique.

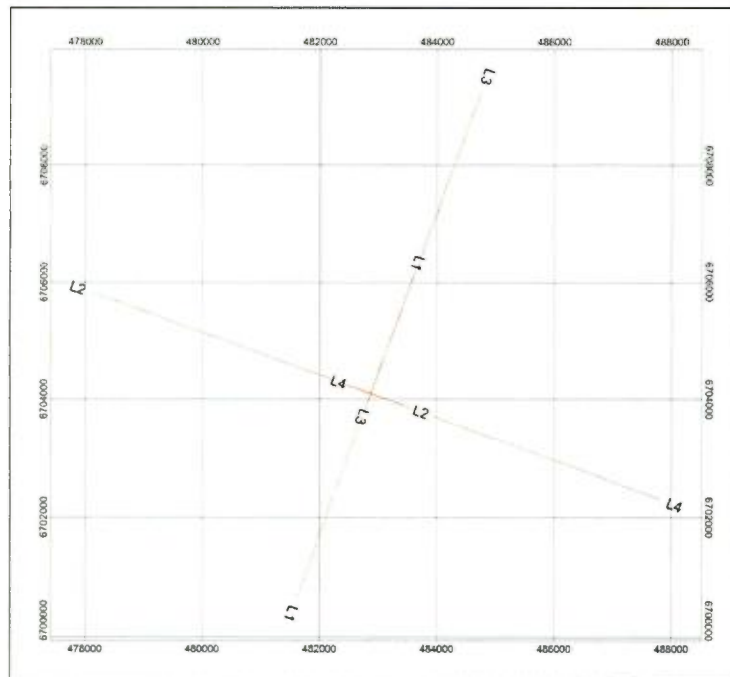
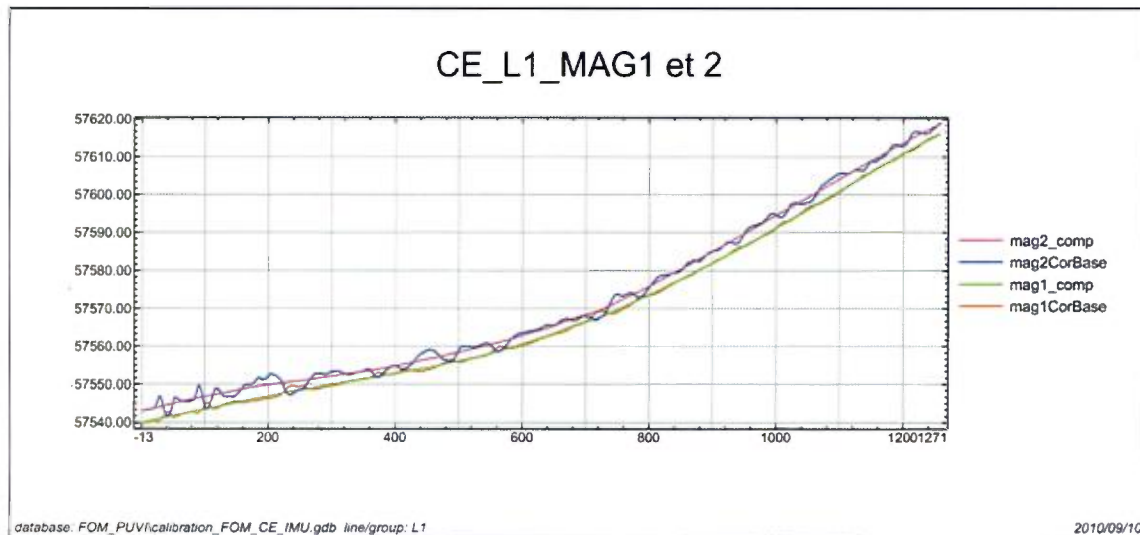


Figure 7 : Figure de mérite (FOM)

Chaque figure de mérite comprend 4 branches (L1, L2, L3 et L4) volées à haute altitude en décrivant une figure en forme de trèfle (double 8). Chaque branche est donc volée dans les deux sens pour respectivement la direction des lignes de vol et des lignes de contrôle.

Les figures qui suivent montrent le champ avant et après compensation pour chacune de ces branches et pour chacun des magnétomètres gauche et droit (1 et 2 sur les figures) pour la FOM du bloc CE.



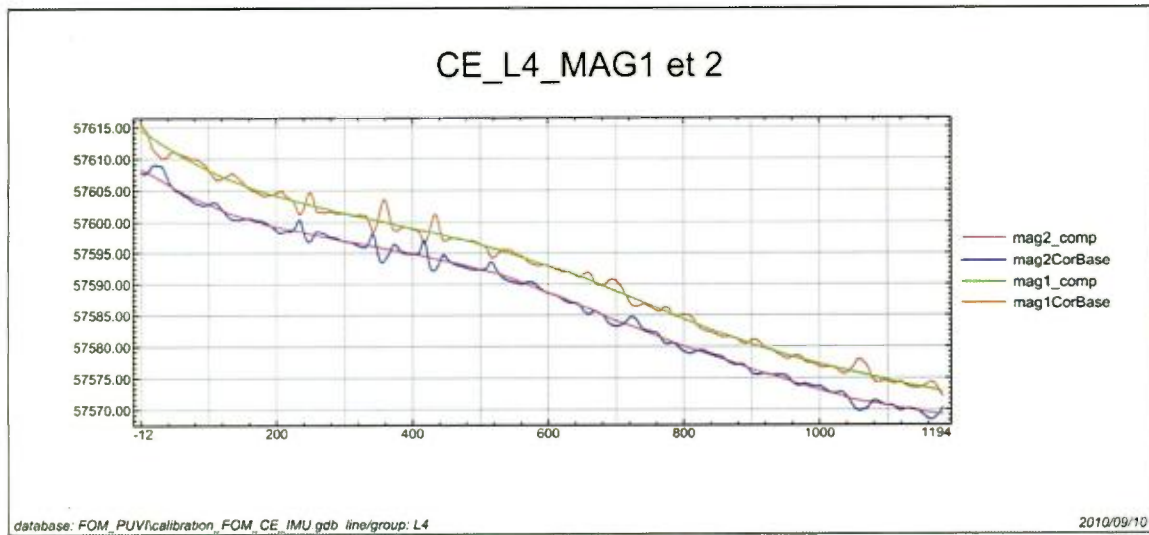
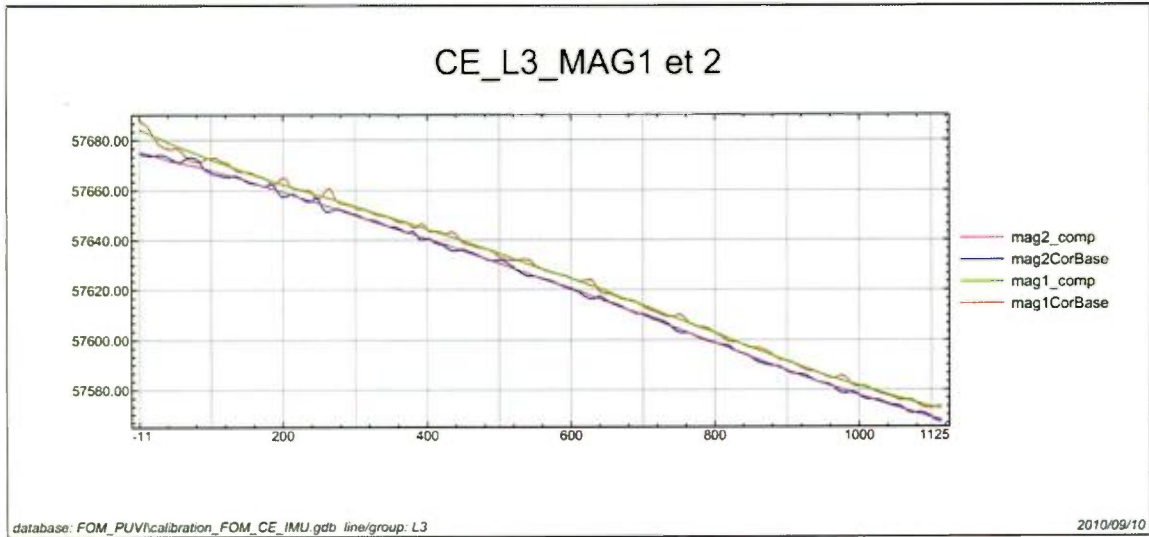




Figure Of Merit (FOM) - 3 septembre 2010 -

Bloc AB : MAG1

Manoeuvre	L1	L2	L3	L4	Somme des manoeuvres
Roll	0.09	0.07	0.07	0.05	0.28
Pitch	0.10	0.08	0.04	0.06	0.28
Yaw	0.03	0.08	0.06	0.06	0.23
Somme pour la branche	0.22	0.23	0.17	0.17	0.79

Bloc AB : MAG2

Manoeuvre	L1	L2	L3	L4	Somme des manoeuvres
Roll	0.09	0.07	0.08	0.06	0.30
Pitch	0.10	0.09	0.03	0.08	0.30
Yaw	0.07	0.07	0.12	0.06	0.32
Somme pour la branche	0.26	0.23	0.23	0.20	0.92

Bloc CE : MAG 1

Manoeuvre	L1	L2	L3	L4	Somme des manoeuvres
Roll	0.07	0.07	0.08	0.06	0.28
Pitch	0.07	0.07	0.15	0.04	0.33
Yaw	0.04	0.05	0.10	0.04	0.23
Somme pour la branche	0.18	0.19	0.33	0.14	0.84

Bloc CE MAG 2 :

Manoeuvre	L1	L2	L3	L4	Somme des manoeuvres
Roll	0.05	0.09	0.11	0.03	0.28
Pitch	0.07	0.03	0.12	0.05	0.27
Yaw	0.03	0.07	0.02	0.02	0.14
Somme pour la branche	0.15	0.19	0.25	0.10	0.69

Bloc RWI MAG 1 :

Manoeuvre	L1	L2	L3	L4	Somme des manoeuvres
Roll	0.09	0.14	0.07	0.10	0.40
Pitch	0.05	0.05	0.10	0.09	0.29
Yaw	0.07	0.05	0.07	0.02	0.21
Somme pour la branche	0.21	0.24	0.24	0.21	0.90

Bloc RWI MAG 2 :

Manoeuvre	L1	L2	L3	L4	Somme des manoeuvres
Roll	0.09	0.16	0.07	0.10	0.42
Pitch	0.05	0.05	0.10	0.12	0.32
Yaw	0.08	0.04	0.03	0.03	0.18
Somme pour la branche	0.22	0.25	0.20	0.25	0.92



**Log Book C10081 AZIMUT
NAVIGATION CONTROL**

Date	Weather Conditions & Comments	Flight #	Time Flown (Hours)	Block Flown	Lines Flown	In Specs Km Flown	% of the Block Flown	Line to Reflight
2010-07-17								
2010-07-18	arrival to rex camp setting the plane							
2010-07-19	setting the plane setting the plane							
2010-07-20	Cloudy	1	2.5	AB	260-400	106.4	1.2	
	Cloudy and rain	2	3.1	CE	230-410	268.9	12.2	
2010-07-21	Rain	3	1.5	CE	420-470	89.6	4.1	
	Cloudy and some rain	4	2.0	CE	480-590	179.2	8.1	
2010-07-22	Clear sky	5	3.5	CE	600-820	358.5	16.3	
	Clear sky	6	3.7	CE	830-1080	358.5	16.3	
2010-07-23	Cloudy	7	3.6	CE	1090-1190 1450-1570	343.5	15.6	
	Clear sky	8	1.7	CE	1210-1300	149.4	6.8	
2010-07-24	Clear sky	9	3.8	CE	1310-1440	412.4	18.7	
	Clear sky	10	3.4	AB	2410-2550	355.5	4.2	
2010-07-25	Clear sky	11	3.6	AB	2560-2720	436.8	5.1	
	Clear sky	12	3.6	AB	2730-2910	436.9	5.1	
2010-07-26	Clear sky	13	4.2	AB	2180-2401	471.6	5.5	
			2.4		No line done			
2010-07-27	Rain and strong wind. No flight done.							
2010-07-28	Cloudy and strong wind	14	3.3	AB	2920-3040	417.5	4.9	
	Cloudy	15	3.4	AB	3060-3140	278.1	3.3	3160-3180
2010-07-29	Clear sky	16	3.8	AB	3200-3370	487.4	5.7	
	Clear sky	17	3.7	AB	3380-3550	453.3	5.3	
2010-07-30	Cloudy and some rain	18	2.0	AB	3560-3620	179.7	2.1	
	Clear sky	19	4.2	AB	1960-2170	544.9	6.4	
2010-07-31	Cloudy	20	3.9	AB	1940-1750	484.2	5.7	
	Rain no flight done		.3	AB	No line done			
2010-08-01	Cloudy	21	3.5	AB	3630-3720 3150-3180	403.0	4.7	
2010-08-02	Clear sky	22	4.0	AB	3730-3880	501.3	5.9	
	Clear sky	23	3.6	AB	3890-4020	445.4	5.2	
2010-08-03	Rain							
	Cloudy	24	3.8	AB	4330-4490	430.1	5.0	
2010-08-04	Rain and strong wind							
	Rain							
2010-08-05	Cloudy	25	3.2	AB	4220-4320	335.2	3.9	
	Cloudy	26	2.8	AB	4060-4210	498.7	5.8	
2010-08-06	No flight done.							
2010-08-07	Rain and strong wind							
	Cloudy	27	3.2	AB	4500-4640 4030-4050	322.5	3.8	
2010-08-08	Clear sky	28	4.2	AB	50230-50400	498.5	5.8	
	Strong wind no flight done							
2010-08-09	Clear sky	29	3.9	AB	50120-50220 50410-50420	259.2	3.0	
	Clear sky	30	3.7	RWI	1010-1290 2570-2800	503.8		
2010-08-10	This is actually in the #30 flight			CE	1010,1080,1090	44.8	2.0	
	Clear sky, softnav was restarted	31	3.7	RWI	1300-1910 1440-2070	381.5		
2010-08-11	Clear sky	32	4.2	RWI	1450-1800	458.7		
	Clear sky	33	4.0	RWI	1810-1900 2400-2560	475.0		
2010-08-12	Clear sky	34		FOM				
	Clear sky, two lines were passed.	35	4.1	RWI	2080-2390	294.5		2080-2190
2010-08-13	Clear sky	36	2.5	RWI	49910-50020 2230-2280	262.0		
	Moving to rex south							
2010-08-14	Clear sky	37	3.9	SOUTH	2080-2100 2190-2470	466.6	11.0	
		38	4.0	SOUTH	1930-2070 2110-2180	519.8	12.3	
2010-08-15	Clear sky, with wind	39	3.8	SOUTH	1730-1920	495.5	11.7	
	Rain							
2010-08-16	Rain							
	Clear sky	40	3.3	SOUTH	1550-1720	379.6	8.9	
2010-08-17	Rain							
	Rain							
2010-08-18	Strong wind							
	Rain							
2010-08-19	Rain							
	Rain							
2010-08-20	Cloudy	41	4.0	SOUTH	1310-1540	522.7	12.3	
	Clear sky	42	4.2	SOUTH	900-1040 441-500	500.4	11.8	
2010-08-21	Clear sky	43	4.0	SOUTH	10-431 570-630	532.5	12.6	
	Clear sky	44	4.0	SOUTH	510-560 640-780	605.3	14.3	
2010-08-22	Clear sky	45	4.2	SOUTH	790-890 1050-1180	542.7	12.8	
	Cloudy	46	4.2	SOUTH	1190-1300 100010-100100	503.8	11.9	

2010-08-23	Third flight of 22nd	47	2.2	SOUTH	100110-100180	223.9	5.3	
	Cloudy	48	3.9	AB	410-660	408.9	4.8	
2010-08-24	Rain and wind							
	Rain and wind							
2010-08-25	Rain and wind							
	Rain and wind							
2010-08-26	Rain and wind							
	Rain and wind							
2010-08-27	Rain and wind							
	Rain and wind							
2010-08-28	Rain and wind							
	Rain and wind							
2010-08-29	Cloudy, retake of RWI	49	0.3	RWI	2180-2190	25.7	1.0	
	Rain							
	Cloudy	50	2.0	AB	670-740	140.4	1.3	
2010-08-30	Cloudy	51	4.3	AB	1540-1750	402.4	3.6	
	Cloudy	52	4.3	AB	750-1000	497.8	4.5	
	Cloudy, following retake RWI			RWI	2080-2120	63.3	2.5	
	Clear sky	53	4.5	AB	1270-1520	516.4	4.7	
2010-08-31		54	4.5	AB	1010-1260	517.1	4.7	
	Clear sky, end retake RWI			RWI	2130-2170	64.3	2.5	
2010-09-01	Rain and wind							
	Rain and wind							
2010-09-02	Rain and wind							
	Rain and wind							
2010-09-03	Clear sky	55	3.3	AB	1530 50070-50180 50220	272.3	2.4	
	Clear sky	56		FOM				
2010-09-04	Arrival at Kuujuaq							
2010-09-05	Strong wind							
	Strong wind							
2010-09-06	Cloudy							
	Clear sky	57	3.3	DIANA	2420-2610	345.9	4.1	
	Clear sky	58	4.3	DIANA	750-1060 (even)	409.9	4.8	
2010-09-07	Clear sky				100130-100160			
	Clear sky	59	4.3	DIANA	1070-1280 (even)	455.1	5.3	
	Clear sky	60	4.5	DIANA	1290-1500 (even)	550.1	6.4	
2010-09-08	Clear sky				100060-100120			
	Clear sky	61	5.0	DIANA	1510-1620 (except 1511)	618.5	7.2	
	Clear sky	62	4.8	DIANA	1461-1521 (odd) 1630-1700	578.3	6.8	
2010-09-09	Clear sky				100170-100210 100020			
	Clear sky	63	4.5	DIANA	1001-1361 (odd)	494.6	5.8	
2010-09-10	Clear sky	64	4.7	DIANA	1371-1451 (odd) 1710-1840	600.4	7.0	
	Inspection on the plane							
2010-09-11	Clear sky	65	5.0	DIANA	1850-2040	646.2	7.6	
	Clear sky	66	5.0	DIANA	2050-2320	580.3	6.8	
2010-09-12	Clear sky	67	2.0	DIANA	2330-2410	160.3	1.9	
2010-09-13								
	Return to Montreal							
2010-09-14								
	Total AB		96.7			11101.5	100.0	
	Total CE		22.9			2204.8	100.1	
	Total SOUTH		41.8			5292.8	100.0	
	Total RWI		22.2			2528.8	100.0	
	Total DIANA		47.4			5439.6	100.0	
	Total		231.0			26567.5	100.0	