





# Acquisition géophysique héliportée de l'île de La Réunion

Rapport final

**BRGM/RP-63818-FR**

Décembre 2014

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Recherche du BRGM 2014 DGR

**G. Martelet, P.A. Reninger, J. Perrin, J. DeParis**

**Vérificateur :**

Nom : Pierre Nehlig

Date : 18/12/2014

Signature :



**Approbateur :**

Nom : Séverine Bes de Berc

Date : 15/01/2015

Signature :

Séverine BES DE BERG  
Directrice  
BRGM Réunion



Le système de management de la qualité et de l'environnement est  
certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



**Mots clés :** Électromagnétisme, Magnétisme, Hélicoptère, Géophysique aéroportée, La Réunion, ReunEM, Résistivité, RGF

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Martelet G., Reninger P.A., Perrin J., Deparis J.** (2014) – Acquisition géophysique hélicoptère de l'île de La Réunion. BRGM/RP-63818-FR, Rapport final, 90 p., 28 fig., 21 tab., 5 ann.

© BRGM, 2014, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Au travers du projet REUN\_EM, la Région La Réunion, le FEDER à La Réunion, le MESR et le BRGM ont réalisé une campagne de géophysique hélicoptée en électromagnétisme et magnétisme de l'île de La Réunion. Cette campagne haute résolution a pour objectifs de doter le territoire réunionnais d'une infrastructure de données géophysiques moderne, utile aux décideurs et *in fine* à la société, permettant d'aborder les différentes dimensions de la ressource naturelle et de l'aménagement du territoire. Ces données par ailleurs ne manqueront pas de susciter et d'éclairer un certain nombre de questions scientifiques en géosciences, propres au territoire insulaire et volcanique.

L'opération a été menée sous maîtrise d'œuvre du BRGM, depuis son élaboration jusqu'au contrôle et à la remise des produits. L'acquisition s'est déroulée sur un peu plus de 2 mois et demi, du 2 Mai au 23 Juillet 2014, et les traitements, mise en forme de données, réalisation des inversions et du rapport et leur validation/réception par le BRGM se sont poursuivis jusqu'en Décembre. Ce rapport détaille le protocole d'acquisition, de traitement et d'inversion des données.

Techniquement, cette opération a deux objectifs : 1/ pouvoir le territoire d'une cartographie haute résolution en magnétisme, 2/ réaliser une cartographie en trois dimensions de la résistivité (ou de la conductivité, qui est son inverse) du sous-sol sur une épaisseur pouvant atteindre 250 mètres, avec une résolution accrue dans la partie superficielle. Pour ce 2<sup>nd</sup> objectif, la méthode retenue est le sondage électromagnétique dans le domaine temporel, aussi appelé Time Domain Electro-Magnetism (TDEM).

La réalisation du lever a été attribuée à la société SkyTEM au terme d'un appel d'offres européen. La particularité du système choisi (développé à l'Université d'Aarhus, Danemark) est de combiner deux moments d'émission différents, le moment faible pour sonder la proche subsurface avec une résolution optimale, et le moment fort pour sonder plus en profondeur mais avec une résolution plus faible.

Le survol, assuré par la compagnie réunionnaise HéliLagon, réalisé avec une garde au sol moyenne de 81 m, a été effectué selon un maillage régulier constitué de lignes de vol espacées de 400 m, orientées Nord-Sud et localement N45 ou N135, selon le relief. Ce plan de vol de base a été densifié soit par des resserrements à 200 m, soit par des recoupes orientées Est-Ouest espacées de 400 m, sur environ 70% du territoire, constituant des zones d'intérêt prioritaires définies avec les partenaires du projet. La couverture totale réalisée comprend 10 341 km linéaires.

Un contrôle de toutes les phases d'acquisition et de traitement et inversion des données a été réalisé par le BRGM afin d'assurer la qualité des données conformément au Cahier des Charges. Des reprises de vols ont été ordonnées pour toutes les données acquises en dehors des tolérances admises.

Les données électromagnétiques ont été traitées à l'aide du logiciel Workbench<sup>1</sup> développé par l'Université d'Aarhus au Danemark. L'inversion des données a permis de restituer les sondages électromagnétiques sur les lignes de vol. Une interpolation par krigeage a été réalisée à partir des sondages EM pour restituer des grilles de résistivité ; ces dernières ont-

---

<sup>1</sup> © 2008 Aarhus Geophysics ApS C.F.Møllers Allé 4 DK-8000 Aarhus C, Denmark  
(<http://www.aarhusgeo.com/aarhus-workbench/software/workbench/aarhus-workbench-2.html>)

elles-mêmes été interpolées dans un modèle final de résistivité en 3D des 200 premiers mètres de la surface, sur l'ensemble de l'île.

Les données magnétiques ont été traitées suivant les règles de l'art, à l'aide du logiciel Oasis Montaj<sup>2</sup> de Geosoft, pour aboutir à l'anomalie du champ magnétique. Ces données ont permis de dériver d'autres variables magnétiques, qui sont l'anomalie magnétique réduite au pôle, la dérivée verticale du champ magnétique, le signal analytique et l'inclinaison de la dérivée (tilt dérivative).

Le présent rapport documente l'ensemble des caractéristiques techniques du levé et des produits qui en dérivent. Sous forme numérique, il accompagne les données acquises.

---

<sup>2</sup> Geosoft, 2010, Geosoft Oasis Montaj: Software for Earth Sciences Mapping and Processing ([www.geosoft.com/](http://www.geosoft.com/))

# Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	<b>11</b>
<b>2. Plan de Vol</b> .....	<b>13</b>
<b>3. Spécifications de mesures</b> .....	<b>15</b>
3.1. NAVIGATION.....	15
3.2. ÉQUIPEMENT GÉOPHYSIQUE .....	15
3.2.1. Émetteur .....	17
3.2.2. Récepteur .....	18
3.2.3. Inclinomètres .....	19
3.2.4. DGPS .....	19
3.2.5. Altimètres.....	20
3.2.6. Vidéo .....	20
3.2.7. Magnétomètre.....	20
3.3. STATIONS SOLS .....	21
3.3.1. Stations magnétiques .....	21
<b>4. Calibration des systèmes de mesure</b> .....	<b>23</b>
4.1. CALIBRATION DU TDEM .....	23
4.1.1. Test sur site de référence .....	23
4.1.2. Test à haute altitude .....	23
4.2. CALIBRATION DU MAGNÉTOMÈTRE .....	26
4.2.1. Effet de cap.....	26
4.2.2. Test de lag.....	27
<b>5. Conditions opérationnelles</b> .....	<b>29</b>
5.1. GÉNÉRALITÉS.....	29
5.2. DIURNE MAGNETIQUE .....	29
<b>6. Contrôle de qualité et traitement sur le terrain</b> .....	<b>31</b>
6.1. LIGNE TEST .....	31
6.2. CONTRÔLE ET VALIDATION DES DONNÉES SUR SITE (BRGM).....	31
6.3. LES REVOLS .....	32
<b>7. Traitement</b> .....	<b>33</b>
7.1. TRAITEMENT ET INVERSION DES DONNÉES EM .....	33
7.1.1. Filtrage des données EM .....	33

7.1.2. Inversion et interpolation des données TDEM.....	40
7.2. MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN (MNT).....	44
7.3. REPRÉSENTATION DES RÉSISTIVITÉS INVERSÉES.....	44
7.4. DONNÉES MAGNÉTIQUES.....	45
7.4.1. Traitement de la station de base et correction de la diurne.....	45
7.4.2. Filtrage des données magnétiques hélicoptérées.....	46
7.4.3. Corrections des données magnétiques.....	46
7.4.4. Corrections de l'IGRF.....	46
7.4.5. Nivellement des données magnétiques.....	46
7.4.6. Champ magnétique résiduel.....	46
7.4.7. Champ total.....	47
7.4.8. Dérivées du champ magnétique.....	47
7.5. REPRÉSENTATION.....	48
<b>8. Produits finaux.....</b>	<b>49</b>
8.1. FICHER TDEM XYZ.....	49
8.2. FICHER MAGNÉTIQUE XYZ.....	49
8.3. GRILLES.....	50
8.4. ORGANISATION DES DONNÉES.....	51
<b>9. Conclusions.....</b>	<b>53</b>
<b>10. Bibliographie.....</b>	<b>55</b>
<b>Annexes</b>	
Annexe 1 Calibration du système EM.....	57
Annexe 2 Caractéristiques temporelles des fenêtres d'enregistrement EM.....	63
Annexe 3 Calendrier des opérations.....	67
Annexe 4 Représentation des données EM.....	75
Annexe 5 Représentation des données du champ magnétique.....	83

## Liste des illustrations

Figure 1 : Vue d'ensemble du plan de vol réalisé.....	13
Figure 2 : Schéma montrant l'emplacement des appareils de mesures. L'octogone bleu représente la bobine émettrice TDEM. Le plan horizontal est défini par (x,y).....	16
Figure 3 : Test à haute altitude du 01/05/2014 réalisé à 1116 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le LM (à gauche) et le HM (à droite).....	24

Figure 4 : Test à haute altitude du 06/05/2014 réalisé à 1042 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le LM (à gauche) et le HM (à droite).....	24
Figure 5 : Test à haute altitude du 15/05/2014 réalisé à 1005 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le LM (à gauche) et le HM (à droite).....	25
Figure 6 : Test à haute altitude du 17/06/2014 réalisé à 1025 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le LM (à gauche) et le HM (à droite).....	25
Figure 7 : Test à haute altitude du 29/06/2014 réalisé à 1013 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le LM (à gauche) et le HM (à droite).....	26
Figure 8 : Localisation du test de l'effet de cap magnétique. ....	27
Figure 9 : Localisation du test de lag magnétique et profils enregistrés à l'aller et au retour.....	28
Figure 10 : Illustrations du matériel et de la mise en œuvre du levé hélicoptéré.....	30
Figure 11 : Données de garde au sol laser mesurées (points) et corrigées (courbe). Ce graphique correspond à environ 2 km de ligne de vol. A partir de 10:01:50, l'altitude de vol augmente et « l'éparpillement » des données mesurées traduit le passage d'une zone sans végétation à une zone de forêt. ....	34
Figure 12 : Paramètres du logiciel Workbench utilisés par Aarhus Geophysics pour le filtrage du LM (à gauche) et du HM (à droite). ....	36
Figure 13 : Résultat de la seconde étape de filtrage présenté sur deux exemples de courbes bruitées, affectées par des oscillations et pics. Les courbes bleue et rouge représentent respectivement la décroissance mesurée et celle reconstruite par SVD. Les points noirs indiquent les fenêtres bruitées identifiées et rejetées par la suite.....	37
Figure 14 : Carte de poids d'une composante de bruit caractérisée par SVD. Les lignes électriques géoréférencées (parfois incomplètes) apparaissent en noir et les lignes de vol en tiretés gris. ....	38
Figure 15 : Signal résultant des mesures TDEM (courbes rouge LM et orange HM) après le traitement des données réalisé par Aarhus Geophysics. Les fenêtres supprimées sont grisées. La courbe verte correspond au niveau de bruit enregistré.....	39
Figure 16 : Signal TDEM pour le LM sur une portion de 3,5 km de ligne de vol et altitude de vol (courbe marron supérieure). La courbe vert kaki représente les valeurs de la 1 <sup>ière</sup> fenêtre utilisable du LM, la courbe bleu marine les valeurs de la 2 <sup>nde</sup> fenêtre, etc... Les points gris sont les valeurs supprimées automatiquement ou manuellement car un bruit est observé sur la courbe de décroissance. De 11:23:00 à 11:24:00, des bruit de couplage ont été identifiés, correspondant à la périphérie d'une zone urbaine. ....	39
Figure 17 : Compte-tenu du nombre de sondages TDEM très élevé, l'inversion a été réalisée séparément sur 6 blocs choisis en fonction de critères géographiques et de résistivité moyenne des terrains. ....	41
Figure 18 : Trois modèles a priori différent ont été utilisés en fonction de la position des sondages inversés : en bleu foncé un modèle conducteur à 0.25 $\Omega$ .m sur la partie marine, en jaune un modèle moyen à 100 $\Omega$ .m, en orange un modèle résistif à 500 $\Omega$ .m. ....	41
Figure 19 : Paramètres géométriques du modèle a priori de l'inversion à 25 couches réalisée par Aarhus Geophysics, pour une zone de résistivité « moyenne ». ....	42

Figure 20 : Illustration de la correction de PFC sur un enregistrement électromagnétique. Pour le levé de La Réunion, cette correction a permis d'exploiter les enregistrements TDEM dès 7 $\mu$ s (au lieu de 22 $\mu$ s sans PFC). .....	43
Figure 21 : Position x,y non corrigée et corrigée basée sur l'angle de la topographie et sur la position du système (adaptée de HGG Report 201210-01 : SkyTEM Survey Mayotte Report).....	44
Figure 22 : Rampe montante et descendante pour le LM. ....	59
Figure 23 : Rampe montante et descendante pour le HM.....	59
Figure 24 : Résultats de l'étalonnage du dispositif de mesure TDEM pour une altitude de 11m, 16m, 20m, 27m et 37m. La courbe en noir est la réponse attendue, les courbes en vert et bleu sont les réponses enregistrées pour le moment faible et le moment fort respectivement. ....	62
Figure 25 : Carte de résistivité moyenne entre 5 et 10 mètres de profondeur .....	77
Figure 26 : Carte de résistivité moyenne entre 20 et 30 mètres de profondeur .....	79
Figure 27 : Carte de résistivité moyenne entre 90 et 100 mètres de profondeur .....	81
Figure 28 : Carte de l'anomalie magnétique réduite au pôle .....	85

## Liste des Tableaux

Tableau 1 : Numérotation des lignes du plan de vol. ....	14
Tableau 2 : Coordonnées (en mètres) des instruments de mesure dans le repère de la boucle émettrice TDEM. ....	17
Tableau 3 : Coordonnées (en mètres) de l'émetteur TDEM Tx.....	17
Tableau 4 : Paramètres de l'émetteur TDEM.....	18
Tableau 5 : Paramètres des boucles réceptrices TDEM.....	18
Tableau 6 : Caractéristiques de l'enregistrement vidéo. ....	20
Tableau 7 : Paramètres de l'enregistrement magnétique.....	20
Tableau 8 : Localisation des stations magnétiques au sol (Lat/lon, WGS84, degrés décimaux) et période de fonctionnement au cours du levé. ....	21
Tableau 9 : Résultat du test de l'effet de cap magnétique. ....	27
Tableau 10 : Statistiques de vol pour le lever REUN_EM.....	31
Tableau 11 : Localisation des stations magnétiques au sol (Lat/lon, WGS84, degrés décimaux) et période de fonctionnement au cours du levé. ....	45
Tableau 12 : Caractéristique de l'IGRF utilisé pour la réduction au pôle.....	47
Tableau 13 : Description des champs fournis dans les fichiers EM XYZ.....	49
Tableau 14 : Description des champs fournis dans les fichiers magnétiques XYZ.....	50
Tableau 15 : Liste des grilles produites. ....	51
Tableau 16 : Organisation de l'archive numérique associée au présent rapport. ....	51
Tableau 17 : Courant normalisé pour le LM.....	60

Tableau 18 : Courant normalisé pour le HM. ....	61
Tableau 19 : Caractéristiques temporelles des fenêtres de mesure. A noter que les temps indiqués ici pour le HM sont ceux pris en compte dans le logiciel Workbench (qui prend en compte un time-shift de 60 $\mu$ s à partir de la coupure de courant). Si un autre logiciel est utilisé, ce time-shift doit être introduit. ....	65
Tableau 20 : Conditions de vol pour chaque vol .....	70
Tableau 21 : Carnet de vol. ....	73



# 1. Introduction

Le BRGM a assuré la réalisation du projet « REUN\_EM » de cartographie géophysique aéroportée haute résolution de l'île de La Réunion. Les partenaires du projet sont le FEDER et le MESR, portés par la DRRT de La Réunion, la Région La Réunion et le BRGM. L'Université de La Réunion est partenaire scientifique.

Ce projet est une des actions du programme européen FEDER à La Réunion ; il s'inscrit dans l'Axe 2 (Compétitivité de l'économie) et la Mesure 2-02 (Pôle de recherche appliqué en « observation » : terre, mer, espace).

Le projet REUN\_EM comporte deux phases :

- Phase 1 : acquisition, traitements et rendu des données électromagnétiques et magnétique sur l'ensemble de l'île ;
- Phase 2 : première valorisation des données (prévue en 2015).

Le BRGM a confié la réalisation technique du levé à la société danoise SkyTEM, dont le dossier a été sélectionné au terme d'un appel d'offres européen. SkyTEM a fait appel à la société réunionnaise Héllilagon pour l'hélicoptage du dispositif géophysique. Le levé a été réalisé à l'aide d'un hélicoptère de type Eurocopter Astar 350 B3 dont le pilotage a été assuré par rotations de 3 pilotes.

L'acquisition s'est déroulée sur un peu plus de 2 mois et demi, du 2 Mai au 23 Juillet 2014. Le kilométrage linéaire total de l'acquisition est de 10 341 km. Les traitements, la mise en forme des données, la réalisation des inversions et du rapport et leur validation/réception par le BRGM se sont poursuivis jusqu'en décembre 2014.

Le présent rapport détaille le protocole d'acquisition et de traitement des données d'électromagnétisme et de magnétisme ainsi que les résultats d'inversion résultant du projet REUN\_EM, conformément à l'Annexe 1 de la Convention n° 1129 co-signée entre le BRGM et le Préfet de La Réunion en date du 23 Septembre 2013.



## 2. Plan de Vol

Les acquisitions géophysiques ont été réalisées sur l'ensemble de l'île de La Réunion, incluant une frange marine étendue jusqu'à l'isobathe -20 m (Figure 1). Les vols de production ont été réalisés sur un peu plus de 2 mois et demi, du 2 Mai au 23 Juillet 2014. Le kilométrage linéaire totalisé lors de l'acquisition est de 10 341 km.

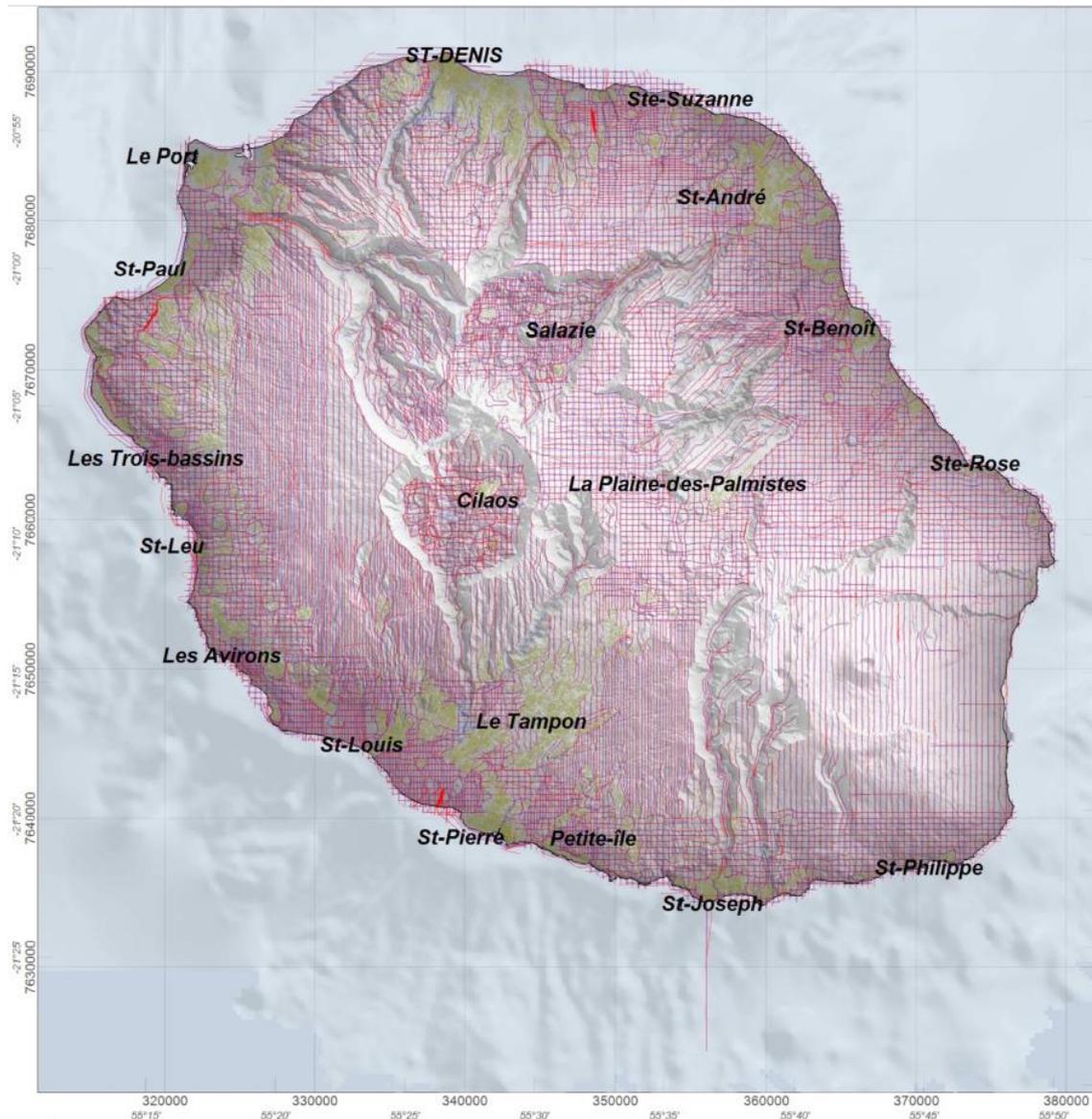


Figure 1 : Vue d'ensemble du plan de vol réalisé.

Le plan de vol et l'ensemble des mesures ont été référencés dans le système de coordonnées projetées UTM 40 Sud (sur le datum WGS 84). Dans ce système, les lignes de vol ont une orientation Nord-Sud espacées de 400 m ; elles sont localement orientées N45 ou N135, selon le relief. Ce plan de vol de base a été densifié soit par des resserrements à 200 m, soit par des recoupes orientées Est-Ouest espacées de 400 m, sur environ 70 % du territoire, constituant des zones d'intérêt prioritaires définies avec les partenaires du projet (Figure 1).

Les écarts entre les trajectoires planifiées et réelles sont dus à la présence au sol d'obstacles pouvant générer un bruit électromagnétique important, tels que des constructions métalliques, lignes électriques, fermes, infrastructures diverses : le pilote a contourné ces obstacles pour préserver le signal. De plus, le survol à basse altitude des agglomérations est interdit. Lors de chaque vol, une ligne test a été réalisée afin de s'assurer du bon fonctionnement du système et de la stabilité des mesures

La nomenclature de numérotation des lignes du plan de vol est présentée dans le Tableau 1.

<i>Numéros des lignes</i>	<i>Description</i>
1xxxxx	Ligne N/S
2xxxxx	Ligne E/W
3xxxxx	Ligne NE/SW (45°)
4xxxxx	Ligne SE/NW (135°)
6xxxxx	Ligne financée par projet industriel spécifique
8xxxxx	Ligne de resserrement (demandée en cours de levé)
973xxx	Ligne pour le test de l'effet de cap
921001-921025	Ligne de répétition (base de l'Éperon)
922001	Ligne de répétition (base de Gillot), occupée une seule fois
923001-923039	Ligne de répétition (base de Gillot)
923041-923088	Ligne de répétition (base de Pierrefonds)

*Tableau 1 : Numérotation des lignes du plan de vol.*

### 3. Spécifications de mesures

Les conditions de mesures de ce levé étaient régies par le Cahier des Charges du dossier d'appel d'offres – réalisé par le BRGM. Les principales spécifications techniques et les tolérances de vol sont rappelées ci-dessous. Au fil des vols, en relation avec le pilote et l'équipe SkyTEM, les géophysiciens du BRGM se sont assurés, compte-tenu des conditions de survol parfois très difficiles, que le meilleur compromis soit atteint entre la sécurité des vols et la qualité des données acquises.

#### 3.1. NAVIGATION

Les tolérances de navigation par rapport aux lignes de vol préétablies sont :

- positionnement planimétrique à +/- 50 m de la ligne théorique ;
- altitude de +/- 10 m par rapport à l'altitude pré-établie ;
- vitesse comprise entre 60 et 100 km/h.

La garde au sol nominale entre le système d'émission électromagnétique et le sol est de 40 à 70 mètres, avec une augmentation pendant le survol des forêts, lignes électriques, obstacles topographiques, ...

La vitesse de l'hélicoptère attendue est de l'ordre de 80 km/h (22 m/s) au-dessus d'une topographie plate. Celle-ci peut varier dans les zones présentant des variations topographiques importantes et en fonction des conditions de vent.

#### 3.2. ÉQUIPEMENT GÉOPHYSIQUE

Le dispositif géophysique, tracté en élingue, comprend les boucles émettrice et réceptrice du TDEM, deux inclinomètres, deux altimètres, deux GPS, un magnétomètre. Une caméra vidéo est également installée à bord de l'hélicoptère, enregistrement de contrôle en continu, à la verticale sous l'hélicoptère.

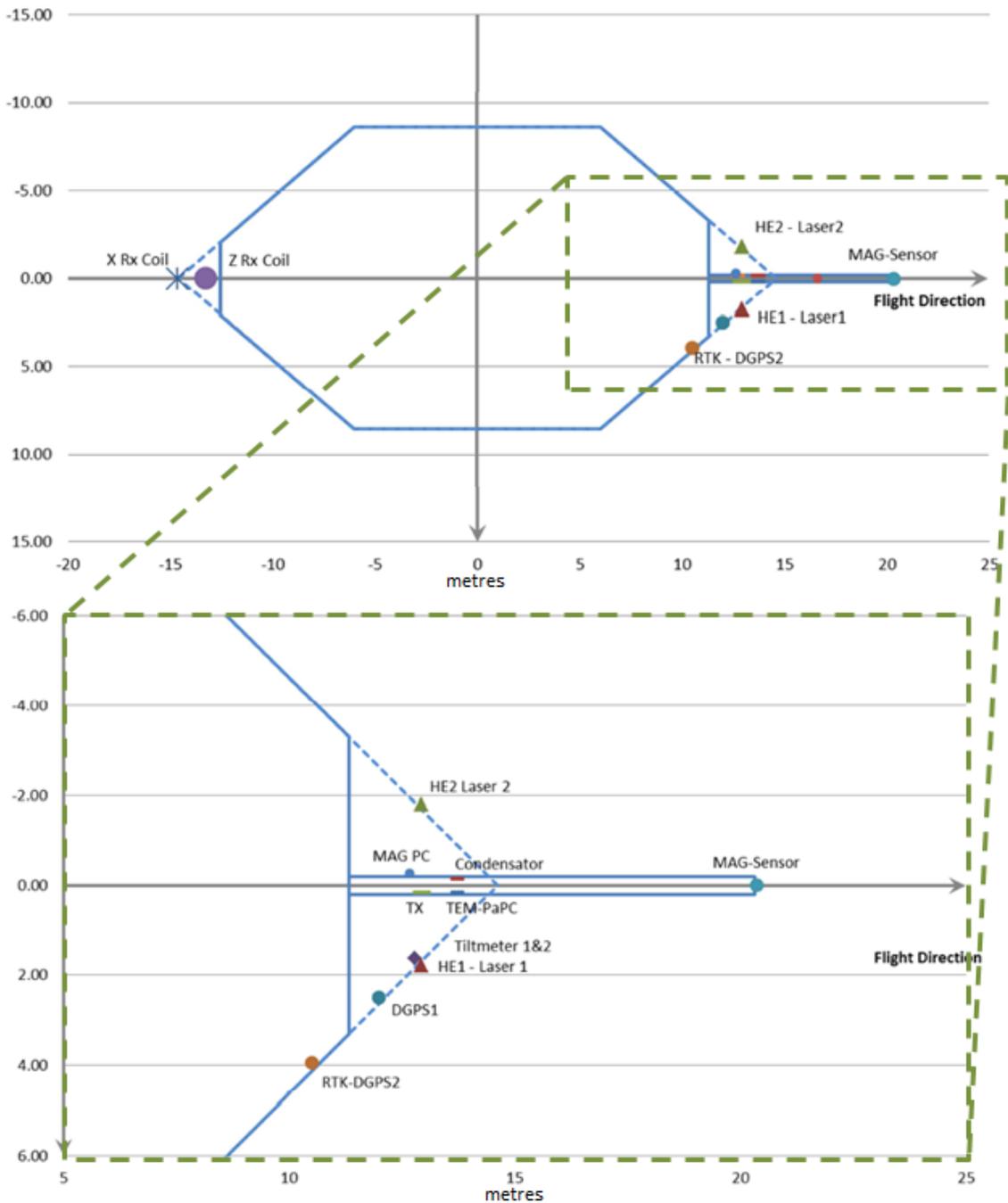


Figure 2 : Schéma montrant l'emplacement des appareils de mesures. L'octogone bleu représente la bobine émettrice TDEM. Le plan horizontal est défini par (x,y).

Le schéma en Figure 2 montre la géométrie de la boucle émettrice et la position des différents instruments qui constituent le système SkyTEM mis en œuvre à La Réunion. Les coordonnées reportées dans le Tableau 2 permettent de définir précisément la géométrie du dispositif, dans un système de coordonnées (X, Y, Z) orthonormé. X et Y définissent le plan horizontal. Z est perpendiculaire au plan (X, Y). L'axe X est positif dans la direction du vol, l'axe Y est orienté vers la droite par rapport à la direction de vol et l'axe Z est orienté vers le bas.

<i>Instrument</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
GPS1	12.00	2.50	-0.16
GPS2	10.51	3.95	-0.16
HE1 (altim.)	12.94	1.79	-0.12
HE2 (altim.)	12.94	-1.79	-0.12
ANG1 (Inclinom.)	12.79	1.64	-0.12
ANG2 (Inclinom.)	12.79	1.64	-0.12
Capteur Mag	20.4	0.00	-0.40
RX (Boucle Z)	-13.25	0.00	-2.00
RX (Boucle Z)	-14.65	0.00	0.00

Tableau 2 : Coordonnées (en mètres) des instruments de mesure dans le repère de la boucle émettrice TDEM.

### 3.2.1. Émetteur

La boucle émettrice TDEM dans la nouvelle configuration en matériaux composites, telle que proposée par SkyTEM, peut être décrite par un octogone dont les coordonnées sont données dans le Tableau 3.

<i>X</i>	<i>Y</i>
-12.56	-2.08
-6.02	-8.62
6.02	-8.62
11.33	-3.30
11.33	3.30
6.02	8.62
-6.02	8.62
-12.56	2.08

Tableau 3 : Coordonnées (en mètres) de l'émetteur TDEM Tx.

La surface de la boucle émettrice est de 340.8 m<sup>2</sup> avec une circonférence de 68.3 m.

La configuration de mesure de l'équipement est de type double moment : un moment fort (HM) composé de quatre tours de boucle Tx et un super moment faible (LM) composé d'un tour de boucle Tx. L'avantage du système double moment est de pouvoir mesurer des fenêtres temporelles précoces lors de la configuration LM pour obtenir une meilleure résolution en subsurface, tout en ayant avec le HM une puissance suffisante pour assurer une grande profondeur de pénétration.

Le courant injecté dans la boucle émettrice est sensible à la température. En dépit de la stabilisation en température de l'émetteur par un système de refroidissement à l'eau, selon les conditions climatiques rencontrées lors de l'acquisition, le courant a varié légèrement autour de 117 A pour le HM et de 9.2 A pour le LM. En effet le courant fourni diminue légèrement quand la température du système augmente et l'efficacité du refroidissement n'est optimale qu'en vol à vitesse stabilisée et peut varier avec le vent. On observe en début de vol qu'il faut approximativement 5 à 10 minutes pour stabiliser la température. De plus, le système est mieux refroidi lorsque la direction du vent est opposée à la direction de vol.

Toutes ces variations sont mesurées et prises en compte lors de la normalisation des données.

La séquence de mesure est décrite par les paramètres listés dans le Tableau 4.

<i>Paramètres</i>	<i>LM</i>	<i>HM</i>
Nombre de tours de l'émetteur	1	4
Aire de l'émetteur	340.8 m <sup>2</sup>	340.8 m <sup>2</sup>
Pic de courant	9.2 A	117 A
Pic de moment	3000 Am <sup>2</sup>	160 000 Am <sup>2</sup>
Fréquence de répétition	325 Hz	25 Hz
Durée de l'émission	800 μs	10000 μs
Durée de mesure (courant interrompu)	738 μs	10000 μs
Nombre de périodes	260 (0.40s)	60 (1.20s)
Forme d'onde (1)	Carrée	Carrée

Tableau 4 : Paramètres de l'émetteur TDEM.

(1) Les formes d'ondes mesurées et modélisées sont illustrées en Annexe 1.

L'émetteur fonctionne en rafales de 60 impulsions unitaires pour le HM et 260 pour le LM. Le cycle d'émission complet est constitué d'alternances de ces séries d'injections de moment faible et fort répétées.

La longueur du cycle complet est donc :

$$\text{Longueur du cycle} = 60 * 20 \text{ ms} + 260 * 1.538 \text{ ms} = 1.60 \text{ s}$$

### 3.2.2. Récepteur

La décroissance du champ magnétique secondaire est mesurée en utilisant deux boucles d'induction indépendantes. La boucle Z (Plan X, Y) mesure la composante verticale du champ magnétique secondaire ; elle a une aire effective de 105 m<sup>2</sup>. La boucle X (Plan Y, Z) mesure la composante horizontale dans la direction X; elle a une aire effective de 115 m<sup>2</sup>.

Les boucles réceptrices sont placées dans une position caractéristique choisie telle que l'atténuation du champ primaire atteigne un facteur 100 :

- Boucle Z, coordonnées (X, Y, Z) en mètres : (-13.25, 0.00, -2.00)
- Boucle X, coordonnées (X, Y, Z) en mètres : (-14.65, 0.00, 0.00)

<i>Paramètres du récepteur</i>	<i>LM</i>	<i>HM</i>
Taux d'échantillonnage	Toute les décroissances sont mesurées	Toute les décroissances sont mesurées
Nombre de fenêtres de mesure	24	36
Filtre passe bas de la boucle réceptrice	210 kHz	210 kHz
Filtre passe bas de l'instrument de réception	300 kHz	300 kHz
Fréquence de répétition	325 Hz	25 Hz
Première porte	0 μs	70 μs

Tableau 5 : Paramètres des boucles réceptrices TDEM.

La position des fenêtres de réception est définie à partir du début de la coupure de l'injection. La liste complète décrivant les fenêtres de mesure est donnée à l'Annexe 2.

La « première porte » est un commutateur dans le système de réception qui maintient le circuit des bobines réceptrices fermé pendant le temps d'émission afin de ne pas saturer les amplificateurs. Le temps de la première porte, qui est reporté dans le Tableau 5, est défini dans la configuration du système de mesure. Il est indépendant des fenêtres de réception.

### 3.2.3. Inclinomètres

L'inclinaison de la boucle est mesurée à l'aide de deux inclinomètres indépendants (nommés Ang1 et Ang2). Leur fréquence de mesure est de 2 Hz. L'inclinomètre utilisé est fabriqué par Bjerre Technologie.

Les inclinomètres sont placés à l'arrière de la boucle émettrice, à proximité de la bobine réceptrice Z. Les données angulaires sont stockées sous forme X, Y. L'axe X est parallèle à la direction de vol et X est compté positivement lorsque l'avant du cadre est au-dessus de l'horizontale. Y est perpendiculaire à la direction de vol et est compté positivement lorsque le côté gauche du cadre est au-dessus de l'horizontale. L'angle est contrôlé et étalonné manuellement par l'utilisation d'un niveau avec une erreur estimée de 1°.

### 3.2.4. DGPS

Les coordonnées géographiques du dispositif sont mesurées avec deux GPS indépendants (GPS1 et GPS2). Ils se trouvent au milieu du mat à l'avant du dispositif. Les caractéristiques du GPS utilisées sont :

- Chipset : OEMV1-L1, 14 canaux avec un taux d'échantillonnage interne de 20 Hz ;
- Antenne : Trimble Bullet III.

Les données GPS sont restituées à 1 Hz.

Les traitements ont été effectués à l'aide du logiciel GrafNavLite<sup>3</sup> de Novatel par traitement différentiel (DGPS).

Sur le terrain le positionnement GPS différentiel a été obtenu en temps réel en utilisant le système TERRASTAR D L'erreur sur la localisation est de  $\pm 0.4$  m après traitement (avec un facteur de qualité de 1).

Après les vols un 2<sup>nd</sup> positionnement DGPS plus précis a été calculé en utilisant le réseau de stations GPS permanentes réunionnais LEL@<sup>4</sup>.

Les coordonnées sont données dans le système WGS84. La référence altimétrique est le niveau de la mer, obtenue en appliquant la grille de quasi-géoïde RAR07 de l'IGN.

---

<sup>3</sup> GrafNav Lite est un logiciel de post-traitement de données GNSS en mode statique et cinématique ; c' est une marque déposée de NovAtel Inc.

<sup>4</sup> Réseau de stations GPS/GNSS permanentes sur l'île de la Réunion, permettant le positionnement temps réel avec une précision centimétrique de tous les capteurs mobiles GPS/GNSS compatibles.

### 3.2.5. Altimètres

Deux lasers (HE1 et HE2), de type MDL ILM300R, sont montés de chaque côté du cadre et mesurent la garde au sol. Chaque laser délivre 30 points par seconde, sur une plage de mesures allant de 0.2 m à approximativement 200 m.

Les surfaces noires, incluant l'eau, réduisent la réflectivité du signal et peuvent induire une perte du signal.

Les données sont délivrées avec une résolution centimétrique mais l'incertitude de mesure varie de 10 à 30 cm. Le bon fonctionnement des lasers est contrôlé sur des cibles connues.

### 3.2.6. Vidéo

La caméra vidéo utilisée (Racelogic VBOX Lite) est montée à bord de l'hélicoptère, elle enregistre en continu au cours des vols, à l'aplomb de l'hélicoptère. Avant chaque vol, les données et le temps de chaque image sont synchronisés avec le temps UTC. Le Tableau 6 donne les caractéristiques de l'enregistrement.

<i>Format d'enregistrement vidéo</i>	<i>Caractéristiques</i>
Taux d'échantillonnage	25 images/sec
Résolution	720*576
Format de fichier	AVI
Référence temporelle	UTC
Taille approximative	2 GB/40min

Tableau 6 : Caractéristiques de l'enregistrement vidéo.

### 3.2.7. Magnétomètre

Le capteur au césium Geometrics G822A et le compteur Kroum KMAG4 ont été installés à l'extrémité du mat qui dépasse à l'avant de la boucle d'injection TDEM (cf. Figure 2).

La sensibilité du système est meilleure que  $0.0005 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$  rms ; à la fréquence d'échantillonnage de 10 Hz, cela correspond à 0.002 nT pic à pic. La précision absolue du magnétomètre est meilleure que 3nT.

Pour ne pas perturber la mesure magnétique, il enregistre pendant les temps de réception de la séquence de mesure du HM du TDEM.

Aucune mesure n'est réalisée (1) pendant le cycle du LM car la fréquence d'acquisition serait trop importante ; (2) quand le TDEM est en mode émission, la mesure magnétique commence à 100 microsecondes jusqu'à l'impulsion TDEM suivante.

Les paramètres d'enregistrement du magnétomètre sont récapitulés dans le Tableau 7.

<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>
Fréquence d'échantillonnage	50 Hz pendant le HM
Précision	3 nT
Sensibilité	$< 0.0005 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
Magnétomètre allumé	Réception des cycles HM
Magnétomètre éteint	Cycles LM

Tableau 7 : Paramètres de l'enregistrement magnétique.

### 3.3. STATIONS SOLS

#### 3.3.1. Stations magnétiques

Le champ magnétique enregistré en vol comprend les variations spatiales du champ provenant des sources localisées dans le sol mais aussi des variations temporelles rapides, dites « diurnes », liées notamment à l'interaction des vents solaires avec l'atmosphère et aux variations de luminosité au cours de la journée. Ces variations diurnes sont enregistrées au sol par des capteurs magnétiques en station fixe (stations de base). Pour s'affranchir des variations diurnes dans les données mesurées en vol, on leur retire l'enregistrement mesuré à la base magnétique au sol. Lorsque l'agitation magnétique temporelle dépasse un certain niveau lors d'un orage magnétique par exemple, il n'est plus possible de réduire les données magnétiques avec une précision suffisante et la ou les portions de lignes affectées sont revolées. Le niveau de l'agitation est jugé excessif lorsque se manifeste sur les enregistrements des stations sol l'une des conditions suivantes :

- en période d'orage magnétique, lorsqu'on observe des variations plus importantes que 30 nT par heure ;
- lorsque la variation diurne, mesurée sur une courbe idéale (corde), dépasse 2 nT pour 2 minutes.

Les stations de base magnétiques ont été installées dans une zone de faible gradient magnétique et aussi loin que possible de sources de perturbations anthropiques (lignes électriques, émetteurs, moteurs, etc.). Trois sites de bases magnétiques ont été implantés, sur les trois bases d'opération occupées au cours du levé ; leur position et période d'occupation sont donnés dans le Tableau 8.

	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Altitude asl</i>
Base mag 2 – L'Eperon (02/05 – 23/05/2014)	-21.0348475°	55.2612696°	233.1 m
Base mag 2 (Gillot) (24/05 – 16/06/2014)	-20.8967462°	55.5213119°	27.7 m
Base mag 2 – Pierrefonds (17/06 – 22/07/2014)	-21.3225073°	55.4312486°	15.0 m
Base mag 2 – L'Eperon (23/07/2014)	-21.0348475°	55.2612696°	233.1 m

*Tableau 8 : Localisation des stations magnétiques au sol (Lat/lon, WGS84, degrés décimaux) et période de fonctionnement au cours du levé.*

Par sécurité la station magnétique au sol était doublée (Base mag secours).

Les capteurs mis en œuvre à la station sol sont des magnétomètres Overhauser GSM-19W ayant une résolution de 0.01 nT et une erreur absolue de 1nT. Leur fréquence d'échantillonnage est de 1 Hz.

Les magnétomètres de base étaient synchronisés en temps à l'aide d'un récepteur GPS.



## 4. Calibration des systèmes de mesure

### 4.1. CALIBRATION DU TDEM

#### 4.1.1. Test sur site de référence

La calibration du TDEM a été réalisée sur site de référence Danois en Février 2014. La calibration inclut la mesure de l'onde transmise (Annexe 1) et des tests réalisés à différentes altitudes. Ces calibrations montrent que l'appareil utilisé reproduit de manière satisfaisante le signal du site de référence pour l'ensemble des altitudes testées.

Les paramètres de calibration sont les suivants :

- facteur de décalage : HM = 0.94 et LM = 0.94 (sur les mesures dB/dt brutes),
- décalage temporel : HM = - 1.4  $\mu$ s et LM = -1.4  $\mu$ s.

Toutes les données produites, incluant les fenêtres temporelles (Annexe 2) et le facteur d'échelle sur les données dB/dt ont été corrigées en utilisant ces paramètres de calibration.

#### 4.1.2. Test à haute altitude

Afin de définir le niveau de bruit de l'appareil de mesure, des tests à haute altitude ont été réalisés régulièrement pendant l'opération à une altitude de l'ordre de 1000 m. Ce test a été effectué périodiquement tout au long de la mission afin de contrôler que le niveau de bruit du système restait stable et bas.

Les figures 3 à 7 montrent les résultats des tests à haute altitude. Les lignes grises représentent chaque décroissance enregistrée. Les lignes bleues représentent les décroissances moyennes et les signes sur chaque fenêtre d'enregistrement sont indiqués par un rond rouge pour les données positives et vert pour les données négatives. Les lignes pointillées indiquent la déviation standard du bruit de fond calculé pour chaque porte.

Pour chaque vol, un test à 400 m d'altitude a aussi été réalisé lors d'un vol de ferry, afin de vérifier la stabilité de la configuration géométrique de la boucle.

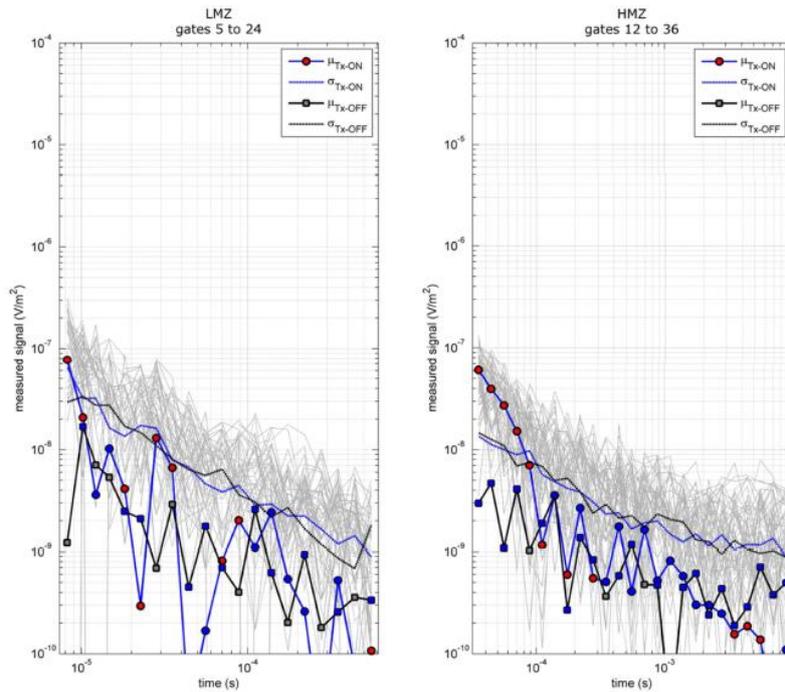


Figure 3 : Test à haute altitude du 01/05/2014 réalisé à 1116 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le LM (à gauche) et le HM (à droite).

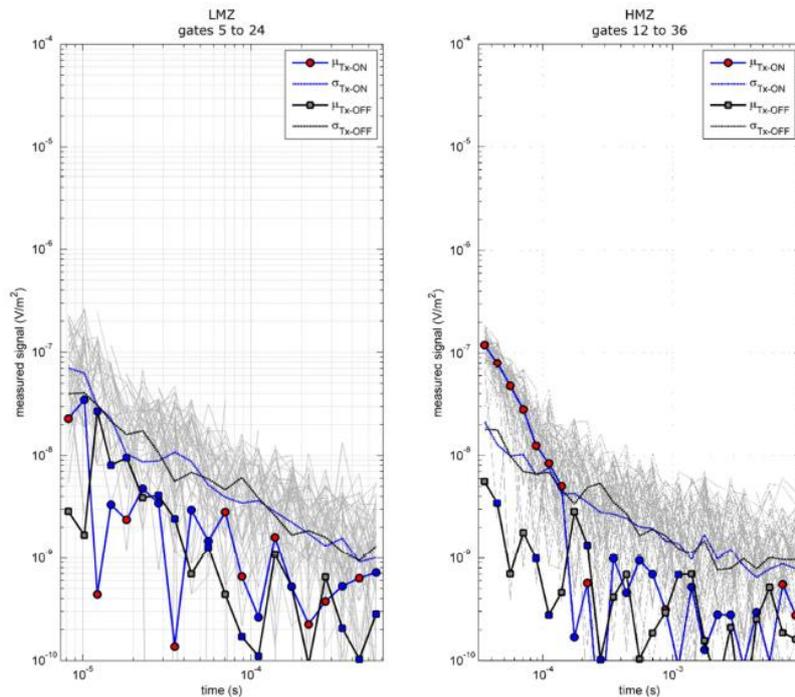


Figure 4 : Test à haute altitude du 06/05/2014 réalisé à 1042 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le LM (à gauche) et le HM (à droite).

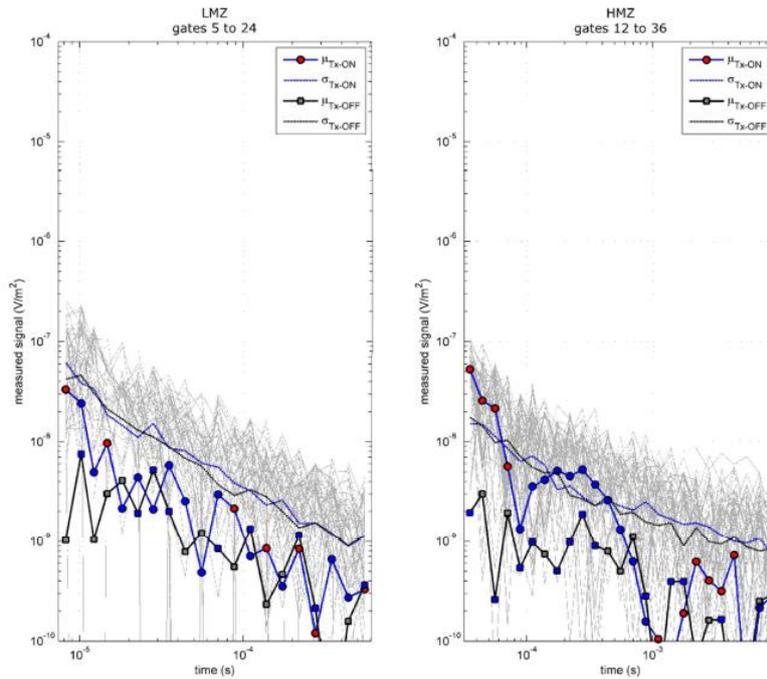


Figure 5 : Test à haute altitude du 15/05/2014 réalisé à 1005 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le LM (à gauche) et le HM (à droite).

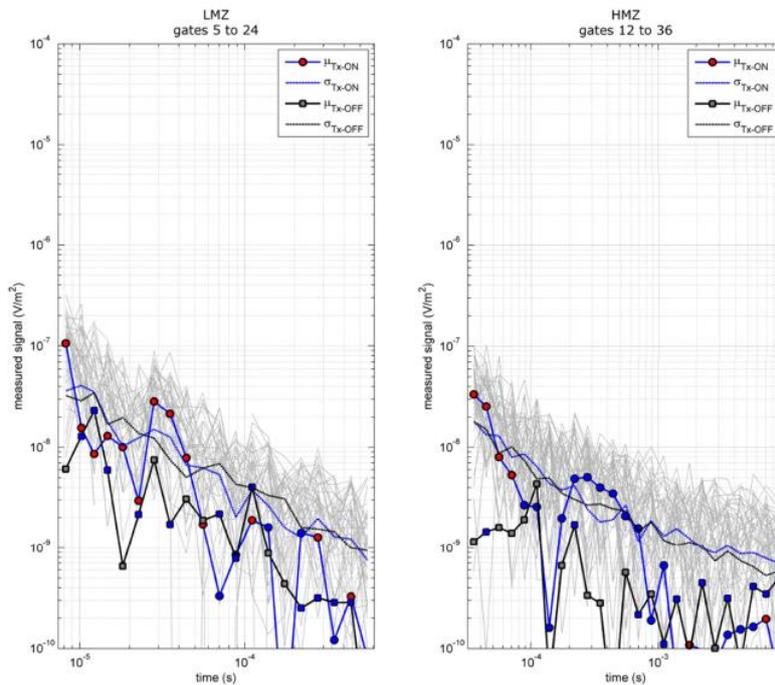


Figure 6 : Test à haute altitude du 17/06/2014 réalisé à 1025 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le LM (à gauche) et le HM (à droite).

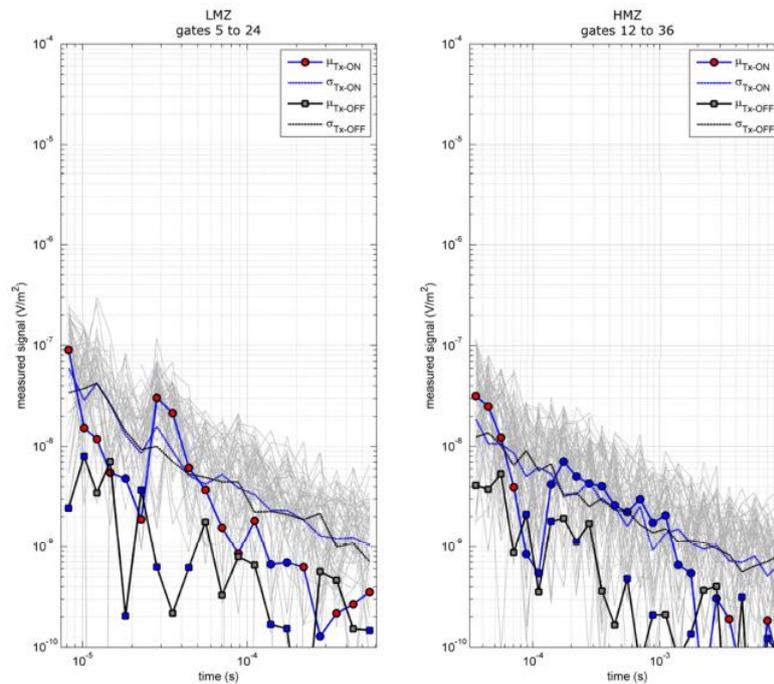


Figure 7 : Test à haute altitude du 29/06/2014 réalisé à 1013 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le LM (à gauche) et le HM (à droite).

## 4.2. CALIBRATION DU MAGNÉTOMÈTRE

Les tests de pré-production et de calibration du magnétisme ont été effectués avec les mêmes paramètres que ceux utilisés pendant les vols de production. Ils ont été effectués après la mobilisation dans une zone à faible gradient magnétique.

### 4.2.1. Effet de cap

Ce test permet de déterminer les écarts de mesure du champ magnétique dans les quatre directions de vol. L'effet de cap a été déterminé en volant un motif en forme de trèfle à haute altitude. Deux passages ont été effectués dans les quatre directions cardinales (Figure 8) afin d'estimer l'erreur de cap. Le test a été effectué le 15/07/2014.



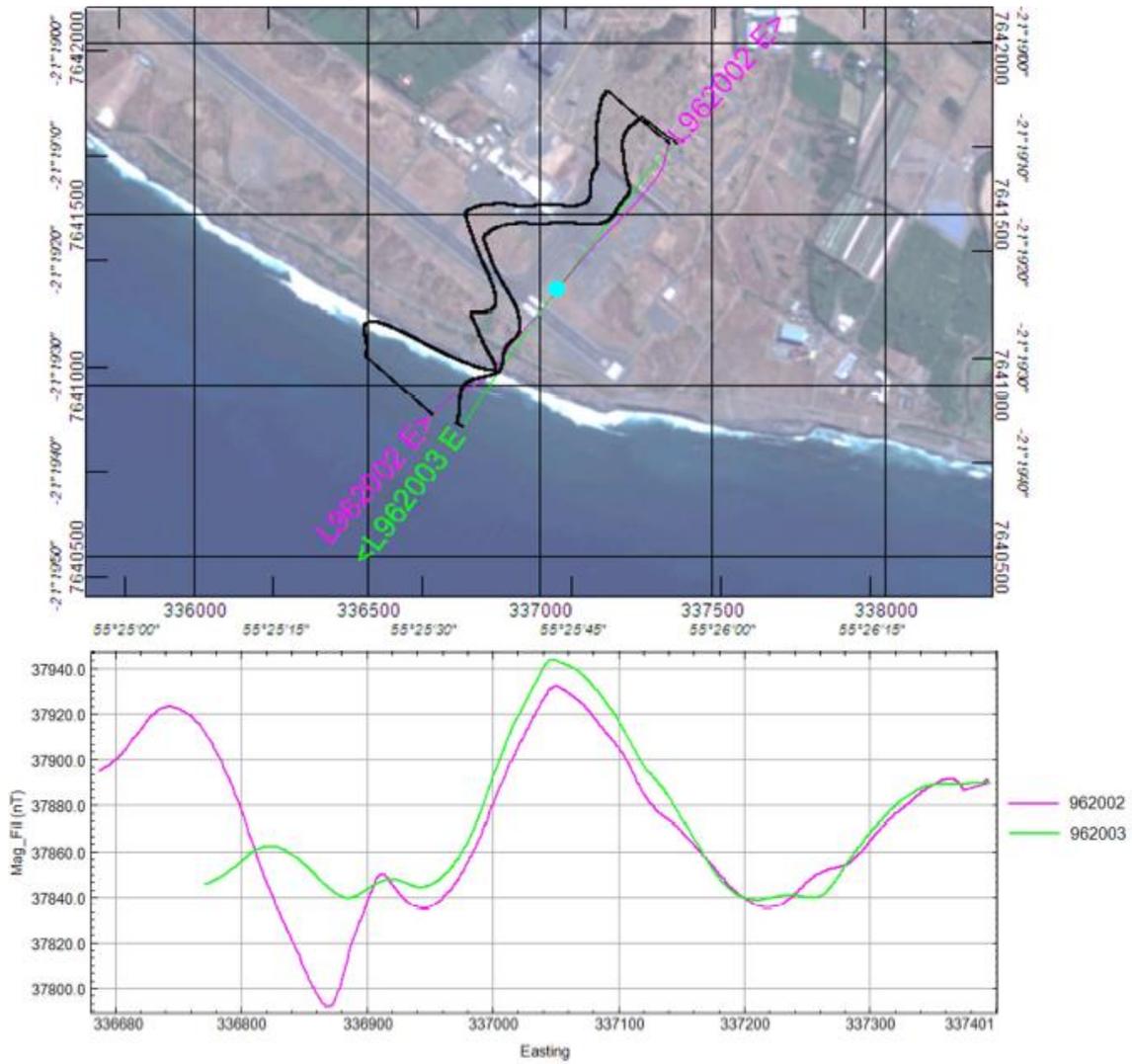


Figure 9 : Localisation du test de lag magnétique et profils enregistrés à l'aller et au retour.

## 5. Conditions opérationnelles

### 5.1. GÉNÉRALITÉS

Le calendrier fourni en Annexe 3 résume le déroulement des opérations. La mobilisation de l'équipe SkyTEM et l'installation de la base d'opération étaient effectives au 2 Mai 2014 (Figure 10). Les opérations ont successivement été conduites depuis :

- la base Hénilagon de l'Éperon (du 01/05 au 23/05/2014) ;
- la base Hénilagon sur l'aéroport de St Denis – Gillot (du 24/05 au 16/06/2014) ;
- l'aéroport de Pierrefonds (du 17/06 au 22/07/2014) ;
- la base Hénilagon de l'Éperon (le 23/07/2014).

Aucun incident ni interruption majeur n'est venu émailler le levé, cependant, le dispositif géophysique a été endommagé (et rapidement rétabli) à 2 reprises en début de mission, le 4 et le 9 Mai, en raison de l'inexpérience des pilotes dans ce type de portage.

Au total 114 vols de production répartis sur 64 jours ont été réalisés avec une production journalière moyenne de 161,5 kml. Un total de 10 341 kml de lignes de vol a été enregistré en conditions de production, soit un rythme moyen de 90,7 kml/vol. La campagne de mesure s'est achevée le 23 Juillet 2014 (date du dernier vol de production).

### 5.2. DIURNE MAGNÉTIQUE

Deux stations sol comprenant chacune un magnétomètre et un capteur GPS (pour la synchronisation en temps) ont été utilisées lors de cette campagne. L'ensemble du traitement a été réalisé avec le magnétomètre de base n° 2, excepté pour le 1er jour (cf. Tableau 8).



*Le dispositif au sol*



*Terminal de suivi du pilote*



*Initialisation du système de mesure embarqué*



*Décollage du dispositif*



*Acquisition en vol*

*Figure 10 : Illustrations du matériel et de la mise en œuvre du levé hélicoptère.*

## 6. Contrôle de qualité et traitement sur le terrain

### 6.1. LIGNE TEST

Un tronçon de vol de 1 000 m environ a été sélectionné comme ligne test. L'hélicoptère devait voler la ligne test de la zone concernée au début et à la fin de chaque vol de production. Cette ligne, volée en sens inverse à l'aller et au retour, permet de mettre en évidence, le cas échéant, d'éventuels dysfonctionnements ou des dérives instrumentales.

### 6.2. CONTRÔLE ET VALIDATION DES DONNÉES SUR SITE (BRGM)

Quatre géophysiciens du BRGM ont assuré à tour de rôle, aux côtés des équipes SkyTEM et Héliagon, un suivi journalier des opérations de terrain. On a ainsi pu s'assurer que l'équipement ne présentait pas d'anomalie de fonctionnement tout au long de la campagne, et que les données produites se conformaient au plus près des spécifications du Cahier des Charges – compte-tenu des conditions de terrain (relief et aérologie notamment).

Ce contrôle a consisté notamment en :

- un examen rigoureux des lignes tests, des calibrations instrumentales et des tests, avant et après les vols de production ;
- un contrôle systématique de l'intégrité de l'ensemble des paramètres enregistrés, au retour de l'hélicoptère ;
- une vérification systématique des enregistrements numériques par analyse statistique, vol par vol et ligne par ligne, et par visualisation des données en profil et en carte.

Le protocole du contrôle était le suivant :

- relecture des fichiers SkyTEM ;
- calcul des paramètres dérivés des données : vitesse instantanée de vol, hauteur de vol ;
- tracé et analyse des fenêtres TDEM ;
- vérification du plan de vol.

Enfin, périodiquement, lorsque le volume de données était suffisant, les variables altimétriques, magnétiques et TDEM étaient interpolées afin de procéder à un contrôle de cohérence cartographique.

Le Tableau 10 récapitule les statistiques relatives à l'instrumentation géophysique, pour l'ensemble du lever.

<i>Paramètre de contrôle</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ec. type</i>
Vitesse au sol (km/h)	77.3	18
Garde au sol (m)	81.7	53.2
Inclinaison	X (°)	2.4
	Y (°)	0.5
Voltage Tx	Tx Off (V)	63
	Tx On (V)	60
Courant LM (A)	9.2	0.01
Courant HM (A)	117.0	1.4
Température Tx (C°)	40	-

Tableau 10 : Statistiques de vol pour le lever REUN\_EM.

### **6.3. LES REVOLS**

Chaque ligne de vol a fait l'objet d'une validation par le géophysicien BRGM. Les tronçons de lignes non conformes aux spécifications du Cahier des Charges ont été identifiés et soumis à SkyTEM pour revol.

Très peu de revols ont été nécessaires. Les principales raisons de ces revols sont liées à une garde au sol jugée trop élevée, après prise en compte des conditions de sécurité.

## 7. Traitement

### 7.1. TRAITEMENT ET INVERSION DES DONNÉES EM

Cette partie vise successivement à :

- éliminer sur les données EM les effets de couplage dus aux infrastructures ;
- réaliser les corrections d'altitude et d'attitude de la boucle afin d'augmenter la résolution de l'inversion, notamment en proche subsurface ;
- réaliser une inversion multicouche de l'ensemble du jeu de données et l'interpoler en vue d'obtenir *in fine* un bloc 3D de résistivité du sous-sol.

#### 7.1.1. Filtrage des données EM

Le but du filtrage est de préparer les données à l'inversion. Cela comprend l'import, la correction, le filtrage, le découpage et le rejet des données incorrectes.

Dans le cadre de la sous-traitance SkyTEM, le traitement des données TDEM a été confié à la société danoise Aarhus Geophysics (AAG). Les filtrages et inversions ont été mis en œuvre par AAG à l'aide du logiciel Aarhus Workbench, qu'elle développe et commercialise.

Un filtrage alternatif a également été réalisé par le BRGM, avec pour objectif principal de raffiner localement la qualité des données et de l'inversion qui en est issue. On en détaille certains éléments ci-après, en complément des traitements opérés par AAG.

En pratique, le traitement des données acquises par SkyTEM comprend plusieurs étapes :

- le traitement des données GPS, d'altitude et d'attitude de la boucle ;
- le filtrage numérique des bruits des données TDEM ;
- l'édition manuelle des données TDEM.

#### **a. Traitement des données GPS, d'altitude et d'attitude de la boucle**

##### I. Traitement par Aarhus Geophysics

Dans une première étape, les positions X et Y acquises par le GPS sont ajustées séparément par un polynôme d'ordre et de longueur temporelle ajustable. Les données d'orientation de la boucle, c'est-à-dire le tangage (angle x) et roulis (angle y), sont calculées dans une deuxième étape. Ces paramètres sont approximés par un filtre médian pour éliminer les valeurs aberrantes. Ces données sont ensuite utilisées pour corriger les données de garde au sol.

Les données de garde au sol sont traitées lors de la troisième étape. L'altimètre laser enregistre non seulement la réflexion du sol, mais aussi d'autres réflexions généralement dues au couvert végétal ; en conséquence, les distances mesurées par l'altimètre sont souvent inférieures à la distance au sol. Pour déterminer la garde au sol, un algorithme permet de filtrer les données automatiquement : un ajustement polynomial est appliqué aux données et les données inférieures de quelques mètres de ce polynôme sont supprimées.

Ensuite, avec une correction manuelle, les réflexions dues au couvert végétal qui subsistent sont éliminées pour qu'il ne reste plus que les données réelles d'altitude. La Figure 11

présente les données d'altitude brutes et la courbe d'altitude obtenue suite aux traitements décrits (et à l'édition manuelle lorsque nécessaire) comme décrit ci-dessus.

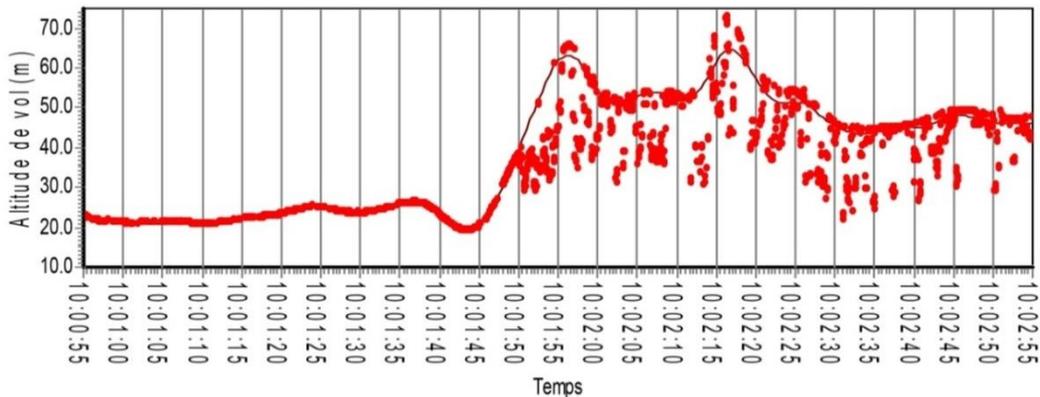


Figure 11 : Données de garde au sol laser mesurées (points) et corrigées (courbe).  
Ce graphique correspond à environ 2 km de ligne de vol. A partir de 10:01:50, l'altitude de vol augmente et « l'éparpillement » des données mesurées traduit le passage d'une zone sans végétation à une zone de forêt.

## II. Traitements alternatifs par le BRGM

Étant donné la forte topographie de l'île de La Réunion et la grande incertitude sur la fiabilité de la mesure laser à différents endroits, une alternative au traitement standard de la garde au sol a été préférée par le BRGM.

Les données GPS ont été post-traitées en différentiel en utilisant les stations du réseau permanent réunionnais Lél@, afin de déterminer, avec une grande précision, les positions X, Y et particulièrement Z de la boucle. La garde au sol de la boucle a alors été obtenue par soustraction du modèle numérique de terrain issu de la campagne Litto3D® (© SHOM-IGN) à la position en vol de la boucle. Dans un souci de cohérence avec la méthode TDEM hélicoptère mise en œuvre, le MNT, initialement défini par des cellules de 1 m, a été volontairement été dégradé à une résolution de 25 m afin de s'accorder à la résolution des données EM.

Le traitement des données d'altitude de la boucle a été, quant à lui, abordé de manière standard.

### **b. Filtrage numérique des bruits des données dB/dt**

Les données TDEM – la courbe de décroissance de la composante magnétique du champ secondaire induit par le sol – sont traitées à leur tour.

Le but du traitement est d'isoler les bruits qui affectent la réponse électromagnétique du sol, voire de supprimer les décroissances intégralement affectées par du bruit.

Différents types de bruits s'ajoutent au signal TDEM du sol, ils peuvent être naturels ou anthropiques.

Comme bruit naturel, les décharges, appelées « spherics », provenant de l'activité orageuse et guidées par la cavité terre-ionosphère (résonances de Schumann), peuvent induire des pics au niveau des décroissances ; les « spherics » ne durent pas plus d'une milliseconde.

Pour ce qui est des bruits anthropiques, Szarka (1988) en propose une liste provenant de différentes sources. Par exemple il peut s'agir de bruits engendrés par des émetteurs de modulation d'amplitude (AM > 1kHz) ou de très basse fréquence (VLF, 3 à 30 kHz). Pour une acquisition en milieu anthropisé, d'autres bruits plus problématiques viennent s'ajouter. Ainsi, le récepteur mesure également le mode fondamental (50Hz en France) et les harmoniques du réseau de distribution d'électricité. De plus, des bruits de couplages galvaniques et capacitifs sont observés à proximité de certaines installations humaines (Sørensen & al., 2000 ; Danielsen & al., 2003). Les couplages capacitifs sont dus à des objets enterrés dans le sol, comme par exemple un tuyau de canalisation ; cela génère des oscillations aux temps d'enregistrement longs (en fin de courbe de décroissance). Le couplage galvanique est dû à des installations anthropiques en surface, comme les lignes électriques, qui créent une boucle de courant secondaire apparaissant sur la courbe de décroissance TDEM comme un changement de pente.

Le mode 50 Hz et ses harmoniques sont filtrés lors de l'acquisition des données TDEM.

#### I. Filtrage par Aarhus Geophysics

Le filtrage des données TDEM a été réalisé de la façon suivante :

- Cap Filter, qui supprime les temps courts (le début de la courbe) et supprime les valeurs d'amplitudes inférieures à celle de la courbe de bruit modélisée ;
- Slope Filter, supprime les oscillations en fonction de deux pentes théoriquement acceptables encadrant les signaux ;
- Sign Filter, supprime les signaux négatifs.
- Trapez Filter, moyenne les données suivant les paramètres trapèze choisis pour créer des sondages TDEM.

Les paramètres des filtres utilisés par Aarhus Geophysics pour le traitement des données TDEM sont donnés sur la Figure 12.

Settings:		Load From File...	Settings:		Load From File...
Key	Value	Save To File...	Key	Value	Save To File...
Noise Channel	OFF	Default Settings	Noise Channel	OFF	Default Settings
Use 2nd order slope filters	ON		Use 2nd order slope filters	ON	
Sounding Bin Spacing [s]	2		Sounding Bin Spacing [s]	2	
Current Time Distance [s]	0.5		Current Time Distance [s]	0.5	
Cap Sign Filter	ON		Cap Sign Filter	ON	
Cap Sign from time [s]	2e-5		Cap Sign from time [s]	1.5e-4	
Cap Sign noise level (ms)[v/m <sup>2</sup> ]	2e-7		Cap Sign noise level (ms)[v/m <sup>2</sup> ]	3e-7	
Cap Sign noise slope	-0.7		Cap Sign noise slope	-0.7	
Cap Sign back step	1		Cap Sign back step	1	
Cap Slope Filter	ON		Cap Slope Filter	ON	
Cap Slope from time [s]	2e-5		Cap Slope from time [s]	1.5e-4	
Cap Slope noise level (ms)[v/m <sup>2</sup> ]	2e-7		Cap Slope noise level (ms)[v/m <sup>2</sup> ]	3e-7	
Cap Slope noise slope	-0.7		Cap Slope noise slope	-0.5	
Cap Slope min slope	-0.6		Cap Slope min slope	-0.6	
Cap Slope max slope	0.6		Cap Slope max slope	0.6	
Cap Slope back step	1		Cap Slope back step	1	
Ave Sign Filter	ON		Ave Sign Filter	ON	
Ave Sign from time [s]	2e-5		Ave Sign from time [s]	6e-4	
Ave Sign back step	1		Ave Sign back step	2	
Ave Slope Filter - Late Times	ON		Ave Slope Filter - Late Times	ON	
Ave Slope from time [s]	2e-5		Ave Slope from time [s]	6e-4	
Ave Slope min slope	-0.6		Ave Slope min slope	-0.5	
Ave Slope max slope	0.6		Ave Slope max slope	0.5	
Ave Slope back step	1		Ave Slope back step	2	
Ave Slope Filter - Early Times (ET)	OFF		Ave Slope Filter - Early Times (ET)	ON	
Ave Slope from time (ET) [s]	1.5e-5		Ave Slope from time (ET) [s]	1e-4	
Ave Slope (ET) (+/-)	0.5		Ave Slope (ET) (+/-)	-0.7	
Ave Slope back step (ET)	0		Ave Slope back step (ET)	1	
Trapez Filter	ON		Trapez Filter	ON	
Trapez Sounding Distance [s]	1.6		Trapez Sounding Distance [s]	1.6	
Trapez Gate Time 1 [s]	1e-5		Trapez Gate Time 1 [s]	1e-4	
Trapez Gate Time 2 [s]	1e-4		Trapez Gate Time 2 [s]	1e-3	
Trapez Gate Time 3 [s]	1e-3		Trapez Gate Time 3 [s]	1e-2	
Trapez Width 1 [s]	4		Trapez Width 1 [s]	4	
Trapez Width 2 [s]	5		Trapez Width 2 [s]	6	
Trapez Width 3 [s]	12		Trapez Width 3 [s]	14	
Trapez 2nd Tx min. Altitude [m]	60		Trapez 2nd Tx min. Altitude [m]	999	
Trapez 2nd Width 1 [s]	6		Trapez 2nd Width 1 [s]	8	
Trapez 2nd Width 2 [s]	12		Trapez 2nd Width 2 [s]	24	
Trapez 2nd Width 3 [s]	20		Trapez 2nd Width 3 [s]	48	
Trapez Spike Factor	25		Trapez Spike Factor	25	
Trapez Min. No. Gates [%]	25		Trapez Min. No. Gates [%]	25	
Trapez Min. No. Gates per sound.	5		Trapez Min. No. Gates per sound.	5	
Trapez Sync. location of sound.	ON		Trapez Sync. location of sound.	ON	
Trapez Require left/right sound.	OFF		Trapez Require left/right sound.	OFF	
Minimum allowed Tx altitude [m]	5.0		Minimum allowed Tx altitude [m]	5.0	
Maximum allowed Tx altitude [m]	999.0		Maximum allowed Tx altitude [m]	999.0	

Figure 12 : Paramètres du logiciel Workbench utilisés par Aarhus Geophysics pour le filtrage du LM (à gauche) et du HM (à droite).

## II. Filtrage alternatif par le BRGM

Une procédure de filtrage des données EM alternative, basée sur l'utilisation de la Décomposition en Valeurs Singulières (SVD), a été utilisée (Reninger & *al.*, 2011). Le filtrage est alors rendu moins subjectif et il est mis en œuvre de façon beaucoup plus rapide.

La SVD utilise des composantes orthogonales afin d'extraire les formes dominantes d'un jeu de courbes (i.e. les décroissances EM mesurées). La première composante est alors celle qui explique la part la plus importante de la variance des données (la moyenne), tandis que la deuxième composante va expliquer la part la plus importante de la variance non expliquée par la première composante (moyenne du résidu), et ainsi de suite.

La méthode SVD permet ainsi d'exprimer chaque courbe de décroissance EM en une combinaison linéaire de plusieurs composantes principales. Les facteurs de cette combinaison, spécifiques à chaque courbe et composante, sont appelés les poids.

Le principe du filtrage par SVD est alors d'identifier et de ne garder que le signal désiré (*i.e.* le signal géologique) contenu dans chacune des courbes grâce à un choix judicieux des composantes de signal / de bruit. Pour exemple, de façon classique, dans le cas où les courbes sont affectées par un bruit de distribution normale et de moyenne nulle, les composantes d'ordre faible expliquent la part géologique du signal et celles d'ordre plus élevé représentent le bruit.

La procédure de filtrage mise en œuvre se décompose en quatre étapes. Tout d'abord, une analyse des composantes et de la variation qu'elles induisent au regard de la première (la moyenne) permet d'identifier les composantes expliquant la part géologique du signal et celles expliquant le bruit.

Ensuite, les composantes dites géologiques (*i.e.* identifiées comme expliquant le signal géologique) sont utilisées pour reconstruire chacune des décroissances mesurées lors du levé. Chaque mesure est alors comparée numériquement, fenêtre par fenêtre, à la reconstruction qui lui est associée dans le but d'identifier les fenêtres bruitées. Le résultat de cette opération est présenté sur la Figure 13. Cette étape permet donc de rejeter les distorsions singulières, telles que les pics et les oscillations présentes sur les décroissances.

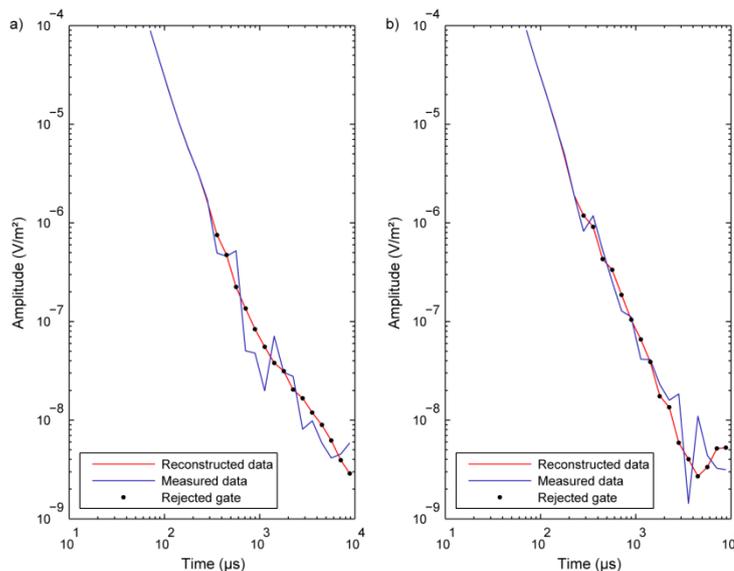


Figure 13 : Résultat de la seconde étape de filtrage présenté sur deux exemples de courbes bruitées, affectées par des oscillations et pics. Les courbes bleue et rouge représentent respectivement la décroissance mesurée et celle reconstruite par SVD. Les points noirs indiquent les fenêtres bruitées identifiées et rejetées par la suite.

Cependant, certains bruits, tels que les bruits de couplage avec les installations humaines, se traduisent par des shifts de l'amplitude de la mesure et une distorsion de sa pente. Il est alors obligatoire de retirer du jeu de données les courbes affectées par de tels bruits afin d'éviter tout artefact et toute mauvaise interprétation du modèle de résistivité.

C'est l'objectif de la troisième étape. Au cours de celle-ci, les composantes dites de bruit (*i.e.* identifiées comme expliquant le bruit), et plus particulièrement les poids qui leurs sont associés pour chaque courbe, sont analysés. Les poids les plus forts indiquent la présence

d'oscillations et/ou de pics d'amplitude anormalement importants, reflétant un probable biais dans la mesure, généralement dû à la présence d'une installation humaine.

La Figure 14 montre une carte de poids de la somme des composantes de bruit obtenue sur un extrait du levé. Les poids forts mettent clairement en évidence la présence des lignes électriques ainsi que d'autres installations (routes, habitations) ayant probablement induit une distorsion importante de la mesure. Cette étape permet donc l'identification des décroissances probablement affectées par un bruit de couplage et facilite grandement la phase d'édition manuelle des données, la rendant moins subjective, puisque indépendante de la qualité et de la quantité de l'information disponible sur les installations humaines. Pour exemple, le fichier de localisation des lignes électriques utilisé dans le cadre de cette étude est apparu parfois peu précis et incomplet (cf. Figure 14).

La quatrième étape consiste en l'application d'un « stack » adaptatif. A l'issue de l'analyse SVD, chaque fenêtre identifiée comme bruitée a été moyennée avec les fenêtres des décroissances voisines. La largeur de ce stack s'accroît avec le nombre de fenêtres bruitées pour chaque décroissance enregistrée. Ainsi, la largeur du stack est petite pour la première fenêtre bruitée et augmente linéairement avec le nombre de fenêtres à moyenner. Cette étape permet d'améliorer le rapport signal sur bruit aux temps intermédiaires à longs et donc d'augmenter la profondeur d'investigation de la méthode.

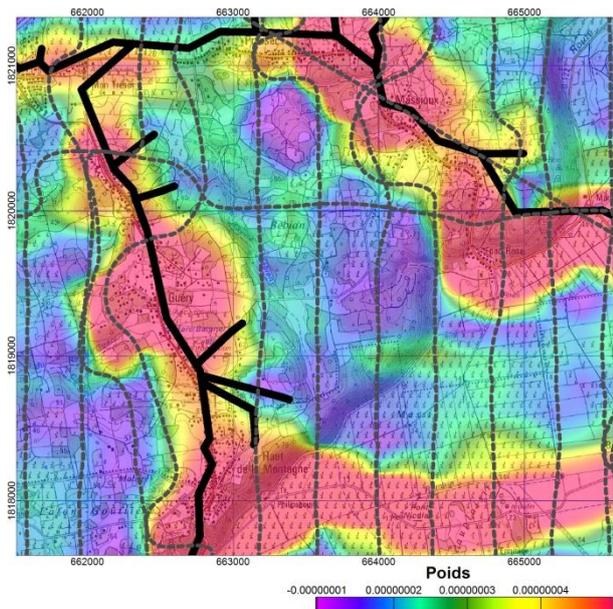


Figure 14 : Carte de poids d'une composante de bruit caractérisée par SVD. Les lignes électriques géoréférencées (parfois incomplètes) apparaissent en noir et les lignes de vol en tiretés gris.

Enfin, un effort particulier a été fait pour valoriser le maximum de données acquises au cours du levé : par rapport aux données de production (correspondant aux lignes de vol planifiées), près de 80 000 sondages électromagnétiques supplémentaires, exploitables, ont pu être récupérés (correspondant à des extrémités de lignes, trajets de liaison, etc.). Ces données récupérées ont subi les mêmes étapes de traitement que les autres.

### c. Édition manuelle des données dB/dt

Comme pour le traitement des données d'altitude, après ces différents filtres, une inspection systématique des décroissances mesurées et leur édition manuelle sont réalisées pour supprimer les bruits restants. Chaque courbe de décroissance est représentée comme dans la Figure 15 et les données présentant les caractéristiques de bruit (oscillations, boucle secondaire) sont supprimées.

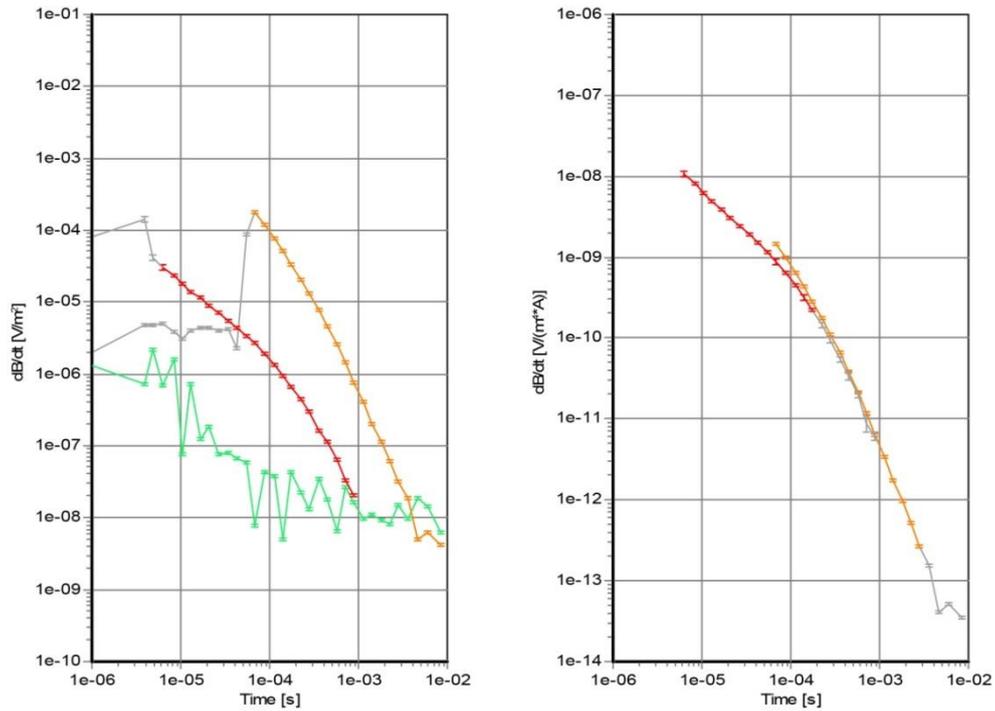


Figure 15 : Signal résultant des mesures TDEM (courbes rouge LM et orange HM) après le traitement des données réalisé par Aarhus Geophysics. Les fenêtres supprimées sont grisées. La courbe verte correspond au niveau de bruit enregistré.

La Figure 16 présente les données TDEM pour une portion de ligne de vol, après le traitement automatique et manuel réalisé par Aarhus Geophysics.

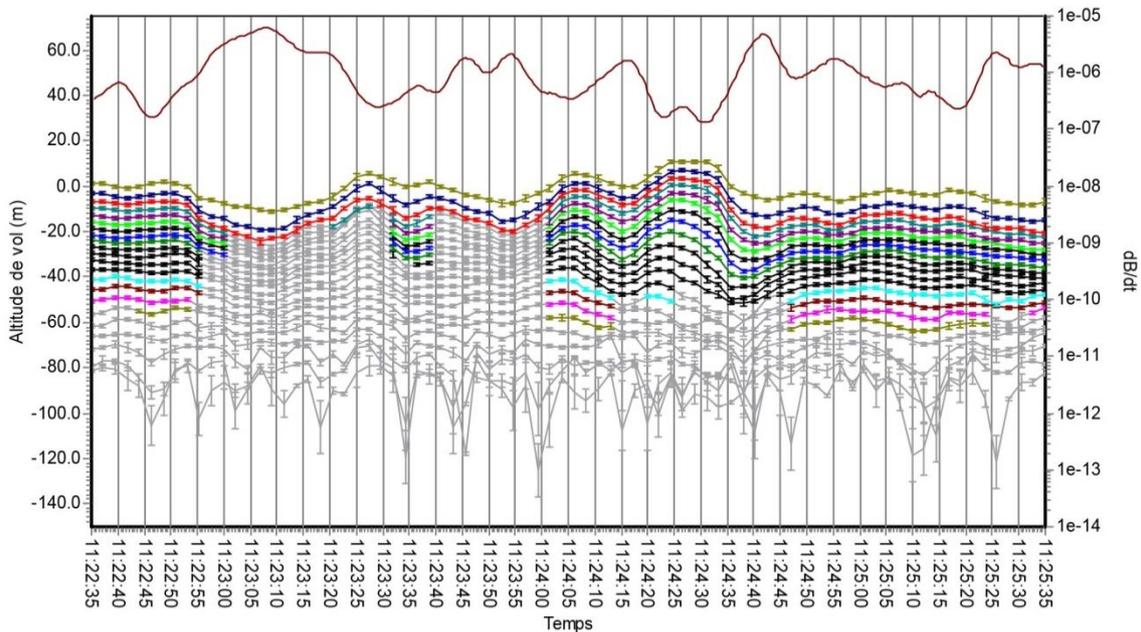


Figure 16 : Signal TDEM pour le LM sur une portion de 3,5 km de ligne de vol et altitude de vol (courbe marron supérieure). La courbe vert kaki représente les valeurs de la 1<sup>ère</sup> fenêtre utilisable du LM, la courbe bleu marine les valeurs de la 2<sup>nde</sup> fenêtre, etc. Les points gris sont les valeurs supprimées automatiquement ou manuellement car un bruit est observé sur la courbe de décroissance. De 11:23:00 à 11:24:00, des bruit de couplage ont été identifiés, correspondant à la périphérie d'une zone urbaine.

Une fois les filtrages décrits ci-dessus menés à bien, la modélisation des signaux électromagnétiques permet d'approcher les propriétés physiques du système étudié, notamment la résistivité, par une analyse numérique *ad hoc*, de type « inverse ».

Dans le cas des données TDEM l'opération d'inversion consiste à calculer un profil de résistivité du sous-sol permettant d'expliquer au mieux la courbe de décroissance du champ électromagnétique mesuré. Comme le traitement des données, elle est réalisée dans le logiciel Workbench.

La solution calculée par inversion dépend du modèle de terre initial. Il est possible d'adapter ce dernier en choisissant le nombre de couches (de 3 à 25) à prendre en compte lors de l'inversion, les valeurs de résistivité du modèle de départ et les contraintes de variations des différentes couches (à la fois en résistivité et en épaisseur).

### 7.1.2. Inversion et interpolation des données TDEM

#### a. Inversion

L'inversion a été réalisée par Aarhus Geophysics à l'aide du logiciel Workbench. L'algorithme utilisé (em1dinv – Univ. d'Aarhus) est non linéaire. La fonction de transfert du système est aussi modélisée (utilisation de la forme d'onde, filtre passe bas, ...). Les paramètres de modélisation du système sont livrés dans l'archive numérique (fichier .geo). La densité importante des données acquises permet d'utiliser une inversion contrainte spatialement (SCI, Viezzoli et al, 2009). Dans le schéma SCI les paramètres de chaque modèle 1D de résistivité sont reliés entre eux suivant une covariance spatiale qui est fonction de la distance entre les modèles voisins. Ce type d'inversion contrainte latéralement tend à améliorer la précision en résistivité et géométrie des sondages qui n'auraient pas été bien résolus par une inversion 1D simple. Des facteurs de contraintes entre les couches (sur la valeur de résistivité), appelées contraintes verticales sont fixées afin de lisser les variations verticales de résistivité. Des contraintes latérales entre les sondages sont ajoutées de manière à réaliser une inversion spatialement contrainte; ainsi les sondages sont inversés en tenant compte des résultats d'inversion des sondages avoisinant compris dans un rayon d'influence déterminé.

Le jeu de données complet TDEM (plus de 250 000 sondages) excédait les capacités de calcul possibles dans le logiciel Workbench. Il a donc été décidé de réaliser des inversions selon 6 blocs de données cohérents à la fois géographiquement et en termes de résistivité moyenne (Figure 17).

Pour l'inversion, Aarhus Geophysics a adopté un modèle 25 couches. Sur la tranche 0-350 m, l'épaisseur des couches augmente de façon logarithmique avec la profondeur, la couche superficielle la plus fine ayant 2 m d'épaisseur. Au cours de l'inversion l'épaisseur des couches reste inchangée tandis que la résistivité peut varier. La résistivité du modèle de départ est de 100  $\Omega.m$ , excepté dans les zones très résistives (volcan) où la résistivité initiale a été fixée à 500  $\Omega.m$  et dans les zones très conductrices (océan < 1  $\Omega.m$ ) ; l'emprise de ces 3 types de zones est fournie en Figure 18. À titre d'exemple, les paramètres du modèle a priori utilisés pour cette inversion 25 couches en zone de résistivité « moyenne » sont présentés en Figure 19.

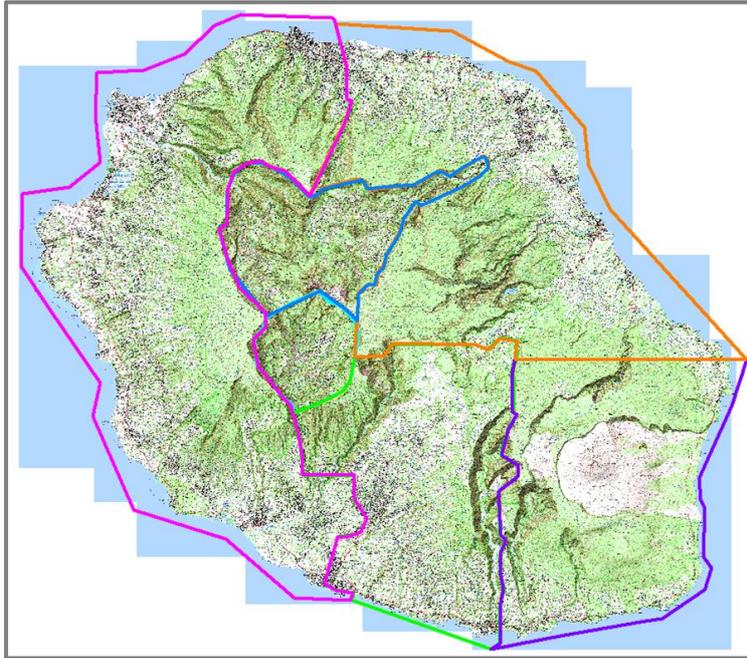


Figure 17 : Compte-tenu du nombre de sondages TDEM très élevé, l'inversion a été réalisée séparément sur 6 blocs choisis en fonction de critères géographiques et de résistivité moyenne des terrains.

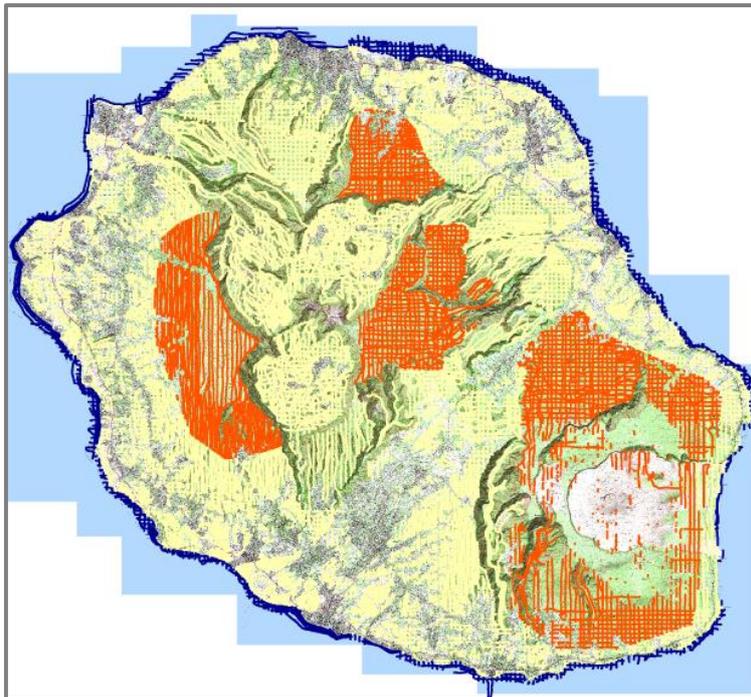


Figure 18 : Trois modèles a priori différents ont été utilisés en fonction de la position des sondages inversés : en bleu foncé un modèle conducteur à  $0.25 \Omega.m$  sur la partie marine, en jaune un modèle moyen à  $100 \Omega.m$ , en orange un modèle résistif à  $500 \Omega.m$ .

Layer	Res	ResAprSTD	Thk	ThkAprSTD	Dep	DepAprSTD
Layer 1	100.0	99.000	2.0	1.001	2.0	99.000
Layer 2	100.0	99.000	2.3	1.001	4.3	99.000
Layer 3	100.0	99.000	2.6	1.001	6.9	99.000
Layer 4	100.0	99.000	3.0	1.001	9.9	99.000
Layer 5	100.0	99.000	3.5	1.001	13.4	99.000
Layer 6	100.0	99.000	4.0	1.001	17.4	99.000
Layer 7	100.0	99.000	4.5	1.001	21.9	99.000
Layer 8	100.0	99.000	5.2	1.001	27.1	99.000
Layer 9	100.0	99.000	6.0	1.001	33.1	99.000
Layer 10	100.0	99.000	6.8	1.001	39.9	99.000
Layer 11	100.0	99.000	7.9	1.001	47.8	99.000
Layer 12	100.0	99.000	9.0	1.001	56.8	99.000
Layer 13	100.0	99.000	10.3	1.001	67.1	99.000
Layer 14	100.0	99.000	11.8	1.001	79.0	99.000
Layer 15	100.0	99.000	13.6	1.001	92.5	99.000
Layer 16	100.0	99.000	15.6	1.001	108.0	99.000
Layer 17	100.0	99.000	17.8	1.001	126.0	99.000
Layer 18	100.0	99.000	20.5	1.001	146.0	99.000
Layer 19	100.0	99.000	23.5	1.001	170.0	99.000
Layer 20	100.0	99.000	26.9	1.001	197.0	99.000
Layer 21	100.0	99.000	30.8	1.001	228.0	99.000
Layer 22	100.0	99.000	35.4	1.001	263.0	99.000
Layer 23	100.0	99.000	40.5	1.001	304.0	99.000
Layer 24	100.0	99.000	46.5	1.001	350.0	99.000
Layer 25	100.0	99.000				

Figure 19 : Paramètres géométriques du modèle a priori de l'inversion à 25 couches réalisée par Aarhus Geophysics, pour une zone de résistivité « moyenne ».

### b. Correction de l'effet de boucle

Afin d'atteindre la meilleure résolution possible en proche subsurface (0-30m) il est important d'utiliser les données des toutes premières fenêtres temporelles enregistrées par la bobine réceptrice du TDEM. Ces premières fenêtres enregistrées quelques microsecondes après la coupure de l'injection de courant dans la boucle émettrice sont bruitées par la fin de l'émission. Sans traitement particulier, la 1<sup>ière</sup> fenêtre du LM utilisable avec le dispositif mis en œuvre à La Réunion est la n°10, centrée sur 22  $\mu$ s (cf. Annexe 2).

Avec le nouveau modèle de boucle mis en œuvre par SkyTEM au cours du levé de La Réunion, le couplage entre l'injection et la bobine réceptrice a pu être mesuré pour chaque sondage, et corrigé après chaque vol. Cette correction de PFC (Primary Field Compensation) mise en œuvre de façon originale par SkyTEM a pu être analysée et validée sur le terrain par l'équipe BRGM. Mais dans la mesure où elle est en cours de dépôt, elle ne peut être exposée en détail ici. Cette correction utilise un vol d'étalonnage à 400 m en début et fin de chaque vol de production. Son principe repose sur la linéarité entre l'injection et la réception pour chaque fenêtre enregistrée.

En pratique, cette correction a permis sur l'ensemble du levé, et pour chaque sondage électromagnétique de récupérer les premières fenêtres de mesure (Figure 20) : les fenêtres 5 à 9 ont ainsi été corrigées, permettant une exploitation des signaux à partir de 7  $\mu$ s (cf. Annexe 2).

Ce gain est essentiel pour disposer de modèles inversés de haute résolution dans les premiers mètres de la subsurface.

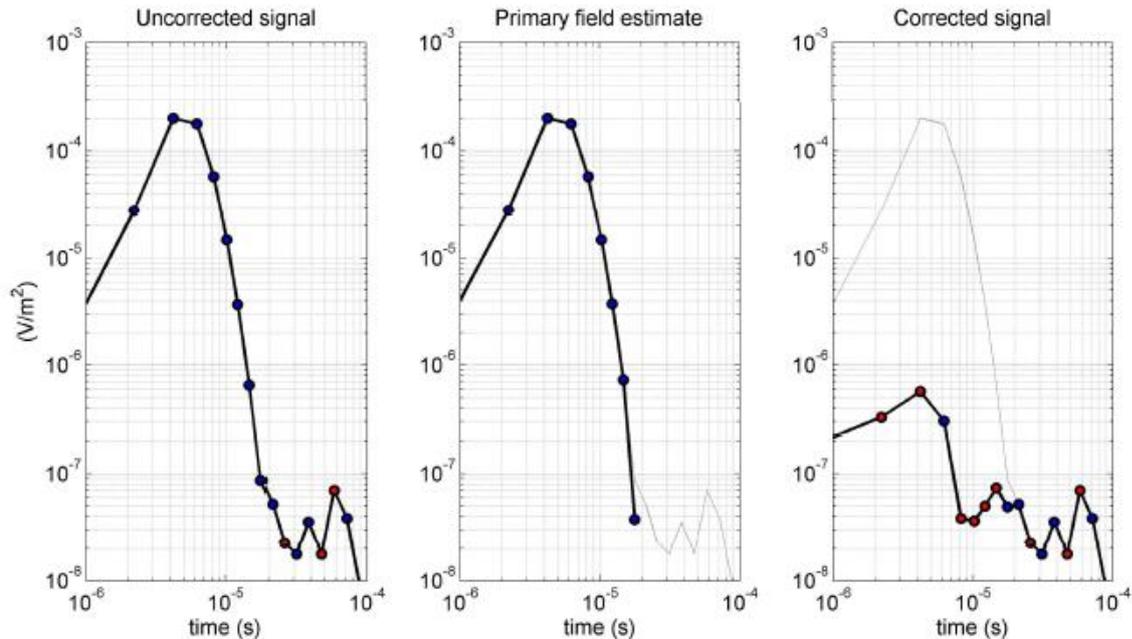


Figure 20 : Illustration de la correction de PFC sur un enregistrement électromagnétique. Pour le levé de La Réunion, cette correction a permis d'exploiter les enregistrements TDEM dès 7  $\mu$ s (au lieu de 22  $\mu$ s sans PFC).

### c. Profondeur limite d'investigation

La profondeur limite d'investigation (Depth Of Investigation, DOI), basée sur l'analyse de la matrice Jacobienne (Christiansen et Auken, 2010), a été calculée pour l'ensemble des décroissances. Le DOI représente la profondeur maximale pour laquelle l'inversion des signaux TDEM a une sensibilité correcte. Les résistivités inversées plus profondément que le DOI doivent être ignorées ou au minimum considérées avec précaution. Le seuil de sensibilité est établi de façon empirique. Compte tenu de la subjectivité de ce seuil, deux valeurs de DOI ont été calculées, l'une optimiste et l'autre plus conservatrice.

Dans les cartes restituées au terme de ce projet, il a été choisi d'utiliser le DOI le plus conservateur – les résultats présentés sont donc dignes de confiance, mais cela est un peu au détriment de la profondeur d'investigation.

### d. Interpolation

Les données inversées se présentent à chaque point de sondage sous la forme d'une courbe de résistivité variant suivant la profondeur. L'interpolation permet de représenter en 3D ces résistivités calculées en 1D. L'interpolation est faite par krigeage. L'espace est discrétisé en couches d'épaisseurs variables en fonction de la profondeur ou de l'altitude.

Avant d'interpoler les cartes de résistivité, la position des sondages en X, Y a été corrigée de l'effet de la topographie. La Figure 21 illustre le principe de cette correction de la position des sondages.

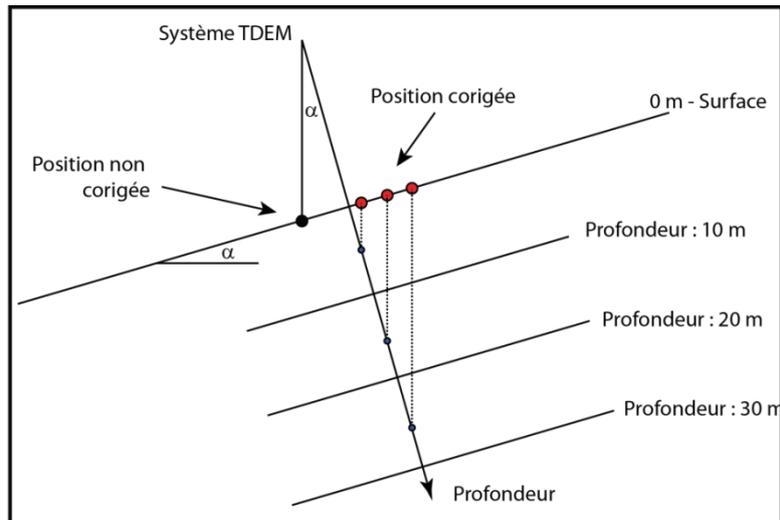


Figure 21 : Position x,y non corrigée et corrigée basée sur l'angle de la topographie et sur la position du système (adaptée de HGG Report 201210-01 : SkyTEM Survey Mayotte Report).

Aarhus Geophysics a appliqué pour La Réunion des contraintes en fonction de la profondeur. Les cartes de résistivité ont été restituées sur une série de 23 couches, entre 0 et 350 m de profondeur. Les épaisseurs des couches augmentent progressivement entre 5 m en subsurface, jusqu'à 30 m à la base du modèle. Chaque couche est constituée de cellules de 100 m de côté, dont la valeur de résistivité est obtenue par krigeage, à partir des données 1D des sondages TDEM inversés.

## 7.2. MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN (MNT)

Un modèle numérique de terrain a été calculé en soustrayant la garde au sol mesurée par le laser de l'altitude obtenue par le traitement du DGPS. Les étapes de traitement sont les suivantes :

- données initiales du MNT obtenues en soustrayant les données laser filtrées des données DGPS ;
- nivellement statistique conventionnel complet (en incluant les traverses) et micronivellement des données ;
- interpolation en grille avec un opérateur de courbure minimum au pas de 100 m avec lissage ; les données manquantes ont été interpolées jusqu'à une distance de 800 m ;
- filtre passe bas (fenêtre de Hanning) sur la grille.

## 7.3. REPRÉSENTATION DES RÉSISTIVITÉS INVERSÉES

Une série de cartes de résistivité présentant les grilles interpolées par tranches de profondeurs (suivant la procédure explicitée précédemment) a été produite. Trois d'entre elles sont présentées, mises en page, en Annexe 4.

## 7.4. DONNÉES MAGNÉTIQUES

Le traitement final des données magnétiques implique une série de traitements classiques permettant d'aboutir à une variable dite de « champ total ».

Ces traitements, réalisés dans Geosoft, ont consisté en :

- traitement des données magnétiques de la station sol ;
- édition manuelle des défauts ponctuels (spikes) ;
- correction à partir des enregistrements de bases magnétiques pour compenser les variations de diurnes ;
- corrections des effets de cap et de retard (lag) ;
- correction de l'IGRF ;
- nivellement statique des lignes et traverses puis micro-nivellement ;
- création de grilles régulières par interpolation des données en ligne de vol.

### 7.4.1. Traitement de la station de base et correction de la diurne

Les données magnétiques de la station de base ont été transférées quotidiennement.

Les différentes étapes de traitement des données magnétiques sol ont été les suivantes :

- retrait manuel des « spikes », interpolation de pertes de signal brèves ;
- filtre passe bas de type Fraser (60 sec) pour lisser les données diurnes ;
- correction de l'IGRF, avec les paramètres suivants :
  - o date : variable en fonction de la date des données,
  - o position : celle de la station de base utilisée ;
- l'ensemble des données de diurne ont été rapportées à la valeur de l'IGRF corrigé pour l'ensemble du levé (184.44 nT), en fonction du lieu et de la période d'occupation (Tableau 11).

Les données magnétiques des stations de base ainsi corrigées ont été fusionnées avec les données en vol en utilisant l'heure UTC, pour appliquer la correction de diurne aux données aéroportées.

	<i>Moyenne sur la base magnétique pour la période (nT)</i>	<i>Correction appliquée (nT)</i>
Base mag 2 – L'Eperon (02/05 – 23/05/2014)	360.08	-175.64
Base mag 2 (Gillot) (24/05 – 16/06/2014)	-74.00	110.44
Base mag 2 – Pierrefonds (17/06 – 22/07/2014)	102.64	81.8
Base mag 2 – L'Eperon (23/07/2014)	362.46	-178.02
<b>Levé complet</b>	<b>184.44</b>	<b>0</b>

Tableau 11 : Localisation des stations magnétiques au sol (Lat/lon, WGS84, degrés décimaux) et période de fonctionnement au cours du levé.

#### **7.4.2. Filtrage des données magnétiques hélicoptées**

Un filtre non linéaire afin de retirer les pics et un filtre passe bas pour lisser les données magnétiques hélicoptées ont été appliqués. Les filtres suivants ont été utilisés :

- ré-échantillonnage des données de 50 Hz à 10 Hz (stacking) ;
- débruitage manuel pour enlever les spikes et les données erronées ;
- filtre spline bi-cubique (finesse = 0.0, tension = 0.6) afin d'interpoler les données magnétiques non acquises pendant le LM (0.3 sec).

#### **7.4.3. Corrections des données magnétiques**

Les données filtrées sont corrigées de la façon suivante :

- correction de variation de diurne en utilisant les données magnétiques de la station de base (voir paragraphe 7.4.1) ;
- correction de l'effet de cap déterminé à partir du test en vol (cf. Tableau 9).

#### **7.4.4. Corrections de l'IGRF**

Le champ géomagnétique international de référence (IGRF) est un champ magnétique régional de grande longueur d'onde calculé à partir des données recueillies par les satellites et les observatoires magnétiques permanents dans le monde. L'IGRF est mis à jour par un comité international et publié tous les 5 ans. Les variations séculaires du champ magnétique terrestre sont incorporées dans l'estimation du modèle de l'IGRF.

Le modèle IGRF du levé de La Réunion a été calculé avant de réaliser le nivellement en utilisant les paramètres suivants :

- modèle IGRF de l'année 2010 (11<sup>e</sup> génération) ;
- date: variable en fonction de la « date » d'acquisition ;
- position: selon coordonnées GPS, données dans le système de coordonnées WGS84 en latitude/longitude ;
- altitude: variable selon l'altitude du capteur magnétique, dérivée des données GPS.

#### **7.4.5. Nivellement des données magnétiques**

En raison du relief important un nivellement lignes/traverses classique aurait été peu opérant. Par ailleurs, dans le contexte volcanique réunionnais, les variations magnétiques de la carte sont élevées et complexes : il n'a pas été jugé utile d'opérer un nivellement et encore moins de micro-nivellement.

#### **7.4.6. Champ magnétique résiduel**

Après application de l'ensemble des réductions détaillées ci-dessus, on aboutit au champ magnétique résiduel (Residual Magnetic Field – RMF). La carte mise en page de cette variable magnétique est présentée en Annexe 5.

### 7.4.7. Champ total

Le champ magnétique total (Total Magnetic Field - TMI) est recalculé en additionnant au champ magnétique résiduel le modèle d'IGRF à une date et à une altitude fixées.

L'IGRF a été calculé avec les des caractéristiques suivantes :

- modèle d'IGRF: 2010 ;
- date: 15 juin 2014 ;
- position: fonction des coordonnées GPS ;
- altitude: altitude moyenne de 836 m.

### 7.4.8. Dérivées du champ magnétique

Tout comme les grilles d'anomalies, les grilles calculées par dérivation (ou combinaison de dérivées) du champ magnétique sont fournies dans les produits du projet. Le champ magnétique total a ainsi été soumis à différentes opérateurs classiques (Réduction au pôle, dérivées première et seconde du champ vertical, ...).

Toutes ces transformations ont été réalisées en domaine fréquentiel à l'aide du module « Magmap » du logiciel Geosoft.

#### **Réduction au pôle**

Compte-tenu de l'inclinaison variable du champ magnétique à la surface de la Terre, les anomalies magnétiques ne sont pas localisées à l'aplomb des sources qui les génèrent. La position des anomalies magnétiques par rapport à leur source est fonction de l'inclinaison et de la déclinaison du champ magnétique, qui dépendent de la longitude, latitude (et altitude) d'acquisition.

Pour relocaliser les anomalies magnétiques à l'aplomb de leur source, les données magnétiques subissent une transformation de manière à simuler un champ magnétique vertical (tel qu'aux pôles magnétiques. Cette transformation est réalisée à l'aide d'un opérateur dit de « réduction au pôle magnétique » (Reduced To Pole - RTP). La réduction au pôle est calculée à partir de la grille TMI en utilisant les paramètres d'IGRF (Inclinaison et Déclinaison magnétiques) correspondant au centre de la zone survolée (Tableau 12).

<i>Paramètres de réduction au pôle</i>	
Inclinaison magnétique	-54.25°
Déclinaison magnétique	-19.32°

Tableau 12 : Caractéristique de l'IGRF utilisé pour la réduction au pôle.

#### **Dérivée verticale du champ magnétique**

La dérivée verticale du champ magnétique (First Vertical Derivative - 1VD) indique le taux de variation du champ magnétique en fonction de l'altitude (axe Z). Elle a pour effet de rendre visuellement un fort détail structural tout en atténuant l'effet des sources les plus profondes. Cette variable a été calculée en utilisant le module Magmap de Geosoft en utilisant la grille RMF.

### ***Dérivée verticale seconde du champ magnétique***

Afin d'augmenter encore visuellement le détail des sources superficielles et de petite extension, une seconde dérivée selon l'axe Z a été calculée (Second Vertical Derivative - 2VD). Il en résulte également une vision encore affinée de structures géologiques magnétiquement peu marquées. Cette variable a été calculée en utilisant le module Magmap de Geosoft en utilisant la grille RMF.

### ***Signal analytique***

Le signal analytique (Analytical Signal - AS) est la racine carrée de la somme des carrés des dérivées de la grille RMF dans les directions X, Y et Z.

Le signal analytique a la propriété de toujours localiser les anomalies à l'aplomb des corps magnétiques, indépendamment de la position de la source sur le globe ou du fait que son aimantation soit de nature induite ou rémanente. Cette variable a été calculée en utilisant le module Magmap de Geosoft en utilisant la grille RMF.

### ***Inclinaison de la dérivée***

L'inclinaison de la dérivée (Tilt Derivative - TiltD) est définie par :

$$\text{TiltD} = \text{ArcTan} (\text{VDR}/\text{THDR}),$$

où VDR et THDR sont respectivement la première dérivée verticale et la dérivée horizontale totale du champ magnétique :

- VDR =  $dT/dz$
- THDR =  $\{(dT/dx)^2 + (dT/dy)^2\}^{1/2}$

Le TiltD est utile pour cartographier les structures du sous-sol peu profondes et pour s'affranchir de l'effet d'approfondissement des sources magnétiques sous un recouvrement d'eau ou de sédiments non-magnétiques. Cette variable a été calculée en utilisant le module Magmap de Geosoft en utilisant la grille RMF.

## **7.5. REPRÉSENTATION**

La carte de l'anomalie magnétique réduite au pôle, mise en page, est présentée en Annexe 5.

## 8. Produits finaux

### 8.1. FICHER TDEM XYZ

Les fichiers XYZ résultants de l'étude SkyTEM et contenant les données TDEM et les informations utiles pour l'inversion sont fournis.

Les mesures et les positions de tous les appareils sont incluses lors de la production du fichier XYZ. Le système de projection utilisé dans les fichiers XYZ est UTM40S WGS84. La localisation originale Lat/Long WGS84 est aussi incluse.

Les fichiers fournis sont ceux de l'inversion 25 couches d'Aarhus Geophysics.

<i>Paramètres</i>	<i>Explications</i>	<i>Unité</i>
Line	Numéro de ligne unique	LLLLLL
X	Nord en UTM 20N WGS84	m
Y	Est en UTM 20N WGS84	m
DateTime	Date décimale	Decimal day
RECORD	Identifiant unique	
TOPO	Modèle numérique de terrain	m a.s.l
ALT	Mesure de hauteur filtrée	m
InvALT	Altitude inversée	m
InvALTSTD	Écart type de l'altitude inversée	m
Height	Mesure de hauteur filtrée	m
Alt	Altitude DGPS	m
NUMDATA	Nombre de fenêtre inversée	
SGEMENT	1 : moment faible uniquement, 2 : moment fort uniquement ; 12 : moment faible et moment fort	
Residual	Erreur associée aux résultats	
RHO_i_X	Résistivité de la i ème couche	Ohm.m
RHO_i_STD	Écart type sur la résistivité de la i ème couche	Ohm.m
DEP_TOP_i	Profondeur du haut de la couche	m
DEP_BOT_i	Profondeur du bas de la couche	m
THK_STD_i	Écart type sur l'épaisseur de la i ème couche	m
DEP_TOP_STD_i	Écart type sur la profondeur du haut de la couche	m
DEP_BOT_STD_i	Écart type sur la profondeur du haut de la couche	m
DOI_LOWER	Profondeur d'investigation maximale	m
DOI_UPPER	Profondeur d'investigation minimale	m

Tableau 13 : Description des champs fournis dans les fichiers EM XYZ.

### 8.2. FICHER MAGNÉTIQUE XYZ

Les fichiers XYZ résultant du lever magnétique, contenant les données brutes, et traitées sont fournis. Le système de projection utilisé est le système UTM40S - WGS84. Chacune des données a une position et est numérotée par un nombre fiduciel unique.

L'entête du fichier magnétique XYZ est récapitulé dans le Tableau 14. Les données EM sont également fournies et peuvent être utilisées comme entrée d'un logiciel d'inversion.

<i>Paramètres</i>	<i>Explications</i>	<i>Unité</i>
Fid	Nombre Fiduciel unique	-
Line	Numéro de ligne unique	LLLLLS
Flight	Nom du vol	yyyymmdd.ff
DateTime	Format de la date	Decimal days
Date	Date	yyyymmdd
Time	Temps UTC	hhmmss.zzz
AngleX	Angle dans la direction de vol	d°
AngleY	Angle perpendiculaire à la direction de vol	d°
Height	Mesure de hauteur filtrée, corrigée du tilt	m
DEM	Modèle numérique de terrain	m a.s.l.
Lon	Longitude (WGS84)	Degrés décimaux
Lat	Latitude (WGS84)	Degrés décimaux
E_UTMz20	Est en UTM 20N WGS84	m
N_UTMz20	Nord en UTM 20N WGS84	m
Alt	Altitude DGPS (Datum RAR07)	m a.s.l.
GdSpeed	Vitesse au sol	m/s
Curr_1	Courant du moment fort	A
Curr_2	Courant du moment faible	A
LM_Z_G01_f[xx]	LM-Z normalisée et corrigée de la réponse de la boucle. Fenêtres 1 à 24 ; les premiers canaux sont sans valeur	pV/(m4*A)
HM_Z_G01_f[xx]	HM-Z normalisée et corrigée de la réponse de la boucle. Fenêtres 1 à 36 ; les premiers canaux sont sans valeur	pV/(m4*A)
LM_X_G01_f[xx]	LM-X normalisée et corrigée de la réponse de la boucle. Fenêtres 1 à 24 ; les premiers canaux sont sans valeur	pV/(m4*A)
HM_X_G01_f[xx]	HM-X normalisée et corrigée de la réponse de la boucle. Fenêtres 1 à 36 ; les premiers canaux sont sans valeur	pV/(m4*A)
PowerlineIntensity	Amplitude de la densité spectrale du bruit des lignes électriques	-
IGRF_air	IGRF calculé aux points d'acquisition	nT
Bmag_raw	Champ magnétique brut (st. de base)	nT
Diurnal	Correction de la diurne filtrée (st. de base)	nT
Mag_raw	Champ magnétique total édité des spikes	nT
Mag_fil	Données magnétiques hélicoptées filtrées	nT
Mag_cor	Champ magnétique résiduel traité	nT
RMF	Anomalie magnétique résiduelle (IGRF soustrait) – données finales corrigées	nT
TMI	Champ magnétique total	nT

Tableau 14 : Description des champs fournis dans les fichiers magnétiques XYZ

### 8.3. GRILLES

Les données magnétiques ont été interpolées à l'aide d'un opérateur à courbure minimale au pas de 100 m.

Les données EM ont été interpolées par krigeage au pas de 100 m.

Les grilles fournies sont récapitulées dans le Tableau 15.

<i>Nom de la grille</i>	<i>Variable</i>
Reunion_DEM_UTM40S	Modèle numérique de terrain
Reunion_Depth_25_Z1-Z2	Résistivité pour les profondeurs variant de Z1 à Z2 pour l'inversion 25 couches (Aarhus Geophysics)
Reunion_MAG_TMI_UTM40S	Champ magnétique total
Reunion_MAG_RMF_UTM40S	Champ magnétique résiduel
Reunion_MAG_RTP_UTM40S	Champ magnétique résiduel réduit au pôle
Reunion_MAG_TDR_UTM40S	Tilt derivative
Reunion_MAG_AS_UTM40S	Signal analytique
Reunion_MAG_1VD_UTM40S	Dérivée verticale première du champ magnétique
Reunion_MAG_2VD_UTM40S	Dérivée verticale seconde du champ magnétique

Tableau 15 : Liste des grilles produites.

## 8.4. ORGANISATION DES DONNÉES

L'organisation des dossiers restitués au terme de l'étude est récapitulée dans le Tableau 16.

<i>Dossier</i>	<i>Sous-dossier</i>	<i>Format de fichier</i>	<i>Commentaires</i>
01_TDEM	01_Grilles	Surfer GRD	Grilles de résistivité
	02_Sondages	Fichier ascii	Sondages TDEM inversés
	03_Cartes	Fichier PDF	Représentation des données EM
02_MAG	01_BaseVol	Fichier ascii	Données magnétiques brutes et traitées
	02_Grilles	Surfer GRD	Grilles du champ magnétique
03_Rapport		Fichier PDF	Rapport d'acquisition

Tableau 16 : Organisation de l'archive numérique associée au présent rapport.



## 9. Conclusions

Le BRGM a mis en œuvre le projet REUN\_EM, en collaboration entre la Région La Réunion, le MESR, le FEDER et l'Université de La Réunion, qui consistait en un levé géophysique hélicopté de l'ensemble de l'île de La Réunion. Ce projet dote l'île de La Réunion d'une infrastructure géophysique moderne en électromagnétisme (TDEM) et magnétisme haute résolution, dont les retombées sont attendues dans les différentes dimensions de la ressource naturelle et de l'aménagement du territoire, au service des besoins de la société.

L'acquisition de terrain s'est déroulée du 2 Mai au 23 Juillet 2014. Elle a consisté à mesurer un ensemble de paramètres suivant un plan de vol préétabli, globalement régulier et localement adapté aux conditions de relief très difficiles. À la suite de l'acquisition, des traitements spécifiques et l'inversion des données acquises et leur validation par le BRGM se sont déroulées jusqu'en Décembre 2014.

La réalisation du lever a été attribuée à la société SkyTEM au terme d'un appel d'offres européen. La particularité du système TDEM choisi (développé à l'université d'Aarhus, Danemark) est de combiner deux moments d'émission différents, le moment faible pour sonder la subsurface avec une résolution accrue, et le moment fort pour sonder plus en profondeur mais avec une résolution moins importante.

Le plan de vol était constitué de lignes de vol espacées de 400 m, orientées Nord-Sud et localement N45 ou N135, selon le relief. Ce plan de vol de base a été densifié soit par des resserrements à 200 m, soit par des recoupes orientées Est-Ouest espacées de 400 m, sur environ 70 % du territoire, constituant des zones d'intérêt prioritaires définies avec les partenaires du projet. La couverture totale réalisée comprend 10 341 km linéaires.

Un contrôle de toutes les phases d'acquisition et de traitement des données brutes a été réalisé par le BRGM afin d'assurer la qualité des données conformément au cahier des charges. Des reprises de vols ont été ordonnées pour toutes les données acquises en dehors des tolérances admises dans le Cahier des Charges, toujours dans la limite imposée de sécurité des vols.

Les données électromagnétiques ont été traitées à l'aide du logiciel Workbench développé par l'université d'Aarhus au Danemark. L'inversion des données a permis de restituer les sondages électromagnétiques sur les lignes de vol. Une interpolation par krigeage a été réalisée à partir des sondages TDEM pour restituer des grilles de résistivité et un modèle de résistivité tri-dimensionnel sur l'ensemble de l'île.

Les données magnétiques ont été traitées à l'aide du logiciel Oasis Montaj de Geosoft, suivant les procédures classiques, pour aboutir à une carte d'anomalies du champ magnétique. Ces données ont permis de dériver d'autres variables magnétiques usuelles : l'anomalie magnétique réduite au pôle, la dérivée verticale du champ magnétique, le signal analytique et l'inclinaison de la dérivée.



## 10. Bibliographie

Christiansen, A.V. and Auken, E., 2010.- A Global Measure for Depth of Investigation. Ext. Abstr., In: 16<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface, Zurich, Switzerland.

Danielsen J.E., Auken E., Jørgensen F., Søndergaard V., Sørensen K.I., 2003.- The application of the transient electromagnetic method in hydrogeophysical surveys. J. of Appl. Geophysics 53, 181-198.

Sørensen K.I., Auken E. and Thomsen P., 2000.- TDEM in groundwater mapping – a continuous approach. Symposium on the Applications of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Arlington, Virginia, pp. 485 – 491.

Szarka L., 1988.- Geophysical aspects of man-made electromagnetic noise in the earth – a review. Surveys in Geophysics 9, 287-318.

Viezzoli A., Auken E. and Munday T., 2009.- Spatially constrained inversion for quasi 3D modelling of airborne electromagnetic data – an application for environmental assessment in the Lower Murray Region of South Australia. Exploration Geophysics, 40:2, 173-183.



## **Annexe 1**

# **Calibration du système EM**



Les formes d'ondes ont été mesurées à la fréquence de répétition de 25 Hz à 117 A (HM) et 325 Hz à 9.2 A (LM). Le Figure 22 montre les rampes montantes et descendantes normalisées pour le LM (les valeurs de la courbe sont détaillées dans le Tableau 17). L'équivalent est fourni pour le HM en Figure 23 et dans le Tableau 18.

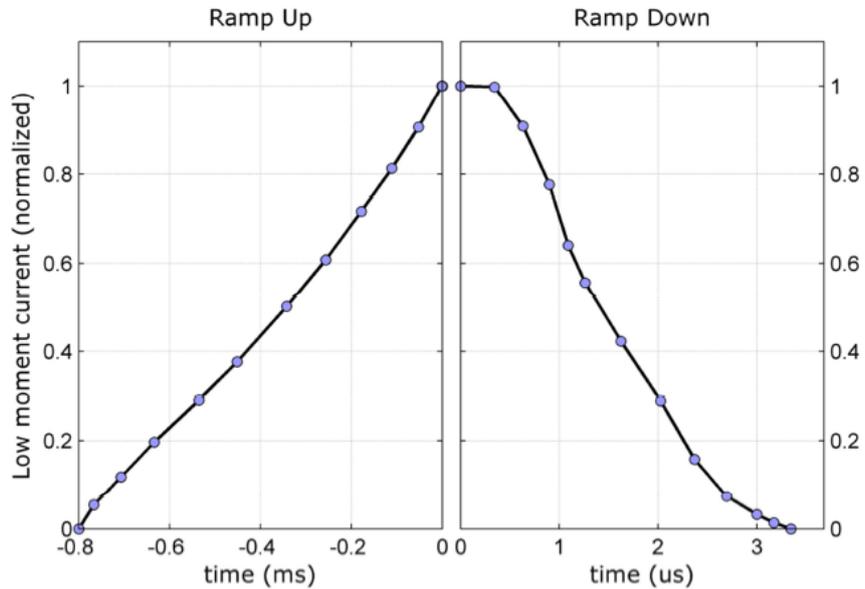


Figure 22 : Rampe montante et descendante pour le LM.

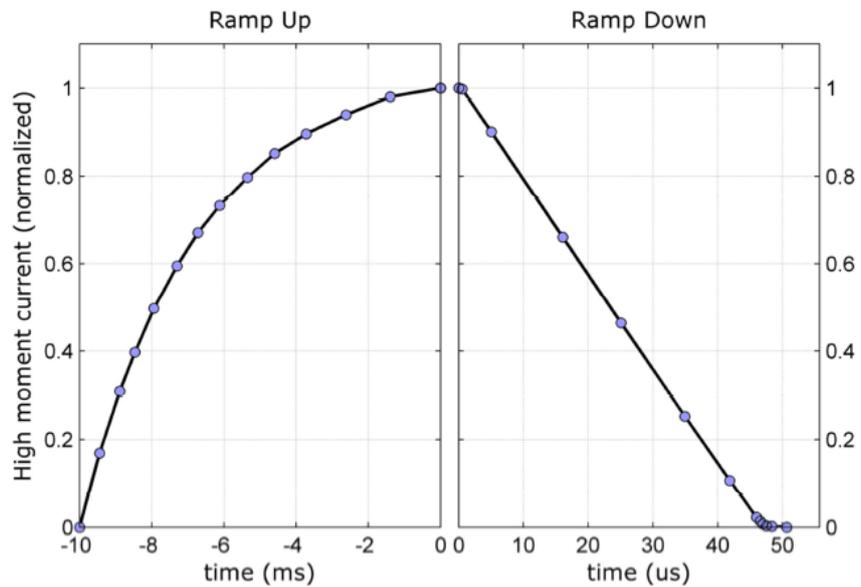


Figure 23 : Rampe montante et descendante pour le HM.

<i>Temps [s]</i>	<i>Courant normalisé</i>
-8.00000E-004	0.00000E+000
-7.66486E-004	5.37956E-002
-7.06705E-004	1.18029E-001
-6.33424E-004	1.96715E-001
-5.35074E-004	2.91460E-001
-4.51187E-004	3.76569E-001
-3.42231E-004	5.01825E-001
-2.56415E-004	6.07810E-001
-1.78314E-004	7.17007E-001
-1.10818E-004	8.13358E-001
-5.20012E-005	9.06496E-001
-1.00000E-006	1.00000E+000
0.00000E+000	1.00000E+000
3.44472E-007	9.97701E-001
6.31036E-007	9.08796E-001
8.98496E-007	7.76971E-001
1.08954E-006	6.40547E-001
1.26148E-006	5.56241E-001
1.62446E-006	4.22883E-001
2.02565E-006	2.89526E-001
2.36953E-006	1.57701E-001
2.69430E-006	7.33942E-002
2.99997E-006	3.20073E-002
3.17191E-006	1.36131E-002
3.34384E-006	0.00000E+000

*Tableau 17 : Courant normalisé pour le LM.*

<i>Temps [s]</i>	<i>Courant normalisé</i>
-1.00000E-002	0.00000E+000
-9.44417E-003	1.69416E-001
-8.88544E-003	3.09124E-001
-8.46355E-003	3.97445E-001
-7.93903E-003	4.97007E-001
-7.30048E-003	5.94964E-001
-6.71895E-003	6.70438E-001
-6.11461E-003	7.33066E-001
-5.35064E-003	7.97299E-001
-4.59806E-003	8.51898E-001
-3.72006E-003	8.96861E-001
-2.61401E-003	9.40219E-001
-1.39393E-003	9.80365E-001
-2.81674E-006	1.00000E+000
0.00000E+000	1.00000E+000
5.32711E-007	9.97699E-001
5.02667E-006	9.01076E-001
1.60662E-005	6.60285E-001
2.50541E-005	4.63971E-001
3.49213E-005	2.52320E-001
4.18576E-005	1.06619E-001
4.59608E-005	2.22651E-002
4.65587E-005	1.34502E-002
4.69320E-005	6.85519E-003
4.75048E-005	3.30872E-003
4.83635E-005	2.06858E-003
5.06300E-005	0.00000E+000

*Tableau 18 : Courant normalisé pour le HM.*

L'équipement TDEM complet a été étalonné sur le site de référence de SkyTEM au Danemark. La Figure 24 montre les résultats des mesures ainsi que les réponses attendues pour les altitudes de 11, 16, 20, 27 et 37 mètres.

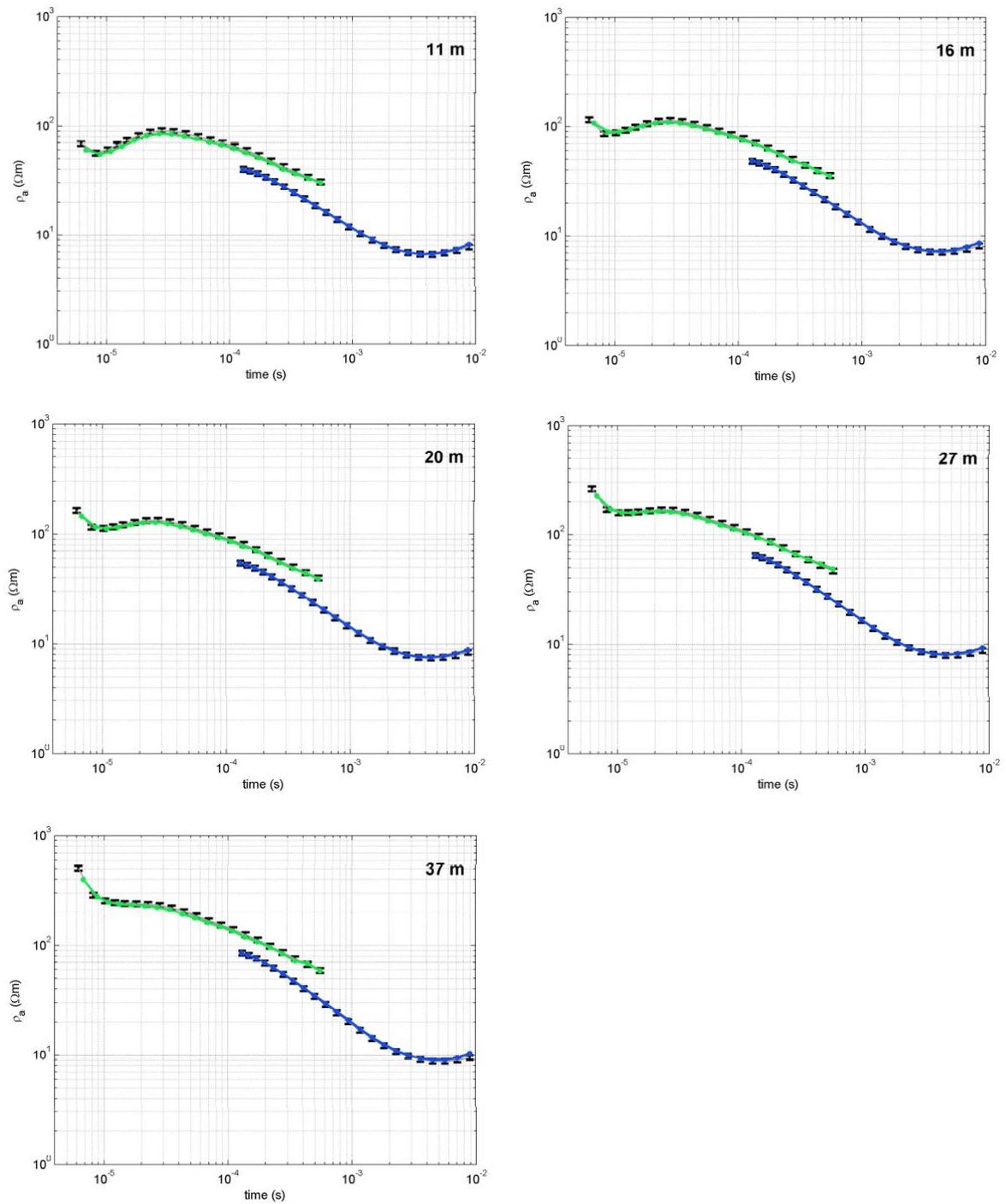


Figure 24 : Résultats de l'étalonnage du dispositif de mesure TDEM pour une altitude de 11 m, 16 m, 20 m, 27 m et 37 m. La courbe en noir est la réponse attendue, les courbes en vert et bleu sont les réponses enregistrées pour le moment faible et le moment fort respectivement.

## **Annexe 2**

# **Caractéristiques temporelles des fenêtres d'enregistrement EM**



Fenêtre	Ouverture ( $\mu$ s)	Centre ( $\mu$ s)	Longueur ( $\mu$ s)	Fermeture ( $\mu$ s)	Commentaire
1	0.43	0.715	0.57	1.00	Pas utilisée
2	1.43	2.215	1.57	3.00	Pas utilisée
3	3.43	4.215	1.57	5.00	Pas utilisée
4	5.43	6.215	1.57	7.00	Pas utilisée
5	7.43	8.215	1.57	9.00	Correction PFC
6	9.43	10.215	1.57	11.00	Correction PFC
7	11.43	12.215	1.57	13.00	Correction PFC
8	13.43	14.715	2.57	16.00	Correction PFC
9	16.43	18.215	3.57	20.00	Correction PFC
10	20.43	22.715	4.57	25.00	LM
11	25.43	28.215	5.57	31.00	LM
12	31.43	35.215	7.57	39.00	LM+HM
13	39.43	44.215	9.57	49.00	LM+HM
14	49.43	55.715	12.57	62.00	LM+HM
15	62.43	70.215	15.57	78.00	LM+HM
16	78.43	88.215	19.57	98.00	LM+HM
17	98.43	110.715	24.57	123.00	LM+HM
18	123.43	138.715	30.57	154.00	LM+HM
19	154.43	174.215	39.57	194.00	LM+HM
20	194.43	219.715	50.57	245.00	LM+HM
21	245.43	276.715	62.57	308.00	LM+HM
22	308.43	348.715	80.57	389.00	LM+HM
23	389.43	439.715	100.57	490.00	LM+HM
24	490.43	553.715	126.57	617.00	HM
25	617.43	697.715	160.57	778.00	HM
26	778.43	879.215	201.57	980.00	HM
27	980.43	1107.715	254.57	1235.00	HM
28	1235.43	1396.215	321.57	1557.00	HM
29	1557.43	1760.215	405.57	1963.00	HM
30	1963.43	2218.715	510.57	2474.00	HM
31	2474.43	2796.715	644.57	3119.00	HM
32	3119.43	3525.715	812.57	3932.00	HM
33	3932.43	4444.715	1024.57	4957.00	HM
34	4957.43	5603.215	1291.57	6249.00	HM
35	6249.43	7063.215	1627.57	7877.00	HM
36	7877.43	8904.215	2053.57	9931.00	HM

Tableau 19 : Caractéristiques temporelles des fenêtres de mesure. À noter que les temps indiqués ici pour le HM sont ceux pris en compte dans le logiciel Workbench (qui prend en compte un time-shift de 60  $\mu$ s à partir de la coupure de courant). Si un autre logiciel est utilisé, ce time-shift doit être introduit.



## **Annexe 3**

# **Calendrier des opérations**

<i>Vol</i>	<i>Temp. (C)</i>	<i>Vent (m/s)</i>	<i>Visibilité</i>	<i>Description</i>
20140502.01	25	2	good	Clear sky, clouds on the mountain
20140503.01	28	3	good	Clear sky, clouds on the mountain
20140503.02	30	5	good	Clear sky, clouds on the mountain
20140504.01	27	2	good	Clear sky, clouds on the mountain
20140504.02	30	4	good	Cloudy on the mountain, coming down
20140504.03	30	5	good	Cloudy on the mountain, coming down
20140506.01	26	2	good	Cloudy on the mountain, coming down
20140506.02	28	3	good	Some clouds
20140506.03	30	5	good	Clear sky, clouds on the mountain
20140506.04	30	5	good	Clear sky, clouds on the mountain
20140507.01	27	3	good	Clear sky, clouds on the mountain
20140507.02	30	4	good	Clear sky, clouds on the mountain
20140508.01	20	3	good	Cloudy on the mountain, coming down
20140508.02	28	3	good	Cloudy, grey over mountain, blue over shore
20140509.01	28	3	good	Clear
20140513.01	32	9	good	Clear sky, very windy
20140515.01	30	3	good	Clear sky, clouds on the mountain
20140515.02	30	4	good	Clear sky, clouds on the mountain
20140515.03	30	5	good	Clear sky, clouds on the mountain
20140515.04	30	6	good	Clear sky, clouds on the mountain
20140516.01	30	7	good	Sunny, very windy at high altitudes
20140516.02	33	7	good	Sunny, very windy at high altitudes
20140517.01	28	3	good	Some clouds
20140517.02	30	4	good	Clear sky with few clouds
20140518.01	20	5	good	Sunrise over clear sky
20140518.02	28	5	good	Sunny
20140520.01	20	9	good	Clear sky, low clouds on the sea
20140520.02	30	9	good	Clear sky, low clouds on the sea
20140521.01	20	6	good	Clear sky, low clouds on the sea
20140521.02	30	6	good	Clear sky, low clouds on the sea
20140522.01	26	8	good	Clear sky with few clouds
20140522.02	32	8	good	Sunny with few clouds
20140523.01	20	3	good	Clear sky, clouds over the sea
20140523.02	32	5	good	Sunny with clouds on the mountains
20140526.01	18	1	good	Cloudy over the sea
20140526.02	25	4	good	Sunny with clouds
20140526.03	32	7	good	Sunny with clouds on the mountains
20140527.01	18	4	good	Clear sky with clouds on the horizon
20140527.02	30	6	good	Sunny with few clouds
20140528.01	20	6	good	Few clouds over the sea
20140528.02	28	4	good	Sunny with clouds on the east
20140529.01	21	3	good	Clear sky with clouds on the horizon
20140530.01	19	5	good	Cloudy over the sea
20140530.02	27	10	good	Cloudy over the sea
20140601.01	24	7	good	Sunny with clouds
20140601.02	28	10	good	Sunny with clouds

20140602.01	22	2	good	Sunny with clouds
20140602.02	25	5	good	Sunny with clouds
20140603.01	25	10	ok	Mostly overcast
20140604.01	22	3	ok	Clear sky, clouds over the sea
20140604.02	25	8	good	Sun with few clouds
20140605.01	22	8	good	Sun with few clouds
20140605.02	26	12	good	Sun with few clouds
20140606.01	24	7	ok	Mostly overcast, with few light showers
20140606.02	28	8	good	Few clouds
20140607.01	20	3	good	Few clouds
20140607.02	26	6	ok	Mostly overcast
20140608.01	22	3	good	Few clouds
20140608.02	26	5	ok	Mostly overcast
20140609.01	22	4	ok	Overcast
20140609.02	25	6	ok	Overcast
20140610.01	20	3	good	Few clouds
20140610.02	25	6	good	Few clouds
20140611.01	22	4	good	Overcast
20140611.02	26	10	ok	Few clouds
20140612.01	20	4	good	Few clouds
20140612.02	25	8	good	Few clouds
20140613.01	20	5	good	Few clouds
20140613.02	26	10	good	Few clouds
20140614.01	19	5	good	Few clouds
20140616.01	22	3	good	Mostly clear skies
20140616.02	28	6	good	clear skies
20140617.01	22	6	good	Mostly clear skies
20140618.01	22	4	good	Mostly clear skies
20140618.02	28	12	ok	Mostly clear skies
20140619.01	22	4	ok	Clear skies, some clouds over the east part of Island
20140619.02	28	6	ok	Overcast
20140620.01	20	3	good	clear skies
20140620.02	30	5	good	clear skies
20140621.01	22	7	ok	Some clouds
20140621.02	26	8	ok	Some clouds, occasional shower
20140623.01	20	7	good	Few clouds
20140623.02	26	12	good	Few clouds
20140624.01	22	8	ok	Some clouds
20140624.02	26	12	ok	Few clouds
20140626.01	24	6	good	Few clouds
20140626.02	28	12	good	Few clouds
20140627.01	18	6	good	Few clouds
20140627.02	27	9	good	Few clouds
20140628.01	23	5	good	Few clouds
20140628.02	29	8	good	Few clouds
20140629.01	21	6	good	Few clouds
20140629.02	27	12	ok	Some clouds
20140701.01	19	3	ok	Some clouds
20140701.02	26	11	ok	Few clouds
20140702.01	22	4	good	Few clouds
20140702.02	28	15	good	Few clouds
20140703.01	23	15	good	Few clouds
20140704.01	20	5 - 12	good	Few clouds wind 5 m/s rising to 12 m/s during flight
20140705.01	22	At least 10	good	Some clouds, Gusting badly
20140707.01	22	3	good	Few clouds, but low clouds on much of the higher terrain
20140707.02	25	4	good	Few clouds, but low clouds on much of the higher terrain
20140707.03	27	6	good	Some clouds - particularly on the high terrain

20140708.01	20	3	good	Very few clouds
20140708.02	25	6	good	Some clouds gathering on high terrain
20140709.01	18	4	good	Clear sky
20140709.02	24	15-20	good	Few clouds on terrain. Wind rose very suddenly and very quickly got very strong at Pierrefond airport.)
20140710.01	23	5	ok	Pretty cloudy with rising winds
20140711.01	20	5	ok	Cloudy, but mostly high clouds
20140711.02	22	8-10 and rising	ok	Cloudy, but mostly high clouds, more clouds starting to form on high terrain
20140712.01	17	3-4	good	Clear, very few clouds
20140712.02	21	2-3 but rising during flight	good	Clear few clouds
20140712.03	25	8-10	good	Partially cloudy on some terrain
20140714.01	18	2-3 rising a little during flight	good	Clear on island, som clouds out at sea
20140714.02	30	5-7	good	Some clouds forming on high terrain
20140715.01	22	3-5	good	Few clouds
20140715.02	28	3-5	good	Few clouds
21040715.03	28	5-7	ok	Cloudy (pilot believed he could fly in the survey area)
20140716.01	20	3-4	ok	Heavy clouds drifting in from south east with rain showers
20140716.02	27	5-7	ok	Drifting clouds with light showers
20140717.01	20	6-8	poor-ok	Low clouds and showers (clear in parts of survey area above clouds)
20140718.01	22	7-9	ok	Clouds and rain to the east, few clouds otherwise
20140718.02	25	8-10	ok	Some clouds
20140721.01	25	2-4	good	Very few clouds
20140721.02	30	3-5 going up to 7-9 during flight	good	Some clouds on high terrain
20140722.01	23	3-5	good	Few clouds
20140722.02	28	8-10	good	Some clouds on high terrain
20140723.01	24	3-5	good	Few clouds
20140723.02	26	3-5	ok	Some clouds and even showers

Tableau 20 : Conditions de vol pour chaque vol.

<i>Vols</i>	<i>Commentaires</i>
20140501.01	First 0-Pos
20140501.02	Second 0-Pos
20140501.03	HighAlt
20140502.01	Production
20140503.01	Production
20140503.02	Production
20140504.01	Production
20140504.02	0-Pos /500m 5 min recalibration. Moved 2mm forward on Z
20140504.03	Frame damaged
20140506.01	0-Pos
20140506.02	0-Pos
20140506.03	HighAlt
20140506.04	Production
20140507.01	Production
20140507.02	Production
20140508.01	Production
20140508.02	Production
20140509.01	Production. Frame damaged.
20140513.01	First 0-Pos
20140515.01	Second 0-Pos. Using B2 helicopter as the Radae altimeter was installed in the B3
20140515.02	HighAlt . Using B2
20140515.03	Production - Using B2
20140515.04	Production - Using B2
20140516.01	Production - Back to B3
20140516.02	Production
20140517.01	Production
20140517.02	Production
20140518.01	Production
20140518.02	Production
20140520.01	Production
20140520.02	Production
20140521.01	Production
20140521.02	Production
20140522.01	Production, landed in Rolland-Garros
20140522.02	Production, DGPS bases moved to Rolland-Garros
20140523.01	Production, GPS2 was off when starting up the system.
20140523.02	Production, problems connecting GPS2 to TerraStar satellites
20140526.01	Production, tower moved 1mm backward (45.6cm from rear)
20140526.02	Production
20140526.03	High Altitude
20140527.01	Production
20140527.02	Production
20140528.01	Production
20140528.02	Production
20140529.01	Production
20140530.01	Production
20140530.02	Production
20140601.01	Production
20140601.02	Production, aborted due to high winds
20140602.01	Production
20140602.02	Production
20140603.01	Production
20140604.01	Production
20140604.02	Production
20140605.01	Production
20140605.02	Production. Generator alu-fan broken during flight and changed with spare. Small drop in voltage but data ok.

20140606.01	Production
20140606.02	Production
20140607.01	Production
20140607.02	Production
20140608.01	Production
20140608.02	Production, Flight aborted, Skymap lost projection
20140609.01	Production
20140609.02	Production, Flight aborted, Skymap lost projection
20140610.01	Production
20140610.02	Production
20140611.01	Production
20140611.02	Production,
20140612.01	Production, flight aborted temporarily after pilot lost navigation PC.
20140612.02	Production
20140613.01	Production
20140613.02	Production,
20140614.01	Production, MagBase 16 removed for relocation to Pierrefonds Airport
20140616.01	Production, changing landingsite to Pierrefonds Airport
20140616.02	Production
20140617.00	HighAlt
20140617.01	Production
20140618.01	Production
20140618.02	Production, flight aborted due to low satellite warnings, high winds and clouds later on.
20140619.01	Production
20140619.02	Production
20140620.01	Production
20140620.02	Production
20140621.01	Production
20140621.02	Production
20140623.01	Production
20140623.02	Production, Flight aborted due to high winds, 1000m for 5 min on the way to production lines, 2.nd flight
20140624.01	Production
20140624.02	Production
20140626.01	Production, Flew in nature reserve, finished the national park area.
20140626.02	Production, Flight aborted due to high winds
20140627.01	Production
20140627.02	Production
20140628.01	Production
20140628.02	Production
20140629.01	High alt
20140629.02	Production
20140701.01	Production
20140701.02	Production, attempt at Lagtest
20140702.01	Production
20140702.02	Production, Flight aborted after NavPC lost projection in flight.
20140703.01	Production, attempt at cloverleaf, but VERY windy, aborted after 3.rd pass.
20140704.01	Production and attempt at cloverleaf.
20140705.01	Lag test and 400 m, production not possible due to wind
20140707.01	Production
20140707.02	0-pos flight with production script, confirmation flight to make sure, that the null position had not been adjusted so much, that BRGM would require reflight
20140707.03	Production
20140708.01	Production including flight from Helilagon
20140708.02	Production including flight back to Helilagon
20140709.01	Production including flight from Helilagon->Pierrefond
20140709.02	Aborted flight - generator malfunction so he came back. Suspect tail wind for having choked the generator. System running fine for 45 minutes on ground after restart, so there seems to be no persistent problems with the generator.

20140709.03	Helicopter from Pierrefond to Helilagon
20140710.01	Production
20140711.01	Production
20140711.02	Production, aborted due to tricky mountain winds resulting in a close encounter with a tree (no frame damage).
20140712.01	High Alt
20140712.02	Production
20140712.03	Production
20140714.01	Production
20140714.02	Production
20140715.01	Clover test
20140715.02	Production
20140715.03	Production
20140716.01	Production
20140716.02	Production
20140717.01	Production
20140718.01	Production
20140718.02	Production
20140721.01	Production
20140721.02	Production
20140722.01	Production
20140722.02	Production
20140723.01	Production - take off at Pierrefond, landing at Eperon (HeliLagon base)
20140723.02	Production, no reference line

*Tableau 21 : Carnet de vol.*



## **Annexe 4**

# **Représentation des données EM**















## **Annexe 5**

# **Représentation des données du champ magnétique**









**Centre scientifique et technique**  
**Direction des Géoressources**  
3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34