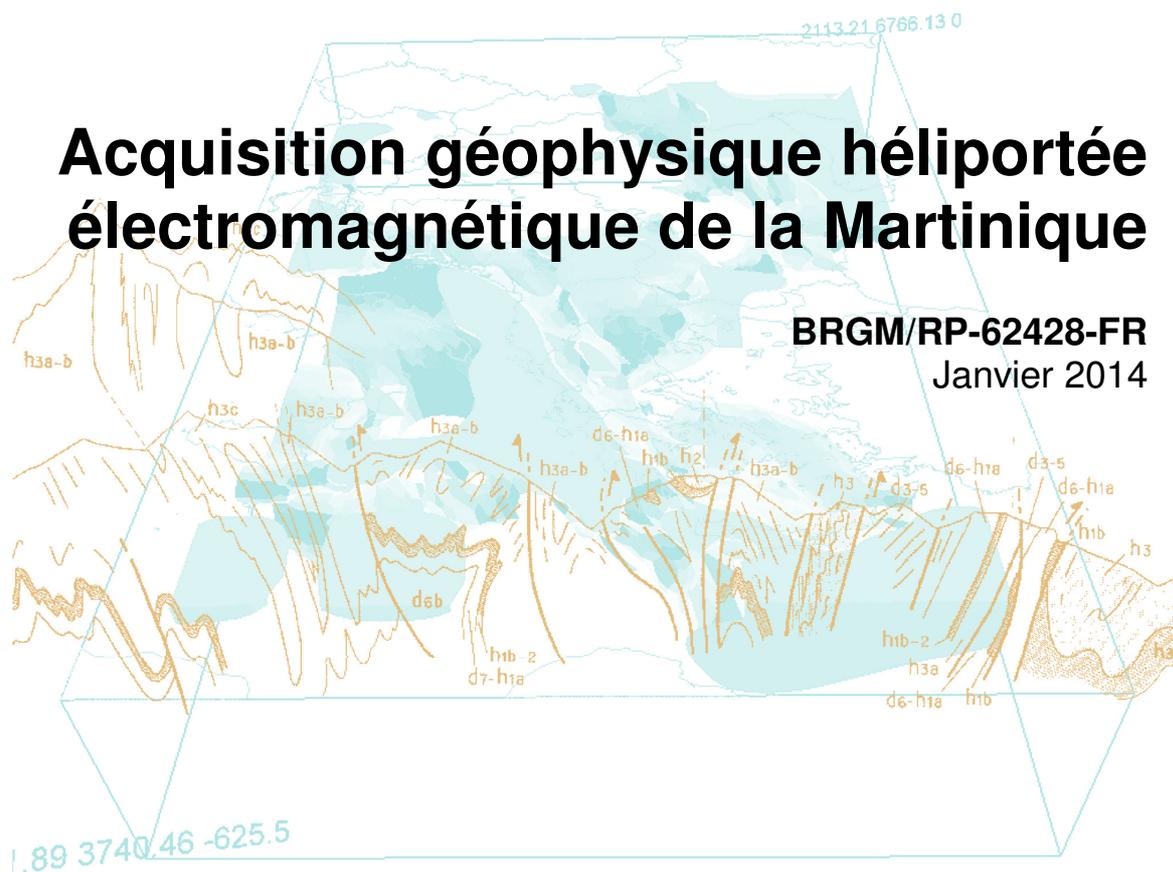




# Acquisition géophysique hélicoptérée électromagnétique de la Martinique

BRGM/RP-62428-FR  
Janvier 2014





# Acquisition géophysique hélicoptérée électromagnétique de la Martinique

**BRGM/RP-62428-FR**  
Janvier 2014

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

**J. Deparis, P.A. Reninger, J. Perrin, G. Martelet et J-C Audru**

**Vérificateur :**

Nom : Puvilland Pascal

Date : 20/01/2014

Signature :



**Approbateur :**

Nom : Nehlig Pierre

Date : 24/01/2014

Signature :



**Mots clés :**

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

Deparis, J., Reninger, P.A ., Perrin J., Martelet G., J.C Audru (2014) – Acquisition géophysique hélicoptérée de la Martinique. Rapp. BRGM/RP-62428-FR, 88 p., 23 fig., 21 tab.

## Synthèse

Au travers de l'action MartEM et par l'intermédiaire du BRGM, la Région Martinique, le FEDER, la DEAL Martinique et l'Office de l'eau de la Martinique ont conduit une campagne de géophysique hélicoptérée en électromagnétisme et magnétisme haute résolution de la Martinique. Cette campagne haute résolution a pour objectif d'apporter au territoire une infrastructure de données géophysique moderne permettant d'aborder les différentes dimensions de la ressource naturelle et de l'aménagement du territoire, au service des besoins de la société.

L'acquisition s'est déroulée du 29 janvier au 16 mars 2013 et consistait à acquérir les données suivant un plan de vol régulier dans un premier temps puis à densifier l'acquisition sur des zones de resserrement dans un second temps. Ce rapport détaille le protocole d'acquisition, de traitement et d'inversion des données. Les données issues de cette opération doivent permettre d'une part aux décideurs de disposer de données fiables pour gérer durablement les ressources naturelles et favoriser une occupation rationnelle du sol et du sous-sol et d'autre part de répondre aux questions scientifiques que ce levé ne manquera pas de susciter.

Techniquement, cette opération a deux objectifs : 1/ pourvoir 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 200 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 ElectroMagnetic (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 subsurface avec une résolution accrue, et le moment fort pour sonder plus en profondeur mais avec une résolution moins importante.

Les mesures d'électromagnétisme et de magnétisme ont été acquises le long de lignes de vol orientées N-S. Elles sont espacées de 400 m et resserrées de 100 à 200 m sur 31% de ce tracé. Des lignes de contrôle orientées perpendiculairement ont été acquises tous les 4000 m. Au final la couverture réalisée comprend 3730,7 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.

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 EM pour restituer des grilles de résistivités et les modèles de résistivités en trois dimensions de la Martinique.

Les données magnétiques ont été traitées à l'aide du logiciel Oasis Montaj de Geosoft pour calculer 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.

Le présent rapport est livré avec les données acquises.

## 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 .....	16
3.2.2. Récepteur .....	18
3.2.3. Inclinomètre.....	19
3.2.4. DGPS.....	19
3.2.5. Altimètre.....	19
3.2.6. Vidéo.....	20
3.2.7. Magnétomètre .....	20
3.3. STATIONS SOLS.....	21
3.3.1. GPS .....	21
3.3.2. 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 MAGNÉTOMETRE .....	28
4.2.1. Effet de cap.....	28
4.2.2. Test de lag .....	29
<b>5. Conditions opérationnelles .....</b>	<b>31</b>
5.1. GÉNÉRALITES .....	31
5.2. DIURNE .....	31
<b>6. Contrôle de qualité et traitement sur le terrain .....</b>	<b>33</b>
6.1. LIGNE TEST .....	33

6.2. CONTROLE ET VALIDATION DES DONNÉES SUR SITE (BRGM) .....	33
6.3. LES REVOLS .....	34
<b>7. Traitement.....</b>	<b>35</b>
7.1. TRAITEMENT ET INVERSION DES DONNÉES EM.....	35
7.1.1. Filtrage des données EM.....	35
7.1.2. Inversion et interpolation des données TDEM .....	44
7.2. MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN (MNT) .....	48
7.3. REPRÉSENTATION.....	49
7.4. DONNÉES MAGNÉTIQUES.....	49
7.4.1. Traitement de la station de base et correction de la diurne.....	49
7.4.2. Filtrage des données magnétiques hélicoptères.....	50
7.4.3. Corrections des données magnétiques.....	50
7.4.4. Corrections de l'IGRF .....	50
7.4.5. Nivellement des données magnétiques .....	51
7.4.6. RMF .....	51
7.4.7. TMI .....	51
7.4.8. Dérivées du champ magnétique .....	52
7.5. REPRÉSENTATION.....	53
<b>8. Produits finaux .....</b>	<b>55</b>
8.1. FICHER EM XYZ.....	55
8.2. FICHER MAGNÉTIQUE XYZ .....	56
8.3. GRILLES .....	58
8.4. FICHER 3D AU FORMAT VTK.....	58
8.5. ORGANISATION DES DONNÉES .....	60
<b>9. Conclusions.....</b>	<b>61</b>

## Liste des illustrations

Figure 1 : vue d'ensemble du plan de vol réalisé. Les lignes grenats représentent le plan de vol de base, les lignes vertes représentent les resserements. ....	13
Figure 2 : schéma montrant l'emplacement des appareils de mesures. La ligne rouge représente la bobine émettrice TDEM. Le plan horizontal est défini par (x,y). ....	16
Figure 3 : test à haute altitude du 27/01/2013 réalisé à 892 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le SLM (à gauche) et le HM (à droite). ....	24
Figure 4 : test à haute altitude du 09/02/2013 réalisé à 981 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le SLM (à gauche) et le HM (à droite). ....	25
Figure 5 : test à haute altitude du 19/02/2013 réalisé à 948 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le SLM (à gauche) et le HM (à droite). ....	26
Figure 6 : test à haute altitude du 22/02/2013 réalisée à 953 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le moment faible (à gauche) et le moment fort (à droite). ....	27
Figure 7 : test à haute altitude du 06/03/2013 réalisée à 1042 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le moment faible (à gauche) et le moment fort (à droite). ....	28
Figure 8 : localisation du test magnétique de l'effet de cap. ....	29
Figure 9 : données de garde au sol laser mesurées (points) et corrigées (courbe). Cette fenêtre de temps 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 forestière. ....	36
Figure 10 : paramètres de traitement utilisés par Aarhus Geophysics pour le filtrage du SLM (à gauche) et le HM (à droite). ....	38
Figure 11 : 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. Les points noirs indiquent les fenêtres bruitées identifiées et rejetées par la suite. ....	40
Figure 12 : carte de poids d'une composante de bruit (interpolation par courbure minimum). Les lignes électriques géoréférencées apparaissent en noires et les lignes de vol en tiretés gris. ....	41
Figure 13 : signal résultant des mesures TDEM (courbes rouge SLM 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. ....	42
Figure 14 : signal TDEM pour le SLM 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 SLM, la courbe bleue 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 suite au survol d'une zone urbaine.....	43
Figure 15 : paramètres géométriques utilisés pour le modèle de départ de l'inversion à 25 couches effectuée par Aarhus Geophysics.....	45
Figure 16 : paramètres géométriques utilisés pour le modèle de départ des inversions à 20 (a) couches et 5 (b) couches effectuées par le BRGM. ....	46
Figure 17 : réponses de la boucle TDEM mesurées pour la campagne réalisée en Martinique. ....	47
Figure 18 : 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. ....	48
Figure 19 : rampe montante et descendante à 225 Hz. ....	65
Figure 20 : rampe montante et descendante à 25 Hz. ....	65
Figure 21 : résultats du test de calibration pour une altitude de 11 (a), 16 (b), 21 (c), 26 (d) et 30 m (e). 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. ....	67
Figure 22 : Carte de résistivité apparente moyenne de 5 à 10 mètres et de 40 à 50 mètres de profondeurs.....	81
Figure 23 : Carte de résistivité apparente moyenne de 90 à 100 mètres de profondeurs et carte de l'anomalie magnétique réduite au pôle.....	83

## Liste des Tableaux

Tableau 1 : numérotation des lignes du plan de vol.....	14
Tableau 2 : coordonnées en mètre des instruments de mesure dans le repaire de la boucle émettrice TDEM. ....	16
Tableau 3 : géométrie en mètre de l'émetteur TDEM Tx. ....	17
Tableau 4 : paramètres de l'émetteur TDEM. ....	17
Tableau 5 : Paramètre 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 sol (Lat/Ion, WGS84, degrés décimaux) et période de fonctionnement au cours du levé.....	21
Tableau 9 : Résultat du test de l'effet de cap magnétique. ....	29
Tableau 10 : Statistiques de vol pour le lever MartEM.....	34
Tableau 11 : caractéristique du champ magnétique au centre de la zone étudiée.....	52
Tableau 12 : Description des champs fournis dans les fichiers EM XYZ.....	55
Tableau 13 : caractéristiques des champs fournis dans les fichiers magnétiques XYZ.....	57

Tableau 14 : récapitulatif des grilles produites.....	58
Tableau 15 : récapitulatif des grilles produites.....	59
Tableau 16 : organisation des fichiers de données. ....	60
Tableau 17 : courant normalisé pour le moment faible. ....	66
Tableau 18 : courant normalisé pour le moment fort. ....	66
Tableau 19 : Caractéristiques temporelles des fenêtres de mesure .....	71
Tableau 20 : rapport pour chaque vol .....	75
Tableau 21 : carnet de vol.....	77

## Liste des annexes

Annexe 1 Calibration du système EM.....	63
Annexe 2 Caractéristiques temporelles des fenêtres d'enregistrement EM.....	69
Annexe 3 Calendrier des opérations.....	73
Annexe 4 Représentation des données EM .....	79



# 1. Introduction

Le BRGM a assuré la réalisation du projet « MartEM » de cartographie géophysique aéroportée haute résolution de la région Martinique. Les partenaires du projet sont le FEDER porté par la DRRT Martinique, la Région Martinique, la DEAL Martinique et l'Office de l'eau de la Martinique.

Ce projet est une des actions du programme européen FEDER sur l'axe 1 (Développement économique, innovation et recherche), l'action 1.1 (soutien à la recherche, au développement et à la technologie), et la sous action 1.1.1 : développement des pôles d'activités stratégiques.

Le projet MartEM comporte une phase d'acquisition des données électromagnétiques et magnétique sur l'ensemble de l'île.

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.

Les vols de production ont été réalisés du 26 janvier au 16 mars 2013. Le kilométrage linéaire d'acquisition est de 3730,7 km.

Le présent rapport détaille le protocole d'acquisition et de traitement des données d'électromagnétisme et de magnétisme hélicoptérées ainsi que les premiers résultats, conformément à l'article 5 de l'annexe technique du projet MartEM.



## 2. Plan de Vol

Les acquisitions géophysiques ont été réalisées l'ensemble de la Martinique (Figure 1). Les vols de production ont été réalisés du 29 janvier au 16 mars 2013. Le kilométrage linéaire d'acquisition est de 2830,2 km pour le plan de vol de base et de 900,5 km pour les resserrements.

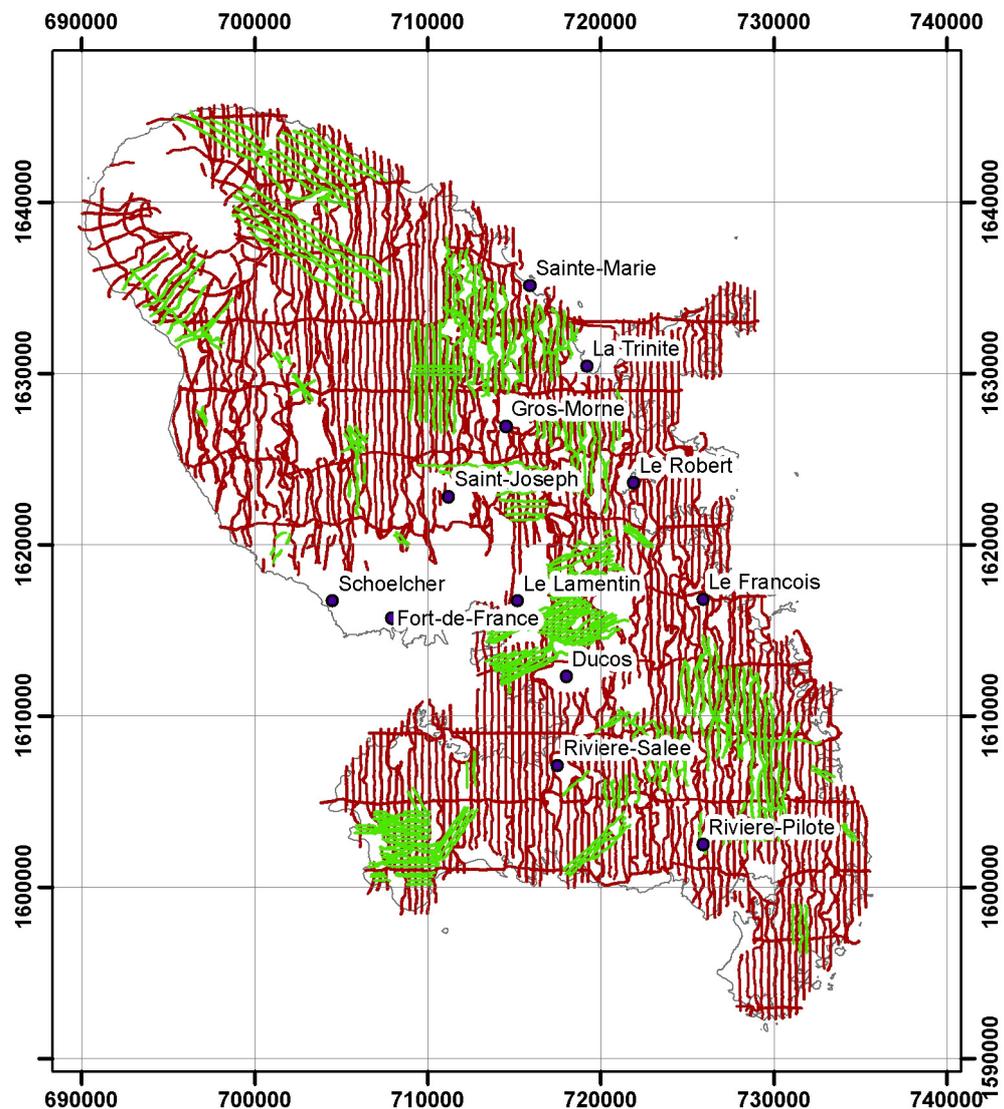


Figure 1 : vue d'ensemble du plan de vol réalisé. Les lignes grenats représentent le plan de vol de base, les lignes vertes représentent les resserrements.

Le plan de vol et la localisation des mesures sont référencés dans le système de coordonnées projetées UTM 20 Nord (datum WGS 84). Dans ce système, les lignes de vol ont une orientation Nord-Sud espacées de 400 m et les traverses sont volées perpendiculairement dans la direction Est-Ouest tous les 4000 m. Il a aussi été réalisé localement une densification des lignes de vol (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, tel que la présence de constructions métalliques, lignes électriques, fermes ou villages. Les survols à basses altitudes des agglomérations est interdit. Le pilote de l'hélicoptère a contourné ces obstacles pour préserver le signal. Lors de chaque vol, une ligne test a été réalisée afin de s'assurer du bon fonctionnement et de la stabilité du système de mesure

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

<i>Numéros des lignes</i>	<i>Description</i>
100101 - 110001	Ligne N/S
200101 - 201401	Ligne de recoupe E/W
300101 - 303001	Ligne radiale sur le Mt Pelé
400201 - 400502	Ligne tangentielle sur le Mt Pelé
901021 - 902022	Ligne de test pour l'Effet de cap
922001 - 922050	Ligne de resserrement

*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. Lors du contrôle des vols, les géophysiciens du BRGM ont contrôlé le respect des spécifications techniques et des tolérances rappelées ci-dessous.

### 3.1. NAVIGATION

Les vols ont été effectués selon une trajectoire bidimensionnelle préétablie selon une surface théorique de vol.

Les tolérances de navigation sont :

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

La garde au sol nominale entre le système d'émission électromagnétique et le sol est de 30 mètres, avec une augmentation pendant le survol des forêts, lignes électriques, variations 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 lors des changements de vitesse de vent.

### 3.2. ÉQUIPEMENT GÉOPHYSIQUE

Les systèmes tractés en élingue comprennent les boucles émettrice et réceptrice du TDEM, deux inclinomètres, deux altimètres, deux GPS, un magnétomètre et une caméra vidéo (installée à bord de l'hélicoptère).

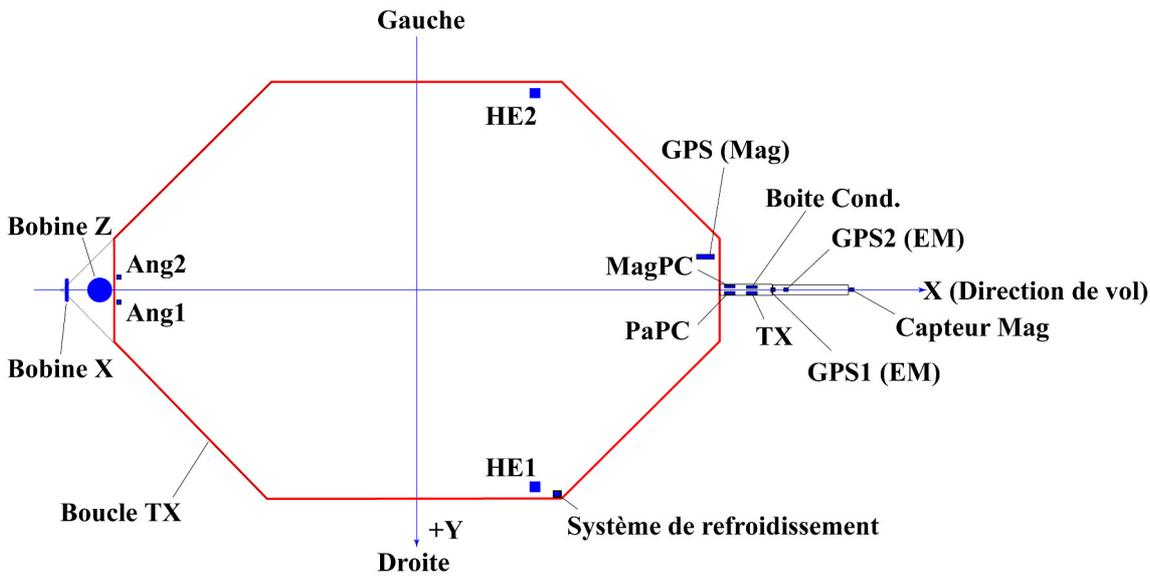


Figure 2 : schéma montrant l'emplacement des appareils de mesures. La ligne rouge représente la bobine émettrice TDEM. Le plan horizontal est défini par (x,y).

Le schéma en Figure 2 montre la géométrie de la boucle émettrice et la position des différents instruments qui constituent le système Skytem. 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.

Instrument	X	Y	Z
GPS1	10.89	2.75	-0.27
GPS2	9.46	..95	-0.27
HE1 (altim.)	5.15	7.67	-0.15
HE2 (altim.)	5.15	-9.67	-0.15
Inclinomètre 1	-11.90	-0.50	-0.36
Inclinomètre 1	-11.90	0.50	-0.36
Capteur Mag	20	0.00	-0.40
RX (Boucle Z)	-12.50	0.00	-2.10
RX (Boucle Z)	-13.60	0.00	0.00

Tableau 2 : coordonnées en mètre des instruments de mesure dans le repaire de la boucle émettrice TDEM.

### 3.2.1. Émetteur

La boucle émettrice TDEM peut être décrite par un octogone dont les coordonnées sont données dans le Tableau 3.

X	Y
-11.87	-2.03
-5.68	-8.22
5.68	-8.22
11.87	-2.03
11.87	2.03
5.68	8.22
-5.68	8.22
-11.87	2.03

Tableau 3 : géométrie en mètre de l'émetteur TDEM Tx.

La surface de la boucle émettrice est de 314 m<sup>2</sup> avec une circonférence de 65.9 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 (SLM) 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 SLM 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 très affecté par 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 112 A pour le HM et de 11 A pour le SLM. 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.

Paramètres	SLM	HM
Nombre de tours de l'émetteur	1	4
Aire de l'émetteur	314 m <sup>2</sup>	314 m <sup>2</sup>
Pic de courant	9.2 A	115.7 A
Pic de moment	2890 Am <sup>2</sup>	145 000 Am <sup>2</sup>
Fréquence de répétition	225 Hz	25 Hz
Durée de l'émission	800 µs	10000 µs
Durée de mesure (courant interrompu)	1422 µs	10000 µs (HM)
Nombre de périodes	126 (0.28s)	66 (1.32s)
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 66 impulsions unitaires pour le HM et 126 pour le SLM. 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:

$$\text{Longueur du cycle} = 66 * 20 \text{ ms} + 126 * 2.25 \text{ ms} = 1.6 \text{ s}$$

### 3.2.2. Récepteur

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

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

- Boucle Z (X,Y,Z) = (-12.50, 0.00, -2.0)
- Boucle X (X,Y,Z) = (-13.60, 0.00, 0.00)

Les boucles X et Z ont une garde au sol de 30 et 32.12 m respectivement. Les paramètres des boucles réceptrices sont donnés dans le Tableau 5

<i>Paramètres du récepteur</i>	<i>SLM</i>	<i>HM</i>
Taux d'échantillonnage	Toute les décroissances sont mesurées	Toute les décroissances sont mesurées
Nombre de fenêtres de mesure	24	20
Filtre passe bas de la boucle réceptrice	450 kHz	450 kHz
Filtre passe bas de l'instrument de réception	300 kHz	300 kHz
Fréquence de répétition	225 Hz	25 Hz
Première porte	0 µs	50 µs

*Tableau 5 : Paramètre 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. Inclinomètre

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 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

La fréquence d'échantillonnage est de 1Hz. Les coordonnées sont données dans le système WGS84.

L'erreur sur la localisation est de  $\pm 0.4$  m après traitement différentiel (avec un facteur de qualité de 2). Les traitements ont été effectués à l'aide du logiciel GrafNavLite de Novatel sur la base d'un traitement différentiel (DGPS) entre les GPS de la station sol et les instruments en vol, afin d'améliorer la précision de la localisation.

### 3.2.5. Altimètre

Deux lasers indépendants (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, pour une étendue de mesure 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 n'ayant pas de valeur sont marquées 99999.99 par défaut.

Les données sont délivrées avec une résolution centimétrique mais l'incertitude de mesure varie de 10 à 30 cm. Les lasers sont contrôlés avec des cibles bien connues.

### 3.2.6. Vidéo

La caméra vidéo utilisée (Racelogic VBOX Lite) est montée à bord 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 lmg/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'avant du mat qui dépasse à l'avant de la boucle d'injection TDEM (cf. Figure 2).

La sensibilité du système est inférieure à 0.0005 nT/  $\sqrt{\text{Hz}}$  rms. La plage de fonctionnement est de 0.002 nT point à point à la fréquence d'échantillonnage de 10 Hz, avec une précision absolue de 3nT.

Les mesures du magnétomètre sont réalisées pendant les temps de réception de la séquence de mesure du HM du TDEM.

Aucune mesure n'est réalisée (1) pendant le cycle du SLM 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 de l'enregistrement du magnétomètre sont récapitulés sur le Tableau 7.

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

*Tableau 7 : Paramètres de l'enregistrement magnétique.*

### 3.3. STATIONS SOLS

Les stations sol ont été placées selon les spécifications du Cahier des Charges, en particulier de manière à éviter toute interférence avec des installations humaines. La localisation de ces dernières est reportée dans le Tableau 8.

	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Altitude</i>
<i>DGPS 1</i>	<i>14° 35' 37.72"</i>	<i>-61° 00' 16.48"</i>	<i>4.75 m</i>
<i>Base mag 1 (utilisée le 20/03/2013)</i>	<i>14°35'35.56"</i>	<i>-61° 00' 37.73"</i>	<i>3.5 m</i>
<i>Base mag 2 (base jusqu'au le 07/02/2013)</i>	<i>14°35'35.36"</i>	<i>-61° 00' 38.10"</i>	<i>3.5 m</i>
<i>Base mag 2 (secours depuis le 08/02/2013)</i>	<i>14°35'32.49"</i>	<i>-61° 00' 30.33"</i>	<i>2.2 m</i>

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

#### 3.3.1. GPS

Un récepteur GPS de référence a été maintenu au sol en station fixe durant l'opération en vue de la correction différentielle du système de positionnement embarqué. Les caractéristiques du GPS utilisé au sol étaient :

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

La fréquence d'échantillonnage est de 1 Hz.

#### 3.3.2. 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 sol). Pour s'affranchir de ces variations dans les données mesurées en vol, on leur retire l'enregistrement mesuré à la base magnétique fixe 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 lorsqu'il se manifeste sur les enregistrements des stations sol l'une des conditions suivantes :

- En période d'orage magnétique, lorsque l'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 magnétiques sol ont été installées dans une zone de faible gradient magnétique et loin des sources de bruit (lignes électriques, objets métalliques en mouvement). Deux emplacements ont été occupés successivement (voir Tableau 8), le premier étant trop bruité.

Par sécurité la station sol a été 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 sur sa gamme de température. Sa fréquence d'échantillonnage est de 1 Hz.

## 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 décembre 2012. La calibration inclue 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 = 1.02 et SLM = 1.02 (sur les mesures dB/dt brutes),
- Décalage temporel : HM = - 1.6  $\mu$ s et SLM = -1.6  $\mu$ s

Toutes les données produites, incluant les fenêtres temporelles (Annexe 2) et le facteur d'échelle sur les données dB/dt doivent être corrigées des 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 avec une altitude comprise entre 1098 et 1266 m. Ce test a été effectué pendant l'ensemble de la mission afin d'assurer un niveau de bruit stable et bas. Les données acquises ont été comparées aux standards internationaux et sont en dessous du niveau de bruit admissible maximal.

Les figures 3 à 7 montrent les résultats du test à haute altitude. Les lignes grises représentent chaque décroissance enregistrée. Les lignes bleues représentent les décroissances moyennes et les signes 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 afin de vérifier la stabilité de la boucle.

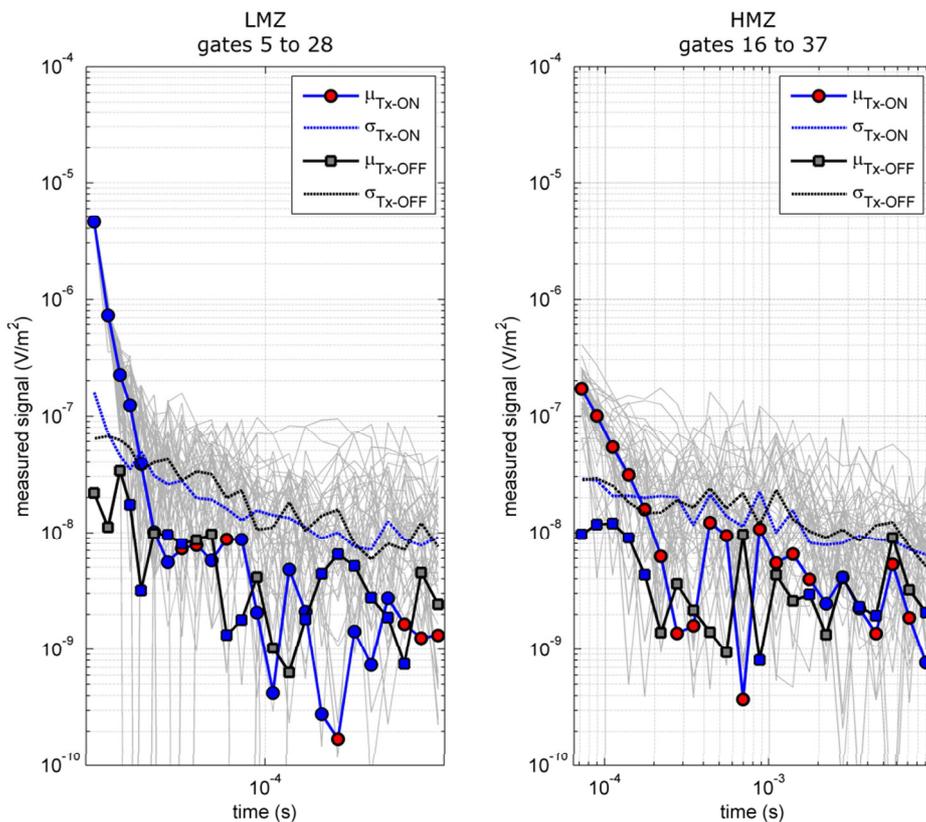


Figure 3 : test à haute altitude du 27/01/2013 réalisé à 892 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le SLM (à gauche) et le HM (à droite).

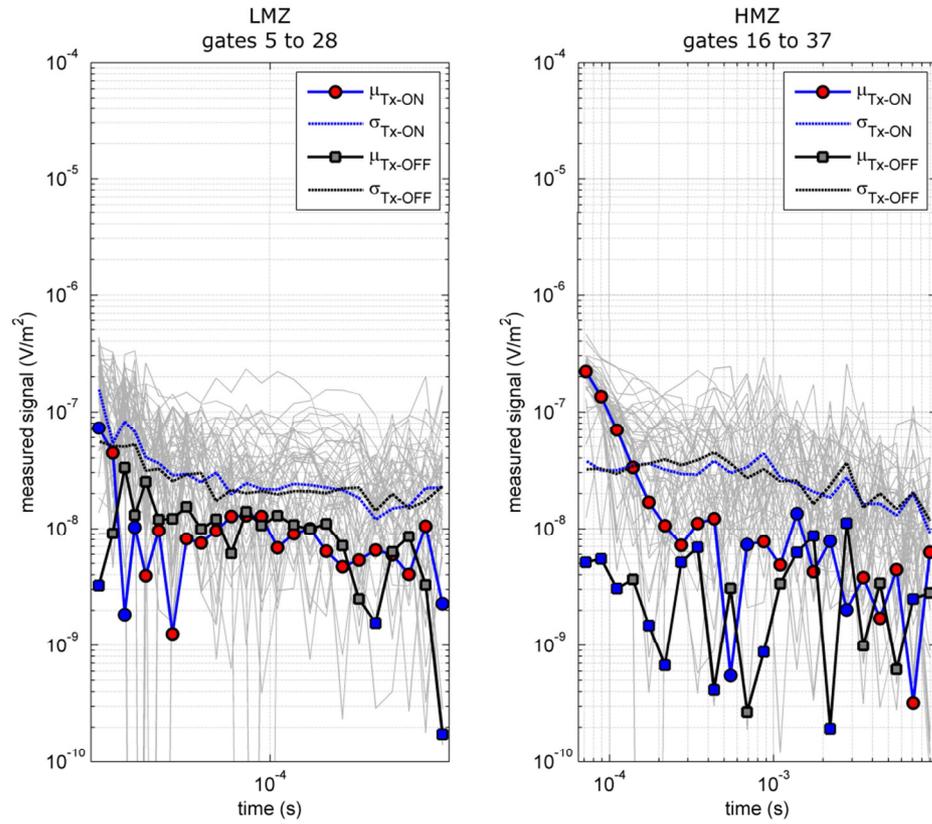


Figure 4 : test à haute altitude du 09/02/2013 réalisé à 981 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le SLM (à gauche) et le HM (à droite).

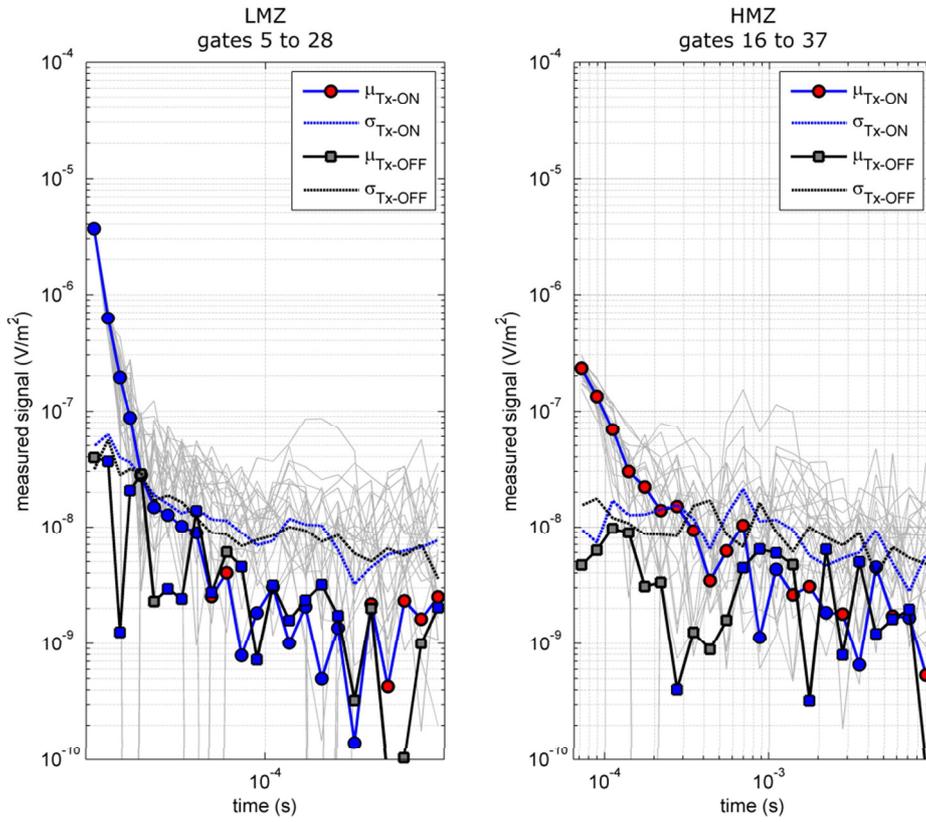


Figure 5 : test à haute altitude du 19/02/2013 réalisé à 948 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le SLM (à gauche) et le HM (à droite).

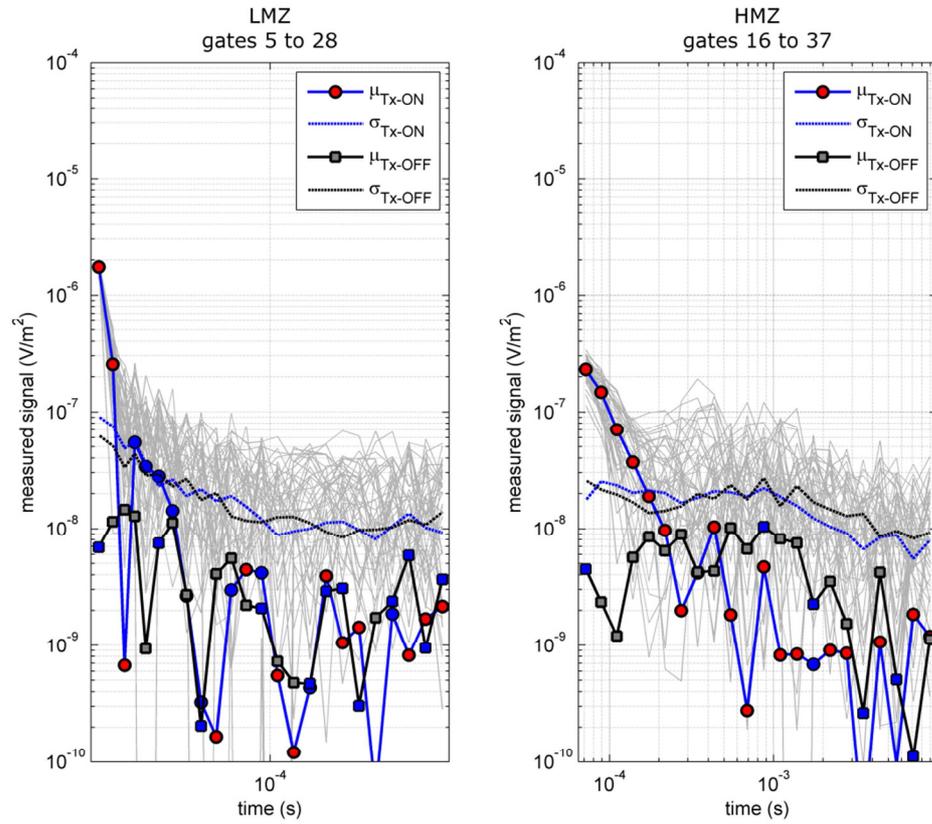


Figure 6 : test à haute altitude du 22/02/2013 réalisée à 953 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le moment faible (à gauche) et le moment fort (à droite).

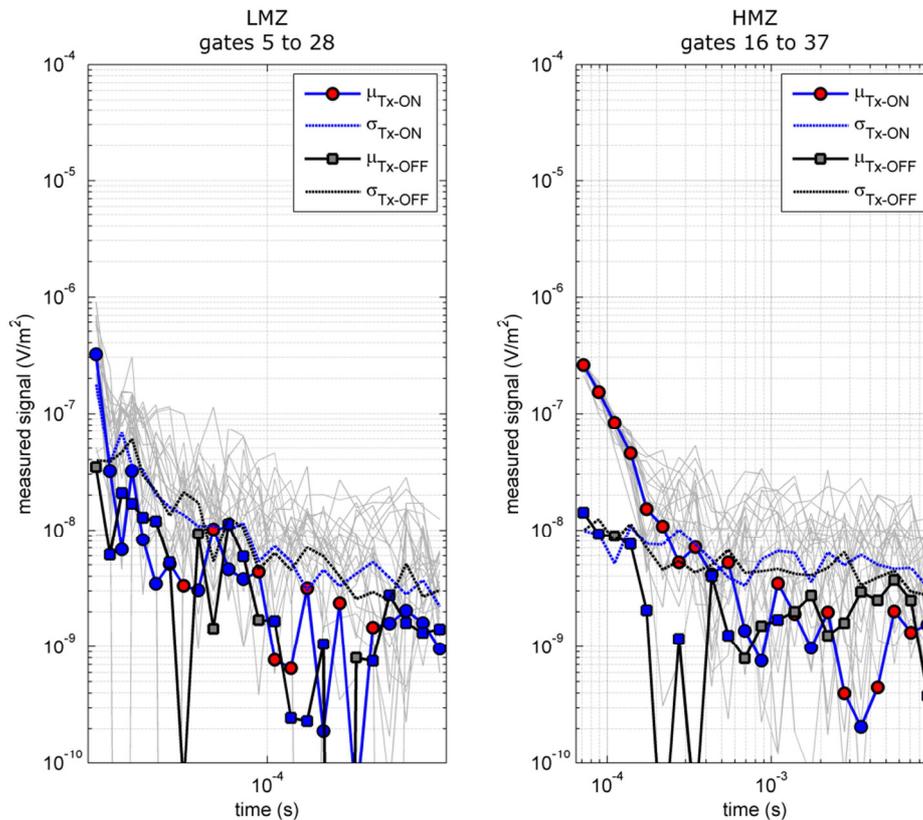


Figure 7 : test à haute altitude du 06/03/2013 réalisée à 1042 m d'altitude, avec émission (ligne bleue) et sans émission (ligne noire) pour le moment faible (à gauche) et le moment fort (à droite).

## 4.2. CALIBRATION DU MAGNÉTOMETRE

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 30/01/2013.

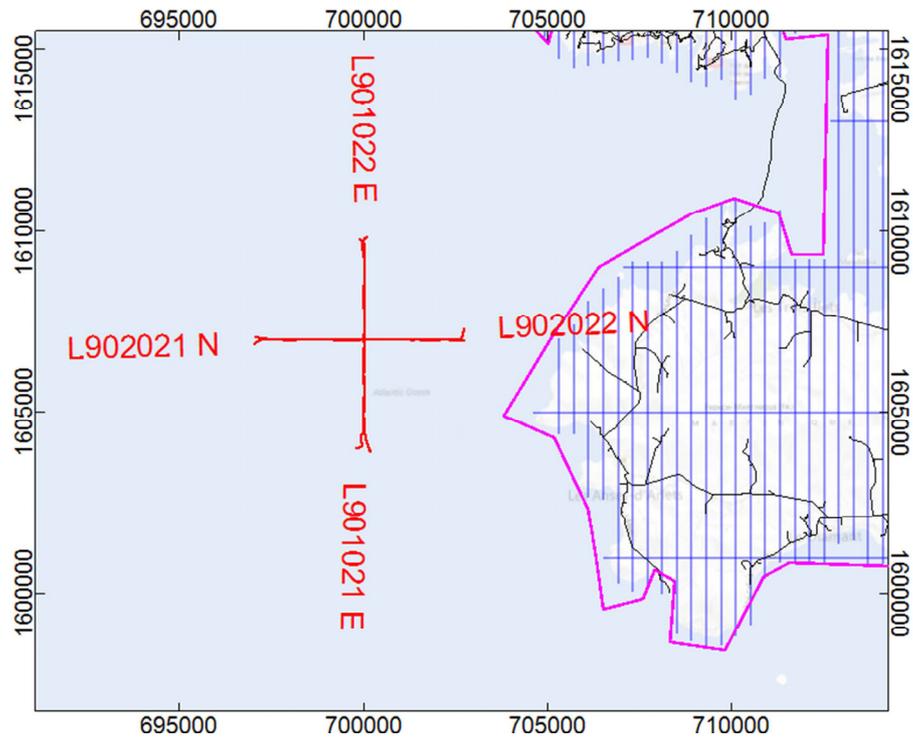


Figure 8 : localisation du test magnétique de l'effet de cap.

Les paramètres de correction trouvés sont donnés dans le Tableau 9.

Direction	Correction	Ligne
0°	0.655nT	902021
90°	0.690	902022
180°	-0.065	901022
270°	-1.280 nT	901021

Tableau 9 : Résultat du test de l'effet de cap magnétique.

#### 4.2.2. Test de lag

Le « lag » du système magnétométrique a été déterminé en comparant les données magnétiques sur deux passages en directions opposées au-dessus d'une structure métallique. Le décalage dans la localisation de l'objet sur les données brutes donne le temps pris pour que le champ magnétique mesuré par le système hélicoptéré soit enregistré par l'ordinateur ainsi que le décalage physique entre le magnétomètre et l'antenne GPS. Le test a été réalisé le 28/02/2013. La valeur de lag qui en résulte est de zéro seconde.



## **5. Conditions opérationnelles**

### **5.1. GÉNÉRALITES**

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 26 janvier 2013. Les opérations ont été conduites depuis l'aéroport de Pointe à Pitre.

Aucune avarie matérielle majeure n'est à répertorier. La production journalière moyenne est de 230 kml. La campagne de mesure s'est achevée le 16 mars 2013 (date du dernier vol de production). Au total 43 vols de production répartis sur 26 jours ont été réalisés. Au total, 3730,5 kml de lignes de vol ont été enregistrés en condition de production, soit un rythme moyen de 86,8 kml/vol

### **5.2. DIURNE**

Deux stations sol avec deux magnétomètres ont été utilisés lors de cette campagne. L'ensemble du traitement a été réalisé avec un seul magnétomètre (cf. Tableau 8).



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

### 6.1. LIGNE TEST

Un tronçon de vol de 1000 m 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'éventuelles dérives instrumentales.

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

Le géophysicien du BRGM s'est assuré que les données étaient conformes aux spécifications du Cahier des Charges et que l'équipement ne présentait pas d'anomalie de fonctionnement tout le long de la campagne.

Ce contrôle a été effectué par :

- un examen rigoureux des lignes tests, avant et après les vols de production, des calibrations instrumentales et des tests,
- un contrôle systématique des enregistrements numériques 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 ont été interpolés afin de procéder à un contrôle de cohérence cartographique.

Le Tableau 10 récapitule les statistiques de vols pour l'ensemble du lever.

<i>Paramètre de contrôle</i>	<i>Moyenne</i>	<i>StD</i>
Vitesse au sol (km/h)	63.1	14.1
Garde au sol (m)	63.7	27.0
Inclinaison	X (°)	0.6
	Y (°)	0.8
Voltage Tx	Tx Off (V)	66
	Tx On (V)	63
Courant LM (A)	9.2	0.1
Courant HM (A)	115.6	1
Température (C°)	40-50	-

Tableau 10 : Statistiques de vol pour le lever MartEM.

### 6.3. LES REVOLS

Chaque ligne de vol a fait l'objet d'une validation par le géophysicien BRGM. Les tronçons de ligne 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 trop élevée, parfois à des sautes du courant d'injection.

## 7. Traitement

### 7.1. TRAITEMENT ET INVERSION DES DONNÉES EM

Le but de cette partie est de :

- Eliminer sur les données EM les effets de couplage dus aux infrastructures,
- Réaliser les corrections d'altitude et d'attitude de la boucle afin d'améliorer la résolution de sub-surface,
- Réaliser une inversion multicouche de l'ensemble du jeu de données afin d'obtenir un bloc 3D de résistivité inversée.

#### 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.

Le traitement des données TDEM a été réalisé par Aarhus Geophysics à l'aide du logiciel Aarhus Workbench. Les paramètres mis en œuvre et les résultats obtenus sont les sujets du rapport « **Processing and inversion of SkyTEM data - Martinique. Report number 2013-07, September 2013** ».

Une procédure de filtrage alternative a également été réalisée par le BRGM.

Le traitement des données SkyTEM comprend plusieurs étapes :

- le traitement des données GPS, d'altitude et d'orientation de la boucle ;
- le filtrage numérique des bruits des données dB/dt ;
- l'édition manuelle des données dB/dt.

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

##### ***I. 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. Ce filtre est appliqué plusieurs fois sur les données résiduelles.

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 9 présente les données d'altitude brutes et la courbe d'altitude obtenue suite aux traitements numériques (et à l'édition manuelle lorsque nécessaire) de ces données.

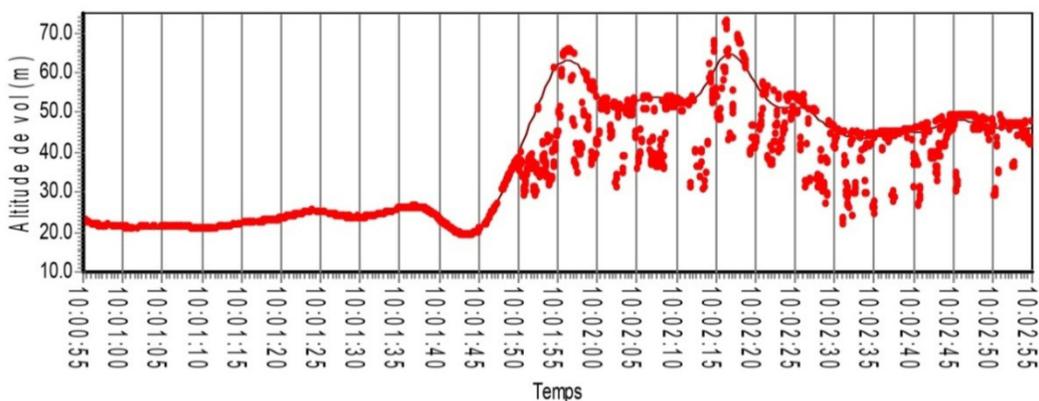


Figure 9 : données de garde au sol laser mesurées (points) et corrigées (courbe). Cette fenêtre de temps correspond à environ 2 km de ligne de vol. A partir de 10:01:50, l'altitude de vol augmente et « l'éparpillement » des données mesurées traduit le passage d'une zone sans végétation à une zone forestière.

## II. BRGM

Etant donné la forte topographie de l'île de la Martinique 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 traitées par traitement différentiel afin de connaître, avec grande précision, les positions x,y et particulièrement z de la boucle. La garde au sol de cette dernière a alors été obtenue par soustraction du modèle numérique de terrain à l'altitude de 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 dégradé à une résolution de 25 m afin de s'accorder à la résolution des données EM.

Le traitement des données d'attitude 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 affectés 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 (cf. 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 ( $AM > 1\text{kHz}$ ) 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). Le couplage capacitif est dû à un objet enterré 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 une ligne électrique, qui créent une boucle secondaire apparaissant sur la courbe de décroissance comme un changement de pente.

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

#### **I. Aarhus Geophysics**

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

- Cap Filter, qui supprime les temps courts, soit le début de la courbe, et supprime les valeurs d'amplitude inférieures à celle de la courbe de bruit modélisée ;
- Slope Filter, supprime les oscillations en fonction de deux pentes 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 10.

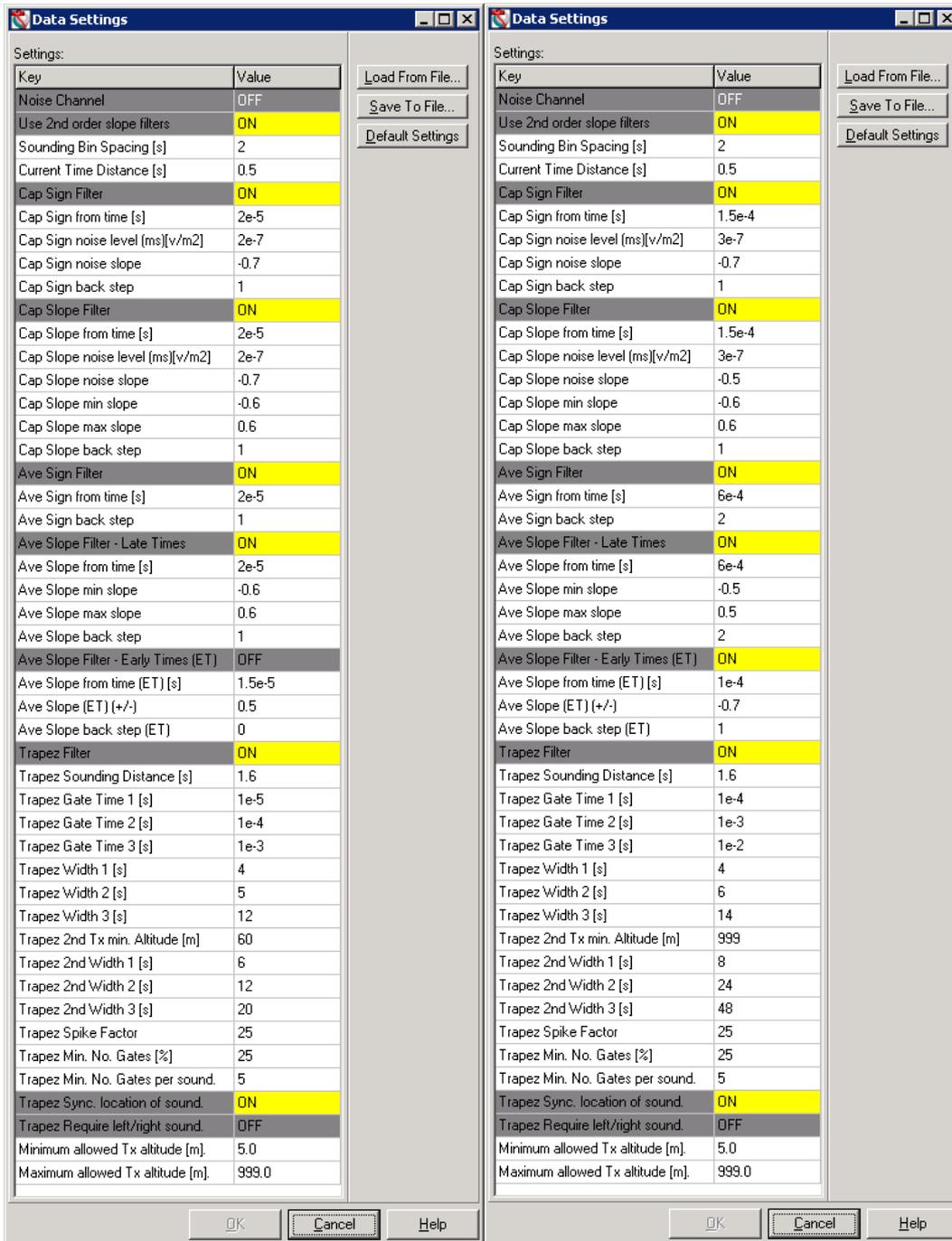


Figure 10 : paramètres de traitement utilisés par Aarhus Geophysics pour le filtrage du SLM (à gauche) et le HM (à droite).

## II. BRGM

Une procédure de filtrage des données EM alternative, basée sur l'utilisation de la Décomposition en Valeurs Singulières (SVD), a été utilisée par le BRGM (Reninger & al., 2011). Le filtrage est alors rendu moins subjectif et moins gourmand en temps.

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 trois 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 11. Cette étape permet donc de rejeter les distorsions singulières, telles que les pics et les oscillations présentes sur les décroissances.

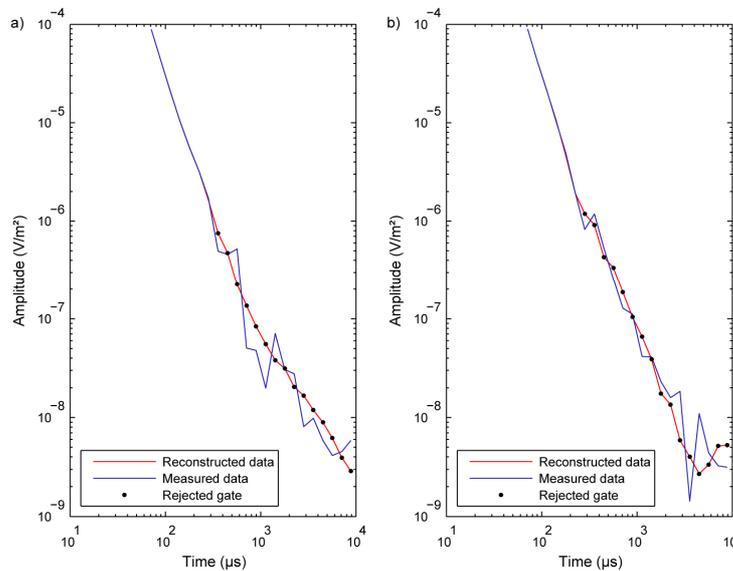


Figure 11 : résultat de la seconde étape de filtrage présenté sur deux exemples de courbes bruitées, affectées par des oscillations et pics. Les courbes bleue et rouge représentent respectivement la décroissance mesurée et celle reconstruite. Les points noirs indiquent les fenêtres bruitées identifiées 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 leur 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 12 montre une carte de poids de la somme des composantes de bruit. 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 12).

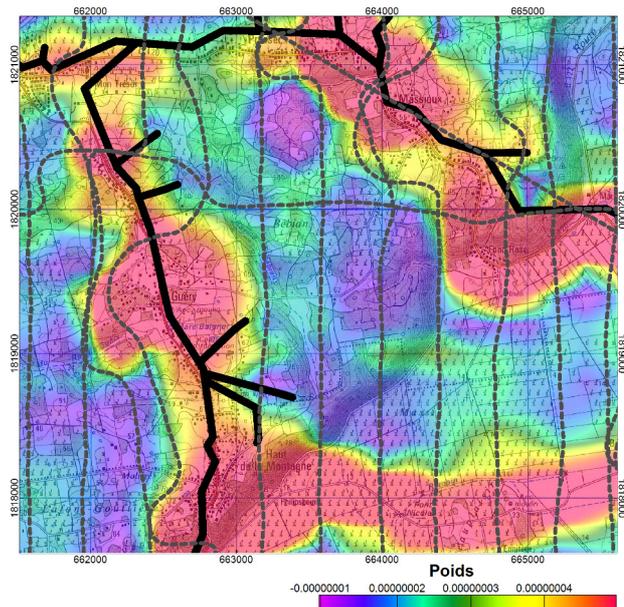


Figure 12 : carte de poids d'une composante de bruit (interpolation par courbure minimum). Les lignes électriques géoréférencées apparaissent en noires et les lignes de vol en tiretés gris.

### c. Edition 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 est réalisée pour supprimer les bruits restants. Chaque courbe de décroissance est représentée comme dans la Figure 13 et les données présentant les caractéristiques de bruit (oscillations, boucle secondaire) sont supprimées.

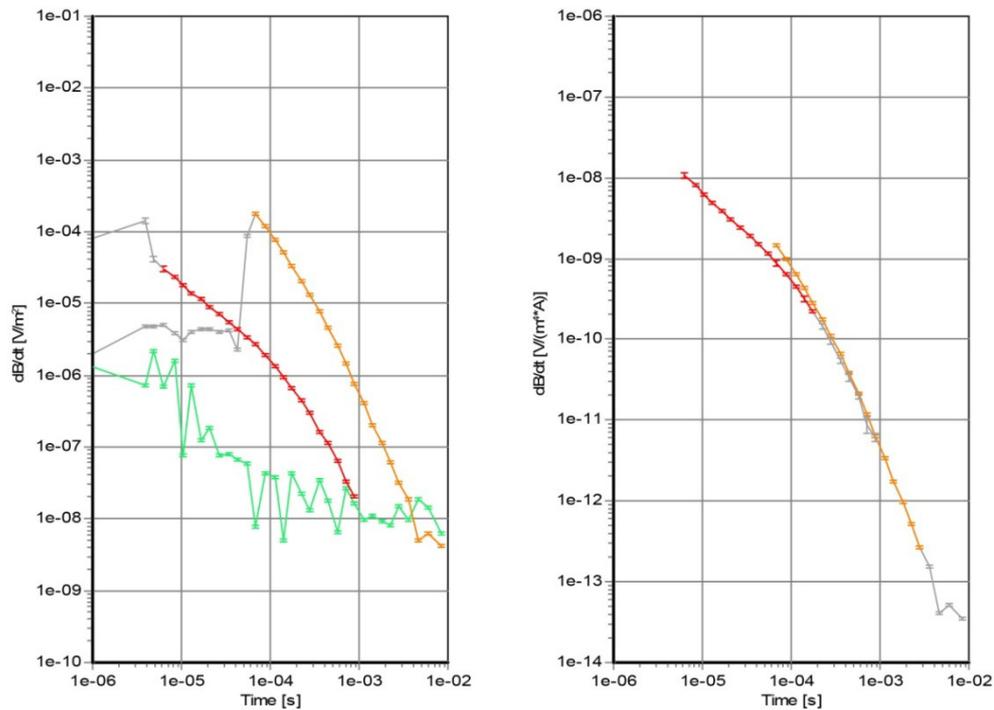


Figure 13 : signal résultant des mesures TDEM (courbes rouge SLM et orange HM) après le traitement des données réalisé par Aarhus Geophysics. Les fenêtres supprimées sont grisées. La courbe verte correspond au niveau de bruit enregistré.

La Figure 14 présente les données TDEM pour une portion de ligne de vol, après le traitement automatique et manuel réalisé par Aarhus Geophysics.

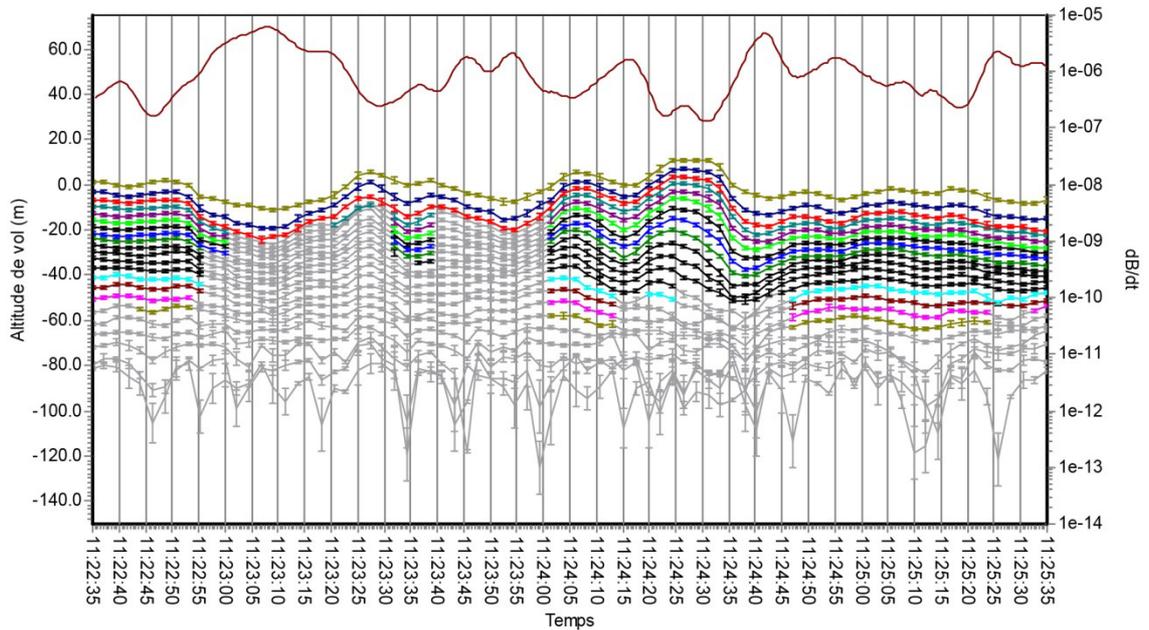


Figure 14 : signal TDEM pour le SLM sur une portion de 3,5 km de ligne de vol et altitude de vol (courbe marron supérieure). La courbe vert kaki représente les valeurs de la 1<sup>ière</sup> fenêtre utilisable du SLM, la courbe bleue les valeurs de la 2<sup>de</sup> fenêtre, etc... Les points gris sont 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 suite au survol d'une zone urbaine.

L'analyse des attributs (variation du champ magnétique) des signaux du champ électromagnétique secondaire permet d'approcher les propriétés physiques du système étudié, notamment la résistivité, par une analyse dite 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 secondaire mesuré. Comme le traitement des données, elle est réalisée avec 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 le logiciel Workbench. L'algorithme utilisé (em1dinv) 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.

Dans ce projet, l'inversion de Aarhus Geophysics a été réalisée à l'aide d'un modèle 25 couches (Figure 15). L'épaisseur des couches augmente de façon logarithmique avec la profondeur. Elle reste inchangée au cours de l'inversion tandis que la résistivité peut varier. La résistivité du modèle de départ est de 30  $\Omega$ .m excepté dans les zones très conductrices (océan par exemple) et très résistives (sud de Basse terre).

Deux inversions ont également été réalisées par le BRGM. Une inversion avec un modèle à 21 couches (Figure 16 a) et une inversion avec un modèle à 7 couches (Figure 16). Un nombre de couches important permet d'obtenir une image lissée des contrastes de résistivité de la sub-surface et est efficace pour imager une géologie complexe. Un nombre de couches réduit permet de caractériser au mieux la résistivité et les épaisseurs des formations mais est plus difficilement applicable à une géologie complexe, l'inversion étant très sensible au modèle de départ.

SCI Inversion Properties

Model | Constraints | Properties

Number of model layers: 25  Auto scale resistivities

Layer	Res	ResAprSTD	Thk	ThkAprSTD	Dep	DepAprSTD
Layer 1	30.0	99.000	2.0	1.001	2.0	99.000
Layer 2	30.0	99.000	2.3	1.001	4.3	99.000
Layer 3	30.0	99.000	2.6	1.001	6.9	99.000
Layer 4	30.0	99.000	2.9	1.001	9.8	99.000
Layer 5	30.0	99.000	3.3	1.001	13.1	99.000
Layer 6	30.0	99.000	3.8	1.001	16.9	99.000
Layer 7	30.0	99.000	4.3	1.001	21.2	99.000
Layer 8	30.0	99.000	4.9	1.001	26.1	99.000
Layer 9	30.0	99.000	5.6	1.001	31.7	99.000
Layer 10	30.0	99.000	6.3	1.001	38.0	99.000
Layer 11	30.0	99.000	7.2	1.001	45.2	99.000
Layer 12	30.0	99.000	8.1	1.001	53.3	99.000
Layer 13	30.0	99.000	9.3	1.001	62.6	99.000
Layer 14	30.0	99.000	10.5	1.001	73.1	99.000
Layer 15	30.0	99.000	12.0	1.001	85.1	99.000
Layer 16	30.0	99.000	13.6	1.001	98.7	99.000
Layer 17	30.0	99.000	15.4	1.001	114.1	99.000
Layer 18	30.0	99.000	17.5	1.001	131.6	99.000
Layer 19	30.0	99.000	19.9	1.001	151.5	99.000
Layer 20	30.0	99.000	22.6	1.001	174.1	99.000
Layer 21	30.0	99.000	25.7	1.001	199.8	99.000
Layer 22	30.0	99.000	29.2	1.001	229.0	99.000
Layer 23	30.0	99.000	33.2	1.001	262.2	99.000
Layer 24	30.0	99.000	37.7	1.001	299.9	99.000
Layer 25	30.0	99.000				

Default Run Close Help

Figure 15 : paramètres géométriques utilisés pour le modèle de départ de l'inversion à 25 couches effectuée par Aarhus Geophysics.

Number of model layers   Auto scale resistivities

	Res	ResApriSTD	Thk	ThkApriSTD	Dep	DepApriSTD
Layer 1	Auto	99.000	2.0	1.001	2.0	99.000
Layer 2	Auto	99.000	2.4	1.001	4.4	99.000
Layer 3	Auto	99.000	2.8	1.001	7.2	99.000
Layer 4	Auto	99.000	3.3	1.001	10.5	99.000
Layer 5	Auto	99.000	3.9	1.001	14.4	99.000
Layer 6	Auto	99.000	4.6	1.001	19.0	99.000
Layer 7	Auto	99.000	5.5	1.001	24.4	99.000
Layer 8	Auto	99.000	6.4	1.001	30.9	99.000
Layer 9	Auto	99.000	7.6	1.001	38.5	99.000
Layer 10	Auto	99.000	9.0	1.001	47.5	99.000
Layer 11	Auto	99.000	10.6	1.001	58.1	99.000
Layer 12	Auto	99.000	12.6	1.001	70.7	99.000
Layer 13	Auto	99.000	14.9	1.001	85.5	99.000
Layer 14	Auto	99.000	17.6	1.001	103.0	99.000
Layer 15	Auto	99.000	20.8	1.001	124.0	99.000
Layer 16	Auto	99.000	24.5	1.001	148.0	99.000
Layer 17	Auto	99.000	29.0	1.001	177.0	99.000
Layer 18	Auto	99.000	34.3	1.001	212.0	99.000
Layer 19	Auto	99.000	40.5	1.001	252.0	99.000
Layer 20	Auto	99.000	47.9	1.001	300.0	99.000
Layer 21	Auto	99.000				

Number of model layers   Auto scale resistivities

	Res	ResApriSTD	Thk	ThkApriSTD	Dep	DepApriSTD
Layer 1	Auto	99.000	10.0	99.000	10.0	99.000
Layer 2	Auto	99.000	15.8	99.000	25.8	99.000
Layer 3	Auto	99.000	24.9	99.000	50.7	99.000
Layer 4	Auto	99.000	39.3	99.000	90.0	99.000
Layer 5	Auto	99.000	62.1	99.000	152.0	99.000
Layer 6	Auto	99.000	97.9	99.000	250.0	99.000
Layer 7	Auto	99.000				

Figure 16 : paramètres géométriques utilisés pour le modèle de départ des inversions à 21 (haut) couches et 7 (bas) couches effectuées par le BRGM.

### Correction de l'effet de boucle

Afin d'améliorer la résolution en sub-surface (0-10m) il est important d'utiliser les données acquises le plus proche de la coupure. Ces données sont bruitées par la réponse de la boucle, il est donc important de caractériser cette dernière. La réponse de la boucle a été déterminée à l'aide des vols de calibration à haute altitude. Elle n'est pas constante sur l'ensemble de la campagne. Par contre lors d'un vol d'acquisition, cette dernière présente des variations faibles et basses fréquence. Les différentes réponses de boucle utilisées pour l'inversion sont montrées sur la Figure 17. La forme d'onde moyenne est utilisée lors de l'inversion qui ajuste localement la réponse mesurée. Ce traitement a permis de récupérer les fenêtres 5 et 6 (c.f. annexe 2).

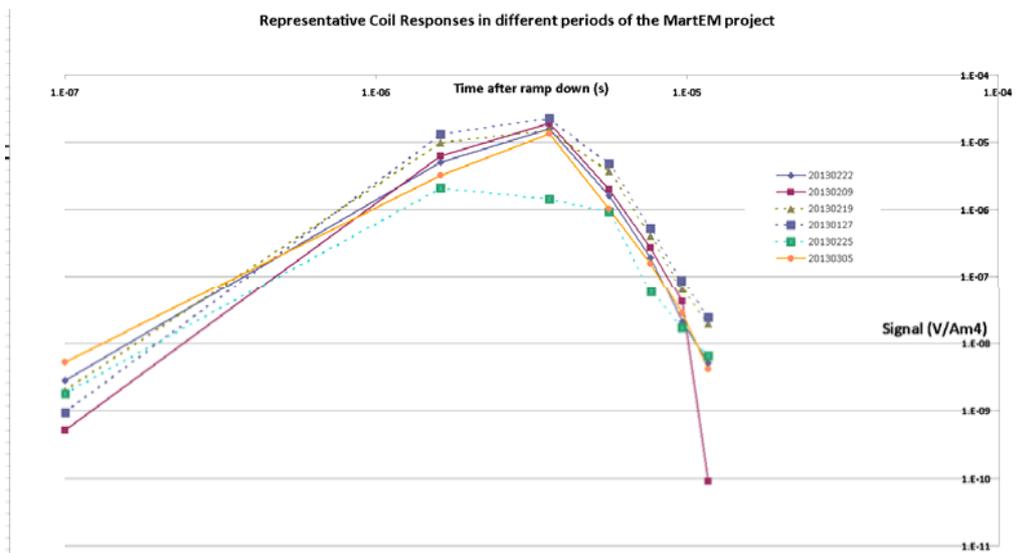


Figure 17 : réponses de la boucle TDEM mesurées pour la campagne réalisée en Martinique.

### Depth of Investigation (DOI)

La profondeur d'investigation (DOI), basée sur l'analyse de la matrice Jacobienne (Christensen et Auken, 2012), a été calculée pour l'ensemble des décroissances. Le DOI représente la profondeur maximale pour lequel le modèle est sensible. Les couches se trouvant en dessous du DOI doivent être ignorées. Cette valeur est définie à l'aide d'un coefficient de sensibilité. Compte tenu de la subjectivité de ce dernier paramètre, deux valeurs de DOI ont été calculées, une optimiste et l'autre plus conservatrice.

#### **b. 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'épaisseur variable en fonction des résultats du modèle a priori (c.f. Figure 16) en fonction de la profondeur et en couche de 5 m en fonction de l'altitude. Chaque couche est ensuite divisée en cellules de 50 m de côté, soient 586 501 cellules par couche ; ces cellules sont caractérisées par une valeur de résistivité calculée par krigeage, à partir des données de sondage TDEM inversées.

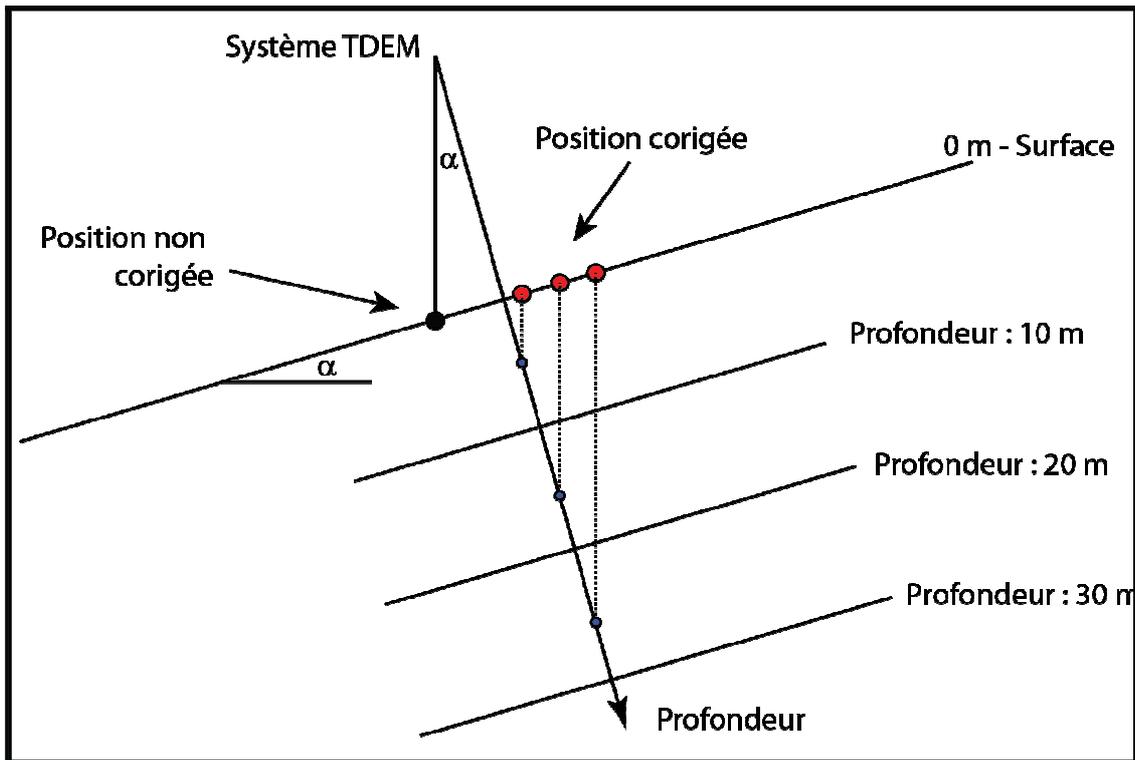


Figure 18 : position x,y non corrigée et corrigée basée sur l'angle de la topographie et sur la position du système (adaptée de HGG Report 201210-01 : Skytem Survey Mayotte Report).

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 18 illustre le principe de cette correction de la position des sondages.

## 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 avec le système DGPS. Les étapes de traitement sont les suivantes :

- Données initiales du MNT obtenues en soustrayant les données lasers filtrées des données DGPS,

- Nivellement statistique conventionnel complet (en incluant les traverses) et micronivellement des données,
- Interpolation en grilles avec un opérateur de courbure minimum au pas de 130 m avec lissage ; les données manquantes ont été interpolées jusqu'à une distance de 750m,
- Filtre passe bas (fenêtre de Hanning) sur la grille.

### **7.3. REPRÉSENTATION**

Les cartes de résistivité sont fournies en Annexe 4

### **7.4. DONNÉES MAGNÉTIQUES**

Le traitement final des données magnétiques implique des traitements traditionnels pour compenser les variations de diurne, le décalage, les effets de cap et le nivellement des lignes de vol. Des filtres de micro-nivellement et des opérateurs d'ordre supérieurs sont ensuite appliqués pour améliorer la qualité des grilles finales.

Les traitements réalisés dans Geosoft sont les suivants :

- traitement des données magnétiques de la station sol,
- édition manuelle des données magnétiques hélicoptées,
- corrections standard pour compenser les variations de diurnes, les effets de cap et de retard,
- correction de l'IGRF :
- nivellement statique des lignes et traverses puis micro-nivellement,
- création des grilles 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 dans une base de données Geosoft quotidiennement.

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

- Retrait manuel des « spikes »,

- Nivellement des données (utilisation de la base mag 1) :
  - o Filtre de type B-spline ( finesse =0.9, tension = 0.9)
- Filtre passe bas de type Fraser (60 sec) pour lisser les données diurnes
- Correction de l'IGRF, les paramètres sont :
  - o Date : variable en fonction de la date des données,
  - o Position : celle de la station de base utilisée
- La moyenne des valeurs corrigées de l'IGRF corrigé (164.83 nT) a été soustraite de toutes les données de diurne

Les données magnétiques résiduelles de la station de base ont été fusionnées avec les données hélicoptères en utilisant l'heure UTC.

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

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

- Ré-échantillonnage des données de 50 Hz à 10 Hz (stack),
- 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 moment faible (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 a été calculé avant de réaliser le nivellement en utilisant les paramètres suivants :

- modèle IGRF de l'année 2010
- Date: variable en fonction de la "date" d'acquisition.
- Position: variable selon le GPS, donnée 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**

Après analyse des données, le nivellement a été réalisé uniquement sur les îles de Grande-Terre et de Marie Galante. La méthode utilisée est la suivante :

- Statistique standard et nivellement complet,
- Toutes les intersections du lever sont utilisées (la moyenne du champ magnétique résiduel est calculée et utilisé comme références)
- Les mauvaises intersections (altitudes trop dissemblables et les intersections où la différence est supérieure à 5 nT sont enlevées

#### **7.4.6. RMF**

Le nivellement est réalisé après l'application des filtres mentionnés ci-dessus pour obtenir le champ magnétique résiduel (RMF).

#### **7.4.7. TMI**

Le champ magnétique total (TMI) est recalculé en additionnant le modèle d'IGRF à une date et à une altitude fixée aux valeurs du champ magnétique résiduel.

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

- modèle d'IGRF: 2010
- Date: 15/02/2013
- Position: fonction des coordonnées GPS
- Altitude: altitude moyenne de 223.5 m

#### 7.4.8. Dérivées du champ magnétique

Les grilles calculées à partir des dérivées du champ magnétique sont fournies dans les livrables. Le champ magnétique total a été soumis à différentes techniques de traitements (Réduction au pôle, dérivées première et seconde du champ vertical, ...).

Toutes les techniques de filtrage spatial ont été réalisées à l'aide du module « Magmap » du logiciel Oasis Montaj. Les filtres sont appliqués dans le domaine de Fourier.

##### ***Réduction au pôle***

La position des anomalies magnétiques par rapport à la source est fonction de l'inclinaison et de la déclinaison du champ magnétique, qui est fonction de la longitude et de la latitude d'acquisition. Pour compenser ce décalage, les données magnétiques sont transformées afin que les anomalies magnétiques apparaissent au droit des sources magnétiques, comme ce serait le cas si l'acquisition avait été faite au pôle nord magnétique. Cette transformation est réalisée à l'aide d'un opérateur de «réduction au pôle magnétique » (RTP) dans le domaine de Fourier. La réduction au pôle est calculée à partir de la grille TMI en utilisant les paramètres magnétiques du centre de la zone survolée (Tableau 11).

	<i>Martinique</i>
Inclinaison magnétique	36.85
Déclinaison magnétique	-14.88

Tableau 11 : caractéristique du champ magnétique au centre de la zone étudiée.

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

La dérivée verticale du champ magnétique indique le taux de variation du champ magnétique en fonction de la hauteur. Elle a pour effet d'améliorer la localisation spatiale des axes des sources et des contacts.

Cette variable a été calculée en utilisant le module Magmap de Geosoft en utilisant la grille RMF. Un filtre Butterworth additionnel avec une longueur d'onde de 600 m a été appliqué sur la grille RMF pour lisser les données avant le calcul.

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

Pour améliorer la localisation des anomalies locales sur la carte et pour aider à visualiser les bords des corps anormaux à partir des données, la dérivée seconde verticale (2VD) a été calculée. Elle permet d'aider à délimiter les corps et de localiser avec précision les changements du gradient du champ magnétique. Il en résulte une meilleure définition des discontinuités et leur rapport avec les corps géologique est

rendu plus net. La grille 2VD est calculée à partir de la grille réduite au pôle en utilisant des procédures standard proposées dans le module Magmap du logiciel Geosoft.

### ***Signal analytique***

Le signal analytique (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 est utile pour l'interprétation car il ne dépend ni de la direction ni du type de l'aimantation induite ou rémanente. En conséquence, les anomalies AS sont toujours localisées à l'aplomb des corps magnétiques. La grille AS est calculée à partir de la grille RMF en utilisant des procédures standard proposées dans le module Magmap du logiciel Geosoft.

Un filtre Butterworth additionnel avec une longueur d'onde de 600 m a été appliqué sur la grille RMF pour lisser les données avant le calcul.

### ***Inclinaison de la dérivée***

L'inclinaison de la dérivée (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 réduit :

$$- \text{VDR} = dT/dz$$

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

Le TiltD est utile pour cartographier les structures du sous-sol peu profondes.

La grille TiltD est calculée à partir de la grille RMF en utilisant des procédures standard proposées dans le module Magmap du logiciel Geosoft.

Un filtre Butterworth additionnel avec une longueur d'onde de 600 m a été appliqué sur la grille RMF pour lisser les données avant le calcul.

## **7.5. REPRÉSENTATION**

La carte de l'anomalie magnétique réduite au pôle est fournie dans l'annexe 5.

## **7.6. VALORISATION PRÉLIMINAIRE DES DONNÉES MARTEM :**

En parallèle de la phase de traitement explicitée dans ce rapport et permettant d'obtenir un jeu de données propre, les données MarTEM ont également été utilisées

en tant que support dans différents projets portant sur des thématiques variées. Les principales études ont été les suivantes :

- En géothermie, les données MarTEM ont été utilisées afin de mieux appréhender la géologie de subsurface au niveau des Anses d'Arlet, de la montagne Pelée, des monts du Carbet et du Lamentin.
- En hydrogéologie, les données MarTEM ont servi
  - o à la caractérisation du Bassin versant du Galion dans le but de préparer la mise en place d'un observatoire de la qualité des eaux.
  - o à l'imagerie du biseau salé.
  - o à répondre à une demande d'implantation de forages d'eau dans un champ de canne à sucre.
  - o à caractériser le secteur de Pécoul (Saint-Pierre) pour le déplacement de forages d'eau existants dans une zone favorable.
- En risques naturels, les données MarTEM ont permis d'imager l'extension horizontale et verticale d'une couche susceptible de glisser (Nationale N1, Morne Figue)

Les rapports sont en cours de finalisation ou d'écriture. Les données MarTEM sont également utilisées dans le cadre du projet MarVal (projet interne BRGM) pour la revalorisation des données géophysiques acquises en Martinique.

## 8. Produits finaux

### 8.1. FICHER EM XYZ

Les fichiers XYZ résultants de l'étude Skytem et contenant les données EM et les informations pour l'interprétation et l'inversion ont été fournis. Ces fichiers peuvent être utilisés comme entrée pour un programme d'inversion.

Les mesures et les positions de tous les appareils sont prises en compte lors de la production du fichier XYZ. Le système de projection utilisé dans les fichiers XYZ est UTM20N WGS84. La localisation originale Lat/Long WGS84 est aussi incluse.

<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.sl
ALT	Mesure de hauteur filtrée	m
InvALT	Altitude inversée	m
InvALTSTD	Ecart 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 associé aux résultats	
RHO_i_X	Résistivité de la i ème couche	Ohm.m
RHO_i_STD_X	Ecart 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	Ecart type sur l'épaisseur de la i ème couche	M
DEP_TOP_STD_i	Ecart type sur la profondeur du haut de la couche	M
DEP_BOT_STD_i	Ecart type sur la profondeur du haut de la couche	M
DOI_LOWER	Profondeur d'investigation maximale	
DOI_UPPER	Profondeur d'investigation minimale	M

Tableau 12 : Description des champs fournis dans les fichiers EM XYZ.

Les fichiers fournis sont ceux de l'inversion 25 couches, 21 couches et 7 couches.

## **8.2. FICHIER MAGNÉTIQUE XYZ**

Les fichiers XYZ résultant du lever magnétique, contenant les données brutes, et traitées, ainsi que les informations pour l'interprétation et la mise en grille sont fournis. Le système de projection utilisé est le système UTM 20N WGS84. Chacune des données à une position est numérotée par un nombre fiducial unique.

L'entête du fichier magnétique XYZ est récapitulé sur le Tableau 13.

L'entête du fichier magnétique XYZ est récapitulé sur le Tableau 13. 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 Fiducial unique	-
Line	Numéro de ligne unique	LLLLLS
Flight	Nom du vol	yyyymmdd.ff
DateTime	Format de la date	Decimal days
Date	Date UTC	yyyymmdd
Time	Temps UTC	hhmmss.zzz
AngleX	Angle dans la direction de vol	Degré
AngleY	Angle perpendiculaire à la direction de vol	Degré
Height	Mesure de hauteur filtrée	m
DEM	Modèle numérique de terrain	m.a.sl
Lat	Latitude (WGS84)	Degrés décimaux
Lon	Longitude (WGS84)	Degrés décimaux
N_UTMz20	Nord en UTM 20N WGS84	m
E_UTMz20	Est en UTM 20N WGS84	m
Alt	Altitude DGPS (Datum WGS84)	m
GdSpeed	Vitesse au sol	m/s
Curr_1	Courant du moment fort	A
Curr_2	Courant du moment faible	A
LM_Z_G7[xx]	LM-Z normalisée et corrigée de la réponse de la boucle. Les 6 premiers canaux sont nuls	pV/(m4*A)
HM_Z_G18[xx]	HM-Z normalisée et corrigée de la réponse de la boucle. Les 17 premiers canaux sont nuls	pV/(m4*A)
LM_X_G7[xx]	LM-X normalisée et corrigée de la réponse de la boucle. Les 6 premiers canaux sont nuls	pV/(m4*A)
HM_X_G18[xx]	HM-X normalisée et corrigée de la réponse de la boucle. Les 17 premiers canaux sont nuls	pV/(m4*A)
PowerlineIntensity	Amplitude de la densité spectrale du bruit des lignes électriques	
IGRF_air	IGRF calculé – Champ magnétique total (modèle 2010)	nT
Bmag_raw	Champ magnétique total brute (station de base)	nT
Diurnal	Correction de la diurne filtrée	nT
Mag_raw	Champ magnétique total retiré des spikes	nT
Mag_fil	Données magnétiques hélicoptères filtrées	nT
Mag_cor	Champ magnétique résiduel traité	nT
RMF	Modèle résiduelle du champ magnétique (IGRF a été enlevé) – données finals corrigées et nivelées	nT
TMI	Champ magnétique total	nT

Tableau 13 : caractéristiques des champs fournis dans les fichiers magnétiques XYZ

### 8.3. GRILLES

L'ensemble des grilles mag ont été interpolées à l'aide d'un opérateur à courbure minimale au pas de 100 mètres. Les grilles fournies sont récapitulées dans le Tableau 14 et les grilles EM ont été interpolées à l'aide d'un interpolateur de type krigeage.

<i>Nom de la grille</i>	<i>Variable</i>
DEM	Modèle numérique de terrain
MTQ_Alt_25_Z1 à Z2	Résistivité pour des altitudes variant de Z1 à Z2 pour l'inversion 25 couches (Aarhus Geophysics)
MTQ_Depth_25_Z1 à Z2	Résistivité pour les profondeurs variant de Z1 à Z2 pour l'inversion 25 couches (Aarhus Geophysics)
MTQ_Alt_21_Z1 à Z2	Résistivité pour des altitudes variant de Z1 à Z2 pour l'inversion 21 couches (BRGM)
MTQ_Depth_21_Z1 à Z2	Epaisseur pour les profondeurs variant de Z1 à Z2 pour l'inversion 210 couches (BRGM)
MTQ_res_7_i	Résistivité de la i ème couche pour l'inversion 7 couches (BRGM)
MTQ_depth_7_i	Epaisseur de la i ème couche pour l'inversion 7 couches (BRGM)
MTQ_TMI_m_UTMz20N	Champ magnétique total
MTQ_RMF_m3_UTMz20N	Champ magnétique résiduel
MTQ_RTP_NoACI_m3_UTMz20N	Champ magnétique résiduel réduit au pôle
MTQ_TDR_m5_UTMz20N	Incliné de la dérivée
MTQ_AS_m5_UTMz20N	Signal analytique
MTQ_1VD_m5_UTMz20N	Dérivé verticale première du champ magnétique total
MTQ_2VD_m5_UTMz20N	Dérivé verticale seconde du champ magnétique total

Tableau 14 : récapitulatif des grilles produites.

### 8.4. FICHER 3D AU FORMAT VTK

L'ensemble des données résultant de l'inversion du TDEM est également restitué au format Visualization Tool Kit (VTK). Ce format de données peut être lu par de nombreux logiciels, dont Paraview. ParaView est une application multi-plateforme pour la visualisation des données en 2 et 3 dimensions, distribuée sous forme de logiciel libre (BSD-2). ParaView est conçu pour pouvoir être exécuté aussi bien sur des machines mono-processeur que sur des plateformes parallèles de grande taille, et a été testé avec succès sous Linux, Windows, Mac OS X, IBM Blue Gene, Cray XT3 et divers autres systèmes UNIX, en série et en parallèle.

Les données resituées en 3 dimensions au format VTK sont les suivantes :

- Modèles de résistivité 1D obtenus le long des lignes de vols ;
- Modèle de résistivité 3D interpolé au pas de 50m en x et y et 5 m de 0 à 20m de profondeur, 10 m de 20 à 100 m de profondeur et 20 m de 100 à 280m de profondeur. Les différents attributs de chaque cellule sont :
  - o Alt : Altitude moyenne,
  - o Pro : Profondeur moyenne sous la topographie,
  - o Res : Résistivité,
  - o Gra\_Res : Gradient de résistivité

- Nom de la grille 3D	Variable
Alt_25_X1_X2_Y1_Y2	Grille interpolée en fonction de l'altitude variant de X1 à X2 et de Y1 à Y2
Depth_25_X1_X2_Y1_Y2	Grille interpolée en fonction de la profondeur variant de X1 à X2 et de Y1 à Y2
Alt_20_X1_X2_Y1_Y2	Grille interpolée en fonction de l'altitude variant de X1 à X2 et de Y1 à Y2
Depth_20_X1_X2_Y1_Y2	Grille interpolée en fonction de la profondeur variant de X1 à X2 et de Y1 à Y2
Alt_5_X1_X2_Y1_Y2	Grille interpolée en fonction de l'altitude variant de X1 à X2 et de Y1 à Y2
Depth_5_X1_X2_Y1_Y2	Grille interpolée en fonction de la profondeur variant de X1 à X2 et de Y1 à Y2

Tableau 15 : récapitulatif des grilles produites.

## 8.5. ORGANISATION DES DONNÉES

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

<i>Dossier des données</i>	<i>Dossier</i>	<i>Sous dossier</i>	<i>Format de fichier</i>	<i>Commentaires</i>
01_TEM_data	01_Grille		Surfer grids	Grille de résistivité au format surfer
	02_Sondages		Fichier ascii	Ensemble des sondages TDEM inversés
	03_Cartes		Fichier PDF	Représentation des données EM
	04_3DVTK	01_Sondage	Fichier VTK	Ensemble des sondages TDEM au format VTK
		02_Grille3D	Fichier VTK	Ensemble des grilles 3D au format VTK
		03_SIG3D	Fichier VTK	Couche SIG au format VTK
02_MAG_data	01_BaseVol		Fichier ascii	Données magnétiques brutes et traitées
	02_Grids		Surfer.grd	Grille du champ magnétique : TMI, RMF and derivatives
03_Rapport			.pdf	Rapport d'acquisition
04_MISC	DEM		Grd	MNT calculé à partir du lever

Tableau 16 : organisation des fichiers de données.

## 9. Conclusions

Au travers de l'action MartEM et par l'intermédiaire du BRGM, la Région Martinique, le FEDER, la DEAL Martinique et l'Office de l'eau de la Martinique ont conduit une campagne de géophysique hélicoptérée en électromagnétisme et magnétisme haute résolution de la Martinique. Cette campagne haute résolution a permis d'apporter au territoire une infrastructure de données géophysique moderne permettant d'aborder les différentes dimensions de la ressource naturelle et de l'aménagement du territoire, au service des besoins de la société.

L'acquisition s'est déroulée du 29 janvier au 16 mars 2013 et consistait à acquérir les données suivant un plan de vol régulier dans un premier temps puis à densifier l'acquisition sur des zones de resserrement dans un second temps.

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 subsurface avec une résolution accrue, et le moment fort pour sonder plus en profondeur mais avec une résolution moins importante.

Les mesures d'électromagnétisme et de magnétisme ont été acquises le long de lignes de vol orientées N-S. Elles sont espacées de 400 m et resserrées de 100 à 200 m sur 31% de ce tracé. Des lignes de contrôle orientées perpendiculairement ont été acquises tous les 4000 m. Au final la couverture réalisée comprend 3730,7 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.

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 EM pour restituer des grilles de résistivités et les modèles de résistivités en trois dimensions sur l'ensemble de la Martinique

Les données magnétiques ont été traitées à l'aide du logiciel Oasis Montaj de Geosoft pour calculer 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.



## **Annexe 1**

### **Calibration du système EM**



Les formes d'ondes ont été mesurées à la fréquence de répétition de 25 Hz (HM) et 110 A et 225 Hz (SLM) et 10 A. Les figures ci-dessous montrent les rampes montantes et descendantes normalisées respectivement pour les moments forts et faibles. Le Tableau 17 récapitule les valeurs de la courbe pour le moment faible. Le Tableau 18 récapitule les valeurs de la courbe pour le moment fort.

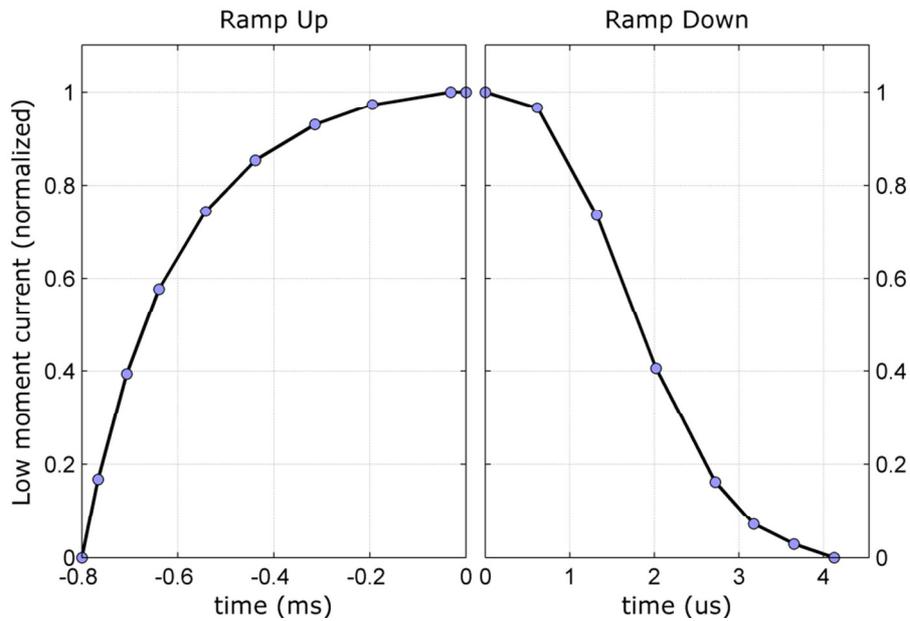


Figure 19 : rampe montante et descendante à 225 Hz.

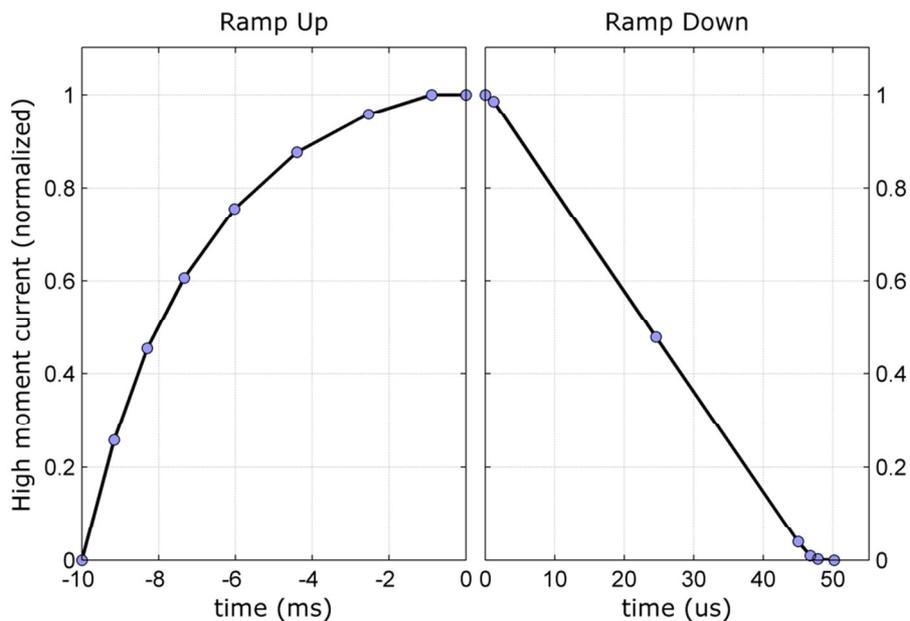


Figure 20 : rampe montante et descendante à 25 Hz.

<i>Temps</i>	<i>Courant normalisé</i>
-8.00000E-004	0.00000E+000
-7.66303E-004	1.67810E-001
-7.06537E-004	3.94234E-001
-6.39299E-004	5.77299E-001
-5.42178E-004	7.44307E-001
-4.38521E-004	8.53504E-001
-3.14318E-004	9.28978E-001
-1.94785E-004	9.72336E-001
-3.13604E-005	1.00000E+000
0.00000E+000	1.00000E+000
6.15495E-007	9.65511E-001
1.31744E-006	7.35584E-001
2.01939E-006	4.06022E-001
2.72133E-006	1.62299E-001
3.17553E-006	7.18613E-002
3.65038E-006	2.89416E-002
4.12522E-006	0.00000E+000

Tableau 17 : courant normalisé pour le moment faible.

<i>Time [s]</i>	<i>Courant normalisé</i>
-1.00000E-002	0.00000E+000
-9.16051E-003	2.57737E-001
-8.29518E-003	4.53650E-001
-7.33629E-003	6.06204E-001
-6.02659E-003	7.55547E-001
-4.40116E-003	8.75985E-001
-2.53017E-003	9.57883E-001
-8.93046E-004	1.00000E+000
0.00000E+000	1.00000E+000
1.19964E-006	9.85435E-001
2.45591E-005	4.77966E-001
4.50228E-005	3.94877E-002
4.67733E-005	9.28947E-003
4.78462E-005	2.39639E-003
5.01915E-005	0.00000E+000

Tableau 18 : courant normalisé pour le moment fort.

L'équipement complet a été calibré sur le site de référence Danois. La Figure 21 montre les résultats des mesures ainsi que les réponses attendues pour les altitudes de 11, 61, 21, 26 et 30 mètre.

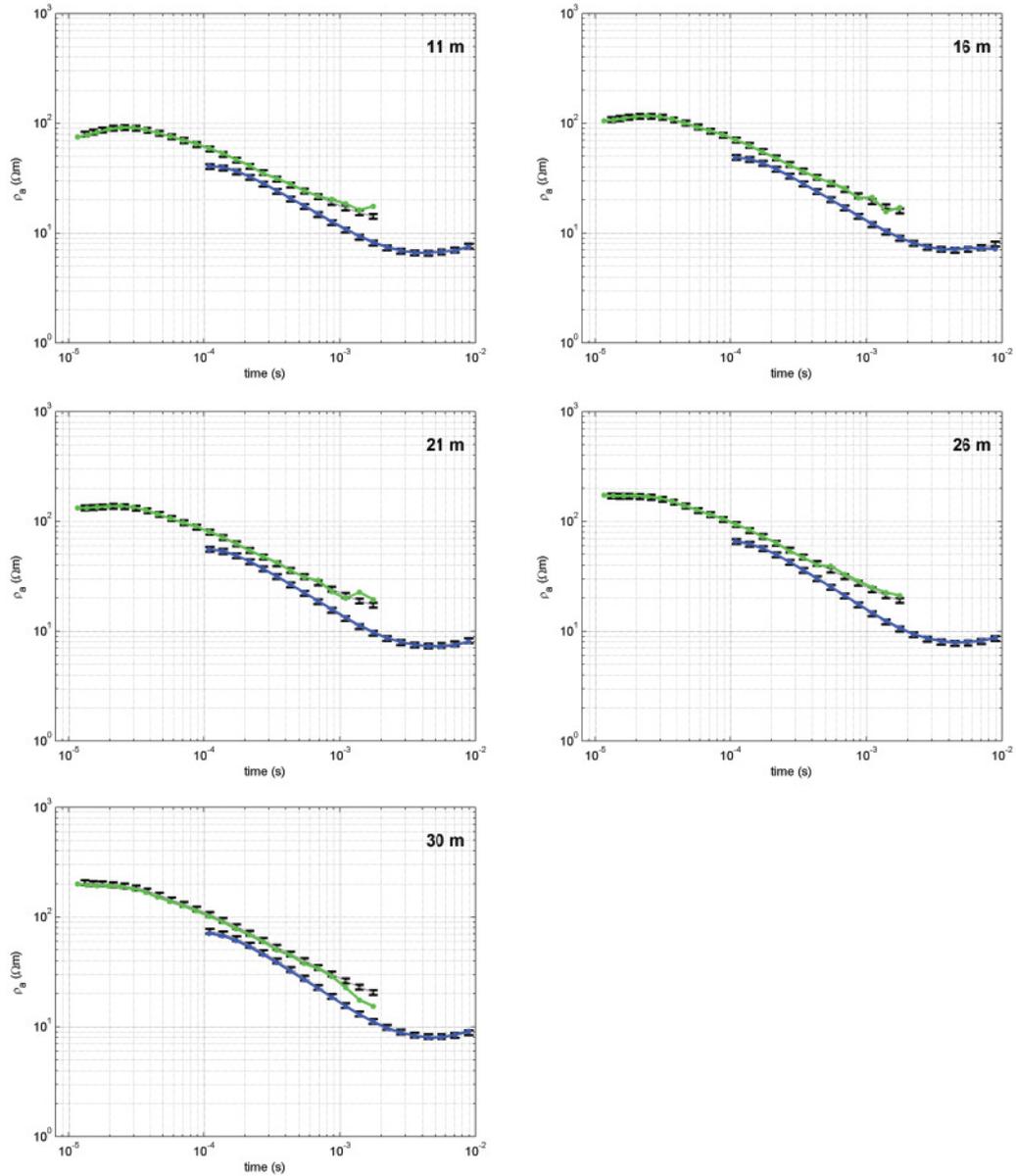


Figure 21 : résultats du test de calibration pour une altitude de 11 (a), 16 (b), 21 (c), 26 (d) et 30 m (e). La courbe en noir est la réponse attendue, les courbes en vert et bleu sont les réponses enregistrées pour le moment faible et le moment fort respectivement.



*Le dispositif au sol*



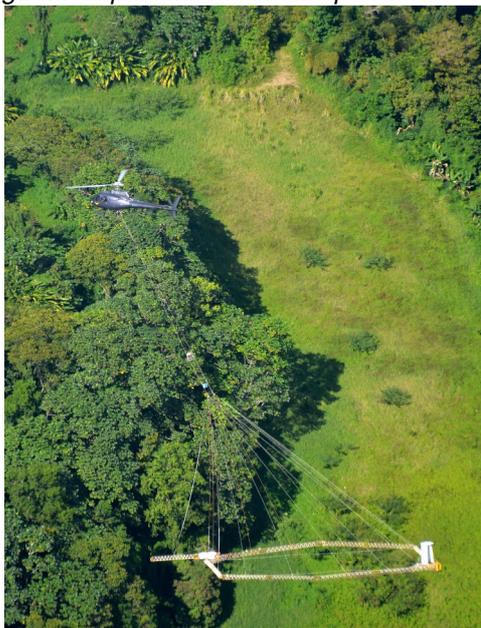
*Aménagement de l'hélicoptère pour le suivi*



*Arrimage du dispositif sous l'hélicoptère*



*Décollage du dispositif*



*Exemples de vols d'acquisition*

## **Annexe 2**

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



<b>Fenêtre</b>	<b>Ouverture (<math>\mu</math>s)</b>	<b>Centre (<math>\mu</math>s)</b>	<b>Longueur (<math>\mu</math>s)</b>	<b>fermeture (<math>\mu</math>s)</b>	<b>Commentaire</b>
1	0.43	1.215	1.57	2	Pas utilisée
2	2.43	3.215	1.57	4	Pas utilisée
3	4.43	5.215	1.57	6	Pas utilisée
4	6.43	7.215	1.57	8	Pas utilisée
5	8.43	9.215	1.57	10	Correction
6	10.43	11.215	1.57	12	Correction
7	12.43	13.215	1.57	14	LM seulement
8	14.43	15.215	1.57	16	LM seulement
9	16.43	17.715	2.57	19	LM seulement
10	19.43	21.215	3.57	23	LM seulement
11	23.43	25.715	4.57	28	LM seulement
12	28.43	31.215	5.57	34	LM seulement
13	34.43	38.215	7.57	42	LM seulement
14	42.43	47.215	9.57	52	LM seulement
15	52.43	58.215	11.57	64	LM seulement
16	64.43	71.715	14.57	79	LM seulement
17	79.43	88.715	18.57	98	LM+HM
18	98.43	110.715	24.57	123	LM+HM
19	123.43	138.715	30.57	154	LM+HM
20	154.43	173.715	38.57	193	LM+HM
21	193.43	217.715	48.57	242	LM+HM
22	242.43	273.215	61.57	304	LM+HM
23	304.43	343.715	78.57	383	LM+HM
24	383.43	433.215	99.57	483	LM+HM
25	483.43	546.215	125.57	609	LM+HM
26	609.43	688.715	158.57	768	LM+HM
27	768.43	868.715	200.57	969	LM+HM
28	969.43	1096.215	253.57	1223	LM+HM
29	1223.43	1383.715	320.57	1544	HM seulement
30	1544.43	1746.715	404.57	1949	HM seulement
31	1949.43	2204.715	510.57	2460	HM seulement
32	2460.43	2783.215	645.57	3106	HM seulement
33	3106.43	3514.215	815.57	3922	HM seulement
34	3922.43	4437.715	1030.57	4953	HM seulement
35	4953.43	5604.215	1301.57	6255	HM seulement
36	6255.43	7077.215	1643.57	7899	HM seulement
37	7899.43	8937.715	2076.57	9976	HM seulement

Tableau 19 : Caractéristiques temporelles des fenêtres de mesure



## **Annexe 3**

# **Calendrier des opérations**

<i>Vol</i>	<i>Temp. (C)</i>	<i>Vent (m/s)</i>	<i>Visibilit é</i>	<i>Description</i>
20130126.01	28	E - 6m/s	good	Scattered clouds, with few rain
20130126.02	28	E - 6m/s	good	Scattered clouds, with few rain
20130126.03	28	E - 6m/s	good	Scattered clouds, with few rain
20130126.04	28	E - 6m/s	good	Scattered clouds, with few rain
20130127.01	30	E - 6m/s	fair to low	Scattered clouds, with heavy rain
20130127.02	30	E - 6m/s	fair to low	Scattered clouds, with heavy rain
20120128.01	28	E - 8m/s	good	Scattered clouds, with heavy rain
20120129.01	28	E - 6m/s	fair to low	Scattered clouds, with heavy rain
20120129.02	28	E - 6m/s	fair to low	Scattered clouds, with heavy rain
20130130.01	30	E - 6m/s	good	Sunny, with few clouds
20130130.02	30	E - 6m/s	good	Sunny, with few clouds
20130130.03	30	E - 6m/s	good	Sunny, with few clouds
20130201.01	30	E - 6m/s	good	Sunny, with few clouds
20130201.02	30	E - 6m/s	good	Sunny, with few clouds
20130202.01	27	E - 8-10m/s	fair	Showers before take-off and in the
20130202.02	30	E - 8-10m/s	good	Sunny, with few clouds
20130203.01	27	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130203.02	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130204.01	30	E - 6-8m/s	good	Rain early in the morning. Cloudy and
20130204.02	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130205.01	28	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130205.02	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130206.01	28	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130206.02	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130207.01	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130207.02	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130208.01	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130208.02	30	E - 6-8m/s	good	Cloudy
20130208.03	27	E - 6-8m/s	ok	Light rain
20130209.01	26	E - 6-8m/s	ok	Cloudy, some sun
20130209.02	28	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130210.01	27	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130210.02	29	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130211.01	28	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130211.02	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130219.01	28	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130219.02	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130220.01	29	E - 10- 12 m/s	good	Sunny, with few clouds
20130220.02	29	E - 10 -12m/s	good	Sunny, with few clouds
20130221.01	28	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130221.02	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130221.03	28	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130222.01	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130222.02	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130222.03	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130222.04	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130222.05	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130222.06	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130222.07	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130223.01	30	E - 7-9m/s	good	Sunny, with few clouds
20130223.02	30	E - 7-9m/s	good	Sunny, with few clouds

20130224.01	28	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130224.02	30	E - 7-9m/s	good	Sunny, with few clouds
20130225.01	30	E - 7-9m/s	good	Sunny, with few clouds
20130225.02	30	E - 7-9m/s	good	Sunny, with few clouds
20130227.01	30	E - 9-11m/s	good	Sunny, with few clouds
20130227.02	30	E - 9-11m/s	good	Sunny, with few clouds
20130228.01	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130228.02	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130301.01	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130303.01	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130303.02	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130304.01	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130304.02	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130305.01	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130305.02	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130306.01	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130306.02	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130306.03	30	E - 6-8m/s	good	Sunny, with few clouds
20130126.01	28	E - 6m/s	good	Scattered clouds, with few rain
20130126.02	28	E - 6m/s	good	Scattered clouds, with few rain
20130126.03	28	E - 6m/s	good	Scattered clouds, with few rain
20130126.04	28	E - 6m/s	good	Scattered clouds, with few rain
20130126.01	28	E - 6m/s	good	Scattered clouds, with few rain
20130126.02	28	E - 6m/s	good	Scattered clouds, with few rain
20130126.03	28	E - 6m/s	good	Scattered clouds, with few rain

Tableau 20 : rapport pour chaque vol

<b>Vol</b>	<b>Commentaire</b>
20130126.01	0-pos
20130126.02	0-pos
20130126.03	0-pos
20130126.04	0-pos
20120127.01	High Alt test
20120127.02	High Alt test
20120128.01	Production – Current drops. Lines reflow
20120129.01	Changed Generator. Still current issues. No Production
20120129.02	Production. Special script with 60 HM pulses pr cycle
20130130.01	Test flight with Noise. Flight abandoned
20130130.02	Test with noise settings changed. No
20130130.03	Production. 60 HM pulses pr. Cycle, CLOVERTEST flown
20130201.01	Production flight. One restart during flight
20130201.02	Production flight
20130202.01	Production flight. One restart during flight in the same spot as the previous restart. Something on the ground must trigger it...
20130202.02	Production MANY HOUSES!
20130203.01	Production flight. Many lines cut due to flying over airport.
20130203.02	Production flight.
20130204.01	Production flight.
20130204.02	Production flight.
20130205.01	Production flight.
20130205.02	Production flight. Current drops - probably due to rain
20130206.01	Production flight. Current dropouts from 20130205.02 have been reflow
20130206.02	Production flight
20130207.01	Production flight
20130207.02	High Altitude test
20130208.01	High Altitude test
20130208.02	Calibration flight
20130208.03	Calibration flight. Light rain upon arrival.
20130209.01	High Altitude test
20130209.02	Production flight
20130210.01	Production flight
20130210.02	Production flight
20130211.01	Production flight
20130211.02	Production flight. Power line accident. No reference line flown
20130219.01	Calibration flight
20130219.02	High Altitude test
20130220.01	Production flight
20130220.02	Production flight
20130221.01	Production flight
20130221.02	Calibration flight
20130221.03	Calibration flight. Ski changed on the system
20130222.01	Calibration flight
20130222.02	Calibration flight
20130222.03	Calibration flight
20130222.04	Calibration flight
20130222.05	Calibration flight
20130222.06	High Altitude test
20130222.07	Production flight
20130223.01	Production flight
20130223.02	Production flight
20130224.01	Production flight
20130224.02	Production flight
20130225.01	Production flight.
20130225.02	Production flight

20130227.01	Production flight
20130227.02	Production flight
20130228.01	Production flight. Infill lines - Filmed by media
20130228.02	Production flight. Infill lines
20130301.01	Production flight
20130303.01	Production flight
20130303.02	Production flight
20130304.01	Production flight
20130304.02	Production flight
20130305.01	Production flight
20130305.02	Production flight
20130306.01	Production flight
20130306.02	Prod, survey complete
20130306.03	High Alt (script changed in hover)
20130126.01	0-pos
20130126.02	0-pos
20130126.03	0-pos
20130126.04	0-pos
20120127.01	High Alt test
20120127.02	High Alt test
20120128.01	Production - Current drops. Lines reflow
20120129.01	Changed Generator. Still current issues. No Production

Tableau 21 : carnet de vol.



## **Annexe 4**

# **Représentation des données EM**



















**Centre scientifique et technique  
Service DGR**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34