



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Traitement et inversion des données électromagnétiques héliportées acquises au cours des levés Eaux-SCARS et ECORSE 82

Rapport final

BRGM/RP-72248-FR

Version 1 du 3 novembre 2022

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche et développement

Reninger P.A., Raingeard A.

Vérificateur :

Nom : Frédéric Dubois

Fonction : Ingénieur géophysicien

Date : 04/11/2022

Signature :

Approbateur :

Nom : Nicolas Pédrón

Fonction : Directeur régional NVA

Date : 21/12/2022

Signature :

Le Directeur Régional
du BRGM Nouvelle-Aquitaine

Nicolas PÉDRON

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

Contact : qualite@brgm.fr



RÉGION
**Nouvelle-
Aquitaine**



eau
GRAND SUD-OUEST
AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE



**Dordogne
PÉRIGORD**
LE DÉPARTEMENT dordogne.fr

LOT-ET-GARONNE
Le Département

LOT
LE DÉPARTEMENT

CHARENTE
LE DÉPARTEMENT

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : Géophysique, Electromagnétisme, Aéroporté, Nouvelle-Aquitaine, Occitanie

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

Reninger P.A., Raingeard A. (2022) - Traitement et inversion des données électromagnétiques héliportées acquises au cours des levés Eaux-SCARS et ECORSE 82. Rapport final V1. BRGM/RP-72248-FR, 85 p.

Sommaire

1. Contexte et objectifs	5
2. L'électromagnétisme	9
3. Les levés des projets Eaux-SCARS et ECORSE 82.....	11
3.1. ACQUISITION.....	11
3.2. EQUIPEMENT GEOPHYSIQUE	12
4. Traitement et inversion des données électromagnétiques	15
4.1. TRAITEMENT DES DONNEES	15
4.1.1. <i>Traitement de la donnée de navigation</i>	15
4.1.2. <i>Traitement de la donnée EM</i>	15
4.2. INVERSION DES DONNEES.....	18
4.2.1. <i>Inversion réalisée</i>	18
4.2.2. <i>Discussion autour des résultats d'inversion</i>	20
4.3. LIVRABLES	23
5. Bibliographie	25
6. Annexe.....	27

Illustrations

Illustration 1 - Situation de la zone d'étude Eaux-SCARS sur la carte géologique au 1:1 000 000 et coupe géologique NE-SW individualisant les principaux aquifères	6
Illustration 2 - Principe de mesure de l'électromagnétisme aéroporté	9
Illustration 3 - Trace de l'hélicoptère (en noir) pour chacun des vols réalisés	11
Illustration 4 - Présentation d'un système « SkyTEM ».....	13
Illustration 5 - Carte de poids d'une composante de bruit caractérisée par SVD (Les lignes électriques géoréférencées -parfois peu précises et incomplètes- apparaissent en noir et les lignes de vol, en tiretés gris)	16
Illustration 6 - Illustration du stack adaptatif le long d'une ligne de vol (a) : les données identifiées comme étant biaisées par la présence d'installations au sol (en noir) ne sont pas prises en compte ; deux mesures EM sont présentées en (b) et (c) ; les données brutes et moyennées apparaissent respectivement en bleu et en rouge	17
Illustration 7 - Eléments de contrôle utilisés pour évaluer et retirer les données EM bruitées	18
Illustration 8 - Schéma de principe des relations entre les modèles EM lors de l'inversion de type SCI : les contraintes s'exercent entre modèles proches, le long des lignes de vol, mais aussi d'une ligne à l'autre	19
Illustration 9 - Profil de résistivité obtenu après traitement et inversion par le BRGM.....	20

1. Contexte et objectifs

Le BRGM, établissement public de référence dans le domaine du sol et du sous-sol, accompagne, depuis plus de 20 ans, les Départements de la Dordogne, du Lot-et-Garonne, du Lot, du Tarn-et-Garonne et de la Charente dans les actions fortes qu'ils entreprennent afin d'améliorer la connaissance des eaux souterraines et ainsi pérenniser les usages (eau potable, agriculture, industrie, thermalisme) et préserver les milieux naturels.

Ces départements se situent sur les bordures est et nord-est du Bassin aquitain, dans lesquelles l'agencement des formations géologiques traduit un comblement progressif sur le socle continental (affleurant plus à l'est dans le Massif Central) par des formations sédimentaires, depuis le Trias jusqu'au Quaternaire, avec des épaisseurs pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres. Du fait des alternances dans les natures des formations déposées, le sous-sol de ces territoires est constitué d'un multicouche d'aquifères, plus ou moins individualisés selon les secteurs, et dont les principaux réservoirs sont hérités des deux vastes transgressions marines qui se sont produites au Jurassique et au Crétacé.

Ces aquifères sont le siège de systèmes karstiques à la fois à l'affleurement et sous couverture, qui se développent au sein des roches solubles, ici principalement des carbonates (calcaire, dolomie et craie). Les structures et fonctionnements propres au karst peuvent engendrer des transferts rapides d'eaux de surface (pluies, cours d'eau) vers l'aquifère, rendant difficile la gestion des ressources en eau, qui sont alors soumises à une forte variabilité temporelle des débits et des signatures chimiques et à une vulnérabilité accrue des ressources vis-à-vis des pollutions.

Ces formations carbonatées et les ressources en eau qu'elles renferment contribuent au patrimoine naturel et économique de ces territoires à plusieurs niveaux. Il s'agit en premier lieu de réservoirs stratégiques pour satisfaire les besoins en eau, notamment pour l'agriculture et l'alimentation en eau potable (AEP). En outre, lorsqu'elles se trouvent à l'affleurement, les nappes qu'elles contiennent se retrouvent en lien étroit avec les milieux superficiels (zones humides et cours d'eau) qu'elles alimentent notamment par l'intermédiaire de sources ou de sorties diffuses : elles participent par là même au maintien des écosystèmes associés et soutiennent de nombreuses activités économiques et de loisirs.

Certains territoires rencontrent déjà des difficultés de gestion de ces ressources. En Lot-et-Garonne par exemple, la baisse chronique des niveaux a mené à l'établissement d'un moratoire sur l'ensemble des prélèvements, dans les nappes du Crétacé et du Jurassique. Mais, plus globalement, le caractère stratégique de ces nappes va se voir renforcé dans un contexte de changement climatique et la question de la disponibilité de l'eau sur ces territoires se pose à moyen et long terme : prévision d'étiages plus sévères et plus longs, report des prélèvements des ressources de surface vers les ressources souterraines, augmentation des consommations en eau.

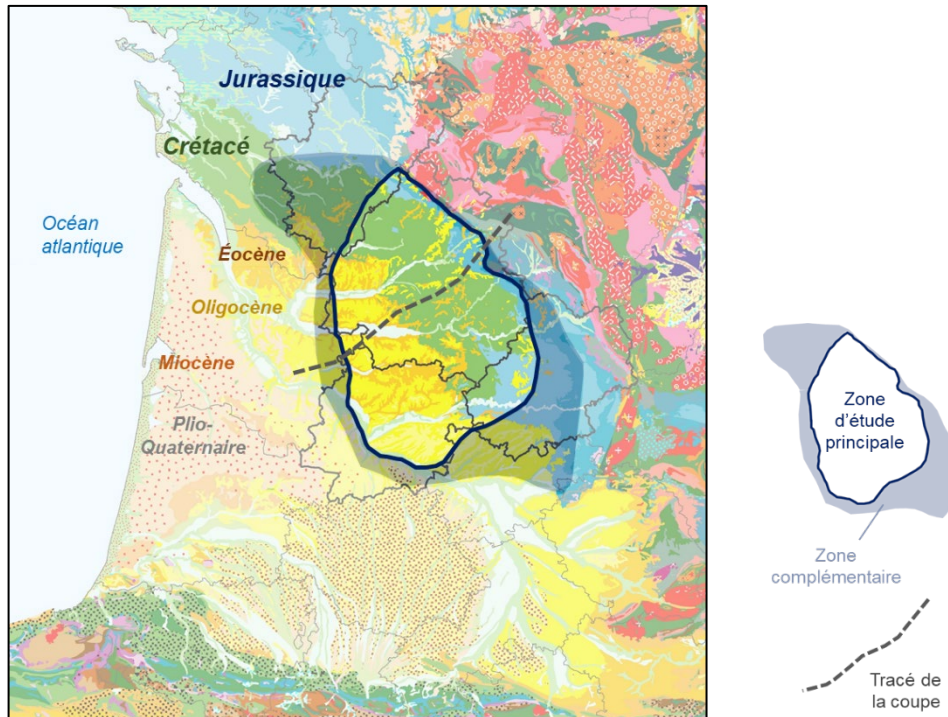


Illustration 1 - Situation de la zone d'étude Eaux-SCARS sur la carte géologique au 1:1 000 000 et coupe géologique NE-SW individualisant les principaux aquifères

En 2014, plusieurs départements ont pris la décision de « participer à la création d'une instance interdépartementale (Dordogne, Lot-et-Garonne, Lot) de concertation et de suivi des nappes profondes ». Cette instance de gestion concertée devra s'appuyer sur des éléments scientifiques robustes à même d'orienter et d'appuyer ses décisions pour faire face aux problèmes de gestion opérationnelle des nappes d'eaux souterraines du Crétacé et du Jurassique du nord du Bassin aquitain.

Parmi ces éléments scientifiques, la connaissance de la nature et de la géométrie des aquifères et aquitards est un élément clé, car elle détermine :

- les conditions d'écoulement dans les réservoirs ;
- la continuité des réservoirs vis-à-vis des zones de recharge ;
- les possibilités de connexions et d'échanges entre les réservoirs.

Cette question est abordée, parmi d'autres, par deux projets complémentaires, portés par le BRGM, touchant le territoire :

- Le programme Eaux-SCARS, en partenariat avec l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, les Conseils Départementaux de Dordogne, Lot-et-Garonne, Lot et Charente, et l'appui financier de l'Union Européenne, via les fonds FEDER. Ce programme, lancé en 2021 pour une durée de 6 ans, vise à mieux connaître le fonctionnement des systèmes carbonatés (impact du changement climatique, interaction nappes-rivières, fonctionnement hydrogéologique des karts, potentialités des nappes) et lever les verrous scientifiques associés à ces nappes profondes selon 3 volets complémentaires :
 - caractérisation géologique et hydrogéologique des réservoirs,
 - évaluation du renouvellement de la ressource en eau dans un contexte de changement global,
 - amélioration des outils de gestion de la ressource ;
- Le programme ECORSE¹ 82, en partenariat avec le Département de Tarn-et-Garonne, et l'appui financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et du Conseil Régional d'Occitanie, dans le cadre de son plan d'intervention régional pour l'eau. Il a débuté en 2021 pour une durée de 2 ans. Il vise à :
 - présenter le contexte géologique et hydrogéologique à l'échelle du département, avec le degré de connaissances des différents aquifères / besoins en eau par type d'usage et les ressources en eau ;
 - réaliser une synthèse hydrogéologique des connaissances existantes sous forme de fiches opérationnelles.
 - caractériser le potentiel des eaux souterraines dans les secteurs où l'information bibliographique synthétisée indique des réservoirs souterrains pressentis, mais avec des informations lacunaires. Plus précisément, le programme consiste à réaliser des investigations géologiques, géophysiques et hydrogéologiques dans la région du Quercy blanc, au nord du département, afin d'améliorer les connaissances concernant les aquifères identifiés dans les formations calcaires du Jurassique sous couverture, dans le but de proposer un programme d'exploration spécifique et de suivi de ces aquifères.

En général, la compréhension des agencements des aquifères repose sur la corrélation d'informations géologiques disparates (coupe géologique, forages, cartographie des affleurements), en accord avec l'état des connaissances sur l'histoire géologique du secteur concerné. La densité de données disponibles conduit nécessairement à une simplification et une incertitude sur les géométries des aquifères et aquitards, dont les implications peuvent être majeures pour la compréhension du fonctionnement des nappes d'eau et l'évaluation des ressources : conditions de réalimentation, compartimentation des réservoirs et continuité des écoulements, drainances verticales entre aquifères.

Au travers des différentes études menées depuis plus de 10 ans par le BRGM, l'électromagnétisme héliporté (EM) ressort comme un outil pertinent, capable de réduire significativement ces incertitudes. En effet, la méthode permet de couvrir de grands territoires, de manière homogène et sur des profondeurs d'investigation allant jusqu'à plusieurs centaines de mètres (voire le premier kilomètre dans certaines zones favorables). Les dernières études positionnent la méthode comme un outil pertinent dans des contextes hydrogéologiques variés (volcaniques, sédimentaires, de socle, ...), et dont l'utilisation est encore vouée à se développer dans les années à venir.

¹ Etat des CONnaissances et premières acquisitions de données sur les Ressources en eaux Souterraines du département de Tarn-et-Garonne dans une perspective d'Exploitation durable

La méthode a ainsi été mise en œuvre en 2021, sur une emprise de plus de 6 600 km², couvrant le système aquifère multicouche de la bordure est et nord-est du Bassin aquitain, dans le cadre de ces deux projets Eaux-SCARS (Charente-Périgord-Quercy) et ECORSE 82 (Tarn-et-Garonne), soit environ 1 500 km linéaires de données. Cette campagne a été cofinancée par le BRGM et l'Union Européenne, via les fonds FEDER, gérés par la Région Nouvelle-Aquitaine. L'acquisition des données EM, dans la zone d'étude couverte par le programme ECORSE 82, a été quant à elle cofinancée par le BRGM et le Département de Tarn-et-Garonne, avec l'appui financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et du Conseil Régional d'Occitanie.

2. L'électromagnétisme

La théorie de l'électromagnétisme (EM) appliquée à la géophysique est documentée dans différents ouvrages (Nabighian and Macnae, 1991; Ward and Hohmann, 1988).

Les grands principes de l'EM se basent sur les équations de Maxwell (19^e siècle), et plus particulièrement sur celles du domaine diffusif (i.e. les courants de conduction dominant) dans le cas d'un levé EM en domaine temporel. Ces équations permettent d'expliquer la diffusion des courants dans le sous-sol suite à une excitation externe ; diffusion qui dépendra, au premier ordre, de la conductivité / résistivité électrique du milieu sous-terrain, qui sera donc le paramètre imagé. Cette conductivité / résistivité varie en fonction de nombreux facteurs : nature de la roche, niveau d'altération, teneur en argile, porosité, saturation en eau, minéralisation de l'eau, ...

Lors d'une mesure EM, un courant d'une intensité donnée est injecté dans la boucle émettrice afin de créer un champ magnétique, dit primaire (d'après l'équation de Maxwell Ampère). Ce même courant est ensuite coupé le plus nettement possible, entraînant alors une variation du champ primaire. Celle-ci se traduit par l'induction de courants de Foucault dans le sous-sol (d'après l'équation de Maxwell Faraday), créant, à leur tour, un champ magnétique dit secondaire et mesuré au niveau de la boucle réceptrice. Ce principe est présenté sur la figure 1.

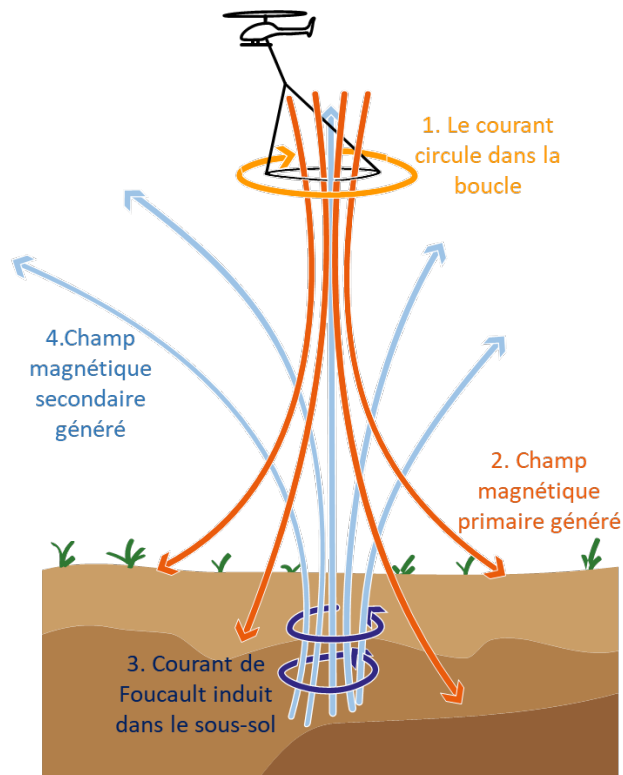


Illustration 2 - Principe de mesure de l'électromagnétisme aéroporté

Les courants se dissipant dans le sous-sol avec le temps (effet Joule), la donnée recueillie informera donc sur la décroissance du champ secondaire en fonction du temps, celle-ci étant directement liée à la conductivité du milieu et échantillonnée à des temps prédéfinis, appelés fenêtres. Plus la décroissance est rapide et plus le sous-sol est résistant. La profondeur d'investigation de la méthode dépendra de l'intensité du courant injecté, de l'aire de la boucle d'émission, du niveau de bruit local ainsi que de la conductivité du sous-sol.

3. Les levés des projets Eaux-SCARS et ECORSE 82

3.1. ACQUISITION

Le levé, effectué par SkyTEM Surveys ApS., dont le dossier a été sélectionné au terme d'un appel d'offres européen, s'est déroulé du 10 septembre au 16 octobre 2021. Le plan de vol a consisté en de longs profils, majoritairement sud-ouest / nord-est avec quelques recoupes nord-ouest / sud-est. Les lignes de vol, espacées de quelques kilomètres, ont été resserrées à 400 m au-dessus du bassin versant du Toulon, avec comme objectif de mieux comprendre la communication entre le Jurassique et le Crétacé. Le long de chaque ligne de vol, une mesure électromagnétique a été prise sans discontinuer, à pas régulier ; ce qui représente un point de donnée tous les 30 à 40 m.

Les traces de l'hélicoptère sont présentées en Illustration 3. A noter que les traces ne se limitent pas aux lignes de vol mais comprennent également les « ferrys » (trajet entre la base opérationnelle et la première ligne de vol à voler, transition entre deux lignes de vol, trajet entre la dernière ligne de vol volée et la base opérationnelle). Les écarts entre le plan de vol et le réalisé sont dus à la présence d'obstacles au sol qu'il est interdit de survoler ou pouvant induire un risque non négligeable pour la sécurité du pilote ou la poursuite de l'opération, tels que la présence d'habitations, d'élevages, de reliefs importants. Rappelons que le survol des agglomérations est interdit.

Le BRGM a assuré le montage, la supervision, la coordination et le contrôle de qualité de la campagne héliportée. Le rapport d'acquisition, remis par le prestataire géophysique, est présenté en Annexe. Il détaille les différents instruments utilisés et les paramètres d'acquisition associés.

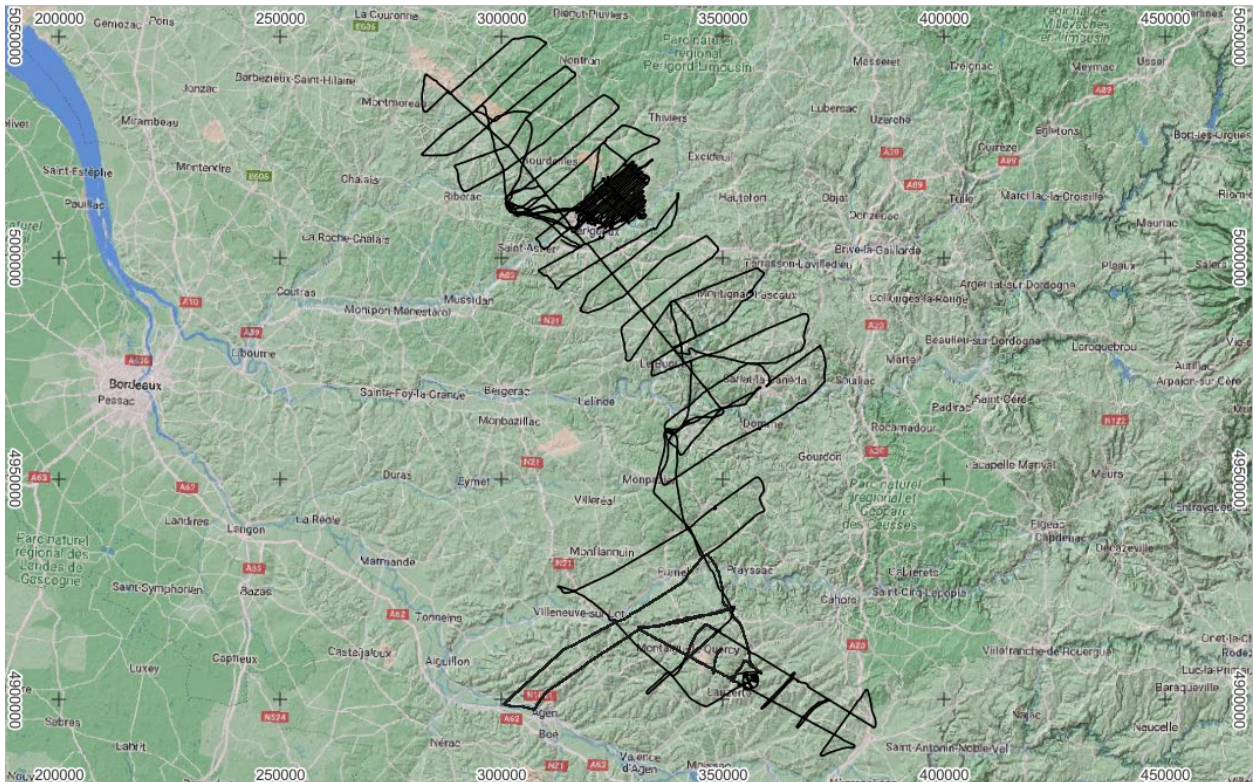


Illustration 3 - Trace de l'hélicoptère (en noir) pour chacun des vols réalisés

3.2. EQUIPEMENT GEOPHYSIQUE

Le système de mesure utilisé est le SkyTEM 312 (<https://skytem.com/geophysical-surveys/>). Ce système est tracté en élingue, environ 35 mètres sous l'hélicoptère (Illustration 4). Sur le câble d'accrochage, à 20 m environ sous l'hélicoptère, un générateur fournit le courant nécessaire à la mesure EM. La structure se compose d'une boucle émettrice (qui permet l'excitation du sous-sol), d'une boucle réceptrice (pour mesurer la réponse du sous-sol), d'un générateur comme source d'énergie, ainsi que de différents instruments de navigation tels que GPS, inclinomètres et altimètres laser, afin de positionner à tout moment la mesure dans l'espace. Un magnétomètre, enregistrant le champ magnétique naturel, est également placé à l'avant du système. Enfin, une caméra vidéo et un système de navigation en temps réel sont installés à bord de l'hélicoptère. La caméra enregistre en continu, à la verticale, sous l'hélicoptère, et le système de navigation permet au pilote de l'hélicoptère de connaître la garde au sol du dispositif et de se localiser par rapport au plan de vol. Ce système permet également d'avertir le pilote en cas de dysfonctionnement d'un instrument de mesure ou d'une garde au sol trop faible.

La particularité des systèmes SkyTEM est d'émettre deux moments magnétiques différents (fonction du nombre de tour et de l'aire de la boucle d'émission et de l'intensité du courant injecté) : un moment dit faible, qui assure une résolution en proche surface (dans la gamme ~0-50/100 m) et un moment dit fort, fournissant une information à des profondeurs plus importantes. Ces deux moments sont interprétés conjointement et correspondent à un même point de mesure. Le système SkyTEM 312 a vocation à émettre un champ magnétique de moment important, afin de sonder le sous-sol en profondeur, ceci s'accompagne d'une perte de résolution en proche surface.



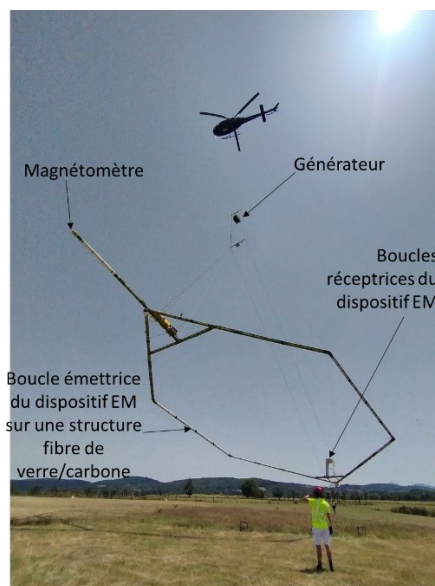
Accrochage du dispositif



Equipement dans le cockpit



Acquisition en vol



Localisation des éléments principaux du système

Illustration 4 - Présentation d'un système « SkyTEM »

4. Traitement et inversion des données électromagnétiques

4.1. TRAITEMENT DES DONNEES

Les mesures fournies par SkyTEM Surveys ApS. vont de la donnée brute à un modèle de résistivité préliminaire, en passant par la donnée préfiltrée et la donnée traitée. Le rapport d'acquisition de SkyTEM Surveys ApS. (Annexe) détaille les différentes données et les traitements appliqués. Le traitement réalisé par SkyTEM Surveys ApS. n'est pas exhaustif et laisse de nombreux bruits sur la donnée. Il a pour but, d'une part, de livrer au client une donnée prestataire prétraitée et, d'autre part, d'obtenir une imagerie préliminaire du sous-sol. Ce « pré- »traitement, bien qu'efficace, a tendance à dégrader la résolution horizontale et verticale de la méthode. C'est pourquoi, après récupération des données brutes, le BRGM réalise son propre traitement des données afin d'en optimiser la qualité (Reninger et al., 2020). Cela consiste à (1) traiter les données de navigation, (2) traiter les données électromagnétiques et (3) inverser le jeu de données avec des paramètres optimisés.

4.1.1. Traitement de la donnée de navigation

a. Données GPS

La position du dispositif est mesurée toutes les secondes grâce aux GPS différentiels, installés à la fois sur la boucle et à la station de base. Cette position est alors évaluée à chaque mesure EM par interpolation.

b. Données d'inclinaison

L'attitude de la boucle est mesurée suivant l'axe de vol et sa perpendiculaire horizontale grâce aux deux inclinomètres placés sur la boucle. Ceux-ci permettent de suivre le comportement du système durant le levé et servent à calculer les aires effectives des boucles d'émission et de réception par rapport au sol. Un filtre médian permettant de retirer les valeurs aberrantes a été appliqué sur ces mesures, qui ont ensuite été corrigées de la topographie (Reninger et al., 2015).

c. Données d'altitude

Il existe deux moyens de connaître l'altitude du dispositif : d'une part, grâce aux deux altimètres situés sur la boucle, d'autre part, par traitement du GPS différentiel et soustraction du modèle numérique de terrain. La première solution, utilisée par SkyTEM Surveys ApS., est souvent complexe et subjective, particulièrement dans le cas d'une topographie accidentée. La seconde solution est donc préférée par le BRGM lors de son traitement.

4.1.2. Traitement de la donnée EM

La mesure EM est extrêmement sensible aux champs EM « ambiants » aussi bien naturels qu'artificiels, ces derniers induisent un bruit sur la donnée. Comme source naturelle de bruit, on peut citer les « spherics », ondes EM issues de l'activité orageuse, se propageant dans l'ionosphère ; les sources artificielles de bruits comprennent quant à elles toutes installations humaines interagissant avec ou produisant un champ électromagnétique.

Afin de garder uniquement les mesures fiables, il est donc nécessaire de les filtrer et ainsi de « débruiter » le jeu de données.

La première étape du traitement appliqué est basée sur l'utilisation de la décomposition en valeurs singulières (Reninger et al., 2011). Ce filtrage permet d'identifier le bruit affectant la donnée en toute objectivité et offre des outils afin de le caractériser. Les composantes dites de bruit (i.e. identifiées comme expliquant le bruit), et plus particulièrement les poids qui leurs sont associés pour chaque mesure EM, sont analysés. Les poids les plus forts indiquent la présence d'oscillations et/ou de pics d'amplitude anormaux, reflétant un probable biais dans la mesure, généralement dû à la présence d'installations au sol (Illustration 5). Ce traitement permet également d'identifier les données susceptibles d'être exploitables hors plan de vol. Ainsi des portions de ligne supplémentaires ont pu être ajoutées au jeu de données. Les lignes ajoutées portent les numéros 9XXXXX. Durant le contrôle de qualité quotidien, des sections jugées de bonne qualité ont aussi été intégrées à la production et numérotées 8XXXXX.

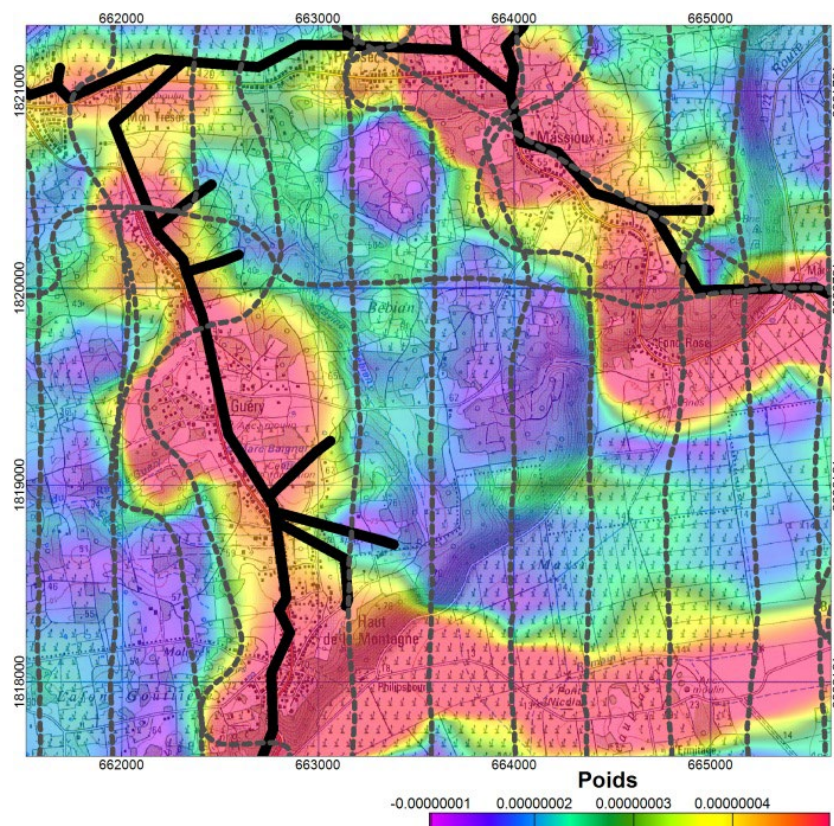


Illustration 5 - Carte de poids d'une composante de bruit caractérisée par SVD (Les lignes électriques géoréférencées -parfois peu précises et incomplètes- apparaissent en noir et les lignes de vol, en tiretés gris)

Afin d'améliorer le ratio signal sur bruit, ce traitement a été complété par l'application d'une moyenne glissante (« stack ») entre les différentes mesures EM, dont la largeur de la fenêtre s'adapte au niveau de bruit de chaque donnée. Ainsi, seule la partie identifiée comme bruitée va être affectée par ce « stack », dont la taille s'adapte afin de réduire au mieux le bruit le long de chaque mesure (i.e. au niveau de chacune des fenêtres concernées). Cette étape permet d'optimiser la résolution et la profondeur d'investigation après inversion (Reninger et al., 2020, Illustration 6). Les données identifiées, à l'étape précédente, comme étant biaisées par la présence d'installations au sol, ne sont pas prises en compte lors du calcul de la moyenne ; ceci permet de ne pas diluer et diffuser ces bruits non réductibles.

Au sortir du stack, les fenêtres 11 à 15 du moment fort ont été filtrées afin de rejeter celles qui seraient trop affectées par le champ source, mesuré lors des vols à 1 000 m d'altitude. Un niveau maximum pour chaque fenêtre et pour l'ensemble du levé a été défini : toutes mesures, dont le rapport champ source / amplitude de la fenêtre, est supérieur à 10% ont été retirées.

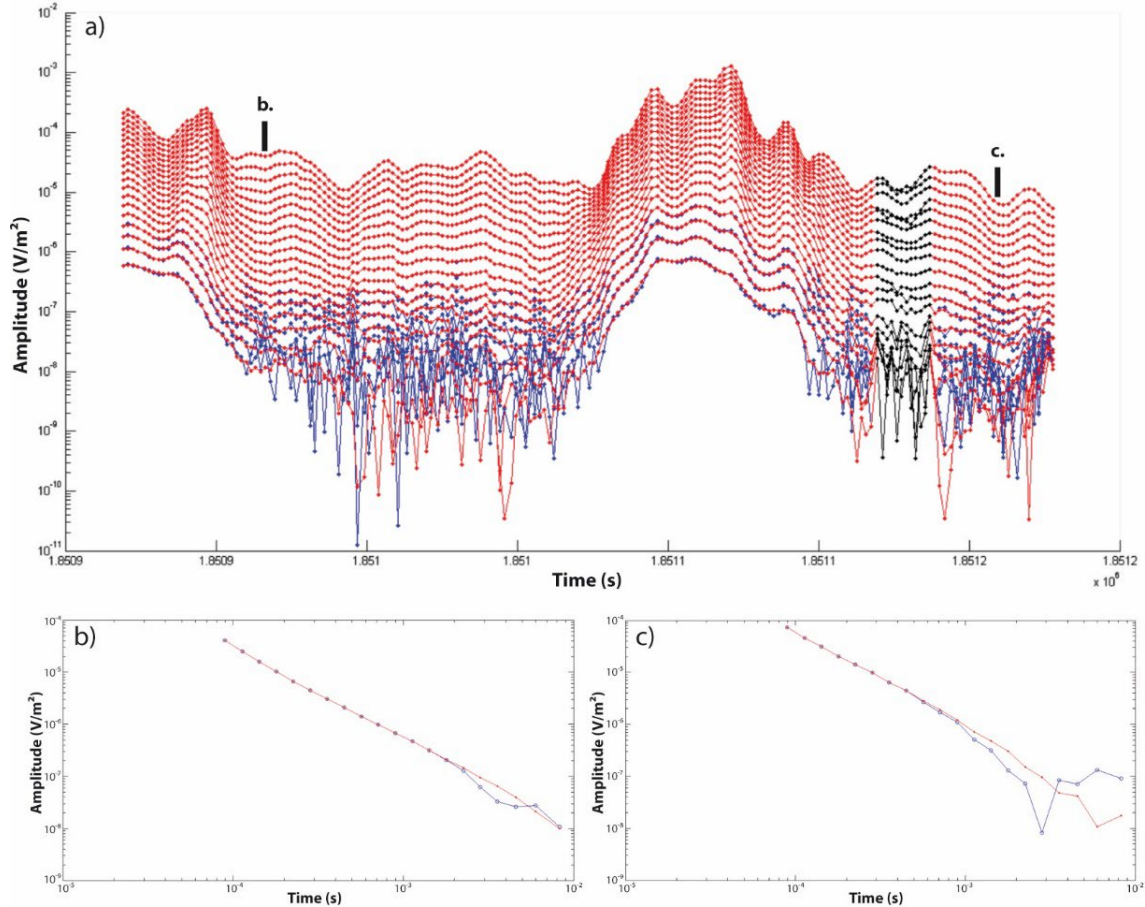


Illustration 6 - Illustration du stack adaptatif le long d'une ligne de vol (a) : les données identifiées comme étant biaisées par la présence d'installations au sol (en noir) ne sont pas prises en compte ; deux mesures EM sont présentées en (b) et (c) ; les données brutes et moyennées apparaissent respectivement en bleu et en rouge

Enfin, une édition manuelle du bruit résiduel a été réalisée (Illustration 7). Cette étape est destinée à restituer un jeu de données (et ensuite un modèle de résistivité inversée), corrigés du maximum de bruits / artefacts qu'il est possible d'identifier. Toutefois, certains bruits / artefacts nécessitent une connaissance locale plus approfondie afin d'être identifiés et corrigés ou rejetés. Seule une confrontation avec des données annexes indépendantes peut permettre d'identifier ces défauts sans équivoque (SIG, forages, ERT...).

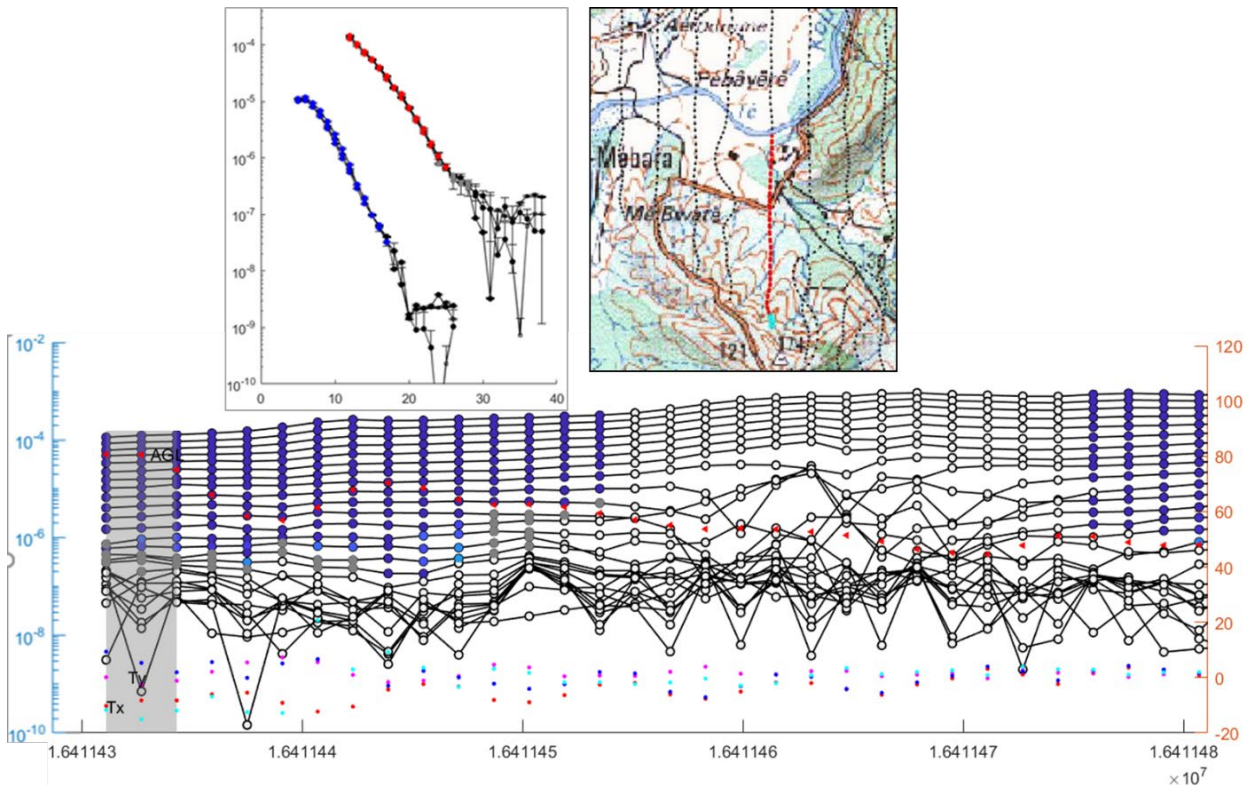


Illustration 7 - Eléments de contrôle utilisés pour évaluer et retirer les données EM bruitées
 En bas, le signal EM mesuré pour les différentes fenêtres, en temps du moment faible (LM) sur une portion de 500 m de ligne de vol environ (des temps courts vers les longs de haut en bas). Les points blancs ont été supprimés par l'analyse SVD ; les points gris sont les fenêtres supprimées après inspection manuelle des courbes de décroissance : trois d'entre elles, de bonne qualité, sont représentées dans l'encart haut gauche, correspondant aux trois sondages EM grisés sur le profil. Les couplages identifiés dans la partie centrale du profil correspondent à la traversée de la route et de la zone urbanisée visibles sur la carte de localisation de l'encart haut droit.

Les données ont été normalisées par les aires effectives des boucles réceptrices et émettrices (nombre de tours x aire) et le courant injecté. Celles-ci sont donc ramenées à des pV/Am^4 .

4.2. INVERSION DES DONNEES

4.2.1. Inversion réalisée

Afin de traduire la mesure EM en valeurs de résistivité, en fonction de la profondeur, celle-ci doit être inversée. Le principe de l'inversion en géophysique est de retrouver les propriétés physiques (i.e. ici la résistivité électrique) du sous-sol à l'origine des différents signaux mesurés (i.e. ici les mesures EM). Pour ce faire, il est nécessaire de trouver le modèle schématisant le sous-sol qui minimise la différence entre les données mesurées et celles prédites par la théorie. Celui-ci est obtenu après définition d'un modèle de départ, puis par itération de modélisations EM et comparaisons à la donnée mesurée. Les modèles pris en considération à cette étape permettent d'imager les contrastes de résistivité dans le sous-sol.

Dans le cadre de ce projet, le BRGM a réalisé des inversions dites « Smooth » avec le logiciel Aarhus Workbench – Version 6.4.1.0 (<https://www.aarhusgeosoftware.dk/aarhus-workbench>). L'inversion mise en œuvre est basée sur l'algorithme non linéaire EM1DINV (de l'Université d'Aarhus). La fonction de transfert du système y est prise en compte (utilisation de la forme

d'onde, filtre passe bas, ...). Cette inversion considère des modèles 1D constitués de 40 couches, chacune caractérisée par une épaisseur et une résistivité et allant de 0 à 800 m de profondeur. L'épaisseur des couches augmente de façon logarithmique avec la profondeur, la couche la plus fine ayant une épaisseur de 2 m. Seule la résistivité peut varier. Ce type d'inversion a l'avantage d'être moins dépendant des a priori définis pour initialiser le calcul (i.e. reflétant notre appréhension de la géologie), mais il a le désavantage d'imager des variations lissées de la résistivité selon la profondeur. Afin de stabiliser le processus, des contraintes spatiales entre les différentes couches des différents modèles sont également appliquées lors de l'inversion (cf. Spatially Constrained Inversion ; Viezzoli et al., 2008) - pour tirer parti des relations entre sondages proches (Illustration 8). Les contraintes verticales et latérales appliquées lors des inversions sont respectivement de 4 et 2 (excepté pour les 4 premières couches sur lesquelles aucune contrainte latérale n'a été appliquée).

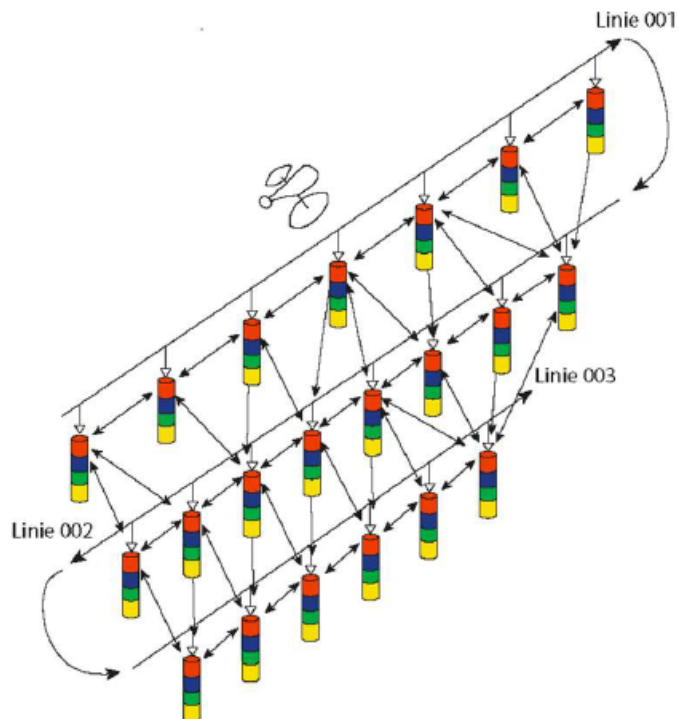


Illustration 8 - Schéma de principe des relations entre les modèles EM lors de l'inversion de type SCI : les contraintes s'exercent entre modèles proches, le long des lignes de vol, mais aussi d'une ligne à l'autre

A la fin de cette inversion, la profondeur d'investigation de chaque mesure est également évaluée afin de calculer une limite basse (hypothèse pessimiste ; profondeur d'investigation la plus faible) et une limite haute (hypothèse optimiste ; profondeur d'investigation la plus importante). A l'issue de l'étape d'inversion, nous obtenons donc, à l'emplacement de chaque mesure, un modèle 1D censé rendre compte des variations de la résistivité avec la profondeur.

Pour des raisons pratiques, les données ont été séparées en deux blocs (avec recouvrement). Deux inversions ont donc été calculées : une pour la partie nord et centre, une autre pour la partie sud.

Le prétraitement réalisé par SkyTEM surveys ApS. permet de rendre l'influence de la source émise sur la mesure EM quasi négligeable (cf. rapport d'acquisition en Annexe). Il est donc possible d'inverser la donnée de moment faible en considérant des temps très courts, pendant la coupure du courant dans la boucle d'émission. Le logiciel Aarhus Workbench offre depuis peu la possibilité de gérer ces temps très courts au travers du module « System Response Modeling ».

Pour pouvoir utiliser ce dernier, il est nécessaire de posséder un fichier .sr2, lié aux fichiers de géométrie (.gex) délivrés par SkyTEM ApS. (cf. rapport d'acquisition en Annexe). Les inversions réalisées ont utilisé ce module. L'écart-type associé aux fenêtres 2 à 8 a été calculé en prenant en compte le champ source résiduel.

L'inversion a été calculée en considérant les fenêtres 2 à 23, pour le moment faible, et 11 à 38, pour le moment fort.

Des modèles de départ ont été définis de façon ad hoc, en fonction de l'environnement géologique, dans une gamme de résistivités allant de 20 $\Omega.m$ à 300 $\Omega.m$. Les caractéristiques et le zonage d'application des modèles a priori sont livrés dans l'archive numérique du BRGM.

L'Illustration 9 présente un extrait de profil de résistivité obtenu, la coloration étant directement liée à la résistivité.

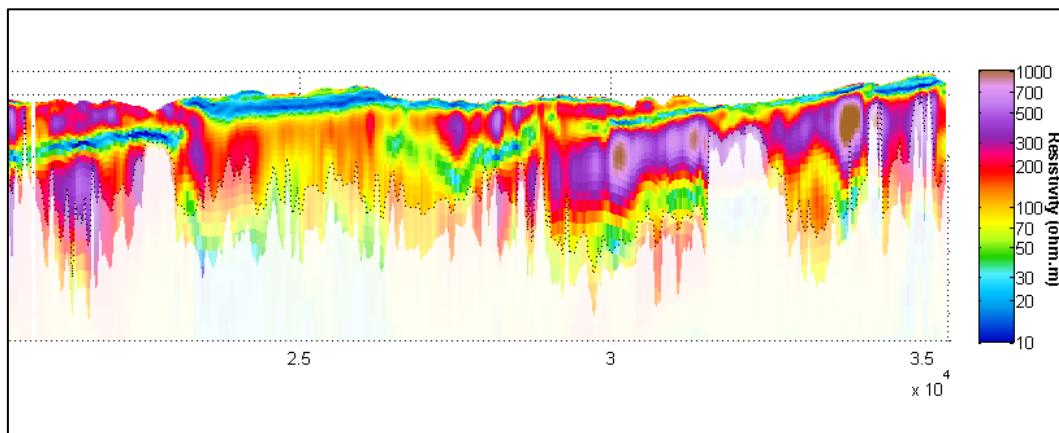


Illustration 9 - Profil de résistivité obtenu après traitement et inversion par le BRGM

La profondeur d'investigation de la méthode EM est représentée par une tranche en légèreté reflétant l'incertitude obtenue pour ce paramètre et, est définie par une limite haute et une limite basse (pointillés). Sous la limite haute, la transparence appliquée étant nettement plus importante.

En premier lieu, la capacité de la méthode à imager le sous-sol jusqu'à des profondeurs de quatre à cinq cents mètres en contexte sédimentaire a pu être validée. Les premières interprétations dans le secteur Charente-Périgord-Quercy (projet Eaux-SCARS) mettent en évidence une complexité géométrique significative des réservoirs carbonatés du Secondaire, au-delà des attentes. On observe notamment la continuité en profondeur des structures observées en surface, mais aussi l'identification de structures et variations de faciès qui n'étaient pas visibles à l'affleurement et ne pouvaient pas apparaître sur les seules corrélations des données géologiques disponibles. La révision de la connaissance hydrogéologique de ce territoire, induite par ces interprétations, permettra de répondre aux questionnements sur les conditions de réalimentation et de circulation dans les aquifères, et alimentera dans un second temps la mise à jour d'un modèle numérique de gestion, sur une base solide et partagée.

4.2.2. Discussion autour des résultats d'inversion

Les résultats d'inversion EM livrés ont été obtenus en utilisant des paramètres, présentant le meilleur compromis entre précision des résultats et ajustement des modèles, après divers tests menés (tant au niveau du traitement que de l'inversion) dans le temps imparti du projet. Les fichiers livrés donnent toute liberté de retraiter et /ou ré-inverser les données afin d'appliquer d'autres traitements et d'adapter les paramètres à l'échelle, au contexte et/ou à la connaissance

de la géologie locale. Les résultats pourront également évoluer au gré des avancées des méthodes de traitement et/ou des outils d'inversion.

L'algorithme d'inversion utilisé a été éprouvé dans de nombreux projets et est une référence internationale pour l'EM aéroporté. Toutefois, les modèles de résistivité restitués après traitement / inversion résultent de choix opérés pour les traitements et l'inversion - tels qu'explicités aux paragraphes précédents - et ne doivent donc pas être considérés comme uniques ou définitifs. Par exemple, les valeurs de résistivité ne sont en aucun cas absolues, étant en partie liées aux paramètres / traitements utilisés.

Avec plus de temps et des objectifs plus spécifiques, sur des zones plus restreintes, le modèle de résistivité pourrait être précisé (e.g. meilleure résolution, plus contrasté, correction de certains artefacts, ...) au gré, entre autres, de connaissances supplémentaires (forages, observations, SIG, ...), d'un changement d'échelle et/ou de l'utilisation d'un algorithme différent (2D/3D).

Par ailleurs, il est rappelé que le problème d'inversion ne possède pas de solution unique et est soumis à des questions d'équivalence (i.e. plusieurs modèles peuvent donner une réponse similaire). De plus, bien que contrainte spatialement, l'inversion utilisée reste 1D et ne peut résoudre de manière adéquate les géométries du sous-sol, qui présentent un fort caractère 2D ou 3D.

Un certain nombre de remarques, éléments critiques et points de retour d'expérience sont discutés ci-après, concernant les résultats des inversions du BRGM délivrées.

a) Paramètres d'entrée

- L'édition des décroissances a été réalisée à l'échelle du levé et en se basant sur les « connaissances » dont nous disposons (cartes IGN principalement). Il est vraisemblable que, localement, cette édition ait retiré trop de données (i.e. certaines fenêtres, voire décroissances, pourraient donc sans doute être récupérées) ou inversement que des bruits n'aient pas été identifiés par manque de données annexes et indépendantes et/ou de connaissances locales.
- Durant l'inversion, les contraintes ont été appliquées en fonction de l'altitude (les contraintes sont appliquées entre les couches de même altitude). Etant donné le contexte, cela nous a semblé être le choix le plus pertinent. En cas de ré-inversion locale et suivant le contexte, une application des contraintes suivant la profondeur pourrait s'avérer plus pertinente (les contraintes sont appliquées entre les couches de même profondeur).
- Les épaisseurs des différentes couches (et notamment de la couche superficielle du modèle inversé) peuvent être adaptées selon la résolution attendue, et en fonction de la qualité des deux moments et du contexte géoélectrique (plus le milieu est conducteur et meilleure est la résolution de surface).
- L'inversion qui a été réalisée est de type « Smooth » 1D (en norme L2). Elle restitue les contrastes de résistivité de manière lissée. L'interprétation des épaisseurs des horizons imagés est alors rendue difficile et très dépendante de l'échelle de couleur retenue. Ainsi, en fonction des objectifs, d'autres types d'inversion existent. Le logiciel Aarhus Workbench permet d'inverser en utilisant 4 types d'inversion différents (Smooth L2, Smooth L1, Few Layer, Sharp), chacune avec des avantages et des défauts. Des algorithmes d'inversion multidimensionnelle sont en train d'être mis au point et seront, certainement, dans un futur proche, utilisés de manière croissante.
- Le MNT utilisé a été dégradé afin de rendre compte de l'empreinte du système EM. D'autres MNT peuvent être utilisés : soit au niveau de l'inversion, avec un risque de créer des artefacts

en cas de résolution inadaptée, soit pour visualiser les résultats obtenus (en gardant à l'esprit l'empreinte au sol du dispositif).

b) Imagerie de la résistivité

- Localement, un editing imparfait peut, après inversion, faire apparaître de manière abusive des conducteurs profonds. L'opérateur doit donc interpréter avec précaution les conducteurs situés à la base des modèles 1D et profils de résistivité, surtout dans le cas de conducteurs très locaux, importants et présentant des formes se rapprochant d'une hyperbole. Un conducteur d'origine géologique présentera, le plus souvent, des longueurs d'onde plus importantes.
- Dans le cas particulier où seul le moment faible est inversé pour un point de mesure, l'algorithme d'inversion tend à créer une couche conductrice en fin de sondage, dont la conductivité est généralement exagérée par rapport à ce qu'indique la donnée. Le plus souvent, la présence de cet horizon conducteur profond doit être considéré comme un artefact (ou, au minimum, la conductivité doit être minorée). Nous avons toutefois préféré conserver ces données car l'imagerie de proche surface, d'intérêt pour le projet, reste tout à fait pertinente. Si le modèle devait être utilisé pour la connaissance géologique « profonde », ces « artefacts » devraient être corrigés, filtrés ou rejetés.
De manière générale, des artefacts conducteurs sont plus particulièrement générés dans des contextes résistants : en plus de possibles bruits, ces artefacts peuvent résulter d'un modèle a priori inadapté.
- En miroir aux conducteurs profonds, un modèle inadapté peut également produire un artefact résistant en surface. Cela s'observe notamment en contexte très conducteur.
- La résistivité inversée n'est pas absolue et dépend des données d'entrée et des paramètres appliqués. Ainsi, un résultat d'inversion ne peut être comparé à un autre résultat d'inversion si les traitements et paramètres des deux inversions ne sont pas parfaitement connus. Par exemple, l'altitude est un paramètre clé pour la définition des contrastes de résistivité. Un changement dans l'altitude va nécessairement avoir un impact sur les valeurs imagées et peut possiblement, en cas d'erreur, créer un artefact en proche surface.
- Afin d'aider à l'interprétation des résultats d'inversion, les fichiers livrés rendent compte du résidu (différence entre la donnée modélisée et celle mesurée), du nombre de fenêtres et du/des moment(s) utilisés. Par exemple, l'inversion d'un moment fort seul ne peut être précise en proche surface, même si l'utilisation de contraintes tend à lisser les variations de qualité entre deux sondages EM consécutifs.
- Un résidu élevé ne signifie pas nécessairement que le résultat d'inversion est mauvais ou que la donnée est à rejeter. Il indique que le modèle inversé n'a pu être ajusté très précisément à la donnée. Différentes raisons peuvent être évoquées : un bruit affectant encore la donnée, l'existence d'un effet 2D/3D localement plus prononcé ou encore l'application de paramètres d'inversion inadaptés. A l'inverse, un résidu faible est plutôt un bon indicateur, mais cela n'assure pas de manière certaine que le modèle restitué par l'inversion est juste (conforme à la réalité géologique). Par exemple, une série de données peut être affectée par un bruit cohérent ; ou un faible résidu peut s'expliquer par des écarts-types des fenêtres de mesures élevés.

Pour compléter ces commentaires techniques liés à l'inversion, il est recommandé de s'approprier les données et les résultats d'inversion, et de les confronter à ses propres connaissances (observations, forages, SIG...) afin d'en tirer le meilleur profit et ainsi être en mesure d'interpréter les contrastes de résistivité imagés. De même, la participation au processus d'interprétation d'un opérateur ayant des notions solides en géophysique, notamment en EM, est recommandée. L'extraction de l'information d'intérêt nécessite un travail et un affichage adaptés des données,

prenant en compte les limites et la résolution de la méthode. Un travail en binôme entre un géophysicien et un géologue (ou un hydrogéologue, suivant la problématique) est conseillé.

4.3. LIVRABLES

Les livrables issus de l'acquisition sont détaillés dans le rapport d'acquisition en Annexe. Les livrables issus du traitement BRGM sont présentés dans le tableau suivant.

Dossier	Fichier	Descriptif
Data	Data_Workbench64.XYZ README_Data_processed.txt	Données issues du traitement BRGM. Le fichier README détaille le contenu des fichiers de données.
Inversion	SCI_Nord.xyz SCI_Sud.xyz README_SCI.txt	Résultats d'inversion. Le fichier README détaille le contenu des fichiers d'inversion
Workbench	20211122_312_503_FRA_342m2_LM750Hz _HM50Hz_sr2 (.gex et .sr2) SkyTEM_EauxScar_UseFlag.ALC AprioriX.xyz README_FichiersAnnexes.txt	Fichiers nécessaires pour l'import et l'inversion dans le logiciel Aarhus Workbench : fichiers de géométrie (.gex), fichiers nécessaires au « System Response Modelling » (.sr2), fichiers de description des colonnes des fichiers de données (.ALC) et fichiers définissant les a priori (AprioriX.xyz, X étant la valeur de l'a priori). Le fichier README indique la version du workbench utilisé.

5. Bibliographie

Nabighian, M.N., Macnae, J.C., 1991. Time domain electromagnetic prospecting methods, in: *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. SEG Books, pp. 427-509. Chap 6.

Reninger, P.-A., Martelet, G., Deparis, J., Perrin, J., Chen, Y., 2011. Singular value decomposition as a denoising tool for airborne time domain electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics* 75, 264–276. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.06.034>

Reninger, P.-A., Martelet, G., Perrin, J., 2015. Frame effective tilt correction for HEM data acquired over rugged terrain, in: *First European Airborne Electromagnetics Conference*. European Association of Geoscientists & Engineers, pp. 1–5.

Reninger, P.-A., Martelet, G., Perrin, J., Dumont, M., 2020. Processing methodology for regional AEM surveys and local implications. *Exploration Geophysics* 51, 143–154. <https://doi.org/10.1080/08123985.2019.1680249>

Viezzoli, A., Christiansen, A.V., Auken, E., Sørensen, K., 2008. Quasi-3D modeling of airborne TEM data by spatially constrained inversion. *Geophysics* 73, F105–F113. <https://doi.org/10.1190/1.2895521>

Ward, S.H., Hohmann, G.W., 1988. 4. Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 1, Theory*.

6. Annexe

DATA REPORT

SkyTEM Survey: Aquitaine, France

Client: BRGM

Date: December 2021



SKYTEM SURVEYS APS
DYSEN 2
8200 AARHUS N, DENMARK

TEL: +45 8620 2050
VAT: 27704379

WWW.SKYTEM.COM
INFO@SKYTEM.COM



Structure of the Digital Data Delivery catalogue

Folder	Sub folder		File format	Content
01_Data	01_GDB		.gdb (Geosoft database)	Data
	02_ Workbench	01_GEX	.gex	
		02_Mask	.lin	
		03_Rawdata	.skb	
	04_SR2	.sps		
		.sr2 & sr2.gex		
	03_PFC_parameters		.dat	
02_Inversion	01_GDB_Models		.gdb (Geosoft database) .xyz (ASCII file)	Modelled layer resistivity
	02_Layer_resistivity_Grids		.grd (Geosoft grid)	Modelled layer resistivity
	03_Layer_resistivity_Maps		.map (Geosoft map) .pdf	Modelled layer resistivity
	05_Layer_resistivity_Profiles		.png	Modelled layer resistivity & model analysis, Profile sections
03_Grids	01_DEM		.grd (Geosoft grids)	DEM
	02_EM			EM data (LMZ & HMZ)
	03_MAG			Mag data (RMF & TMI)
	04_PLNI			PLNI
	05_Tau			Tau (Decay & Gate)
04_Maps	01_DEM		.map (Geosoft maps) .pdf	DEM
	02_EM			EM data (LMZ & HMZ)
	03_MAG			Mag data (RMF & TMI)
	04_PLNI			PLNI
	05_Tau			Tau (Decay & Gate)
	06_PlannedFlightLines			Planned lines
	07_LinePath			Flown lines
05_Report			.pdf	Data report



Contents

Contents	3
Executive Summary.....	4
Introduction	5
Survey outline.....	6
Flight Parameters	9
Flight Reports.....	10
Instruments	12
Airborne unit.....	12
Ground base stations	13
Data Acquisition	14
Gate times.....	15
Waveform.....	18
High Altitude Test	20
Digital Data	23
Inversion results.....	23
Data processing and presentation.....	25
Auxiliary data	26
Magnetic data.....	28
Power Line Noise Intensity (PLNI)	33
EM data.....	35
Adaptive Time Constant (TAU).....	37
Inversion	38
References	43
Appendix list.....	44
Appendix 1: Instruments	44
Appendix 2: Introduction to Spatially Constrained Inversion.....	44



Executive Summary

This report covers data acquisition, technical specifications, data processing and presentation of the SkyTEM312M survey flown in the period from the September 10th to September 16th in the region of Aquitaine, France. The survey is comprised of 2 blocks containing 1485.9 km planned flight lines.

The SkyTEM312M collects time domain electromagnetic and magnetic data along with supporting navigation measurements.

All material is delivered digitally; the final product includes:

- Data report
- Processed data in Geosoft database
- Raw data and configuration files in Workbench format
- Inversion results; modelled layer resistivity in Geosoft database and ASCII file format
- Grids and maps in Geosoft format
- Presentations of data and inversion results in png or pdf format

An overview of the digital data delivery can be seen on the front inside cover of this report.



Introduction

The SkyTEM electromagnetic and magnetic survey described in this report is flown with the SkyTEM312M system. The survey is requested by BRGM and performed by SkyTEM Surveys ApS. Basic survey information and key personnel are listed in Table 1.

This report covers data acquisition, instrument descriptions, data processing and presentations. The data delivery includes processed electromagnetic data and presentations, Spatially Constrained Inversion (SCI) results and model presentations as well as processed magnetic data and presentations. The digital data delivery folder is described in the front inside cover of this report.

This report does not include any geological interpretations of the geophysical dataset.

Client	BRGM
Client Contact person	Mr Pierre-Alexandre Reninger Email: pa.reninger@brgm.fr
Contractor	SkyTEM Surveys ApS
Contact person	Mr Flemming Effersø Email: fe@skytem.com
Project Manager	Mr Emil Nielsen Email: eni@skytem.com
Field Crew	Mr John Louis Blyth Mr Klaus Marstrand
Helicopter operator	Koopmann Helicopters
Helicopter type	Eurocopter Astar 350 B3
Pilot	Mr Florian Kirschbaum
Data acquisition period	September 10th to september 16th
Data processing, presentations, and report	Mr Emil Nielsen
Quality control of final product	Ms Sara Thofte

Table 1 Key personnel and survey information.



Survey outline

The survey area is located in Aquitaine, France, and flown from the September 10th to september 16th. The survey outline is presented as blue lines on Figure 1. Flight line details are listed in Table 2 and Table 3.

Actual flown lines (red lines) versus planned lines (blue lines) are seen on Figure 2. Discrepancies between planned and flown lines occur where cultural features such as roads, buildings, and antennas necessitate a diversion.

The coordinate system is kept in RGF93 / Lambert-93 throughout this report and the digital data delivery.

Area name	Line spacing (m)	Line direction (deg)	Tie line spacing (m)	Flight lines (km)	Tie lines (km)	Total line kilometres (km)
EauxScar	Variable	NE – SW	Variable	1106.6	184.1	1291.0
Ecorse	Variable	NE – SW	Variable	83.9	111.0	194.9
Total						1485.9

Table 2 Survey details

Area	Line numbering
EauxScar – Lines – Tie lines	L100000 – L102200, L300000 – L312000, L200000 – L200200, L400000 – L409000
Ecorse – Lines – Tie lines	L600000 – L600600 L700000 – L700200

Table 3 Line numbering

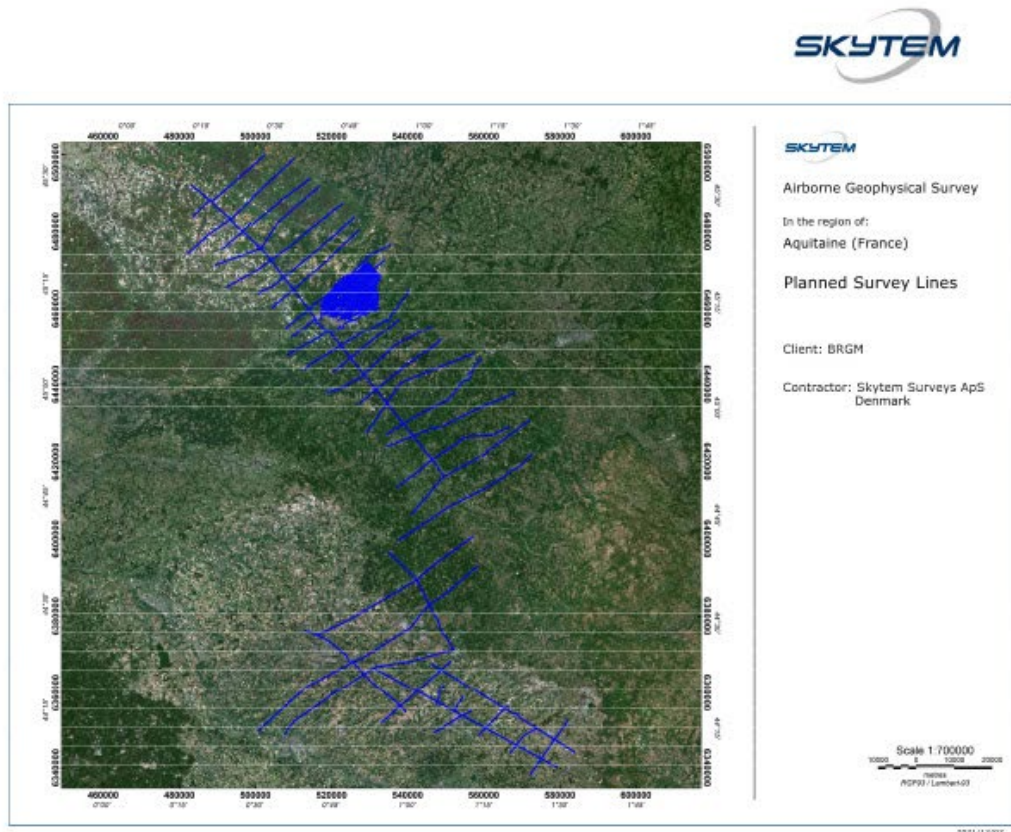


Figure 1. Survey outline. Blue lines representing planned survey lines.

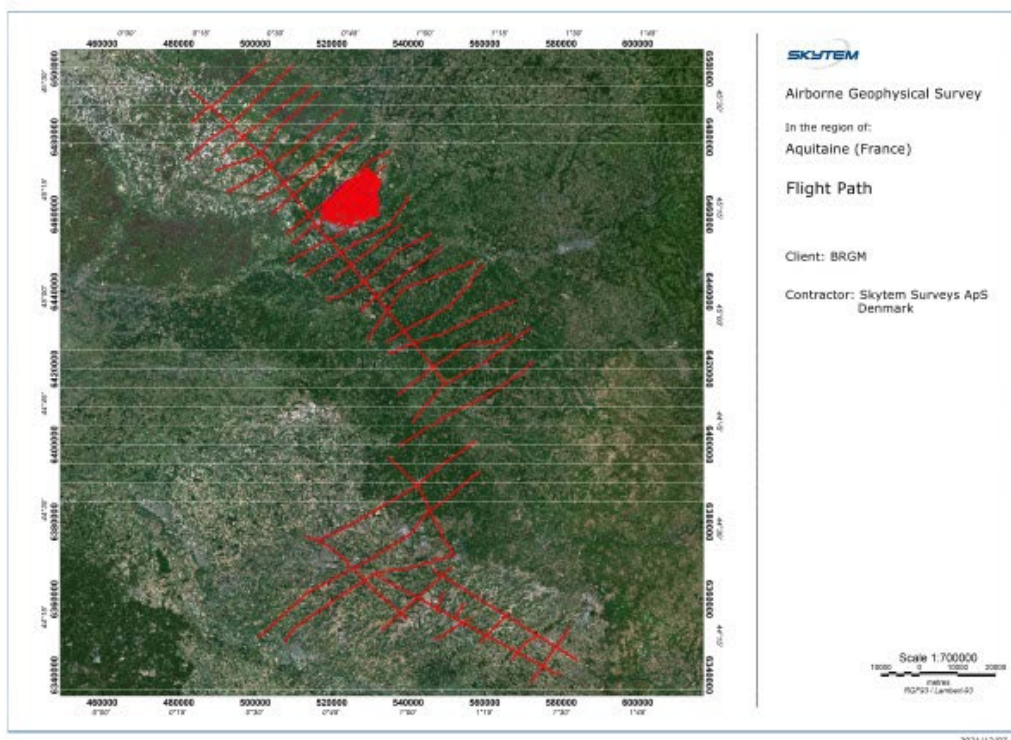


Figure 2 Flown lines (red) superimposed on planned lines (blue).



Flight Parameters

The nominal terrain clearance is 30-50 m, with an increase over forests, power lines, or any other obstacles or hazards. The safe flying height during the survey is always based on the pilot's assessment of risk and deviations from nominal values are at the discretion of the pilot.

The nominal production airspeed is 60-80 kph for a flat topography with no wind. This may vary in areas of rugged terrain and/or windy conditions.

Average values and standard deviations of survey flight parameters are found in Table 4.

Control parameter		Average Value	Standard Deviation
Ground speed*)		76.5 kph	20.3 kph
Processed height		48.4 m	12.1 m
Tilt angle	X	7.1 degrees	5.5 degrees
	Y	1.9 degrees	1.7 degrees
Low Moment Current		7.0 A	0.0
High Moment Current		112.9 A	0.1
Tx temperature		33.5 °C	-

Table 4 Flight parameters

*) Actual speed varies as a function of day and flight direction due to different wind directions and magnitude.



Flight Reports

For each flight, a report with key information regarding the data acquisition is made in the field. Listed in the reports are type of flight activity, weather and special data parameters and other events which may influence the data. Selected information from the flight report is shown in Table 5 and Table 6.

Flight	Temperature (C)	Wind (m/s)	Visibility	Description
20210909.02_0_pos	24	0-1	Good	Cloudy
20210909.03_high_alt	24	0-1	Good	Cloudy
20210909.04	24	1-2	Good	Cloudy
20210910.01	21	1-2	Good	Cloudy
20210910.02	23	0-1	Good	Clear skies
20210911.01_0_pos	25	0-1	Good	Clear skies
20210911.02_0_pos	25	0-1	Good	Clear skies
20210911.03_0_pos	26	1-2	Good	Clear skies
20210911.04	25	0-1	Good	Clear skies
20210913.01	15	0-1	Good	Clear skies
20210913.02_0_pos	25	0-1	Good	Clear skies
20210913.03	25	0-1	Good	Cloudy
20210914.01	20	0-1	Good	Overcast
20210914.02	27	0-1	Good	Overcast
20210915.01	20	1-2	Good	Overcast
20210915.02	28	0-1	Good	Sunny, high clouds
20210915.03	25	0-1	Good	Sunny, high clouds
20210916.01	20	0-1	Good	Overcast, scattered rain.

Table 5 Weather report



Flight	Comments
20210909.02_0_pos	0 position
20210909.03_high_alt	High altitude flight.
20210909.04	Test lines.
20210910.01	Production.
20210910.02	Production.
20210911.01_0_pos	0 position.
20210911.02_0_pos	0 position.
20210911.03_0_pos	0 position.
20210911.04	Production.
20210913.01	Production.
20210913.02_0_pos	0 position.
20210913.03	Production.
20210914.01	Production.
20210914.02	Production.
20210915.01	Production.
20210915.02	Production.
20210915.03	Production.
20210916.01	Production.

Table 6 Flight report



Instruments

This section provides an overview of airborne as well as ground base instruments, throughout technical descriptions are provided in Appendix 1.

Airborne unit

The airborne instrumentation comprising a SkyTEM312M system includes a time domain electromagnetic system, a magnetic data acquisition system and an auxiliary data acquisition system containing two inclinometers, two altimeters and two GNSS'. All instruments are mounted on the frame suspended ~40 m below the helicopter, the generator used to power the transmitter is suspended between the frame and the helicopter, ~30 m below the helicopter. A picture of the airborne SkyTEM312M unit is seen on Figure 3, and a sketch of the instrumentation is seen on Figure 4.



Figure 3 SkyTEM312M Airborne unit.

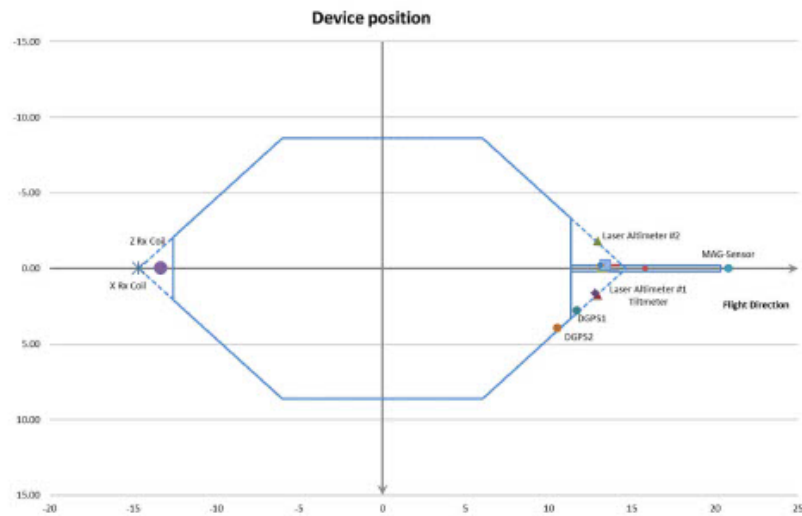


Figure 4 Sketch showing the frame and the position of the basic instruments. The blue line defines the transmitter loop. The horizontal plane is defined by (x,y) .

Ground base stations

The GNSS and magnetic base stations were positioned in the vicinity of the survey area.

GNSS base station

The GNSS base station were placed at a location of maximum possible view to satellites and away from metallic objects that could influence the GNSS antenna.

Table showing the GNSS base station location:

GNSS Base station	Lat	Lon	Ellipsoidal height
Tocane Saint Apre	45.219578°	0.479771°	166.9 m
Belves Aerodrome	44.783516°	0.959387°	244.2 m

Magnetometer base station

The base station magnetometer was placed in a location of low magnetic gradient, away from electrical transmission lines and moving metallic objects, such as motor vehicles and aircrafts.



The table below shows the location of the magnetic base station:

Magnetometer Base station (#)	Lat	Lon	Elevation
Tocane Saint Apre (21)	45.219501°	0.477688°	150 m
Tocane Saint Apre (25)	45.219833°	0.477640°	150 m
Belves Aerodrome (21)	44.784168°	0.956751°	240 m
Belves Aerodrome (25)	44.784334°	0.956311°	239 m

Data Acquisition

The SkyTEM312M system setup is a dual moment configuration containing a Low Moment (LM) with a peak moment of ~4,800 NIA and a High Moment (HM) with a peak moment of ~ 450,000 NIA.

A dual moment system provides a major advantage over single moment systems in that it is possible to measure a wider range of time gates. In LM mode early time gates can be measured allowing more accurately resolution in the near surface while in the HM mode, deep penetration can be achieved.

Data from two GNSS receivers are recorded by the EM data acquisition system while a third GNSS is recorded by the magnetic data acquisition system. The GNSS systems are used for time stamping, positioning, and correlation of the EM and magnetic datasets. All recorded data are marked with a time stamp used to link the different data types.

The time stamp is in UTC/GMT and the formats are either,

- Date and Time defined as; yyyy/mm/dd hh:mm:ss.sss
- or
- Datetime values defined as the decimal number of days since 1900-01-01



Gate times

Gate center times, raw and calibrated, are presented in Table 7 and Table 8. All times are referred to start of turnoff of ramp down.

Calibration parameters:

Low Moment

Shift factor: 0.9 (on the raw dB/dt data)

Time shift: -1.9×10^{-6} s

High Moment

Shift factor: 0.95 (on the raw dB/dt data)

Time shift: -2.5×10^{-6} s

HM gate times on the 312 system are shifted 350 μ s, in addition to the time shift of -2.5×10^{-6} s, with respect to start of turnoff ramp. This is done to move the gates away from the ramp.

HM effective calibrated Gate Center Times (GCT_cal):

Gate Center Time calibrated = (Gate Center Time) + (HM_shift) + (time shift)

Calibrated gate center times found in Table 7 and Table 8 for LM and HM, respectively correspond with the processed data (Geosoft GDB). If data from the GDB is inverted the calibrated gate center times should be applied.

Aarhus Workbench handles time shift and calibrations automatically as they are defined in the geometry file (.gex).

The earliest gates are not used as those are in the transition zone.



Gate #	GateOpen (μs)	Gate Close (μs)	Gate width (μs)	Raw Gate center (μs)	LM Calibrated Gate Center Time (μs)	Comment
1	0.43	1.00	0.57	0.715	-1.185	Not Used
2	1.43	3.00	1.57	2.215	0.315	Not Used
3	3.43	5.00	1.57	4.215	2.315	Not Used
4	5.43	7.00	1.57	6.215	4.315	Not Used
5	7.43	9.00	1.57	8.22	6.315	Not Used
6	9.43	11.00	1.57	10.22	8.315	Not Used
7	11.43	13.00	1.57	12.22	10.315	Not Used
8	13.43	16.00	2.57	14.72	12.815	LM
9	16.43	20.00	3.57	18.22	16.315	LM
10	20.43	25.00	4.57	22.72	20.815	LM
11	25.43	31.00	5.57	28.22	26.315	LM
12	31.43	39.00	7.57	35.22	33.315	LM
13	39.43	49.00	9.57	44.22	42.315	LM
14	49.43	62.00	12.57	55.72	53.815	LM
15	62.43	78.00	15.57	70.22	68.315	LM
16	78.43	98.00	19.57	88.22	86.315	LM
17	98.43	123.00	24.57	110.72	108.815	LM
18	123.43	154.00	30.57	138.72	136.815	LM
19	154.43	200.00	45.57	177.22	175.315	LM
20	200.43	246.00	45.57	223.22	221.315	LM
21	246.43	292.00	45.57	269.22	267.315	LM
22	292.43	384.00	91.57	338.22	336.315	LM
23	384.43	476.00	91.57	430.22	428.315	LM

Table 7 Gate times LM



Gate #	GateOpen (μs)	Gate Close (μs)	Gate width (μs)	Raw Gate center (μs)	HM Calibrated Gate Center Time (μs)	Comment
1	0.43	1.00	0.57	0.715	348.215	Not Used
2	1.43	3.00	1.57	2.215	349.715	Not Used
3	3.43	5.00	1.57	4.215	351.715	Not Used
4	5.43	7.00	1.57	6.215	353.715	Not Used
5	7.43	9.00	1.57	8.22	355.715	Not Used
6	9.43	11.00	1.57	10.22	357.715	Not Used
7	11.43	13.00	1.57	12.22	359.715	Not Used
8	13.43	16.00	2.57	14.72	362.215	Not Used
9	16.43	20.00	3.57	18.22	365.715	Not Used
10	20.43	25.00	4.57	22.72	370.215	Not Used
11	25.43	31.00	5.57	28.22	375.715	Not Used
12	31.43	39.00	7.57	35.22	382.715	Not Used
13	39.43	49.00	9.57	44.22	391.715	Not Used
14	49.43	62.00	12.57	55.72	403.215	Not Used
15	62.43	78.00	15.57	70.22	417.715	Not Used
16	78.43	98.00	19.57	88.22	435.715	HM
17	98.43	123.00	24.57	110.72	458.215	HM
18	123.43	154.00	30.57	138.72	486.215	HM
19	154.43	200.00	45.57	177.22	524.715	HM
20	200.43	246.00	45.57	223.22	570.715	HM
21	246.43	292.00	45.57	269.22	616.715	HM
22	292.43	384.00	91.57	338.22	685.715	HM
23	384.43	476.00	91.57	430.22	777.715	HM
24	476.43	614.00	137.57	545.22	892.715	HM
25	614.43	798.00	183.57	706.22	1053.715	HM
26	798.43	1028.00	229.57	913.22	1260.715	HM
27	1028.43	1304.00	275.57	1166.22	1513.715	HM
28	1304.43	1626.00	321.57	1465.22	1812.715	HM
29	1626.43	2040.00	413.57	1833.22	2180.715	HM
30	2040.43	2546.00	505.57	2293.22	2640.715	HM
31	2546.43	3190.00	643.6	2868.2	3215.715	HM
32	3190.43	4018.00	827.6	3604.2	3951.715	HM
33	4018.43	5030.00	1011.6	4524.2	4871.715	HM
34	5030.43	6272.00	1241.6	5651.2	5998.715	HM
35	6272.43	7744.00	1471.6	7008.2	7355.715	HM
36	7744.43	9584.00	1839.6	8664.2	9011.715	HM
37	9584.43	11654.00	2069.6	10619.2	10966.715	HM
38	11654.43	14414.00	2759.6	13034.2	13381.715	HM

Table 8 Gate times HM



Waveform

The waveform is measured on site on the September 4th, 2021, using the 50 Hz script applied for this survey and with HM at 111.3 Amp.

The waveform is measured using a current probe (turn-on ramp) and a pick-up coil (outputs dI/dt) for the turn-off ramp. The approximation to the measured waveform is applied in modelling of the EM data. Figure 5 and Figure 6 show the approximated up and down ramp and waveform details are presented in Table 9 to Table 12.

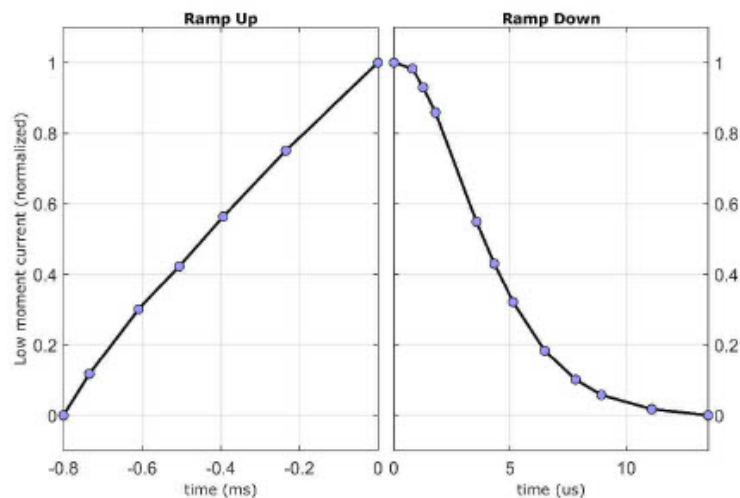


Figure 5 Ramp up and down at 375 Hz (LM). The current is normalised.

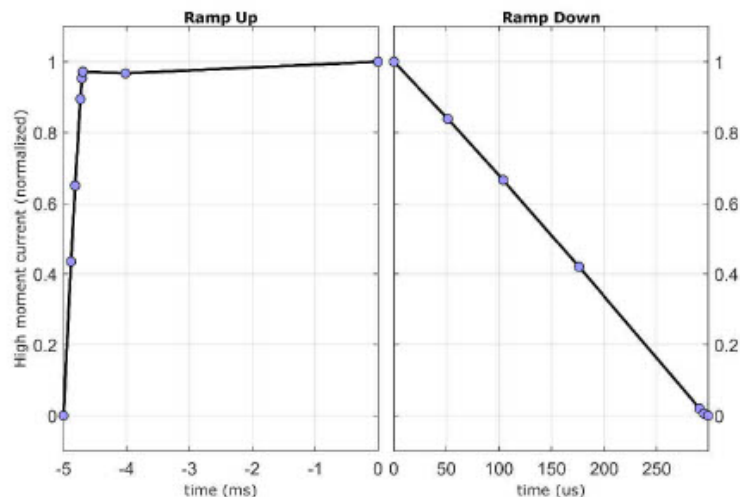


Figure 6 Ramp up and down at 25 Hz (HM). The current is normalised.



LM

Parameter	Value
Base frequency	375 Hz
Current range	7 Amp

Table 9: Waveform parameters for LM

Time [s]	Normalized current
-8.0000E-04	0.0000E+00
-7.3439E-04	1.1699E-01
-6.0915E-04	3.0059E-01
-5.0570E-04	4.2230E-01
-3.9419E-04	5.6277E-01
-2.3442E-04	7.5053E-01
0.0000E+00	1.0000E+00
7.9370E-07	9.8235E-01
1.2657E-06	9.2985E-01
1.7937E-06	8.5904E-01
3.5537E-06	5.4859E-01
4.3137E-06	4.3001E-01
5.1297E-06	3.2102E-01
6.4897E-06	1.8347E-01
7.8097E-06	1.0122E-01
8.9217E-06	5.7607E-02
1.1090E-05	1.7538E-02
1.3522E-05	0.0000E+00

Table 10: Normalized current for LM



HM

Parameter	Value
Base frequency	25 Hz
Current range	110 Amp

Table 11: Waveform parameters for HM

Time [s]	Normalized current
-5.0000E-03	0.0000E+00
-4.8794E-03	4.3493E-01
-4.8147E-03	6.5023E-01
-4.7310E-03	8.9467E-01
-4.7082E-03	9.5324E-01
-4.6943E-03	9.7167E-01
-4.0172E-03	9.6721E-01
0.0000E+00	1.0000E+00
5.1392E-05	8.3870E-01
1.0391E-04	6.6623E-01
1.7606E-04	4.2034E-01
2.9081E-04	1.9869E-02
2.9518E-04	5.9836E-03
2.9906E-04	0.0000E+00

Table 12: Normalized current for HM

High Altitude Test

The High altitude test were flown in 1000 m above terrain prior to production and it is flown with a special script, where the data are measured with the transmitter turned both on and off.

The three images below on Figure 7 shows raw LMZ and HMZ data from a interval during the high altitude test 20210909.03. LMZ are shown without and with PFC applied.

Data were recorded with the transmitter TX on (blue curves) and with the transmitter off (black curves) in an altitude free of signals from the ground. Hence, only the system itself, outcoming noise sources e.g. radio transmitters will be seen in the recorded data.

Individual sounding curves with the transmitter on are shown in grey.

The blue and dark grey lines show the mean (μ) of the signal with the transmitter turned on and off, respectively. The stippled blue and black curves show the standard deviation (σ) on the raw EM data.



The data from the high altitude test shows that the background noise is comparable to what is recorded with the transmitter on.

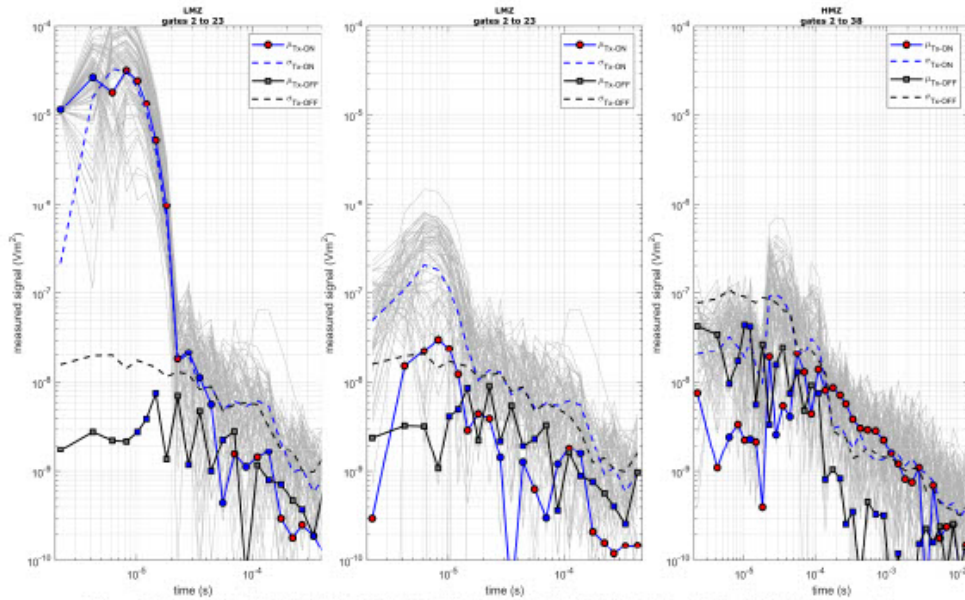


Figure 7 High altitude test data from flight 20210909.03. LMZ without (left) and with PFC (middle), and HMZ (right)

A zero position flight was conducted after adjustments of the zero position on flight 20210911.03 and 20210913.02. The results of these flights are presented on Figure 8 and 9.

The data collection for these tests were done with the zero position script, and this means that there is no HMZ data to present but only LMZ. In the figures are both the PFC and the non-PFC data.

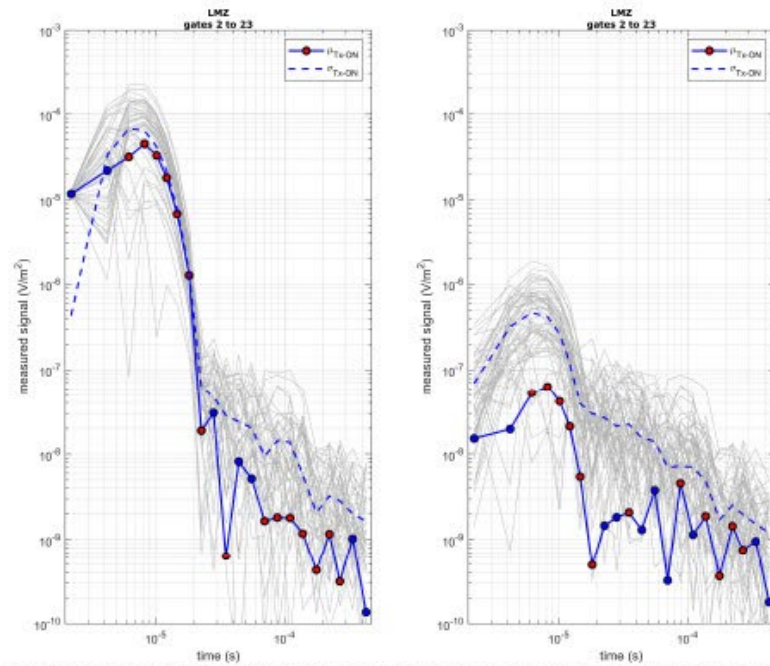


Figure 8 Zero position flight 20210911.03. LMZ without (left) and with PFC (right)

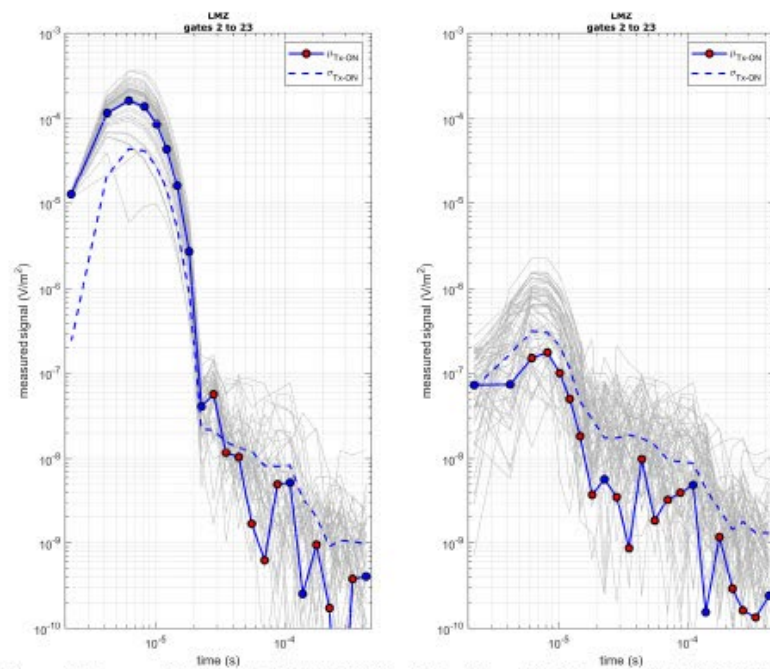


Figure 9 Zero position flight 20210913.02. LMZ without (left) and with PFC (right)



Digital Data

The complete dataset of the SkyTEM survey is delivered as a Geosoft database (GDB) which can be used as input for further processing and gridding and as input to inversion and interpretation software. The channels of the GDB are described in Table 12. Raw data and supporting configuration files in Workbench format are also delivered.

Inversion results

The result of the Spatially Constrained Inversion (SCI) is delivered as a Geosoft database (GDB) and exported to a Geosoft XYZ-file (ASCII data file) containing the modelled layer resistivities. The channels of the GDB and XYZ-files are described in Table 13.

The applied gridding methods, cell size, blanking distance and filtering are listed in Table 14.



Channel description, Survey Data

Parameter	Explanation	Unit
Fid	Unique Fiducial number	seconds
Line	Line number	LLLLLL
Flight	Name of flight	yyyymmdd.ff
DateTime	DateTime format	Decimal days
Date	Date	yyyymmdd
Time	Time	hhmmss.zzz
AngleX	Angle in flight direction	Degrees
AngleY	Angle perpendicular to flight direction	Degrees
Height	Filtered height measurement	Meters
Lon**	Latitude/Longitude, WGS84	Decimal degrees
Lat**	Latitude/Longitude, WGS84	Decimal degrees
E_UTM31N*	UTM Zone 31 N, WGS84	Meter
N_UTM31N*	UTM Zone 31 N, WGS84	Meter
E_RGF93*	RGF93 / Lambert-93	Meter
N_RGF93*	RGF93 / Lambert-93	Meter
DEM	Digital Elevation Model	M. a. sl.
Alt	GNSS Altitude	M. a. sl.
GdSpeed	Ground Speed	km/h
Curr_LM	Current, low moment	Amps
Curr_HM	Current, high moment	Amps
LM_Z_G01[xx]**	Geosoft array. Normalized LM Z-coil value	pV/(m4*A)
HM_Z_G01[xx]**	Geosoft array. Normalized HM Z-coil value	pV/(m4*A)
HM_X_G01[xx]**	Geosoft array. Normalized HM X-coil value	pV/(m4*A)
PLNI_50Hz	Amplitude spectral density of the power line noise 50 Hz	-
Bmag_raw	Total Magnetic Intensity Magnetic base station data	-
Diurnal	Diurnal variation Magnetic base station data	nT
Mag_Raw	Total Magnetic Intensity Raw magnetic data	nT
Mag_Cor	Total Magnetic Intensity, Magnetic data Filtered and diurnal corrected	nT
RMF	Residual magnetic Field IGRF corrected Final corrected data	nT
TMI	Total Magnetic Intensity IGRF recalculated	nT
Tau	Adaptive Tau decay constant	s
Tau Lastgate	Adaptive Tau, last applicable gate	-

Table 12 Channel description, survey data

*) Data positions refer to the center of the frame.

**) The first valid gates are: 16 (HM), 8 (LM).



Channel description, EM inversion database

Parameter	Explanation	Unit
Line	Line number	LLLLLL
E	RGF93 / Lambert-93	Meter
N	RGF93 / Lambert-93	Meter
DTM	Digital Terrain Model	Meters above mean sea level
ResI1	Residual of data	-
Height	Filtered Height Measurement	Meter
InvHei	Inverted Height	Meter
DOI	Depth of Investigation	-
Elev[xx]	Elevation of top of layer xx	Meter
Res [xx]	resistivity of layer xx	Ωm
Res [xx]_doi	Masked below DOI of layer xx	Ωm
RUnc[xx]	Relative uncertainty of layer xx	-

Table 13 Channel description, inversion results

Gridding method and parameters

Area	Gridding algorithm	Gridding filter	Cell size	Blanking distance
Aquitaine	Minimum curvature	-	300 m	330 m

Table 14 Geosoft gridding

Data processing and presentation

This section covers processing of auxiliary data and magnetic data and processing and inversion of EM data and presentations.

All devices (GNSS, Laser altimeters, inclinometers) are moved to the centre of the frame and corrected for the tilt of the frame hence all data positions refer to the center of the frame. Data is split at the beginning and end of each planned flight line.

After the initial filtering all data are resampled to 10Hz.



Auxiliary data

Tilt processing

The X and Y angle processing involves manual and automated routines using a combination of the SkyTEM in-house software SkyLab and Geosoft.

The processing involves the following steps:

1. 3 sec box filter (SkyLab)
2. Low pass filtering of 3.0 sec. (Geosoft)

Height processing

The height processing involves manual and automated routines using a combination of the SkyTEM in-house software SkyLab and Geosoft.

The processing involves the following steps:

1. Keeping the 5 highest values pr. second and discarding the rest to correct for the canopy effect (treetop filter) (SkyLab)
2. 3 sec running box filter (SkyLab)
3. Tilt correction (SkyLab)
4. Averaging of the two laser values (SkyLab)
5. Additional filters:
 - a. Low pass filter of 3.0 sec (Geosoft)

GNSS processing

The GNSS has been processed using the Waypoint GrafNav PPP processing tool. The standard airborne settings have been used.

1. Import of airborne files (Rover)
2. Download of precise Ephemeris and Almanacs
3. Processed using Precise Point Positioning (PPP) setup with the L2 band of the GNSS rover. The PPP process eliminates the need of base station data and the improved precision is obtained during the post-processing based on the downloaded precision files
4. Export as .txt file

The GNSS.txt files are used as input to the SkyLab software assuring GNSS corrected data in the processed files.

The ground speed, altitude, latitude and longitude from the processed GNSS' are imported into Geosoft and merged into the final database where the coordinates are converted into RGF93 / Lambert-93 and a low pass filter of 3.0 sec is applied.



Digital elevation model

A digital elevation model (DEM) has been calculated by subtracting the filtered laser altimeter data from the GNSS elevation. All steps related to the DEM are carried out Geosoft.

The processing of the final DEM involves the following steps:

1. Filtering and processing of the laser altimeter height as described above
2. DEM data received by subtraction of final filtered laser data from final processed GNSS altitude data

Figure 10 shows the DEM of Aquitaine.

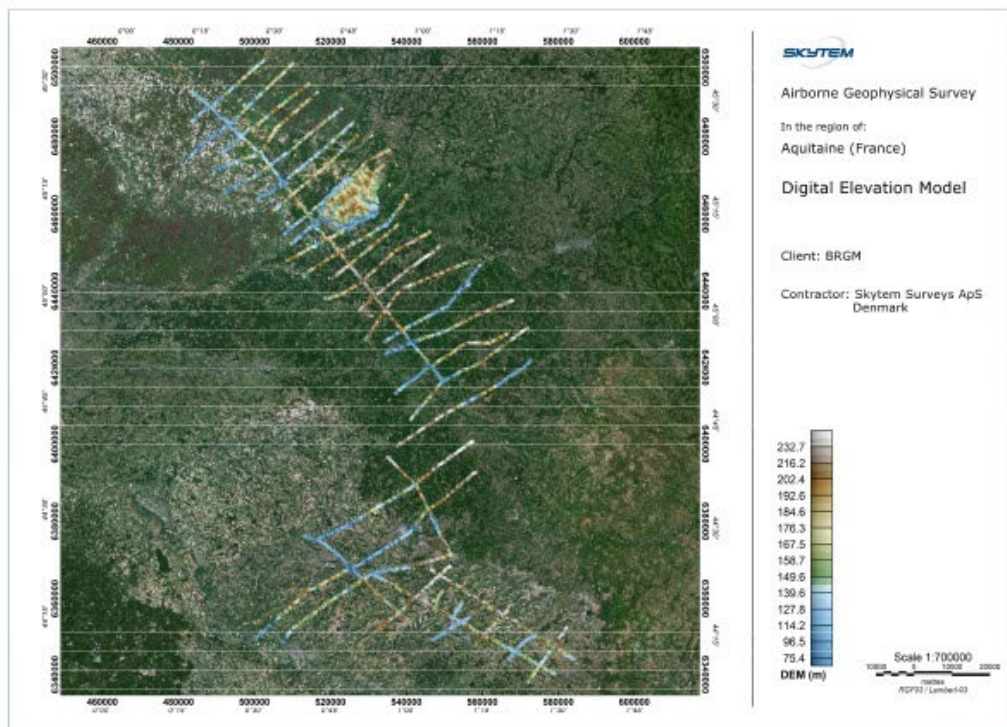


Figure 10 Digital Elevation Model (DEM) in meter above sea level.



Magnetic data

Final processing of the magnetic data involves the application of traditional corrections to compensate for diurnal variation and heading effects prior to gridding. Geosoft magnetic data processing tools are applied as follows:

- Processing of static magnetic data acquired on magnetic base station
- Pre-processing of airborne magnetic data
 - Stacking of data to 10 Hz in SkyLab.
 - Moving positions to the center of the system in SkyLab.
- Processing and filtering of airborne magnetic data
- Standard corrections to compensate the diurnal variation
- Lag and Heading correction
- IGRF correction
- Levelling
- Gridding

Processing of base station magnetic data

The base station magnetometer data was merged into the base station Geosoft database on daily basis for further processing.

The following filtering was applied:

- Manual despiking to remove spikes
- Interpolation (Geosoft Prediction)
- Fraser Low-pass filter (width 60 sec)
- IGRF correction
 - IGRF: coefficients defined by IGRF 13th generation
 - Date: variable according to date of acquired data
 - Position: fixed GNSS WGS84 longitude, latitude and elevation of magnetic base station.
- Residual magnetic field (RMF) calculated
- The average (Tocane Saint Apre: 47002.96 nT, Belves Aerodrome: 46866.82 nT) of the base data was subtracted from RMF to calculate the Diurnal.

Processed residual magnetic data from the magnetic base station representing short term variations was merged with airborne magnetic data.



Processing and Filtering of airborne magnetic data

Airborne magnetic data is filtered and interpolated as follows:

- Adjustment of the data for the time lag between the GNSS position and the position of the magnetic sensor
- Data resampling to 10 Hz (stacking)
- Manual despiking to remove spikes and spurious data
- Geosoft processing:
 - Fraser Low-pass filter (width 30 sec)

Corrections to the magnetic data

The following corrections are applied to the airborne magnetic data:

- Correction for diurnal variation using the digitally recorded ground base station magnetic values as described above
- A lag correction of -0.20 sec is applied
- A heading correction is applied
- IGRF correction

Lag correction

Test lines were flown over a magnetic anomaly, in this case a railway track. This anomaly is used to estimate any time shift, lag, there could be present.

The test was conducted on flight 20210914.02 and it resulted in an estimated lag correction of -0.20 seconds that needs to be applied to the magnetic data, the result is presented in Figure 11.

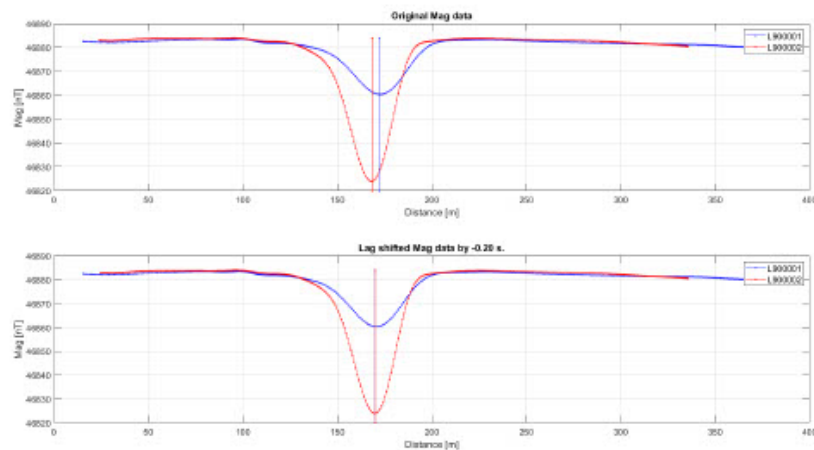


Figure 11 Result of Mag lag test, before and after correction.



Figure 12 Flight lines for the lag test.

Heading correction

A clover test was performed to estimate if any heading correction were needed.

The heading test were completed on flight 20210915.01.

The result from the heading test is presented below and has been applied to the data with the Heading correction tool in Geosoft.

The flight lines for the test are presented in Figure 13.

Direction	Lines	Heading correction (nT)
56.1	999004	0.368
161.0	999006	-0.219
240.8	999002	-0.153
335.4	999007	0.111

Table 15 Heading test result.

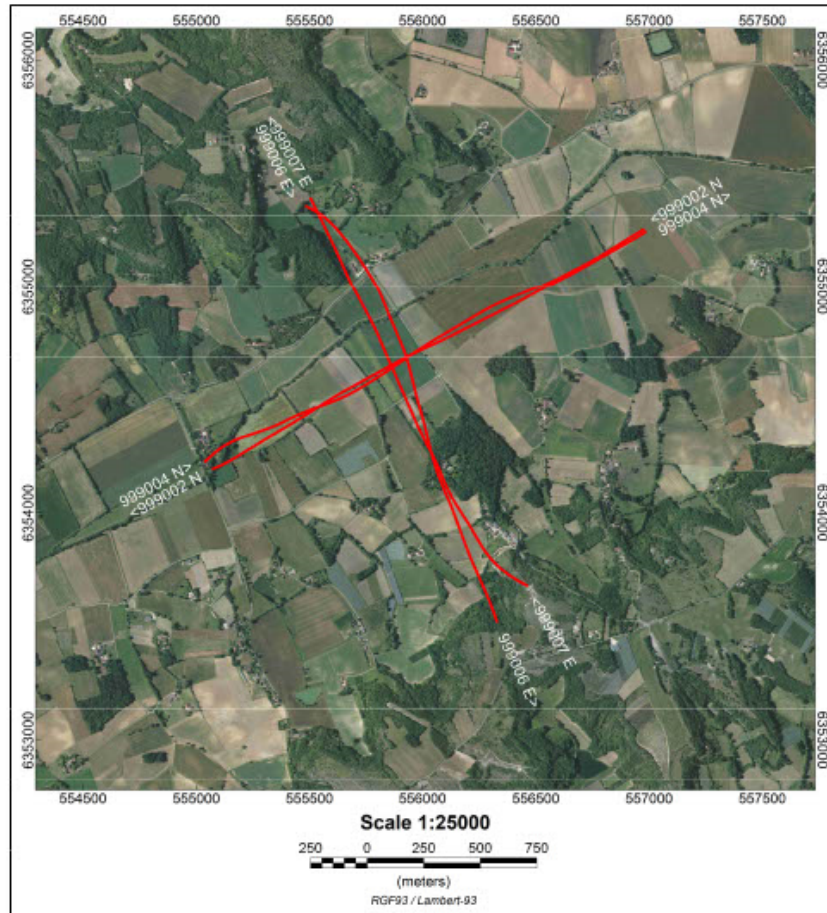


Figure 13 Flight lines for heading test.

IGRF correction

The International Geomagnetic Reference Field (IGRF) is a long-wavelength regional magnetic field calculated from permanent observatory data collected around the world. The IGRF is updated and determined by an international committee of geophysicists every 5 years. Secular variations in the Earth's magnetic field are incorporated into the determination of the IGRF.

The IGRF model is calculated before levelling using the following parameters:

IGRF model year: 2020, IGRF 13th generation

Date: variable according to date channel in database

Position: variable according to GNSS WGS84 longitude and latitude

Elevation: variable according to magnetic sensor altitude derived from GNSS data



Levelling

The Geosoft Levelling Toolkit is used to apply the levelling of the magnetic data. It is an iterative process of first assessing the tie line differences against the production lines and adjust the tie lines if needed, and second assessing the production line differences against the adjusted tie lines.

TMI recalculation

The outcome of processed magnetic data after all corrections and levelling is the Residual magnetic field (RMF).

Total magnetic intensity (TMI) is recalculated to average altitude (0 m) by adding the IGRF regional field back to RMF on a fixed date (2021/09/15) for each individual point. The corrected data is used to generate the Residual Magnetic Field (RMF) and Total Magnetic Intensity (TMI) grid.

Figure 14 shows the total magnetic intensity of Aquitaine.

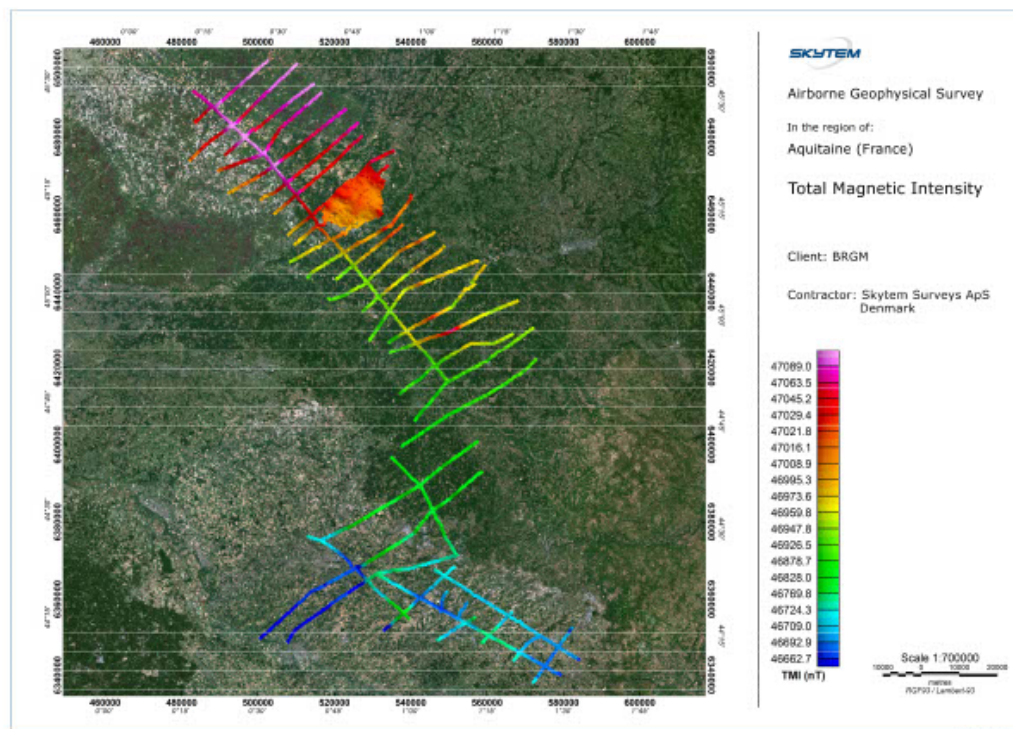


Figure 14 Total Magnetic intensity



Power Line Noise Intensity (PLNI)

The PLNI is a powerful tool for identifying powerline noise effect on EM and magnetic data. The PLNI monitor values are derived from a frequency analysis of the raw Z-component EM data. For every low moment EM data block a PLNI value is obtained by Fourier transformation of the measured values for the latest low moment gate. The Fourier transformation is evaluated at the local power transmission frequency yielding the amplitude spectral density of the power line noise.

CAUTION - When evaluating the PLNI values one should be aware of the following factors that may give rise to anomalous PLNI patterns unrelated to the actual power line noise level:

- The low moment EM data are measured at a rate lower than the Nyquist criterion for the applied system bandwidth which means that some of the frequency components contained may represent aliased frequencies. However, the considerable integration time of the latest low moment gate reduces this problem significantly.
- Other noise sources than power line noise may contribute to the total noise spectral density in the data at the power transmission frequency. When power line noise is present it tends to dominate all such other noise sources.
- The presented PLNI values are not corrected for fly height or frame angles, which means that adjacent lines crossing the same power line may not exhibit the same values of PLNI.

Figure 15 shows the PLNI of Aquitaine.

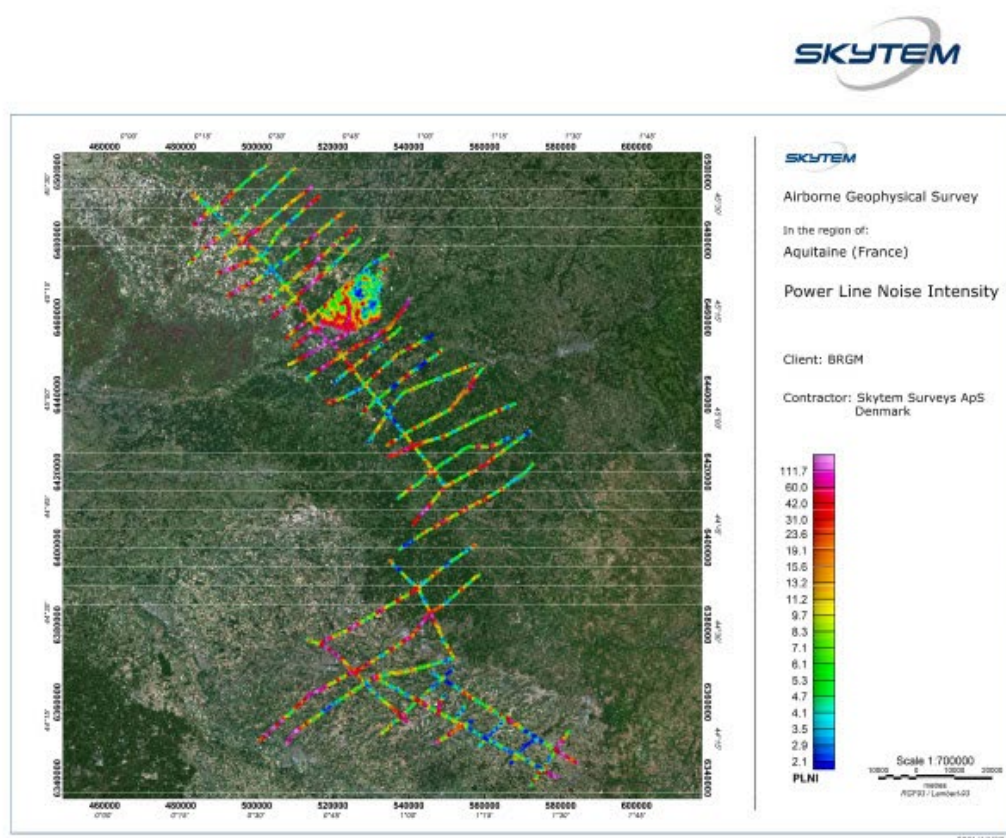


Figure 15 Power Line noise Intensity (PLNI). Warm colours (red) represent high intensity, cold colours (blue) low intensity.



EM data

This section covers processing of EM data, including primary field correction (PFC) and filtering of EM data.

Primary Field Compensation (PFC)

The magnetic field coupling between the receiver coils and the transmitter loop is continuously hardware-monitored, providing a separate value for the magnetic field coupling during each transient sounding. These data are used for raw data correction in a separate post-processing step. The primary field compensation technique has proven stable and has routinely yielded a reduction of the primary field influence in very early time gates by a factor exceeding 50.

EM Filtering

The PFC data is the input for further processing. The data are normalized in respect to effective Rx coil area, Tx coil area, number of turns and current giving the unit $[pV/(m^2 \cdot A)]$.

The EM data is filtered adaptively based on the signal-to-noise ratio. The applied EM filtering method is based on iterative weighted spline fitting routines, which operate in positive/negative symmetric transform spaces. The data weighting scheme relies on an extensive noise evaluation performed on the individual gate values of the raw data decays. Optimised sets of averaging filters are used for each measured moment and type of receiver coil in a stepwise averaging process. This allows for optimal suppression of motion induced noise as well as cultural noise components, while keeping track of the resulting data uncertainty.

The provided EM grids are corrected for variations in flying height. All grids are shifted to a level as if it was flown in 48.4 m above the ground.

No height correction has been applied to the raw EM data channels in the delivered Geosoft database and data file.

Figure 14 shows an example of the HM Z data from Aquitaine. Geosoft grids of EM Z channels are included in the digital data delivery.

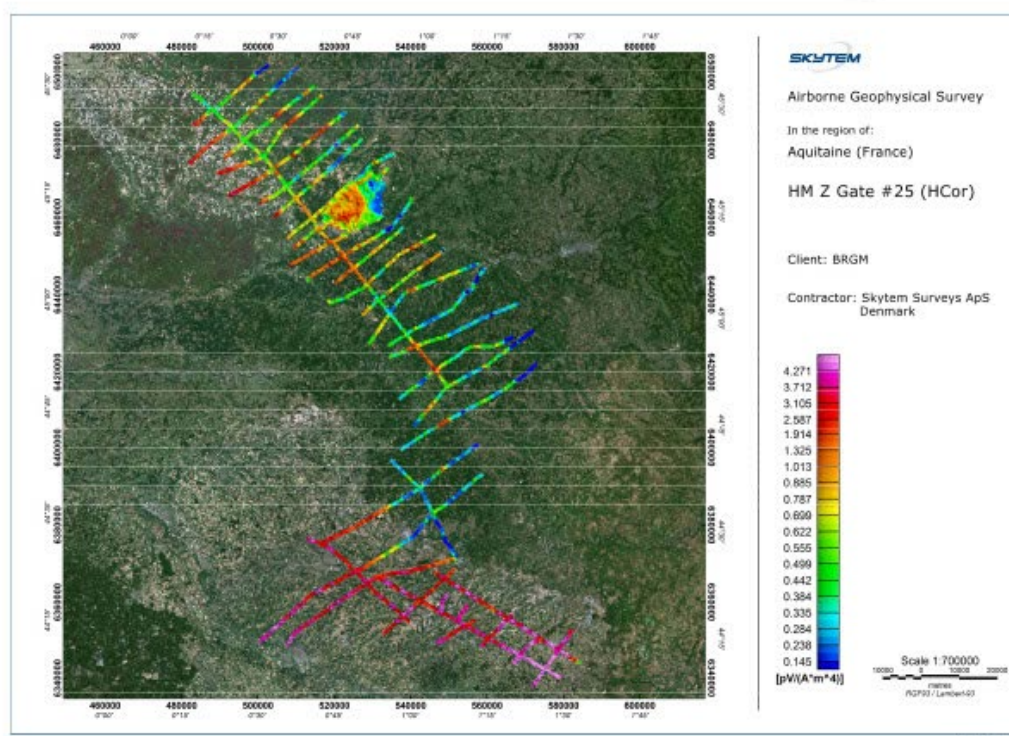


Figure 16. High Moment Z coil (gate 25). Warm colours represent high signal.



Adaptive Time Constant (TAU)

An adaptive Tau calculation has been performed on HMZ data.

The adaptive Tau method treats each sounding curve individually and involves the following steps for each sounding position:

- Identifying the latest gate with a relative data uncertainty below a user-defined threshold. Later gates are regarded as having too low S/N ratio to be reliably used in the subsequent fitting operation.
- Fitting an exponential function to a user-defined number of consecutive gates up to and including the latest gate defined above. The fitting procedure follows the latter formulation given in (Weisstein, E. W.) using end-of-ramp referenced gate times.

For the present survey, the upper threshold for acceptable relative uncertainty is set to 0.4 and 5 consecutive gates are used in each exponential fit.

In addition to a map of adaptive Tau values, Figure 17, a map of latest gate used are made and can be found in the digital data delivery.

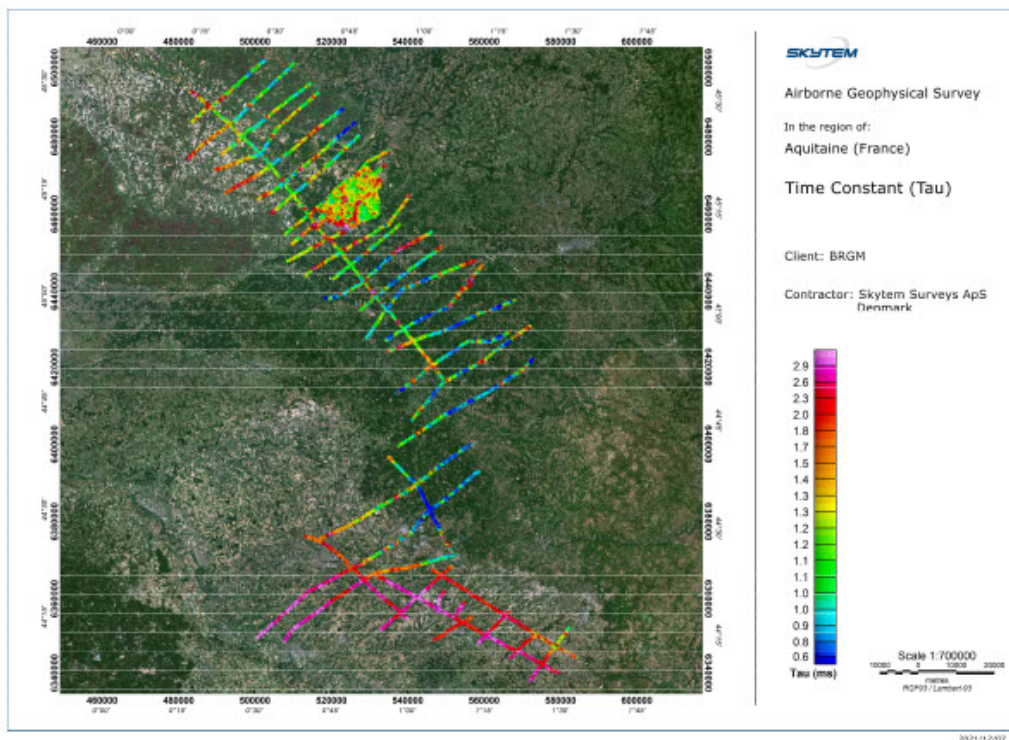


Figure 17. Tau calculation on HM Z EM data.



Inversion

In this section, the particulars of modelling and inversion of SkyTEM data from Aquitaine will be described with reference to the more general material found in Appendix 2.

The SkyTEM data have been processed and inverted using Spatially Constrained Inversion (SCI) in Aarhus Workbench, a unique software package initially developed at Aarhus University, Denmark. In this SCI algorithm a group of time-domain EM (TEM) soundings are inverted simultaneously using 1-D models. Each sounding yields a separate layered model, but the models are constrained spatially.

The result of the SCI inversion is a model section that varies smoothly along and across the profiles and yields a resistivity model that combines the very good shallow depth resolution offered by the low moment data and the larger depth of investigation from the high moment data. See Figure 18.

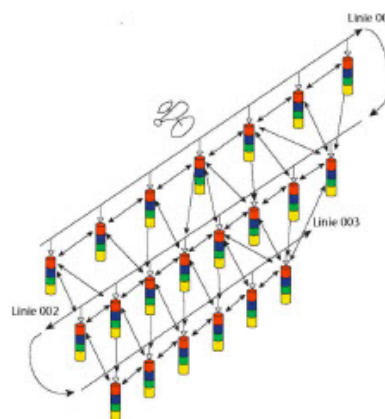


Figure 18. Schematic presentation of the SCI setup. Constraints connect not only soundings located along the flight line, but also those across them (figure from hgg.au.dk).

Initial model and optimisation norm

The SCI code is run in multi-layer, smooth-model mode in which the layer thicknesses are fixed and the data are inverted only for resistivity. In the inversion of the Aquitaine survey the thickness of the first layer was set to 1 m and the depth to the top of the deepest layer boundary was 500 m. While computing the layer thicknesses, the first and last layer boundary scales the model thicknesses automatically using a log distribution. Thicknesses and depths to the top of each layer for the current project are given in Table 14 below.



The input data to the inversion are the LM & HM moments of the Z-component of EM data. The initial model resistivity structure is a homogenous half-space model with an Auto Calculated starting resistivity.

Manually masking of data displaying coupling effects e.g. due to power lines is not part of the current project and therefore cultural effects in the EM data can be present in the final data base.

Layer #	Layer Thickness [m]	Depth to top of layer [m]
1	1.0	0
2	1.2	1.0
3	1.4	2.2
4	1.6	3.5
5	1.8	5.1
6	2.1	6.9
7	2.5	9.1
8	2.9	11.6
9	3.4	14.5
10	3.9	17.9
11	4.6	21.8
12	5.4	26.4
13	6.2	31.8
14	7.3	38.0
15	8.5	45.3
16	9.9	53.7
17	11.5	63.6
18	13.4	75.1
19	15.6	88.4
20	18.1	104.0
21	21.1	122.2
22	24.6	143.3
23	28.7	167.9
24	33.4	196.6
25	38.9	230.0
26	45.3	268.9
27	52.8	314.2
28	61.5	366.9
29	71.6	428.4
30	-	500.0

Table 13 Layer distribution of the multi-layer smooth inversion model.



Model Presentation - Model sections and maps

The models resulting from the inversion are presented as layer resistivity profiles and as grids and maps of mean resistivity in depth intervals in Geosoft and pdf format. Figure 19 and Figure 20 show examples of a layer resistivity profiles and maps respectively. All profiles, grids, images and maps are included in the digital data delivery.

Model Sections

The profile plots consist of four sections; the top section shows the inverted models, with topography, where the resistivity of the individual layers is colour coded according to the colour bar. The resistivity is shown on a logarithmic scale and conductive and resistive features appear with the same weight. The white shading in the analysis section indicates the estimated lower depth of investigation (DOI) (Christiansen, A.V. and Auken, E., 2012). Where the colour fades into the white, the inverted resistivity is determined almost exclusively by the regularization, i.e., the resistivity is essentially undetermined. The measured and inverted flight elevation is shown with a black and blue line, respectively, above the model section.

Below the model section are two plots of the measured data (dots) together with the response of the inverted models (solid lines) for low moment data (LM Z) and high moment data (HM Z). Blank sections in the profile indicate areas where the signal to noise ratio has been too low for any data to be used in the inversion. Essentially the resistivity in those sections can be considered as "Very high" ($>1000 \Omega m$). Alternatively, a man-made conductor has interfered with the signal which can also lead to data being discarded prior the inversion.

The quality of the inversion results can be evaluated by inspecting the residuals, which are shown in the bottom section (Figure 19) as black dots. The data residual is calculated by comparing the measured data responses with the response of the resulting model after inversion. If the residual is in the range of 1, the misfit between the response of the final model and the data is, on average, equal to the noise. If the residual is high, it might be caused by data that are noisier than what the noise model accounts for. This can be seen where resistivity is very high and the signal consequently very low. A high data residual can also be due to the inconsistency between the 1D model assumed in the inversion and the 2D/3D character of the real world. This is seen primarily at the edges of sharp lateral resistivity contrasts. Finally, coupling effects due to power lines and other manmade conductors can also be a source of a high residual and hence a poor data fit.

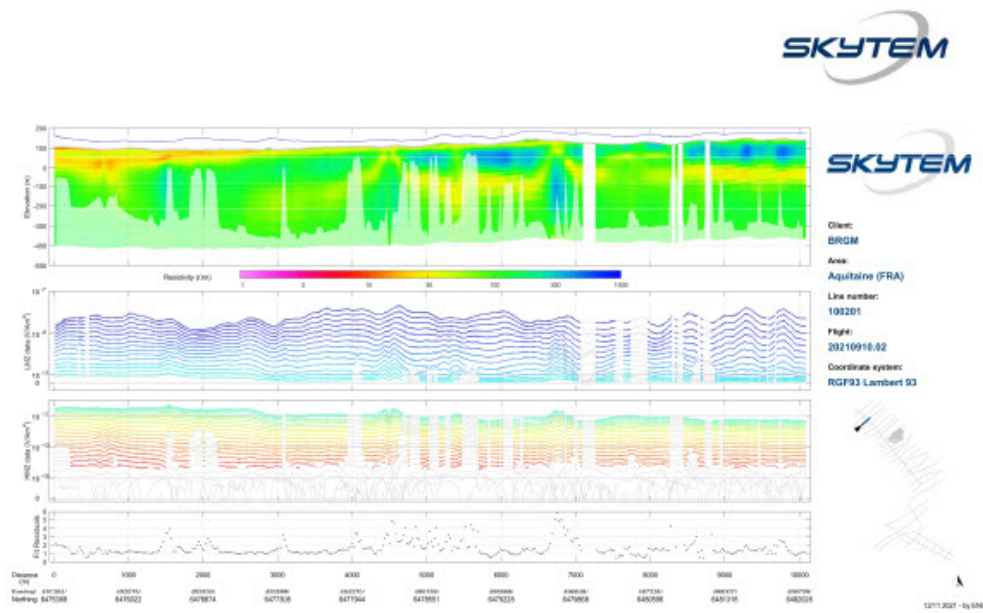


Figure 19 Example of section plot. From top to bottom: resistivity section with flight height and Depth of Investigation (DOI), LM gate plot (data=dots, model=line), HM gate plot (data=dots, model=line), residual.

Layer resistivity maps

The layer resistivity maps show the inverted conductivity for each of the model layers across the survey area. As the thickness of the model layers increases downwards the maps represent varying thickness intervals. The depth interval for each layer is stated on the maps as meters below the surface. Figure 20 shows an example of the resistivity depth plot for layer 9, 14.5 – 17.9 m depth.

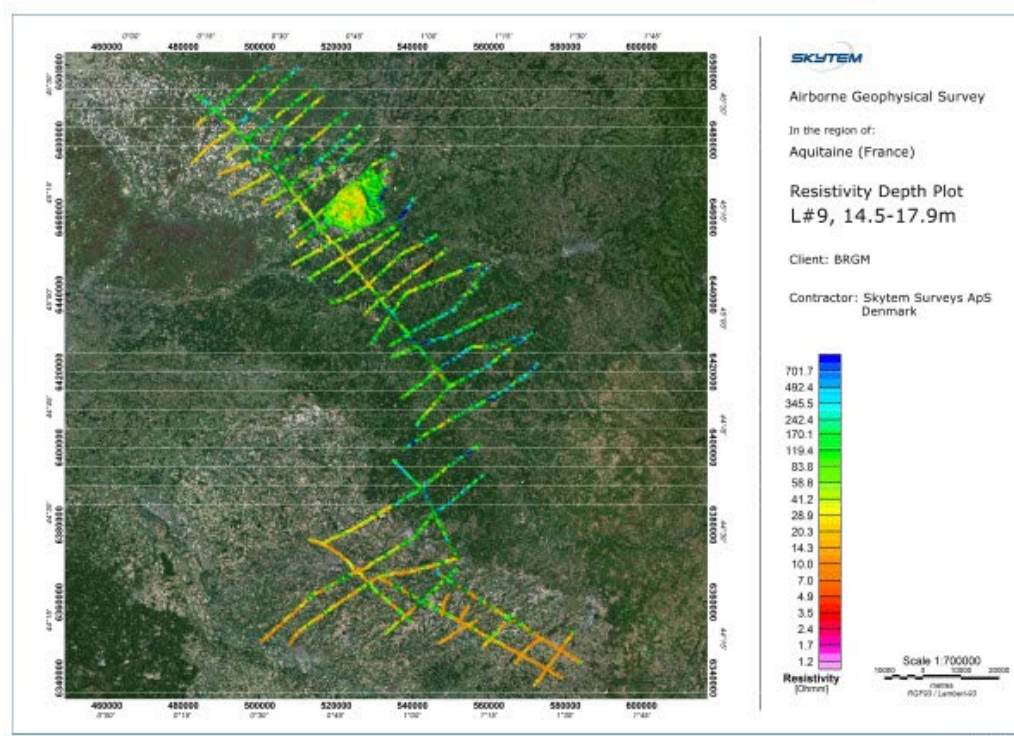


Figure 20. Modelled Layer Resistivity of layer 9 (depth 14.5 m – 17.9 m). Warm colours (red) represent low resistivity, cold colours (blue) high resistivity.



References

- Aarhus University, n.d., Guide to 1D-LCI inversion.
- Auken, E., Foged, N. and Sørensen, K., 2002, Model recognition by 1-D laterally constrained inversion of resistivity data: Proceedings – New Technologies and Research Trends Session, 8th meeting, EEGS-ES.
- Auken, E., Christiansen, A. V., Jacobsen, B. H., Foged, N., and Sørensen, K. I., 2005, Piecewise 1D Laterally Constrained Inversion of resistivity data: *Geophysical Prospecting*, 53, 497–506.
- Christiansen, A.V. and Auken, E., 2012, A global measure for depth of investigation: *Geophysics*, vol 77, No. 4, 171-177.
- Sattel, D., 2005, Inverting airborne electromagnetic (AEM) data with Zohdy's method, *Geophysics*, 70, G77-G85.
- Weisstein, E. W., Least Squares Fitting – Exponential. From MathWorld – A Wolfram Web Resource.
<http://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFittingExponential.html>



Appendix list

Appendix 1: Instruments

Appendix 2: Introduction to Spatially Constrained Inversion

Appendix 1: Instruments

Instrument positions

The instrumentation involves a time domain electromagnetic system, two inclinometers, two altimeters and two GNSS'.

The measurements were carried out, using a setup as described below.

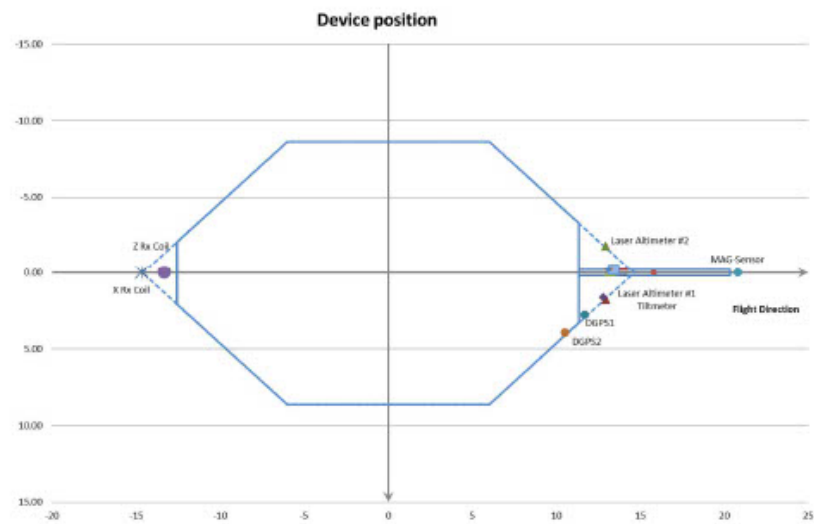


Figure 1 Sketch showing the frame and the position of the basic instruments. The blue line defines the transmitter loop. The horizontal plane is defined by (x, y) .

The location of instruments in respect to the frame is shown in Figure 1 and is given in (x, y, z) coordinates in the table below.

X and y define the horizontal plane. Z is perpendicular to (x, y) . X is positive in the flight direction, y is positive to the right of the flight direction, and z is positive downwards.

The generator used for powering of the transmitter is ~ 30 m below the helicopter.

Device	X	Y	Z
GNSS1 (EM)	11.68	2.79	-0.16
GNSS2 (EM)	10.51	3.95	-0.16
HE1 (altim.)	12.94	1.79	-0.12
HE2 (altim.)	12.94	-1.79	-0.12
Inclinometer 1	12.79	1.64	-0.12
Inclinometer 2	12.79	1.64	-0.12
RX (Z Coil)	-13.31	0.00	-2.00
RX (X Coil)	-14.65	0.00	0.15
Mag sensor	20.80	0.00	-1.30

For the location of instruments see Figure 1.

Transmitter

The time domain transmitter loop can be described as an octagon with the corners listed below:

X	Y
-12.55	-2.10
-6.03	-8.63
6.03	-8.63
11.34	-3.31
11.34	3.31
6.03	8.63
-6.03	8.63
-12.55	2.10

The total area of the transmitter coil defined by the corner points is 342 m² and 68.3 m in circumference.

The key parameters defining the transmitter set up are:

Low Moment

Parameter	Value
Number of transmitter turns	2
Transmitter area	342 m ²
Peak current	7 Amp
Peak moment	~4,800 NIA
Repetition frequency	375 Hz
On-time	800 μ s
Off-time	533 μ s
Duty cycle	60 %
Wave form	Triangular

High Moment

Parameter	Value
Number of transmitter turns	12
Transmitter area	342 m ²
Peak current	110 Amp
Peak moment	~ 450,000 NIA
Repetition frequency	25 Hz
On-time	5000 μ s
Off-time	15000 μ s
Duty cycle	25 %
Wave form	Square



Figure 2 The 342 m² frame in production mode.

Receiver system

The decay of the secondary magnetic field is measured using two independent active induction coils. The Z coil is the vertical component, and the X coil is the horizontal in-line component. Each coil has an effective receiver area of 325 m² (Z), 115 m² (X) and a radius of 0.25 m (Z) and 0.15 m (X).

The receiver coils are placed in a null-position:

Z coil $(x, y, z) = (-13.31 \text{ m}, 0.0 \text{ m}, -2.0 \text{ m})$

X coil $(x, y, z) = (-14.65 \text{ m}, 0.0 \text{ m}, 0.0 \text{ m})$

In the null-position, the primary field is damped with a factor of 0.01 on HM and due to PFC correction it can be neglected on LM.



Figure 3 Rudder containing the Z coil located in the top part of the tower.

The key parameters defining the receiver set up are:

Receiver parameters		
Sample rate		All decays are measured
Number of output gates		38 (HM) and 23 (LM)
Receiver coil low pass filter		207 kHz (Z-coil) and 349 kHz (X-coil)
Receiver instrument low pass filter		300 kHz
Repetition frequency	LM	375 Hz
	HM	25 Hz
Front gate	LM	0.0 μ s
	HM	370 μ s

Receiver gate times are measured from the start of the transmitter current turn-off. A complete list describing gate open, close and centre times are listed in Table 7 and 8 in the report.

Inclination

Instrument type: Bjerre Technology

The inclination of the frame is measured with 2 independent inclinometers. The x and y angles are measured 2 times per second in both directions. The inclinometers are placed in the rear of the frame as close to the z coil as possible, see Figure 1.

The angle data are stored as x, y readings. X is parallel to the flight direction and positive when the front of the frame is above horizontal. Y is perpendicular to the flight direction and negative when the right side of the frame is above horizontal.

The angle is checked and calibrated manually within 1.0 degree by use of a level meter.

DGPS airborne unit and base stations

Chipset: Novatel-OEM6-L2 rate.

Antenna: Trimble, Bullet III GPS Antenna

The differential GPS receiver is on top of the boom in front of the frame.

The DGPS delivers one dataset per second. The raw coordinates are given in Latitude/Longitude, WGS84.

The uncertainty in the xyz-directions is ± 1 m after processing.

The processed DGPS data is combined with the EM data in the xyz-files, giving the precise position.

DGPS parameters	
Sample rate	1 HZ
Uncertainty	± 1 m

Altimeter

Instrument type: MDL ILM300R

Two independent laser units mounted on the frame measuring the distance from the frame to the ground, see Figure 1

Each laser delivers 30 measurements per second, and covers the interval from 0.2 m to approximately 200 m.

Dark surfaces including water surfaces will reduce the reflected signal. Consequently, it may occur that some measurements do not result in useful values.

The altimeter measurements are given in meters with two decimals. The uncertainty is 10 - 30 cm. The lasers are checked on a regular basis against well-defined targets.

Laser parameters	
Sample rate	30 Hz
Uncertainty	10 - 30 cm
Min/ max range	0.2 m / 200 m

Magnetometer airborne unit

Instrument type: Geometrics G822A sensor and Kroum KMAG4 counter.

The Geometrics G822A sensor and Kroum KMAG4 counter is a high sensitivity Cesium magnetometer. The basic of the sensor is a self-oscillating split-beam Cesium vapor (non-radioactive) Principe, which operates on principles similar to other alkali vapor magnetometers.

The sensitivity of the Geometrics G822A sensor and Kroum KMAG4 counter is stated as $<0.0005 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms. Typically 0.002 nT P-P at a 0.1 second sample rate, combined with absolute accuracy of 3 nT over its full operating range.

The magnetometer is synchronized with the TEM system. When the TEM signal is on, the counter is closed. In the TEM off-time the magnetometer data is measured from 100 microseconds until the next TEM pulse is transmitted. The data are averaged and sampled as 50 Hz.

Parameter	Value
Sample frequency	50 Hz (in between each HM EM pulse)
Magnetometer on	HM Cycles
Magnetometer off	LM Cycles

Magnetometer base station

Instrument type: GEM Proton.

The GEM Proton is a portable high-sensitivity precession magnetometer.

The GEM Proton is a secondary standard for measurement of the Earth's magnetic field with 0.01 nT resolutions, and 1 nT absolute accuracy over its full temperature range.

The base station data are sampled with 1 Hz frequency.

Appendix 2: Introduction to Spatially Constraint Inversion (SCI)

Model and inversion routine

The SkyTEM data have been processed and inverted using a Spatially Constrained Inversion (SCI) in Aarhus Workbench, a unique software package initially developed at Aarhus University, Denmark. In the SCI algorithm, a group of time-domain EM (TEM) soundings are inverted simultaneously using 1-D models (Auken et al. 2002 & 2005, Viezzoli et al. 2008). Each sounding yields a separate layered model, but the models are constrained spatially on resistivity, see Figure 1 .

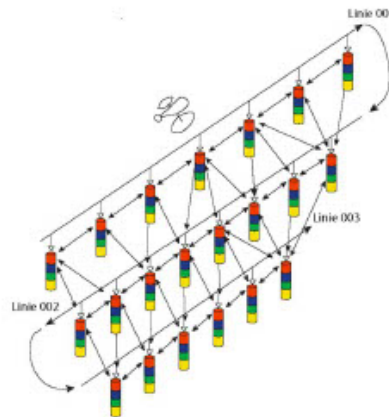


Figure 1 Figure 1 Schematic presentation of the SCI setup. Constraints connect not only soundings located along the flight line, but also those across them (figure from hgg.au.dk).

The result of the SCI inversion is a quasi-3D model that varies smoothly along and across the profiles. The SCI inversion is capable of simultaneously inverting the interleaved HM and LM measurements, yielding a conductivity model that combines the very good shallow depth resolution offered by the low moment data and the larger depth of investigation from the high moment data.

The SCI code is run in multi-layer, smooth-model mode, in which the layer thicknesses are fixed and the data are inverted only for resistivity. The SCI smooth-model inversion typically uses 20-30 layers. Smoothness constraints are applied on the variation of resistivity with depth, in addition to the lateral constraints between adjacent models. Multi-layer smooth-model inversion is slower to compute, but is usually able to provide a very close fit to the observed data.

In the model set-up the thickness of the first layer and the depth to the top of the deepest layer boundary is given. While computing the layer thicknesses, the first and last layer boundary scales the model thicknesses automatically using a log distribution.

The input data to the inversion are the LM & HM moments of the Z-component of EM data. Both moments are combined in a single inversion to increase the depth resolution. The initial model resistivity structure is a homogenous half-space model with an Auto Calculated starting resistivity.

Constraints are given as factors, i.e. a factor of 1.1 means that the parameter can vary between the starting value divided by/times 1.1 (Aarhus University).

The SCI inversion allows for horizontal and vertical constraints to be set for resistivities.

Horizontal constraints are scaled by distance using a reference distance and power function:

$$C = 1 + (C_{opt} - 1) \left(\frac{\Delta GPS}{Dist_{ref}} \right)^n$$

Where C is the used constraint, C_{opt} is the optimal constraint at a sounding distance of $Dist_{ref}$ and ΔGPS is the actual sounding distance.

The horizontal constraints are initially scaled by distance and a power function.

Inversion for flight altitude is included after the first 5 inversion runs. The constraint on the processed flight height is set low and is only allowed a very limited variation.

The methodology for calculating the DOI is based on a recalculated Jacobian matrix from a 1D model (Christiansen and Auken, 2012). Working with global and absolute threshold values requires a relative, data-type, independent relation between the model space and data space, which we obtain by working in the logarithmic model and data spaces. For a given model, the DOI calculations solely include information from the part of the Jacobian relating to the observed data. This means that lateral or vertical model constraints or a priori information, which also contributes information to the model, is not included. The workflow includes the following steps:

- 1) Starting from a measured data set, the data is inverted into a smooth model. The inversion includes the data uncertainty, estimated from the data stack, and the regularization method of the chosen inversion algorithm.
- 2) The Jacobian for the sub-discretized model is calculated.
- 3) The Jacobian is finally used to compute the cumulated sensitivities from which we can deduct the DOI.

Data and noise model

The inaccuracy of TEM data is influenced by the ambient noise. This noise is reduced by selective stacking of delay time series and by applying appropriate filters in the receiver system.

Data insufficiency

For SkyTEM data, the insufficiency lies primarily in the limited delay time range that can be obtained. The earliest obtainable time gate is determined by the

turnoff of the Tx current, and the latest useful time gate is determined by the signal to noise ratio. Increasing the Tx moment will give better measurements at late times, and thus improve the depth penetration, but also increase the turnoff time and thus remove early-time gates, thereby making the near-surface resolution poorer. This trade-off is solved by transmitting an alternating sequence of (1) a low moment that can be turned off quickly to give good near-surface resolution, and (2) a high moment that will improve the signal-to-noise ratio at late times, thus improving depth penetration.

Model inconsistency

When using 1D models in the interpretation of SkyTEM data, inconsistency arises where the lateral gradient of conductivity is not small, e.g. typically in mining applications. However, also in environmental investigations, inconsistencies can arise, typically where near-surface good conductors have abrupt boundaries. Often such inconsistency is indicated by the data residual being high and one should look upon the inversion results with some caution at these locations. 3D effects can also reveal themselves by the so-called 'pant legs', i.e. conductive or resistive structures projecting at an angle of approximately 30 degrees from the horizontal at the edges of high contrast structures.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm