

Projet DEM'Eaux Thau - Modélisation et inversion 3D de données électromagnétiques à source contrôlée sur la zone de Balaruc-les-Bains (Hérault, France)

Rapport final

BRGM RP-70632-FR

Mars 2021



PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Projet DEM'Eaux Thau – Modélisation et inversion 3D de données électromagnétiques à source contrôlée sur la zone de Balaruc-les-Bains (Hérault, France)

Rapport final

BRGM RP-70632-FR

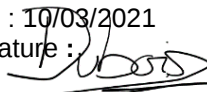
Mars 2021

Ouvrage réalisé dans le cadre du
projet BRGM RP16LRO005

S. Vedrine

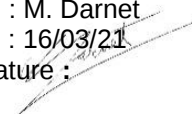
Vérificateur :

Nom : F. Dubois
Date : 10/03/2021
Signature :



Approbateur :

Nom : M. Darnet
Date : 16/03/21
Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr



PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL



Mots-clés : Géophysique, CSEM, Balaruc-les-Bains, Hérault.

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

Vedrine S. (2021) - Projet DEM'Eaux Thau - Modélisation et inversion 3D de données électromagnétiques à source contrôlée sur la zone de Balaruc-les-Bains (Hérault, France), BRGM/RP-70632-FR, rapport final, 51 p., 37 ill.

Synthèse

Ce rapport traite de la modélisation et de l'inversion 3D des données électromagnétiques à source contrôlée (CSEM) recueillies en 2017 dans la région de Balaruc-les-Bains près de Montpellier (Hérault, France) par une équipe d'ingénieurs géophysiciens du BRGM. Le logiciel POLYEM3D développé au BRGM à Orléans par François BRETAUDEAU a été utilisé pour cette tâche, en tenant compte de l'effet 3D de l'Étang de Thau sur les données CSEM. En effet, les précédentes inversions 1D et 2D ont montré les limites de ces approches dans les contextes insulaires et côtiers. L'ajout d'une couche d'eau 3D électriquement conductrice dans les modèles devrait améliorer de manière significative les résultats des inversions.

Le rapport est organisé selon quatre axes :

- un bref rappel du contexte de l'étude et de l'intérêt de la méthode CSEM ;
- une évaluation de la qualité des données recueillies sur site ;
- modélisation et inversion synthétiques 3D avec POLYEM3D afin d'optimiser les paramètres d'entrée du logiciel et de quantifier l'empreinte de la géométrie du dispositif de mesure utilisé sur la zone de Balaruc-les-Bains ainsi que l'effet de la mer très présent du fait de la présence de l'Étang de Thau ;
- enfin, l'inversion 3D avec POLYEM3D des données recueillies sur site afin d'imager la géométrie d'une éventuelle remontée de fluides géothermiques au Gouffre de la Vise.

Au cours de cette étude, une cinquantaine de tests de modélisation et d'inversion ont été réalisés. Tout d'abord, des tests synthétiques ont permis de montrer l'empreinte du levé ainsi que l'influence de l'effet de la mer sur les modèles inversés en 3D. Nous avons décidé d'améliorer la prise en compte de la bathymétrie dans le modèle 3D de départ en affinant les maillages de modélisation et d'inversion jusqu'à 10 cm près de la surface. De multiples tests synthétiques ont permis de quantifier les limites imposées par le dispositif expérimental à l'imagerie d'un corps conducteur dans une roche encaissante résistante. Une partie des données mesurées sur le terrain n'a pas passé le contrôle de qualité et n'a donc pas été prise en compte pour l'inversion synthétique. En outre, l'étang de Thau conducteur masque certaines des informations sous-jacentes et déforme considérablement les lignes de champ électromagnétique.

Connaissant ces limites, et les paramètres optimaux pour l'inversion, c'est-à-dire la méthode d'inversion, la méthode de régularisation, le lissage spatial, le *Module Scaling*, la paramétrisation et le modèle de départ, nous avons tenté d'inverser les données réelles acquises sur la zone en 2017. Hélas, les données sont bruitées (urbanisation importante, lignes électriques, ...) pour les fréquences d'intérêt, et de nombreux effets statiques en surface rendent très difficile l'inversion de certains récepteurs. Malgré plusieurs tests d'inversion suivant une méthodologie très stricte, il n'a malheureusement pas été possible d'obtenir un modèle 3D fiable.

Afin de continuer à exploiter les données, il sera nécessaire de mettre en place de nouveaux outils de calcul numérique sur POLYEM3D afin d'améliorer la prise en compte des effets bathymétriques, des effets topographiques, des effets statiques locaux, pour gagner en stabilité sur le problème inverse.

Pour ce faire, l'inversion jointe 3D de jeux de données électromagnétiques complémentaires (CSEM, MT & ATEM) sera étudiée dans le cadre d'une thèse à venir. Grâce à la collaboration entre le laboratoire de géosciences marines de Brest et le BRGM d'Orléans, l'intégration de logiciels multi-méthodes électromagnétiques 3D devrait apporter des solutions à l'impasse rencontrée dans le cas du projet DEM'Eaux THAU. Et dans un futur proche, nous espérons pouvoir publier sur ces travaux sous forme d'étude de cas.

Table des matières

1. Introduction.....	9
1.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE	9
1.2. LA MÉTHODE CSEM	9
1.2.1. Le paramètre de résistivité électrique	10
1.2.2. Le principe de la méthode CSEM	11
2. Traitement du signal et qualité des données	13
3. Modélisations synthétiques	17
3.1. AVANT-PROPOS	17
3.2. LE MODÈLE VRAI.....	18
3.3. MODÉLISATION DE L'EFFET DE LA MER.....	19
3.3.1. Le contact.....	19
3.3.2. L'étang de Thau	20
4. Inversions synthétiques	25
4.1. RÉGULARISATION	26
4.2. INVERSIONS PRÉLIMINAIRES (1 MÈTRE)	27
4.2.1. Sans bathymétrie	27
4.2.2. Avec bathymétrie.....	29
4.3. INVERSIONS PRÉCISES (10 CENTIMÈTRES)	32
4.3.1. Modélisation	32
4.3.2. Mauvais résultat d'inversion typique	34
4.3.3. Inversion 1D préalable pour déterminer le modèle de départ.....	36
4.3.4. Inversion avec contrainte spatiale sous les émetteurs	37
5. Inversions des données réelles	41
5.1. MÉTHODOLOGIE	41
5.2. ESSAIS D'INVERSION.....	42
5.2.1. 1 ^{er} essai.....	42
5.2.2. Retirer les données observées aberrantes	43
5.2.3. Essai avec l'inversion 1D préalable	43
5.2.4. Essai avec la contrainte spatiale activée	44
5.2.5. Essai avec la contrainte spatiale activée à partir du modèle géologique.....	45
5.2.6. Ajout d'une correction d'effet de la mer sur les données observées	47
6. Conclusion	49
7. Références	51

Liste des Figures

Figure 1: Carte géologique de la zone investiguée (infoterre BRGM)	9
Figure 2 : Balaruc-les-Bains avec la position de stations de mesures électromagnétiques en noir, et la position des sources de courant en vert. Les routes et les lignes électriques haute-tension sont représentées respectivement en noir et en rouge.	10
Figure 3 : Ordres de grandeur de résistivité des matériaux usuels (Guy Marquis, EOST).	11
Figure 4 : Disposition d'une mesure CSEM/CSAMT avec à gauche la station de mesure et ses mesures E_x, E_y, H_x, H_y, H_z . À droite la source avec deux directions de polarisation (Zonge, 1991).	12
Figure 5 : Nature oscillatoire du champ électrique en mode diffusif et profondeur de pénétration.	12
Figure 6 : Contrôle de qualité des données CSEM de Balaruc-les-Bains. Les récepteurs ont tous un numéro d'identification, une date d'acquisition et une qualité attribuée pour chaque émetteur.	13
Figure 7 : Cartes de qualité des récepteurs CSEM pour chaque émetteur utilisé. Code couleur rouge pour « Mauvais », orange pour « Moyen » et vert pour « Bon ». Les câbles des émetteurs sont indiqués en rouge à partir des données GPS sur le terrain.	15
Figure 8 : Modélisation avec la configuration des mesures de Thau. Ci-dessus, le cube de résistivité du modèle vrai avec le maillage apparent. Les points blancs correspondent aux positions des récepteurs, les lignes blanches aux positions des émetteurs. En bas, une vue 3D de l'intrusion conductrice sous-jacente de 20 Ω .m. Le bloc est de dimensions (XYZ) = 7 000x11 000x2 000 m et le cube est géo référencé à l'origine aux coordonnées $X_0 = 6\,261\,500$ m et $Y_0 = 754\,500$ m. Les couleurs chaudes correspondent à une faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. Les points représentent la position des récepteurs utilisés pour la modélisation. Les lignes représentent la position des câbles d'émission	19
Figure 9 : Contact entre deux unités adjacentes de conductivité contrastée σ_1 (à gauche) $\ll$ σ_2 (à droite). Ci-dessus, le champ E_y en phase et en quadrature de phase. En bas, le champ E_z en phase et en quadrature de phase.	20
Figure 10 : Rapport entre le grand axe de polarisation du champ électrique mesuré aux positions des récepteurs pour le modèle "sec" et "avec bathymétrie" pour toutes les sources à la fréquence de 0,125 Hz (profond). L'effet de la mer est visible sur les récepteurs marins, ainsi que sur les stations terrestres proches de la côte avec une diminution/augmentation de l'amplitude du champ.	22
Figure 11 : Niveaux du logarithme de l'amplitude du champ électrique total modélisé à 10 m de profondeur sur chaque maille à 0,125 Hz (profond) pour les trois émetteurs. L'effet de la mer est clairement visible avec un resserrement des niveaux à l'interface terre-mer et l'apparition d'effets statiques d'accumulation de charges électriques à l'interface mer-terre.	23
Figure 12 : Niveaux du logarithme de l'amplitude du champ électrique total modélisé à 10 m de profondeur sur chaque maille à 128 Hz (peu profond) pour les trois émetteurs. L'effet de la mer est clairement visible avec un resserrement des niveaux à l'interface terre-mer et l'apparition d'effets statiques d'accumulation de charges électriques à l'interface mer-terre.	24
Figure 13 : Courbe de compromis entre l'ajustement des données et la norme du modèle, une mesure de la complexité du modèle. Chaque point de la courbe représente une solution, ce qui nous permet d'équilibrer le compromis entre un bon ajustement des données et un modèle simple. (Gubbins, 2004).	26
Figure 14 : Exemple d'une recherche de l'hyperparamètre de régularisation de Tikhonov optimal pour des données observées synthétiques et réelles. Valeurs prises de 10^{-15} jusqu'à 15 pour les données synthétiques, et de 10^{-11} jusqu'à 1 500 pour les données réelles. Les zones entourées représentent le compromis entre la norme du modèle et l'ajustement des données. ...	27
Figure 15 : Tracé des résidus aux positions récepteurs pour chaque émetteur (inversion_synth_2TX). Sur l'axe des abscisses sont représentés les récepteurs avec leurs numéros d'identification, sur l'axe des ordonnées sont représentées les fréquences inversées. Pour chaque paire récepteur-fréquence, deux carrés sont affichés, correspondant à gauche au résidu du modèle de départ et à droite au résidu du modèle final (itération 6).	28

Figure 16 : Coupe horizontale à l'itération 6 du modèle inversé à 50 mètres de profondeur (inversion2_synth_bathy_2TX). La coupe est de dimensions (XY) = 7 000 x 11 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées X0 = 6 261 500 m et Y0 = 754 500 m. Les couleurs chaudes correspondent à des zones de faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. L'intrusion conductrice sous-jacente du modèle vrai est représentée en transparence orange afin de visualiser ce que l'inversion réussit à retrouver.	29
Figure 17 : Fonction de coût total selon le nombre d'itérations pour ~/inversion2_synth_2TX/.....	30
Figure 18 : Tracé des résidus aux positions récepteurs pour chaque émetteur (inversion2_synth_bathy_2TX). Sur l'axe des abscisses sont représentés les récepteurs avec leurs numéros d'identification, sur l'axe des ordonnées sont représentées les fréquences inversées. Pour chaque paire récepteur-fréquence, deux carrés sont affichés, correspondant à gauche au résidu du modèle de départ et à droite au résidu du modèle final (itération 5).	31
Figure 19 : Coupe horizontale de l'itération 5 du modèle inversé à 50 mètres de profondeur (inversion2_synth_bathy_2TX). La coupe est de dimensions (XY) = 7 000 x 11 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées X0 = 6 261 500 m et Y0 = 754 500 m. Les couleurs chaudes correspondent à des zones de faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. L'intrusion conductrice sous-jacente du modèle vrai est représentée en transparence orange afin de visualiser ce que l'inversion réussit à retrouver.	31
Figure 20 : Niveaux du logarithme de l'amplitude du champ électrique total modélisé à 6m de profondeur sur chaque maille à 0,125Hz (en profondeur) pour les trois émetteurs. L'effet de la mer est clairement visible avec un resserrement des niveaux à l'interface terre-mer et l'apparition d'effets statiques d'accumulation de charges électriques à l'interface mer-terre. Bathy 0,1m.	33
Figure 21 : Niveaux du logarithme de l'amplitude du champ électrique total modélisé à 6m de profondeur sur chaque maille à 128 Hz (peu profond) pour les trois émetteurs. L'effet de la mer est clairement visible avec un resserrement des niveaux à l'interface terre-mer et l'apparition d'effets statiques d'accumulation de charges électriques à l'interface mer-terre. Bathy 0,1m.	34
Figure 22 : Fonction de coût total selon le nombre d'itérations pour ~/inversion_synth_2TX/.....	35
Figure 23 : Tracé des résidus aux positions récepteurs pour chaque émetteur (inversion_synth_2TX (dernier)). Sur l'axe des abscisses sont représentés les récepteurs avec leurs numéros d'identification, sur l'axe des ordonnées sont représentées les fréquences inversées. Pour chaque paire récepteur-fréquence, deux carrés sont affichés, correspondant à gauche au résidu du modèle de départ et à droite au résidu du modèle final (itération 4).	35
Figure 24 : Coupe horizontale et verticale de l'itération 4 du modèle inversé à 200 mètres de profondeur (~/inversion_synth_2TX/). La coupe est de dimensions (XY) = 7 000 x 11 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées X0 = 6 261 500 m et Y0 = 754 500 m. Les couleurs chaudes correspondent à une faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. Les points représentent la position des récepteurs utilisés pour la modélisation. Les lignes représentent la position des câbles d'émission.. L'intrusion conductrice du modèle vrai est représentée en surface 3D avec le maillage apparent.	36
Figure 25 : Résultat de la première étape de l'inversion 1D pour les données observées synthétiques après 3 itérations. Le bloc est de dimensions (XYZ) = 7 000 x 11 000 x 3 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées X0 = 6 261 500 m et Y0 = 754 500 m. Les couleurs chaudes correspondent à une faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. Les points représentent la position des récepteurs utilisés pour la modélisation. Les lignes représentent la position des câbles d'émission.....	37
Figure 26 : Visualisation du Module Scaling appliqué pour le test inversion_synth_last_MS_2TX/. Les couleurs chaudes correspondent aux zones les moins contraintes, les couleurs froides aux zones les plus contraintes (sous les émetteurs).	38
Figure 27 : Fonction de coût total en fonction du nombre d'itérations pour ~/inversion_synth_last_MS_2TX/.....	38
Figure 28 : Coupe horizontale de l'itération 4 du modèle inversé à 200 mètres de profondeur (~/inversion_synth_last_MS_2TX/). La coupe est de dimensions (XY) = 7 000 x 11 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées X0 = 6 261 500 m et Y0 = 754 500 m. Les couleurs chaudes correspondent à une faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. Les points représentent la position des récepteurs utilisés pour la modélisation. Les lignes représentent la position des câbles d'émission. L'intrusion conductrice du modèle vrai est représentée en surface 3D avec le maillage apparent.	39

Figure 29 : Coupe horizontale du modèle inversé à l'itération 4 à 50 mètres de profondeur (~inversion_last_2TX_secondrun/). La coupe est de dimensions (XY) = 7 000 x 11 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées X0 = 6 261 500 m et Y0 = 754 500 m. Les couleurs chaudes correspondent à des zones de faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée.....	42
Figure 30 : Carte des résidus aux positions des récepteurs pour le TX3 (inversion_synth_3TX). Sur l'axe des abscisses sont représentées les latitudes en mètres, sur l'axe des ordonnées sont représentées les longitudes en mètres. Pour chaque paire récepteur-fréquence, un cercle de couleur est affiché, correspondant au résidu du modèle final (itération 11).	43
Figure 31 : Résultat de la première étape de l'inversion 1D pour les données réelles après 4 itérations. Le bloc est de dimensions (XYZ) = 7 000 x 11 000 x 3 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées X0 = 6 261 500 m et Y0 = 754 500 m. Les couleurs chaudes correspondent à une faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. Les points représentent la position des récepteurs utilisés pour la modélisation. Les lignes représentent la position des câbles d'émission.	44
Figure 32 : Visualisation du Module Scaling appliqué pour le test inversion_last_MS_2TX/. Les couleurs chaudes correspondent aux zones les moins contraintes, les couleurs froides aux zones les plus contraintes.	44
Figure 33 : Modèle géologique 3D converti en valeurs de résistivité de la zone d'intérêt. Le bloc est de dimensions (XYZ) = 7 000 x 11 000 x 3 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées X0 = 6 261 500 m et Y0 = 754 500 m. Les couleurs chaudes correspondent à des zones de faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. Les points violets correspondent aux positions du récepteur, les lignes violettes aux positions de l'émetteur.	45
Figure 34 : La covariance 3D du modèle a priori utilisé pour la tentative inversion_last_noMS_prior_igrid_TX1/. Les couleurs froides correspondent à une valeur de covariance faible, et donc à un intervalle de confiance fort dans le modèle a priori. Inversement, pour les couleurs chaudes.	46
Figure 35 : Fonction de coût total en fonction du nombre d'itérations pour ~inversion_last_noMS_prior_igrid_TX1/.	46
Figure 36 : Coupe horizontale de l'itération 5 du modèle inversé à 50 mètres de profondeur (~inversion_last_noMS_prior_igrid_TX1/). Le bloc est de dimensions (XYZ) = 7 000 x 11 000 x 3 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées X0 = 6 261 500 m et Y0 = 754 500 m. Les couleurs chaudes correspondent à des zones de faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée.....	47
Figure 37 : Niveaux du logarithme de l'amplitude du champ électrique total modélisé avec la grille fine à 15 centimètres de profondeur sur chaque maille à 0,125Hz (grande profondeur) pour l'émetteur TX1. L'effet de la mer est clairement visible avec un resserrement des niveaux à l'interface terre-mer et l'apparition d'effets statiques d'accumulation de charges électriques à l'interface mer-terre.	48

1. Introduction

1.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

La campagne CSEM fait partie des investigations géophysiques réalisés dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau avec une campagne sismique et une campagne de mesures gravimétriques (BRGM RP-68381-FR). Ce projet, lancé en juillet 2017, vise à caractériser l'hydrosystème de Thau pour le développement d'un outil régional de gestion des eaux souterraines. Le projet est organisé en différents ateliers : hydrogéologie, géochimie et géologie (dont acquisitions géophysiques). Le BRGM est le pilote de ce projet de recherche et travaille avec les laboratoires de recherche Géosciences Montpellier et Hydrosiences Montpellier et la société Synapse. Ce projet est financé par l'État et la Région (CPER), l'Europe (FEDER), Montpellier Méditerranée Métropole, l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, la ville de Balaruc-les-Bains, le SMBT et le BRGM.

L'émergence de sources chaudes dans la région de Balaruc-les-Bains, 1^{ère} station thermale en France, indique l'existence d'un potentiel système géothermique sous-jacent. La carte géologique de la zone d'étude est présentée Figure 1.

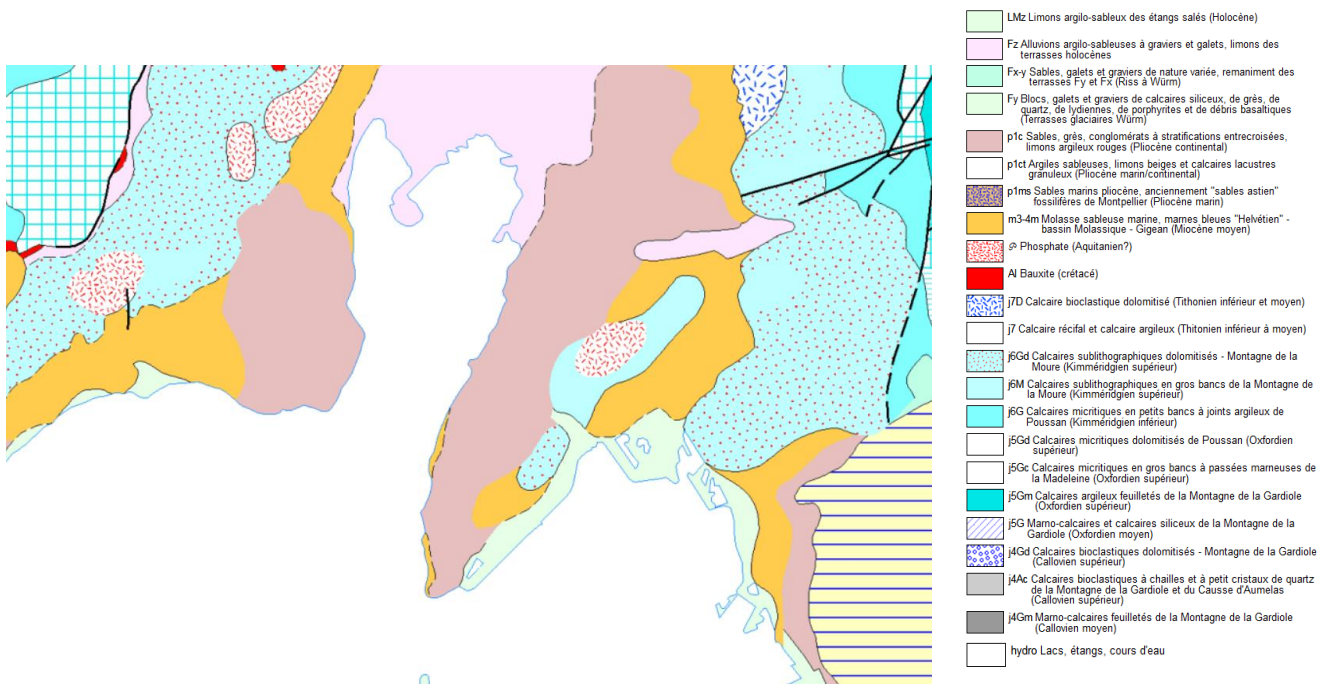


Figure 1 : Carte géologique de la zone investiguée (infoterre BRGM).

1.2. LA MÉTHODE CSEM

Afin d'affiner le modèle géologique 3D (GEOMODELER) construit par Géosciences Montpellier, la méthode du CSEM a été choisie pour produire une carte de résistivité 3D à haute résolution de la région (Figure 2). Son avantage majeur par rapport à la méthode magnétotellurique (MT) traditionnellement utilisée dans l'exploration géothermique est qu'elle permet de cartographier la résistivité en profondeur malgré la présence de bruit anthropique généré par les zones urbanisées. En effet, l'utilisation de sources de forte puissance (>30 kW) et de stations de mesure électromagnétique très sensibles permet de surmonter les problèmes liés aux sources de bruit électromagnétique présentes dans la ville : câbles de communication, lignes à haute tension enterrées, radiodiffusion, etc.

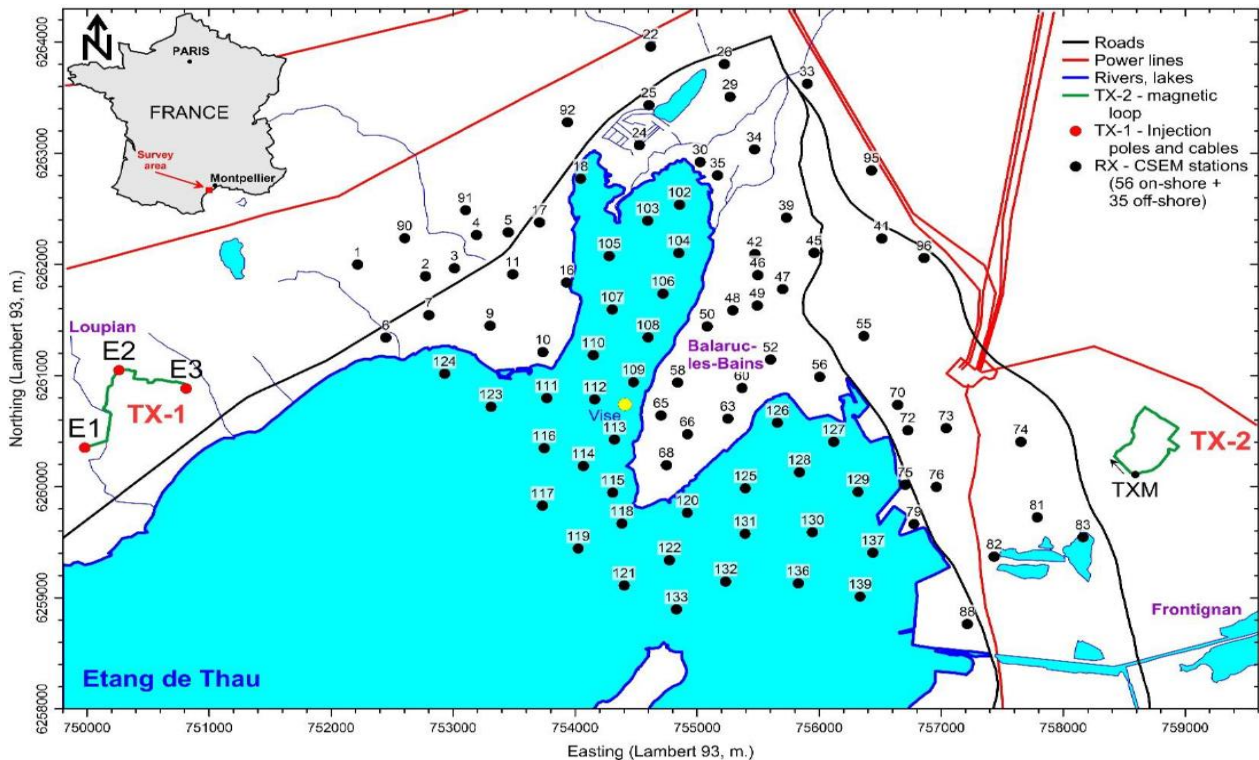


Figure 2 : Balaruc-les-Bains avec la position de stations de mesures électromagnétiques en noir, et la position des sources de courant en vert. Les routes et les lignes électriques haute-tension sont représentées respectivement en noir et en rouge.

La méthode CSEM vise à imager la distribution de la résistivité électrique à des profondeurs allant jusqu'à 2 000 m. C'est le paramètre crucial de l'exploration géothermique, car il est directement lié à la présence de fluides qui peuvent fortement abaisser la résistivité électrique des structures en fonction de leur salinité et de la présence d'argiles. L'objectif de notre campagne est de mettre en évidence une zone de remontée de fluides minéralisés (eaux thermales – conductivité électrique de l'ordre de 22 mS/cm à 25 °C) par des fractures qui correspondraient à une zone de faible résistivité (5-10 $\Omega.m$).

1.2.1. Le paramètre de résistivité électrique

Les interactions entre les ondes électromagnétiques et les matériaux terrestres permettent de caractériser les structures du sous-sol par leur propriété électrique. Nous chercherons en particulier à déterminer le paramètre de conductivité électrique σ (S.m⁻¹) qui caractérise l'amplitude d'une roche à se laisser traverser par un courant électrique. En EM appliquée, le paramètre de résistivité électrique est le plus couramment utilisé : il représente l'inverse de la conductivité électrique et s'écrit ρ ($\Omega.m$). L'intérêt de ce paramètre réside dans les contrastes nets de résistivité des matériaux qui constituent le sous-sol. Plus le contraste est important entre deux matériaux, plus il est aisé de le détecter à l'aide de capteurs EM (ex. minéraux métalliques conducteurs ou eaux minéralisées conductrices versus encaissant résistant).

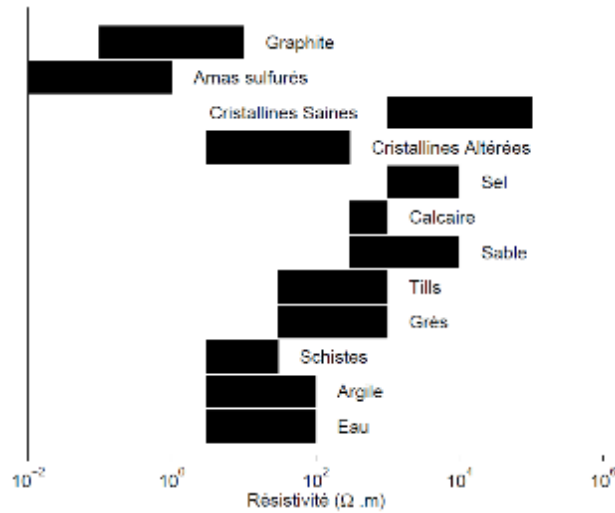


Figure 3 : Ordres de grandeur de résistivité des matériaux usuels (Guy Marquis, EOST).

La Figure 3 représente les résistivités de matériaux usuels, ce sont de bons ordres de grandeur à connaître pour interpréter des résultats. À sec, la conductivité des roches qui composent le sous-sol est extrêmement faible. Seule l'eau contenue dans les pores interstitiels permet de conduire le courant : on parle alors de conduction de nature électrolytique. L'eau pure n'est pas conductrice, et sa conductivité dépend de sa teneur en sel (salinité). Pour une roche poreuse argileuse, la loi proposée par Waxman & Smith, 1968 définit la résistivité apparente en fonction de sa porosité, de sa saturation en un fluide donné et de sa composition minéralogique :

$$\rho = \rho_f * s * \phi^{-m} + \sigma_s^{-1} \quad (1.1)$$

où ρ et ρ_f sont les résistivités de la roche et du fluide respectivement ($\Omega.m$), s le coefficient de saturation (-), ϕ la porosité de la roche (-), m le coefficient de cimentation (-) et σ_s est la conductivité surfacique des minéraux argileux (S/m).

Le terme de conductivité surfacique dépend directement de la capacité d'échange de cations (meg/g). Pour les argiles d'altération, les valeurs rencontrées sont de l'ordre de 0,2 à 1,2 meg/g pour respectivement, les illites et smectites. La conductivité d'une saumure, elle, dépend principalement de la salinité et en moindre importance de la température. Pour la résistivité d'un matériau poreux argileux, le terme de conductivité surfacique prédomine généralement le terme de conductivité électrique du fluide. Pour un assemblage de plusieurs matériaux argileux, une somme pondérée des capacités d'échange de cations permet d'établir une capacité d'échange équivalente du milieu. La conséquence est qu'une faible quantité d'argile à forte capacité d'échange peut masquer une grosse quantité d'argile à faible capacité d'échange, et fausser une interprétation de résultat électromagnétique.

1.2.2. Le principe de la méthode CSEM

Le principe de la CSEM est illustré Figure 4. Il s'agit d'injecter un courant électrique de 15-25A à des points sources (*émetteurs*) à différentes fréquences et pendant des durées variables (rappel : $f_{injection} = \frac{1}{T_{injection}}$ en Hz). Simultanément, des enregistreurs (*récepteurs*) sont disposés sur le terrain jusqu'à plusieurs kilomètres de la source et mesurent le champ électrique en surface selon deux orientations perpendiculaires E_x et E_y (entre des paires d'électrodes espacées de plusieurs dizaines de mètres) ainsi que le champ magnétique dans les trois directions de l'espace H_x , H_y , H_z .

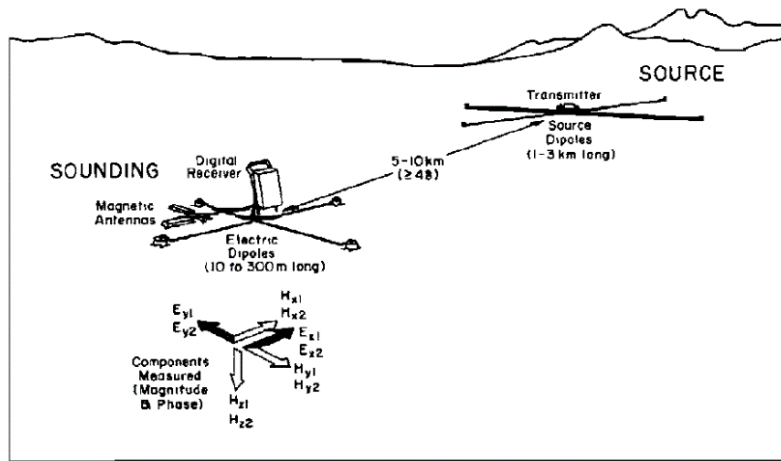


Figure 4 : Disposition d'une mesure CSEM/CSAMT avec à gauche la station de mesure et ses mesures E_x , E_y , H_x , H_y , H_z . À droite la source avec deux directions de polarisation (Zonge, 1991).

Indépendamment du bruit naturel et anthropique, le rapport signal sur bruit mesuré aux stations de mesure est d'autant plus important que le courant injecté à la source est fort I (A) et que la distance à la source est faible. Pour acquérir des données de bonne qualité, il est donc pertinent de ne pas trop éloigner les stations de mesure des sources. Il est possible de modéliser la distribution des champs électriques mesurés en surface aux différentes stations de mesure à l'aide des équations de propagation des ondes EM dans un milieu électriquement conducteur. Dans le cas d'un milieu hétérogène complexe et qui présente des contrastes aux interfaces de résistivités (cas réel d'un sous-sol), il est nécessaire d'utiliser des codes numériques de modélisation 1D, 2D et 3D pour pouvoir établir un modèle de résistivité qui ajuste au mieux les champs mesurés en surface. Ce rapport aborde l'utilisation d'un code de modélisation et inversion 3D CSEM développé au BRGM : POLYEM3D.

La propagation de l'onde EM est représentée sur la Figure 5 dans la direction verticale z (m) et en 1D. Elle possède un terme d'oscillation selon z (m), un terme d'oscillation selon t (s), et un terme de décroissance selon z (m). Le dernier terme introduit un paramètre $\delta = 1/\beta$ (m) communément appelé profondeur de la peau. Une onde EM voit son amplitude initiale diminuer d'un facteur $1/e = 36,8\%$ lorsqu'elle atteint la profondeur de pénétration : $\delta \approx 503 \sqrt{\rho/f}$ où ρ la résistivité électrique ($\Omega \cdot m$) et f la fréquence (Hz). Il est intéressant de noter que la pénétration d'une onde EM dépend directement de sa fréquence d'émission et de la conductivité du milieu. En fait, pour sonder en profondeur un milieu fortement conducteur, il sera nécessaire d'abaisser autant que possible la fréquence des ondes émises et mesurées (Basses Fréquences < 1 Hz) afin que le rapport ρ/f soit le plus élevé possible.

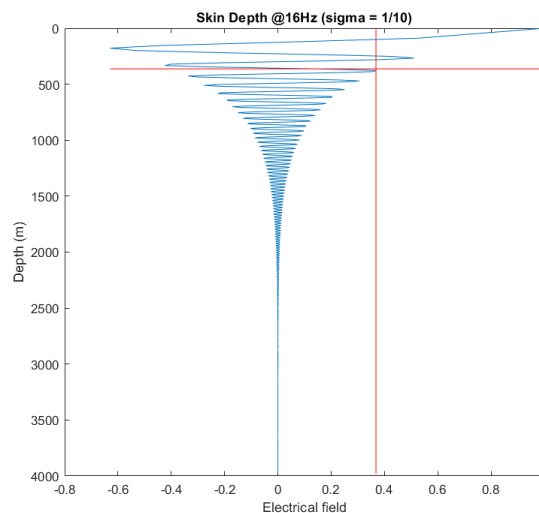


Figure 5 : Nature oscillatoire du champ électrique en mode diffusif et profondeur de pénétration.

2. Traitement du signal et qualité des données

Un résumé du traitement des données brutes acquises lors de la mission d'octobre 2017 est fourni dans la section suivante. Les données brutes sont stockées sous la forme d'un ensemble de structures de cellules 4D :

$$DATA_struct\{nRX, nTX, nFreq, nOcc\}$$

où nRX est le nombre de récepteurs (par exemple nRX = [01 02 03 04 ...139]), nTX est le nombre d'émetteurs (par exemple TX = [1 2 3]), nFreq est le nombre de fréquences fondamentales d'injection de courant (par exemple Freq = [1 2 3 4 5 ...12]) et nOcc est le nombre de séquences d'enregistrement répétées sur un seul récepteur (par exemple Occ = [1 2 3 4]).

RX	TX1 (TX2 ; POL1)	TX2 (TX2 ; POL2)	TX3 (TXM)	RX	TX1 (TX2 ; POL1)	TX2 (TX2 ; POL2)	TX3 (TXM)				
1	Good	Good	Medium	102	Bad	Good	Medium				
2	Good	Good	Medium	103	Good	Good	Good				
3	Good	Good	Medium	104	Good	Good	Good				
4	Good	Good	Medium	105	Good	Good	Good				
5	Good	Good	Medium	106	Good	Medium	Good				
6	Good	Good	Bad	107	Good	Good	Good				
7	Medium	Good	Bad	108	Good	Good	Good				
9	Good	Good	Medium	109	Good	Good	Good				
10	Good	Medium	Bad	110	Good	Good	Good				
11	Good	Good	Good	111	Good	Good	Good				
16	Good	Good	Medium	112	Good	Good	Good				
17	Good	Good	Good	113	Good	Good	Good				
18	Good	Good	Good	114	Good	Good	Good				
22	Good	Good	Medium	115	Good	Good	Good				
24	Good	Good	Good	116	Good	Good	Good				
25	Good	Good	Good	117	Good	Good	Good				
26	Good	Good	Good	118	Good	Good	Good				
29	Good	Good	Good	119	Good	Good	Good				
30	Good	Good	Good	120	Good	Good	Good				
33	Good	Good	Medium	121	Good	Good	Bad				
34	Good	Good	Medium	122	Good	Good	Bad				
35	Good	Good	Good	123		Good					
39	Good	Good	Medium	124		Good					
41	Medium	Medium	Good	125	Good	Good	Good				
42	Good	Good	Medium	126	Good	Good	Good				
45	Medium	Medium	Good	127	Good	Good	Good				
46	Good	Good	Good	128	Good	Good	Good				
47	Medium	Medium	Medium	129	Good	Good	Good				
48	Good	Good	Good	130	Good	Good	Good				
49	Good	Good	Good	131	Good	Good	Good				
50	Good	Medium	Good	132	Good	Good	Bad				
52	Good	Good	Good	133	Good	Good	Bad				
55	Medium	Medium	Good	136	Good	Good	Good				
56	Good	Good	Good	137	Good	Good	Good				
58	Good	Good	Medium	139	Good	Good	Good				
60	Medium	Good	Medium								
63	Medium	Good	Good								
65	Good	Good	Good		Good	Toutes (BF au minimum) fTX exploitables avec plusieurs harmoniques impaires					
66	Medium	Medium	Medium		Medium	Certaines fTX exploitables avec zéro ou plusieurs harmoniques impaires					
68	Good	Good	Good		Bad	Rien à exploiter					
70	Medium	Medium	Good			Pas de données					
72	Medium	Good	Good								
73	Medium	Good	Good								
74	Bad	Medium	Good								
75	Good	Good	Bad								
76	Bad	Medium	Good								
79	Good	Good	Bad								
81	Bad	Bad	Good								
82	Medium	Good	Good								
83	Medium	Good	Good								
88	Bad	Good	Bad								
90	Good	Good	Bad								
91	Good	Good	Medium								
92	Good	Good	Bad								
95	Good	Good	Good								
96	Medium	Medium	Good								
				BILAN		Good	Medium	Bad	Nan	% Exploitable	
				Count		207	44	18	4	92	

Figure 6 : Contrôle de qualité des données CSEM de Balaruc-les-Bains. Les récepteurs ont tous un numéro d'identification, une date d'acquisition et une qualité attribuée pour chaque émetteur.

Au cours de la mission, 91 stations de mesures du CSEM ont été installées sur terre et en mer. Une faible partie des données a été exclue en raison des aléas du terrain, des conditions de pose, et du niveau de bruit électromagnétique. Une évaluation globale de la qualité des données est présentée dans la Figure 6.

Les fonctions de transfert qui lient le signal transmis par l'émetteur au signal enregistré par le récepteur sont estimées par les codes BRGM : PROCATS et RAZORBACK. Les fréquences fondamentales émises et mesurées étaient de 0,125, 0,5, 2, 8, 32, 128, 256, 512 1024, 2048, 4096, 8192 Hz. Les données finales retenues de champ électrique sont liées à la fréquence fondamentale mesurée ainsi que ses harmoniques impaires associées (jusqu'à 200).

Le principal critère de qualité est le rapport signal/bruit des données prit supérieur ou égal à 3. Après ce premier traitement, une analyse graphique est effectuée à l'aide de différents outils : graphiques de rapport signal/bruit au format tableur, spectres d'amplitude et de phase, diagrammes d'Argand, diagrammes de polarisation, cartes du rapport signal/bruit et cartes d'orientation de l'ellipse de polarisation du champ électrique. Grâce à ces outils, il a été possible d'établir trois critères de qualité :

- « Bon » : une majorité des fréquences fondamentales et plusieurs de leurs harmoniques impairs dépassent le seuil de 3 du rapport signal/bruit. Les spectres sont continus sur toute la gamme de fréquences de 0,125 à 8 192 Hz au mieux. Le récepteur est cohérent en niveau de bruit avec ses proches voisins. L'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique est cohérente avec ses proches voisins et avec la réponse d'un modèle 1D ;
- « Moyen » : certaines fréquences fondamentales peuvent être utilisées avec ou sans harmoniques impairs. Sinon, les conditions de validation sont équivalentes au critère « Bon » ;
- « Mauvais » : très peu de fréquences fondamentales exploitables et non continues.

Certains fichiers QC sont disponibles dans *~/CSEM_QC_LS/noise2D_data.ppt & amplitude2D_data.ppt & ellip2D_data_vs_intrusion_bathy_pEmax.ppt*. Les données qui ont validé le seuil de rapport signal/bruit sont représentées dans *~/CSEM_QC_LS/TX*_patch.png*. Une description plus exhaustive du traitement des données est donnée dans un fichier *~/CSEM_QC_LS/README.txt*. En fin de compte, sont conservés pour l'inversion:

- TX1 : 83 récepteurs dont 32 marins ;
- TX2 : 88 récepteurs dont 34 marins ;
- TX3 : 79 récepteurs dont 28 marins.

Cela correspond à 92 % des récepteurs installés pouvant être exploités pour l'inversion. Les Figure 6 et la Figure 7 dressent le bilan du contrôle qualité par récepteur et par émetteurs.

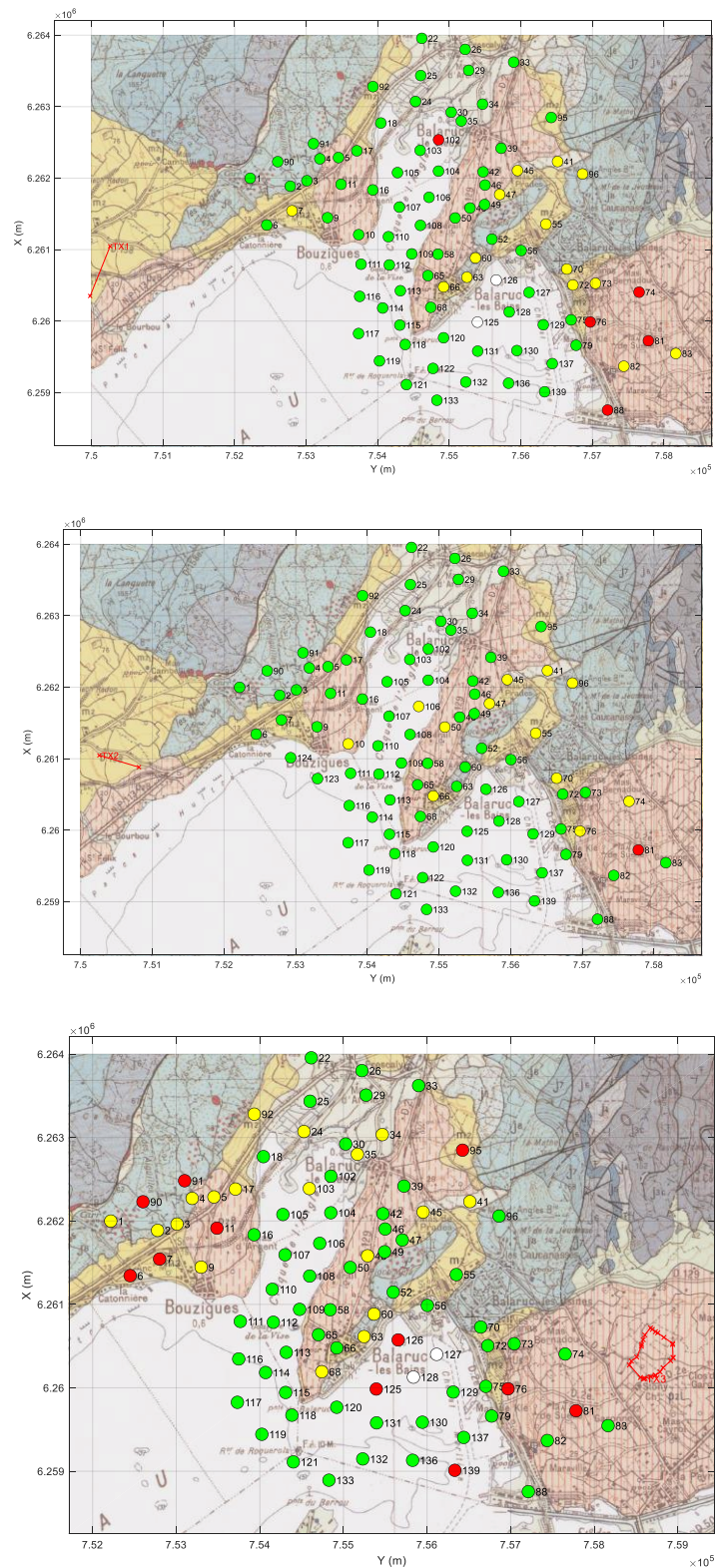


Figure 7 : Cartes de qualité des récepteurs CSEM pour chaque émetteur utilisé. Code couleur rouge pour « Mauvais », orange pour « Moyen » et vert pour « Bon ». Les câbles des émetteurs sont indiqués en rouge à partir des données GPS sur le terrain.

3. Modélisations synthétiques

Dans cette partie, nous aborderons les différents tests de modélisation réalisés sur POLYEM3D pour la configuration de mesure utilisée à Thau. Dans un premier temps, le défi consistait à étudier la faisabilité de l'inversion 3D pour les 3 émetteurs (deux dipôles électriques et une boucle magnétique) et les 91 récepteurs.

3.1. AVANT-PROPOS

Le processus d'inversion cherche à retrouver un modèle de résistivité électrique 3D qui « explique » les données mesurées aux sites de mesures, à savoir le champ électrique suivant les deux directions de l'espace horizontal E_x et E_y en (V/m) (voir Figure 4). Ce sont les données observées. La modélisation prédit, à partir d'un modèle de résistivité 3D fourni en entrée, la valeur du champ électrique suivant les deux directions de l'espace horizontal E_x et E_y aux sites de mesures en utilisant une formulation en champ électrique des équations de Maxwell. Ce sont les données prédites. L'inversion s'apparente alors à une succession de modélisations cherchant à minimiser l'écart entre les données observées et les données prédites (le résidu) en faisant varier les paramètres du modèle de résistivité 3D à partir d'un modèle initial (à l'itération 0).

Le code POLYEM3D cherche à minimiser les résidus tel que :

$$\lim_{iteration \rightarrow \infty} d_{observées, iteration} - d_{prédites, iteration} = 0 \quad (3.2)$$

À chaque itération chaque paramètre résistivité électrique ($\Omega.m$) est modifié de +/-% afin de minimiser les résidus. Pour que l'inversion soit un succès, il est donc nécessaire que la modélisation fournissant les données prédites soit assez précise pour atteindre un résidu faible. Il faut alors générer une grille 3D de paramètres de résistivité assez fine pour pouvoir « expliquer » des variations dans la donnée observée. Afin de tester la précision de notre modélisation, ainsi que l'efficacité du processus d'inversion, des essais dits « synthétiques » sont communément effectués. On parle de données synthétiques lorsque les données observées ne sont pas issues d'une mesure réelle sur le terrain, mais d'une modélisation à partir d'un modèle vrai fixé par l'utilisateur. On parle d'inversion synthétique lorsque les données observées utilisées dans le processus d'inversion sont des données synthétiques.

L'objectif est de savoir si l'inversion est capable de retrouver le modèle vrai fixé par l'utilisateur (à l'itération ∞) à partir d'un modèle initial différent (itération 0) en faisant varier les paramètres de résistivité électrique du sous-sol itérativement. C'est un bon indicateur de la bonne performance du code pour une configuration de mesure donnée afin de détecter l'empreinte du dispositif d'acquisition sur le modèle inversé. Nous pouvons ensuite extraire un intervalle de confiance dans le résultat d'inversion, c'est à dire dans quelle zone nous pouvons interpréter le résultat avec confiance sur le cube 3D X(m) Y(m) Z(m). C'est une étape exigée avant d'inverser des données observées réelles afin de déterminer quels sont les paramètres d'entrée d'inversion optimaux.

Lors de nos tests synthétiques, nous avons fait le choix de ne pas injecter de bruit aléatoire dans les données synthétiques observées, ce qui est pourtant la pratique admise dans ce genre d'étude afin de reproduire fidèlement la réalité d'une mesure de terrain. La raison est que nous ne souhaitons pas masquer l'effet de l'étang de Thau sur les données observées synthétiques. Notre objectif est d'étudier seulement l'impact de l'eau salée de l'étang lors du processus d'inversion (eau d'une conductivité d'environ 55 mS/cm à 25 °C).

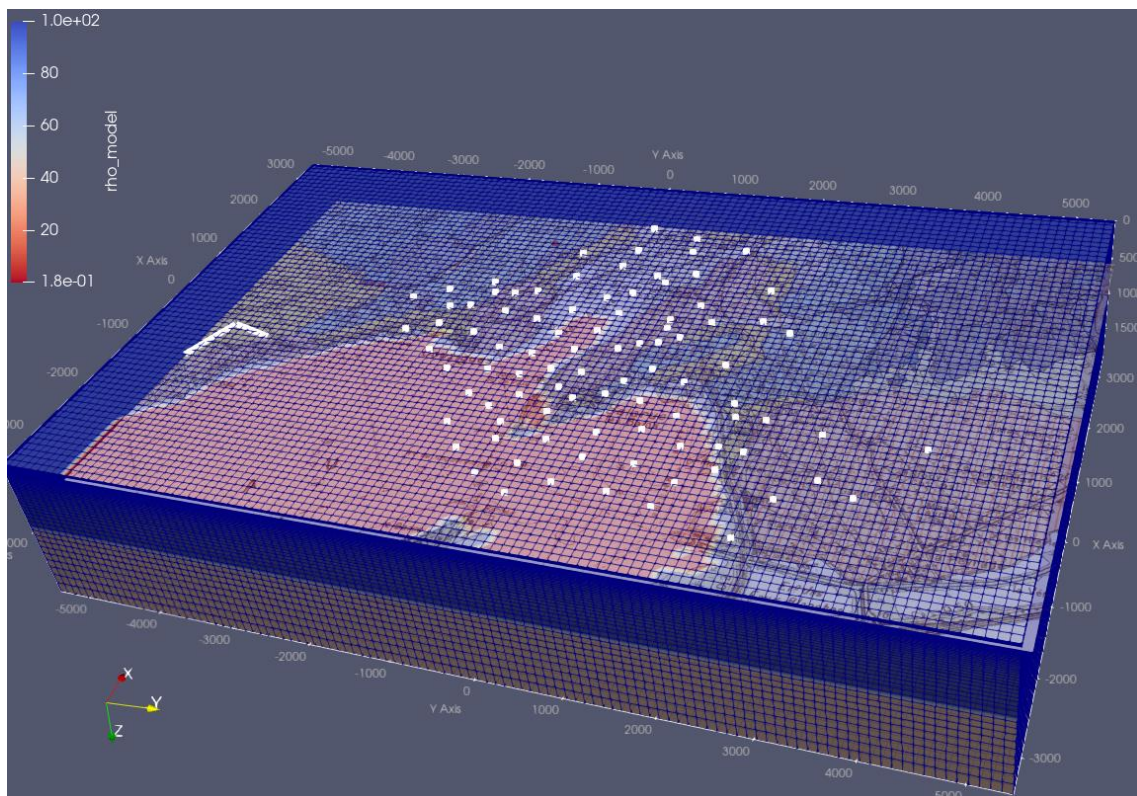
3.2. LE MODÈLE VRAI

Une première grille 3D (n_1, n_2, n_3) = 152 x 134 x 94 (environ 1 900 000 mailles) a été utilisée pour la modélisation. Dans la zone d'intérêt, les mailles de (ZYX) = 1-50 x 100 x 100 m. La taille des mailles est fine sur les dix premiers mètres afin de correspondre correctement à la bathymétrie. Un modèle vrai simpliste résultant d'interprétations géologiques, de sondages gravimétriques, de diagraphies, de cartes de résistivité apparente CSEM a été construit, et il consiste en :

- un bloc 100 $\Omega.m$ sur 1 000 mètres puis un demi-espace homogène 40 $\Omega.m$;
- une intrusion conductrice orientée S-N sur la partie centrale du levé de 20 $\Omega.m$, dimensions (XYZ) = 5000x1000x350 mètres de 50 à 400 mètres de profondeur, simulant une zone plus poreuse saturée ;
- l'Étang de Thau à 0,18 $\Omega.m$ qui correspond à la bathymétrie interpolée sur la grille 3D.

Ce modèle ne représente pas une réalité géologique de la zone, notre objectif ici est de savoir si notre code d'inversion est capable de retrouver l'intrusion conductrice orientée sud-nord (itération ∞) à partir d'un modèle de départ isotrope homogène (itération 0). Nous chercherons principalement à déterminer l'impact de l'étang de Thau sur le processus d'inversion, c'est-à-dire si nous arriverons à détecter et recouvrer l'intrusion conductrice orientée sud-nord sous l'étang qui agit comme un masque EM.

Une visualisation 3D et une coupe transversale du modèle vrai sont disponibles sur le logiciel Paraview Figure 8. Les données observées synthétiques aux positions des récepteurs sont modélisées pour 9 fréquences : 0,125, 0,5, 2, 8, 32, 128, 256, 512 et 1024 Hz.



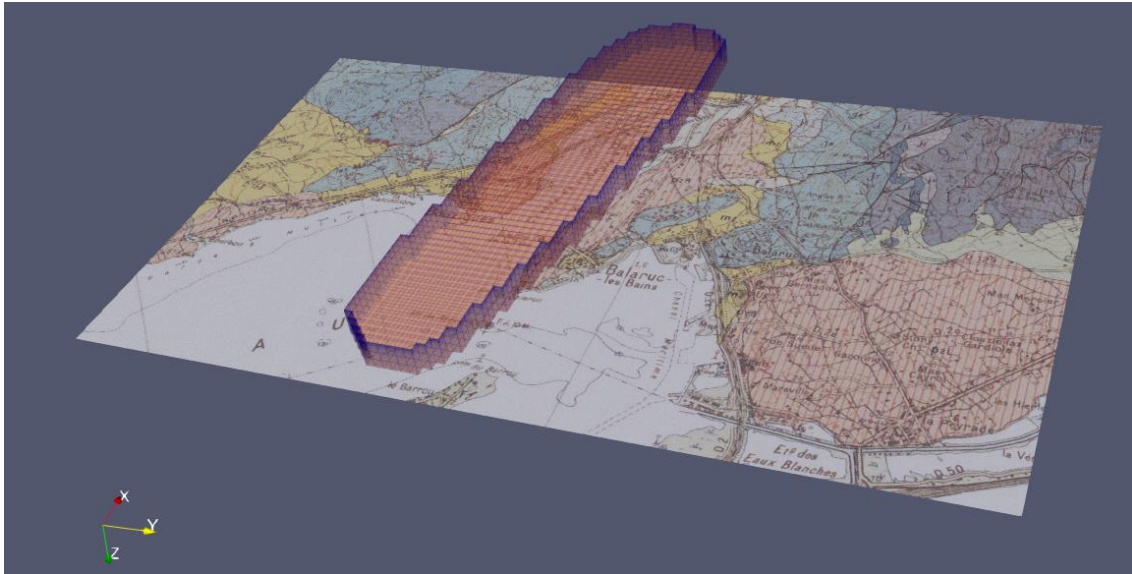


Figure 8 : Modélisation avec la configuration des mesures de Thau. Ci-dessus, le cube de résistivité du modèle vrai avec le maillage apparent. Les points blancs correspondent aux positions des récepteurs, les lignes blanches aux positions des émetteurs. En bas, une vue 3D de l'intrusion conductrice sous-jacente de 20 $\Omega.m$. Le bloc est de dimensions (XYZ) = 7 000 x 11 000 x 2 000 m et le cube est géo référencé à l'origine aux coordonnées $X0 = 6\,261\,500$ m et $Y0 = 754\,500$ m. Les couleurs chaudes correspondent à une faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée.

3.3. MODÉLISATION DE L'EFFET DE LA MER

Dans un milieu tabulaire hétérogène avec des contrastes de résistivité 1D, 2D et/ou 3D, quatre conditions limites s'appliquent à l'interface de deux corps de conductivité électrique différente. En particulier, la composante normale du déplacement diélectrique d est discontinue à l'interface et provoque une accumulation locale de densité de charge surfacique ρ_s telle que $(d_2 - d_1) \cdot n = \rho_s$.

3.3.1. Le contact

Un effet direct de cette condition limite est l'effet galvanique sur le contact entre deux structures de résistivité différente. Soit le milieu 1 de conductivité $\sigma_1 = 1/10$ S et le milieu 2 de conductivité $\sigma_2 = 1/1\,000$ S situés de part et d'autre de $y=0$. Un tel contraste peut être interprété comme une intrusion conductrice dans un milieu résistif (par exemple l'Étang de Thau), ou en profondeur comme une faille normale ayant déplacé deux unités adjacentes de lithologie différente.

En appliquant la condition limite de déplacement diélectrique à l'interface et en résolvant ensuite l'équation de Helmholtz homogène, il est possible de trouver une solution au champ électromagnétique qui soit valable des deux côtés du contact (Ward *et al.* (1988)). Un script calcule les champs orientés E_{yj} et E_{zj} en utilisant des calculs intégraux pour un champ magnétique incident parallèle à l'axe X ($H = H_x \cdot \hat{x}$).

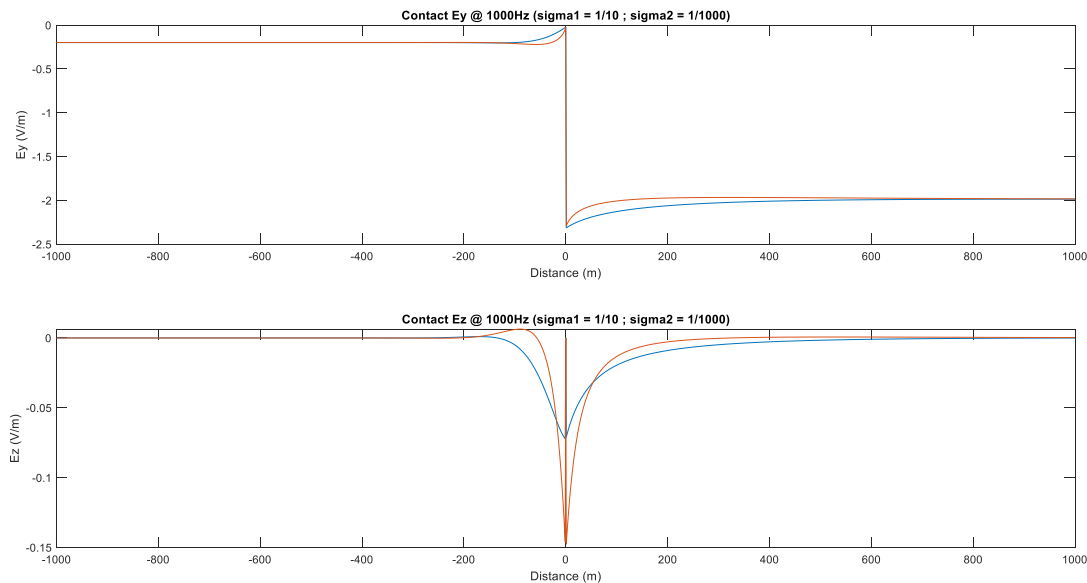


Figure 9 : Contact entre deux unités adjacentes de conductivité contrastée σ_1 (à gauche) $\ll \sigma_2$ (à droite).
Ci-dessus, le champ E_y en phase et en quadrature de phase. En bas, le champ E_z en phase et en quadrature de phase.

La Figure 9 montre la partie réelle et imaginaire du champ électrique E_y et E_z le long de l'axe des Y. Elle illustre l'effet statique qui déplace le champ électrique en amplitude à l'interface. Selon la condition limite, le champ discontinu provoque une accumulation locale de densité de charge de surface ρ_s . Dans ce cas, si le champ EM se propage dans la direction Y-positive, il en résulte que $(d_2-d_1) \cdot \hat{y} < 0$ donc $\rho_s < 0$. Il y aura une accumulation de charges négatives $-q$ à l'interface. Inversement, si $(d_2-d_1) \cdot \hat{y} > 0$, il y aura une accumulation de charges positives $+q$.

Cet effet galvanique est présent dans tous les milieux hétérogènes en 2D et 3D, en particulier dans le cas d'un environnement côtier. L'accumulation de charges $+q$ a un impact direct sur la polarisation locale du champ électromagnétique. L'orientation des ellipses de polarisation aura tendance à diverger autour d'une interface chargée $+q$. Au contraire, l'orientation des ellipses de polarisation convergera près d'une interface $-q$. Cela peut donc être une indication forte de la présence d'une structure résistante en profondeur dans une roche encaissante conductrice ou vice versa. Cependant, cet effet est une contrainte s'il est présent sous les premiers mètres du sol. En effet, la mesure de surface du champ électrique est affectée par un effet statique si les électrodes de mesure du potentiel électrique sont placées non loin d'une interface chargée de $\pm q$. Dans la littérature, des méthodes de correction de l'effet statique ont été développées pour pallier ce problème récurrent lors des campagnes de CSEM et de MT. La solution la plus efficace consiste à disposer d'une mesure inductive électromagnétique transitoire (=TEM) de la zone pour contraindre les mesures du CSEM en proche surface. Le TEM n'est pas affecté par l'effet statique car elle utilise uniquement des mesures de champ magnétique et sera donc considéré comme un modèle de référence sur les cent premiers mètres.

3.3.2. L'étang de Thau

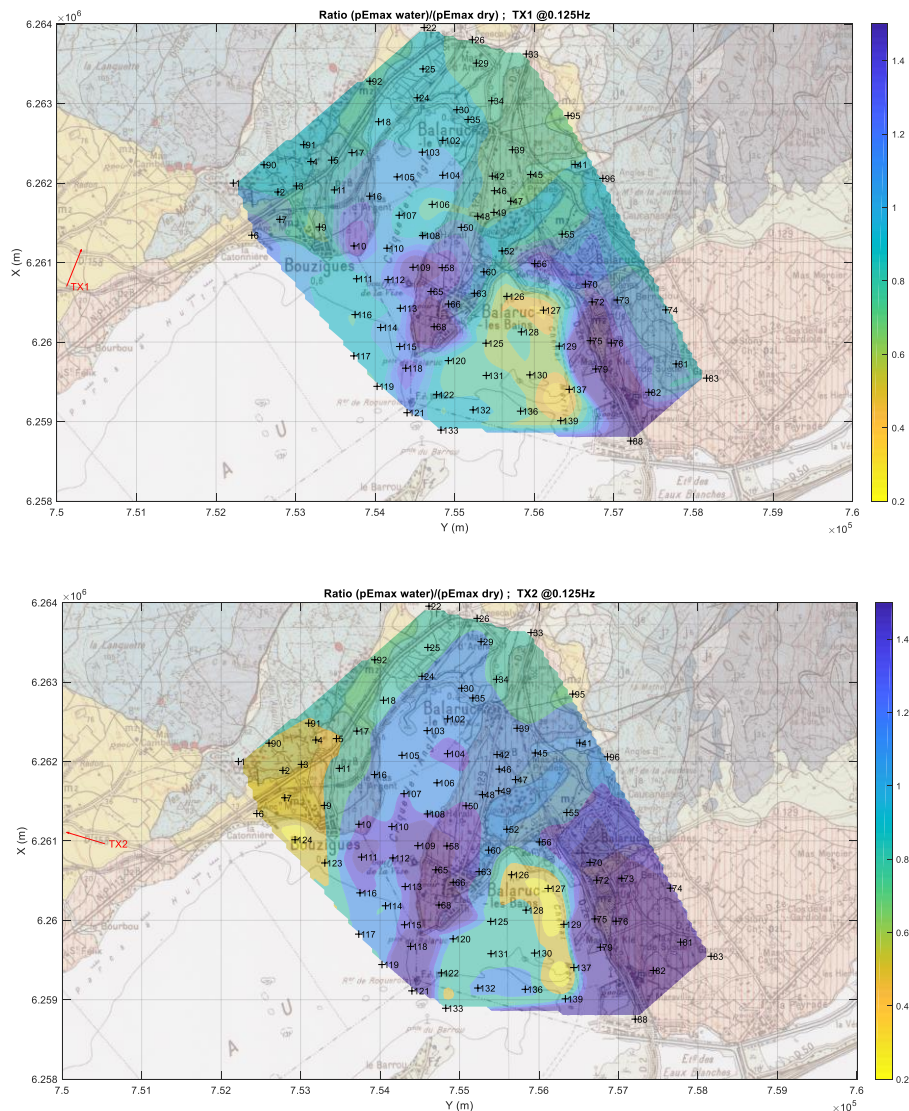
L'Étang de Thau a un impact direct sur les lignes de champ électromagnétique. Il s'agit d'un corps hautement conducteur $\sim 0,18 \Omega.m$ dans une roche encaissante résistante, le sol (environ ~ 100 à $\Omega.m$ selon les diagraphies de forage et le TDEM). Un effet statique apparaît aux interfaces résultant de la condition limite du déplacement diélectrique des équations de Maxwell. L'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique pointe vers les interfaces chargées négativement, ce qui déforme localement les lignes de courant par rapport à un modèle sans mer. Inversement, l'orientation diverge aux interfaces chargées positivement. En outre, à basse fréquence (= grandes distances), la masse d'eau conductrice a un impact direct sur les champs effectifs mesurés aux récepteurs, ce qui réduit artificiellement l'amplitude du spectre local et peut fausser une

interprétation. Il serait malheureux d'interpréter une couche géologique conductrice profonde, qui est en fait un effet peu profond de la mer conductrice. Afin de prendre en compte cet effet 3D, il apparaît indispensable de modéliser numériquement la masse d'eau et son impact sur les données mesurées à Balaruc-les-Bains.

Afin de mettre en évidence la contribution de la masse d'eau dans la modélisation, deux modèles « à sec » et « avec bathymétrie » ont été comparés pour la même configuration de mesure CSEM. Les trois émetteurs ont été sélectionnés pour ces tests, avec leurs récepteurs associés. Les dossiers sont disponibles sous le nom *~/forward_3TX_v2/* et *~/forward_bathy_3TX_v2/*. Les données observées synthétiques aux positions des récepteurs sont modélisées pour 9 fréquences : 0,125, 0,5, 2, 8, 32, 128, 256, 512, 1024Hz. Ensuite, les données des deux modèles sont cartographiées sous la forme d'un rapport d'amplitude du grand axe de polarisation de l'ellipse du champ électrique, tel que :

$$R = \frac{PEmax_{water}}{PEmax_{dry}}$$

Une carte de ce rapport pour la fréquence fondamentale 0,125Hz est présentée à la Figure 10. Pour chaque émetteur, les rapports des amplitudes du champ électrique mesurées aux positions du récepteur pour les deux modèles sont interpolés :



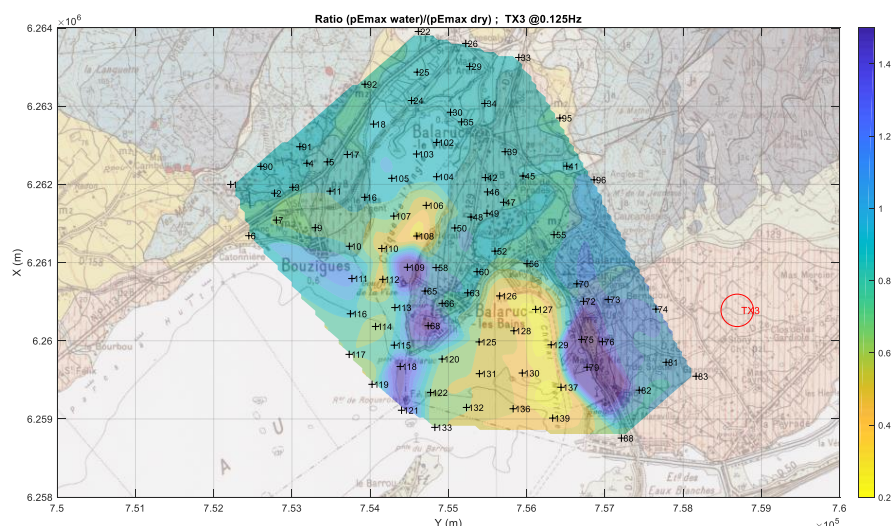


Figure 10 : Rapport entre le grand axe de polarisation du champ électrique mesuré aux positions des récepteurs pour le modèle « sec » et « avec bathymétrie » pour toutes les sources à la fréquence de 0,125 Hz (profond). L'effet de la mer est visible sur les récepteurs marins, ainsi que sur les stations terrestres proches de la côte avec une diminution/augmentation de l'amplitude du champ.

L'axe des ordonnées et l'axe des abscisses constituent la longitude et la latitude de la zone étudiée en mètres. Les couleurs chaudes représentent un faible rapport R, correspondant à une zone où le champ modélisé par le modèle bathymétrique est plus faible que le champ modélisé par le modèle sec. Inversement pour les couleurs froides. Tous ces graphiques peuvent être trouvés dans `~/CSEM_QC_LS/ratio_seaEffect_3TX_pE_max.ppt`.

Ensuite, le champ E total modélisé avec la contribution de la bathymétrie est cartographié pour les fréquences profondes et peu profondes pour chaque émetteur à 10 mètres de profondeur :



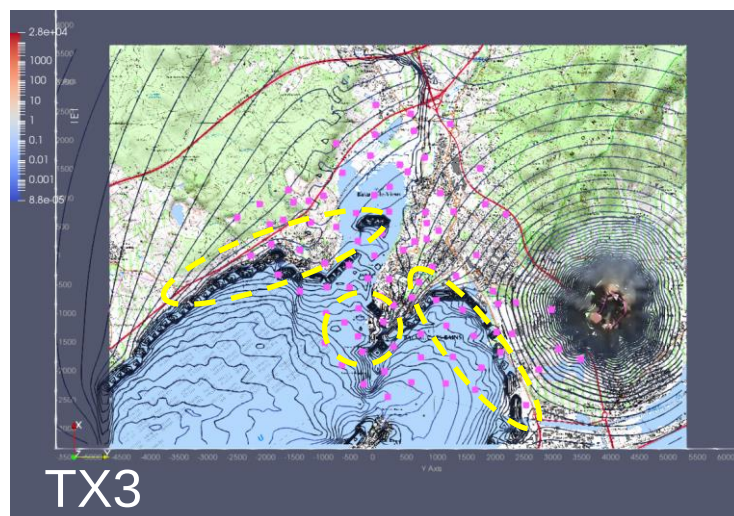
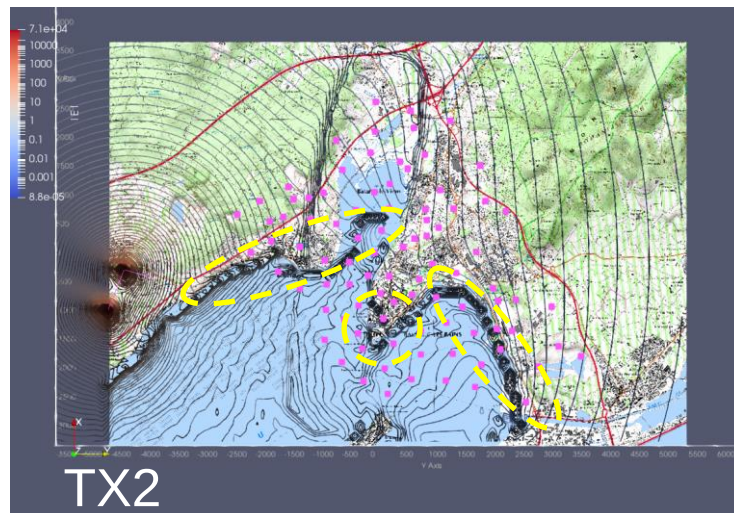
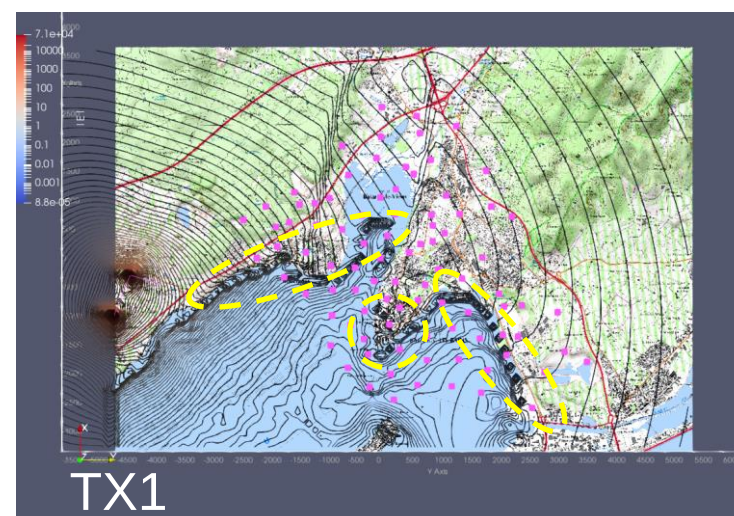


Figure 11 : Niveaux du logarithme de l'amplitude du champ électrique total modélisé à 10 m de profondeur sur chaque maille à 0,125 Hz (profond) pour les trois émetteurs. L'effet de la mer est clairement visible avec un resserrement des niveaux à l'interface terre-mer et l'apparition d'effets statiques d'accumulation de charges électriques à l'interface mer-terre.



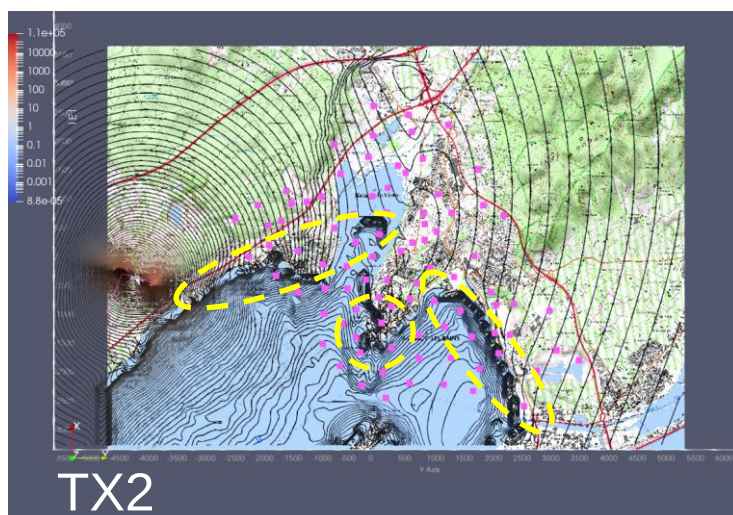


Figure 12 : Niveaux du logarithme de l'amplitude du champ électrique total modélisé à 10 m de profondeur sur chaque maille à 128 Hz (peu profond) pour les trois émetteurs. L'effet de la mer est clairement visible avec un resserrement des niveaux à l'interface terre-mer et l'apparition d'effets statiques d'accumulation de charges électriques à l'interface mer-terre.

À la fréquence de 0,125 Hz (en profondeur), 128 Hz (à faible profondeur), une baisse locale d'amplitude apparaît nettement aux stations marines : c'est l'effet de mer. Sur terre, en revanche, l'accumulation de la densité de charge près des côtes perturbe les lignes de champ et provoque une augmentation locale du champ sur plusieurs récepteurs Figure 11. L'effet de mer a un fort impact sur les récepteurs marins et sur les récepteurs terrestres le long de la côte. S'il n'est pas pris en compte pour l'inversion, il peut être difficile, voire impossible, de converger vers un résidu faible.

4. Inversions synthétiques

Dans cette partie, nous aborderons les différents tests d'inversions synthétiques¹ réalisés sur POLYEM3D pour la configuration de mesure utilisée à Thau. La grille d'inversion utilisée était similaire à la grille de modélisation, mais réduite dans l'espace à une fenêtre de $(Z \ Y \ X) = 3000 \times 11000 \times 7000$ centrée sur la grille 3D afin d'inverser uniquement la zone d'intérêt. Ces essais ont porté sur :

- inversion par la méthode Gauss-Newton avec le solveur LSQR et par la méthode de descente de gradient, moins coûteuse en mémoire, en utilisant WSMP pour la factorisation de la matrice du problème direct ;
- une norme des moindres carrés est utilisée pour le calcul des résidus à chaque itération pour différentes quantités d'entrée telles que la norme des données observées synthétiques, la norme du logarithme, etc... décrite dans Bretaudeau F., 2018 ;
- le paramètre d'inversion est la résistivité bornée ($0,1 < \rho < 2\ 000\ \Omega.m$) ;
- différentes valeurs de l'hyperparamètre de régularisation de Tikhonov. Le terme régularisation fait référence à l'équilibre entre la minimisation de la norme des moindres carrés des résidus et la minimisation de la norme du modèle (simplicité). En général, la valeur de l'hyperparamètre est choisie pour représenter un compromis satisfaisant entre ces deux grandeurs (voir section 4.1) ;
- un lissage spatial de l'ordre de 400 mètres dans le plan (X ; Y) et de 1~10 mètres en profondeur. ;
- l'activation du *Depth Scaling*, une fonction décrite dans Bretaudeau F., 2018. Elle augmente la sensibilité du modèle en fonction de la profondeur pour contrecarrer l'effet d'atténuation du champ EM. Elle peut également réduire la sensibilité du modèle localement à la surface et/ou à de très grandes profondeurs ;
- l'activation du *Module Scaling*, une fonction décrite dans Bretaudeau F., 2018. Elle permet de réduire localement la sensibilité du modèle en fonction de l'amplitude du champ électromagnétique de référence, notamment sous les émetteurs.

Un journal de bord est disponible dans `~/INVERSION/logbook_THAU.xlsx` et rapporte tous les tests effectués par ordre chronologique, avec un commentaire associé. Les tests sont référencés par leur nom de dossier et sont disponibles dans `~/RESULTS/nnn_XXX/`.

Chaque dossier comprend les fichiers d'entrée :

- *acqui_CSEM*, *em3d.par*, *data_obs_XXX*, *data_cova_XXX*, et la matrice de poids d'inversion W_d est classiquement choisie comme l'inverse de la covariance des données tel que : $W_d = 1/(|E| \cdot \eta)$ avec η le bruit blanc gaussien estimé à 1 % de l'amplitude du champ électrique ;
- la grille 3D du modèle : *grid01.asc*, *grid02.asc*, *grid03.asc* ;
- le modèle 3D vrai avec/sans bathymétrie : *rho_3d_intrusion.bin* ou *rho_3d_bathy_intrusion.bin* ;
- le modèle 3D de départ double couche 100/40 $\Omega.m$ avec la bathymétrie : *rho_3d_bathy.bin*. Ou *rho_start_bathy.bin* et *rho_start_1d.bin* ;
- le modèle 3D de référence demi-espace isotrope homogène : *rho0_3d.bin* ;
- le modèle de référence demi-espace isotrope homogène 1D : *layers.asc*.

¹ Il s'agit de générer des données synthétiques à partir d'un modèle géologique conceptuel. Une fois ces données générées, elles sont utilisées comme « données observées » dans l'inversion. Cette étape permet d'évaluer notre capacité à retrouver un modèle de départ à partir des caractéristiques du levé (fréquences, géométrie d'acquisition).

Et les fichiers de sortie, si inversion :

- les données prédites à chaque itération et à chaque fréquence *data_calc_XXX_XXX* ;
- les modèles 3D de résistivité inversée à chaque itération : *inverted_rho_XXX*.

Pour aller plus loin, les différents fichiers de sortie sont décrits dans le manuel d'utilisation de POLYEM3D.

4.1. RÉGULARISATION

Pour stabiliser un problème inverse sous-déterminé (c.a.d le nombre de paramètres inversibles excède fortement le nombre de données observées), la méthode de régularisation de Tikhonov est couramment utilisée. Le code POLYEM3D cherche à minimiser les résidus équation (3.2) en faisant varier les paramètres du modèle de résistivité, tout en ne s'écartant pas d'un modèle simple fixé par l'utilisateur. À la minimisation des résidus équation (3.2) s'ajoute alors la minimisation de la norme du modèle, tel que l'écart du modèle inversé avec un modèle simple soit le plus faible possible. Le nouveau problème s'écrit généralement sous la forme :

$$\lim_{\text{iteration} \rightarrow \infty} \Phi_{d,\text{iteration}} + \theta * \Phi_{m,\text{iteration}} = 0 \quad (4.3)$$

où Φ_d correspond aux résidus (3.2) appelée fonction coût des données, Φ_m correspond à la différence normée entre modèle inversé et modèle simple appelée fonction de coût modèle, et θ étant l'hyperparamètre de régularisation sans dimension. En général, la valeur de θ est choisie pour représenter un compromis satisfaisant entre Φ_d et Φ_m .

La Figure 13 montre la courbe de compromis, chaque point correspond à un résultat d'inversion avec différentes valeurs de θ :

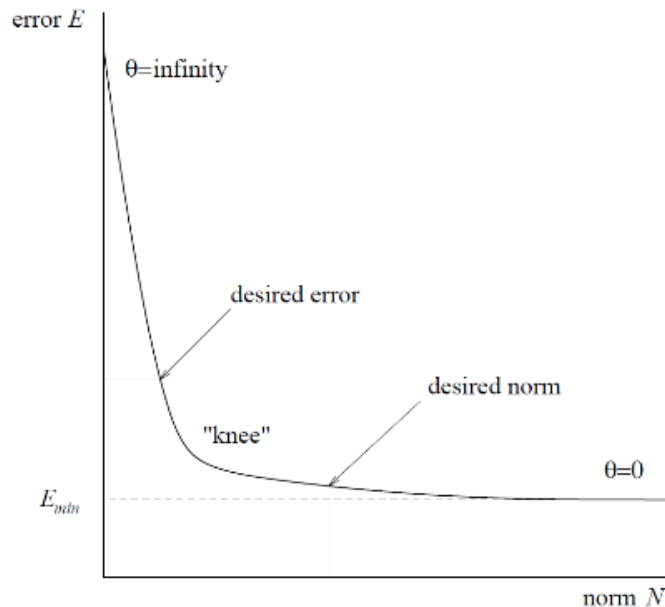


Figure 13 : Courbe de compromis entre l'ajustement des données et la norme du modèle, une mesure de la complexité du modèle. Chaque point de la courbe représente une solution, ce qui nous permet d'équilibrer le compromis entre un bon ajustement des données et un modèle simple. (Gubbins, 2004).

Cette courbe nous permet de choisir entre: 1) obtenir un modèle régulier et simple pour produire des interprétations structurales ($\theta \rightarrow \infty \leftrightarrow \Phi_{\text{total}} = \Phi_m$). 2) Si l'ensemble des données observées est fiable, l'objectif est alors de faire correspondre les données observées aux données prédites le mieux possible en minimisant au maximum les résidus ($\theta \rightarrow 0 \leftrightarrow \Phi_{\text{total}} = \Phi_d$). 3) Sinon, on cherche un compromis, généralement en choisissant la rupture de pente de la courbe de compromis représentée sur la Figure 13 (θ intermédiaire).

Avec POLYEM3D, la méthodologie actuelle consiste à tracer une courbe de compromis à la première itération en utilisant une astuce d'approximation linéaire du problème inverse non-linéaire, puis à choisir graphiquement la valeur de l'hyperparamètre par l'utilisateur, qui reste la même pour le reste de l'inversion quel que soit le nombre d'itérations. Nous donnons un exemple à la Figure 14 pour deux jeux de données observées, un synthétique et un réel. L'axe des x représente la fonction de coût des données, l'axe des y la fonction de coût du modèle. Chaque point correspond à une solution pour une valeur donnée de l'hyperparamètre de régularisation de Tikhonov. Le zone de compromis de la pente est entourée d'un cercle coloré pour les deux cas, et correspond à la zone de compromis entre la norme du modèle et l'ajustement des données. Les dossiers correspondants sont `~/inversion2_synth_bathy_2TX/` et `~/inversion_next_2TX/`.

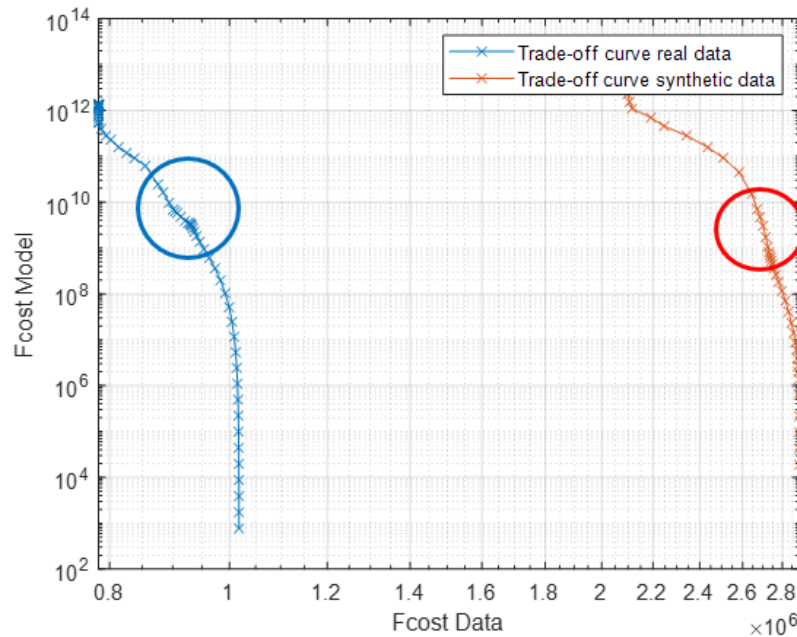


Figure 14 : Exemple d'une recherche de l'hyperparamètre de régularisation de Tikhonov optimal pour des données observées synthétiques et réelles. Valeurs prises de 10^{-15} jusqu'à 15 pour les données synthétiques, et de 10^{-11} jusqu'à 1 500 pour les données réelles. Les zones entourées représentent le compromis entre la norme du modèle et l'ajustement des données.

La convergence du modèle correspond à la minimisation de la fonction de coût totale (4.3).

4.2. INVERSIONS PRÉLIMINAIRES (1 MÈTRE)

4.2.1. Sans bathymétrie

Une première inversion est réalisée avec un modèle de départ constitué d'un bloc de 100 Ω .m sur 400m puis d'un demi-espace isotrope homogène de 40 Ω . Les données observées synthétiques sont les données modélisées à partir de `~/forward_3TX_v2/` pour 4 fréquences : 2, 8, 32, 128 Hz. Pour rappel, grille 3D (n_1, n_2, n_3) = 152 x 134 x 94 (environ 1 900 000 mailles) avec, dans la zone d'intérêt, des mailles de (ZYX) = 1 x 100 x 100 m. Les émetteurs TX1 et TX2 sont utilisés pour l'inversion, le dossier est disponible sous le nom `~/inversion_synth_2TX/`. La première étape consiste à déterminer le paramètre de régularisation de Tikhonov optimal pour obtenir un modèle interprétable en générant une courbe de compromis, puis l'inversion est initialisée avec :

- l'hyperparamètre de régularisation de Tikhonov est égal à 0,008 (un peu plus de poids est donné à la norme des moindres carrés des résidus par rapport à la norme du modèle) ;
- lissage spatial (Z Y X) = 10 250 250 ;
- *Depth scaling* activé, mais les 10 premiers mètres avec une forte diminution de la sensibilité. De même, une forte diminution de la sensibilité est réglée à partir de 2 000 mètres.

Les résidus convergent vers une moyenne quadratique réduite $RMS = 17$ (idéalement le $RMS \rightarrow 1$). Nous traçons les résidus de données par émetteurs pour visualiser ce que le modèle inversé final explique par rapport au modèle de départ. Sur l'axe des abscisses sont représentés les récepteurs avec leurs numéros d'identification, sur l'axe des ordonnées sont représentées les fréquences inversées. Pour chaque paire récepteur-fréquence, deux carrés sont affichés, correspondant à gauche au résidu du modèle de départ et à droite au résidu du modèle final. Pour avoir une vue d'ensemble, la progression du résidu global réduit est donnée dans le titre.

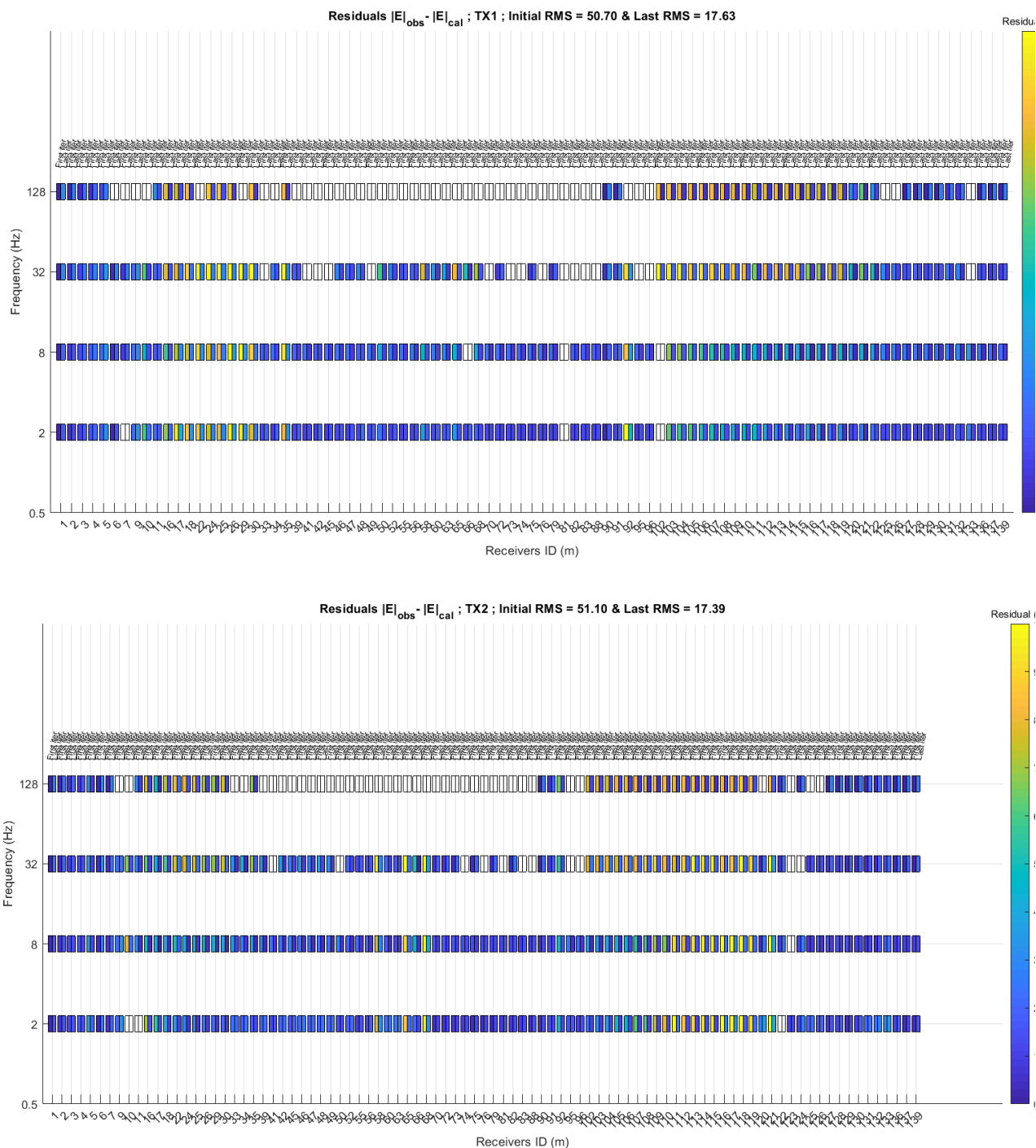


Figure 15 : Tracé des résidus aux positions récepteurs pour chaque émetteur (inversion_synth_2TX). Sur l'axe des abscisses sont représentés les récepteurs avec leurs numéros d'identification, sur l'axe des ordonnées sont représentées les fréquences inversées. Pour chaque paire récepteur-fréquence, deux carrés sont affichés, correspondant à gauche au résidu du modèle de départ et à droite au résidu du modèle final (itération 6).

Les récepteurs positionnés au-dessus de l'intrusion conductrice du modèle vrai (cf. section 3.2) divergent d'abord du modèle de départ de $100 \Omega.m$ à la surface. Après cinq itérations, l'inversion réussit à expliquer ces résidus anormaux, et les réduit sous la barre d'erreur de 40 % afin de retrouver le corps conducteur entre 50 et 400 mètres de profondeur. Une visualisation 3D d'une section transversale du modèle inversé est disponible sur le logiciel Paraview Figure 16.

Le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées $X0 = 6\,261\,500$ m et $Y0 = 754\,500$ m. L'intrusion conductrice du modèle vrai est représentée en surface 3D avec le maillage apparent.

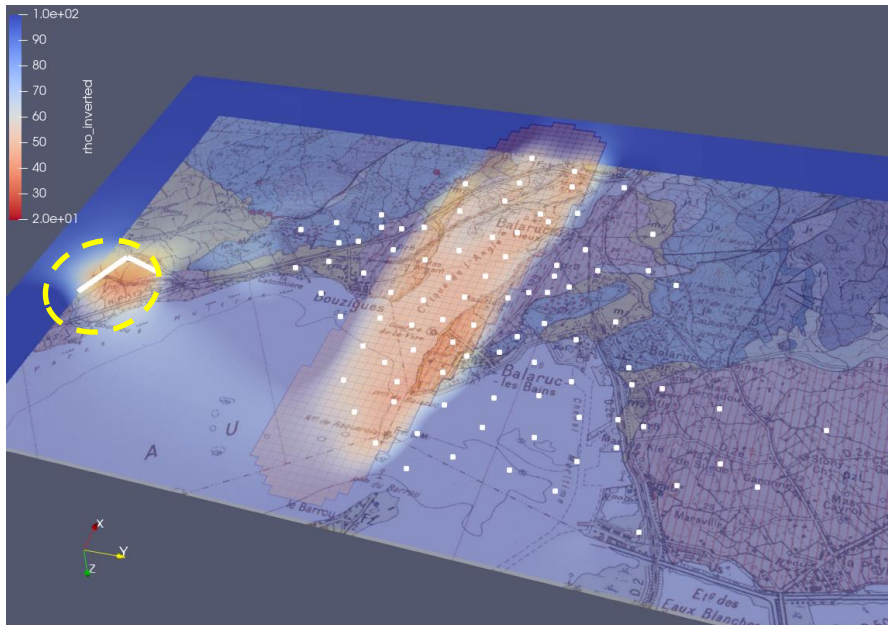


Figure 16 : Coupe horizontale à l'itération 6 du modèle inversé à 50 mètres de profondeur (inversion2_synth_bathy_2TX). La coupe est de dimensions (XY) = $7\,000 \times 11\,000$ m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées $X0 = 6\,261\,500$ m et $Y0 = 754\,500$ m. Les couleurs chaudes correspondent à des zones de faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. L'intrusion conductrice sous-jacente du modèle vrai est représentée en transparence orange afin de visualiser ce que l'inversion réussit à retrouver.

L'intrusion conductrice est correctement retrouvée dans l'espace, mais la valeur absolue de la résistivité diffère des $20 \Omega.m$ du modèle vrai. Un effet de source a conduit l'inversion à placer une grande anomalie conductrice sous les deux émetteurs. Afin de réduire ces artefacts d'inversion, nous devons contraindre les paramètres du modèle sous les émetteurs en ajoutant une contrainte et cela sera traité dans la section 4.3.4.

4.2.2. Avec bathymétrie

Ensuite, une seconde inversion a été effectuée avec un modèle de départ avec bathymétrie cette fois. Elle consiste en un bloc de $100 \Omega.m$ sur 400 m puis un demi-espace isotrope homogène de $40 \Omega.m$. Les données observées sont les données modélisées à partir de `~/forward_bathy_3TX_v2/` pour 4 fréquences : 2, 8, 32, 128 Hz. La même grille, et la même configuration de mesures ont été utilisées, le dossier est disponible sous le nom `~/inversion2_synth_bathy_2TX/`. L'inversion est initialisée avec :

- l'hyperparamètre de régularisation de Tikhonov est égal à 0,008 (un peu plus de poids est donné à la norme des moindres carrés des résidus par rapport à la norme du modèle) ;
- lissage spatial (Z Y X) = 1 500 500 ;
- *Depth Scaling* activée, mais les 10 premiers mètres avec une forte diminution de la sensibilité. Aussi, une forte diminution de la sensibilité est réglée à partir de 2 000 mètres ;
- *Module Scaling* activé, et fixe l'eau non inversible à $0,18 \Omega.m$.

Afin de visualiser la convergence du modèle (minimisation de la fonction de coût), nous traçons un graphique dans la Figure 17 qui représente le logarithme de la fonction de coût totale (fonction de coût modèle + fonction de coût données) en fonction du nombre d'itérations:

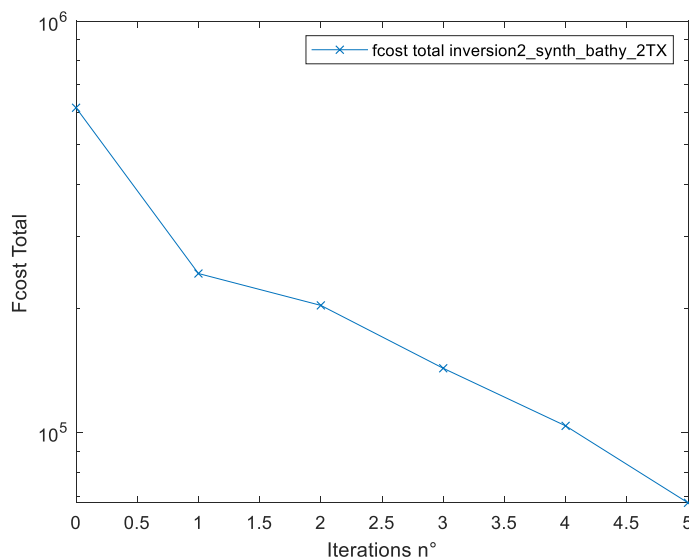
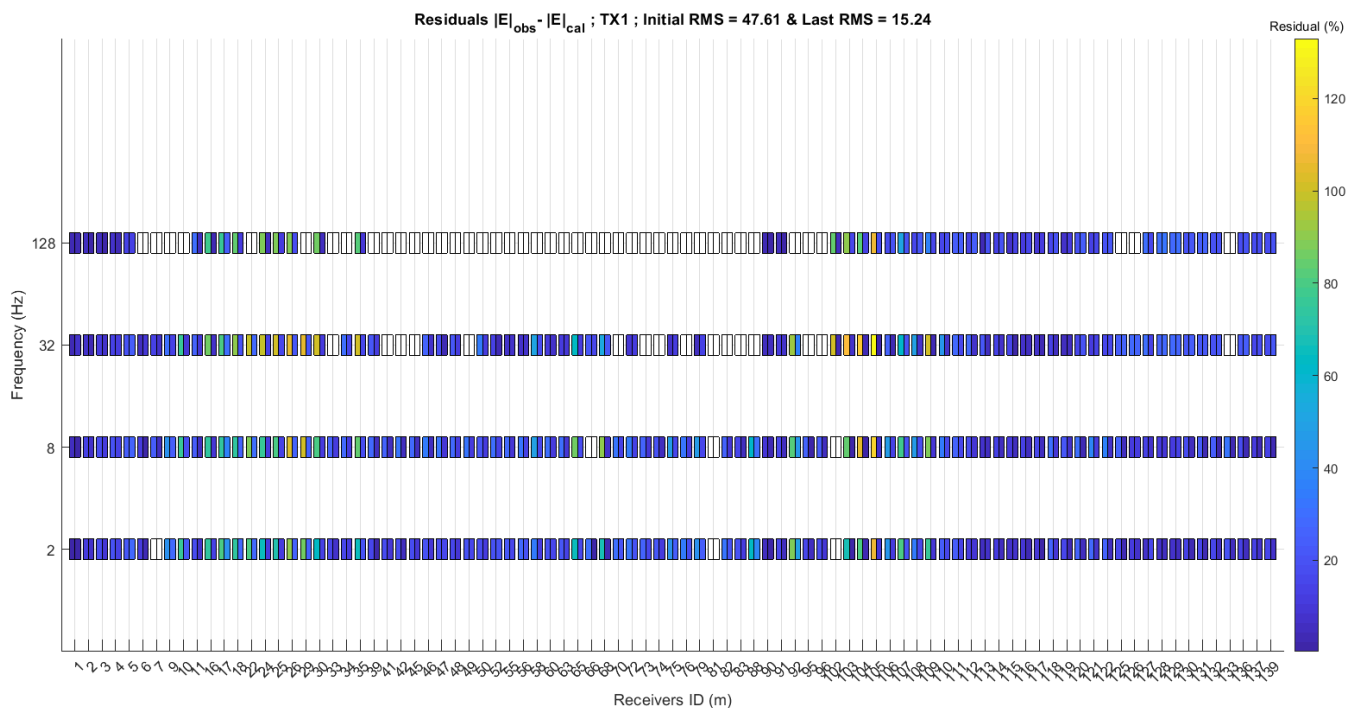


Figure 17 : Fonction de coût total selon le nombre d'itérations pour $\sim$ /inversion2_synth_2TX/.

Les résidus convergent vers une moyenne quadratique réduite RMS = 15. Nous traçons à la Figure 18 les résidus de données par les émetteurs pour visualiser ce que le modèle inversé final explique par rapport au modèle de départ.



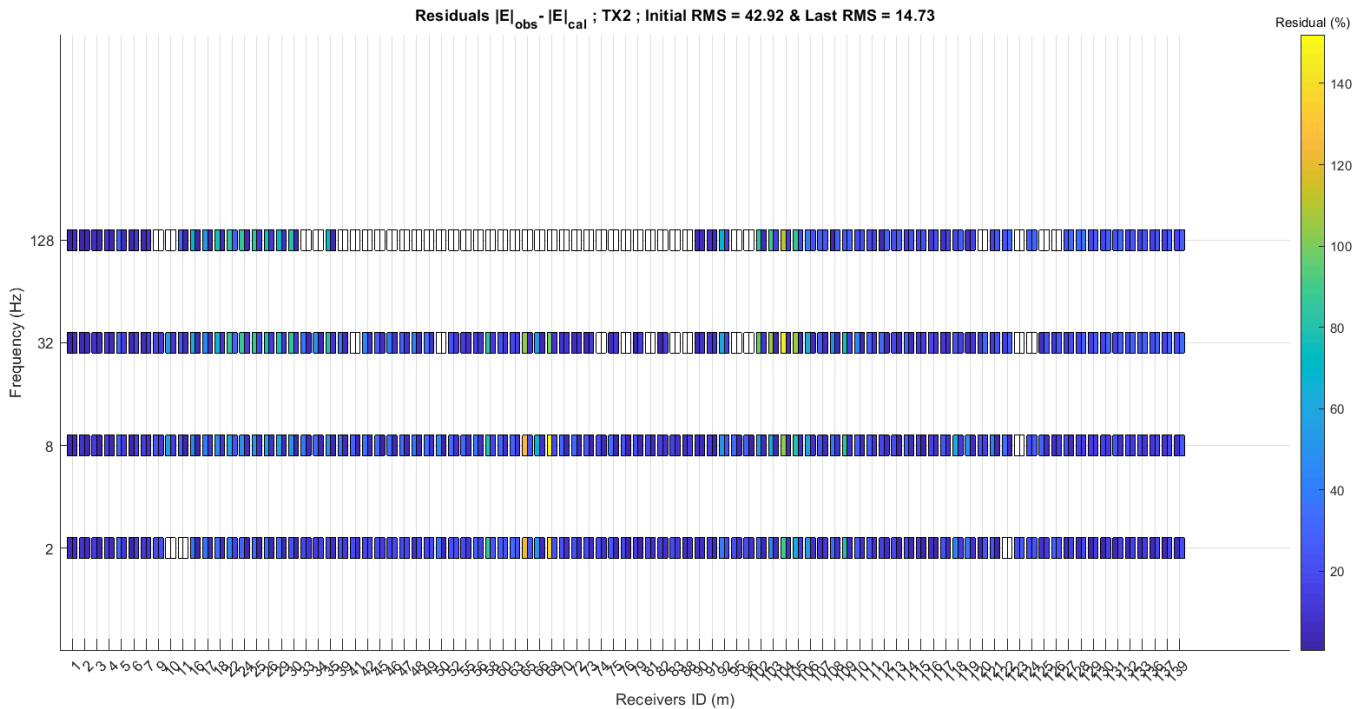


Figure 18 : Tracé des résidus aux positions récepteurs pour chaque émetteur (inversion2_synth_bathy_2TX). Sur l'axe des abscisses sont représentés les récepteurs avec leurs numéros d'identification, sur l'axe des ordonnées sont représentées les fréquences inversées. Pour chaque paire récepteur-fréquence, deux carrés sont affichés, correspondant à gauche au résidu du modèle de départ et à droite au résidu du modèle final (itération 5).

Une visualisation 3D d'une section transversale du modèle inversé final est disponible sur le logiciel Paraview Figure 19.

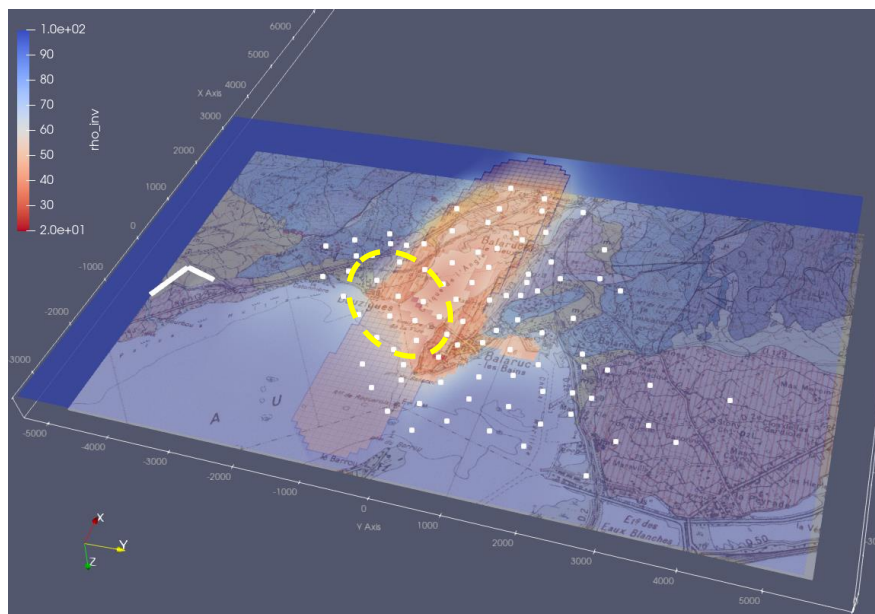


Figure 19 : Coupe horizontale de l'itération 5 du modèle inversé à 50 mètres de profondeur (inversion2_synth_bathy_2TX). La coupe est de dimensions (XY) = 7 000 x 11 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées X0 = 6 261 500 m et Y0 = 754 500 m. Les couleurs chaudes correspondent à des zones de faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. L'intrusion conductrice sous-jacente du modèle vrai est représentée en transparence orange afin de visualiser ce que l'inversion réussit à retrouver.

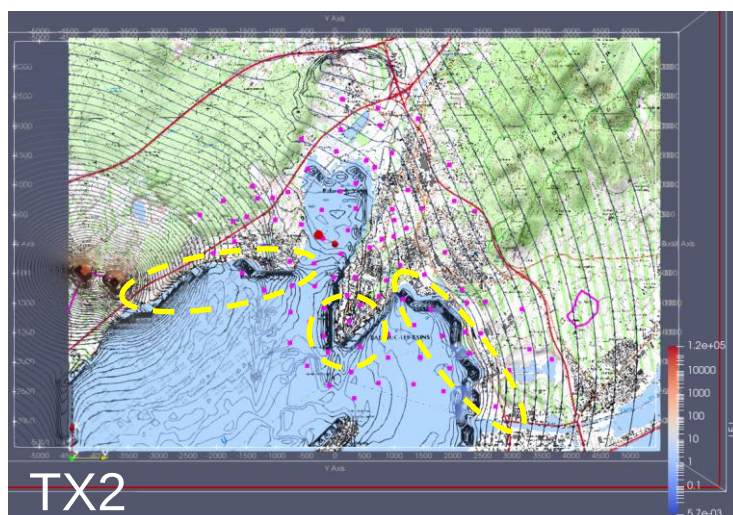
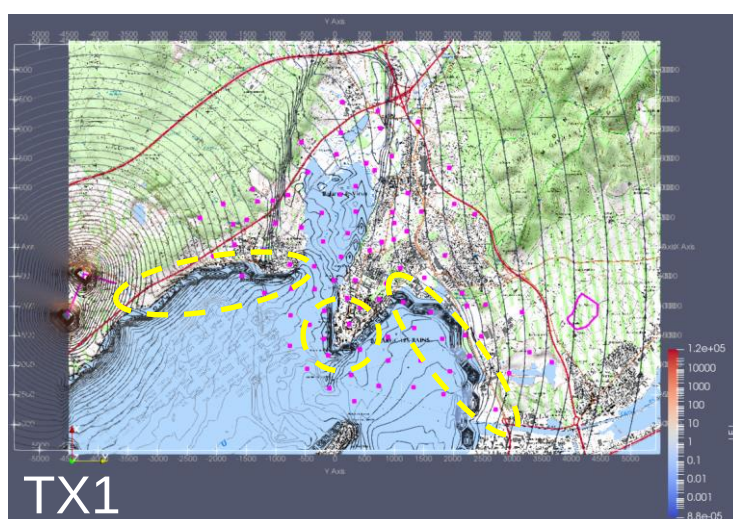
L'intrusion conductrice est partiellement récupérée dans l'espace, et la valeur absolue de la résistivité diffère des 20 $\Omega.m$ du modèle vrai (cf. section 3.2). En effet, une partie de l'intrusion n'est pas récupérée sous les récepteurs marins situés en bordure de l'étude. Ceci est directement causé par l'effet de mer qui masque l'information de l'anomalie conductrice sous-jacente à ces positions.

4.3. INVERSIONS PRÉCISES (10 CENTIMÈTRES)

Afin d'améliorer la sensibilité du modèle sous la mer, nous avons choisi d'affiner le maillage et la bathymétrie à 0,1 mètre. Cela vise à réduire les effets statiques le long du littoral, qui ont été numériquement augmentés par le précédent maillage grossier de 1 mètre.

4.3.1. Modélisation

Le dossier est disponible sous le nom *~/forward_last/*. Les données observées synthétiques aux positions des récepteurs sont modélisées pour 9 fréquences : 0,125, 0,5, 2, 8, 32, 128, 256, 512 et 1 024 Hz. Ensuite, le champ E total modélisé avec la nouvelle bathymétrie fine est cartographié pour les fréquences profondes et peu profondes pour chaque émetteur à 6 mètres de profondeur : Figure 20 et Figure 21 respectivement. La nouvelle bathymétrie a amélioré l'effet statique le long du littoral. Cependant, à faible profondeur, la mer masque complètement l'intrusion conductrice sous-jacente. Nous sommes maintenant plus fidèles à la réalité du terrain. Nous remarquons que le champ électrique est plus lisse par rapport à la bathymétrie précédente, et il n'y a plus de décalage d'amplitude au milieu de l'étang.



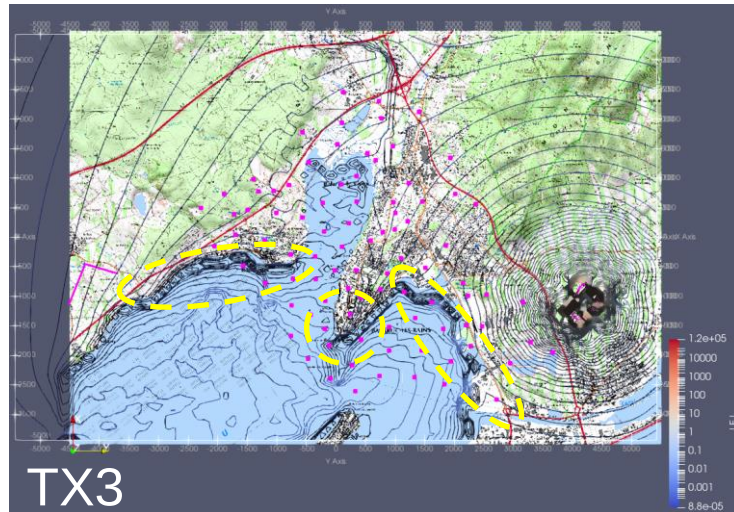


Figure 20 : Niveaux du logarithme de l'amplitude du champ électrique total modélisé à 6m de profondeur sur chaque maille à 0,125Hz (en profondeur) pour les trois émetteurs. L'effet de la mer est clairement visible avec un resserrement des niveaux à l'interface terre-mer et l'apparition d'effets statiques d'accumulation de charges électriques à l'interface mer-terre. Bathy 0,1m.

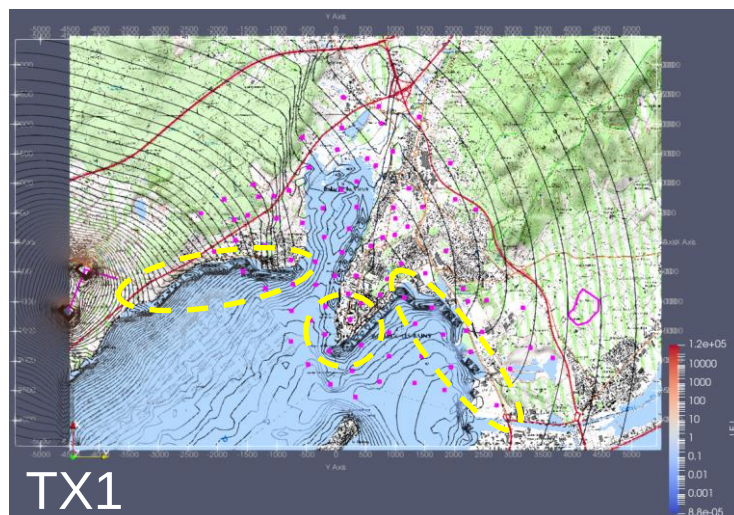




Figure 21 : Niveaux du logarithme de l'amplitude du champ électrique total modélisé à 6m de profondeur sur chaque maille à 128 Hz (peu profond) pour les trois émetteurs. L'effet de la mer est clairement visible avec un resserrement des niveaux à l'interface terre-mer et l'apparition d'effets statiques d'accumulation de charges électriques à l'interface mer-terre. Bathy 0,1m.

4.3.2. Mauvais résultat d'inversion typique

Afin de valider ce résultat encourageant, une inversion synthétique est réalisée avec la nouvelle bathymétrie et un modèle de départ consistant en un demi-espace isotrope homogène de 25 $\Omega.m$. Les données observées synthétiques sont les données modélisées à partir de *~/forward_last/* pour 6 fréquences : 0,125, 0,5, 2, 8, 32, 128 Hz. La nouvelle grille 3D (n_1, n_2, n_3) = 106 x 134 x 94 (environ 1 100 000 mailles) avec, dans la zone d'intérêt, des mailles de (ZYX) = 0,1 x 100 x 100 m. Le dossier se trouve sous le nom de *~/inversion_synth_2TX/*.

Les besoins en mémoire et le nombre d'opérations numériques peuvent être réduits au cours du processus d'inversion par la compression de la grille 3D de modélisation, où des interpolateurs sont alors utilisés pour relier la grille de construction à la grille d'inversion. Cette méthode vise à réduire le nombre de paramètres inversibles et à stabiliser le problème inverse sous-déterminé. Dans le logiciel POLYEM3D, 3 options d'interpolateur sont disponibles :

- paramétrisation basée sur les splines linéaires ;
- paramétrisation basée sur les splines cubiques ;
- paramétrisation basée sur l'interpolation du plus proche voisin.

La grille d'inversion grossière est définie à partir des fichiers d'entrée *Igrid01.asc*, *Igrid02.asc* et *Igrid02.asc*. L'inversion *~/inversion_synth_2TX/* est initialisée avec :

- l'hyperparamètre de régularisation de Tikhonov est égal à 0,0004 (un peu plus de poids est donné à la norme des moindres carrés des résidus par rapport à la norme du modèle) ;
- lissage spatial (Z Y X) = 1 400 400 ;
- *Depth Scaling* est activée, mais une forte diminution de la sensibilité est réglée à partir de 2 000 mètres ;
- inversion avec une grille de taille réduite (n_1, n_2, n_3) = 18 x 38 x 25 à partir de 10 mètres de profondeur.

Afin de visualiser la convergence de la minimisation de la fonction de coût, nous traçons un graphique dans la Figure 22 qui représente le logarithme de la fonction de coût totale (fonction de coût modèle + fonction de coût données) en fonction du nombre d'itérations :

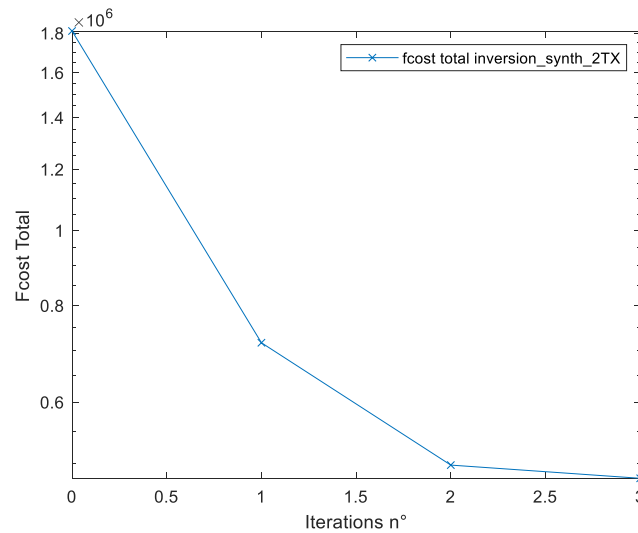


Figure 22 : Fonction de coût total selon le nombre d'itérations pour *inversion_synth_2TX*.

Les résidus convergent vers une moyenne quadratique réduite RMS = 27. Sur la Figure 23, nous traçons les résidus de données par émetteurs pour visualiser ce que le modèle inversé final explique par rapport au modèle de départ. Pour quasiment chaque donnée, l'algorithme d'inversion réduit les résidus.

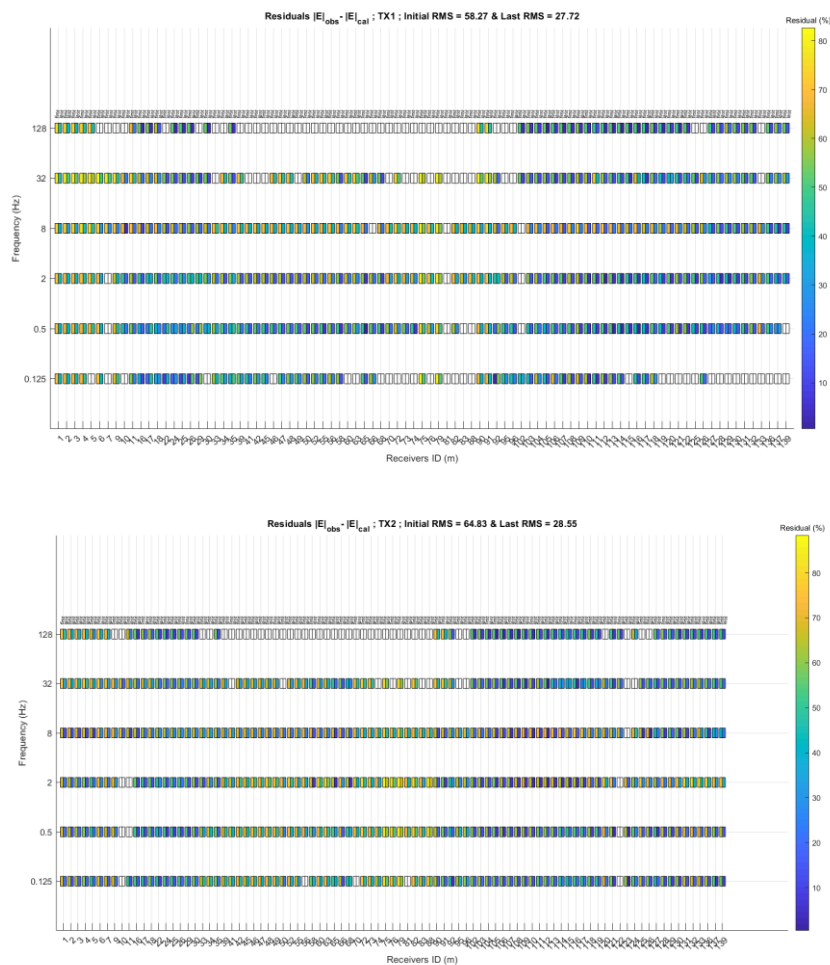


Figure 23 : Tracé des résidus aux positions récepteurs pour chaque émetteur (*inversion_synth_2TX* (dernier)). Sur l'axe des abscisses sont représentés les récepteurs avec leurs numéros d'identification, sur l'axe des ordonnées sont représentées les fréquences inversées. Pour chaque paire récepteur-fréquence, deux carrés sont affichés, correspondant à gauche au résidu du modèle de départ et à droite au résidu du modèle final (itération 4).

Une visualisation 3D d'une section transversale du modèle inversé est disponible sur le logiciel Paraview Figure 24.

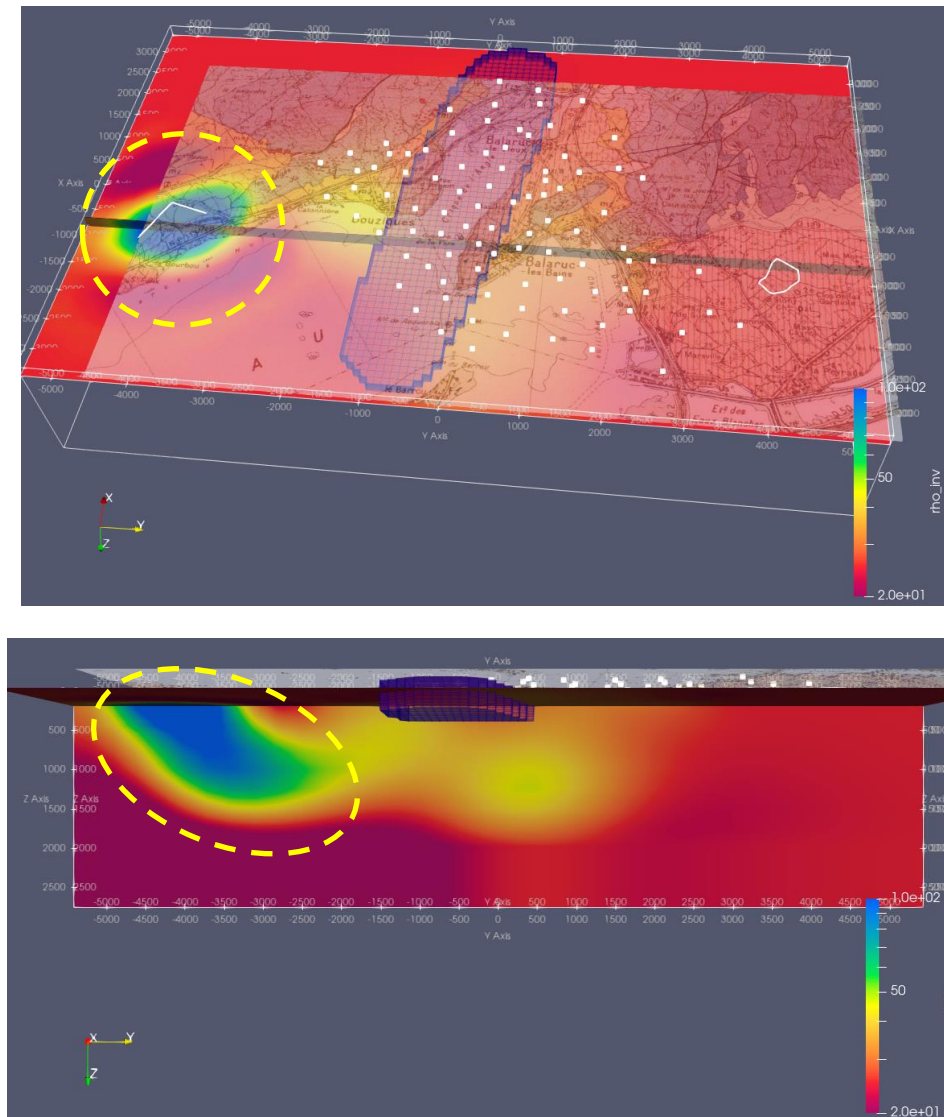


Figure 24 : Coupe horizontale et verticale de l'itération 4 du modèle inversé à 200 mètres de profondeur (~/*inversion_synth_2TX*/). La coupe est de dimensions (XY) = 7 000 x 11 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées $X_0 = 6\,261\,500$ m et $Y_0 = 754\,500$ m. Les couleurs chaudes correspondent à une faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. Les points représentent la position des récepteurs utilisés pour la modélisation. Les lignes représentent la position des câbles d'émission..
L'intrusion conductrice du modèle vrai est représentée en surface 3D avec le maillage apparent.

L'inversion ne retrouve pas un modèle final satisfaisant après 4 itérations, en effet, une grande partie de la couche 100 $\Omega\cdot\text{m}$ du modèle vrai est déplacée sous les sources. Ici typiquement, le modèle de départ 25 $\Omega\cdot\text{m}$ est donc trop éloigné du modèle vrai, le processus d'inversion se « perd » dans un minimum local. Il est donc préconisé d'améliorer le modèle de départ afin de le rapprocher dans une moindre mesure au modèle final attendu (= modèle vrai).

4.3.3. Inversion 1D préalable pour déterminer le modèle de départ

L'objectif est d'améliorer le modèle de départ précédemment constitué d'un demi-espace isotrope homogène de 25 $\Omega\cdot\text{m}$, pour ce faire, une nouvelle méthodologie est mise en œuvre. En première étape, une inversion 1D sur la grille 3D est réalisée avec les données observées synthétiques afin d'améliorer la norme des moindres carrés avant la première itération d'inversion 3D dans le but de diriger le problème inverse. Dans le cas 1D, les paramètres inversés dans la direction (X, Y) sont de

dimension 1. La nouvelle grille d'inversion est donc $(n_1, n_2, n_3) = 18 \times 1 \times 1$. Pour cet exemple, nous avons choisi la paramétrisation des splines linéaires.

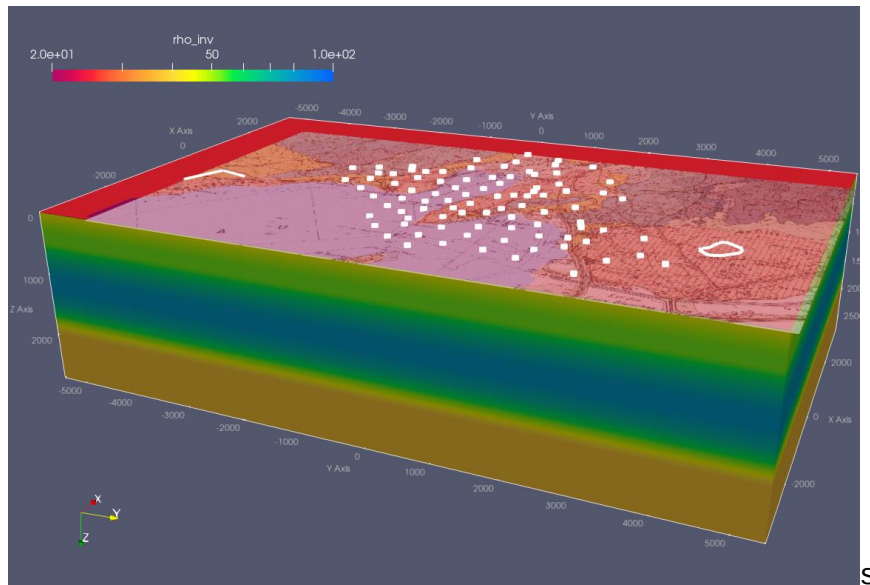


Figure 25 : Résultat de la première étape de l'inversion 1D pour les données observées synthétiques après 3 itérations. Le bloc est de dimensions $(XYZ) = 7\,000 \times 11\,000 \times 3\,000$ m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées $X_0 = 6\,261\,500$ m et $Y_0 = 754\,500$ m. Les couleurs chaudes correspondent à une faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. Les points représentent la position des récepteurs utilisés pour la modélisation. Les lignes représentent la position des câbles d'émission.

Une visualisation 3D du modèle inversé après 3 itérations est disponible sur le logiciel Paraview Figure 25. L'inversion 1D réussit partiellement à retrouver la couche du socle de $40\ \Omega \cdot m$ et la positionne autour de 2000 mètres de profondeur. La couche proche de la surface est retrouvée sous la forme d'un gradient allant de $25\ \Omega \cdot m$ à $100\ \Omega \cdot m$. Il s'agit d'un mélange entre l'intrusion conductrice et l'encaissant résistant mais déplacée plus en profondeur. Ce résultat nous encourage à utiliser ce modèle comme modèle de départ pour l'inversion synthétique 3D. Si elle s'avère utile, cette méthodologie sera appliquée aux données observées réelles mesurées de la zone en 2017.

4.3.4. Inversion avec contrainte spatiale sous les émetteurs

La dernière étape a consisté à activer le *Module Scaling* sous les émetteurs afin de réduire l'effet de source observé sur la Figure 16. La contrainte 3D est construite en fonction de l'inverse de l'amplitude des champs modélisés à partir du modèle de référence. L'objectif est de réduire l'anomalie conductrice sous les émetteurs afin de mieux retrouver l'intrusion conductrice par inversion. Une inversion est réalisée avec le modèle de départ constitué d'un demi-espace isotrope homogène de $100\ \Omega \cdot m$ avec la bathymétrie ajoutée. Pour rappel, grille 3D $(n_1, n_2, n_3) = 106 \times 134 \times 94$ (environ 1 100 000 mailles) avec, dans la zone d'intérêt, des mailles de $(ZYX) = 0,1 \times 100 \times 100$ m. Le dossier est disponible sous le nom `~/inversion_synth_last_MS_2TX/`.

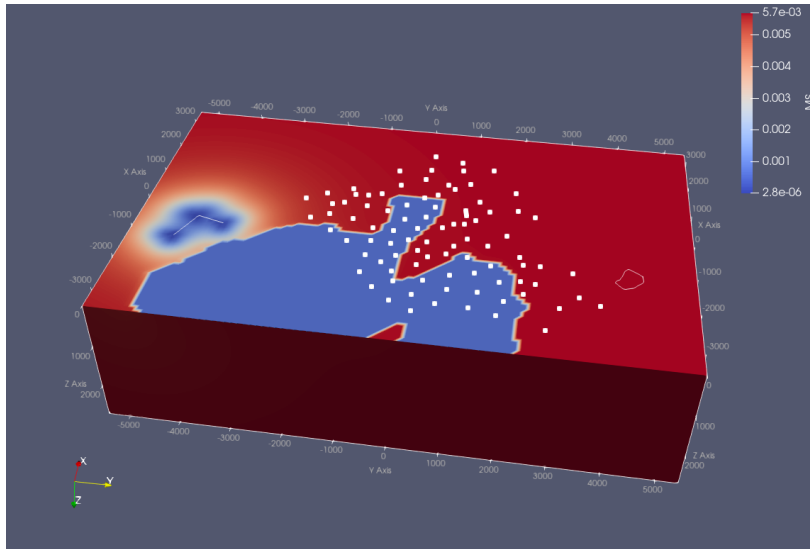


Figure 26 : Visualisation du Module Scaling appliqué pour le test *inversion_synth_last_MS_2TX/*. Les couleurs chaudes correspondent aux zones les moins contraintes, les couleurs froides aux zones les plus contraintes (sous les émetteurs).

L'inversion est initialisée avec :

- l'hyperparamètre de régularisation de Tikhonov est égal à 0,0002 (là encore, un poids légèrement supérieur est accordé à la norme des moindres carrés des résidus par rapport à la norme du modèle) ;
- lissage spatial (Z Y X) = 1 400 400 ;
- *Depth Scaling* est activée, mais une forte diminution de la sensibilité est réglée à partir de 2 000 mètres ;
- le *Module Scaling* activé et illustré par la Figure 26, fixe l'eau non inversible à 0,18 $\Omega.m$ et contraint les émetteurs.

Nous traçons un graphique à la Figure 27 qui représente le log de la fonction de coût total (fonction de coût modèle + fonction de coût données) en fonction du nombre d'itérations :

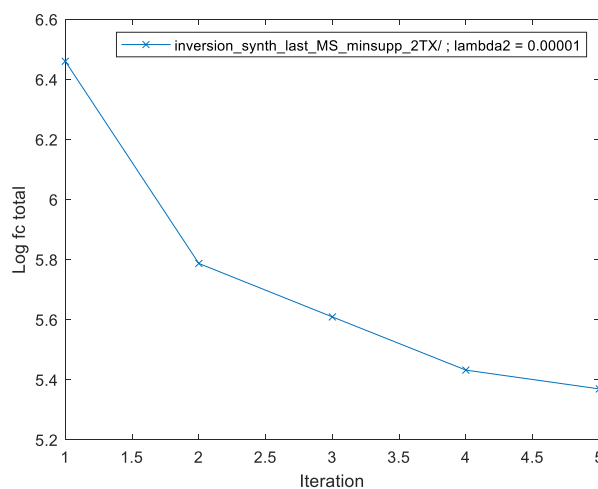


Figure 27 : Fonction de coût total en fonction du nombre d'itérations pour *inversion_synth_last_MS_2TX/*.

Les résidus convergent vers une moyenne quadratique réduite RMS = 13. Une visualisation 3D d'une section transversale du modèle inversé final est disponible sur le logiciel Paraview Figure 28.

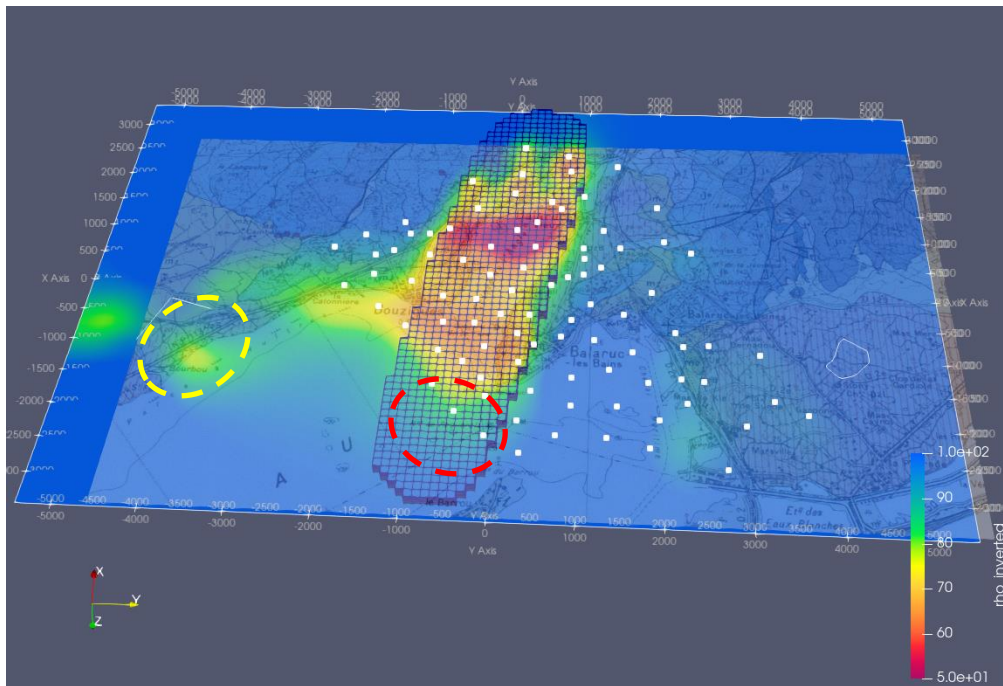


Figure 28 : Coupe horizontale de l'itération 4 du modèle inversé à 200 mètres de profondeur (~inversion_synth_last_MS_2TX/). La coupe est de dimensions (XY) = 7 000 x 11 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées $X_0 = 6\,261\,500$ m et $Y_0 = 754\,500$ m. Les couleurs chaudes correspondent à une faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. Les points représentent la position des récepteurs utilisés pour la modélisation. Les lignes représentent la position des câbles d'émission. L'intrusion conductrice du modèle vrai est représentée en surface 3D avec le maillage apparent.

La Figure 28 met en évidence l'effet du *Module Scaling* sur le résultat. Désormais, l'artefact sous les émetteurs a été fortement atténué par la pénalité introduite dans ce test d'inversion. L'anomalie conductrice sous-jacente est maintenant correctement retrouvée spatialement en (X ; Y) malgré la forte variation de résistivité à l'intérieur. La valeur absolue de résistivité n'est toujours pas retrouvée, donc pour atteindre les 20 Ω .m du modèle vrai, il sera nécessaire de pousser l'inversion au-delà des 4 itérations réalisées pour ce test. De plus, un réglage de la régularisation de la norme du modèle nous permettrait de lisser spatialement les sauts de résistivité. Nous remarquons que les anomalies de conductivité à l'intérieur du corps conducteur sont situées près des interfaces mer-terre. Ceci est directement lié aux effets statiques présents dans ces zones qui induisent un très fort gradient de résistivité. La sensibilité de l'inversion est significativement liée au gradient de résistivité, c'est-à-dire que l'inversion met à jour les paramètres du modèle en premier lieu là où le gradient est fort.

Après ces nombreux tests synthétiques, nous avons choisi d'inverser les données THAU en tenant compte des résultats obtenus dans cette section : c'est-à-dire la méthode d'inversion, la méthode de régularisation, le lissage spatial, et le modèle de départ avec la bathymétrie.

5. Inversions des données réelles

Dans cette partie, les inversions des données observées (réelles) seront traitées.

5.1. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie d'inversion était la suivante :

- tout d'abord, revoir la qualité des données pour les récepteurs utilisés pour l'inversion ;
- sélectionner le type de données observées d'entrée : partie réelle et imaginaire du champ électrique, $\log_{10}$ de la norme du champ électrique, etc. ;
- sélectionner les paramètres d'inversion optimaux en fonction des résultats des tests synthétiques sur le modèle vrai avec la nouvelle bathymétrie ;
- établir une première carte des résidus après la première itération dans le but d'identifier les valeurs aberrantes à des fréquences données ;
- une fois les valeurs aberrantes éliminées, sélectionner avec soin les fréquences d'inversion (en fonction de l'objet que l'on veut imager) ;
- améliorer le processus itératif pendant l'inversion en relâchant la contrainte sur le modèle à mesure que le RMS des résidus diminue.

Ces points seront expliqués au fur et à mesure dans la suite de cette section. L'analyse des spectres en phase et en quadrature de phase a permis de décider d'une première inversion typique : la partie réelle et la partie imaginaire du champ électrique. En effet, sur la plupart des récepteurs des trois émetteurs, l'amplitude du champ en phase et celle du champ en quadrature de phase sont du même ordre de grandeur. Un fichier *QC_SPECTRA.ppt* est disponible dans les dossiers *~/CSEM_QC_LS/* et contient les spectres d'amplitude du champ électrique en fonction des deux composantes X et Y de chaque récepteur pour chaque émetteur. Ce fichier est un outil adéquat pour comparer rapidement deux stations très proches l'une de l'autre et pour détecter des anomalies qui n'auraient pas d'origine géologique. Les données observées qui ne valident pas le traitement de qualité sont injectées dans POLYEM3D avec une valeur absurde *dobs, iteration = 99999 + i99999 V/m*. Associée à ces données, une covariance nulle *dcova, iteration = 0*, qui correspond à un poids nul dans l'inversion.

Sur la base du modèle géologique et des diagraphies de forage, nous avons estimé la résistivité du sol sous les émetteurs à 15-30 $\Omega.m$ sur une profondeur de 50 mètres. Le modèle de départ doit être considéré comme un demi-espace isotopique homogène de résistivité égale au sol sous les émetteurs. Dans la pratique, les données électromagnétiques transitoires et les diagraphies des trous de forage sont couramment utilisées pour calibrer cette valeur. Les inversions suivantes ont été initialisées avec :

- inversion par la méthode Gauss-Newton et par la méthode de descente par gradient ;
- l'hyperparamètre de régularisation de Tikhonov pris avec un poids légèrement supérieur à l'ajustement des données par rapport à la norme du modèle ;
- lissage spatial entre $(Z \ Y \ X) = 1 \ 500 \ 500$ et $(Z \ Y \ X) = 1 \ 300 \ 300$;
- *Depth Scaling* activé, mais une forte diminution de la sensibilité est réglée à partir de 2000 mètres ;
- *Module Scaling* activé pour contraindre la bathymétrie, ou activée pour contraindre la bathymétrie et les émetteurs, ou désactivée ;
- le nombreux modèles de départ, par exemple un modèle avec la bathymétrie isotrope homogène demi-espace 25 $\Omega.m$, ou un modèle inversé en 1D ;

- utiliser une paramétrisation avec des grilles d'inversion beaucoup plus grossières que la grille de modélisation pour stabiliser le problème sous-déterminé.

De nombreuses tentatives ont été faites avec des données réelles, par souci de clarté, les différents résultats obtenus pour chaque test sont résumés dans la section suivante.

5.2. ESSAIS D'INVERSION

Il s'agira ici d'une description étape par étape des deux semaines consacrées aux inversions de données observées réelles et plusieurs approches ont été étudiées. Il est recommandé vivement de consulter les dossiers de résultats car toutes les figures n'ont pu être reproduites dans le présent rapport.

5.2.1. 1^{er} essai

Tout d'abord, nous avons utilisé la meilleure optimisation des paramètres initiaux de POLYEM3D qui avait montré un bon résultat sur les tests synthétiques pour effectuer une inversion sur 6 fréquences 0,125, 0,5, 2, 8, 32, 128Hz avec le modèle de départ constitué d'un demi-espace isotrope homogène de 25 $\Omega.m$ avec la bathymétrie ajoutée. Pour rappel, grille 3D (n_1, n_2, n_3) = 106 x 134 x 94 (environ 1 100 000 mailles) avec, dans la zone d'intérêt, des mailles de (ZYX) = 0,1 x 100 x 100 m. Les émetteurs TX1, TX2 ont été utilisés et les résultats de l'inversion, tels que les figures et les données inversées, sont disponibles dans les dossiers `~/inversion_last_2TX_firstrun/` et `~/inversion_last_2TX_secondrun/`.

Les résidus convergent vers un RMS autour de 60 (à partir de 80). Une visualisation 3D d'une coupe transversale à 50 mètres de profondeur du modèle inversé est disponible sur le logiciel Paraview Figure 29.

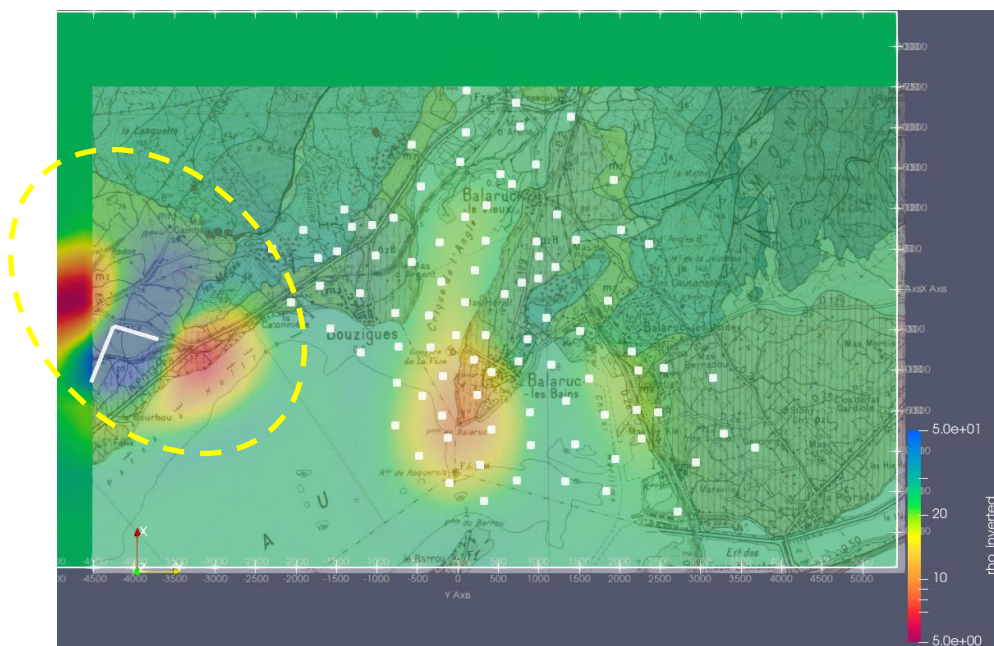


Figure 29 : Coupe horizontale du modèle inversé à l'itération 4 à 50 mètres de profondeur (`~/inversion_last_2TX_secondrun/`). La coupe est de dimensions (XY) = 7 000 x 11 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées $X_0 = 6\,261\,500$ m et $Y_0 = 754\,500$ m. Les couleurs chaudes correspondent à des zones de faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée.

C'est un résultat ininterprétable, la plupart des anomalies (conductrices et résistantes) sont placées sous les deux émetteurs. Le modèle final semble avoir une très faible sensibilité sur la partie nord du levé et pratiquement aucun paramètre n'est mis à jour dans cette zone. L'inversion est bloquée dans un minimum local et ne peut expliquer certaines données à certains récepteurs pour une

fréquence et un émetteur donnés. Afin de poursuivre le travail, il a été nécessaire de mettre en évidence ces données observées aberrantes et de les supprimer avant l'initialisation de l'inversion.

5.2.2. Retirer les données observées aberrantes

Dans un deuxième temps, nous avons voulu obtenir un modèle simple en inversant fréquence par fréquence les données observées. Les inversions ont été réalisées pour les fréquences 0,125, 0,5, 2, 8, 32, 128 Hz pour une configuration à trois émetteurs (c'est-à-dire incluant la boucle électromagnétique TX3). Ces inversions sont disponibles dans le dossier `~/inversion_last_3TX/`, et ont permis une bonne quantification des valeurs aberrantes dans les données. Pour chaque fréquence et pour chaque émetteur, certaines des données ont dépassé le seuil de 100 % de résidu à la dernière itération. Un exemple est présenté à la Figure 30.

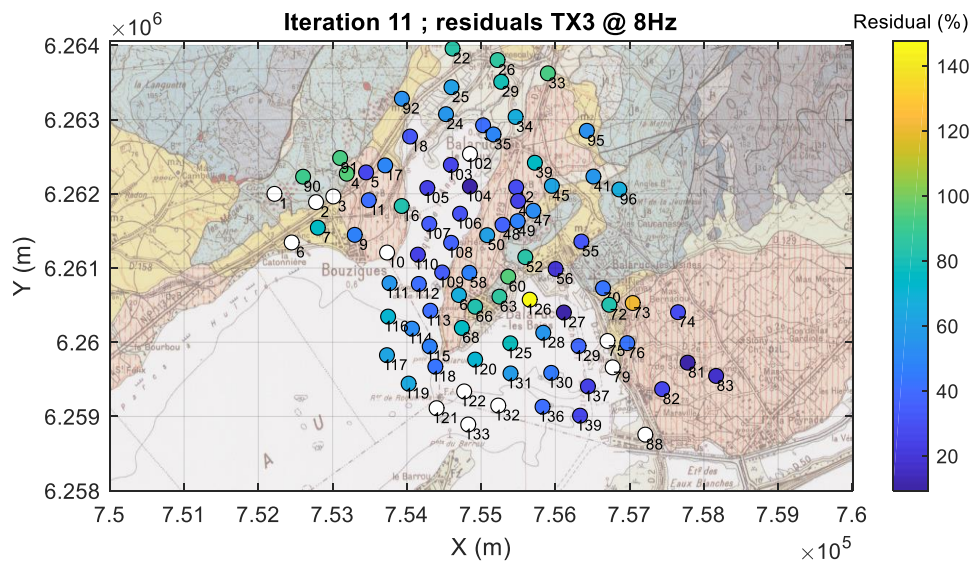


Figure 30 : Carte des résidus aux positions des récepteurs pour le TX3 (*inversion_synth_3TX*). Sur l'axe des abscisses sont représentées les longitudes en mètres, sur l'axe des ordonnées sont représentées les longitudes en mètres. Pour chaque paire récepteur-fréquence, un cercle de couleur est affiché, correspondant au résidu du modèle final (itération 11).

Ici, seule la dernière itération est cartographiée pour la fréquence de 8 Hz et l'émetteur TX3. Notez que les récepteurs 126 et 73 bloquent le processus d'inversion. Il y a deux raisons possibles à cela : soit les données observées sont trop bruitées et ne peuvent pas être ajustées; soit le schéma numérique par différence finie, en particulier près de la côte, induit une erreur numérique qui masque la variabilité des données. Dans tous les cas, ces premières valeurs aberrantes ont été retirées du processus d'inversion en premier lieu, afin de converger vers un modèle simple. Malheureusement, le processus d'inversion reste bloqué dans un minimum local avec cette configuration de levé (3 émetteurs et leurs récepteurs associés), et il n'est pas possible d'extraire un modèle inversé interprétable.

5.2.3. Essai avec l'inversion 1D préalable

En troisième étape, nous avons choisi de faire l'inversion 1D décrite section (4.3.3). La grille d'inversion grossière est définie à partir des fichiers d'entrée *Igrid01.asc*, *Igrid02.asc* et *Igrid03.asc*. La nouvelle grille d'inversion est $(n_1, n_2, n_3) = 18 \times 1 \times 1$. Pour ce test, nous avons choisi la paramétrisation en splines linéaires, et les résultats sont disponibles dans le dossier `~/inversion_last_1D_2TX/`.

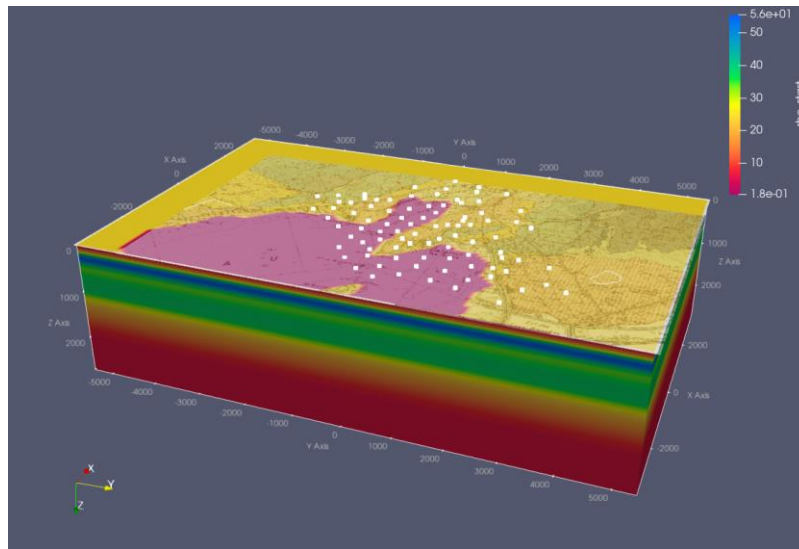


Figure 31 : Résultat de la première étape de l'inversion 1D pour les données réelles après 4 itérations. Le bloc est de dimensions (XYZ) = 7 000 x 11 000 x 3 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées $X_0 = 6\,261\,500$ m et $Y_0 = 754\,500$ m. Les couleurs chaudes correspondent à une faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. Les points représentent la position des récepteurs utilisés pour la modélisation. Les lignes représentent la position des câbles d'émission.

Une visualisation 3D du modèle inversé après 4 itérations est disponible sur le logiciel Paraview Figure 31. L'inversion 1D retrouve une couche de socle hautement conductrice de 10 $\Omega\cdot\text{m}$ et la positionne à environ 2 000 mètres de profondeur. La couche proche de la surface est un mélange entre l'Étang de Thau conducteur et la roche encaissante résistante observée à l'affleurement sur le terrain. Entre les deux, l'inversion retrouve un gradient de résistivité allant de valeurs élevées à de faibles valeurs. Bien que ce soit une mauvaise représentation de la réalité du sous-sol, ce résultat nous a encouragé à utiliser ce modèle 1D comme modèle de départ pour l'inversion 3D. Deux tentatives ont été faites avec le modèle de départ 1D, les résultats sont disponibles dans les dossiers : `~/inversion_lastr_MS_1D_2TX/`, `~/inversion_last_MS_1D_TX1/` et `inversion_last_noMS_1D_TX1`. En réalité, peu ou pas d'amélioration a été constatée en utilisant cette méthodologie.

5.2.4. Essai avec la contrainte spatiale activée

L'étape suivante a consisté à introduire le *Module Scaling* décrit à la section (4.3.4) afin de limiter les paramètres sous les émetteurs TX1 et TX2 (Figure 32).

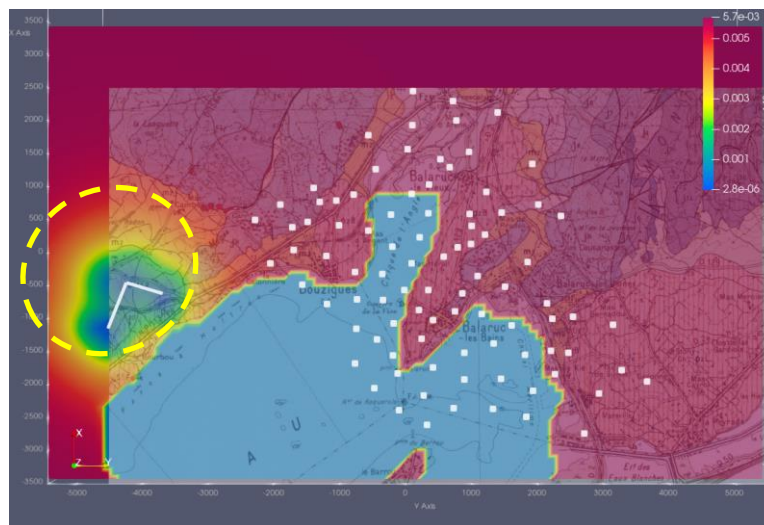


Figure 32 : Visualisation du Module Scaling appliqué pour le test `inversion_last_MS_2TX1`. Les couleurs chaudes correspondent aux zones les moins contraintes, les couleurs froides aux zones les plus contraintes.

Trois tentatives ont été faites avec le *Module Scaling* sous les émetteurs, les résultats sont disponibles dans les dossiers : *~/inversion_last_MS_2TX*, *~/inversion_last_MS_1D_2TX* et *~/inversion_last_MS_1D_TX1*. Les inversions ont été effectuées sur 6 fréquences 0,125, 0,5, 2, 8, 32, 128 Hz avec le modèle de départ constitué d'un demi-espace isotrope homogène de 25 $\Omega.m$ avec la bathymétrie ajoutée.

En pratique, la contrainte empêche le modèle de converger. Une première itération réduit drastiquement la fonction de coût « données », puis l'inversion est verrouillée dans un minimum local et échoue. Pour trouver un équilibre sur la contrainte des paramètres du modèle, il est nécessaire de réaliser une série de tests supplémentaire en faisant varier l'initialisation du *Module Scaling*. En pratique, cela n'a pas été possible en raison du coût numérique des inversions et du temps de calcul que cela aurait engendré.

5.2.5. Essai avec la contrainte spatiale activée à partir du modèle géologique

Le modèle géologique 3D (utilisant le GEOMODELER) construit par Géosciences Montpellier a été converti en valeurs de résistivité selon les données de diaggraphie de forages. Une visualisation 3D du modèle géologique est disponible sur le logiciel Paraview Figure 33.

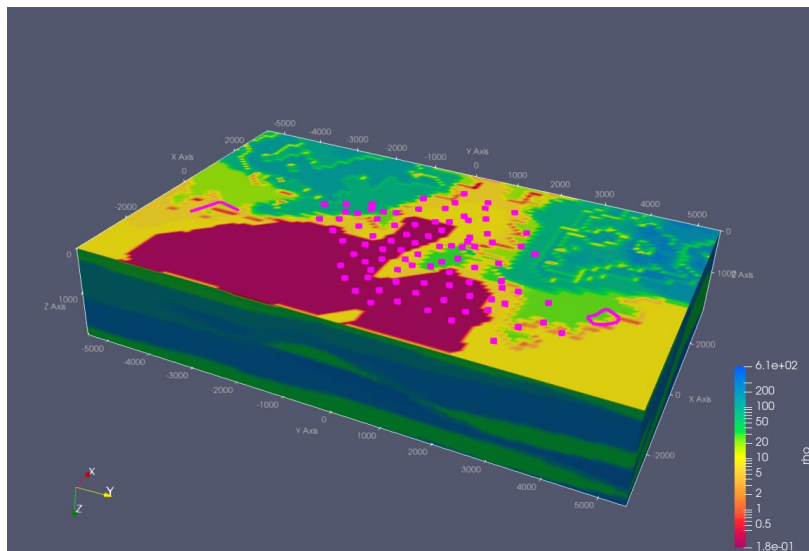


Figure 33 : Modèle géologique 3D converti en valeurs de résistivité de la zone d'intérêt. Le bloc est de dimensions (XYZ) = 7 000 x 11 000 x 3 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées $X0 = 6\,261\,500$ m et $Y0 = 754\,500$ m. Les couleurs chaudes correspondent à des zones de faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée. Les points violets correspondent aux positions du récepteur, les lignes violettes aux positions de l'émetteur.

L'objectif est d'utiliser ce modèle comme un modèle a priori pour guider le processus d'inversion. À chaque itération, l'inversion cherche à minimiser la norme de la différence entre les paramètres du modèle a priori (ρ^*) et le modèle inversé (ρ) en minimisant $|\rho - \rho^*|$. L'effet est que l'inversion tente d'expliquer les données mesurées en utilisant l'information donnée par le modèle a priori, et dans le meilleur des cas, cela mettrait théoriquement en évidence des zones d'anomalies conductrices correspondant à une remontée potentielle de fluides à travers un système de fractures.

Deux tentatives ont été faites avec la pénalité préalable activée près des émetteurs, les résultats sont disponibles dans les dossiers *~/inversion_last_noMS_prior_TX1/* et *~/inversion_last_noMS_prior_igrid_TX1/*. La matrice 3D de covariance est représentée Figure 34. Elle définit l'intervalle de confiance que nous avons dans le modèle a priori. Pour une faible valeur de covariance, la pénalité sera forte dans le processus d'inversion : cela signifie que nous contraignons fortement l'inversion dans ces zones. Inversement, les zones avec de faibles valeurs de covariance ont une faible pénalité et seront moins contraintes. La Figure 34 montre que nous avons choisi de contraindre l'inversion près des émetteurs où nous avons plusieurs jeux de données de résistivité indépendantes extraites des diaggraphies de forage. Ensuite, à mesure que l'on

s'éloigne des émetteurs, la contrainte est relâchée afin de donner un plus fort poids aux données observées CSEM.

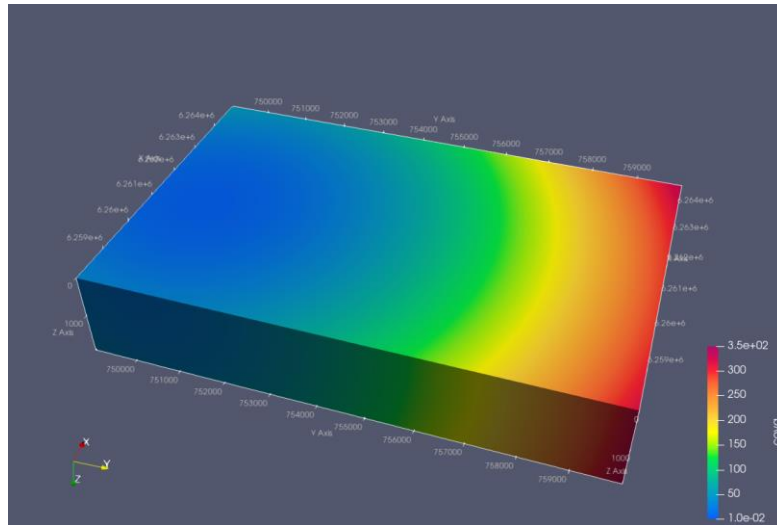


Figure 34 : La covariance 3D du modèle a priori utilisé pour la tentative inversion *last_noMS_prior_igrid_TX1*. Les couleurs froides correspondent à une valeur de covariance faible, et donc à un intervalle de confiance fort dans le modèle a priori. Inversement, pour les couleurs chaudes.

L'inversion *~/inversion_last_noMS_prior_igrid_TX1/* a été réalisée sur 6 fréquences 0,125, 0,5, 2, 8, 32, 128 Hz avec le modèle de départ constitué d'un demi-espace isotrope homogène de 25 $\Omega.m$ avec la bathymétrie ajoutée. La méthode de Gauss Newton a été utilisée en même temps que la compression de la grille d'inversion afin d'améliorer la stabilité du problème inverse sous-déterminé. La nouvelle grille d'inversion est $(n1, n2, n3) = 18 \times 35 \times 25$. Pour ce test, nous avons choisi la paramétrisation par splines linéaires, et seul l'émetteur TX1 a été utilisé.

L'inversion est initialisée avec:

- l'hyperparamètre de régularisation de Prior est égal à 0,000001 (plus de poids est donné à l'ajustement des moindres carrés par rapport à la norme du modèle) ;
- lissage spatial (Z Y X) = 1 400 400 ;
- *Depth Scaling* activée, mais les 10 premiers mètres avec une forte diminution de la sensibilité. Aussi, une forte diminution de la sensibilité est réglée à partir de 2 000 mètres.

Nous traçons un graphique à la figure 35 qui représente la valeur de la fonction de coût total en fonction du nombre d'itérations.

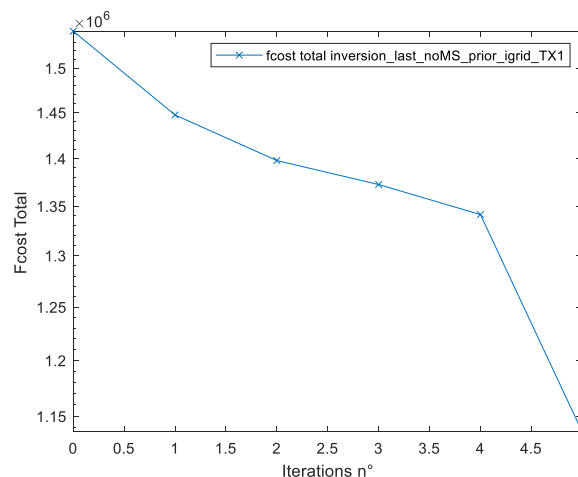


Figure 35 : Fonction de coût total en fonction du nombre d'itérations pour *~/inversion_last_noMS_prior_igrid_TX1/*.

Une visualisation 3D d'une coupe transversale du modèle inversé final est disponible sur le logiciel Paraview Figure 36.

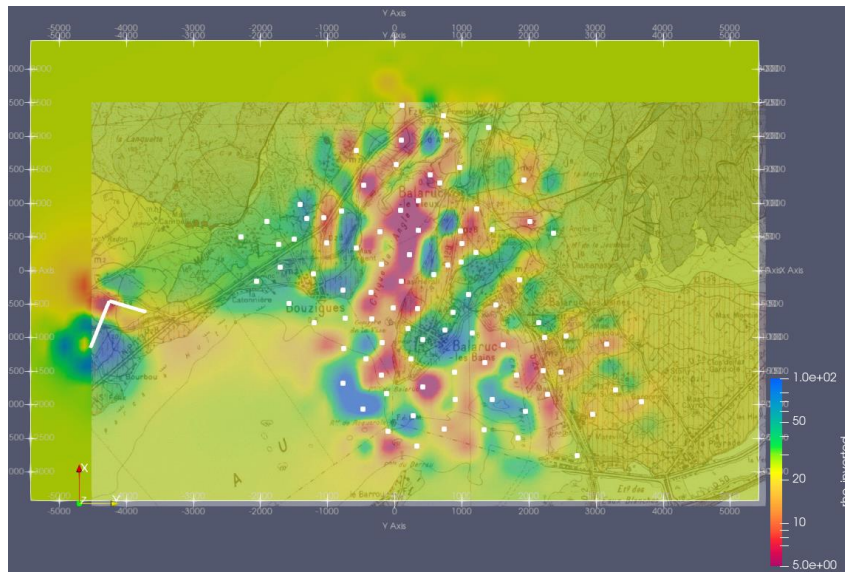


Figure 36 : Coupe horizontale de l'itération 5 du modèle inversé à 50 mètres de profondeur (~inversion_last_noMS_prior_igrid_TX1/). Le bloc est de dimensions (XYZ) = 7 000 x 11 000 x 3 000 m et le levé est géo référencé à l'origine aux coordonnées X0 = 6 261 500 m et Y0 = 754 500 m. Les couleurs chaudes correspondent à des zones de faible résistivité, les couleurs froides à une résistivité élevée.

On constate que la sous-régularisation du modèle entraîne de nombreux effets de surface statiques et montre la complexité des données acquises à Balaruc-les-Bains. Même avec cela, nous ne pouvons pas réduire suffisamment la norme des moindres carrés des résidus. En effet, le modèle converge vers un RMS = 65 (à partir de 75). Le modèle inversé final nous donne des informations sur les statiques, mais il reste géologiquement non interprétable.

5.2.6. Ajout d'une correction d'effet de la mer sur les données observées

Une dernière approche a été considérée, inspirée par les travaux de recherche sur l'inversion des données magnétotelluriques en présence de la mer. Un tenseur de correction de la mer est calculé dans une première étape de modélisation, puis appliqué directement sur les données MT afin de prendre en compte, en premier ordre, l'effet de la mer sur les lignes de champ électrique. L'objectif est d'appliquer cette méthodologie à l'inversion des données CSEM en modélisant des données observées synthétiques à partir de deux modèles "à sec" et "avec bathymétrie". Comme dans la section (3.3), les réponses des deux modèles seront converties en un rapport d'amplitude du grand axe de l'ellipse de polarisation, tel que :

$$C_{sea} = \frac{PE_{max_{water}}}{PE_{max_{dry}}}$$

Le terme C_{sea} désigne le "tenseur" de correction de la mer CSEM, dans notre cas une simple constante qui représente une correction en amplitude du grand axe de l'ellipse de polarisation pour contrer les effets statiques apparaissant sur les récepteurs installés près des côtes. Ensuite, nous appliquerons la constante de correction de la mer aux données observées synthétiques avant l'inversion. Dans cette optique, nous avons choisi de pousser encore plus loin la précision sur la première grille de modélisation et une nouvelle grille 3D (n_1, n_2, n_3) = 80 x 200 x 146 qui a été utilisée (environ 2 300 000 mailles). Dans la zone d'intérêt, les mailles de (ZYX) = 0,1 x 25 x 25. La taille des mailles est fine sur les dix premiers mètres afin de correspondre correctement à la bathymétrie et, de plus, les mailles ont été affinées au centre du levé afin de correspondre correctement au trait de côte littoral.

Les données observées synthétiques aux positions des récepteurs pour les deux modèles sont modélisées pour 6 fréquences : 0,125, 0,5, 2, 8, 32, 128 Hz avec un modèle de départ constitué d'un demi-espace isotrope homogène de 25 $\Omega.m$ avec la bathymétrie fine ajoutée. Le champ électrique total modélisé avec la contribution de la bathymétrie est cartographié à 0.125 Hz pour chaque émetteur à 15 centimètres de profondeur:

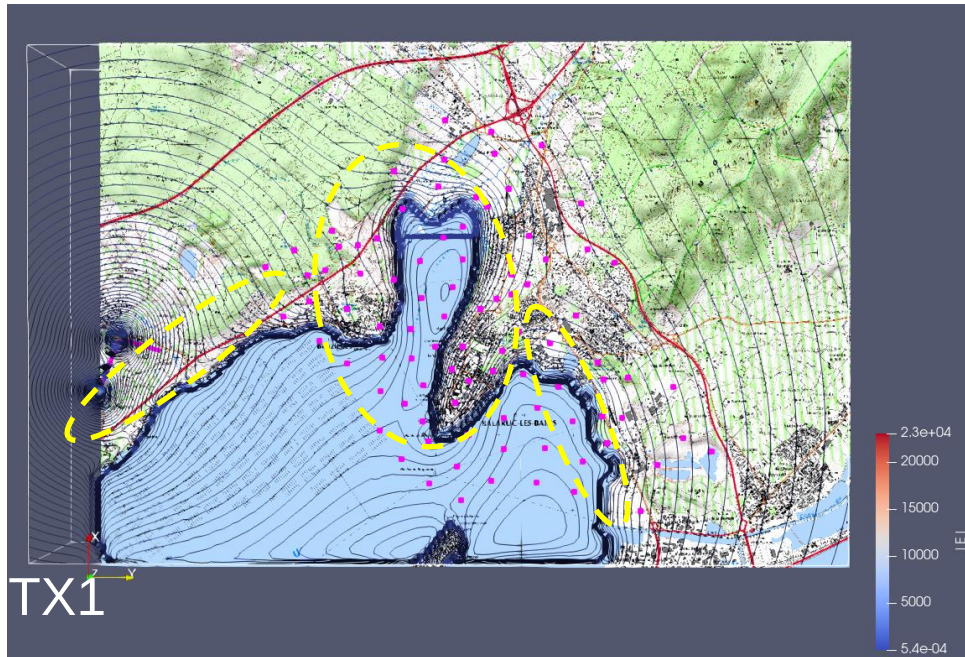


Figure 37: Niveaux du logarithme de l'amplitude du champ électrique total modélisé avec la grille fine à 15 centimètres de profondeur sur chaque maille à 0,125Hz (grande profondeur) pour l'émetteur TX1. L'effet de la mer est clairement visible avec un resserrement des niveaux à l'interface terre-mer et l'apparition d'effets statiques d'accumulation de charges électriques à l'interface mer-terre.

La bathymétrie fine a permis d'améliorer la précision de l'effet statique le long du littoral. Les variations des lignes de champ électrique sont plus douces et mieux modélisées. La constante de correction de la mer est calculée à partir des deux résultats et stockée sous la forme d'un réseau de cellules de dimension $C_{sea}\{nRx, nTX, nFreq\}$. Ensuite, la constante est appliquée directement sur les données observées, en calculant le rapport :

$$d_{obs_{corrected}}(rx, tx, freq) = \frac{d_{obs}(rx, tx, freq)}{C_{sea}(rx, tx, freq)}$$

Cela est similaire à un décalage d'amplitude pour chaque récepteur à chaque fréquence pour chaque émetteur. Ensuite, le champ $E_{obs,corrected}$ est inversé sur une grille beaucoup plus grossière et avec un modèle de départ sans ajouter la couche d'eau afin de diminuer la charge de calcul et accélérer le processus d'inversion. Une dernière inversion a été effectuée sur 6 fréquences 0.125, 0.5, 2, 8, 32, 128 Hz avec un modèle de départ constitué d'un demi-espace isotrope homogène de 25 $\Omega.m$. Une grille plus grossière a été utilisée ($n1, n2, n3$) = 92 x 122 x 90 (environ 1 000 000 de mailles). Dans la zone d'intérêt, les mailles de (ZYX) = 1 x 125 x 125.

Les différents essais sont répertoriés dans le dossier `~/attempt_bathyCorr/` avec notamment une inversion `_last_BFGS_coarse_bathyCorr_2TX/` et ses données réelles corrigées `data_obs_bathyCorr00X`. Malheureusement, il est actuellement impossible d'obtenir un résultat interprétable avec cette approche *malgré de nouveaux calculs lancés courant septembre 2020*.

6. Conclusion

Au cours de cette étude, une cinquantaine de tests de modélisation et d'inversion ont été réalisés. Tout d'abord, des tests synthétiques ont permis de montrer l'empreinte du levé ainsi que l'influence de l'effet de la mer sur les modèles inversés en 3D. Nous avons décidé d'améliorer la prise en compte de la bathymétrie dans le modèle 3D de départ en affinant les maillages de modélisation et d'inversion jusqu'à 10 cm près de la surface. De multiples tests synthétiques ont permis de quantifier les limites imposées par le dispositif expérimental à l'imagerie d'un corps conducteur dans une roche encaissante résistante. Une partie des données mesurées sur le terrain n'a pas passé le contrôle de qualité et n'a donc pas été prise en compte pour l'inversion synthétique. En outre, l'étang de Thau conducteur masque certaines des informations sous-jacentes et déforme considérablement les lignes de champ électromagnétique.

Connaissant ces limites, et les paramètres optimaux pour l'inversion, c'est-à-dire la méthode d'inversion, la méthode de régularisation, le lissage spatial, le *Module Scaling*, la paramétrisation et le modèle de départ, nous avons tenté d'inverser les données réelles acquises sur la zone en 2017. Hélas, les données sont bruitées (zone urbanisée, lignes électriques, ...) pour les fréquences d'intérêt, et de nombreux effets statiques en surface rendent très difficile l'inversion de certains récepteurs. Malgré plusieurs tests d'inversion suivant une méthodologie très stricte, il n'a malheureusement pas été possible d'obtenir un modèle 3D fiable.

Afin de continuer à exploiter les données, il sera nécessaire de mettre en place de nouveaux outils de calcul numérique sur POLYEM3D afin d'améliorer la prise en compte des effets bathymétriques, des effets topographiques, des effets statiques locaux, pour gagner en stabilité sur le problème inverse.

Pour ce faire, l'inversion jointe 3D de jeux de données électromagnétiques complémentaires (CSEM, MT & ATEM) sera étudiée dans le cadre d'une thèse à venir. Grâce à la collaboration entre le laboratoire de géosciences marines de Brest et le BRGM d'Orléans, l'intégration de logiciels multi méthodes électromagnétiques 3D devrait apporter des solutions à l'impasse rencontrée dans le cas du projet DEM'Eaux THAU. Et dans un futur proche, nous espérons pouvoir publier sur ces travaux sous forme d'étude de cas.

7. Références

- Bretonneau F.**, (2018). *POLYEM3D - A 3D frequency-domain modeling and inversion code for Magnetotellurics and Controlled Source Electromagnetic methods*. Technical report No 3.
- Gubbins, D.** (2004). *Time series analysis and inverse theory for geophysicists*. Cambridge University Press.
- Johnston, J. M., Pellerin, L., & Hohmann, G. W.** (1992). Evaluation of electromagnetic methods for geothermal reservoir detection. *Transactions- Geothermal Resources Council*.
- Ward, S. H., Hohmann, G. W.** (1988). Electromagnetic theory for geophysical applications. In *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 1, Theory* (pp. 130-311). Society of Exploration Geophysicists.
- Waxman, M. H., Smits, L. J. M.** (1968). Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 8(02), 107-122.
- Zonge, K. L., Hughes, L. J.** (1991). Controlled source audio-frequency magnetotellurics. In *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 2, Application, Parts A and B* (pp. 713-810). Society of Exploration Geophysicists



**Centre scientifique et technique
DirectionDRP/IGT**

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