

Document public

# Investigations géophysiques (CSEM, gravimétrie et sismique) sur le secteur de Balaruc-les-Bains (Hérault, France) - Rapport d'acquisition - Projet DEM'Eaux Thau

**Livrable L3**  
Rapport final

**BRGM/RP-68381-FR**  
Octobre 2018



PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL



Géosciences pour une Terre durable  
**brgm**



Document public

# Investigations géophysiques (CSEM, gravimétrie et sismique) sur le secteur de Balaruc-les-Bains (Hérault, France) - Rapport d'acquisition - Projet DEM'Eaux Thau

Livrable L3  
Rapport final

BRGM/RP-68381-FR  
Octobre 2018

Étude réalisée dans le cadre du projet de Recherche du BRGM RP16LRO005

Projet cofinancé par le Fonds européen de développement régional

N. Coppo, T. Jacob, A. Bitri, M. Darnet, F. Bretaudeau, P. Wawrzyniak, J. Porté, F. Rembert, B. Bourgeois  
Avec la collaboration de  
F. Beaubois et B. Maurice



PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL

## Vérificateur :

Nom : J-M. Baltassat

Fonction : Géophysicien expert

Date : 01/02/2019

Signature :

## Approbateur :

Nom : A Blum

Fonction : directrice régionale

Date : 18/02/2019

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](mailto:qualite@brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable



**Mots-clés** : DEM'EAUX THAU, Étang de Thau, Électromagnétisme à source contrôlée (CSEM), Gravimétrie, Sismique, Balaruc-les-Bains.

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

**Coppo N., Jacob T., Bitri A., Darnet M., Bretaudeau F., Wawrzyniak P., Porté J., Rembert F. et Bourgeois B.** avec la collaboration de **Beaubois F. et Maurice B.** (2018) – Investigations géophysiques (CSEM, gravimétrie et sismique) sur le secteur de Balaruc-les-Bains (Hérault, France) - Rapport d'acquisition – Projet DEM'Eaux Thau. Rapport final. BRGM/RP-68381-FR, 93 p., 60 ill., 2 ann.



## Synthèse

Ce rapport présente le bilan des acquisitions géophysiques réalisées fin 2017 dans le secteur de Balaruc-les-Bains (Hérault, France), dans le cadre du projet de démonstrateur DEM'EAUX- Thau. Ce projet a pour objectif de réaliser un modèle hydrogéologique intégrant la complexité des réservoirs en présence afin de permettre une optimisation de la gestion de la ressource en eau souterraine dans un contexte à forts enjeux économiques (ressources en eau potable, thermalisme, aquaculture, etc.).

Afin d'améliorer la caractérisation des formations géologiques de la région, trois techniques géophysiques ont été mises en œuvre : électromagnétisme à source contrôlée (CSEM), la sismique réflexion haute résolution et la gravimétrie.

En accord avec les partenaires du projet, une zone de ~24 km<sup>2</sup> a été couverte par 91 stations CSEM (dont 35 dans l'Étang de Thau). 398 nouvelles stations gravimétriques ont été mesurées sur une superficie de 50 km<sup>2</sup> et deux profils sismiques ont été réalisés pour un total de 10,6 km. En raison d'un arrêté préfectoral, les profils sismiques n'ont pas pu traverser la partie nord de l'Étang de Thau, tel qu'initialement prévu.

Les premiers traitements réalisés sur les données CSEM présentés dans ce rapport permettent de mettre en évidence des contrastes de résistivité en cohérence apparente avec les éléments de connaissance structuraux de la zone d'étude qui s'observent sur les premiers 1 000 mètres de profondeur. Les informations apparaissent cohérentes avec les anomalies gravimétriques mises en évidence sur la zone d'étude. Des traitements mathématiques seront conduits pour déconvoluer des mesures acquises, l'effet de l'eau salée de l'Étang de Thau. En effet, ce dernier constitue une importante masse conductrice superficielle qui contrôle principalement la distribution des courants électriques en surface et qu'il convient de prendre en considération. Les données CSEM feront ensuite l'objet d'inversions 1-D et 2-D le long des profils en travers de la baie. Enfin, des modélisations et inversions 3D seront testées en intégrant les contraintes du modèle géologique.

Les deux profils sismiques ont été acquis à l'est et au nord de l'Étang de Thau. L'épisode de prolifération d'algues toxiques dans l'Étang de Thau n'a pas permis l'acquisition sismique dans la lagune afin de ne pas remuer les fonds vaseux. Les conditions environnementales d'acquisition (milieu très urbanisé, nombreux bruits parasites liés à la circulation) d'une part, et les terrains superficiels très « rapides » et fracturés d'autre part, ont perturbé l'acquisition des ondes sismiques. Les structures les plus profondes de la région investiguée sont mal résolues par cette méthode géophysique. Cependant, les données acquises pourront être mises en perspective avec les données anciennes de sismique retraitées dans le cadre de ce projet.

Les données gravimétriques acquises complètent les données existantes et précisent le cadre structural de la région, notamment dans le bassin miocène de Montbazin-Gigean au nord-est de la zone et sur le secteur de Balaruc-Les-Bains avec la localisation de potentiels accidents tectoniques. Ces données seront également utilisées comme éléments de contraintes pour le modèle géologique 3D.



# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Acquisition CSEM.....</b>	<b>13</b>
2.1. PRÉAMBULE.....	13
2.2. INTRODUCTION .....	14
2.3. PERSONNEL ET MATÉRIEL.....	14
2.3.1. Personnel BRGM impliqué sur la mission .....	14
2.3.2. Personnel additionnel .....	14
2.3.3. Matériel géophysique déployé .....	14
2.4. CONFIGURATION DES TX .....	15
2.4.1. TX1 - Loupian .....	15
2.4.2. TX2 - Frontignan.....	18
2.5. SÉQUENCE DE MESURES .....	21
2.6. RX - STATIONS CSEM.....	22
2.7. PROCESSING DES DONNÉES .....	26
2.8. QUALITÉ DES DONNÉES.....	27
2.9. CARTES DE RÉSISTIVITÉ APPARENTES .....	29
2.10. CONCLUSIONS.....	35
<b>3. Acquisition gravimétrique .....</b>	<b>37</b>
3.1. PRÉAMBULE.....	37
3.2. MODE OPÉRATOIRE ET TRAITEMENT .....	37
3.2.1. Acquisition des données .....	37
3.2.2. Références gravimétriques et altimétriques .....	40
3.2.3. Réduction des données vers l'anomalie de Bouguer.....	40
3.2.4. Calcul des corrections de terrain.....	41
3.2.5. Choix de la densité de réduction .....	44
3.2.6. Précision de l'anomalie de Bouguer .....	46
3.2.7. Intégration des données historiques .....	50
3.3. RÉSULTATS.....	50
3.3.1. Anomalie de Bouguer, anomalie régionale, et anomalie résiduelle .....	50
3.3.2. Analyse cartographique .....	55

3.4. ÉBAUCHE D'INTERPRÉTATION .....	59
<b>4. Acquisition sismique .....</b>	<b>61</b>
4.1. PRÉAMBULE.....	61
4.2. INTRODUCTION .....	61
4.3. GÉNÉRALITÉS.....	62
4.3.1. Description de l'étude .....	62
4.3.2. Chronologie et paramètres d'acquisition .....	63
4.4. RESSOURCES HUMAINES .....	64
4.5. VÉHICULES .....	64
4.6. IMPLANTATION .....	64
4.6.1. Autorisation.....	64
4.6.2. Topographie.....	64
4.6.3. Paramètres de la source sismique .....	69
4.7. ACQUISITION DES DONNÉES.....	69
4.7.1. Production .....	69
4.7.2. Contrôle qualité et pré-traitement.....	71
4.8. TRAITEMENT DES DONNÉES .....	74
4.8.1. Séquence de traitement.....	74
4.8.2. Présentation des coupes sismiques.....	75
4.8.3. Conclusion sur l'acquisition sismique .....	80
<b>5. Conclusion et perspectives .....</b>	<b>81</b>
<b>6. Bibliographie .....</b>	<b>83</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 - Carte de la zone avec les investigations réalisées.....	12
Illustration 2 - Mise en place du pôle d'injection E3 de TX1 - Loupian.....	16
Illustration 3 - Coordonnées des pôles d'injection du TX1 - Loupian.....	16
Illustration 4 - Localisation du TX1 - Loupian .....	17
Illustration 5 - Dépose du groupe électrogène 60 kVA au TX1 - Loupian.....	17
Illustration 6 - TX-Loupian (groupe électrogène, transformateur d'isolement, TXM22).....	18
Illustration 7 - Localisation du TX2-Frontignan.....	19
Illustration 8 - Dépose du groupe électrogène 60 kVA au TX2 - Frontignan .....	20
Illustration 9 - TX-Frontignan (groupe électrogène, transformateur d'isolement, TXM22).....	20
Illustration 10 - Séquences, durées et fréquences d'échantillonnage.....	21
Illustration 11 - Visualisation des séquences et de la synchronisation des deux émetteurs et des récepteurs .....	22
Illustration 12 - Station CSEM implantée en bordure de l'Étang de Thau.....	22
Illustration 13 - Carte des réalisations (points noirs) au 20 novembre 2017 .....	24
Illustration 14 - Tableau des données acquises (en grisé = acquis).....	25
Illustration 15 - Exemple de processing pour la station 34, polarisation 1, fréquence fondamentale 0.125 Hz. Haut : séries temporelles synchrones entre l'émission TX (rouge) et la voie Ex de réception RX (bleu). Milieu à gauche : spectre d'amplitude de l'émission. Bas à gauche : idem pour la réception. Milieu à droite : amplitude du rapport spectral. Bas à droite : phase du rapport spectral. ....	26
Illustration 16 - Log10 du bruit en % mesuré sur la zone d'investigation à la fréquence de 2Hz. Haut : composante Ex. Bas : composante Ey. De gauche à droite : POL1 et POL2 (Loupian) et POL3 (Frontignan). Ces valeurs de bruit sont calculées sur la base du signal mesuré à la fréquence de 2Hz, et sur le bruit mesuré sur les raies adjacentes autour de la fréquence d'intérêt. ....	27
Illustration 17 - Maximum de l'ellipse de polarisation en fonction de la fréquence mesuré à 5 stations (34, 56, 107, 119, 137, Illustration 18) avec une émission en POL2. ....	28
Illustration 18 - Localisation des 5 sites présentés en Illustration 17. Carte interpolée du maximum de l'ellipse de polarisation en POL2, à la fréquence de 2Hz. ....	28
Illustration 19 - Bas : accumulation de charges aux bords d'un filon conducteur. Haut : champ électrique perpendiculaire au filon que l'on mesurerait en surface. ....	30
Illustration 20 - Carte géologique sur la zone investiguée par la méthode CSEM. ....	31
Illustration 21 - Carte de résistivité apparente (couleurs) ainsi que l'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique (flèches) à 128Hz pour la polarisation 2 de l'émetteur TX1 à Loupian.....	31
Illustration 22 - Carte de résistivité apparente (couleurs) ainsi que l'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique (flèches) à 8Hz pour la polarisation 2 de l'émetteur TX1 à Loupian.....	32
Illustration 23 - Carte de résistivité apparente (couleurs) ainsi que l'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique (flèches) à 0.5Hz pour la polarisation 2 de l'émetteur TX1 à Loupian.....	32
Illustration 24 - Carte de résistivité apparente (couleurs) ainsi que l'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique (flèches) à 128Hz pour la polarisation 1 de l'émetteur TX1 à Loupian.....	33

Illustration 25 - Carte de résistivité apparente (couleurs) ainsi que l'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique (flèches) à 32Hz pour la polarisation 1 de l'émetteur TX1 à Loupian. ....	33
Illustration 26 - Carte de résistivité apparente (couleurs) ainsi que l'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique (flèches) à 0.125Hz pour la polarisation 1 de l'émetteur TX1 à Loupian. ....	34
Illustration 27 - Carte de résistivité apparente (couleurs) ainsi que l'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique (flèches) à 2Hz l'émetteur TX2 de Frontignan. ....	34
Illustration 28 - Premier plan : gravimètre CG5 en cours d'acquisition sur la base absolue de l'IGN Gigan I, second plan : GPS Trimble Geo7X (pas en cours d'acquisition) .....	38
Illustration 29 - Carte d'implantation des stations gravimétriques acquises pendant cette étude (losanges bleus), et présents dans la base de données gravimétrique (triangles rouges). La base gravimétrique est marquée par un triangle vert. Le rectangle rouge marque l'emprise présente du modèle géologique. Fond topographique IGN au 1/25 000. ....	39
Illustration 30 - a) Localisation de la base (rond rouge) sur photographie aérienne d'après maps.google.fr. b) Photographie de situation de la base gravimétrique principale, située à l'hôtel 'Martinez'. c) Détail du positionnement du trépied du CG5 au niveau de la dalle, les côtes sont en cm, le trépied est marqué par les étoiles rouges. ....	40
Illustration 31 - Corrections topographiques (mGal) pour une densité 2,65. Fond : MNT IGN BD Alti à la maille de 25 m, avec la bathymétrie de l'Étang de Thau. Les polygones blancs marquent les zones où la méthode de Nettleton a été mise en oeuvre. ....	43
Illustration 32 - Principe de la méthode de Nettleton ; a) anomalie de Bouguer pour les densités entre 2 et 3 au pas de 0,05, sur les 8 stations de la zone de la Gardiole, b) altitude des stations concernées, et c) coefficient de corrélation entre l'anomalie de Bouguer et la topographie en fonction de la densité utilisée. Les lignes rouges marquent la corrélation nulle associée à la densité 2.65. ....	45
Illustration 33 - Histogramme des reprises gravimétriques en valeur absolue et pourcentage cumulé (courbe rouge). Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68 % et la valeur de l'erreur associée .....	46
Illustration 34 - Histogramme des reprises du positionnement vertical en valeur absolue et pourcentage cumulé. Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68 % et la valeur de l'erreur associée. ....	47
Illustration 35 - Histogramme des reprises du positionnement horizontal en valeur absolue et pourcentage cumulé. Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68 % et la valeur de l'erreur associée. ....	48
Illustration 36 - Histogramme des écarts entre les altitudes GPS des stations celles projetées sur le MNT à 5 m .....	49
Illustration 37 - Anomalie de Bouguer pour une densité de 2,65 (mGal). Les courbes d'isovaleur sont tous les mGal. ....	52
Illustration 38 - Anomalie régionale obtenue par séparation fréquentielle. ....	53
Illustration 39 - Anomalie résiduelle (mGal). ....	54
Illustration 40 - Gauche : dérivée seconde verticale de l'anomalie de Bouguer pour une densité de réduction de 2,65 (mGal.m <sup>-2</sup> ). Droite : module du gradient horizontal (mGal.m <sup>-1</sup> ) .....	56
Illustration 41 - Carte géologique avec superposition des axes et discontinuités gravimétriques, et des contours de l'anomalie résiduelle (mGal). Les axes positifs sont numérotés (traits rouges) de P1 à P7, les axes négatifs (traits bleus) de N1 à N16, les discontinuités de D1 à D21. ....	57
Illustration 42 - Carte de localisation de l'étude sismique .....	62
Illustration 43 - Calendrier de réalisation des mesures sismiques .....	63

Illustration 44 - Paramètres d'acquisition de l'étude sismique .....	63
Illustration 45 - Localisation du point IGN Gigean I sur fond topographique IGN. ....	65
Illustration 46 - Description et coordonnées des points a, b et c.....	66
Illustration 47 - Implantation des traces et points vibrés. ....	67
Illustration 48 - Exemple de positionnement des points vibrés. ....	68
Illustration 49 - Vibreur IVI minivib II et l'électronique DSD VE464 .....	68
Illustration 50 - Organigramme de la génération des SEG-D .....	70
Illustration 51 - Le signal source (sweep) généré par les vibreurs.....	70
Illustration 52 - Mode acquisition autonome.....	71
Illustration 53 - Position des points milieux communs (CMP) des Ligne 1 & 2. ....	72
Illustration 54 - Rapport de production .....	73
Illustration 55 - Ligne 1 un tir brut tous les 50 points.....	74
Illustration 56 - Séquence de traitement de données.....	75
Illustration 57 - Coupe sismique somme du profil 1 .....	76
Illustration 58 - Coupe sismique somme du profil 2 .....	77
Illustration 59 - Coupe migrée du profil sismique 1 .....	78
Illustration 60 - Coupe migrée du profil sismique 2 .....	79

## Liste des annexes

Annexe 1 - Journal de mission CSEM.....	85
Annexe 2 - Anomalie de Bouguer, Anomalie Régionale et Anomalie Résiduelle avec l'ensemble des données gravimétriques.....	89





# 1. Introduction

Des investigations géophysiques ont été menées dans le cadre du projet de recherche DEM'EAUX-THAU, d'une durée de quatre ans, qui regroupe différents partenaires financiers : Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée, Région Occitanie, FEDER, État (Ministère de la Recherche), Ville de Balaruc-les-Bains, Métropole de Montpellier et le SMBT (Syndicat Mixte du Bassin de Thau). Ce projet rassemble le BRGM (coordinateur du projet - responsable des tâches hydrogéologie, modélisation hydrogéologique), Géosciences Montpellier (responsable de la tâche géologie/construction du modèle géologique), HydroSciences Montpellier (responsable de la tâche géochimie), l'entreprise Synapse Informatique (responsable de l'élaboration de l'outil de gestion) et le SMBT futur destinataire de l'outil de gestion des eaux souterraines de l'hydrosystème de Thau.

Les ressources en eau souterraine des calcaires karstiques du Pli Ouest de Montpellier présentent un intérêt majeur pour le territoire, que ce soit pour l'alimentation en eau potable (ville de Sète, SIAEP Balaruc-Frontignan, SBL), mais également pour le développement économique, avec en particulier l'activité conchylicole au niveau de l'Étang, ainsi que pour le thermalisme sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains (1<sup>ère</sup> station thermale en France avec plus de 46 000 curistes en 2014), et l'irrigation.

Cet aquifère karstique est confronté de temps en temps à des phénomènes d'intrusion d'eau saumâtre par l'intermédiaire de la source sous-marine de la Vise, située dans l'Étang de Thau. Lors de ce phénomène dit « d'inversac » qui peut durer plusieurs mois (plus de 6 mois en 2010, près de 6 mois en 2014), la source de la Vise, au lieu de fournir de l'eau douce utile à la vie biologique de l'Étang de Thau, absorbe l'eau saumâtre de la lagune. Ce phénomène a eu entre autre pour conséquence l'abandon de la source Cauvy à Balaruc-les-Bains pour son usage pour l'alimentation en eau potable. Ce secteur est situé à la convergence d'eaux souterraines provenant de divers réservoirs superficiels et profonds : eaux karstiques froides des Causses d'Aumelas et de la Gardiole, eaux d'origine marine (Étang et Mer) et eaux thermales chaudes et minéralisées. Ces différents réservoirs sont en interaction les uns avec les autres selon des processus complexes dont les paramètres ne sont pas tous connus.

Il est donc nécessaire d'améliorer la connaissance sur ce secteur : tout un programme d'investigations et d'acquisitions de nouvelles données (géologiques, géochimiques, hydrogéologiques) a été lancé. Les acquisitions géophysiques, qui ont été menées en 2017 et qui font l'objet du présent rapport, font partie des investigations indispensables réalisées pour améliorer la connaissance géologique, notamment en profondeur.

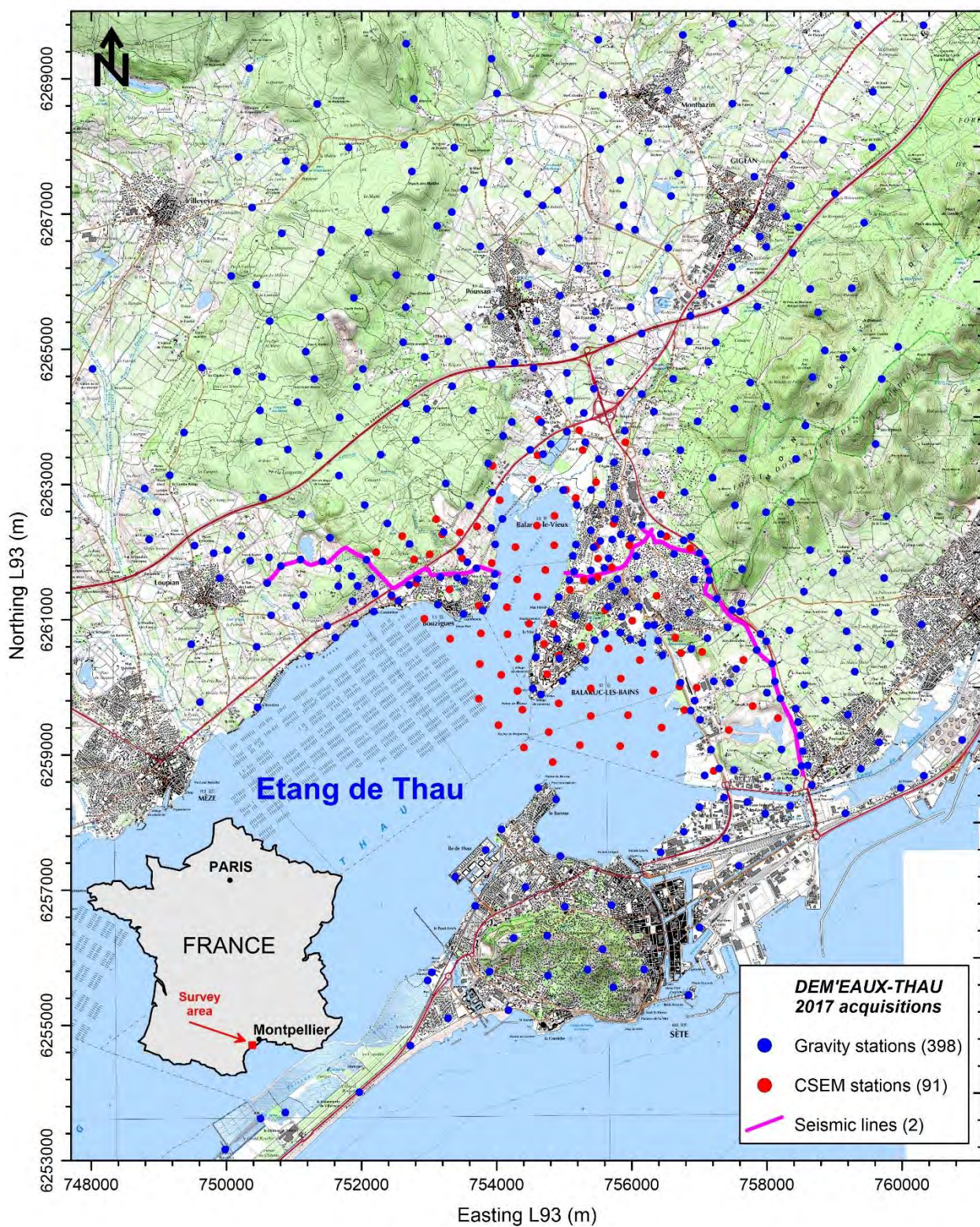


Illustration 1 - Carte de la zone avec les investigations réalisées.

Illustration 1 - Carte de la zone avec les investigations réalisées.



## 2. Acquisition CSEM

### 2.1. PRÉAMBULE

La méthode CSEM (électromagnétisme à source contrôlée) a été sélectionnée lors du montage du projet pour plusieurs raisons explicitées ci-dessous.

Tout d'abord, il s'agit d'imager la distribution de résistivité électrique (propriété des roches à s'opposer au passage de courant électrique) à des profondeurs allant jusqu'à 1 000 m. Ce paramètre physique est crucial dans le cadre d'études hydrogéologiques et géothermiques puisqu'il est directement lié à la présence de fluides qui peuvent abaisser fortement la résistivité électrique en fonction de leur salinité (donc augmenter la conductivité électrique), à la présence d'argiles (mêmes effets), ou à d'autres matériaux qui, au contraire peuvent présenter des résistivités électriques plus élevées tels que les calcaires.

Pour accéder à ces profondeurs en mesurant ce paramètre physique précis et sur une zone importante, le nombre de méthodes géophysiques disponibles est restreint. On dispose de la magnétotellurique (mesure des variations du champ électromagnétique naturel) mais qui présente l'inconvénient d'être très sensible au bruit électromagnétique anthropique (donc difficilement applicable dans le secteur d'étude qui est très urbanisé), d'acquisitions électriques de grande échelle (difficile de mettre en œuvre les grandes lignes d'injection dans ce contexte contraint géographiquement par la mer) et des méthodes électromagnétiques à source contrôlée qui permettent de mieux s'affranchir du bruit anthropique. Cette dernière a été retenue pour sa pertinence et pour les développements dont elle fait l'objet dans le monde de la recherche actuellement : elle constitue la méthode la plus attractive pour investiguer le paramètre « résistivité électrique » aux grandes profondeurs (>1 km) dans les zones périphériques urbaines grâce à l'utilisation d'émetteurs de forte puissance (> 30 kW) et de récepteurs électromagnétiques ultra –sensibles, hérités de la magnétotellurique.

Le principe est simple. Il s'agit d'injecter dans le sol un courant électrique (30-40A dans notre cas) à différentes fréquences et pendant des durées variables, fonction des fréquences injectées (plus les fréquences sont basses, plus les durées sont longues). Simultanément, des enregistreurs sont disposés sur le terrain et mesurent le champ électrique en surface selon deux orientations perpendiculaires (entre des paires d'électrodes espacées de plusieurs dizaines de mètres) ainsi que le champ magnétique dans les trois directions de l'espace (si le site s'y prête). Les fréquences utilisées peuvent être variables, mais sont choisies de manière à investiguer au mieux l'objet étudié. Dans le cas présent, des fréquences de 0,125 Hz à 8 192 Hz ont été utilisées. Il faut avoir en mémoire que plus les fréquences sont basses et plus la résistivité électrique est élevée, plus les ondes électromagnétiques pénètrent dans le sol. En guise d'exemple, une onde de fréquence 1 Hz dans un terrain conducteur de 1 ohm m a une épaisseur de peau de 500 m (profondeur à laquelle l'onde est atténuée d'un facteur  $1/e$ ) et une profondeur d'investigation d'environ 2/3 de 500 m. Sachant que 1 ohm m est très conducteur (présence de fluides salins ou de métaux obligatoire), on devine que ces ondes atteignent rapidement des profondeurs importantes.

Dans le cas d'un milieu homogène, il est facile de prévoir la distribution des champs électriques qui seront mesurés aux différents points de mesure (par modélisation). Et c'est précisément ces différences par rapport à un modèle idéal homogène qui sont analysées. Il s'agit d'essayer de recomposer une distribution d'objet dont la résistivité électrique et la taille permettent d'expliquer les observations réalisées en tenant compte de la complexité du site, dans notre cas fortement influencé par la présence de l'Étang de Thau (très conducteur).

## **2.2. INTRODUCTION**

La mission d'acquisition CSEM s'est déroulée du 13 au 25 novembre 2017 sous des conditions météorologiques très favorables, notamment pour les mesures en mer. 91 stations CSEM ont été acquises en 7 jours avec deux équipes on-shore (56 stations) et 1 off-shore (35 stations) sur une superficie d'environ 24 km<sup>2</sup>.

Afin de faciliter les opérations on-shore dans ce contexte sensible une mission de permittage et d'information auprès des mairies avait été réalisée au préalable.

## **2.3. PERSONNEL ET MATÉRIEL**

### **2.3.1. Personnel BRGM impliqué sur la mission**

- F. Beaubois - technicien géophysicien ;
- F. Rembert - stagiaire ingénieure géophysicienne ;
- J. Porté - stagiaire ingénieur géophysicien ;
- B. François - ingénieur géophysicien ;
- F. Bretaudeau - ingénieur géophysicien (1/2) ;
- P. Wawrzyniak - ingénieur géophysicien (1/2) ;
- B. Bourgeois - ingénieur géophysicien (permittage) ;
- N. Coppo - ingénieur géophysicien, responsable de mission.

### **2.3.2. Personnel additionnel**

- 2 intérimaires/assistants - Karim Khedjam & Moulaye Idrisi ;
- 1 capitaine de bateau - Vivian Caumeil et son assistant Philippe (3 bateaux) ;
- l'équipe des agents de sécurité AS34.

### **2.3.3. Matériel géophysique déployé**

#### ***Injection (TX)***

- 2 émetteurs TXM22 + TXB07 (Metronix, Allemagne) ;
- 2 transformateurs d'isolement sur remorque ;
- 2 groupes électrogènes 60 kVA ;
- Câbles de connexion divers ;
- 3 000 m de câble 6 mm<sup>2</sup> ;
- 50 électrodes métalliques de 60-80 cm ;
- 50 pinces crocodile ;
- 8 plaques inox 50 x 50 cm ;
- petits matériels divers, pelles, pioches, seaux, jerricans ;
- bentonite (300 kg) ;
- 2 véhicules utilitaires.

### **Réception (RX)**

- 6 stations MT complètes (Metronix, Allemagne), comprenant :
  - 1 ADU07 ou ADU08e,
  - 4 enrouleurs de 50 m pour les dipôles électriques,
  - 5 électrodes non-polarisables,
  - 3 capteurs magnétiques avec câbles,
  - jerricans, sel, pelle,
  - Petit matériel ;
- 3 véhicules utilitaires ;
- 3 bateaux à moteur ;
- 1 GPS/sonar.

### **Autres**

- Spare ;
  - câble,
  - 1 ADU07,
  - petit matériel ;
- 1 TEMFAST48 ;
- nécessaire de réparation.

## **2.4. CONFIGURATION DES ÉMETTEURS, TX**

### **2.4.1. TX1 - Loupian**

Trois pôles d'injection de courant formant deux dipôles d'injection indépendants (polarisation 1 et polarisation 2) ont été déployés le mardi 14 novembre au sud-est du château d'eau de Loupian (Illustration 4). Le groupe électrogène, le transformateur d'isolement et l'émetteur étaient localisés dans l'enceinte du château d'eau (Illustrations 5 et 6). Le tracé des câbles a suivi au mieux le tracé du permittage réalisé.

Chaque pôle d'injection est constitué d'une plaque inox de 50 x 50 cm enterrée à 20-30 cm de profondeur sur un lit de bentonite largement imbibée d'eau fortement salée (Illustration 2). Elle est également recouverte d'un lit de bentonite et connectée au câble d'injection relié à l'émetteur.



Illustration 2 - Mise en place du pôle d'injection E3 de TX1 - Loupian.

Une injection de 25-30 A (aux basses fréquences) est assurée sur les deux dipôles.

CONFIGURATION D'INJECTION (Surface-Surface) - TX1 - LOUPIAN				
Electrode	Coordonnées Lambert 93			Commentaires
	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m.a.s.l.)	
<b>E1 (S)</b>	749982	6260351	4.9	1 plaque inox + 30 kg bentonite + eau salée
<b>E2 (N)</b>	750261	6261048	31.7	1 plaque inox + 30 kg bentonite + eau salée
<b>E3 (E)</b>	750813	6260882	21.2	1 plaque inox + 30 kg bentonite + eau salée
POSITION DE L'EMETTEUR				
<b>TXM22</b>	750236	6261052	32.4	TXM22 + groupe électrogène de 60 kVA + transformateur d'isolement

POLARISATIONS			
Nom	Electrodes	Polarisation	Distance (m)
<b>POL 1</b>	E1-E2	P150°	750.8
<b>POL 2</b>	E2-E3	P90°	576.4

Illustration 3 - Coordonnées des pôles d'injection du TX1 - Loupian.



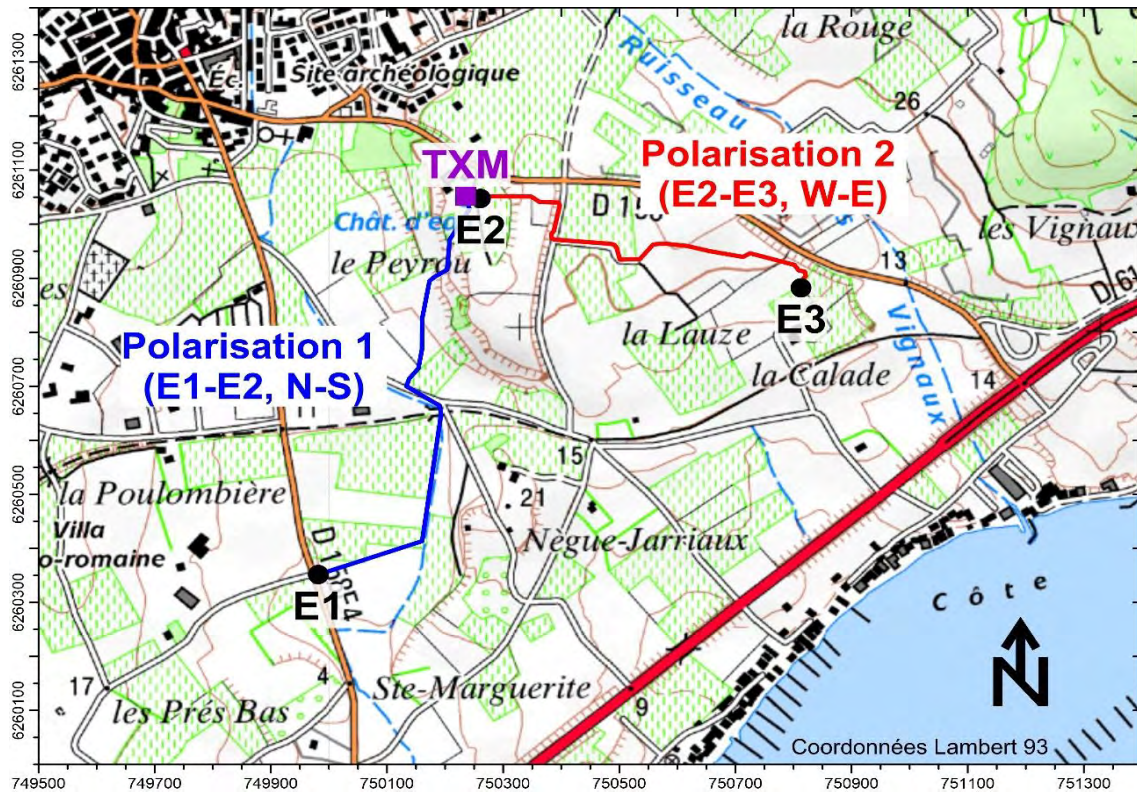


Illustration 4 - Localisation du TX1 - Loupian.



Illustration 5 - Dépose du groupe électrogène 60 kVA au TX1 - Loupian.



*Illustration 6 - TX-Loupian (groupe électrogène, transformateur d'isolement, TXM22).*

#### **2.4.2. TX2 - Frontignan**

Trois pôles d'injection de courant formant deux dipôles d'injection indépendants (polarisation 1 et polarisation 2) ont été déployés le mardi 14 novembre depuis le site du château de Stony sur la commune de Frontignan (Illustration 7). Le dernier pôle d'injection a été mis en place le mercredi 15 au matin. La présence des calcaires à très faible profondeur nous a amené à positionner 2 plaques inox (2 x 50 x 50 cm) pour optimiser au maximum l'injection. Les résistances de prise n'ayant pu être abaissées sous 70 ohm malgré l'apport abondant d'eau salée. Il était impossible d'injecter suffisamment de courant dans le sol pour permettre à l'émetteur de fonctionner de manière optimale (nous avons au maximum 2-3 A). Il a donc été décidé de modifier l'injection de deux dipôles électriques en un dipôle magnétique vertical (VMD). Une partie des câbles déposés a été ramassée et re-disposée de manière à former une boucle de courant. Celle-ci fonctionnait de manière optimale le mercredi 15 novembre au soir avec une intensité de l'ordre de 35-40 A (Illustrations 8 et 9).



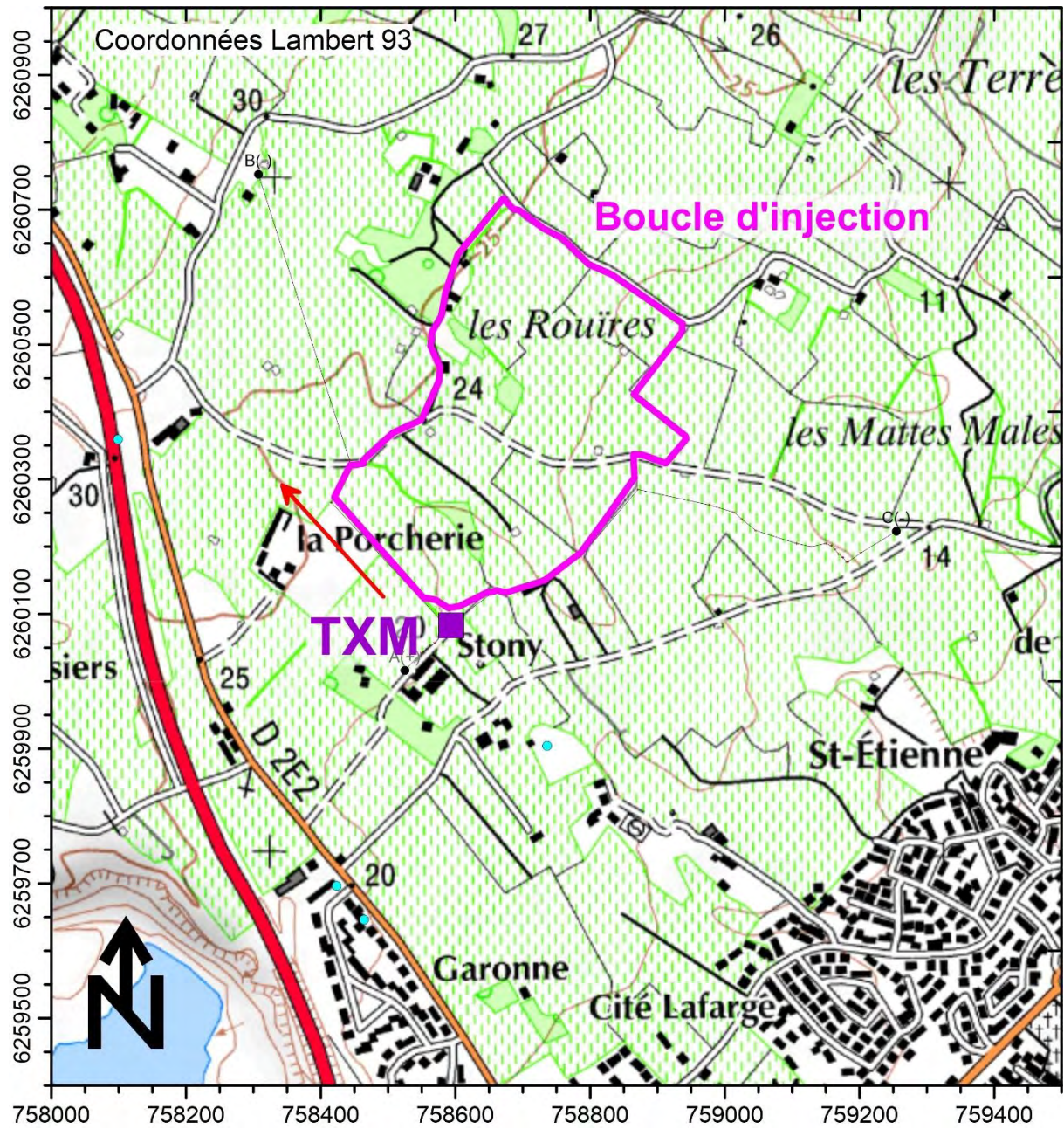


Illustration 7 - Localisation du TX2-Frontignan.





*Illustration 8 - Dépose du groupe électrogène 60 kVA au TX2 – Frontignan.*



*Illustration 9 - TX-Frontignan (groupe électrogène, transformateur d'isolement, TXM22).*

## 2.5. SÉQUENCE DE MESURES

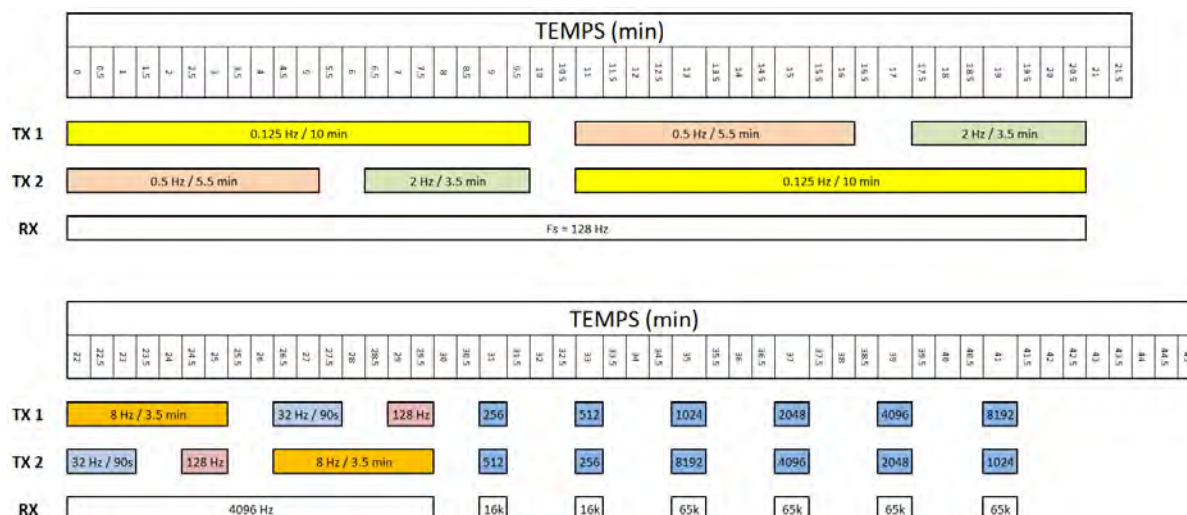
La stratégie de mesure a consisté à injecter simultanément dans les deux émetteurs une série de 12 fréquences fondamentales différentes (0,125 - 0,5 - 2 - 8 - 32 - 128 - 256 - 512 - 1 024 - 2 048 - 4 096 et 8 192 Hz) en évitant le chevauchement possible de leurs harmoniques, ce qui aurait été fatal pour la qualité des données. Pour cela l'ordre des fréquences à globalement été réarrangé et la durée des séquences ajustée (Illustration 11).

La modification du TX2-Frontignan en un dipôle magnétique vertical (VMD) a eu pour conséquence de supprimer une polarisation. Cet émetteur a donc fonctionné sur un cycle de 45 min alors que le TX1-Loupian fonctionnait sur un cycle de 90 min pour permettre l'émission dans chacune des deux polarisations disponibles. Les émissions débutaient à 9 h 00 (LT) du matin et les stations de mesures avaient pour objectif d'enregistrer au moins 1 h 30 de mesure pour parvenir à compléter le jeu de données prévu (Illustration 10). Les séquences d'enregistrement aux stations de mesures étaient légèrement différentes de celles des émissions en ce qu'elles regroupaient (pour les basses fréquences) 3 émissions de fréquences fondamentales différentes.

		TX 1 - Loupian				TX 2 - Frontignan				RX			
	ID	Card 07	START	STOP	DUREE	BASE FREQ	START	STOP	DUREE	BASE FREQ	Sampling FREQ	START	STOP
POLARISATION - 1	1	BF	09:00:00	09:10:00	00:10:00	0.125	09:00:00	09:05:30	00:05:30	0.5	128	09:00:00	09:21:00
	2	BF	09:11:00	09:16:30	00:05:30	0.5	09:06:30	09:10:00	00:03:30	2	128		
	3	BF	09:17:30	09:21:00	00:03:30	2	09:11:00	09:21:00	00:10:00	0.125	128		
	4	BF	09:22:00	09:25:30	00:03:30	8	09:22:00	09:23:30	00:01:30	32	4096	09:22:00	09:30:00
	5	BF	09:26:30	09:28:00	00:01:30	32	09:24:30	09:25:30	00:01:00	128	4096		
	6	BF	09:29:00	09:30:00	00:01:00	128	09:26:30	09:30:00	00:03:30	8	4096		
	7	HF	09:31:00	09:31:30	00:00:30	256	09:31:00	09:31:30	00:00:30	512	16384	09:31:00	09:31:30
	8	HF	09:33:00	09:33:30	00:00:30	512	09:33:00	09:33:30	00:00:30	256	16384	09:33:00	09:33:30
	9	HF	09:35:00	09:35:30	00:00:30	1024	09:35:00	09:35:30	00:00:30	8192	65536	09:35:00	09:35:30
	10	HF	09:37:00	09:37:30	00:00:30	2048	09:37:00	09:37:30	00:00:30	4096	65536	09:37:00	09:37:30
	11	HF	09:39:00	09:39:30	00:00:30	4096	09:39:00	09:39:30	00:00:30	2048	65536	09:39:00	09:39:30
	12	HF	09:41:00	09:41:30	00:00:30	8192	09:41:00	09:41:30	00:00:30	1024	65536	09:41:00	09:41:30
POLARISATION - 2	13	BF	09:45:00	09:55:00	00:10:00	0.125	TX2 - POL2 IDENTIQUE à TX2 - POL1 (puisque dipôle magnétique vertical) + 45 min				IDENTIQUE à RX POL1 + 45 min		
	14	BF	09:56:00	10:01:30	00:05:30	0.5							
	15	BF	10:02:30	10:06:00	00:03:30	2							
	16	BF	10:07:00	10:10:30	00:03:30	8							
	17	BF	10:11:30	10:13:00	00:01:30	32							
	18	BF	10:14:00	10:15:00	00:01:00	128							
	19	HF	10:16:00	10:16:30	00:00:30	256							
	20	HF	10:18:00	10:18:30	00:00:30	512							
	21	HF	10:20:00	10:20:30	00:00:30	1024							
	22	HF	10:22:00	10:22:30	00:00:30	2048							
	23	HF	10:24:00	10:24:30	00:00:30	4096							
	24	HF	10:26:00	10:26:30	00:00:30	8192							

Illustration 10 - Séquences, durées et fréquences d'échantillonnage.





*Illustration 11 - Visualisation des séquences et de la synchronisation des deux émetteurs et des récepteurs.*

## 2.6. RX - STATIONS CSEM

Les stations de mesures servent à enregistrer localement les champs électriques et magnétiques au moyen de deux dipôles électriques perpendiculaires de 50 à 100 m de long (électrodes non polarisables) ainsi que 2 capteurs magnétiques horizontaux, positionnés parallèlement aux dipôles électriques (Illustration 12). Ces enregistrements sont programmés de telle sorte à être synchrones des émissions de courant des deux émetteurs et sont réalisés à l'aide d'une séquence de 8 jobs se lançant toutes les 45 minutes.



*Illustration 12 - Station CSEM implantée en bordure de l'Étang de Thau.*

Trois équipes (1 marine de 3 personnes, 2 terrestres de 2 personnes) possédant chacune 2 équipements réalisent ces acquisitions avec un rendement moyen de l'ordre de 4 stations par jour. La mise en place prend environ 1 h (variable selon les contextes), l'acquisition requiert *a minima* 1 h 30 et le démontage une vingtaine de minutes.

Au soir du 23 novembre 2017, 91 stations (35 marines, 56 terrestres) ont été acquises (Illustrations 13 et 14). 1 stations MT (de qualité médiocre) a également été acquise au TX1-Loupian et une station AMT au TX2-Frontignan. Un sondage TDEM a également été réalisé à chaque émetteur.

Il sera décidé après inspection des données de la pertinence d'acquérir, ou non, davantage de sondages TDEM au droit des stations de mesures.



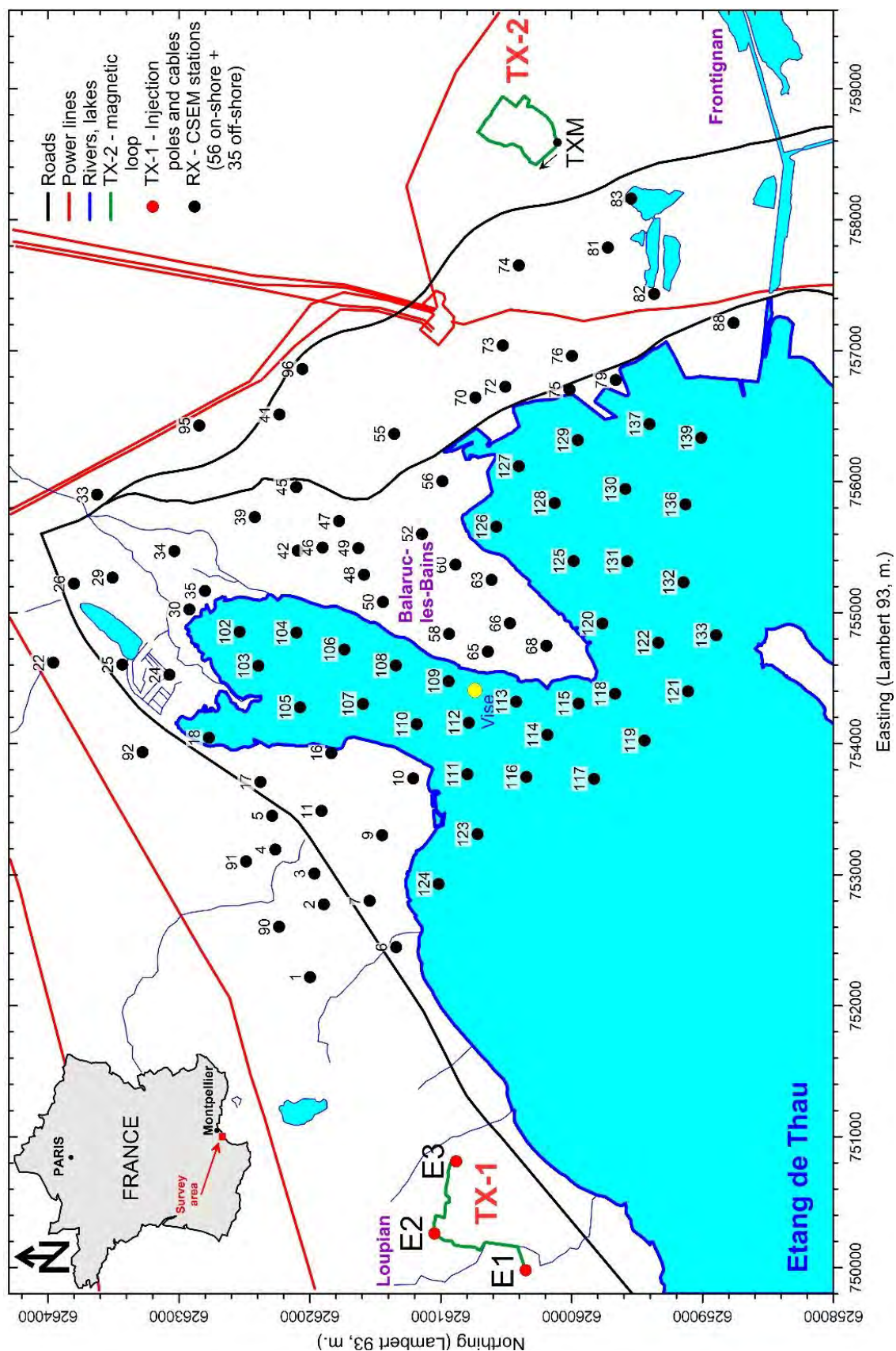


Illustration 13 - Carte des réalisations (points noirs) au 20 novembre 2017.

[illegible]

*Illustration 14 - Tableau des données acquises (en gris = acquis).*

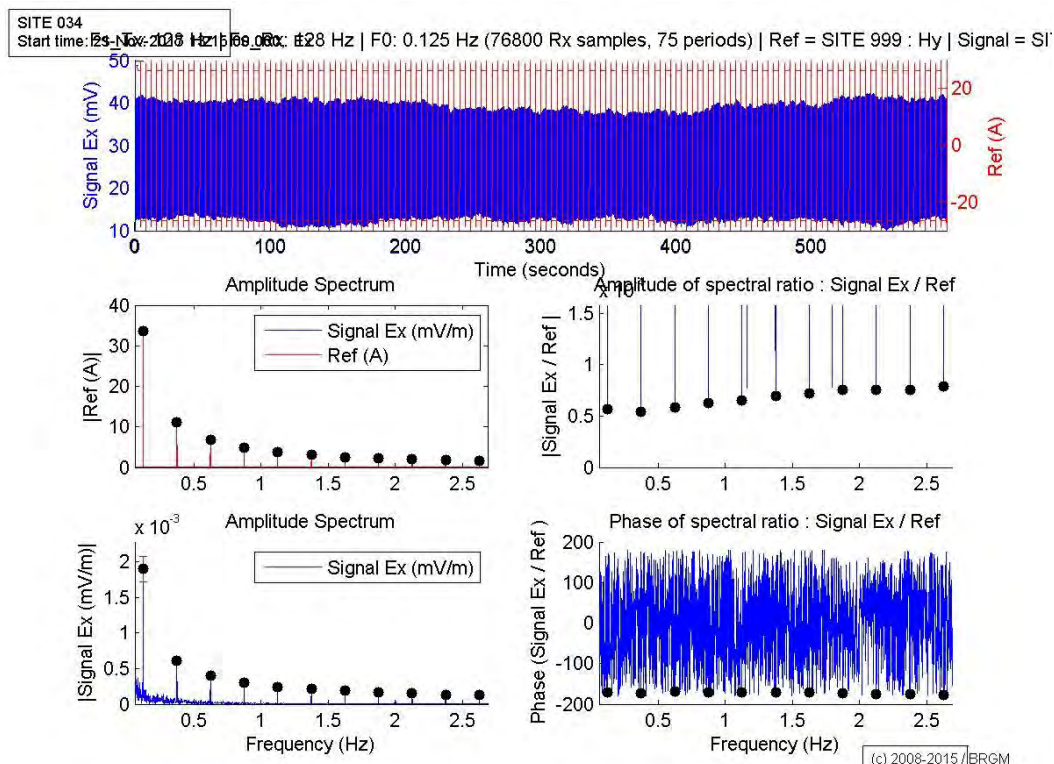
## 2.7. PROCESSING DES DONNÉES

Le processing des données a été réalisé en cours d'acquisition (QC) et au BRGM (processing final complet).

Les données ont été traitées avec le code (PROCATS) développé au BRGM (Bourgeois *et al.*, 2012). Les fonctions de transfert entre le signal enregistré au récepteur ( $E_x(f)$ ,  $E_y(f)$ ,  $H_x(f)$ ,  $H_y(f)$ ) et celui enregistré à la source  $I(f)$  sont estimées pour chaque fréquence harmonique de la fréquence d'injection  $f_0$ . On obtient alors des fonctions de transfert complexes dont les parties réelles et imaginaires sont respectivement les composantes en phase **Ep(f) et Hp(f)**, et en quadratures **Eq(f) et Hq(f)** de la réponse électrique et magnétique du sous-sol soumis à une injection de courant.

Le traitement de données a consisté à extraire, pour chaque station, chacune des trois polarisations, chacune des douze séries temporelles, le contenu spectral (à la fréquence fondamentale émise et ses harmoniques impaires) des signaux ( $E_x(f)$ ,  $E_y(f)$ ,  $H_x(f)$ ,  $H_y(f)$ ) enregistrés aux stations de réception (RX) et les normaliser par l'intensité du courant émis (TX) aux mêmes fréquences. Ceci fournit les champs électromagnétiques mesurés en mV/m/A ou mA/m/A.

Ce traitement de données fournit en sortie non seulement les champs mesurés dans les axes de mesure et tournés dans les axes nord-sud /est-ouest, mais également des estimations des bruits sur chaque composante.



*Illustration 15 - Exemple de processing pour la station 34, polarisation 1, fréquence fondamentale 0.125 Hz. Haut : séries temporelles synchrones entre l'émission TX (rouge) et la voie Ex de réception RX (bleu). Milieu à gauche : spectre d'amplitude de l'émission. Bas à gauche : idem pour la réception. Milieu à droite : amplitude du rapport spectral. Bas à droite : phase du rapport spectral.*

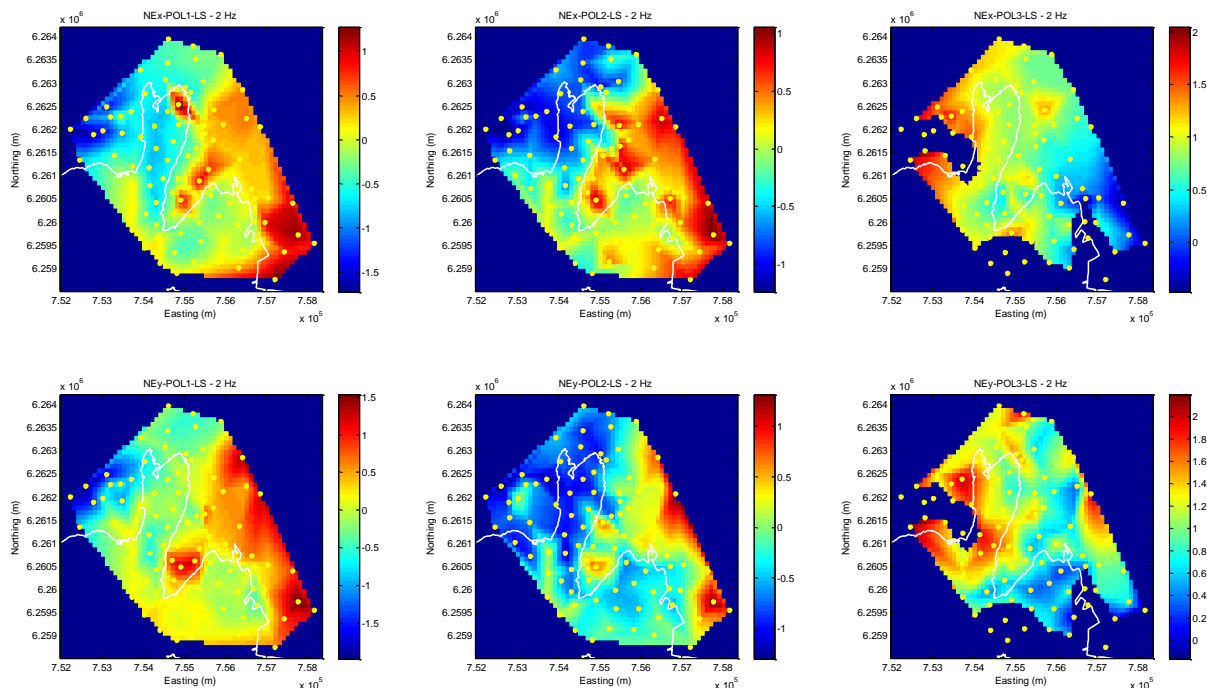
Dans le cadre de cette acquisition un peu plus de 3 000 couples TX/RX enregistrés ont été traités.

## 2.8. QUALITÉ DES DONNÉES

La qualité des données CSEM peut s'évaluer sur plusieurs critères :

- le bruit mesuré sur les différentes composantes Ex, Ey, Hx, Hy (Illustration 16) ;
- l'embrayage entre les fréquences successives (Illustration 17) ;
- la cartographie spatiale, des différents paramètres mesurés et de vecteurs, qui permet de mettre en évidence les stations critiques ou des zones sensibles.

Globalement, la qualité des données CSEM acquises durant cette campagne est bonne à très bonne selon la distance à l'émetteur ainsi qu'en fonction de la proximité des zones urbanisées. Par exemple, les stations marines, acquises en milieu conducteur atténuant les bruits, sont généralement de meilleure qualité que les stations terrestres acquises en plein cœur de Balaruc-les-Bains.



*Illustration 16 - Log10 du bruit en % mesuré sur la zone d'investigation à la fréquence de 2 Hz. Haut : composante Ex. Bas : composante Ey. De gauche à droite : POL1 et POL2 (Loupian) et POL3 (Frontignan). Ces valeurs de bruit sont calculées sur la base du signal mesuré à la fréquence de 2 Hz, et sur le bruit mesuré sur les raies adjacentes autour de la fréquence d'intérêt.*

L'Illustration 16 illustre le niveau de bruit mesuré à la fréquence 2 Hz pour les trois directions « d'éclairage » - POL1, POL2 et POL3 - de la zone et pour les composantes Ex et Ey. On observe que celui-ci, à l'exception de certains points anormaux, est globalement inférieur à 15 % pour les émissions (POL1 et POL2) de Loupian. Le signal diminue clairement plus vite avec l'émetteur POL3 en raison de la physique inhérente au dipôle magnétique vertical. Clairement le bruit augmente avec la distance à la source (le signal diminuant) et en se rapprochant des zones urbanisées (le bruit augmentant). On observe également une augmentation du bruit aux fréquences les plus élevées (Illustration 17).

Sur l'Illustration 17, on observe que l'embrayage entre les fréquences fondamentales injectées (points pleins) et leurs harmoniques (points vides) est quasiment parfait aux stations 34 et 107 en dessous de ~1 000 Hz. Bien que situées à des distances différentes de l'émetteur, celles-ci montrent par ailleurs une réponse semblable. À la station 56, plus affectée par le bruit anthropique lié à la presqu'île de Balaruc, on note un bruit autour de la tendance générale de la courbe.



L'analyse détaillée des données permet de conserver les meilleures fréquences afin de n'utiliser que celle-ci dans les processus d'inversion. Les fréquences fondamentales concentrant un maximum d'énergie sont privilégiées.

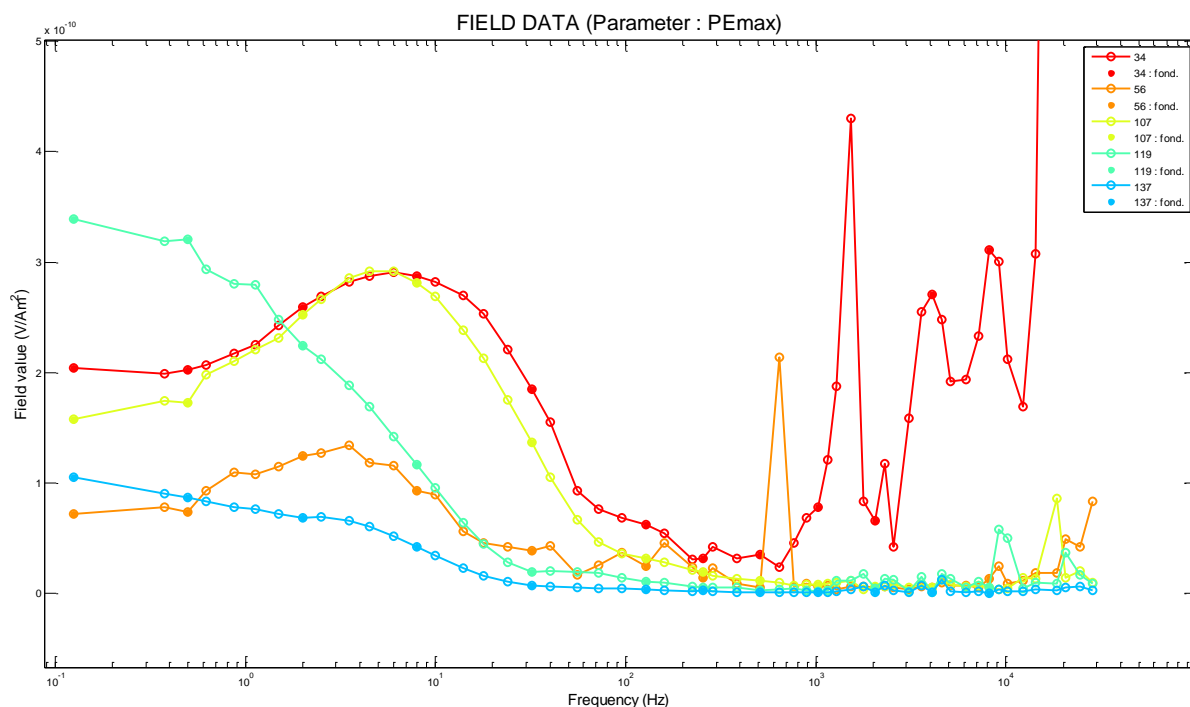


Illustration 17 - Maximum de l'ellipse de polarisation en fonction de la fréquence mesuré à 5 stations (34, 56, 107, 119, 137, Illustration 18) avec une émission en POL2.

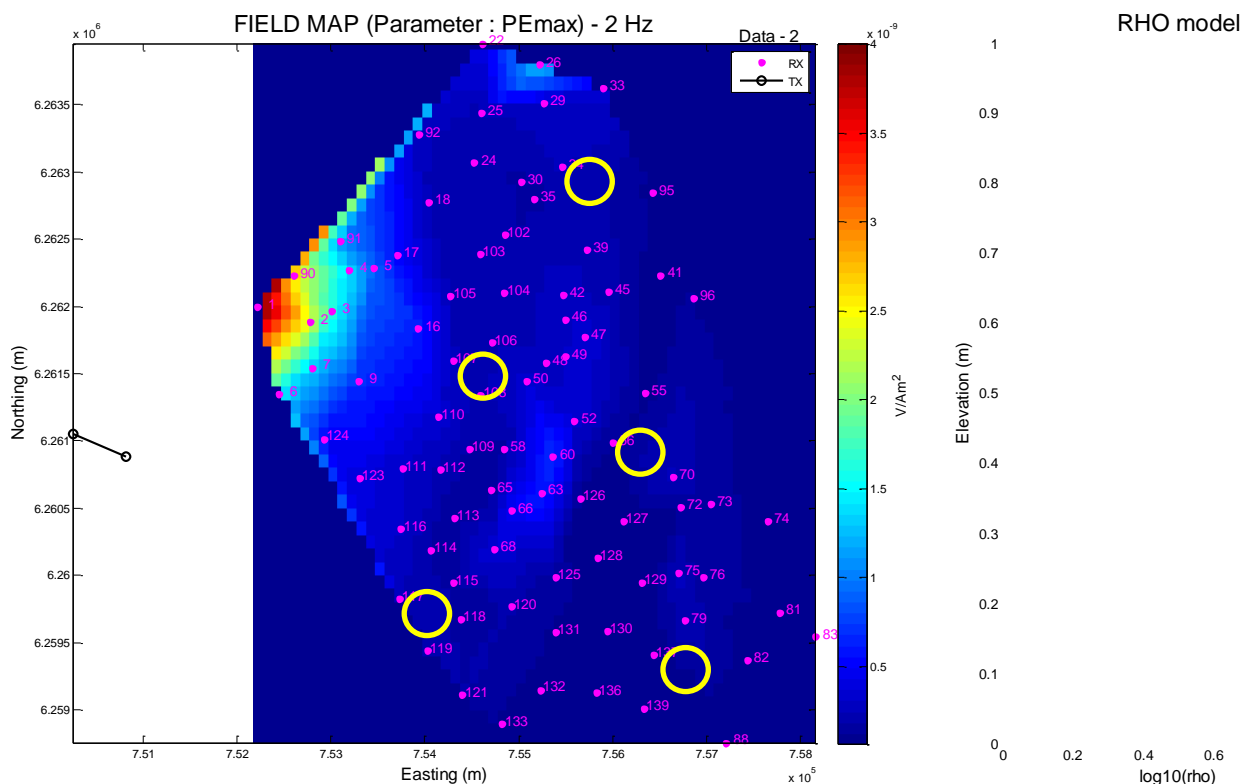


Illustration 18 - Localisation des 5 sites présentés en Illustration 17. Carte interpolée du maximum de l'ellipse de polarisation en POL2, à la fréquence de 2Hz.

## 2.9. CARTES DE RÉSISTIVITÉS APPARENTES

Une fois les données de bonne qualité sélectionnées, des cartes de résistivités apparentes ont été calculées afin de convertir les observations (amplitude des champs électriques) en propriétés électriques du sous-sol. Pour cela, pour chaque station, polarisation et fréquence de l'émetteur, la résistivité d'un demi-espace homogène est calculée afin d'expliquer au mieux les observations, ici les amplitudes maximales de l'ellipse de polarisation du champ électrique horizontale. Ces résistivités donnent une idée des variations latérales de résistivités entre stations mais pas avec la profondeur. On peut cependant prendre en compte la fréquence de l'émetteur afin d'estimer d'éventuelles variations avec la profondeur. Pour cela, on peut utiliser le concept de profondeur de peau qui décrit la distance  $\delta$  à laquelle l'amplitude du champ électrique a décru d'un facteur  $1/e$  (soit ~63 %) en fonction de la fréquence  $f$  de l'émetteur et de la résistivité du milieu  $\rho$  :

$$\delta = 503\sqrt{\rho/f}$$

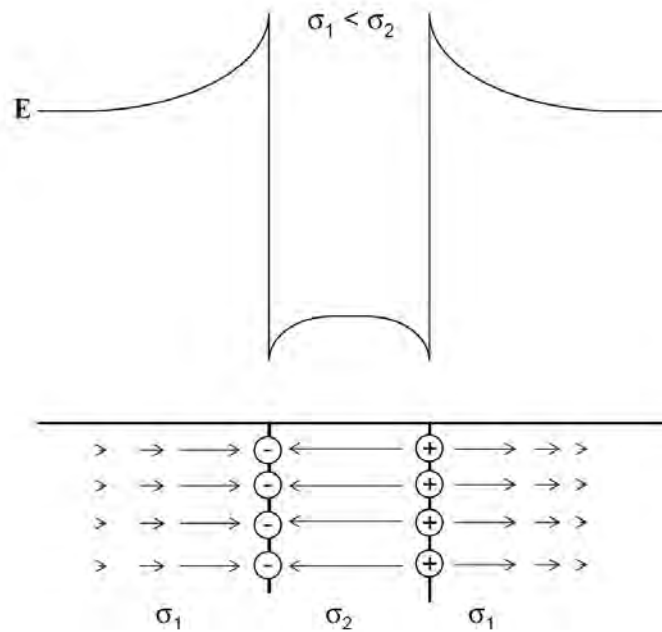
Dans le cas de la présente étude, cette profondeur de peau varie d'une dizaine de mètres à hautes fréquences (>1 000Hz) à plusieurs milliers de mètres à basses fréquences (<1Hz) (Tableau 1) :

Fréquence (Hz)	0.125	0.5	2	8	32	128	256	512	1024	2048	4096	8192
$\delta(\rho=10\Omega.m)$	5000m	2250m	1125m	560m	280m	140m	100m	70m	50m	35m	25m	17m

*Tableau 1 - Profondeur d'investigation estimée en fonction de la fréquence du signal électromagnétique.*

La profondeur d'investigation peut ensuite s'estimer à partir de la profondeur de peau. Il en ressort que les très hautes fréquences (>1 000Hz) ne vont échantillonner que la proche surface (<100 m) alors que les basses fréquences (1Hz) vont échantillonner tout le sous-sol jusqu'à quelques kilomètres de profondeur en cumulant les effets peu profonds et profonds.

En plus des résistivités apparentes, nous avons visualisé l'orientation de l'ellipse de polarisation du champ électrique horizontal afin de visualiser d'éventuels effets galvaniques qui perturbent les lignes de courants électriques dans le sol. En effet, la présence d'une hétérogénéité de résistivité électrique crée des accumulations de charges à ses bords qui perturbent le champ électrique incident (Illustration 17). Pour un corps plus conducteur que l'encaissant, les lignes de champs convergent vers celui-ci et à l'intérieur, les courants se resserrent vers le centre : le champ électrique total semble donc canalisé par le conducteur, c'est l'*effet galvanique*. Il en ressort que les ellipses de polarisation du champ électrique vont pointer vers les corps conducteurs et diverger des corps résistants.



*Illustration 19 - Bas : accumulation de charges aux bords d'un filon conducteur.  
Haut : champ électrique perpendiculaire au filon que l'on mesurerait en surface.*

Les Illustration 21 à 23 représentent les cartes de résistivités apparentes pour la polarisation 2 de l'émetteur TX1 à 128, 8 et 0.5 Hz, respectivement. À très haute fréquence (128 Hz), la profondeur d'investigation étant faible (<100 m), la carte de résistivité représente essentiellement la résistivité des couches superficielles. En comparant avec la carte géologique, il en ressort que les formations calcaires du Jurassique sont majoritairement résistives (> 100  $\Omega.m$ ), les remplissages sédimentaires de l'Oligocène, Miocène et Pliocène (essentiellement marneux) sont conducteurs (< 50  $\Omega.m$ ), tout comme les remplissages récents du Quaternaire. En mer, le signal est dominé par la présence d'eau salée ce qui ne permet pas d'estimer la résistivité des terrains sus-jacents.

À 8 Hz, la profondeur d'investigation étant de l'ordre de plusieurs centaines de mètres et l'atténuation de l'eau de mer plus faible, la géométrie des grandes unités géologiques se dessine avec des calcaires jurassiques bien enracinés et résistants (> 100  $\Omega.m$ ) au nord-ouest et nord-est de la zone d'étude et sous la presqu'île de Balaruc-les-Bains. Dans ces formations calcaires viennent s'insérer des canyons s'ouvrant vers le sud-ouest remplis de Pliocène conducteur (< 100  $\Omega.m$ ). À très basse fréquence (0.5Hz) et plus grande profondeur, des structures similaires se retrouvent à l'exception de la zone située à l'ouest de Balaruc-Les-Bains qui semble anormalement conductrice (< 50  $\Omega.m$ ).

Des observations similaires peuvent se faire sur la polarisation 1 de l'émetteur TX1 (Illustrations 24 à 26) et l'émetteur TX2 (Illustration 27), à la différence que les résistivités apparentes sont globalement plus faibles que sur la polarisation 2 de l'émetteur TX1, très probablement parce que les courants émis sont beaucoup affectés (canalisés) par la présence de l'eau salée de l'Étang de Thau.



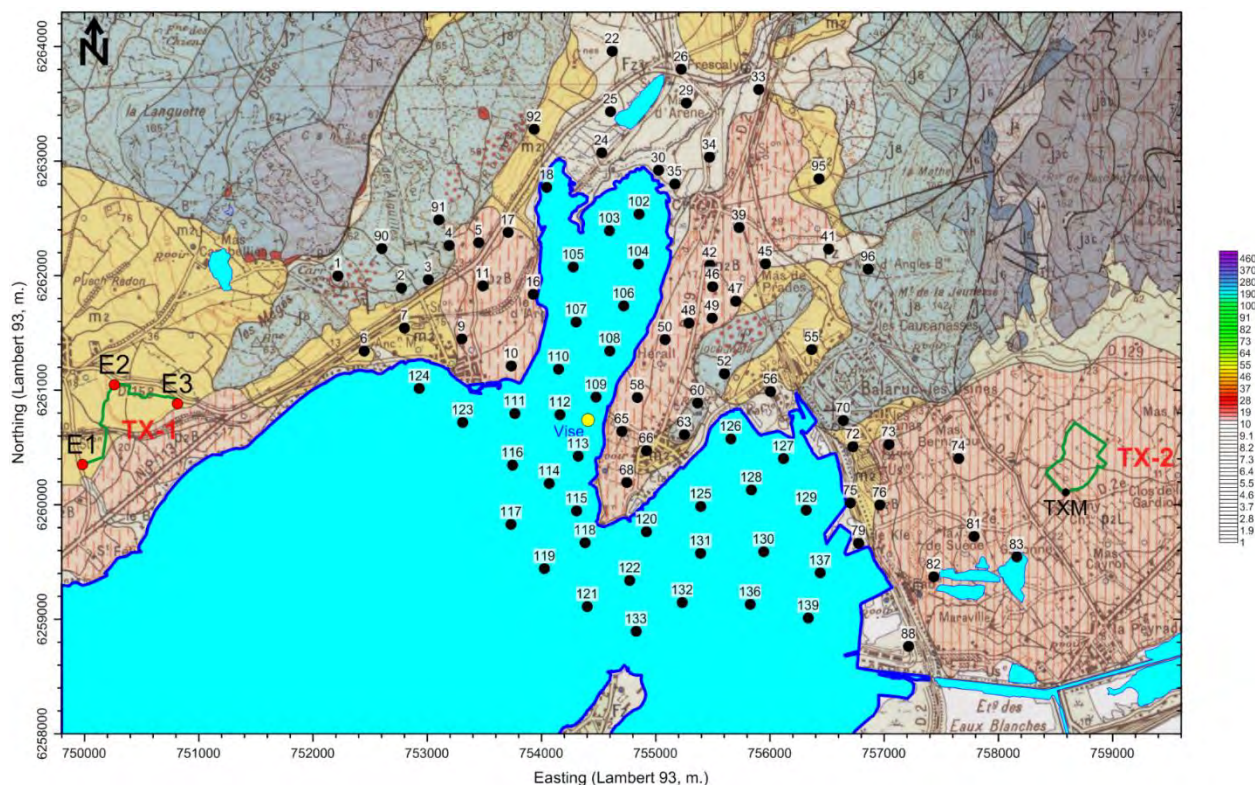


Illustration 20 - Carte géologique sur la zone investiguée par la méthode CSEM. (légende géologique ?).

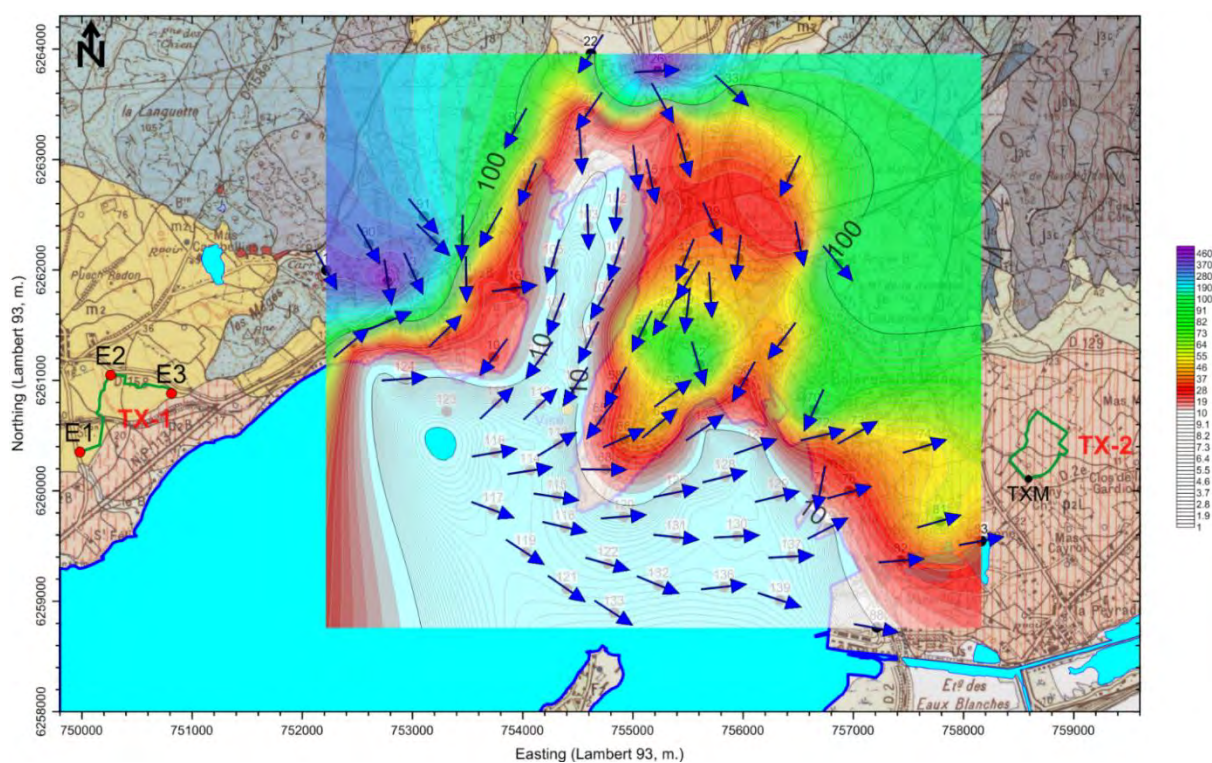


Illustration 21 - Carte de résistivité apparente (couleurs) ainsi que de l'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique (flèches) à 128 Hz pour la polarisation 2 (E2-E3) de l'émetteur TX1 à Loupian.



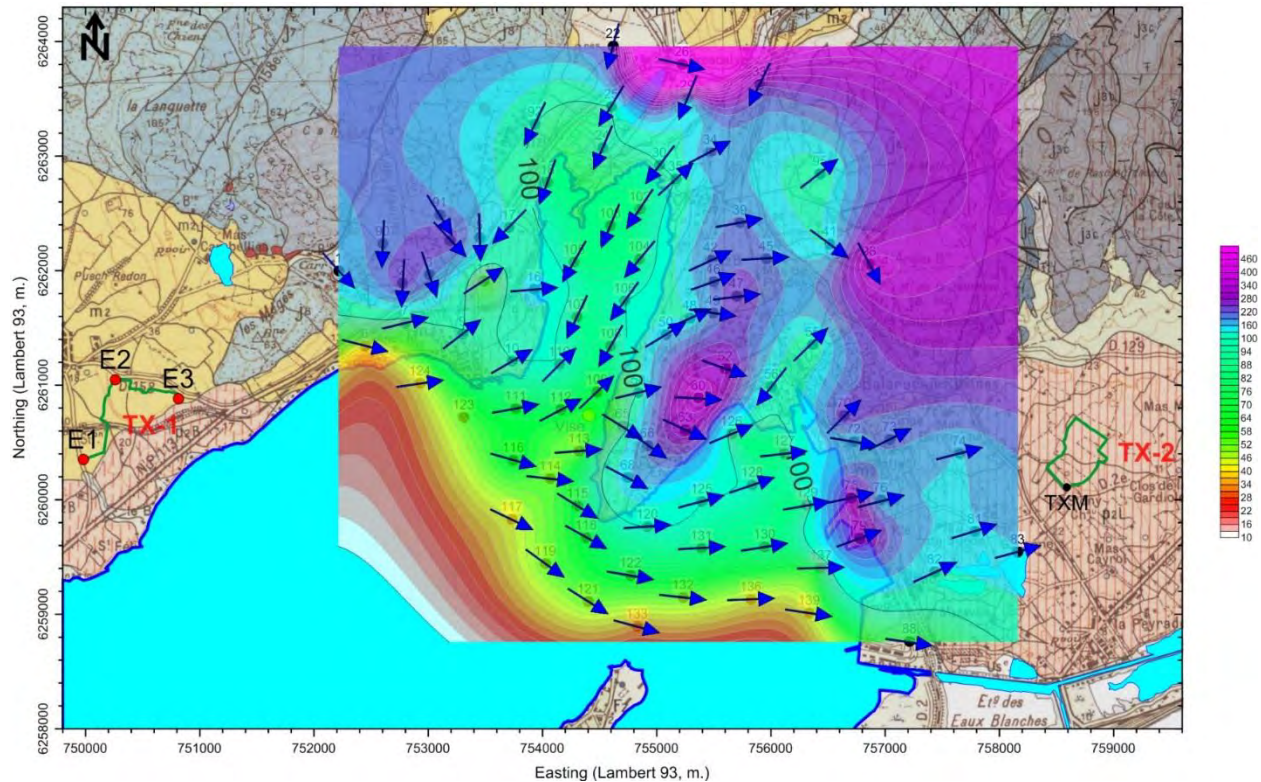


Illustration 22 - Carte de résistivité apparente (couleurs) ainsi que l'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique (flèches) à 8 Hz pour la polarisation 2 (E2-E3) de l'émetteur TX1 à Loupian.

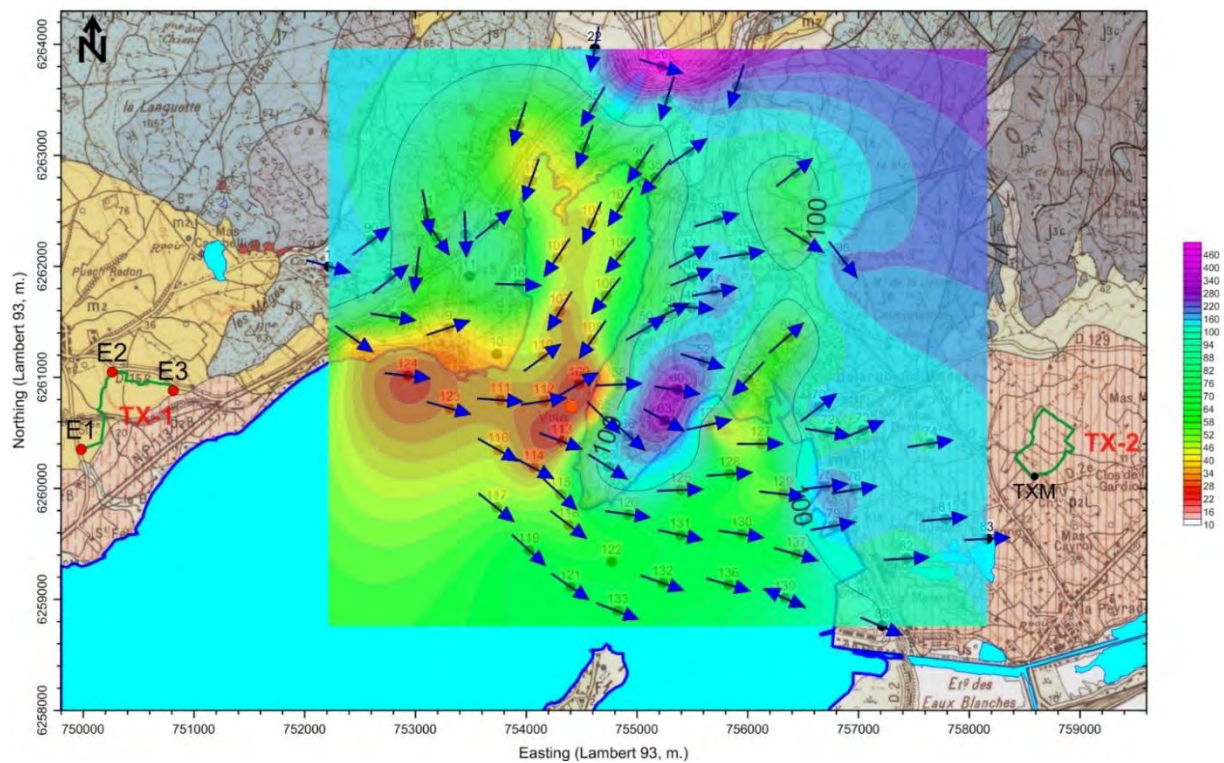


Illustration 23 : Carte de résistivité apparente (couleurs) ainsi que l'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique (flèches) à 0.5 Hz pour la polarisation 2 (E2-E3) de l'émetteur TX1 à Loupian.



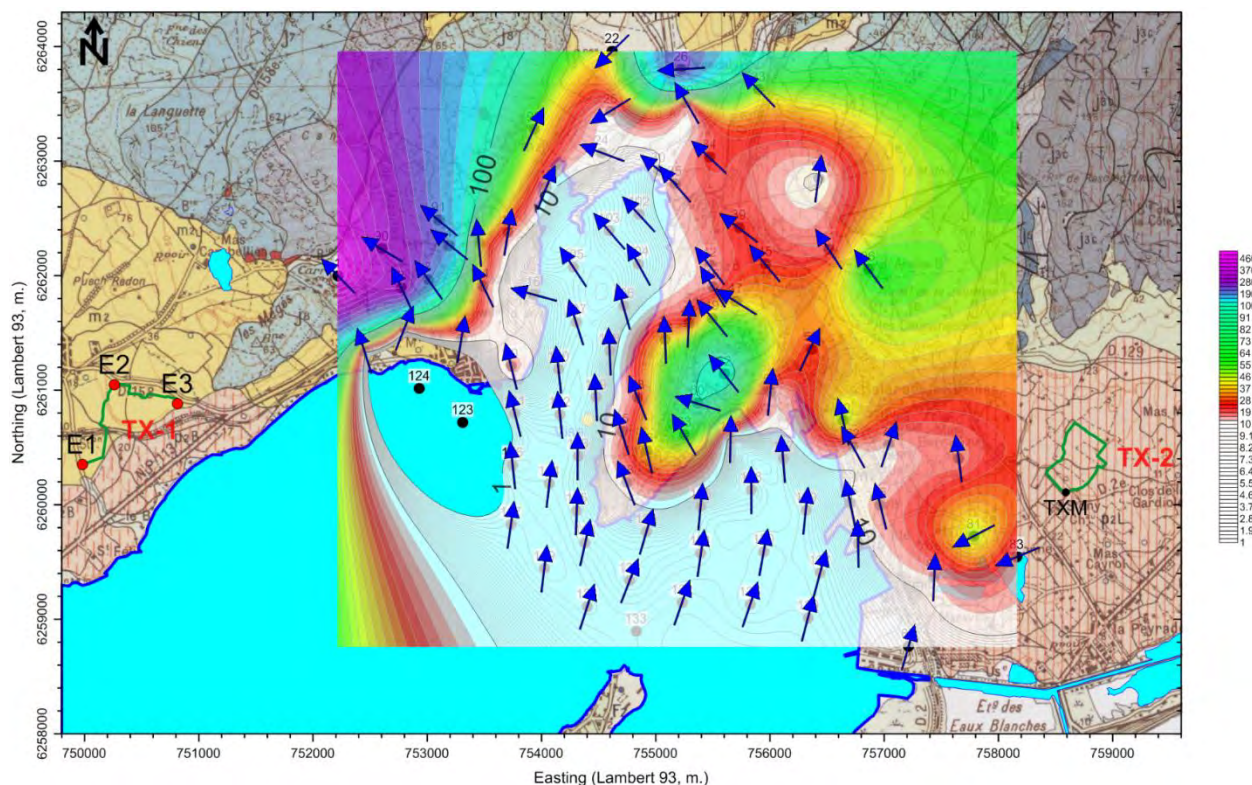


Illustration 24 - Carte de résistivité apparente (couleurs) ainsi que l'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique (flèches) à 128 Hz pour la polarisation 1 (E1-E2) de l'émetteur TX1 à Loupian.

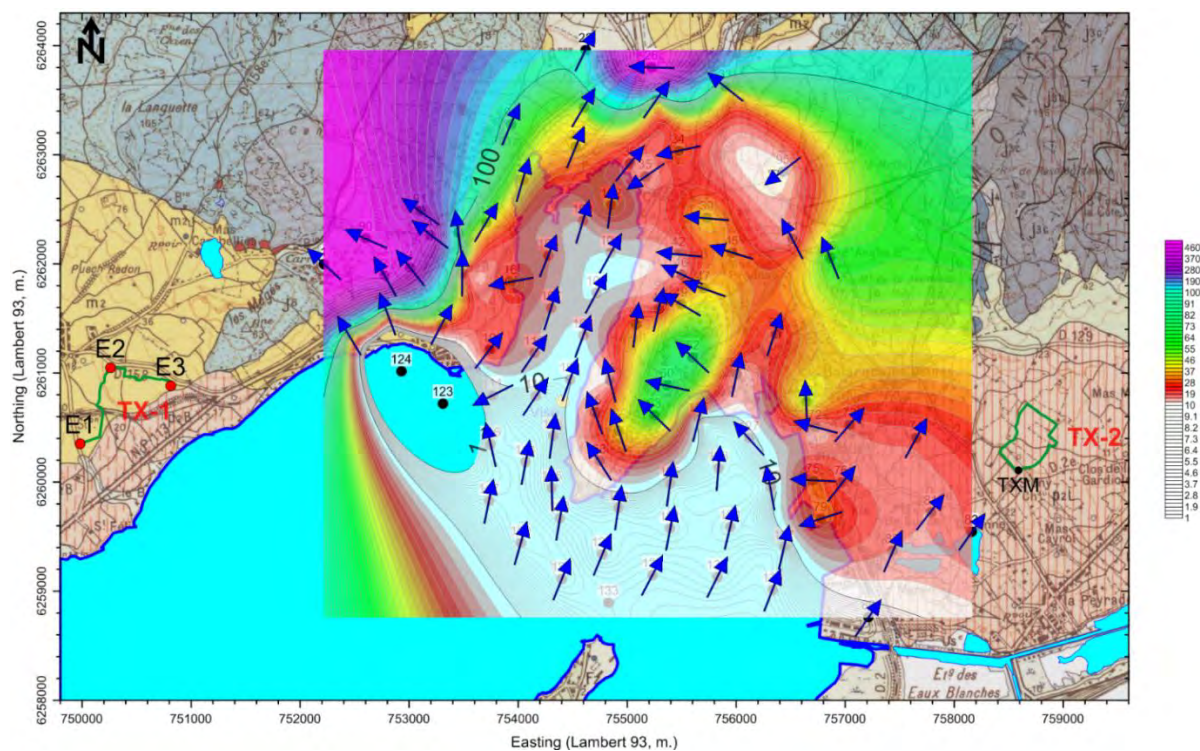


Illustration 25 - Carte de résistivité apparente (couleurs) ainsi que l'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique (flèches) à 32 Hz pour la polarisation 1 (E1-E3) de l'émetteur TX1 à Loupian.



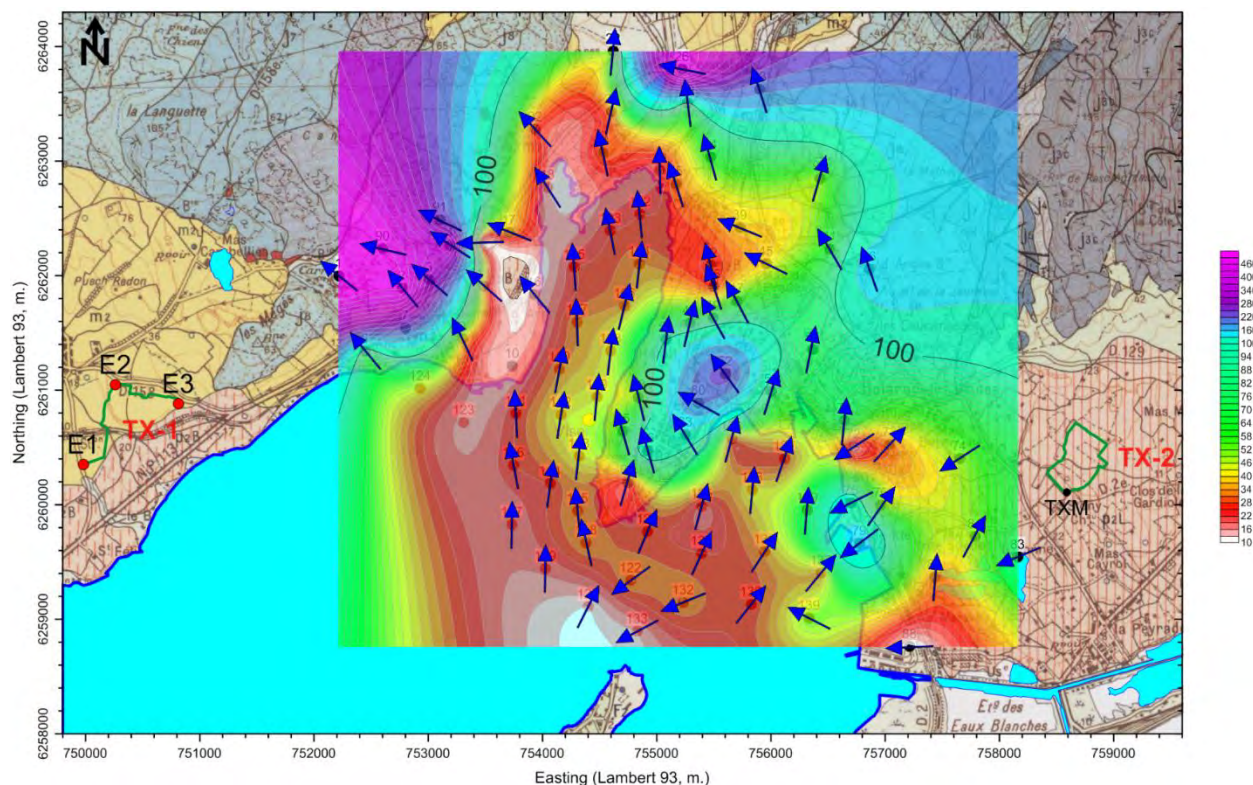


Illustration 26 - Carte de résistivité apparente (couleurs) ainsi que l'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique (flèches) à 0.125Hz pour la polarisation 1 (E1-E3) de l'émetteur TX1 à Loupian.

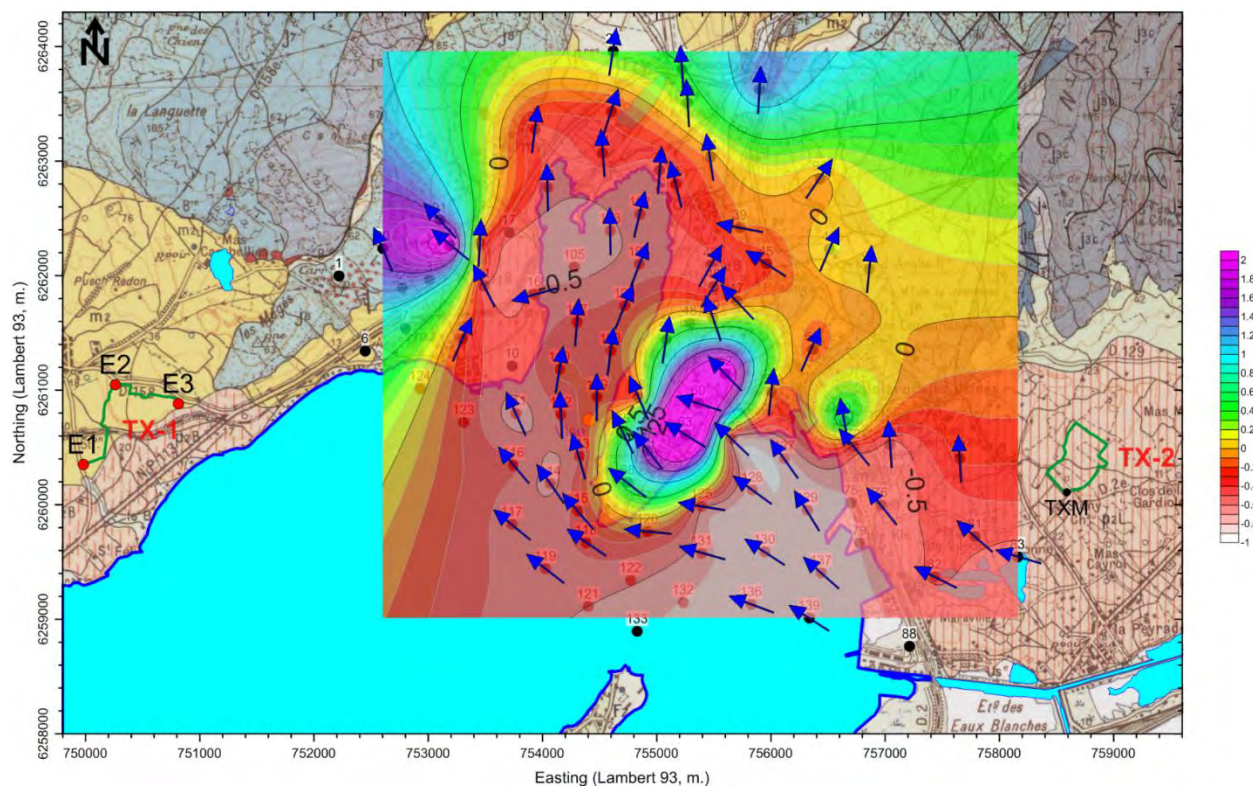


Illustration 27 - Carte de résistivité apparente (couleurs) ainsi que l'orientation des ellipses de polarisation du champ électrique (flèches) à 2 Hz l'émetteur TX2 de Frontignan.

## **2.10. CONCLUSIONS**

L'analyse des données CSEM collectées dans le cadre du projet DEM'EAUX Thau a permis d'aboutir aux résultats préliminaires suivants :

- la mise en œuvre avec succès de cette technique dans un environnement pseudo-côtier fortement anthropisé et complexe lié à la géométrie 3-D de la géologie et à l'Étang de Thau ;
- la mise en œuvre simultanée de deux émetteurs de forte puissance permettant des « éclairages » orientés des cibles recherchées ;
- l'obtention de premières cartes de résistivité apparente à différentes fréquences en accord avec la résistivité des principales formations géologiques présentes dans la zone d'étude ; ces cartes sont encore en cours d'interprétation.



## 3. Acquisition gravimétrique

Cette section du rapport décrit les travaux mis en œuvre, le traitement et l'interprétation des données gravimétriques acquises dans le cadre du projet DEM'EAUX Thau, sous forme de schéma structural.

### 3.1. PRÉAMBULE

La mise en œuvre de la méthode gravimétrique a été choisie, pour apporter une information supplémentaire et complémentaire sur les propriétés physiques des terrains. La méthode CSEM, décrite dans le chapitre précédent, apporte des informations sur la résistivité électrique alors que la gravimétrie apporte des informations sur la distribution de la densité des terrains.

La géologie des terrains du secteur de Balaruc-les-Bains et notamment le contexte structural du site (les grandes failles ayant permis de générer la géologie telle qu'observée aujourd'hui) montrent une complexité évidente à laquelle sont rattachées plusieurs questions scientifiques d'intérêt pour le projet.

La gravimétrie a pour but de déceler les variations du champ de pesanteur sur la zone investiguée et de pouvoir mettre en évidence les contrastes de densité des terrains qui peuvent être liés à des grandes failles, à des transitions géologiques, à la présence de corps particuliers. Ces corps peuvent être légers – vides karstiques ou remplis d'alluvions par exemple, zones décomprimées ou non compactées - ou lourds – telles des intrusions, minéralisations, ou des roches massives (calcaires du Jurassique par exemple).

Le principe est globalement le suivant, et comme pour les méthodes électromagnétiques, basées sur le contraste des paramètres recherchés, plus les corps recherchés sont profonds plus ils doivent être grands et/ou de densité contrastée pour être visibles de la surface. Plus ils sont proches de la surface, plus l'anomalie gravimétrique générée sera de courte longueur d'onde et par conséquent bien localisée.

L'intérêt du couplage des méthodes est l'apport de contraintes supplémentaires permettant de renforcer l'interprétation conjointe des jeux de données et de valider, ou d'infirmer, certaines hypothèses qu'une méthode géophysique, mise en œuvre seule, ne permettrait pas de réaliser.

### 3.2. MODE OPÉRATOIRE ET TRAITEMENT

#### 3.2.1. Acquisition des données

398 stations gravimétriques ont été implantées et mesurées en gravimétrie et au GPS différentiel sur la zone d'étude (Illustrations 28 et 29) entre le 7 et le 15 novembre 2017.

Thomas Jacob, ingénieur géophysicien, et Benjamin Maurice, technicien en géophysique, ont réalisé l'ensemble des mesures avec l'aide de deux manœuvres intérimaires. Deux équipes d'acquisition ont été formées sur le terrain.

Deux gravimètres de terrain Scintrex CG-5 (les CG5 #028 et #539) ont été utilisés pour effectuer les mesures gravimétriques. Les coefficients de calibration des gravimètres, utilisés lors de la réduction des données, sont de 1,000244 pour le CG5 #028 et de 1,000195 pour le CG5 #539. Ils ont été établis entre deux bases absolues IGN ayant une différence de  $g$  de 133,931 mGal, pendant la mission d'acquisition. Cette différence de  $g$  est bien adaptée à la calibration des instruments pour cette étude, car elle est supérieure à deux fois la variation maximale de  $g$  mesurée par l'un ou l'autre des gravimètres pendant l'étude, qui est d'au plus de 49,6 mGal.



L'ensemble des mesures gravimétriques a été effectué en 17 programmes semi-journaliers ou journaliers, dont la durée de chacun d'entre eux n'a pas excédée 9 h 00. Un programme de mesures, pendant lequel 20 à 30 stations gravimétriques sont typiquement mesurées, débute et se termine par une mesure à une base gravimétrique pour contraindre la dérive instrumentale temporelle du gravimètre relatif Scintrex CG-5. Cette dérive est approximée comme étant linéaire avec le temps.

Le mode d'acquisition du gravimètre utilisé a été le suivant :

- 6 à 10 mesures de 50 s à la base ;
- 3 à 5 mesures de 50 s à chaque station.

Si l'inclinaison de l'instrument dépasse  $\pm 10$  secondes d'arc sur la composante X ou Y, une nouvelle mesure a été systématiquement réalisée avec des inclinaisons réajustées. De même, si l'écart entre l'avant dernière et la dernière mesure était supérieur à 0,005 mGal, une nouvelle mesure était effectuée.

Les mesures ont été réalisées sur trépied bas et la hauteur du gravimètre a été systématiquement mesurée avec un mètre ruban. Cette hauteur a été utilisée pour projeter au sol les valeurs de g en utilisant un gradient vertical usuel de 0,3086 mGal m<sup>-1</sup>.

42 stations gravimétriques ont été reprises une fois, totalisant 10,6 % de stations reprises. Les reprises servent à estimer la précision du levé (voir paragraphe 3.2.6)

Le positionnement des stations gravimétriques a été réalisé à l'aide d'un GPS Trimble Geo 7X centimétrique avec une antenne externe Zephyr II sur canne de 2 m (Illustration 28), utilisé en mode différentiel. Un GPS Trimble R6, monté sur canne de 2 m, a été utilisé par la deuxième équipe.

À chaque occupation de station, 1 mesure de 120 s a été effectuée pour le Trimble Geo 7X, au pas d'acquisition de 1 s. Les données enregistrées ont été post-traitées à l'aide du logiciel PathFinder Office v5.65, à partir des données la base IGN RGP de Pézenas, située à une vingtaine de kilomètre de la zone d'étude. Pour le Trimble R6, une mesure de 15 s au pas d'une seconde a été effectuée à chaque station, avec les corrections en temps réel du système Orphéon.



*Illustration 28 - Premier plan : gravimètre CG5 en cours d'acquisition sur la base absolue de l'IGN Gigan I, second plan : GPS Trimble Geo7X (pas en cours d'acquisition) .*



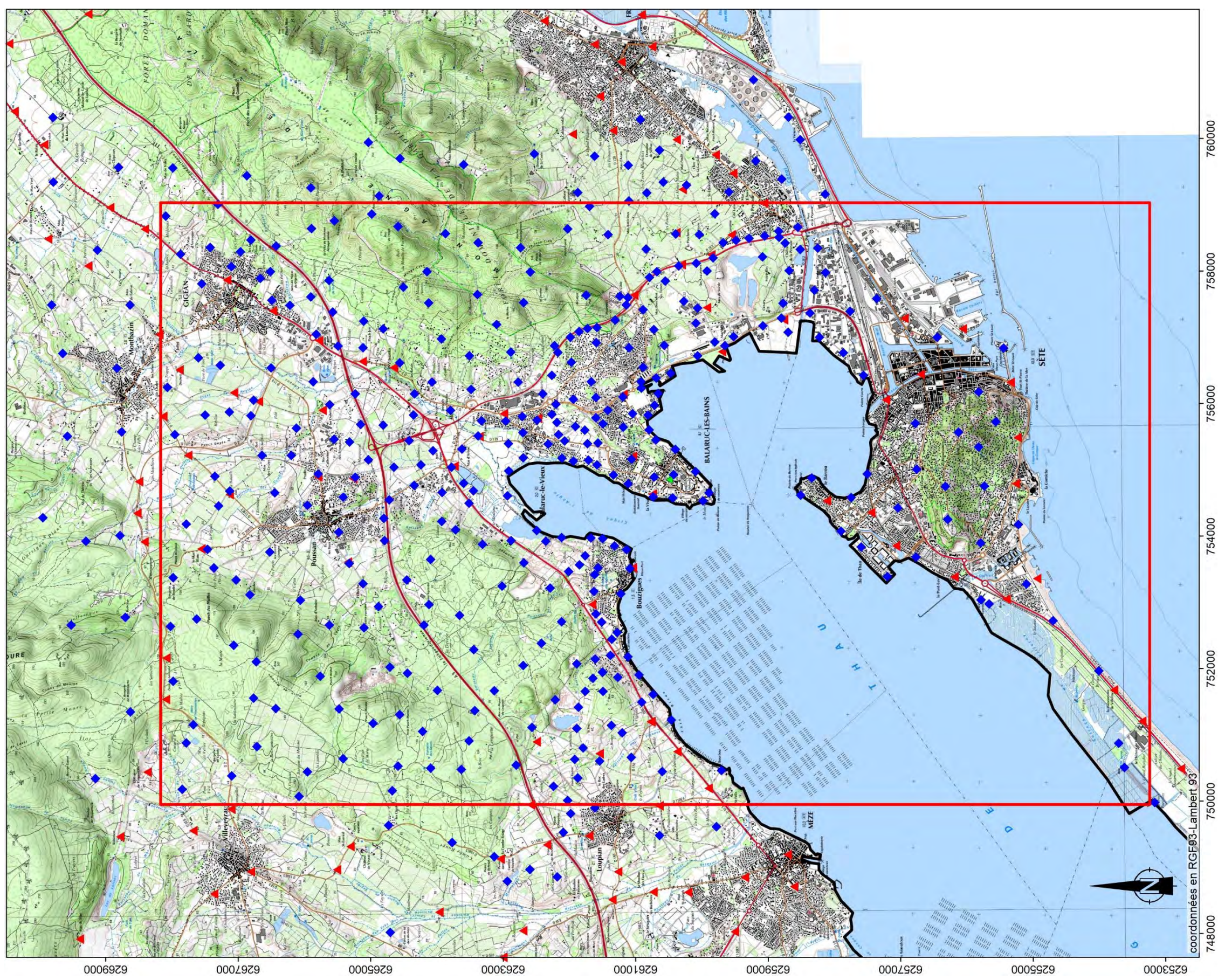
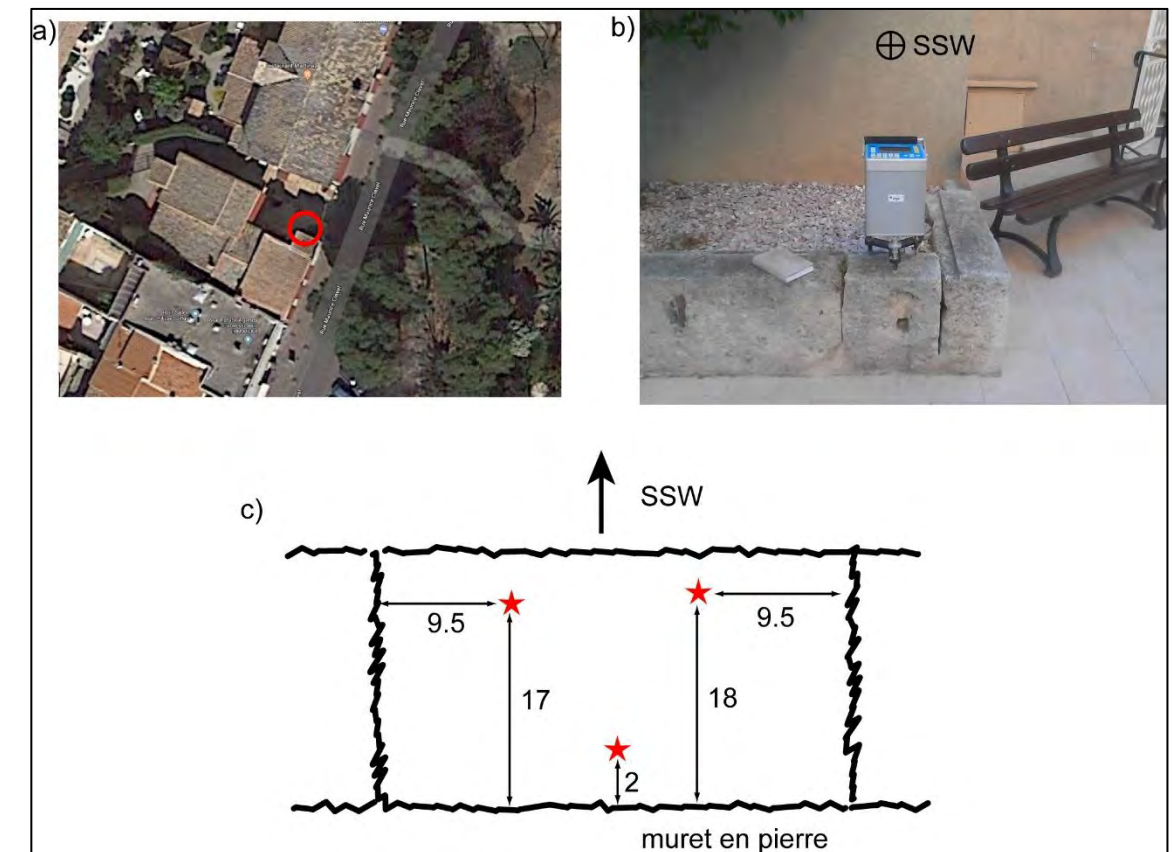


Illustration 29 - Carte d'implantation des stations gravimétriques acquises pendant cette étude (losanges bleus), et présentes dans la base de données gravimétrique (triangles rouges). La base gravimétrique est marquée par un triangle vert. Le rectangle rouge marque l'emprise présente du modèle géologique. Fond topographique IGN au 1/25 000.



### 3.2.2. Références gravimétriques et altimétriques

Une base gravimétrique principale a été implantée à l'hôtel Martinez à Balaruc-les-Bains (Illustration 30), et a été utilisée pour l'ouverture et la fermeture de tous les programmes de mesures. Celle-ci a été rattachée aux bases absolues de l'IGN.



La valeur de  $g$  à la base est établie à  $980492,161 \pm 0,020$  mGal. Cette valeur de  $g$  est donnée dans le référencement du réseau de référence gravimétrique France Métropolitaine 2014 de l'IGN. La base locale a été reliée à 2 bases absolues IGN (Gigean I (Illustration 28), La Boissière III) , par deux allers-et-retours gravimétriques.

Les positions GPS sont exprimées dans le système RGF93, projection Lambert 93 en X et Y, et selon système NGF-IGN 1969 pour l'altitude Z.

### 3.2.3. Réduction des données vers l'anomalie de Bouguer

L'ensemble du traitement des données a été réalisé par Thomas Jacob, avec des codes développés au BRGM.

## • Principe

La réduction des données gravimétriques vise à corriger tous les effets (variations temporelles, différences d'altitudes, effets topographiques, etc.) qui influent sur les données acquises brutes et qui ne présentent pas d'intérêt pour l'interprétation des données relatives à la structure du sous-sol. L'anomalie de Bouguer est une anomalie gravimétrique rendant compte de l'ensemble des variations de densité sous la surface topographique.

Les réductions de données suivantes sont à réaliser pour obtenir l'anomalie de Bouguer :

- correction de la marée terrestre gravimétrique (algorithmes de Longman, 1959) ;
- correction de la dérive temporelle du gravimètre, déterminée par la première et dernière occupation de la station de base au sein d'un programme de mesure ;
- projection de la valeur de  $g$  au niveau du sol à partir de la hauteur du capteur mesurée sur le terrain, via un gradient vertical usuel de  $0,3086 \text{ mGal m}^{-1}$  ;
  - les trois précédentes corrections permettent d'obtenir les valeurs relatives de  $g$  aux stations par rapport à la base, appelées valeurs compensées  $g_{comp}$  ;
- retrait du  $g$  théorique  $g_{th}$  (formule GRS80), fonction de la latitude, qui permet de passer d'une valeur de  $g$  à une anomalie ;
- correction d'air libre pour compenser les effets des variations d'altitude entre les stations ;
- corrections de relief (correction de plateau + corrections de terrain), pour compenser l'effet des reliefs à proximité des points de mesures.

L'anomalie de Bouguer  $A_B$  s'exprime ainsi :

$$A_B = g_{comp} - g_{th} + (dg/dz)h - 2\pi G\rho_b h + \rho_b CT \quad (\text{eq. 1})$$

où  $\rho_b$  est la densité de réduction de Bouguer,  $h$  l'altitude du point considéré (en mètres),  $dg/dz$  le gradient vertical dit à 'l'air libre',  $G$  la constante de gravitation universelle,  $CT$  la correction de terrain pour un terrain de densité 1.

### 3.2.4. Calcul des corrections de terrain

Les corrections de terrain (CT) ont été réalisées en prenant en compte la topographie et la bathymétrie entre 0 et 167 km de chaque station, en utilisant des modèles numériques de terrain (MNT) imbriqués, avec des routines basées sur le calcul par prismes selon le protocole suivant :

Sur Terre :

- entre 0 et 1 000 m autour des stations, le MNT Lidar IGN RGE Alti à la maille de 5 m est utilisé. Sur une distance de 100 m autour de chaque station, ce MNT a été ré-interpolé linéairement à la maille de 1 m pour atténuer les effets de « marche d'escalier » inhérents au calcul par la méthode de prismes ;
- entre 1 000 m et 12,5 km, le MNT IGN BD Alti à la maille de 25 m est utilisé pour calculer les CT ;
- au-delà de 12,5 km, le MNT IGN BD Alti à la maille de 250 m est utilisé pour calculer les CT. La topographie en Espagne a été prise en compte avec le MNT EU-DEM v1.1, sous-échantillonné à la maille 250 m (<https://land.copernicus.eu/pan-european/satellite-derived-products/eu-dem/eu-dem-v1.1>)

Pour les effets de la mer :

- à moins de 30 km des côtes, un modèle bathymétrique à la maille 25 m a été utilisé pour calculer les CT. Ce MNT provient du portail EMODnet ( <http://portal.emodnet-bathymetry.eu/> ). La densité de l'eau de mer a été prise égale à 1,03 ;
- la bathymétrie du bassin de Thau a été prise en compte, d'après les données relevées par l'Ifremer/Région-Languedoc Roussillon en 2009. Un MNT à la maille 25 m a été créé à partir données sonar ponctuelles ;
- entre 30 km et jusqu'à 167 km, les données de bathymétrie EMODnet ont été utilisées à la maille 250 m. La densité de l'eau de mer a été prise égale à 1,03.

Les corrections topographiques à chaque station sont illustrées à l'illustration 31, pour une densité de 2,65. Celles-ci varient de 0,245 à 4,157 mGal sur le secteur d'étude, les plus fortes valeurs étant situées dans les zones de forte rugosité topographique : fonds de vallée ou hauts de sommet.



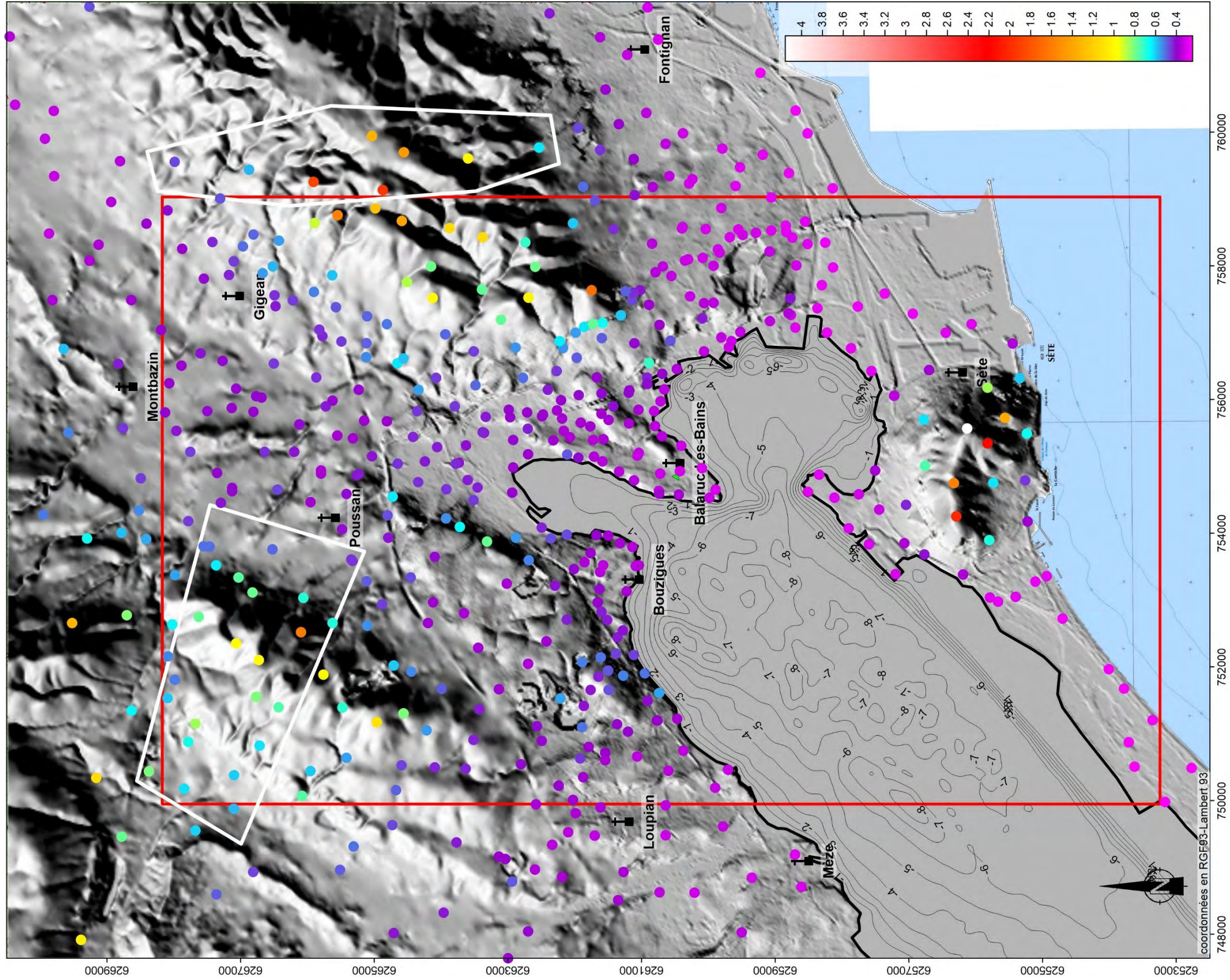


Illustration 31 - Corrections topographiques (mGal) pour une densité 2,65. Fond : MNT IGN BD Alti à la maille de 25 m, avec la bathymétrie de l'Étang de Thau. Les polygones blancs marquent les zones où la méthode de Nettleton a été mise en oeuvre.



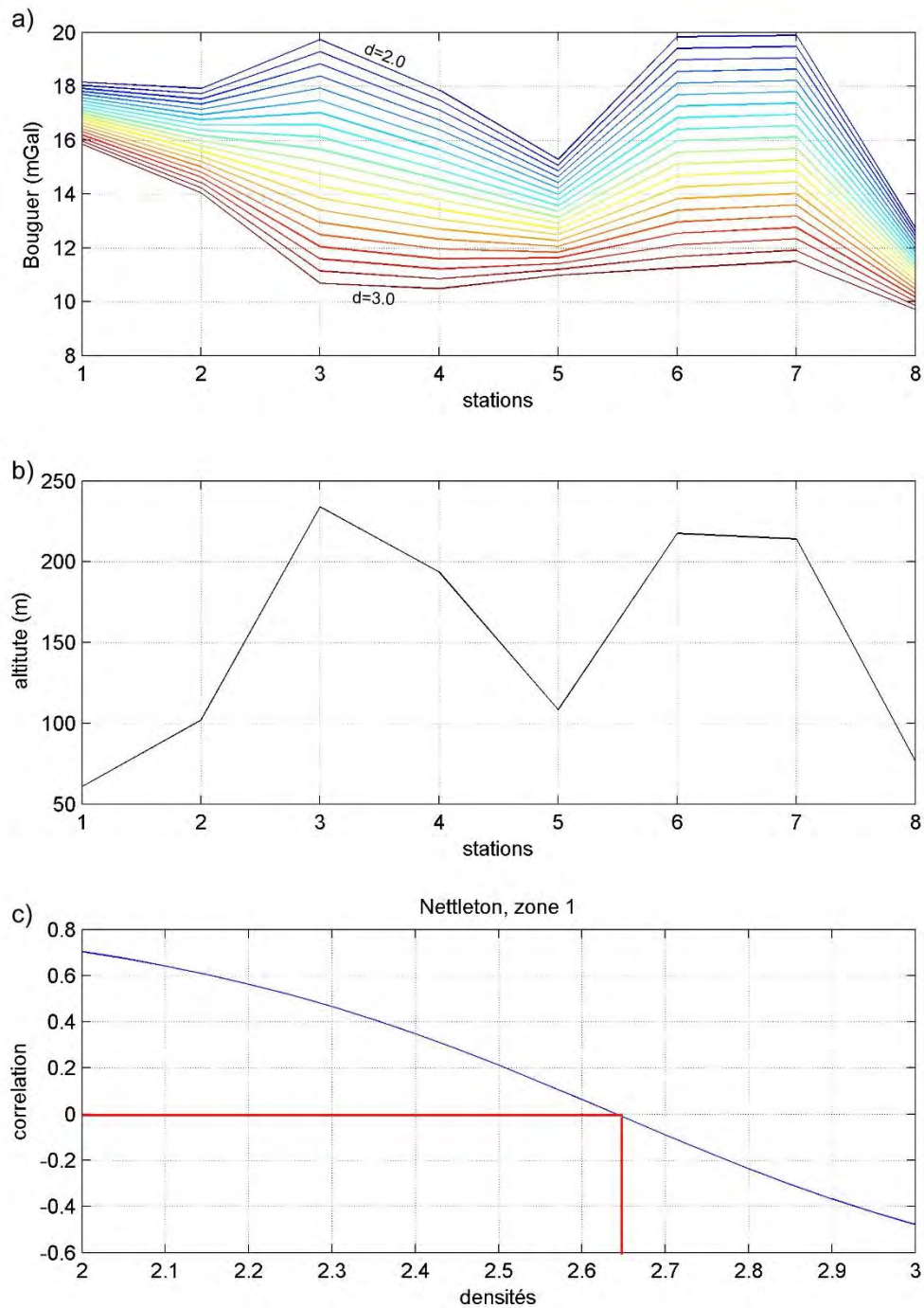
### 3.2.5. Choix de la densité de réduction

La densité  $\rho_B$  de réduction de l'anomalie de Bouguer est un paramètre important pour l'interprétation de cette anomalie, ainsi que de l'anomalie résiduelle. Celle-ci doit correspondre au mieux avec la densité des terrains superficiels. En effet, une mauvaise densité de correction génère des anomalies fictives, dues à des sur- ou des sous- corrections de l'effet de la topographie. Les deux méthodes classiquement utilisées pour déterminer la bonne densité de réduction sont les méthodes de Nettleton (1939) et Parasnis (1952), toutes deux basées sur la recherche de la densité qui permet de décorréler l'anomalie de Bouguer du relief.

Nous mettons en œuvre l'approche de Nettleton, selon deux polygones recoupant une forte topographie (polygones blancs, Illustration 31) dans le massif de la Gardiole et dans les reliefs à l'ouest de Poussan. Dans ces deux secteurs, l'anomalie de Bouguer est recalculée pour des densités entre 2 et 3, par pas de 0.05 (Illustration 32a), et la corrélation entre cette dernière est ensuite calculée avec l'altitude des stations en fonction de la densité (Illustration 32c). La densité retenue est celle dont la corrélation entre la Bouguer et la topographie est nulle. Celle-ci est de 2.65 sur les deux secteurs de test. Cette densité est retenue pour la suite pour le calcul de l'anomalie de Bouguer.

Les méthodes utilisées pour déterminer la densité sont basées sur l'hypothèse de travail que les anomalies gravimétriques doivent être décorrélées de la topographie. Cette hypothèse peut s'avérer fausse, par exemple dans le cas de remplissages légers en fond de vallée et de reliefs générés par des structures denses, ou inversement, de fonds de vallées lourds et de hauts topographiques légers.

De plus, la densité déterminée est une densité moyenne pour la zone d'étude. Selon les densités des formations affleurantes, cette densité moyenne peut s'avérer être localement sur- ou sous-estimée.



*Illustration 32 - Principe de la méthode de Nettleton ; a) anomalie de Bouguer pour les densités entre 2 et 3 au pas de 0,05, sur les 8 stations de la zone de la Gardiole, b) altitude des stations concernées, et c) coefficient de corrélation entre l'anomalie de Bouguer et la topographie en fonction de la densité utilisée. Les lignes rouges marquent la corrélation nulle associée à la densité 2.65.*



### 3.2.6. Précision de l'anomalie de Bouguer

L'erreur totale sur l'anomalie de Bouguer est évaluée classiquement comme la somme quadratique des erreurs élémentaires sur les variables entrant dans son calcul, soit :

$$\varepsilon_{AB} = \sqrt{\varepsilon_g^2 + \varepsilon_{gth}^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_{CT}^2} \quad (\text{eq. 2})$$

Le détail de ces erreurs est détaillé ci-après.

- **Erreur sur g ( $\varepsilon_g$ )**

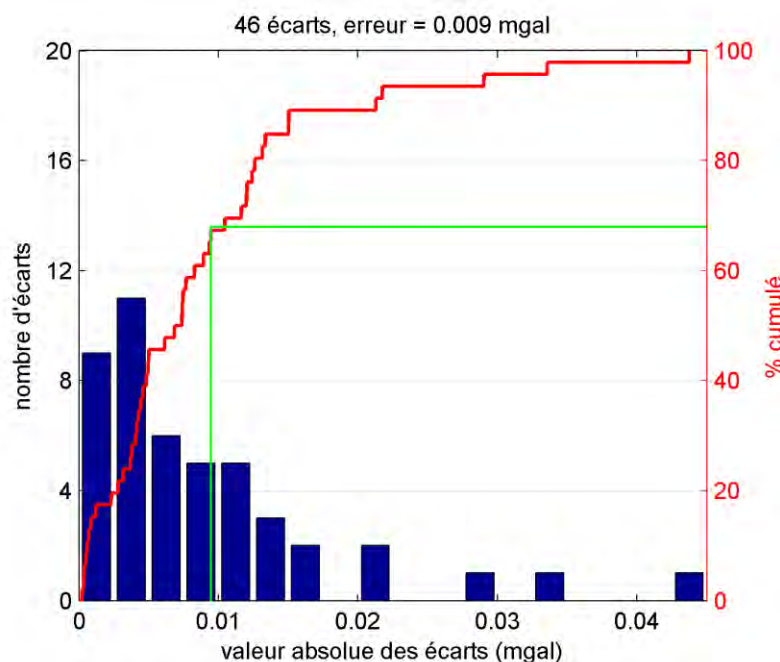
Cette erreur est estimée à partir de l'histogramme des écarts sur les stations occupées plusieurs fois au cours des programmes successifs, appelées reprises.

On appelle « reprise », la mesure de la gravité sur une station qui a déjà fait l'objet d'une mesure dans un programme de mesure antérieur. Une station peut être reprise plus d'une fois. Les écarts entre les valeurs de l'accélération de la pesanteur g compensées (corrigées de la dérive instrumentale et de la hauteur de trépied), issus de ces reprises, donnent la répétabilité de la mesure au sein d'une étude gravimétrique, et sont une bonne indication de la précision de l'étude.

Les reprises peuvent être aléatoires, pour obtenir la précision d'un levé, ou ciblées, pour vérifier une anomalie décelée. L'histogramme des valeurs absolues de ces écarts (Illustration 33) et le pourcentage cumulé associé (courbe rouge) sont généralement utilisés pour définir l'erreur moyenne de l'étude. L'erreur est définie à la valeur auquel le pourcentage cumulé atteint 68 %, ce qui correspond statistiquement à l'écart-type d'une distribution gaussienne.

Un total de 42 stations a été repris, correspondant à un pourcentage de stations reprises de 10,5 %. Sur ces 42 stations, 4 stations ont été reprises deux fois : il s'agit de celles dont le premier écart était supérieur à 0,02 mGal.

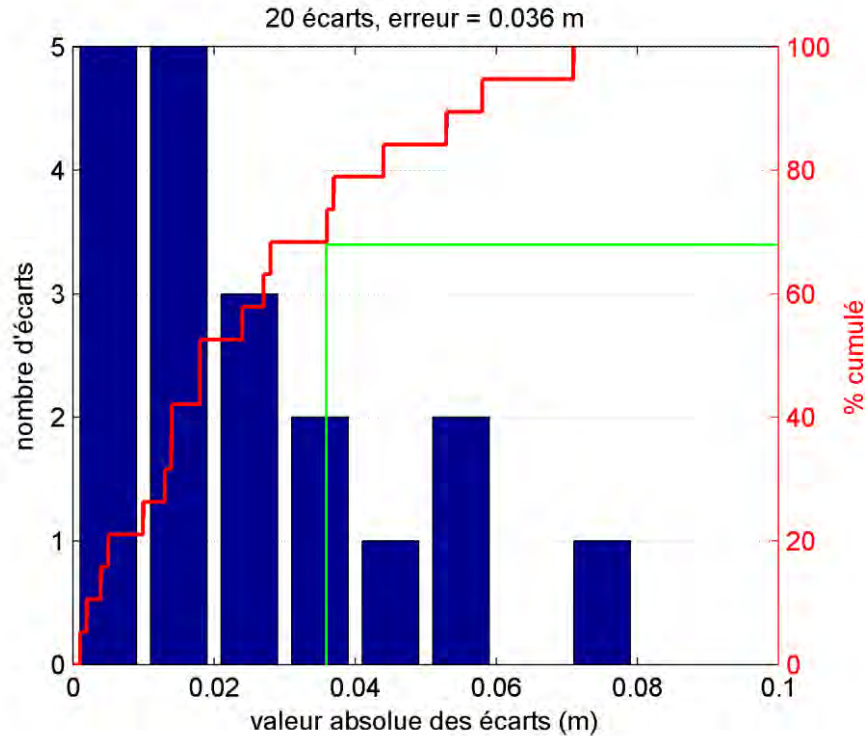
Nous retenons une erreur associée à la mesure de g de 0,009 mGal (Illustration 33).



*Illustration 33 - Histogramme des reprises gravimétriques en valeur absolue et pourcentage cumulé (courbe rouge). Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68 % et la valeur de l'erreur associée.*

- **Erreur sur l'altitude ( $\varepsilon_z$ )**

Les reprises gravimétriques ont été majoritairement associées à des reprises de mesure GPS. Les reprises GPS permettent d'appréhender la précision du positionnement sur la composante verticale. On considère que l'erreur moyenne sur Z est donnée par la valeur à 68 pourcents des écarts cumulés (Illustration 34). Celle-ci est ici de 0,036 m.



*Illustration 34 - Histogramme des reprises du positionnement vertical en valeur absolue et pourcentage cumulé. Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68 % et la valeur de l'erreur associée.*

L'erreur moyenne de 0,036 m correspond à une erreur sur l'anomalie de Bouguer équivalente à 0,007 mGal pour une densité de 2,65.

En outre, l'exactitude des mesures GPS a été évaluée en mesurant au GPS le repère de l'IGN Gigan I (Illustration 28), et en comparant la position trouvée avec la position donnée par l'IGN. La différence en X, Y et Z est inférieure à 2 cm.

- **Erreur sur  $g_{th}$  ( $\varepsilon_{gth}$ )**

L'erreur sur  $g_{th}$  est fonction de l'erreur sur le positionnement en latitude. L'historgramme des écarts de positionnement sur l'axe N-S permet d'estimer cette erreur, à partir des reprises GPS (Illustration 35).

L'erreur sur Y est estimée à 0,024 m en moyenne sur l'ensemble de l'étude, ce qui correspond à une erreur négligeable sur  $g_{th}$ , inférieure à 0,001 mGal.

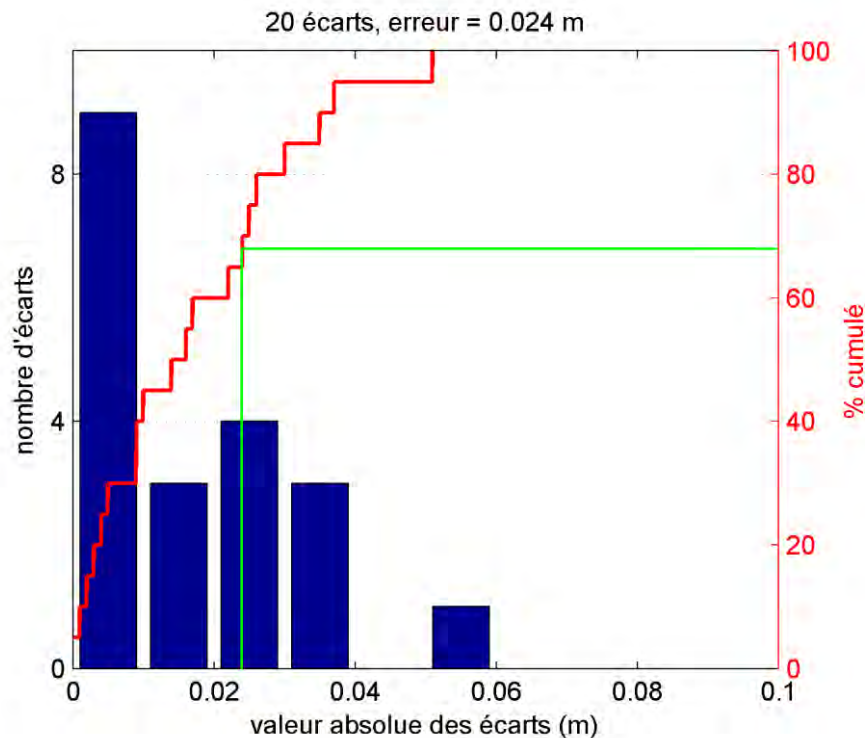


Illustration 35 - Histogramme des reprises du positionnement horizontal en valeur absolue et pourcentage cumulé. Les traits verts horizontaux et verticaux indiquent le pourcentage cumulé à 68 % et la valeur de l'erreur associée.

#### • Erreur sur les corrections topographiques ( $\varepsilon_{CT}$ )

L'erreur sur les CT provient :

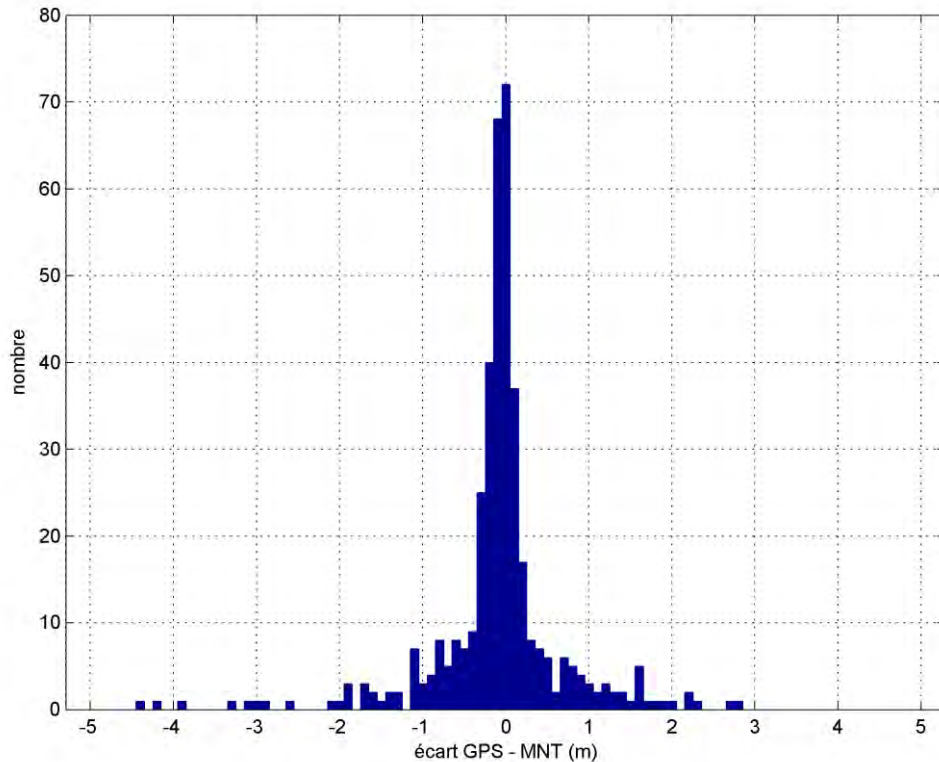
- de la résolution des MNT utilisés : les variations de reliefs sont d'autant mieux restitués que le MNT a une maille fine ;
- de la précision des MNT utilisés ;
- du positionnement en X, Y, Z des stations gravimétriques ;
- de la méthode de calcul de l'effet gravifique des reliefs.

Comme le champ de gravité décroît avec l'inverse de la distance au carré, il est important que le MNT utilisé en champ proche sur la zone 0 – 1 000 m soit le plus résolu et le plus précis possible. Au-delà, un MNT moins résolu est généralement utilisé, la perte de résolution et de précision ayant un moindre impact sur la valeur de la CT.

En s'inspirant des travaux de Cattin *et al.*, 2015, nous considérons une erreur sur les CT comme étant linéaire avec l'erreur des MNT utilisés  $\varepsilon_{MNT}$ , en prenant un facteur d'admittance  $a$  de 0,07 mGal/m, défini par Cattin *et al.*, 2015, selon la formule :

$$\varepsilon_{CT} = a\varepsilon_{MNT} \quad (\text{eq. 3})$$

La différence d'altitude entre les stations gravimétriques et leur altitude interpolée linéairement sur le MNT à 5 m est de  $-0,10 \text{ m} \pm 0,81 \text{ m}$  (Illustration 36). Nous considérons que l'écart-type de 0,81 m est caractéristique de l'erreur sur ce MNT, car l'erreur sur les positions GPS est d'un ordre de grandeur inférieure (voir paragraphe précédent). Le biais observé de  $-0,10 \text{ m}$  n'induit pas d'erreur sur les CT car pour le calcul des celles-ci, le Z pris est celui correspondant au Z du MNT.



*Illustration 36 - Histogramme des écarts entre les altitudes GPS des stations et celles projetées sur le MNT à 5 m.*

L'erreur sur le MNT à 25 m n'influe que peu sur l'erreur totale du fait de sa distance aux points de mesures : le MNT à 5 m est utilisé sur les 1 000 m autour des stations, et c'est donc ces erreurs qui auront la plus grande influence. En effet, en considérant une erreur systématique constante sur une topographie plane, plus de 99 % de son effet gravifique provient des premiers 1 000 m autour des stations. Ceci est la conséquence de la décroissance avec l'inverse de la distance au carré du champ gravifique.

Ainsi, nous considérons l'erreur sur les CT comme égale à 0,057 mgal, d'après l'équation 3.

#### • Erreur totale sur l'anomalie de Bouguer ( $\varepsilon_{AB}$ )

L'erreur sur l'anomalie de Bouguer est calculée selon l'équation (2), et est estimée à 0,058 mGal. Cette erreur est valable uniquement pour les stations acquises en 2017. Les stations des campagnes antérieures (voir paragraphe suivant) ont une erreur plus importante, du fait d'un positionnement moins précis en X, Y, et Z induisant des erreurs sur les CT importantes en zone accidentée, ainsi que de mesures de g moins précises.

#### • Seuil de signification

On définit le seuil de signification de l'étude comme étant deux fois l'erreur totale sur l'anomalie de Bouguer de l'étude, soit 0,116 mGal.

Un niveau de confiance supérieur à 95 % est à accorder aux anomalies dont l'amplitude est supérieure à 0,116 mGal.

### 3.2.7. Intégration des données historiques

Les stations préexistantes sur la zone sont issues de 2 campagnes d'acquisition présentes dans la banque de données gravimétriques française :

- une campagne de 1950 - référence du Code minier CM181 ;
- une campagne de 1965 - référence du Code minier CM2256.

Les données historiques ont été repositionnées en (x, y) selon les routes car elles étaient positionnées hors des routes dans la base de données. En effet, les mesures à cette époque ont été faites quasi-exclusivement selon le réseau routier, sur le réseau de nivellement de l'IGN. Ce repositionnement est incertain, et les stations dont l'écart en Z avec le MNT à 5 m est supérieur à 5 m ont été rejetées. Ceci témoigne d'un mauvais positionnement de la station, ce qui affecte très largement l'exactitude des CT, notamment en région de forte rugosité topographique.

De plus, 13 nouvelles stations ont été acquises à une distance inférieure à 50 m des stations historiques, et un écart moyen de -0,260 mGal avec un écart-type de 0,120 mGal est observé sur la valeur de la Bouguer entre les nouvelles et les anciennes stations. Cet écart a été utilisé pour corriger la valeur de la Bouguer des anciennes stations ; il s'agit d'un terme correctif constant.

La valeur de l'anomalie de Bouguer a été recalculée à partir des valeurs de g compensées à chaque station préexistante selon le traitement décrit en section 3.2.3.

## 3.3. RÉSULTATS

### 3.3.1. Anomalie de Bouguer, anomalie régionale, et anomalie résiduelle

L'anomalie de Bouguer est fonction de l'ensemble des variations de densité sous la surface topographique : ces variations peuvent être localisées superficiellement ou en profondeur. Les valeurs élevées de l'anomalie de Bouguer sont caractéristiques de matériaux denses, alors que les valeurs faibles caractérisent des matériaux moins denses.

La carte d'anomalie de Bouguer est présentée sur l'illustration 37. Elle a été créée par interpolation « bicubic » entre les valeurs aux stations, implémentée dans le code RegularizeData3D.m (Jamal, 2014), basé sur le code Gridfit.m (D'Errico, 2005). Le paramètre de « smoothness » utilisé est  $5 \cdot 10^{-5}$ . Les secteurs de la carte situés à plus de 1 000 m d'une station gravimétrique ont été masqués, afin d'éviter d'interpréter des artefacts d'interpolation liés à l'absence de stations.

La carte présente une dynamique de 24 mGal et est marquée par des valeurs élevées au sud et à l'est (teintes oranges à rouges clair), au niveau de la Gardiole et du trait de côte, qui décroissent selon un gradient de direction nord-ouest/sud-est, pour atteindre un minimum au nord-ouest de la carte (teintes bleues). Des anomalies « légères » sont dès lors observables au nord-est de Gigean, qui se présentent sous forme de cuvette dans l'anomalie de Bouguer. Cette cuvette est délimitée au sud-est par un gradient important : les isanomales y sont très resserrées, marquant une discontinuité gravimétrique majeure de direction nord-est/sud-ouest.

Le gradient observé à l'échelle de la carte est à mettre en relation avec la structure géologique profonde. Ce signal n'est pas l'objet de cette étude et doit être corrigé pour obtenir une anomalie résiduelle rendant compte de la répartition de densités dans les premiers km sous la surface. Pour cela, une anomalie régionale doit être judicieusement choisie.

L'anomalie régionale, présentée à l'illustration 38, est obtenue par l'ajustement d'une surface interpolée avec la méthode d'interpolation précédemment décrite, avec un paramètre de « smoothness » de  $5 \cdot 10^{-2}$ . Ce paramètre de lissage contrôle le contenu fréquentiel de la surface interpolée et son écart avec les données mesurées : plus il est faible, plus les petites longueurs d'ondes sont présentes dans la surface interpolée, et plus la surface interpolée est proche des points de mesure. À l'inverse, plus ce paramètre est grand, plus la surface interpolée ne contiendra principalement que les grandes longueurs d'ondes, et plus l'écart avec les points de mesure sera important. Le paramètre retenu de  $5 \cdot 10^{-2}$  est obtenu par essai-erreur, et l'anomalie régionale est retenue après examen visuel sur l'ensemble des données considérées, sur une emprise bien supérieure à celle présentée dans les illustrations suivantes (voir annexe 2). L'anomalie régionale retenue se rapproche d'un plan, n'ayant qu'une légère courbure, et rend ainsi compte des tendances observées à l'échelle de la carte, caractéristiques des très grandes longueurs d'ondes présentes dans l'anomalie de Bouguer.

En bordure de couverture gravimétrique, tel que sur le front de mer ou en bordure de l'Étang de Thau, l'anomalie régionale est possiblement mal estimée du fait de l'absence de contraintes liées aux lacunes de données en mer et dans l'Étang.

L'anomalie résiduelle est obtenue en soustrayant l'anomalie régionale à l'anomalie de Bouguer, et correspond ainsi aux contributions de plus faibles longueurs d'ondes. Celle-ci fait ressortir les variations de gravité en lien avec les variations de densité dans les premiers kilomètres, objet de cette étude. Elle est présentée en Illustration 39.

L'anomalie résiduelle a une dynamique de 9,5 mGal, variant de -5 mGal à 4,5 mGal. L'anomalie résiduelle met en exergue les anomalies observées sur l'anomalie de Bouguer, et permet d'en faire ressortir les plus fines.

La carte d'anomalie résiduelle est marquée par des anomalies positives majeures au niveau de Sète et du massif de la Gardiole. Les anomalies négatives dominantes sont situées au niveau de Mèze, au nord-est de Gigean-Montbazin.

Les anomalies sont définies et décrites dans le paragraphe suivant.



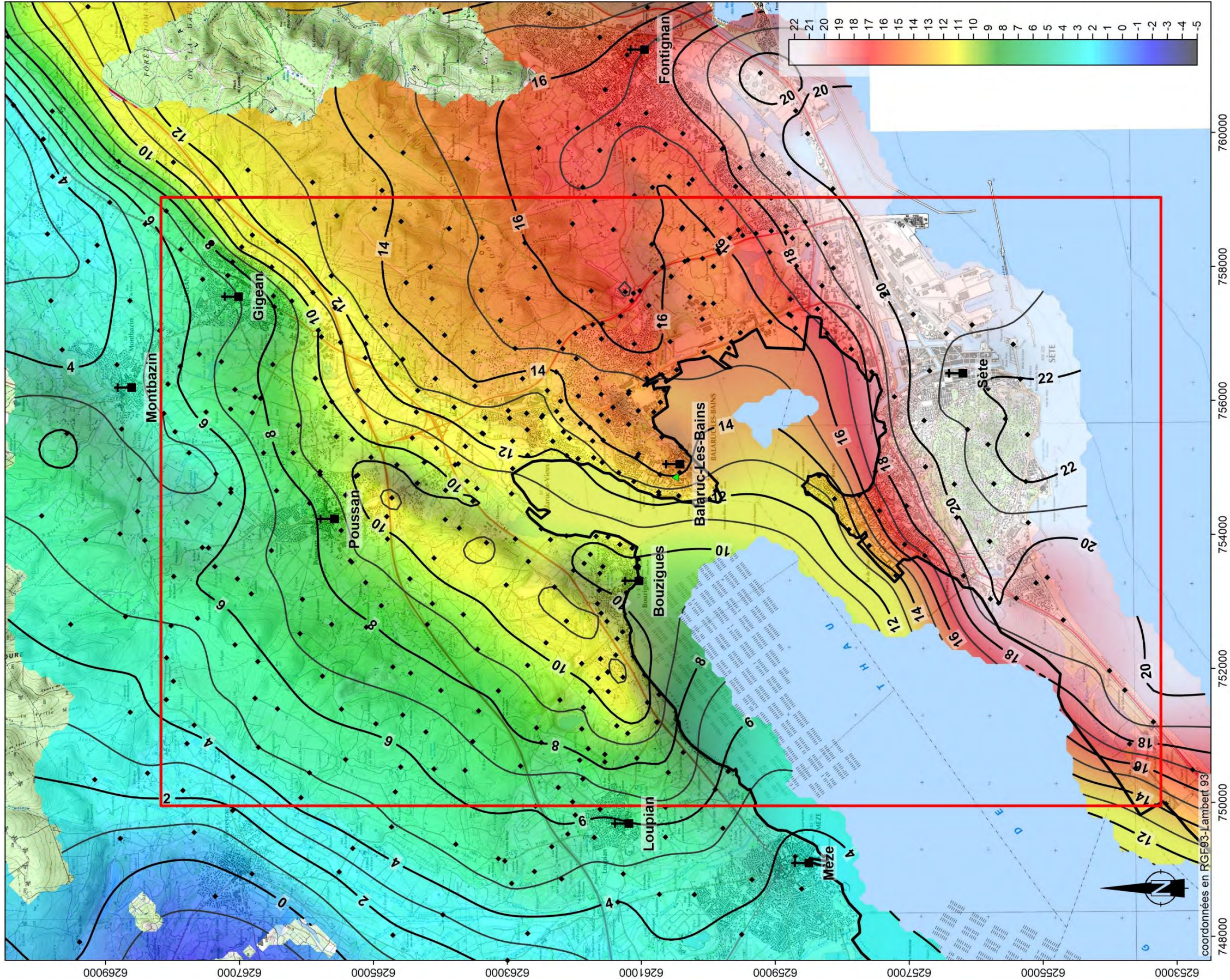


Illustration 37 - Anomalie de Bouguer pour une densité de 2,65 (mGal). Les courbes d'isovaleur sont tous les mGal.



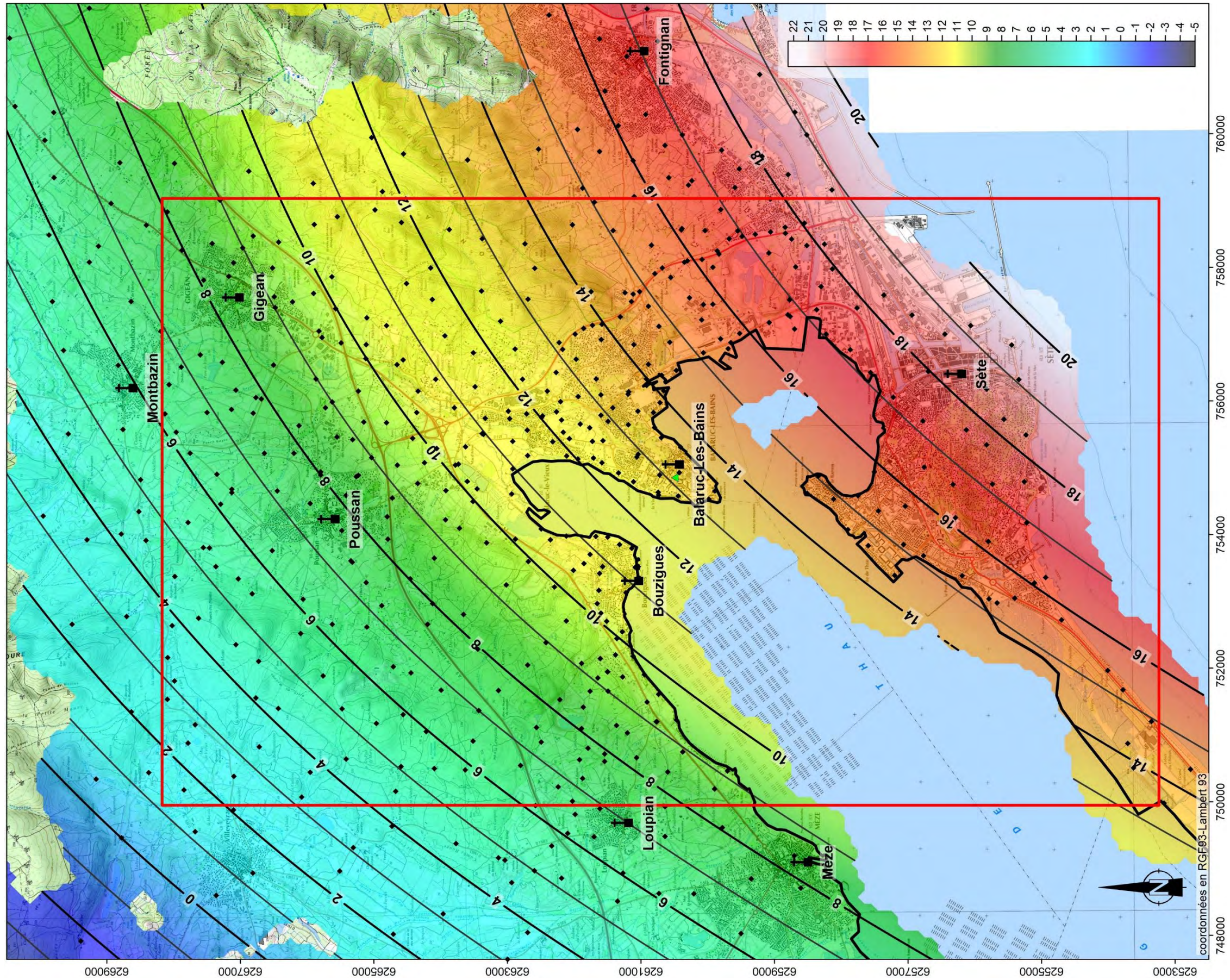


Illustration 38 - Anomalie régionale obtenue par séparation fréquentielle.



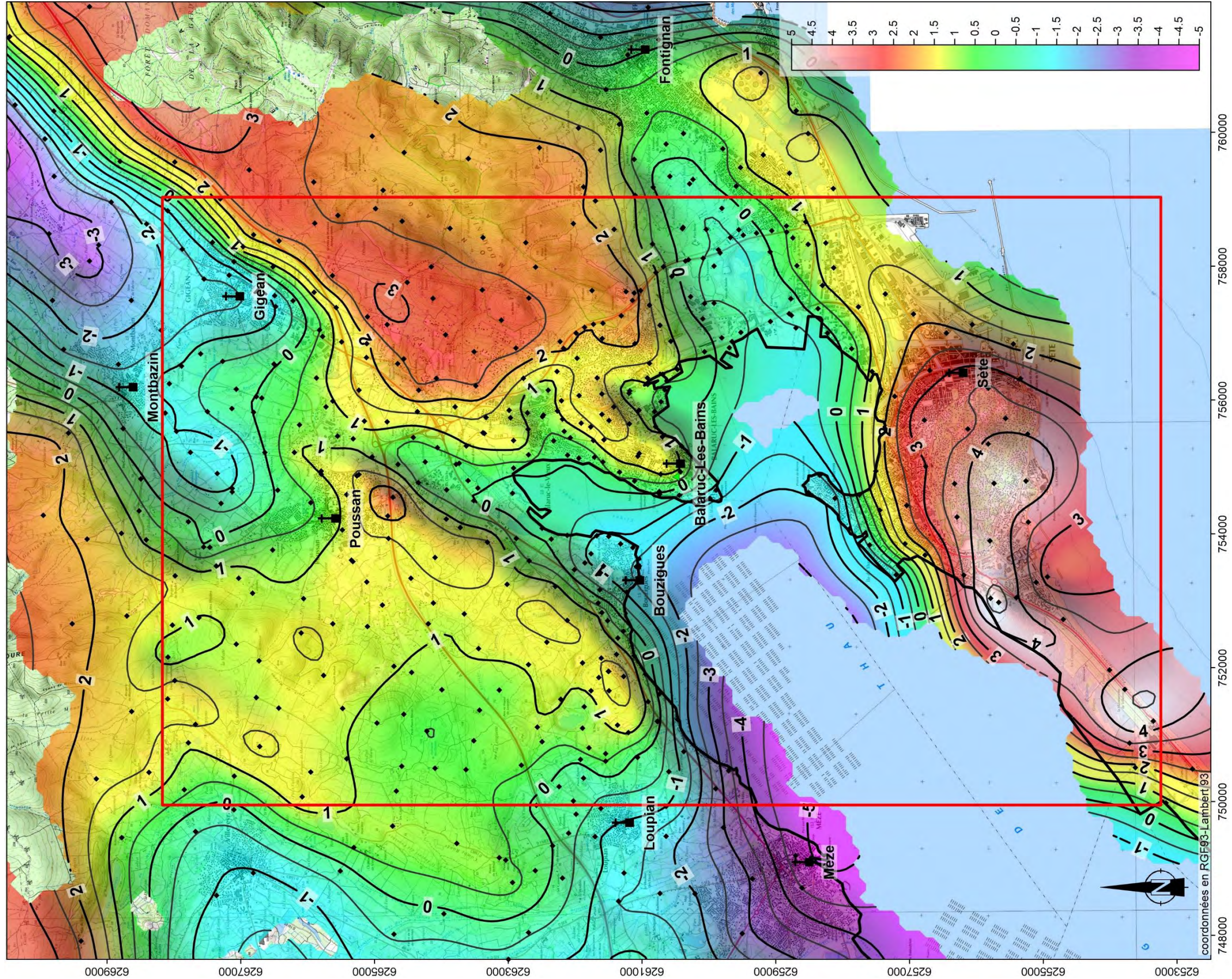


Illustration 39 - Anomalie résiduelle (mGal).



### 3.3.2. Analyse cartographique

Pour améliorer la détection des discontinuités gravimétriques permettant de cartographier les bordures d'éventuelles structures et pour procéder à une analyse cartographique structurale fine, il est possible d'appliquer des opérateurs dits « focalisant » à l'anomalie résiduelle. Nous appliquons deux opérateurs à l'anomalie de Bouguer (Illustration 40) :

- la dérivée seconde verticale, (Cooper et Cowan, 2006), son iso-contour nul est utilisé pour cartographier les discontinuités. L'anomalie résiduelle est préalablement prolongée vers le haut de 500 m pour atténuer le bruit haute-fréquence ;
- le module du gradient horizontal, qui s'apparente à la valeur de la pente si l'anomalie résiduelle était une carte topographique. Les zones de fortes valeurs du module du gradient horizontal permettent la localisation des discontinuités gravimétriques (Blakely et Simpsons, 1986).

Les discontinuités ainsi décelées peuvent correspondre à des failles mettant en contact latéral des formations de densité différente, ou à des contacts stratigraphiques (remplissage de vallées par exemple) ou intrusifs (plutonisme). Sans informations géologiques complémentaires, il n'est pas possible de discriminer leurs origines.

À partir de cette analyse, et en conjonction avec l'étude de l'anomalie résiduelle, nous définissons les principales discontinuités, axes positifs, dits lourds, et axes négatifs, dits légers (Illustration 41). Cette analyse ne nécessite aucun *a priori* sur la géologie.

Les axes positifs (notés P – en rouge) sont dans un premier temps décrits.

L'axe positif correspondant à l'anomalie positive la plus importante de la carte d'anomalie résiduelle, P7, a une direction N090, et est situé sur la presqu'île de Sète. L'amplitude de l'anomalie atteint 4,4 mGal. Cet axe est bordé par la discontinuité D22, qui est marquée par une forte valeur du module du gradient horizontal (Illustration 40), et peut être considérée comme une discontinuité de premier ordre à l'échelle de la carte. La lacune de données gravimétriques induite par l'Étang et la mer ne permet pas de bien circonscrire cette anomalie.

En continuité de l'anomalie contenant P7, l'axe P6 présente une direction N055° suivant le cordon littoral, et est sis au sein d'une anomalie de 1.2 à 2 mGal. Ce dernier est bordé au nord par la discontinuité D21.

Plus au nord, les axes P1, P3 et P4 sont localisés dans une large zone positive au droit du massif de la Gardiole, et ont des orientations de respectivement N045°, N030° et N060°. Ces axes sont bordés au sud par la discontinuité D20 de direction N020°, au nord par la discontinuité majeure D1, de direction N035°, et à l'ouest par la discontinuité D13 de direction N150°. La valeur de l'anomalie résiduelle atteint 3 mGal au droit de P1.

L'axe P5 est situé sur la presqu'île de Balaruc, et a une orientation N045° à N050°. Cet axe est bordé par les discontinuités D16, D17 et D18, et atteint une amplitude inférieure à 2 mGal.



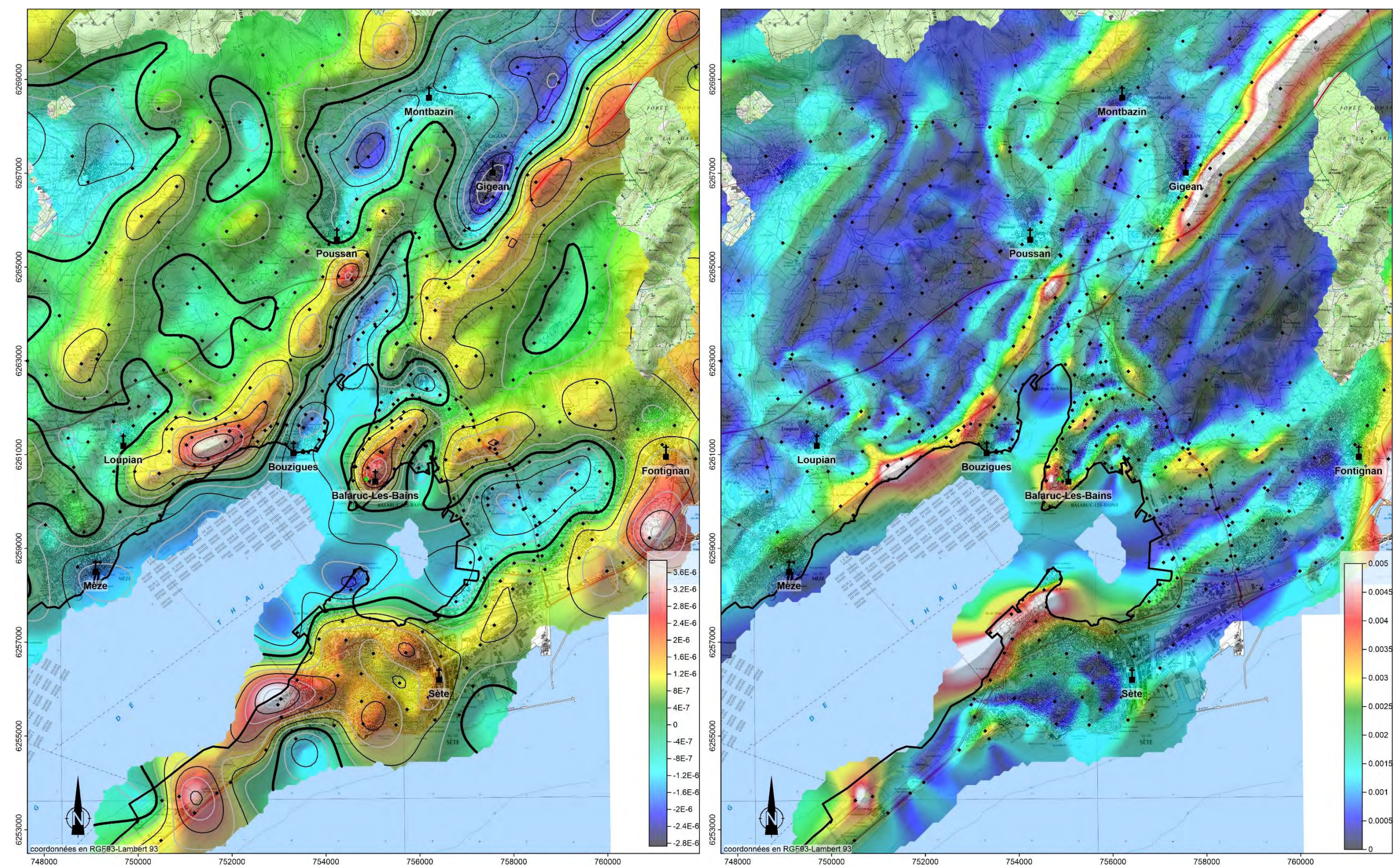


Illustration 40 - Gauche : dérivée seconde verticale de l'anomalie de Bouguer pour une densité de réduction de 2,65 ( $mGal.m^{-2}$ ). Droite : module du gradient horizontal ( $mGal.m^{-1}$ ).



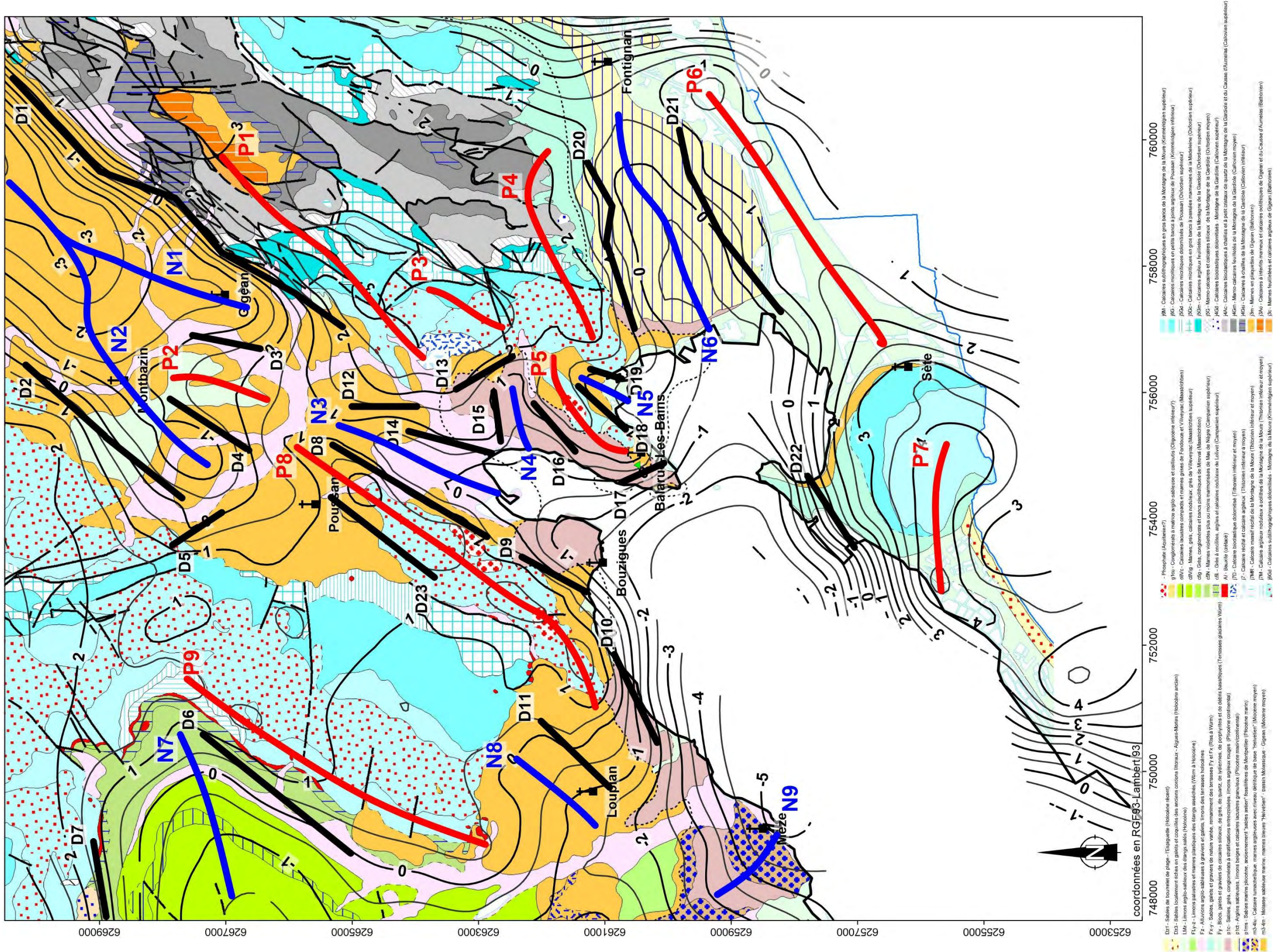


Illustration 41 - Carte géologique avec superposition des axes et discontinuités gravimétriques, et des contours de l'anomalie résiduelle (mGal). Les axes positifs sont numérotés (traits rouges) de P1 à P7, les axes négatifs (traits bleus) de N1 à N16, les discontinuités de D1 à D21.



Plus à l'ouest, les axes P2 et P8 ont une direction de respectivement N015° à N035°, et sont bordées par les discontinuités D3, D4, D23 et D8 à D11. Ces discontinuités ont une orientation proche de celle des axes précités. L'anomalie au droit de P8 atteint 2,3 mGal. P2 n'est pas sur une anomalie positive *stricto sensu*, mais sur un rebond positif borné par les axes négatifs N1 et N2. L'axe P9 a une direction N025°, et se trouve au sein d'une anomalie atteignant 1,5 mGal, et est bordé par l'axe D6 au nord-ouest. On note la présence d'une vaste zone positive entre P8 et P9.

Les axes négatifs sont maintenant décrits. La vaste anomalie négative dans le bassin de Gigean-Montbazin, délimitée par les axes D1 et D2, contient les axes négatifs N1 et N2 qui se rejoignent vers le nord-est selon une direction N045°. Ces axes ont une orientation générale N025° à N050°. L'amplitude des anomalies négatives au droit de ces axes est importante, atteignant -3,5 mGal.

Sur le pourtour de l'Étang de Thau, nous notons la présence d'anomalies négatives dont l'orientation est radiale à l'Étang : il s'agit des anomalies caractérisées par les axes N9, N3, N4, N5 et N6, dont les orientations sont respectivement N140°, N025°, N080°, N025° et N065°. L'amplitude de l'anomalie est la plus importante au droit de N9, atteignant -5 mGal, alors que les autres anomalies précitées sont légèrement négatives ou même positives, mais se présentent sous forme de « vallées » bien identifiées, bornées par des discontinuités gravimétriques bien marquées.

L'axe négatif N8 a une orientation N045° et est bordé par la discontinuité D11 de même orientation au sud-ouest, alors que l'axe N7 a une orientation N075°, et est situé au sein d'une vaste « vallée » encadrée par les discontinuités D6 et D7.

Les discontinuités de premier ordre, marquées par des valeurs élevées du module du gradient horizontal (Illustration 40), sont D1, D22, D8, D9 et D10. Les directions dominantes sont N030° à N035° pour D1, D8 et D9, et N050° à N060° pour D22 et D10.

Nous confrontons maintenant l'analyse cartographique gravimétrique avec la carte géologique (Illustration 41). Les observations suivantes peuvent être faites :

- les formations jurassiques sont *quasi* exclusivement associées à des anomalies positives, comme l'atteste la présence des axes positifs P1, P3, P4, P7, P8 et P9 au droit de ces formations. Il s'agit de calcaires compacts lithographiques et dolomitisés qui seraient plus denses que les autres formations. Des mesures de densité sur ces formations, effectuées dans la thèse de E. Husson, les donnent entre 2,69 et 2,73 ;
- les formations miocènes et pliocènes sont *quasi* exclusivement associées à des anomalies négatives ou à des axes négatifs au sein d'anomalies positives : c'est le cas de l'ensemble des axes négatifs identifiés, à l'exception de l'axe N7, au droit de formations crétacées. Ces formations seraient moins denses que les calcaires jurassiques, et les anomalies négatives marquent donc des épaisseurs localement importantes de ces formations. Les formations miocènes et pliocènes sont en effet des molasses sableuses, ainsi que des argiles et des sables, qui sont des formations détritiques peu consolidées et donc peu denses. Ceci est attesté par des mesures de densités sur carotte des formations miocènes, mesurées à 2,25 par E. Husson dans sa thèse. Les formations pliocènes devraient avoir une densité du même ordre de grandeur, car elles sont lithologiquement similaires. Les formations crétacées comportent des grès, des marnes et des calcaires lacustres, qui sont plausiblement moins denses que les calcaires jurassiques. La densité du Rognacien (Maastrichtien) a été mesurée à 2,55 (thèse de E. Husson) et est donc moins importante que celle des calcaires jurassiques.

### 3.4. ÉBAUCHE D'INTERPRÉTATION

L'interprétation suivante peut être faite à partir des anomalies et des discontinuités gravimétriques décelées, à la lumière des connaissances géologiques du secteur :

- les anomalies négatives N1 et N2 marquent le remplissage du bassin Miocène de Gigan - Montbazin, et les discontinuités D1 et D2 marqueraient ses failles bordières. En bordure sud-ouest, ce bassin présente un haut-fond marqué par l'axe P2, borné par les discontinuités D3 et D4 qui pourraient être des failles délimitant une structure de type horst. De plus, la faille bordière D1 ne semble pas continuer vers le bassin de Thau, mais est bornée au sud ;
- l'axe N3 pourrait marquer le remplissage d'un bassin Miocène délimité par les failles bordières D8, D9, D14, D12. L'axe N5 pourrait marquer une même structure, délimité par D18 et D19. L'axe N8 pourrait également correspondre à ce cas de figure. Nous n'invoquons pas de remplissage pliocène pour ces structures car ces formations n'y sont pas cartographiées au droit de ces axes négatifs ;
- les axes N4, N6 et N9 sont à mettre en relation avec des remplissages miocènes et pliocènes. L'amplitude importante de l'anomalie résiduelle au droit de N9 peut s'expliquer soit par une importante épaisseur de sédiment détritique, soit par une origine plus profonde telle qu'une épaisseur importante de formations crétacées, ou par les deux raisons précédentes, ensembles. L'axe N6 délimite un bassin plausiblement délimité par des failles bordières D20 et D21, de directions N050° à N070°, jusqu'ici inconnues car recouverte par les formations Pliocènes continentales. Ces directions se retrouvent dans les discontinuités D10 et D22 ;
- l'axe N7 marque l'axe du synclinal de Villeveyrac, et les discontinuités D6 et D7 les contacts stratigraphiques entre le Jurassique plus dense et le Crétacé moins dense ;
- la faille régionale Antonègre-Cancers s'exprime par la discontinuité D5, mais il est peu aisé de déterminer avec précision son tracé plus au sud du fait de la complexité des structures : cette faille pourrait passer par la transition entre la terminaison sud du bassin Miocène de Gigan au système marqué par les axes P8 et N3.

Pour la suite, un travail interprétatif basé sur le retraitement et l'interprétation des lignes sismiques existantes et l'analyse des forages profonds sur site, doit être mené afin de confirmer ou d'infirmer les hypothèses présentées dans ce rapport, et proposer un schéma structural affiné.

Parallèlement, une étude bibliographique concernant la densité des terrains doit être effectuée, et, si celle-ci est infructueuse, nous préconisons des mesures de densité sur échantillons afin de caler les densités des formations dans le modèle 3D.

Finalement, un modèle géologique 3D va être construit, avec comme contrainte les données géologiques de terrain, les données géologiques en forages, les horizons sismiques et les observations structurales gravimétriques. Pour valider le modèle, l'effet gravifique du modèle sera calculé à partir des densités allouées à chaque formation, et cet effet sera confronté à l'anomalie mesurée. La géométrie du modèle sera itérativement modifiée pour que son effet gravifique corresponde avec l'anomalie mesurée.





## 4. Acquisition sismique

Cette partie du rapport décrit l'acquisition et le traitement des données sismiques acquises dans le cadre du projet DEM'EAUX Thau.

### 4.1. PRÉAMBULE

L'acquisition de données sismiques, tout comme la mise en œuvre des méthodes gravimétriques et électromagnétiques a été choisie lors du montage du projet pour apporter une information supplémentaire et complémentaire sur les propriétés physiques des terrains.

L'électromagnétisme et la gravimétrie, décrits dans les chapitres précédents, apportent respectivement des informations sur la distribution de la résistivité électrique et la densité des terrains. La sismique renseigne sur la vitesse de propagation des ondes sismiques dans le sous-sol. Elle permet, dans la majorité des cas, d'obtenir une image précise de la structure du sous-sol grâce aux réflexions des ondes sismiques aux interfaces géologiques (s'il y a contraste d'impédance acoustique).

Le principe est de prime abord simple. Une onde est générée par une source (qui peut être de nature variable : masse, explosif, camion-vibreux dans cette étude), puis se propage dans le sous-sol. À la rencontre d'une interface géologique, une partie de l'énergie est réfléchie et une autre réfractée. La partie réfléchie remonte vers la surface et vient faire vibrer des géophones (petit capteur planté dans le sol et extrêmement sensible aux vibrations) qui enregistrent le passage de cette onde.

L'analyse des temps d'arrivée sur chaque géophone et pour une série de « tirs » permet de recomposer la structure du sous-sol qui sera ensuite interprétée en termes géologiques. Les interfaces ainsi identifiées, et corrélées avec des informations de forage par exemple peuvent ensuite permettre de contraindre l'interprétation des données électromagnétiques ou gravimétriques, en fixant des épaisseurs à certains horizons par exemple.

Cette méthode incontournable fournit ainsi l'information essentielle de la structure du sous-sol. Comme toutes les autres méthodes géophysiques elle a toutefois ses limitations, liées aux bruits anthropiques, aux vitesses des terrains de proche surface, etc.

### 4.2. INTRODUCTION

Cette campagne d'acquisition sismique menée par CGG Services SAS (réf. rapport CGG ; 2018) a pour objet d'imager le sous-sol afin de mieux comprendre les structures géologiques et en particulier le potentiel et le fonctionnement du réservoir karstique, siège des ressources en eaux souterraines du bassin de Thau. La zone à investiguer est située dans le secteur de Balaruc-les-Bains, au nord de Sète (34). Deux profils de sismique réflexion Haute Résolution (traits en rouge sur l'illustration 42) ont été enregistrés entre le 12 et 29 novembre 2017.



Illustration 42 : Carte de localisation de l'étude sismique.

### 4.3. GÉNÉRALITES

#### 4.3.1. Description de l'étude

D'un point de vue géographique et environnemental, le secteur investigué est complexe. En effet, il comprend :

- un milieu urbain dense ;
- des zones péri-urbaines ;
- un secteur rural avec présence de vignes ;
- une zone aquatique, à travers l'Étang de Thau.

À cet endroit, la géologie est constituée, du haut vers le bas, par des séries du Tertiaire incluant notamment des marnes, surmontant les séries du Jurassique à dominance calcaire.

D'un point de vue de géologie structurale, la structure est complexe avec la présence de nombreux accidents. L'objectif de cette étude est de mieux appréhender la structure géologique du site en vue de la réalisation d'un modèle géologique. La sismique réflexion, mise en œuvre lors de la présente étude, étudie la propagation des rayons sismiques réfléchis ce qui permet d'obtenir une coupe sismique, c'est-à-dire une échographie, quasi-continue du sous-sol mettant en exergue la succession des terrains, leurs discontinuités et leur structure. Pour que la méthode soit opérationnelle, il est nécessaire que des réflecteurs sismiques, c'est à dire des couches de vitesse et/ou de densité contrastée, existent et, de préférence, que le pendage des horizons étudiés soit inférieur à 45°. La profondeur d'investigation requise est de 1 000-1 500 m.

#### 4.3.2. Chronologie et paramètres d'acquisition

La chronologie d'acquisition terrain des deux profils sismique HR est montrée sur l'illustration 43.

SETÉ 2017		DE	A	Durée (jours)
Attribution		18-Sep-17	18-Sep-17	1
PHASE A - Mobilisation de l'équipement		12-Nov-17	15-Nov-17	4
PHASE B - Mobilisation du personnel		12-Nov-17	15-Nov-17	4
PHASE C - Acquisition		15-Nov-17	29-Nov-17	15
Topographie		15-Nov-17	18-Nov-17	4
Enregistrement avec mise en pace et repli du dispositif		17-Nov-17	25-Nov-17	9
PHASE D - Démobilisation		26-Nov-17	29-Nov-17	4

Illustration 43- Calendrier de réalisation des mesures sismiques

L'illustration 44 montre les paramètres d'acquisition pour cette étude. L'enregistrement a été réalisé à l'aide de l'équipement Sercel UNITE sans câble ce qui est bien adapté pour travailler dans des zones urbanisées.

Type d'étude	2D
Type de géométrie	In-line
Nombre de lignes	2
Volume total (km)	10.610
Nombre de point de tir réalisés/prévus	Ligne 1 : 507 / 528 Ligne 2 : 486 / 456
Nombre de géophones implantés/prévus	Ligne 1 255 / 289 Ligne 2 244 / 244
Nombre de canaux actifs	244
Couverture nominale	122
Intervalles géophones & Points de tir	20 m & 10 m
Type de géophone	Sercel SG5
Nombre de géophone par trace	1
Type de Vibreur	Minivib II (IVI)
Nombre de vibreurs par point de tir	2
Nombre de flotte de vibreurs	1
Console électronique vibreur	VE464
Système d'enregistrement	SERCEL UNITE WIRELESS RAU Ex

Illustration 44 - Paramètres d'acquisition de l'étude sismique (ref rapport CGG).



#### 4.4. RESSOURCES HUMAINES

L'équipe CGG était constituée de 11 personnes auxquelles se sont joints un conseiller Hygiène, Sécurité, Environnement (HSE) et un technicien topographe en début de mission. Le personnel de CGG, employé de manière stable et permanente, est hautement qualifié dans tous les domaines d'intervention : direction d'équipe, topographie, acquisition, mécanique, laboratoire d'enregistrement.

Pour le permittage, un *permitman*, Dominique Bayle, d'Athemis France et deux gardiens d'AS Sécurité-34 étaient aussi sur la mission.

#### 4.5. VÉHICULES

Cinq véhicules ont été utilisés sur site :

- 2 Hilux PickUp ;
- 3 Véhicules légers.

Pendant la production :

- équipe Vibreur : 1 Hilux ;
- topographie/mise en place du dispositif : 1 Hilux ;
- laboratoire support : 1 véhicule léger ;
- chef de mission/Adjoint Chef de mission / Contrôle Qualité : 2 fourgonnettes.

#### 4.6. IMPLANTATION

##### 4.6.1. Autorisation

Les déclarations d'Intention de Commencement de Travaux (DICT) ont été réalisées par l'entreprise Athemis France pour l'acquisition des lignes 1 et 2. Suite à ces démarches, les tracés initiaux des deux lignes ont dû être modifiés à plusieurs reprises à cause de propriétaires récalcitrants et pour des raisons de sécurité notamment, entre autres, à cause de la circulation trop dense sur la RD600 et/ou afin d'éviter de vibrer à proximité de canalisations (D2). Pour accéder à certaines parties du linéaire (accès dans les jardins, carrières, etc.), la présence du *permitman* était nécessaire au moment de la réalisation des enregistrements. À noter que le *permitman* a pris soin de photographier l'ensemble des bâtiments le long des profils avant le passage des vibreurs, en cas de contestation. Des mesures vibrations ont été réalisées pendant l'acquisition. La ligne 1 devait traverser l'Étang de Thau au niveau de la crique de l'Angle. Malheureusement, la présence d'un phytoplancton toxique pour les huîtres et les moules a conduit le BRGM à renoncer à cette acquisition qui aurait pu conduire au brassage des fonds vaseux de l'Étang lors de la mise en place du dispositif d'enregistrement ou des tirs avec un air-gun. Le linéaire prévu dans l'Étang de Thau a donc été reporté à terre, en extrémité ouest de la ligne 1.

##### 4.6.2. Topographie

##### **Vérification du réseau**

La première opération consiste à vérifier si les positions issues du récepteur Trimble sont homogènes et cohérentes avec les coordonnées des points du réseau de l'IGN. Cette vérification a été effectuée à partir du point Gigean I (Illustration 45), point du premier ordre qui se trouve environ à 4 km de Balaruc-Les-Bains. La borne en granit correspond au point a,

les repères b et c ont aussi été utilisés (Illustration 46). Les mesures ont été faites en mode RTK en utilisant les corrections du réseau Orphéon avec le récepteur Trimble R7GNSS S/N 5035K46965.



Illustration 45 - Localisation du point IGN Gigan I sur fond topographique IGN.




Les données ont été transférées dans GPSeismic puis converties en Lambert RGF93.

Les résultats sur les 3 points a, b et c sont les suivants :

	Levé RTK			Point IGN						
Station_Text	Easting	Northing	Height	Easting	Northing	Height	Dx	Dy	Dz	Receiver_SN
gigeanA	759134.247	6264873.113	234.100	759134.254	6264873.121	234.090	0.007	0.008	-0.010	5035K46965
gigean A1	759134.249	6264873.105	234.100	759134.254	6264873.121	234.090	0.005	0.016	-0.010	5035K46965
gigean A3	759134.242	6264873.112	234.094	759134.254	6264873.121	234.090	0.012	0.009	-0.004	5035K46965
gigean A5	759134.250	6264873.110	234.098	759134.254	6264873.121	234.090	0.004	0.011	-0.008	5035K46965
gigean A7	759134.261	6264873.110	234.093	759134.254	6264873.121	234.090	-0.007	0.011	-0.003	5035K46965
						Average	0.004	0.011	-0.007	
gigean B1	759151.319	6264874.823	232.474	759151.314	6264874.840	232.480	-0.005	0.017	0.006	5035K46965
gigean B3	759151.331	6264874.816	232.473	759151.314	6264874.840	232.480	-0.017	0.024	0.007	5035K46965
gigean B5	759151.322	6264874.816	232.477	759151.314	6264874.840	232.480	-0.008	0.024	0.003	5035K46965
gigean B7	759151.317	6264874.828	232.471	759151.314	6264874.840	232.480	-0.003	0.012	0.009	5035K46965
						Average	-0.008	0.019	0.006	
gigean C1	759138.238	6264862.019	232.960	759138.231	6264862.052	232.970	-0.007	0.033	0.010	5035K46965
gigean C3	759138.239	6264862.016	232.959	759138.231	6264862.052	232.970	-0.008	0.036	0.011	5035K46965
gigean C5	759138.236	6264862.017	232.957	759138.231	6264862.052	232.970	-0.005	0.035	0.013	5035K46965
gigean C7	759138.235	6264862.020	232.953	759138.231	6264862.052	232.970	-0.004	0.032	0.017	5035K46965
						Average	-0.006	0.034	0.012	



Les écarts sont minimes. Les positions issues du récepteur Trimble sont homogènes et cohérentes avec les coordonnées des points du réseau de l'IGN. La topographie peut donc être réalisée avec les récepteurs Trimble en mode RTK en utilisant les corrections du réseau Orphéon.

<b>GIGEAN I</b>	
<p><b>Point : a</b></p> <p>Borne en granit gravée IGN et 1942 : Repère hémisphérique 1994 en laiton de 12 mm de diamètre Point vu en place en 2013</p> <p>Exploitable directement par GPS</p> <p>Azimut de la prise de vue : 95 gr</p>	
<p><b>Point : b</b></p> <p>Rocher : Repère 1980 en bronze GM Point vu en place en 2013</p> <p>Exploitable directement par GPS</p> <p>Azimut de la prise de vue : 140 gr</p>	
<p><b>Point : c</b></p> <p>Rocher : Repère 1980 en fonte triangulaire Point vu en place en 2013</p> <p>Exploitable directement par GPS</p> <p>Azimut de la prise de vue : 390 gr</p>	

**Système : RGF93 (ETRS89) - Ellipsoïde : IAG GRS 1980**

Point	Longitude (dms)	Latitude (dms)	Hauteur (m)	Précision
a	3° 43' 50.26111" E	43° 28' 49.75303" N	283.728	< 1 cm
b	3° 43' 51.02058" E	43° 28' 49.80358" N	282.114	< 5 cm
c	3° 43' 50.43346" E	43° 28' 49.39334" N	282.603	< 5 cm

**Système : RGF93 (ETRS89) - Projection : LAMBERT-93 - Système altimétrique : NGF-IGN 1969**

Point	e (m)	n (m)	Précision plani	Altitude (m)	Précision alti
a	759134.254	6264873.121	< 1 cm	234.09	< 50 cm
b	759151.314	6264874.840	< 5 cm	232.48	< 50 cm
c	759138.231	6264862.052	< 5 cm	232.97	< 50 cm

*Illustration 46 - Description et coordonnées des points a, b et c.*

### ***Implantation des lignes sismiques***

Pour des raisons de *permittage*, les lignes ont été implantées le long des routes et chemins à l'aide d'une chaîne étalonnée pour une intertrace de 20 m et un inter points vibrés (PV) de 10 m. Les points ont été matérialisés par des piquets de jardinier ou avec de la peinture bio dégradable (Illustration 47).



*Illustration 47 - Implantation des traces et points vibrés.*

Toutes les positions traces ont été levées en RTK avec l'antenne sur canne de 2 m. Sur la zone, les 2 appareils recevaient bien les corrections via le réseau GSM orange. Les données sont ensuite traitées avec le logiciel GPSeismic et transmises au département QC. À partir de ces traces levées, le département QC a généré les positions théoriques des PV. Ces positions théoriques sont sur le même axe que les traces et la distance entre PV est calculée en fonction de l'intertrace. Les lignes étant brisées, l'utilisation de Land Seismic s'est avérée indispensable. Ce logiciel installé dans le carnet terrain Trimble TSC3, prend en compte chaque changement de direction et permet ainsi d'implanter correctement les PV déportés. Tous les parcours vibrateurs se trouvant sur les pistes et routes, ils ont été relevés par une acquisition en continu sur le carnet TSC3, en mode RTK à l'aide d'un véhicule équipé en son centre d'une antenne. Ces données permettent d'avoir avec exactitude la position de la piste et de projeter les PV théoriques sur ce parcours (Illustration 48). Cette fonction se trouve dans le module QuikMap de GPSeismic. À partir de ces nouvelles positions, le département QC, génère un fichier de guidance pour les vibrateurs. Cette méthode permet de positionner les vibrateurs avec exactitude y compris prévoir les éventuels détours des vibrateurs.

Pour cette étude, deux Mini Vibrateurs, IVI minivib II, étaient en production (Illustration 49). Le guidage des vibrateurs se fait à partir d'une tablette PC qui utilise les positions GPS des récepteurs Trimble SPS855 montés sur les vibrateurs. Comme pour le levé topographique, les récepteurs GPS des vibrateurs utilisent les corrections de positionnement en temps réel du réseau Orphéon ; pour cela ils sont équipés de modem Settop CellXtrem. Ces modems reçoivent les corrections du réseau Orphéon et les transmettent aux récepteurs Trimble SPS855 dès leur mise en route.

La zone avait une bonne couverture GSM Orange et SFR ; cependant par sécurité, l'un des minivib II était équipé en SFR et l'autre en Orange.



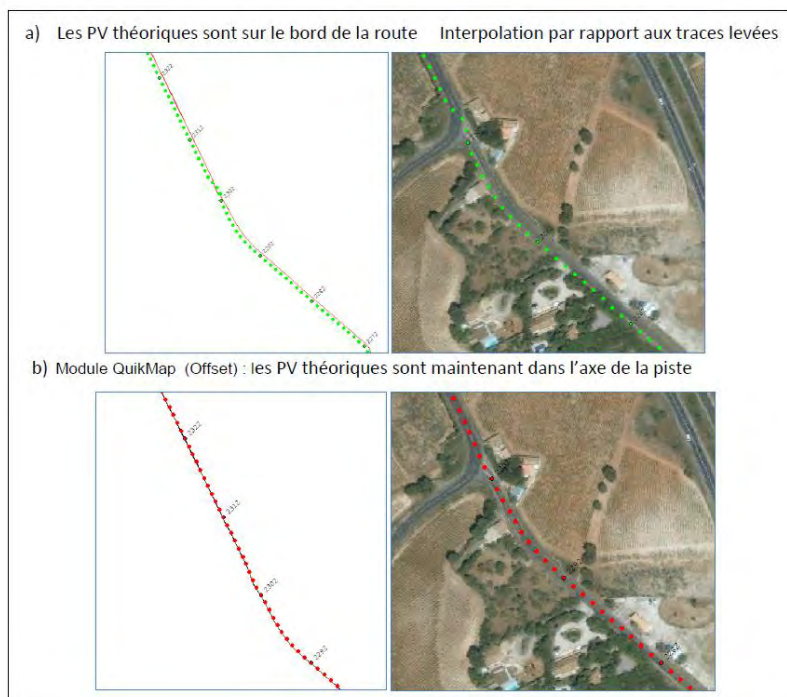


Illustration 48 - Exemple de positionnement des points vibrés.



Illustration 49 - Vibrateur IVI minivib II et l'électronique DSD VE464.

#### 4.6.3. Paramètres de la source sismique

Camion vibreur - Paramètres	
Type de camion vibreur	IVI Minivib II
Electronique	DSD VE464 v.3 patch 12
Positionnement	GPS Trimble SPS 855 (1 per vibrator + 1 base)
Guidage	CGG Guidance software
Autonomous shooting:	Vib timer.

Définition du point vibré	
Nombre de sets	2 vibreurs par flotte
Type de <i>sweep</i>	Emphaseis
Bande de fréquence	3-100 Hz
Longueur du <i>sweep</i>	16 s
Taper (début/fin)	300 ms / 300 ms
Nombre de <i>sweeps</i> par PV et par vibreur	2
Option : brute ou filtrée	Brute
Nombre de déplacement / distance	Permanent
Drive level	80% (V1)
Positionnement DGPS	Oui
Type de corrélation	Process I: correl after with DV Stack. 60 windows

### 4.7. ACQUISITION DES DONNÉES

#### 4.7.1. Production

Les enregistrements sismiques ont été réalisés à l'aide du système UNITE de Sercel. Ce système sans fil permet d'utiliser les vibreurs en mode autonome, à savoir que le vibreur déclenche le tir dès lors qu'il est en position. Avec le système UNITE, les données peuvent être récupérées à tout moment, même pendant la production.

Le serveur UNITE se trouvait au bureau pour le contrôle des opérations, la récupération des données (*harvesting*), le contrôle qualité des data et leur enregistrement sous format Segd sur support digital (Illustration 50).

Sur le serveur UNITE, AVSegd permet de créer, à partir des fichiers événements (TB), les enveloppes de données qui seront « habillées » après la collecte des données présentes sur les RAUs. Sur chaque vibreur, deux boîtiers RAU sont installés pour enregistrer à partir du DSD (Digital Servo Drive) d'une part, le signal émis (*sweep*) de Référence et d'autre part, le signal Force correspondant à la vibration envoyée dans le sol, soit respectivement les signaux théoriques et réels de la vibration (Illustration 51).



Ces données échantillonnées au pas de 1 ms sont enregistrées puis collectées pour être transférées sur les Data-Segd de chaque PV de production, rendent ainsi possible, *a posteriori*, un contrôle qualité de chaque vibration pour chacun des vibrateurs.

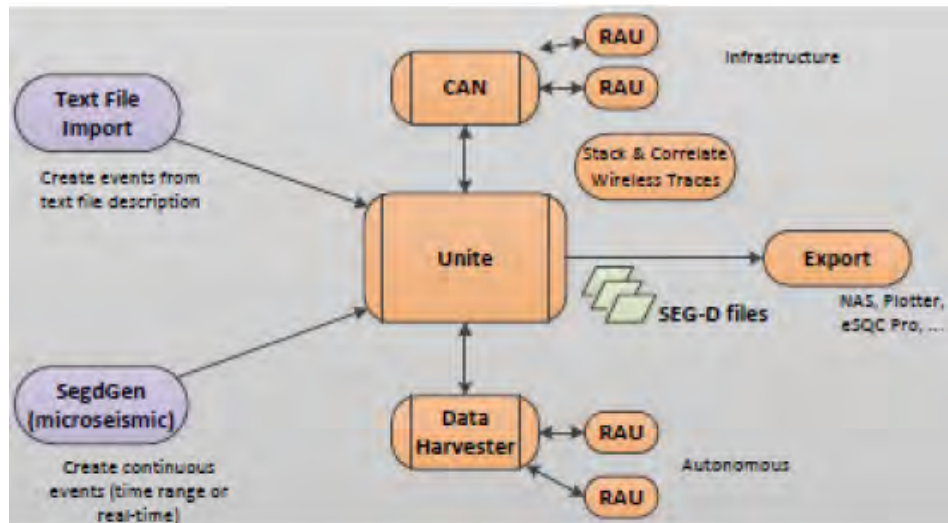


Illustration 50 - Organigramme de la génération des SEG-D.

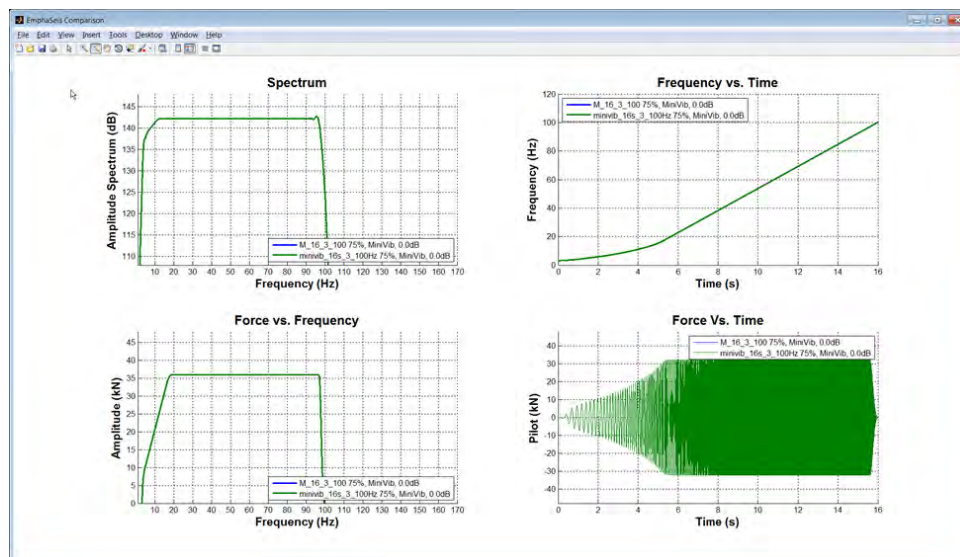


Illustration 51 - Le signal source (sweep) généré par les vibrateurs.

Un contrôle de qualité se fait par ailleurs, en temps réel, sur le terrain par le biais des extendedQC (valeurs échantillonnées à 500 ms) fournies par le DSD et analysées par l'AVQC. Les vibrateurs ont été équipés d'électronique pour opérer en mode Autonomous CGG selon le schéma décrit en Illustration 52.

Le Système AVS (Autonomous Vibrator System) est un ensemble d'outils permettant d'optimiser le Contrôle Qualité des vibrations produites par les vibrateurs, certains embarqués dans les véhicules (vibrateurs, voiture VibQC) ou bien au camp (AVQC), et de finaliser la production jusqu'à la création des fichiers Segd (AVSegd).

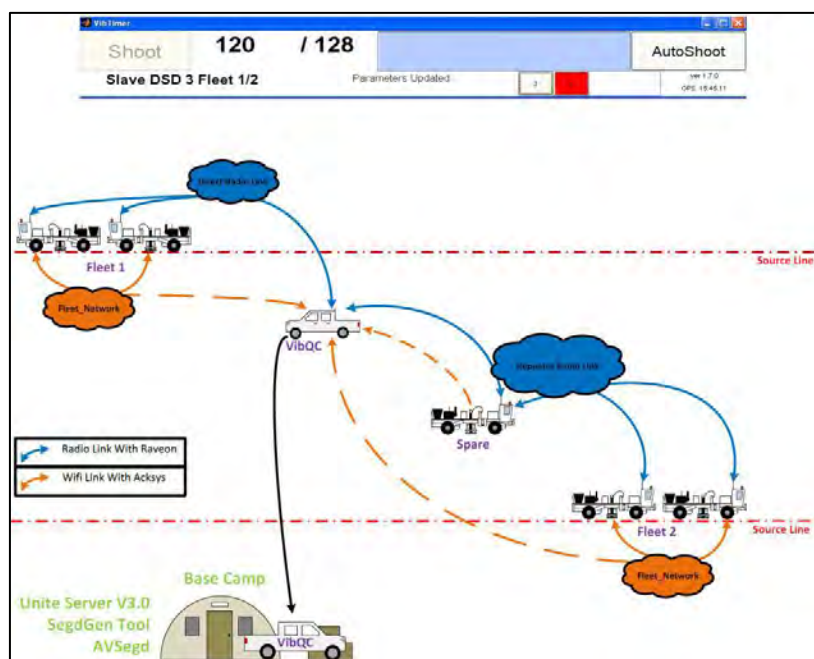


Illustration 52 - Mode acquisition autonome.

#### 4.7.2. Contrôle qualité et pré-traitement

La configuration logicielle pour le planning et le management de l'information est la suivante :

- Geoland v5.0.3.47 ;
- ArcGIS v10.1 ;
- EasyQC.

#### **Données non sismiques (Geoland – Arcmap)**

L'importation des coordonnées levées en topographie s'effectue via le logiciel Geoland. Ce logiciel permet :

- le contrôle des offsets entre les coordonnées théoriques et levées. Les points hors tolérances, les coordonnées sont contrôlées par l'équipe topographie ;
- la mise en attente de validation pour les points hors tolérances ;
- le contrôle des offsets en fonction des contraintes environnementales (obstacles, habitations, zone inaccessibles, refus de permit, etc...) ;
- le contrôle de la tolérance sur la distance entre sources (minimum 10 m) ;
- l'assignation des dispositifs d'enregistrement et le contrôle sur carte de la couverture.

#### **Guidage pour les vibrateurs**

Le logiciel Arcmap est mis en œuvre pour :

- la génération de la grille de calcul pour le logiciel de guidage des PC vibrateurs ;
- la transformation des coordonnées projetées locales (NGF93) et la génération des fichiers de guidage en coordonnées WGS84 pour les PC vibrateurs (Illustration 53). À noter qu'en cas de modifications des coordonnées levées, ces fichiers sont à nouveau générés pour le secteur géographique concerné.





Illustration 53 - Position des points milieux communs (CMP) des Ligne 1 & 2.

Suite à l'acquisition, le contrôle qualité des données non sismiques comporte :

- le contrôle des coordonnées RTK des vibrateurs sur les fichiers forces des vibrateurs ;
- la correction, par l'équipe topographie, des valeurs d'altimétrie des points vibrés en fonction du numéro des vibrateurs et de leur hauteur d'antenne.

Si une anomalie ou une indécision apparaît, les coordonnées topographiques levées font foi et servent pour la mise à jour des SPS finaux. Après la validation de ces coordonnées, elles sont remises à jour sur Geoland.

### Suivi de production

La mission dispose de différents outils pour effectuer le suivi de l'avancement de la campagne de mesures et le rapport journalier de production (Illustration 54) :

- mise à jour des bases données d'avancement sur la topographie, le déroulage, la production, l'ouverture et les permis d'accessibilité ;
- cartes d'avancement émises sur Arcmap.

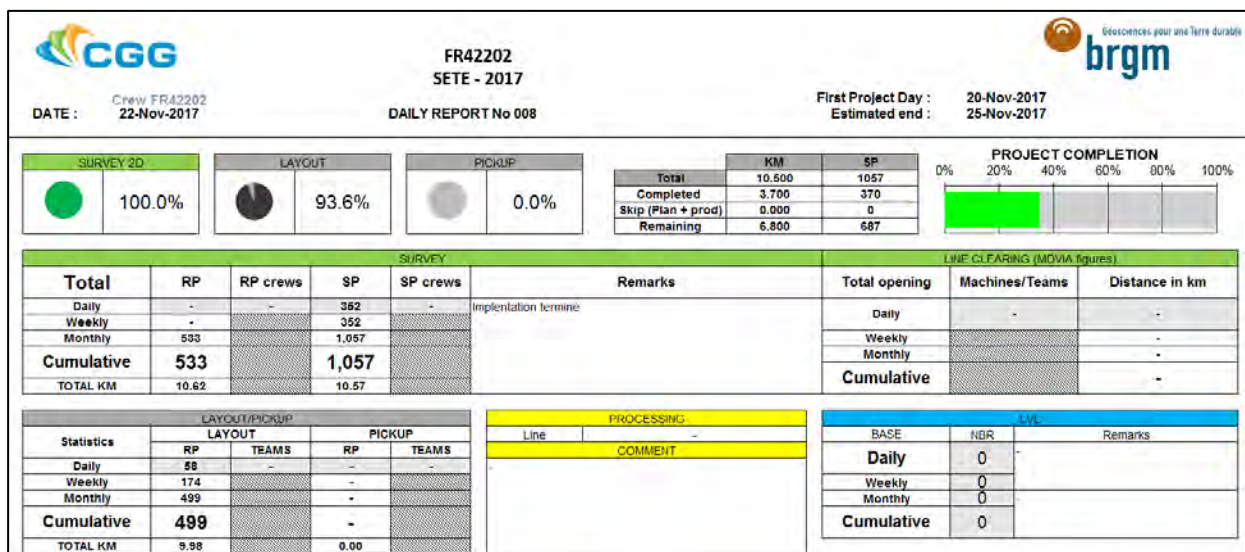


Illustration 54 - Rapport de production.

## Contrôle de la production

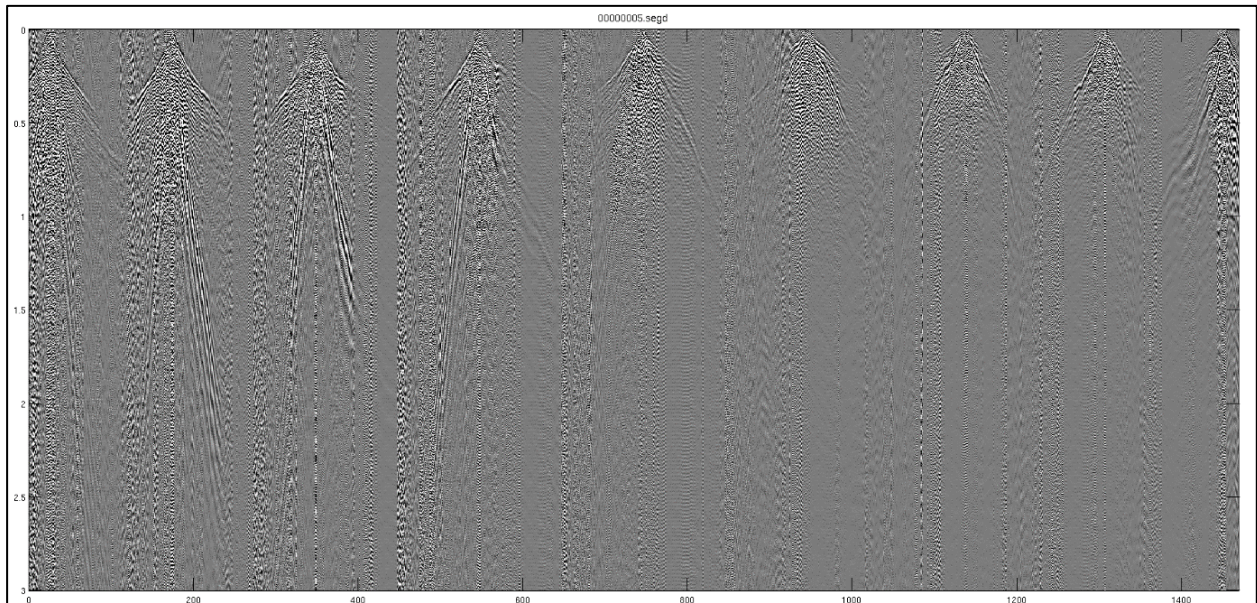
Réaffectation des types de sources en fonction des rapports d'acquisition laboratoire (contraintes environnementales, distance de sécurité).

- contrôle des points sources effectués par l'acquisition sur les fichiers VPtables (SEGD générés par le laboratoire en sortie de processus UNITE) et les fichiers SPS du laboratoire ;
- importation des fichiers SPS mis à jour dans Geoland ;
- contrôle de cohérence du dispositif d'acquisition (*spread*) par rapport au dispositif théorique ;
- si incohérence, reprise des rapports du laboratoire et mise à jour des SPS ;
- contrôle des attributs des vibrateurs sur fichiers de logs ;
- indexation des points récepteurs si nécessaire en cas de modification de leurs coordonnées en cours d'acquisition et réassignation du dispositif (*spread*) ;
- exportation des fichiers SPS finaux.

## Données sismiques

Un contrôle visuel de la qualité des données par visualisation des points de tirs en SEG2 (sous EasyQC) et de certains attributs sismiques (longueur d'enregistrement, gain des traces, type de vibreur) (Illustration 55).





*Illustration 55 - Ligne 1 un tir brut tous les 50 points.*

## **4.8. TRAITEMENT DES DONNÉES**

### **4.8.1. Séquence de traitement**

Le traitement classique des mesures a pour but de convertir les données brutes numériques en coupes (ou sections) sismiques montrant l'agencement des réflecteurs le long du profil. Ces réflecteurs sont l'image des différences de lithologies des couches du sous-sol.

La séquence de traitement peut varier d'une étude à l'autre, en fonction de la profondeur de la cible, du type de sol et des paramètres d'enregistrement.

La séquence de traitement appliquée aux données brutes a été élaborée de manière à atténuer les bruits aléatoires et organisés, et à remonter le niveau de signal. Pour ce faire, divers algorithmes sont successivement appliqués pour construire la séquence de traitement qui contient des routines types de traitement du signal. Parmi ces étapes peuvent figurer des filtres en temps ou dans le domaine FK, une déconvolution, l'édition des traces bruitées ou défectueuses, soit totalement soit pour un temps donné. Ces diverses étapes se placent soit avant soit après la mise en collection en points miroirs et selon diverses collections.

Le logiciel Geovation2® est employé pour ce traitement, il comporte des algorithmes avancés développés spécifiquement par CGG. De tels algorithmes diffèrent parfois fortement en optimisation des logiciels courants proposés par les fabricants de matériel d'acquisition. Le détail des séquences appliquées correspond à une expertise et un savoir-faire et n'est pas communiqué dans le détail. Les séquences sont élaborées en collaboration avec les spécialistes du centre de traitement de Massy en fonction des étapes et problèmes identifiés.

La séquence utilisée pour cette étude comprend entre autre les étapes présentées sur l'illustration 56. À noter que celles-ci ne sont pas réalisées exactement dans l'ordre suivant et que certaines peuvent être répétées dans la séquence, comme par exemple les procédures de récupération de gains et d'amplitude ou les filtrages.

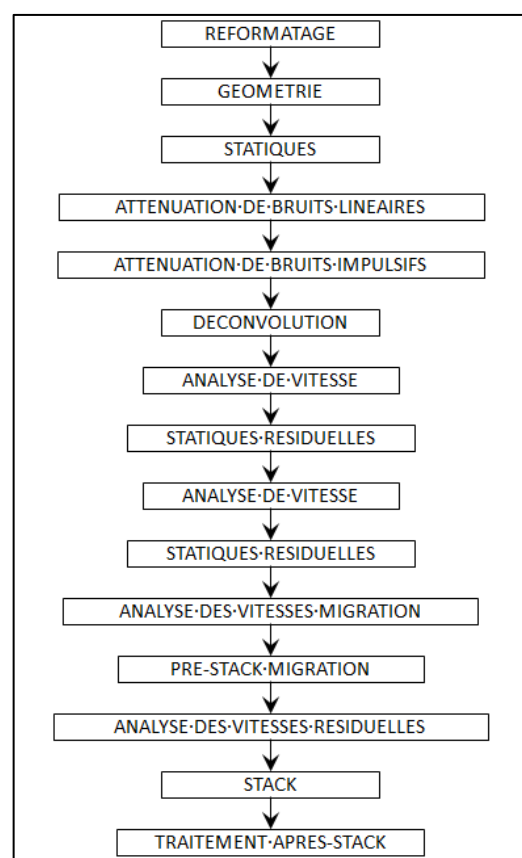


Illustration 56 - Séquence de traitement de données.

Le plan de référence choisi, pour cette étude, est situé à 50 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer.

#### 4.8.2. Présentation des coupes sismiques

Deux types de sections sont produits dans le cadre de cette étude :

- coupe somme avant migration (Illustrations 57 et 58) ;
- coupe après migration (Illustration 59 et 60).

Les coupes obtenues ont une échelle verticale en temps double (aller-retour de l'onde sismique), exprimée en millisecondes. L'axe des temps est croissant vers le bas. Les réflexions les plus tardives, donc les plus profondes, sont situées plus bas sur la section donnant ainsi à ce document un aspect géologique.

L'échelle horizontale est en mètres. L'espace entre deux traces verticales correspond à la moitié de l'inter trace (5 mètres pour cette étude).

Par convention, une interface impédance élevée / impédance faible se traduit par une phase blanche (distension) ; à l'inverse, une interface impédance faible / impédance élevée se traduit par une phase noire (compression). L'amplitude est directement liée au contraste d'impédance

En d'autres termes et de façon simplifiée, le passage d'un terrain tendre à un terrain dur se traduit par une phase positive noire et inversement, le passage d'un terrain dur à un terrain tendre, par une phase négative blanche.



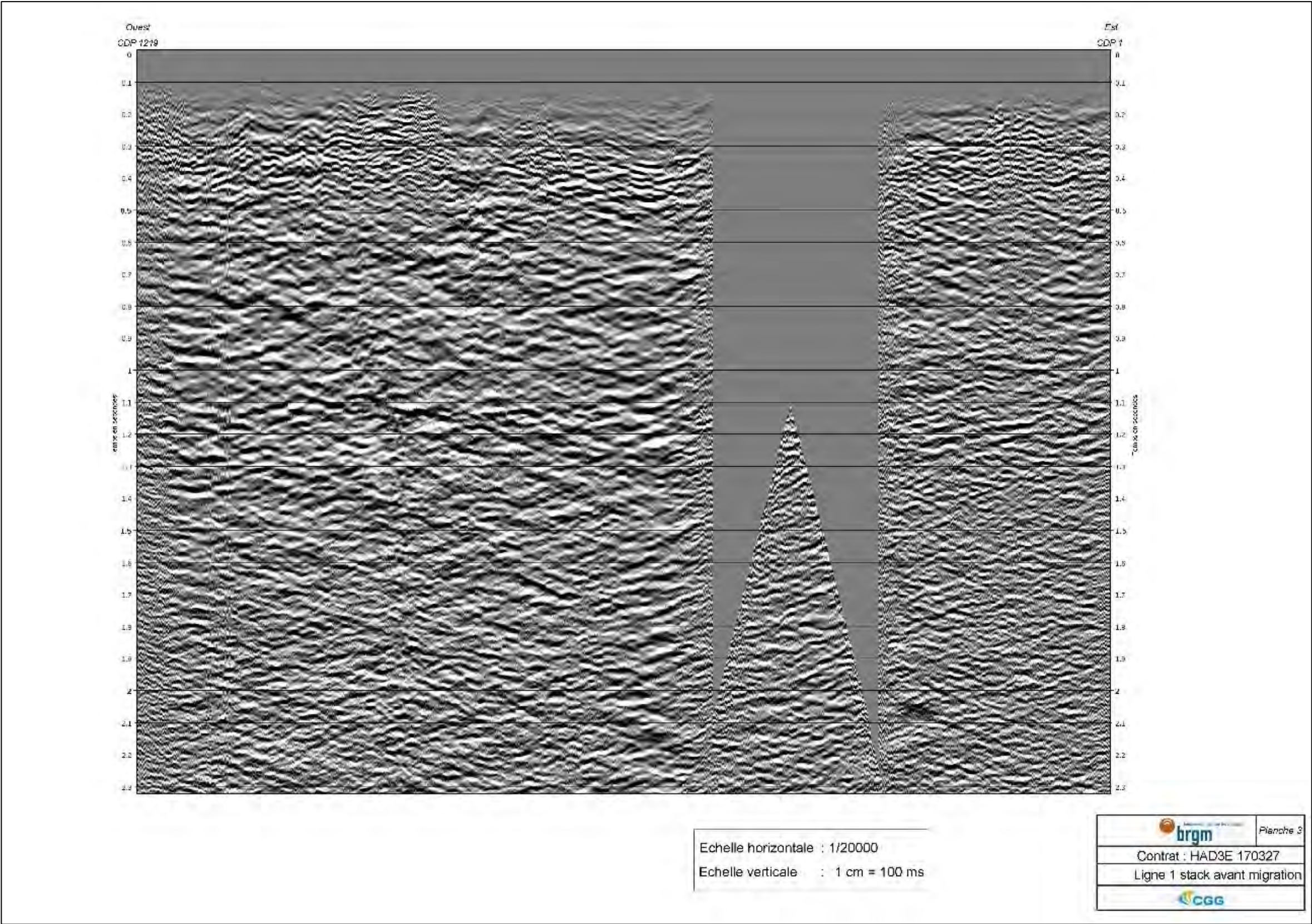
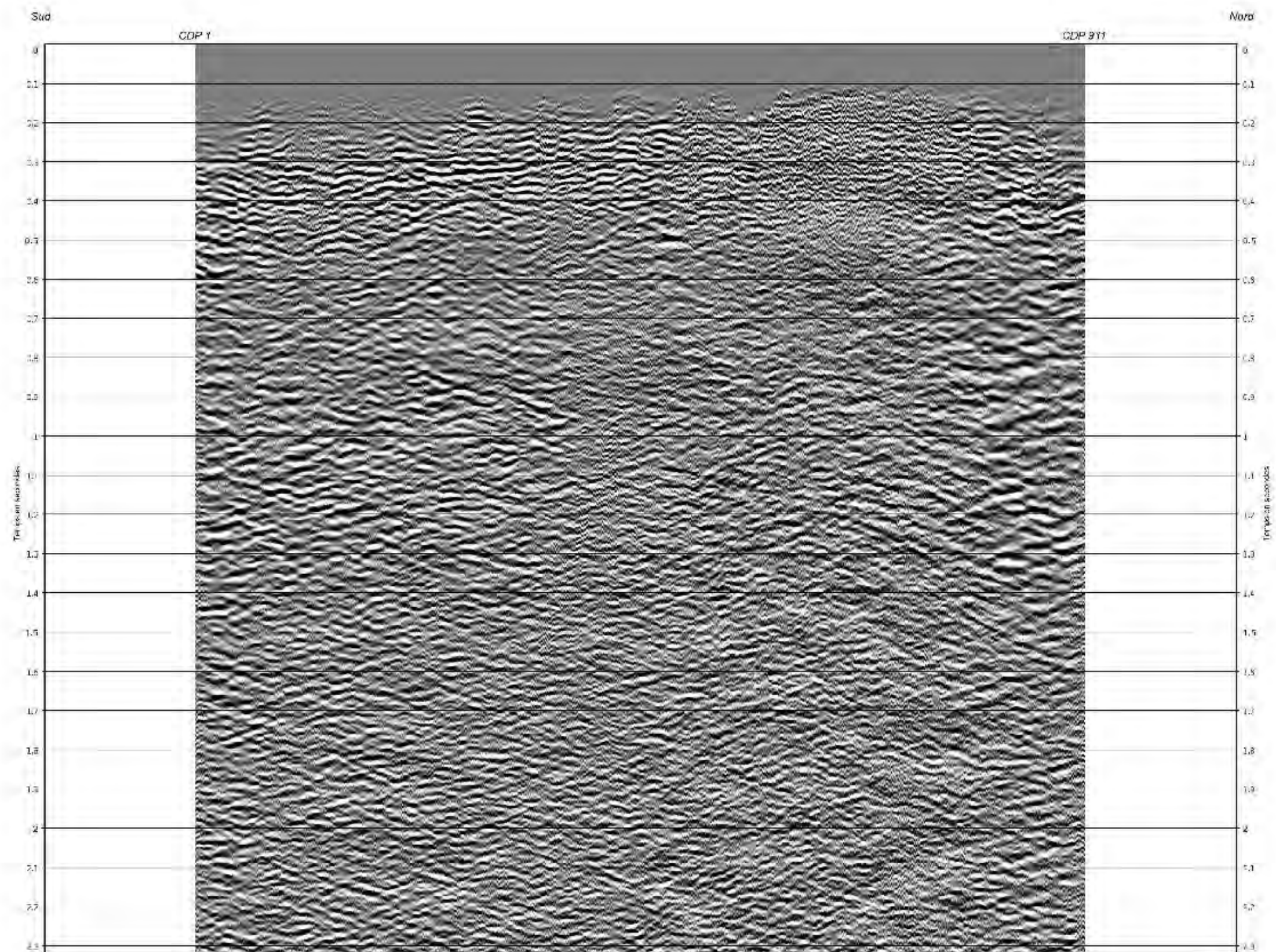


Illustration 57 - Coupe sismique somme du profil 1.





Echelle horizontale : 1/20000  
 Echelle verticale : 1 cm = 100 ms

	Planche 4
Contrat : HAD3E 170327	
Ligne 2 stack avant migration	
	

Illustration 58 - Coupe sismique somme du profil 2.



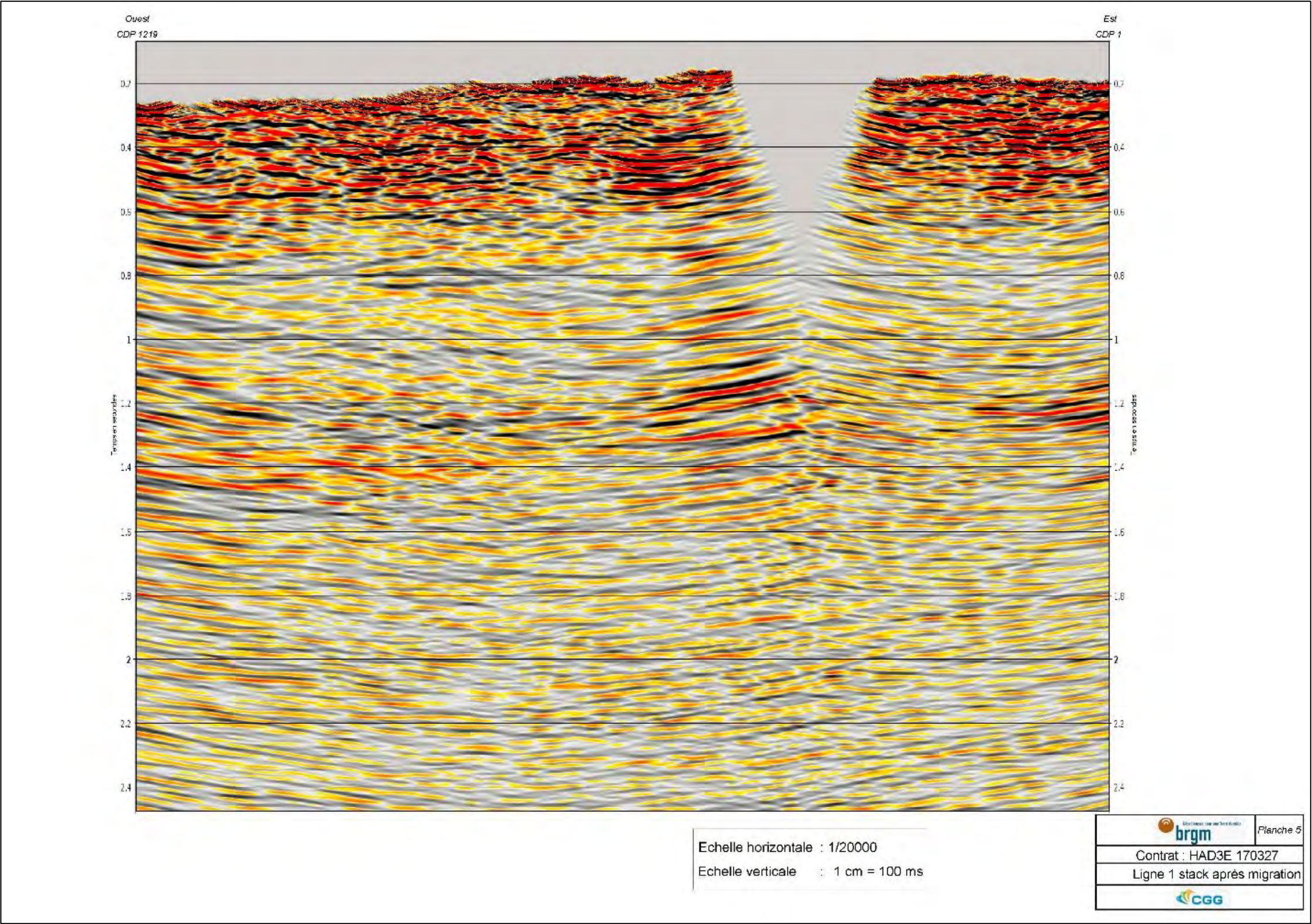


Illustration 59 : Coupe migrée du profil sismique 1.



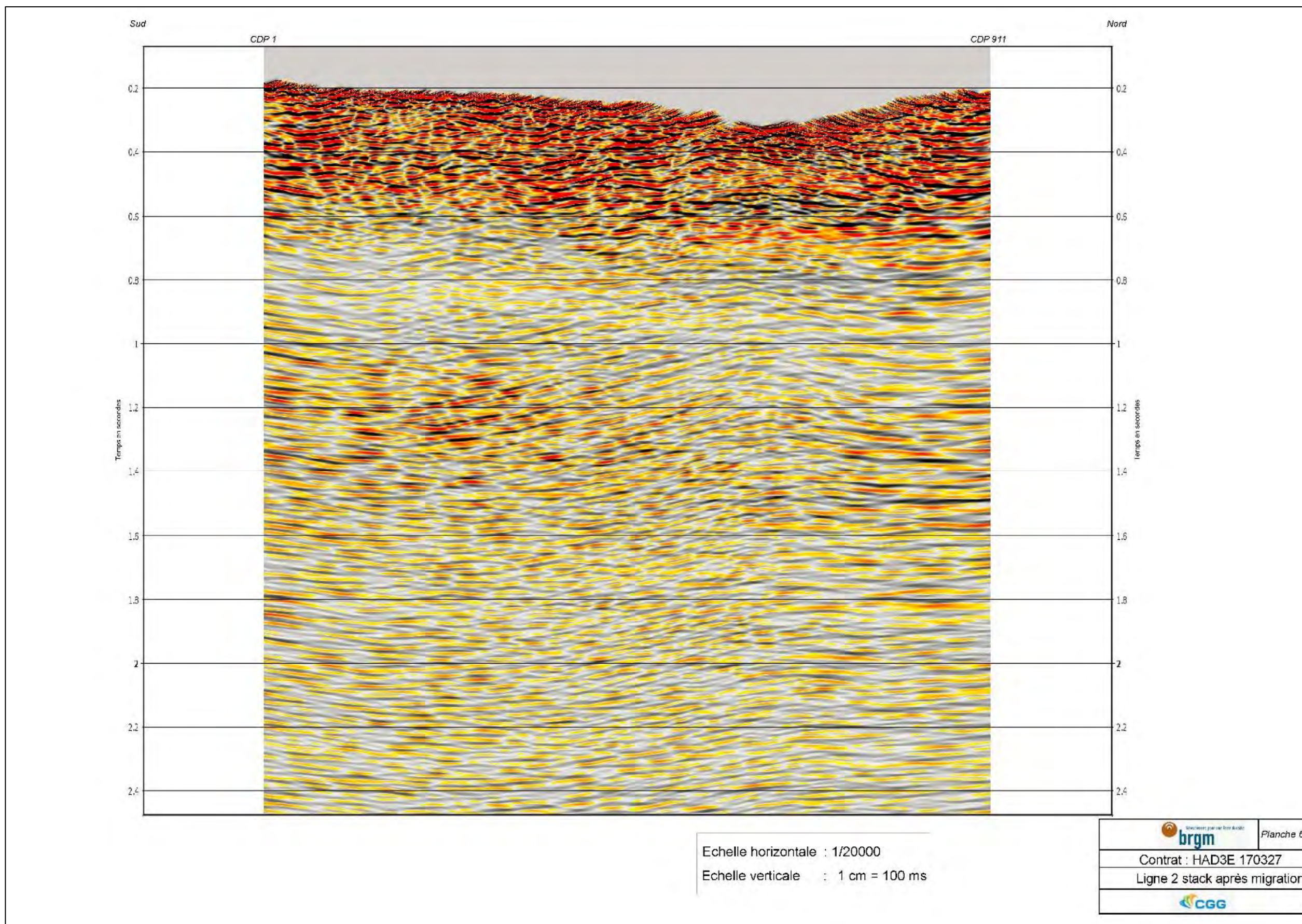


Illustration 60 - Coupe migrée du profil sismique 2.



#### **4.8.3. Conclusion sur l'acquisition sismique**

La campagne de sismique réflexion réalisée dans le cadre du projet Dem'eaux Thau a consisté en l'acquisition de deux profils sismiques représentant un linéaire respectivement de 5 750 m et 4 860 m soit un linéaire cumulé de 10.610 km. Le matériel utilisé pour l'acquisition correspond au standard très strict du marché de l'industrie pétrolière.

L'acquisition sur l'Étang de Thau n'a pas pu être réalisée en raison de l'interdiction pour risque sanitaire émise par l'Ifremer, ceci afin de ne pas remuer les fonds vaseux de l'Étang contenant potentiellement des algues toxiques pour les huîtres.

Les sections obtenues après traitement, avant la migration, présentent de nombreuses diffractions liées vraisemblablement à la présence des calcaires fracturés du Jurassique. Malgré ces difficultés, le traitement mis en œuvre a permis de faire apparaître des réflecteurs jusqu'à plus de 1.2 seconde. Les sections obtenues après migration montrent des réflecteurs plus continus qui permettent d'appréhender la structure géologique au droit des deux lignes.

## 5. Conclusion et perspectives

Ce rapport fait état des campagnes d'acquisition des données géophysiques selon trois méthodes différentes et complémentaires.

Les premiers traitements réalisés sur les données CSEM présentées dans ce rapport permettent de mettre en évidence des contrastes de résistivité en cohérence apparente avec les éléments de connaissance structuraux de la zone d'étude qui s'observent sur les premiers 1 000 mètres de profondeur. Les informations apparaissent cohérentes avec les anomalies gravimétriques mises en évidence sur la zone d'étude.

Les données CSEM feront ensuite l'objet d'inversions 1-D et 2-D le long des profils en travers de la baie. Afin d'expliquer les données collectées le plus correctement possible, il est pressenti que la prise en compte en 3-D de la morphologie de l'Étang de Thau et des propriétés de son eau (grande masse très conductrice) au travers de modélisations et inversions soit indispensable pour reconstituer les propriétés électriques du sous-sol. Enfin, des modélisations et inversions 3D seront également testées en intégrant les contraintes du modèle géologique.

Les deux profils sismiques ont été acquis à l'est et au nord de l'Étang de Thau. L'épisode de prolifération d'algues toxiques dans l'Étang de Thau n'a pas permis l'acquisition sismique dans la lagune. Les conditions environnementales d'acquisition (milieu très urbanisé, nombreux bruits parasites liés à la circulation) d'une part, et les terrains superficiels très « rapides » et fracturés d'autre part, ont perturbé l'acquisition des ondes sismiques. Les structures les plus profondes de la région investiguée semblent mal résolues par cette méthode géophysique. Cependant, les données acquises pourront être mises en perspective avec les données anciennes de sismique retraitées dans le cadre de ce projet pour améliorer la connaissance du sous-sol profond.

Les données gravimétriques acquises complètent les données existantes et précisent le cadre structural de la région, notamment dans le bassin miocène de Montbazin-Gigean au nord-est de la zone et sur le secteur de Balaruc-Les-Bains avec la localisation de potentiels accidents tectoniques. Ces données seront également utilisées comme éléments de contraintes pour le modèle géologique 3D.





## 6. Bibliographie

**Blakely, R. J., & Simpson, R. W.** (1986) - Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51(7), 1494-1498.

**Cattin, R., Mazzotti, S., & Baratin, L. M.** (2015) - GravProcess: An easy-to-use MATLAB software to process campaign gravity data and evaluate the associated uncertainties. *Computers & Geosciences*, 81, 20-27.

**CGG**, (2018) - Rapport d'études, BRGM FR 42-202.

**Cooper, G. R. J., & Cowan, D. R.** (2006) - Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers & Geosciences*, 32(10), 1585-1591.

**D'Errico, J.** (2005) - Surface Fitting using gridfit, MATLAB Central File Exchange. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8998>

**Jamal,** (2014) - RegularizeData3D, MATLAB Central File Exchange. <http://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46223-regularizedata3d>

**Longman, I. M.** (1959) - Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun. *Journal of Geophysical Research*, 64(12), 2351-2355.

**Moritz, H.** (2000) - Geodetic reference system 1980. *Journal of Geodesy*, 74(1), 128-133.

**Nettleton, L. L.** (1939) - Determination of density for reduction of gravimeter observations. *Geophysics*, 4(3), 176-183.

**Parasnis, D.S.**, (1952) - A study of rock densities in English Midlands: *Geophysical Journal International*, 6, 252-271.

**Spector, A., Grant, F.S.**, (1970) - Statistical models for interpreting aeromagnetic data, *Geophysics*, 35, p.293-302.





## Annexe 1

### Journal de mission CSEM

Jour 1 : Lundi 13/11/2017

- Voyage Orléans-Balaruc-les-Bains (10h00 – 19h30)
- Récupération de 2 véhicules utilitaires à Montpellier
- Hôtel Martinez à Balaruc-les-Bains
- Récupération du parking
- Repas à l'hôtel avec l'équipe gravimétrie
- Briefing collectif sur la mission

Jour 2 : Mardi 14/11/2017

- Météo : beau, vent
- Arrivée de l'intérimaire K. Khedjam 8h00
- Départ du parking 8h30 pour les **TX1 (Loupian)**
- Répartition du matériel RX dans les véhicules
- Installation du TX1, déploiement des câbles, creusement des trous pour les plaques inox, préparation bentonite, eau salée
- Fin d'installation vers 13h30
- Installation d'une station MT sur TX1
- Déplacement sur le **TX2 (Frontignan)**, discussion avec propriétaire (M. Nodet)
- Récupération du groupe électrogène destiné au TX2
- Déploiement des câbles, creusement des trous pour les plaques inox
- Déplacement sur TX1 avec le deuxième groupe électrogène
- Test injection, problème avec TXM15 (TXB0713 + câbles blancs), changement pour TXM36 (avec TXB07-34 + câbles noirs) → OK 23 A. Raison inconnue (câbles ou TXM?)
- Programmation de la station MT pour la nuit (2 séquences à 4096 Hz de 1h, 1 à 128 Hz de 12h, 1 à 65536 Hz de 3 min).
- Retour sur TX2
- Arrivée des agents de sécurité (RDV hôtel à 17h30), explications sur la surveillance à réaliser
- Fin de la journée, 2 pôles d'injection installés sur TX2
- Retour hôtel 19h00-19h30
- Briefing de la journée
- Intérimaire : 08:00-18h30

Jour 3 : Mercredi 15/11/2017

- Météo : Beau, sans vent
- Retour sur TX2 pour finir l'implantation (dernier pôle d'injection)
- Récupération de la station MT, et test des séquences automatiques sur ADU08
- Atelier soudure pour prises E ADU.



- RDV Bouzigues avec V. Caumeil (équipe marine) – 10h00.
- Retour sur TX2.
- Mise en place de la remorque + TXM-15 + TXB07-13.
- Tests → résistances de prise entre 100 et 150  $\Omega$ .
- Test avec le TXM-36 + TXB07-34, résistances semblables
- Tentative d'amélioration avec 100 l d'eau et 5-6 kg de sel par pôle. Abaissement de la résistance à 60-80  $\Omega$ . Trop haute pouvoir injecter du courant pour l'appareil (1.5 -2A)
- Décision de transformer les deux dipôles électriques en un dipôle magnétique vertical.
- Retour sur TX1 (15h00) pour injection pendant les 2 mesures marines (123 et 124)
- Problème d'injection sur la POL1 (N-S), coupure. Injection sur POL2 uniquement (départ RX à 12h52 UT, et ~15h15 UT)
- Tentative d'injection sur le DMV de TX2, problème
- Rajout d'eau salée sur les pôles de TX1, réparation de la coupure sur TX1 et entrevue avec l'agent de sécurité;
- Retour sur TX2, finalement OK, 35 A dans la boucle;
- Agent de sécurité sur TX2.
- Briefing récupération des données et préparation de la journée suivante
- Intérimaire : 08:00-18h40

#### Jour 4 : Jeudi 16/11/2017

- Météo : Beau, sans vent
- Briefing matinal, départ 08h15
- Mise en place du TX2, démarrage à 09:00 (LT) puis problème ("no ARS board message"), reboot, puis démarrage à 10h15 (LT)
- Mise en place du TX1, démarrage à 09:33 (LT), 25A.
- Acquisition des stations N° 1-2-3-10-75-79-88-121-122-132-133
- Récupération des données
- Mise en charge des batteries
- Briefing récupération des données et préparation de la journée suivante

#### Jour 5 : Vendredi 17/11/2017

- Météo : Beau, sans vent
- Briefing matinal, départ 08h15
- Mise en place du TX2, démarrage à 09:00 (LT), 35A.
- Mise en place du TX1, démarrage à 09:00 (LT), 25A.
- Visite de l'équipe projet sur le terrain (matinée entre l'équipe marine, le TX1 et une équipe terrestre)
- Processing GPS, pré-processing des données CSEM
- Acquisition des stations N° 4-5-6-7-9-41-45-47-55-111-116-117-118-119
- Récupération des données
- Mise en charge des batteries
- Briefing récupération des données et préparation de la journée suivante

Jour 6 : Samedi 18/11/2017

- Météo : Beau, sans vent
- Briefing matinal, départ 08h15
- Mise en place du TX1, démarrage à 09:00 (LT), 27A.
- Mise en place du TX2, démarrage à 09:00 (LT), 35A.
- Processing GPS, pré-processing des données CSEM
- Coupure du câble d'injection de TX2 à 12h26 (UT) à 14h00 (UT) en 3 endroits espacés de 3m.
- Détection de la panne, localisation et réparation, redémarrage à 15h00 (LT).
- Acquisition des stations N° 11-16-17-18-42-46-48-49-50-102-103-104-105-106
- Récupération des données
- Mise en charge des batteries
- Briefing, récupération des données

Jour 7 : Dimanche 19/11/2017

- OFF
- Départ François Bretaudeau
- 100 litres d'eau de mer au TX1 Loupian
- Arrivée Pierre Wawrzyniak et Adnand Bitri
- Briefing, préparation de la journée suivante

Jour 8 : Lundi 20/11/2017

- Météo : Beau, sans vent
- Briefing matinal, départ 08h15
- Mise en place du TX2, démarrage à 09:00 (LT), 35A.
- Mise en place du TX1, démarrage à 09:00 (LT), 29A.
- Processing GPS, pré-processing des données CSEM
- Acquisition des stations N° 22-24-25-26-39-52-58-60-125-126-127-128-129-131
- Récupération des données
- Mise en charge des batteries
- Briefing récupération des données et préparation de la journée suivante
- Contact société Lafarge / CB Président

Jour 9 : Mardi 21/11/2017

- Météo : Beau, sans vent
- Briefing matinal, départ 08h15
- Mise en place du TX2, démarrage à 09:00 (LT), 35A.
  - Problème sur TX2 vers 17 (LT), n'est pas relancé après
- Mise en place du TX1, démarrage à 09:11(LT), 29A.
- Processing GPS, pré-processing des données CSEM
- Acquisition des stations N° 30-33-34-35-81-82-83-120-130-136-137-139
- Stations sur site Lafarge réalisées
- Récupération des données
- Mise en charge des batteries
- Briefing récupération des données et préparation de la journée suivante



Jour 10 : Mercredi 22/11/2017

- Météo : gris, vent
- Briefing matinal, départ 08h15
- Mise en place du TX2, démarrage à 09:00 (LT), 35A.
- Mise en place du TX1, démarrage à 09:11(LT), 29A.
- Processing GPS, pré-processing des données CSEM
- Acquisition des stations N° 63-65-66-68-70-72-73-76-107-108-109-110
- Problème de GPSdiff sur stations 81 (points S et C seulement, les autres ont été recalculés d'après les distances mesurées au GPSdiff)
- Stations sur site CB réalisées
- Récupération des données
- Mise en charge des batteries
- Briefing récupération des données et préparation de la journée suivante
- Repas d'équipe

Jour 11 : Jeudi 23/11/2017

- Météo : gris, vent
- Briefing matinal, départ 08h15
- Mise en place du TX2, démarrage à 09:00 (LT), 35A.
- Mise en place du TX1, démarrage à 09:11(LT), 30A.
- Processing GPS, pré-processing des données CSEM
- Acquisition des stations N° 29-56-74-90-91-92-96-112-113-114-115
- 1 station sur la Raffinerie du Midi réalisée
- Récupération des données
- Mise en charge des batteries
- Briefing récupération des données et préparation de la journée suivante
- 

Jour 12 : Vendredi 24/11/2017

- Météo : gris, vent
- Briefing matinal, départ 08h15
- Reprise des 2 groupes électrogènes par Locawatt
- Acquisition GPS de la boucle Frontignan
- Repli du TX1
- Repli du TX2
- Acquisition sondages TEM / MT

Jour 13 : Samedi 25/11/2017

- Restitution des véhicules Entreprise à Montpellier
- Voyage Balaruc – Orléans (9:00 – 17h45)

## **Annexe 2**

### **Anomalie de Bouguer, Anomalie Régionale et Anomalie Résiduelle avec l'ensemble des données gravimétriques**







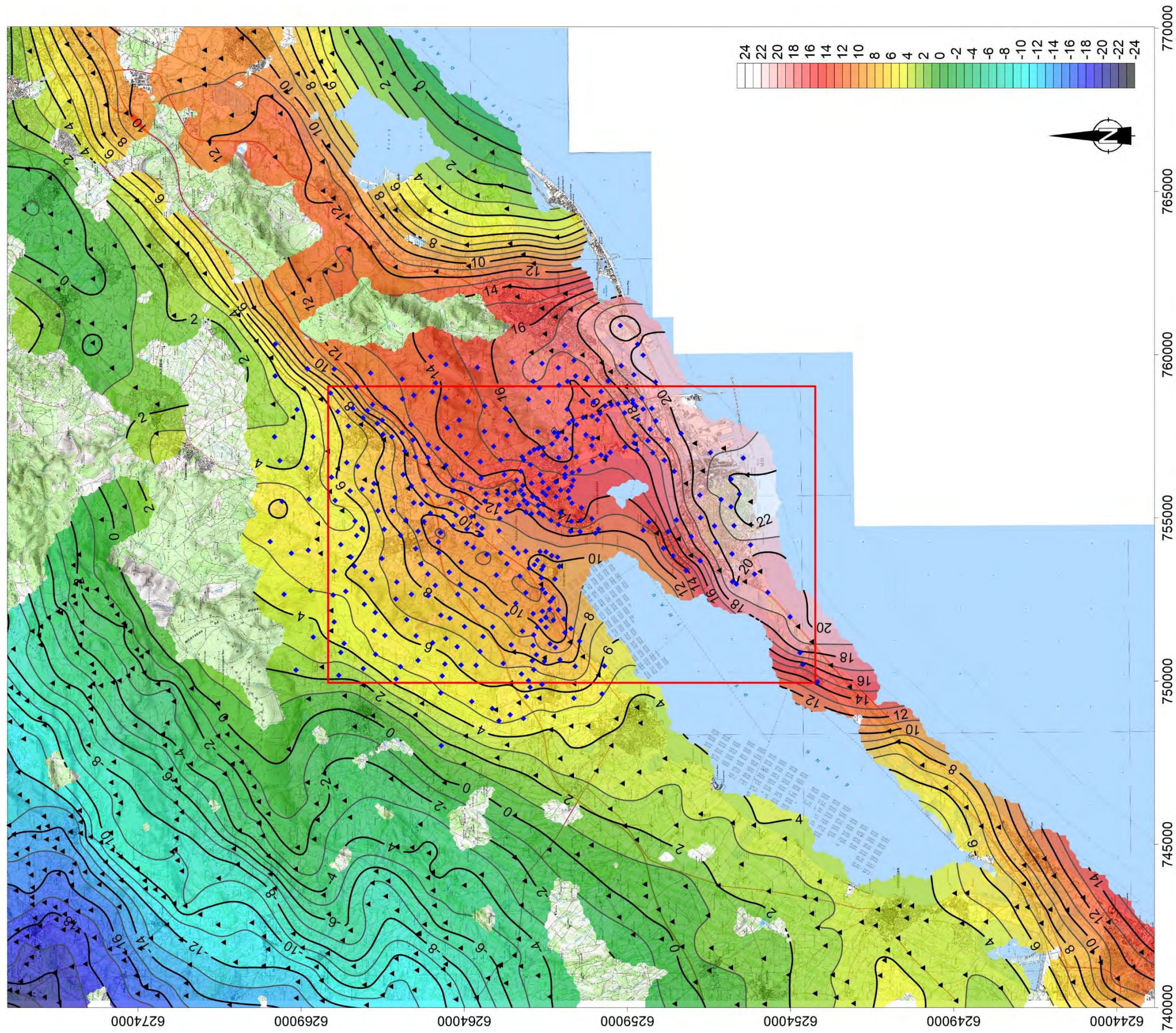


Illustration A 1 - Anomalie de Bouguer pour une densité 2.65, avec l'ensemble des données gravimétriques utilisées. Les données acquises dans ce projet sont représentées par des losanges bleus, les données historiques par des triangles noirs.



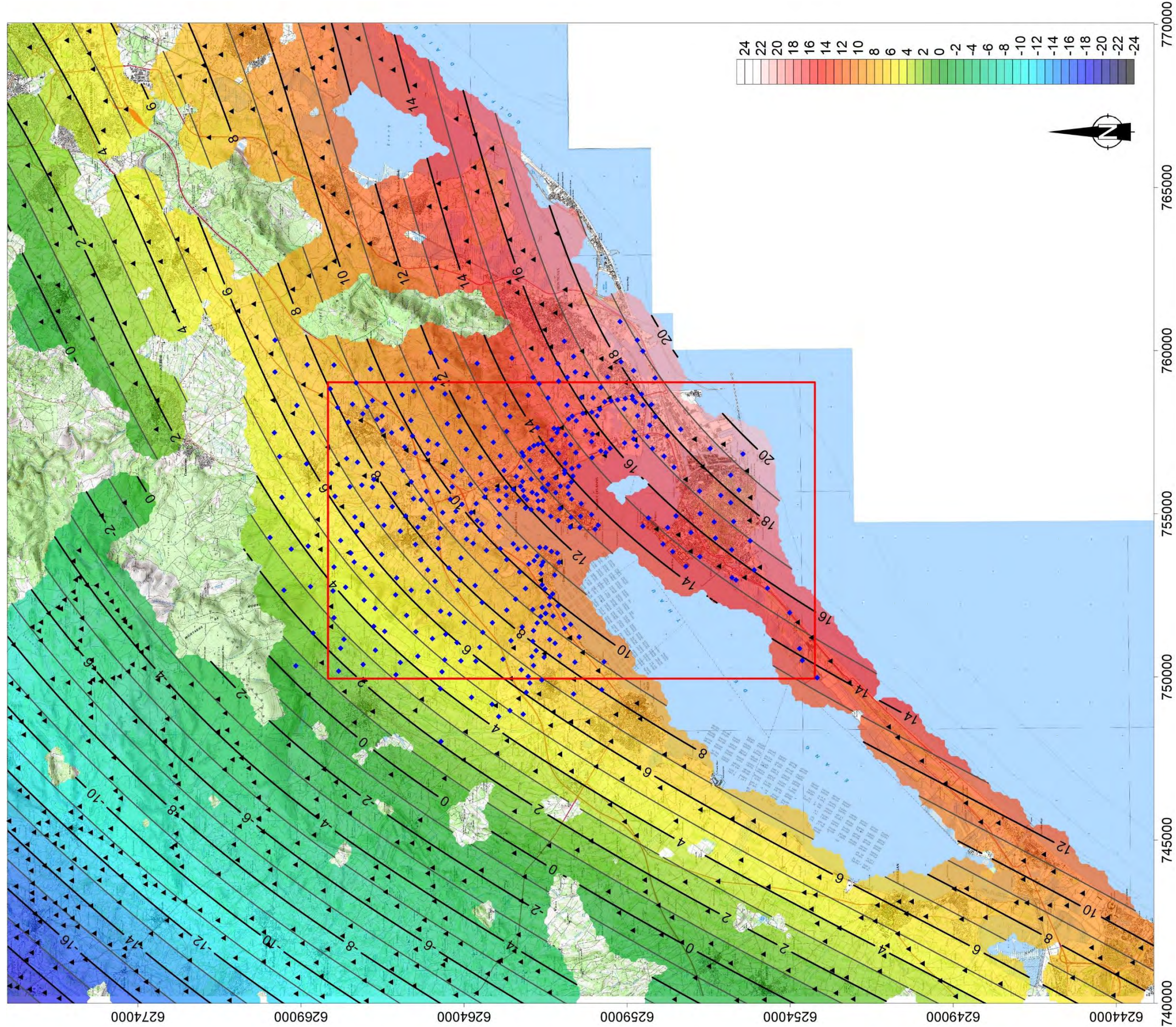


Illustration A 2 - Anomalie de régionale pour une densité 2.65, avec l'ensembles des données gravimétriques utilisées. Les données acquises dans ce projet sont représentées par des losanges bleus, les données historiques par des triangles noirs.



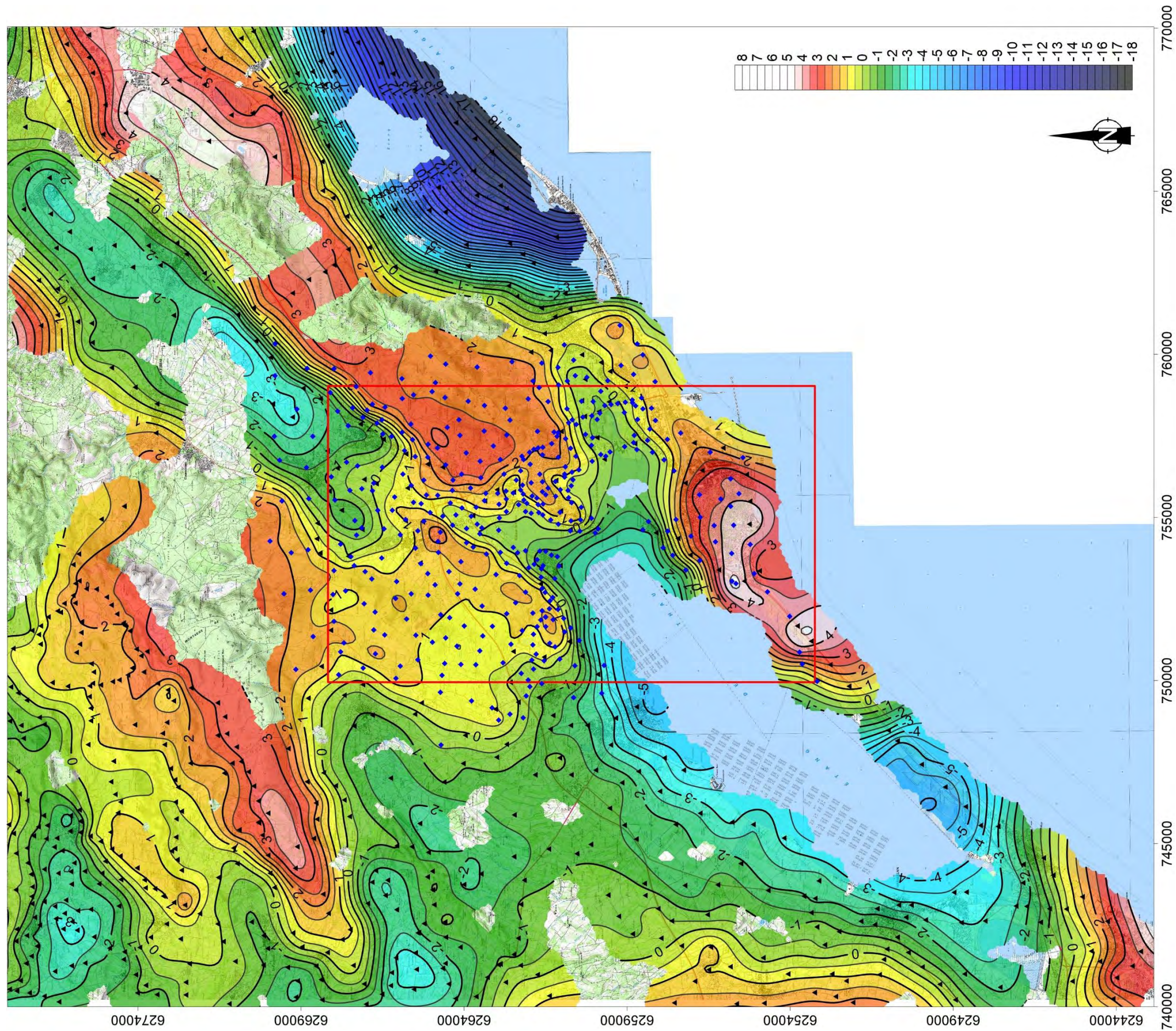


Illustration A 3 - Anomalie résiduelle avec l'ensemble des données gravimétriques utilisées. Les données acquises dans ce projet sont représentées par des losanges bleus, les données historiques par des triangles noirs.







Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale Occitanie**

1039 rue de Pinville

34000 – Montpellier – France

Tél. : 04 67 15 79 80