



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

Document public



Géosciences pour une Terre durable

brgm

DEM'Eaux Thau - Construction d'un modèle géologique 3D du secteur Montpellier-Sète et de l'étang de Thau (34) Livrable L4

Rapport final

BRGM/RP-70789-FR

Avril 2021



UNION EUROPÉENNE



La Région
Occitanie
Pyrénées - Méditerranée



PRÉFET
DE LA RÉGION
OCCITANIE

PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

DEM'Eaux Thau - Construction d'un modèle géologique 3D du secteur Montpellier-Sète et de l'étang de Thau (34) Livvable L4

BRGM/RP-70789-FR
Avril 2021

Étude réalisée dans le cadre du projet BRGM RP16LRO005

R. Hemelsdaël, M. Séranne, S. Caritg, G. Courrioux,
É. Husson, T. Jacob, C. Lamotte

Vérificateur :

Nom : **Callec Y.**

Fonction : Responsable Unité
DGR/CGEO

Date : 29/04/2021

Signature :



Approbateur :

Nom : **Blum A.**

Fonction : Directrice Direction
Régionale Occitanie

Date : 03/05/2021

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr



PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Modèle géologique 3D, GeoModeller, Coupes structurales de références, Forages, Interfaces géologiques, Anomalie gravimétrique résiduelle, Réponse gravimétrique du modèle, Chevauchement de Montpellier, Chevauchement de Thau, Faille normale, Réactivation, Bassin de Thau, Balaruc-les-Bains, Pile lithologique, Réservoir karstique profond.

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

R. Hemelsdaël, M. Séranne, S. Caritg, G. Courrioux, E. Husson, T. Jacob, C. Lamotte (2021) - Projet DEM'Eaux Thau - Construction d'un modèle géologique 3D du secteur Montpellier-Sète et de l'étang de Thau (34) – Livrable L4 – Rapport final. BRGM/RP-70789-FR, 98 p., 54 fig., 9 tab., 2 ann.

Synthèse

Le volet « Géologie » du projet DEM'EAUX THAU (2017–2022) est focalisé sur la construction d'un modèle géologique 3D (logiciel GeoModeller) du secteur Montpellier-Sète, et incluant l'étang de Thau. La construction du modèle 3D fait partie d'un travail de post doctorat (Romain Hemelsdaël) à l'Université de Montpellier, et il représente plusieurs mois de travail en collaboration avec le BRGM. Ce rapport décrit les étapes de construction du modèle et les choix effectués pour obtenir une cohérence 3D des données.

Ce modèle 3D d'une emprise de 39 x 27 x 5 km vise à documenter et à comprendre la structuration des réservoirs karstiques sous couverture sédimentaire. Le réservoir karstique d'intérêt correspond ici au Jurassique Supérieur et Jurassique Moyen dans une moindre mesure. La compilation des données géologiques et géophysiques régionales a été nécessaire pour ce travail, incluant : l'harmonisation des données de forages (464 forages) et des cartes géologiques, l'interprétation de profils sismiques réflexion, des mesures de terrain. Cette étude a bénéficié des nouvelles données acquises dans le cadre du projet : deux forages non carottés, le retraitement d'anciennes lignes sismiques, l'acquisition d'un profil sismique réflexion, l'acquisition de données en sismique passive, l'acquisition de mesures gravimétriques et électromagnétiques.

Dans ce rapport, une attention particulière est portée à la différence entre données disponibles avant le projet et les nouveaux résultats apportés par la modélisation 3D. Ces nouveaux résultats incluent : la construction d'un schéma structural, d'une carte géologique synthétique, des coupes structurales, la chronologie d'activité des failles le long de la marge proximale du Golfe du Lion, les cartes d'anomalie gravimétrique résiduelle en Languedoc, la cartographie du toit du Jurassique (sismique passive), et enfin la corrélation entre les domaines terre et mer à partir de l'interprétation des profils sismiques réflexion.

Les données de surface et de forages sont harmonisées par rapport à la pile stratigraphique établie pour la modélisation 3D. L'ensemble de données permet d'établir le schéma structural du secteur Montpellier-Sète-Thau et des coupes structurales de référence pour la construction du modèle 3D sous GeoModeller. Même si on présente uniquement les résultats finaux ici, il s'agit d'une modélisation pas à pas des différentes unités stratigraphiques (13) et des failles (24), par secteur et depuis les unités les plus jeunes jusqu'aux plus anciennes. Le défi majeur de ce modèle 3D est la complexité du réseau de faille comprenant le chevauchement pyrénéen de Montpellier, des failles normales pré-pyrénéennes et des failles normales de l'extension oligocène (ouverture du Golfe du Lion). De plus, les différentes failles s'enracinent dans le socle paléozoïque, le Trias (niveau de décollement régional) ou le Lias calcaire (niveau de décollement local), et elles se connectent entre elles en surface et/ou en profondeur. La force de ce modèle est la réalité géologique apportée par la complexité du réseau de failles, et notamment les écailles syn-tectoniques en relation avec les chevauchements pyrénéens. Les unités allochtones et autochtones, de part et d'autre du chevauchement de Montpellier, sont modélisées dans une seule pile stratigraphique sous GeoModeller. Cela rend le modèle facilement compréhensible et modifiable par d'autres utilisateurs.

La mise en cohérence des unités stratigraphiques et des failles est vérifiée en comparant la réponse gravimétrique du modèle avec les données gravimétriques mesurées (anomalie résiduelle). Le résultat final respecte les principales variations gravimétriques même si certaines incohérences persistent et ne révèlent pas forcément des erreurs du modèle 3D. Ces incohérences peuvent être expliquées par les incertitudes liées au calcul d'anomalie gravimétrique résiduelle ou encore aux valeurs de densité interprétées au sein des unités.

Les éléments du modèle géologique obtenu sont exportés sous forme de grilles 3D ou de mailles 2D afin de cartographier les unités et les compartiments du réservoir karstique. Les coupes générées à partir du modèle 3D permettent de : (1) prédire les résultats du forage carotté dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU ; (2) proposer un nouveau modèle conceptuel des différentes eaux souterraines en milieu côtier. Le chevauchement pyrénéen de Thau est un bon candidat pour la remontée de fluides thermaux basse température à Balaruc-les Bains. En complément des analyses géochimiques acquises dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU, le modèle 3D permet de soutenir l'hypothèse d'une remontée thermique : (1) depuis le socle (à environ 2 000 m de profondeur) ou ; (2) depuis la partie profonde du réservoir karstique. Ainsi, le modèle 3D apporte de nouvelles contraintes géométriques du sous-sol et des réservoirs karstiques pour mieux comprendre des écoulements souterrains en milieu côtier.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Principes de modélisation 3D avec le GeoModeller.....	13
3. Zone d'étude et emprise du modèle 3D	15
4. Compilation des données existantes et nouvelles acquisitions.....	17
4.1. FORAGES	17
4.1.1. Forages existants	17
4.1.2. Forages récents	19
4.2. CAMPAGNES DE SISMIQUE RÉFLEXION.....	20
4.3. COUPES STRUCTURALES EXISTANTES	24
5. Nouveaux résultats et données géophysiques	27
5.1. CARTE GÉOLOGIQUE SYNTHÉTIQUE ET CHRONOLOGIE DES FAILLES	27
5.2. CORRÉLATION ENTRE LES PRINCIPAUX FORAGES PROFONDS.....	29
5.3. ANOMALIE GRAVIMÉTRIQUE RÉSIDUELLE.....	30
5.4. INTERPRÉTATION DES PROFILS SISMQUES REFLEXION.....	33
5.5. SISMIQUE PASSIVE	36
6. Construction et éléments du modèle 3D	41
6.1. MNT ET CARTES GÉOLOGIQUES.....	41
6.2. DONNÉES LITHOSTRUCTURALES DE SURFACE.....	42
6.3. ÉTABLISSEMENT DE LA PILE LITHOLOGIQUE	43
6.4. IMPORTATION DES DONNÉES DE FORAGES	44
6.5. COUPES GÉOLOGIQUES DE RÉFÉRENCE.....	45
7. Résultats du modèle géologique 3D	49
7.1. MODÉLISATION DU RÉSEAU DE FAILLES	49
7.1.1. Le chevauchement de Montpellier	51
7.1.2. Le chevauchement de Thau.....	51
7.1.3. Nord du chevauchement de Montpellier.....	51
7.1.4. Secteur Causse d'Aumelas.....	52
7.1.5. Secteur massif de la Gardiole	52
7.1.6. Bordure Est.....	53

7.2. MODÉLISATION DES FORMATIONS	58
7.3. VÉRIFICATION DES FORAGES	60
7.4. CARTOGRAPHIE 3D ET 2D.....	61
7.5. RÉPONSE GRAVIMÉTRIQUE DU MODÈLE.....	65
7.6. FORCES ET LIMITES DU MODÈLE 3D	69
7.6.1. Modélisation de la pile lithologique en lien avec les chevauchements pyrénéens	69
7.6.2. Modélisation des écaïlles syn-tectoniques	69
7.6.3. Segmentation des interfaces à la terminaison des failles « finies »	70
7.6.4. Variations importantes d'épaisseurs des formations	70
8. Livraison et perspectives d'exploitation du modèle	73
8.1. EXPORTATION DES DONNÉES SOUS MARTHE.....	73
8.2. EXPORTATION DE GRILLES DE RÉSISTIVITÉ	73
8.3. INVERSION GRAVIMÉTRIQUE	74
8.4. PRÉDICTION DU FORAGE CAROTTÉ	75
8.5. RÉVISION DE LA GÉOMÉTRIE DU SOUS-SOL ET DES MODÈLES CONCEPTUELS EN HYDROGÉOLOGIE	76
8.6. VALORISATION DES RÉSULTATS	77
9. Conclusion.....	79
10. Bibliographie	81

Liste des figures

Figure 1 : A : Méthode de modélisation géologique par interpolation de champ de potentiel : points de passage et de données d'orientation (1), interfaces géologiques correspondant aux surfaces d'isovaleur du potentiel (2), intégration de fonctions de dérive discontinues pour la modélisation des failles (3) (Lopez et al. 2017).	13
Figure 2 : Extrait de la carte géologique de Montpellier à l'échelle 1/250 000. L'encadré correspond à l'emprise du modèle 3D. Coordonnées en Lambert 93.	15
Figure 3 : Emprise du modèle géologique 3D DEM'EAUX THAU qui recoupe cinq cartes géologiques au 1/50 000 (feuilles de Lodève, Pézenas, Sète, Montpellier et Agde). Coordonnées Lambert 93.	16
Figure 4 : Coupe géologique du forage GS1 à Sète (indice BSS002JDVC) montrant des épaisseurs moindres pour les unités du Jurassique (série condensée).	18
Figure 5 : Interprétation des forages BSS003CGKO à Sète et BSS003CGLI (F15) à Balaruc-les- Bains. Il s'agit de forages non carottés sondés et interprétés par l'entreprise ANTEA.	19

Figure 6 : Compilation des profils sismiques réflexion issus de campagnes d'acquisition et traitement différentes. L'ensemble des profils sismiques permet la corrélation entre les domaines terre et mer.	20
Figure 7 : Carte géologique synthétique dans l'emprise du modèle illustrant la position des profils sismiques réflexion et des forages disponibles. Une partie des profils sismiques sort de l'emprise du modèle 3D mais a donné lieu à interprétation.	22
Figure 8 : Comparaison du profil sismique réflexion F11 avant et après traitement du signal effectué en 2017 dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU.	23
Figure 9 : Profils DEM01 et DEM02 acquis en 2017 (CGG Veritas) dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU. La zone floue et sans donnée correspond au manque d'acquisition à l'extrémité Est de l'étang de Thau. La mauvaise qualité de ces deux images sismiques ne permet pas l'interprétation des structures en profondeur.	23
Figure 10 : Coupe structurale entre le Pic Saint-loup et le massif de la Gardiole (Arthaud & Seguret, 1981).	24
Figure 11 : Coupe régionale orientée nord-nord-est/sud-sud-ouest avec exagération verticale entre la faille des Cévennes et le Cap d'Agde (Arthaud & Laurent, 1995). L'emprise du modèle 3D ne représente qu'une partie (milieu) de cette coupe.	24
Figure 12 : Coupe structurale orientée nord-sud et passant par les chevauchements du Pic Saint-Loup et de Montpellier (Michel Séguret, non publiée).	25
Figure 13 : Coupe structurale orientée nord-nord-ouest/sud-sud-est entre le chevauchement de Montpellier et le massif de la Gardiole (coupe non publiée issu du rapport d'Étienne Legeay, 2012).	25
Figure 14 : Profil sismique H83H interprété (line drawing) et coupe structurale à partir de ce même profil converti en profondeur (Husson, 2013).	25
Figure 15 : Carte géologique synthétique de la zone d'étude réalisée d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Hérault. Les limites géologiques et le tracé des failles majeures font partie des données en entrée du modèle 3D. Seule l'unité dite Bauxite ne fait pas partie du découpage stratigraphique du modèle.	27
Figure 16 : Chronologie d'activation des failles en lien avec les différents événements tectoniques. En rouge : les chevauchements pyrénéens. En bleu : les failles pré-pyrénéennes et oligocènes. Les chevauchements et les failles normales ont des périodes d'activation bien distinctes.	28
Figure 17 : Corrélation entre les forages profonds selon des transects ouest-est et nord-sud (profondeurs exprimées en mètres). Les forages CASTRIES, SAINT-HYPPOLITE-DU-FORT, VIOLS-LE-FORT sont à l'extérieur de l'emprise du modèle. Pour la première fois, le forage géothermique de Sète est pris en compte dans le schéma de corrélations entre les forages du secteur.	30
Figure 18 : Anomalie gravimétrique résiduelle. Les courbes d'isovaleurs sont exprimées en mGal. Les points noirs indiquent la localisation des nouvelles stations. Extrait du rapport BRGM/RP-68318-FR (Coppo et al., 2018).	31
Figure 19 : (Gauche) Anomalie gravimétrique résiduelle à l'échelle régionale (anomalie de Bouguer soustraite de l'anomalie régionale ; voir détails dans le texte). On note des lacunes de données ponctuellement à terre et dans la lagune de Thau, et plus largement en mer. (Droite) Même anomalie gravimétrique résiduelle dans l'emprise du modèle, vue dans GeoModeller.	32
Figure 20 : Anomalie gravimétrique résiduelle (en mGal) avec interprétation des principales « discontinuités gravimétriques » marquées par de forts gradients. Les tirets blancs et noirs marquent la position interprétée des failles normales et des chevauchements respectivement.	33
Figure 21 : Profil sismique H84D interprété. Les bassins syn-rift oligo-aquitaniens sont contrôlés par une faille normale majeure qui s'aplanit et s'enracine dans le Trias (niveau de décollement régional).	34

Figure 22 : Interprétations sismiques de certains profils retraités en 2017 et 2018 dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU.....	34
Figure 23 : Profil sismique LRM34 (domaine marin) interprété. Les bassins tertiaires et les structures de socle sont bien délimités. Les réflecteurs plus profonds (au delà de 2s TWT) pourraient correspondre à d'anciens chevauchements pyrénéens.	35
Figure 24 : (Haut) Vue 3D des profils sismiques interprétés (logiciel Move 3D) sur fond de la carte géologique 1/250 000 et localisation de la ligne sismique composite orientée nord-ouest/sud-est.....	36
Figure 25 : Localisation de la campagne en sismique passive et formations concernées. Dans cette zone, les dépôts du Miocène reposent directement sur les calcaires du Jurassique.....	37
Figure 26 : Démarche pour déterminer un modèle de vitesses des ondes S à partir de la fréquence de résonance, la profondeur du toit du Jurassique connue par forage, et la vitesses des ondes de cisaillements Vs déduite des points d'acquisition à l'aplomb du forage.	38
Figure 27 : (A) Distribution des sites de mesures en sismique passive dont certains forment des profils. Fond de la carte géologique de Sète au 1/50 000. (B) Carte d'altitude (m NGF) du toit du Jurassique (formation « Malm ») réalisée à partir de l'interpolation entre les points de mesures en sismique passive (Bourgeois, 2019).	39
Figure 28 : Coupe orientée N-S entre la source de la Vène et le Mont Saint-Clair (Sète). Cette coupe montre la connectivité des résurgences karstiques et le cheminements de l'eau météorique depuis les sources de la Vène, Issanka et la Vise (Bourgeois, 2019).....	39
Figure 29 : Corrélations des variations des vitesses sismiques issues du profil sismique P5 (Portolano et al., 2005) et les résultats en sismique passive. On montre les vitesses calculées dans cinq forages thermaux recoupant le toit du Jurassique (pointillés bleus). Positionnement du profil sismique P5 et des puits mesurés (encadré noir).....	40
Figure 30 : en haut à gauche : MNT de la zone au pas de 25 m. La bathymétrie du Gofe du Lion, et donc les valeurs négatives d'altitude ne sont pas prises en compte dans ce MNT. En haut à droite : le même MNT une fois intégré dans Geomodeller avec ici exagération verticale. En bas à gauche : extrait de la carte géologique au 1/250 000. En bas à droite : Même carte géologique drapée sur le MNT dans GeoModeller.	41
Figure 31: (Gauche) Distribution des mesures de pendages sur le terrain dans les différentes formations. (Droite) Base des formations et tracé des failles dans la zone d'étude (les triangles pointent vers la direction de pendage). Le tracé des failles (points cerclés) contient aussi une information de pendage, de rayon horizontal, vertical, et de rayon d'influence de la faille.....	42
Figure 32 : Pile lithologique du modèle 3D et relations géométriques retenues entre les séries (« Erode » et « Onlap » dans GeoModeller).	43
Figure 33 : Répartition des forages en carte et vue 3D. Les forages sont inégalement répartis dans l'espace en XYZ. Seuls quatre forages ont une profondeur supérieure à 1 000 mètres.....	44
Figure 34 : Contraintes en surface pour modéliser les formations et les failles (points de passage et orientations). Hormis les données de forages, la majeure partie des contraintes de profondeur sont placées dans les sections annotées de 1 à 6. Les autres sections (traits jaunes) ne contiennent pas de contraintes et servent à la visualisation des résultats de modélisation. Fond géologique au 1/50 000.....	45
Figure 35 : Coupes structurales de référence dessinées en préparation à la modélisation. Bien que les tracés des failles et des limites d'unités soient incertains, ces coupes sont importées dans GeoModeller et apportent des contraintes en profondeur. La modélisation des failles et des interfaces conduit à la modification de ces coupes qui ne sont donc pas finales.	47

Figure 36 : Notion de failles « finie » et « infinies » et relations de recoupement ou non entre failles, dans le logiciel Geomodeller : À gauche, failles « finies » d'Aigle et de Gigan. Leur extension dépend des paramètres R1, R2 et R3 définis par le modélisateur (voir Tableau 5 : Liste des failles et leurs principaux paramètres pour la modélisation.). À droite, les mêmes failles si celles-ci avaient été définies comme « infinies » et faille de Gigan s'arrêtant sur la faille d'Aigle.	49
Figure 37 : Failles modélisées et projetées en surface. Les différentes failles sont regroupées par secteurs : (1) chevauchement de Montpellier, (2) chevauchement de Thau, (3) nord du chevauchement de Montpellier, (4) Causse d'Aumelas, (5) Massif de la Gardiole, (6) Bordure est.....	50
Figure 38 : Modélisation des failles (chevauchement en rouge et failles normales en bleu) dans les coupes 1 et 5.	51
Figure 39 : Vue 3D du réseau de failles depuis le sud-ouest. En rouge les chevauchements pyrénéens et en bleu les failles pré-pyrénéennes et oligocènes.	52
Figure 40 : (A) Résultats cartographiques de la modélisation des limites des formations et des failles. (B) Mêmes résultats avec la visualisation des formations et des failles.....	58
Figure 41 : Coupes de référence modélisées avec mise en évidence des contraintes (points de passages orientés, forages projetés à 500 m). Les interfaces représentent les bases de formations « bottom ». Les couleurs sont les mêmes que celles de la pile lithologique (voir Figure 34 pour la localisation des coupes).	59
Figure 42 : Exemple de coupes 1,4, 5, 6 finales éditées. Les flèches de couleurs différentes correspondent aux différentes générations de failles ayant joué dans la région. (voir les coupes préliminaires de la Figure 35).	60
Figure 43 : (Gauche) Pourcentage des forages en fonction de la distance dans les forages, toutes formations incluses. (Droite) Comparaison entre le forage (forage thermal F15) et le résultat de modélisation au niveau de ce même forage (graduations tous les 10 mètres).	61
Figure 44 : Vue du modèle 3D complet et extraction d'une coupe orientée nord-ouest/sud-est passant par Balaruc-les-Bains.	62
Figure 45 : Vue 3D du toit du réservoir Jurassique. Les surfaces de failles sont laissées apparentes. En rouge : les chevauchements pyrénéens de Montpellier (au nord) et de Thau (au sud).	63
Figure 46 : Cartes isohypses de certaines formations du modèle (bases ou toits). L'échelle d'altitude (mètres NGF) est la même pour toutes les formations.	64
Figure 47 : Cartes isopaques de certaines formations géologiques du modèle. L'échelle d'épaisseur en mètres est la même pour toutes les formations.	65
Figure 48 : Réponse gravimétrique du modèle dans les six coupes de référence (courbe rouge « données modélisées ») et anomalie gravimétrique résiduelle (courbe noire « données mesurées») calculée à partir de l'anomalie de Bouguer et l'anomalie gravimétrique régionale supposée. Les zones où l'écart entre les données modélisées et les données mesurées est importante correspondent à des imprécisions sur la profondeur du socle de forte densité.	66
Figure 49 : (A) Anomalie gravimétrique résiduelle (données mesurées). (B) Réponse gravimétrique du modèle, calculée à partir des mesures de densité dans les différentes formations. (C) « Misfit » correspond à la différence entre les données modélisées et les données réelles. L'échelle de couleur en mGal est la même pour les différentes cartes.	67
Figure 50 : Histogrammes de distribution des valeurs d'anomalies gravimétriques pour (A) les données réelles/anomalie gravimétrique résiduelle, (B) les données modélisées et (C) la différence entre les données modélisées et les données réelles (« misfit »).	68

Figure 51 : Coupe 6 extraite du modèle 3D. Le chevauchement de Montpellier comprend plusieurs segments qui forment des écaïlles syn-pyrénéennes renfermant des marnes et des brèches dites « vitrolliennes ». La modélisation de ces écaïlles n'est pas toujours possible sous GeoModeller car les biseaux entre les failles peuvent aboutir à des géométries aberrantes.	70
Figure 52 : Grille 3D de résistivité de la zone de Balaruc (centre du modèle). Les valeurs de résistivité sont appliquées aux différentes formations jusqu'à 2 000 mètres de profondeur.	74
Figure 53 : Position du futur forage carotté de 650 mètres de profondeur sur une coupe extraite du modèle 3D. La projection du forage F5 à proximité aide à la prédiction des résultats du futur ouvrage.	75
Figure 54 : (Gauche) Coupe conceptuelle passant par la presqu'île de Balaruc-les-Bains et montrant les différentes masses d'eau souterraines. Le réservoir thermal sous la presqu'île serait alimenté par la remontée d'eau profonde le long du chevauchement de Thau (Pétre <i>et al.</i> , 2020). (Droite) Carte géologique du secteur de Balaruc-les-Bains. Le forage carotté est localisé au niveau du site F6.	76

Liste des tableaux

Tableau 1 : Forages profonds (pétroliers et géothermiques) dans la zone d'étude (emprise du modèle) et aux alentours. Les lignes en gras correspondent aux forages dans l'emprise du modèle 3D.	17
Tableau 2 : Compilation des campagnes d'acquisition et de retraitement des profils sismiques réflexion. Ces profils sont ré-interprétés dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU.	21
Tableau 3 : Mesures de densité en laboratoire pour les différentes séries/formations du modèle. Ces valeurs intègrent les mesures existantes dans la zone d'étude (Husson <i>et al.</i> , 2018).	32
Tableau 4 : Vitesses sismiques moyennes des formations issues des données diagaphiques de sonic (foragers de Castries à terre et Calmar en mer).	35
Tableau 5 : Liste des failles et leurs principaux paramètres pour la modélisation.	54
Tableau 6 : Affectation des séries par les failles. Les cases en gris foncé correspondent aux séries affectées par les failles. F : faille ; Chvt : chevauchement ; mtp : Montpellier.	55
Tableau 7 : Relations entre les failles. Les cases en gris foncé indiquent que les failles de la première colonne s'arrêtent sur les failles indiquées à droite, dans les autres colonnes du tableau. Les cases avec un tiret indiquent qu'une faille ne peut être liée à elle-même.	57
Tableau 8 : Résistivité moyenne et écart-type des formations calculés à partir des données de diagaphies disponibles dans la région. Toutes les formations du modèle se sont documentées en diagaphies.	74
Tableau 9: Compilation des forages importés dans GeoModeller	93

Liste des annexes

Annexe 1 : Compilation des forages importés dans GeoModeller	83
Annexe 2 : Projet DEM'EAUX Thau - Infolettre	95

1. Introduction

Le projet de recherche DEM'EAUX THAU, qui a débuté en juillet 2017, vise à mieux comprendre l'hydrosystème dans le secteur du Bassin de Thau (Hérault) et à développer un outil de gestion des eaux souterraines à l'échelle régionale. Ce projet scientifique pluridisciplinaire implique la caractérisation de la géologie, l'hydrogéologie et la géochimie de cet hydrosystème, sur un territoire soumis : i) à des enjeux économiques importants (croissance démographique, thermalisme, conchyliculture, pêche, tourisme) ; ii) à la fragilité de l'équilibre entre les différentes ressources en eaux souterraines (comme les phénomènes d'intrusion d'eau marine) ; iii) à la complexité du comportement des différents réservoirs. Au-delà des questions sociétales posées par les enjeux d'approvisionnement d'une population croissante, de conflits d'usage, de vulnérabilité ou encore de salinisation, les réservoirs karstiques profonds sont mal compris et les questions scientifiques sont multiples. Notamment, dans la zone côtière de Balaruc-les-Bains où convergent des eaux météoriques, thermales, marines, et où il s'agit de préciser quelles sont les interactions possibles entre les réservoirs karstiques profonds et superficiels ?

Le BRGM pilote ce projet de recherche. Les trois autres partenaires opérationnels du projet sont les laboratoires Géosciences Montpellier, Hydrosiences Montpellier et l'entreprise Synapse. Ce projet est financé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, l'État et la Région (CPER), l'Europe (FEDER), Montpellier Méditerranée Métropole, la ville de Balaruc-les-Bains, le SMBT (Syndicat Mixte Balaruc-Thau) ainsi que les partenaires opérationnels.

La partie « Géologie » du projet est focalisée sur la construction d'un modèle géologique 3D (avec le logiciel GeoModeller) dans le secteur de Balaruc et de l'étang de Thau. Afin de répondre au mieux à la problématique des réservoirs karstiques profonds dans ce secteur, il a été nécessaire de travailler à l'échelle régionale pour comprendre les structures géologiques. La compilation et l'acquisition de nouvelles données géologiques et géophysiques couvrent la zone de Montpellier-Sète et de l'étang de Thau, ainsi qu'une partie du domaine marin du Golfe du Lion. Il s'agit ensuite de mettre en cohérence 3D les objets géologiques sur l'ensemble de la zone d'étude grâce à la modélisation.

Les principaux objectifs de ce modèle géologique 3D sont les suivants :

- préciser la géométrie 3D des principales formations géologiques (extension latérale, profondeur, épaisseur) et les différents blocs structuraux (extension latérale/verticale, direction/pendage et mouvements relatifs) jusqu'à 5 000 m de profondeur. Une attention particulière est attachée à la modélisation du chevauchement de Montpellier et les relations entre les failles, ainsi que les unités géologiques formant le réservoir karstique et sa couverture sédimentaire tertiaire et quaternaire ;
- illustrer et comprendre les structures géologiques à partir de coupes, de cartes (isohypses, isopaques) et de vues 3D. Le modèle final permet de générer des coupes dans toutes les directions et de donner l'information géologique en tout point du volume 3D. On focalise ensuite sur la zone de Balaruc-les-Bains pour répondre aux problématiques liées à la géométrie des réservoirs karstiques ;
- simuler la réponse gravimétrique du modèle géologique 3D et comparer avec les données gravimétriques afin d'améliorer le modèle et discuter sa validation.

La construction du modèle 3D implique la compilation des données géologiques et géophysiques. Ce rapport fait suite au rapport BRGM/RP-68483-FR (Ladouche *et al.*, 2019) dans lequel était détaillé le contexte géologique régional, la compilation des données existantes, ainsi que les premières données acquises par le projet DEM'EAUX THAU. La bonne compréhension de la géologie régionale est essentielle à la construction du modèle 3D. Une des difficultés est de hiérarchiser les données et de comprendre la complexité géologique à partir des structures majeures, et ce sans altérer les spécificités à l'échelle kilométrique (plissements, variations d'épaisseurs, segmentation des unités par les failles, etc...). Avant de détailler la construction du modèle 3D, on présente les données cartographiques, les forages harmonisés, ainsi que les nouvelles données acquises dans le cadre du projet et qui ont permis de dessiner des coupes structurales à travers la zone d'étude. L'interprétation des profils sismiques permet de contraindre la géométrie des unités et des failles en profondeur. Les données de terrain permettent de caler la géométrie des unités en surface, et les données de forages aident au calage des différentes interfaces en profondeur.

La construction du modèle 3D fait partie d'un travail de post-doctorat (Romain Hemelsdaël) à l'Université de Montpellier, et il représente plusieurs mois de travail en collaboration avec le BRGM. Dans un souci de rigueur et de transparence, ce rapport décrit les étapes de construction du modèle et les choix effectués pour obtenir une cohérence 3D des données. On présente les structures et les unités sédimentaires en globalité en insistant sur les forces et les limites du modèle.

2. Principes de modélisation 3D avec le GeoModeller

La modélisation géologique 3D du secteur ouest du « Pli de Montpellier » a été réalisée à partir du logiciel GeoModeller. Il s'agit d'un logiciel développé au BRGM en 1995, puis commercialisé et co-développé par Intrepid Geophysics à partir de 2005 (<http://www.geomodeller.com>). Cet outil de modélisation 3D permet notamment de construire des objets géologiques complexes en trois dimensions (plis, failles, formations inverses, intrusions, etc.) à partir de données ponctuelles, hétérogènes et irrégulièrement réparties dans l'espace. Il vise à obtenir une interprétation géométrique et géologique 3D cohérente basée sur l'interpolation des surfaces géologiques (formations, failles) à partir de données de contraintes en surface (MNT, cartes, mesures structurales de terrain, etc.) et/ou de données de contraintes en profondeur (coupes, forages, pointés sismiques convertis en profondeur).

Dans l'algorithme du logiciel, les interfaces géologiques (limites entre deux formations) sont représentées par des surfaces définies de manière implicite, comme des lieux d'isovaleurs d'un champ scalaire 3D dont les gradients sont contraints par les données d'orientation/pendage de ces surfaces et leurs points de passage (Figure 1). Le champ est alors obtenu par co-krigeage universel de ces données (interpolation multivariable). L'utilisation des gradients du champ scalaire 3D interpolé est assimilé à un champ de potentiel et la méthode a été qualifiée de méthode de « modélisation géologique par champ de potentiel » (Lajaunie et al., 1997).

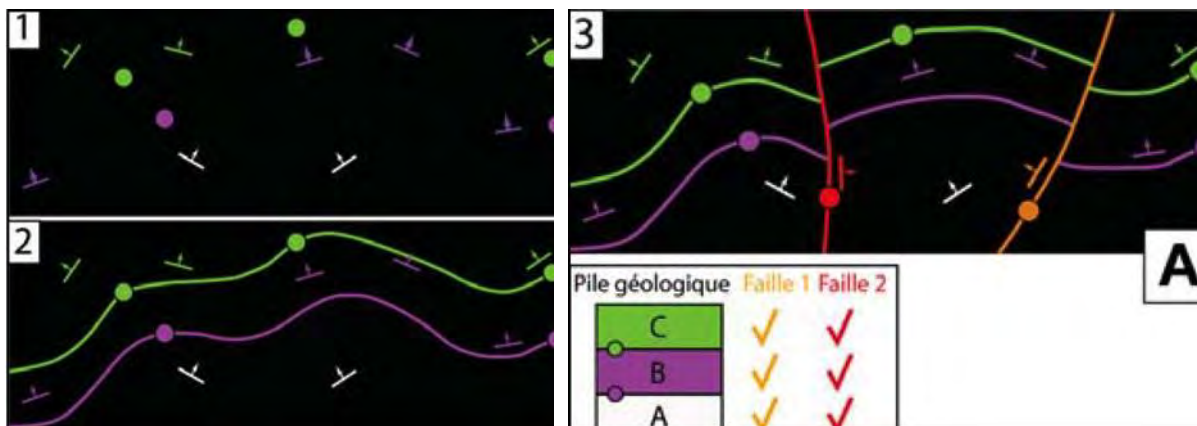


Figure 1 : A : Méthode de modélisation géologique par interpolation de champ de potentiel : points de passage et de données d'orientation (1), interfaces géologiques correspondant aux surfaces d'isovaleur du potentiel (2), intégration de fonctions de dérive discontinues pour la modélisation des failles (3) (Lopez et al. 2017).

Les points de passage des interfaces géologiques correspondent aux contours cartographiques des formations et des failles, observés ou interprétés en surface, mais aussi à leurs limites dans les forages ou interprétés dans les coupes en profondeur. Les données d'orientation/pendage correspondent aux mesures structurales des formations et failles, relevées sur le terrain ou interprétés dans les coupes.

La modélisation géologique des formations dans Geomodeller nécessite d'établir une « pile lithologique », définissant l'ordre chronologique dans lequel se superposent les unités lithostratigraphiques et les relations géométriques qu'elles ont entre elles. Pour ce faire, l'utilisateur peut choisir s'il travaille en « bottom » ou « top », c'est-à-dire si les interfaces modélisées correspondent au mur (base) ou au toit (sommet) des formations géologiques.

Conditionné par ce choix, le modélisateur attribuera alors à ces interfaces une fonction « *onlap* » ou « *erode* » qui va contrôler respectivement la relation de « superposition » (type dépôt) ou de « recoupement » (type érosion ou intrusion) des interfaces entre elles. La pertinence de regrouper ces formations dans une seule et même série est ensuite évaluée. La notion de série dans l'outil de modélisation désigne une ou plusieurs formations dont le style de mise en place ou de déformation est similaire. Lorsque plusieurs formations sont comprises dans une même série, elles partagent le même champ de potentiel. Un même champ de potentiel permet donc de modéliser des formations avec des géométries proches. La relation « *onlap* » ou « *erode* » attribuée à une série s'applique à l'ensemble des formations contenues dans la série. De la même façon, les failles affectant une série, affectent l'ensemble des formations de cette série.

La modélisation des failles consiste à modéliser l'interface de ces failles comme une discontinuité introduite dans les champs de potentiel. L'interpolation de la faille est générée de la même manière que pour les interfaces géologiques, c'est-à-dire à partir des points de contraintes que sont les points de passage et les données d'orientation/pendage de la faille. En revanche, la discontinuité de type « faille » dans le champ de potentiel est définie selon les caractéristiques suivantes : (1) ses dimensions avec les paramètres de failles dites « finies » ou « infinies », (2) ses relations avec les séries (elle affecte ou non la série), (3) ses relations avec les autres failles (recoupement ou embranchement avec les autres failles). Dans le cas simple d'une faille dite « infinie », la faille recoupe l'ensemble du volume 3D des formations ou séries qu'elle affecte et ne peut pas être recoupée par des failles finies. Dans le cas d'une faille « finie », l'extension verticale, horizontale, et l'influence de la faille sont définies arbitrairement par le modélisateur en fonction de l'interprétation qu'il en fait. Ces notions de failles « finies » et « infinies » seront rappelées lors que la mise en application dans la zone du démonstrateur.

La modélisation 3D réalisée sous Geomodeller permet de mettre en cohérence 3D des données 1D (forages) et 2D (cartes, coupes). La modélisation conjointe des formations et des failles dans Geomodeller, permet ainsi de reconstituer des architectures complexes comme le chevauchement de Montpellier. De plus, les résultats de la modélisation peuvent être interrogés et visualisés sur l'ensemble du volume 3D mais aussi exploités pour d'autres applications avec notamment la possibilité : (1) d'extraire des cartes isohypses ou isopaques ; (2) d'appliquer des propriétés physiques ; (3) d'inverser des données gravimétriques (Calcagno *et al.*, 2008; Guillen *et al.*, 2008).

3. Zone d'étude et emprise du modèle 3D

Avant de commencer l'importation des données, il convient de définir l'emprise du modèle et les formations géologiques à modéliser. Les coordonnées du bloc 3D dans le Geomodeler sont les suivantes :

- Système de projection : Référentiel français Lambert 93 ;
- Unité : mètre ;
- Latitudes : $Y_{min} = 6\,246\,000$; $Y_{max} = 6\,285\,000$, soit 39 km d'extension nord-sud ;
- Longitudes : $X_{min} = 740\,000$; $X_{max} = 767\,000$, soit 27 km d'extension est-ouest ;
- Altitudes : $-5\,000 < Z < 1\,000$; soit 6 km d'extension verticale.

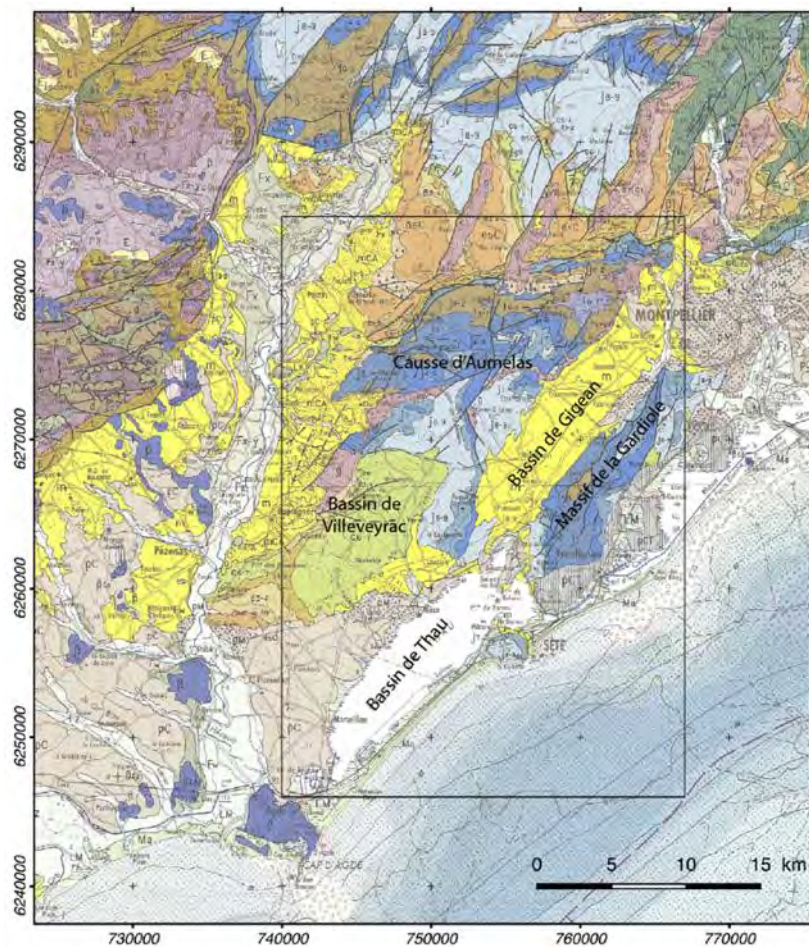


Figure 2 : Extrait de la carte géologique de Montpellier à l'échelle 1/250 000. L'encadré correspond à l'emprise du modèle 3D. Coordonnées en Lambert 93.

L'emprise du modèle 3D s'étend de Montpellier (au nord-est) jusqu'à Agde (au sud-ouest). Elle comprend les entités géologiques suivantes : les Causses d'Aumelas au nord, le Bassin de Villeveyrac à l'ouest, le Bassin de Gigan et le massif de la Gardiole à l'est (Figure 2, Figure 3) ; et elle est limitée au nord par le chevauchement de Montpellier (Figure 15). La partie sud-est de la zone correspond au domaine marin du Golfe du Lion. En profondeur, le modèle s'étend jusqu'à $-5\,000$ m afin d'interpréter l'ensemble des formations jusqu'au paléozoïque.

Le choix de cette emprise est justifié par la position du chevauchement de Montpellier correspondant à la limite nord de l'hydrosystème du Bassin de Thau. La zone d'étude recouvre tout ou partie de cinq cartes géologiques au 1/50 000 (feuilles de Lodève, Montpellier, Pézenas, Sète, Agde). Au total, 410 forages extraits de la banque de données du sous-sol gérée par le BRGM (<https://infoterre.brgm.fr/page/banque-sol-bss>) ont été harmonisés avec les unités du modèle géologique 3D (Figure 3).

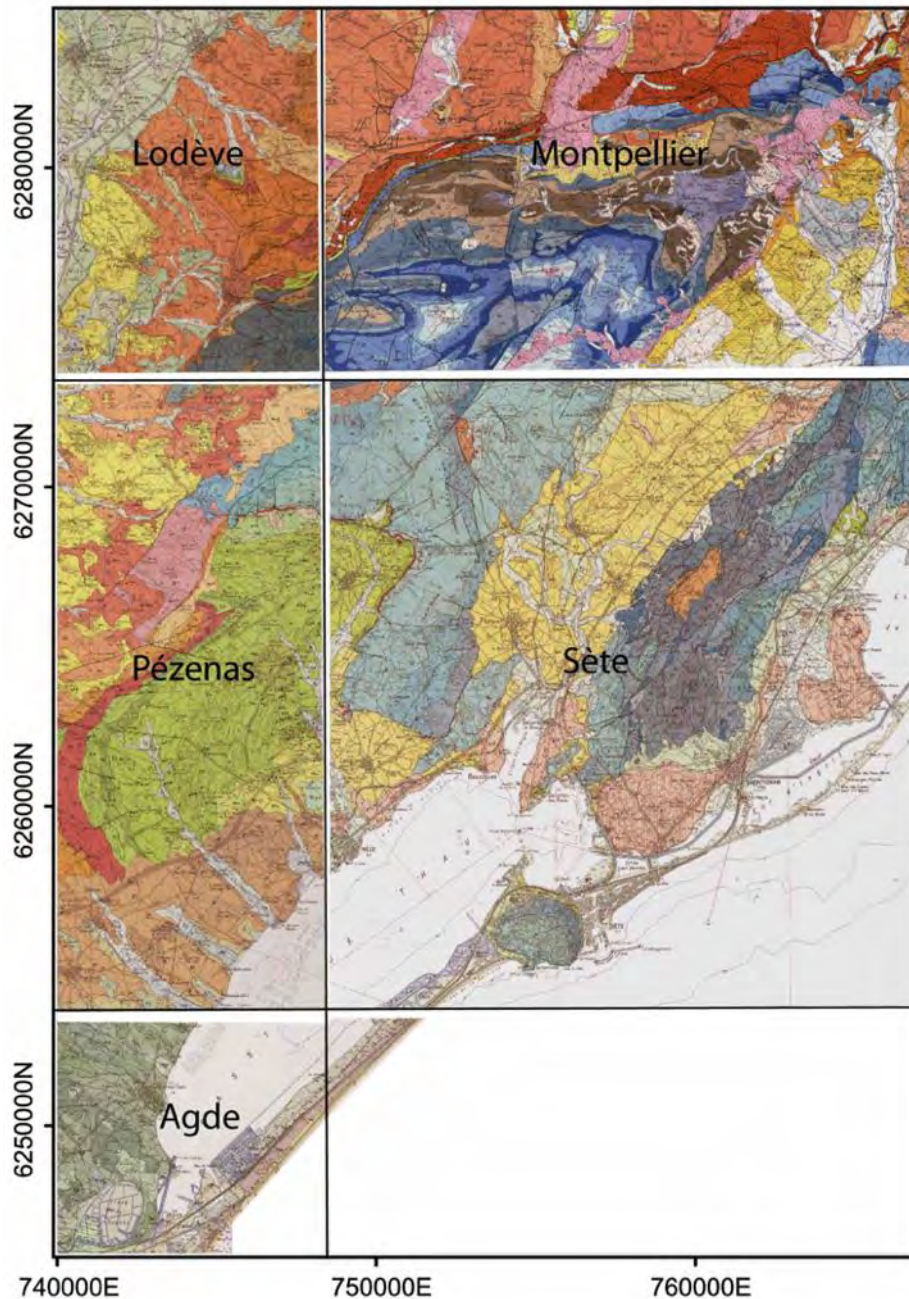


Figure 3 : Emprise du modèle géologique 3D DEM'EAUX THAU qui recoupe cinq cartes géologiques au 1/50 000 (feuilles de Lodève, Pézenas, Sète, Montpellier et Agde). Coordonnées Lambert 93.

4. Compilation des données existantes et nouvelles acquisitions

Les structures majeures et les unités sédimentaires dépassent largement l'emprise du modèle 3D. Comprendre l'histoire géologique dans l'emprise du modèle 3D implique une compilation des données régionales, incluant les forages, les profils de sismique réflexion et les coupes structurales notamment. La compilation des données régionales permet ainsi de cibler sur les spécificités de la zone Montpellier-Sète.

4.1. FORAGES

4.1.1. Forages existants

La zone d'étude comprend quatre forages pétroliers profonds : MURVIEL, GARDIOLE, SAINT-BAUZILLE-DE-LA-SYLVE, MURVIEL. Seul le forage GARDIOLE atteint le socle paléozoïque. D'autres sondages pétroliers localisés en dehors de la zone d'étude aident à contraindre la géométrie des structures profondes, l'épaisseur des unités stratigraphiques et leurs variations. Les forages CALMAR et AGDE MARITIME sont localisés dans le golfe du Lion, à environ 20 km de la ligne de rivage. Le forage en mer de SIROCCO est localisé à environ 40 km de Sète. Les forages CASTELNAU 1-2-3-4, PEZENAS 1-2-3, FLORENSAC et VALENSAC sont situés le long de l'Hérault, à moins de 5 km à l'ouest de la zone d'étude. Les forages CASTRIES et VIOLS-LE-FORT sont aussi situés en dehors de l'emprise du modèle (à l'est et au nord respectivement). Quelques forages profonds (> 900 mètres de profondeur) ont été réalisés pour l'exploration géothermique (GS1, LA CASTILLONNE).

Nom du forage	Numéro BBS / BEPH	X (L93)	Y (L93)	Prof. totale
<u>Forages pétroliers :</u>				
Gardiole	18-1077	759973	6265007	1995,5
Murviel	18-1162	760092	6278584	1443,3
Castelnau 1	18-0999	735621	6260974	1156,0
Castelnau 2	18-1023	736211	6260741	3806,4
Castelnau 3	18-1121	734996	6263041	2605,4
Castelnau 4	18-1160	735709	6261040	762,6
Pezenas 1	18-1028	735079	6261545	688,0
Pezenas 2	18-1029	733187	6262923	783,3
Pezenas 3	18-1047	735337	6263267	684,1
Florensac	18-1136	735747	6250880	379,1
Castries	18-1248	777205	6287736	4444,9
St Bauzille de la Sylve	18-1255	744936	6280263	1436,1
Viols le Fort	18-1256	754025	6292244	2382,5
Valensac	18-1263	737694	6251082	4578,5
Sirocco	18-1295	789589	62322811	1396,0
Agde Maritime	18-1346	741703	6225321	1410,0
Calmar	18-1344	761235	6234277	3468,8
<u>Forages géothermiques et autres :</u>				
GS1-Sète	002JDVC	754061	6256978	976
La Castillonne	002JCBJ	743277	6259813	1487

Tableau 1 : Forages profonds (pétroliers et géothermiques) dans la zone d'étude (emprise du modèle) et aux alentours. Les lignes en gras correspondent aux forages dans l'emprise du modèle 3D.

Environ 460 forages interprétés sont issus de la banque du sous-sol du BRGM. Les sondages de la banque du sous-sol du BRGM ont été extraits. Les forages d'une profondeur supérieure à 50 mètres ont été pris en compte. Ces forages sont sélectionnés s'ils documentent au moins une limite stratigraphique en plus de la limite Pliocène-Quaternaire. Bien que la plupart soient peu profonds, ces forages apportent de précieuses informations en subsurface, et notamment le toit du Miocène (surface d'érosion messinienne) et le toit du Jurassique (toit du réservoir karstique).

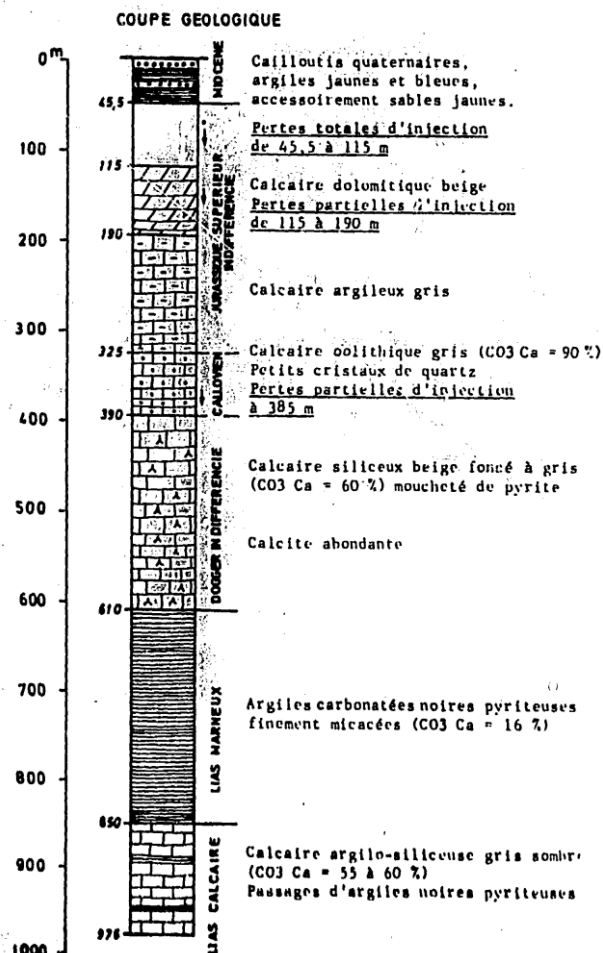


Figure 4 : Coupe géologique du forage GS1 à Sète (indice BSS002JDVC) montrant des épaisseurs moindres pour les unités du Jurassique (série condensée).

Le forage GS1 à Sète traverse la quasi-totalité de la série jurassique et l'unité du Lias calcaire à 850 mètres de profondeur. La faible épaisseur de la série jurassique dans ce secteur permet d'estimer la profondeur du toit du socle à environ 1 200 mètres. Cet ouvrage datant de 1983 n'était jusqu'à présent pas intégré dans les études géologiques du secteur de l'étang de Thau. Pourtant, il représente un élément essentiel à la compréhension du sous-sol et la segmentation du réservoir karstique.

4.1.2. Forages récents

Deux nouveaux forages interprétés à Sète (Stade Michel – BSS003CGKO)) et sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains (F15 - BSS003CGLI) sont disponibles depuis la fin de l'année 2017 (Figure 5). Ces deux forages interprétés atteignent les calcaires du Jurassique. Le forage BSS003CGKO à Sète permet le suivi piézométrique dans le réservoir karstique. Ce forage a fait remonter des eaux thermales à une température d'environ 60 °C. La foration de F15 a été conduite à la demande des thermes de Balaruc pour le captage des eaux thermales.

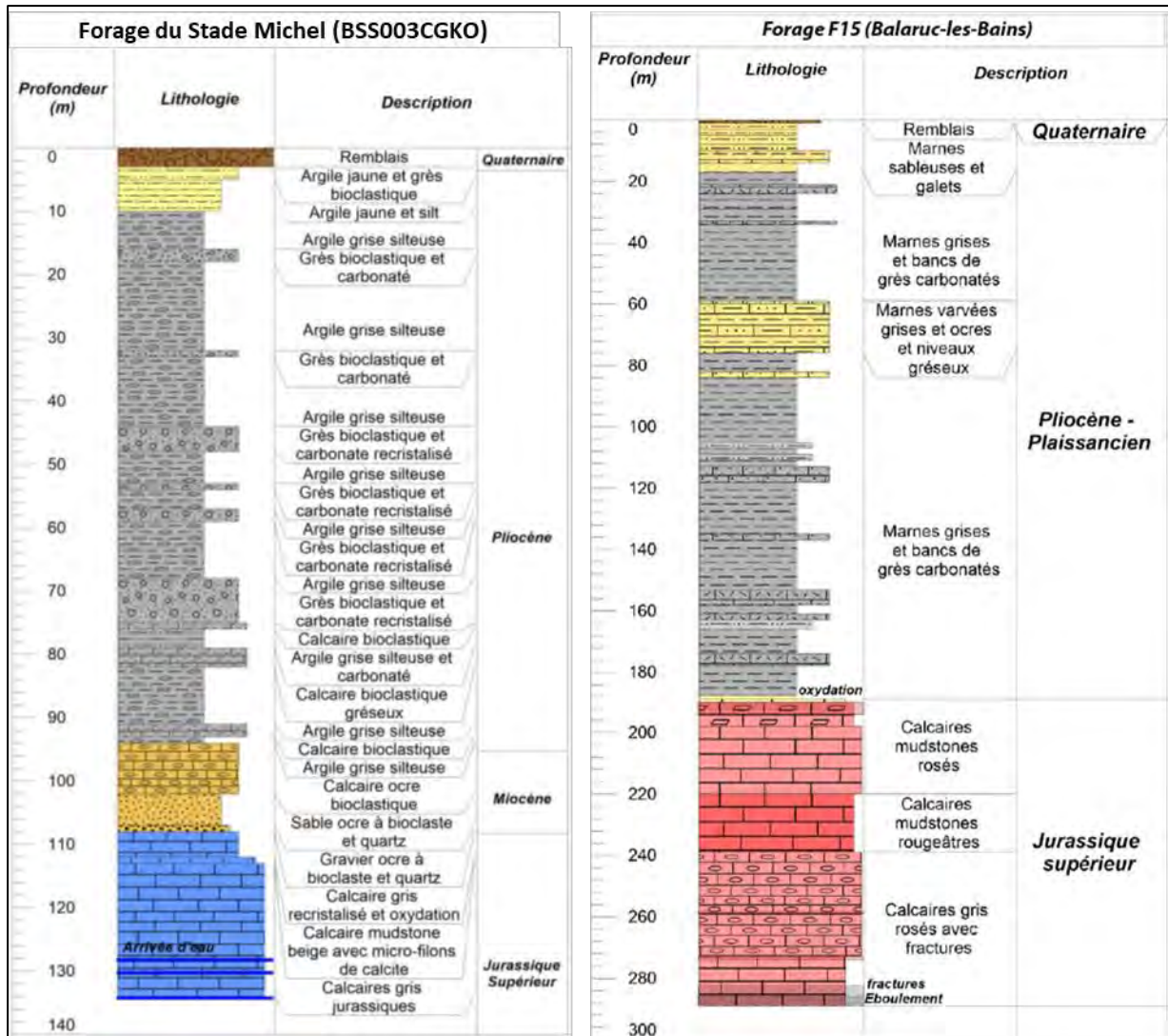


Figure 5 : Interprétation des forages BSS003CGKO à Sète et BSS003CGLI (F15) à Balaruc-les-Bains. Il s'agit de forages non carottés sondés et interprétés par l'entreprise ANTEA.

Ces deux nouveaux forages disponibles révèlent une épaisse série pliocène (Pliocène continental) et la présence d'une paléovallée messinienne dans la partie orientale de l'étang de Thau. Jusqu'à présent, les forages existants montraient que la surface d'érosion messinienne ne dépasse pas - 90 m NGF (Figure 5). Ces nouvelles données sont intégrées au modèle 3D.

Les résultats du forage carotté à Balaruc-les-Bains ne sont pas encore disponibles et feront l'objet d'un autre rapport de résultats à venir.

4.2. CAMPAGNES DE SISMIQUE RÉFLEXION

La Figure 6 montre la localisation des profils sismiques dans l'emprise du modèle. Une partie de ces profils sismiques est localisée en dehors de l'emprise du modèle. Ce jeu de données focalise sur la zone côtière de l'étang de Thau afin de décrire la géométrie des structures (failles) et des bassins à la transition entre les domaines terre et mer. Le Tableau 2 liste les différentes campagnes d'acquisition et de retraitement des profils sismiques utilisés.

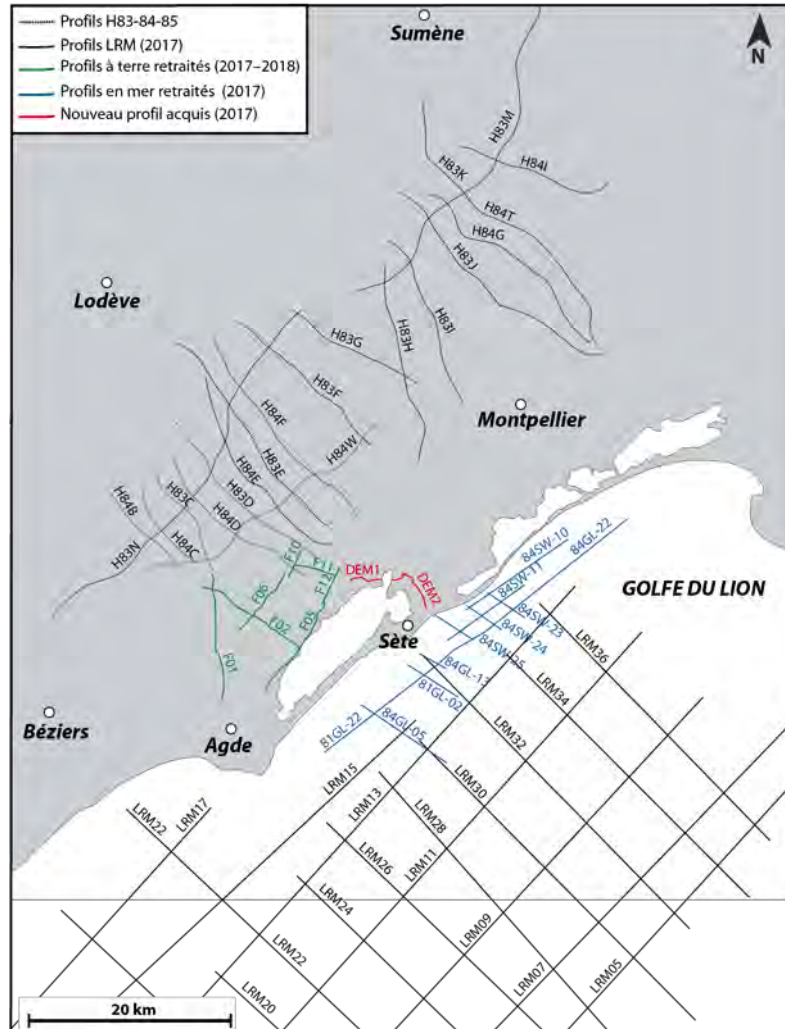


Figure 6 : Compilation des profils sismiques réflexion issus de campagnes d'acquisition et de retraitement différentes. L'ensemble des profils sismiques permet la corrélation entre les domaines terre et mer.

Les profils sismiques à terre comprennent les profils des campagnes Hérault 1983/1984 (Rapport BRGM/RP-56980-FR). Ces acquisitions sismiques sont localisées entre Montpellier et Lodève. Une partie de ces profils (campagne 1983) a été interprétée dans le Bassin de l'Hérault et dans la partie nord montpelliéraine (Benedicto *et al.*, 1996; Maerten & Séranne, 1995). Les profils ont été retraités par le BRGM en 2004, puis en 2007, conduisant à la réinterprétation des structures extensives du Bassin de l'Hérault (Serrano & Hanot, 2005). Des interprétations plus récentes ont été apportées par des travaux de thèse menés à l'Université de Montpellier (Husson, 2013).

Campagne	Terre/Mer	Date d'acquisition	Retraitement (BRGM)	Profils sélectionnés
DEMEAUX THAU F	Onshore	2017		DEM01, DEM02
	Onshore	1963	2017–2018	F01, F02, F05, F06, F10, F11, F12
84SW	Offshore	1984	2017	84SW-10, 84SW-11, 84SW-22, 84SW23, 84SW24, 84SW25
84GL	Offshore	1984	2017	84GL-05, 84GL-13, 84GL-22
81GL	Offshore	1981	2017	81GL-02
H83	Onshore	1983	2007–2008	H83C, H83D, H83E, H83F, H83G, H83H, H83I, H83N, H83M, H83K
H84	Onshore	1984	2007–2008	H84B, H84C, H84D, H84E, H84F, H84G, H84I, H84T, H84W,
LRM	Offshore	?		LRM18, LRM20, LRM22, LRM24, LRM26, LRM28, LRM30, LRM32, LRM34, LRM36, LRM05, LRM07, LRM09, LRM11, LRM13, LRM15, LRM17

Tableau 2 : Compilation des campagnes d'acquisition et de retraitement des profils sismiques réflexion. Ces profils sont ré-interprétés dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU.

L'emprise du modèle 3D est recoupée par 11 profils sismiques : H84-D, H83-D, H84-E, H83-3, H84-F, H83-F, H83-G, H83-H, H83-I (Figure 7). Bien qu'une partie de ces profils soit en dehors de l'emprise du modèle, les profils sont interprétés dans leur intégralité pour contraindre au mieux la géométrie des structures.

Dans le cadre du projet DEM'EAUX Thau, sept lignes sismiques acquises en 1963 (F01, F02, F05, F06, F10, F11 et F12) ont été retraitées par le BRGM (Tableau 2). Les avancées en matière de traitement du signal permettent d'atténuer les bruits sismiques et d'améliorer la résolution des réflecteurs (Figure 8). Ces profils couvrent le Bassin de Villeveyrac et une partie de la vallée de l'Hérault. Après retraitement, la résolution des profils permet l'interprétation des réflecteurs sismiques et des structures jusqu'à environ 2 s TWT.

De la même manière, en 2017, le BRGM a aussi procédé au traitement de neuf lignes sismiques issues des campagnes sismiques (GL et SW ; Tableau 2) acquises en mer dans les années 1981–1984. Après retraitement, la résolution des profils permet l'observation des structures et des faciès sismiques jusqu'à 2 s TWT. Pour les profils 84SW25, 84SW24 et 84SW23 (perpendiculaires au trait de côte), seule les parties nord-ouest de ces profils ont été retraitées et représentées sur nos cartes (Figure 6 et Figure 7).

Deux profils sismique réflexion (DEM1 et DEM2) ont été acquis en 2017 par CGG Veritas dans le cadre du projet DEM'EAUX Thau. Les deux profils orientés est-ouest et nord-nord-ouest/sud-sud-est se croisent au nord de Balaruc-le-Vieux (Figure 7). L'accès à l'étang de Thau n'a pas été autorisé dans le cadre de cette campagne, induisant une perte de l'enregistrement au milieu du profil DEM01 (Figure 9). L'image sismique après traitement est de mauvaise qualité, probablement à cause de la présence des calcaires jurassiques en surface ou à faible profondeur qui absorbent une part importante de l'énergie. Les profils font tout même apparaître des réflecteurs continus jusqu'à 1.5 s TWT environ. Les détails de l'acquisition et les résultats des profils (avant et après migration) sont présentés dans le rapport de mise en œuvre FR42202 rédigé par CGG et le BRGM (Coppo *et al.*, 2018).

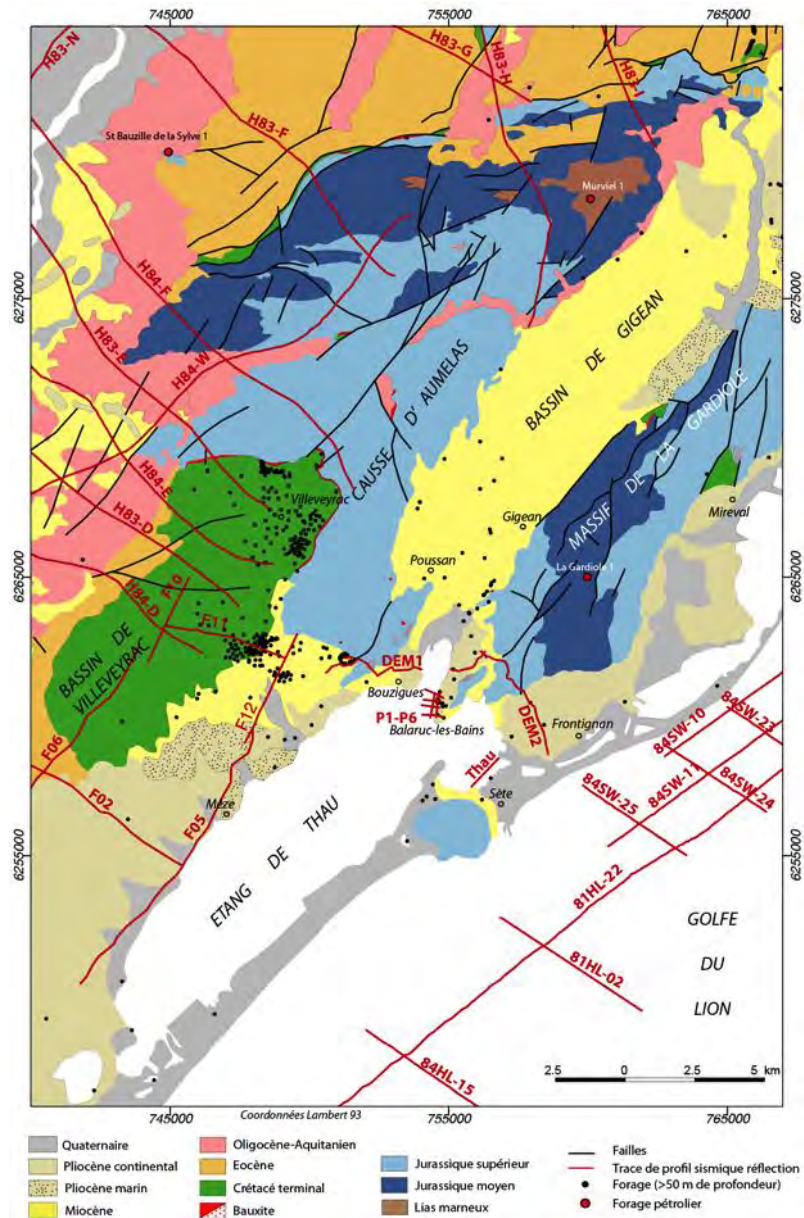


Figure 7 : Carte géologique synthétique dans l'emprise du modèle illustrant la position des profils sismiques réflexion et des forages disponibles. Une partie des profils sismiques sort de l'emprise du modèle 3D mais a donné lieu à interprétation.

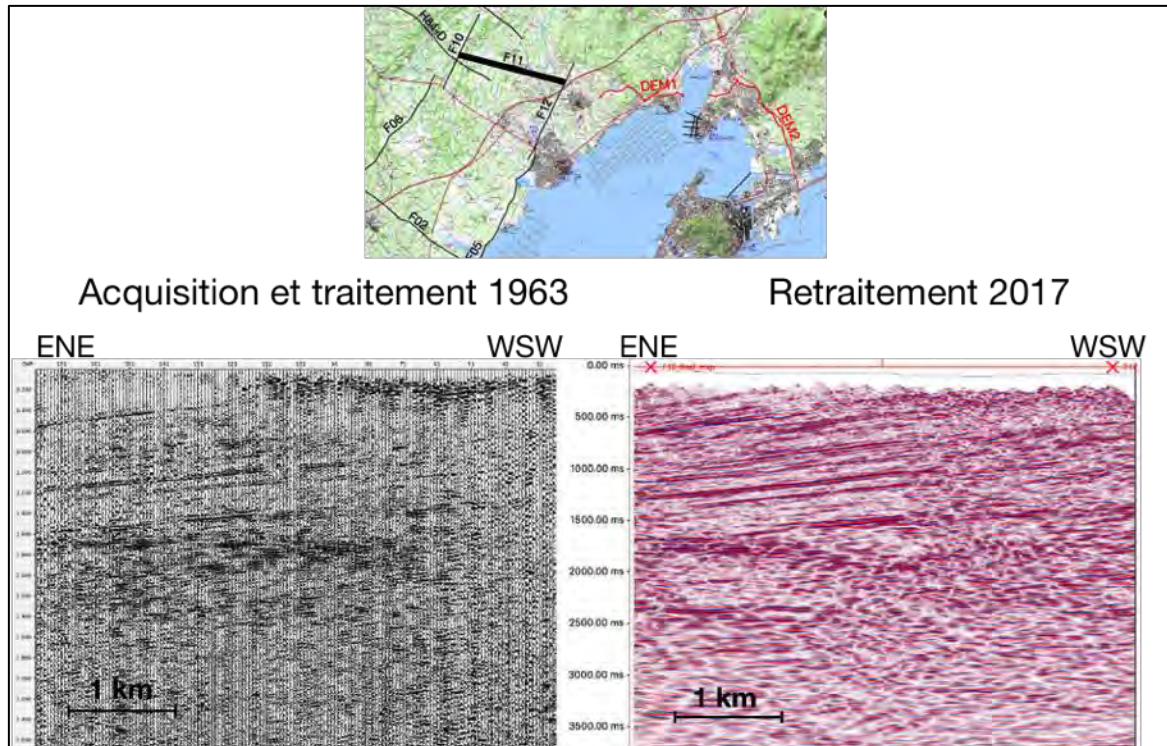


Figure 8 : Comparaison du profil sismique réflexion F11 avant et après retraitement du signal effectué en 2017 dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU.

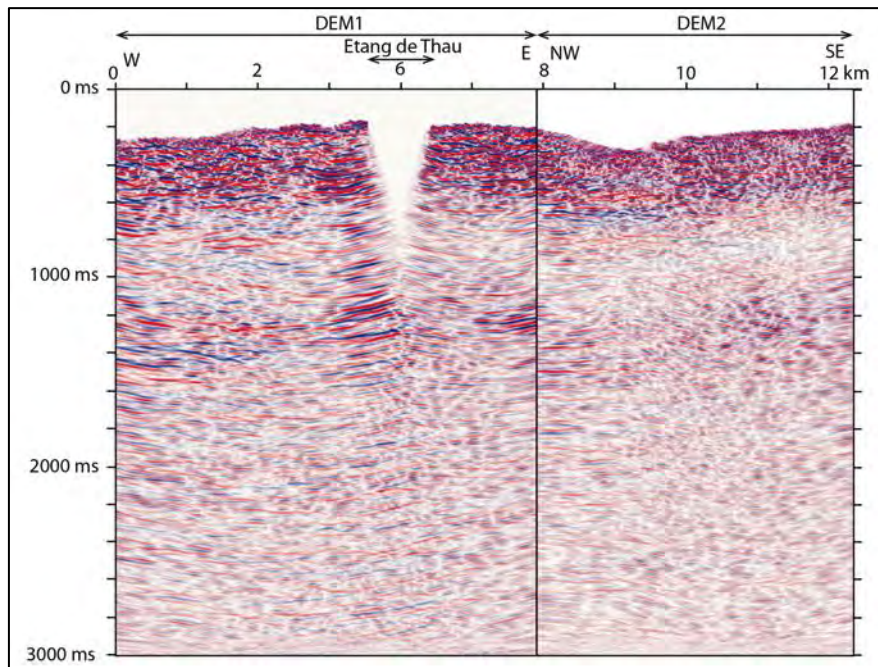


Figure 9 : Profils DEM01 et DEM02 acquis en 2017 (CGG Veritas) dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU. La zone floue et sans donnée correspond au manque d'acquisition à l'extrémité Est de l'étang de Thau. La mauvaise qualité de ces deux images sismiques ne permet pas l'interprétation des structures en profondeur.

4.3. COUPES STRUCTURALES EXISTANTES

Plusieurs coupes structurales sont disponibles dans la littérature, ainsi que dans les fonds documentaires non publiés de l'Université de Montpellier (rapports des projets de master notamment). Certaines de ces coupes sont présentées ci-dessous. Ces coupes montrent que la géométrie des chevauchements de Montpellier et Pic Saint-Loup est discutée depuis au moins les années 80. La position du chevauchement de Montpellier en profondeur et la relation avec le socle paléozoïque varient selon les auteurs (Figure 10 à Figure 14). Il n'y a pas non plus de consensus sur la signification du massif de la Gardiole en surface.

Ces coupes ne peuvent pas être directement utilisées pour la modélisation pour plusieurs raisons. D'une part, elles soutiennent différents modèles cinématiques des failles, impliquant des géométries différentes. D'autre part, la localisation de certaines de ces coupes est incertaine. De nouvelles coupes sont donc proposées en accord avec notre découpage stratigraphique, et le schéma structural dans l'emprise du modèle 3D (voir ci-dessous).

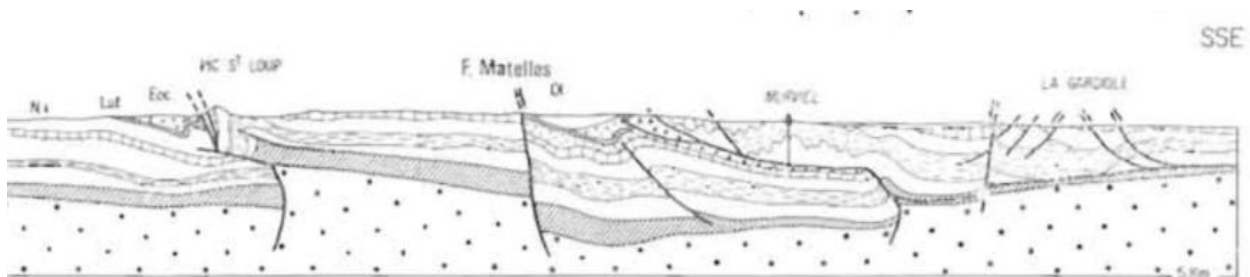


Figure 10 : Coupe structurale entre le Pic Saint-loup et le massif de la Gardiole (Arthaud & Seguret, 1981).

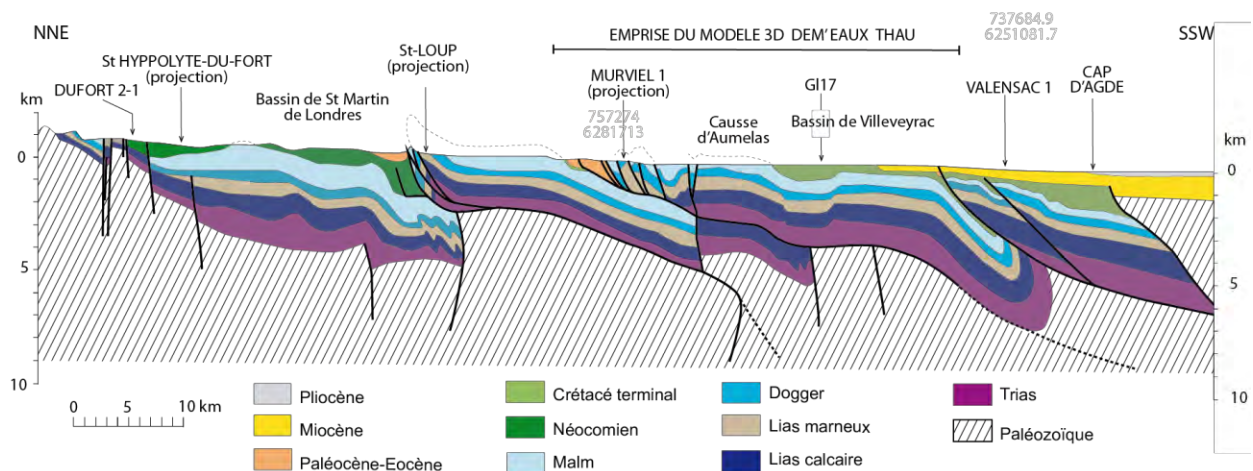


Figure 11 : Coupe régionale orientée nord-nord-est/sud-sud-ouest avec exagération verticale entre la faille des Cévennes et le Cap d'Agde (Arthaud & Laurent, 1995). L'emprise du modèle 3D ne représente qu'une partie (milieu) de cette coupe.

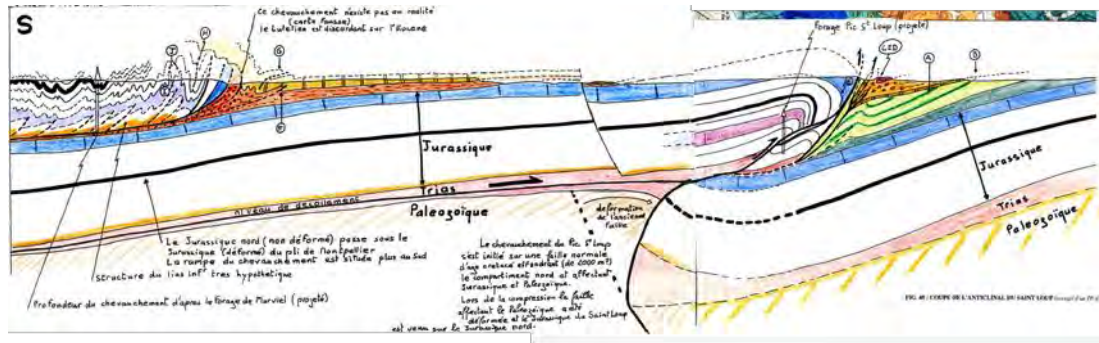


Figure 12 : Coupe structurale orientée nord-sud et passant par les chevauchements du Pic Saint-Loup et de Montpellier (Michel Séguret, non publiée).

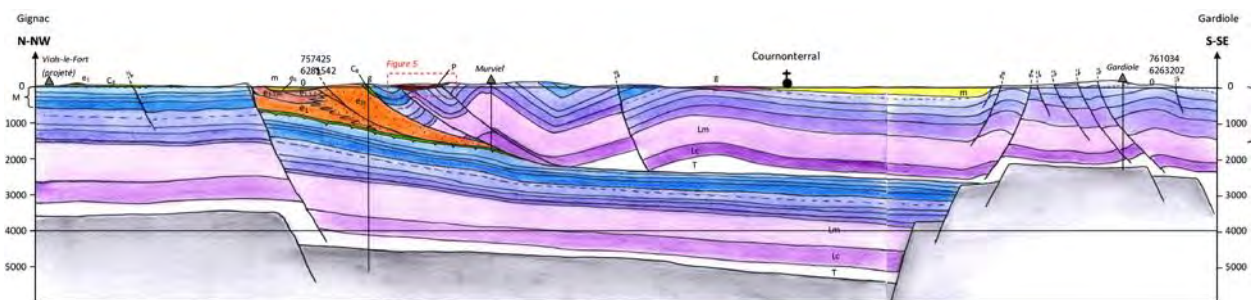


Figure 13 : Coupe structurale orientée nord-nord-ouest/sud-sud-est entre le chevauchement de Montpellier et le massif de la Gardiole (coupe non publiée issu du rapport d'Étienne Legeay, 2012).

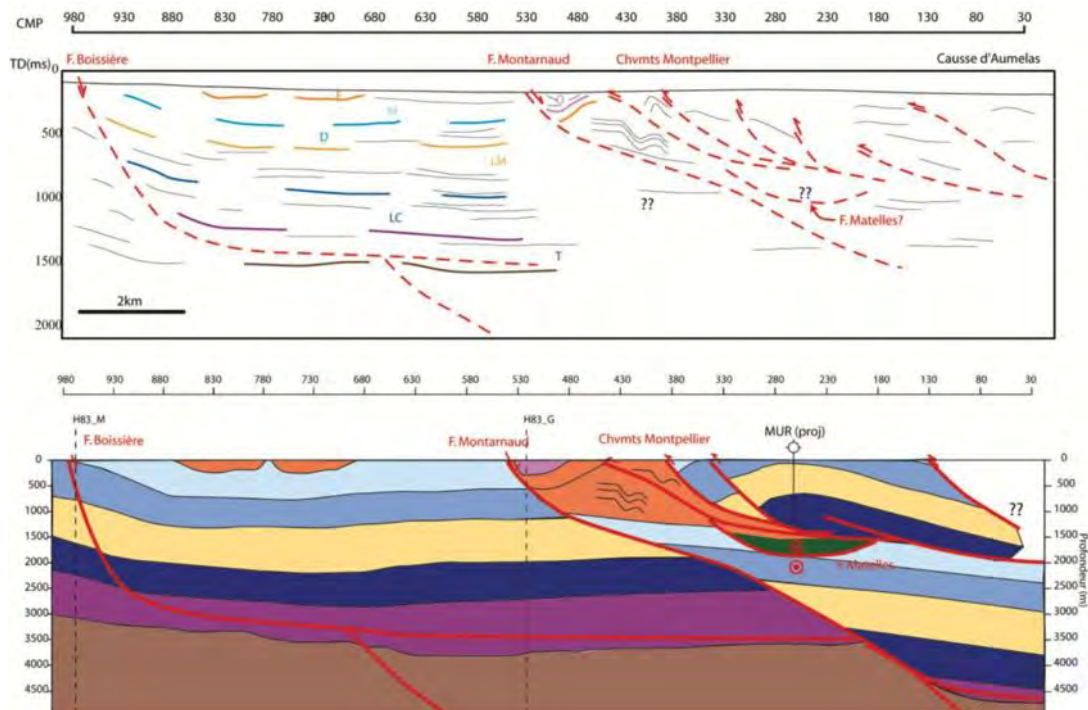


Figure 14 : Profil sismique H83H interprété (line drawing) et coupe structurale à partir de ce même profil converti en profondeur (Husson, 2013).

5. Nouveaux résultats et données géophysiques

5.1. CARTE GÉOLOGIQUE SYNTHÉTIQUE ET CHRONOLOGIE DES FAILLES

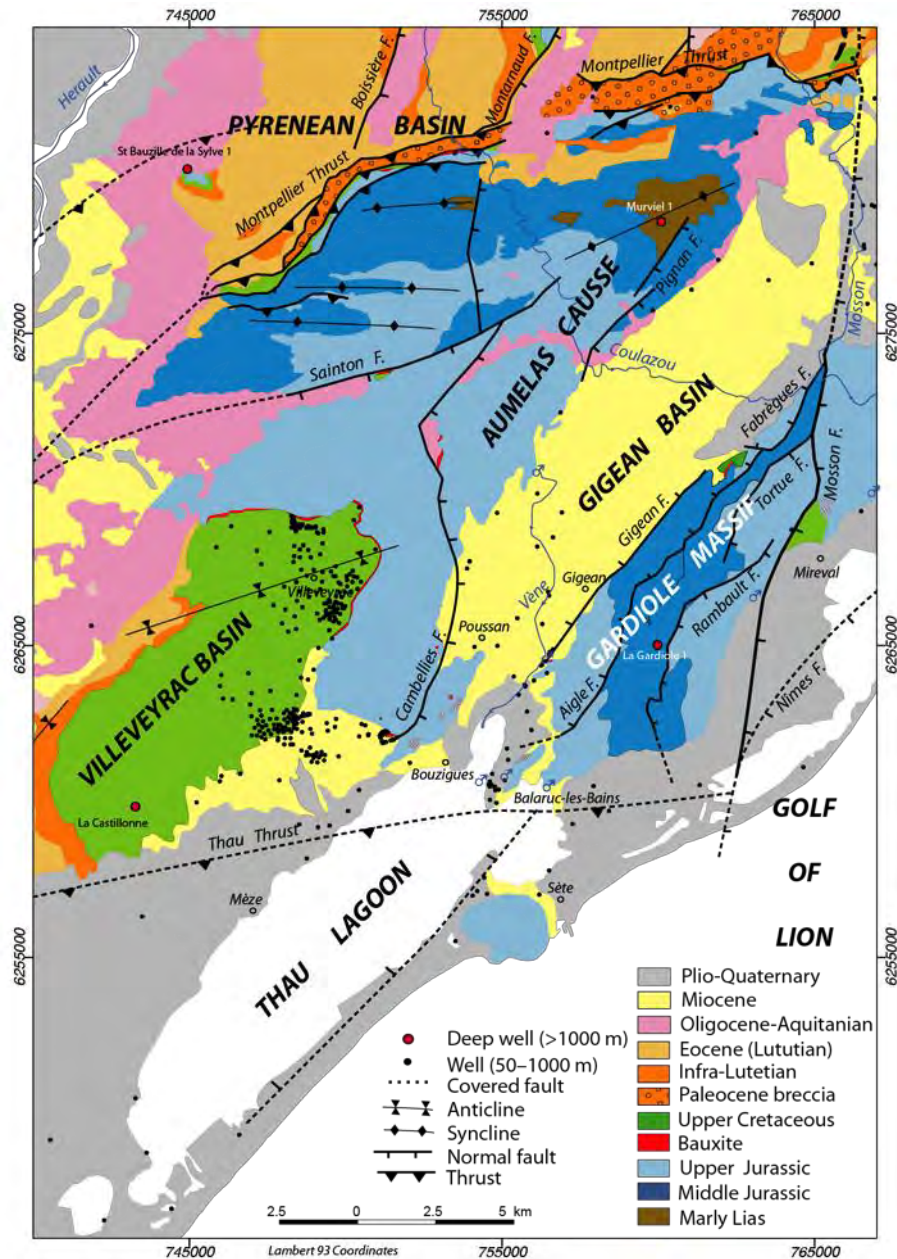


Figure 15 : Carte géologique synthétique de la zone d'étude réalisée d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Hérault. Les limites géologiques et le tracé des failles majeures font partie des données en entrée du modèle 3D. Seule l'unité dite Bauxite ne fait pas partie du découpage stratigraphique du modèle.

À partir des cartes harmonisées du BRGM, une nouvelle carte géologique synthétique est présentée en utilisant le découpage stratigraphique établi pour cette étude (Figure 15). Cette carte regroupe les unités lithostratigraphiques en lien avec les événements géologiques dans la région. Elle inclut aussi les failles majeures qui seront modélisées. La carte géologique synthétique montre les unités suivantes : Lias marneux, Jurassique Moyen (Dogger), Jurassique Supérieur (Malm), Bauxite, Crétacé Supérieur, Paléocène (infra-Lutétien), Éocène, Oligocène-Aquitainien, Miocène, Pliocène marin, Plio-Quaternaire. Le socle paléozoïque, les dépôts du Trias et du Lias calcaire n'affleurent pas dans l'emprise du modèle 3D mais ils font partie de la pile lithostratigraphique afin de documenter la profondeur du socle paléozoïque.

Le choix des intervalles stratigraphiques est basé sur les grands épisodes tectoniques et sédimentaires en Languedoc. La faible épaisseur du niveau de bauxites (maximum 5–10 mètres d'épaisseur) ne permet pas de modéliser cette unité correctement par rapport à la résolution et les dimensions du modèle. Pour la même raison, les dépôts du Pliocène et du Quaternaire sont regroupés en une seule unité. La base de cette unité « Plio-Quaternaire » correspond à la surface d'érosion messinienne (crise de salinité messinienne).

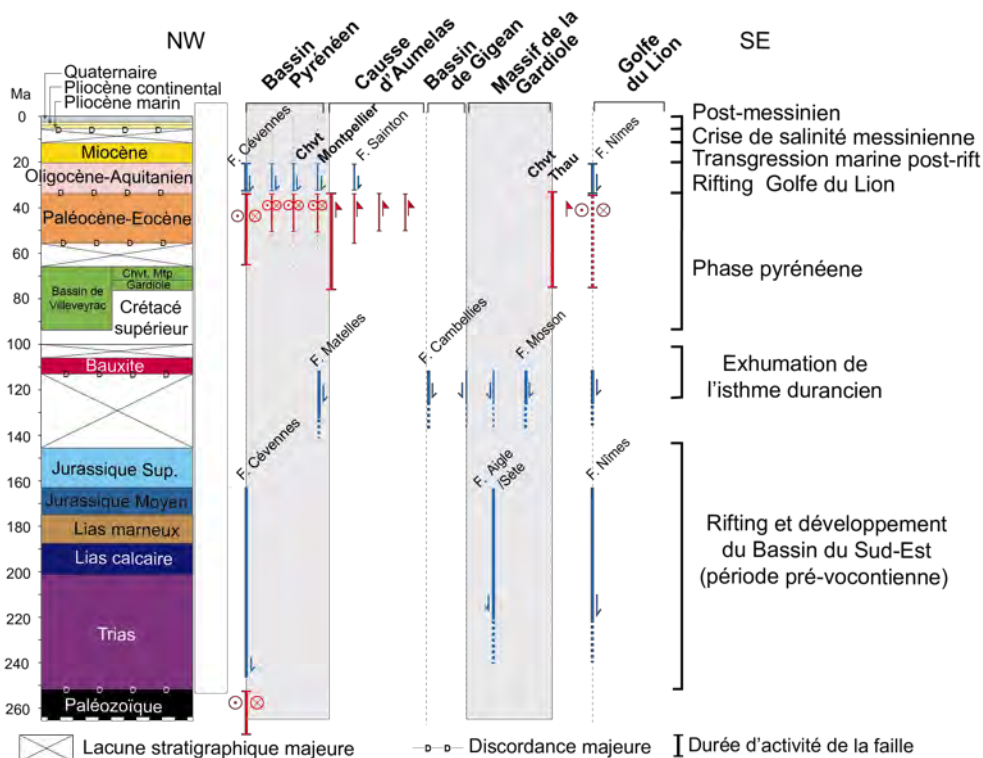


Figure 16 : Chronologie d'activation des failles en lien avec les différents événements tectoniques. En rouge : les chevauchements pyrénéens. En bleu : les failles pré-pyrénéennes et oligocènes. Les chevauchements et les failles normales ont des périodes d'activation bien distinctes.

Tous les éléments des cartes géologiques ne peuvent pas être représentés dans le modèle 3D. Les accidents majeurs de la carte géologique synthétique (Figure 15) correspondent ainsi aux failles retenues pour le modèle. Les structures majeures prises en compte dans le modèle sont : le chevauchement de Montpellier et les anticlinaux du « Pli de Montpellier », le chevauchement de Thau, le horst de la Gardiole, le graben de Nîmes et le synclinal du bassin de Villeveyrac. Le modèle vise à reproduire en 3D cette carte géologique synthétique même si le tracé des failles scellées en profondeur est incertain. C'est notamment le cas des failles scellées par les sédiments cénozoïques au niveau de la zone littorale et dans la vallée de l'Hérault (partie ouest de la zone du modèle 3D).

Il est impossible de modéliser toutes les failles existantes, ainsi que la complexité des séries déformées. La modélisation 3D est une simplification de la réalité mais elle doit respecter la géométrie et la localisation des structures majeures. Les travaux de terrain ont permis de hiérarchiser les structures et d'identifier les failles majeures. On considère comme « failles majeures », les failles dont le déplacement est au moins de plusieurs dizaines de mètres.

L'histoire géologique de la zone d'étude est détaillée dans le rapport BRGM/RP-68483-FR (Ladouche *et al.*, 2019). Une des caractéristiques géologiques de la zone d'étude est l'histoire tectonique polyphasée qui a donné lieu à différents bassins et la réactivation de certaines failles. Certaines failles pré-pyrénéennes ont été réactivées au cours de la compression pyrénéenne et de l'ouverture du Golfe du Lion (Oligocène). La chronologie d'activation des failles au cours de la tectonique polyphasée est illustrée sur la Figure 16. Les chevauchements et failles normales ont des périodes d'activation bien distinctes.

Alors que certaines failles recoupent le socle paléozoïque, d'autres s'enracinent dans l'unité du Trias qui forme un niveau de décollement majeur dans la région notamment pendant les phases de compression pyrénéenne et d'extension oligocène. Les différentes générations de failles et leurs réactivations jouent un rôle important dans la structuration et la segmentation des aquifères. Les différentes générations de failles rendent compte de la complexité du réseau de failles en profondeur.

La construction du modèle permet de réviser et d'actualiser la géologie d'un secteur en proposant une architecture géologique cohérente en trois dimensions. Dans le cas du modèle géologique 3D du secteur Montpellier-Sète et de l'étang de Thau, un des points forts de ce travail de modélisation a été de représenter les failles scellées, au niveau de la zone littorale et en mer. De nouvelles structures ont ainsi été documentées dans le secteur de l'étang de Thau, et notamment un chevauchement pyrénéen dit de Thau qui jouerait un rôle important dans la remontée des eaux thermales à Balaruc-les-Bains. Pour la première fois, la géométrie de ces structures est proposée grâce au modèle 3D. La structuration du réservoir karstique sous couverture sédimentaire est essentielle pour appréhender la problématique des écoulements d'eaux souterraines dans cette zone littorale.

5.2. CORRÉLATION ENTRE LES PRINCIPAUX FORAGES PROFONDS

La compilation des forages a permis d'exploiter d'anciennes données jusqu'à présent peu utilisées dans les études précédentes. C'est notamment le cas d'un forage géothermique à Sète (GS1, au nord du Mont Saint-Clair ; Figure 4) d'une profondeur de 976 mètres et qui atteint l'unité du « Lias calcaire ». Ce forage montre une série jurassique peu épaisse par rapport aux forages alentours. Dans le schéma de corrélation entre les forages (Figure 17), cette variation importante d'épaisseur est expliquée par la présence d'une faille normale à pendage nord, localisée au nord du Mont Saint-Clair (Sète). Cette faille scellée par la couverture tertiaire ne montre pas d'évidence en surface, et son orientation est incertaine.

La présence d'une série jurassique peu épaisse implique aussi la présence du socle paléozoïque à environ -1 200 mètres NGF. Ce haut structural à Sète est aussi argumenté par les données gravimétriques (voir anomalie gravimétrique régionale ci-après).

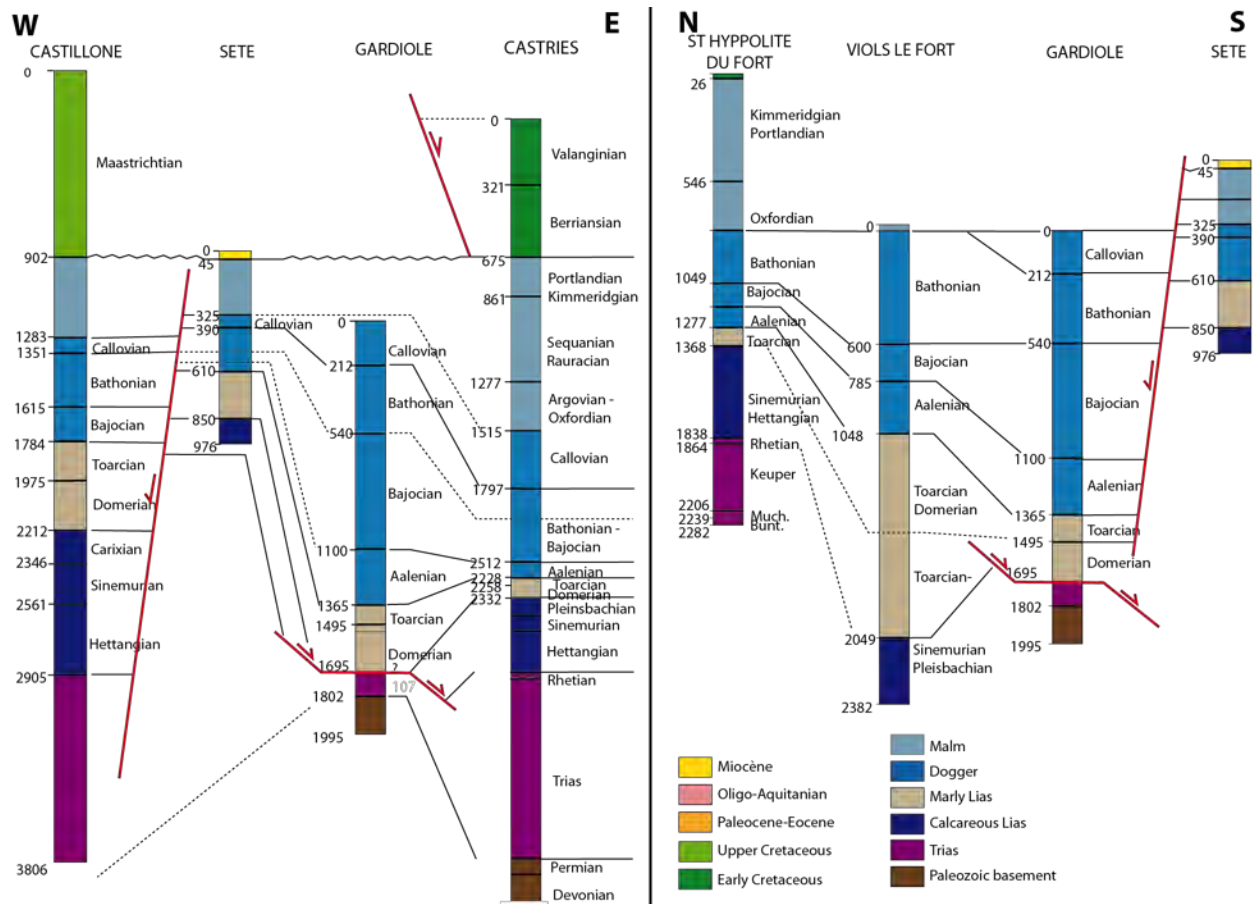


Figure 17 : Corrélation entre les forages profonds selon des transects ouest-est et nord-sud (profondeurs exprimées en mètres). Les forages CASTRIES, SAINT-HYPPOLITE-DU-FORT, VIOLS-LE-FORT sont à l'extérieur de l'emprise du modèle. Pour la première fois, le forage géothermique de Sète est pris en compte dans le schéma de corrélations entre les forages du secteur.

5.3. ANOMALIE GRAVIMÉTRIQUE RÉSIDUELLE

Dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU, différentes campagnes géophysiques en sismique réflexion, en gravimétrie et en CSEM ont été menées en 2017 dans le secteur de Balaruc-les-Bains. Les détails des acquisitions et les résultats sont rassemblés dans le rapport BRGM/RP-68318-FR (Coppo *et al.*, 2018). L'acquisition gravimétrique a constitué en 398 nouvelles stations de mesures implantées dans le secteur de Balaruc-les-Bains. Les résultats ont permis d'améliorer la carte d'anomalie de Bouguer dans le secteur de l'étang de Thau (Figure 18).

L'anomalie résiduelle est obtenue en soustrayant l'anomalie gravimétrique régionale à l'anomalie de Bouguer. L'anomalie régionale retenue (non représentée ici) correspond à une surface légèrement courbée diminuant vers le nord-ouest et associée à la remontée asthénosphérique sous le Massif Central (Bayer, 1984). La carte d'anomalie résiduelle montre des variations de faibles longueurs d'ondes, soulignant ainsi les variations de gravité pouvant être associées à des contrastes de densité en profondeur et donc de possibles discontinuités structurales (failles). L'anomalie résiduelle obtenue montre ici des variations de gravité entre -13 mGal et 10 mGal. L'anomalie résiduelle fait ressortir les anomalies observées sur l'anomalie de Bouguer. Les forts gradients représentent des discontinuités gravimétriques qui peuvent être attribuées à des failles majeures ou des surfaces d'érosion délimitant des corps avec un fort contraste de densité.

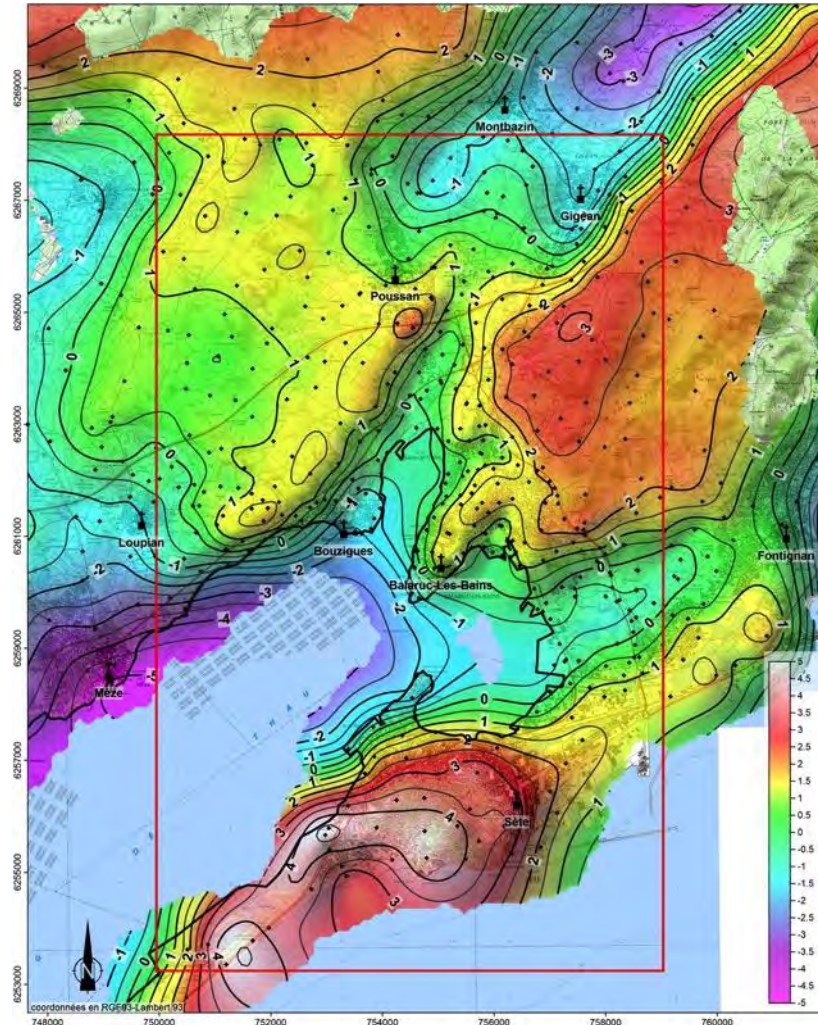


Figure 18 : Anomalie gravimétrique résiduelle. Les courbes d'isovaleurs sont exprimées en mGal. Les points noirs indiquent la localisation des nouvelles stations. Extrait du rapport BRGM/RP-68318-FR (Coppo et al., 2018).

Les nouvelles données gravimétriques ont été compilées avec les données anciennes dans d'autres stations pour générer des cartes gravimétriques régionales. On présente ici la carte d'anomalie gravimétrique résiduelle dans l'emprise du modèle 3D (Figure 19).

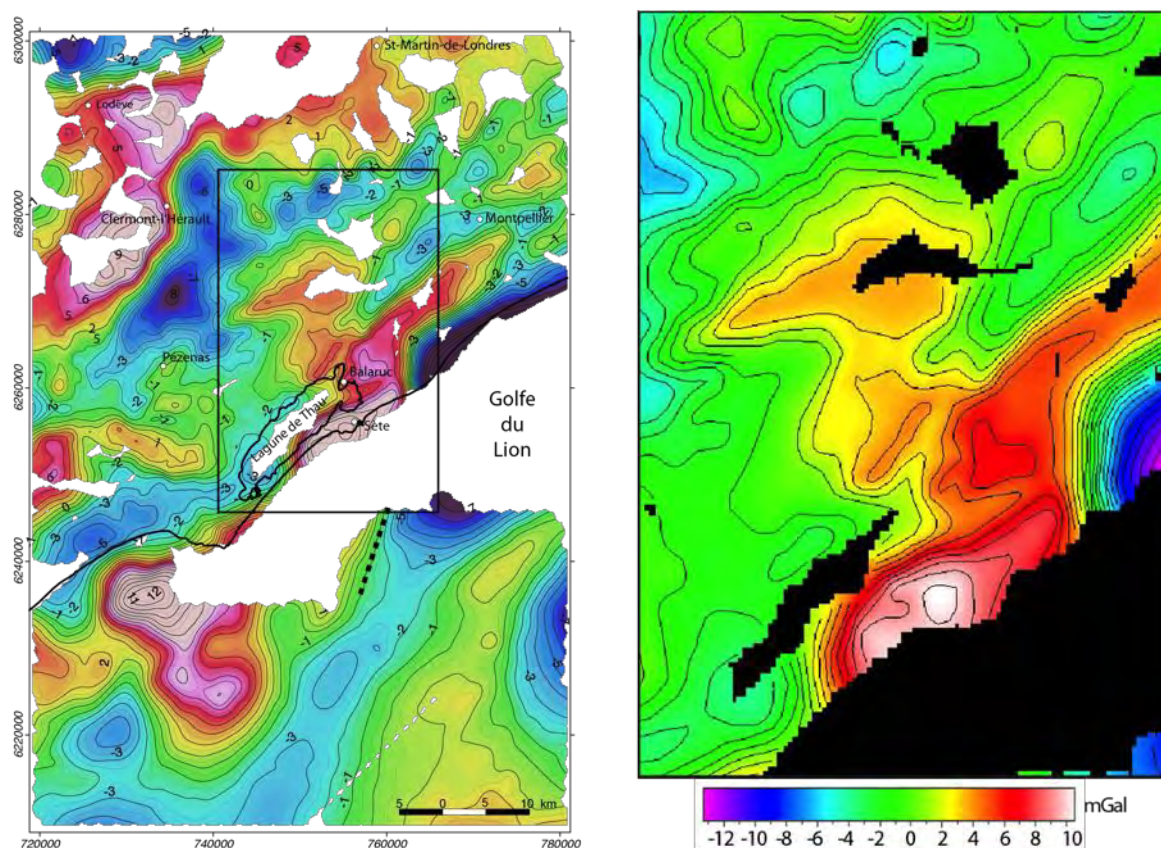


Figure 19 : (Gauche) Anomalie gravimétrique résiduelle à l'échelle régionale (anomalie de Bouguer soustraite de l'anomalie régionale ; voir détails dans le texte). On note des lacunes de données ponctuellement à terre et dans la lagune de Thau, et plus largement en mer. (Droite) Même anomalie gravimétrique résiduelle dans l'emprise du modèle, vue dans GeoModeller.

Séries/formations	Densité (g/cm ³)	Ecart-type
Plio-Quaternaire	2,46	0,08
Miocène	2,33	0,11
Oligocène-Aquitainien	2,56	0,17
Vitrollien-Eocène	2,55	0,15
Crétacé terminal	2,55	0,07
Malm	2,70	0,09
Dogger	2,66	0,07
Lias marneux	2,63	0,22
Lias calcaire	2,72	0,05
Trias	2,60	0,10
Socle	2,70	0,10

Tableau 3 : Mesures de densité en laboratoire pour les différentes séries/formations du modèle. Ces valeurs intègrent les mesures existantes dans la zone d'étude (Husson et al., 2018).

Les anomalies gravimétriques sont comparées à la réponse gravimétrique du modèle calculée à partir des densités mesurées dans chacune des formations géologiques (Tableau 3). Les anomalies gravimétriques font ressortir les contrastes de densité en profondeur en lien avec les structures affectant le socle paléozoïque, ou encore les bassins tertiaire (Miocène et Oligocène notamment) au-dessus des calcaires jurassiques (Figure 20).

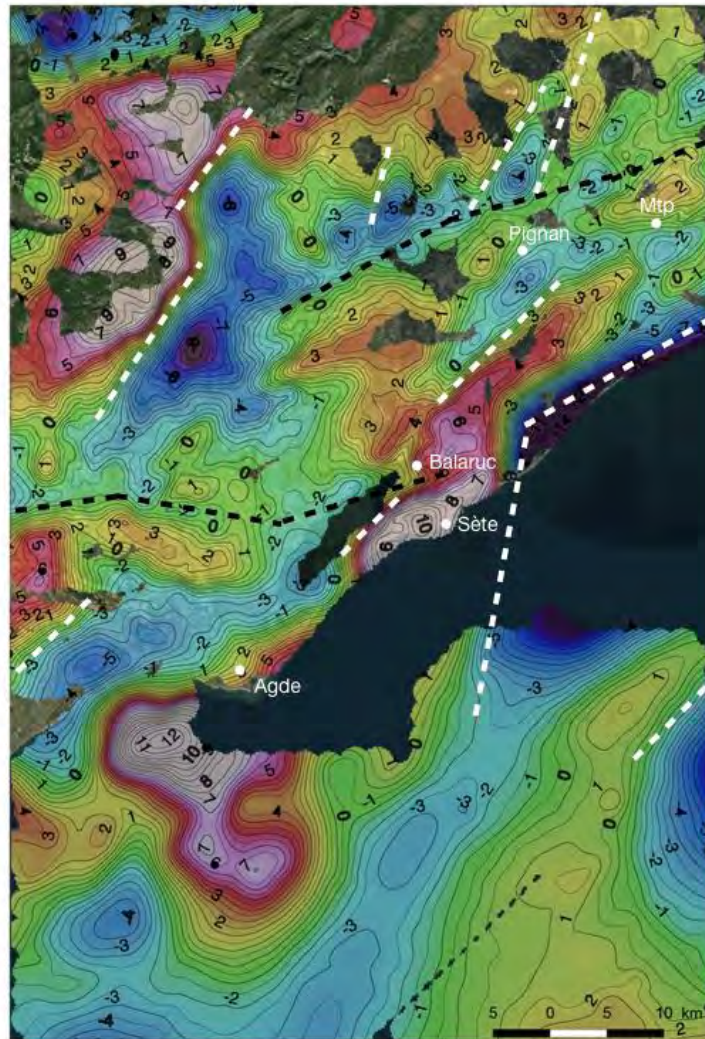


Figure 20 : Anomalie gravimétrique résiduelle (en mGal) avec interprétation des principales « discontinuités gravimétriques » marquées par de forts gradients. Les tirets blancs et noirs marquent la position interprétée des failles normales et des chevauchements respectivement.

5.4. INTERPRÉTATION DES PROFILS SISMIQUES REFLEXION

Les profils sismiques (format SEG Y) sont importés et interprétés dans le logiciel 3D Move. Bien que de nombreux profils dépassent l'emprise du modèle 3D, ils sont interprétés à l'extérieur des limites du modèle 3D afin de comprendre la géométrie des structures majeures et leurs prolongements latéraux et/ou en profondeur dans l'emprise du modèle 3D. La zone d'étude est un zoom sur un cadre structural régional complexe. Par exemple, la réactivation (en faille normale) de la faille des Cévennes contrôle la formation d'un demi-graben oligocène qui affleure en partie dans l'emprise du modèle 3D. De la même manière, la terminaison de la faille de Nîmes et de son dépocentre syn-rift sont clairement observés en mer et se terminent au niveau de Sète. La terminaison de la faille de Nîmes est marquée par un changement d'orientation abrupt au sud de Sète (nord-est/sud-ouest à nord-sud).

Les interprétations sismiques permettent de documenter la géométrie des structures, des bassins cénozoïques et, dans une moindre mesure, des bassins mésozoïques. La qualité des profils n'est pas toujours suffisante pour localiser précisément les structures majeures ; et tous les profils interprétés ne sont pas illustrés (voir la Figure 7 pour la localisation des lignes sismiques).

L'interprétation des profils à terre est basée sur les travaux existants (Husson, 2013; Serrano & Hanot, 2005). Sur le profil H84D, les principales unités jurassiques ont été interprétées (Figure 21) et servent de référence pour extrapoler les principaux réflecteurs et les unités sismiques de proche en proche, grâce à l'intersection avec d'autres profils. C'est ainsi que l'on a pu interpréter les profils retraités en 2017 et 2018 (Figure 22).

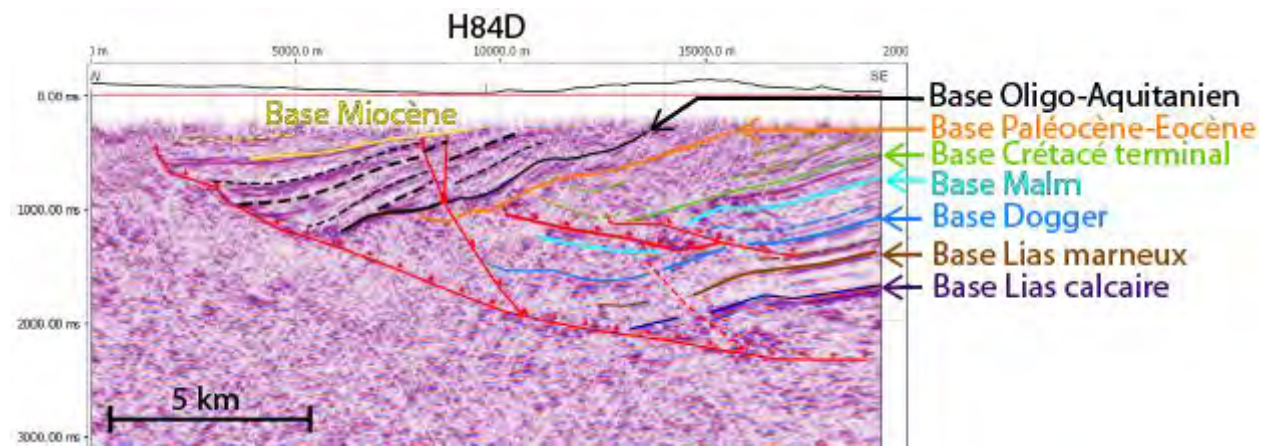


Figure 21 : Profil sismique H84D interprété. Les bassins syn-rift oligo-aquitaniens sont contrôlés par une faille normale majeure qui s'aplanit et s'enracine dans le Trias (niveau de décollement régional).

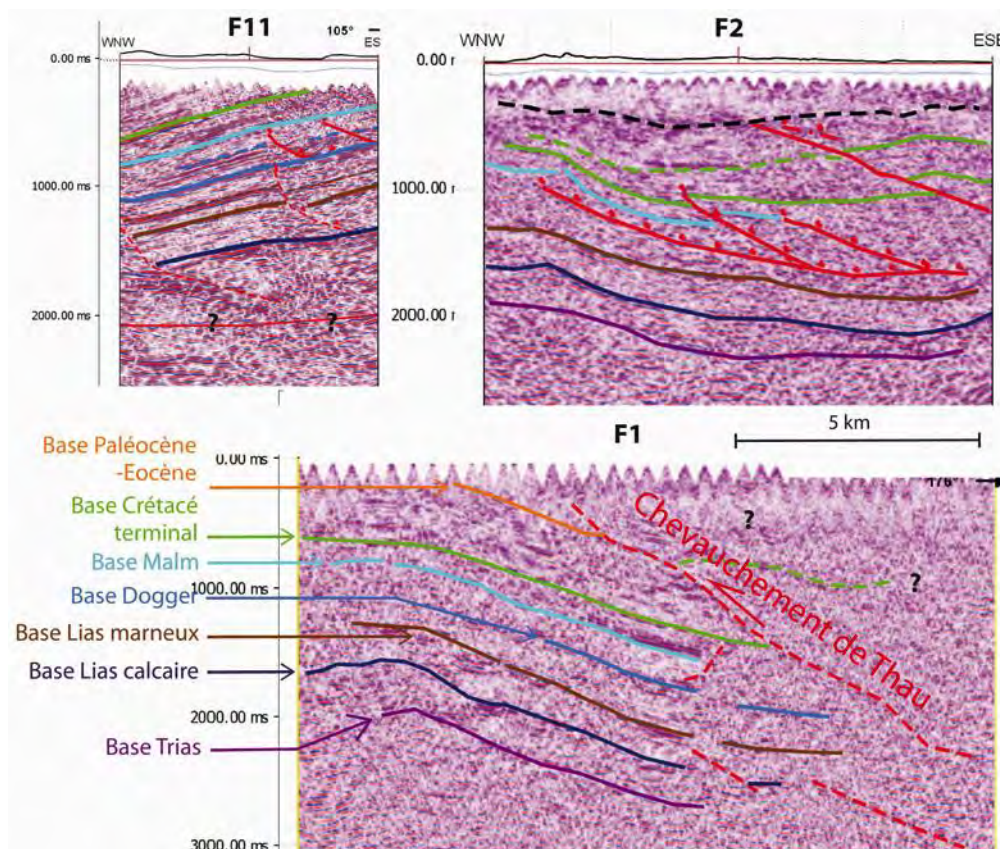


Figure 22 : Interprétations sismiques de certains profils retraités en 2017 et 2018 dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU.

L'interprétation des profils marins LRM est basé sur les travaux existants dans le Golfe du Lion et se focalisant principalement sur les structures et séries tertiaires (Bache *et al.*, 2010; Gorini *et al.*, 1994; Mauffret *et al.*, 2001). La bonne qualité des profils en domaine marin permet l'interprétation des séries « *Plio_Quaternaire* » « *Miocène* » et « *Oligo_Aquitainien* », ainsi que les failles normales associées qui s'enracinent dans le socle paléozoïque. Les séries du Jurassique, plus profondément enfouies (au-delà de 2s TW), ne sont pas clairement identifiées sur les profils en mer. Quelques réflecteurs profonds correspondraient à d'anciennes failles normales ou chevauchements pyrénéens (Figure 23).

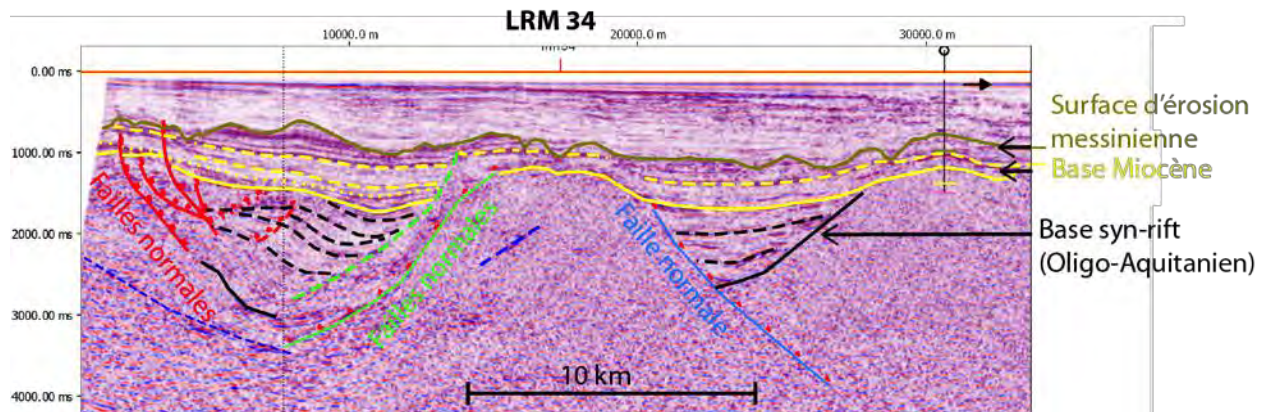


Figure 23 : Profil sismique LRM34 (domaine marin) interprété. Les bassins tertiaires et les structures de socle sont bien délimités. Les réflecteurs plus profonds (au delà de 2s TWT) pourraient correspondre à d'anciens chevauchements pyrénéens.

En domaine marin, on apporte quelques points de contrainte à partir de la conversion temps-profondeur aux intersections entre les profils sismiques. La conversion en profondeur est effectuée pour la base des séries « *Plio_Quaternaire* » « *Miocène* » et « *Oligo_Aquitainien* ». L'interprétation sismique et la conversion en profondeur ne sont pas possibles pour les séries plus anciennes (Jurassique notamment) en raison de l'insuffisante résolution des images sismiques. Une conversion temps-profondeur est proposée à partir des vitesses stackées des profils et des vitesses moyennes de chaque formation. Ces dernières sont issues de la compilation des données de diagraphies (sonic) disponibles dans le secteur (forages de Castries et Calmar). L'augmentation de la vitesse avec la profondeur (« dérive du sonic ») ne permet pas d'extraire les valeurs de vitesse dans les parties profondes des forages.

Formation	Vitesse (m/s)
Eau	1500
Plio-Quaternaire	2000
Miocène	2400
Oligo-Aquitainien (syn-rift)	2100

Tableau 4 : Vitesses sismiques moyennes des formations issues des données diagraphiques de sonic (foragers de Castries à terre et Calmar en mer).

Les interprétations sismiques permettent pour la première fois de proposer une corrélation précise entre les domaines continentaux et marins à partir des profils issus des différentes campagnes sismiques (Figure 24). Ce transect image bien les bassins syn-rift (Oligocène-Aquitainien) localisés au nord-ouest (bassin de l'Hérault) et sud-est (Golfe de Lion). Le milieu de cette coupe est marqué par la remontée du socle et la mise à l'affleurement des séries jurassiques.

La formation d'une zone de haut structural peut-être expliquée en partie par la flexure dans le mur de la faille normale de Nîmes. Les réflecteurs profonds au niveau de la zone littorale, interprétés comme la trace d'un chevauchement pyrénéen (chevauchement de Thau), sont de bons candidats pour expliquer la formation d'un haut de socle hérité (Figure 24). Ces interprétations sont cohérentes avec l'anomalie gravimétrique positive dans cette même zone (Figure 20). Ce chevauchement pyrénéen scellé sous l'étang de Thau est aussi mis en évidence par les résultats de campagne en sismique passive (ci-après).

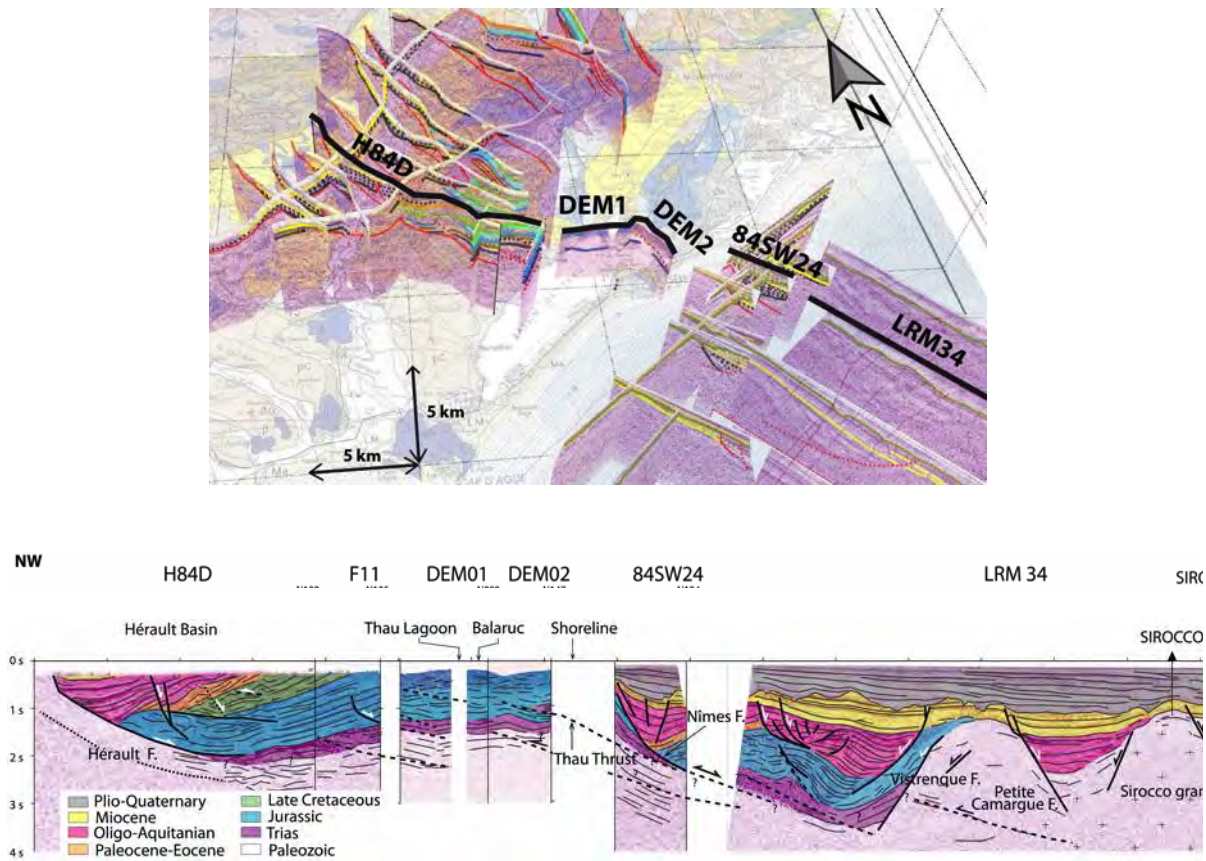


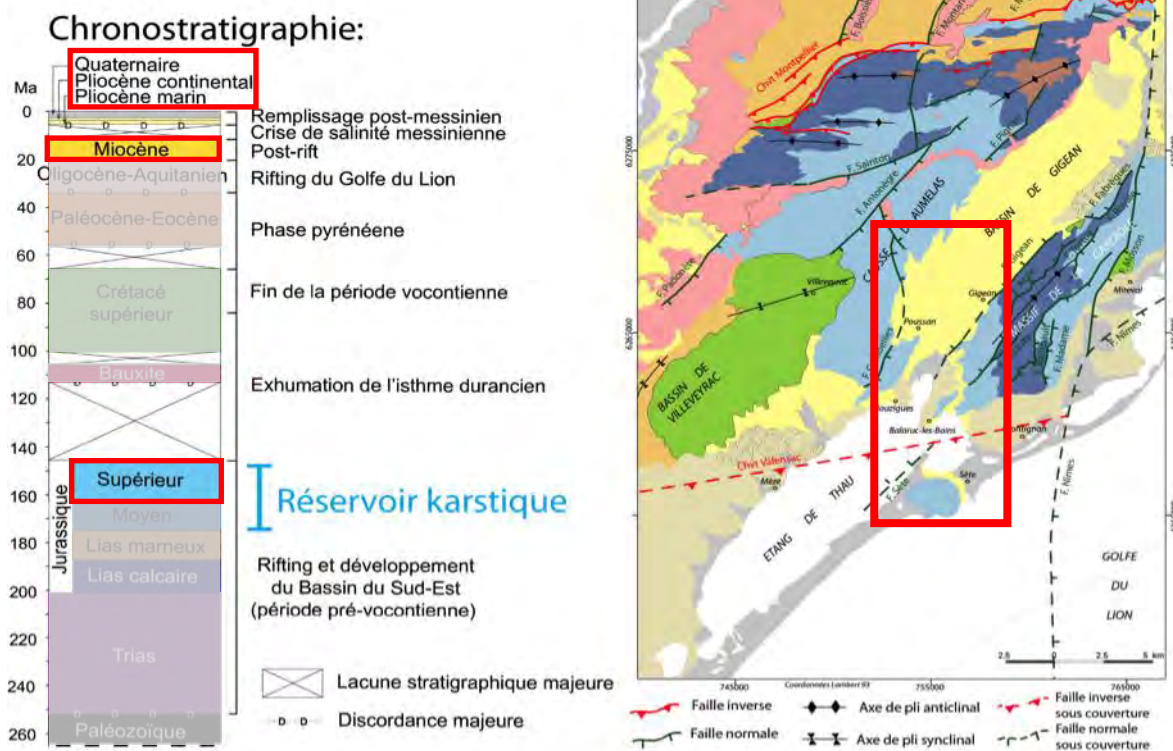
Figure 24 : (Haut) Vue 3D des profils sismiques interprétés (logiciel Move 3D) sur fond de la carte géologique 1/250 000 et localisation de la ligne sismique composite orientée nord-ouest/sud-est.

5.5. SISMIQUE PASSIVE

En plus des profils de sismique réflexion, les résultats de la campagne d'acquisition de sismique passive dans la partie ouest du Bassin de Gigan et le secteur de Balaruc-Sète apportent un calage en profondeur pour la base du Miocène et donc au toit du Jurassique supérieur (Malm) (Figure 25).

La méthode de sismique passive, la construction du modèle de vitesse des ondes S (V_s) et la conversion des vitesses V_s en profondeur sont détaillées dans le rapport de fin d'étude de master 2 (Bourgeois, 2019). Ce projet a été mis en place dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU au sein du laboratoire Géosciences Montpellier (Université de Montpellier). La méthode et les résultats de ce projet sont brièvement résumés ci-dessous.

La méthode de sismique passive (Figure 26) consiste à enregistrer, grâce à un petit sismomètre posé sur le sol (Tromino®), le bruit sismique ambiant naturel (houle, microséismes, ...) ou anthropique (moteurs, circulation, chantier, ...) transmis à travers le sous-sol, et réfléchi sur l'interface entre le calcaire jurassique très compétent et les sédiments moins denses sus-jacents. Pour transformer l'information enregistrée en profondeur du toit du Jurassique à l'aplomb du point de mesure, il faut connaître la vitesse de propagation des ondes sismiques (V_s) dans les terrains. Malheureusement, celle-ci se révèle très variable et une « valeur moyenne » ne peut être raisonnablement fixée. Pour déterminer des vitesses de propagation des ondes, des mesures ont été acquises à l'aplomb des 33 forages atteignant le Jurassique, distribués sur la zone d'étude. Connaissant la profondeur de l'interface donnée par le forage, il est possible de déterminer la vitesse des ondes S (V_s) au niveau de ces points et de les extrapoler à leur périphérie (Figure 26).



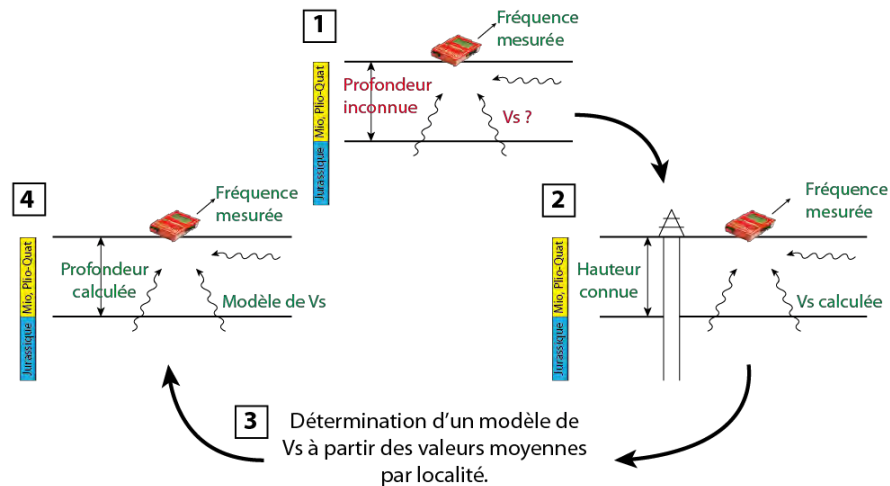


Figure 26 : Démarche pour déterminer un modèle de vitesses des ondes S à partir de la fréquence de résonance, la profondeur du toit du Jurassique connue par forage, et la vitesses des ondes de cisaillements V_s déduites des points d'acquisition à l'aplomb du forage.

La campagne comprend 400 sites de mesures séparés de 100 ou 500 mètres (Figure 27 A). Ces points ont été agrégés aux altitudes du Jurassique à l'affleurement pour réaliser une carte d'élévation du toit du Jurassique (Figure 27 B). La carte montre la présence de deux sous-bassins distincts. Le sous-bassin de Montbazin-Gigean est limité au sud par le massif de la Gardiole. Le fort gradient de pente le long de la bordure nord du massif de la Gardiole est interprété comme une faille normale à pendage nord. Le second sous-bassin est celui de Bouzigues-Balaruc, également limité à l'ouest par un fort gradient de pente. Dans ce dernier cas, les contours de l'interface Miocène-Jurassique suggèrent la présence d'un paléorelief pré-miocène. Les deux sous-bassins sont séparés par la zone haute d'Issanka (Figure 27 B). L'approfondissement abrupt au sud de la presqu'île de Balaruc-les-Bains correspondrait à la trace d'un chevauchement pyrénéen (à pendage sud). Ce chevauchement important (de déplacement kilométrique) a été aussi identifié par forage et en sismique réflexion à l'ouest de l'étang de Thau. Il se prolonge à l'Est dans le secteur de Sète-Balaruc et se connecte à la faille de Nîmes. Ces nouveaux résultats permettent de préciser le schéma structural de la zone d'étude. Les points de calage de la base du Miocène/toit du Jurassique sont utilisés pour modéliser la base du Miocène (Figure 28).

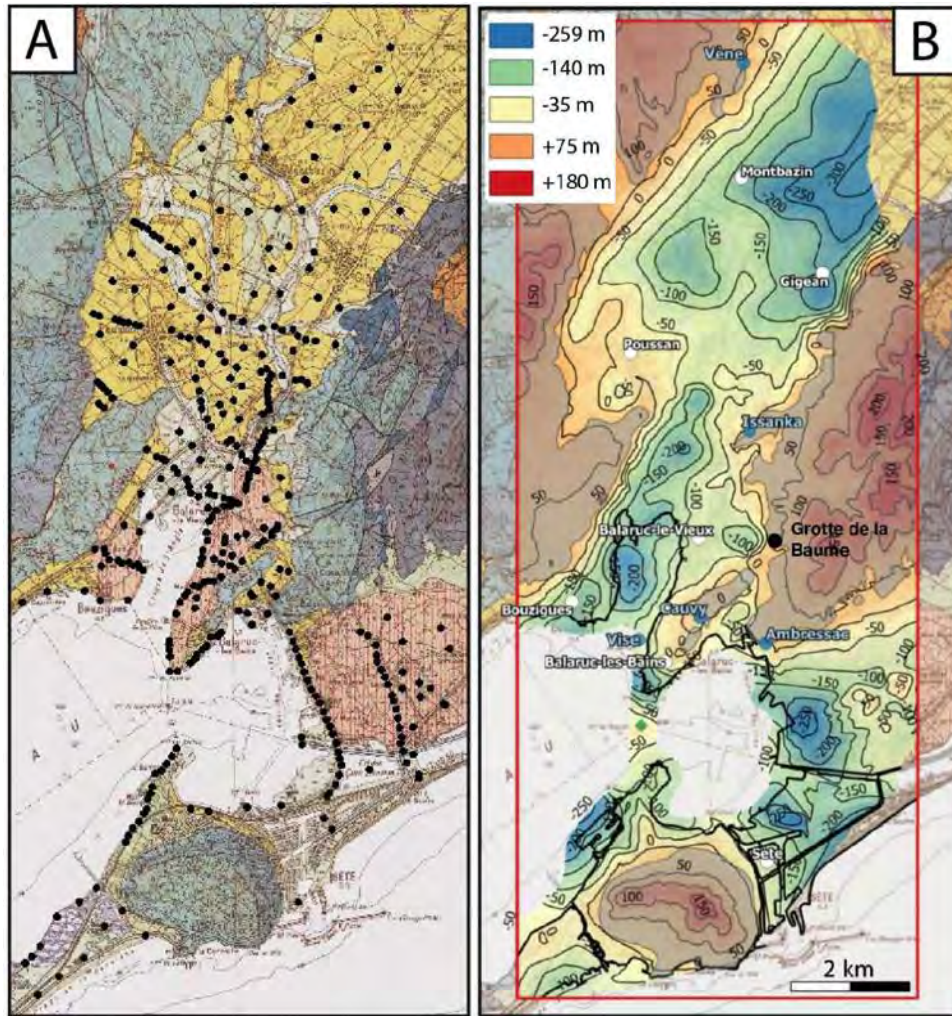


Figure 27 : (A) Distribution des sites de mesures en sismique passive dont certains forment des profils. Fond de la carte géologique de Sète au 1/50 000. (B) Carte d'altitude (m NGF) du toit du Jurassique (formation « Malm ») réalisée à partir de l'interpolation entre les points de mesures en sismique passive (Bourgeois, 2019).

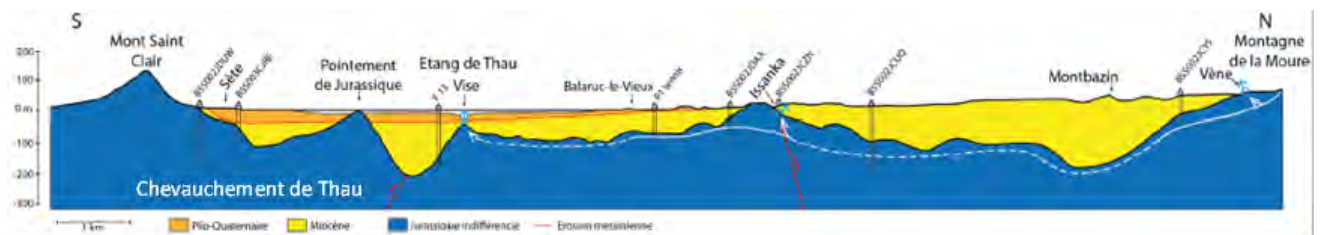


Figure 28 : Coupe orientée N-S entre la source de la Vène et le Mont Saint-Clair (Sète). Cette coupe montre la connectivité des résurgences karstiques et le cheminements de l'eau météorique depuis les sources de la Vène, Issanka et la Vise (Bourgeois, 2019).

Les résultats de la campagne en sismique passive, et notamment le modèle de vitesse permettent de discuter les variations spatiales de vitesse V_s dans la partie sommitale du réservoir jurassique. Les vitesses varient fortement de 750 à 2 800 m/s. La Figure 29 montre une comparaison entre les vitesses V_s calculées à partir des résultats en sismique passive et les vitesses V_p déterminées à partir des profils sismique réflexion (campagne EOSYS 2005). De faibles vitesses V_p et V_s sont observées dans la partie nord de la presqu'île de Balaruc. Ces valeurs de vitesses sont interprétées comme une zone où les calcaires jurassiques sont fortement altérés. Au contraire, les valeurs dans la partie sud de la presqu'île, où les calcaires du Jurassique sont plus profondément enfouis, correspondraient à des zones moins karstifiées ou moins altérées. Ces derniers résultats permettent donc d'évaluer le niveau d'altération des réservoirs karstiques sous couverture sédimentaire. Cet état d'altération est à documenter plus précisément à partir du forage carotté qui sera acquis dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU.

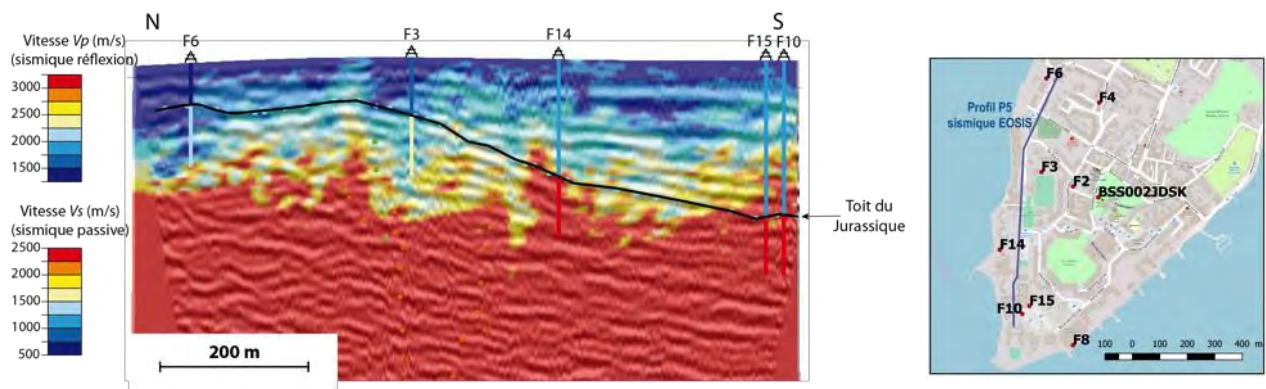


Figure 29 : Corrélation des variations des vitesses sismiques issues du profil sismique P5 (Portolano et al., 2005) et les résultats en sismique passive. On montre les vitesses calculées dans cinq forages thermiques recoupant le toit du Jurassique (pointillés bleus). Positionnement du profil sismique P5 et des puits mesurés (encadré noir).

6. Construction et éléments du modèle 3D

6.1. MNT ET CARTES GÉOLOGIQUES

Après avoir défini l'emprise géographique du modèle dans GeoModellier, une des premières opérations est d'importer les cartes géologiques et le modèle numérique de terrain (MNT). Un MNT de type SRTM (téléchargé sur le site de l'IGN) avec un pas de 25 mètres a été choisi pour cette étude (Figure 30). Tous les points de contrainte digitalisés à partir des cartes géologiques, ainsi que les mesures de terrain sont projetés sur la surface du MNT. Ce MNT ne prend pas en compte la bathymétrie de l'étang de Thau et du Golfe du Lion. Dans le logiciel GeoModeller, il n'est donc pas possible de modéliser des objets au-dessus de la surface du MNT. C'est pour cela que la bathymétrie de l'étang de Thau et du Golfe du Lion est modélisée comme une couche à partir de l'importation des données bathymétriques.

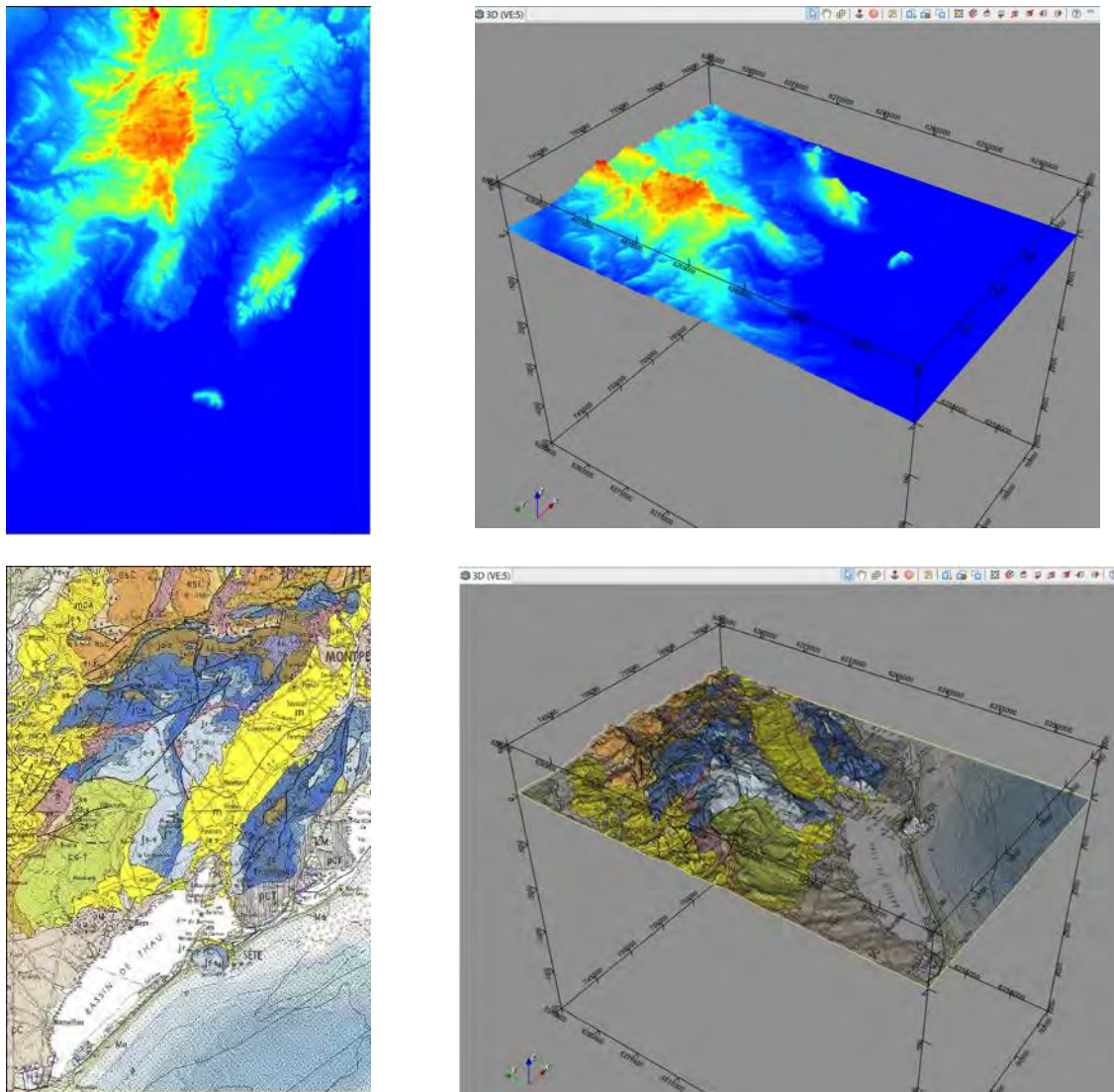


Figure 30 : en haut à gauche : MNT de la zone au pas de 25 m. La bathymétrie du Gofe du Lion, et donc les valeurs négatives d'altitude ne sont pas prises en compte dans ce MNT. En haut à droite : le même MNT une fois intégré dans Geomodeller avec ici exagération verticale. En bas à gauche : extrait de la carte géologique au 1/250 000. En bas à droite : Même carte géologique drapée sur le MNT dans GeoModeller.

6.2. DONNÉES LITHOSTRUCTURALES DE SURFACE

Les données de surface issues des cartes géologiques ne suffisent pas à modéliser les différentes formations, notamment dans le cas où les séries sont déformées et plissées. Il est donc nécessaire d'alimenter le modèle avec d'autres mesures d'orientation et de pendage de la stratification. Ces mesures d'orientation sont issues des campagnes de terrain de 2018 et 2019, ainsi que de la compilation des minutes disponibles (rapports de master non publiés, Géosciences Montpellier). Les données de terrain incluent aussi l'orientation des failles, des fractures, les stries et les axes de pli. Pour la modélisation sous GeoModeller, on utilise l'orientation des strates et des failles majeures (Figure 31).

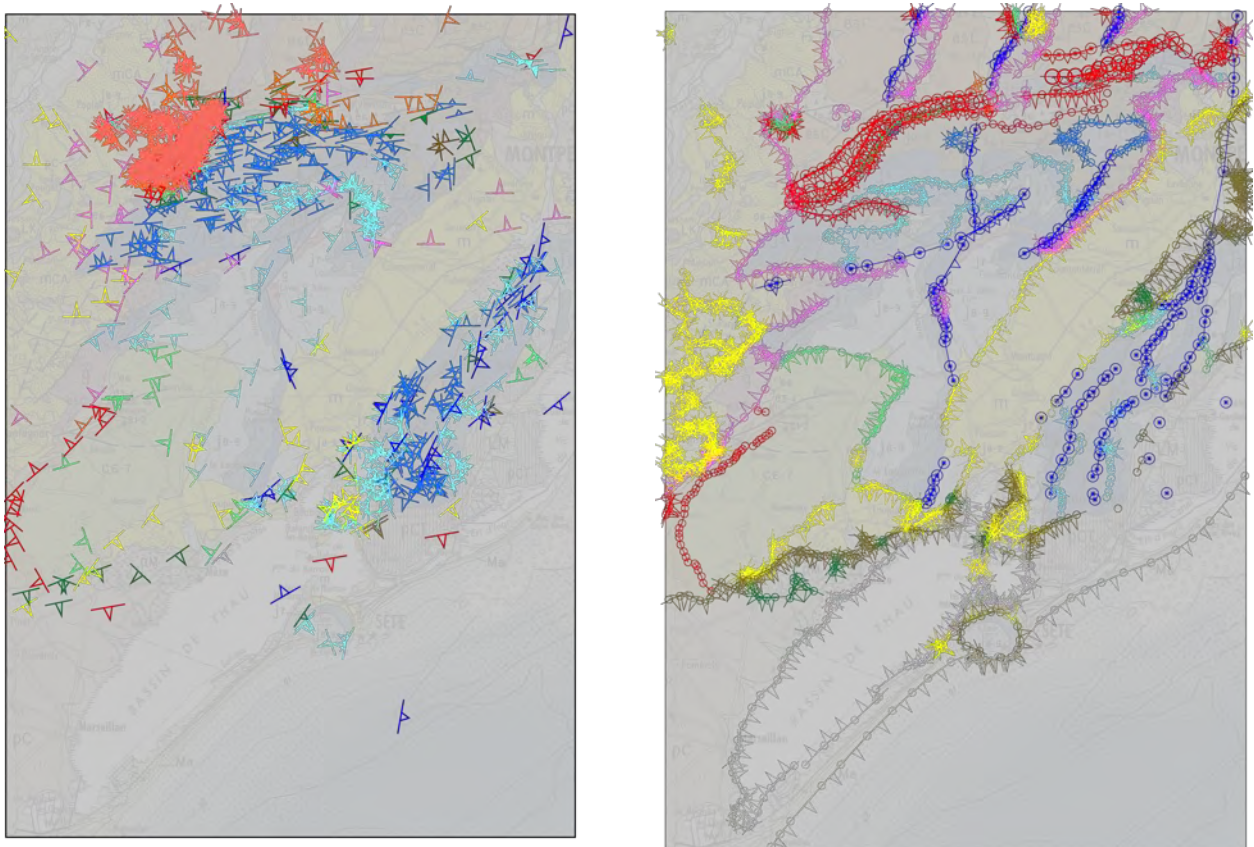


Figure 31: (Gauche) Distribution des mesures de pendages sur le terrain dans les différentes formations. (Droite) Base des formations et tracé des failles dans la zone d'étude (les triangles pointent vers la direction de pendage). Le tracé des failles (points cerclés) contient aussi une information de pendage, de rayon horizontal, vertical, et de rayon d'influence de la faille.

6.3. ÉTABLISSEMENT DE LA PILE LITHOLOGIQUE

En vue de la modélisation géologique 3D, il est nécessaire de définir la « pile lithologique », c'est-à-dire la succession des séries lithostratigraphiques ainsi que leurs relations les unes par rapport aux autres (*Erode/Onlap*). Les formations regroupées au sein d'une même série appartiennent au même grand ensemble géologique ou tectonique. La pile lithologique du modèle est subdivisée en 10 séries et 12 formations géologiques (Figure 32). Elle a été établie à partir des données cartographiques (formations affleurantes) mais aussi à partir des données de forages. Ici, par principe, on modélise la base des formations géologiques (« *Reference : Bottom* »).

Afin de modéliser la topographie sous le niveau de la mer NGF, la tranche d'eau de l'étang de Thau et de la Méditerranée est considérée comme une série géologique virtuelle constituant la formation « Eau » d'une série éponyme. Les formations contenues dans une même série partagent les mêmes orientations, les mêmes champs de potentiel. Elles sont donc considérées comme sub-parallèles par le logiciel, autorisant peu de variations d'épaisseurs. Or, dans le cas du secteur de Montpellier-Sète et de l'étang de Thau, les formations présentent d'importantes variations d'épaisseurs associées à la présence de dépôts syn-tectoniques, et des discordances. Pour en tenir compte, la plupart des séries du modèle ne comprennent qu'une seule formation. Seules les séries « Réservoir » et « Lias » comprennent deux formations. La série « Réservoir » comprend les formations « Malm » et « Dogger ». La série « Lias » comprend les formations « Lias marneux » et « Lias calcaire ». L'interface entre ces deux séries est importante du point de vue hydrogéologique car elle correspond à la limite inférieure du réservoir karstique, entre la formation aquifère du « Dogger » et la formation aquitard du « Lias marneux » sous-jacente.

En vue des simulations d'écoulements souterrains à partir du modèle 3D, les marnes à la base du Dogger (Aalénien inférieur) font parties de la formation aquitard « Lias_marneux ». Mise à part l'interface Dogger-Lias marneux, la pile lithologique respecte les principales limites stratigraphiques régionales.

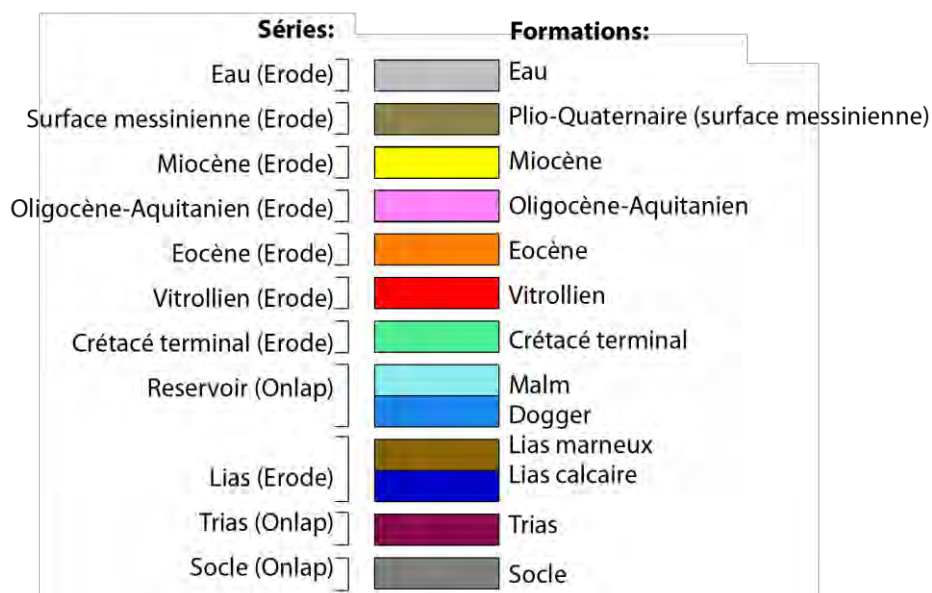


Figure 32 : Pile lithologique du modèle 3D et relations géométriques retenues entre les séries (« Erode » et « Onlap » dans GeoModeller).

Chaque série est modélisée individuellement avec les failles qui l'affecte, et ce depuis les séries les plus jeunes (superficielles) jusqu'aux séries les plus anciennes (plus profondes). Cette longue étape de construction et d'interprétation 3D pas à pas représente environ 10 mois de travail. Ensuite, le modèle est amélioré en modélisant l'ensemble de la pile stratigraphique et du réseau de failles. La durée de construction du modèle dépend principalement de la complexité des structures plissées et du réseau de failles.

6.4. IMPORTATION DES DONNÉES DE FORAGES

Avant l'importation dans GeoModeller, les données de 464 forages sont homogénéisées selon le codage de la pile lithologique établie pour le modèle. Ces forages sont répertoriés en Annexe 1. Ces forages sont majoritairement issus de la Banque du Sous-Sol (BRGM) et quelques forages pétroliers. Malgré une quantité importante de forages dans la zone d'étude, ils sont inégalement distribués dans l'espace et avec des profondeurs variables. La majorité des forages est localisée en bordure du bassin crétacé de Villeveyrac (Figure 6) alors que les parties nord-ouest et sud-est (maritime) du modèle sont quasiment dépourvues de forages. De plus, parmi les 464 forages importés, 47 % des forages (217) ont une profondeur supérieure à 100 mètres, 18 % forages (82) ont une profondeur supérieure à 200 mètres et seulement 3 % des forages (16) ont une profondeur supérieure à 500 mètres. Uniquement quatre forages (1 %) dépassent 1 000 mètres de profondeur (GARDIOLE, MURVIEL, SAINT BAUZILLE DE LA SYLVE et LA CASTILLONNE). Les forages d'une profondeur supérieure à 1 000 mètres sont différenciés sur la Figure 33.

Seul le forage profond GARDIOLE atteint le socle paléozoïque. Les unités du Jurassique ne sont donc que partiellement traversées. Les limites de formations documentées dans les forages représentent des contraintes en profondeur. Néanmoins, ces points de passage pour modéliser les interfaces ne suffisent pas à générer des surfaces 3D. Les contraintes en surface et les données de forages ne suffisent pas à construire directement le modèle 3D. Il n'y a pas assez de forages profonds pour caler la géométrie des unités les plus anciennes, et notamment celles qui n'affleurent pas dans la zone d'étude. Des contraintes doivent donc être ajoutées à partir des coupes structurales (voir ci-dessous).

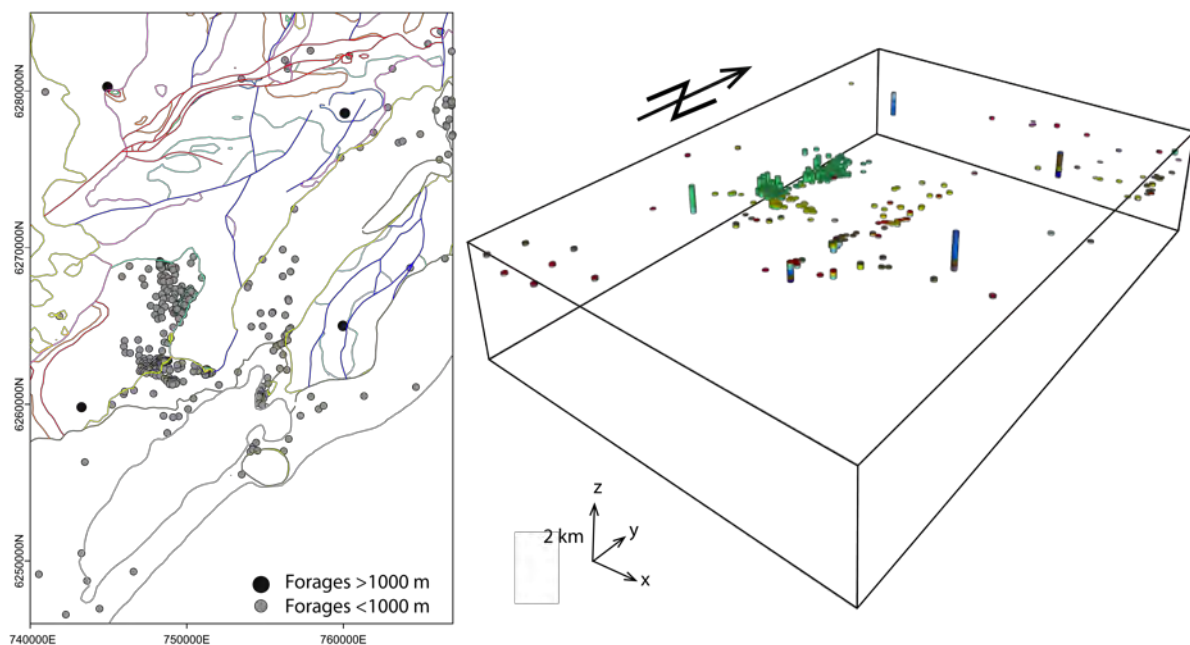


Figure 33 : Répartition des forages en carte et vue 3D. Les forages sont inégalement répartis dans l'espace en XYZ. Seuls quatre forages ont une profondeur supérieure à 1 000 mètres.

6.5. COUPES GÉOLOGIQUES DE RÉFÉRENCE

Dans le cadre du projet Dem'Eaux Thau, de nouvelles coupes structurales ont été réalisées et ensuite testées dans le constructeur de modèle 3D. La position incertaine des coupes structurales disponibles et leurs découpages stratigraphiques différents ne permettent pas de les exploiter pour la construction du modèle. On choisit d'apporter un maximum de contraintes dans six sections de référence annotées de 1 à 6 (Figure 34) qui ont été construites de manière homogène dans le cadre de cette étude. Ces coupes (Figure 35) sont plus ou moins transverses aux structures majeures et passent par les forages les plus profonds. Bien que ces coupes soient préliminaires, elles représentent une étape indispensable à la construction du modèle. Elles sont simultanément mises en cohérence avec l'ensemble des points de contrainte disponibles dans le modèle et modifiées par itération. L'aspect 3D des structures diffère des coupes interprétées par le géologue, notamment en raison des pendages et de la projection des structures obliques sur les coupes.

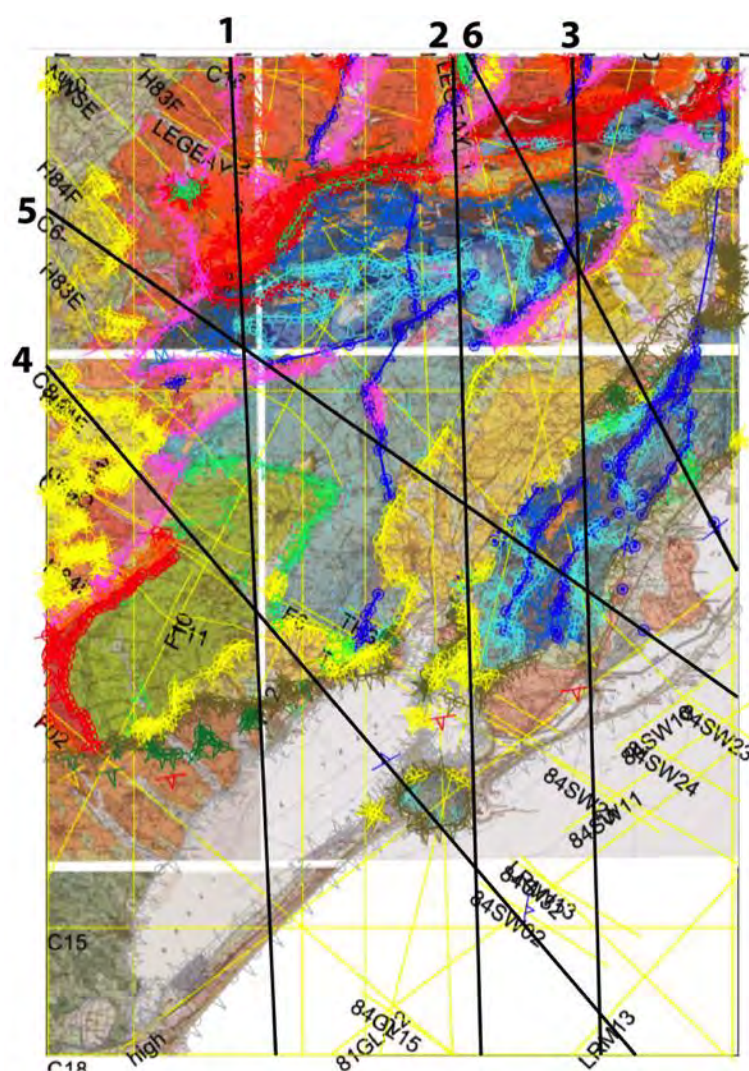


Figure 34 : Contraintes en surface pour modéliser les formations et les failles (points de passage et orientations). Hormis les données de forages, la majeure partie des contraintes de profondeur sont placées dans les sections annotées de 1 à 6. Les autres sections (traits jaunes) ne contiennent pas de contraintes et servent à la visualisation des résultats de modélisation. Fond géologique au 1/50 000.

Le but n'est pas de reproduire les coupes préliminaires dans GeoModeller mais plutôt d'apporter quelques contraintes (points de passage et orientations) en profondeur pour générer les différentes interfaces et failles. Le positionnement des contraintes en profondeur est arbitraire et répond à une logique de mise en cohérence des données en 3D : respect des épaisseurs et des relations stratigraphiques entre les formations. La Figure 35 montre des coupes préliminaires incluant les contraintes qui ont permis la mise en cohérence 3D dans les différentes coupes. Les contraintes sont modifiées pas à pas dans les coupes de référence, jusqu'à la mise en cohérence 3D des interfaces. Les interfaces sont modélisées depuis les formations les plus récentes, jusqu'aux formations les plus anciennes. Pour chaque formation, les contraintes sont ajoutées dans chacun des compartiments délimités par les failles affectant cette même formation. Il est important de ne pas ajouter trop de contraintes et de modéliser les interfaces et les failles avec un certain « degré de liberté » du logiciel. Au final, on peut remarquer des décalages importants entre les coupes structurales préliminaires et le résultat de modélisation.

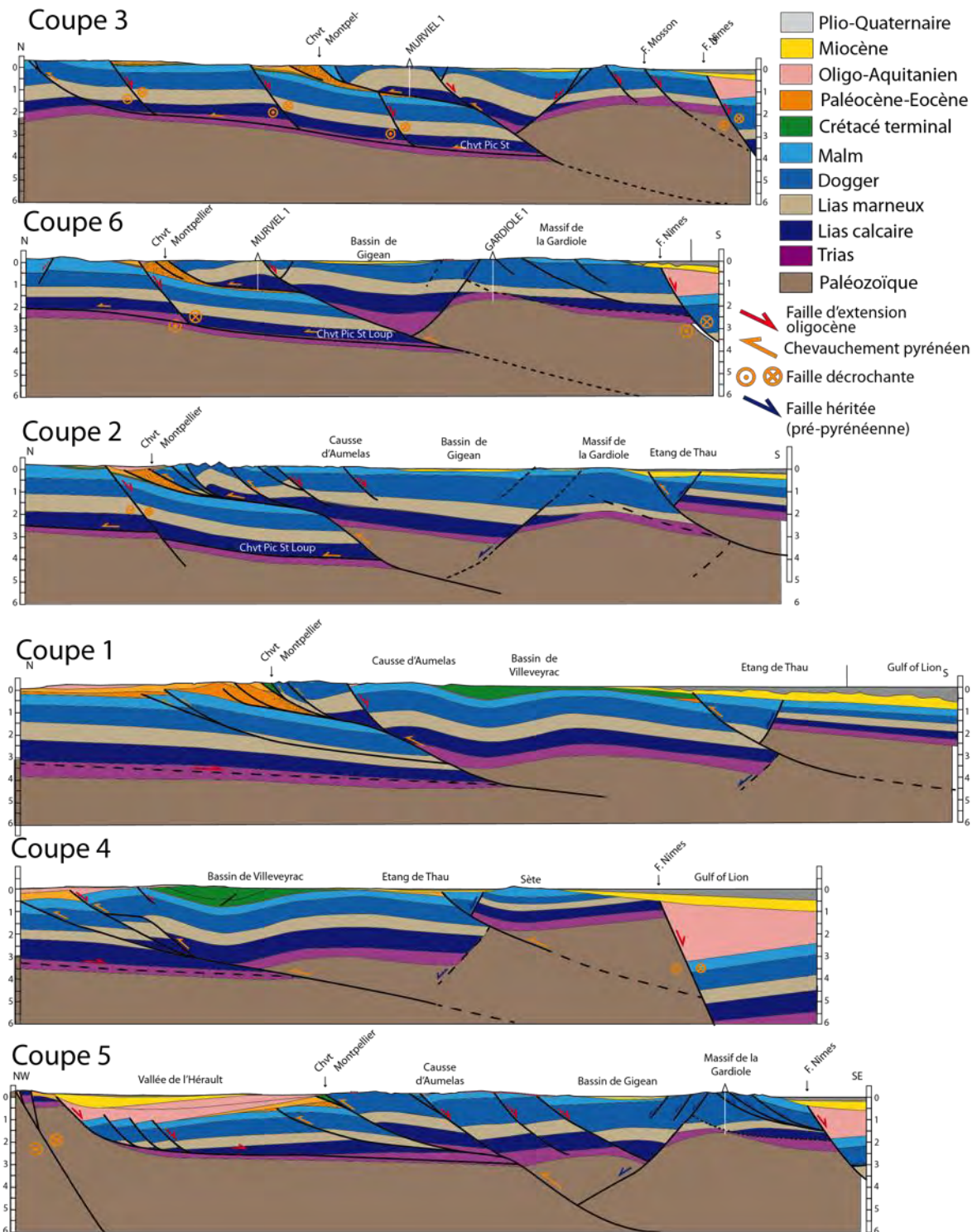


Figure 35 : Coupes structurales de référence dessinées en préparation à la modélisation. Bien que les tracés des failles et des limites d'unités soient incertains, ces coupes sont importées dans GeoModeller et apportent des contraintes en profondeur. La modélisation des failles et des interfaces conduit à la modification de ces coupes qui ne sont donc pas finales.

7. Résultats du modèle géologique 3D

7.1. MODÉLISATION DU RÉSEAU DE FAILLES

La zone d'étude comprend 24 failles dont les relations failles-séries et les connexions en surface et en profondeur varient. Ces failles sont divisées en deux familles principales (Figure 7.2) : les chevauchements pyrénéens orientés est-nord-est/ouest-sud-ouest et les failles normales pré-pyrénéennes ou oligocènes orientées nord-est/sud-ouest. Les chevauchements pyrénéens dans la zone d'étude incluent les chevauchements de Montpellier et de Thau (Figure 7.2, Figure 7.3, Figure 7.4).

La réactivation des failles au cours de l'histoire tectonique polyphasée implique des segments de failles qui se recoupent en profondeur avec des géométries différentes à chaque événement tectonique. Cette complexité « historique » du réseau de failles ne peut pas être retranscrite en modélisation 3D. Dans le cas des failles réactivées, on représente uniquement la géométrie des segments de faille tels qu'ils sont lors de leur dernière réactivation. Par exemple, la faille de Sainton (« F_sainton ») est un chevauchement pyrénéen qui a été réactivé en faille normale pendant le rifting oligocène (Figure 5.2). Dans le modèle, cette faille est donc représentée comme une surface de faille normale oligocène (Figure 7.4, Figure 7.3).

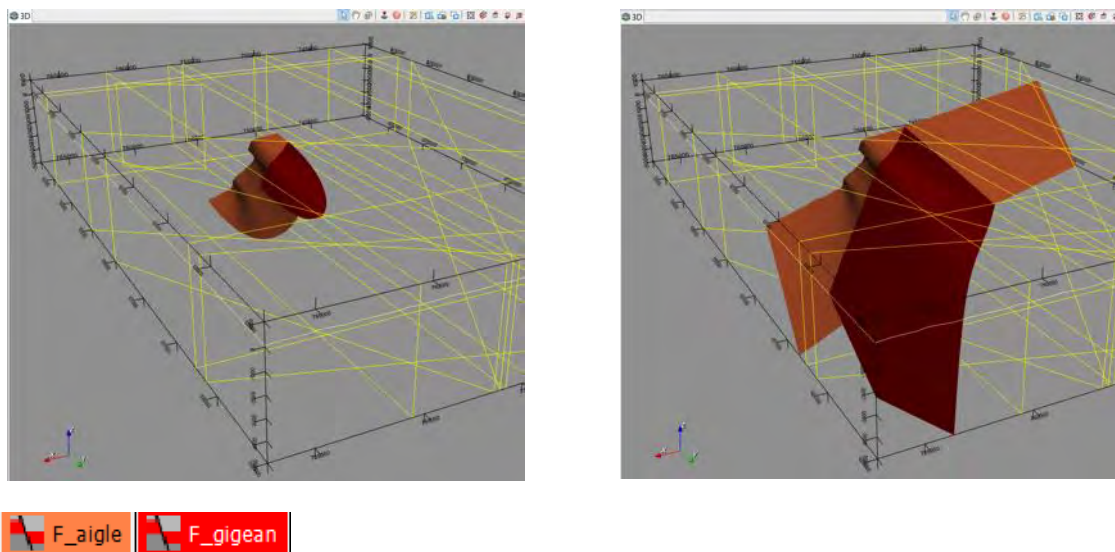


Figure 36 : Notion de failles « finie » et « infinies » et relations de recoupement ou non entre failles, dans le logiciel Geomodeller : À gauche, failles « finies » d'Aigle et de Gigean. Leur extension dépend des paramètres R1, R2 et R3 définis par le modélisateur (voir Tableau 5). À droite, les mêmes failles si celles-ci avaient été définies comme « infinies » et faille de Gigean s'arrêtant sur la faille d'Aigle.

Les failles sont soit « infinies » soit « finies » (Figure 36). Les dimensions des failles finies dépendent des paramètres définis par le modélisateur : (R1) rayon horizontal de l'ellipsoïde de la surface de faille ; (R2) rayon de l'ellipsoïde perpendiculaire à la direction de faille ; (R3) rayon d'influence (rayon d'influence d'un point de contrainte sur la surface de faille). Par défaut, les failles infinies traversent l'ensemble du volume des formations qu'elles affectent mais elles peuvent avoir une extension limitée en se connectant à d'autres failles infinies (Figure 36 à droite). Les différentes failles du modèle sont décrites et regroupées par type et par localité. Pour faciliter la lecture des figures, le réseau de failles est ici représenté sans les formations (Figure 37 à Figure 39). On rappelle que les séries/formations et les failles sont modélisées ensemble dans la version finale du modèle 3D.

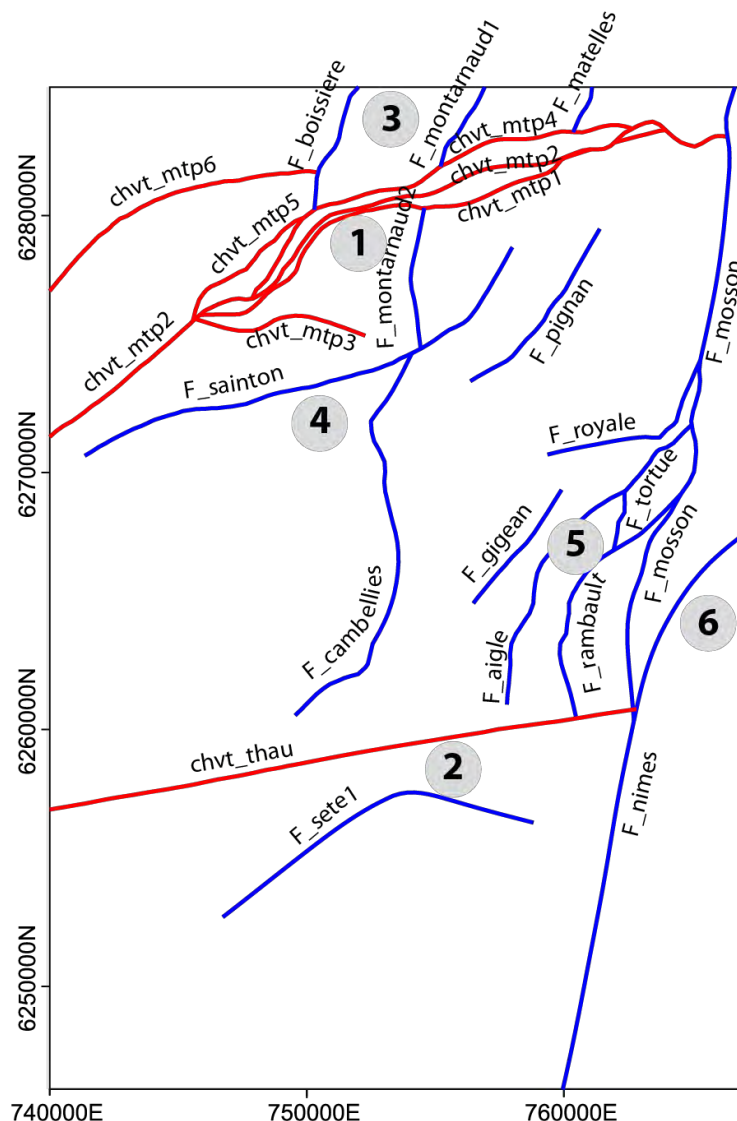


Figure 37 : Failles modélisées et projetées en surface. Les différentes failles sont regroupées par secteurs : (1) chevauchement de Montpellier, (2) chevauchement de Thau, (3) nord du chevauchement de Montpellier, (4) Causse d'Aumelas, (5) Massif de la Gardiole, (6) Bordure est.

7.1.1. Le chevauchement de Montpellier

En surface, le chevauchement de Montpellier est synthétisé en 6 segments de failles (Figure 37). On modélise 5 failles infinies (*chvt_mtp1*, *chvt_mtp2*, *chvt_mtp3*, *chvt_mtp5*, *chvt_mtp6*) et une faille finie (*chvt_mtp4*; $R_1=4\,000\text{ m}$; $R_2=4\,000\text{ m}$; $R_3=4\,000\text{ m}$). Cet ensemble de failles comprend une faille principale (*chvt_mtp2*) qui dessine une géométrie en rampe-palier recoupant le socle paléozoïque (Figure 37, Figure 38). Le pendage de ces failles varie entre 30° et 50° en surface et diminue en profondeur pour devenir localement subhorizontal. Les segments localisés sur le mur du chevauchement forment plusieurs écailles qui accommodent les sédiments synchrones de la compression pyrénéenne (séries syn-tectonique « *Vitrollien* », « *Éocène* »).

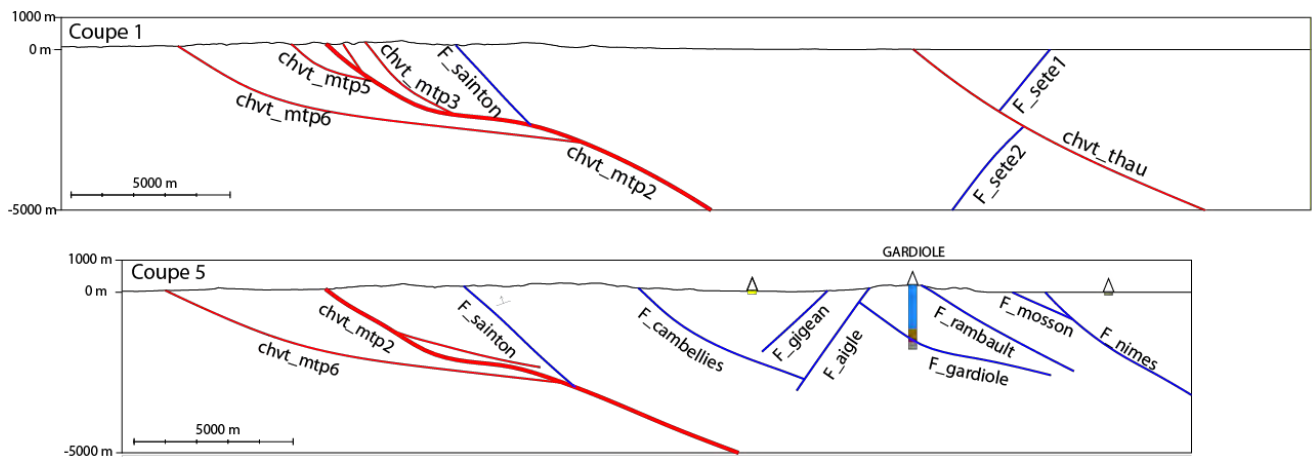


Figure 38 : Modélisation des failles (chevauchement en rouge et failles normales en bleu) dans les coupes 1 et 5.

7.1.2. Le chevauchement de Thau

Le chevauchement Thau est localisé dans la partie sud du modèle mais n'atteint pas la surface car il est scellé par les formations tertiaires (« *Miocène* » et « *Plio-Quaternaire* ») sous la lagune de Thau. Il se connecte vers l'est à la faille de Nîmes dans le secteur de Sète-Balaruc (Figure 37, Figure 38). Le chevauchement de Thau recoupe la faille normale de Sète en profondeur donnant lieu à deux segments de failles (« *F_sete1* » et « *F_sete2* »). Cette faille de Sète isole structuralement et stratigraphiquement le Mont Saint-Clair (à Sète) qui est situé dans un bloc soulevé par rapport à la zone de Balaruc.

7.1.3. Nord du chevauchement de Montpellier

Au nord de la zone d'étude, trois failles normales orientées nord-est/sud-ouest et à pendage sud-est se connectent au chevauchement de Montpellier (« *F_boissiere* », « *F_montarnaud* », « *F_matelles* »). Ces failles sont considérées comme des failles héritées de la compression pyrénéennes (décrochement en jeu sénestre) et qui ont été réactivées pendant l'extension oligocène (Benedicto *et al.*, 1999). Leur réactivation à l'Oligocène ne montre pas de recoupement net du chevauchement de Montpellier. Seule la faille « *F_montarnaud2* » apparaît comme un prolongement de la faille « *F_montarnaud1* », représentée par un segment séparé (Figure 37).

7.1.4. Secteur Causse d'Aumelas

Le Causse d'Aumelas comprend les failles « *F_sainton* », « *F_cambellies* », « *F_montarnaud2* », « *F_Pignan* » (Figure 37). Sur le terrain, les mesures de direction de plan de faille varient entre N000° et N080° avec des pendages vers l'est et sud-est, et compris entre 52° et 80°. La faille « *F_montarnaud2* » est représentée avec un pendage subvertical de 80° vers l'est. Les autres failles ont des pendages compris entre 52° et 60°, plus typiques des failles normales. Toutes ces failles sont localisées dans le toit du chevauchement de Montpellier. Ces failles sont modélisées comme des failles normales mais elles ont pu être actives comme chevauchements pendant la compression pyrénéenne. On considère que ces failles se branchent sur le chevauchement principal « *chvt_mtp2* » qui est présent à environ -1 400 mètres NGF dans cette zone. À part la faille « *F_montarnaud2* » orientée nord-sud, la connexion en profondeur de ces failles est localisée à la transition rampe-palier du chevauchement de Montpellier, vers -2 000/-2 500 mètres NGF (Figure 38). Plus au sud, ce même chevauchement s'enracine dans le socle paléozoïque.

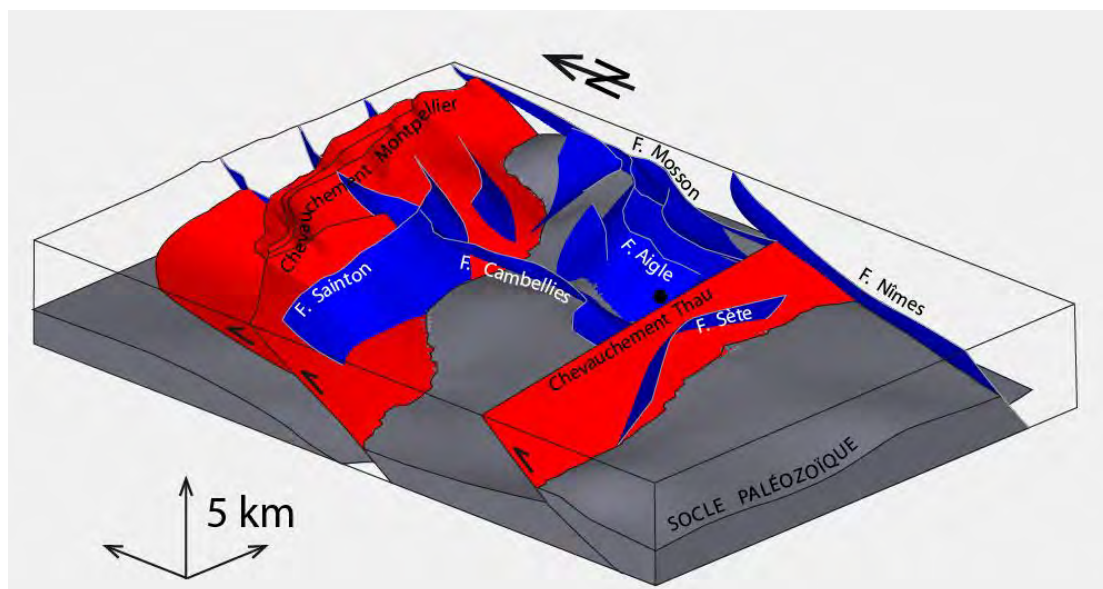


Figure 39 : Vue 3D du réseau de failles depuis le sud-ouest. En rouge les chevauchements pyrénéens et en bleu les failles pré-pyrénéennes et oligocènes.

7.1.5. Secteur massif de la Gardiole

Les failles dans le secteur du massif de la Gardiole sont toutes orientées N030°–N040° avec des pendages compris entre 40° et 60°. Les failles « *F_gigean* », « *F_aigle* », « *F_royal* » en bordure ouest du massif ont un regard vers le nord-ouest, alors que les failles « *F_rambault* », « *F_tortue* », et « *F_gardiole* » à l'intérieur du massif présente un regard vers le sud-est (Figure 37, Figure 38). La faille normale « *F_gardiole* » n'est pas observée en surface mais elle est interprétée en profondeur et permet d'expliquer l'absence de la formation « *Lias_calcaire* » dans le forage GARDIOLE. Cette faille recoupe la faille « *F_aigle* » et aurait la même direction que la faille « *F_rambault* ».

Le massif de la Gardiole est caractérisé par des failles mineures à pendage faible (environ 30°–40°) qui ne sont pas prises en compte dans le modèle 3D. Cette zone formerait un haut structural de type « Horst » hérité du rifting téthysien (voir rapport BRGM/RP-68463-FR pour plus de détails). Il n'y a pas d'évidence de compression des séries Malm et Dogger et les évidences de mouvement décrochant sur les miroirs de faille sont rares. Il est possible que certaines de ces failles aient été réactivées pendant la phase d'extension à l'Oligocène ; mais il n'y a pas de données robustes pour valider cette hypothèse.

7.1.6. Bordure Est

La bordure Est de la zone d'étude correspond à des blocs abaissés, délimités par les failles de Nîmes et de la Mosson (« *F_nîmes* », « *F_mosson* »). La faille de la Mosson recoupe le chevauchement de Montpellier en profondeur et se connecte à la faille de Nîmes vers le sud dans le secteur de la Gardiole (Figure 37). Les mesures en surface dans le massif de la Gardiole montrent des pendages compris entre 50°–60° vers le sud-est.

La bordure Est du modèle est une zone de branchement (point triple) entre les failles de la Mosson et de Nîmes et le chevauchement de Thau. La faille de Nîmes orientée nord-est à l'est du modèle 3D (parallèlement aux failles de massif de la Gardiole) est orientée nord-nord-est/sud-sud-ouest en domaine marin. Ce changement de direction est interprété à partir des profils sismiques et de l'anomalie gravimétrique résiduelle.

<i>Secteur</i>	<i>Nom</i>	<i>Description</i>	<i>Type</i>	<i>R1 (rayon horizontal)</i>	<i>R2 (rayon vertical)</i>	<i>R3 (rayon d'influence)</i>
Chevauchement de Montpellier	chvt_mtp1	Chevauchement pyrénéen	Infinie	-	-	-
	chvt_mtp2	Chevauchement pyrénéen	Infinie	-	-	-
	chvt_mtp3	Chevauchement pyrénéen	Finie	-	-	-
	chvt_mtp4	Chevauchement pyrénéen	Infinie	4000	4000	4000
	chvt_mtp5	Chevauchement pyrénéen	Infinie	-	-	-
	chvt_mtp6	Chevauchement pyrénéen	Infinie	-	-	-
Chevauchement de Thau	Chvt_Thau	Chevauchement pyrénéen	Infinie	-	-	-
	F_sete1	Faïlle normale pré-pyrénéenne	Finie	7000	6000	7000
	F_sete2	Faïlle normale pré-pyrénéenne	Finie	7000	5000	7000
Nord du chevauchement de Montpellier	F_boissiere	Faïlle normale oligocène	Finie	10000	8000	10000
	F_montarnaud1	Faïlle normale oligocène	Finie	8000	4000	8000
	F_matelles	Faïlle normale oligocène	Finie	12000	6000	12000
Causse d'Aumelas	F_sainton	Faïlle normale oligocène	Finie	10000	6000	60000
	F_cambellies	Faïlle normale oligocène	Finie	10000	5000	5000
	F_montarnaud2	Décrochement pyrénéen	Finie	10000	4000	10000
	F_pignan	Faïlle normale oligocène	Finie	4000	4000	4000
Massif de la Gardiole	F_gigean	Faïlle normale oligocène?/pré-pyrénéenne ?	Finie	3000	3000	3000
	F_royal	Faïlle normale oligocène?/pré-pyrénéenne?	Finie	5000	5000	5000
	F_tortue	Faïlle normale oligocène?/pré-pyrénéenne?	Finie	4000	4000	4000
	F_aigle	Faïlle normale oligocène?/pré-pyrénéenne?	Finie	6000	4000	4000
	F_rambault	Faïlle normale oligocène?/pré-pyrénéenne?	Finie	6000	4000	6000
	F_Gardiole	Faïlle normale oligocène?/pré-pyrénéenne?	Finie	6000	4000	6000
Bordure Est	F_nimes	Faïlle normale oligocène	Infinie	-	-	-
	F_mosson	Faïlle normale oligocène	Finie	10000	5000	5000

Tableau 5 : Liste des failles et leurs principaux paramètres pour la modélisation.

Series / Faults	Chvt mtp1	Chvt mtp2	Chvt mtp3	Chvt mtp4	Chvt mtp5	Chvt mtp6	F. Aigle	F. Boissiere	F. Cambellies	F. Gardiole	F. Gigan	F. Matelles
Eau												
Surface messinienne (Plio-Quaternaire)												
Miocène												
Oligocène-Aquitanién												
Eocène												
Vitrollien												
Crétacé terminal												
Réservoir												
Lias												
Trias												
Socle												

Series / Faults	F. Montarnaud 1	F. Montarnaud 2	F. Mosson	F. Nîmes	F. Pignan	F. Rambault	F. Royale	F. Sainton	F. Sète	F. Sète2	F. Tortue	F. Valensac
Eau												
Surface messinienne (Plio-Quaternaire)												
Miocène												
Oligocène-Aquitanién												
Eocène												
Vitrollien												
Crétacé terminal												
Réservoir												
Lias												
Trias												
Socle												

Tableau 6 : Affectation des séries par les failles. Les cases en gris foncé correspondent aux séries affectées par les failles. F : faille ; Chvt : chevauchement ; mtp : Montpellier.

Se branche sur→	Chvt mtp1	Chvt mtp2	Chvt mtp3	Chvt mtp4	Chvt mtp5	Chvt mtp6	F. Aigle	F. Boissière	F. Cambellies	F. Gardiole	F. Gigan	F. Matelles
Chvt mtp1	–											
Chvt mtp2		–										
Chvt mtp3			–									
Chvt mtp4				–								
Chvt mtp5					–							
Chvt mtp6						–						
F. Aigle							–					
F. Boissière								–				
F. Cambellies									–			
F. Gardiole										–		
F. Gigan											–	
F. Matelles												–
F. Montarnaud1												
F. Montarnaud2												
F. Mosson1												
F. Nîmes												
F. Pignan												
F. Rambault												
F. Royale												
F. Sainton												
F. Sète												
F. Sète2												
F. Tortue												
F. Valensac												

Se branche sur→	Chvt mtp1	Chvt mtp2	Chvt mtp3	Chvt mtp4	Chvt mtp5	Chvt mtp6	F. Aigle	F. Boissière	F. Cambellies	F. Gardiole	F. Gigan	F. Matelles
Chvt mtp1												
Chvt mtp2												
Chvt mtp3												
Chvt mtp4												
Chvt mtp5												
Chvt mtp6												
F. Aigle												
F. Boissière												
F. Cambellies												
F. Gardiole												
F. Gigan												
F. Matelles												
F. Montarnaud1	–											
F. Montarnaud2		–										
F. Mosson1			–									
F. Nîmes				–								
F. Pignan					–							
F. Rambault						–						
F. Royale							–					
F. Sainton								–				
F. Sète									–			
F. Sète2										–		
F. Tortue											–	
F. Valensac												–

Tableau 7 : Relations entre les failles. Les cases en gris foncé indiquent que les failles de la première colonne s'arrêtent sur les failles indiquées à droite, dans les autres colonnes du tableau. Les cases avec un tiret indiquent qu'une faille ne peut être liée à elle-même.

7.2. MODÉLISATION DES FORMATIONS

Les résultats de modélisation sont illustrés sous forme de cartes, de coupes et de blocs diagramme 3D. En ce qui concerne la pile lithologique, on modélise les interfaces des bases des formations (Figure 40 A). Le résultat final est illustré avec un remplissage des formations pour mieux visualiser la géométrie des structures (Figure 40 B). La modélisation en surface est fortement dépendante de la résolution du modèle numérique de terrain (MNT). On utilise ici un MNT d'une résolution de 25 mètres (produit IGN BD ALTI® version 2), suffisante pour notre étude.

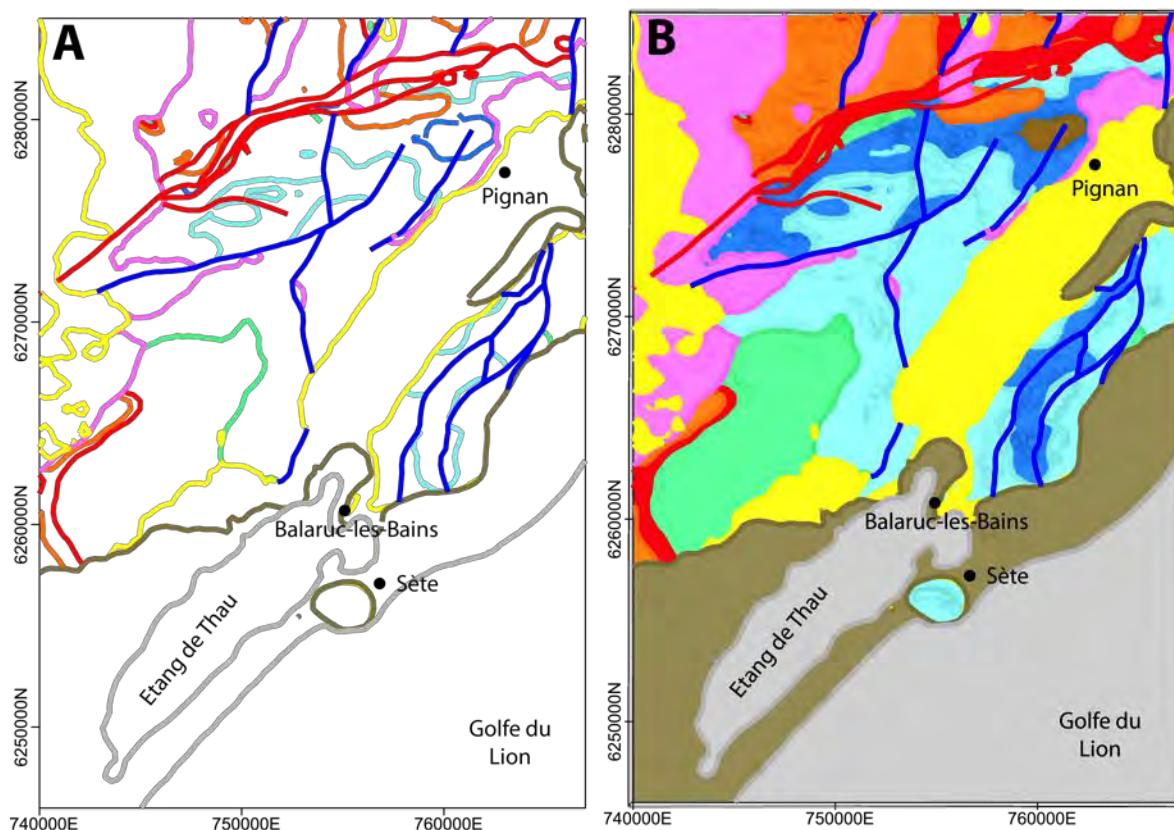


Figure 40 : (A) Résultats cartographiques de la modélisation des limites des formations et des failles. (B) Mêmes résultats avec la visualisation des formations et des failles.

Dans les coupes de référence (Figure 41), les interfaces modélisées sont illustrées en laissant les contraintes apparentes (forages, points de passages orientés). On ajoute le moins de contraintes possibles sur ces coupes afin de donner à l'algorithme un certain degré de liberté pour tracer les interfaces.

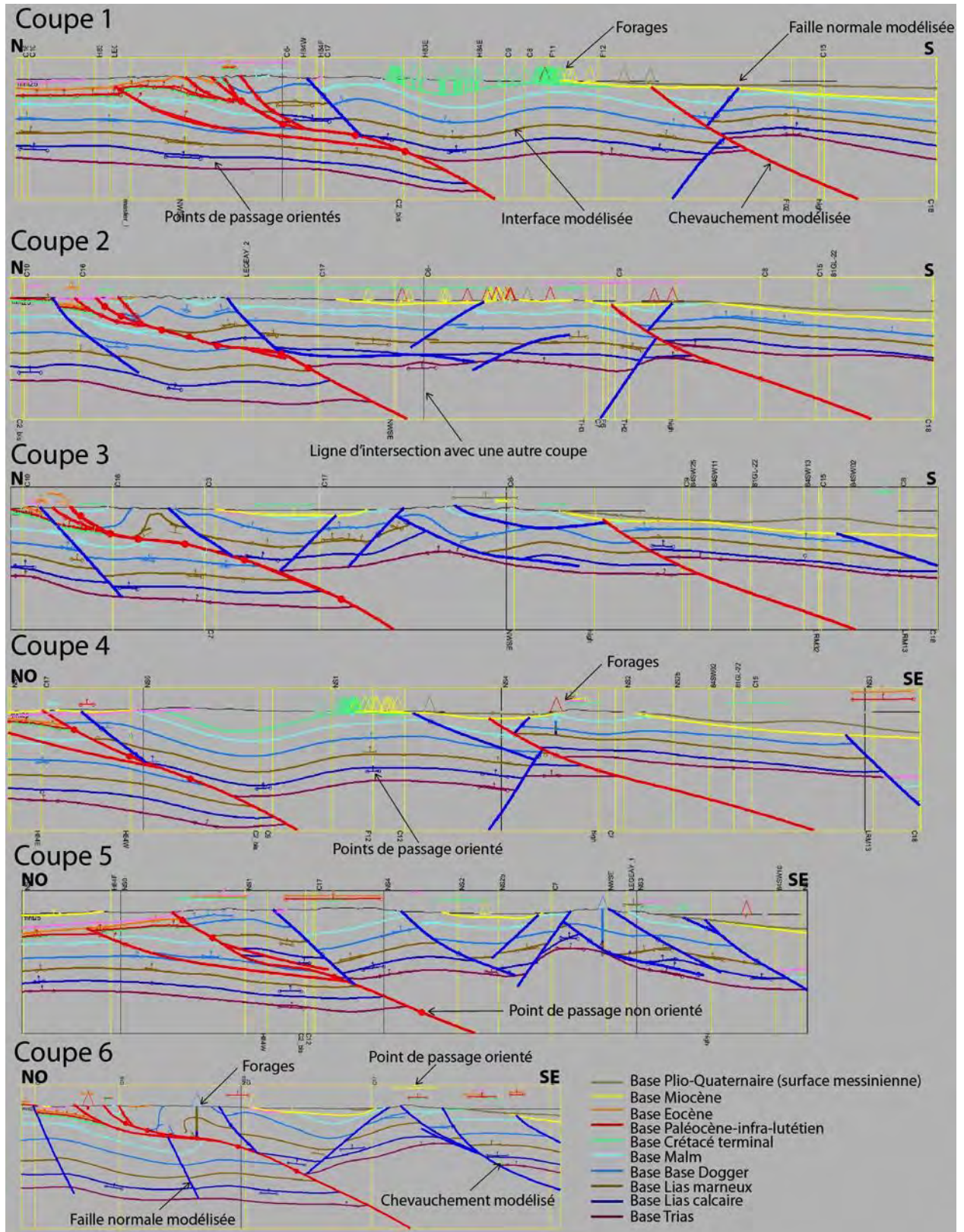


Figure 41 : Coupes de référence modélisées avec mise en évidence des contraintes (points de passages orientés, forages projetés à 500 m). Les interfaces représentent les bases de formations « bottom ». Les couleurs sont les mêmes que celles de la pile lithologique (voir Figure 34 pour la localisation des coupes).

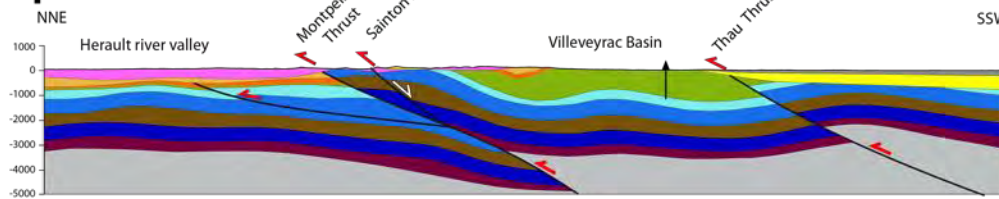
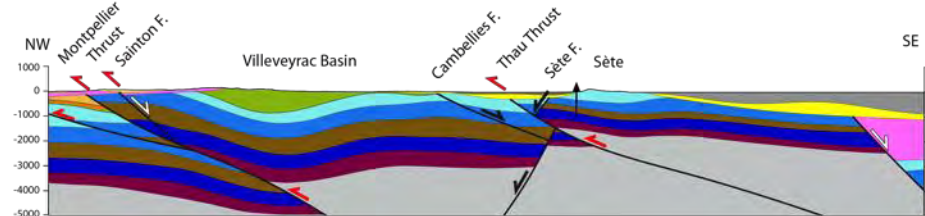
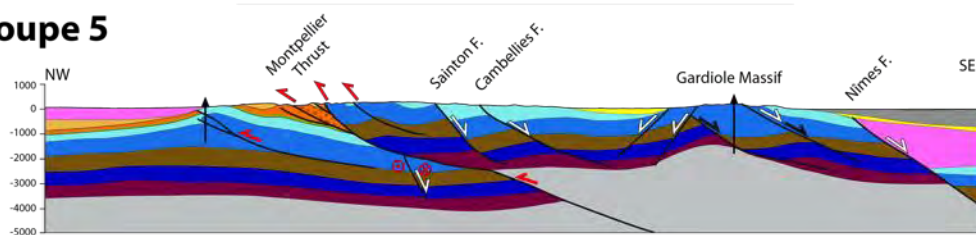
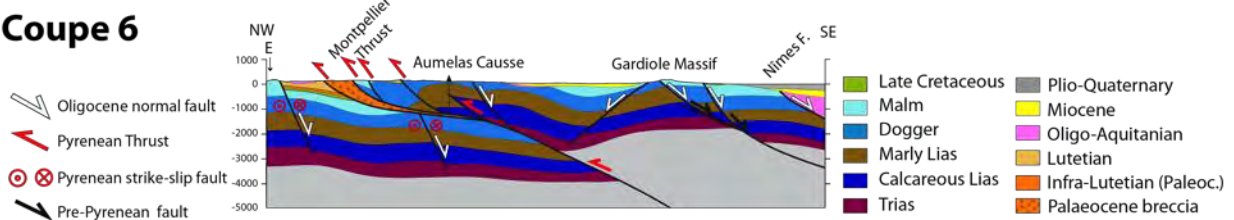
Coupe 1**Coupe 4****Coupe 5****Coupe 6**

Figure 42 : Exemple de coupes 1, 4, 5, 6 finales éditées. Les flèches de couleurs différentes correspondent aux différentes générations de failles ayant joué dans la région. (voir les coupes préliminaires de la Figure 35).

7.3. VÉRIFICATION DES FORAGES

L'outil de détection (dans GeoModeller) des forages permet d'évaluer l'écart géométrique des forages non respectés par le modèle (distance verticale entre l'interface modélisé et l'intersection rencontrée en forage), on observe qu'une grande majorité des forages (93 %) est respectée par le modèle avec une résolution à 50 mètres (Figure 43). En dessous de 50 mètres, le pourcentage de forages non respectés augmente drastiquement. Cette valeur peut donner une indication sur la résolution maximale du modèle dans sa partie superficielle (jusqu'à environ 300–500 m de profondeur) mais doit être utilisée avec précaution. En effet, la distribution des forages est hétérogène; avec des zones avec une forte densité de forages et des zones sans forage (Figure 33). De plus, on rappelle qu'il y a peu de forages profonds et peu de données à plus de 500 mètres de profondeur ; par conséquent, l'incertitude du modèle augmente fortement avec la profondeur. Même si l'on ne peut pas quantifier précisément la résolution du modèle, elle peut atteindre plusieurs centaines de mètres dans les zones les plus incertaines et les plus profondes.

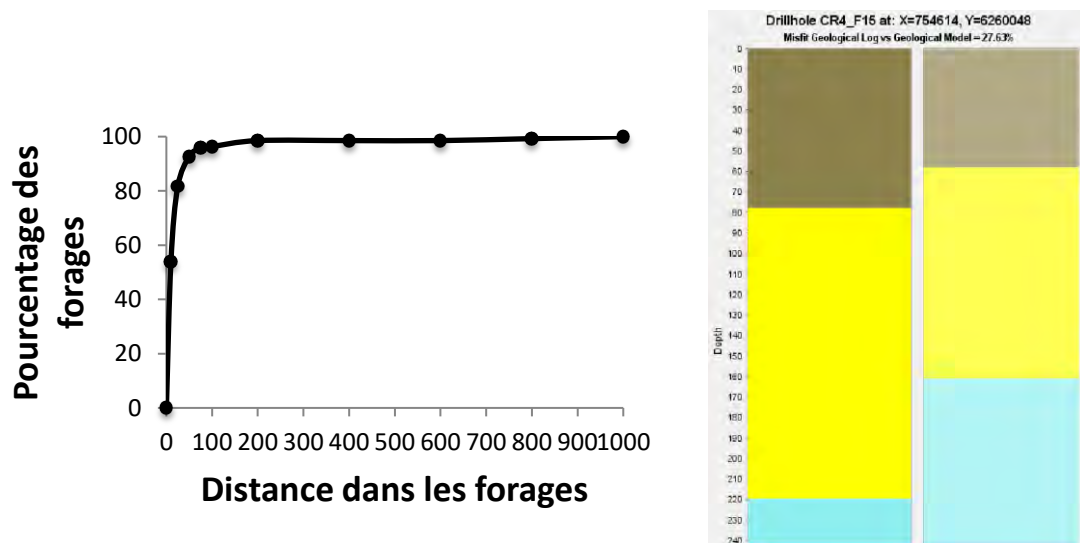


Figure 43 : (Gauche) Pourcentage des forages en fonction de la distance dans les forages, toutes formations incluses. (Droite) Comparaison entre le forage (forage thermal F15) et le résultat de modélisation au niveau de ce même forage (graduations tous les 10 mètres).

7.4. CARTOGRAPHIE 3D ET 2D

L'outil de visualisation 3D permet d'afficher l'ensemble des formations et failles modélisées, mais aussi d'interroger ce modèle complet en tout point de l'espace 3D. À partir de ce modèle 3D complet, on peut ainsi dessiner des coupes dans toutes les directions afin de mettre en évidence la géométrie détaillée des niveaux stratigraphiques d'intérêt. On trace par exemple ici une coupe orientée nord-ouest/sud-est passant par Balaruc-les-Bains (Figure 44) permettant de visualiser le toit du réservoir karstique (Figure 45) et le réseau de failles associé, sous couverture, c'est-à-dire sans les formations sédimentaires sus-jacentes (Figure 39).

À partir du modèle géologique 3D complet, le logiciel GeoModeller permet également de générer des cartes isohypses (Figure 46) et isopaques des formations modélisées (Figure 47). Ce type de grilles 2D est plus adapté que les vues 3D pour estimer les variations d'altitude (cote NGF) et d'épaisseur, et lisible par tout type de support SIG. Les différentes cartes isohypses et isopaques présentées ci-après sont affichées avec les mêmes échelles de couleurs. Les ruptures de gradients de profondeur et d'épaisseurs correspondent aux failles qui affectent et décalent les différentes formations. À noter que toutes les formations modélisées ne sont pas présentées ici et que les différentes cartes ne sont pas non plus commentées de façon exhaustive.

Les séries du Plio-Quaternaire (dont la base correspond à la surface d'érosion messinienne) et du Miocène montrent un approfondissement vers le sud-est en domaine marin (0 à 1 000 mètres et 0 à 650 mètres respectivement).

La distribution de la série Oligocène-Aquitainien montre un dépocentre majeur (demi-graben) au toit de la faille de Nîmes (épaisseur maximale de 1 800 mètres) et un approfondissement progressif vers le nord-ouest de la vallée de l'Hérault. Cette série est absente entre ces deux dépocentres au centre de la zone d'étude, suivant une direction nord-est/sud-ouest.

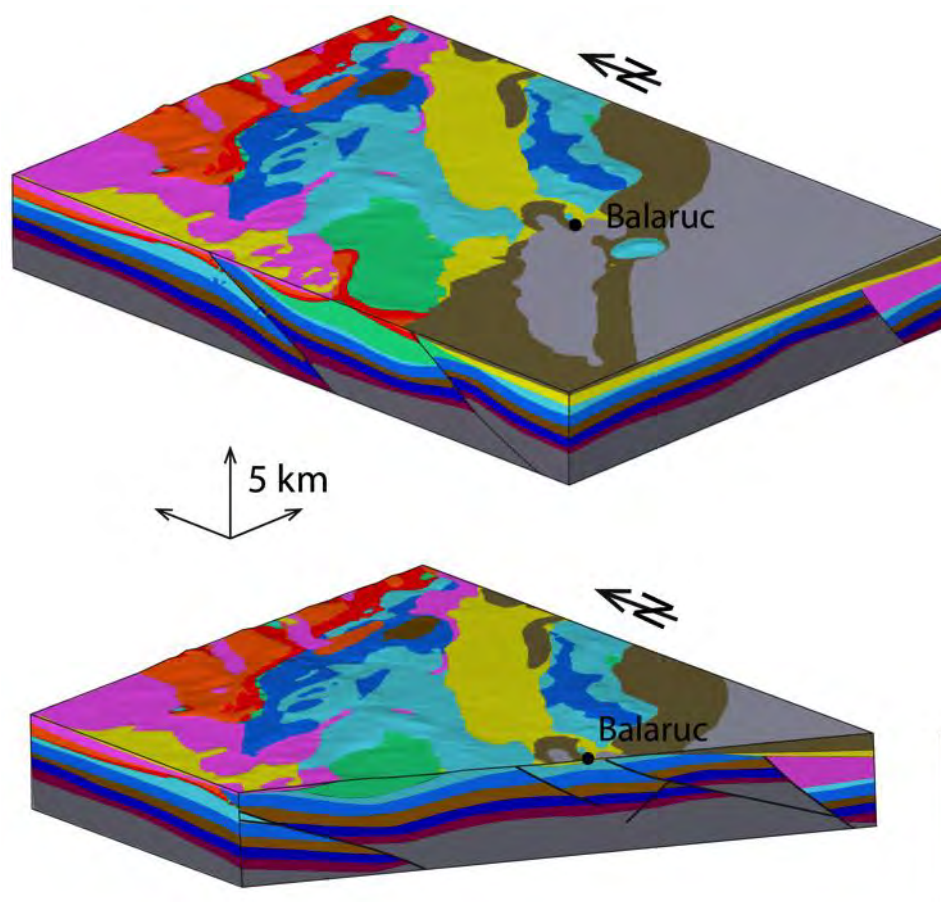


Figure 44 : Vue du modèle 3D complet et extraction d'une coupe orientée nord-ouest/sud-est passant par Balaruc-les-Bains.

Les dépôts syn-pyrénéens formés par les séries/formations « Vitrollien » et « Eocène », sont ici regroupés en une succession dite « Paléocène-Eocène ». Cette succession montre une épaisseur maximale (1 100 mètres) le long du chevauchement de Montpellier (écailles syn-tectoniques formées par la formation « Vitrollien »).

Les dépôts du Crétacé sont localisés dans le Bassin de Villeveyrac à l'ouest de la zone d'étude (jusqu'à 1 600 mètres). Le coin nord-est montre une plus grande épaisseur (jusqu'à environ 900 mètres) où les dépôts du Néocomien (partie inférieure du Crétacé) sont localement préservés. Ailleurs la série du Crétacé est peu épaisse (50–100 mètres). Le Crétacé Supérieur est présent dans le Bassin de Villeveyrac sur une grande épaisseur (>1 000 mètres).

Le toit du Malm correspond au toit du réservoir karstique d'intérêt (Figure 45). Il s'agit d'une surface complexe en discordance avec toutes les séries plus jeunes mentionnées ci-dessus (d'âge crétacé et tertiaire). Le toit du Malm est relativement peu profond au centre du modèle 3D et plonge vers l'ouest sous le Bassin crétacé de Villeveyrac. L'épaisseur de la formation « Malm » varie peu avec quelques surépaissements le long des failles normales et des chevauchements.

Les bases du Malm et du Dogger montrent des variations similaires. Les cartes isopaques pour les formations plus vieilles sous-jacentes ne sont pas présentées ici car elles illustrent une vue erronée de l'épaisseur des formations. En effet, en chaque point, elles cumulent les épaisseurs de part et d'autre du chevauchement de Montpellier (aberration d'épaisseur du Malm à 2 000 mètres au nord-est de la zone d'étude).

Le toit du socle varie entre -1 300 et -5 000 mètres d'altitude (cote NGF). La surface du toit du socle est marquée par des ruptures de gradients de profondeur et d'épaisseur qui correspondent à la trace des failles recoupant le socle. Plus particulièrement, il s'agit des traces du chevauchement de Montpellier (au nord), du chevauchement de Thau (au sud), la faille de la Mosson (à l'est) et la faille de Nîmes (au sud-est). Le socle est localisé entre -1 500 et -2 500 m d'altitude environ sous le massif de la Gardiole et le long du chevauchement de Thau. Le toit du socle plonge vers le sud sous la rampe du chevauchement de Montpellier, et vers l'ouest sous la vallée de l'Hérault.

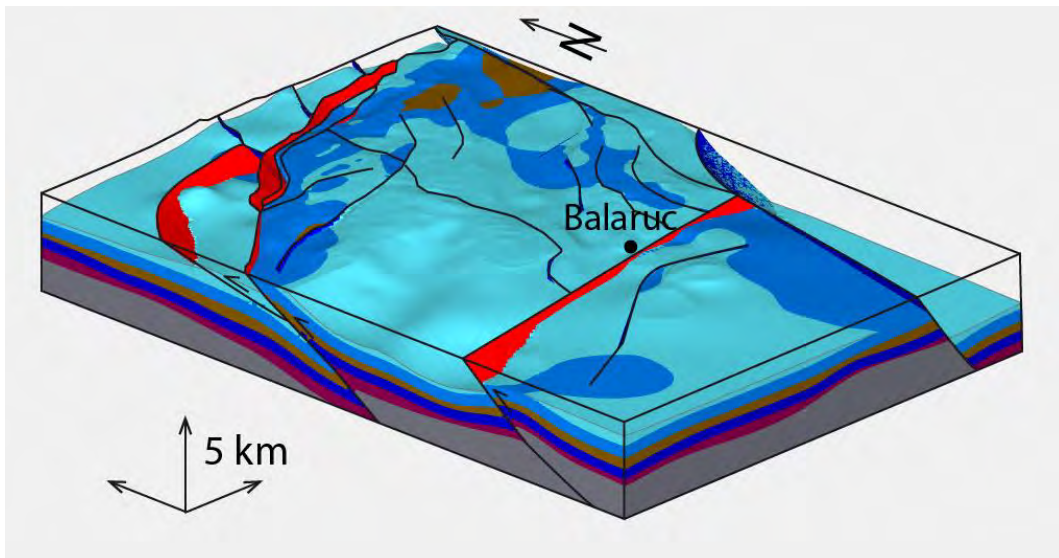


Figure 45 : Vue 3D du toit du réservoir Jurassique. Les surfaces de failles sont laissées apparentes.
En rouge : les chevauchements pyrénéens de Montpellier (au nord) et de Thau (au sud).

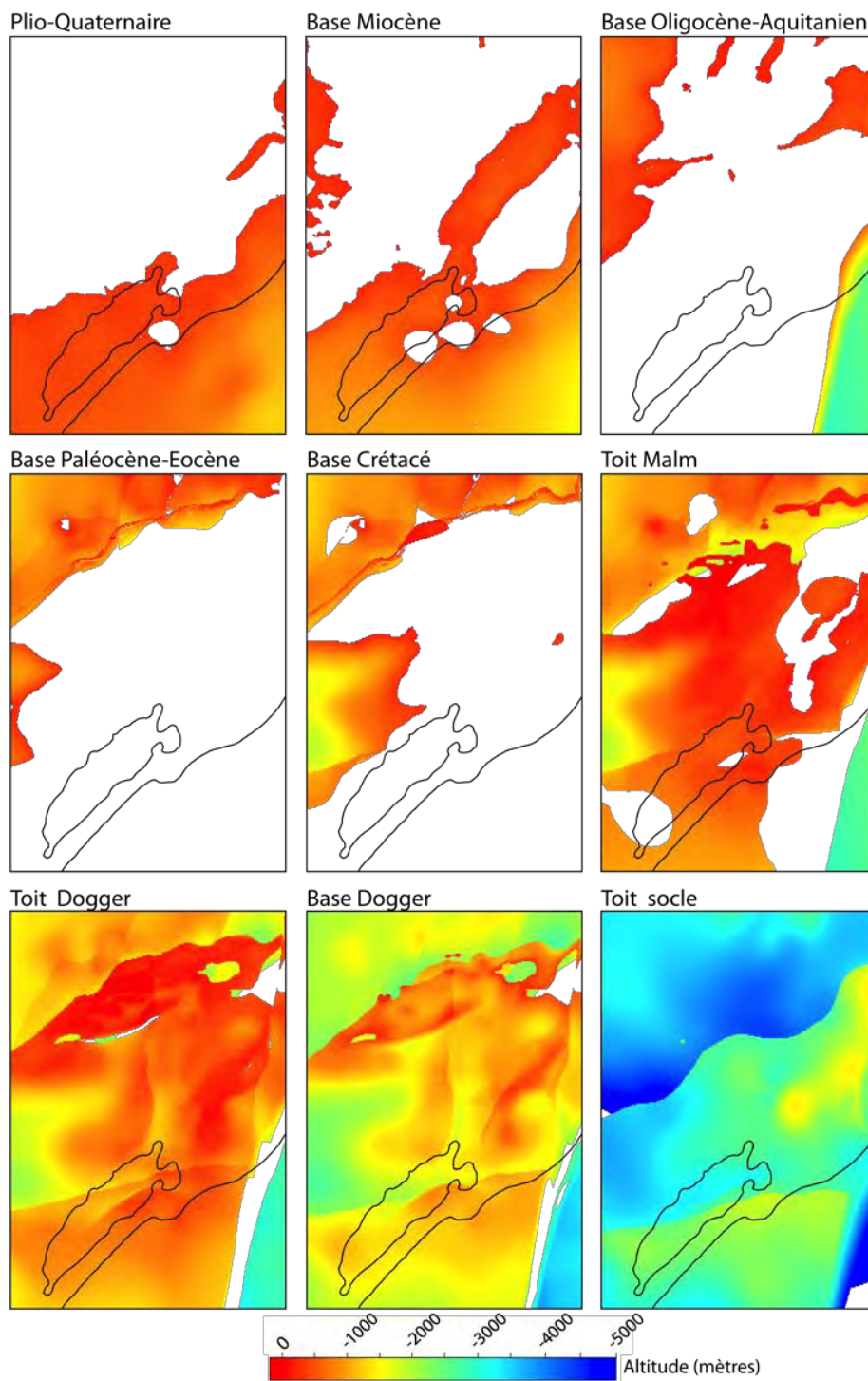


Figure 46 : Cartes isohypses de certaines formations du modèle (bases ou toits).
L'échelle d'altitude (mètres NGF) est la même pour toutes les formations.

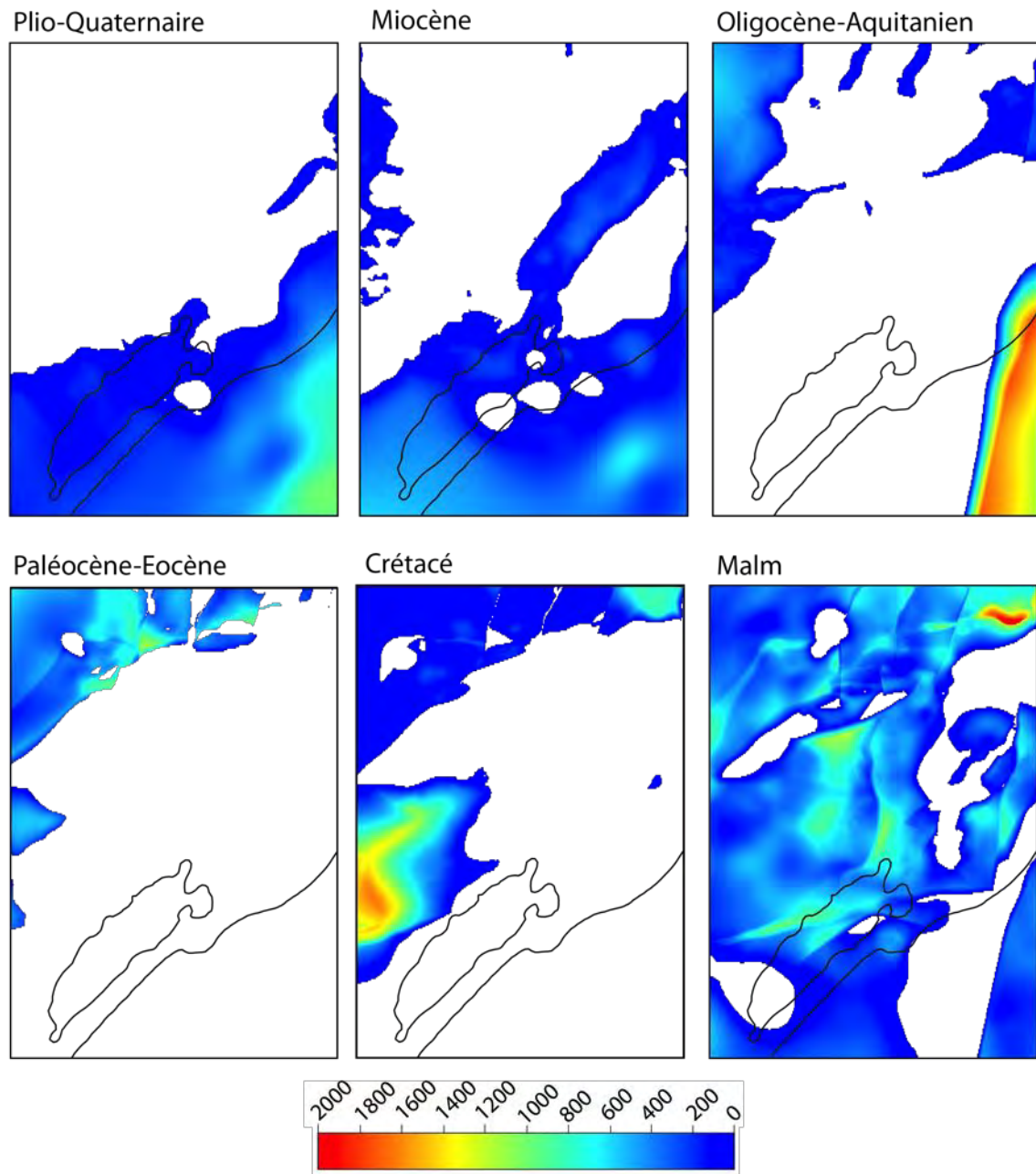


Figure 47 : Cartes isopaches de certaines formations géologiques du modèle. L'échelle d'épaisseur en mètres est la même pour toutes les formations.

7.5. RÉPONSE GRAVIMÉTRIQUE DU MODÈLE

La réponse gravimétrique du modèle est calculée dans les six coupes de référence à partir des valeurs de densité issues d'échantillons collectés dans la zone d'étude. Cette réponse gravimétrique du modèle est ensuite comparée aux anomalies gravimétriques résiduelles calculées à partir des mesures de terrain et d'une anomalie supposée (Figure 48). Le but du modèle est de reproduire les principales variations gravimétriques qui ont pu être mesurées sur le terrain. Cette comparaison permet d'ajuster la profondeur des interfaces et la position des accidents au cours de la construction du modèle. Les données gravimétriques du modèle sont sensibles aux forts contrastes de densité entre les formations, et notamment la profondeur du toit du socle paléozoïque (de forte densité).

Les zones où les données modélisées présentent des valeurs de gravimétrie supérieures aux données réelles sont expliquées par le surplus de masse/densité et donc à une position du toit du socle plus superficielle dans le modèle. Cela peut être corrigé en augmentant l'épaisseur de la pile mésozoïque peu contrainte. Dans le cas contraire, les zones où les données réelles sont supérieures aux données modélisées correspondent au manque de masse/densité lié à la présence du socle à une plus grande profondeur dans le modèle. Quand cela est possible, cette différence est corrigée en réduisant l'épaisseur de la pile mésozoïque.

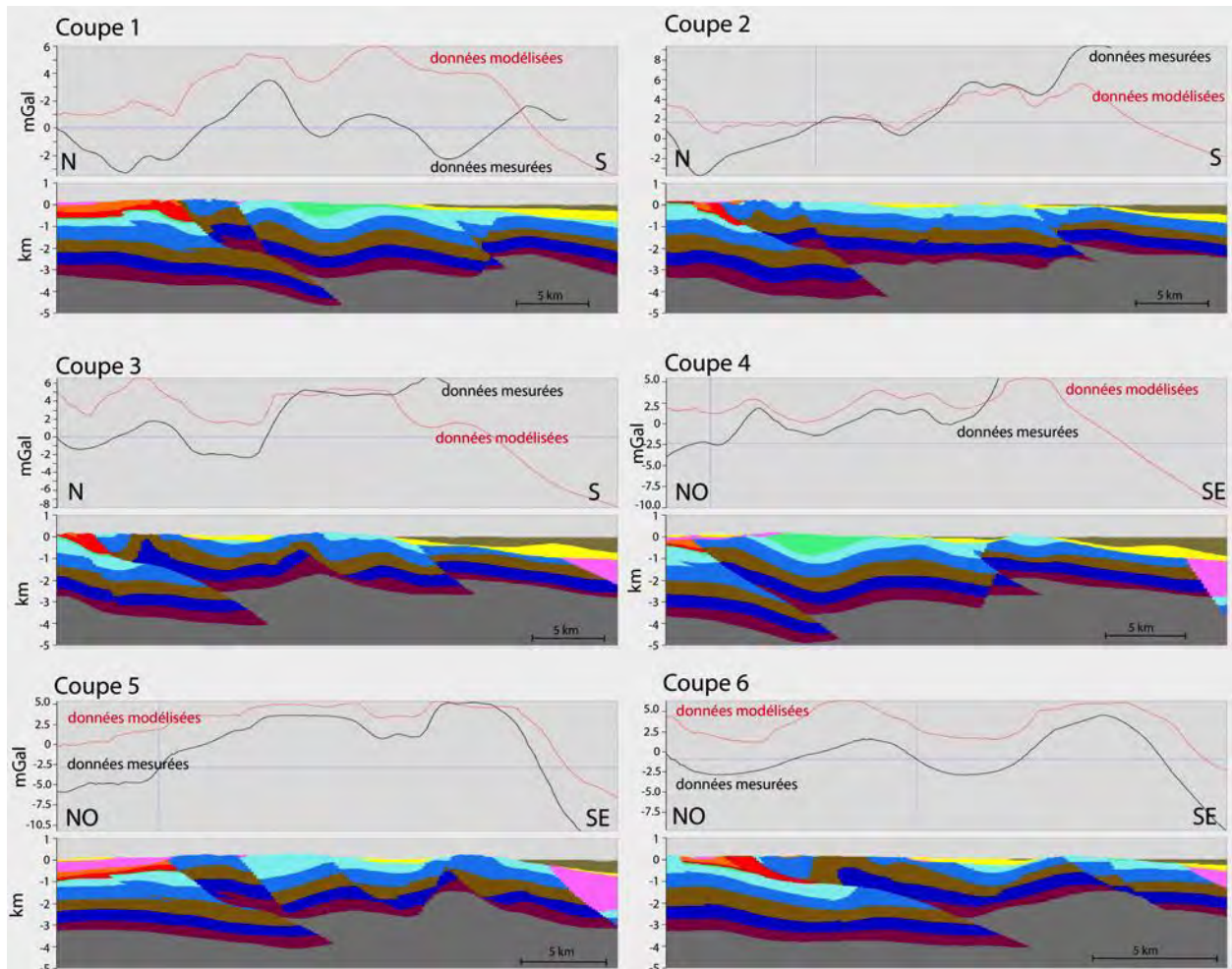


Figure 48: Réponse gravimétrique du modèle dans les six coupes de référence (courbe rouge « données modélisées ») et anomalie gravimétrique résiduelle (courbe noire « données mesurées ») calculée à partir de l'anomalie de Bouguer et l'anomalie gravimétrique régionale supposée. Les zones où l'écart entre les données modélisées et les données mesurées est importante correspondent à des imprécisions sur la profondeur du socle de forte densité.

Les différents ajustements pour reproduire au mieux les anomalies observées permettent de valider qualitativement la géométrie du modèle. Même si les anomalies gravimétriques ne se superposent pas toujours, la réponse gravimétrique du modèle est cohérente avec les variations issues des données mesurées. C'est notamment le cas pour les coupes nord-ouest/sud-est (coupes 4, 5 et 6 ; Figure 48) même si le modèle a tendance à légèrement surestimer les données mesurées. Les données mesurées sont plus difficilement respectées sur les coupes orientées nord-sud (coupes 1, 2 et 3 ; Figure 48). L'anomalie paraît surestimée dans le nord du modèle alors qu'elle est sous-estimée au sud du modèle, sous le Bassin de Thau. Cette différence du nord au sud de la zone d'étude pourrait être liée au choix de l'anomalie régionale pour calculer l'anomalie régionale. Bien que certaines incohérences puissent être encore corrigées, la réponse modélisée reproduit bien les principales tendances et le modèle 3D est tout à fait acceptable à ce stade.

La comparaison « données modélisées » vs « gravimétrie résiduelle » est aussi réalisée sous forme de cartes (Figure 49). La carte d'anomalie gravimétrique résiduelle affiche des variations entre -13,3 et +10,5 mGal, avec une valeur moyenne de $0,0 \pm 3,5$ mGal (1σ). La carte d'anomalie modélisée montre des variations entre -18,9 et +7,3 mGal, avec une valeur moyenne de $1,2 \pm 4,1$ mGal. La distribution des valeurs gravimétriques du modèle montre bien des valeurs supérieures à celles des données observées (Figure 50 : Histogrammes de distribution des valeurs d'anomalies gravimétriques pour (A) les données réelles/anomalie gravimétrique résiduelle, (B) les données modélisées et (C) la différence entre les *données modélisées et les données réelles* (« *misfit* »)). On présente aussi la carte de différence entre les données modélisées et les données réelles (« *misfit* » ; Figure 49 : (A) Anomalie gravimétrique résiduelle (données mesurées). (B) Réponse gravimétrique du modèle, calculée à partir des mesures de densité dans les différentes formations. (C) « Misfit » correspond à la différence entre les données modélisées et les données réelles. L'échelle de couleur en mGal est la même pour les différentes cartes.). Cette carte montre des valeurs comprises entre -12,0 et +10,5 mGal. La distribution des valeurs gravimétriques fait ressortir deux écarts extrêmes (pics) à -0,5 mGal et +5,2 mGal. Le pic à -0,5 mGal correspond à un « *misfit* » quasi nul dans la partie centrale (Figure 49 : (A) Anomalie gravimétrique résiduelle (données mesurées). (B) Réponse gravimétrique du modèle, calculée à partir des mesures de densité dans les différentes formations. (C) « Misfit » correspond à la différence entre les données modélisées et les données réelles. L'échelle de couleur en mGal est la même pour les différentes cartes.), montrant ainsi une bonne cohérence entre les données réelles et le modèle. Le second pic du « *misfit* » à +5,2 mGal souligne la surestimation des valeurs gravimétriques dans la partie nord du modèle notamment.

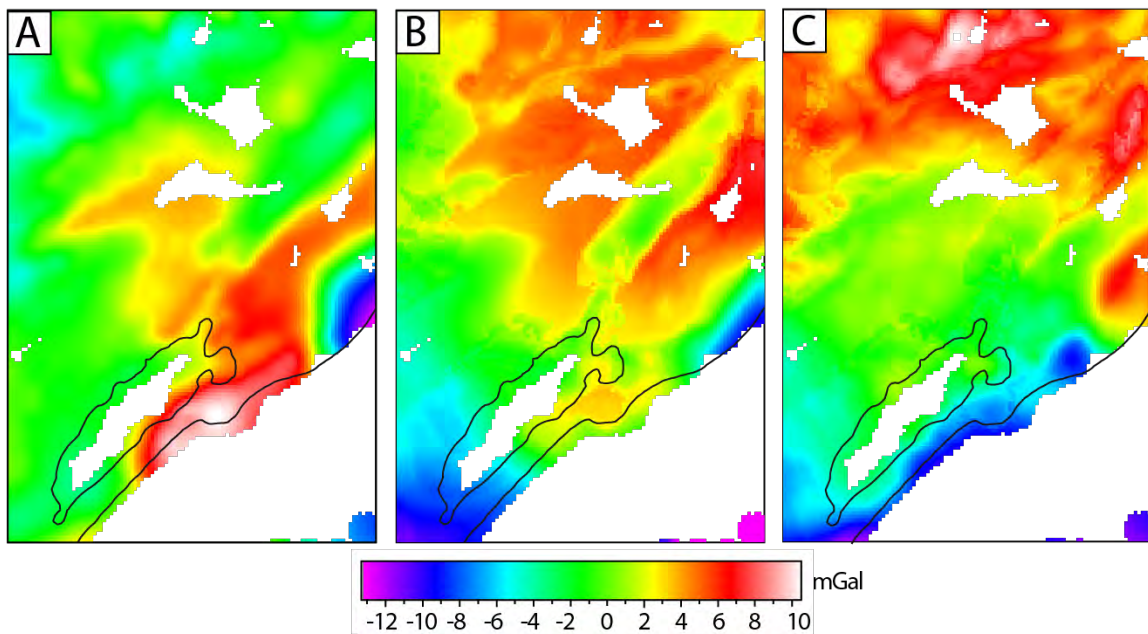


Figure 49 : (A) Anomalie gravimétrique résiduelle (données mesurées). (B) Réponse gravimétrique du modèle, calculée à partir des mesures de densité dans les différentes formations. (C) « Misfit » correspond à la différence entre les données modélisées et les données réelles. L'échelle de couleur en mGal est la même pour les différentes cartes.

De manière générale, les anomalies gravimétriques sont correctement reproduites dans la partie centrale du modèle (zones vertes?), alors que les extrémités nord et sud montrent des incohérences, avec des anomalies positives (en rouge) et négatives (en bleu) respectivement (Figure 49 : (A) Anomalie gravimétrique résiduelle (données mesurées). (B) Réponse gravimétrique du modèle, calculée à partir des mesures de densité dans les différentes formations. (C) « Misfit » correspond à la différence entre les données modélisées et les données réelles. L'échelle de couleur en mGal est la même pour les différentes cartes.).

Ces incohérences peuvent être liées à (1) une mauvaise interprétation du socle en profondeur (pas assez superficiel au sud et trop profond au nord) (2) des valeurs de densité mesurées incorrectes pour certaines formations, (3) à une mauvaise estimation de l'anomalie régionale qui est soustraite à l'anomalie de Bouguer pour réaliser la carte d'anomalie résiduelle (Coppo *et al.*, 2018). Au premier ordre, les variations (« *misfit* ») forment une tendance depuis des anomalies positives au nord-ouest vers des anomalies négatives vers le sud-est. Cette tendance correspond grossièrement à l'anomalie régionale, qui a été utilisée pour réaliser la carte d'anomalie résiduelle. Dans notre cas, un trop faible gradient de l'anomalie régionale pourrait être à l'origine des forts contrastes d'anomalie entre les parties nord et sud de la zone d'étude. Cette hypothèse est cohérente avec l'anomalie gravimétrique régionale qui présente la même tendance nord-ouest/sud-est de l'amincissement crustal.

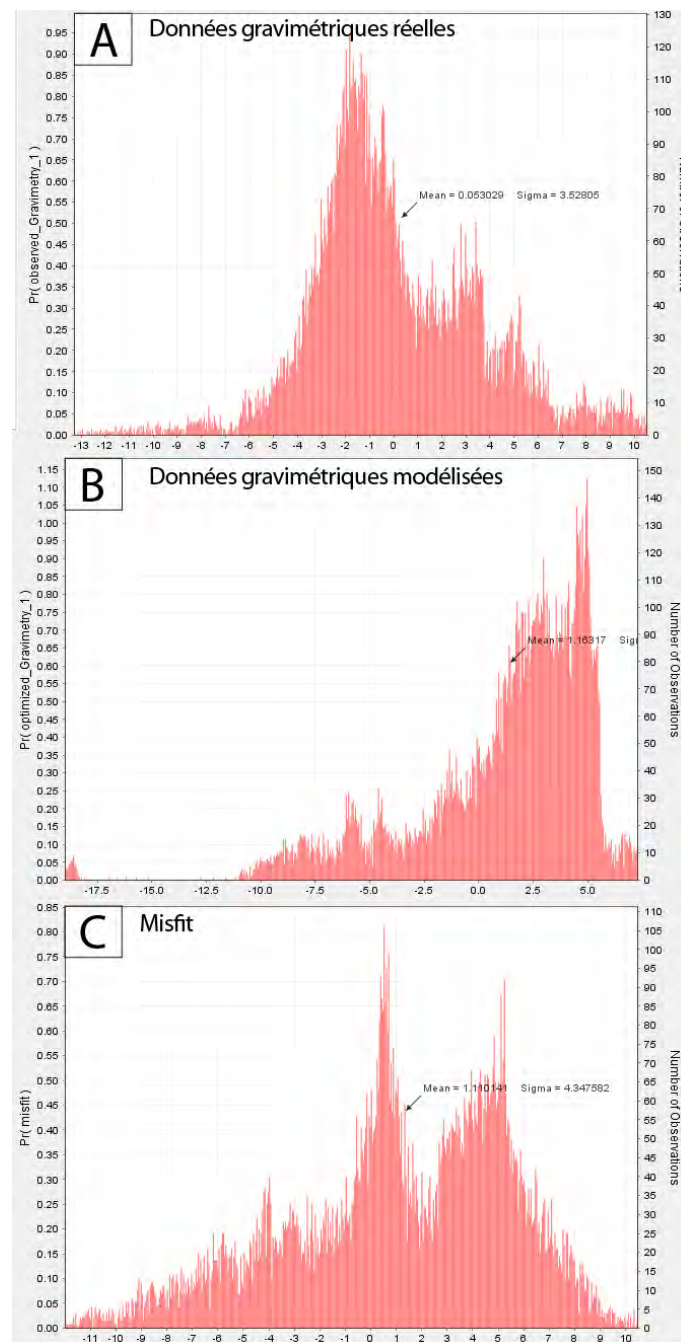


Figure 50 : Histogrammes de distribution des valeurs d'anomalies gravimétriques pour (A) les données réelles/anomalie gravimétrique résiduelle, (B) les données modélisées et (C) la différence entre les données modélisées et les données réelles (« misfit »).

Compte tenu des différentes sources d'erreur possibles, le modèle peut être difficilement amélioré sans nouvelles données à disposition, notamment les variations de densité au sein des formations et la géométrie de l'interface socle/couverture (i.e. toit du Paléozoïque). Malgré les quelques incohérences en gravimétrie, notre modèle propose une cohérence des données en 3D suffisamment robuste pour permettre la modélisation des écoulements d'eaux souterraines. La réponse gravimétrique dans la partie centrale montre une très bonne corrélation avec les données observées. Ces résultats valident la géométrie du modèle dans la zone de Balaruc pour répondre au mieux aux problématiques du projet DEM'Eaux Thau.

7.6. FORCES ET LIMITES DU MODÈLE 3D

7.6.1. Modélisation de la pile lithologique en lien avec les chevauchements pyrénéens

La modélisation 3D sous GeoModeller apporte une interprétation géométriquement et géologiquement cohérente en trois dimensions, qui se veut représentative d'une certaine « réalité géologique » à l'échelle du modèle. Dans le cadre de ce projet, les principales structures et formations géologiques retenues ont été modélisées pour leur intérêt hydrogéologique à l'échelle régionale. Un des défis réalisés dans ce projet est d'avoir modélisé les principaux éléments du réseau de failles de la région malgré sa complexité géométrique marquée par plusieurs phases tectoniques (compression et extension). Les chevauchements principaux (« chvt_mtp2 » et « chvt_thau ») séparent la pile lithologique en différents domaines autochtones et allochtones, marqués par des variations d'épaisseurs notables au sein des séries. Comme expliqué précédemment, la représentation des variations d'épaisseurs au sein d'une même série est limitée sous GeoModeller. Un moyen de palier à cette limite est de modéliser séparément plusieurs piles lithologiques en dissociant les domaines allochtones des domaines autochtones. C'est ce qui avait été fait au nord-est du secteur, dans le cadre de la thèse d'E. Husson (Husson, 2013). Pour ce modèle, nous avons fait le choix de représenter les séries sédimentaires à partir d'une pile lithologique unique et homogène pour l'ensemble de l'emprise du modèle. Ce choix présente plusieurs avantages :

- la continuité des interfaces entre les principales structures permet de générer plus facilement des coupes équilibrées (épaisseurs des formations, et déplacements cohérents de part et d'autre des failles) ;
- une plus simple gestion de la pile lithologique ;
- une meilleure visibilité du modèle pour d'autres utilisateurs ;
- une meilleure exploitation du modèle final pour sélectionner les données dans les séries/formations (réalisation des cartes isohypses/isopaques, visualisation 3D, exportation de grilles 3D...).

L'inconvénient de cette démarche est le contrôle limité sur les variations d'épaisseurs des formations, et plus particulièrement de part et d'autre des failles.

7.6.2. Modélisation des écailles syn-tectoniques

Malgré les simplifications pour représenter le chevauchement de Montpellier, les dépôts pyrénéens sont séparés en deux séries/formations : « Vitrollien » et « Eocène », correspondant aux différents stades de la compression pyrénéenne en Languedoc (Arthaud & Séguret, 1981). Une des caractéristiques du chevauchement de Montpellier est la présence de brèches syntectoniques attribuées au Vitrollien, et formant des écailles tectoniques sur une bande de quelques centaines de mètres le long du chevauchement principal de Montpellier.

La modélisation des écaïlles tectoniques est délicate sous GeoModeller car la morphologie en « biseau étroit » génère des perturbations d'interfaces, notamment au niveau des intersections entre les failles. Ces écaïlles tectoniques sont représentées par des chevauchements secondaires qui se connectent rapidement en profondeur sur le chevauchement principal (Figure 37). Comme documenté dans le forage de MURVIEL, les dépôts syn-tectoniques du « Vitrollien » sont présents sous le palier du chevauchement de Montpellier à environ 1 200 m de profondeur (Figure 51). Même si ces dépôts sont probablement présents ailleurs sous le palier du chevauchement jusqu'à environ 2 000 m de profondeur, on ne peut pas toujours les modéliser aussi profondément. La faible épaisseur de ces écaïlles (quelques dizaines de mètres) sous le palier du chevauchement de Montpellier n'est pas significative par rapport à l'échelle du modèle. Néanmoins, les dépôts de marnes et de brèches formant ces écaïlles peuvent jouer un rôle important dans la formation de barrières et de pièges pour la circulation des eaux souterraines.

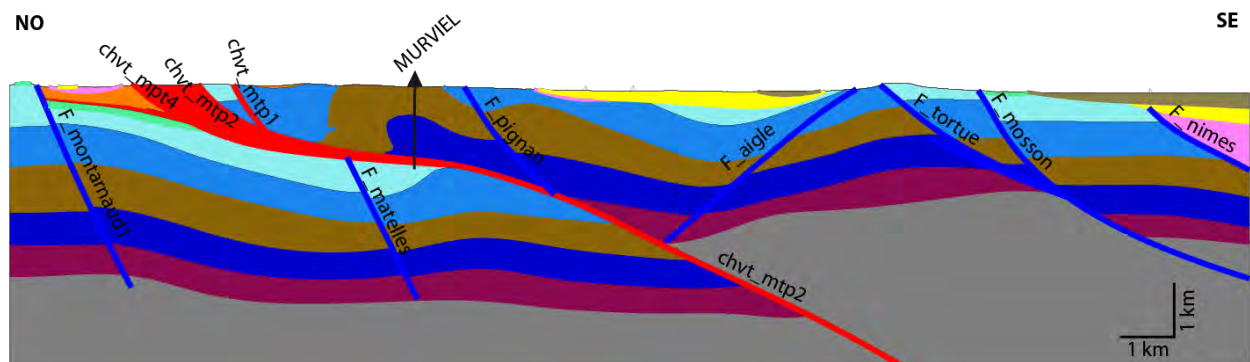


Figure 51 : Coupe 6 extraite du modèle 3D. Le chevauchement de Montpellier comprend plusieurs segments qui forment des écaïlles syn-pyrénéennes renfermant des marnes et des brèches dites « vitrolliennes ». La modélisation de ces écaïlles n'est pas toujours possible sous GeoModeller car les biseaux entre les failles peuvent aboutir à des géométries aberrantes.

7.6.3. Segmentation des interfaces à la terminaison des failles « finies »

La modélisation d'un nombre important de failles dites « finies » sous GeoModeller génère des zones de perturbations du champ de potentiel qui sont exprimées par la segmentation des interfaces (Figure 41). Les interfaces représentent les bases de formations. Les couleurs sont les mêmes que celles de la pile lithologique (voir pour la localisation des coupes)). Les zones de perturbations sont souvent localisées à la terminaison des failles au sein des formations ou à l'intersection des interfaces avec les failles. Quand cela est possible et réaliste, on limite ces zones de perturbation par les connexions entre les failles « finies » (Tableau 7). Même si la segmentation des interfaces est difficilement corrigeable, elle n'affecte que localement les résultats de modélisation, et reste sans conséquence sur la géométrie globale du modèle.

7.6.4. Variations importantes d'épaisseurs des formations

L'outil de vérification des forages montre que 93 % forages (380 sur 410 forages) sont respectés avec une résolution de 50 mètres. Malgré ce résultat satisfaisant, quelques forages ne sont pas respectés, même à une résolution de plusieurs centaines de mètres. C'est le cas les forages profonds MURVIEL et GARDIOLE (Figure 7 ; Figure 51). Malgré l'ajout de contraintes pour forcer le tracé des interfaces, les bases de formations obtenues par modélisation sont mal calées par rapport à celles observées dans ces forages.

Le forage MURVIEL documente un doublement de la formation ; « *Lias_marneux* » (1 050 mètres au total) lié à la présence d'une faille inverse (à 422 m de profondeur) qui n'a pas été pris en compte dans le modèle (Figure 41 ; Figure 51).

Le forage GARDIOLE documente un surépaississement de la formation « *Dogger* » (1 300 mètres) et l'absence de la formation « *Lias_calcaire* ». Ces deux particularités sont expliquées par la présence d'une faille normale téthysienne sous le massif de la Gardiole (F_Gardiole). La subsidence différentielle pendant le Jurassique Moyen aurait permis la formation d'un dépocentre dans ce secteur. Malgré l'ajout de failles pour expliquer le surépaississement du Dogger, on ne parvient pas à le modéliser correctement à cause du parallélisme des formations « *Dogger* » et « *Malm* » dans la même série « *Réservoir* ».

8. Livraison et perspectives d'exploitation du modèle

8.1. EXPORTATION DES DONNÉES SOUS MARTHE

En février 2020, les interfaces modélisées ont été exportées en vue de la modélisation des écoulements des eaux souterraines sous le logiciel MARTHE. Les différentes interfaces sont exportées selon un maillage régulier avec un pas de 400 m (en X et Y). La résolution verticale sera paramétrée sous MARTHE au cours des simulations. Des propriétés hydrologiques sont ensuite appliquées entre les interfaces pour simuler les écoulements au sein des formations. Il en est de même pour les surfaces de failles. Bien que l'on soit capable de générer des maillages plus fins, il n'a pas été jugé nécessaire d'augmenter la résolution du maillage. Par exemple, fournir un maillage avec une précision de 100 mètres implique que le modèle est correct à 100 mètres près, ce qui n'est pas le cas à l'échelle régionale du modèle géologique 3D où certaines zones sont dépourvues de contraintes (domaine marin et parties profondes notamment).

8.2. EXPORTATION DE GRILLES DE RÉSISTIVITÉ

Comme pour les données de densité en gravimétrie, on peut appliquer des valeurs de résistivité aux formations du modèle pour inverser des données en électromagnétisme à source contrôlée (CSEM). Les valeurs de résistivité moyennes dans les formations du modèle sont établies à partir des données de diagraphies disponibles dans la région (Tableau 8-1). Néanmoins, le logiciel GeoModeller ne permet pas de simuler directement la réponse électromagnétique du modèle à partir des valeurs de résistivité. Les données CSEM nécessitent d'importants traitements en amont et développements de la méthode pour apporter des interprétations fiables, avec une signification géologique. En revanche, le résultat de modélisation 3D réalisée à partir de logiciels spécifiques à la méthode CSEM peut être intégré dans Geomodeller et visualisé en 3D. Un des défis du traitement des données CSEM est la soustraction des effets de l'eau de l'étang de Thau, très conductrice (0,18 ohm.m) et au contact de formations géologiques peu conductrices (environ 50-100 ohm.m). Les données CSEM existantes couvrent la partie orientale de l'étang de Thau et la presqu'île de Balaruc (Coppo *et al.*, 2018).

Le traitement des données a été mené par les géophysiciens du BRGM (Vedrine, 2021). Malgré les efforts pour traiter et déchiffrer les données, on ne peut pas les exploiter pour démarrer une quelconque interprétation géologique en lien avec la modèle géologique 3D. Des développements mathématiques sont nécessaires pour lever l'influence de l'eau de mer (fortement conductrice) sur les modèles inversés. Ce masque conducteur déforme considérablement les lignes de champs électromagnétiques (voir les détails de cette étude dans le rapport BRGM RP-70632-FR (Vedrine, 2021).

Séries/formations	Résistivité (ohm.m)	Ecart-type
Plio-Quaternaire	41	19
Miocène	31	12
Oligocène-Aquitainien	41	27
Vitrollien-Eocène	-	-
Crétace terminal	31	18
Malm	153	75
Dogger	274	127
Lias marneux	34	15
Lias calcaire	329	142
Trias	-	-
Socle	-	-

Tableau 8 : Résistivité moyenne et écart-type des formations calculés à partir des données de diagraphies disponibles dans la région. Toutes les formations du modèle se sont documentées en diagraphies.

À partir des données de résistivité, on a pu extraire une grille 3D ($V_{xx}=100$ m ; $V_{yy}=100$ m ; $V_{zz}=40$) de résistivité dans une partie du modèle géologique centrée sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains ($X_{min}:748000$; $Y_{min}:6256800$; $X_{max}:761000$; $Y_{max}:6266000$; $Z_{min}:-2000$; $Z_{max}:500$). Cette grille 3D (Figure 8.1) sera utilisée pour guider l'inversion des données CSEM.

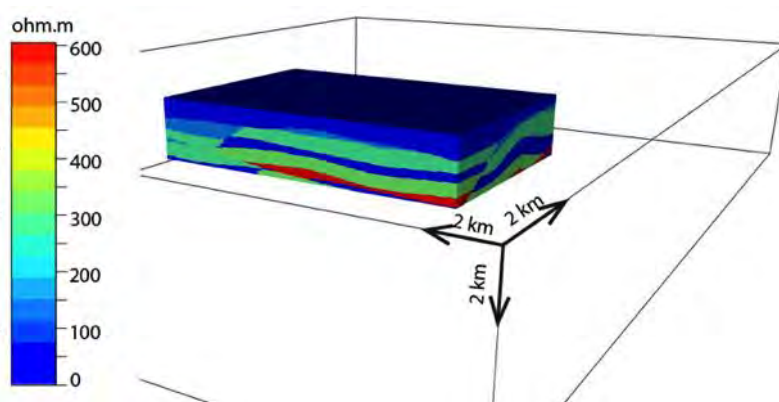


Figure 52 : Grille 3D de résistivité de la zone de Balaruc (centre du modèle). Les valeurs de résistivité sont appliquées aux différentes formations jusqu'à 2 000 mètres de profondeur.

8.3. INVERSION GRAVIMÉTRIQUE

La réponse gravimétrique du modèle (modélisation directe) a été utilisée pour modifier et valider le modèle géologique au stade final de sa construction. L'outil d'inversion gravimétrique dans le logiciel GeoModeller permet de vérifier si la géométrie du modèle géologique 3D et les valeurs de densité implémentées sont capables d'expliquer les anomalies gravimétriques résiduelles calculées à partir des mesures gravimétriques de terrain. La géométrie du modèle doit être supposée comme vraie même si les interfaces peuvent être modifiées au cours des processus d'inversion. Les résultats de l'inversion sont donnés sous la forme de probabilités statistiques basées sur plusieurs millions d'itérations (Guillen *et al.*, 2008). Les résultats d'inversion serviront à discuter les variations de densités dans chacune des formations du modèle.

On s'intéresse particulièrement à la distribution spatiale des densités dans les unités réservoirs carbonatés (Malm et Dogger). La forte karstification peut être associée à des zones de perte de matière dans les unités carbonatées, donnant lieu à des volumes de plus faible densité. Cette approche pour détecter des zones fortement karstifiées en profondeur a déjà fourni des résultats concluants dans ces mêmes unités dans l'arrière-pays de Montpellier (Husson *et al.*, 2018). Le modèle géologique de la zone Montpellier-Sète devrait permettre de détecter les zones plus ou moins plus karstifiées dans les séries jurassiques sous couverture, en lien avec les circulations d'eaux météoriques.

8.4. PRÉDICTION DU FORAGE CAROTTÉ

À partir du modèle 3D complet, on peut obtenir l'information géologique en tout point de l'espace que ce soit à travers la réalisation de coupes 2D (horizontales, inclinées, verticales, linéaires ou brisées) ou de coupes 1D (i.e sondages horizontaux, verticaux ou inclinés).

Un forage profond équipé (foration prévue fin 2020-début 2021) constituera une plateforme de suivi des paramètres hydrologiques des réservoirs, pour élaborer un outil de gestion optimisé de la ressource en eau. La réalisation de ce forage carotté permettra de valider le modèle 3D réalisé dans le secteur de Balaruc-les-Bains. En attendant, on peut prédire le log du forage en créant un forage virtuel à partir du modèle 3D (Figure 53).

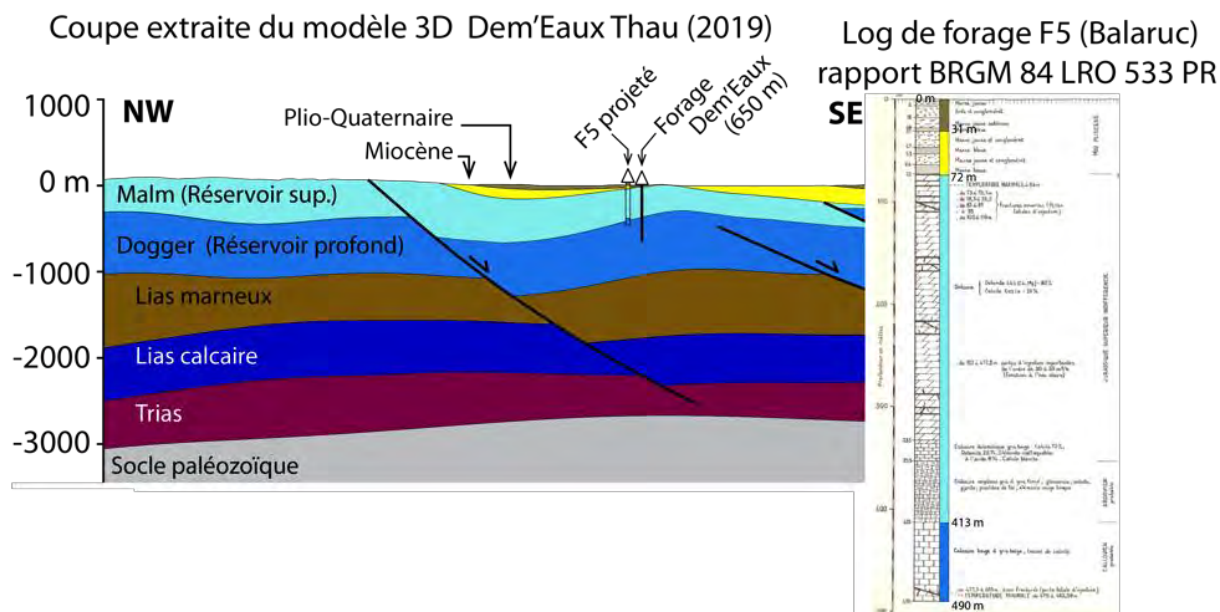


Figure 53 : Position du futur forage carotté de 650 mètres de profondeur sur une coupe extraite du modèle 3D. La projection du forage F5 à proximité aide à la prédiction des résultats du futur ouvrage.

Le forage carotté d'une profondeur de 650 mètres atteindra les calcaires du Dogger vers le milieu du Callovien. De plus, le forage traversera les marnes de l'étage Oxfordien, susceptible de séparer deux aquifères, l'un supérieur et l'autre profond. Ce forage carotté permettra de documenter pour la première fois, la circulation et la nature des eaux dans l'aquifère profond.

8.5. RÉVISION DE LA GÉOMÉTRIE DU SOUS-SOL ET DES MODÈLES CONCEPTUELS EN HYDROGÉOLOGIE

À partir des résultats en sismique passive et du modèle 3D, on représente ci-dessous une coupe orientée nord-sud passant par les principales sources du secteur (Figure 28). Cette coupe apporte de nouvelles réflexions sur le rôle des failles dans la circulation des eaux en profondeur et la remontée thermique à Balaruc-les-Bains. Sur la coupe passant par Balaruc-les-Bains (Figure 53, Figure 54), le chevauchement pyrénéen de Thau (« *chvt_thau* ») est un bon candidat pour la remontée de fluides thermaux (basse température) bien que la source du thermalisme dans le secteur de Thau reste encore mal connue (Aquilina *et al.*, 2002, 2003). En complément des analyses géochimiques acquises dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU, le modèle 3D permet de soutenir l'hypothèse d'une remontée thermique : (1) depuis le socle (à environ 2 000 m de profondeur) ; ou (2) depuis la partie profonde du réservoir karstique (formation « *Dogger* »). Ainsi, le modèle 3D apporte de nouvelles contraintes géométriques du sous-sol et des réservoirs karstiques, essentielles à la révision des modèles conceptuels des écoulements souterrains en milieu côtier (Figure 54).

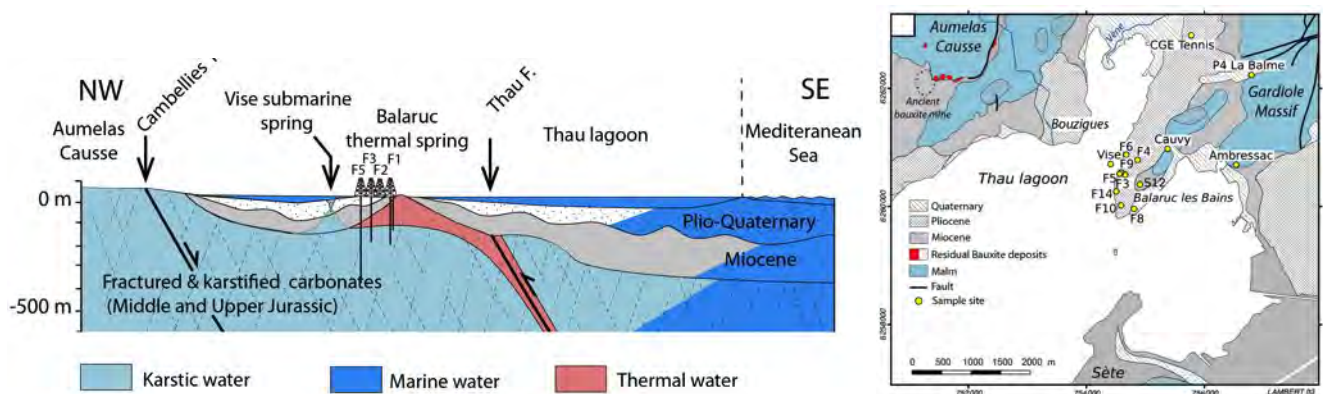


Figure 54 : (Gauche) Coupe conceptuelle passant par la presqu'île de Balaruc-les-Bains et montrant les différentes masses d'eau souterraines. Le réservoir thermal sous la presqu'île serait alimenté par la remontée d'eau profonde le long du chevauchement de Thau (Pétre et al., 2020). (Droite) Carte géologique du secteur de Balaruc-les-Bains. Le forage carotté est localisé au niveau du site F6.

8.6. VALORISATION DES RÉSULTATS

Les travaux de post doctorat présentés dans ce rapport ont été valorisés sous différentes formes depuis 2018 : la participation à la RST (Réunion des Sciences de la Terre, Lille, octobre 2018), la rédaction d'une infolettre à l'attention des partenaires et financeurs du projet DEM'EAUX THAU, et la rédaction de publications scientifiques de rang A pour de la communauté scientifique internationale.

- l'infolettre de décembre 2019 est disponible en Annexe 2 ;
- la présentation orale à la RST était intitulée : « Construction d'un modèle géologique des réservoirs karstiques profonds du Bassin de Thau (Hérault, France) : un outil innovant pour la gestion de la ressource en eau ;
- deux publications scientifiques de rang A sont en cours de préparation. La première porte sur l'histoire géologique polyphasée en Languedoc et une nouvelle compréhension des structures dans le secteur Montpellier-Sète, et notamment le style de déformation pyrénéenne en Languedoc en lien avec les structures hérités et l'ouverture du Golfe du Lion. La publication sera intitulée : « Structural style of the Languedoc Pyrenean thrust belt in relation with the inherited Mesozoic structures and rifting of the Gulf of Lion margin, SE France » et soumis au Bulletin de la Société Géologique de France / Earth Sciences Bulletin ;
- une seconde publication en préparation porte sur les résultats de la modélisation 3D sous GeoModeller et l'utilisation des données gravimétriques pour discuter l'état du réservoir karstique sous couverture sédimentaire.

La Figure 54 est issue d'un article récent (Pétre *et al.*, 2020) rédigé par certains membres du projet est publié dans *Hydrology and Earth System Sciences* : Pétre, M.-A., Ladouche, B., Seidel, J.-L., Hemelsdaël, R., de Montety, V., Batiot- Guilhe, C., Lamotte, C. Hydraulic and geochemical impact of occasional saltwater intrusions through a submarine spring in a karstic and thermal aquifer (Thau lagoon area, Montpellier, France). *Hydrology and Earth System Sciences*.

9. Conclusion

Le modèle géologique 3D du secteur Montpellier-Sète, incluant l'étang de Thau (39 x 27 x 5 km), vise à documenter et à comprendre la structuration des réservoirs karstiques sous couverture sédimentaire. Les réservoirs karstiques d'intérêt correspondent ici au Jurassique Supérieur et au Jurassique Moyen dans une moindre mesure. En préparation à la modélisation 3D, ce travail comprend la compilation des données géologiques et géophysiques régionales, et une base de données de forages harmonisés (464 forages) a été établie. Cette étude a aussi bénéficié de deux forages non carottés, le retraitement d'anciennes lignes sismiques, l'acquisition d'un profil sismique réflexion, l'acquisition de données en sismique passive, l'acquisition de mesures gravimétriques et électromagnétiques. Ces nouvelles données sont toutes localisées en zone côtière, à l'Est de l'étang de Thau.

En préparation à la modélisation 3D, ce projet a permis l'établissement d'un schéma structural révisé, d'une carte géologique synthétique, de coupes structurales, de préciser la chronologie d'activité des failles le long de la marge proximale du Golfe du Lion, de produire des cartes d'anomalie gravimétrique résiduelle en Languedoc, une cartographie du toit du Jurassique à partir de la sismique passive, et enfin la corrélation entre les domaines terre et mer à partir de l'interprétation des profils sismiques réflexion. Ces nouvelles données ont été nécessaires à la construction du modèle 3D.

Les données des forages ne suffisent pas à caler la géométrie des unités mésozoïques sous couverture. Des coupes structurales de références (6 coupes) sont dessinées et ensuite testées sous GeoModeller. Le tracé des failles et des interfaces géologiques est modifié pas à pas jusqu'à l'obtention de coupes finales et la cohérence 3D des structures. Le modèle 3D est caractérisé par un réseau de failles complexe (24 failles) comprenant les chevauchements pyrénéens de Montpellier et Thau, des failles pré-pyrénéennes et des failles normales oligocènes. La mise en cohérence 3D de ces structures et des 13 unités stratigraphiques est la force de ce modèle géologique. La réponse gravimétrique du modèle et la comparaison avec les données gravimétriques mesurées (anomalie gravimétrique résiduelle) permettent ensuite d'ajuster la géométrie et la profondeur des limites entre les unités et des structures.

Le modèle 3D apporte une nouvelle compréhension de l'évolution tectonique polyphasée en Languedoc, ainsi que la segmentation du réservoir karstique sous les sédiments cénozoïques. Les éléments du modèle géologique obtenu sont exportés sous forme de grilles 3D ou de mailles 2D afin de cartographier les unités et les compartiments du réservoir karstique. Les coupes générées à partir du modèle 3D permettent de: (1) prédire les résultats du forage carotté dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU ; (2) proposer un nouveau modèle conceptuel des différentes eaux souterraines en milieu côtier.

La mise en évidence du chevauchement pyrénéen de Thau et d'une faille normale pré-pyrénéenne entre Sète et Balaruc-les-Bains sont de bons candidats pour la remontée des eaux thermales basse température en surface, à Balaruc-les-Bains. En complément des analyses géochimiques acquises dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU, le modèle 3D permet de soutenir l'hypothèse d'une remontée thermique : (1) depuis le socle (à environ 2 000 m de profondeur) ; ou (2) depuis la partie profonde du réservoir karstique. Ainsi, le modèle 3D apporte de nouvelles contraintes géométriques du sous-sol et des réservoirs karstiques pour mieux comprendre les écoulements souterrains en milieu côtier. Les différentes interfaces sont exportées selon un maillage régulier avec un pas de 400 m pour les simulations des écoulements d'eaux souterraines (sous le logiciel MARTHE) par les hydrogéologues du BRGM. D'autres travaux en géophysique sont à exploiter à partir du modèle.

10. Bibliographie

Aquilina, L., Ladouche, B., Doerfliger, N. et al. (2002). Origin, evolution and residence time of saline thermal fluids (Balaruc springs, southern France): implications for fluid transfer across the continental shelf. *Chemical Geology*, 192(1- 2), 1- 21.

Aquilina, L., Ladouche, B., Doerfliger, N. et al. (2003). Deep water circulation, residence time, and chemistry in a karst complex. *Groundwater*, 41(6), 790- 805.

Arthaud, F., & Laurent, P. (1995). Contraintes, déformation et déplacement dans l'avant-pays Nord-pyrénéen du Languedoc méditerranéen. *Geodinamica Acta*, 8(3), 142- 157.

Arthaud, F., & Seguret, M. (1981). Les structures pyreneennes du Languedoc et du Golfe du Lion (Sud de la France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, S7-XXIII(1), 51- 63.

Arthaud, F., & Séguret, M. (1981). Les structures pyrénéennes du Languedoc et Golfe du Lion (Sud de la France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 13(1), 51- 63.

Bache, F., Olivet, J. L., Gorini, C. et al. (2010). Evolution of rifted continental margins: The case of the Gulf of Lions (Western Mediterranean Basin). *Earth and Planetary Science Letters*, 292(3- 4), 345- 356.

Bayer, R. (1984). Interprétation des anomalies du champ de gravité et du champ géomagnétique: méthodes et applications géologiques. *Thèse Doctorat, Université Montpellier*, 118p.

Benedicto, A., Labaume, P., Séguret, M. et al. (1996). Low-angle crustal ramp and basin geometry in the Gulf of Lion passive margin: Oligocene-aquitainian Vistrenque graben, SE France. *Tectonics*, 15(6), 1192- 1212.

Benedicto, A., Seguret, M., & Labaume, P. (1999). Interaction between faulting, drainage and sedimentation in extensional hanging-wall syncline basins: example of the Oligocene Matelles basin (Gulf of Lion rifted margin, SE France). *Geological Society of London Special Publication*, 156, 81- 108.

Bourgeois, T. (2019). Caractérisation du paléokarst sous couverture du démonstrateur DEM'EAUX Thau, Bassin de Montbazin- Gigean et de l'extrémité Est de l'étang de Thau (Hérault) : approche par sismique passive. *Master 2, Université de Montpellier*, 50p.

Calcagno, P., Chilès, J. P., Courrioux, G. et al. (2008). Geological modelling from field data and geological knowledge: Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1- 4), 147- 157.

Coppo, N., Jacob, T., Bitri, A. et al. (2018). Investigations géophysiques (CSEM, gravimétrie et sismique) sur le secteur de Balaruc-les-Bains (Hérault, France) - Rapport d'acquisition. *Rapport BRGM, RP-68318-F*, 77p.

Gorini, C., Mauffret, A., Guennoc, P. et al. (1994). Structure of the Gulf of Lions (Northwestern Mediterranean Sea): A Review. In A. Mascle (Éd.), *Hydrocarbon and Petroleum Geology of France* (p. 223- 243). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Guillen, A., Calcagno, P., Courrioux, G. et al. (2008). Geological modelling from field data and geological knowledge: Part II. Modelling validation using gravity and magnetic data inversion. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1-4), 158-169.

Husson, E. (2013). Interaction géodynamique/karstification et modélisation géologique 3D des massifs carbonatés: implications sur la distribution prévisionnelle de la karstification. Exemple des paléokarsts crétacés à néogènes du Languedoc montpelliérain. *Thèse de Doctorat, Université de Montpellier*, 316p.

Husson, E., Guillen, A., Séranne, M. et al. (2018). 3D Geological modelling and gravity inversion of a structurally complex carbonate area: application for karstified massif localization. *Basin Research*, 30(4), 766-782.

Ladouche, B., Lamotte, C., Hemelsdaël, R et al. (2019). Synthèse et valorisation préliminaire des données sur l'hydrosystème de Thau (34). *Rapport BRGM/RP-68483-FR*, 313p.

Lajaunie, C., Courrioux, G., & Manuel, L. (1997). Foliation fields and 3D cartography in geology: Principles of a method based on potential interpolation. *Mathematical Geology*, 29(4), 571-584.

Lopez S., Allanic C., Courrioux G. et al. (2017), « La Modélisation géologique 3D : un outil pour la cartographie », Revue officielle de la Société géologique de France, 193, pp. 48-53.

Maerten, L., & Séranne, M. (1995). Extensional tectonics of the Oligo-Miocene Hérault Basin (S France), Gulf of Lion margin. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 166(6), 739-749.

Mauffret, A., Durand De Grossouvre, B., Tadeu Dos Reis et al. (2001). Structural geometry in the Eastern Pyrenees and Western Gulf of Lion (Western Mediterranean). *Journal of Structural Geology*, 23(11), 1701-1726.

Pétre, M.-A., Ladouche, B., Seidel, J.-L. et al. (2020). Hydraulic and geochemical impact of occasional saltwater intrusions through a submarine spring in a karst and thermal aquifer (Balaruc peninsula near Montpellier, France). *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(11), 5655-5672.

Serrano, O., & Hanot, F. (2005). Le bassin Oligo-Miocène de l' Hérault : un exemple de rétrocharriage des structures pyrénéennes . Implications hydrogéologiques. *Rapport BRGM, RP-53733-F*, 81p.

Vedrine, S. (2021). Projet DEM'Eaux Thau - Modélisation et inversion 3D de données électromagnétiques à source contrôlée sur la zone de Balaruc-les-Bains (Hérault, France). *BRGM RP-70632-FR*, 54p.

Annexe 1

Compilation des forages importés dans GeoModeller

<i>Référence du forage</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Profondeur maximale</i>
BSS002GMXZ	739268	6278234	105
BSS002GNBS	740962	6279940	63
BSS002GNRT	766222	6283808	236
BSS002GNYM	753493	6280775	110
BSS002GPAK	760093	6278584	1435
BSS002GPCD	760378	6282262	85
BSS002GPCG	761063	6276405	58
BSS002GPCK	756491	6281622	55
BSS002GPFH	761921	6277358	51
BSS002GPFK	757899	6282581	163
BSS002GPFN	762375	6278100	138
BSS002GPQB	766579	6279444	19
BSS002GPQC	764911	6277246	51
BSS002GPQT	766916	6279071	60
BSS002GPSD	767022	6277250	36
BSS002GPSE	766736	6279133	61
BSS002GPSL	767012	6277250	108
BSS002GPSM	766982	6277210	110
BSS002GPTF	767217	6280469	56
BSS002GPTR	766836	6279112	58
BSS002GPTS	766897	6279191	64
BSS002GPUB	766769	6278192	116
BSS002GPVA	767160	6276988	51
BSS002GPVE	766546	6279104	29
BSS002GPVF	766909	6279411	45
BSS002GPVL	766586	6277723	48
BSS002GPVP	765913	6278769	31
BSS002GPVR	766922	6282533	17
BSS002GPVT	763787	6276794	50
BSS002GPVV	767300	6276997	42
BSS002GPVW	766951	6277120	45
BSS002GPWC	766140	6275626	28
BSS002GPWD	763132	6281421	63
BSS002GPWQ	767028	6276669	19
BSS002GPXJ	767053	6277379	26
BSS002GPXK	766908	6279311	39

BSS002JAMS	733042	6263765	42
BSS002JAPT	736226	6264021	16
BSS002JARS	739087	6265279	67
BSS002JASU	735926	6264103	15
BSS002JASV	736565	6263928	22
BSS002JATT	747562	6268635	155
BSS002JATX	747157	6268038	458
BSS002JAUN	747965	6265705	428
BSS002JAUP	748158	6265444	390
BSS002JBHC	733188	6262923	738
BSS002JBHP	733730	6259589	16
BSS002JBMZ	734631	6257149	24
BSS002JBNC	734543	6258721	21
BSS002JBND	734974	6260108	17
BSS002JBNE	735000	6260788	19
BSS002JBNL	735998	6263032	2605
BSS002JBNW	735081	6261545	688
BSS002JBPA	733764	6261489	124
BSS002JBRR	735638	6259193	137
BSS002JBRX	734585	6262763	141
BSS002JBSK	734099	6260016	2
BSS002JBSK	734099	6260016	11
BSS002JBSL	733758	6260662	10
BSS002JBSP	733786	6260668	12
BSS002JBSP	734279	6260828	11
BSS002JBSP	739467	6260113	13
BSS002JBSP	735343	6259935	13
BSS002JBSP	739937	6262671	100
BSS002JBVT	747595	6263541	264
BSS002JBVU	746992	6263471	391
BSS002JBVV	746075	6263294	542
BSS002JBVW	746383	6263268	486
BSS002JBVX	746947	6263106	392
BSS002JBVY	747261	6262919	280
BSS002JBVZ	748114	6262928	121
BSS002JBWA	747643	6262931	195
BSS002JBWB	748017	6262828	140
BSS002JBWC	748218	6262827	109
BSS002JBWD	747305	6262750	270
BSS002JBWE	746983	6262730	350
BSS002JBWF	748167	6262702	114
BSS002JBWG	747791	6262655	165
BSS002JBWH	747576	6262639	219
BSS002JBWJ	748041	6262628	127
BSS002JBWK	748241	6262626	104
BSS002JBWL	747174	6262613	300

BSS002JBWM	747355	6262568	251
BSS002JBWN	748140	6262527	117
BSS002JBWP	747213	6262464	280
BSS002JBWQ	747704	6262461	195
BSS002JBWR	747839	6262454	177
BSS002JBWS	747903	6262450	193
BSS002JBWT	747455	6262437	240
BSS002JBWU	748235	6261826	116
BSS002JBWV	747334	6262383	260
BSS002JBWW	748064	6262378	131
BSS002JBWX	747825	6262346	216
BSS002JBWY	747987	6262364	163
BSS002JBWZ	747088	6262360	323
BSS002JBXA	747713	6262315	222
BSS002JBXB	748188	6262302	127
BSS002JBXC	747528	6262272	239
BSS002JBXD	747910	6262272	187
BSS002JBXE	748096	6262287	142
BSS002JBXF	747253	6262251	299
BSS002JBXG	747838	6262229	184
BSS002JBXH	748013	6262228	174
BSS002JBXJ	748263	6262226	116
BSS002JBXK	747393	6262168	280
BSS002JBXL	747612	6262156	222
BSS002JBXM	746996	6262114	339
BSS002JBXN	747164	6262112	335
BSS002JBXP	747304	6262055	307
BSS002JBXQ	747836	6262029	185
BSS002JBXR	748061	6262028	166
BSS002JBXS	748236	6262026	134
BSS002JBXT	747427	6261987	277
BSS002JBXV	747829	6261957	200
BSS002JBXW	748035	6261828	192
BSS002JBXY	747876	6260678	37
BSS002JBYB	745974	6260643	110
BSS002JCAE	746026	6260813	130
BSS002JCAM	746627	6260888	10
BSS002JCBJ	743277	6259813	1487
BSS002JCDS	750261	6269014	60
BSS002JCDT	748360	6268969	44
BSS002JCDU	748347	6268909	70
BSS002JCDV	748409	6268878	73
BSS002JCDW	748479	6268878	71
BSS002JCDX	748539	6268877	59
BSS002JCDY	748620	6268877	49
BSS002JCDZ	748324	6268851	100

BSS002JCEA	748439	6268818	100
BSS002JCEB	748589	6268827	70
BSS002JCEC	748789	6268825	52
BSS002JCED	748259	6268779	143
BSS002JCEE	748329	6268769	131
BSS002JCEF	748539	6268767	88
BSS002JCEG	748739	6268766	73
BSS002JCEH	748839	6268765	61
BSS002JCEJ	748939	6268764	52
BSS002JCEK	749039	6268773	51
BSS002JCEL	748428	6268748	114
BSS002JCEM	749289	6268721	144
BSS002JCEN	748408	6268658	202
BSS002JCEP	749088	6268623	167
BSS002JCEQ	749288	6268621	162
BSS002JCER	749255	6268271	235
BSS002JCES	748354	6268188	406
BSS002JCET	748644	6268206	322
BSS002JCEU	750954	6268078	25
BSS002JCEV	748533	6268077	385
BSS002JCEW	748803	6268055	370
BSS002JCEX	749182	6267922	336
BSS002JCEY	748352	6267858	428
BSS002JCEZ	748531	6267827	407
BSS002JCFA	748882	6267824	392
BSS002JCFB	748330	6267678	449
BSS002JCFC	749680	6267538	282
BSS002JCFD	748578	6267426	443
BSS002JCFE	748978	6267423	416
BSS002JCFF	749528	6267369	342
BSS002JCFG	749258	6267351	378
BSS002JCFH	748757	6267235	456
BSS002JCFK	749677	6267218	280
BSS002JCFL	750027	6267215	194
BSS002JCFM	749246	6267041	346
BSS002JCFN	748425	6267027	549
BSS002JCFP	749776	6267017	226
BSS002JCFQ	749184	6266801	315
BSS002JCFR	750374	6266812	12
BSS002JCFS	748813	6266784	418
BSS002JCFT	748513	6266736	485
BSS002JCFU	749063	6266682	335
BSS002JCFV	748822	6266554	404
BSS002JCFW	748440	6266427	476
BSS002JCFX	749491	6266439	146
BSS002JCFY	748619	6266225	410

BSS002JCFZ	749088	6266022	229
BSS002JCGA	748367	6265927	438
BSS002JCGB	749166	6265821	162
BSS002JCGC	748414	6265527	319
BSS002JCGD	749562	6265218	17
BSS002JCGE	749129	6264921	52
BSS002JCGG	748526	6264525	127
BSS002JCGH	748572	6263965	86
BSS002JCGJ	748791	6263903	51
BSS002JCGL	748262	6269160	9
BSS002JCGM	748291	6269129	10
BSS002JCGN	748321	6269129	9
BSS002JCGP	748291	6269079	21
BSS002JCGQ	748331	6269089	21
BSS002JCGR	748291	6269029	38
BSS002JCGS	748331	6269029	34
BSS002JCGT	748280	6268979	60
BSS002JCGU	748280	6268929	80
BSS002JCGW	748849	6268815	47
BSS002JCGX	748999	6268794	55
BSS002JCGY	749039	6268823	45
BSS002JCHC	753963	6267695	61
BSS002JCHD	755490	6265872	126
BSS002JCHN	754122	6264952	87
BSS002JCHV	753881	6267465	85
BSS002JCJD	750229	6267394	133
BSS002JCJE	750128	6267284	148
BSS002JCJF	750046	6267095	159
BSS002JCJG	749835	6266966	131
BSS002JCJH	749803	6266696	121
BSS002JCJJ	749692	6266577	119
BSS002JCJK	749491	6266389	131
BSS002JCJL	749479	6266229	150
BSS002JCJM	749369	6266130	169
BSS002JCJN	749287	6265880	157
BSS002JCJP	750367	6267182	110
BSS002JCJQ	750216	6267033	108
BSS002JCJR	750045	6266895	106
BSS002JCJS	749973	6266705	86
BSS002JCJT	749872	6266546	72
BSS002JCJU	749751	6266347	68
BSS002JCJV	749599	6266178	107
BSS002JCJW	749598	6266058	94
BSS002JCJX	749497	6265948	105
BSS002JCJZ	749607	6267218	69
BSS002JCKA	750486	6267041	56

BSS002JCKB	750173	6266694	40
BSS002JCKC	749899	6266195	14
BSS002JCKD	749939	6266185	38
BSS002JCKE	749980	6266255	5
BSS002JCKF	749818	6266006	59
BSS002JCKG	749390	6266359	170
BSS002JCKH	749320	6266340	211
BSS002JCKJ	749620	6266298	98
BSS002JCKK	749739	6266177	74
BSS002JCKL	749698	6266067	79
BSS002JCKM	749681	6266397	88
BSS002JCKN	749367	6265959	149
BSS002JCKP	749860	6266326	59
BSS002JCKR	750257	6267213	132
BSS002JCKS	749528	6266038	122
BSS002JCKT	749486	6265838	95
BSS002JCKU	749428	6266009	137
BSS002JCKV	749637	6265917	74
BSS002JCKW	749606	6265768	58
BSS002JCKX	749786	6265716	99
BSS002JCKZ	749474	6265488	36
BSS002JCLD	749118	6268593	167
BSS002JCLG	748974	6264222	70
BSS002JCLH	754845	6269249	92
BSS002JCLJ	754853	6264987	58
BSS002JCLR	750432	6269424	80
BSS002JCLT	749368	6266070	164
BSS002JCUC	756477	6266715	80
BSS002JCUG	756630	6268465	87
BSS002JCUN	759975	6265007	1995
BSS002JCUQ	756289	6265686	200
BSS002JCUR	756633	6264873	60
BSS002JCWL	755723	6263729	20
BSS002JCWM	755743	6263709	20
BSS002JCWN	755743	6263689	20
BSS002JCWZ	756917	6269263	100
BSS002JCYS	756131	6269869	114
BSS002JCZG	756506	6266595	123
BSS002JCZK	756511	6264704	50
BSS002JCZL	756279	6264375	50
BSS002JDGQ	764266	6268706	81
BSS002JDMQ	751638	6262050	55
BSS002JDNC	754787	6260355	60
BSS002JDND	754758	6260455	41
BSS002JDNK	748431	6263409	90
BSS002JDNL	748349	6262970	89

BSS002JDNM	748443	6262925	79
BSS002JDNN	748318	6262851	86
BSS002JDNP	748643	6262823	68
BSS002JDNQ	748317	6262751	93
BSS002JDNR	748339	6262699	93
BSS002JDNS	748417	6262725	82
BSS002JDNT	748483	6262653	137
BSS002JDNU	748383	6262615	89
BSS002JDNV	748315	6262551	72
BSS002JDNW	748616	6262549	88
BSS002JDNX	748440	6262500	113
BSS002JDNY	748354	6262457	115
BSS002JDNZ	748339	6262351	104
BSS002JDPA	748439	6262325	113
BSS002JDPB	748869	6262321	84
BSS002JDPC	748603	6262223	131
BSS002JDPD	748923	6262171	116
BSS002JDPE	751139	6262154	61
BSS002JDPF	751189	6262153	57
BSS002JDPH	751088	6262104	65
BSS002JDPJ	751488	6261976	50
BSS002JDPK	751538	6261976	47
BSS002JDPN	751437	6261951	37
BSS002JDPP	751287	6261903	49
BSS002JDPR	751212	6261878	79
BSS002JDPS	748310	6261826	148
BSS002JDPV	748859	6261725	143
BSS002JDPX	748585	6261631	143
BSS002JDPY	748758	6261584	155
BSS002JDPZ	749228	6261586	166
BSS002JDQA	749071	6261557	156
BSS002JDQB	748828	6261490	160
BSS002JDQC	749338	6261487	167
BSS002JDQD	748732	6261472	183
BSS002JDQE	748956	6261483	152
BSS002JDQF	749197	6261476	162
BSS002JDQG	749029	6261453	169
BSS002JDQH	749144	6261410	170
BSS002JDQJ	748970	6261393	173
BSS002JDQK	749311	6261317	188
BSS002JDQM	749093	6261249	190
BSS002JDQN	751159	6261937	30
BSS002JDQP	751169	6261896	50
BSS002JDQQ	751188	6261871	62
BSS002JDQS	749773	6261444	89
BSS002JDQU	751361	6262206	19

BSS002JDQV	751323	6262225	17
BSS002JDQW	751286	6262256	17
BSS002JDQX	751238	6262250	35
BSS002JDQY	751187	6262228	55
BSS002JDQZ	751287	6262192	36
BSS002JDRA	751169	6262116	58
BSS002JDRB	751122	6262123	49
BSS002JDRC	751108	6262041	54
BSS002JDRD	751169	6261896	46
BSS002JDRE	751188	6261871	62
BSS002JDRF	748849	6262790	38
BSS002JDRG	748836	6262799	46
BSS002JDRH	748824	6262807	39
BSS002JDRJ	748794	6262796	40
BSS002JDRK	748794	6262796	40
BSS002JDRL	748777	6262765	48
BSS002JDRM	748704	6262766	65
BSS002JDRN	748653	6262741	52
BSS002JDRN	748653	6262741	75
BSS002JDRP	748566	6262721	94
BSS002JDRS	751122	6262170	49
BSS002JDRT	751170	6262203	61
BSS002JDRU	751124	6262105	59
BSS002JDRW	751213	6262206	46
BSS002JDRX	750719	6262117	47
BSS002JDRY	750728	6262152	40
BSS002JDRZ	750624	6262437	33
BSS002JDSA	750431	6262084	78
BSS002JDSB	750507	6262480	54
BSS002JDSC	749656	6262385	57
BSS002JDSD	749427	6262265	75
BSS002JDSE	749692	6262642	37
BSS002JDSF	749397	6262508	41
BSS002JDSL	748757	6258170	200
BSS002JDTA	755090	6260673	15
BSS002JDTB	755195	6261332	15
BSS002JDTC	755157	6261693	23
BSS002JDTW	753509	6255522	22
BSS002JDTX	750425	6260368	80
BSS002JDUF	748515	6259263	1
BSS002JDUF	748515	6259263	11
BSS002JDUG	749485	6259225	25
BSS002JDUH	749115	6259168	33
BSS002JDUJ	755531	6263421	15
BSS002JDUX	752052	6261236	31
BSS002JDVC	754061	6256978	976

BSS002JDVF	750079	6259691	2
BSS002JDVF	750079	6259691	30
BSS002JDVF	750079	6259691	130
BSS002JEBU	757260	6259275	269
BSS002JEFV	755942	6262287	115
BSS002JEFY	756192	6257012	58
BSS002JEGA	758424	6259696	67
BSS002JEGK	757930	6260491	75
BSS002JEGS	756508	6257785	365
BSS002JEHH	761322	6260525	125
BSS002JEQJ	764638	6261100	91
CR3_SETE	754209	6257126	3
CR3_SETE	754209	6257126	113
CR4_F15	754614	6260048	285
F1	754901	6260377	200
F2	754777	6260472	150
F3	754666	6260534	175
F4	754610	6260638	55
F5	754577	6260539	490
F6	754685	6260881	63
F8	754822	6259951	407
F9	754607	6260476	120
F1_issanka	756515	6264720	50
F2_issanka	756248	6264356	50
F3_issanka	756374	6264487	27
F4_issanka	756537	6264794	41
BSS003CJRE	754431	6257557	85
BSS002JEHM	755802	6262881	115
F5_vieux	756436	6264110	132
BSS002JCMA	755377	6264003	198
S2_boulidou	759828	6275744	110
metaires_dischino	754521	6257035	148
BSS002JATQ	746338	6268819	118
BSS002KPTB	743631	6248734	113
BSS002KPSF	743274	6250488	110
BSS002KPSE	746597	6249312	123
BSS002KPSD	742273	6246573	100
BSS002KPSC	744427	6246947	122
BSS002KPDR	739520	6248976	112
BSS002KPCL	740552	6249148	120
BSS002KPAZ	739855	6247073	130
BSS002KNZB	740023	6245500	120
BSS002JDFC	766491	6269300	46
BSS002JCWU	756871	6272465	64
BSS002JVVQ	756128	6268168	96
BSS002JCBE	745229	6259968	75

BSS002JBYF	743489	6256310	35
BSS002JBRM	739866	6554787	106
BSS002JAVT	741861	6265628	125
BSS002JAVC	746892	6264108	517
BSS002JAUX	745978	6263695	586
BSS002JAUW_GL17	746021	6264054	715
BSS002JAUL	748068	6266150	530
BSS002JAUK	747689	6266293	668
BSS002JAUG	748034	6266880	634
BSS002JAUB	747299	6267606	593
BSS002JATV	745858	6268148	291
BSS002JARS	739087	6265279	67
BSS002GPYU	766692	6275951	143
BSS002GPQP	765406	6283014	77
BSS002GPAL	756440	6281422	80
BSS002GMXZ	739268	6278234	105
BSS002GPJH	766577	6277838	46
BSS002JCZM	756390	6264535	27
BSS003CJQG	756253	6264368	120
BSS002JCZS	756442	6264094	132
BSS002JDAA	756185	6263906	87
BSS002JCZU	756045	6263857	55
BSS002JCUT	755894	6263818	70
BSS002JCWL	755723	6263729	20
BSS002JEDU	756149	6263166	46
BSS002JEFU	756392	6262193	58
BSS003HGPE	756453	6261797	70
BSS002JDVD	755454	6261170	196
BSS002JDSU	754833	6261125	34
BSS002JDXA	754676	6260877	64
BSS002JDVA	754868	6260789	55
BSS002JDTA	755090	6260673	15
BSS002JDXB	754588	6260575	120
BSS002JDUZ	754658	6260536	175
BSS002JDND	754758	6260455	41
BSS002JDXJ	754773	6260483	150
BSS002JDNE	754898	6260514	37
BSS002JDSK	754865	6260444	167
BSS002JDNF	755008	6260493	14
BSS002JDNG	755007	6260393	36
BSS002JDNC	754787	6260355	60
BSS002JDXH	754894	6260377	200
BSS002JDNB	754806	6260174	69
BSS002JDWH	754773	6259905	407
BSS002JCZN	756278	6264407	58
BSS003HNCK	756247	6264357	50

BSS002JCGK	754019	6265884	37
BSS002JCHT	754709	6265818	46
BSS002JCHE	755449	6265823	60
BSS002JCWD	757730	6265803	15
BSS002JCLP	755238	6264343	90
BSS003DKPM	757615	6263347	150
BSS002JEGR	758736	6259904	42
BSS002JDUC	753269	6262057	37
BSS003CGKO	754225	6257285	134
BSS002JCVQ	756128	6268168	96

Tableau 9 : Compilation des forages importés dans GeoModeller.

Annexe 2

Projet DEM'EAUX Thau - Infolettre



La deuxième année du projet de recherche DEM'EAUX Thau s'achève. Les nombreuses acquisitions de données réalisées depuis le début du projet ont notamment permis l'élaboration d'un modèle géologique 3D qui sera délivré avant la fin de l'année 2019. Les travaux en cours au sein des différents ateliers sont résumés ci-dessous.

Equipping of the source of la Vise (1st semester 2019)

La source sous-marine de la Vise située dans l'étang de Thau a été équipée d'instruments de mesure. L'objectif est de mesurer le débit de la source, sa température, ainsi que d'autres paramètres décrivant la qualité de l'eau. Une réunion publique a été organisée par la mairie de Balaruc-les-Bains en avril dernier afin de présenter le projet.

L'instrumentation mise en œuvre par Antea Group repose sur des systèmes de mesure robustes, d'un entretien aisé, avec en corollaire une conception permettant aux différents utilisateurs du milieu (plongeurs, pêcheurs, etc) de pénétrer à l'intérieur pour vérifier par eux-mêmes l'innocuité du dispositif vis-à-vis du flux d'eau tiède venant réchauffer cette partie de l'étang. Pour ce faire, l'ancienne buse métallique coiffant le griffon (1) a été déposée et un nouveau dispositif de collecte des eaux de la source a été mis en place afin de recevoir les différents équipements de mesure (2). L'ensemble des opérations subaquatiques a été réalisé par une équipe de trois scaphandriers professionnels assistée d'un pilote.



Différents instruments (sondes, débitmètre (3), système pour échantillonner de l'eau de la source) ont



été mis en place par des plongeurs professionnels. Les câbles et flexibles entre la source et la rive au droit de l'écluserie des Poissons du Soleil ont été fixés sur des plots en béton pour assurer leur lestage puis enfouis sous 50 cm de sédiments à proximité de la canalisation existante assurant la prise d'eau à la source pour l'écluserie. A terre, les différents câbles ont été reliés vers une armoire de mesure (4) installée le long d'un mur de clôture de l'écluserie. Une pompe a été installée pour assurer des prélèvements à la demande de l'eau de la Vise afin de pouvoir procéder à des échantillonnages d'eau ou à des suivis de traçages par la pose d'un fluorimètre de terrain (Rapport BRGM RP-69163-FR). La station de mesure (4) est opérationnelle depuis le mois de juin 2019. Le débitmètre est en cours de test par l'entreprise KROHNE.

L'instrumentation au fond du gouffre restera en place pendant plusieurs années, le temps d'acquiescer des données essentielles au projet. Les différents instruments de mesure seront vérifiés et entretenus tous les 6 mois par des plongeurs professionnels sur la durée du projet (2021). Il est demandé à tous de respecter cet équipement qui n'entravera pas l'écoulement naturel de la source.

Atelier Géologie : Caractériser l'aquifère karstique masqué sous les sédiments «récents» par l'enregistrement du bruit sismique ambiant

Un des principaux objectifs de l'atelier Géologie du projet DEM'EAUX Thau est de comprendre la géométrie et les connectivités du réservoir karstique. Celui-ci, composé par les calcaires du

Jurassique supérieur affleure sur une large zone (Massif de la Gardiole, Montagne de la Moure, Mont Saint-Clair) mais se trouve recouvert par des sédiments plus récents dans le bassin de Montbazin-Gigean et dans

l'étang de Thau. Dans ces zones, il est nécessaire de mettre en œuvre une méthode d'imagerie du toit du Jurassique, avec une résolution bien meilleure que celle dont on dispose avec les quelques forages disponibles.

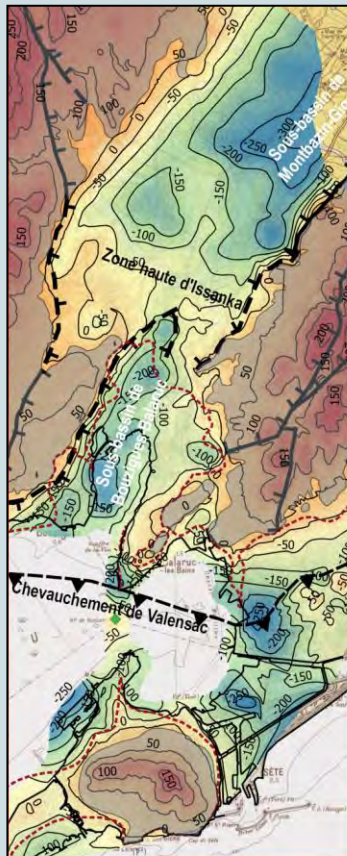


Pose de l'appareil (Tromino®) au sol pour l'enregistrement du bruit sismique ambiant pendant 20 minutes.

Dans cette optique, le laboratoire Géosciences Montpellier a lancé une campagne d'acquisition de sismique passive. Ce travail correspond au stage de recherche Master 2 de Théo Bourgeois (photo ci-dessus). La méthode consiste à enregistrer, grâce à un petit sismomètre posé sur le sol, le bruit sismique ambiant naturel ou anthropique transmis à travers le sous-sol, et réfléchi sur l'interface entre le calcaire Jurassique très compétent et les sédiments moins denses sus-jacents. Pour convertir l'information enregistrée en profondeur, il faut connaître la vitesse de propagation des ondes sismiques (Vs), très variable sur ces terrains. Pour déterminer les vitesses de propagation des ondes, des mesures ont été effectuées à l'aplomb des forages atteignant les calcaires du Jurassique. Connaissant la profondeur donnée par le forage, il était possible de déterminer la vitesse Vs au niveau de ces points et de les extrapoler à leurs périphéries.

Au cours de la campagne, plus 400 points de mesure (distants de 100 à 500 m) ont permis la détermination

de la profondeur du toit du Jurassique. Ces points ont permis de réaliser une carte d'élévation du toit du Jurassique (ci-dessous). La carte montre la présence de deux sous-bassins distincts : 1) Montbazin-Gigean, limité contre la Gardiole par une zone à fort gradient interprétée comme une faille, 2) Bouzigues-Balaruc, également limité à l'ouest par une faille. Les deux sous-bassins sont séparés par une zone haute entre Issanka et Poussan. Vers le sud, les résultats confirment le tracé d'une faille (chevauchement pyrénéen) séparant le Mont Saint Clair de la Gardiole, et initialement reconnu plus à l'ouest dans le forage de Valensac (vallée de l'Hérault).



On s'est également intéressé aux variations spatiales des valeurs de vitesse de propagation des ondes sismiques (Vs) dans le Jurassique. Celles-ci varient fortement de 750 à 2800 m/s. La comparaison avec des résultats de sismique réflexion acquis en 2005 suggère que les faibles vitesses de propagation mesurées dans la partie nord de la presqu'île de Balaruc corréleraient avec la faible profondeur et la forte altération des calcaires. Par contre, les valeurs élevées mises en évidence dans la partie sud de la presqu'île, dans un bloc enfoui plus profondément se corrèleraient avec un massif calcaire peu ou moins altéré. Ces derniers résultats doivent être confirmés, cependant s'ils se vérifient, nous disposerions d'un nouveau moyen pour évaluer l'altération des réservoirs karstiques sous couverture. Un article scientifique est en cours de rédaction pour valoriser l'ensemble de ces résultats.

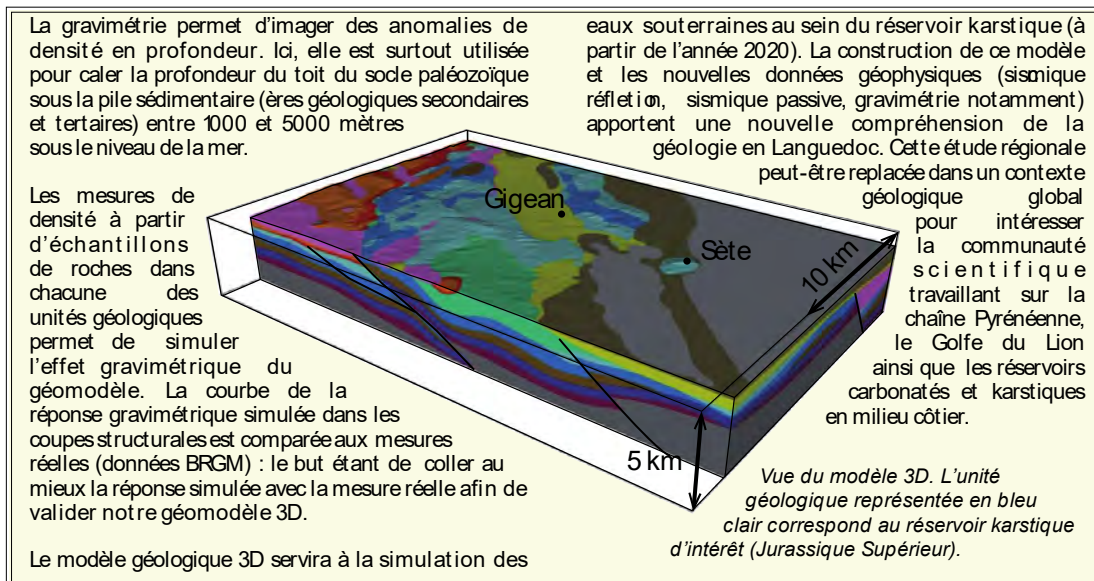
Carte d'altitude du toit des calcaires jurassiques (en mètres NGF) et interprétation des failles masquées en profondeur (en pointillés) dans le secteur de Sète-Balaruc-Montbazin.

Atelier Géologie : Construction du modèle géologique 3D

Le modèle géologique 3D est construit à partir de GeoModeller, logiciel développé par le BRGM et Intrepid. Ce logiciel permet de compiler les données de forages et les données en surface (cartes géologiques, orientation des couches affleurant en surface). A partir de la connaissance du sous-sol et du terrain en surface, les géologues dessinent des coupes structurales dans un premier temps. Ces coupes sont ensuite importées dans le logiciel GeoModeller pour contraindre la géométrie des couches en profondeur. Pendant la construction du modèle, les coupes sont

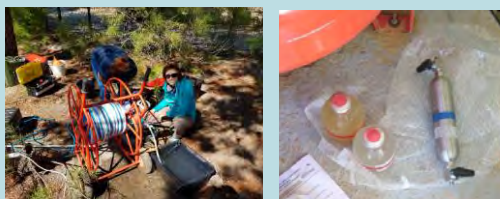
modifiées jusqu'à l'obtention d'une cohérence 3D, et plus particulièrement des unités géologiques et des failles. L'histoire géologique de la région est ici résumée en 12 unités depuis le socle paléozoïque jusqu'à l'actuel, soit plus de 250 millions d'années. Ces différentes unités ont été déformées et faillées au cours des différentes phases tectoniques (formation des Pyrénées, ouverture du Golfe du Lion, etc). Les 23 failles majeures du géomodèle caractérisent la complexité du contexte géologique, ainsi que la compartimentalisation des réservoirs carbonatés en Languedoc.





Atelier géochimie : Réalisation de la 3^{ème} campagne d'échantillonnage et zoom sur les gaz dissous

La 3^{ème} campagne régionale d'échantillonnage a été réalisée du 21 au 23 Mai 2019. Des échantillons d'eau ont été prélevés dans les forages thermaux de Balaruc, des autres forages et des sources karstiques aux alentours, soit un total de 16 points de prélèvement. Cette campagne s'inscrit comme celle d'Août 2018 dans un contexte de basses eaux (les niveaux d'eau dans l'aquifère karstique sont bas) qui contraste avec le contexte de la première campagne du mois de mars 2018 (hautes eaux). Les nouveaux prélèvements sont en cours d'analyse au laboratoire HydroSciences Montpellier.

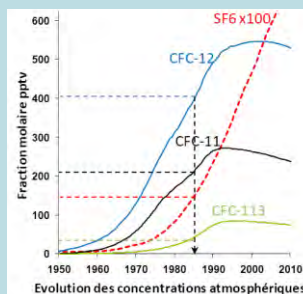


Nous remercions vivement les propriétaires des ouvrages pour leur collaboration, qui a permis le bon déroulement de cette troisième campagne.

Parmi les échantillons récupérés lors de ces campagnes de prélèvement, certains sont destinés à l'analyse des gaz dissous dans l'eau. Deux types de gaz sont recherchés et apportent des informations complémentaires sur les eaux souterraines :

- Les gaz d'origines anthropiques, les CFCs (chlorofluorocarboènes) et le SF₆ (hexafluorure) sont utilisés pour estimer le temps de résidence de l'eau dans le système souterrain. La comparaison entre les concentrations dans l'eau et les courbes d'évolution des concentrations atmosphériques permet de déterminer l'année de recharge de l'eau souterraine.
- Les gaz rares, néon, argon et azote, sont utilisés pour déterminer les conditions de pression et de température au moment de la recharge des eaux souterraines.

Ces deux types de gaz sont prélevés dans des flacons spécifiques qui assurent une parfaite étanchéité vis-à-vis des gaz atmosphériques. Ces échantillons sont en cours d'analyse par la plateforme Condate Eau de l'OSUR de l'Université de Rennes 1.



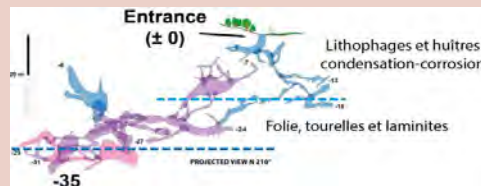
Evolution globale des concentrations de gaz dissous CFC et SF₆ mesurés dans l'atmosphère entre 1950 et 2010. Ces courbes servent de référence pour dater les eaux.

Evidences d'une karstification par d'anciennes remontées de fluides thermaux dans la grotte de la Baume (Gardirole)

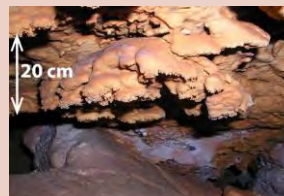
Le bureau d'étude CENOTE intervient dans le projet DEM'EAUX Thau pour cartographier et catégoriser les morphologies karstiques dans les massifs calcaires entre Montpellier et Sète. Ce travail permet de mieux contraindre l'histoire du réservoir calcaire et des circulations d'eaux souterraines au cours des différentes périodes géologiques. On s'intéresse notamment à la mise en circulation de l'eau thermale dans le secteur de Balaruc-La Gardirole.

La grotte de la Baume, à Balaruc-le-Vieux, s'ouvre à 44m d'altitude dans les calcaires du Jurassique Supérieur et se développe au sein d'une brèche constituée de blocs calcaires de plusieurs mètres cubes (voir plan de la grotte ci-contre). Dans la partie supérieure et médiane de la cavité, ces blocs sont emballés dans des marnes contenant des huîtres. Le site semble donc correspondre à une ancienne source littorale.

La partie inférieure du réseau est caractérisée par une intense corrosion des calcaires, avec des concrétions sous-marines (de type tourelles ou folia sur la photo ci-contre). Ces objets sont caractéristiques d'un dégazage dans des karsts hypogènes; c'est-à-dire des karst formés par la remontée d'eau souterraine profonde (flux thermal). La partie supérieure montre aussi des indices de condensation-corrosion en milieu gazeux associés à des concrétions, elles-aussi d'origine hypogène.



Ce site représente donc une ancienne source littorale comblée par des sédiments marins (d'âge Miocène, environ 20 millions d'années) qui a été ensuite réactivée par la remontée de fluides thermaux, probablement durant le Pliocène (environ entre 3 et 5 millions d'années). Cette grotte est un analogue des possibles cavités présentes en profondeur sous la presqu'île de Balaruc-les-Bains.



Concrétions de type «folia» dans la grotte de La Baume, typiques du dégazage dans l'eau.

La carte de l'ensemble des morphologies karstiques et des paléosurfaces dans le secteur Montpellier-Sète est en cours de réalisation et sera finalisée en fin d'année 2019.

Valorisation des travaux DEM'EAUX Thau

- Participation au 46^{ème} congrès de l'AIH (Association Internationale des Hydrogéologues) à Malaga (Espagne) en Septembre 2019. Félicitations à Marie-Amélie Pétré, ancienne post-doctorante DEM'EAUX Thau au laboratoire Hydrosiences Montpellier, qui a remporté le prix 2019 du meilleur chercheur sur les recherches en karstologie (photo ci-contre) pour la présentation : «Hydraulic and geochemical impact of occasional saltwater intrusions through a submarine spring in a karstic and thermal aquifer (Thau lagoon



area, Montpellier, France)». Les travaux présentés seront prochainement valorisés sous forme d'un article scientifique.

- Participation aux réunions OROGEN à Paris en octobre 2019. Romain Hemelsdaël (post-doctorant Géosciences Montpellier) a présenté ses travaux intitulés : « Structural style of the Languedoc Pyrenean thrust belt in relation with inherited Mesozoic structures and rifting of the Gulf of Lion ». Ces réunions avaient pour but de préparer la rédaction d'un article scientifique dans un numéro spécial du Bulletin de la Société Géologique de France (Earth Sciences Bulletin) qui paraîtra en 2020.

Dates importantes à venir...

- Mardi 17 décembre 2019 : Atelier plateforme expérimentale DEM'EAUX organisée par TERINOV.
- Mardi 10 mars 2020 : Présentation du projet aux journées OZCAR (Observatoire de la Zone Critique: Applications et Recherche) à Sète.
- Vendredi 10 janvier 2020 : Comité de suivi annuel du projet.

Cette infolettre a été rédigée par: H. Camus, R. Hemelsdaël, B. Ladouche, C. Lamotte, J.L. Seidel, M. Séranne.





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

Direction régionale Occitanie
1039 rue de Pinville
34000 Montpellier
Tel. : 04.67.15.79.80