



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité



Document à accès immédiat

# DEM'Eaux Thau : rapport de synthèse final

Rapport de synthèse final

BRGM/RP-77471-FR

Version du 24 novembre 2022

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche

Ladouche B., Seranne M., de Montety V., Ranchoux C., Dewandel B., Hakoun V., Maréchal J-C.,  
Lamotte C., Pezard P., Le Ber E., Temani A., Neyens D., Brillouet N. Hemelsdaël R., Pétré M. A.,  
Camus H., Widhen F., Hery M., Seidel J.L., Léonardi V., Bailly-Comte V., Coppo N.

## Vérificateur :

Nom : T. KLINKA

Fonction : Hydrogéologue

Date : 21/11/2022

Signature :

## Approbateur :

Nom : A.-V. HAU-BARRAS

Fonction : Directrice Régionale

Date : 20/12/2022

Signature :

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

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)



PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL

## Avertissement

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

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

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

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

## Votre avis nous intéresse

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

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



**Mots clés :** Modèle géologique 3D, GeoModeller, Coupes structurales de références, Log lithologique, Chevauchement de Thau, Réservoir karstique, Forage profond, Vise, Inversac, Modèle hydrogéologique, Eaux thermales, Géochimie, Isotopes, Datation, Balaruc-les-Bains

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

Ladouche B., Seranne M., de Montety V., Ranchoux C., Dewandel B., Hakoun V., Maréchal J-C., Lamotte C., Pezard P., Le Ber E., Temani A., Neyens D., Brillouet N. Hemelsdaël R., Pétré M. A., Camus H., Widhen F., Hery M, Seidel J.L, Léonardi V., Bailly-Comte V., Coppo N. (2022) – DEM'Eaux Thau : rapport de synthèse final. Rapport final . BRGM/RP-77471-FR, 129 p., 59 fig., 3 ann.

## Synthèse

Les ressources en eau souterraine des calcaires karstiques du Pli Ouest de Montpellier présentent un intérêt majeur pour le territoire, que ce soit pour l'alimentation en eau potable (ville de Sète, SIAEP Balaruc-Frontignan, SBL), ou pour le développement économique, avec en particulier l'activité conchylicole au niveau de la lagune de Thau, ainsi que pour le thermalisme sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains (1<sup>re</sup> station thermale en France avec près de 53 000 curistes en 2019), et l'irrigation. Ce secteur est situé à la convergence d'eaux souterraines provenant de divers réservoirs superficiels et profonds : eaux karstiques froides des Causses d'Aumelas et de la Gardiole, eaux d'origine marine (lagune et mer) et eaux thermales chaudes et minéralisées. Ces différents réservoirs sont en interaction les uns avec les autres selon des processus complexes dont les déterminants ne sont pas tous connus.

Cet aquifère karstique est confronté à des phénomènes temporaires d'intrusion d'eau saumâtre (appelés « inversac ») par l'intermédiaire de la source sous-marine de la Vise, située dans la lagune de Thau. Depuis la fin des années 1960, sept phénomènes d'inversac ont été détectés ; le dernier en date a débuté le 28 novembre 2020, et s'est terminé le 14 mars 2022. Pendant ce phénomène qui peut durer plusieurs mois (plus de 6 mois en 2010, près de 6 mois en 2014 et près de 18 mois en 2020-2022), la source de la Vise, au lieu de fournir de l'eau douce utile à la vie biologique de l'Étang de Thau, absorbe l'eau saumâtre de la lagune conduisant à une salinisation de l'aquifère. Ce phénomène a eu entre autre pour conséquence l'abandon (en 2014) de la source Cauvy à Balaruc-les-Bains pour son usage pour l'alimentation en eau potable.

Le projet de recherche DEM'Eaux Thau a eu pour objectif de comprendre la structure et le fonctionnement de cet hydrosystème complexe dans le secteur du Bassin de Thau (Hérault) et de développer un outil de gestion des eaux souterraines. Il s'est déroulé de 2017 à 2022. Piloté par le BRGM, avec le soutien de 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 Bassin de Thau) ainsi que des partenaires opérationnels. Ce travail pluridisciplinaire a été divisé en trois volets : (1) le volet géologie, piloté par Géosciences Montpellier et réalisé en collaboration avec le BRGM, (2) le volet hydrogéologie, piloté par le BRGM et réalisé en collaboration avec le laboratoire HydroSciences Montpellier et la société Synapse Informatique et (3) le volet géochimie piloté par HydroSciences Montpellier et réalisé en collaboration avec le BRGM.

Le présent rapport constitue le livrable L14 du projet et présente une synthèse des nouveaux équipements mis en place et des principaux résultats des travaux et avancées scientifiques réalisées au cours de ce projet de recherche DEM'Eaux Thau.

Après une description des contextes géologique et hydrogéologique ainsi que du réseau d'observation mis en place (§ 2), les principales nouvelles informations sur la géométrie et la structure des réservoirs souterrains sont décrites pour aboutir à un modèle géologique tridimensionnel (§ 3). La synthèse et l'homogénéisation d'anciennes données géologiques et géophysiques, associées à l'acquisition de nouvelles données (cartographie haute résolution, levés gravimétriques, sismique réflexion multi-traces, sismique passive, CSEM) a permis de constituer une base de données du sol et du sous-sol correspondant à l'hydrosystème Thau Balaruc, remarquable par sa densité, sa résolution, son homogénéité et sa cohérence.

L'ensemble de ces données a été intégré dans un modèle géologique numérique 3D, construit sous *GeoModeller®*. Celui-ci présente de manière cohérente la distribution des réservoirs géologiques et de leurs couvertures, dans un volume de 70 km x 30 km x 5 km, s'étendant depuis le nord du Chevauchement de Montpellier, jusqu'aux parties off-shore au large de Sète, avec une résolution de l'ordre de la dizaine de mètres. Cet outil permet d'investiguer dans les trois directions la structure du réservoir karstique, les connectivités et ses relations avec les zones de recharge, dans tout le volume de la zone d'étude. Il permet de tester différentes hypothèses de chemins de circulations fluides.

La construction du modèle géologique 3D a mis en évidence plusieurs structures majeures dans la zone littorale, jusqu'à présent inconnues. On note en particulier la continuité vers le sud-est de la Faille normale de Nîmes qui admet un rejet kilométrique, ainsi que le Chevauchement de Thau, d'orientation est-ouest, qui soulève le compartiment sud (Mont Saint-Clair) de plusieurs centaines de mètres. Les recherches conduisant à la construction du modèle géologique 3D ont également permis de confirmer la chronologie des déformations successives et ainsi, de documenter la formation sur le long-terme de la structure du réservoir géologique, actuellement utilisé par l'hydrosystème de Thau-Balaruc.

La description et les nouvelles informations apportées par les nouveaux équipements mis en place dans le cadre du projet (plateforme de forages, équipement de la Vise...), déterminantes dans les avancées scientifiques réalisées, sont décrites et analysées au § 4. Les nouveaux ouvrages (forage profond composite (DEMT1, 2, 3 et 4), forage de Sète) ont permis d'apporter de nouvelles informations concernant d'une part le sous-sol de la presqu'île de Balaruc-les-Bains et de Sète, nécessaires à la meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique ; d'autre part les caractéristiques géochimiques inédites sur l'origine des fluides en fonction de la profondeur, les temps de résidence ; ce qui a permis de préciser les relations hydrauliques entre le gisement thermal et l'aquifère karstique de sub-surface et plus globalement sur l'organisation des écoulements.

Les nouvelles connaissances hydrogéologiques acquises grâce aux nouvelles chroniques de données, aux essais de traçage, de pompage et à l'hydrochimie, ainsi que l'actualisation du modèle hydrogéologique conceptuel sont présentées dans le § 5.

Des modélisations numériques ont été mises en œuvre ; leurs résultats sont distingués ainsi : modélisation globale (§ 6.1) et modélisation déterministe (§ 6.2).

Ainsi, la modélisation globale (Gardenia) a permis de qualifier le fonctionnement hydrogéologique du système karstique dans son ensemble, et d'établir un bilan hydrogéologique à l'échelle de deux compartiments « amont » et « aval ». Le fonctionnement hydrogéologique montre que la source d'Issanka est l'exutoire principal du compartiment amont de l'aquifère, depuis cette source s'écoule la Vène. L'impluvium de recharge pour ce compartiment est situé sur le causse d'Aumelas et la montagne de la Moure et a été estimé à 135,6 km<sup>2</sup>. La part des écoulements souterrains qui n'émergent pas à Issanka est transférée vers un compartiment aval, dont l'exutoire principal est la source de la Vise. L'impluvium associé à ce compartiment est de 20,6 km<sup>2</sup>. Le modèle conceptuel apporte des ordres de grandeur des flux concernant ces compartiments amont et aval. La recharge sur le causse d'Aumelas et la montagne de la Moure du compartiment amont a été évaluée à 152,8 mm/a en moyenne [7,5 millions de m<sup>3</sup>/a] ; les flux du karst qui alimentent la Vène représentent en moyenne 130,6 mm/a [6,4 millions de m<sup>3</sup>/a], le flux d'échange au profit du compartiment aval est évalué à 22,3 mm/a [1,1 millions de m<sup>3</sup>/a]. Les flux de l'amont vers l'aval sont estimés à 150 L/s en hautes eaux et <30 L/s en période de très basses eaux. À l'aval, le flux de recharge moyen est évalué entre 131-141 mm.an<sup>-1</sup> ; et le flux moyen de la Vise est de l'ordre de 0,127 m<sup>3</sup>/s (4 millions de m<sup>3</sup>/a), la variabilité interannuelle apparaît assez faible (Min= 0,1 m<sup>3</sup>/s, Max =0,15 m<sup>3</sup>/s) soit entre 3,2 et 4,8 millions de m<sup>3</sup>/a.

En moyenne, le flux en provenance du compartiment amont représenterait environ 30 % du flux total de la Vise. Les flux des exutoires secondaires du compartiment aval (sources de Cauvy et d'Ambressac), représenteraient moins de 10 % des flux moyens de la source de la Vise.

Sur la base du modèle géologique 3D (GeoModeller), un modèle déterministe 3D a été développé à l'aide de l'outil de modélisation hydrogéologique MARTHE. La géométrie du domaine de modélisation hydrodynamique du modèle « MARTHAU » est très détaillée en plan (grille de 400 x 400 m) et en profondeur (multicouche avec compartimentation du domaine vis-à-vis des accidents majeurs), soit au total plus de 12 200 mailles sur une extension de 1 000 km<sup>2</sup> (dont 200 km<sup>2</sup> d'impluvium). Ce domaine de modélisation prend en compte les nouvelles informations géologiques, en particulier les profondeurs des couches des calcaires du Jurassique révisées et la faille de Thau, qui sépare un compartiment amont (entité liée à la Vise) et un compartiment aval (entité du Mont Saint-Clair). La discrétisation du domaine en multicouche permet de réaliser des calculs au sein de zones d'écoulements avec des propriétés physiques discrétisées en 3D associées à des étages géologiques différents (p. ex. Jurassique Supérieur et Moyen). L'approche numérique de type milieu poreux équivalent s'est révélée satisfaisante pour reproduire les charges à l'échelle globale, comparables aux états de référence observés dans le karst. La modélisation permet en outre de reproduire localement les débordements correspondant aux sources et les dynamiques de fonctionnement observées ainsi que les flux ascendants correspondant à des différences de charges verticales observées entre les formations du Jurassique. Ces éléments constituent des résultats nouveaux et informatifs importants, qui sont issus du travail de calibration du modèle en régimes permanent et transitoire.

L'occurrence d'un inversac au cours du projet a permis d'en expliquer le mécanisme et d'en élaborer une modélisation (§ 7) grâce à l'équipement mis en place sur la source sous-marine de Vise pour l'acquisition des données (débit, conductivité, température, qualité chimique de l'eau). Les informations recueillies ont permis de préciser les schémas conceptuels de fonctionnement de l'hydrosystème en période de fonctionnement « normal » et au cours d'un inversac, en permettant notamment une quantification inédite des flux mis en jeu lors des différents processus. Ces travaux ont conduit in fine à l'élaboration d'un outil d'évaluation du risque « inversac ». Des propositions de surveillance et de possibles pistes de gestion de l'inversac ont été proposées.

La plateforme de concentration et visualisation des données élaborée est décrite au § 8. La production scientifique du projet DEM'EAUX Thau est décrite au § 9. On y présente la liste des livrables produits en cours de projet, dont les livrables contractuels (§ 9.1) sont consultables sur le site web du projet (DEM'Eaux Thau).

Enfin, plusieurs perspectives, détaillées au §10, émergent à l'issue du projet DEM'Eaux Thau, que ce soit dans la poursuite des acquisitions au niveau de la plateforme scientifique, des caractérisations et études des carottes, l'amélioration des modélisations (prédiction des modalités d'écoulement à l'étiage, périodes favorables au déclenchement de phénomène d'inversacs, prise en compte des effets densitaires, réalisation de calculs prévisionnels ou intégration de scénarios de gestion, avec la prise en compte d'incertitudes, ...), dans l'étude de solutions techniques qui permettraient notamment de moduler le débit de la source de la Vise en fonction de la piézométrie (et les aménagements associés), ...

Des numéros de rapport BRGM ont été attribués à chaque production de manière à les bancariser de façon pérenne et pouvoir les retrouver et les télécharger sur le site InfoTerre<sup>1</sup> du BRGM.

---

<sup>1</sup> <http://infoterre.brgm.fr/rechercher/switch.htm?scope=9>.



# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>13</b>
<b>2. L'aquifère karstique de Thau .....</b>	<b>15</b>
2.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE .....	15
2.2. RÉSEAU D'OBSERVATION .....	18
2.3. PHÉNOMÈNE D'INVERSAC 2020-2022 .....	19
<b>3. Nouvelles connaissances sur la géométrie de l'aquifère .....</b>	<b>21</b>
3.1. APPROCHE GÉOMORPHOLOGIQUE .....	21
3.2. APPROCHE GÉOPHYSIQUE .....	22
3.3. APPROCHE PÉTROPHYSIQUE .....	25
3.3.1. Péetrophysique sur carottes .....	25
3.3.2. Géophysique en forage .....	26
3.3.3. Impact de l'inversac de 2020 .....	29
3.4. APPROCHE GÉOLOGIQUE .....	30
3.5. MODÈLE GÉOLOGIQUE 3D .....	34
<b>4. Apport des nouveaux équipements .....</b>	<b>37</b>
4.1. INTRODUCTION .....	37
4.2. FORAGE DE SÈTE .....	37
4.3. SOURCE DE LA VISE .....	39
4.4. PLATEFORME DE FORAGES .....	41
4.4.1. Informations techniques .....	42
4.4.2. Observatoires géophysiques en forage .....	43
4.4.3. Paramètres hydrauliques des nouveaux forages .....	45
4.4.4. Informations géochimiques des nouveaux forages .....	48
<b>5. Nouvelles connaissances hydrogéologiques .....</b>	<b>55</b>
5.1. ESSAIS PAR POMPAGE .....	55
5.2. ESSAIS DE TRAÇAGES ARTIFICIELS .....	57
5.3. APPROCHE HYDROGÉOCHIMIQUE / ACTUALISATION DU MODÈLE CONCEPTUEL HYDROGÉOLOGIQUE .....	59
<b>6. Modélisations hydrogéologiques numériques .....</b>	<b>67</b>
6.1. MODÈLE GLOBAL GARDENIA .....	67
6.2. MODÈLE DÉTERMINISTE MARTHE .....	69
<b>7. Phénomène d'inversac .....</b>	<b>79</b>
7.1. INVERSAC 2020-2022 .....	79

7.2.	EXPLICATION DU MÉCANISME D'INVERSAC.....	81
7.3.	IMPACT QUALITATIF DE L'INVERSAC SUR LES EAUX DE LA PRESQU'ÎLE DE BALARUC .....	83
7.4.	MODÉLISATION DE L'INVERSAC .....	85
7.4.1.	Modélisation analytique du rebond piézométrique.....	85
7.4.2.	Modélisation numérique des écoulements souterrains et du transport de sel..	87
7.4.3.	Modélisation analytique des débits mesurés à la Vise .....	88
7.5.	GESTION ET PRÉVISION DE L'INVERSAC.....	92
7.5.1.	Surveillance en situation normale : indicateur de risque d'inversac.....	92
7.5.2.	Surveillance en situation d'inversac : indicateur de situation d'arrêt d'inversac.....	95
7.5.3.	Surveillance : conclusion.....	96
7.5.4.	Remédiation.....	96
<b>8.</b>	<b>Outil d'observation et de gestion.....</b>	<b>97</b>
8.1.	MISE EN PLACE DE L'ARCHITECTURE MATÉRIELLE ET RÉSEAU.....	97
8.2.	OBJECTIFS DE L'APPLICATION .....	98
8.3.	LA CONCENTRATION DES DONNÉES .....	99
8.4.	LA CONSULTATION DES DONNÉES .....	99
8.4.1.	Le Synoptique Cartographique.....	99
8.5.	LES RAPPORTS GRAPHIQUES .....	101
8.6.	EXPLOITATION OPÉRATIONNELLE DES DONNÉES .....	103
8.7.	VALORISATION DES RESULTATS DE RECHERCHE .....	104
8.8.	UN OUTIL OPÉRATIONNEL : LE CALCUL DE L'INDICATEUR DU RISQUE D'INVERSAC .....	105
8.9.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	106
<b>9.</b>	<b>Synthèse de la production scientifique.....</b>	<b>107</b>
9.1.	LIVRABLES SCIENTIFIQUES DU PROJET.....	107
9.2.	AUTRES RAPPORT SCIENTIFIQUES .....	108
9.3.	RAPPORTS D'ACTIVITÉ .....	109
9.4.	ARTICLES SCIENTIFIQUES .....	109
9.5.	CONFÉRENCES / CONGRÈS .....	109
9.6.	AUTRES .....	112
9.6.1.	Communication publique.....	112
9.6.2.	Presse .....	112
9.6.3.	Divers .....	112
<b>10.</b>	<b>Conclusion et perspectives.....</b>	<b>113</b>
<b>11.</b>	<b>Bibliographie.....</b>	<b>119</b>



## Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude. ....	16
Figure 2 : Caractérisation des différentes zones des compartiments amont et aval au sein de l'entité A.V.I.C (Aumelas-Vène-Issanka-Cauvy). ....	17
Figure 3 : Carte de localisation des ouvrages instrumentés (Focus sur la presqu'île de Balaruc, Légende : les rectangles définissent approximativement les zones hydrogéologiques). ....	19
Figure 4 : Cartes gravimétriques. Anomalie de Bouger (à gauche) et anomalie résiduelle (à droite). Les points noirs représentent les stations d'acquisition (Coppo et al. 2018). ....	22
Figure 5 : Transects de sismique réflexion présentant les corrélations Terre-Mer, construits à partir de données anciennes retraitées (H84D & B, F11 & 02, 84SW24, LRM34 & 30 et 84GL15) ainsi que les profils nouvellement acquis (DEM01 & 02) (BRGM/RP-70789-FR, Hemelsdaël et al. 2021). ....	23
Figure 6 : Carte de l'altitude (m NGF) du toit des calcaires du Jurassique réalisée à partir de l'interprétation des données de sismique passive sous la couverture du Néogène et de la carte géologique pour les reliefs (Bourgeois, 2019). ....	24
Figure 7 : Mesures pétrophysiques sur carottes pour 60 échantillons choisis en fonction de la lithologie et de la déformation (Temani, 2022). De gauche à droite : masse volumique de grain, porosité, vitesse des ondes P (Vp) et facteur de formation électrique. Les masses volumiques de grain atteignent 2,87 gg/cc dans les dolomies situées entre 150 et 350 m. ....	25
Figure 8 : (A) Images optiques de paroi dans le forage DEMENT4. Les images de résolution millimétrique sont orientées par rapport au nord et mettent en évidence la présence d'horizons karstiques (346 m, à gauche) ou de fractures colmatées avec de la calcite (709 m, à droite). (B) Cartographie de l'ensemble des structures à partir des images optiques (Widhen, 2021). ....	26
Figure 9 : Profils géophysiques dans les forages DEMENT1, DEMENT3 et DEMENT4 du site de Balaruc. De gauche à droite : lithologie déduite de l'analyse des carottes (Widhen, 2021); radioactivité gamma naturelle; rapport Th/K lié à la minéralogie des argiles, conductivité électrique de la formation, vitesse acoustique (Vp) comparées aux mesures ultrasoniques sur carottes (carrés noirs) ; calculs de porosité à partir des mesures de Vp comparées aux mesures de porosité sur carottes (ronds noirs) ; conductivité électrique du fluide poral ; déformations observées sur carottes (Widhen, 2021). Horizontalement : les karsts ou fractures ouverts sur les images optiques et avec une anomalie de température, de conductivité électrique ou de pH du fluide en forage sont soulignés en bleu ; ceux qui sont sans anomalie apparaissent en gris clair. ....	27
Figure 10 : Mesures des propriétés physico-chimiques des fluides en forage montrant l'impact de l'inversac de 2020 sur les circulations en sub-surface (A et B) et la connectivité hydraulique verticale des structures (C). (A) Mesures de pH (en vert) et de conductivité électrique du fluide en forage (en rose) dans le forage DEMENT1, en face de la section crépinée du tube PVC (de 100 à 160 m). Comparaisons de profils enregistrés en juin 2020 avec ceux mesurés six jours après l'inversac du 28 novembre 2020. La conductivité électrique passe de 2 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en juin 2020 et dans la partie supérieure du forage, à 3 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en dessous de 136 m et plus de 7 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en dessous de 150 m. Ceci indique des venues d'eau de mer liées à l'inversac qui s'infiltrent depuis la surface se mélangent aux eaux thermales venues de grande profondeur puisque la conductivité électrique de l'eau de mer est de 55 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25 °C. (B) Un mois et demi après l'inversac, des valeurs de plus de 28 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sont mesurées dans le forage DEMENT3 à près de 300 m de profondeur, soulignant que l'impact hydrodynamique de l'inversac se fait sentir à grande profondeur. ....	28

Figure 11 : Profil sismique vertical (PSV) enregistré dans le forage DEMENT4 jusqu'à 750 m par OGS (Trieste, Italie). Les données présentées en « temps double » (à gauche) sont migrées en profondeur (à droite). On observe la forte impédance des niveaux karstifiés et dolomités du Jurassique de 72 à 160 m environ (Figure 9). En dessous, de forts réflecteurs apparaissent également entre 290 et 350 m dans une zone de forte déformation (Figure 9), puis de façon régulière jusqu'à 1 400 m, ce qui pourrait correspondre à l'interface Toarcien / Pliensbachien. ....	29
Figure 12 : Coupes géologiques de la zone DEM'Eaux Thau, présentant la structure actuelle et indiquant la chronologie des déformations. Le réservoir d'intérêt correspond aux calcaires du Malm et du Dogger. ....	30
Figure 13 : Colonne litho-stratigraphique et de déformation du forage DEM'Eaux Thau. ....	31
Figure 14 : Vue panoramique de la carothèque installée au BRGM dans le centre technique d'Orléans (crédit photo: O. Serrano). ....	32
Figure 15 : Exemples des cinq types de cristallisation de calcite observés dans les fractures. Chaque exemple montre une vue en lumière naturelle (à gauche) et en cathodoluminescence (à droite). ....	33
Figure 16 : Calendrier de la structuration du réservoir DEM'Eaux Thau et des circulations de fluides à l'origine des différents types de cristallisation de calcite dans les fractures, en lien avec l'évolution géodynamique régionale. ....	34
Figure 17 : Vues du modèle géologique 3D réalisé avec Geomodeler™, avec toutes les couches géologiques (en haut). En bas : écorché du réservoir Malm (bleu clair) et Dogger (bleu foncé), avec les surfaces de failles inverse (en rouge) et normales (bleu marine). ....	35
Figure 18 : Vue du modèle géologique 3D présentant la structure du réservoir carbonaté Malm-Dogger (bleus clair et foncé, respectivement) affecté par le chevauchement de Thau (rouge) et la faille normale de Nîmes (bleu marine). Les rivages de l'étang de Thau et de la mer sont indiqués par une ligne rouge. ....	36
Figure 19 : Interprétation du pompage sur le Forage du stade Michel (Sète, 20-22/02/2018). Modèle analytique : fracture inclinée et drainance – Extrait, Ladouche et al., 2019, BRGM RP-68483- FR). ....	38
Figure 20 : Suivi piézométrique sur le forage du Stade-Michel à Sète (BSS003CGKO). ....	39
Figure 21 : Localisation de la plateforme expérimentale des forages. ....	41
Figure 22 : Schéma de principe de l'implantation des ouvrages réalisés et aquifères-cibles de la plateforme DEM'Eaux Thau. ....	42
Figure 23 : Image SMD de résistivité électrique du milieu réalisée en mode dipôle-dipôle et transformée en conductivité électrique de l'eau porale en fonction de la profondeur. Les 14 premiers mois de données soulignent nettement la fin de l'inversac en mars 2022. ....	44
Figure 24 : Suivi du débit de la source de la Vise (Avril – Mai 2020) et informations liées à la foration du DemT1. ....	46
Figure 25 : Rapport Mg/Ca en fonction de $\delta^{18}O$ des eaux étudiées (2018-2021), extrait du rapport BRGM/RP-71281-FR, Ranchoux et al. 2022. ....	49
Figure 26 : Schémas conceptuels présentant les hypothèses possibles de l'origine de la part d'eau marine des échantillons d'eau des ouvrages F6, DEMENT1 et DEMENT3 prélevés au cours de l'inversac 2020-2022 (extrait du rapport BRGM/RP-71281-FR, Ranchoux et al. 2022). ....	51
Figure 27 : Rapport isotopique $^{87}Sr/^{86}Sr$ en fonction de l'inverse de la concentration en Sr. ....	53
Figure 28 : Comparaison des transmissivités (graphe haut-gauche), perméabilités (graphe haut-droite) et des emmagasineurs (graphe du bas) déduits des essais sur les forages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4 aux données disponibles sur le secteur : Miocène, aquifères fracturés-karstifiés du Jurassique sur les mines de Bauxite (Villeveyrac), de Balaruc (Thermes) et du secteur Issanka-Belvezet. Extrait de Ladouche et al., 2021. ....	56

Figure 29 : Courbes de restitution des huit traçages réalisés entre la source de la Vène et les sources d'Issanka, avec une représentation linéaire (A) et semi-logarithmique (B). .....	58
Figure 30 : Schéma conceptuel du fonctionnement du réservoir thermal et apport des nouveaux outils géochimiques et des temps de résidence (Ranchoux et al., 2022, Livrable L5a BRGM/RP-71281-FR). .....	61
Figure 31 : Représentation schématique de l'alimentation en eau des forages F8 et Sète/Stade Michel. Les eaux thermales (30 % d'eau de mer, 70 % d'eau karstique) remontent depuis le réservoir thermal par la faille de Thau. ....	61
Figure 32 : Schéma conceptuel de la presqu'île de Balaruc-les-Bains en période « normale », extrait Ranchoux et al., 2022 L5b BRGM/RP-71957-FR. ....	65
Figure 33 : Bilan hydrogéologique du système karstique de l'entité A.V.I.C évalué à l'aide des modèles Gardenia (extrait, BRGM/RP-71757-FR). ....	68
Figure 34 : Vue d'ensemble 3D du modèle hydrogéologique MARTHAU(extrait, BRGM/RP-71757-FR). ....	69
Figure 35 : Comparaisons entre valeurs de piézométrie observées et calculées après calibration en régime permanent pour la situation d'étiage (août-septembre) de 1986. a) comparaison des valeurs observées et calculées sur des sites interceptant le Jurassique Supérieur (vert) et le Jurassique Moyen (rouge). Les points nommés indiquent les sites où la différence entre les valeurs observées et calculées est supérieure à 24 m. b) comparaison entre piézométrie régionale interprétée en basses-eaux 1986 (en rouge) et calculée en régime permanent (en noir) dans la couche 8 (Jurassique Supérieur) du modèle MARTHE.. ....	71
Figure 36 : Comparaison de la piézométrie observée et calculée au pas de temps mensuel sur la période 1988 - 2021 à Balaruc-le-Vieux (10166X0212/BV83 - CGE Tennis). Les observations ont été échantillonnées à la date du calcul mensuel. ....	72
Figure 37 : États des charges calculées en régime transitoire en période de hautes (A) et basses eaux (B) dans la couche 8 représentant la géométrie du Jurassique Supérieur dans le modèle MARTHE. Les calculs reproduisent (i) la géométrie régionale des écoulements dans l'aquifère et (ii) les modifications de géométrie d'écoulement au sein du chemin d'écoulement préférentiel entre le trop-plein de la Vène, Issanka et la Vise. ....	73
Figure 38 : Exemples de trajectoires (noir) vers la source de la Vise dans la couche 8 (J. Sup.) du modèle MARTHE, le fond correspond aux perméabilités de la couche. Les calculs montrent deux groupes (à l'est sur et à l'ouest de la montagne de la Moure) qui contribuent à l'alimentation de la source. ....	75
Figure 39 : Distribution des débits de la Vise calculés au pas de temps mensuel (date en fin de mois) en fonction des horizons temporels (période de référence 1981-2005) et de la saisonnalité hydrologique (BE : Basses Eaux – d'avril à octobre ; HE : Hautes Eaux - de novembre à mars). ....	76
Figure 40 : Évolution des paramètres physico-chimiques et conditions hydrologiques de l'étang et de la source de la Vise au moment de l'inversac de 2020. ....	80
Figure 41 : Évolution du niveau piézométrique au sein de l'aquifère jurassique au forage F4-La Balme (orange), du niveau de l'étang de Thau (vert), de la pluviométrie (bleu) et du débit de la Vise (noir). ....	80
Figure 42 : Coupe hydrogéologique 2D verticale centrée sur l'émergence de la source de la Vise. Schématisation des écoulements (a) en conditions normales (b) en cours d'inversac. ....	82
Figure 43 : Évolutions des conductivités électriques (à gauche) et températures de l'eau (à droite) enregistrées après l'inversac de novembre 2020 dans les points du réseau de mesure proche de la source de la Vise. ....	83
Figure 44 : Schéma conceptuel de la presqu'île de Balaruc-les-Bains en situation d'inversac (extrait Ranchoux et al., 2022 L5b BRGM/RP-71957-FR). ....	84

Figure 45 : Inversac de 2020-2022 - évolution en fonction du temps des variations piézométriques observées et simulées au moyen de la solution 2 aux forages proches F4, F6 (en haut)) et éloignés S12 et CGE-Tennis (en bas).....	86
Figure 46 : Schéma (coupe hydrogéologique 2D verticale) du modèle numérique mis en œuvre.....	87
Figure 47 : Évolution des niveaux d'eau et débit simulés par le modèle numérique.....	88
Figure 48 : Schéma conceptuel interprétatif et coupes hydrogéologiques verticales au droit de la Vise. .	89
Figure 49 : Simulation des débits de la Vise en considérant les variations de niveau de la lagune, les variations du ratio $\frac{Q_e}{Q_0}$ et les variations piézométriques de l'ouvrage P4-Balm (BSS002JEKE). ....	91
Figure 50 : Présentation du prototype de l'outil permettant d'évaluer le risque de déclenchement de l'inversac à l'aide de l'indicateur I1 en tenant compte de l'effet des pompages. Dans l'exemple, le critère « actuel » représentait la situation de l'hydrosystème dans les heures qui précédaient le déclenchement de l'inversac de 2020.....	94
Figure 51 : Présentation du prototype de l'outil permettant d'évaluer la possibilité de fin de l'inversac. ...	95
Figure 52 : Plateforme DEM'Eaux : Vue générale de l'architecture matérielle.....	98
Figure 53 : Plateforme DEM'Eaux Thau : Vue du synoptique Cartographique constituant l'écran d'accueil de l'application.....	99
Figure 54 : Plateforme DEM'Eaux Thau : Affichage du panneau de détail et les liens vers les plateformes externes.....	101
Figure 55 : Plateforme DEM'Eaux Thau : Un exemple de rapport graphique (évolution du débit journalier de la Vise et de la conductivité électrique de l'eau au niveau du griffon (à -29 m de profondeur dans la lagune de Thau). ....	102
Figure 56 : Plateforme DEM'Eaux Thau : Exports depuis la page des graphiques.....	103
Figure 57 : Plateforme DEM'Eaux Thau : carte de l'altitude du toit des calcaires du Jurassique (mNGF).....	104
Figure 58 : Plateforme DEM'Eaux Thau : piézométrie basses eau en 2002.....	105
Figure 59 : Plateforme DEM'Eaux Thau : Indicateur Inversac.....	105

## Liste des annexes

Annexe 1 : Détail sur le réseau d'observation.....	123
Annexe 2 : Extrait de l'atlas cartographique du diagnostic karstologique des massifs carbonatés de l'Aumelas et de la Gardiole .....	125
Annexe 3 : Complément d'information sur la plateforme de forage .....	129

# 1. Introduction

Les ressources en eau souterraine des calcaires karstiques du Pli Ouest de Montpellier présentent un intérêt majeur pour le territoire, que ce soit pour l'alimentation en eau potable (ville de Sète, SIAEP Balaruc-Frontignan, SBL), mais également pour le développement économique, avec en particulier l'activité conchylicole au niveau de la lagune de Thau, ainsi que pour le thermalisme sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains (1<sup>re</sup> station thermale en France avec plus de 50 000 curistes en 2019), et l'irrigation. Ce secteur est situé à la convergence d'eaux souterraines provenant de divers réservoirs superficiels et profonds : eaux karstiques froides des Causses d'Aumelas et de la Gardiole, eaux d'origine marine (Étang et Mer) et eaux thermales chaudes et minéralisées. Ces différents réservoirs sont en interaction les uns avec les autres selon des processus complexes dont les déterminants ne sont pas tous connus.

Cet aquifère karstique est confronté à des phénomènes temporaires d'intrusion d'eau saumâtre (appelés « inversac ») par l'intermédiaire de la source sous-marine de la Vise, située dans la lagune de Thau. Depuis la fin des années 1960, sept phénomènes d'inversac ont été détectés; le dernier en date a débuté le 28 novembre 2020, de manière fortuite, dans le cadre de ce projet ce qui constitue une occasion unique d'étudier de façon détaillée le phénomène qui s'est terminé le 14 mars 2022 après 471 jours. Pendant ce phénomène qui peut durer plusieurs mois (plus de 6 mois en 2010, près de 6 mois en 2014 et près de 18 mois en 2020-2022), la source de la Vise, au lieu de fournir de l'eau douce utile à la vie biologique de la lagune de Thau, absorbe l'eau saumâtre de la lagune conduisant à une salinisation de l'aquifère. Ce phénomène a eu entre autre pour conséquence l'abandon (en 2014) de la source Cauvy à Balaruc-les-Bains pour son usage pour l'alimentation en eau potable.

Le projet de recherche DEM'Eaux Thau, débuté en juillet 2017 d'une durée de cinq ans, a pour objectif de mieux comprendre la structure et le fonctionnement de l'hydrosystème complexe du Bassin de Thau (Hérault) et de développer un outil de gestion des eaux souterraines à l'échelle régionale basé sur un modèle hydrogéologique 3D distribué. 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.

Ce projet rassemble le BRGM (coordinateur du projet - responsable des tâches hydrogéologie, modélisation hydrogéologique), Géosciences Montpellier (responsable de la tâche géologie/construction du modèle géologique), HydroSciences Montpellier (responsable de la tâche géochimie), l'entreprise Synapse Informatique (responsable de l'élaboration de l'outil de gestion) et le SMBT futur destinataire de l'outil de gestion des eaux souterraines de l'hydrosystème de Thau. 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 ainsi que par les partenaires opérationnels.

Le coût total du projet est de 5,1 M€. Les investissements nécessaires pour acquérir de nouvelles données (matériel pour l'acquisition de données géophysiques CSEM, réalisation de forages carottés et de piézomètres, matériel de monitoring hydro-géophysique à haute-résolution verticale et temporelle, équipement de la Vise, infrastructure informatique pour la plateforme de valorisation) ont été réalisés avec le concours financier de l'État et de la Région Occitanie (33 % du montant total du projet, dans le cadre du Contrat de Plan État-Région 2015-2020), de Montpellier Méditerranée Métropole (8 % du montant total du projet) et du BRGM (2 % du montant total du projet). Les dépenses de fonctionnement nécessaires à la réalisation du programme de travail ont été financées par le FEDER (11 % du montant total du projet), de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse (17 % du montant total du projet), de la commune de Balaruc-les-Bains (2 % du montant total du projet) et du Syndicat Mixte du Bassin de Thau (1 %). Le reste du financement du projet (soit 26 %) a été apporté grâce à la participation financière de la plupart des partenaires.

Le présent rapport constitue le rapport final des travaux du projet DEM'Eaux Thau. Il présente de manière synthétique les principaux résultats du projet sur les différentes approches qui font l'objet de rapports détaillés, cités à la fin de ce rapport en bibliographie, constituant les productions effectives du projet. Après une description des contextes géologique et hydrogéologique ainsi que du réseau d'observation mis en place (§ 2), les principales nouvelles informations sur la géométrie et la structure des réservoirs souterrains sont décrites pour aboutir à un modèle géologique tridimensionnel (§ 3). La description et les nouvelles informations apportées par les nouveaux équipements mis en place dans le cadre du projet (plateforme de forages, équipement de la Vise...) sont décrites et analysées au chapitre suivant (§ 4). Les nouvelles connaissances hydrogéologiques acquises grâce aux nouvelles chroniques de données, aux essais de traçage, de pompage et à l'hydrochimie sont résumées dans la section suivante (§ 5). Un modèle hydrogéologique conceptuel est proposé (§ 5). Les résultats des modélisations numériques mises en œuvre sont ensuite présentés : modélisation globale (§ 6.1) et modélisation déterministe (§ 6.2). L'occurrence d'un inversac au cours du projet a permis d'en expliquer le mécanisme (§ 7). Des propositions de surveillance et de possibles pistes de gestion de l'inversac sont ensuite proposées. La plateforme de concentration et visualisation des données est décrite au § 8. La production scientifique du projet DEM'Eaux Thau est décrite au § 9. On y présente la liste des livrables produits en cours de projet, dont les livrables contractuels (§ 9.1) sont consultables sur le site web du projet ([DEM'Eaux Thau](http://dem-eaux-thau.fr)). Des numéros de rapport BRGM ont été attribués à chaque production de manière à les bancariser de façon pérenne et pouvoir les retrouver et les télécharger en accès libre sur le site InfoTerre<sup>2</sup> du BRGM.

---

<sup>2</sup> <http://infoterre.brgm.fr/rechercher/switch.htm?scope=9>.

## 2. L'aquifère karstique de Thau

### 2.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

L'hydrosystème de Thau est situé au sud-ouest de Montpellier, dans la région Occitanie. Cette étude concerne la masse d'eau FRDG160 « Calcaires jurassiques du pli ouest de Montpellier et formations tertiaires, unité Thau Montbazin - Gigan Gardiole » et plus spécifiquement l'entité A.V.I.C (« Aumelas-Vène-Issanka-Cauvy » et « Gardiole Est ») dans le projet de SDAGE 2016-2021 (Vigouroux *et al.*, 2008). Géographiquement, la zone d'étude est délimitée par le Causse d'Aumelas au nord, le massif de la Gardiole au nord-est, la vallée de l'Hérault à l'ouest et l'étang de Thau et plus généralement la bordure littorale au sud (Figure 1).

Le contexte hydrogéologique et le schéma conceptuel de structure et de fonctionnement de la zone d'étude ont été présentés dans le rapport BRGM/RP-68483-FR sur la base de la synthèse des connaissances existantes. Retenons que le Jurassique Supérieur, fortement faillé et karstifié, constitue le siège des principaux aquifères karstiques de la zone d'étude. Il affleure largement dans l'arrière-pays, sur le Causse d'Aumelas et la montagne de la Moure, sur le massif de la Gardiole et sur les pointements que l'on retrouve au niveau de la presqu'île de Balaruc ainsi que sur le Mont Saint-Clair à Sète (Figure 2). Ces massifs constituent une zone de recharge des aquifères par les précipitations. Les failles principales correspondent au chevauchement de Montpellier (nord du secteur) et à la faille normale de Nîmes (sud du secteur). Les accidents majeurs d'orientation nord-nord-est/sud-sud-ouest sont accompagnés d'accidents secondaires globalement orthogonaux. Les accidents chevauchants profonds pourraient constituer des vecteurs préférentiels pour la remontée des eaux thermales vers la surface. Il est supposé que le pendage de ces accidents diminue avec la profondeur. La valorisation des données anciennes a permis de mettre en évidence la présence d'un chevauchement traversant possiblement l'étang de Thau (nommé Faille de Thau, Figure 2 et Figure 3). Cet accident correspondrait au prolongement du chevauchement traversé par le forage pétrolier de Valensac dans la vallée de l'Hérault.

L'écoulement général de l'aquifère au sein des calcaires jurassiques s'organise selon une direction nord-ouest/sud-est (Figure 1 et Figure 2). Un axe de drainage, démontré par essais de traçages, apparaît entre la source de trop-plein de la Vène et la source d'Issanka ; l'étude détaillée des relations hydrauliques pour différentes conditions hydrogéologiques est présentée dans le livrable L8, BRGM/RP-71758-FR. Il est noté que les directions d'écoulement générales mises en évidence sur les différentes cartes piézométriques ne varient pas en fonction des conditions hydrologiques (BRGM/RP-68483-FR). L'existence des pertes du Coulazou dont le bassin versant s'étend au-delà de la limite de la masse d'eau implique la prise en compte du bassin versant amont du Coulazou dans la délimitation de l'impluvium karstique de « Aumelas-Vène-Issanka-Cauvy » estimé à 200 km<sup>2</sup>. Ces pertes ont lieu au sein des calcaires jurassiques entre la limite nord de l'entité (chevauchement de Montpellier) et l'entrée du cours d'eau sur la molasse miocène. L'émergence temporaire de la Vène et des Oulettes (trop-pleins) et plus au sud, les sources d'Issanka et, plus en aval encore, la source sous-marine de la Vise constituent les principaux exutoires de cette entité karstique « Aumelas-Vène-Issanka-Cauvy ». La partie occidentale du massif de la Gardiole entre Gigan et Frontignan est drainée principalement vers la source Cauvy et la source d'Ambressac à Balaruc-Les-Bains et également par la source sous-marine de la Vise.

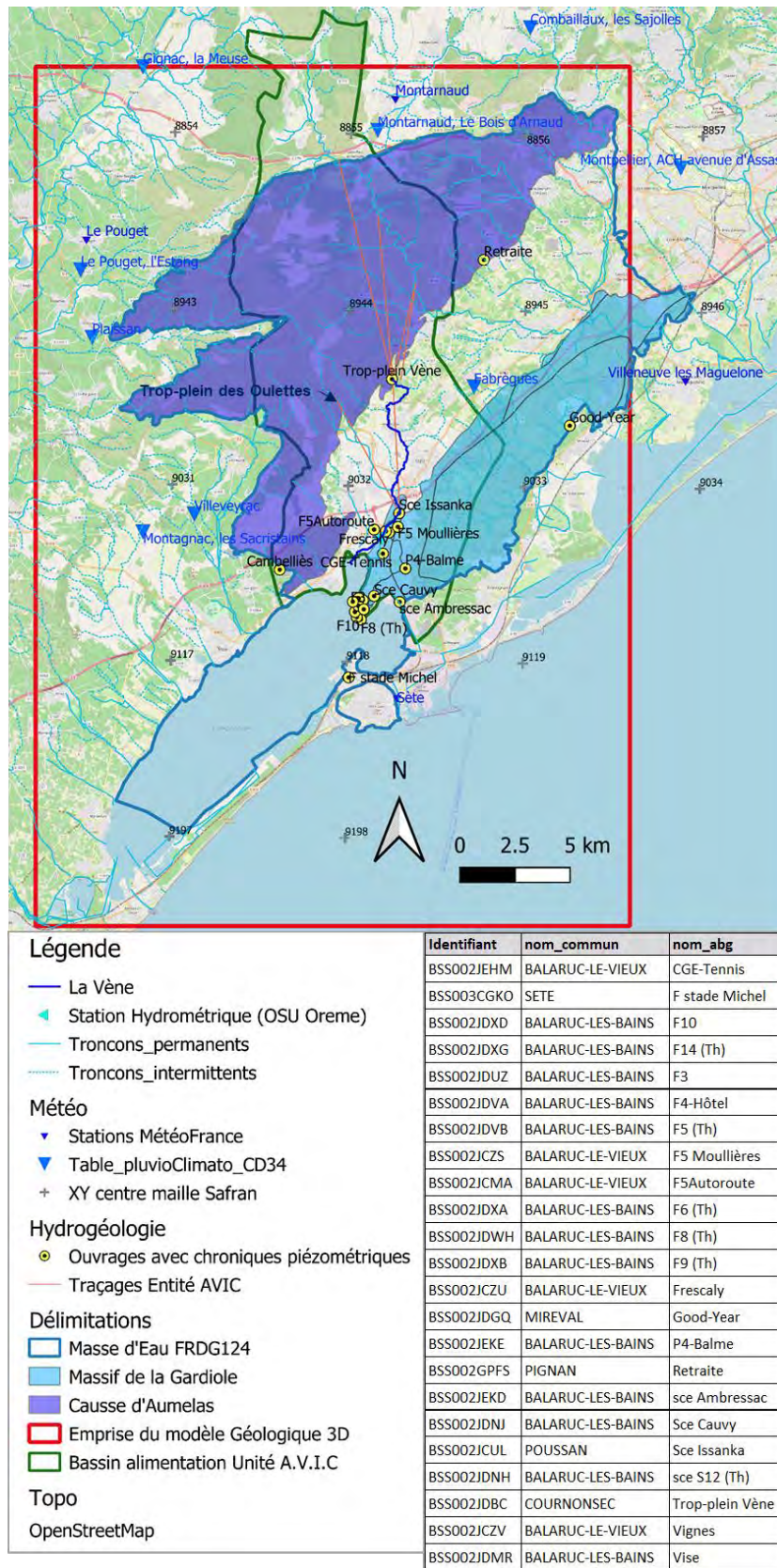


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude.



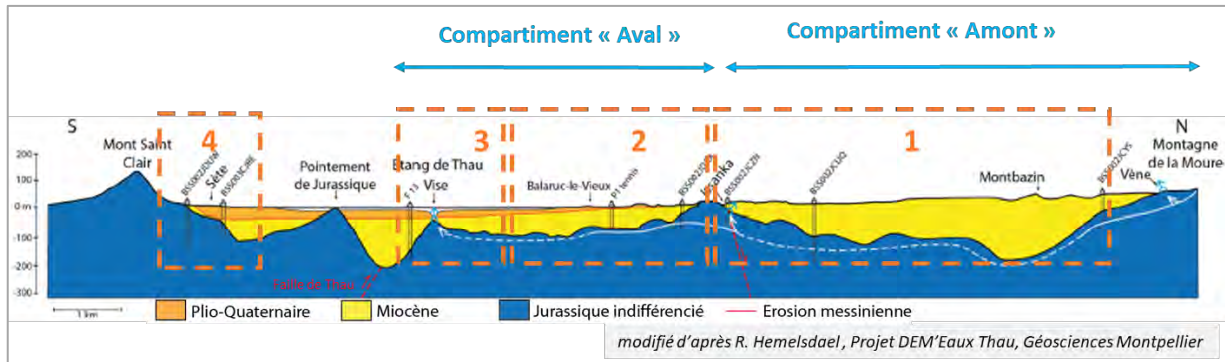


Figure 2 : Caractérisation des différentes zones des compartiments amont et aval au sein de l'entité A.V.I.C (Aumelas-Vène-Issanka-Cauvy).

La presqu'île de Balaruc constitue le lieu de convergence des eaux souterraines provenant de divers réservoirs superficiels et profonds : eaux karstiques froides des Causses d'Aumelas et de la Gardiole, eaux d'origine marine (étang et mer) et eaux thermales chaudes et minéralisées. En contexte de fonctionnement dit « normal » (hors inversac), la source de la Vise est l'exutoire le plus aval du système hydrogéologique. Elle constitue naturellement le lieu de convergence des eaux karstiques froides en provenance des Causses d'Aumelas et de la Gardiole et également d'une part d'eaux thermales minéralisées d'origine profonde.

L'actualisation du contexte géologique réalisée dans le cadre de DEM'Eaux Thau ([BRGM/RP-68483-FR](#) et [BRGM/RP-70789-FR](#)) laisse suggérer que les eaux thermales d'origine profonde transitent par la faille de Thau et non au droit de la Vise comme conceptualisé antérieurement.

Les eaux thermales qui sont retrouvées en sub-surface au toit du Jurassique Supérieur occupent au sein de l'aquifère récepteur fortement karstifié une extension spatiale vraisemblablement réduite (compte tenu des informations des forages disponibles sur la presqu'île de Balaruc). Selon Tessier (1988), la géométrie de la « bulle thermique et minérale » est conditionnée par le toit imperméable (formation peu perméable du Miocène) et la présence sous-jacente et latérale d'eaux froides, douces et salées. Historiquement l'exutoire des eaux thermales de Balaruc se situait à proximité du point S12 (cf. description [BRGM/RP-68483-FR](#)). Les contrastes de densité des différents types d'eau souterraine de Balaruc donnent lieu à l'existence de plusieurs interfaces hydrauliques se déplaçant suivant l'importance respective des différentes charges hydrauliques mises en jeu (pompages, niveau de l'étang, recharge par les précipitations). Cette configuration hydrogéologique singulière a été confirmée et illustrée à l'aide des investigations réalisées en 2007 sur le forage carotté F13 réalisé par les thermes de Balaruc. Ces différents réservoirs sont en interaction les uns avec les autres selon des processus complexes qui sont étudiés dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau.

Ces interactions sont à l'origine de conflits d'usage, de problèmes de quantité d'eau et de dégradation de la qualité des eaux souterraines notamment par des phénomènes d'intrusion d'eau saumâtre par l'intermédiaire de la source sous-marine de la Vise. Lors de ces phénomènes temporaires dits « d'inversac », qui peuvent durer plusieurs mois (plus de 6 mois en 2010, près de 6 mois en 2014, plus de 15 mois en 2020/2022), la source de la Vise, au lieu de fournir de l'eau douce utile à la vie biologique de l'étang de Thau, absorbe l'eau saumâtre de la lagune. Ce phénomène a pour conséquence de provoquer une modification des paramètres physico-chimiques des eaux de l'hydrosystème, observée au niveau de différents ouvrages sur la presqu'île de Balaruc ([BRGM/RP-64812-FR](#)), notamment sur la source Cauvy qui a dû être abandonnée en 2014 pour son usage d'alimentation en eau potable.

L'amélioration de la compréhension du phénomène d'inversac et des facteurs et mécanismes déclencheurs constitue un enjeu majeur pour une meilleure gestion de la ressource de cette entité hydrogéologique et constitue l'un des verrous scientifiques du projet DEM'Eaux Thau. Le septième phénomène d'inversac depuis les années 1960, qui a débuté le 28 novembre 2020, est spécifiquement étudié dans le cadre de ce projet. L'étude du phénomène s'appuie sur l'important renforcement du réseau de mesures existant qui intègre notamment les données acquises sur le forage de Sète ([BRGM/RP-68549-FR](#)) et les plateformes expérimentales des forages (DEMT1, DEMT2) et de la Vise (cf. présentation des plateformes dans le rapport [BRGM/RP-70842-FR](#) qui constitue le livrable L10 du projet).

## 2.2. RÉSEAU D'OBSERVATION

L'acquisition de données de débit, de conductivité et température de la source sous-marine de la Vise constitue un élément-clé du projet de recherche DEM'Eaux Thau pour la compréhension du fonctionnement hydrogéologique en condition « normale » ou en période « d'inversac ». La plateforme d'observation des ouvrages DEMT1, DEMT2 et (DEMT3)/DEMT4 réalisés à quelques centaines de mètres de la source à proximité immédiate de l'ouvrage existant F6 constitue également un complément expérimental d'exception pour suivre les évolutions physico-chimiques des eaux souterraines à différentes profondeurs. Le détail de ces équipements ainsi que des premières acquisitions de données et leur première interprétation sont présentés dans les rapports [BRGM/RP-69163-FR](#) et [BRGM/RP-70842-FR](#).

Le réseau d'observation des eaux souterraines de la zone d'étude s'appuie également sur 31 ouvrages (cf. liste en 1) dont la localisation est reportée sur les cartes (Figure 1 et Figure 3). Des conventions ont été signées entre le SMBT et les différents producteurs de données afin de pouvoir les bancariser et les valoriser dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau. Ce réseau d'observation existant a été renforcé en début de projet par le SMBT (7 ouvrages) et le BRGM (2 ouvrages) dans le but de suivre, suivant l'axe d'écoulement nord-sud des eaux souterraines, les deux compartiments hydrogéologiques distingués (Figure 2) :

- le **compartiment « Amont »** a pour exutoire principal les sources du champ captant d'Issanka et le trop-plein de la Vène qui déborde en période de crue. Ce compartiment est alimenté par les recharges issues du massif d'Aumelas et la montagne de la Moure. Le fonctionnement hydrogéologique du compartiment amont peut-être décrit à l'aide de sept ouvrages de mesures (cf. liste des ouvrages en Figure 1) ;
- le **compartiment « Aval »**, situé à l'aval du champ captant, est alimenté par les recharges issues de la partie occidentale du massif de la Gardiole et par la terminaison sud de la montagne de la Moure. Ce compartiment bénéficie également de l'alimentation des flux profonds issue du compartiment amont qui n'ont pas été drainés par la source d'Issanka (Figure 2). Au sein, du compartiment aval, deux zones ont été distinguées (zones 2 et 3) d'après les informations issues de l'étude des inversacs de 2010 et 2014 ([BRGM/RP-64812-FR](#)). La zone 3, qui correspond à la partie sud de la presqu'île de Balaruc (cf. Figure 2 et Figure 3), est influencée hydrauliquement et chimiquement par les phénomènes d'inversac. Les variations piézométriques sont principalement contrôlées par le potentiel hydraulique de la Lagune de Thau (cf. [BRGM/RP-70842-FR](#)). La zone 2 apparaît seulement influencée hydrauliquement par les phénomènes d'inversac. La liste des ouvrages associés à chacune de ces zones du compartiment aval est reportée dans le tableau en 1 ;
- au niveau de Sète, une quatrième zone a été définie. Les suivis réalisés sur le forage stade Michel ([BSS003CGKO](#)) notamment lors des tests de pompage de 2019 (cf. L1-BRGM/RP-68483-FR, Ladouche *et al.* 2019) ne permettent pas de le rattacher au compartiment aval de l'entité A.V.I.C.

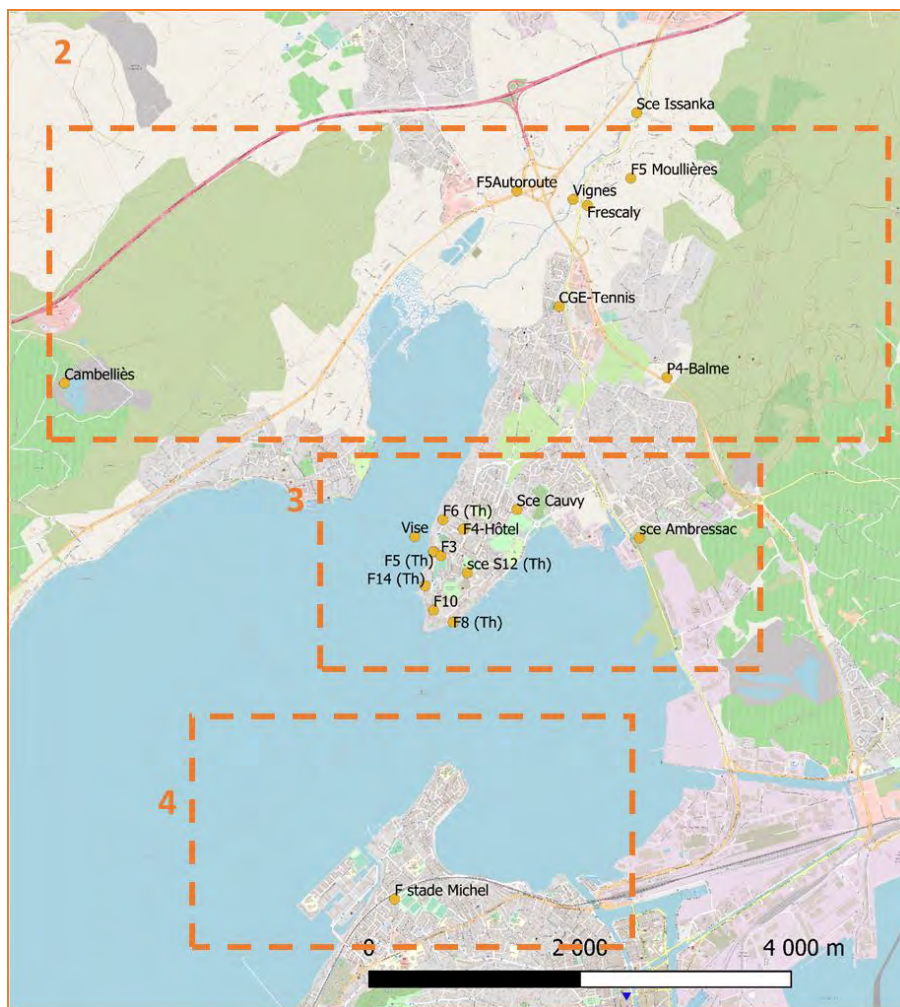


Figure 3 : Carte de localisation des ouvrages instrumentés (Focus sur la presqu'île de Balaruc, Légende : les rectangles définissent approximativement les zones hydrogéologiques).

### 2.3. PHÉNOMÈNE D'INVERSAC 2020-2022

Un bilan des informations disponibles sur les phénomènes d'inversac survenu avant 2019 a été réalisé dans la première phase du projet (L1, BRGM/RP-68483-FR, Ladouche *et al.*, 2019). Ce bilan présente les six inversacs qui ont pu être détectés à la source de la Vise depuis les années 1960. Ces détections n'excluent pas que des phénomènes se soient produits avant ou entre les épisodes documentés.

La chronologie des six événements antérieurs à celui de 2020 est la suivante :

- 1) Inversac du 22 octobre 1967 (augmentation des niveaux d'eau sur la presqu'île en janvier 1968) avec une fin probable en mars 1969 (des doutes subsistent sur la date de fin de phénomène) ;
- 2) Inversac du 18 mai 1984 (augmentation de la minéralisation de la source de Cauvy) avec une fin non documentée ;
- 3) Inversac du 06-07 octobre 1993 (détecté par l'observation d'une intervention humaine sur la cloche placée sur la Vise et par une baisse conjointe de la minéralisation et de la température de l'eau pompée au forage F5 de Balaruc) avec une fin le 31 octobre 1993 (durée : 25 jours) ;

- 4) Inversac du 2 janvier 2008 avec une fin le 23 mars 2008 (durée : 81 jours) ;
- 5) Inversac du 10 juin 2010 avec une fin le 25 décembre 2010 (durée : 198 jours) ;
- 6) Inversac du 5 mai 2014 avec une fin le 22 octobre 2014 (durée : 170 jours).

L'inversac de 2020 a débuté le 28 novembre 2020 à 9h45 et s'est terminé le 14 mars 2022 à 8h35 (durée = 471 jours). L'inversac de 2020 est survenu dans un contexte hydrogéologique de très basses eaux (occurrence décennal sec) et dans un contexte de haut niveau de la lagune de Thau sur lequel un phénomène de surcote temporaire est survenu. Au cours du phénomène, le volume d'eau saumâtre absorbé par le karst par l'intermédiaire de la Vise a été évalué à 6,7 millions de m<sup>3</sup> ( $\pm$  0,3 millions de m<sup>3</sup>). La masse de sel apportée à l'aquifère est estimée à 216 000 tonnes ( $\pm$  11 000 tonnes). Les flux moyens sont respectivement de 14 400 m<sup>3</sup>/j et 460 tonnes/j. Sur la même période, le flux écoulé/exporté à l'exutoire secondaire Cauvy est estimé à 0,6 millions de m<sup>3</sup> (9 %), 1 700 tonnes de chlorure ont été exporté (0,9 %). Le bilan est largement non équilibré ce qui indique qu'un important stockage s'est produit dans le réservoir. Ceci s'illustre également pour le compartiment aval par une augmentation très significative de la piézométrie et également par une importante modification des paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine dans la pointe de la presqu'île de Balaruc comme en témoignent les résultats des suivis physico-chimiques aux ouvrages DEMENT1, F6, F4, S12 et à la source Cauvy.

Le phénomène d'inversac a interféré avec les opérations de pompage qui ont été réalisées sur les ouvrages forés dans le cadre de cette étude (DEMT3 et DEMENT4), ce qui a complexifié l'interprétation des données géochimiques collectées sur ces ouvrages.

### 3. Nouvelles connaissances sur la géométrie de l'aquifère

#### 3.1. APPROCHE GÉOMORPHOLOGIQUE

La cartographie des paléosurfaces sur les massifs carbonatés d'Aumelas et de la Gardiole ainsi que dans les bassins sédimentaires périphériques d'âge Crétacé supérieur au Quaternaire, et l'étude des réseaux (paléo-)karstiques, permettent d'aborder l'évolution des systèmes de recharge et des circulations au cours de l'évolution géologique. En cela, l'approche géomorphologique complète et enrichit l'étude géologique dont un des objectifs consiste en la détermination de l'évolution long-terme de la région. La zone étudiée présente trois panneaux distincts en fonction de leur uplift ou subsidence, séparés par des structures NS. Le panneau ouest comprend le bassin Crétacé supérieur de Villeveyrac et la Moure / Causse d'Aumelas ; au centre, entre les failles de Cambelliès et faille de la Mosson, on reconnaît le bassin de Gigean / Massif de la Gardiole et le segment central du « pli de Montpellier » ; le panneau Est comprend la Madeleine, le cône alluvial Pliocène et le chevauchement de Montpellier. Les éléments du diagnostic karstologique des massifs carbonatés d'Aumelas et de la Gardiole sont rassemblés dans un atlas cartographique (Livable L2, CENOTE, Camus H. 2021), un exemple de production est présenté en Annexe 2.

L'évolution du réservoir est envisagée depuis la formation de la « surface des bauxites » (Crétacé « moyen »). Les bauxites ont scellé le réservoir des calcaires du Jurassique supérieur karstifié, s'étendant sur toute la zone considérée préalablement à son plissement en larges synclinaux et anticlinaux. Une érosion des culminations s'est produite pendant la compression pyrénéenne (Maastrichtien-Éocène) et le chevauchement de Montpellier.

Ainsi, au cours du Paléocène, un imposant réseau karstique est creusé dans les calcaires du Jurassique supérieur qui ont été découverts de la couverture bauxitique. Il est caractérisé par le dépôt i) de brèches de fan delta au débouché des résurgences et ii) de laminites carbonatées déposées dans le réseau karstique. Pendant le rifting Oligo-Aquitainien du Golfe du Lion, se développe un karst à butte sur la partie ouest du chevauchement de Montpellier alors que le rifting n'affecte que le panneau est et l'extrême sud (actuellement en mer) de la zone d'étude. Au Burdigalien, la transgression associée à la subsidence post-rift, recouvre en on-lap les massifs carbonatés méridionaux et les marnes scellent les karsts antérieurs. On reconnaît les lignes de paléo-rivage et des surfaces d'abrasion marine (Gardiole).

L'érosion messinienne, d'amplitude pluri hectométrique, éventre les karsts précédents dans tout le panneau Est alors qu'elle n'affecte que la partie la plus méridionale des panneaux centre et ouest. La baisse du niveau de base réactive les réseaux karstiques profonds du Paléocène et en crée de nouveaux, notamment dans le panneau central. La remise en eau Pliocène permet de sceller les karsts profonds et, du fait du haut niveau marin (+80 mNGF) permet d'agrandir des cônes alluviaux sur les bordures des massifs carbonatés. Les résurgences karstiques sont ainsi repoussées vers l'amont.

Pendant le Pléistocène on observe la formation de plusieurs générations de paléosurfaces emboîtées, à partir de la surface d'abandon pliocène, notamment sur le pourtour du bassin de Gigean. Les résurgences migrent vers l'aval au cours de l'incision, comme le montrent des paléo-résurgences post-Pliocène reconnues sur la partie sud de la Gardiole, à 50 mNGF (La Balme).



### 3.2. APPROCHE GÉOPHYSIQUE

- **CSEM.** La méthode « Controlled-Source Electro-Magnetic » a pour but d'imager la distribution de résistivité électrique dans le sol jusqu'à une profondeur d'un à deux kilomètres. Ce paramètre est directement relié à la présence de fluides qui abaissent la résistivité électrique en fonction de leur salinité et de la présence d'argiles. Dans la zone nord-est de l'étang de Thau, la méthode CSEM a permis d'obtenir des cartes de résistivité apparente à différentes fréquences en accord avec les données gravimétriques. Cependant, les essais d'inversion 3D des données CSEM n'ont pu aboutir en raison de la complexité à prendre en compte la bathymétrie et la morphologie précise de l'Étang de Thau (BRGM RP-70632-FR, Vedrines, 2021).
- **Gravimétrie.** Une campagne d'acquisition de 398 nouvelles stations gravimétriques et l'intégration des données anciennes (acquises en 1950 et 1965) ont permis de calculer une carte de l'anomalie de Bouger sur la zone d'étude (BRGM/RP-68381-FR, Coppo *et al* 2018). Une telle carte intègre les effets gravimétriques de l'ensemble de la colonne, depuis les structures les plus superficielles, jusqu'au manteau (Figure 4 à gauche). Afin de distinguer les effets liés aux structures pertinentes pour l'étude, de faible longueur d'onde et localisées dans la croûte supérieure, on soustrait les effets liés aux structures profondes, de grande longueur d'onde. On obtient ainsi une carte gravimétrique résiduelle (Figure 4 à droite). Celle-ci présente des anomalies positives importantes (comme autour du Mont Saint-Clair) ou négative (comme sous l'Étang de Thau et sous le bassin sédimentaire de Gigean), caractérisant la présence de corps de forte et faible densité, respectivement, dans la croûte supérieure. D'autre part, la carte d'anomalies résiduelles présente des zones de gradient élevé, qui peuvent être interprétées comme des failles. Les bandes de gradient élevé sont principalement orientées nord-est/sud-ouest ; on note également une orientation est-ouest qui limite le Mont Saint-Clair au nord.

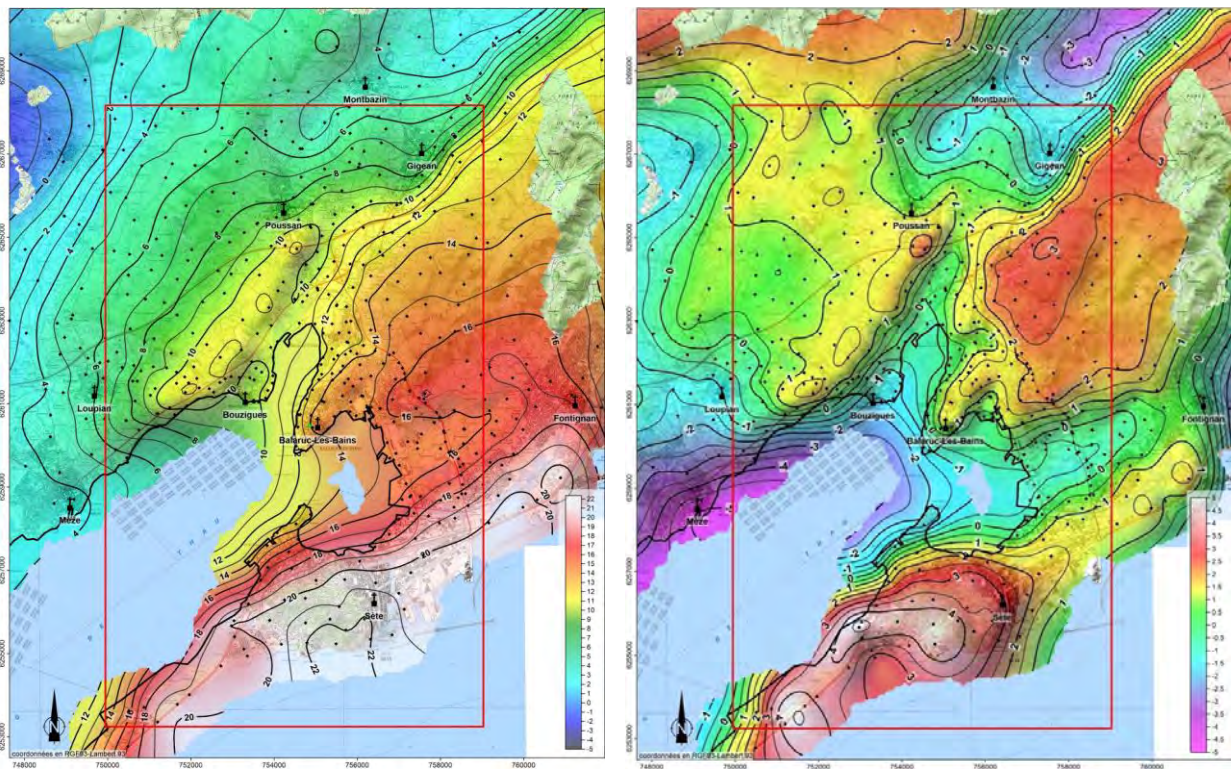


Figure 4 : Cartes gravimétriques. Anomalie de Bouger (à gauche) et anomalie résiduelle (à droite). Les points noirs représentent les stations d'acquisition (Coppo et al. 2018).



- **Sismique réflexion.** Les données de sismique réflexion multitrace 2D utilisées ont plusieurs origines, dont certains profils anciens ont été retraités (BRGM/RP-68318-FR et BRGM/RP-68603-FR, Capar et Marc, 2018a,b) et deux nouveaux profils (DEM1 et DEM2) acquis et traités dans le cadre du projet (BRGM/RP-68381-FR, Coppo *et al.* 2018). L'intégration et l'interprétation de ces données a permis de réaliser des profils transverses terre-mer nord-ouest/sud-est (Figure 5, BRGM/RP-70789-FR, Hemelsdaël *et al.* 2021). Les structures reconnues en sismique réflexion sont utilisées pour la construction du modèle géologique 3D (voir chapitre 3.5).

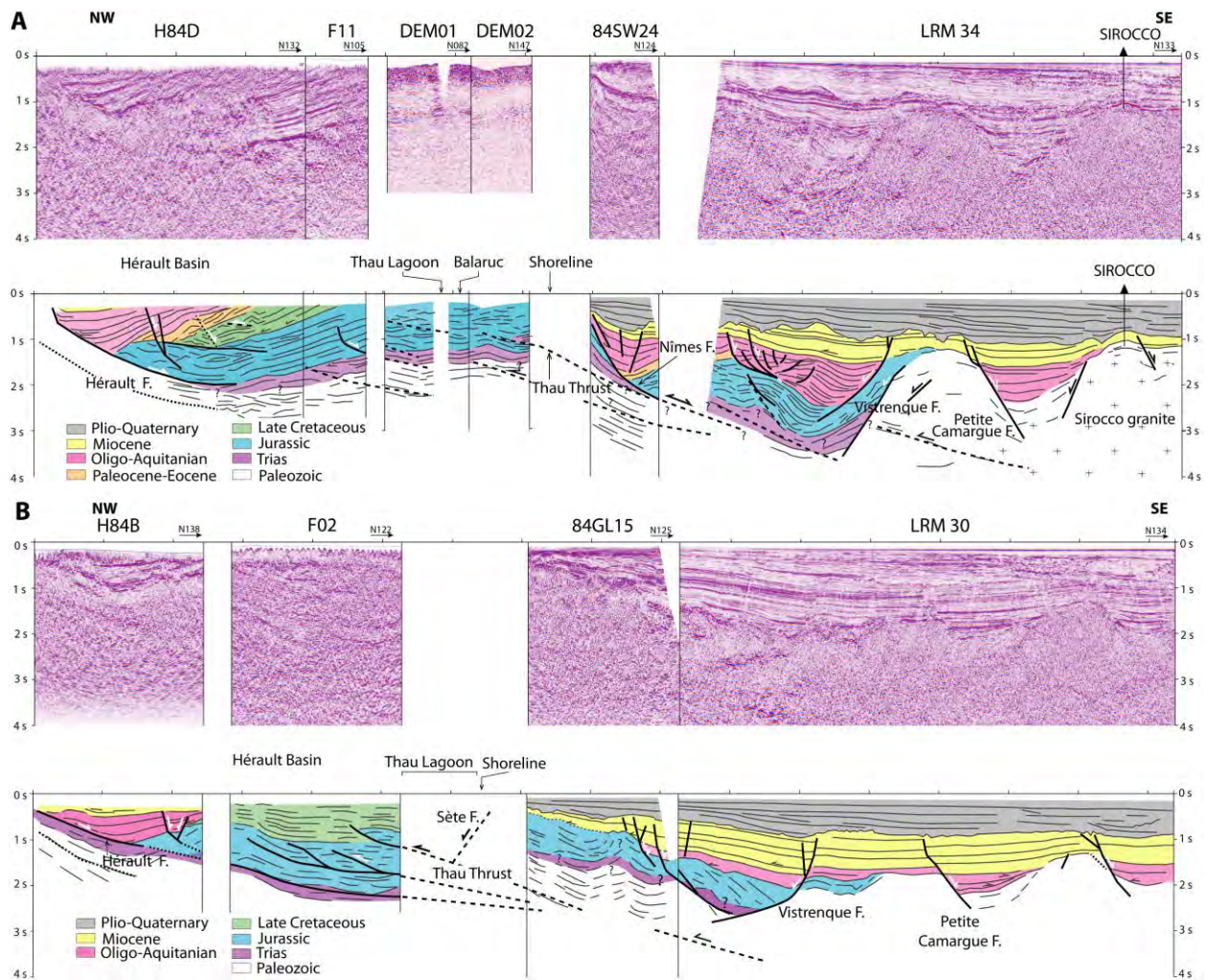


Figure 5 : Transects de sismique réflexion présentant les corrélations Terre-Mer, construits à partir de données anciennes retraitées (H84D & B, F11 & 02, 84SW24, LRM34 & 30 et 84GL15) ainsi que les profils nouvellement acquis (DEM01 & 02) (BRGM/RP-70789-FR, Hemelsdaël *et al.* 2021).

- **Sismique passive.** L'imagerie sismique par bruit de fond sismique (ou méthode H/V) a permis de cartographier l'interface entre les calcaires du Jurassique supérieur et les marnes et sédiments détritiques du Miocène et du Pliocène qui le recouvrent. L'interpolation des 400 points de mesures acquis sur la zone d'étude fournit une carte de profondeur de l'interface à fort contraste d'impédance (Bourgeois, 2019) (Figure 6). La géométrie de cette interface est utilisée pour la construction du modèle géologique 3D (voir chapitre 3.5).



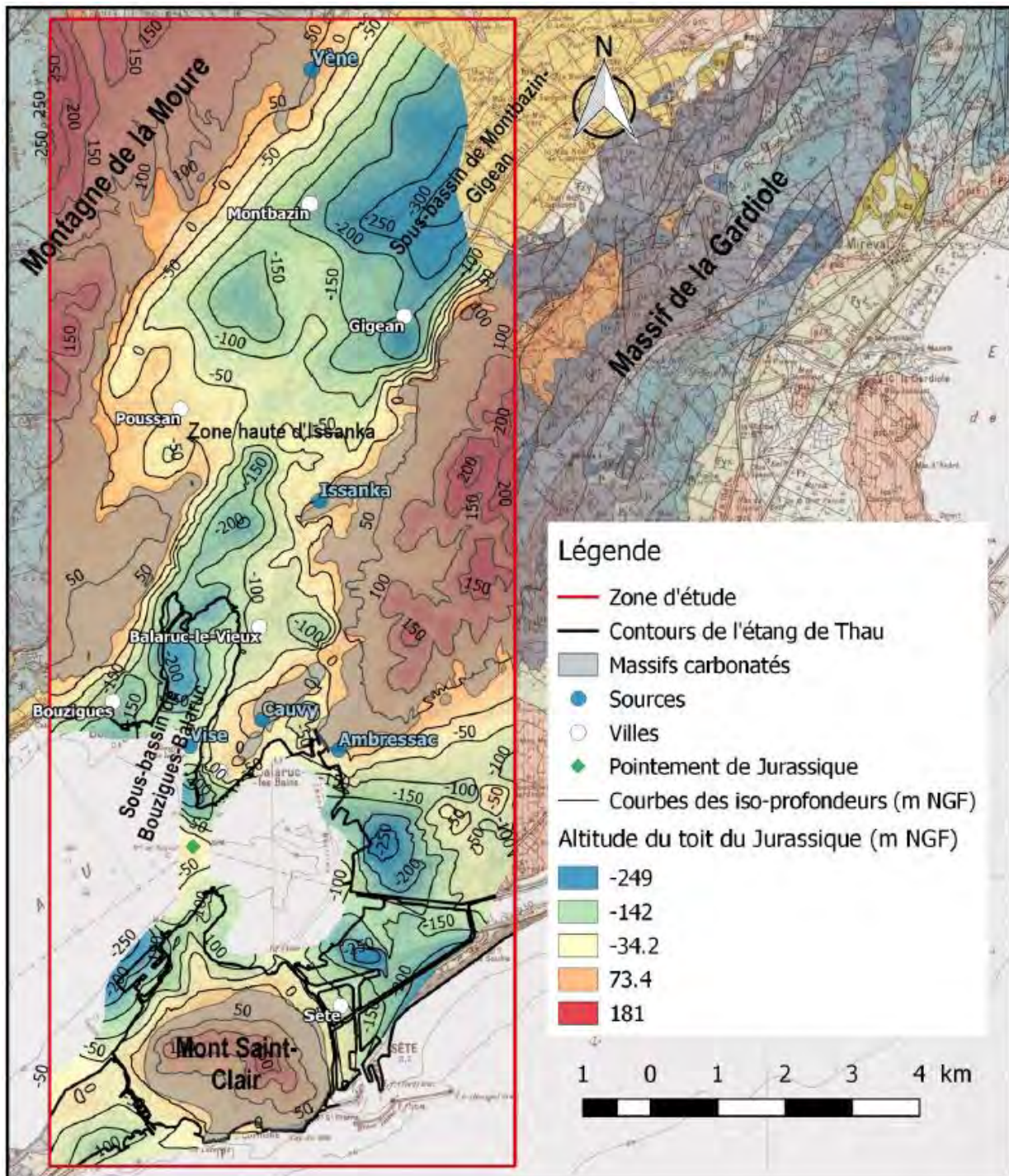


Figure 6 : Carte de l'altitude (m NGF) du toit des calcaires du Jurassique réalisée à partir de l'interprétation des données de sismique passive sous la couverture du Néogène et de la carte géologique pour les reliefs (Bourgeois, 2019).



### 3.3. APPROCHE PÉTROPHYSIQUE

La structure et la dynamique temporelle des aquifères du site de forage de Balaruc-les-Bains ont été étudiées à l'aide d'un ensemble de mesures pétrophysiques réalisées (i) sur carottes extraites des forages du site de Balaruc-les-Bains (Figure 7), et (ii) le long de profils géophysiques et images enregistrés en forage (Figure 8, Figure 9, Figure 10 et Figure 11). En tout, plus de 100 profils géophysiques et images de parois ont été enregistrés dans les différents forages du site, produisant plus de 15 km linéaires de données. Soixante échantillons ont été prélevés à ce stade sur carottes pour effectuer des analyses détaillées en laboratoire (Figure 7).

#### 3.3.1. Pétrophysique sur carottes

Cette approche a permis de mesurer la porosité des roches traversées et d'évaluer le degré de dolomitisation des calcaires rencontrés jusqu'à 350 m de profondeur (Figure 7). Les porosités des marnes, mudstones et calcaires oolithiques sont inférieures à 5 %. Dans les zones dolomitisées et bréchifiées, les porosités sont plus fortes du fait de la dolomitisation, atteignant 8 % entre 200 et 250 m, et 12 % entre 300 et 350 m. Ces mesures soulignent l'impact de l'eau de mer qui s'infiltre jusqu'à au moins 340 m lors des inversacs successifs. La limite inférieure de cet aquifère très fortement dolomitisé n'est pas déterminée précisément par ces données, principalement par manque d'échantillons réalisés sur les carottes entre 350 et 450 m. Cette limite sera précisée dans le futur lors de la réalisation d'un jeu de mesures complémentaires sur de nouveaux échantillons. Selon le profil de radioactivité naturelle (Figure 8), elle pourrait se situer au toit des mudstones et des marnes présentes en dessous de 350 m. Ces mesures de porosité ont servi de points de référence pour les calculs de porosité à partir des mesures acoustiques en forage, ainsi que pour le profil de résonance magnétique protonique (RMP) enregistré en forage fin juin 2022. Ce dernier produira directement un profil de porosité qui pourra être interprété en termes de perméabilité des roches traversées à échelle décimétrique à métrique.

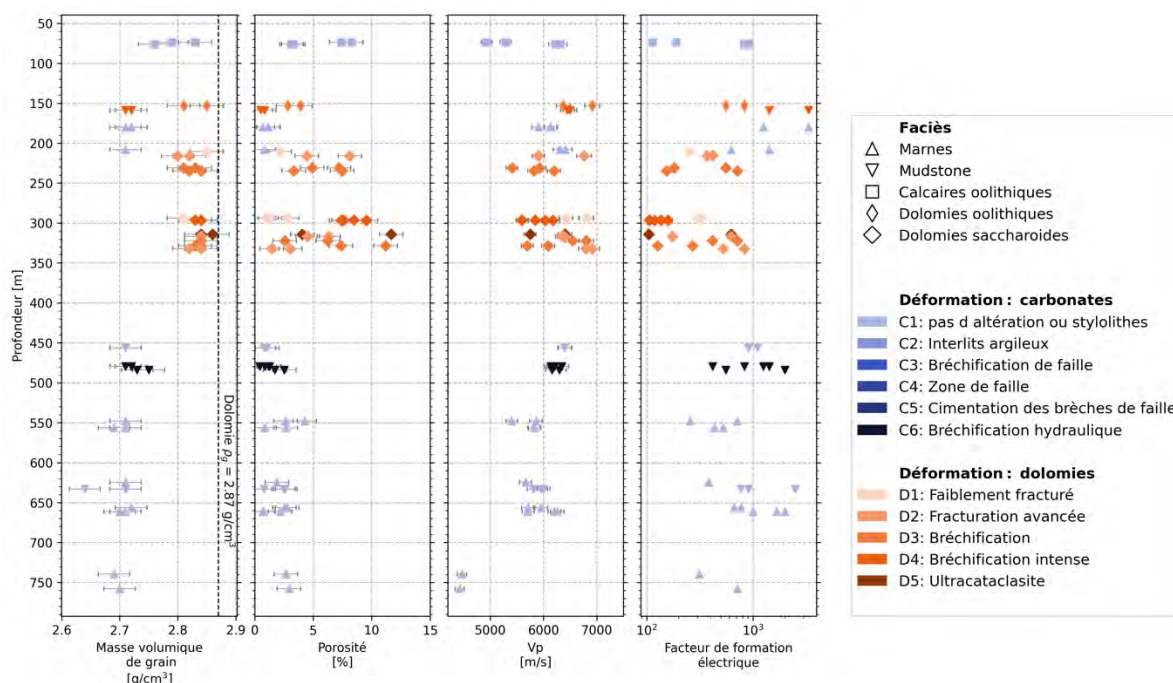


Figure 7 : Mesures pétrophysiques sur carottes pour 60 échantillons choisis en fonction de la lithologie et de la déformation (Temani, 2022). De gauche à droite : masse volumique de grain, porosité, vitesse des ondes P (Vp) et facteur de formation électrique. Les masses volumiques de grain atteignent 2,87 gg/cc dans les dolomies situées entre 150 et 350 m.

### 3.3.2. Géophysique en forage

Un jeu complet de mesures géophysiques (Figure 9, Figure 10 et Figure 11) et images de paroi (Figure 8) a été enregistré en forage. Ces mesures et images détaillent tout d'abord la structure et la lithologie des roches traversées. Les images donnent une représentation millimétrique et orientée des structures traversées tels que karsts et fractures ouvertes ou minéralisées (Figure 8A). Ces images ont globalement permis de mettre en évidence une orientation d'extension nord-nord-est/sud-sud-ouest (Figure 8B ; Widhen *et al.*, soumis). Les failles normales dans le calcaire montrent également une direction d'extension nord-nord-est/sud-sud-ouest. Les pôles des veines identifiées par imagerie ( $n = 500$ ) indiquent principalement des fractures d'extension verticales à sub-verticales. Les fractures de pendage  $\geq 60^\circ$  ( $n = 320$ ) suggèrent trois phases de déformation distinctes et superposées, correspondant à trois événements d'extension nord-nord-est/sud-sud-ouest, de compression nord-nord-est/sud-sud-ouest et d'extension nord-ouest/sud-est (Figure 8B).

Les profils pétrophysiques *in-situ* (Figure 9) soulignent la structure des différents aquifères traversés sur le site, leur degré d'argilosité et de déformation, et détaillent les propriétés géophysiques du sous-sol telles que la vitesse acoustique des ondes P ou la résistivité électrique. Ces profils ont permis d'estimer la porosité (Wyllie *et al.*, 1956) et de calculer la conductivité du fluide poral au sein de ces aquifères (Archie, 1942 ; Waxman et Smits, 1968). Ces mesures de résistivité réalisées en 2021, pendant l'inversac, soulignent la présence d'eau de mer entre 98 et 110 m, et surtout entre 285 et 295 m. Entre 100 et 300 m de profondeur, on observe des mélanges d'eau douce et d'eau thermique. En-dessous de 300 m, on trouve principalement de l'eau douce, avec de rares présence d'eau plus minéralisée à 339, 377, 392 et 509 m.

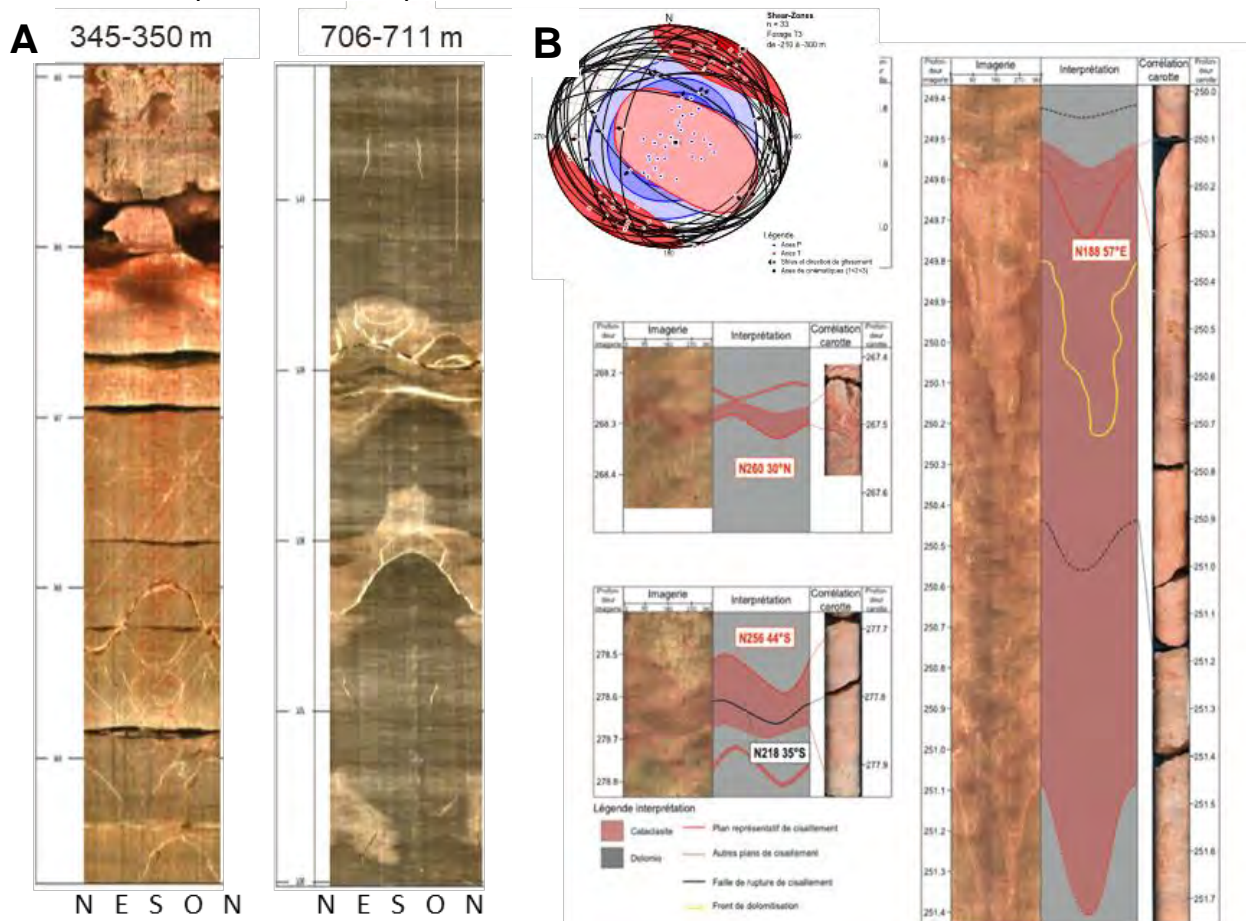
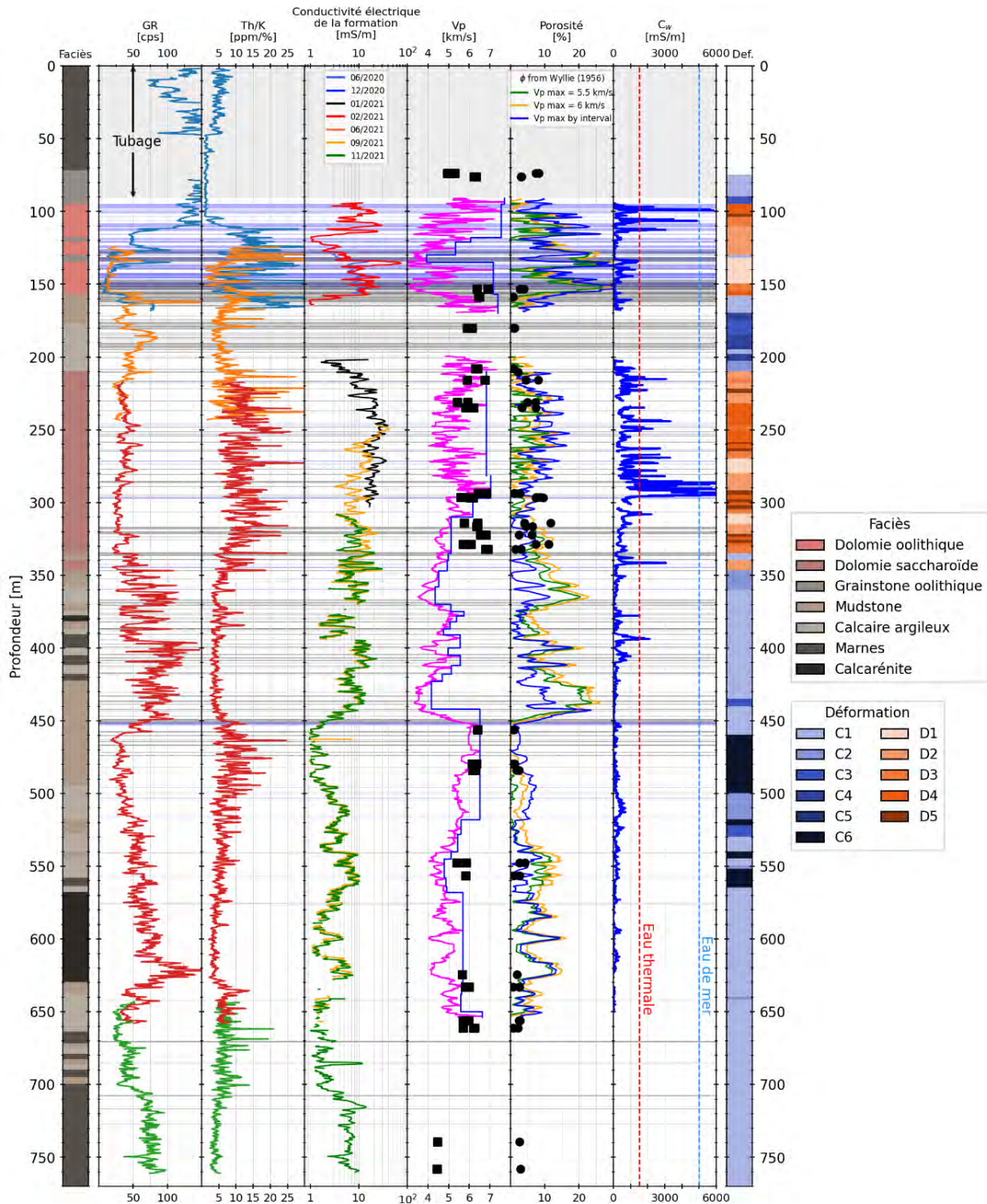


Figure 8 : (A) Images optiques de paroi dans le forage DENT4. Les images de résolution millimétrique sont orientées par rapport au nord et mettent en évidence la présence d'horizons karstiques (346 m, à gauche) ou de fractures colmatées avec de la calcite (709 m, à droite). (B) Cartographie de l'ensemble des structures à partir des images optiques (Widhen, 2021).





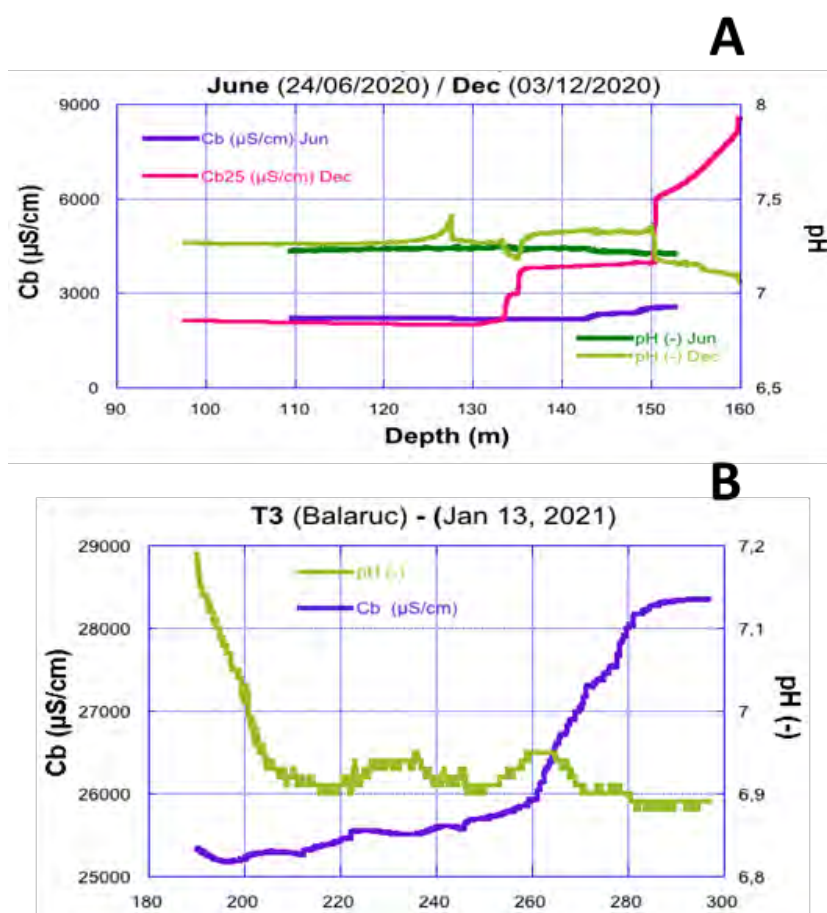


Figure 10 : Mesures des propriétés physico-chimiques des fluides en forage montrant l'impact de l'inversac de 2020 sur les circulations en sub-surface (A et B) et la connectivité hydraulique verticale des structures (C). **(A)** Mesures de pH (en vert) et de conductivité électrique du fluide en forage (en rose) dans le forage DGMT1, en face de la section crépinée du tube PVC (de 100 à 160 m). Comparaisons de profils enregistrés en juin 2020 avec ceux mesurés six jours après l'inversac du 28 novembre 2020. La conductivité électrique passe de 2 800 µS/cm en juin 2020 et dans la partie supérieure du forage, à 3 600 µS/cm en dessous de 136 m et plus de 7 000 µS/cm en dessous de 150 m. Ceci indique des venues d'eau de mer liées à l'inversac qui s'infiltrent depuis la surface se mélangent aux eaux thermales venues de grande profondeur puisque la conductivité électrique de l'eau de mer est de 55 000 µS/cm à 25 °C. **(B)** Un mois et demi après l'inversac, des valeurs de plus de 28 000 µS/cm sont mesurées dans le forage DGMT3 à près de 300 m de profondeur, soulignant que l'impact hydrodynamique de l'inversac se fait sentir à grande profondeur.



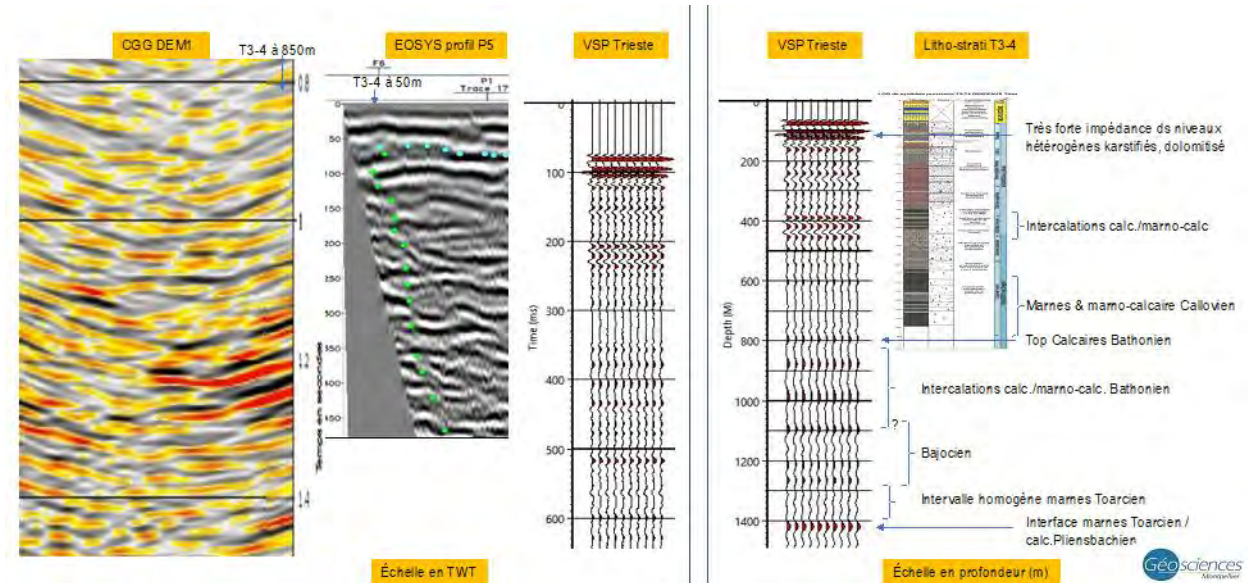


Figure 11 : Profil sismique vertical (PSV) enregistré dans le forage DMT4 jusqu'à 750 m par OGS<sup>3</sup> (Trieste, Italie). Les données présentées en « temps double » (à gauche) sont migrées en profondeur (à droite). On observe la forte impédance des niveaux karstifiés et dolomités du Jurassique de 72 à 160 m environ (Figure 9). En dessous, de forts réflecteurs apparaissent également entre 290 et 350 m dans une zone de forte déformation (Figure 9), puis de façon régulière jusqu'à 1 400 m, ce qui pourrait correspondre à l'interface Toarcien / Pliensbachien.

### 3.3.3. Impact de l'inversac de 2020

Un inversac s'est produit en cours de projet, le 28 novembre 2020, permettant d'observer les modifications des circulations dans les aquifères avant et pendant cet événement. Des données ayant été enregistrées dans le forage DMT1 en juin 2020, ces mesures ont été réalisées dans le même forage le 3 décembre 2020, six jours après l'inversac (Figure 10A). La comparaison des profils de conductivité électrique et de pH du fluide en forage entre juin et décembre 2020 met en lumière les points d'entrée d'eau de mer dans le sous-sol, avec notamment des augmentations abruptes de conductivité électrique du fluide à 134 et 150 m de profondeur, passant de 2 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à plus de 8 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 160 m du fait de l'inversac. Les profils enregistrés un mois plus tard, en janvier 2021, montrent que des valeurs supérieures à 28 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  sont atteintes à 280 m (Figure 10B).

En résumé, les mesures pétrophysiques sur carotte et les profils géophysiques en forage venant du site de Balaruc-les-Bains soulignent la présence de trois aquifères distincts. Le premier est l'aquifère de l'exploitation thermique. Il est fortement karstifié, dolomitisé et bréchifié, et s'étend jusqu'à 160 m de profondeur (Figure 9). En-dessous et jusqu'à 300 m, le second est également dolomitisé. Il contient également des eaux thermales avec ponctuellement la présence d'eau de mer, notamment à la base. Les mesures pétrophysiques sur carottes indiquent que la dolomitisation s'étend jusqu'à au moins 350 m de profondeur. Ensuite, plus en profondeur, on trouve principalement de l'eau douce, avec de rares présences d'eau plus minéralisées d'origine incertaine à ce stade. Le profil sismique vertical (PSV) identifie clairement les deux aquifères superficiels et met en évidence des réflecteurs sismiques jusqu'à plus de 1 400 m de profondeur (Figure 11).

<sup>3</sup> OGS (Istituto Nazionale Di Oceanografia E Di Geofisica Sperimentale)

### 3.4. APPROCHE GÉOLOGIQUE

La connaissance de la géométrie de l'aquifère a été améliorée grâce à des approches géologiques distinctes et complémentaires.

- **Géologie des réservoirs.** Cette approche décrit la structure des ensembles géologiques, notamment le Jurassique Supérieur et le Dogger considérés à l'échelle du bassin. Pour cela on a construit des coupes géologiques à travers la zone d'étude, contraintes par la géologie de surface, les données de forage et profils de sismique réflexion (BRGM/RP-70789-FR, Hemlesdaël *et al.* 2021). L'exercice permet de décrire la géométrie actuelle du réservoir et de déchiffrer la chronologie des déformations successives qui ont conduit à la structure actuelle (Figure 12).

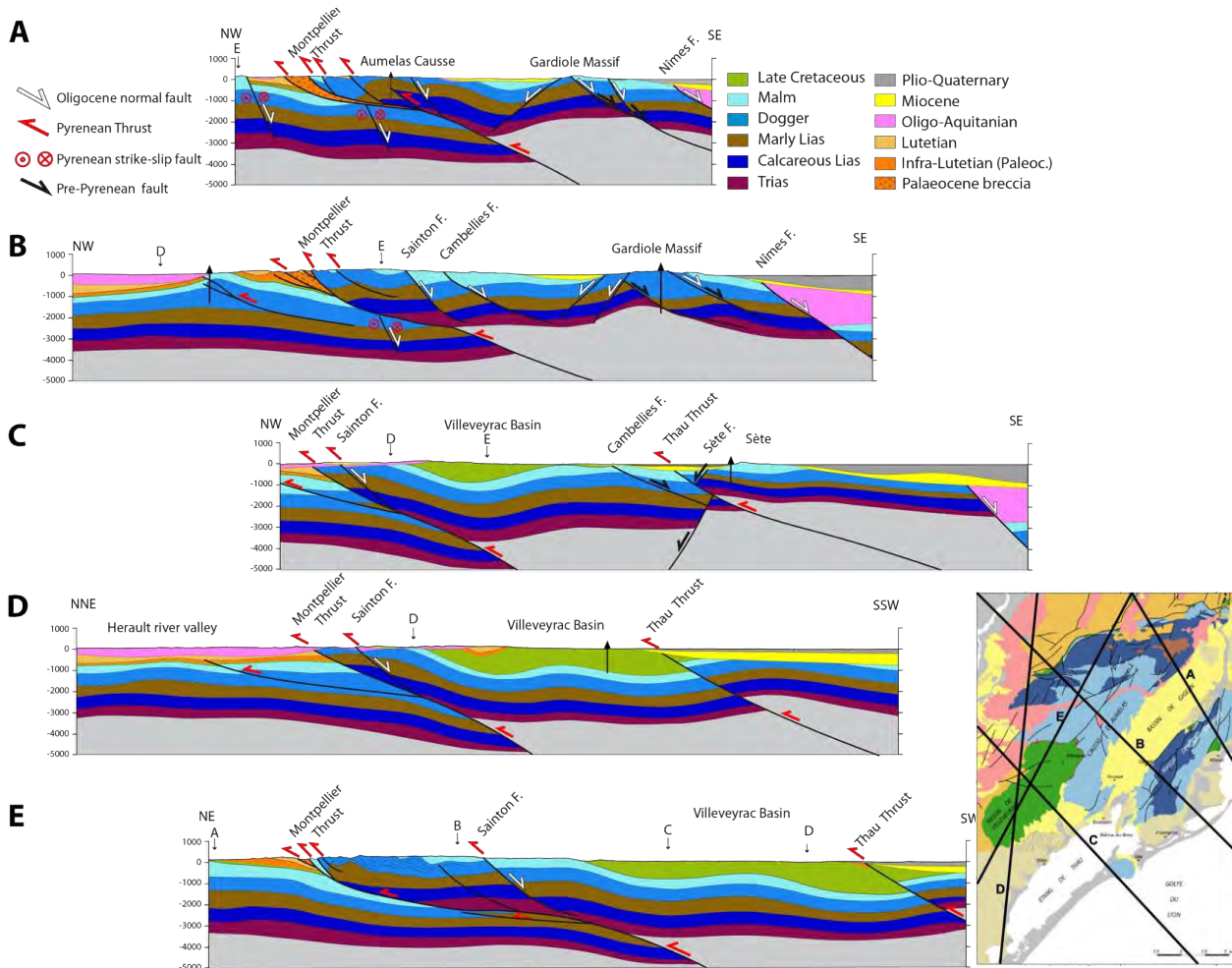


Figure 12 : Coupes géologiques de la zone DEM'Eaux Thau, présentant la structure actuelle et indiquant la chronologie des déformations. Le réservoir d'intérêt correspond aux calcaires du Malm et du Dogger.

- **Forages :** Les forages donnent un accès direct au réservoir ; ils permettent de valider les profondeurs des intervalles stratigraphiques, d'analyser les propriétés pétrophysiques des formations échantillonnées, de comprendre les paléo-circulations qui ont affecté le réservoir. Les forages verticaux DEM'Eaux Thau 3 et 4, forés sur une plateforme de 10 m<sup>2</sup>, ont livré 749 m de carottes dont l'analyse a fourni un log synthétique (Widhen *et al.*, soumis ; Figure 13).

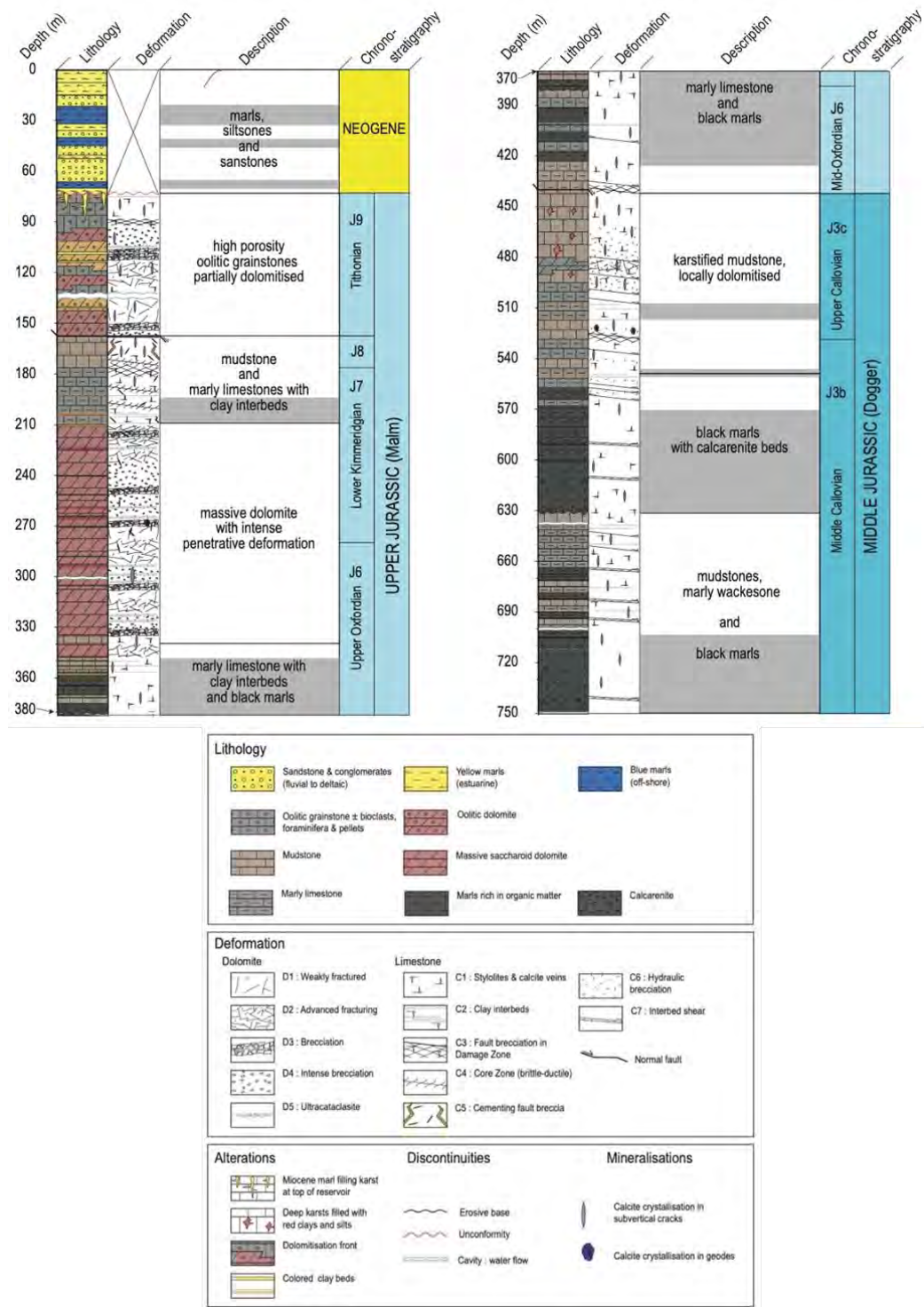


Figure 13 : Colonne litho-stratigraphique et de déformation du forage DEM'Eaux Thau.



Suite à ces descriptions, les carottes ont été stockées à la carothèque du BRGM à Orléans et sont donc référencées et librement accessibles (Figure 14).



Figure 14 : Vue panoramique de la carothèque installée au BRGM dans le centre technique d'Orléans (crédit photo: O. Serrano).

L'analyse des carottes a révélé une série de résultats originaux (Widhen *et al.*, soumis) :

- les séries carbonatées calcaires ont subi des dolomitisations secondaires sur plusieurs niveaux interstratifiés dans la partie supérieure du forage (entre 90 et 155 m), ainsi que sur un épais intervalle (entre 210 et 350 m). L'intervalle supérieur présente en outre des évidences d'épisodes de dolomitisation et de dédolomitisation successifs. De plus, cet intervalle supérieur est affecté de dissolution karstique importante, occasionnant une augmentation significative de la porosité et la formation de drains ouverts avec écoulements d'eau actuels, reconnus pendant la foration ;
- les calcaires et les dolomies présentent des modes de déformation distincts. On observe une déformation pénétrative cataclastique dans les dolomies, aboutissant localement à des ultra-cataclasites par comminution. Les calcaires sont affectés de déformation par bréchification, localisée dans des zones d'endommagement de failles, ainsi que de la déformation par dissolution, le long de joints stylolitiques. En outre on observe de nombreuses fentes de tension sub-verticales, remplies de calcite cristallisée ;
- trois types de karstification sont distingués. Tout d'abord, la partie supérieure du réservoir carbonaté est affectée de cavités de dissolution centimétriques à métriques, qui présentent des remplissages colmatant totalement ou partiellement, composés de sédiments marins d'âge Miocène, qui ont percolé depuis la surface de discordance d'âge Burdigalien (côte -72 m). On reconnaît ce type de karst jusqu'à -210m, ce qui suggère une formation lors de l'importante baisse du niveau de base au cours du Messinien. Un deuxième type de karst présente des remplissages d'argiles rouge et de silts d'origine superficielle dans un intervalle très profond (-450 m à -500 m), indiquant des circulations depuis la surface et un exutoire (niveau de base) encore plus profond. Enfin, un dernier type de remplissage, caractérisé par des marnes rosées, laminées et lithifiées, se rencontre dans les mêmes profondeurs ; ce remplissage est antérieur aux argiles et silts rouges. Les karsts profonds (450-500 m) présentent des remplissages similaires à ceux d'âge Paléocène étudiés dans la région (Combes *et al.*, 2009, Husson, 2012, 2013) ;
- les minéralisations de calcite dans les fractures analysées en microscopie en lumière naturelle et en cathodoluminescence ont révélé 5 types distincts de minéralisations. Ceux-ci indiquent cinq types de fluides différents circulant dans les fractures : calcite issue de la précipitation de



fluides en équilibre avec les calcaires (Figure 15.a); calcite lamellaire issue de précipitation à partir de fluide hydrothermal (Figure 15.b) ; Calcite contenant des argiles et des hydroxydes de fer, traçant des percolations depuis la surface (Figure 15.c); Calcite translucide, remplissant des golfes de corrosion, issue de précipitation dans des eaux d'origine météoriques (Figure 15.d); des calcites cristallisées en « dent de chien » observées dans des fentes ouvertes actuellement utilisées par des venues d'eau, présentant des auréoles de croissance contrastées ; elles indiquent des variations de chimie du fluide au cours de la précipitation (Figure 15.e). Cette dernière observation suggère l'existence de conduits pérennes, utilisés par différents types de fluides qui se succèdent au cours de l'évolution ;

- l'analyse des relations structurales entre les fractures contenant les cinq types de cristallisation permet de déterminer la chronologie relative des minéralisations, et donc, la succession des circulations de fluides au cours de l'évolution du réservoir. Le calendrier de la structuration du réservoir peut être étalonné par corrélation avec les événements géodynamiques affectant la région (Figure 16), (Widhen *et al.* Soumis) ;

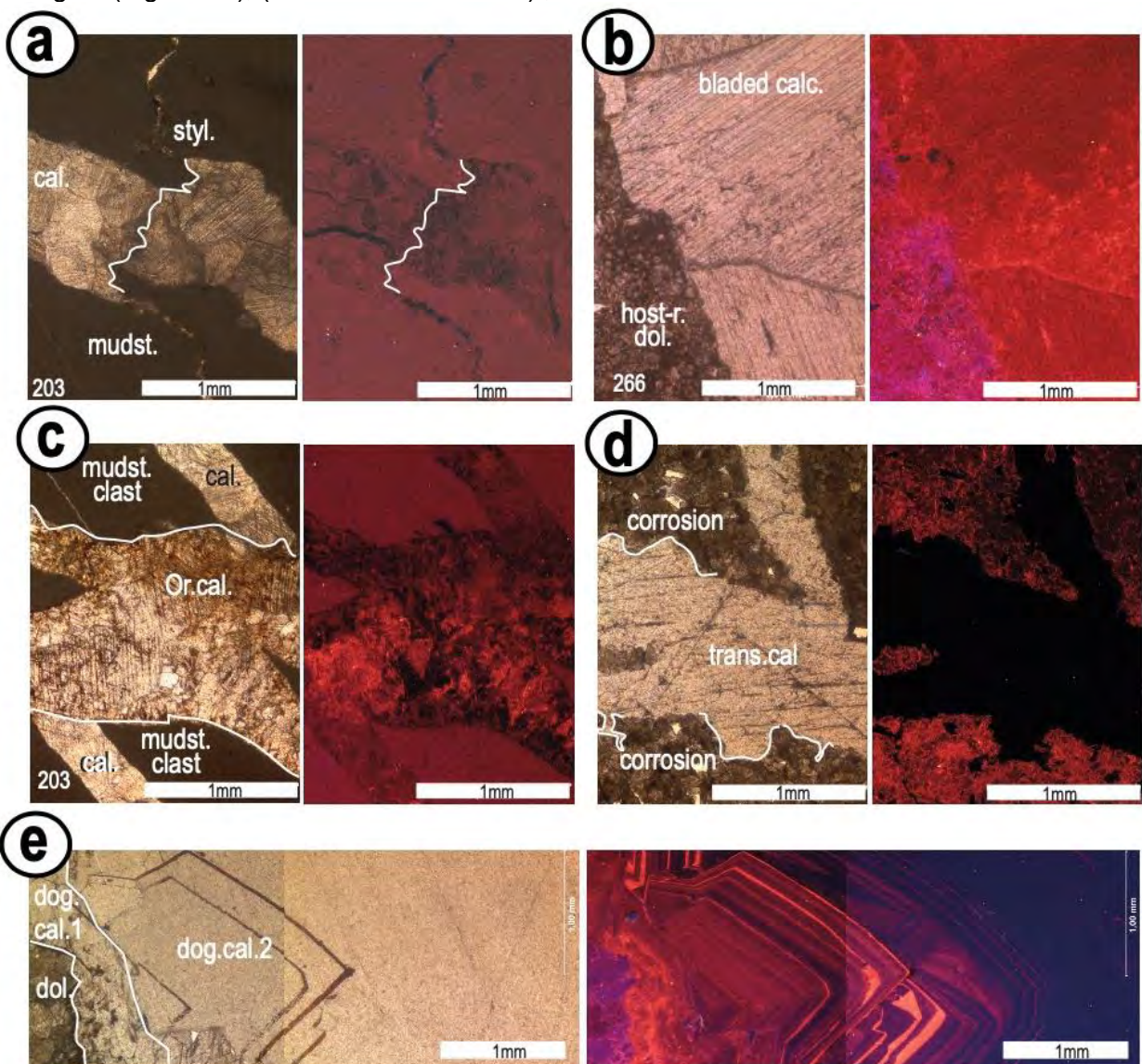


Figure 15 : Exemples des cinq types de cristallisation de calcite observés dans les fractures. Chaque exemple montre une vue en lumière naturelle (à gauche) et en cathodoluminescence (à droite).

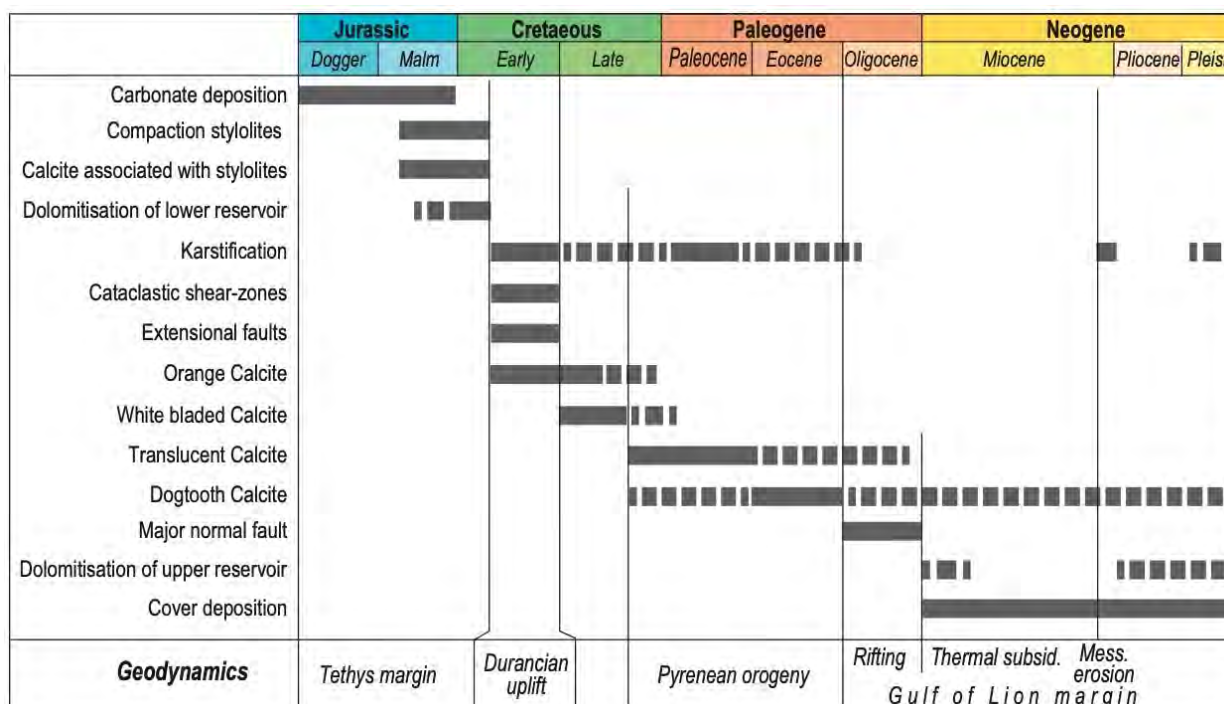


Figure 16 : Calendrier de la structuration du réservoir DEM'Eaux Thau et des circulations de fluides à l'origine des différents types de cristallisation de calcite dans les fractures, en lien avec l'évolution géodynamique régionale.

- les altérations (dissolution karstique, dolomitisation, dédolomitisation) et les minéralisations de calcite à partir : 1) d'eaux karstiques d'origine météorique, 2) d'eaux thermales d'origine profonde et 3) d'eaux marines, dans le réservoir karstique caractérisé dans le projet DEM'Eaux Thau, correspondent à l'enregistrement de systèmes hydrogéologiques fossiles, survenus au cours de l'évolution géologique long-terme. Le système hydrogéologique actuel réactive les conduits et les connectivités acquises tout au long de l'évolution géologique locale, alors que les circulations actuelles sont soumises aux variations hydrologiques sur le court terme (pluviométrie, niveau de la mer/lagune). De telles variations pourraient correspondre aux : alternances glaciaire-interglaciaire (temps caractéristique  $10^4$  ans), ou à des épisodes interannuels (type « *inversac* »). On note que le changement climatique global, qui diminue les précipitations et élève le niveau de la mer, pourrait modifier le système hydrogéologique actuel.

### 3.5. MODÈLE GÉOLOGIQUE 3D

L'intégration de l'ensemble des données géologiques (stratigraphiques, lithologiques et structurales) et géophysiques (gravimétrie, sismique réflexion, sismique passive) a permis de construire un modèle géologique 3D de la zone DEM'Eaux Thau grâce à l'outil *Geomodeler* (BRGM/RP-70789-FR, Hemelsdaël *et al.*, 2021). Ce modèle de 70 km de long en nord-sud, 35 km de large en est-ouest et 5 km d'épaisseur, présente la structure géologique, informée dans tout le volume, de manière géologiquement cohérente. Ce modèle géologique 3D numérique présente la structure du réservoir (Malm et Dogger) et les connectivités entre les différents panneaux juxtaposés par le jeu des failles (Figure 17). Il sert de base aux modélisations hydrogéologiques.



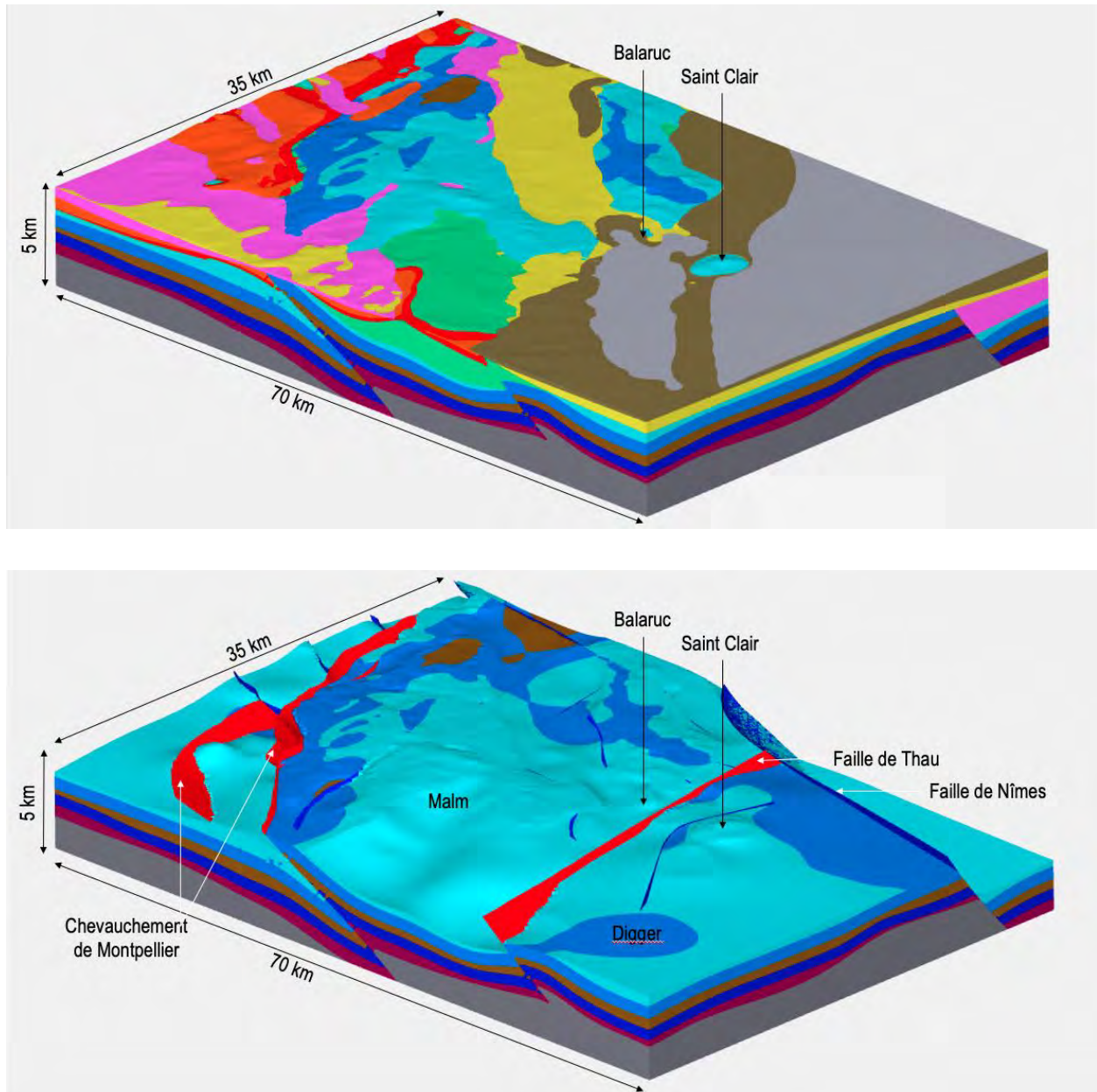


Figure 17 : Vues du modèle géologique 3D réalisé avec Geomodeler™, avec toutes les couches géologiques (en haut). En bas : écorché du réservoir Malm (bleu clair) et Dogger (bleu foncé), avec les surfaces de failles inverse (en rouge) et normales (bleu marine).

Parmi les acquis de l'étude géologique, il faut signaler la mise en évidence de structures dans la zone côtière et /ou en off-shore, masquées par des sédiments néogènes :

- le prolongement sud-est de la faille normale de Nîmes, qui s'infléchit vers le sud au large de Frontignan. Cette faille abaisse le réservoir Jurassique de 2 000 m dans le compartiment sud-est (Figure 18) ;
- la faille inverse de Thau, nouvellement identifiée, d'orientation est-ouest, recoupée à l'est par la faille de Nîmes et qui soulève le compartiment sud du Mont Saint-Clair (Figure 18). Il s'agit d'un accident similaire au chevauchement Pyrénéen de Montpellier, connu depuis longtemps ;

- la géométrie de ces structures est déterminante pour les circulations ascendantes d'eaux profondes thermales depuis le réservoir profondément enfoui, vers la surface, au niveau de la presqu'île de Balaruc.

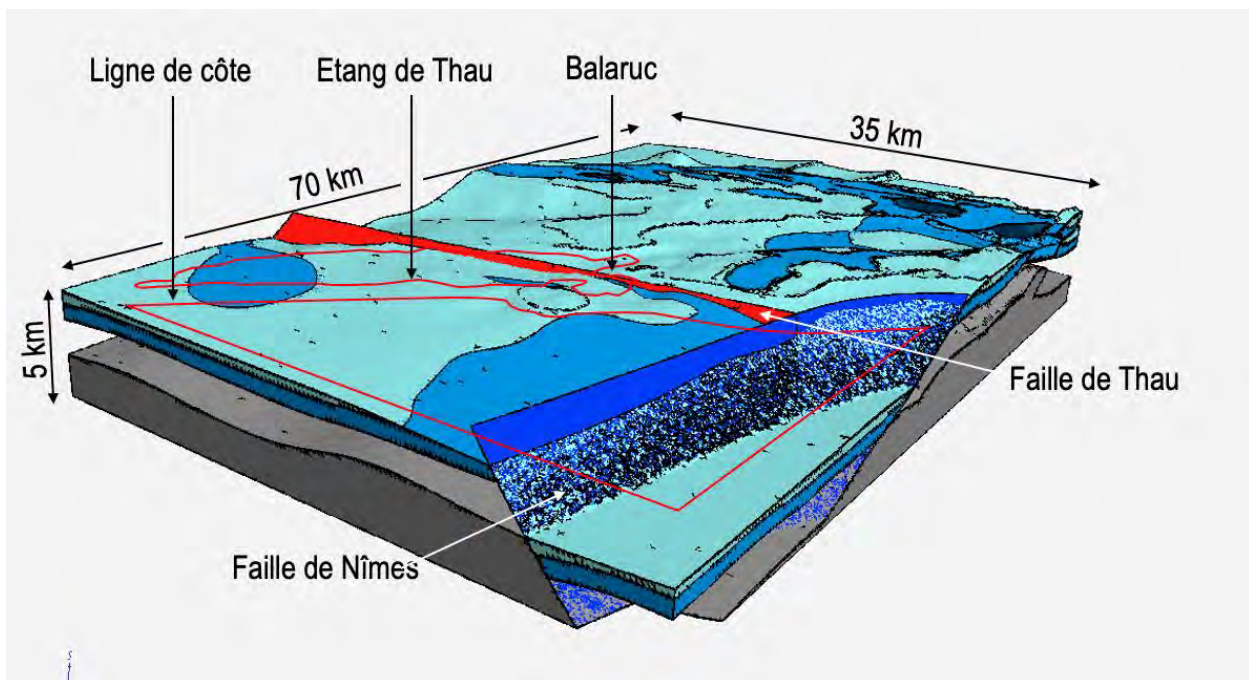


Figure 18 : Vue du modèle géologique 3D présentant la structure du réservoir carbonaté Malm-Dogger (bleus clair et foncé, respectivement) affecté par le chevauchement de Thau (rouge) et la faille normale de Nîmes (bleu marine). Les rivages de l'étang de Thau et de la mer sont indiqués par une ligne rouge.

## 4. Apport des nouveaux équipements

### 4.1. INTRODUCTION

Le projet DEM'Eaux Thau (2017–2022) a permis la mise en place d'un observatoire des eaux souterraines du Jurassique dans le secteur de la presqu'île de Balaruc et de Sète. Cet observatoire est constitué par l'équipement de la source sous-marine de la Vise située dans la lagune de Thau, ainsi que par la réalisation et l'équipement de quatre ouvrages : DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4 à quelques centaines de mètres de la source ainsi que du forage Stade Michel à Sète. Les informations détaillées des ouvrages sont consignées dans les livrables L6, L7 et L10 (rapports [BRGM/RP-68549-FR](#), [BRGM/RP-69163-FR](#) et [BRGM/RP-70842-FR](#)).

Les principaux objectifs de cet observatoire sont les suivants :

- caractérisation des flux (entrants ou sortants) de la source de la Vise afin de pouvoir établir des bilans volumiques ou massiques, caractériser la qualité physico-chimique (température, conductivité électrique) et chimique des eaux de la source (éléments majeurs, traces, signatures isotopiques) ;
- caractérisation des interactions entre les réservoirs karstiques profonds et superficiels dans la zone côtière de Balaruc-les-Bains où convergent des eaux douces, thermales, marines ;
- test d'équipements innovants pour la caractérisation fine de différents types d'écoulements en zone karstique (suivi de la résistivité de la zone supérieure karstifiée, suivi de la température sur un linéaire de 200 mètres, mesures acoustiques distribuées (DAS) pour l'analyse des écoulements in-situ).

Une fois le projet DEM'Eaux terminé, ces équipements seront mis à disposition auprès de scientifiques, entreprises, d'étudiants, pour la réalisation de projets opérationnels (mises au point, tests de modes opératoires, matériels), éducatifs, ou de recherche (modalités d'accès en cours d'élaboration).

La mise en place de l'observatoire a bénéficié du soutien financier du CPER État – Région et de l'agglomération Montpellier Méditerranée Métropole. Les communes de Sète et de Balaruc-les-Bains ont mis à disposition une parcelle pour l'implantation des forages.

### 4.2. FORAGE DE SÈTE

Le forage « Stade Michel » d'une profondeur de 134 m ([BSS003CGKO](#)) a été réalisé au début du projet de recherche DEM'Eaux Thau », du 6 novembre 2017 au 19 décembre 2017. Les éléments techniques sont consignés dans le livrable L6 du projet DEM'Eaux Thau ([BRGM/RP-68549-FR](#), Vigouroux 2018).

Le réservoir du Jurassique a été recoupé à 108 m de profondeur sous recouvrement miocène (94 m à 108 m de profondeur), pliocène (10 m à 94 m de profondeur) et quaternaire (0 à 10 m de profondeur)<sup>4</sup>. D'importantes venues d'eau chaudes (autour de 39 °C) et minéralisées (CE autour de 28 mS/cm), légèrement carbogazeuses ont été rencontrées vers 130 m de profondeur (débit au soufflage estimé à 200 m<sup>3</sup>/h) provoquent l'arrêt de la foration à 134 m de profondeur.

---

<sup>4</sup> - foration à la tarière Ø 570 mm de 0 à 5,5 m et cimentation de la tête de forage

- foration au rotary tricône Ø 380 mm de 5,5 à 113 m, pose du tubage PVC vissé Ø 285/315 mm jusqu'à 111 m, cimentation du pied de l'extrados du tubage PVC

- foration au Marteau Fond de Trou (MFT) Ø 222 mm de 111 à 134 m. Ciment de 111 m à 113,8 m.

Des pompages par paliers de débit d'une heure (50, 100 et 150 m<sup>3</sup>/h) ont été réalisés en février 2018, suivi d'un pompage longue durée de 48 h au débit de 100 m<sup>3</sup>/h.

L'interprétation détaillée des résultats est présentée dans le livrable L1 du projet DEM'Eaux Thau (BRGM RP-68483- FR, Ladouche *et al.*, 2001). La modélisation de l'essai de pompage à l'aide d'un modèle analytique de type pompage dans une fracture inclinée permet de reproduire de manière très satisfaisante les observations. Dans la modélisation, la fracture est supposée horizontale et représente les importantes venues d'eau interceptées en fin de forage, entre 128 et 135 m de profondeur (conduit karstique). Sa dimension est estimée à 250 x 250 m, soit une surface relativement grande. Dans ce modèle (Figure 19), la fracture et la partie non-tubé du puits (111-135 m) sont pompées. La transmissivité de l'aquifère du Jurassique est estimée à  $3.0 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s, son emmagasinement à  $1.5 \times 10^{-3}$  (-) et son épaisseur à 250 m, ce qui est conforme à l'épaisseur fracturée du jurassique rencontré au niveau du sondage de Sète (prof. 976 m) situé à environ 350 m (BSS002JDVC). Selon le modèle, cet aquifère jurassique semble caractérisé par une anisotropie verticale de perméabilité assez importante ( $k_h/k_v = 30$ ). Cette anisotropie traduit vraisemblablement la présence de niveaux perméables (zones karstifiées) intercalés de niveaux moins perméables. La perméabilité de l'aquitard, qui pourrait correspondre à la perméabilité verticale des formations du Miocène-Pliocène sus-jacent ou à la perméabilité des calcaires marneux calloviens sous-jacents, est estimée à  $3.0 \times 10^{-7}$  m/s. La très légère surestimation du rabattement modélisé en phase de remontée ainsi que le diagnostic sur la dérivée du rabattement (cf. Ladouche *et al.*, 2019) suggère la présence d'une à deux limites étanches parallèles lointaines à une distance très approximative estimée entre 1 et 2 km du forage. L'orientation des limites (nord-sud ?, est-ouest ?, autre ?) ne peut pas être précisée.

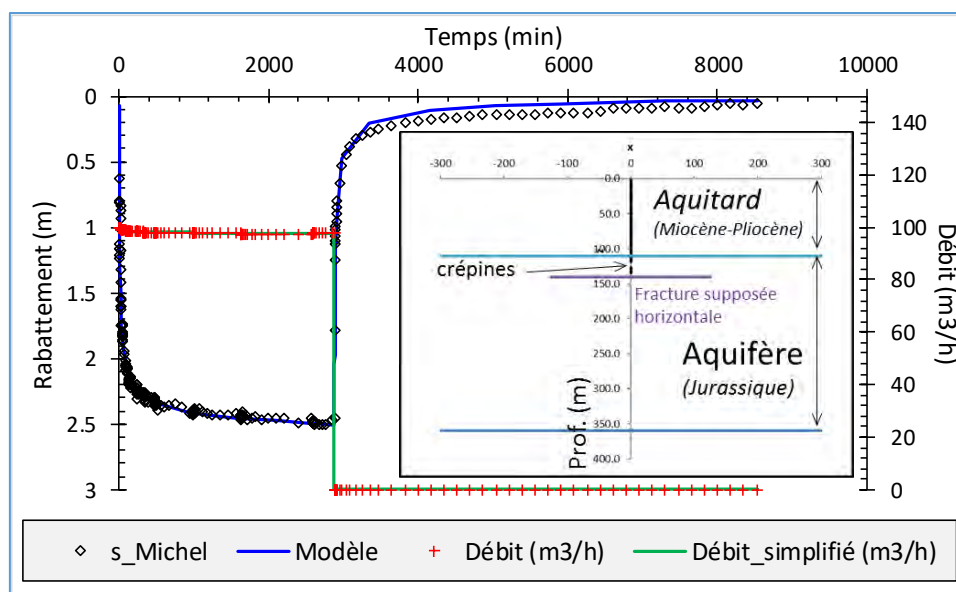


Figure 19 : Interprétation du pompage sur le Forage du stade Michel (Sète, 20-22/02/2018).  
Modèle analytique : fracture inclinée et drainance – Extrait, Ladouche *et al.*, 2019,  
BRGM RP-68483- FR).

Les eaux pompées au cours de l'essai de pompage sont chaudes (39 °C en moyenne) et minéralisées (CE de l'ordre de 28 mS/cm), les eaux présentent un faciès chloruré sodique d'origine marine, les signatures géochimiques des eaux du forage « Stade Michel » apparaissent très comparables à celles mesurées dans l'ouvrage F8 des thermes de Balaruc-les-Bains (10165X02134/SNTCLR).



Les éléments d'informations géochimiques sont consignés dans le livrable L5a du projet DEM'Eaux Thau (Ranchoux *et al.*, 2022, [BRGM/RP-71281-FR](#)). La signature des eaux s'explique comme le résultat d'un mélange entre une eau d'origine marine (45 %) et une eau douce d'origine karstique (55 %). L'excès en Ca, Sr et HCO<sub>3</sub> dans les eaux par rapport à la droite de mélange avec l'eau de mer met en évidence l'existence d'interactions eau-roche avec les roches carbonatées en présence de CO<sub>2</sub>. Les isotopes du strontium confirment que ces eaux interagissent et circulent dans une matrice carbonatée d'âge jurassique. L'excès en lithium ainsi que la présence de CO<sub>2</sub> suggère la participation d'eau d'origine profonde du socle granitique sous-jacent. L'âge apparent des eaux estimé à l'aide de l'hélium et du chlore 36 suggèrent que les eaux sont anciennes (plusieurs milliers d'années) cependant la présence de gaz anthropique (CFC) indique que l'aquifère est sous l'influence des eaux de recharge récentes vraisemblablement issues des calcaires de Sète.

Les suivis piézométriques réalisés sur l'ouvrage depuis juillet 2018 (Figure 20) indiquent que la piézométrie tend vers 3 m NGF en période de basses eaux soit une valeur très significativement supérieure à celles observées dans la partie sud de la presqu'île de Balaruc à proximité de la Vise (470 m, F4-Hotel [BSS002JDVA]).

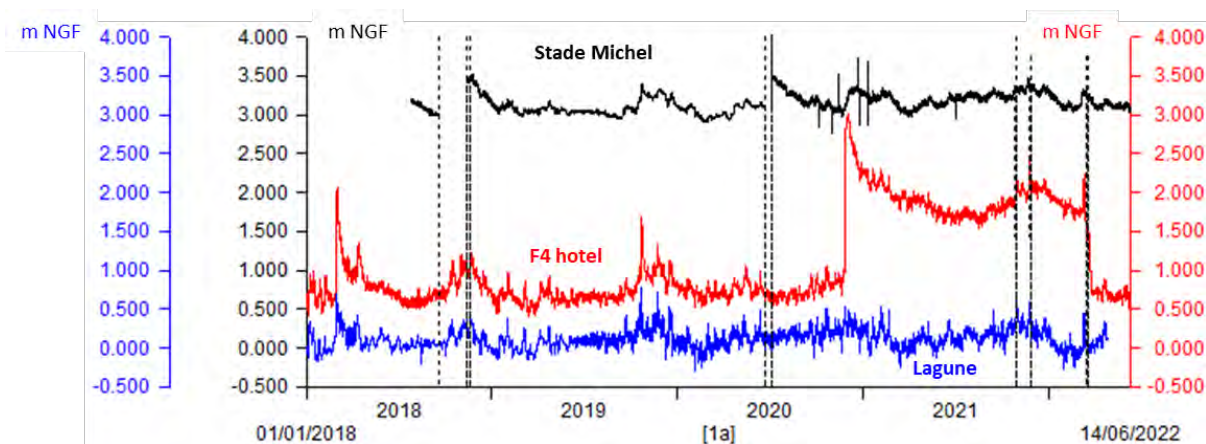


Figure 20 : Suivi piézométrique sur le forage du Stade-Michel à Sète (BSS003CGKO).

### 4.3. SOURCE DE LA VISE

La source sous-marine de la Vise (BSS002JDMR) située dans la lagune de Thau à l'ouest de la presqu'île de Balaruc-les-Bains constitue l'exutoire naturel majeur de l'aquifère des calcaires karstifiés du Jurassique du compartiment aval de l'entité A.V.I.C., les autres exutoires secondaires étant les sources karstiques de Cauvy et d'Ambressac.

L'acquisition de données sur la Vise a constitué un élément-clé du projet de recherche DEM'Eaux Thau. La conception de l'instrumentation de la source de la Vise a dû faire face à plusieurs enjeux : griffon submergé sous une trentaine de mètres d'eau saumâtre, au point bas d'un cône de sédiments, éloignement de la cote de 160 m environ, présence d'anciens équipements (buse métallique, sacs de ciments...), zone fortement fréquentée par les pêcheurs et les plongeurs,... Les livrables L7 ([BRGM/RP-69163-FR](#), Lamotte 2019) et L10 ([BRGM/RP-70842-FR](#), Ladouche *et al.*, 2022,) présentent de manières détaillées le design de l'instrumentation et les premières acquisitions réalisées. Le phénomène d'inversac et les données acquises à la Vise font l'objet du Livrable L11b ([BRGM/RP-70839-FR](#), Ladouche *et al.* 2022).

L'autorisation d'équiper la source de la Vise a été obtenue en octobre 2017 (cf. rapport [BRGM/RP-69163-FR](#)). L'autorisation d'occupation temporaire du domaine public maritime a été obtenue en octobre 2018.

L'instrumentation à terre a été mise en place sur le site « Poissons du Soleil » (signature d'une convention). L'installation des équipements de mesure a été réalisée au printemps 2019 par ANTEA GROUP avec l'appui de la société de travaux sous-marins Océan Travaux Services. Les travaux de maintenance sont assurés par ANTEA GROUP jusqu'en décembre 2022.

Dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau, la source de la Vise fait l'objet d'un suivi depuis le 26 juin 2019 (débit, température et conductivité). Sur la période du 1<sup>er</sup> juillet 2019 au 27 novembre 2020 (avant la période d'inversac), le débit moyen de la source de la Vise a été évalué à 119 L/s. Pendant l'inversac (28 novembre 2020 au 14 mars 2022), le débit moyen d'absorption du griffon de la Vise (Lagune vers système karstique) a été évalué à 182 L/s. Depuis la reprise de l'écoulement, à la date du 31 mai 2022, le débit moyen a été évalué à 150 L/s.

La température de la Vise est de 19 °C en moyenne, la minéralisation de l'ordre de 2,5 mS/cm. Les eaux présentent un faciès chloruré-sodique, l'origine de la salinité est attribuée à une faible contribution d'eau d'origine thermal (de l'ordre de 7-8 %) et d'une part majoritaire (92 %) d'eau d'origine karstique (de type CGE-Tennis et/ou P4-Balm) et d'une contribution négligeable (<1 % en moyenne<sup>5</sup>) d'eau de la lagune de Thau attribué au dispositif de prélèvement qui ne permet pas de s'affranchir de ce faible mélange.

Les eaux de la Vise présentent une signature géochimique très comparable à celles prélevées sur le nouvel ouvrage DEM-T1 à 130 m de profondeur implanté sur la plateforme expérimentale du projet de recherche DEM'Eaux Thau ([BRGM/RP-71957-FR](#), Ranchoux *et al*, 2022).

---

<sup>5</sup> De 0,1 % à 3,1 %



#### 4.4. PLATEFORME DE FORAGES

Dans le but d'acquérir des données hydrogéologiques inédites et de lever les incertitudes géologiques et géochimiques en vue d'améliorer le schéma conceptuel de structure et de fonctionnement de l'hydrosystème complexe de la presqu'île de Balaruc, une plateforme expérimentale composée de plusieurs ouvrages de reconnaissance a été mise en œuvre dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau. Ces équipements ont été réalisés dans le cadre de l'Investissement CPER n° 1b. La carte (Figure 21) permet de localiser la plateforme expérimentale des forages.

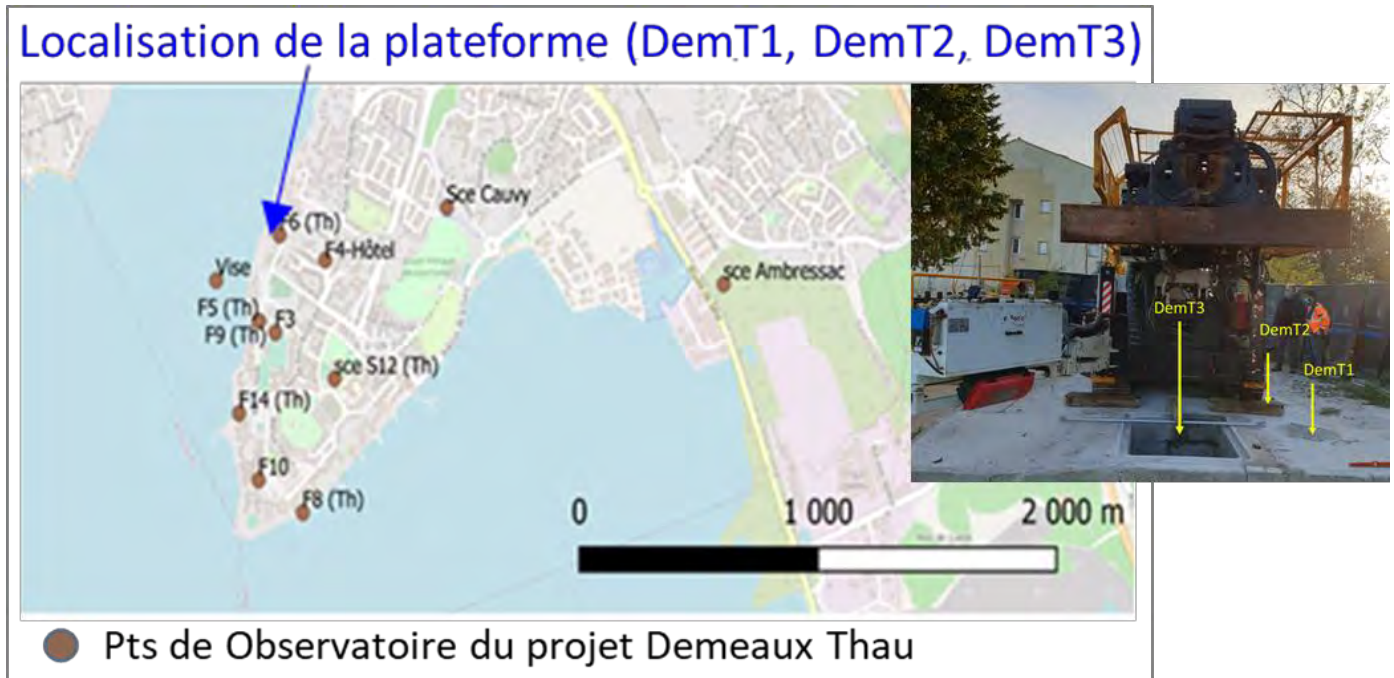


Figure 21 : Localisation de la plateforme expérimentale des forages.

L'objectif de ces ouvrages est de capter et instrumenter des horizons aquifères qui ne l'étaient pas auparavant. Les objectifs scientifiques et principaux questionnements sont les suivants :

- caractérisation pétrophysique des réservoirs, minéralogie (circulations des fluides, rôle des eaux thermales dans la karstification, ...) – Validation du modèle géologique 3D ;
- caractérisation des propriétés hydrauliques des différents aquifères et des structures hydrodynamiques (indispensables au modèle hydrogéologique) ;
- caractérisation géochimique du réservoir profond : acquisition de la salinité des eaux thermales (Jurassique Supérieur ou plus profond ?), le Jurassique Moyen est-il un réservoir relais des flux profonds transitant le long des failles ?
- comment évoluent les circulations au cours du temps ? Au cours d'un inversac ? Réservoir impacté par un inversac ?

Le schéma de principe d'implantation des ouvrages et les aquifères-cibles sont explicités sur la Figure 22.

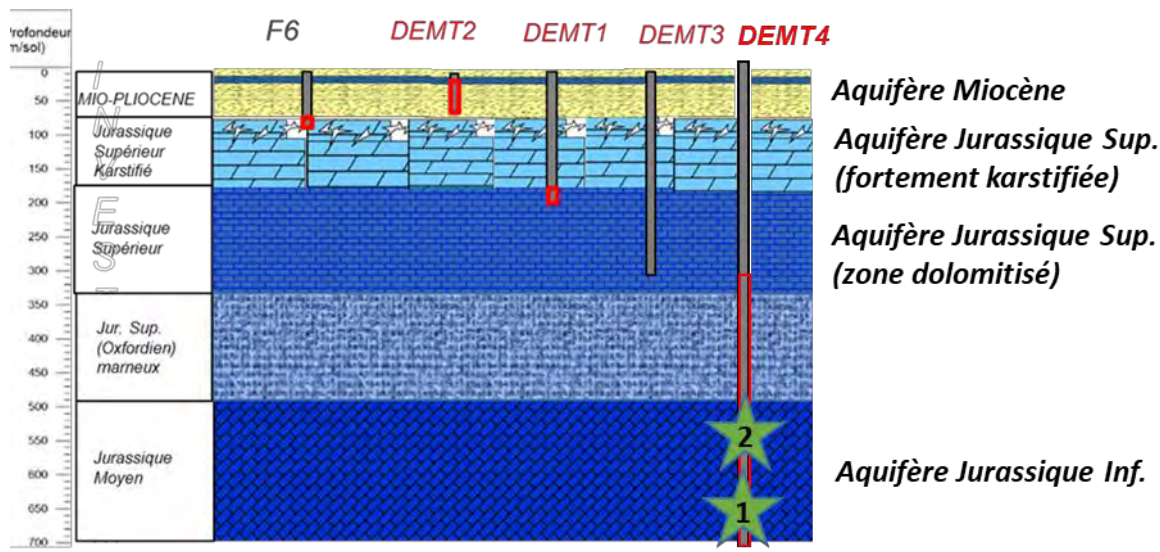


Figure 22 : Schéma de principe de l'implantation des ouvrages réalisés et aquifères-cibles de la plateforme DEM'Eaux Thau.

#### 4.4.1. Informations techniques

Les forages DEMENT1 (BSS004AXZH) et DEMENT2 (BSS004AXZJ) ont été réalisés en destructif entre mars et mai 2020. Le forage DEMENT3 (BSS004AXZK) a été réalisé entre novembre 2020 et février 2021, à proximité du DEMENT1 (du 16 novembre 2020 au 26 février 2021). Le forage DEMENT4 (BSS004CLMU) a été réalisé en 2021 (du 7 avril 2021 au 19 novembre 2021) Ils sont situés à proximité immédiate du forage F6 (BSS002JDXA) des thermes.

Le forage DEMENT1 est profond de 168 m et capte les formations carbonatées du Jurassique entre 128 et 163 m de profondeur. Le Jurassique est atteint vers 75 m de profondeur sous les dépôts marneux et marno-sableux du Mio-Pliocène. L'inspection vidéo a montré des cavités dont la plus importante est située entre 132,9 et 134,7 m. Une arrivée d'eau importante a été identifiée à la foration à 131 – 131,5 m de profondeur. Il s'agit d'un drain karstique de dimension notable (décimétrique). L'ouvrage a fait l'objet d'un test de pompage de 24 h à un débit de 25 m<sup>3</sup>/h (du 27 au 28 mai 2020) et de deux prélèvements (T0+1h, T0+24h) pour caractérisations chimiques et isotopiques. Le niveau statique avant pompage était de 7,73 m/repère (+0,8 m NGF).

Le forage DEMENT2 est situé dans la formation sus-jacente au Jurassique, dans les dépôts marneux et marno-sableux du Mio-Pliocène. Il est profond de 45 m et capte l'aquifère du Mio-Pliocène entre 20,7 et 40,7 m de profondeur. L'ouvrage a fait l'objet d'un test de pompage de 5 h (290 minutes, le 6 juin 2020) à un débit variant de 6 à 16 m<sup>3</sup>/h (7 m<sup>3</sup>/h en moyenne) (du 27 au 28 mai 2020) et de deux prélèvements (T0+1h30, T0+4h) pour caractérisations chimiques et isotopiques. Le niveau statique avant pompage était de 7,7 m/repère (+0,56 m NGF).

La comparaison des piézométries des ouvrages DEMENT1 et DEMENT2 permet de montrer que l'aquifère jurassique (DEMENT1) est en charge par rapport au Miocène recoupé par le DEMENT2. La différence de charge de l'ordre de +0,3 m en moyenne tend à se réduire en période de basses eaux (+0,1 m). En période d'inversac, la différence de charge est très significativement plus forte, de l'ordre de +1,3 m (Annexe 3).

Le forage DEMENT3 (BSS004AXZK) a été carotté jusqu'à une profondeur de 300 m ; il recoupe les formations carbonatées du Jurassique sous environ 68 m de formations marneuses et marno-sableuses du Mio-Pliocène. L'ouvrage a fait l'objet d'un test de pompage 24h (du 11 au 12 janvier 2021 en période d'inversac) à un débit variant de 1,9 à 4 m<sup>3</sup>/h et de deux prélèvements (T0+4h, T0+24h) pour caractérisations chimiques et isotopiques. Le tubage de soutènement entre 0 à 200 m de profondeur a permis d'isoler la section 200-300 m de profondeur de l'aquifère. C'est cette section de l'aquifère qui a été sollicitée durant l'essai par pompage. Le niveau statique avant pompage était de 4 m/repère (+5,38 m NGF). Après la réalisation de l'essai par pompage en janvier 2021, le forage a été comblé suite à des problèmes techniques liés à la reprise de foration.

Le carottage du DEMENT4 (BSS004CLMU) a été réalisé entre juillet et novembre 2021 (22 juillet 2021 au 19 novembre 2021), à 1,5 mètres du DEMENT3, afin de poursuivre l'acquisition de données géologiques et hydrogéologiques jusqu'à 759,5 m de profondeur (diamètre HQ : 96 mm entre 290 et 759,5 m). Deux essais par pompage de 24h ont été réalisés (en période d'inversac) sur le forage profond (DEMENT4 ou Claudine IV). Le premier à 4,6 – 4,7 m<sup>3</sup>/h, effectué du 15 au 16 décembre 2021 a concerné les horizons compris entre 759 m et 620 m de profondeur, et le second, à 4,5 m<sup>3</sup>/h, du 17 au 18 décembre 2021, sur les horizons compris entre 390 à 759,5 m de profondeur. Durant ces essais, le tubage de soutènement du carottier a permis d'assurer l'isolation des niveaux supérieurs. Lors du premier essai (759-620 m ; 15-16 décembre 2021), le niveau statique n'est pas connu car l'ouvrage était artésien (débit faible de l'ordre de quelques L/min, cote piézométrique > 8,8 m NGF) ; par contre, il était à 2,73 m/repère lors du deuxième essai (760-390 m ; 17-18 décembre 2021), soit approximativement autour de +7 m NGF. L'aquifère du jurassique moyen apparaît en charge par rapport à l'aquifère du jurassique supérieur (de l'ordre de + 5 m pour le premier test entre 620 et 760 m de profondeur, de l'ordre de +3,5 m lors du second test entre 390 et 760 m de profondeur).

#### 4.4.2. Observatoires géophysiques en forage

Dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau, le BRGM a mandaté les sociétés ImaGeau et Kloé afin de doter la plateforme expérimentale d'équipement de suivis en continu de la résistivité électrique (ImaGeau – SMD) et de température par fibre optique (Kloé) dans le but d'obtenir un monitoring en continu à grande résolution verticale de la minéralisation et de la température des eaux.

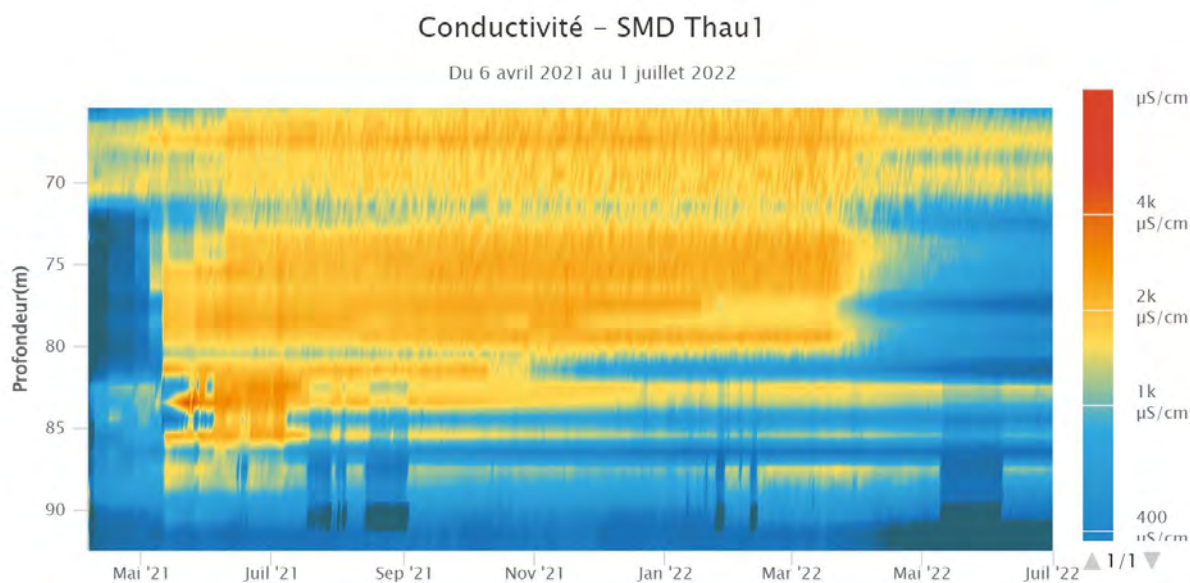
Les sociétés imaGeau et Kloé ont instrumenté respectivement le forage DEMENT1 et le forage DEMENT4 d'un observatoire en continu de la résistivité électrique (SMD) pour DEMENT1 (imaGeau) et d'un observatoire en continu de température par fibre optique pour DEMENT4 (Kloé). Une paire de fibres optiques en forme de U ont également été installées dans DEMENT4 par Kloé afin de permettre dans le futur un monitoring acoustique et sismique en utilisant la technologie DAS.

##### a) Observatoire de résistivité

Le SMD (Subsurface Monitoring Device) de la société imaGeau est un outil de monitoring des eaux souterraines qui permet d'enregistrer et de télétransmettre la conductivité électrique de l'eau, la pression, et la température de l'aquifère autour d'un piézomètre via un grand nombre de points de mesure (jusqu'à 60). Un boîtier d'acquisition placé en surface à proximité de l'ouvrage contrôle une chaîne d'électrodes permettant de réaliser des profils de résistivité électrique autour de l'ouvrage en utilisant des méthodes géophysiques. Ce signal est ensuite converti en conductivité électrique de l'eau de l'aquifère en utilisant l'équation de Waxman-Smiths (1968).

Cette opération demande de connaître le facteur de formation (F) et la conductivité de surface (Cs) qui sont déterminés à l'installation du SMD en utilisant les mesures géophysiques en forage du CNRS (radioactivité naturelle gamma pour les argiles, résistivité électrique de la formation et vitesse acoustique des ondes P pour la porosité). Le détail de la procédure de calibration est présenté dans le rapport L10, BRGM/RP-70842 (Ladouche *et al*, 2022).

Les acquisitions des chroniques de conductivité ont débuté le 6 avril 2021. Sur les 14 premiers mois de données (Figure 23), on note une conductivité assez uniforme de l'ordre de 1 500-2 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  dans l'aquifère du Miocène, des variations plus discrètes avec des valeurs généralement plus faibles au toit du Jurassique. En mars 2022, la fin de l'inversac est visible de 65 à 80 m de profondeur, aussi bien dans le Miocène qu'au toit du Jurassique.



*Figure 23 : Image SMD de résistivité électrique du milieu réalisée en mode dipôle-dipôle et transformée en conductivité électrique de l'eau porale en fonction de la profondeur.  
Les 14 premiers mois de données soulignent nettement la fin de l'inversac en mars 2022.*

### **b) Observatoire de température**

La solution de Monitoring de températures par fibre optique développée et fournie par la société Kloé se compose d'un interrogateur optoélectronique de surface (K-FBG-MU), d'un (ou plusieurs) câbles optiques (K-FBGA) déployé(s) le long du site à surveiller, comportant les capteurs optiques de températures (K-FBG) répartis selon les besoins du projet (cf. rapport L10, BRGM/RP-70842).

L'interrogateur optoélectronique se compose (i) d'une source laser, accordable, qui balaie en boucle un spectre de longueurs d'onde dont la largeur est adaptée au nombre de capteurs de températures déployés le long des câbles optiques de mesure, (ii) d'un commutateur optique permettant une interrogation multi-lignes, (iii) de détecteurs optiques assurant la mesure permanente des signaux optiques collectés à l'extrémité de chaque câble relié à l'interrogateur, et (iv) d'un logiciel rendant principalement compte des températures relevées par chaque capteur en fonction du temps.

Le câble optique se compose principalement d'une fibre optique, déployée en A/R dans le câble, comportant régulièrement des capteurs optiques (de type « réseaux de Bragg », les K-FBGs) très sensibles à la température, répartis spatialement le long de la fibre selon les besoins de l'application, et d'une gaine de protection, dont le type est sélectionné et adapté au mieux en fonction des contraintes environnementales liées au projet.

Compte tenu des contraintes techniques liées au chantier de foration du DEMENT4 qui s'est terminé fin novembre 2021, le système d'acquisition associé au système de monitoring n'a pas pu être installé avant la fin du chantier, ni les fibres raccordées à ce dernier. Cependant, à l'issue de la pose de ces quatre fibres (deux pour les mesures de températures, deux autres pour les mesures acoustiques futures) et à leur mise en attente sécurisée en tête de forage, elles ont pu être testées avec succès en termes de continuité et d'intégrité physique (cf. rapport L10, BRGM/RP-70842). Les acquisitions pourront démarrer lorsque le container prévu pour les instrumentations du DEMENT4 sera installé sur site (second semestre 2022).

#### 4.4.3. Paramètres hydrauliques des nouveaux forages

Les caractérisations hydrauliques par essais de pompage et les suivis piézométriques et physico-chimiques réalisés sur les ouvrages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4 apportent des éléments nouveaux à la compréhension du fonctionnement du système karstique de la presqu'île de Balaruc. L'interprétation détaillée des résultats est présentée dans le livrable L10 du projet DEM'Eaux Thau (Ladouche *et al.*, 2022, BRGM RP-70842- FR).

##### a) Forage DEMENT1 (BSS004AXZH)

Lors du nettoyage et développement de l'ouvrage DEMENT1 par la technique du soufflage « Air-Lift », un débit de l'ordre de 200 m<sup>3</sup>/h environ a été produit par le forage. Au même moment, le débit de la source de la Vise, située à environ 310 m de DEMENT1, a diminué de façon notable de plusieurs centaines de m<sup>3</sup>/h (200 m<sup>3</sup>/h en moyenne), montrant ainsi que le drain karstique situé à 131 m de profondeur est en forte connexion hydraulique avec la source de la Vise (Figure 24).

Ces informations ont orienté le schéma conceptuel de modélisation qui a été adopté pour décrire les résultats de l'essai de pompage de l'ouvrage DEMENT1 (cf. L10- BRGM RP-70842- FR). La modélisation des résultats de l'essai de pompage de l'ouvrage DEMENT1 se base sur un modèle analytique de type puits interceptant et pompant une fracture verticale recoupant complètement un aquifère, lui-même surmonté d'un aquitard traversé dans lequel sourd une source.

Dans le cadre de l'essai de pompage réalisé sur l'ouvrage DEMENT1 (25 m<sup>3</sup>/h), on calcule que le pompage provoque une réduction du débit de la Vise évalué à 8 m<sup>3</sup>/h en fin d'essai, soit 32 % du débit pompé en DEMENT1. Les caractéristiques hydrauliques déduites du modèle indiquent que la transmissivité et l'emmagasinement de l'aquifère, respectivement 8,0x10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s et 10<sup>-3</sup>, sont élevées et caractéristiques d'un milieu très fracturé/karstifié.

Néanmoins, comme la modélisation est réalisée au puits de pompage, la valeur de l'emmagasinement n'est qu'approximative. La perméabilité de l'aquitard (défini pour une épaisseur unitaire) est de 2x10<sup>-6</sup> m/s, pour un emmagasinement de 5x10<sup>-3</sup>. Le coefficient d'échange source/aquifère ( $\alpha_0$ ) est très élevé ( $\alpha_0 > 5 \times 10^4$ ), typique d'émergence par une zone de fractures très ouvertes (Hunt et M. Smith, 2008).





Figure 24 : Suivi du débit de la source de la Vise (Avril – Mai 2020) et informations liées à la foration du DemT1.

### b) Forage DEMENT2 (BSS004AXZJ)

La modélisation de résultats de l'essai de pompage de l'ouvrage DEMENT2 (Miocène) se base sur un modèle analytique de type modèle d'aquifères compartimentés verticalement (Dewandel *et al.*, 2014). Il considère un puits implanté dans un compartiment central de largeur 2L, de transmissivité T1 et d'emmagasinement S1, et limité dans l'espace par deux compartiments de transmissivité et emmagasinevements différents (T2, S2 et T3, S3). La transmissivité de l'aquifère capté (T1) est de  $2,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  et son emmagasinement (S1) évaluée à  $2 \times 10^{-4}$ . La largeur du compartiment (2L) est évaluée à environ 200 m.

Les valeurs de S1 et 2L sont approximatives car l'essai n'a été suivi qu'au puits de pompage. L'effet de capacité au puits de pompage a été fixé à 0,1 m, soit le rayon du puits et les pertes de charge quadratiques ont été évaluées à  $2,5 \times 10^5 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$ . Ces dernières sont plutôt élevées suggérant que l'ouvrage n'est pas en très bonne connexion hydraulique avec l'aquifère (l'ouvrage est possiblement mal développé ou partiellement colmaté).

### **c) Forage carotté DEMENT3 (BSS004AXZK)**

L'essai par pompage sur DEMENT3 a été réalisé du 11 au 12 janvier 2021 (24h) au début du phénomène d'inversac (T+44 jours) à un débit variant de 1,9 à 4 m<sup>3</sup>/h. Le tubage de soutènement du carottier de 0 à 200 m a permis d'isoler la section 200-300 m de profondeur durant l'essai par pompage. Le niveau statique avant essai était de 4 m/repère. Les ouvrages DEMENT1, DEMENT2, F3, F4, F5, F6 et F10 ont été suivis en niveau durant l'essai et n'ont pas réagi à l'essai.

Le diagnostic de l'essai de pompage réalisé sur DEMENT3 à l'aide de la méthode des dérivées des rabattements montre que le comportement hydraulique de l'ouvrage est, dans les premières minutes de pompage, influencé par un effet de puits possiblement combiné à l'effet de fractures interceptés par le puits et que très rapidement (au bout de 10 mn), la dérivée décrit une pente de -1 caractéristique d'une limite à potentiel imposé (limite d'alimentation). Ce dernier comportement est typique de la proximité d'une zone très perméable située à proximité du puits de pompage (Abbaszadeh et Cinco-Ley, 1995). Il peut s'agir d'une zone de faille, d'un conduit karstique, situés à proximité immédiate du forage.

Pour modéliser le comportement hydraulique, une nouvelle solution mathématique a été développée dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau qui a fait l'objet d'une publication scientifique (Dewandel *et al.*, 2022). La solution mathématique résout le cas d'un puits interceptant et pompant une fracture située à proximité d'une zone perméable ou non, verticale.

Pour le cas d'étude DEMENT3 (cf. L10- BRGM RP-70842- FR), la fracture pompée a une demi-longueur de 6,3 m, elle est parallèle à la discontinuité perméable ( $\alpha=90^\circ$ ), et est très proche de la zone perméable aux environs de 4 m d'après ce modèle. La transmissivité de l'aquifère capté (T1) est de  $4,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  et son emmagasinement (S1) évaluée à  $2 \times 10^{-4}$ . S1 est approximatif, pour les mêmes raisons évoquées que pour les essais précédents. La largeur de la zone perméable est estimée, approximativement à 1 m, sa transmissivité  $T^*$  à  $5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ , son emmagasinement  $S^*$  à  $10^{-1}$  et son anisotropie de transmissivité  $T^*_y/T^*_x$  à 10,0. Les propriétés du compartiment à l'opposé de la zone perméable ont été fixées identiques à celles du compartiment pompé ( $T_2=T_1$ ,  $S_2=S_1$ ). Les pertes de charge quadratiques sont estimées à  $3,8 \times 10^6 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$  et l'effet de capacité à 0,1 m.

### **d) Forage carotté DEMENT4 (BSS004CLMU)**

Deux essais par pompage de 24h ont été réalisés sur le forage DEMENT4 (ou Claudine IV) profond de 759,5 m. Ces deux essais ont été réalisés en contexte d'inversac. Le premier à 4,6-4,7 m<sup>3</sup>/h, effectué du 15 au 16 décembre 2021 a concerné les horizons compris entre 620 m et 759 m de profondeur, et le second, à 4,5 m<sup>3</sup>/h, du 17 au 18 décembre 2021, sur les horizons compris entre 390 à 759 m de profondeur. Durant ces essais, le tubage de soutènement du carottier a permis d'assurer l'isolation des niveaux supérieurs.

Le diagnostic de l'essai de pompage réalisé sur DEMENT4 à l'aide de la méthode des dérivées des rabattements montre que le comportement hydraulique de l'ouvrage DEMENT4 est assez semblable à celui de l'ouvrage DEMENT3.

Durant les premiers temps du pompage (entre 1 et 2 h environ), les courbes des dérivées indiquent l'existence d'un effet de fractures interceptées par le puits possiblement combiné à un effet de puits, puis dans un second temps, l'existence d'un écoulement pseudo-radial à radial à partir duquel la transmissivité de l'aquifère a été estimée pour les horizons compris entre 620 et 760 m de profondeur ( $T = 6 \text{ à } 7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ), puis pour ceux compris entre 390 m et 760 m de profondeur ( $T = 8 \text{ à } 9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ). À partir de 500 min de pompage (essai entre 759 et 620 m) ou environ 100 min de pompage (essai entre 390 et 759 m), la dérivée des rabattements diminue, ce qui traduit une alimentation par une ou des zones plus perméables (zones de failles perméables, conduits karstiques, etc.) situées à proximité du forage.

Pour modéliser le comportement hydraulique des essais, c'est la solution analytique précédemment développée pour le DEMENT3 (Dewandel *et al.*, 2022) qui a été utilisée. Dans les modèles DEMENT4, la demi-longueur de la fracture pompée est comprise entre 140 à 180 m, la fracture est parallèle à la discontinuité perméable ( $\alpha=90^\circ$ ). Selon les résultats des modèles (essais de pompages 1 et 2), les zones perméables sollicitées par le pompage seraient situées aux environs de 200 m pour l'essai sur la zone 760-620m et aux environs de 60 m pour celui de la zone 390-759 m. La transmissivité des niveaux aquifères captés (T1) est de  $6,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  pour la zone 760 - 620m et de  $8,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  pour la zone entre 390 et 760 m (T2). Par différence, on en déduit donc qu'entre 390 et 620 m de profondeur, les formations sont peu transmissives, aux environs de  $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . Les valeurs d'emménagement déduites (S1) sont aux environs de  $1 \text{ à } 2 \times 10^{-4}$ ; cependant et pour les mêmes raisons évoquées que pour les essais précédents ces valeurs sont approximatives car estimées au puits de pompage. La largeur des zones perméables sollicitées par les pompages sont estimées, approximativement à quelques mètres (1 à 3 m suivant l'essai), leur transmissivité  $T^*$  de  $1 \text{ à } 4 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$  et leur emménagement  $S^*$  de  $0,15 \text{ à } 2 \times 10^{-1}$ . L'anisotropie de transmissivité de ces zones a été fixée à 1,0 ( $T^*_y/T^*_x$ ) et les propriétés du compartiment à l'opposé des zones perméables ont été fixées identiques à celles du compartiment pompé ( $T_2=T_1$ ,  $S_2=S_1$ ). Les pertes de charge quadratiques sont estimées à  $4 \times 10^5 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$  pour l'essai entre 760 et 620 m, et à  $5 \times 10^4 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$  pour celui entre 390 et 760 m ; les effets de capacité lié aux puits sont négligeables ici.

#### 4.4.4. Informations géochimiques des nouveaux forages

Les prélèvements effectués au cours des essais des pompages sur les ouvrages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4 ont permis d'acquérir des données géochimiques inédites sur l'origine des fluides en fonction de la profondeur, les temps de résidence et également de préciser les relations hydrauliques entre le gisement thermal et l'aquifère karstique de sub-surface et plus globalement sur l'organisation des écoulements. La valorisation des résultats géochimiques est détaillée dans les livrables L5a et L5b (BRGM/RP-71281-FR et BRGM/RP-71957-FR).

Les eaux des ouvrages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4 ont des faciès chlorurés sodique et potassique. Les caractéristiques physico-chimiques sont les suivantes :

- les eaux échantillonnées à DEMENT1 (avant inversac) entre 130 et 170 m de profondeur dans le Jurassique supérieur présentent une température de l'ordre de  $19,8^\circ\text{C}$ , une conductivité électrique comprise entre 1,98 mS/cm et 2,6 mS/cm (*Cl entre 378 et 563 mg/L*). Les teneurs en oxygène dissous sont supérieures à 5 mg/L, les potentiels redox des eaux sont positifs ( $>100 \text{ mV}$ ) ;
- les eaux échantillonnées à DEMENT2 (avant inversac) entre 20 et 40 m de profondeur dans la formation miocène sus-jacent présentent une température de  $24,5^\circ\text{C}$  en moyenne, une conductivité électrique comprise entre 12,36 mS/cm et 11,58 mS/cm (*Cl entre 3 592 et 3 223 mg/L*). Les teneurs en oxygène dissous sont faibles de l'ordre de 1 mg/L, les potentiels redox des eaux ne sont pas connus ;

- les eaux prélevées dans le DEMENT3 (pendant inversac) entre 200 et 300 m de profondeur dans le Jurassique présentent une température de 22 °C et une minéralisation comprise entre 25,1 et 27,3 mS/cm (*Cl entre 8 629 et 9 820 mg/L*) en fin de pompage (prélèvement 44 jours après le déclenchement du phénomène d'inversac de 2020). Les teneurs en oxygène dissous sont faibles <0.3 mg/L, les potentiels redox des eaux sont négatifs (<-100 mV) ;
- les eaux prélevées dans le DEMENT4 (pendant inversac) entre 620 et 760 m de profondeur dans le Jurassique moyen présentent une température comprise entre 25,9 °C et 26,3 °C et une minéralisation comprise entre 5,82 et 11,36 mS/cm (*Cl entre 1 808 et 3 750 mg/L*) en fin de pompage (prélèvements 382/383 jours après le déclenchement du phénomène d'inversac de 2020). Les teneurs en oxygène dissous sont très faibles (<0.3 mg/L), les potentiels redox des eaux sont négatifs (<-100 mV) ;
- les eaux prélevées dans le DEMENT4 (pendant inversac) entre 390 et 760 m de profondeur dans le jurassique moyen présentent une température comprise entre 25,9 °C et 26,3 °C et une minéralisation comprise entre 7,34 et 11,11 mS/cm (*Cl entre 2 389 et 3 803 mg/L*) en fin de pompage (prélèvements 384/385 jours après le déclenchement du phénomène d'inversac de 2020). Les teneurs en oxygène dissous sont très faibles (<0.3 mg/L), les potentiels redox des eaux sont négatifs (<-100 mV).

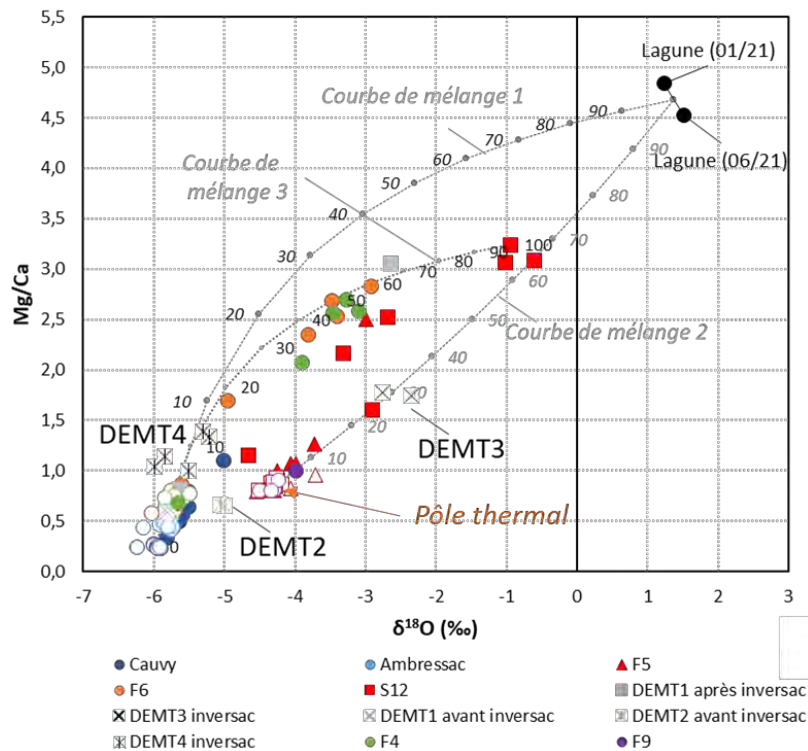


Figure 25 : Rapport Mg/Ca en fonction de  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux étudiées (2018-2021), extrait du rapport BRGM/RP-71281-FR, Ranchoux et al. 2022.

Nota de la Figure 25. Les figurés vides correspondent aux campagnes spatiales et mensuelles i.e. en condition normale (2018-2020) et les figurés pleins aux campagnes liées à l'inversac (2020-2021). Les courbes représentent les évolutions des mélanges à deux pôles (pôle karstique : moyenne des valeurs de Cauvy sur la période 2018-2020, pôle thermal : moyenne des valeurs de F9 sur la période 2018-2019, et pôle marin : valeur moyenne de la lagune prélevée en 2021). La courbe de mélange 3 correspond à un mélange entre le pôle karstique et un pôle impacté par l'inversac, caractérisé par les eaux de S12 en fin d'inversac.



**a) Forage DEMENT1 (BSS004AXZH)**

En replaçant les nouvelles données collectées dans le contexte géochimique de la presqu'île de Balaruc (Figure 25), les résultats de l'ouvrage DEMENT1 permettent de montrer que l'eau échantillonnée (avant l'inversac) a des caractéristiques chimiques et isotopiques proches de celles de la Vise ce qui indique que les eaux proviennent du même réservoir. Dans le détail on montre que les eaux échantillonnées résultent d'un mélange entre l'eau du karst amont (CGE-Tennis et/ou P4-Balm) et une eau d'origine thermique (type Forage F9), respectivement  $95 \% \pm 1 \%$  et  $5 \% \pm 1 \%$ . Dans les conditions de fonctionnement « normales », les eaux du forage DEMENT1 sont comparables à celles de la Vise, les tests hydrauliques attestent de la connexion hydraulique entre ces ouvrages. Le forage F6 est en très bonne connexion hydraulique avec l'aquifère du Jurassique sous-jacent, la qualité des eaux indique que l'ouvrage apparaît fortement alimenté par l'eau jurassique de type « non minéral » caractérisé par le DEMENT1/Vise mais également par une contribution d'eau thermique. Les fluctuations de minéralisation observé au forage F6 avant l'inversac sont expliquées par l'évolution des contributions relatives de ces deux composantes (pôle karst/pôle thermal).

**b) Forage DEMENT2 (BSS004AXZJ)**

Les eaux du forage DEMENT2 au sein du Miocène apparaissent plus minéralisées et plus chaudes que les eaux karstiques du compartiment jurassique sous-jacent qualifié par DEMENT1 et/ou la Vise. La position des points de DEMENT2 dans les diagrammes (Figure 25 et cf. BRGM/RP-71957-FR, Ranchoux *et al.* 2022) montrent l'existence d'un mélange avec les eaux thermales et les eaux karstiques de la presqu'île, respectivement  $45 \% \pm 5 \%$  et  $55 \% \pm 5 \%$ . La composante karstique qui contribue au mélange est récente (quelques années à dizaines d'années) comme le témoigne les informations des gaz dissous anthropiques (CFC/SF6). L'aquifère jurassique présente une charge hydraulique supérieure à celle mesurée dans l'aquitard miocène ce qui rend possible le phénomène de drainance ascendante entre les formations. Les résultats géochimiques suggèrent qu'un flux d'échange privilégié se produit également entre les eaux thermales et le Miocène très vraisemblablement dans le voisinage proche de la source thermique (S12).

**c) Forage carotté DEMENT3 (BSS004AXZK)**

Les eaux prélevées dans le Jurassique supérieur (DEMENT3 entre 200 et 300 m de profondeur) au cours du test de pompage réalisé du 11 au 12 janvier 2021, soit 44 jours après le déclenchement du phénomène d'inversac, présentent une forte minéralisation (de l'ordre de 27,3 mS/cm) en comparaison à celle mesurée dans l'aquifère (entre 130 et 170 m de profondeur, DEMENT1) avant le phénomène d'inversac (autour de 2 mS/cm). La position des points de DEMENT3 dans les diagrammes (Figure 25 et cf. BRGM/RP-71957-FR, Ranchoux *et al.* 2022) pourrait laisser suggérer l'existence d'un mélange avec les eaux thermales et une eau d'origine marine, évalué respectivement à 70 % d'eau thermique et 30 % d'eau d'origine marine. Les isotopes du strontium permettent de préciser l'origine des eaux mobilisées par le pompage, les signatures apparaissent expliquées par un mélange à trois composantes (56 % d'eau d'origine karstique ; 14 % d'eau d'origine thermique et 30 % d'eau marine. La proportion d'eau thermique demeure stable au cours du pompage contrairement à la contribution d'eau marine qui augmente (34 %) au détriment de la part karstique (21 %). Les informations apportées par le chlore 36 suggèrent que la signature de l'eau matricielle principalement mobilisée en début de pompage est très comparable à celle mesurée dans le forage F8 ce qui pourrait indiquer que l'eau de la matrice est ancienne. Dans ce contexte, l'origine de la salinité impliquée dans le mélange du DEMENT3 demande à être questionnée et précisée.

En effet, plusieurs hypothèses sont envisageables comme cela est représenté sur le schéma conceptuel (Figure 26). Les interprétations du test hydraulique permettent de quantifier les flux d'eau apportés par la zone perméable sollicitée par le pompage (L10-BRGM RP-70842- FR, Ladouche *et al.*, 2022). En fin de pompage, environ 70 % du flux pompé proviendrait de la zone perméable selon les estimations réalisées. À partir de la salinité de l'eau pompée, calculée à partir des données de suivi de la conductivité, l'eau issue de la zone perméable aurait une salinité voisine de 21,2 g/L et celle de la matrice de l'aquifère où est implanté l'ouvrage serait de l'ordre de 10 g/L, soit une valeur assez proche de celle du pôle thermal F8 (entre 8,8 g/L). L'ouvrage DEMENT1 qui, on l'a vu, est très bien connecté à la Vise, présentait à la même période une teneur en chlorure de 10 g/L et les eaux de la source S12 (également bien connecté à la Vise) des teneurs en Cl de 15,5 g/L. **Dans ce contexte, les structures perméables du karst semblent être les vecteurs de l'eau salée absorbée par la Vise. Ces éléments suggèrent que ce serait le modèle 1b qui serait le plus à même de décrire les évolutions hydrodynamiques et géochimiques observées au cours du pompage.**

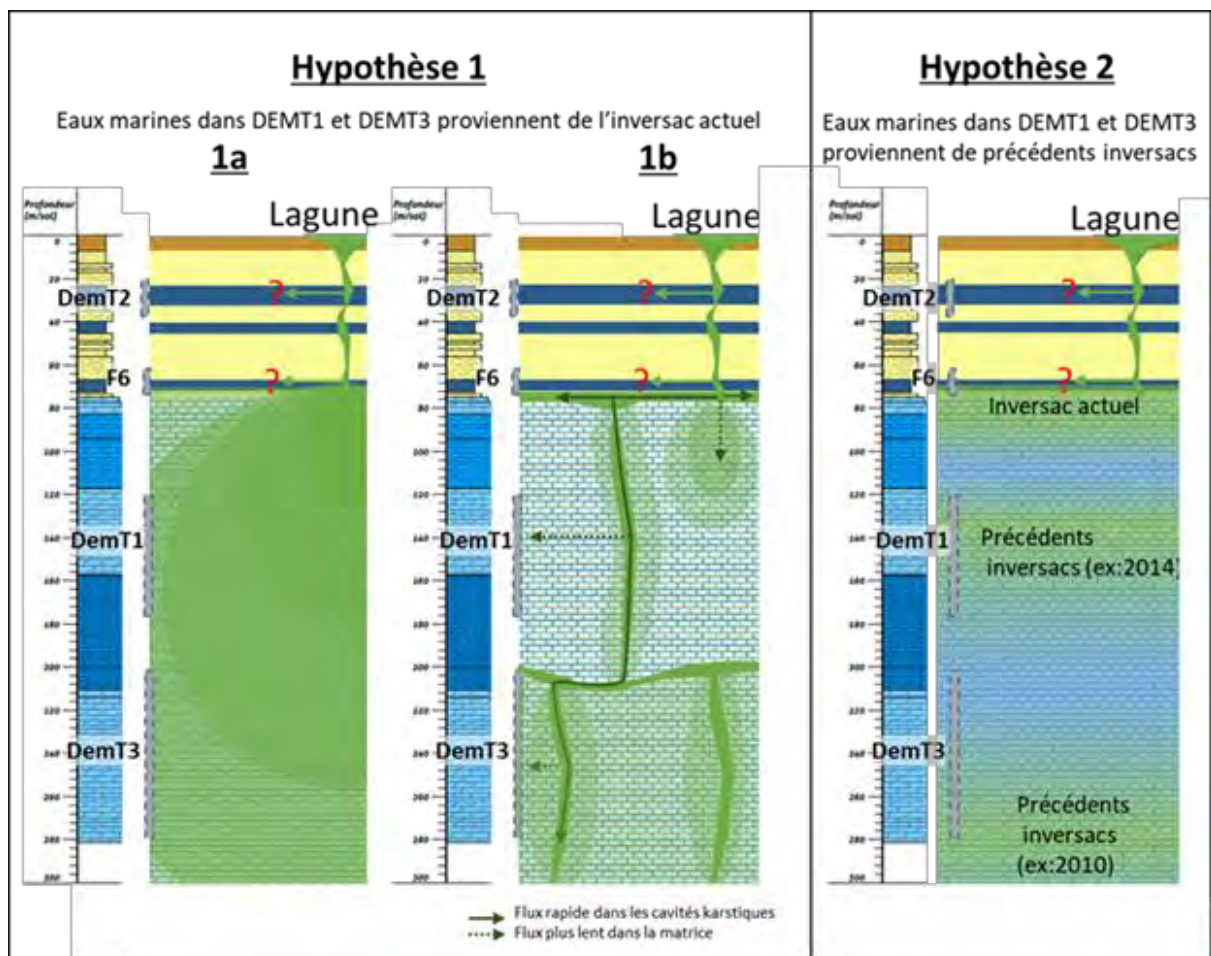


Figure 26 : Schémas conceptuels présentant les hypothèses possibles de l'origine de la part d'eau marine des échantillons d'eau des ouvrages F6, DEMENT1 et DEMENT3 prélevés au cours de l'inversac 2020-2022 (extrait du rapport BRGM/RP-71281-FR, Ranchoux et al. 2022).

#### d) Forage carotté DEMENT4 (BSS004CLMU)

Les eaux prélevées dans le Jurassique moyen (DEMENT4 entre 620 et 759 m de profondeur) sont globalement assez froides (25 °C/26 °C) compte tenu de leurs profondeurs et du gradient géothermique.

En considérant une température moyenne de recharge de 15 °C, et un gradient géothermique moyen de +3 °C/100 m, des températures de l'ordre de 36 °C auraient pu être attendues pour ces eaux profondes. L'anomalie négative de température témoigne globalement de circulations karstiques actives à ces profondeurs, l'étude des minéralisations de calcite dans les fractures analysées en microscopie en lumière naturelle et en cathodoluminescence (cf. § 3.4) permettent de conforter ce résultat.

Les évolutions de minéralisation observées au cours des tests hydrauliques sur DEMENT4 témoignent de l'existence de mélange comme démontré en exemple, par la signature isotopique du strontium (Figure 27). Du point de vue hydraulique, l'ouvrage sollicite assez rapidement (500 mn ou 100 mn selon la profondeur sollicitée) une structure perméable caractérisée par des eaux nettement plus minéralisées que celles mobilisées dans la matrice du réservoir en début de pompage. L'échantillonnage d'eau réalisé en début de pompage T0+4h au cours du premier test (620-759 m) permet de qualifier la signature géochimique de la matrice carbonatée selon les résultats de l'étude hydraulique de l'ouvrage, le second prélèvement (T0+24h) constitue un mélange entre l'eau de la matrice et l'eau en provenance de la zone perméable identifiée à environ 200 m du puits de pompage.

Les eaux profondes échantillonnées à T0+4h dans la matrice carbonatée sont très singulières en comparaison des eaux du Jurassique supérieur (DEMENT1) ou des eaux thermales (F9). Les eaux apparaissent très enrichies en Mg (210 mg/L), Li (185 µg/L) et Sr (16 864 µg/L) ; compte tenu de leurs concentrations en Cl (1 808 mg/L), les rapports isotopiques du strontium sont faibles ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.707539$ ) en comparaison des autres signatures karstiques de la zone d'étude ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.7082$ , cf. BRGM/RP-71281-FR, Ranchoux *et al.* 2022). La signature carbone 13 des eaux et l'activité  $^{14}\text{C}$  des eaux indiquent par ailleurs que les eaux du réservoir en profondeur ont subi d'importantes interactions eau-roche en présence de  $\text{CO}_2$  dissous d'origine profonde (probablement issu du socle sous-jacent, cf. BRGM/RP-71957-FR, Ranchoux *et al.* 2022). L'enrichissement en lithium des eaux de DEMENT4 par rapport à la droite de dilution des eaux de mer apparaît bien plus important que celui précédemment mis en évidence pour les eaux thermales (cf. BRGM/RP-71281-FR, Ranchoux *et al.* 2022) ce qui suggère un flux d'apport d'eau du socle plus important. La systématique isotopique du lithium demandera à être étudiée plus précisément dans le futur car les signatures isotopiques du DEMENT4 ( $\delta^7\text{Li} = 19,3 \text{ ‰}$ ) ne résultent pas d'un simple mélange entre une eau de socle (pôle théorique de la littérature) et une eau marine ce qui suggère l'existence d'un fractionnement isotopique en lien avec la température de l'eau au sein du réservoir comme déjà mis en évidence dans la littérature dans d'autre contexte hydrogéologique (Milot *et al.*, 2010). Le rapport B/Cl des eaux du forage DEMENT4 suggère également l'existence du phénomène d'absorption du bore vraisemblablement sur les horizons marneux identifiés sur les carottes, ce processus n'a pas été mis en évidence sur le DEMENT3. Les isotopes du bore ( $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ ) ne permettent pas de qualifier le processus d'absorption (qui se traduit par un enrichissement isotopique en  $^{11}\text{B}$ ) probablement en raison de la participation d'eau du socle qui selon la littérature est très appauvrie en isotopes lourds ( $^{11}\text{B}$ ).

Les teneurs en chlorure du DEMENT4 en début de pompage sont significativement supérieures aux eaux karstiques échantillonnées dans le Jurassique supérieur (respectivement 1 808 mg/L et de l'ordre de 20 à 25 mg/L pour les eaux karstiques). La contribution du pôle marin est évaluée à  $9 \text{ ‰} \pm 2 \text{ ‰}$  à l'aide des concentrations en chlorure. L'origine de ces teneurs élevées en chlorure a été évaluée dans cette étude. Les informations isotopiques apportées par les isotopes du strontium et le chlore 36 suggèrent une origine thermique toutefois, on ne peut pas exclure la

participation d'une eau marine de type « pôle marin actuel » (d'après les informations isotopiques du strontium), ce qui pourrait s'interpréter comme une conséquence du/des phénomènes d'inversac. Les très faibles valeurs des gaz dissous anthropiques SF6 et CFC mesurées dans l'ouvrage DEMENT4 suggèrent également que les fluides mobilisés par le pompage proviennent des eaux thermales sus-jacentes (type F5/F9) elles-mêmes influencées par mélange par des eaux karstiques chargées en CFC et SF6.

Ces résultats suggèrent donc que les communications entre le Jurassique supérieur et le Jurassique moyen sont possibles et « activables » en situation de pompage très probablement par les structures perméables identifiées par les tests hydrauliques. Selon les hypothèses considérées en entrée pour le pôle karstique, les résultats du modèle d'évolution théorique du rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  au sein d'un réservoir carbonaté suggèrent que l'âge apparent chlore 36 des eaux de la matrice serait compris entre 15 000 et 55 000 ans. Lors du second test de pompage (DEMENT4 entre 390 et 760 m de profondeur), l'âge apparent chlore 36 des eaux a tendance à augmenter au cours du pompage en raison de l'augmentation de la participation d'eau ancienne d'origine thermique (évaluée à  $15\% \pm 6\%$  en fin de pompage par les isotopes du strontium).

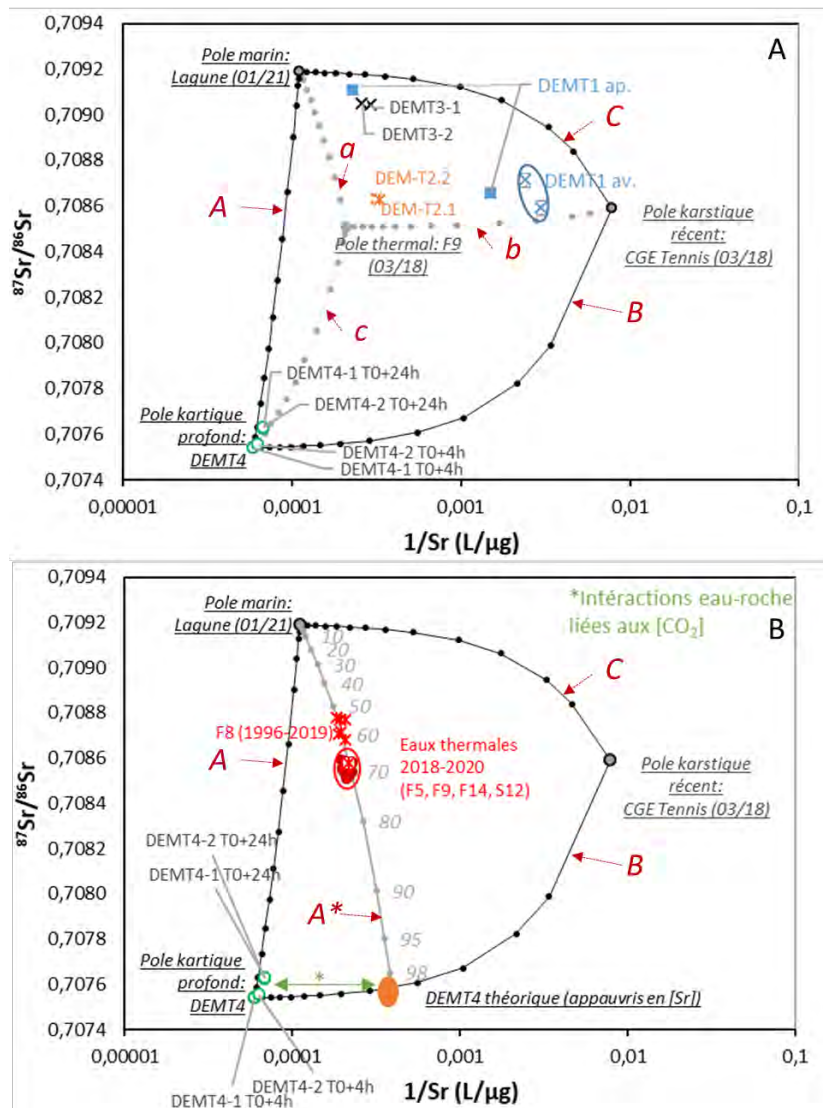


Figure 27 : Rapport isotopique  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en fonction de l'inverse de la concentration en Sr.



Nota de la Figure 27 : La courbe (A) représente la courbe de mélange théorique entre le pôle marin actuel (Mer/ou Lagune) et les eaux profondes du forage DemT4. La courbe (B) représente la courbe de mélange théorique entre les eaux du pôle karstique actuel de sub-surface et les eaux profondes du forage DEMENT4. La courbe (C) représente la courbe de mélange théorique entre les eaux du pôle karstique actuel de sub-surface et le pôle marin actuel (Mer/ou Lagune). La courbe (a) représente la courbe de mélange théorique entre le pôle marin actuel (Mer/ou Lagune) et les eaux thermales qualifiées à l'aide du forage F9. La courbe (b) représente la courbe de mélange théorique entre les eaux du pôle karstique actuel de sub-surface et les eaux thermales qualifiées à l'aide du forage F9.

La courbe (c) représente la courbe de mélange théorique entre les eaux thermales qualifiées à l'aide du forage F9 et les eaux profondes du forage DEMENT4. La courbe(A\*) représente la courbe de mélange théorique entre le pôle marin actuel (Mer/ou Lagune) et les eaux profondes du forage DEMENT4 qui n'ont pas subi d'interaction eau-roche en présence de CO2 dissous d'origine profonde (pôle théorique estimé).

Pour DEMENT1, les points désignés par « av » correspondent aux eaux prélevées avant inversac pendant l'essai de pompage longue durée, les points désignés par « ap » ont été prélevés pendant l'inversac.

## 5. Nouvelles connaissances hydrogéologiques

### 5.1. ESSAIS PAR POMPAGE

Une trentaine d'essais par pompage, pour la plupart issus des bases de données en BSS et auprès des bureaux d'études ont été réinterprétés afin d'avoir une caractérisation aussi claire que possible de la structure géométrique et des propriétés hydrodynamiques du ou des aquifères qui constituent le système aquifère karstique et thermal du secteur de Balaruc-Sète (BRGM/RP-68483-FR et BRGM/RP-70842-FR, Ladouche *et al.*, 2019 ; 2022). Parmi ces essais, six ont été réalisés dans le cadre du projet, un au stade Michel à Sète en 2018 (Jurassique) et les cinq autres sur la plateforme expérimentale de Balaruc-les-Bains : DEMENT1 (Jurassique) et DEMENT2 (Plio-Miocène) en 2020, DEMENT3 (Jurassique, rebouché) en janvier 2021 et deux essais sur le forage profond DEMENT4<sup>6</sup> en décembre 2021 (Jurassique).

La technique mise en œuvre pour interpréter et modéliser les essais s'appuie sur les méthodes de diagnostic (Bourdet *et al.*, 1986) qui servent à identifier les régimes d'écoulement et à choisir le ou les modèles mathématiques les mieux appropriés pour modéliser les essais. Les modèles qui ont été utilisés sont nombreux : modèles à drainance, à fracture, à limites de réservoirs, à compartimentation verticale, proximité de structures drainantes en profondeur, ou des combinaisons de modèles, montrant la complexité du système aquifère étudié (cf. § 4.4.3 pour les démonstrateurs). Pour le forage profond, les horizons profonds sollicités dans le Jurassique moyen entre 620 et 759 m de profondeur, et le deuxième entre 390 et 759 m de profondeur, montrent durant les premiers temps du pompage un écoulement dominé par la présence de fractures perméables interceptées par l'ouvrage et aux temps intermédiaires des écoulements radiaux à partir desquels la transmissivité des parties pompées sont estimées (de 6 à  $9 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s suivant l'essai). Enfin sur les temps longs (à partir de 100 à 500 min suivant l'essai) l'analyse met clairement en évidence la présence de zones très perméables à proximité de l'ouvrage qui dominent l'écoulement. Ces structures perméables sont soit des fractures ouvertes soit des conduits karstiques de dimension notable. La solution mathématique qui a été utilisée pour modéliser ces essais a été développée dans le cadre de ce projet, et résout le cas d'un puits interceptant et pompant une fracture située à proximité d'une zone perméable - ou non - verticale (Dewandel *et al.*, 2022).

La comparaison des propriétés hydrodynamiques déduites des essais par pompage réalisés sur les ouvrages DEMENT1, DEMENT2 et, DEMENT3 et DEMENT4 (Claudine IV) aux autres données disponibles dans le secteur d'étude (informations consignées dans le rapport de synthèse générale de début de projet, BRGM/RP-68483-FR (Ladouche *et al.*, 2019)), apporte un éclairage intéressant sur les propriétés du réservoir Jurassique. Les nouvelles données (Figure 28) sont cohérentes des autres informations disponibles sur le Mio-Pliocène (DEMENT2) et sur le Jurassique fracturé/karstifié au niveau de la presqu'île de Balaruc (DEMENT1, DEMENT3 et des deux horizons testés sur l'ouvrage profond DEMENT4). On notera néanmoins les faibles transmissivité/perméabilité au niveau de DEMENT3 (intervalle 200-300 m) et DEMENT4 (intervalle 390-759 m), montrant que lorsque le milieu n'est pas recoupé par des structures perméables (fractures/conduits) les propriétés aquifères sont faibles, environ 1 000 à 3 000 fois moins perméables que la perméabilité moyenne du système fracturé/karstifié. Dans ce cas, il s'agit essentiellement des propriétés matricielles du Jurassique.

---

<sup>6</sup> DEMENT4= Claudine IV

Les propriétés de la zone perméable mise en évidence à quelques mètres du forage DEMENT3, et celles situées à quelques dizaines à centaines de mètres sur DEMENT4, comme celle mise en évidence au droit de DEMENT1, ont par contre des valeurs les plus importantes, attestant de structures locales de dimension métrique très drainantes repérées à la foration.

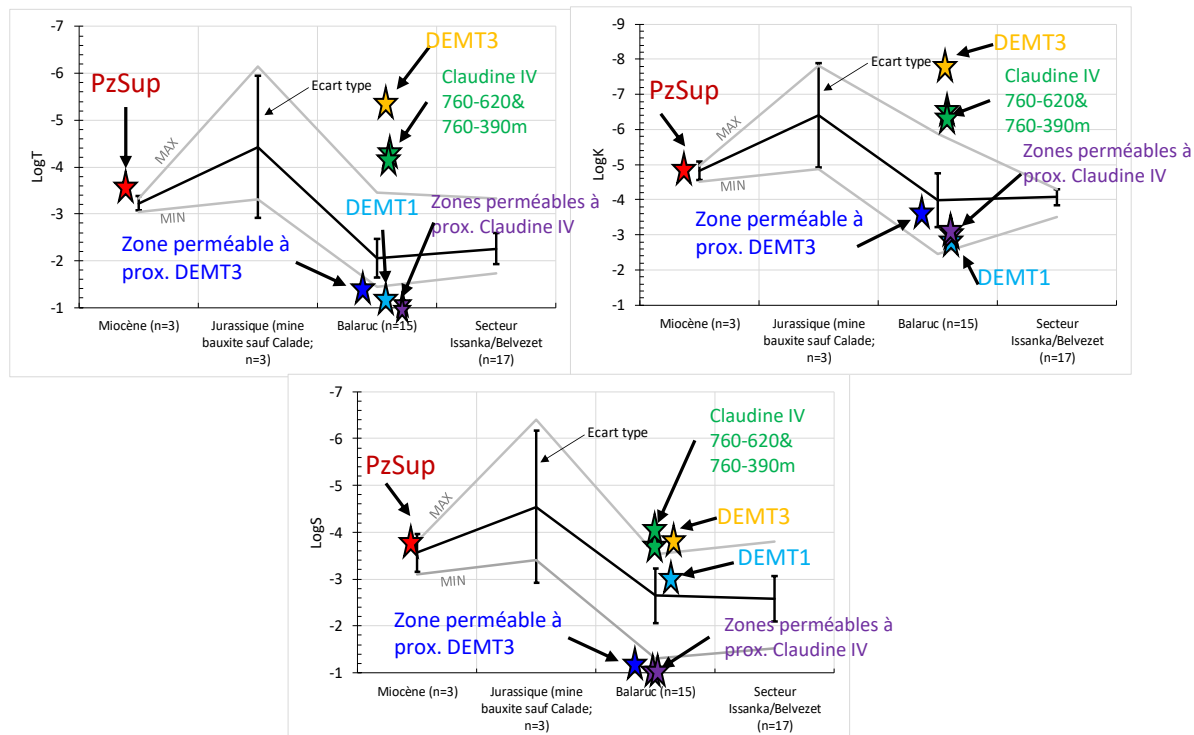


Figure 28 : Comparaison des transmissivités (graphe haut-gauche), perméabilités (graphe haut-droite) et des emmagasinevements (graphe du bas) déduits des essais sur les forages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4 aux données disponibles sur le secteur : Miocène, aquifères fracturés-karstifiés du Jurassique sur les mines de Bauxite (Villeveyrac), de Balaruc (Thermes) et du secteur Issanka-Belvezet. Extrait de Ladouche et al., 2021.

## 5.2. ESSAIS DE TRAÇAGES ARTIFICIELS

La tâche relative aux opérations de traçage est détaillée dans le rapport [BRGM/RP-71758-FR](#) (Leonardi *et al.*, 2022). Seuls les objectifs et les principaux résultats sont repris dans ce paragraphe.

Cette tâche avait pour objectifs de :

1. Synthétiser l'ensemble des connexions hydrauliques mises en évidence par traçage dans le secteur d'étude, et principalement sur un axe reliant la zone de recharge constituée par le Causse d'Aumelas aux différents exutoires karstiques ;
2. Proposer de nouveaux essais de traçages pour mieux comprendre l'organisation du drainage depuis le massif de la Gardiole vers les sources de Cauvy et d'Ambressac ;
3. Réaliser un ensemble de traçage depuis le puits aménagé de la source de la Vène jusqu'aux exutoires d'Issanka pour étudier l'évolution des modalités de transport, et notamment le taux de restitution selon les conditions hydrologiques.

Cette opération avait pour but de préciser le fonctionnement d'une possible difffluence des eaux tracées vers l'exutoire de la Vise.

La synthèse bibliographique sur les traçages antérieurs a notamment permis de valoriser les traçages récents réalisés depuis la cavité du Puits de l'aven dans le Coulazou en 2010 (Selles *et al.*, 2011), ainsi que le traçage réalisé depuis la Vise en 2008 lorsque celle-ci fonctionnait en inversac (Brunet *et al.*, 2008).

Concernant le second objectif, un essai de traçage a été réalisé depuis le forage du Cèdre ([BSS003CJN1](#)) après avoir réalisé une inspection par caméra de cet ouvrage. Aucun autre point plus propice à une injection depuis le massif de la Gardiole n'a pu être trouvé. Le suivi de ce traçage aux sources de Cauvy et d'Ambressac a été perturbé par la mise en place du confinement de 2020 et n'a donné aucun résultat exploitable.

Le troisième objectif a été atteint par la réalisation de huit essais de traçages pour des conditions hydrologiques différentes mais proches du régime permanent lors de la restitution, couvrant ainsi l'ensemble des conditions hydrologiques jusqu'au débordement de la source de la Vène. La figure suivante (Figure 29) présente les résultats obtenus pour les courbes de restitution. Une description détaillée de ces opérations est donnée dans le rapport [BRGM/RP-71758-FR](#).

La figure suivante (Figure 29) présente les résultats obtenus pour les courbes de restitution. On peut remarquer que la forme de ces courbes est très différente selon les conditions hydrologiques (Figure 29 A) : pour les traçages réalisés en hautes eaux (en bleu, vert et jaune), la courbe présentera une forte asymétrie entre l'arrivée très rapide et le départ plus lent du traceur, laissant apparaître un pic de concentration très marqué ; tandis que pour les traçages réalisés en basses eaux (en orange et rouge), la courbe aura une allure plus classique, avec une queue de courbe de restitution cohérente avec la vitesse d'arrivée du traceur. La représentation semi-logarithmique (Figure 29 B) montre que toutes les courbes présentent une évolution asymptotique exponentielle, avec une pente comparable d'une courbe à l'autre.



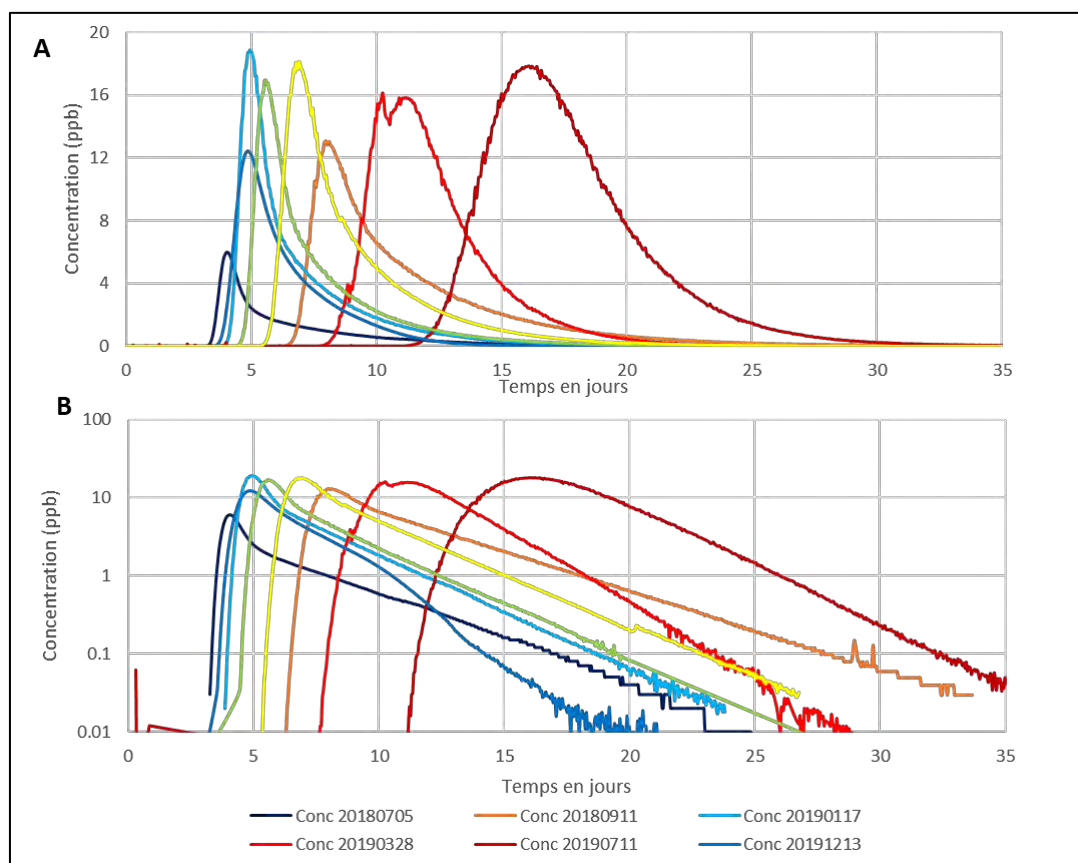


Figure 29 : Courbes de restitution des huit traçages réalisés entre la source de la Vène et les sources d'Issanka, avec une représentation linéaire (A) et semi-logarithmique (B).

L'interprétation des résultats n'a pas permis de mettre en évidence une évolution significative du taux de restitution selon les conditions hydrologiques. La fluorescence suivie à la source de la Vise de manière discontinue du fait de la détérioration des sondes par la salinité n'a pas permis de mettre en évidence le passage du traceur. Au-delà des difficultés techniques, il est probable que la dilution, ainsi que la dispersion associée au temps de transfert beaucoup plus long conduisent à des concentrations à la Vise probablement en dessous du seuil de détection des appareils, de l'ordre du ppb.

La réalisation de cette opération de traçages successifs n'a donc pas permis de mieux comprendre le fonctionnement d'une éventuelle diffuence alimentant la source de la Vise.

Une modélisation analytique s'appuyant sur les concepts monodimensionnels d'advection/dispersion a été proposée à l'aide du logiciel TRAC (Gutierrez *et al.*, 2013) pour reproduire le transfert dans le réseau karstique. Deux modèles analytiques ont été testés :

- un modèle 2D représentant deux chemins représentatifs d'un transport advectif-dispersif et utilisant cinq paramètres ;
- un modèle d'écoulement proposé dans le cadre de ce projet : ce modèle appelé EDM correspond à la mise en série d'un modèle dispersif et d'un modèle de mélange parfait exponentiel.

Il nécessite de caler trois paramètres relatifs au temps de déplacement par advection, le temps de stockage dans le réservoir exponentiel et un terme de répartition pour court-circuiter le réservoir de stockage, sachant qu'un 4<sup>e</sup> paramètre relatif à la dispersion était fixé et commun à l'ensemble des simulations (nombre de Péclet de 200).

Seul le modèle EDM permet de parfaitement reproduire la forme des courbes de restitution à long terme et leur comportement asymptotique, observable sur la Figure 29B. L'interprétation des résultats obtenus selon ce modèle montre qu'une part variable du flux de traceur séjourne dans un réservoir parfaitement mélangé pendant une durée de +/-3 jours avant d'être transporté par le réseau karstique jusqu'aux sources d'Issanka, quelles que soient les conditions hydrologiques. Ainsi, en crue, ce stockage temporaire aura une forte influence sur la dissymétrie de la courbe obtenue tandis qu'en basses eaux ce stockage partiel de trois jours deviendra négligeable devant le temps de transfert dans le réseau karstique. La courbe retrouve ainsi en basses eaux une forme classique de restitution selon un modèle d'advection-dispersion (Figure 29).

### **5.3. APPROCHE HYDROGÉOCHIMIQUE / ACTUALISATION DU MODÈLE CONCEPTUEL HYDROGÉOLOGIQUE**

Les analyses géochimiques réalisées dans cadre de DEM'Eaux Thau ont permis d'apporter de nouvelles connaissances sur les circulations des eaux et les mélanges au sein des réservoirs du Jurassique et ont permis une meilleure compréhension des interactions eaux roches (Livrable L5a BRGM/RP-71281-FR, Ranchoux *et al.*, 2022 et Livrable L5b BRGM/RP-71957-FR, Ranchoux *et al.*, 2022). D'un point de vue opérationnel, les caractérisations géochimiques ont été menées à plusieurs échelles de temps et d'espace :

- caractérisation spatiale grâce au suivi d'une vingtaine de points sur l'ensemble du système. Ces prélèvements ont eu lieu entre 2018 et 2019 en période de hautes eaux (mars 2018 et décembre 2019) et en période de basses eaux (août 2018 et mai 2019) (livrable L5a) ;
- caractérisation des évolutions temporelles sur les principaux exutoires d'eau souterraine sur la presqu'île de Balaruc (Vise, Cauvy, Ambressac, CGE Tennis, ancienne source thermale S12, forage thermal F5, forage F6) (livrable L5b). Ces prélèvements ont eu lieu entre janvier 2020 et novembre 2020 ;
- caractérisations des évolutions géochimiques suite au phénomène d'inversac initié le 28 novembre 2020 (livrable L5b) ;
- caractérisations géochimiques inédites sur les ouvrages profonds des plateformes expérimentales mises en œuvre dans le projet (Forage de Sète/Stade Michel ; DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4 sur la presqu'île de Balaruc, (livrables L5a et L5b).

Les données chimiques, isotopiques et de datations acquises au cours du projet sur les sources et forages échantillonnés permettent de préciser les zones d'ombre du schéma conceptuel du bassin karstique de Thau précédemment établi (cf. synthèse dans Ladouche *et al.*, 2019, livrable L1 : BRGM/RP-68483-FR) et également de le questionner. Trois types d'eau principaux alimentent les calcaires de la zone d'étude dans le secteur de la presqu'île de Balaruc qui constitue la zone d'émergence de l'entité karstique étudiée : (1) des eaux karstiques, (2) des eaux thermales et (3) des eaux marines de type mer/lagune actuelle.

Du point de vue conceptuel, **le réservoir des eaux thermales est toujours supposé situé en profondeur ; ces eaux anciennes remonteraient rapidement, de l'ordre d'une dizaine de jours** d'après les informations apportées par les isotopes du radium (Condomines *et al.*, 2012), **vers le toit du Jurassique supérieur, très vraisemblablement en empruntant des fractures le long du chevauchement de Thau**, mis en évidence durant le projet DEM'Eaux Thau, entre la presqu'île de Balaruc et Sète. Ces eaux minérales chaudes se localisent par contraste de densité préférentiellement au toit du réservoir carbonaté et se trouvent plus ou moins bloquées par les couches supérieures imperméables du Miocène, la charge hydraulique au sein du karst étant supérieure à celle des aquitards du Miocène. La présence de gaz anthropiques dans les eaux thermales échantillonnées au sein de la presqu'île de Balaruc met en évidence un apport (faible) d'une eau récente (inférieure à 70 ans) d'origine karstique par phénomène de mélange au sein du réservoir du Jurassique supérieur dans lequel convergent les écoulements de sub-surface et profond de Balaruc.

Les nombreux calculs de mélanges effectués avec de nombreux éléments chimiques (isotopes stables de l'eau, concentration en Na, Cl...), **confirment les proportions proposées dans les études précédentes (Aquilina *et al.*, 2002 ; Pétré *et al.*, 2020) pour les eaux thermales (70 % d'eaux d'origine karstique, 30 % d'eaux d'origine marine)**. L'excès en Ca, Sr et HCO<sub>3</sub> dans ces eaux par rapport à la droite de mélange avec l'eau de mer met en évidence **l'existence d'interactions eau-roche avec les roches carbonatées**. Les isotopes du strontium confirment que ces eaux interagissent et circulent dans une matrice carbonatée **d'âge jurassique. Les forages thermaux F8 et Sète/stade Michel se démarquent des autres ouvrages thermaux par des proportions d'eau de mer et des concentrations en gaz anthropiques plus importantes**. Il a été proposé, au vu des formations géologiques, que ces mélanges soient dus à une intrusion d'eau salée de type mer actuelle possiblement par le pointement du Jurassique qui se trouve dans la lagune de Thau (entre Sète et Balaruc) et/ou directement par un contact de l'eau de mer avec les roches du Jurassique depuis le mont Saint-Clair (Figure 31).

L'étude du lithium permet d'actualiser le schéma conceptuel de structure et de fonctionnement de cet hydrosystème complexe. Les teneurs en lithium des eaux thermales (F9) sont importantes et ne peuvent pas s'expliquer comme le résultat d'un simple mélange entre des eaux marines et des eaux karstiques. Les excès en lithium caractérisés ne sont pas liés à des interactions eau-roche avec les carbonates du Jurassique car les calcaires contiennent très peu de lithium. Les fortes concentrations en lithium des eaux thermales mettent donc en évidence l'existence d'un apport externe, qui pourrait provenir du socle granitique sous-jacent (Figure 30). En effet les calculs théoriques suggèrent que la signature isotopique en lithium des eaux ( $\delta^7\text{Li}$ ) qui contribuent à définir les eaux thermales est très appauvrie en  $^7\text{Li}$ , les valeurs pouvant s'apparenter à des eaux de socle. Ainsi, le socle granitique sous-jacent qui alimente le réservoir thermal par des flux de CO<sub>2</sub>, mis en évidence notamment par la signature isotopique du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$  du CMTD<sup>7</sup> et l'activité  $^{14}\text{C}$  des eaux) et les mesures volumiques réalisées *in-situ*, pourrait également alimenter le réservoir thermal profond par des flux de solutés chargés en lithium. **Les informations du forage profond DMT4 permettent de montrer sans ambiguïté l'existence d'un flux en provenance du socle dans le réservoir profond du Jurassique moyen**, l'enrichissement en lithium par rapport à la droite de dilution des eaux de mer apparaît même bien plus important que celui précédemment mis en évidence pour les eaux thermales qualifiées au forage F9.

<sup>7</sup> CMTD : Carbone minéral total dissous

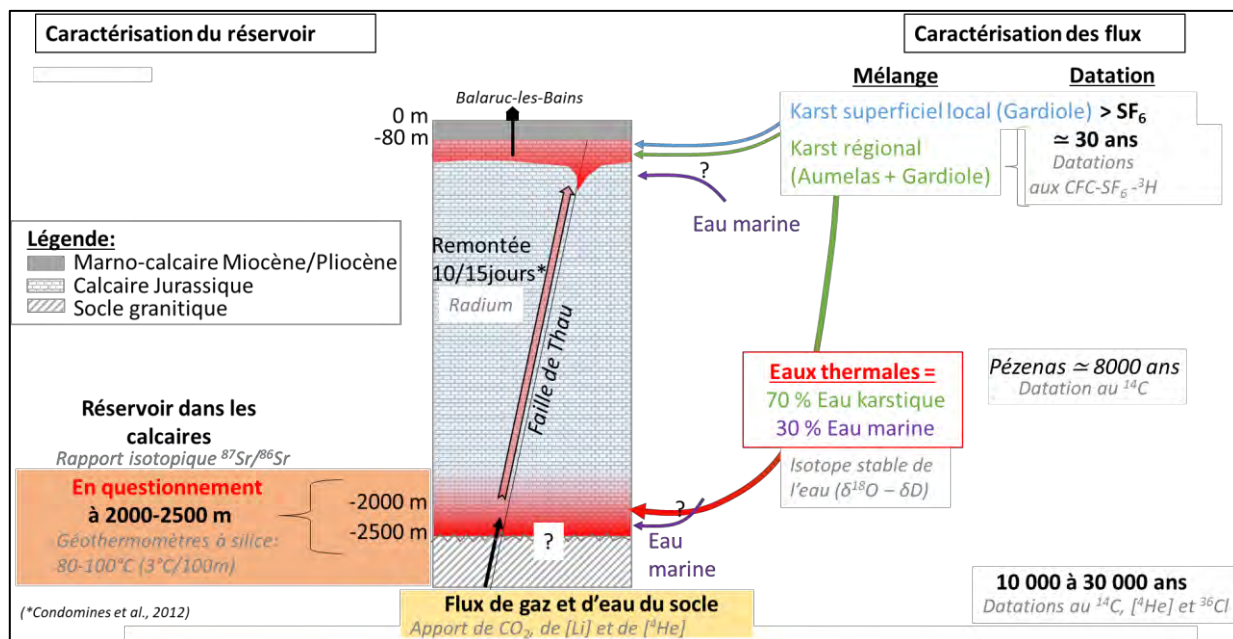


Figure 30 : Schéma conceptuel du fonctionnement du réservoir thermal et apport des nouveaux outils géochimiques et des temps de résidence (Ranchoux et al., 2022, Livrable L5a BRGM/RP-71281-FR).

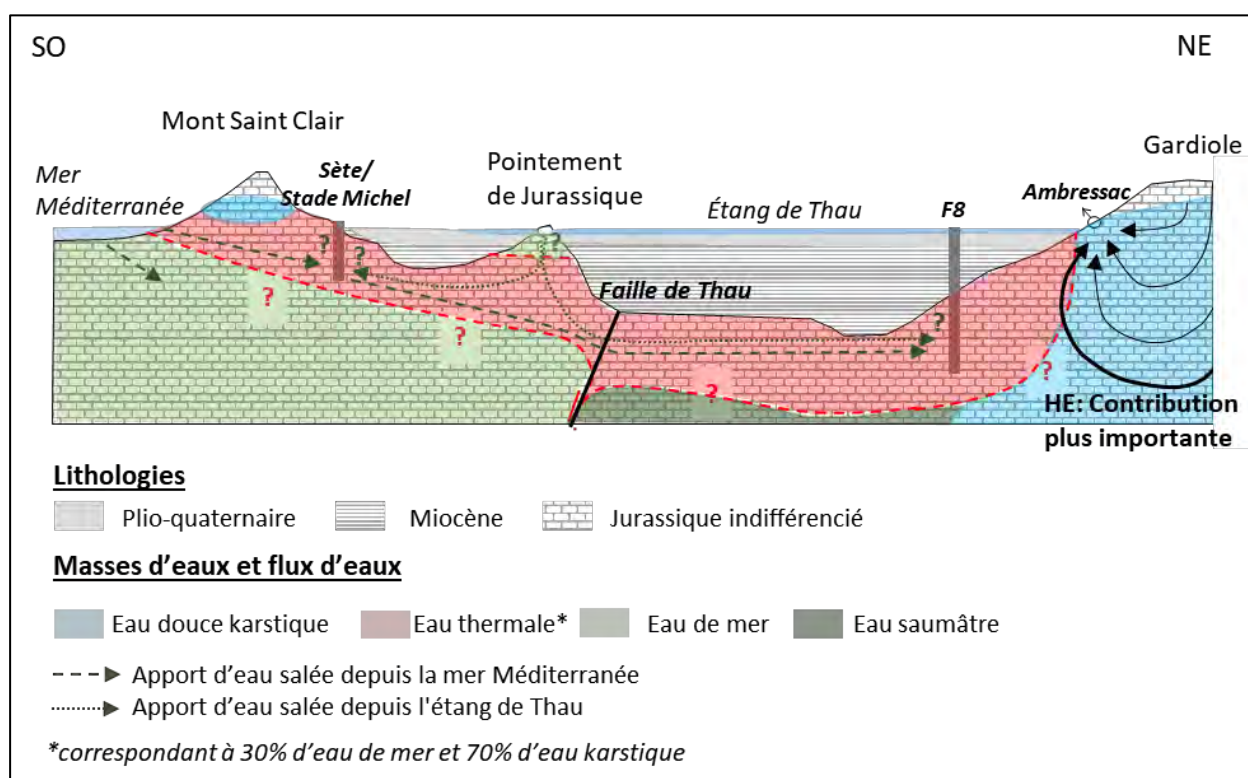


Figure 31 : Représentation schématique de l'alimentation en eau des forages F8 et Sète/Stade Michel. Les eaux thermales (30 % d'eau de mer, 70 % d'eau karstique) remontent depuis le réservoir thermal par la faille de Thau. Un apport complémentaire d'eau salée (+16 % pour F8 et +18 % pour Sète/Stade Michel), représenté par les flèches vertes, provient de la mer Méditerranée et/ou du pointement du Jurassique (Ranchoux et al., 2022, Livrable L5a : BRGM/RP-71281-FR).



L'estimation plus précise de l'âge des eaux thermales par différentes approches géochimiques constitue un apport important de ce travail. C'est le couplage des informations apportées par les différents outils qui a permis de contraindre les paramètres d'entrée des modèles géochimiques et de réduire les incertitudes sur l'estimation des âges des eaux thermales. Les isotopes du carbone permettent de démontrer l'existence d'un flux de CO<sub>2</sub> d'origine profonde attribué au socle sous-jacent. Les données des isotopes de l'eau, et les concentrations en Cl, Na et Li des eaux ont permis une estimation de la contribution relative de ce flux externe issu du socle (de 60 % à 70 % pour le lithium), et donc d'évaluer la correction à apporter à la méthode hélium avant l'estimation de l'âge de l'eau par cette méthode. Pour la méthode hélium, les données géophysiques acquises sur les ouvrages de la plateforme expérimentale (DEMT1, DEMT2, DEMT3/DEMT4) et notamment les données de gamma ray spectrales permettent une estimation des teneurs en uranium et thorium des carbonates et donc une estimation de la fonction de production interne d'hélium au sein du réservoir. Les données de datation carbone 14 et la signature carbone 13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) ainsi que les caractéristiques chimiques des eaux profondes de Pézenas ont permis ensuite de contraindre l'estimation de l'ordre de grandeur de la porosité efficace du réservoir Jurassique en profondeur. C'est la combinaison de l'ensemble de ces informations qui ont permis de valoriser les données acquises sur les forages thermaux. Pour la méthode de datation avec le chlore 36, c'est de nouveau le couplage des informations apportées par les isotopes de l'eau, et les concentrations en Cl des eaux ainsi que les informations des eaux profondes de Pézenas qui permettent de paramétrer les modèles d'évolution géochimique et de réduire les incertitudes. Ensemble, **les différents outils ont permis de raffiner les estimations précédentes (Aquilina *et al.*, 2002) sur l'âge de l'eau des forages thermaux, de l'ordre de 50 000 ans ( $\pm 15\,000$ ) pour F9 et de 80 000 ans ( $\pm 20\,000$ ) pour F8.** Les autres eaux thermales de la presqu'île de Balaruc (F5, F14, S12) présentent des âges apparents globalement plus faibles en raison de l'existence de phénomènes de mélange avec des eaux d'infiltration plus récentes comme le témoignent les informations apportées par les gaz anthropiques.

Les informations nouvelles apportées par l'ouvrage profond DEMT4 et notamment les données des isotopes du strontium et du carbone permettent de questionner le schéma conceptuel existant. Il est établi à l'aide des isotopes stables de l'eau que les eaux thermales sont composées d'un mélange d'eau karstique (70 %) et d'eau marine (30 %), qu'elles interagissent longuement (plusieurs dizaines de milliers d'années) au sein d'un réservoir carbonaté profond (informations de la température, du strontium, du chlore 36 et de l'hélium) avant de remonter rapidement vers le réservoir du Jurassique supérieur (isotopes du radium) très vraisemblablement par la faille de Thau identifiée dans le cadre du projet entre Balaruc et Sète (Figure 30).

Si on accepte l'idée que les eaux profondes du type « DEMT4 » contribue au fonctionnement hydrogéologique de la zone d'étude, **les informations isotopiques du strontium permettraient de préciser les proportions de mélange des différentes composantes pour les eaux thermales qualifiées par le forage F9. Celles-ci seraient composées de 11 %  $\pm 0,1$  % d'eau profonde du Jurassique moyen (type DEMT4), 58 %  $\pm 1,5$  % d'eau karstique du Jurassique supérieur (type CGE-Tennis) et de 31 %  $\pm 1,3$  % d'eau marine.** Ces estimations de proportions ne remettent pas en question la part d'eau d'origine marine déterminée à l'aide des isotopes stables de l'eau ou des teneurs en chlorure (30 % contre 31 % avec les isotopes du strontium), la part d'eau karstique serait composée majoritairement d'eau du réservoir Jurassique supérieur (58 %) et d'une part plus faible d'eau du Jurassique moyen (11 %), le total des eaux karstiques étant de 69 %.

**Ces nouveaux résultats questionnent le modèle conceptuel de structure et de fonctionnement. Où se fait le mélange avec l'eau de mer ?** Deux hypothèses sont envisageables (1) dans un réservoir carbonaté profond influencé par des flux de socle où (2) dans le réservoir du Jurassique supérieur sous couverture mio-pliocène qui est possiblement en connexion hydraulique avec la mer (Sète) et/ou avec la lagune (pointement jurassique situé entre Sète et Balaruc) et ponctuellement par la Vise lors des périodes d'inversac.

Dans le cas de la première hypothèse (les mélanges se font en profondeur), le réservoir profond carbonaté doit avoir été ou est localement salé (eau de mer ancienne ?) ce qui pose (1) la question de la zone géographique où se produit le mélange en profondeur, (2) la question de la recharge des eaux karstiques profondes du réservoir jurassique supérieur et moyen qui contribuent au mélange et également, (3) la question de la température des eaux profondes, en d'autre terme, la question de la profondeur du réservoir thermal profond. Les informations du contexte structural du projet indiquent que la faille de Thau est connectée à la faille de Nîmes (Figure 12) qui, à l'échelle régionale, est l'accident majeur qui s'enracine dans le socle permettant la remontée de gaz (CO<sub>2</sub>). Dans ce contexte, on pourrait imaginer qu'il existe un réservoir thermal dans la partie sud-est de la zone d'étude dans le réservoir carbonaté profond sous couverture oligocène (Figure 12c) et que ce réservoir est salé. Les fluides thermaux circuleraient le long de la faille de Nîmes puis seraient capturés par la faille de Thau et convergeraient ensuite vers la presqu'île de Balaruc pour se mélanger avec les eaux d'origine karstique du Jurassique supérieur et moyen en profondeur (Figure 12c, Figure 12d) puis remonteraient rapidement vers la presqu'île de Balaruc. Il apparaît également que la faille de Thau est enracinée dans le socle sous-jacent (cf. Figure 12c) et pourrait aussi, elle-même être le vecteur de la remontée de fluides profonds (CO<sub>2</sub> et fluides chargées en lithium).

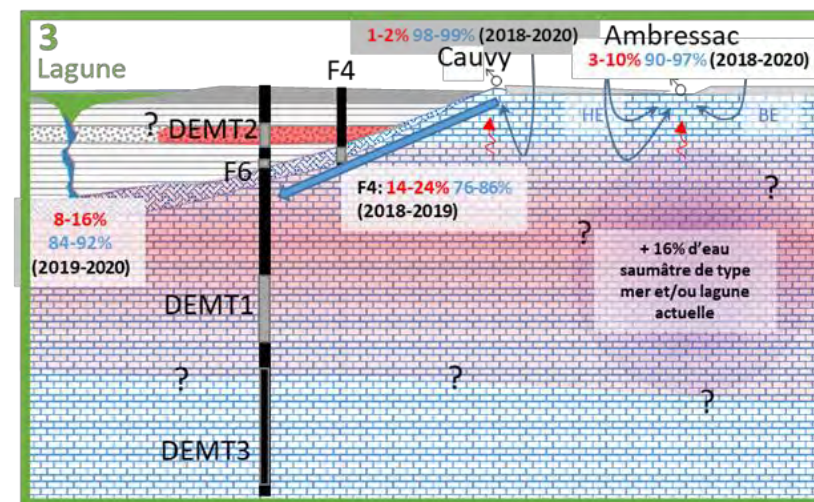
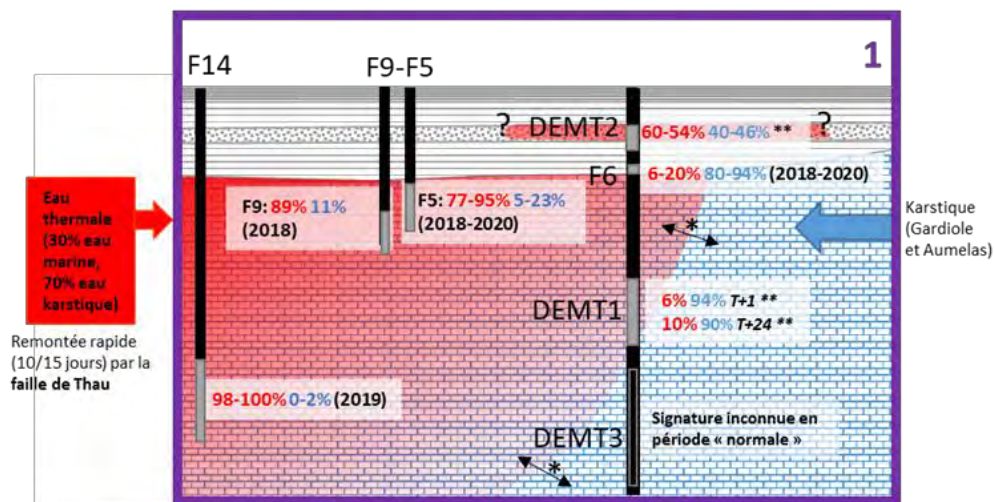
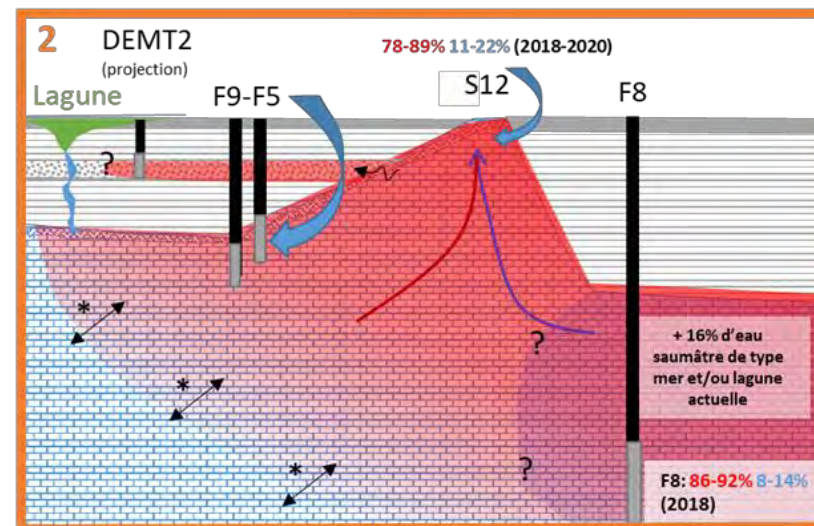
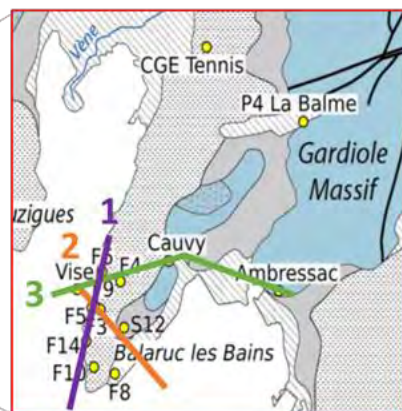
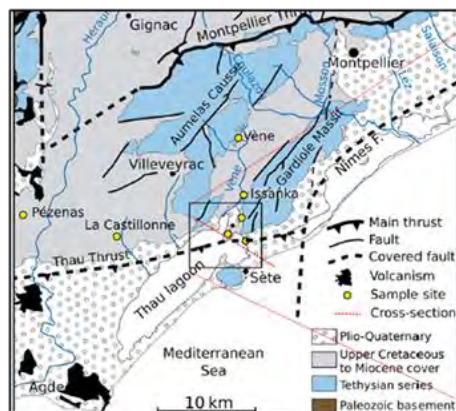
Dans le cas de la deuxième hypothèse – cas où le mélange avec l'eau de mer se produit dans le réservoir jurassique supérieur sous couverture mio-pliocène avec les eaux karstiques du Jurassique supérieur (de type P4-Balm ou CGE-Tennis du point de vue chimique mais ancienne) –, les eaux thermales seraient dans ce schéma conceptuel apportées par des flux d'eaux issus du Jurassique moyen de type « DMT4 » (du point de vue des signatures isotopiques en strontium) mais ils devraient être nécessairement plus chauds (>50 °C). Cela pose de nouveau la question de la localisation du réservoir thermal en profondeur car les températures du pôle DMT4 au droit de Balaruc sont bien trop faibles (26 °C) par rapport aux eaux thermales (50 °C au forage F9). Les informations du contexte structural issues du projet indiquent dans la partie sud-ouest de la zone d'étude (Figure 12c) que le Jurassique moyen est situé à des profondeurs supérieures à 2 000 m. Dans ce contexte, on pourrait imaginer qu'il existe un réservoir thermal dans la partie sud-ouest de la zone d'étude dans le réservoir carbonaté profond du Jurassique moyen et que ce réservoir serait drainé par des structures perméables le long de la faille de Thau. Les eaux convergeraient ensuite vers la presqu'île de Balaruc et/ou Sète tout en interagissant avec les fluides issus du socle mobilisés par la faille de Thau puis in fine, remonteraient rapidement vers la presqu'île de Balaruc. Les calculs de trajectoires réalisés à l'aide du modèle numérique distribué MARTHE (cf. § 6.2) laisse suggérer que ces chemins d'écoulement profonds sont plausibles.

Ainsi, au terme de ce projet de recherche, des inconnues demeurent encore dans le schéma conceptuel de structure et de fonctionnement concernant le réservoir thermal profond, les hypothèses précédentes ne pouvant pas être définitivement tranchées.

Concernant le réservoir du Jurassique supérieur et les écoulements karstiques de sub-surface, les signatures chimiques des eaux karstiques s'expliquent principalement par une eau de pluie qui a évolué et interagi avec une roche carbonatée. L'étude géochimique a montré que ces eaux ont deux zones principales de recharge : le causse d'Aumelas représenté par le trop-plein de la Vène (en crue) ainsi que la source d'Issanka, et le massif de la Gardiole représenté par les sources d'Ambressac et de Cauvy dans le secteur d'étude. À l'aval d'Issanka, les informations géochimiques montrent que ces deux flux de recharge se mélangent préférentiellement en période de hautes eaux comme en témoignent les informations de P4-Balm et dans une moindre mesure CGE-Tennis. Au sein de la presqu'île de Balaruc, l'aquifère libre présente des eaux d'âge subactuel, tandis que l'eau de l'aquifère jurassique sous couverture (CGE-Tennis) présente un âge apparent d'une trentaine d'années. L'eau de ce réservoir, dont le principal exutoire est la source de la Vise, alimente la presqu'île de Balaruc-les-Bains et peut localement se mélanger avec les eaux thermales comme en témoignent les suivis chimiques et physico-chimiques réalisés sur le forage F5. Les eaux souterraines de la presqu'île de Balaruc (P4-Balm, Cauvy et Ambressac) présentent une contamination anthropique en SF6 ce qui a été mis à profit pour mieux tracer les eaux de recharge provenant du massif de la Gardiole ainsi que les phénomènes de mélange qui se produisent au sein de la presqu'île entre l'eau du karst et les eaux thermales. L'étude des communautés bactériennes a également permis de tracer ce flux local. Il ressort que les ouvrages F4 et F6 ont des communautés bactériennes qui peuvent être associées aux eaux de Cauvy alors que les eaux de l'ouvrage S12 sont plutôt connectées aux eaux d'Ambressac. Ces nouvelles informations apportées par le projet permettent de renforcer le schéma conceptuel de fonctionnement précédemment établi (Aquilina *et al.*, 2003) : la presqu'île de Balaruc constitue le lieu de convergence d'un flux karstique dit régional en provenance de l'impluvium amont (Causse d'Aumelas/montagne de la Moure), de flux karstiques locaux provenant de la partie sud-est de la Gardiole et d'un flux thermal d'origine profonde.

Au sein de la presqu'île de Balaruc, les ouvrages F4, F6 et S12 et à certaines périodes l'ouvrage F5 permettent d'illustrer l'existence du phénomène de mélange entre les eaux thermales et les eaux karstiques (Figure 32). On montre également que les ouvrages F4, F6 et S12 sont alimentés par des flux karstiques récents, et qu'ils sont en relation hydraulique avec les sources de Cauvy (F4, F6) et d'Ambressac (S12). Les ouvrages F4, F6, Cauvy, Ambressac ainsi que l'exutoire de la Vise sont très majoritairement composés d'eau d'origine karstique (de 90-99 % d'eau karstique), d'une contribution variable d'eau thermique au cours du cycle hydrologique (1 à 10 % d'eau d'origine thermique) et d'une faible composante d'eau marine de type mer actuelle. Cette dernière est supposée attribuée au reliquat de salinité apporté par les phénomènes d'inversac récents. Les données permettent de montrer que pour ces ouvrages, la contribution relative du pôle thermal est plus importante en période de hautes eaux (HE). Les mises en charge du karst en HE mobilisent par effet piston de manière plus importante les lignes de courants profonds du réservoir karstique et mobilisent les eaux thermales sous-jacentes (Figure 32).

## Situation « normale »



\* Fluctuation en fonction des conditions hydrologiques

\*\* Données obtenues lors des essais de pompage (1 période d'échantillonnage)

x% Pourcentage d'eau thermique de type F9 (estimé pour les ouvrages karstiques à partir des teneurs en chlorures)

x% Pourcentage d'eau karstique de type Ambressac ou Cauvy (estimé pour les ouvrages thermiques à partir des concentrations (pptv) des gaz CFC dissous)

Figure 32 : Schéma conceptuel de la presqu'île de Balaruc-les-Bains en période « normale », extrait Ranchoux et al., 2022 L5b BRGM/RP-71957-FR.





## 6. Modélisations hydrogéologiques numériques

Une meilleure gestion de la ressource en eau souterraine de l'entité hydrogéologique A.V.I.C. constitue l'un des verrous scientifiques du projet DEM'Eaux Thau. Cet objectif doit s'appuyer sur la compréhension détaillée du fonctionnement hydrogéologique de la zone d'étude et des outils de modélisation. Des approches de modélisation globale à l'aide du logiciel Gardenia et déterministe à l'aide du logiciel MARTHE du BRGM ont été mis en œuvre pour caractériser le fonctionnement de l'aquifère et réaliser des premiers bilans hydrogéologiques. L'élaboration du maillage 3D hydrodynamique s'appuie sur les contraintes géométriques complexes du modèle géologique 3D élaboré dans le cadre du projet (Livrable L4 ; [BRGM/RP-70789-FR](#)). Les résultats de ces travaux sont consignés dans le livrable L11a ([BRGM/RP-71757-FR](#), Hakoun et Ladouche, 2022).

### 6.1. MODÈLE GLOBAL GARDENIA

L'étude du fonctionnement hydrogéologique de l'entité A.V.I.C à l'aide de l'approche de modélisation globale (logiciel Gardenia) a permis d'une part, de qualifier le fonctionnement hydrogéologique du système karstique développé au sein du jurassique et d'autre part, de d'établir des bilans hydrogéologiques au sein des compartiments identifiés du système hydrogéologique (Figure 33).

La source d'Issanka est l'exutoire principal du compartiment amont de l'aquifère dont l'impluvium de recharge est situé sur le causse d'Aumelas et la montagne de la Moure. Les sources temporaires de la Vène (à Cournensec) et des Oulettes (à Montbazin) constituent les exutoires temporaires de trop-pleins du système karstique, ils s'activent exceptionnellement suites aux épisodes pluvieux majeurs ( $> 100$  mm). Ces écoulements contribuent à l'écoulement de la Vène dont les écoulements naturalisés ont été reconstitués puis modélisés dans le cadre de cette étude. L'impluvium de la station hydrologique situé à l'aval d'Issanka qui a été utilisée pour la naturalisation des écoulements est évalué à  $135,6 \text{ km}^2$ .

Le schéma adopté pour la modélisation des flux naturalisés issus du compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C repose sur un réservoir caractérisé par deux exutoires séparés par un seuil, le premier exutoire permet de représenter le fonctionnement des trop-pleins du karst (trop-plein de la Vène à Cournensec, trop-plein des Oulettes à Montbazin), le second exutoire permet de caractériser le fonctionnement de la source d'Issanka. Dans le schéma de modélisation, la possibilité d'un débit de fuite au profit du compartiment aval drainé principalement par la Vise a été autorisé dans le modèle.

La recharge sur le causse d'Aumelas et la montagne de la Moure du compartiment amont a été évaluée à  $152,8 \text{ mm/a}$  en moyenne [ $7,5$  millions de  $\text{m}^3/\text{a}$ ] ; les flux du karst qui alimentent la Vène représentent en moyenne  $130,6 \text{ mm/a}$  [ $6,4$  millions de  $\text{m}^3/\text{a}$ ], le flux d'échange au profit du compartiment aval est évalué à  $22,3 \text{ mm/a}$  [ $1,1$  millions de  $\text{m}^3/\text{a}$ ]. La comparaison de l'évolution temporelle du flux d'échange au profit du compartiment aval avec la piézométrie mesurée aux ouvrages CGE-Tennis (BSS002JEHM) et P4-Balm (BSS002JEKE) permet de montrer de manière très démonstrative le lien hydraulique entre les compartiments amont et aval, les évolutions mesurées dans le compartiment aval (presqu'île de Balaruc) apparaissent fortement corrélées aux flux d'échange issus du compartiment amont. La contribution du compartiment amont est importante en période de hautes eaux (de l'ordre de  $150 \text{ L/s}$ ) et apparaît globalement faible en période de très basses eaux ( $< 30 \text{ L/s}$ ).

La modélisation des débits de la Vise mesurés dans cette étude avant l'inversac (26 juin 2019 au 27 novembre 2020) a été réalisée à l'aide d'un modèle Gardenia permettant la prise en compte d'un flux externe constant (flux constant moyen de  $0,035 \text{ m}^3/\text{s}$  [ $1,1$  millions de  $\text{m}^3/\text{a}$ ]) en provenance du compartiment amont. L'effet des pompages connus de la presqu'île ( $<100 \text{ m}^3/\text{h}$ , soit  $0,028 \text{ m}^3/\text{s}$ ) n'a pas été pris en considération dans la modélisation, la chronique de débit de la Vise est trop courte pour étudier l'effet/l'influence des pompages. Les premiers résultats permettent d'établir le premier ordre de grandeur du bilan hydrogéologique pour le compartiment aval. À titre d'information, la recharge moyenne du compartiment aval serait comprise entre  $131$  et  $141 \text{ mm/an}$  selon le modèle considéré, l'impluvium estimé est de  $20,6 \text{ km}^2$ . Le flux moyen de la Vise serait de l'ordre de  $0,127 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $4$  millions de  $\text{m}^3/\text{a}$ ), la variabilité interannuelle apparaît assez faible (Min =  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ , Max =  $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ ) soit entre  $3,2$  et  $4,8$  millions de  $\text{m}^3/\text{a}$ . En moyenne, le flux en provenance du compartiment amont représenterait environ  $30 \%$  du flux total de la Vise. Les flux des exutoires secondaires du compartiment aval (sources de Cauvy et d'Ambressac), représenteraient moins de  $10 \%$  des flux moyens de la source de la Vise.

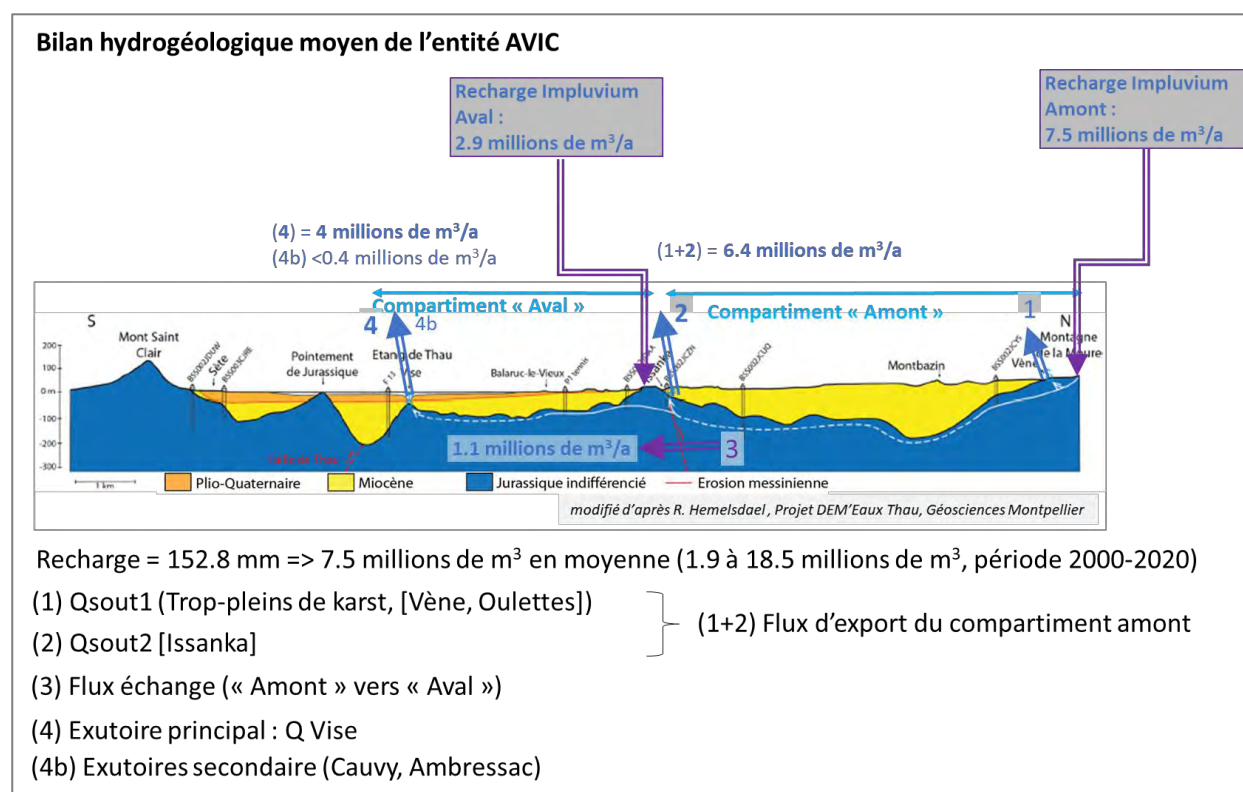


Figure 33 : Bilan hydrogéologique du système karstique de l'entité A.V.I.C évalué à l'aide des modèles Gardenia (extrait, BRGM/RP-71757-FR).

## 6.2. MODÈLE DÉTERMINISTE MARTHE

Un modèle déterministe 3D détaillé a été développé sur la base du modèle géologique développé dans le cadre du projet (§ 3.5). Ce modèle est détaillé dans le rapport (Hakoun *et al.* 2022), il se base sur la conversion du modèle géologique 3D développé dans le cadre du projet (modèle géologique sous GeoModeller, Hemelsdaël *et al.*, 2021) vers l'outil de modélisation hydrogéologique MARTHE (Thiéry, 2015, 2020). Cette étape a constitué un élément de base très important de ce travail. L'aboutissement de ce travail est une géométrie du domaine de modélisation hydrodynamique très détaillée en plan (grille de 400 x 400 m) et en profondeur (multicouche avec compartimentation du domaine vis-à-vis des accidents majeurs), soit au total plus de 12 200 mailles. Ce domaine de modélisation prend en compte les nouvelles informations géologiques, en particulier les profondeurs des couches du Jurassique révisées et la faille de Thau, qui sépare un compartiment amont (entité liée à la Vise) et un compartiment aval (entité du Mont Saint-Clair). La discrétisation du domaine en multicouche permet de réaliser des calculs au sein de zones d'écoulements avec des propriétés physiques discrétisées en 3D associées à des étages géologiques différents (p. ex. Jurassique Supérieur et Moyen).

Le modèle numérique appelé MARTHAU permet de réaliser des calculs d'hydrodynamique avec la méthode des différences finies sur une grille régulière. Les charges hydrauliques et les débits sont déterminés sur le territoire selon une approche « continuum » basée sur la résolution de l'équation de Darcy, ce qui apparaît raisonnable compte tenu de l'importante étendue spatiale du domaine simulé (impluvium de 200 km<sup>2</sup> et extension du modèle de 1 000 km<sup>2</sup>). La Figure 34 présente un aperçu de la géométrie 3D du modèle distribué MARTHAU.

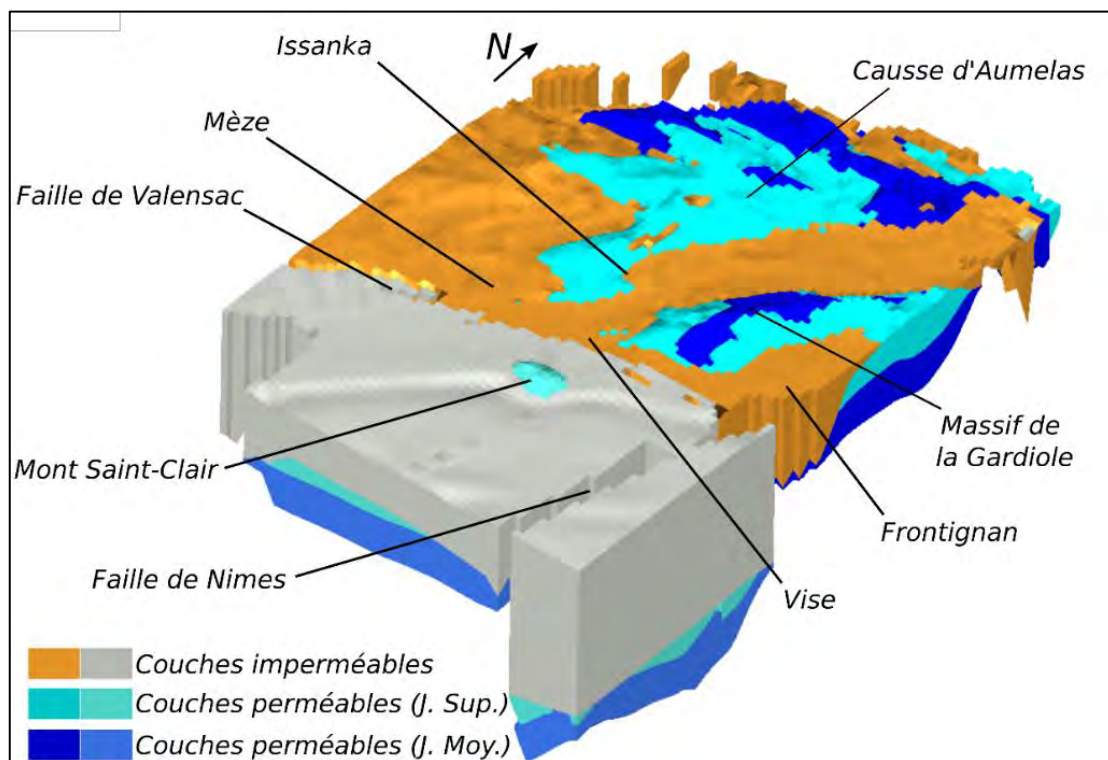
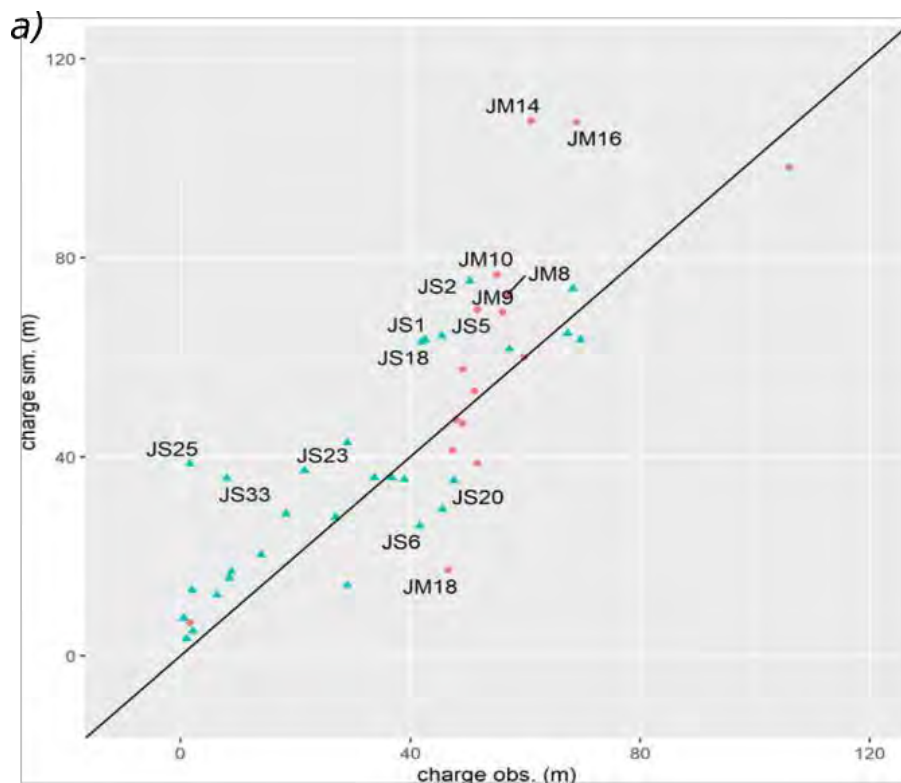


Figure 34 : Vue d'ensemble 3D du modèle hydrogéologique MARTHAU(extrait, BRGM/RP-71757-FR).

L'approche numérique de type milieu poreux équivalent s'est révélée satisfaisante pour reproduire les charges à l'échelle régionale, comparables aux états de référence observés dans le karst (Figure 35). La modélisation permet en outre de reproduire localement les débordements correspondant aux sources et les dynamiques de fonctionnement observées (Figure 36, Figure 37), ainsi que les flux ascendants correspondant à des différences de charges verticales observées entre des horizons peu profonds (100-200 m) et profonds (700 m) du Jurassique (e.g. différences de charges entre les ouvrages DEMENT1 et DEMENT4 de la plateforme expérimentale, BRGM/RP-70842-FR). Ces éléments constituent des résultats nouveaux et informatifs, relativement important, qui sont issus du travail de calibration du modèle en régimes permanent et transitoire.





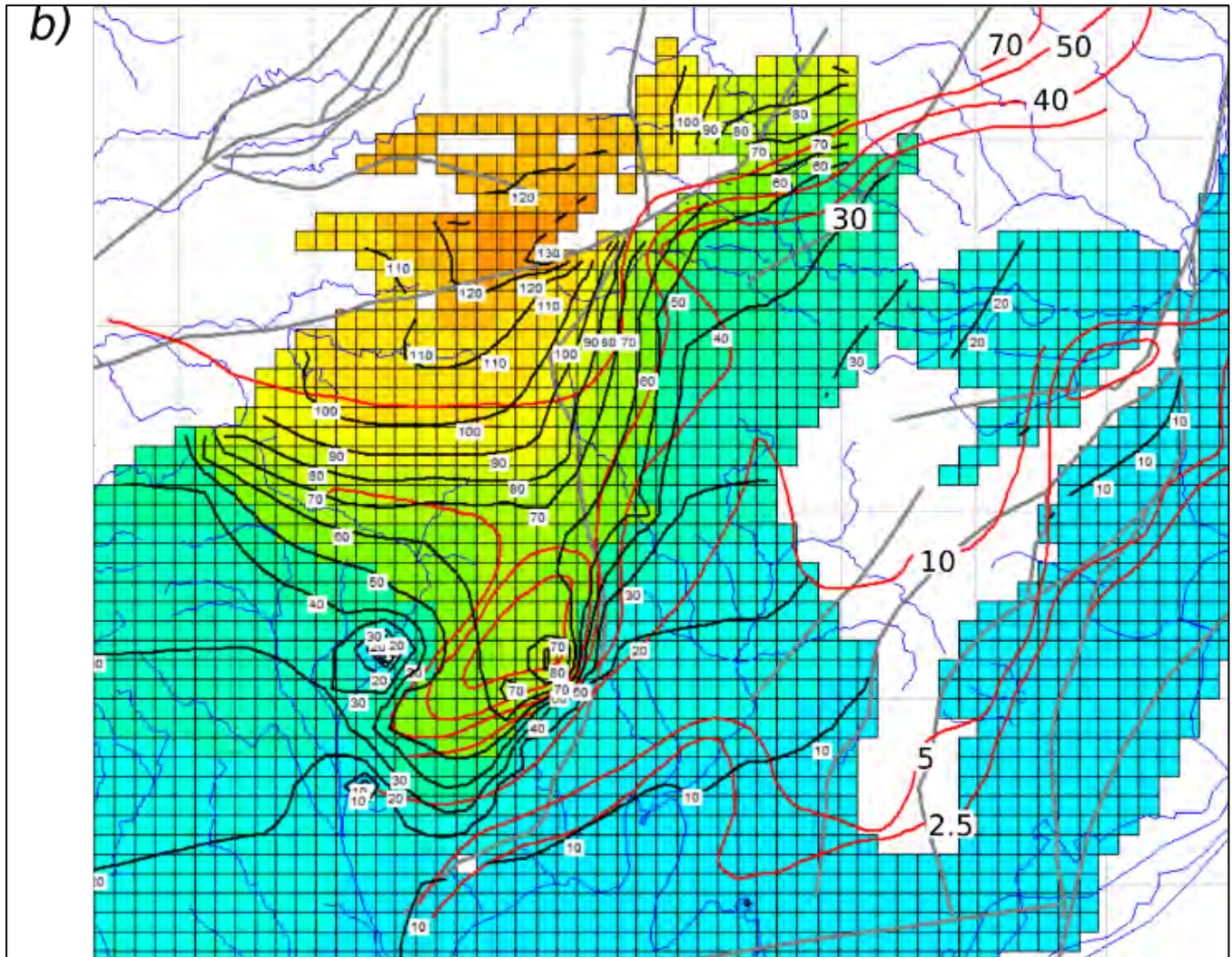


Figure 35 : Comparaisons entre valeurs de piézométrie observées et calculées après calibration en régime permanent pour la situation d'étiage (août-septembre) de 1986. a) comparaison des valeurs observées et calculées sur des sites interceptant le Jurassique Supérieur (vert) et le Jurassique Moyen (rouge). Les points nommés indiquent les sites où la différence entre les valeurs observées et calculées est supérieure à 24 m. b) comparaison entre piézométrie régionale interprétée en basses-eaux 1986 (en rouge) et calculée en régime permanent (en noir) dans la couche 8 (Jurassique Supérieur) du modèle MARTHE.



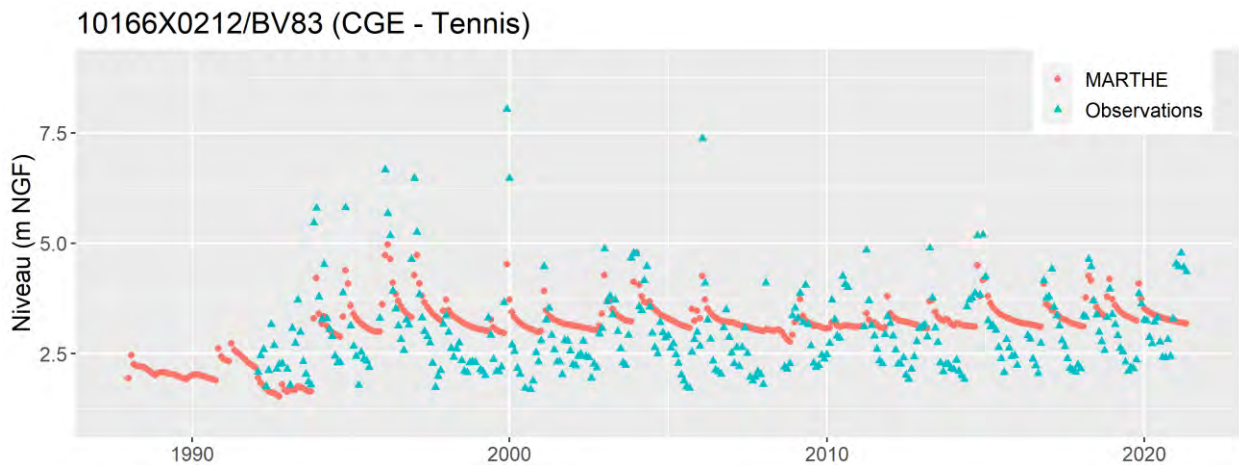
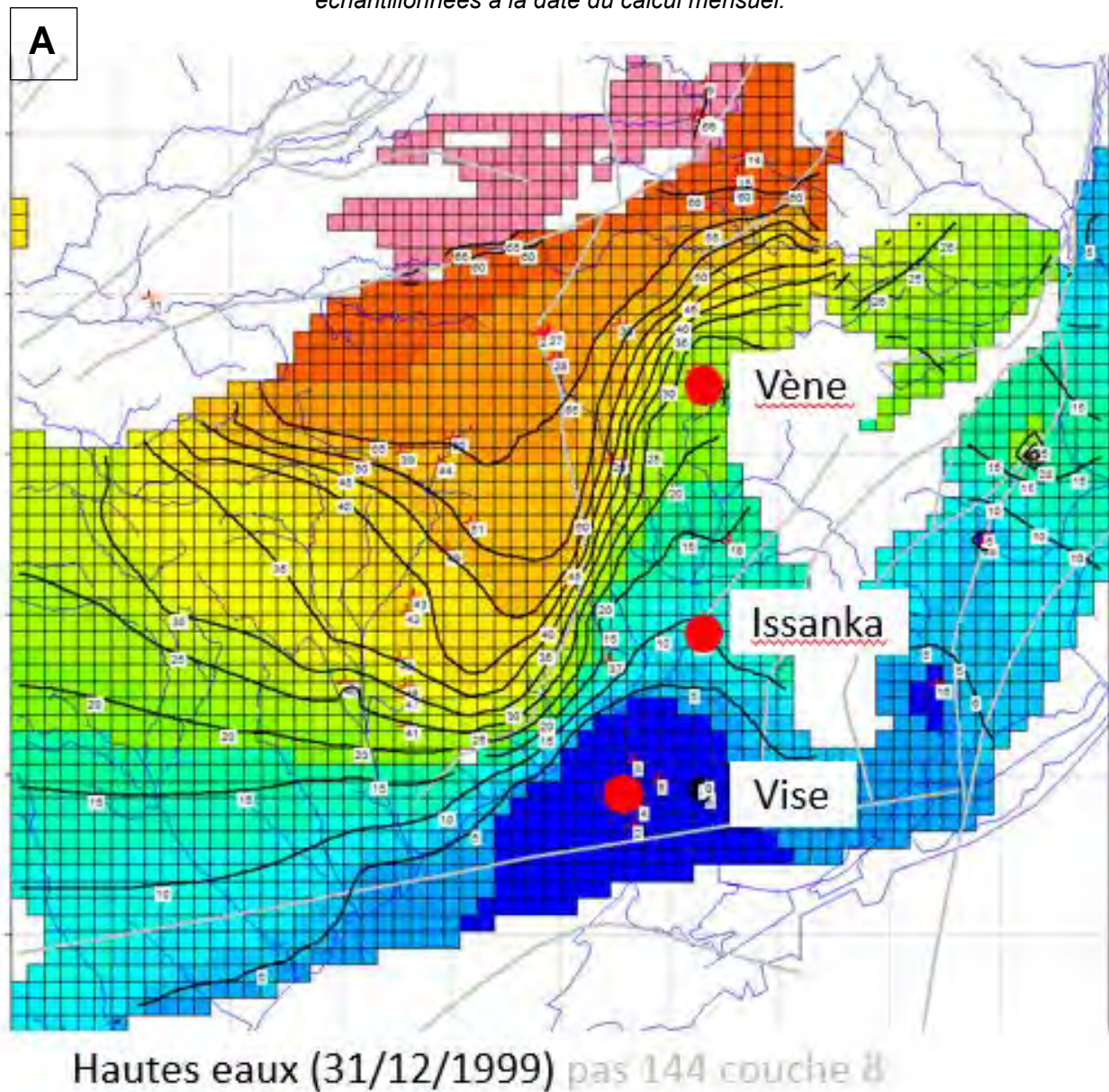
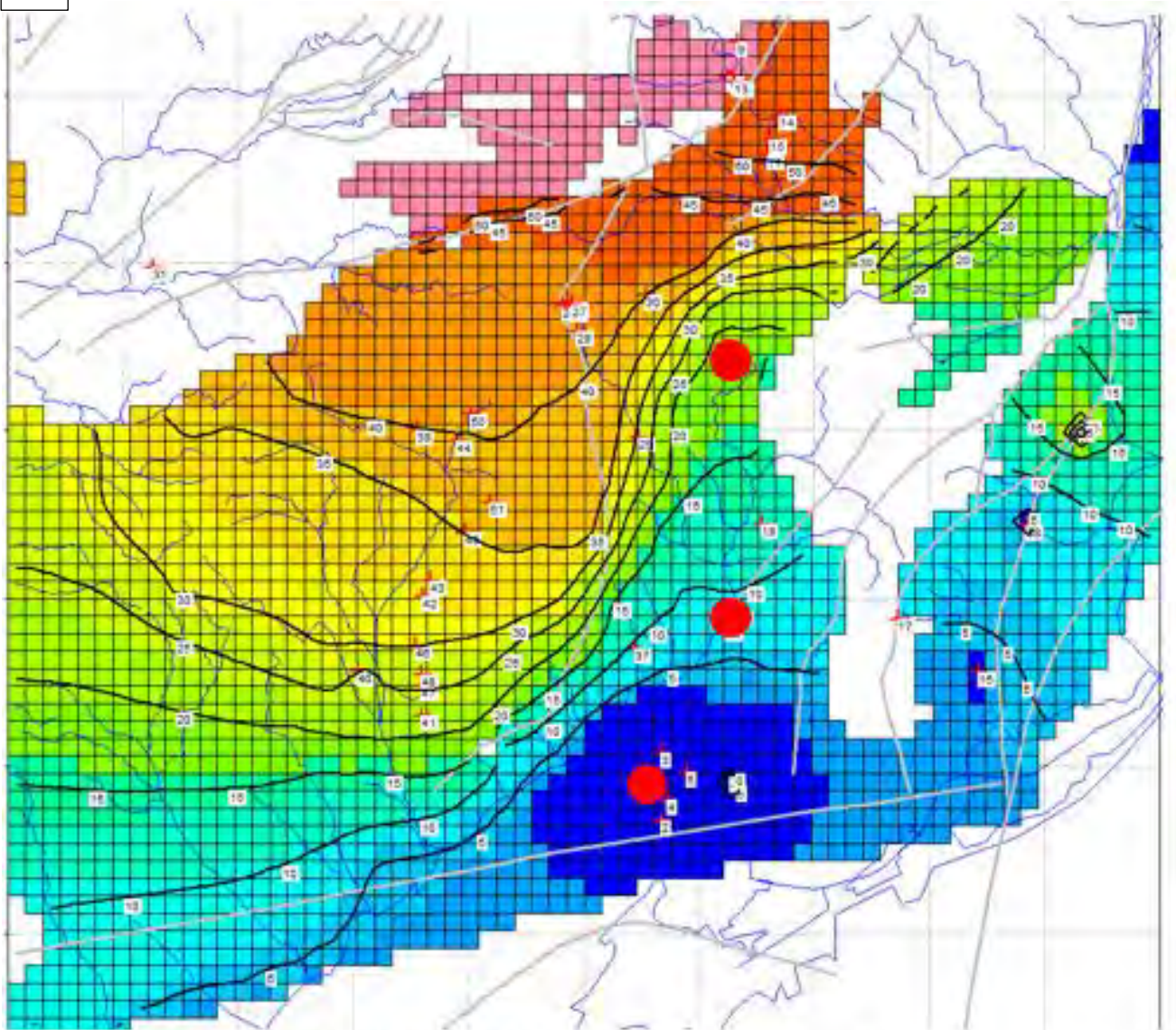


Figure 36 : Comparaison de la piézométrie observée et calculée au pas de temps mensuel sur la période 1988 - 2021 à Balaruc-le-Vieux (10166X0212/BV83 - CGE Tennis). Les observations ont été échantillonnées à la date du calcul mensuel.





**B**

Basses eaux (30/09/2000) pas 154 couche 8

Figure 37 : États des charges calculées en régime transitoire en période de hautes (A) et basses eaux (B) dans la couche 8 représentant la géométrie du Jurassique Supérieur dans le modèle MARTHE. Les calculs reproduisent (i) la géométrie régionale des écoulements dans l'aquifère et (ii) les modifications de géométrie d'écoulement au sein du chemin d'écoulement préférentiel entre le trop-plein de la Vène, Issanka et la Vise.

Le travail de modélisation permet d'obtenir des éléments d'informations qui précisent ou confirment le modèle conceptuel des écoulements dans l'hydrosystème des calcaires du Jurassique. Un premier élément d'information est apporté avec la distribution spatiale des valeurs de perméabilités obtenues par calibration. Pour respecter les piézométries régionales, la phase de construction / optimisation du champ des perméabilités a mis en évidence la nécessité de forts contrastes notamment entre la partie est de la montagne de la Moure et le centre du modèle pour reproduire l'axe de drainage orienté entre le trop-plein de la Vène, Issanka et la source de la Vise. Un second élément d'information est apporté par la structure du domaine hydrogéologique et la limite avec la faille de Thau au sud qui, en la considérant imperméable, permet une compartimentation des écoulements entre deux parties « au nord » (Issanka, Vise) et « au sud » (côté Sète). Cette structure permet d'obtenir des écoulements convergents vers la Vise, illustrés par la piézométrie et les chemins d'écoulements (Figure 38).

Les calculs inverse de trajectoires de particules ont permis d'identifier les principaux chemins d'écoulement vers la source de la Vise (Figure 38). Vers la source de la Vise, les calculs de trajectoires ont montré de faibles contributions depuis la montagne de la Gardiole et deux familles d'écoulements à partir de l'impluvium du Causse d'Aumelas qui s'individualisent puis convergent vers la source de la Vise. La première traverse la partie méridionale du territoire (depuis la partie sud du causse d'Aumelas en passant par i) le flanc est de la montagne de la Moure ou ii) le trop-plein de la Vène puis par Issanka et la Vise. L'autre traverse la montagne de la Moure et converge vers la Vise après un passage en profondeur sous le bassin de Villeveyrac et sous l'étang de Thau. Ces résultats de modélisation permettent d'illustrer le rôle joué par la faille de Thau dans l'organisation des écoulements profonds. Les nouvelles informations apportées par les calculs d'écoulements avec le modèle hydrodynamique MARTHE permettent de préciser les chemins d'écoulement et le schéma conceptuel de fonctionnement établi antérieurement (Aquilina *et al.*, 2002).



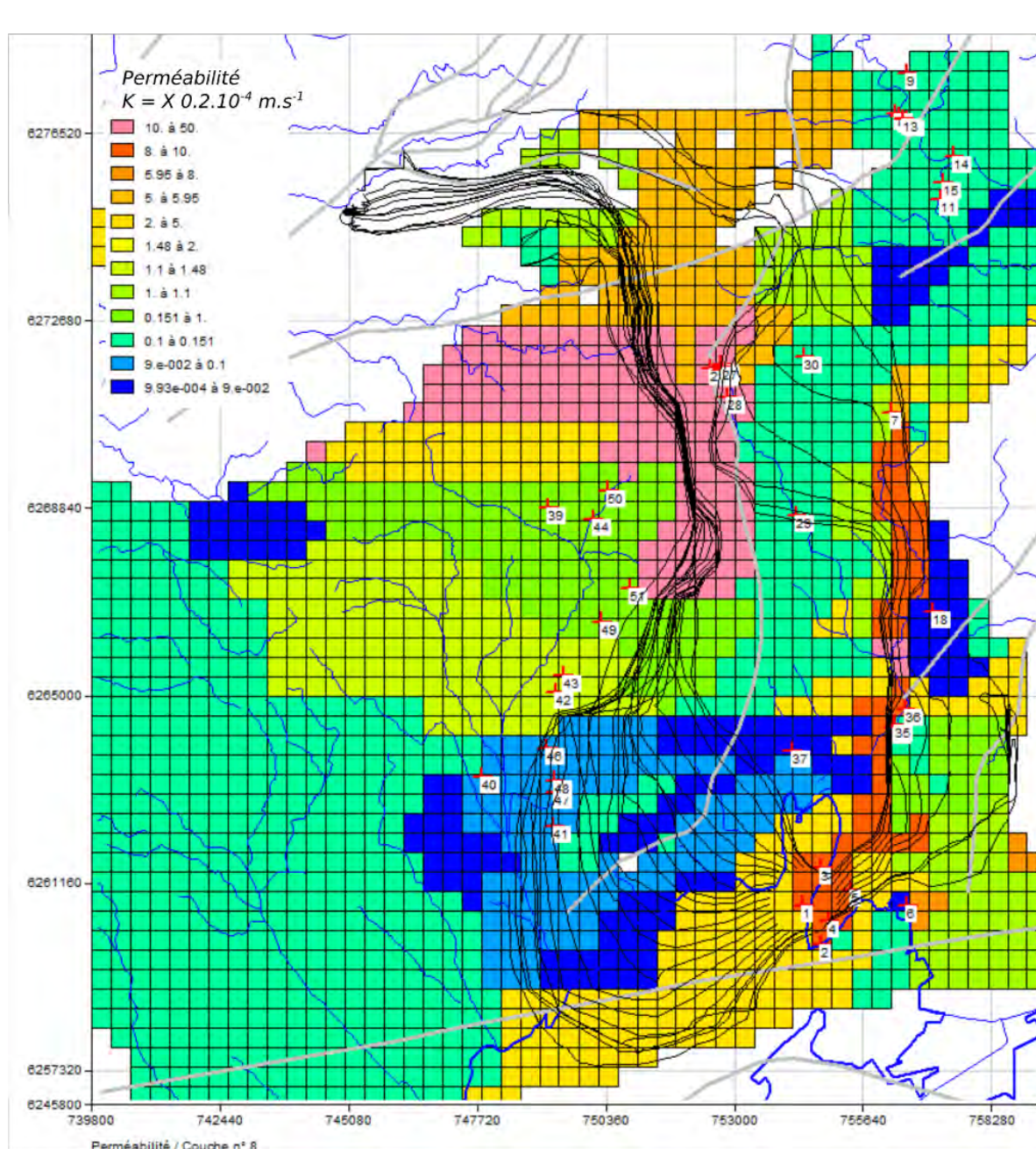


Figure 38 : Exemples de trajectoires (noir) vers la source de la Vise dans la couche 8 (J. Sup.) du modèle MARTHE, le fond correspond aux perméabilités de la couche. Les calculs montrent deux groupes (à l'est sur et à l'ouest de la montagne de la Moure) qui contribuent à l'alimentation de la source.

Une analyse exploratoire du comportement de l'aquifère sous contrainte d'une modification de la recharge a été menée pour appréhender le comportement de l'aquifère eu égard au changement climatique, sans prise en compte des prélèvements. Le modèle climatique et la trajectoire d'émission employés figurent parmi les plus pessimistes en terme de pluviométrie et de températures (CMIP5, HadgME-ES/CCLm4). Les pluies efficaces et la température ont été extraites du jeu DRIAS 2020 à partir du portail partenarial DRIAS (Météo-France, IPSL, Cerfacs). L'analyse des calculs prospectifs a été menée sur les débits de la source de la Vise, cette dernière représente l'exutoire aval connu de l'aquifère (intégrant la réponse globale de l'hydrosystème).

Les résultats à l'horizon intermédiaire (2040-2070) restent dans les gammes de variabilités calculées sur les périodes de références. En revanche les résultats obtenus à l'horizon lointain (2070-2100) ont montré une diminution des débits mensuels, plus notable en période de basses eaux (Figure 39). En outre, pour ce même horizon, une diminution significative des débits minimaux annuels et de leur variabilité a pu être identifiée. Ces modifications à long terme apparaissent en lien avec l'allongement temporel et l'intensification des sécheresses estivales (plus précoces) qui impactent la dynamique des débits de tarissement (en baisse, sur des périodes de temps plus longues).

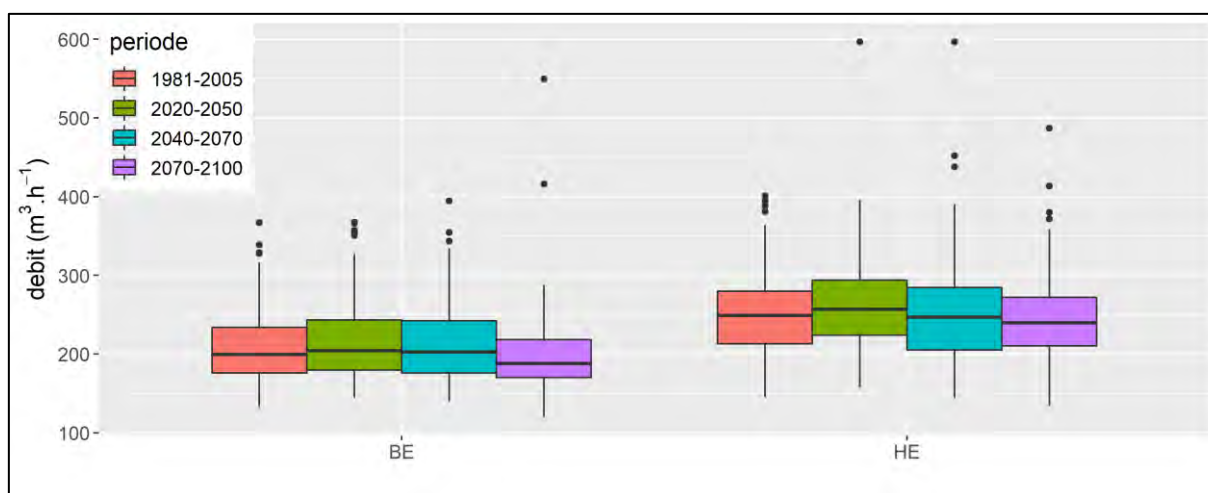


Figure 39 : Distribution des débits de la Vise calculés au pas de temps mensuel (date en fin de mois) en fonction des horizons temporels (période de référence 1981-2005) et de la saisonnalité hydrologique (BE : Basses Eaux – d'avril à octobre ; HE : Hautes Eaux - de novembre à mars).

Plusieurs perspectives émergent à l'issu du projet DEM'Eaux Thau selon la finalité et/ou les attendus des objectifs de modélisation :

- pour mieux simuler et prédire les modalités d'écoulement à l'étiage, périodes favorables au déclenchement de phénomène d'inversacs, la calibration du modèle pourrait être revue spécifiquement sur ces périodes. Une telle calibration du modèle pourrait être couplée à la prise en compte de la dynamique de la lagune au niveau de la source de la Vise. Ceci pourrait être fait en traduisant la dynamique temporelle des hauteurs de la lagune en équivalent eau douce (cf. BRGM/RP-71757-FR) et en modifiant temporellement la charge imposée sur la maille associée à la source. Ce couplage devrait permettre une meilleure représentation des basses eaux et des déclenchements/rétablissement d'inversac ;
- pour approfondir la modélisation et apporter des éléments de compréhension des écoulements en lien avec la réaction de l'aquifère aux processus d'inversac, le modèle pourrait intégrer des effets densitaires, en lien avec la salinité et la température des fluides dans l'hydrosystème. Ce modèle pourrait être développé à plus haute résolution, avec un modèle numérique local. Le contour de ce modèle local s'étendrait jusqu'au sud au niveau de l'interface lagune-mer afin de prendre en compte la faille de Thau qui semble favoriser les flux chauds, rapides (~10 jours). Cette nouvelle modélisation pourra être réalisée à partir de l'outil MARTHE développé ici, par exemple en utilisant un maillage plus détaillé (gigognes, plusieurs couches et plus haute résolution spatiale) que celui adapté à la problématique régionale. Les effets densitaires requièrent par ailleurs la définition de propriétés physiques nouvelles (en particulier avec la thermique) qui pourront être conditionnées par les mesures et expériences réalisées sur les nouveaux forages DMT1-T4 situé à proximité de la Vise ;



- enfin, après une phase d'amélioration de la calibration existante, l'outil de modélisation actuel pourrait être utilisé pour des calculs prévisionnels ou selon des scénarios de gestion, avec la prise en compte d'incertitudes. Ce travail porterait sur les calculs d'évolutions des piézométries et débits dans un contexte de changement globaux qui impacte la recharge, à partir de différents modèles et scénarios d'émission fournissant ainsi une base de calcul d'incertitude globale. Le travail pourrait aussi porter sur la mise en évidence des effets des modifications des régimes de prélèvements sur la piézométrie et les débits, dans un premier temps indépendamment et dans un second temps couplé aux modifications de recharge.



## 7. Phénomène d'inversac

L'amélioration de la compréhension du phénomène d'inversac et des facteurs et mécanismes déclencheurs constitue un enjeu majeur pour une meilleure gestion de la ressource de cette entité hydrogéologique et constitue l'un des verrous scientifiques du projet DEM'Eaux Thau. Le septième phénomène d'inversac depuis les années 1960 (28 novembre 2020-14 mars 2022) a été spécifiquement étudié dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau. L'étude du phénomène s'appuie sur l'important renforcement du réseau de mesures existant qui intègre notamment les données acquises sur le forage de Sète (BRGM/RP-68549-FR) et les plateformes expérimentales des forages (DEMT1, DEMT2) et de la Vise (cf. présentation des plateformes dans le rapport BRGM/RP-70842-FR qui constitue le livrable L10 du projet). Ces informations de nature hydrogéologique ont permis de proposer une hypothèse de mécanisme de mise en place de l'inversac ainsi que de proposer différentes approches de modélisation mettant en relation les conditions hydrologiques et hydrogéologiques (basses eaux et hautes eaux de la lagune de Thau et de l'aquifère jurassique) avec le fonctionnement de la source de la Vise en période dite normale et en période d'inversac. Ce travail est consigné et détaillé dans le livrable L11B du projet DEM'Eaux Thau (BRGM/RP-70839-FR, Ladouche *et al.*, 2022).

### 7.1. INVERSAC 2020-2022

Un inversac s'est déclenché à la fin du mois de novembre 2020. Pour cet inversac de 2020, le suivi mis en place sur la source de la Vise au cours du projet DEM'Eaux Thau permet d'identifier les caractéristiques principales suivantes (Figure 40) :

- début de phénomène : 28 novembre 2020 à 9h40 ;
- éléments déclencheurs : phénomène de surcote de la lagune dans un contexte hydrogéologique de très basses eaux ;
- débit de la Vise avant le phénomène : de l'ordre de 60 L/s ;
- débit d'infiltration<sup>8</sup> (Lagune vers Vise/karst) : de l'ordre de -350 L/s au début du phénomène (28 novembre 2020) ;
- débit d'infiltration (Lagune vers Vise/karst) : de l'ordre de -150 L/s quelques mois plus tard (jusqu'en mars 2021) ;
- débit d'infiltration (Lagune vers Vise/karst) : fluctuation autour de -200 L/s jusqu'à la fin du phénomène.

---

<sup>8</sup> Par convention le débit d'infiltration (Lagune vers Vise/karst) est négatif.

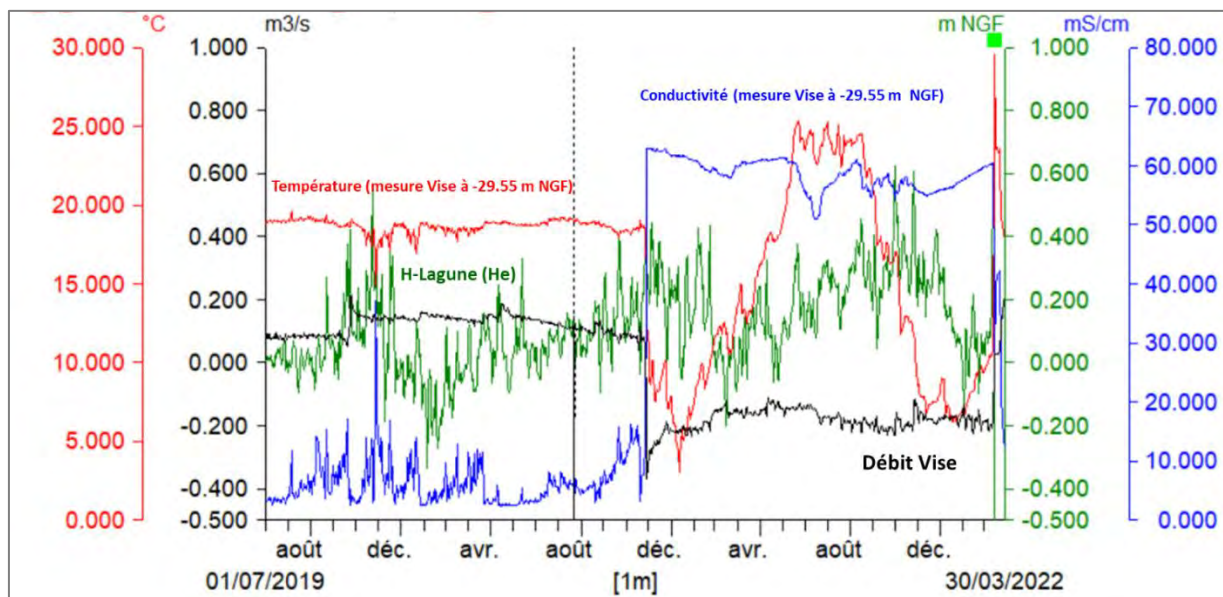


Figure 40 : Évolution des paramètres physico-chimiques et conditions hydrologiques de l'étang et de la source de la Vise au moment de l'inversac de 2020.

L'inversac de 2020-2022 est survenu dans un contexte hydrogéologique de très basses eaux souterraines (occurrence décennal sec) et dans un contexte de haut niveau de la lagune de Thau sur lequel un phénomène de surcote temporaire est survenu. Le débit de la Vise juste avant l'inversac (28 novembre 2020) est de l'ordre de 60 L/s (moyenne journalière, Figure 41).

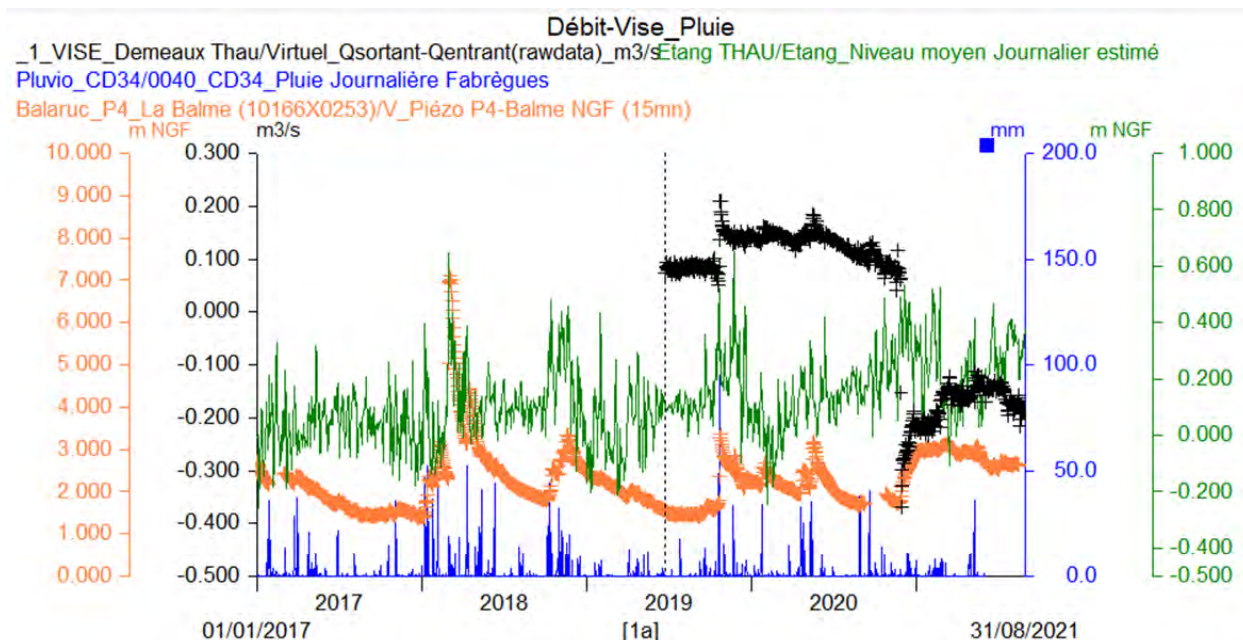


Figure 41 : Évolution du niveau piézométrique au sein de l'aquifère jurassique au forage F4-La Balme (orange), du niveau de l'étang de Thau (vert), de la pluviométrie (bleu) et du débit de la Vise (noir).

## 7.2. EXPLICATION DU MÉCANISME D'INVERSAC

La source de la Vise correspond à un exutoire karstique situé à une profondeur proche de 30 mètres sous le niveau de la lagune de Thau. Il constitue l'extrémité supérieure d'un conduit karstique qui est supposé subvertical (dont la géométrie précise est inconnue) qui draine l'aquifère carbonaté karstique du Jurassique situé sous la couverture du Miocène qui le rend captif.

La configuration géométrique du contexte d'émergence est décrite sous la forme d'une coupe verticale 2D simplifiée (Figure 42). Sous le griffon de la source dont l'altitude est considérée comme le niveau de référence ( $z = 0$ ), le toit du Jurassique est situé à une profondeur  $P$ . Il convient de noter que la géométrie du conduit reliant la lagune à l'aquifère est probablement bien plus complexe que sa schématisation sous forme d'un conduit rectiligne vertical tel que représenté à la Figure 42. Dans l'étang, la masse volumique de l'eau est proche de celle de l'eau de mer ( $\rho_e = 1031.7^9 \text{ kg/m}^3$ ). Dans l'aquifère, la masse volumique de l'eau souterraine varie d'un point à un autre et au cours du temps selon les mélanges entre eau douce, eau salée et eau thermale. Elle est largement inférieure toutefois à la masse volumique de l'eau de l'étang. Le niveau d'eau dans la lagune  $H_e$  varie au cours du temps au gré du niveau de la mer Méditerranée, des marées et des épisodes de tempêtes. Le niveau piézométrique dans l'aquifère  $H_p$  varie au cours du temps en fonction de la recharge naturelle de la nappe à l'amont, des prélèvements d'eau pour les différents usages et de la vidange de l'aquifère par ses différents exutoires naturels.

Dans un premier temps, considérons une situation hydrostatique de manière à simplifier le problème. En situation normale, le niveau<sup>10</sup> dans l'aquifère étant supérieur au niveau de la lagune, le gradient hydraulique entre les deux masses d'eau induit des flux verticaux ascendants au sein du conduit karstique. L'eau douce de l'aquifère captif du Jurassique se déverse dans la lagune de Thau. Cette situation se produit tant que la condition suivante est respectée :

$$H_p > \rho_e / \rho_o H_e$$

En situation d'inversac, le niveau dans l'aquifère devient inférieur au niveau de l'étang, l'inversion de gradient hydraulique induit une inversion de sens des flux verticaux au sein du conduit, qui deviennent descendants. L'eau saumâtre de la lagune de Thau s'infiltre alors dans l'aquifère du Jurassique. En quelques secondes, l'eau de l'étang remplit le conduit karstique d'eau saumâtre sur une hauteur  $P$ , provoquant une augmentation instantanée de charge hydraulique au sein de l'aquifère à la sortie du conduit de la Vise. Cette augmentation de charge devra ensuite être vaincue par la charge hydraulique au sein de l'aquifère pour retrouver une situation normale avec des courants ascendants. C'est la raison pour laquelle, malgré une mise en place rapide, l'inversac peut se prolonger sur des durées importantes avant qu'une pluie significative ne contribue à augmenter de façon marquée la charge hydraulique dans l'aquifère. L'inversac perdure tant que la condition suivante est respectée :

$$\rho_e / \rho_o (H_e + P) - P - H_p > 0$$

<sup>9</sup> Valeur estimée à partir des mesures de conductivité électrique effectuées à la source de la Vise

<sup>10</sup> Niveau intégrant la densité de l'eau



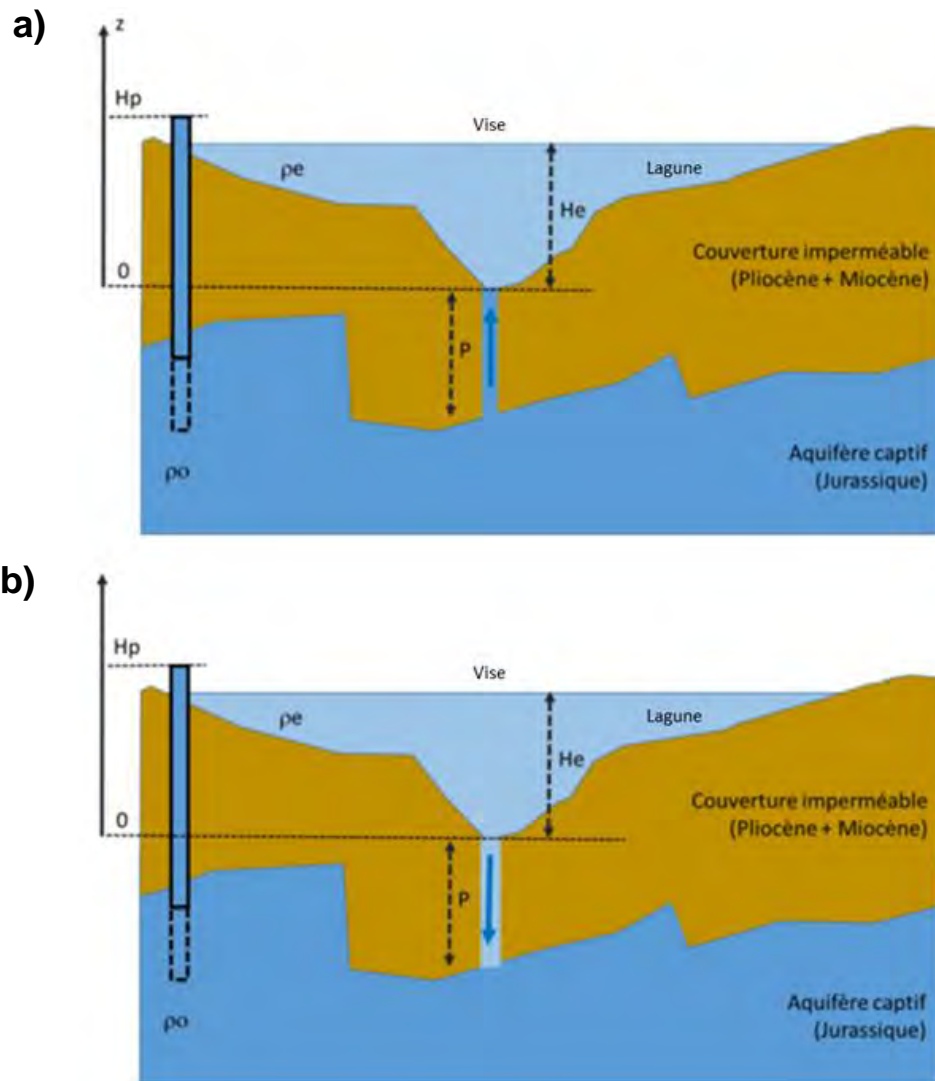


Figure 42 : Coupe hydrogéologique 2D verticale centrée sur l'émergence de la source de la Vise. Schématisation des écoulements (a) en conditions normales (b) en cours d'inversac.

### 7.3. IMPACT QUALITATIF DE L'INVERSAC SUR LES EAUX DE LA PRESQU'ÎLE DE BALARUC

Dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau, les suivis combinés à la Vise et des forages et sources permettent de caractériser avec précision certaines modalités de transport de masse dans l'hydrosystème, autour de la Vise. En effet, c'est la première fois depuis le début des suivis à la source de la Vise, à la fin des années 1960, qu'au cours d'un inversac le signal d'entrée (fluctuations de la conductivité électrique et du débit) et sa propagation dans l'aquifère sont spécifiquement mesurés en différents points de la presqu'île et à différentes profondeurs. Ces mesures permettent une caractérisation multi-échelle des modalités de transport de masse dans l'aquifère Jurassique.

Au cours du processus d'inversac, les conditions d'écoulements au droit de la Vise sont inversées de manière instantanée. Via la source de la Vise, l'eau salée de la lagune de Thau pénètre instantanément dans l'aquifère du Jurassique, ceci a pour conséquence une injection ponctuelle et continue d'un fluide salé au sein de l'aquifère. En terme de conditions aux limites, l'évènement d'inversac peut être considéré comme un créneau d'injection d'un fluide dont la composition en soluté (sel) est très différente de celle du fluide en place dans le milieu (eau douce principalement).

Ainsi, le transport de sel induit par l'évènement d'inversac peut être interprété comme un traçage « naturel » ayant pour point d'injection la Vise et différents points d'observations appartenant au réseau d'observation du projet. L'interprétation quantitative des courbes d'arrivée du sel aux différents points d'observations a pu être réalisée à l'aide d'une solution analytique basée sur un modèle de transport simple (advection dispersion) unidimensionnel. Cette interprétation permet de caractériser les propriétés hydrodispersives de l'aquifère dans la région de la Vise par une approche parcimonieuse, les paramètres ont été obtenus avec le logiciel d'interprétation d'essai de traçage TRAC (Gutierrez *et al.*, 2012, 2013).

Le phénomène d'inversac affecte l'organisation des écoulements et de la qualité des eaux thermales notamment dans la zone d'émergence naturelle (autour de la source S12) pour laquelle de très fortes augmentations de minéralisation sont observées (de 18,7 mS/cm à 44 mS/cm) expliquées par le phénomène de mélange avec les eaux salées (CE = 60 mS/cm) absorbées par la Vise (Figure 43). Des phénomènes de mélange sont également observés sur les autres ouvrages de la presqu'île, la figure suivante (Figure 44) permet de synthétiser les résultats obtenus par l'approche géochimique lors de l'inversac 2020-2022. Ces résultats sont à comparer à la situation de référence, en dehors des périodes d'inversac (Figure 32).

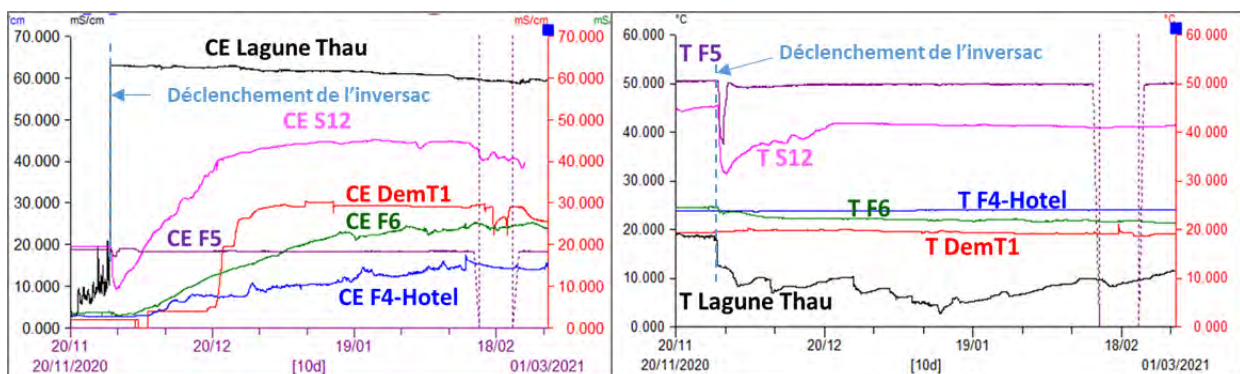
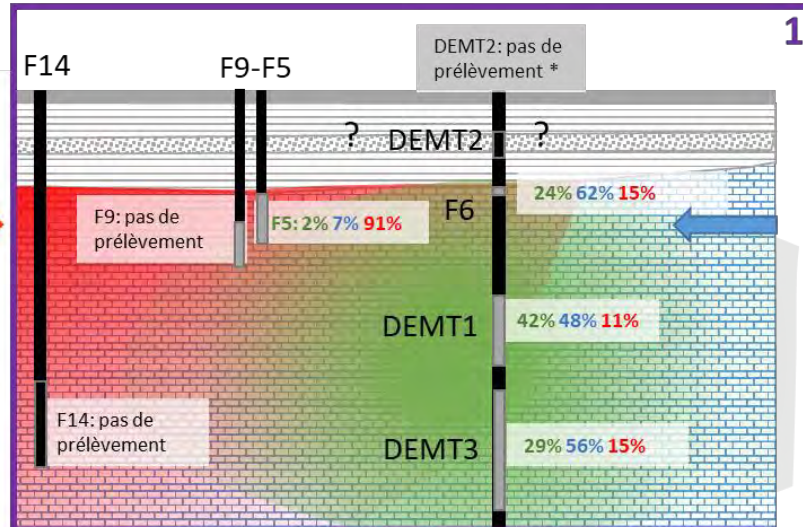
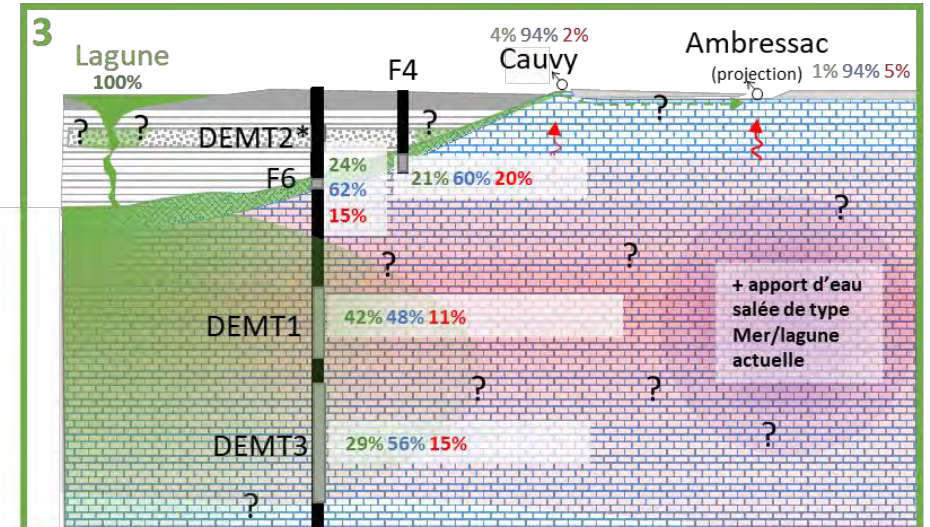
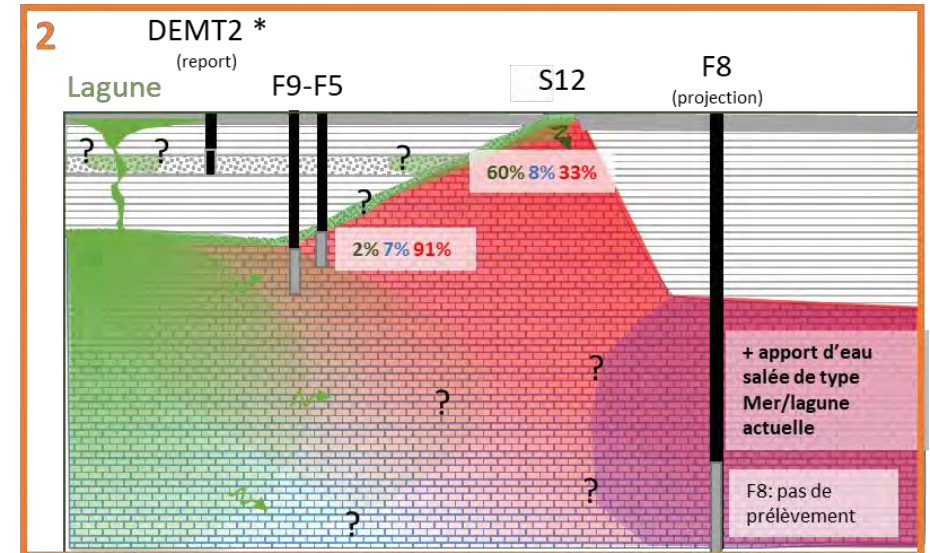
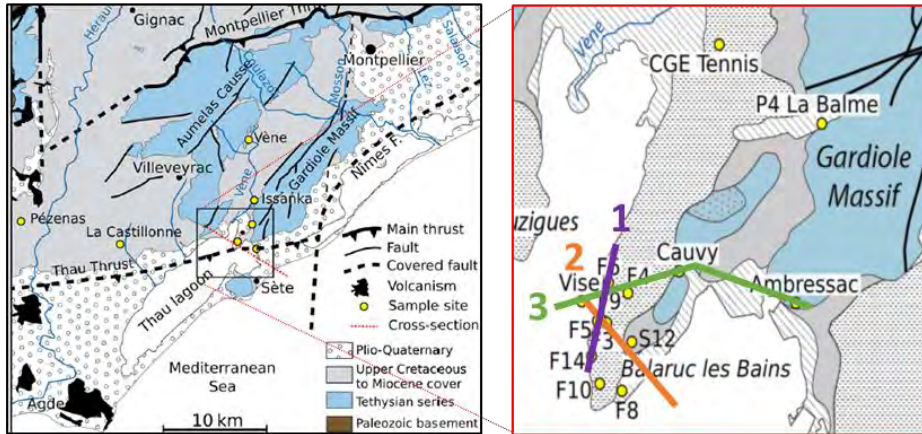


Figure 43 : Évolutions des conductivités électriques (à gauche) et températures de l'eau (à droite) enregistrées après l'inversac de novembre 2020 dans les points du réseau de mesure proche de la source de la Vise.



# Condition d'inversac en Janvier 2021

40 à 45 jours après le début de l'inversac



X% proportion d'eau de l'étang, X% d'eau karstique et X% d'eau thermique estimées avec les isotopes du strontium pour la campagne de janvier 2021

\* Pas d'accès au forage DEMT2 en période d'inversac

Figure 44 : Schéma conceptuel de la presqu'île de Balaruc-les-Bains en situation d'inversac (extrait Ranchoux et al., 2022 L5b BRGM/RP-71957-FR).

L'intrusion de l'eau salée par la Vise repousse probablement vers le nord la limite avec les eaux douces d'origine karstique sans que l'on puisse précisément la situer, entre les ouvrages F4 et CGE-Tennis/P4-Balm, ces deux derniers ouvrages n'étant pas affectés du point de vue physico-chimique par le phénomène d'inversac.

## **7.4. MODÉLISATION DE L'INVERSAC**

Ce paragraphe décrit des approches de modélisation spécifiques au phénomène d'inversac et à son voisinage. Les échelles de temps et d'espace sont très différentes de celles des modèles mis en œuvre au chapitre précédent (§ 6.1 et § 6.2).

### **7.4.1. Modélisation analytique du rebond piézométrique**

Les rebonds piézométriques observés varient en fonction de la distance du point d'observation à la source de la Vise : ce phénomène est lié à la diffusion de la perturbation de charge induite à la Vise au sein de l'aquifère jurassique par le remplissage soudain du conduit karstique. Ce phénomène peut être approché par modélisation en résolvant l'équation de diffusion au sein d'un aquifère poreux, homogène et isotrope de taille infinie.

La solution analytique en écoulement monodimensionnel permet de représenter les tendances observées (Figure 45) (Sauf pour le piézomètre éloigné (CGE-Tennis à 2 600 m), on constate une surestimation des niveaux d'eau aux temps courts et ensuite une sous-estimation aux temps longs. En F4, les niveaux sont généralement sous-estimés, tout comme en F6. En S12, si la magnitude des niveaux d'eau est généralement bien représentée, la dynamique est moyennement représentée. Pour obtenir ces ajustements, le paramètre de diffusivité de l'aquifère a été calé par essais-erreurs : la valeur obtenue ( $D=25 \text{ m}^2/\text{s}$ ) est commune aux quatre piézomètres, en accord avec les valeurs obtenues par interprétation des essais de pompage ou par application de la même relation au transfert de charge entre l'étang et l'aquifère (cf. BRGM/RP-70842-FR). Si les fluctuations piézométriques ne sont pas parfaitement reproduites par la solution analytique, nous considérons que les résultats sont satisfaisants et que la solution permet de représenter les tendances majeures observées, notamment en fonction de la distance à la Vise. Les écarts entre les mesures et le modèle sont en partie liés à la forte hétérogénéité de l'aquifère alors que la solution présume un aquifère homogène et isotrope. Le constat qu'un régime d'écoulement monodimensionnel satisfaisant mieux les observations suggère l'importance des écoulements au sein des conduits karstiques qui favorisent une réponse hydrodynamique linéaire différente d'une réponse radiale-sphérique comme cela aurait été le cas dans un aquifère poreux classique.

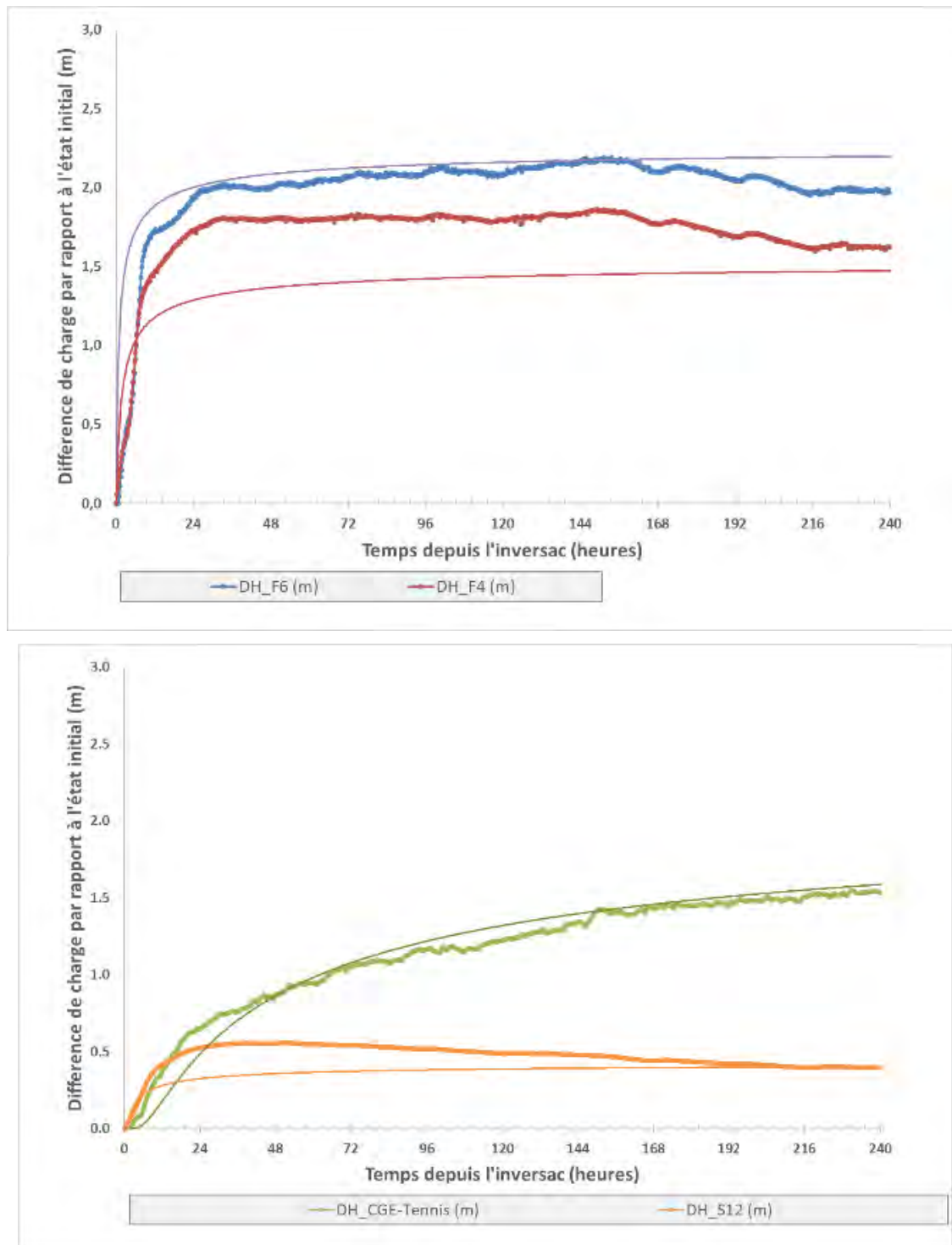


Figure 45 : Inversac de 2020-2022 - évolution en fonction du temps des variations piézométriques observées et simulées au moyen de la solution 2 aux forages proches F4, F6 (en haut) et éloignés S12 et CGE-Tennis (en bas).



#### 7.4.2. Modélisation numérique des écoulements souterrains et du transport de sel

Un modèle numérique à éléments finis (Feflow) a été mis en œuvre pour simuler les mécanismes du phénomène d'inversac. L'objectif de cette modélisation est de reproduire les processus et non pas de tenter de simuler fidèlement les observations de niveaux et débits. Le modèle consiste en une coupe verticale 2D d'un aquifère captif d'une épaisseur  $e = 300$  m, situé sous un aquiclude d'une épaisseur  $P$  égale à 70 m. Un conduit fortement perméable situé à son toit au centre du domaine modélisé permet la connexion avec une masse d'eau salée d'une épaisseur de 31 mètres représentant l'étang de Thau (Figure 46). La diffusivité de l'aquifère  $D$  est égale à  $25 \text{ m}^2/\text{s}$ , conformément aux résultats obtenus lors de la modélisation analytique ci-dessus (§ 7.4.1).

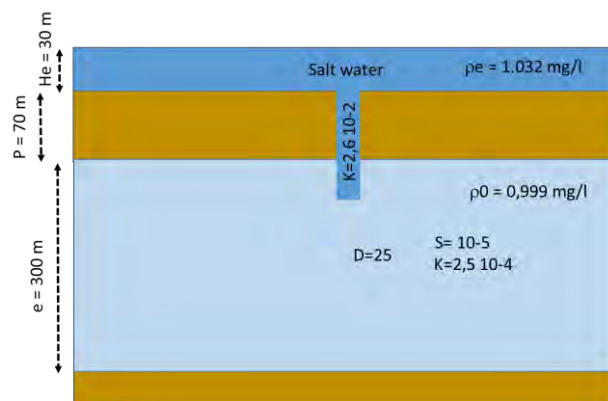


Figure 46 : Schéma (coupe hydrogéologique 2D verticale) du modèle numérique mis en œuvre.

Le scénario modélisé permet de reproduire deux cycles hydrologiques avec des conditions de hautes et basses eaux dans l'aquifère. L'étang subit par ailleurs deux événements identiques de courte durée, séparés de 6 mois. Chaque événement consiste en une montée-descente triangulaire de niveau de 1 m en seulement 7 jours, lié par exemple à une tempête sur l'étang. Lors du premier événement (démarrant après 30 jours de simulation), le niveau dans l'aquifère est à une hauteur de +3 mNGF à la limite amont de l'aquifère (à 4 000 m du conduit) et il n'y a pas d'inversion induite des flux.

En revanche, lorsque le deuxième événement survient après 210 jours, la hauteur piézométrique dans la nappe (à 4 000 m) était graduellement descendue à +2,5 m (suite à une baisse liée à l'absence de pluie par exemple), ce qui génère un puissant inversac qui ne disparaît qu'après remontée de la hauteur piézométrique dans la nappe (à 4 000 m) à +5 m NGF suite à un important épisode de recharge par exemple. La situation normale est ensuite retrouvée lorsque les niveaux d'eau dans l'aquifère repassent de +5 m NGF graduellement à +3 m NGF, comme au début de la simulation.

Les résultats mettent en évidence la succession de trois phases majeures :

- phase 1 : situation normale (entre  $t = 0$  et  $t = 210$  j) : les débits à l'exutoire sont positifs (ascendants de l'aquifère vers l'étang) et proportionnels à la charge hydraulique imposée à l'amont de l'aquifère (oscillant entre + 3 et + 2,5 m NGF) : ils oscillent entre 60 et 40 L/s. La forte hausse de niveau d'eau de l'étang (à  $t = 30$  j) induit une baisse subite du débit à l'exutoire mais n'induit pas d'inversac ;

- phase 2 : situation d'inversac (entre  $t = 210$  et  $t = 445$  j) : suite à une forte hausse du niveau de l'étang concomitante à un niveau dans l'aquifère plus faible, les débits à l'exutoire deviennent négatifs (descendants de l'étang vers l'aquifère). Par ailleurs, un rebond piézométrique est observé dans les piézomètres (courbe verte pour un piézomètre situé à 100 m du conduit) au moment de l'inversac ( $t = 210$  j) comme c'est le cas dans la réalité ;
- phase 3 : situation normale (entre  $t = 445$  et  $t = 730$  j) : suite à une remontée du niveau piézométrique à l'amont de l'aquifère (induite par exemple par une forte pluie), les débits à l'exutoire redeviennent positifs : la situation redevient normale avec des flux ascendants au sein du conduit karstique.

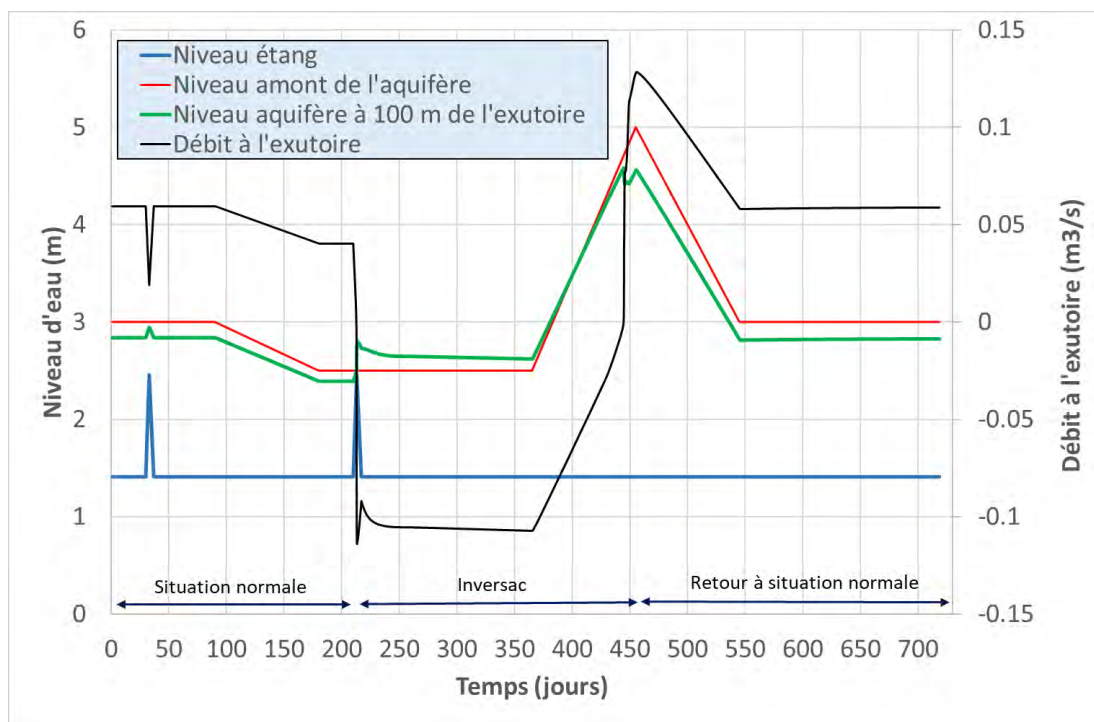


Figure 47 : Évolution des niveaux d'eau et débit simulés par le modèle numérique.

### 7.4.3. Modélisation analytique des débits mesurés à la Vise

Une tentative de prise en compte des écoulements souterrains a été réalisée, en complément de l'analyse préliminaire hydrostatique décrite précédemment au §7.2 en considérant un schéma conceptuel d'écoulement régional au sein de l'aquifère du Jurassique en relation avec la lagune de Thau comme schématisé à la Figure 48.

Dans cette étude, deux solutions analytiques ont été développées pour décrire et reproduire les évolutions du débit de la source sous-marine de la Vise en situation normale (modèle 1 hors inversac) et en période d'inversac (modèle 2). Les modèles développés reposent sur un nombre limité de paramètres (respectivement [A et C] et [A, C, P]) et utilise en entrée les évolutions mesurées dans le karst (piézométrie en amont hydraulique à plus de 2,6 km de la Vise), les variations de la cote du plan d'eau et de la salinité de la lagune de Thau.

## Schéma conceptuel

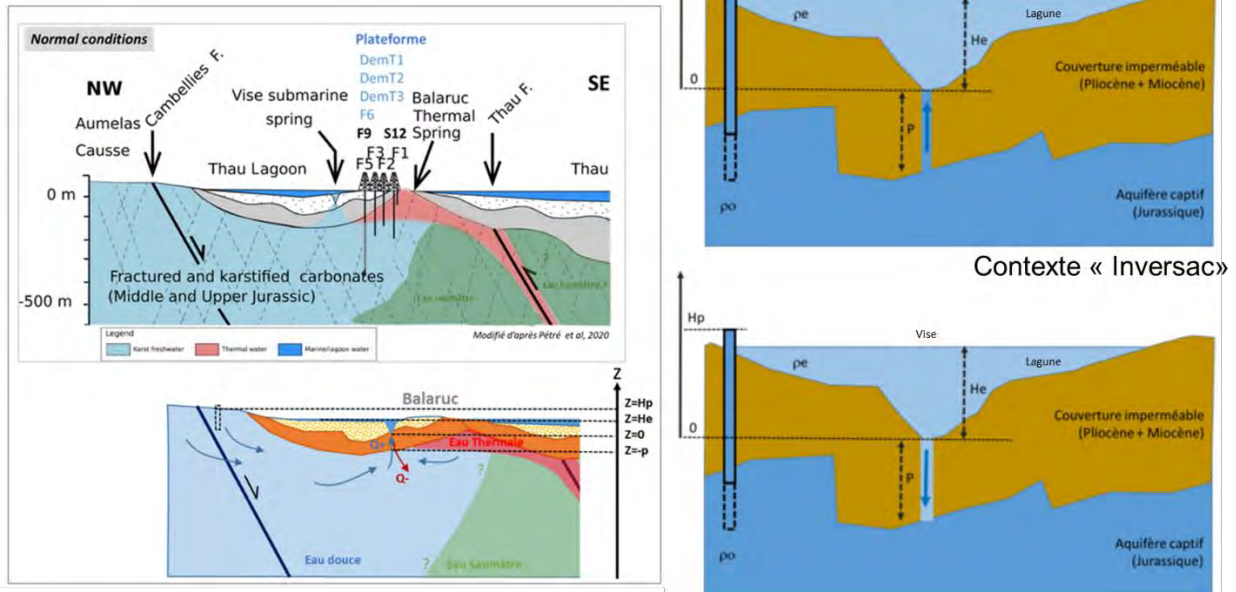


Figure 48 : Schéma conceptuel interprétatif et coupes hydrogéologiques verticales au droit de la Vise.

En situation normale (hors inversac), les débits au sein de l'aquifère karstique de Thau peuvent être décrits par les équations suivantes sous l'hypothèse d'une simplification des lois de l'hydrodynamique négligeant par exemple la géométrie du système :

- au sein de l'aquifère fissuré et karstifié du Jurassique, le débit traversant cet aquifère est proportionnel à la différence de charge hydraulique entre la zone d'infiltration à l'amont de l'aquifère et la sortie de la Vise à l'aval (hypothèse d'écoulements laminaires) :

$$Q_{jur}^+ = A(H_p - \rho_e/\rho_0 H_e - \Delta H_c)$$

- au sein du conduit karstique reliant l'aquifère du Jurassique à l'étang, le débit traversant ce conduit est proportionnel à la racine carrée des pertes de charge hydraulique au sein du conduit (hypothèse d'écoulements turbulents) :

$$Q_c = C\sqrt{\Delta H_c}$$

Où  $\Delta H_c$  désigne les pertes de charge hydraulique au sein du conduit karstique entre le toit de l'aquifère du Jurassique et l'exutoire de la source de la Vise ;  $A$  [m<sup>2</sup>/s] désigne le « coefficient de transmissivité » de l'aquifère du Jurassique et  $C$  [m<sup>2.5</sup>/s] le « coefficient de transmissivité » du conduit karstique.

La résolution des deux équations précédentes permet d'exprimer le débit à la source de la Vise en situation normale et en situation d'inversac.

En situation normale (lorsque  $H_p > \rho_e/\rho_0 H_e$ ), le débit sortant ( $> 0$  par convention) de l'aquifère à la source de la Vise peut être décrit par l'équation suivante :

$$Q_{Vise}^+ = \frac{C^2}{2A} \left( \sqrt{1 + \frac{4A^2}{C^2} (H_p - \rho_e/\rho_0 H_e)} - 1 \right)$$

En situation d'inversac (lorsque  $H_p < \rho_e / \rho_0 (H_e + P) - P$ ), le débit entrant ( $< 0$  par convention) dans l'aquifère au travers du conduit karstique de la Vise est :

$$Q_{Vise}^- = -\frac{C^2}{2A} \left( \sqrt{1 + \frac{4A^2}{C^2} (\rho_e / \rho_0 (H_e + P) - H_p - P)} - 1 \right)$$

Une prise en compte de l'effet des pompages sur la piézométrie a également été introduite (Livrable L11b BRGM/RP-70839-FR, Ladouche *et al.* 2022,).

Différents tests ont été réalisés pour apprécier la sensibilité des modèles aux différentes chroniques d'entrées considérées. Les résultats indiquent que la piézométrie mesurée en amont (P4-Balm ou CGE-Tennis) permet de reproduire de manière jugée très satisfaisante les débits observés entre juin 2019 et le 27 novembre 2020 (avant l'inversac). Pour le piézomètre P4-Balm (BSS002JEKE) situé à environ 2 850 m de la Vise dans l'aquifère libre jurassique entre 50 et 100 m de profondeur, la combinaison suivante des paramètres A et C :  $A=1,75 \text{ m}^2/\text{s}$  et  $C=0,1276 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$  est obtenu pour le modèle (Figure 49).

Les résultats des simulations du modèle modifié ont été jugés satisfaisants ce qui a amené dans un second temps du travail (cf. § 7.5) au développement d'un prototype (V0) d'un outil permettant d'évaluer le risque de déclenchement de l'inversac en fonction des principaux paramètres qui contrôlent l'évolution du débit de la Vise :  $H_p$ ,  $H_e$ , ratio de densité entre l'eau de la lagune et l'eau du karst amont, rabattement cumulé lié aux pompages ( $F5+F6-F9+F14$ , F8, S12).

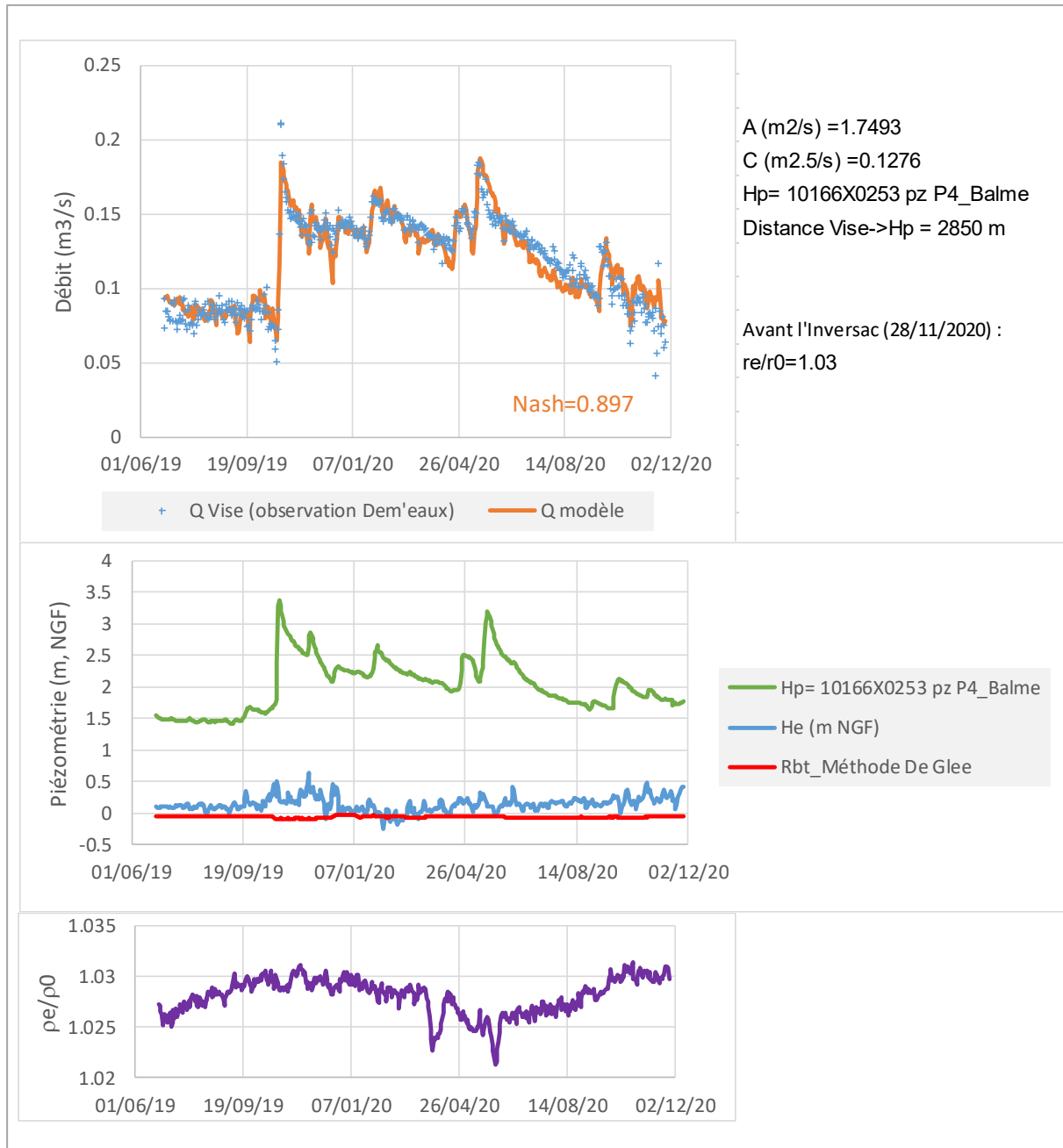


Figure 49 : Simulation des débits de la Vise en considérant les variations de niveau de la lagune, les variations du ratio  $\rho_e/\rho_0$  et les variations piézométriques de l'ouvrage P4-Balm (BSS002JEKE).

Pour le modèle 2 (en période d'inversac), l'élévation globale du niveau piézométrique au sein de la presqu'île observée dans les jours qui suivent le phénomène d'inversac nous a amené à corriger son influence dans la modélisation analytique par rapport à la situation de référence (hors inversac). Pour le piézomètre de référence P4-Balm la correction moyenne est estimée à -1,17 m ( $\pm 0.14$ ). L'élévation globale du niveau piézométrique au sein de la presqu'île de Balaruc conduit probablement à une modification des paramètres hydrodynamiques du milieu aquifère comme le suggèrent les résultats des simulations. En effet le paramètre A qui représente la diffusivité moyenne du milieu karstique aquifère est diminué ( $A = 0,319 \text{ m}^2\text{/s} \pm 0,082 \text{ m}^2\text{/s}$ ) par rapport à la situation de référence ( $A = 1,75 \text{ m}^2\text{/s}$  modèle 1 P4-Balm avec prise en compte des pompes).



Par ailleurs, le « coefficient de transmissivité » ( $C$ ) du conduit karstique est augmenté d'un facteur 2 ( $0,234 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$  contre  $C = 0,1276 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$ ) ce qui suggère que les pertes de charge dans le conduit entre la source et le toit du Jurassique sont diminuées par rapport à la situation de référence (contexte normal). L'évolution des débits horaires simulés lors de l'inversac de 2020-2022 permet de reproduire les observations de manière jugée satisfaisante.

Ces résultats ont également amené dans un second temps du travail (cf. § 7.5) au développement d'un autre outil-prototype (V0) permettant d'évaluer les possibilités de fin du phénomène d'inversac à partir des principaux paramètres qui contrôlent l'évolution du débit d'absorption de la Vise au cours de ces périodes ( $H_p$ ,  $H_e$ , ratio de densité entre l'eau de la lagune et l'eau du karst amont).

## 7.5. GESTION ET PRÉVISION DE L'INVERSAC

Pour gérer au mieux la ressource en eau souterraine sur le secteur de Thau, il convient de définir des indicateurs d'alerte et de prévision pour le risque d'inversac.

Deux indicateurs majeurs ont été définis (BRGM/RP-70839-FR, Ladouche *et al.* 2022) : (i) en situation normale (écoulements ascendants de l'aquifère vers l'étang), un indicateur de risque d'inversac et (ii) en situation d'inversac (écoulements descendants de l'étang vers l'aquifère), un indicateur de possibilité de fin de l'inversac.

### 7.5.1. Surveillance en situation normale : indicateur de risque d'inversac

En hypothèse hydrostatique, les écoulements au travers du conduit karstique de la Vise restent ascendants tant que la charge hydraulique au sein de l'aquifère est supérieure à la charge de l'étang, corrigées des effets densitaires. L'indicateur suivant est proposé :

$$I_1 = H_p - \rho_e / \rho_o H_e > 0$$

Tant que l'indicateur  $I_1$  reste significativement positif (valeur seuil  $>0.8$ ), le risque d'inversac est faible. Lorsqu'il se rapproche de zéro, le risque d'inversac augmente. Lorsque l'indicateur devient négatif, l'inversac se met en place.

L'indicateur  $I_1$  est donc constitué des quatre variables suivantes :

- $H_p$  correspond à une mesure de la charge hydraulique au sein de l'aquifère Jurassique<sup>11</sup> représentative de l'état de l'aquifère à sa limite amont corrigé des pertes de charge liées aux pompages au sein de l'aquifère à proximité de la Vise, l'estimation de rabattement provoqué par les pompages) ;
- $\rho_o$  correspond à la densité de l'eau de l'aquifère au droit du piézomètre d'observation choisi pour mesurer la variable précédente  $H_p$  ;
- $\rho_e$  correspond à la densité de l'eau saumâtre de la lagune dans le secteur de la Vise qui est fonction de la salinité et de la température de l'eau de la lagune ;
- $H_e$  correspond à la hauteur d'eau de la lagune de Thau au-dessus du griffon de la Vise.

<sup>11</sup> Cette charge est mesurée par rapport à un niveau de référence choisi tel que  $z = 0$  au griffon de la source de la Vise

Selon la valeur de l'indicateur  $I_1$ , quatre situations distinctes ont été distinguées :

- $I_1 > 0.8$  : Pas de vigilances ;
- $0.25 < I_1 < 0.8$  : Vigilance ;
- $0.1 < I_1 < 0.25$  : Vigilance renforcée ;
- $I_1 < 0.1$  : Crise imminente d'inversac.

## Production issue du projet Dem'Eaux Thau (2017-2022)

Un prototype (V0) d'un outil permettant d'évaluer le risque de déclenchement de l'inversac de la Vise à l'aide de l'indicateur  $I_1$  a été élaboré dans le cadre du projet Dem'Eaux Thau (BRGM/RP-70839-FR). L'outil permet sur la base des gammes possibles des variables explicatives ( $H_e$ ,  $H_p$  et  $re/ro$ ) d'évaluer instantanément la valeur du paramètre  $I_1$  et la valeur du débit de la Vise et ainsi de connaître le contexte de vigilance associé.

Selon la valeur de l'indicateur  $I_1$ , 4 situations distinctes ont été distinguées :

- $I_1 > 0.8$  : Pas de vigilances [ $Q_{vise} > 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ]
- $0.25 < I_1 < 0.8$  : Vigilance [ $0.062 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{vise} < 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ]
- $0.1 < I_1 < 0.25$  : Vigilance renforcée [ $0.039 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{vise} < 0.062 \text{ m}^3/\text{s}$ ]
- $I_1 < 0.1$  : Crise imminente d'inversac [ $Q_{vise} < 0.039 \text{ m}^3/\text{s}$ ]

Ce prototype permet également la prise en compte de l'effet des pompages sur des ouvrages situés à proximité de la Vise (F5, F6, F9 et F14...).

L'esprit adopté ici pour ce prototype est de permettre à l'utilisateur d'évaluer, pour une situation hydrogéologique donnée ( $H_p$ ,  $H_e$  et  $re/ro$ ), l'effet d'une modification du régime de pompage (ouvrages F5, F6, F9, F14...) sur l'indicateur/débit de la Vise. Les 2 valeurs de l'indicateur/débit de la Vise sont replacés dans le contexte de vigilance précédemment définie



Figure 50 : Présentation du prototype de l'outil permettant d'évaluer le risque de déclenchement de l'inversac à l'aide de l'indicateur  $I_1$  en tenant compte de l'effet des pompages. Dans l'exemple, le critère « actuel » représentait la situation de l'hydrosystème dans les heures qui précédaient le déclenchement de l'inversac de 2020.

Un prototype (V0) d'un outil permettant d'évaluer le risque de déclenchement de l'inversac à l'aide de l'indicateur  $I_1$  a été élaboré (Figure 50), il présente l'évolution du débit de la Vise calculés à l'aide de l'équation précédente (exprimant  $Q_{JUR}$ ) en fonction de la valeur de l'indicateur  $I_1$ .

### 7.5.2. Surveillance en situation d'inversac : indicateur de situation d'arrêt d'inversac

En hypothèse hydrostatique, les écoulements au travers du conduit karstique de la Vise restent descendants tant que la charge hydraulique au sein de l'aquifère est inférieure à la charge de l'étang, corrigée des effets densitaires et du surplus de charge hydraulique lié au remplissage du conduit karstique de la Vise durant l'inversac sur une hauteur  $P$ . L'indicateur suivant est proposé :

$$I_2 = \frac{\rho_e}{\rho_o} (H_e + P) - P - H_p > 0$$

Tant que l'indicateur  $I_2$  reste significativement positif ( $> 0.1$ ), l'inversac sera durable. Lorsqu'il se rapproche de zéro ( $< 0.1$ ), la probabilité de fin d'inversac augmente. Lorsque l'indicateur devient négatif, l'inversac s'arrête.

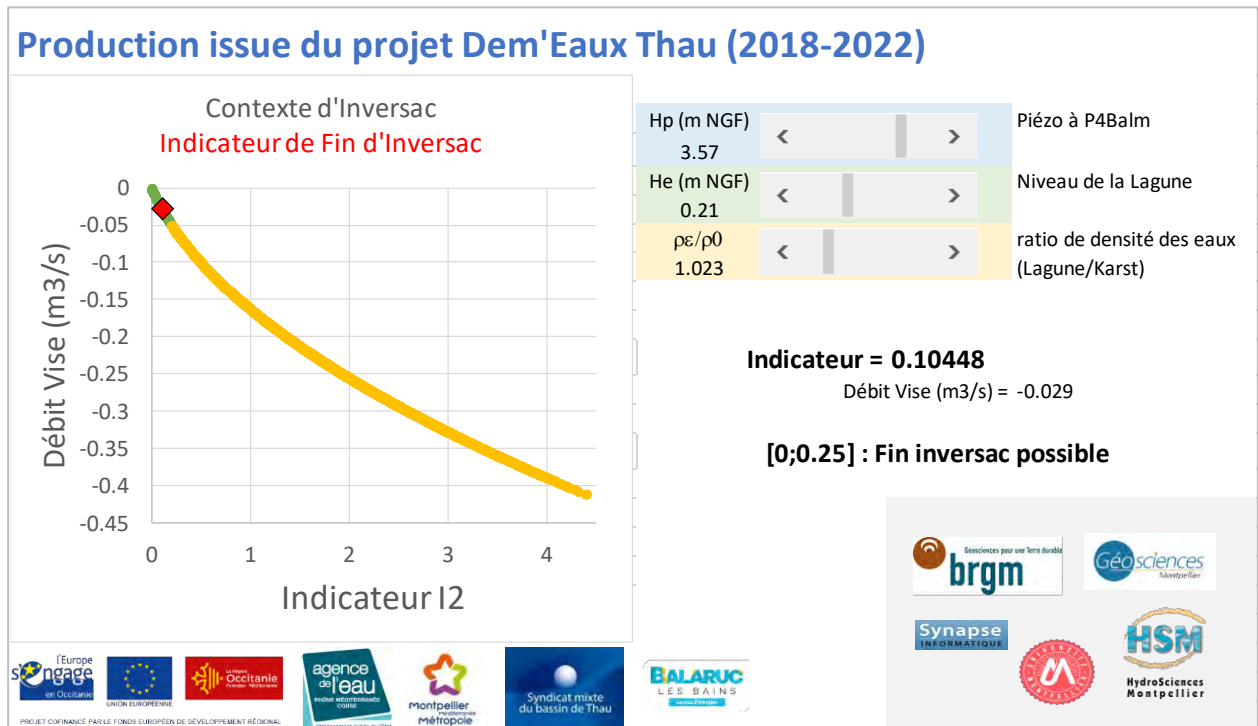


Figure 51 : Présentation du prototype de l'outil permettant d'évaluer la possibilité de fin de l'inversac.

De manière similaire, un prototype (V0) d'un outil permettant d'évaluer la possibilité de fin de l'inversac à l'aide de l'indicateur  $I_2$  a été élaboré (Figure 51). L'outil permet sur la base des gammes possibles des variables explicatives ( $H_e$ ,  $H_p$  et  $\frac{\rho_e}{\rho_o}$ ) d'évaluer instantanément la valeur du paramètre  $I_2$  et d'estimer la valeur du débit d'absorption des eaux saumâtres de la lagune par la Vise.



### 7.5.3. Surveillance : conclusion

Les indicateurs I1 et I2 nécessitent la connaissance de plusieurs variables ( $H_p, H_e, \rho_e/\rho_o$ ). **Certaines d'entre elles sont encore mal connues (salinité de la lagune au niveau de la Vise) et nécessitent la mise en place d'une instrumentation supplémentaire. Nous recommandons de mettre en place un système de mesures de la hauteur d'eau dans l'étang et de sa salinité dans un périmètre proche de la source de la Vise.** Le pas de temps pourrait être horaire.

**Nous recommandons également de maintenir le suivi piézométrique au sein du forage de P4-Balm et également à l'ouvrage CGE-Tennis** pour pallier une éventuelle défaillance du premier.

### 7.5.4. Remédiation

La solution d'obturation de la source de la Vise a déjà été réalisée partiellement par le passé sous la forme d'un clapet anti-retour disposé au niveau de la source (Combes 2011) de façon à permettre les flux ascendants au sein du conduit karstique en période normale et empêcher des flux descendants en période d'inversac. Cette solution permettrait de réduire les effets d'un inversac mais pas nécessairement de l'empêcher car la configuration naturelle de la zone d'émergence de la Vise composée d'un griffon principal (collecté par le dispositif de mesure mis en place dans le projet à -29,5 m de profondeur) et de griffons secondaires de faibles débits situés à proximité à des profondeurs plus faibles (autour de 28,5 m de profondeur) permettrait l'absorption d'eau de la lagune en direction du karst sous-jacent.

Dans l'idéal, il conviendrait d'obturer partiellement la source de la Vise au niveau de sa sortie, à -29.5 m sous le niveau de la lagune. Le dispositif d'obturation de la Vise devrait être ajustable/modulable de façon à être en mesure de contrôler le niveau piézométrique de la nappe du Jurassique dans la presqu'île de Balaruc. En effet, une obturation complète provoquerait probablement une remontée trop importante du niveau de la nappe, induisant une inondation de structures souterraines (caves...), ceci pourra être évalué ultérieurement par modélisation à l'aide du modèle hydrogéologique 3D. Dès lors, l'obturateur pourrait être couplé au système de mesure du niveau piézométrique de façon à automatiser le degré d'ouverture de l'obturateur en fonction de la hauteur piézométrique.

En absence de dispositif de réduction de débit de la Vise, l'autre solution pour maintenir des niveaux d'eau élevés dans le karst est la recharge artificielle (ou maîtrisée) de l'aquifère à proximité de la Vise par injection d'eau dans un ouvrage conçu spécifiquement pour cet usage. Cette dernière solution basée sur un débit d'injection soulève deux problèmes techniques majeurs. Le premier consiste à réaliser et dimensionner un ouvrage d'injection interceptant le même conduit karstique que celui de la source, ou un conduit bien connecté, et le second suppose que l'on puisse acheminer d'importants volumes d'eau douce pour assurer l'injection. Pour une durée de 20 jours et une injection à 100 m<sup>3</sup>/h, cela représente 48 000 m<sup>3</sup>.

En conclusion, une solution de remédiation basée sur une réduction/vannage du débit d'exhaure de la source de la Vise asservi à l'évolution de la piézométrie de l'aquifère apparaît la solution la plus pragmatique sur le long terme. En contexte très déficitaire de précipitation et donc de recharge de l'aquifère, une solution de remédiation mixte consistant à injecter de l'eau douce par forage couplé à une réduction des débits de la source de la Vise pourrait s'avérer une solution transitoire intéressante pour réduire le niveau de risque de déclenchement d'un inversac.

La solution technique qui permettrait de moduler le débit de la source de la Vise en fonction de la piézométrie (et les aménagements associés) demanderait à être étudiée de façon détaillée, notamment en terme d'impact sur la qualité de l'eau de la lagune.

## 8. Outil d'observation et de gestion

Par son caractère interdisciplinaire, le projet DEM'Eaux Thau a produit un grand nombre de données de type et de qualité différentes. La récupération, bancarisation, organisation, traitement et visualisation de ces données pour un usage à la fois professionnel et de vulgarisation de ces données sur une plateforme numérique a représenté un défi informatique important.

L'outil d'observation et de gestion développé par la société SYNPASE est une plateforme informatique qui est accessible aux partenaires du projet via l'adresse web suivante : <https://demeauxthau.follow.solutions>. Un compte utilisateur avec identifiant et mot de passe est actuellement nécessaire pour accéder à l'application.

Cette plateforme informatique a donné lieu à plusieurs types de travaux dont le détail est décrit dans les rapports L12 (Architecture de la plateforme numérique : infrastructure matérielle et réseau) et L13 (Plateforme web : Outil d'observation et de gestion DEM'Eaux Thau).

Le matériel informatique ainsi que la plateforme de stockage de données nécessaires à la mise en place de cette plateforme Web ont été financés par le CPER (inv. n° 7).

### 8.1. MISE EN PLACE DE L'ARCHITECTURE MATÉRIELLE ET RÉSEAU

La première action pour la mise en place de l'outil d'observation et de gestion a été la mise en place de l'architecture matérielle et réseau (Figure 52).

Il faut noter que la plateforme technique est partagée par les projets DEM'Eaux Thau et DEM'Eaux Roussillon.

Ce travail a consisté dans les points principaux suivants :

- spécification et dimensionnement du matériel : serveurs, routeurs, switches, définition de l'hébergement ;
- installation physique en atelier dans les locaux de Synapse puis dans le data center de l'hébergeur ;
- installation d'une plateforme de développement et de préproduction.

La plateforme résultante répond aux objectifs de haute disponibilité, de stockage de données volumineuses et de résilience : utilisation de techniques de clustering et de load balancing pour pallier aux défaillances réseau et matérielles.

Dem'Eaux- Infrastructure réseau

Equipements et sous-réseaux  
Rev. mai'20 - odo

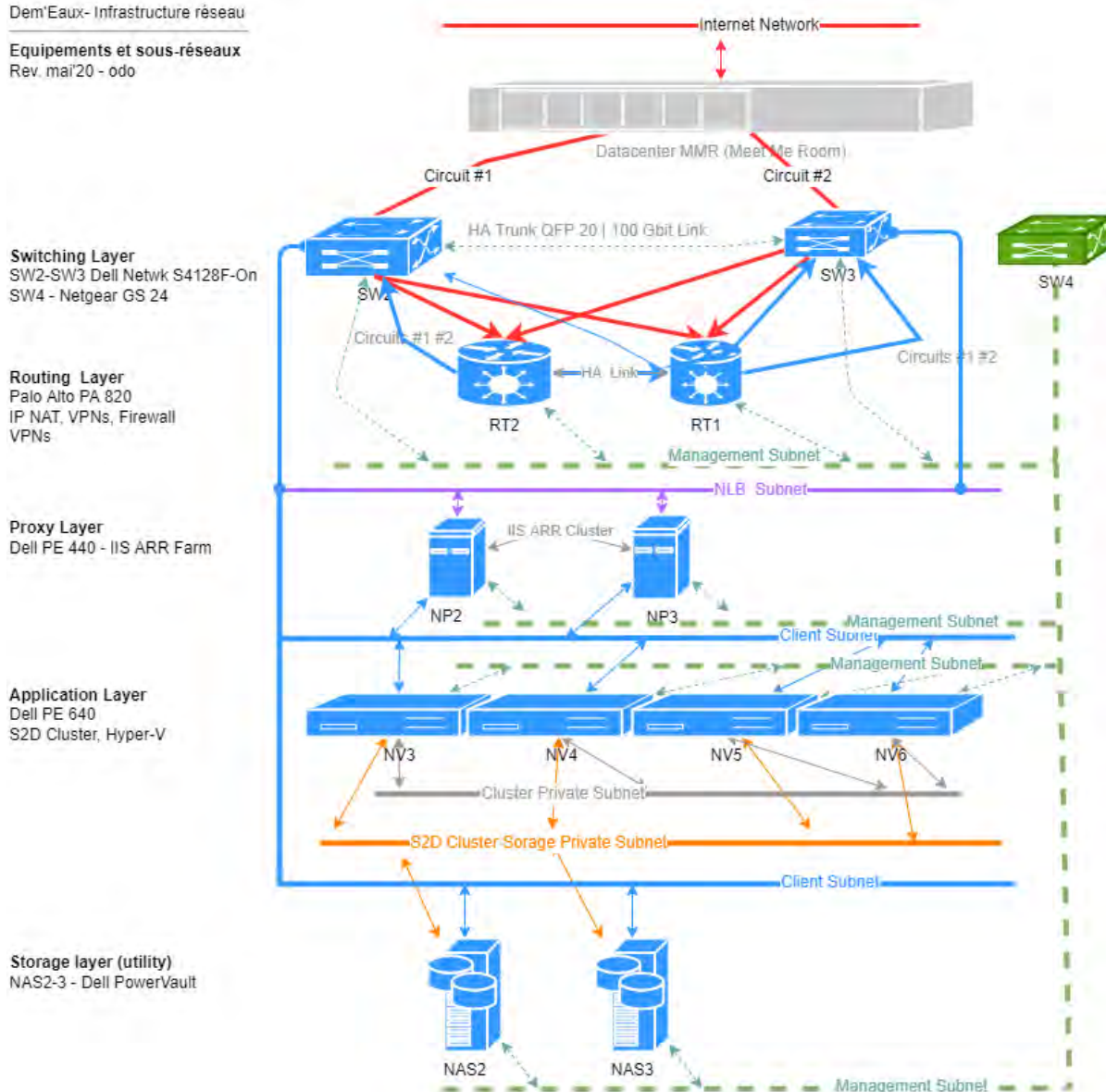


Figure 52 : Plateforme DEM'Eaux : Vue générale de l'architecture matérielle.

## 8.2. OBJECTIFS DE L'APPLICATION

L'application permet de répondre à plusieurs objectifs et s'adresse à plusieurs publics :

- concentrer et stocker les données produites dans le cadre du projet ;
- concentrer et stocker les données des gestionnaires et des exploitants de la ressource : SMBT, Sète Agglopôle, Ville de Sète, Commune de Villeveyrac, Thermes de Balaruc, Suez, BRL... ;
- consulter, visualiser et croiser les données à l'aide d'outils ergonomiques ;
- exploiter les données à des fins opérationnelles ;
- valoriser les résultats de recherche du projet DEM'Eaux Thau : cartes, analyses, outils opérationnels ;
- favoriser la connaissance sur les ressources en eau du territoire grâce à l'accès en temps réel aux données sur l'eau et aux liens vers d'autres plateformes publiques.

### 8.3. LA CONCENTRATION DES DONNÉES

La concentration des données hydrogéologique sur la plateforme numérique est réalisée par un « service d'import » qui importe la donnée en continu depuis plusieurs sources.

On peut distinguer plusieurs sources de données :

- les données produites par les gestionnaires et leurs exploitants (SMBT, Sète, Thermes de Balaruc) dans le cadre de leur réseau de suivi de la ressource. Ces données sont collectées en temps réel (remontées des stations) ou en différé (réseau manuel de collecte ou réseau hydrométrique) ;
- les données produites dans le cadre du projet : observatoires, stations du BRGM.

### 8.4. LA CONSULTATION DES DONNÉES

La consultation des données est possible à l'aide de deux interfaces principales : le synoptique cartographique et les rapports graphiques.

#### 8.4.1. Le Synoptique Cartographique

Le Synoptique Cartographique constitue l'écran d'accueil de l'application (Figure 53). Il permet de voir en un coup d'œil la situation hydrologique et hydrogéologique en temps réel sur le territoire concerné.

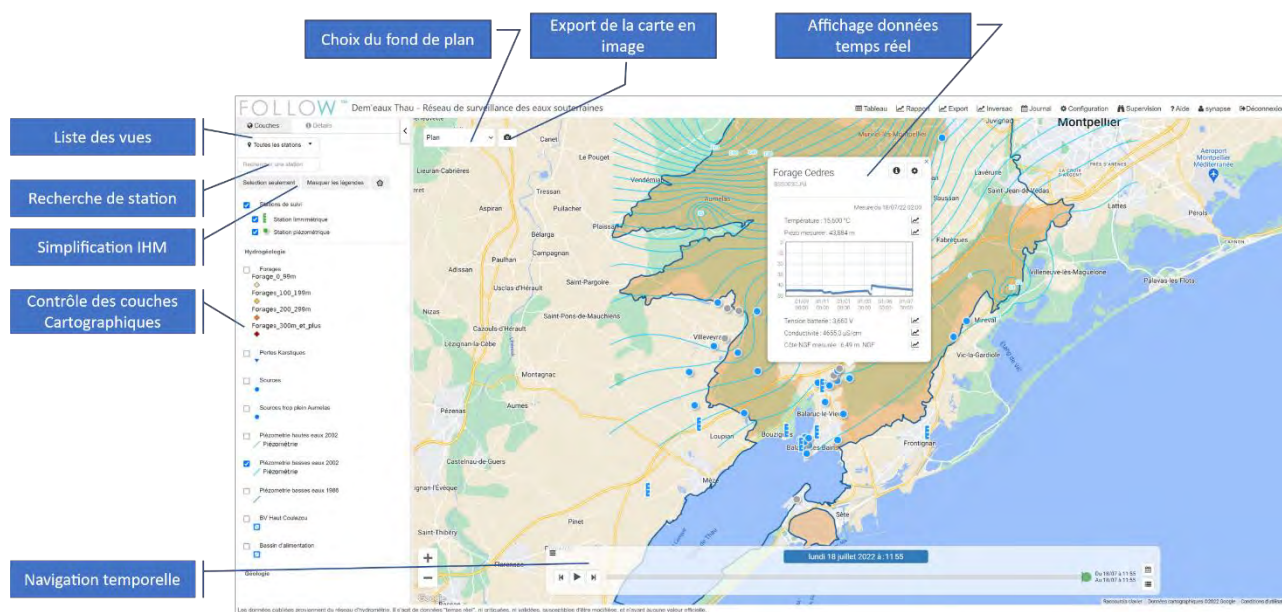


Figure 53 : Plateforme DEM'Eaux Thau : Vue du synoptique Cartographique constituant l'écran d'accueil de l'application.

Ce synoptique s'appuie sur l'API JavaScript Google Maps qui est devenu un standard de fait et avec lequel les utilisateurs sont familiers.



L'utilisateur peut interagir directement avec la carte pour réaliser les actions suivantes :

- **choisir le fond de plan** : cinq fonds de plan sont proposés (plan cartographique, relief, satellite, hybride, noir et blanc) ;
- **choisir la période d'affichage** : possibilité de naviguer facilement dans le temps et de comparer des situations à plusieurs dates données ;
- **visualiser la situation hydrologique** globale et de chaque station, grâce à l'utilisation de couleurs liées aux seuils d'alerte (les seuils sont à définir sur les stations). Seuls des seuils de vigilance ont été définis sur le débit de la Vise dans le cadre de l'étude sur l'Inversac ;
- **consulter les données en temps réel** :
  - a. dernières mesures collectées,
  - b. graphe sur une profondeur définie (de 3 jours à 1 an par exemple) ;
- **Interroger des couches cartographiques.**

Le **panneau de contrôle** situé à gauche de la carte permet les actions suivantes :

- choisir d'afficher certaines **stations regroupées dans des vues**. Les vues peuvent être des regroupements géographiques : bassins versants, unités de gestion ou des regroupements fonctionnels : eaux de surface, eaux souterraines, fournisseur de données ;
- **rechercher** facilement une station par son nom ou son code (BSS, hydrologique) ;
- **simplifier** le contrôle des couches : masquer ou afficher les légendes ou les couches inactives de manière à s'adapter aux différentes tailles d'écran ;
- **afficher et consulter des couches cartographiques** : les couches cartographiques peuvent provenir de différentes sources : serveurs cartographiques internes ou externes, sources publiques (ADES, BSS, Vigicrue, ...) aux formats WMS ou WFS. Il est également possible d'afficher des couches cartographiques orientées métier avec des interactions spécifiques.

Le panneau de contrôle peut également afficher des données plus détaillées sur une station grâce au bouton « Information » de l'infobulle station. Il est ainsi possible avec l'**onglet Détails** d'afficher les graphiques des chroniques de données, des documents (images, pdf, ...), une description détaillée, des liens vers des plateformes externes (Infoterre, ADES, Banque Hydro, ...).

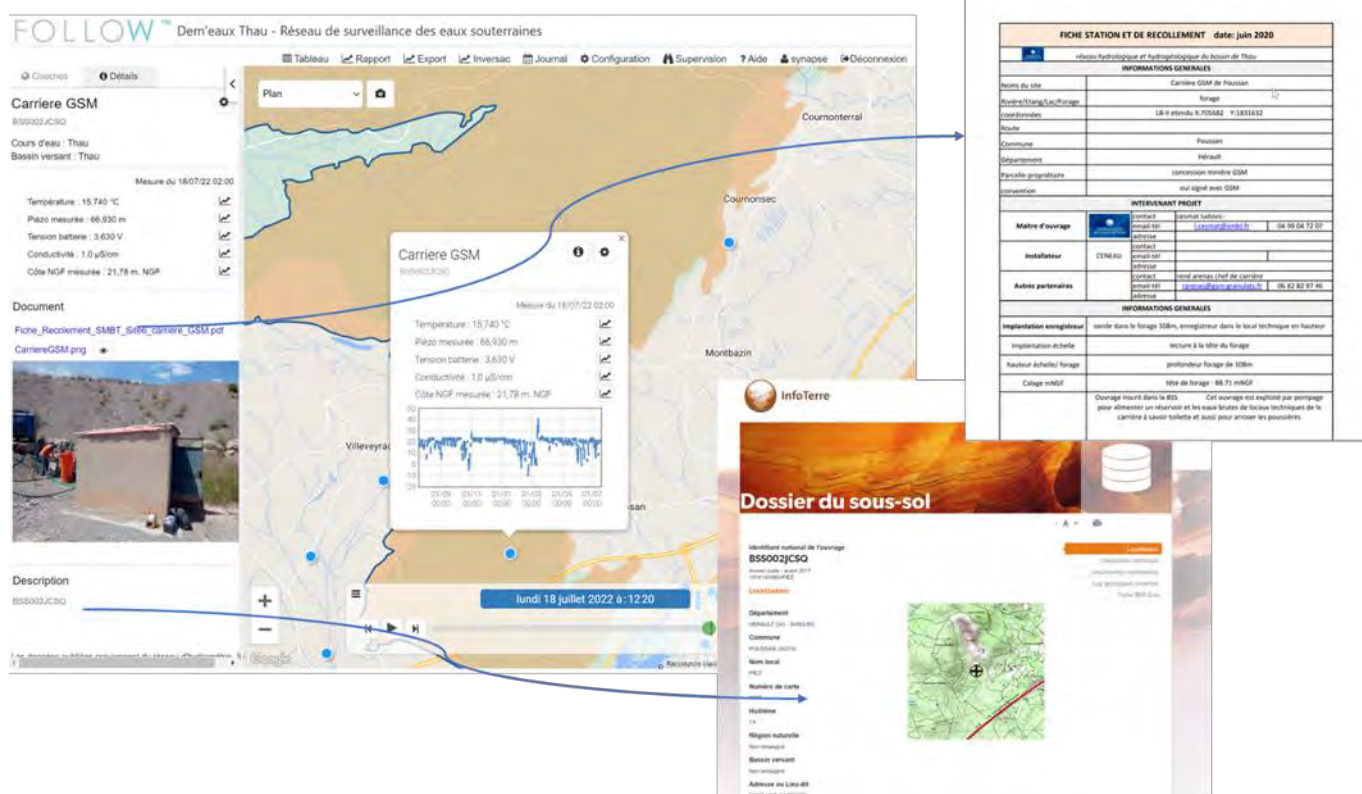


Figure 54 : Plateforme DEM'Eaux Thau : Affichage du panneau de détail et les liens vers les plateformes externes.

- afficher le synoptique sous forme de **tableau** :
  - il est possible d'afficher le synoptique sous la forme d'un tableau qui présente les dernières mesures avec une information sur les dépassements de seuil. Ce tableau permet de regrouper l'affichage des stations par entité de gestion (UGE par exemple) ou entité géographique (bassin versant, cours d'eau...),
  - cela permet de visualiser la situation hydrologique d'un seul coup d'œil. Cette visualisation permet également de filtrer les stations par nom ou par entité de regroupement.

## 8.5. LES RAPPORTS GRAPHIQUES

Toutes les données sont accessibles via l'écran des rapports graphiques, qu'il s'agisse des données historiques ou des données en temps réel.

L'interface du rapport graphique permet de paramétrer l'affichage des données sur le graphique, de superposer plusieurs de même type ou de types différents.

L'interface du rapport graphique a été pensée de manière à pouvoir exploiter toute la richesse des données de la manière la plus simple et la plus intuitive possible.

L'interface permet donc les actions suivantes :

- paramétrage du graphique :
  - choix de la période : prédéfinie ou au choix de l'utilisateur,
  - choix des rubriques,
  - affichage des seuils,
  - possibilité de comparer une rubrique sur deux périodes,
  - enregistrer des favoris (ensemble de rubriques et période) pour pouvoir y accéder rapidement ;
- actions du rapport graphique :
  - choisir entre l'affichage des données sous forme tabulaire ou graphiques,
  - actualiser le graphique en temps réel,
  - relier les points sur le graphique pour combler des lacunes de données,
  - choisir l'origine de l'axe des Y : 0 ou relatif au jeu de données,
  - exporter les données affichées dans différents formats : CSV, XML Sandre, Docx (tableau de valeurs ou images),
  - imprimer le graphique,
  - accéder à l'écran des exports utilisateurs.



**Figure 55 : Plateforme DEM'Eaux Thau : Un exemple de rapport graphique (évolution du débit journalier de la Vise et de la conductivité électrique de l'eau au niveau du griffon (à -29 m de profondeur dans la lagune de Thau).**

## 8.6. EXPLOITATION OPÉRATIONNELLE DES DONNÉES

La plateforme Web DEM'Eaux Thau a aussi pour objectif de fournir des outils opérationnels aux gestionnaires de la ressource.

Elle permet notamment en plus de l'import et de la visualisation temps réel d'exporter les données dans différents formats.

Les exports peuvent être paramétrés et sauvegardés directement depuis la page des rapports graphiques.

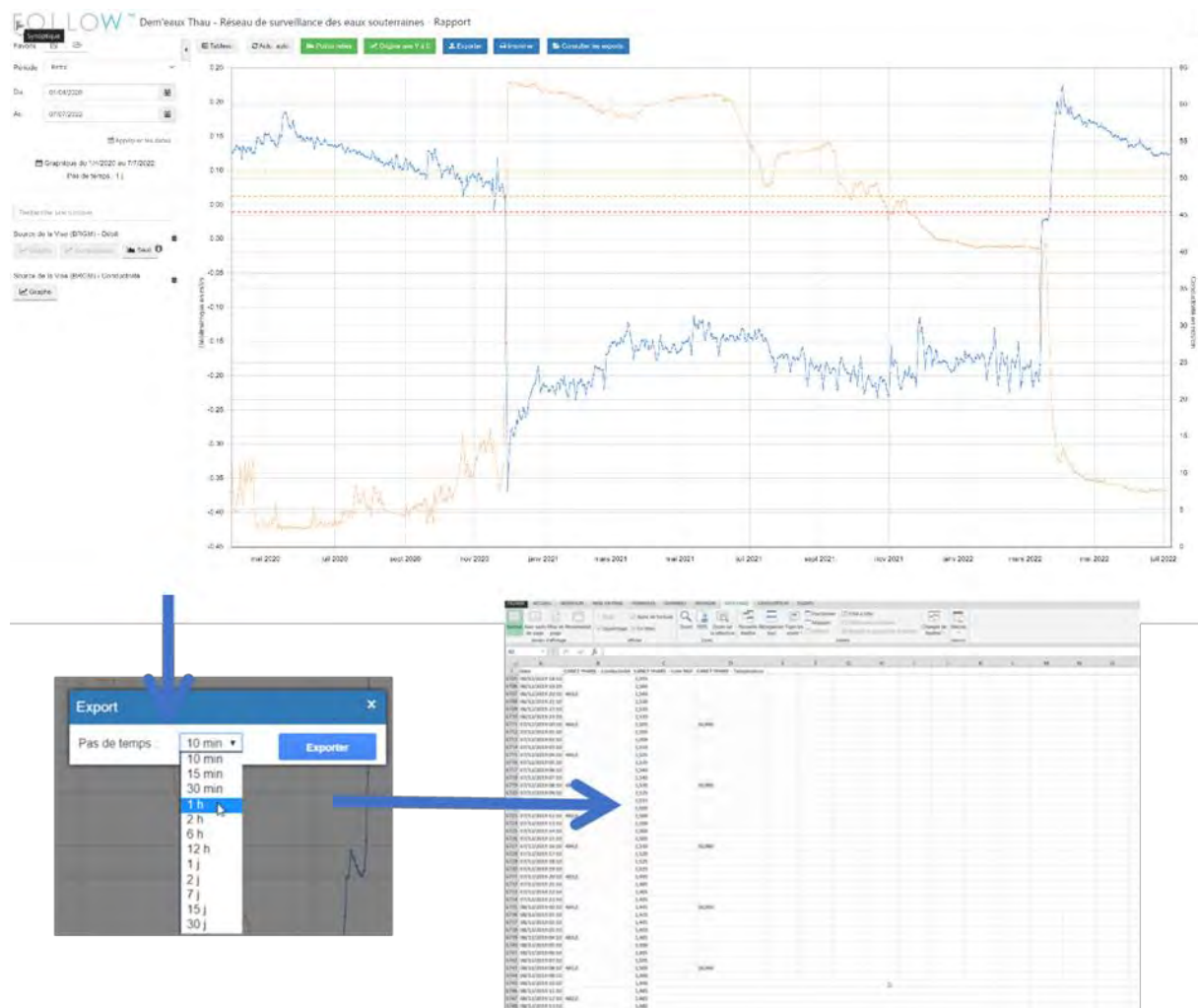


Figure 56 : Plateforme DEM'Eaux Thau : Exports depuis la page des graphiques.

Chaque utilisateur peut ainsi se constituer une bibliothèque de graphique et d'export grâce à la gestion de favoris.

## 8.7. VALORISATION DES RESULTATS DE RECHERCHE

La plateforme intègre également des productions issues des différents volets de recherche sous la forme de couches cartographiques ou de visualisation dédiées :

- on peut noter ainsi les couches suivantes :
  - Forages ;
  - Pertes Karstiques ;
  - Sources ;
  - Sources trop plein Aumelas ;
  - Piézométrie hautes eaux 2002 (mNGF) ;
  - Piézométrie basses eaux 2002 (mNGF) ;
  - Piézométrie basses eaux 1986 (mNGF) ;
  - BV Haut Coulazou ;
  - Bassin d'alimentation ;
  - Géologie ;
  - Fracture de Villeveyrac ;
  - Emprise Masse d'eau ;
  - Altitude du toit des calcaires du Jurassique (mNGF) ;
  - Altitude du toit Jurassique (mNGF) ;
  - Calcaires Pli Ouest affleurants.
- des cartes sur la profondeur des différentes formations géologiques :

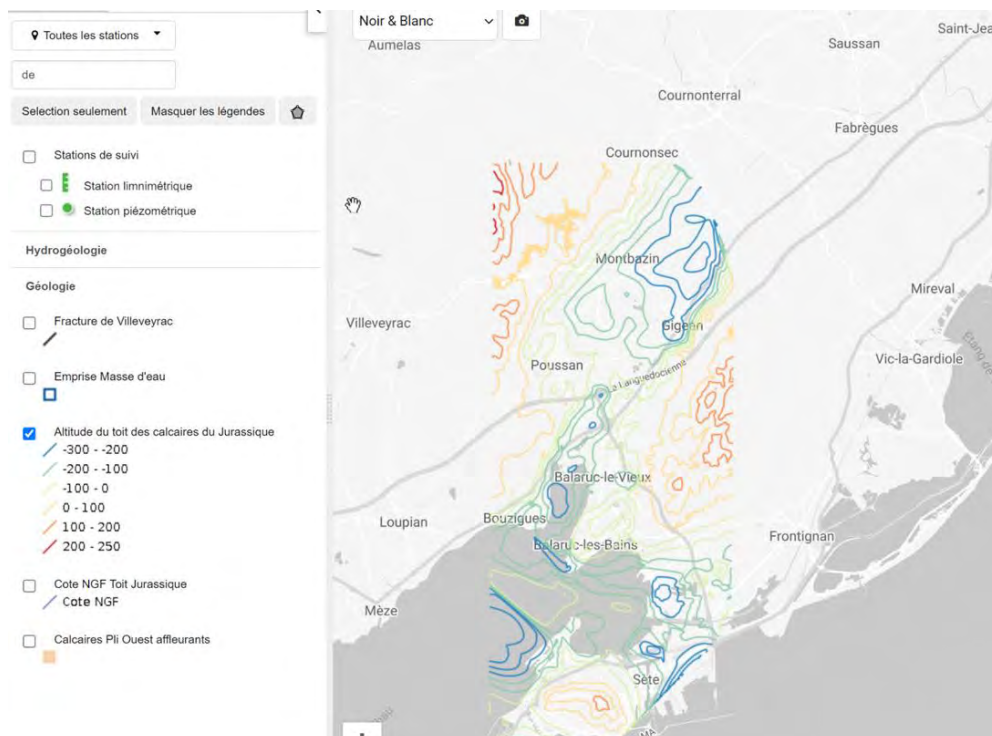


Figure 57 : Plateforme DEM'Eaux Thau : carte de l'altitude du toit des calcaires du Jurassique (mNGF).



- des cartes d'isopiéziométrie à différentes dates, permettant des comparaisons :

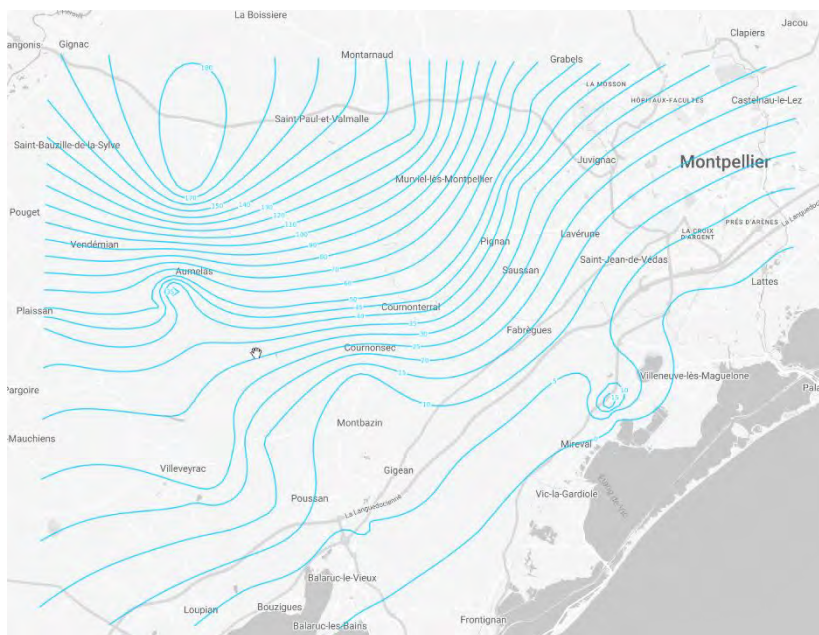


Figure 58 : Plateforme DEM'Eaux Thau : piézométrie basses eau en 2002.

## 8.8. UN OUTIL OPÉRATIONNEL : LE CALCUL DE L'INDICATEUR DU RISQUE D'INVERSAC

Cet outil est la traduction sous la forme d'un écran dédié des travaux de modélisation de l'inversac. Il permet à tout acteur du territoire de simuler des scénarios de calcul en rentrant manuellement les différents paramètres de calcul et les paramètres de gestion de la ressource : régime de pompage sur les différents forages. Cet outil permet ainsi aux gestionnaires de se projeter et de communiquer autour du risque d'inversac à l'aide d'une interface simple et ergonomique.



Figure 59 : Plateforme DEM'Eaux Thau : Indicateur Inversac.

## **8.9. CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

La plateforme web DEM'Eaux Thau permet donc d'intégrer un grand nombre de données, que ce soit en termes de volume ou terme de diversité des types de données.

Cette plateforme offre ainsi un accès aux données sur l'eau sur l'ensemble du territoire du bassin de Thau. Elle se veut aussi être un portail vers des plateformes et des référentiels nationaux comme la banque hydro ou ADES.

En regroupant les données issues des équipements et travaux menés dans le cadre du projet elle offre ainsi un point d'accès unique à la connaissance sur la ressource en eau.

La plateforme s'adresse également à divers types de publics, les partenaires du projet, les publics experts et les gestionnaires de la ressource auxquels elle offre aussi des outils opérationnels et de communication.

Une phase d'appropriation par les gestionnaires et tous les publics concernés doit être maintenant envisagée. Pour continuer à exister il est important que tous les publics concernés par la ressource en eau s'approprient cette plateforme informatique. Cela nécessite de trouver les modalités nécessaires à son entretien, son animation et son évolution.

## 9. Synthèse de la production scientifique

Les livrables suivants ont été produits au cours du projet DEM'Eaux Thau.

### 9.1. LIVRABLES SCIENTIFIQUES DU PROJET

Livable L1 : Ladouche B., Lamotte C., Hemelsdaël R., Pétré M.A., Dewandel B., Léonardi V., Seidel J.L., Seranne M. (2019) - DEM'Eaux Thau - Synthèse et valorisation préliminaire des données sur l'hydrosystème de Thau (34). Rapport final. [BRGM/RP-68483-FR](#), 313 p., 133 fig., 6 tab., 6 ann.

Livable 2 : Camus, H. & Chadelle, B. 2021. Diagnostic karstologique des massifs carbonatés d'Aumelas et de la Gardiole - Atlas Cartographique - Projet DEM'Eaux Thau – CENOTE / Géosciences Montpellier. Unpublished report R-2020-06, 17 p.

Livable L3 : Coppo N., Jacob T., Bitri A., Darnet M., Bretaudeau F., Wawrzyniak P., Porté J., Rembert F. et Bourgeois B. avec la collaboration de Beaubois F. et Maurice B. (2018) – Investigations géophysiques (CSEM, gravimétrie et sismique) sur le secteur de Balaruc-les-Bains (Hérault, France) - Rapport d'acquisition – Projet DEM'Eaux Thau. Rapport final. [BRGM/RP-68381-FR](#), 93 p., 60 ill., 2 ann.

Livable L3bis : 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) – Livable 3bis, [BRGM/RP-70632-FR](#), rapport final, 51 p., 37 ill.

Autre Livable L3 : Capar, L. & Marc, S. 2018. Retraitement de lignes sismiques 2D dans la région de l'étang de Thau. Rapport final. BRGM. [BRGM/RP-68318-FR](#), 23 p.

Autre Livable L3 : Capar, L. & Marc, S. 2018. Retraitement de 3 lignes sismiques 2D dans la région de Florensac. Rapport final. BRGM. [BRGM/RP-68603-FR](#), 19 p.

Livable L4 : 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) – Livable L4 – Rapport final. [BRGM/RP-70789-FR](#), 98 p., 54 fig., 9 tab., 2 ann.

Livable L5a : Ranchoux C., Ladouche B., de Montety V, Seidel J.L., Pétré M. A., Hery M., Desoeuvre A., Batiot-Guilhe C., (2021) – DEM'Eaux Thau - Rapport d'analyses géochimiques- Apports des campagnes spatiales 2018-2019 - Livable L5a. Rapport final. [BRGM/RP-71281-FR](#), 155 p.

Livable L5b : Ranchoux C., Ladouche B., de Montety V, Seidel J.L., Pétré M. A., M. Hery, A. Desoeuvre C. Batiot-Guilhe (2022) – DEM'Eaux Thau - Rapport d'analyses géochimiques- Apports des campagnes mensuelles et de l'inversac 2020-2021 – Livable L5b. Rapport final. [BRGM/RP-71957-FR](#). 165 p

Livable L6 : Vigouroux P. (2018) - Projet DEM'Eaux-Thau - Forage « Stade Michel » à Sète (34) - Dossier de l'Ouvrage Exécuté - Rapport final. [BRGM/RP-68549-FR](#), 40 p., 7 ill., 3 ann.

Livable L7 : Lamotte C. (2019) - Projet DEM'Eaux-Thau - Instrumentation de la source de la Vise à Balaruc-Les-Bains (34) - Rapport de fin de travaux – Livable L7 - Rapport final. [BRGM/RP-69163-FR](#), 23 p., 11 ill., 1 ann.

Livrable L8 : DEM'Eaux Thau : résultats des essais de traçages artificiels. Rapport final. BRGM/RP-71758-FR, 53 p.

Livrable L10 : Ladouche, B. Dewandel, C. Lamotte, P. Pezard, M. Séranne (2022) - Plateforme DEM'Eaux Thau - 1ères acquisitions sur la source de la Vise, forages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3, DEMENT4 – Livrable L10 – Rapport final. BRGM/RP-70842-FR, 162 p.

Livrable L11a : Hakoun V., Ladouche B. avec la collaboration de Manceau J-C (2022) – Modélisation hydrogéologique numérique de l'aquifère karstique de Thau. Rapport final. BRGM/RP-71757-FR, 101 p.

Livrable L11b : Ladouche B, Marechal J-C., Hakoun V, Dewandel B, Perrochet, P., Lamotte C. (2021) – Inversac de la source sous-marine de la Vise sous la lagune de Thau : mécanisme et modélisation. Rapport final. BRGM/RP-70839-FR. 118 p.

Livrable L12 : Synapse PLATEFORME DEM'EauxThau : Infrastructure matérielle et Réseau, Version 1.0, 31 p.

Livrable L13 : Synapse PLATEFORME DEM'Eaux THAU : Outil d'observation et de gestion DEM'Eaux Thau, Version 1.0, 12 p.

Livrable L14 : Ladouche B., Seranne M, de Montety V, Ranchoux C., Dewandel B, Hakoun V, Maréchal J-C, Pezard PA, Le Ber E, Temani A, Neyens D, Brillouet D, Hemelsdaël R., Pétré M. A., Camus H., Widhen F., Hery M, Seidel J.L, Léonardi V., Bailly-Comte V., Durand V., Lamotte C. (2022) – DEM'Eaux Thau : synthèse des travaux. Rapport final. BRGM/RP-77471-FR, 94 p.

## **9.2. AUTRES RAPPORT SCIENTIFIQUES**

Bourgeois, T. 2019. Caractérisation du paleokarst sous couverture du Démonstrateur DEM'EAUX Thau, Bassin de Montbazin-Gigeanet de l'extrémité Est de l'étang de Thau (Hérault) : approche par sismique passive Master 2 université de Montpellier, 50 pp.

Kassim H. (2019). Utilisation des rapports isotopiques du Bore et les éléments en trace pour caractériser l'origine des flux souterrains et les mélanges d'eau au sein d'aquifères karstiques méditerranéens : hydrosystème de Thau. Rapport M2 STPE, Aix-Marseille Université, 75 p.

Lemaitre L. (2020). Apport des gaz dissous à la compréhension des circulations souterraines dans l'hydrosystème de Thau. Master 2 H2E-Env., Université de Montpellier.

Poinas T. (2020). Approche multi-isotopique (Li, B, Sr) pour caractériser l'origine des flux souterrains et les mélanges d'eau au sein d'aquifères karstiques méditerranéens. Master 2 H2E-Env., Université de Montpellier.

Temani, A. 2022. Caractérisation pétrophysique et hydrodynamique du site karstique de Balaruc (projet " DEM'Eaux Thau"). Master 2, Université de Montpellier, 50p.

Widhen, F. 2021. Interactions déformation-altération dans un réservoir karstique côtier de la marge proximale du Golfe du Lion (presqu'île de Balaruc) - Étude de carottes et diagraphies du forage DEM'Eaux Thau. Master 2, Université de Montpellier, 48p.

### 9.3. RAPPORTS D'ACTIVITÉ

Lamotte C., Seidel J.L., Séranne M. (2020) - Projet DEM'Eaux-Thau – Rapport d'activité 2019 - Rapport final. BRGM/RP-69739-FR, 29 p., 15 ill., 1 ann.

Lamotte Claudine (2022) – Projet DEM'Eaux Thau - Rapport d'activité 2020. Rapport final V0. BRGM/RP-71828-FR, 8 p.

### 9.4. ARTICLES SCIENTIFIQUES

Dewandel B., Hakoun V., Lanini S., Ladouche B., Lamotte C., Maréchal J.-C., 2022. Analytical solutions for analysing pumping tests near an infinite vertical and anisotropic fault zone with finite thickness, storativity and hydraulic conductivity based upon unconventional application of well-image theory. *Adv. in Water Res.* Vol. 160, Feb. 2022, 104107. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.104107>.

Hemelsdaël, R., Séranne, M., Husson, E. & Ballas, G. 2021. Structural style of the Languedoc Pyrenean thrust belt in relation with the inherited Mesozoic structures and with the rifting of the Gulf of Lion margin, southern France *BSGF-Earth Sciences Bulletin*, 192, 46. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2021037>.

Pétre, M.A., Ladouche B., Seidel J.L., Hemelsdaël R., de Montety V., Batiot-Guilhe C., and Lamotte C. (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): 5656-5672. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5655-2020>.

Widhen, F., Séranne, M., Ballas, G., Labaume, P., Le-Ber, E., Pezard, P., Girard, F., Lamotte, C. & Ladouche, B. soumis. Long-term evolution of a carbonate reservoir submitted to fresh, saline and thermal waters interactions - Jurassic carbonates in the coastal area of the Gulf of Lion margin (southern France). *Bulletin de la Société Géologique de France*.

### 9.5. CONFÉRENCES / CONGRÈS

Hakoun, V. Bernard Ladouche, Claudine Lamotte, Jean-Christophe Maréchal, Michel Séranne. The Thau hydrosystem under surveillance: an observatory to prevent seawater intrusion in the submarine Vise spring (Balaruc-les-Bains, France). *IAH Brussels 2021 Congress*, Sep 2021, Bruxelles, Belgium. [hal-03329184](https://hal-03329184).

Hakoun, V., B. Ladouche, C. Lamotte, B. Dewandel, J.-C. Maréchal, M. Séranne. A closer look over the Thau hydrosystem, a new monitoring network to characterize and prevent seawater intrusion in the submarine Vise spring (Balaruc-les-Bains, France). *IAHS 2022 - XIème Assemblée Scientifique de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques*, May 2022, Montpellier, France.



- Hemelsdaël, R., Séranne, M., Lamotte, C., Bitri, A., Bretaudeau, F., Caritg-Monnot, S., Coppo, N., Courrioux, G., Darnet, M., Husson, E., Jacob, T., Ladouche, B. & Le Goff, E. 2018. Construction d'un modèle géologique des réservoirs karstiques profonds du Bassin de Thau (sud de la France) : un outil innovant pour la gestion de la Hemelsdaël, R., Séranne, M., Husson, E. & Ballas, G. 2021. Structural style of the Languedoc Pyrenean thrust belt in relation with inherited structures and the rifting of the Gulf of Lion margin, SE France. 27e RST, Lyon, SGF.
- Hemelsdaël, R., Séranne, M., Husson, E., Jacob, T. & Marchand, E. 2019. Structural style of the Languedoc Pyrenean thrust belt in relation with inherited Mesozoic structures and the rifting of the Gulf of Lion margin, SE France. OROGEN Meeting CNRS-Paris, Total-BRGM-INSU.
- Hemelsdaël, R., Séranne, M., Widhen, F., Ladouche, B. & Lamotte, C. 2021. New 3D-structural framework in the Montpellier-Sète coastal area (southern France): implications for segmentation of karst reservoirs and groundwater circulation. International Lithosphere Program Task Force VI Sedimentary Basins, Rueil-Malameison, France.
- Hemelsdaël, R., M. Séranne, C. Lamotte, A. Bitri, F. Bretaudeau, S. Caritg-Monnot, N. Coppo, G. Courrioux, M. Darnet, E. Husson, T. Jacob, B. Ladouche and E. L. Goff (2018). Construction d'un modèle géologique des réservoirs karstiques profonds du Bassin de Thau (sud de la France) : un outil innovant pour la gestion de la ressource en eau. . RST 2018, Lille, SGF.
- Hemelsdaël, R., Séranne, M., Widhen, F., Ladouche, B. & Lamotte, C. 2021. *New 3D-structural frame workin the Montpellier-Sète coastal area (southern France): implications for segmentation of karst reservoirs and groundwater circulation*. International Lithosphere Program TaskForce VI Sedimentary Basins, Rueil-Malameison, France.
- M. Héry, C. Batiot, B. Ladouche, C. Lamotte, JC. Maréchal, V. de Montety. Projet Dem'Eaux-Thau: Vers une meilleure compréhension du fonctionnement d'un hydrosystème souterrain complexe. Atelier virtuel ADNe - Pôle « Agriculture, Environnement, Biodiversité » de l'Isite Muse, 21 Mai 2021.
- Ladouche, B., Lamotte, C. & Séranne, M. 2021. Interactions de fluides (eaux douces, marines, thermales) dans les réservoirs karstiques sous couverture de la marge proximale du Golfe du Lion : le projet DEM'Eaux Thau. 27e RST, Lyon, Société Géologique de France. Poster, ([hal-03780808](#)).
- Jean-Christophe Maréchal, Bernard Ladouche, Claudine Lamotte, Benoît Dewandel, Vivien Hakoun, et al.. Saltwater intrusion and flow reversal at the submarine spring of a Mediterranean karst aquifer : explanation and modelling. *IAH Brussels 2021 Congress*, Sep 2021, Bruxelles, Belgium. ([hal-03291111](#)).
- Jean-Christophe Maréchal, Bernard Ladouche, Claudine Lamotte, Benoît Dewandel, Vivien Hakoun, et al.. Flow reversal and saltwater intrusion at the submarine spring of a Mediterranean karst aquifer: explanation and modelling. *IAHS 2022 - XIème Assemblée Scientifique de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques*, May 2022, Montpellier, France. ([hal-03688592](#)).
- Jean-Christophe Maréchal, Bernard Ladouche, Claudine Lamotte, Benoît Dewandel, Vivien Hakoun, et al.. Saltwater intrusion and flow reversal at the submarine spring of a Mediterranean karst aquifer: observation, interpretation and modelling. *Eurokarst 2022*, Jun 2022, Malaga, Spain. ([hal-03411571](#)).

- de Montety V., Lemaitre L., Ladouche B., Bailly-Comte V., Pérotin L., Hery M., Guilhe-Batiot C., Pétré, M. A., Seidel J.L. 2020. Groundwater circulation and mixing inferred from age dating with dissolved gas tracers in a complex Mediterranean karstic and thermal aquifer (Thau lagoon area, Montpellier, France). EGU, 4-8 May 2020, Online.-Poster.
- de Montety, V., Ladouche, B., Seidel, J. L., Guilhe-Batiot, C., Hery, M., & Lamotte, C. 2021. Recharge origin and mixing processes in karstic thermal aquifers inferred from age dating dissolved gas and isotopic tracers. Goldschmidt2021• Virtual• 4-9 July.
- Pétré M-A., Ladouche B., de Montety V., Batiot-Guilhe C., Lamotte C., Seidel J-L., **2019**. Hydraulic and geochemical impact of occasional saltwater intrusions through a submarine spring in a karstic and thermal aquifer (Thau lagoon area, Montpellier, France). AIH 2019, 22nd - 27th September 2019. Malaga (Spain).-Com orale.
- Pétré M.A., Lefebvre, R., Rivera, A., Ladouche, B., Lamotte, C., Batiot-Guilhe, C., de Montety, V., Seidel, J-L., **2018**. Multidisciplinary approach for the characterisation of regional aquifers and the sustainable management of groundwater resources: case studies of the Milk River Aquifer (Canada-USA) and the Thau karstic aquifer (France). EuroKarst Conference, 2-6 Juillet 2018. Besançon (France).-Com. Orale.
- Pétré, M.A., De Montéty V., Guilhe-Batiot, C., Ladouche, B., Seidel, J.L. (2018). Hydrochemical characterization of a complex Mediterranean karstic system (Thau lagoon area, Montpellier, France) for the regional management of the groundwater resources. EuroKarst Conference, 2-6 Juillet 2018, Besançon, France.
- Pezard, P., Ber, E.L., Henry, G., Brun, L., Raad, F., Séranne, M., Widhen, F., Schleifer, A., Belezza, C., Meneghini, F., Brillouet, N., Neyen, D. & Lamotte, C. 2022. Petrophysical characterisation of a karstic carbonate aquifer with implications for saltwater and brine intrusion into hydrothermal resources. The DEM'EAUX THAU project, Balaruc, France. IAHS Scientific Assembly 2022, Montpellier, France.
- Ranchoux C., Ladouche B., de Montety V., Seidel J.L. C. Batiot-Guilhe (2022 June). Combining residence time and isotopic tracers for a better understanding of groundwater flux in a karstic thermal aquifer. AIHS 2022 29 May- 3 June 2022 – Montpellier (Oral).
- Ranchoux C., Ladouche B., de Montety V., Seidel J.L. C. Batiot-Guilhe (2022 May). Combining residence time and isotopic tracers to better understand groundwater reservoir and flows in a karst thermal aquifer. EGU 2022 - 23–27 May 2022 – Vienne (short Oral).
- Widhen, F., Ballas, G., Lofi, J. & Séranne, M. 2021. Analyse de la déformation sur carottes et diagraphies dans un réservoir karstique côtier de la marge proximale du Golfe du Lion. 27e RST, Lyon, Société Géologique de France.
- Widhen, F., Séranne, M., Ballas, G., Ladouche, B., Lamotte, C. 2021. Interactions déformation-altération dans un réservoir karstique côtier de la marge proximale du Golfe du Lion : résultats préliminaires du forage carotté du projet DEM'Eaux Thau. 27e RST, Lyon, Société Géologique de France. RST 2018, Lille, SGF,615.

## 9.6. AUTRES

### 9.6.1. Communication publique

- Quatre newsletters/bulletins d'information du projet DEM'Eaux Thau
- Newsletters du SMBT
- Page web du projet sur le site internet du BRGM : <https://www.brgm.fr/fr/reference-projet-acheve/dem-eaux-thau-gestion-ressources-eau-souterraine-aquifere-cotier-karstique>
- Plaquettes pour le public en préparation/information d'expérimentations spécifiques
- Trois vidéos de présentation du projet DEM'Eaux Thau
- « DEM'Eaux Thau, qu'es aco », Geo-Info newsletter bi-mestriel de Géosciences Montpellier <http://www.gm.univ-montp2.fr/spip.php?article2870>
- Réunion de présentation de l'étude DEM'Eaux Thau à Balaruc-les-Bains <https://blog.ville-poussan.fr/?p=101381>
- Journées Nationales de la Géologie (JNG 28/05/2021) : visites de la plateforme DEM'Eaux Thau et du chantier de forage profond
- Rendez-Vous des Régions (Avenia – Terinov, 5-6/10/2021) : visites de la plateforme DEM'Eaux Thau et du chantier de forage profond
- Interventions à la CLE - SAGE Thau Ingril

### 9.6.2. Presse

- France 3 : <https://france3-regions.francetvinfo.fr/occitanie/emissions/it-1920-languedoc-roussillon> sur « Montpellier, capital de l'eau » à l'occasion de l'inauguration du Centre Unesco, 2 février 2021
- Midi Libre : Le programme d'études sur la source sous-marine de l'étang de Thau a démarré en 2017, 17 mars 2022
- Midi Libre : des visites pour mieux comprendre l'hydrogéologie (Balaruc-les-Bains), 24 mai 2021
- Midi Libre : Sète, Mieux gérer l'eau du Bassin, 17 novembre 2017
- La Marseillaise : Exploration des eaux souterraines du bassin de Thau, 26 novembre 2017
- Occitanie Tribune : Étude des eaux souterraines : bientôt les premières investigations sur la source sous-marine de la Vise, 1<sup>er</sup> avril 2019
- Article dans « Sauvons l'Eau » - Juillet 2021

### 9.6.3. Divers

- Plateforme concentrateur DEM'Eaux Thau : <https://demeauxthau.follow.solutions>
- Formation : Thau - Cas d'étude en 2020 et 2021 de l'UE « Eaux thermominérales » du Master Eau, parcours Eau ressource – H2E

## 10. Conclusion et perspectives

### • Géologie et structure de l'aquifère

La synthèse et l'homogénéisation d'anciennes données géologiques (cartes au 1/50 000, forages de la BSS) et géophysiques (carte gravimétrique nationale, profils de sismique réflexion 2D à terre et en mer, retraités), associées à l'acquisition de nouvelles données (cartographie haute résolution, levés gravimétriques, sismique réflexion multi-traces, sismique passive, CSEM) a permis de constituer une base de données du sol et du sous-sol correspondant à l'hydrosystème Thau Balaruc, remarquable par sa densité, sa résolution, son homogénéité et sa cohérence.

L'ensemble de ces données a été intégré dans un modèle géologique numérique 3D, construit sous *GeoModeller*®. Celui-ci présente de manière cohérente la distribution des réservoirs géologiques et de leurs couvertures, dans un volume de 70 km x 30 km x 5 km, s'étendant depuis le nord du Chevauchement de Montpellier, jusqu'aux parties off-shore au large de Sète, avec une résolution de l'ordre de la dizaine de mètres. Cet outil permet d'investiguer dans les trois directions la structure du réservoir karstique, les connectivités et ses relations avec les zones de recharge, dans tout le volume de la zone d'étude. Il permet de tester différentes hypothèses de chemins de circulations fluides.

La construction du modèle géologique 3D a mis en évidence plusieurs structures majeures dans la zone littorale, jusqu'à présent inconnues. On note en particulier la continuité vers le sud-est de la Faille normale de Nîmes qui admet un rejet kilométrique, ainsi que le Chevauchement de Thau, d'orientation est-ouest, qui soulève le compartiment sud (Mont Saint-Clair) de plusieurs centaines de mètres. Les recherches conduisant à la construction du modèle géologique 3D ont également permis de confirmer la chronologie des déformations successives et ainsi, de documenter la formation sur le long-terme de la structure du réservoir géologique, actuellement utilisé par l'hydrosystème de Thau-Balaruc.

Le forage profond composite (DEMT1, 2, 3 et 4), foré et carotté sur la presqu'île de Balaruc donne un accès direct à la nature lithologique et à la structure fine du réservoir karstique sur 759,5 m de profondeur. L'analyse stratigraphique, lithologique et microstructurale des carottes a révélé : 1) Un premier réservoir karstique entre 72 et 210 m de profondeur qui a enregistré plusieurs phases successives de dolomitisation et de dédolomitisation, avec une forte porosité et présence de conduits karstiques décimétriques, actuellement hydrologiquement actifs. 2) Un second réservoir entre 210 et 350 m, entièrement dolomitisé et présentant une intense déformation pénétrative hétérogène. Ce réservoir est affecté vers 300 m d'une fente verticale pluri-métrique, ouverte de plusieurs centimètres, hydrologiquement active. 3) Un réservoir karstique très profond ( $\geq 420$  m), présentant des évidences de paléo-circulations d'eau météorique (Paléocène probable), entre 450 et 500 m ainsi que des circulations actuelles, jusqu'à 700 m de profondeur.

L'analyse des cristallisations de calcite dans les fentes et petites cavités atteste de la présence de fluides successifs (eaux douces, thermales, salines), au cours du temps long géologique, dans les différents réservoirs superposés, y compris les plus profonds. Les évidences de présence successives d'eau karstique, thermale et marine dans les paléo-réservoirs pourrait suggérer que l'actuel hydrosystème de Thau Balaruc fonctionne depuis des temps géologiques très anciens. Or, les résultats de l'analyse géologique montrent que la géométrie et les connectivités la caractérisant résultent d'une succession d'événements géodynamiques s'étalant sur le temps long géologique (dizaines de millions d'années), incompatible avec la forte variabilité du fonctionnement de l'hydrosystème observée actuellement (e.g. inversac) contrôlé par des variations hydrologiques (niveau de la mer, précipitations) de très court terme ( $10^5$  à 1 an).

Il conviendra de préciser la caractérisation des paléofluides qui ont circulé et/ou résidé dans les réservoirs karstiques profonds de la zone d'étude, au cours des temps géologiques. Pour cela, il faudra mettre en œuvre des études minéralogiques et géochimiques sur les cristallisations de calcite prélevées sur les carottes conservées à la carothèque du BRGM, à Orléans. Notamment l'analyse des isotopes stables (O, C) et les isotopes du Sr permettraient de mieux contraindre la nature, la source et les éventuels mélanges des paléofluides qui se sont succédés dans le réservoir, et de les comparer aux circulations actuelles.

### • Équipements scientifiques

L'acquisition des données sur la source sous-marine de Vise (débit, conductivité, température, qualité chimique de l'eau) a constitué un élément-clé du projet de recherche DEM'Eaux Thau. Les informations recueillies ont permis de préciser les schémas conceptuels de fonctionnement de l'hydrosystème en période de fonctionnement « normal » et au cours d'un inversac, en permettant notamment une quantification inédite des flux mis en jeu lors des différents processus, mais également l'élaboration d'un outil d'alerte du risque « inversac ». L'acquisition des données du dispositif expérimental est toujours en cours par le BRGM. La pérennisation de l'équipement est une question importante qui sera débattu avec les partenaires du projet (SMBT, ville de Balaruc-les-Bains, ...) au regard d'une part, des objectifs de poursuite d'acquisitions de données, de gestion de l'hydrosystème et du risque « inversac », et d'autre part, des coûts de maintenance de l'installation et au titre de l'occupation temporaire du domaine maritime.

Les nouveaux ouvrages de la plateforme expérimentale ont permis d'apporter de nouvelles informations concernant le sous-sol de la presqu'île de Balaruc-les-Bains, nécessaires à la meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique. Des données géochimiques inédites sur l'origine des fluides en fonction de la profondeur, les temps de résidence ont été acquis ; ce qui permet de préciser les relations hydrauliques entre le gisement thermal et l'aquifère karstique de sub-surface et plus globalement sur l'organisation des écoulements.

Le forage DEMENT1 permet d'accéder aux eaux du premier réservoir karstique identifié par l'approche géologique (entre 72 et 210 m). Les caractéristiques géochimiques des eaux dans ce secteur sont très comparables aux eaux de la Vise en période de fonctionnement normal (hors inversac), les différents traceurs géochimiques indiquent une contribution très majoritaire d'eau karstique (environ 90 %), provenant au moins en partie du massif de la Gardiole (informations des gaz anthropiques et des contaminations bactériologiques), et une contribution minoritaire d'eau thermale (environ 10 %). Cet ouvrage, qui en très bonne connexion hydraulique avec la Vise, permettrait de caractériser les signatures géochimiques de celle-ci dans l'hypothèse où le dispositif expérimental de prélèvement de la Vise venait à se détériorer dans le futur. La poursuite des acquisitions (piézométrie, conductivité et température de l'eau à 130 m de profondeur au niveau de la principale venue d'eau productive de l'ouvrage) est recommandée, les futures données seront à étudier et à mettre en relation avec les informations de l'observatoire géophysique (résistivité SMD, température et mesures acoustiques par fibres optiques).

Les eaux du forage DEMENT2 au sein de l'aquitard miocène apparaissent plus minéralisées et plus chaudes que les eaux karstiques du compartiment jurassique sous-jacent qualifié par DEMENT1 et/ou la Vise. Les eaux du DEMENT2 présente une importante contribution d'eau thermale ( $55 \pm 5$  %) et d'eau de type karstique ( $45 \pm 5$  %). La composante karstique qui contribue au mélange est récente (quelques années à dizaines d'années d'après les informations des gaz dissous anthropiques CFC/SF6).



L'aquifère jurassique présente une charge hydraulique supérieure à celles mesurées dans l'aquitard miocène ; ce qui rend possible le phénomène de drainance ascendante entre les formations.

Cependant, les résultats géochimiques suggèrent qu'un flux d'échange privilégié se produit entre les eaux thermales stockées dans le karst jurassique et le Miocène très vraisemblablement dans le voisinage proche de la source thermique historique (S12), les eaux thermales dans ce secteur envahissant la formation miocène. La poursuite des acquisitions (piézométrie, conductivité et température de l'eau à 40 m de profondeur) est recommandée dans le but de mieux comprendre les relations entre les eaux des formations superficielles miocènes et les eaux thermales et leurs évolutions sur de longues périodes d'observation.

### • **Modèle global Gardenia et modèle numérique MARTHAU**

L'approche de modélisation globale (Gardenia) a permis de qualifier le fonctionnement hydrogéologique du système karstique dans son ensemble, et d'établir un bilan hydrogéologique aux échelles de deux compartiments « amont » et « aval ». Le fonctionnement hydrogéologique montre que la source d'Issanka est l'exutoire principal du compartiment amont de l'aquifère, depuis cette source s'écoule la Vène. L'impluvium de recharge pour ce compartiment est situé sur le causse d'Aumelas et la montagne de la Moure. Les sources temporaires de la Vène (à Cournensec) et des Oulettes (à Montbazin) s'activent, tels des trop pleins du système karstique, suite aux épisodes pluvieux majeurs (>100 mm). L'impluvium de la station hydrologique située à l'aval d'Issanka qui a été utilisée pour la naturalisation des écoulements est de 135,6 km<sup>2</sup>. La part des écoulements souterrains qui n'émergent pas à Issanka est transférée vers un compartiment aval, dont l'exutoire principal est la source de la Vise. L'impluvium associé à ce compartiment est de 20,6 km<sup>2</sup>.

Du point de vue quantitatif, le modèle conceptuel apporte des ordres de grandeur des flux concernant ces compartiments amont et aval. La recharge sur le causse d'Aumelas et la montagne de la Moure du compartiment amont a été évaluée à 152,8 mm/a en moyenne [7,5 millions de m<sup>3</sup>/a] ; les flux du karst qui alimentent la Vène représentent en moyenne 130,6 mm/a [6,4 millions de m<sup>3</sup>/a], le flux d'échange au profit du compartiment aval est évalué à 22,3 mm/a [1,1 millions de m<sup>3</sup>/a]. Une forte corrélation identifiée entre l'évolution temporelle du flux d'échange au profit du compartiment aval et la piézométrie mesurée aux ouvrages CGE-Tennis (BSS002JEHM) et P4-La Balm (BSS002JEKE) confirme le lien hydraulique entre les deux compartiments. Les flux de l'amont vers l'aval sont estimés à 150 L/s en hautes eaux et <30 L/s en période de très basses eaux. À l'aval, le flux de recharge moyen est évalué entre 131-141 mm.an<sup>-1</sup> ; et le flux moyen de la Vise est de l'ordre de 0,127 m<sup>3</sup>/s (4 millions de m<sup>3</sup>/a), la variabilité interannuelle apparaît assez faible (Min= 0,1 m<sup>3</sup>/s, Max =0,15 m<sup>3</sup>/s) soit entre 3,2 et 4,8 millions de m<sup>3</sup>/a. En moyenne, le flux en provenance du compartiment amont représenterait environ 30 % du flux total de la Vise. Les flux des exutoires secondaires du compartiment aval (sources de Cauvy et d'Ambressac), représenteraient moins de 10 % des flux moyens de la source de la Vise.

Sur la base du modèle géologique 3D (GeoModeller), un modèle déterministe 3D a été développé à l'aide de l'outil de modélisation hydrogéologique MARTHE. La géométrie du domaine de modélisation hydrodynamique du modèle MARTHAU est très détaillée en plan (grille de 400 x 400 m) et en profondeur (multicouche avec compartimentation du domaine vis-à-vis des accidents majeurs), soit au total plus de 12 200 mailles sur une extension de 1 000 km<sup>2</sup> (dont 200 km<sup>2</sup> d'impluvium). Ce domaine de modélisation prend en compte les nouvelles informations géologiques, en particulier les profondeurs des couches du Jurassique révisées et la faille de Thau, qui sépare un compartiment amont (entité liée à la Vise) et un compartiment aval (entité du Mont Saint-Clair).

La discrétisation du domaine en multicouche permet de réaliser des calculs au sein de zones d'écoulements avec des propriétés physiques discrétisées en 3D associées à des étages géologiques différents (p. ex. Jurassique Supérieur et Moyen). L'approche numérique de type milieu poreux équivalent s'est révélée satisfaisante pour reproduire les charges à l'échelle régionale, comparables aux états de référence observés dans le karst.

La modélisation permet en outre de reproduire localement les débordements correspondant aux sources et les dynamiques de fonctionnement observées ainsi que les flux ascendants correspondant à des différences de charges verticales observées entre les formations du Jurassique. Ces éléments constituent des résultats nouveaux et informatifs importants, qui sont issus du travail de calibration du modèle en régimes permanent et transitoire.

Plusieurs perspectives émergent à l'issu du projet DEM'Eaux Thau selon la finalité et/ou les attendus aux futurs objectifs de modélisation :

- pour mieux simuler et prédire les modalités d'écoulement à l'étiage, périodes favorables au déclenchement de phénomènes d'inversac, la calibration du modèle pourrait être revue spécifiquement sur ces périodes. Une telle calibration du modèle pourrait être couplée à la prise en compte de la dynamique de la lagune au niveau de la source de la Vise. Ceci pourrait être fait en traduisant la dynamique temporelle des hauteurs de la lagune en équivalent eau douce et en modifiant temporellement la charge imposée sur la maille associée à la source. Ce couplage devrait permettre une meilleure représentation des basses eaux et des déclenchements/rétablissement d'inversacs ;
- pour approfondir la modélisation et apporter des éléments de compréhension des écoulements en lien avec la réaction de l'aquifère aux processus d'inversac, le modèle pourrait intégrer des effets densitaires, en lien avec la salinité et la température des fluides dans l'hydrosystème. Ce modèle pourrait être développé à plus haute résolution, avec un modèle numérique local. Le contour de ce modèle local s'étendrait jusqu'au sud au niveau de l'interface lagune-mer afin de prendre en compte la faille de Thau qui semble favoriser les flux chauds, rapides (~10 jours). Cette nouvelle modélisation pourra être réalisée à partir de l'outil MARTHE développé ici, par exemple en utilisant un maillage plus détaillé (gigognes, plusieurs couches et plus haute résolution spatiale) que celui adapté à la problématique régionale. Les effets densitaires requièrent par ailleurs la définition de propriétés physiques nouvelles (en particulier avec la thermique) qui pourront être conditionnées par les mesures et expériences réalisées sur les nouveaux forages DMT1-T4 situé à proximité de la Vise ;
- enfin, après une phase d'amélioration de la calibration existante, l'outil de modélisation actuel pourrait être utilisé pour des calculs prévisionnels ou selon des scénarios de gestion, avec la prise en compte d'incertitudes. Ce travail porterait sur les calculs d'évolution des piézométries et des débits dans un contexte de changements globaux qui impacte la recharge, à partir de différents modèles et scénarios d'émission fournissant ainsi une base de calcul d'incertitude globale. Le travail pourrait aussi porter sur la mise en évidence des effets des modifications des régimes de prélèvements sur la piézométrie et les débits, dans un premier temps indépendamment et dans un second temps couplés aux modifications de recharge ;

- **Mécanisme du phénomène d'inversac**

Le mécanisme de mise en place de l'inversac est expliqué par des conditions de gradient hydraulique de charge, corrigées de la densité de l'eau, fluctuantes au cours du cycle hydrologique. En hypothèse hydrostatique, lorsque le niveau d'eau de la lagune de Thau et sa salinité sont élevés alors que le niveau piézométrique de l'aquifère est bas, les risques d'inversac augmentent. Ils sont faibles lorsque le niveau de la lagune et sa salinité sont peu élevés alors que les niveaux dans l'aquifère sont hauts.

Le mécanisme proposé, avec le remplissage subit d'un conduit karstique vertical lors du démarrage de l'inversac, permet d'expliquer le phénomène de rebond piézométrique (augmentation subite des niveaux d'eau de l'ordre de 2.3 m) observé sur le secteur d'étude après chacun des inversacs. Ceci nous permet de mieux préciser la géométrie du système à proximité de la source, à savoir une localisation du toit du Jurassique à environ -99 +/- 10 m NGF au niveau du conduit karstique.

La réalisation d'une modélisation numérique des écoulements et du transport (sel) souterrains a permis de confirmer le mécanisme proposé et de mettre en évidence le rôle du rebond piézométrique dans la durée des phénomènes d'inversac. En effet, une fois l'inversac mis en place et le conduit karstique rempli d'eau salée, la charge hydraulique à vaincre par l'aquifère pour contrecarrer l'intrusion est augmentée d'environ 2,3 m au niveau de la source. Seuls des épisodes pluvieux rares (de cumul supérieur à 100 mm) peuvent induire une recharge suffisante pour provoquer une telle hausse de niveau piézométrique ; ceci explique ainsi la longue durée des inversacs une fois ceux-ci mis en place.

Des équations prenant en compte de façon simplifiée les écoulements souterrains au sein de l'aquifère jurassique et du conduit karstique ont permis d'expliquer les débits observés à la source de la Vise en fonction des conditions hydrologiques. Ces équations ont permis de proposer deux indicateurs : en période normale, un indicateur de risque d'inversac et, en période d'inversac, un indicateur de probabilité de fin d'inversac. Le suivi dans le futur des trois variables impliquées dans cet indicateur permettra d'identifier les risques d'inversac. Nous recommandons de poursuivre ce suivi à un pas de temps fin (horaire).

Dans ce contexte, c'est la hauteur d'eau dans le karst qui apparaît la plus « facilement » modifiable par une gestion concertée de l'hydrosystème, l'objectif étant de garder des niveaux d'eau élevés dans l'aquifère le plus longtemps possible pour réduire le risque d'inversac en contrôlant la baisse de cette hauteur d'eau en période d'étiage. Ce contrôle pourrait être exercé par une réduction volontaire du débit d'exhaure de la source de la Vise ou par injection d'eau à proximité de la Vise voire même par une solution mixte (injection/réduction des débits de la Vise). Ces différentes solutions de remédiation ont été étudiées et évaluées dans cette étude.

La solution d'obturation de la source de la Vise a déjà été réalisée partiellement par le passé sous la forme d'un clapet anti-retour disposé au niveau de la source (Combes 2011) de façon à permettre les flux ascendants au sein du conduit karstique en période normale et empêcher des flux descendants en période d'inversac. Cette solution permettrait de réduire les effets d'un inversac mais pas nécessairement de l'empêcher. En effet, la configuration naturelle de la zone d'émergence de la Vise est composée d'un griffon principal (collecté par le dispositif de mesure mis en place dans le projet à -29,5 m de profondeur) mais également de griffons secondaires de faibles débits, situés à proximité à des profondeurs plus faibles (autour de 28,5 m de profondeur), qui permettraient toujours l'absorption d'eau de la lagune en direction du karst sous-jacent.

Dans l'idéal, il conviendrait d'obturer partiellement la source de la Vise au niveau de sa sortie, à - 29,5 m sous le niveau de la lagune. Le dispositif d'obturation de la Vise devrait être ajustable/modulable de façon à être en mesure de contrôler le niveau piézométrique de la nappe du Jurassique dans la presqu'île de Balaruc. En effet, une obturation complète provoquerait probablement une remontée trop importante du niveau de la nappe, induisant une inondation de structures souterraines (caves, ...) ; ceci pourra être évalué ultérieurement par modélisation à l'aide du modèle hydrogéologique 3D. Dès lors, l'obturateur pourrait être couplé au système de mesure du niveau piézométrique de façon à automatiser le degré d'ouverture de l'obturateur en fonction de la hauteur piézométrique.

Cette solution technique qui permettrait de moduler le débit de la source de la Vise en fonction de la piézométrie (et les aménagements associés) demanderait à être étudiée de façon détaillée, notamment en terme d'impact sur la qualité de l'eau de la lagune.

- **Outil de visualisation et gestion**

La plateforme web DEM'Eaux Thau offre un accès aux données sur l'eau sur l'ensemble du territoire du bassin de Thau et permet également un accès vers d'autres plateformes telles que l'hydroportail ou ADES (Portail national d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines). En regroupant les données issues des équipements et travaux menés dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau, elle offre ainsi un point d'accès unique à la connaissance sur la ressource en eau du territoire.

La plateforme s'adresse à divers types de publics, le grand public, les publics experts et les gestionnaires de la ressource auxquels elle offre aussi des outils opérationnels et de communication. Une phase d'appropriation par les gestionnaires et tous les publics concernés doit être maintenant envisagée. Son maintien dans la durée nécessite également de définir les modalités nécessaires à son entretien, son animation et son évolution.

## 11. Bibliographie

**Abbaszadeh M.D., Cinco-Ley H.,** (1995) - Pressure transient behavior in a reservoir with a finite-conductivity fault. S.P.E.-R.E Feb., 115-124.

**Aquilina L., Ladouche B., Dörfliger N., Seidel J. L., Bakalowicz M., Dupuy C. et Le Strat P.** (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), p.1–21. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00160-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00160-2).

**Aquilina L., Ladouche B., Dörfliger N. et Bakalowicz M.** (2003) - Deep water circulation, residence time, and chemistry in a karst complex, Groundwater, 41(6), p.790–805. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02420.x>.

**Archie, G.E.** (1942) - The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, J. Pet. Techn., 5, 1-8.

**Bourdet, Whittle T.M., Dougals, A.A., Pirard V.M.** (1983) - A new set of type curves simplifies well test analysis, World Oil.

**Bourgeois, T.** (2019) - Caractérisation du paleokarst 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 Université de Montpellier, 50 pp.

**Brunet P., Hernandez F. et Muller F.** (2008) - Compte rendu du traçage effectué sur la source de la Vise le 30/01/2008. Rapport interne HydroSciences Montpellier, 7 p.

**Capar, L. & Marc, S.** (2018a) - Retraitement de lignes sismiques 2D dans la région de l'étang de Thau. Rapport final. BRGM. [BRGM/RP-68318-FR](#), 23 p.

**Capar, L. & Marc, S.** (2018b) - Retraitement de 3 lignes sismiques 2D dans la région de Florensac. Rapport final. BRGM. [BRGM/RP-68603-FR](#), 19 p.

**Combes, P.J., Peybernès, B., Fondécave-Wallez, M.-J., Séranne, M., Lesage, J.-L. & Camus, H.** (2007) - Latest-Cretaceous/Paleocene karsts with marine infillings from Languedoc (South of France); paleogeographic, hydrogeologic and geodynamic implications. Geodinamica Acta, 20, 301-326.

**Condomines, M., Gourdin, E., Gataniou, D., & Seidel, J. L.** (2012) - Geochemical behaviour of Radium isotopes and Radon in a coastal thermal system (Balaruc-les-Bains, South of France). Geochimica et Cosmochimica Acta, 98, 160-176.

**Coppo, N., Jacob, T., Bitri, A., Darnet, M., Bretaudeau, F. & Wawrzyniak, P.** (2018) - Investigations géophysiques (CSEM, gravimétrie et sismique) sur le secteur de Balaruc-les-Bains (Hérault, France) - Rapport d'acquisition. BRGM. [BRGM, RP-68381-FR](#), 77p.

**Dewandel B., Hakoun V., Lanini S., Ladouche B., Lamotte C., Maréchal J.-C.** (2022) - Analytical solutions for analysing pumping tests near an infinite vertical and anisotropic fault zone with finite thickness, storativity and hydraulic conductivity based upon unconventional application of well-image theory. Adv. in Water Res. Vol. 160, Feb. 2022, 104107. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.104107>.



**Dewandel B., Aunay B., Maréchal J.C., Roques C., Bour, Mougin B., Aquilina L.** (2014). Analytical solutions for analysing pumping tests in a sub-vertical and anisotropic fault zone draining shallow aquifers, *Journal of Hydrology*, Volume 509, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.014>.

**Gutierrez, A., Klinka, T., & Thiery, D.** (2012). Manuel d'utilisation de TRAC: Aide à l'interprétation de traçages en milieux poreux. *Rapport BRGM-RP-60660-FR*.

**Gutierrez, A., Klinka, T., Thiéry, D., Buscarlet, E., Binet, S., Jozja, N., Défarge, C., Leclerc, B., Fécamp, C., Ahumada, Y., Elsass, J.** (2013) - TRAC, a collaborative computer tool for tracer-test interpretation, *EPJ Web of Conferences*, 50 (2013) 03002, DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20135003002>.

**Hemelsdaël, R., Séranne, M., Caritg, S., Courrioux, G., Husson, E., Jacob, T. & Lamotte, C.** (2021) - DEM'Eaux Thau – Construction d'un modèle géologique 3D du secteur Montpellier-Sète et de l'étang de Thau. *Rapport BRGM RP-70789-FR*, 94 p.

**Hemelsdaël, R., Séranne, M., Husson, E. & Ballas, G.** (2021) - Structural style of the Languedoc Pyrenean thrust belt in relation with the inherited Mesozoic structures and with the rifting of the Gulf of Lion margin, southern France *BSGF-Earth Sciences Bulletin*, 192, 46.

**Hunt, B. and M. Smith** (2008) - Improved spring depletion solution and analysis. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 2, 80-89.

**Husson, E.** (2013) - Interaction géodynamique/karstification et modélisation géologique 3D des massifs carbonatés : Implication sur la distribution prévisionnelle de la karstification. Exemple des paléokarsts crétacés à néogènes du Languedoc montpelliérain. Doctorat, Université Montpellier 2, 314p.

**Husson, E., Séranne, M., Combes, P.-J., Camus, H., Peybernès, B., Fondécave-Wallez, M.-J. & Melinte-Dobrinescu, M.** (2012) - Marine karstic infillings: witnesses of extreme base level changes and geodynamic consequences (Paleocene of Languedoc south of France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 183, 425-441.

**Ladouche B., C. Lamotte** (2015) - Inversac de la source sous-marine de la Vise en 2014 : Recueil et analyse des données disponibles. *Rapport final. BRGM/RP- 64812-FR*, 82 p., 56 ill.

**Ladouche B., Lamotte C., Hemelsdaël R., Petre M.A., Dewandel B., Léonardi V., Seidel A.L., Séranne M.** (2019) - DEM'Eaux Thau – Synthèse et valorisation des données historiques sur l'hydrosystème de Thau (34). *Rapport final. BRGM/RP-68483-FR*.

**Ladouche, B. Dewandel, C. Lamotte, P. Pezard, M. Séranne** (2021) - Plateforme DEM'Eaux Thau - 1ères acquisitions sur la source de la Vise, forages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3, DEMENT4 – Livrable L10 – *Rapport final. BRGM/RP-70842-FR*.

**Leonardi V., Bailly-Comte V., Brunet P. et Lamotte C.** – DEM'Eaux Thau : résultats des essais de traçages artificiels. *Rapport final. BRGM/RP-71758-FR*, 55 p.

**Marchal et Camus** (1986) - Ressources en eau souterraine des systèmes aquifères calcaires jurassiques de l'étang de Thau. *Rapport BRGM 86 SGN 684 LRO*.

- Millot R., Scaillet B., Sanjuan B.** (2010) - Lithium isotopes in island arc geothermal systems: Guadeloupe, Martinique (French West Indies) and experimental approach, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 74, Issue 6, Pages 1852-1871, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.12.007>
- Pétre, M.A., Ladouche B., Seidel J.L., Hemelsdaël R., de Montety V., Batiot-Guilhe C., and Lamotte C.** (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): 5656-5672. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5655-2020>.
- Ranchoux C., Ladouche B., de Montety V., Seidel J.L., Pétre M. A., Hery M., Desoeuvre A. , Batiot-Guilhe C.**, (2021) - DEM'Eaux Thau - Rapport d'analyses géochimiques- Apports des campagnes spatiales 2018-2019 - Livrable L5a. Rapport final. [BRGM/RP-71281-FR](#), 155 p.
- Ranchoux C., Ladouche B., de Montety V., Seidel J.L., Pétre M. A., M. Hery, A. Desoeuvre C. Batiot-Guilhe** (2022) - DEM'Eaux Thau - Rapport d'analyses géochimiques- Apports des campagnes mensuelles et de l'inversac 2020-2021 - Livrable L5b. Rapport final. [BRGM/RP-71957-FR](#).
- Selles, A., Leonardi, V., Bailly-Comte, V., Jourde, H.**, (2011) - Influence des relations karst/rivière sur la restitution plurimodale d'un traçage artificiel : Cas du Causse d'Aumelas. *Proc. H2Karst, 9th Conference on Limestone Hydrogeology*, Besançon (France), pp. 439–442.
- Temani, A.** (2022) - Caractérisation pétrophysique et hydrodynamique du site karstique de forage de Balaruc (projet " DEM'Eaux Thau"). Master 2, Université de Montpellier, 50p.
- Thiéry D.** (2020) - Code de calcul MARTHE version 7.8 - Modélisation 3D des écoulements et des transferts dans les hydrosystèmes - Notice d'utilisation. [Rapport BRGM/RP-69541-FR](#), 359 p., 166 fig.
- Thiéry, D.** (2015) - Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le code de calcul MARTHE - version 7.5. Rapport BRGM/RP-64495-FR. 87p., 36 fig.
- 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.
- Vigouroux P.** (2018) - Projet DEM'Eaux-Thau - Forage « Stade Michel » à Sète (34) - Dossier de l'Ouvrage Exécuté (L6)- Rapport final. [BRGM/RP-68549-FR](#), 40 p., 7 ill., 3 ann.
- Waxman et Smits**, (1968) - Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Soc. Pet. Eng. J.*, 8, 107-122.
- Widhen, F.** (2021) - Interactions déformation-altération dans un réservoir karstique côtier de la marge proximale du Golfe du Lion (presqu'île de Balaruc) - Étude de carottes et diagraphies du forage DEM'Eaux Thau. Master 2, Université de Montpellier, 48p.
- Widhen, F., Séranne, M., Ballas, G., Labaume, P., Le-Ber, E., Pezard, P.A., Girard, F., Lamotte, C. & Ladouche, B. soumis.** Long-term evolution of a carbonate reservoir submitted to fresh, saline and thermal waters interactions - Jurassic carbonates in the coastal area of the Gulf of Lion margin (southern France). *Bulletin de la Société Géologique de France*.
- Wyllie, M., Gregory, A., et Gardener, G.**, (1956) - Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, 21:41–70.



## Annexe 1

## Détail sur le réseau d'observation

Code BSS	Abreviation	x_L93	y_L93	Zone	Réseau/producteur
BSS002JDBC	pz trop-plein Vène	756188	6270819	1	BRGM/AFB
BSS002JCUL	Pavillon Issanka	756512	6264734	1	SETE/SUEZ; BRGM/Demeaux depuis 2019
BSS002JCZF	Pavillon Bourges	756313	6264415	1	SETE/SUEZ; BRGM/Demeaux depuis 2019
BSS002JCSQ	Forage Carrière GSM	751878	6264630	1	SMBT
BSS002PYCD	Piézo Carrière GSM	751198	6266023	1	GSM/ Berga Sud
BSS002GPF5	Pignan_retraite	760362	6276230	1	BRGM/AFB
BSS002GPFR	Boulidou	759834	6275755	1	SBL
BSS002GPFN	Olivet	762375	6278100	1	SBL
BSS002JEKE	P4_Balm	756846	6262232	2	BRGM/AFB
BSS002JCZU	Frescaly	756045	6263857	2	SETE/SUEZ puis SMBT 2ème trimestre 2018
BSS002JCZV	Vignes	755910	6263913	2	SETE/SUEZ puis SMBT 2ème trimestre 2018
BSS002JCMA	F5 Autoroute	755375	6263992	2	SETE/SUEZ puis SMBT 2ème trimestre 2019
BSS002JEHM	CGE_Tennis	755777	6262898	2	BRGM/AFB
BSS004AWUN	Cambelliès	751107	6262201	2	SMBT
BSS002JCZS	F5_Moulières	756442	6264094	2	SMBT
BSS003CJNI	Cèdre	757192	6264258	2	SMBT
BSS002JEKD	Sce_Amb	756539	6260705	3	BRGM puis SMBT
BSS002JDNI	Sce_Cauvy	755378	6260974	3	CD34
BSS002JDNI	Sce_Cauvy	755453	6260924	3	SMBT
-	Lagune THAU	754483	6260247	3	Thermes
BSS002JDXG	F14	754506	6260253	3	Thermes
BSS002JDUZ	F3	754658	6260536	3	Thermes
BSS002JDVA	F4 Hôtel	754868	6260789	3	BRGM/AFB
BSS002JDVB	F5	754589	6260576	3	Thermes
BSS002JDXA	F6	754676	6260877	3	BRGM/Demeaux
BSS002JDWH	F8	754773	6259905	3	Thermes
BSS002JDXB	F9	754588	6260575	3	Thermes
BSS002JDMR	la Vise	754410	6260718	3	BRGM/Demeaux
BSS002JDNI	S12	754907	6260374	3	SMBT
BSS003CGKO	pz Stade-Michel	754219	6257281	4	BRGM/Demeaux
BSS002JCLT	La Calade (St Farriol)	749368	6266070	*	Mairie de Villeveyrac/BRL
* Entité "Bassin de Villeveyrac"					

Liste des points suivis et report de leur zone hydrogéologique

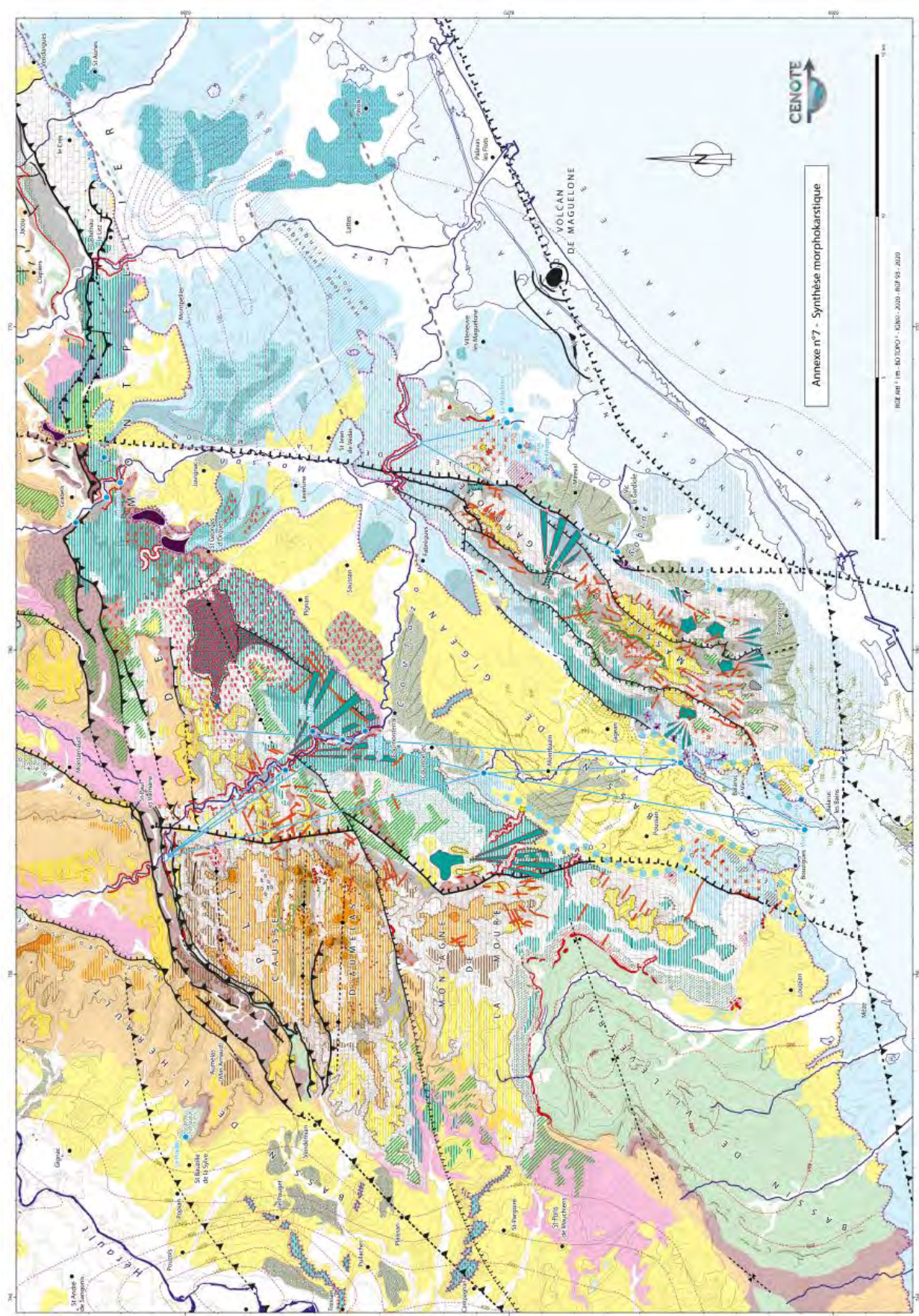




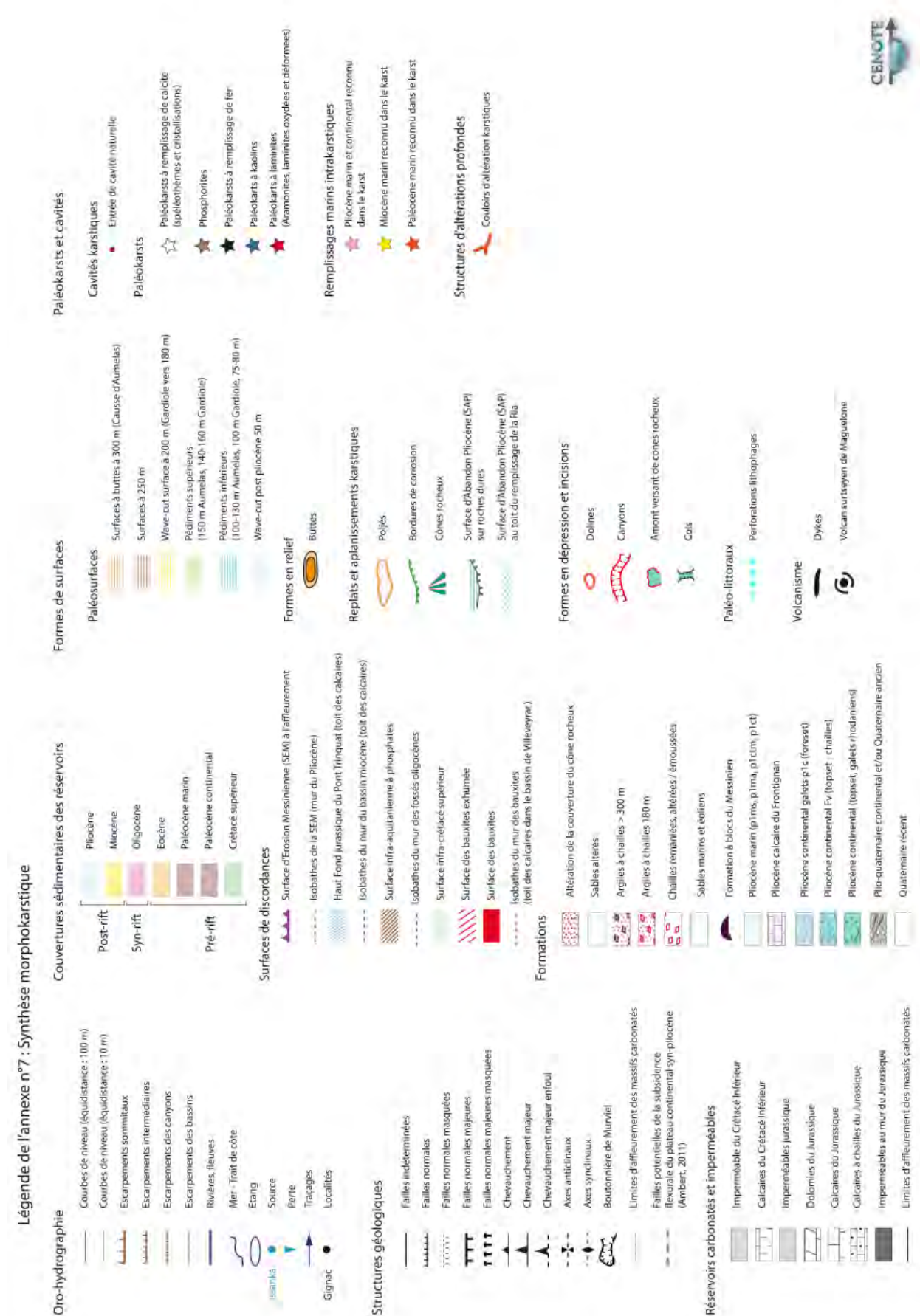
## **Annexe 2**

### **Extrait de l'atlas cartographique du diagnostic karstologique des massifs carbonatés de l'Aumelas et de la Gardiole**



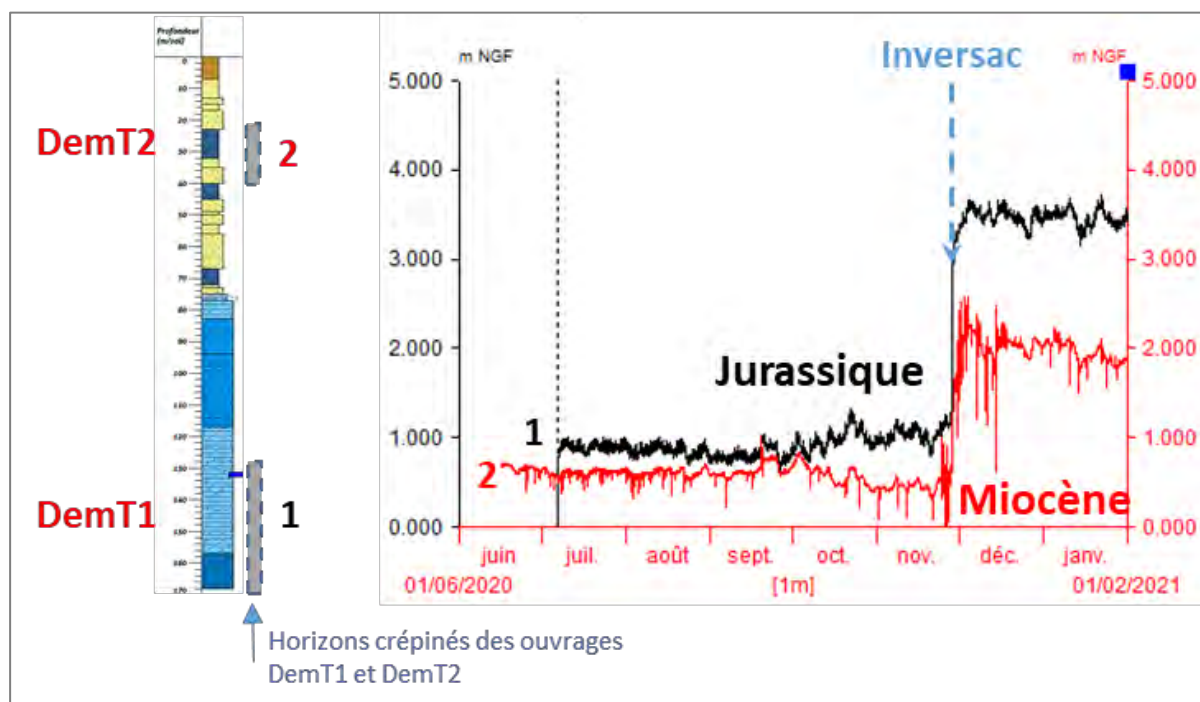






## Annexe 3

### Complément d'information sur la plateforme de forage



Évolution comparée de la piézométrie mesurée dans le Jurassique (DEMT1) et le Miocène (DEMT2)

	DEMT1	DEMT2	DEMT3	DEMT4	
Lithologies	Carbonate (Jurassique)	minéraux argileux (Miocène)	Carbonate (Jurassique)	Carbonate (Jurassique)	Carbonate (Jurassique)
Profondeur échantillonnée	128 - 178 m	20 - 40 m	200 m et 280 m	620 et 759 m	390 et 759 m
Durée pompage	24 h	4 h	24 h	24 h	24 h
Q pompage	25 m <sup>3</sup> /h	6.3 m <sup>3</sup> /h	3 à 4 m <sup>3</sup> /h	5 m <sup>3</sup> /h	5 m <sup>3</sup> /h
Échantillons (date)	T <sub>0</sub> +1h (27 mai 20)	T <sub>0</sub> +1h30 (2 juin 20)	T <sub>0</sub> +4h (11 jan. 21)	T <sub>0</sub> +4h (15 nov. 21)	T <sub>0</sub> +4h (17 nov. 21)
	T <sub>0</sub> +24h (28 mai 20)	T <sub>0</sub> +4h (2 juin 20)	T <sub>0</sub> +24h (12 jan. 21)	T <sub>0</sub> +24h (16 nov. 21)	T <sub>0</sub> +24h (18 nov. 21)

Caractéristiques des essais de pompages et des prélèvements associées sur les démonstrateurs.









**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

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

**Direction régionale Occitanie**

1039 rue de Pinville  
34000 Montpellier  
Tél. : 04 67 15 79 80

**[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)**



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**