



HAL
open science

Le système hydrothermal actif de Balaruc-les-Bains

Michel Séranne, Claudine Lamotte, Bernard Ladouche, Coralie Ranchoux

► **To cite this version:**

Michel Séranne, Claudine Lamotte, Bernard Ladouche, Coralie Ranchoux. Le système hydrothermal actif de Balaruc-les-Bains. *Géologues*, 2024, 221, pp.69-73. hal-04815011

HAL Id: hal-04815011

<https://hal.science/hal-04815011v1>

Submitted on 5 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

Le système hydrothermal actif de Balaruc-Les-Bains

Michel Séranne⁽¹⁾, Claudine Lamotte⁽²⁾, Bernard Ladouche⁽²⁾, Coralie Ranchoux^(2,3)

1 : Géosciences Montpellier, Université de Montpellier-CNRS, 34095 Montpellier.

2 : BRGM, 1039 Rue de Pinville, 34000 Montpellier

3 : HydroSciences Montpellier, Université de Montpellier-CNRS-IRD, 34095 Montpellier

Référence : Séranne, M., Lamotte, C., Ladouche, B. & Ranchoux, C. 2024. Le système hydrothermal actif de Balaruc-les-Bains. *Géologues*, 221, 69-73.

La station hydrothermale de Balaruc-les-Bains, sur la côte méditerranéenne entre Sète et Montpellier, se distingue des autres stations hydrothermales localisées dans des environnements montagneux. Le projet Dem'Eaux Thau a montré que le système hydrothermal actuel de Balaruc s'explique par l'évolution géologique longue (depuis le Crétacé) et polyphasée, du réservoir karstique située en zone côtière.

Introduction

Il ne s'agit pas d'une ressource minérale classique exploitée comme matière première dans des processus industriels, néanmoins, les eaux thermales de Balaruc-les-Bains correspondent bien à la définition d'une « ressource ». Tout d'abord, le thermalisme constitue une ressource thérapeutique certifiée par l'Académie de Médecine et contrôlée par les Agences Régionales de Santé. Ainsi, les eaux chaudes et minérales de Balaruc sont reconnues pour leurs effets bénéfiques en rhumatologie et en phlébologie. Ensuite, Balaruc-les-Bains, première station hydrothermale de France, génère directement (1100 employés de l'établissement thermal accueillent plus de 50000 curistes/an) et indirectement (hébergement et activités des curistes) un chiffre d'affaire annuel de l'ordre de 100 millions d'euros. Le poids économique considérable pour le territoire a été dramatiquement révélé lors de la crise sanitaire de 2020 entraînant la fermeture temporaire, suivie d'une forte baisse de fréquentation pendant les deux années suivantes. Enfin, il apparaît que la géothermie exploitant des eaux naturellement chaudes ($\geq 40^{\circ}\text{C}$ en surface) constitue une nouvelle ressource énergétique en développement.

L'hydrogéologie complexe du site, notamment les interactions des eaux thermales profondes avec des eaux plus superficielles, constitue un enjeu pour la pérennité de la ressource hydrothermale. L'objectif du projet DEM'EAUX THAU (2017-2022) était d'améliorer la compréhension du système hydrogéologique de la zone nord-est de l'étang de Thau. Mené par les scientifiques du BRGM, du CNRS, de l'Université de Montpellier et de GEau, appuyé par l'entreprise Synapse Informatique, le projet a été co-financé par l'Europe, l'État, la Région Occitanie, l'Agence de l'Eau RMC, la métropole de Montpellier, Balaruc-les-Bains et le SMBT, aux côtés des organismes de recherche impliqués. Ce projet innovant combinait mesure et modélisation en géologie, hydrogéologie, hydrochimie et a développé une plateforme Web (concentration et valorisation des données du territoire), afin de fournir aux acteurs économiques et politiques un outil de gestion des usages des différentes eaux souterraines qui

interagissent dans le réservoir karstique. Cet article se focalise sur l'hydrothermalisme, notamment sur l'origine des eaux thermales.

Un contexte hydrogéologique particulier

L'hydrogéologie du site de Balaruc est caractérisée par trois types d'eaux très différentes, interagissant dans un réservoir profond karstique en domaine littoral (Figure 1).

- **Eaux karstiques** froides et douces. Ces eaux d'origine météorique, sont issues des précipitations sur une zone de recharge de plus de 150 km² d'affleurement de calcaires karstifiés d'âge Jurassique. Une partie circule rapidement dans les réseaux karstiques souterrains et émerge dans des résurgences, dont certaines sont captées pour l'adduction d'eau potable (AEP). Une autre partie alimente un réservoir régional plus profond, à faible vitesse de circulation.

- **Eaux marines** salées ou saumâtres. Elles s'infiltrent dans le réservoir par les affleurements et pointements côtiers de calcaire karstifié, depuis la mer ou l'étang de Thau. De plus, pendant certains épisodes non-périodiques de plusieurs mois ou années, la source d'eau douce sous-marine de la Vise s'inverse et absorbe l'eau saumâtre de l'étang.

- **Eau thermale** chaude (environ 50°C), fortement minéralisée (conductivité $\geq 15\text{mS/cm}$), d'origine profonde. Cette dernière atteint naturellement la surface dans des sources historiques, au niveau de la péninsule de Balaruc-les-Bains. Elle est aujourd'hui exploitée par une série de forages (100 à 400 m de profondeur) directement dans le réservoir karstique des calcaires du Jurassique. Un forage de reconnaissance réalisé dans le cadre du projet DEM'EAU THAU a également mis en évidence des eaux thermales dans le Jurassique sous-couverture au niveau de Sète.

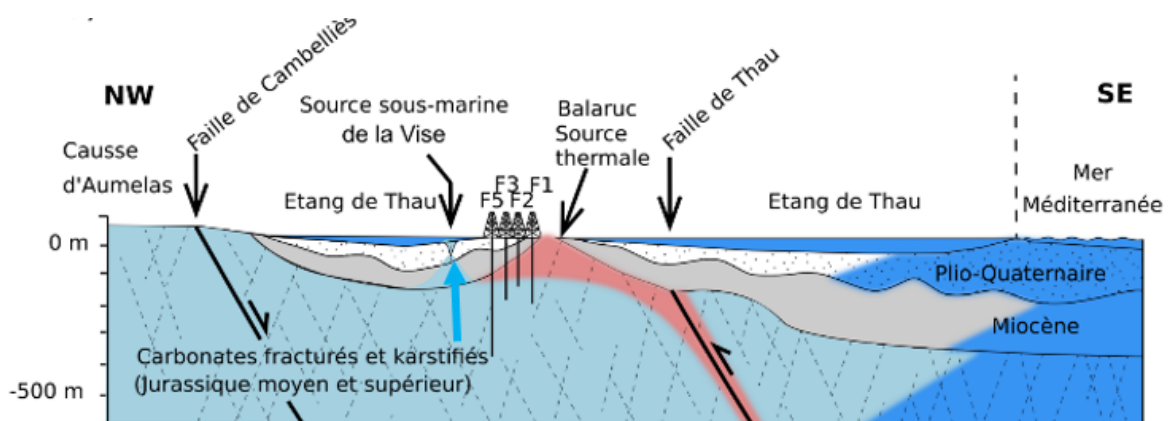


Fig. 1 : Coupe conceptuelle montrant la distribution des différents aquifères de la zone d'étude. Bleu clair : eaux douces karstiques ; bleu foncé : eaux salées marines ; rouge : eaux thermales profondes (d'après (Pétre et al., 2020)).

Géologie du réservoir

La première étape du projet a consisté à déterminer les caractéristiques géométriques et pétrophysiques du réservoir karstique profond, afin de construire un modèle géologique 3D servant de base aux modélisations hydrologiques.

L'ensemble des données utilisées sont représentées sur la figure 2. La géologie de surface est issue des cartes au 1/50 000^e et intègre de nouvelles mesures structurales, notamment de pendages et de cinématique des zones de faille majeures. La structure du sous-sol est contrainte par les données de sondages et forages (BSS) généralement < 100 m de profondeur, ainsi que 4 forages d'exploration pétrolière > 1000 m. Ces derniers ont permis l'interprétation et le calage de profils de sismique réflexion. Des campagnes de sismique d'exploration pétrolière à terre, acquies dans les années 1980 ont été utilisées, ainsi que de très anciennes acquisitions des années 1960 dont le retraitement a apporté de très bons résultats. En mer, nous avons sélectionné et retraité les profils proches de la côte. Il existe en outre quelques profils de sismique réflexion haute résolution (et faible pénétration) dans la partie nord de l'étang de Thau. Aucune donnée du sous-sol existant dans la zone côtière, nous avons acquis un profil de sismique réflexion terrestre de 11 km entourant le nord de l'étang de Thau. Les structures masquées par d'extensives zones en eau et par des couvertures sédimentaires récentes ont été documentées par de nouvelles acquisitions de gravimétrie. L'interface calcaire jurassique / sédiments marneux du Néogène a été imagée par sismique passive, par la méthode H/V. Enfin, des mesures CSEM (*Controlled Source Electromagnetic*) ont analysé la distribution des résistivités dans le sous-sol, afin de mettre en évidence différentes lithologies et/ou des flux de fluides plus ou moins conducteurs.

L'ensemble de ces données ont été intégrées afin de construire un modèle géologique 3D sous *Geomodeller™* sur un volume de 70 km dans la direction NS, 35 km en EW et 5 km de profondeur (Figure 3). Ce modèle met en cohérence géologique les structures représentées et permet d'investiguer la géométrie tridimensionnelle des différents réservoirs calcaires du Jurassique, leurs juxtapositions par le jeu des failles majeures, ainsi que les connexions potentielles entre les panneaux de calcaire Jurassique.

La modélisation géologique en 3D a permis de renouveler le schéma structural de la région, ce qui a grandement amélioré la compréhension des circulations d'eaux souterraines (Hemelsdaël *et al.*, 2021b). Tout d'abord, un chevauchement masqué par le Plio-Quaternaire et l'étang de Thau a été mis en évidence pour la première fois ; il est orienté EW et d'âge Pyrénéen, comme le chevauchement de Montpellier situé plus au nord. D'autre part, une faille normale majeure, orientée NNE, abaissant le panneau Jurassique de deux kilomètres vers l'est a également été cartographiée sous les sédiments côtiers. Il s'agit du prolongement vers le SE de la Faille de Nîmes. Elle joue le rôle de rampe latérale pour le chevauchement de Thau pendant la compression pyrénéenne et fonctionne en faille normale pendant le rifting Oligocène. Le réservoir de calcaire Jurassique situé au toit du chevauchement de Thau et au toit de la faille de Nîmes est tronqué par une surface d'érosion et de karstification visible sur le terrain et reconnue en profondeur sur les profils de sismique réflexion. Cette discontinuité, localement associée à des bauxites d'âge Albien, est recouverte en discordance par l'Oligocène ou le Mio-Pliocène. Ceci indique que le réservoir Jurassique a été exposé et karstifié, avant d'être enfoui sous une couverture marneuse et finement détritique, imperméable.

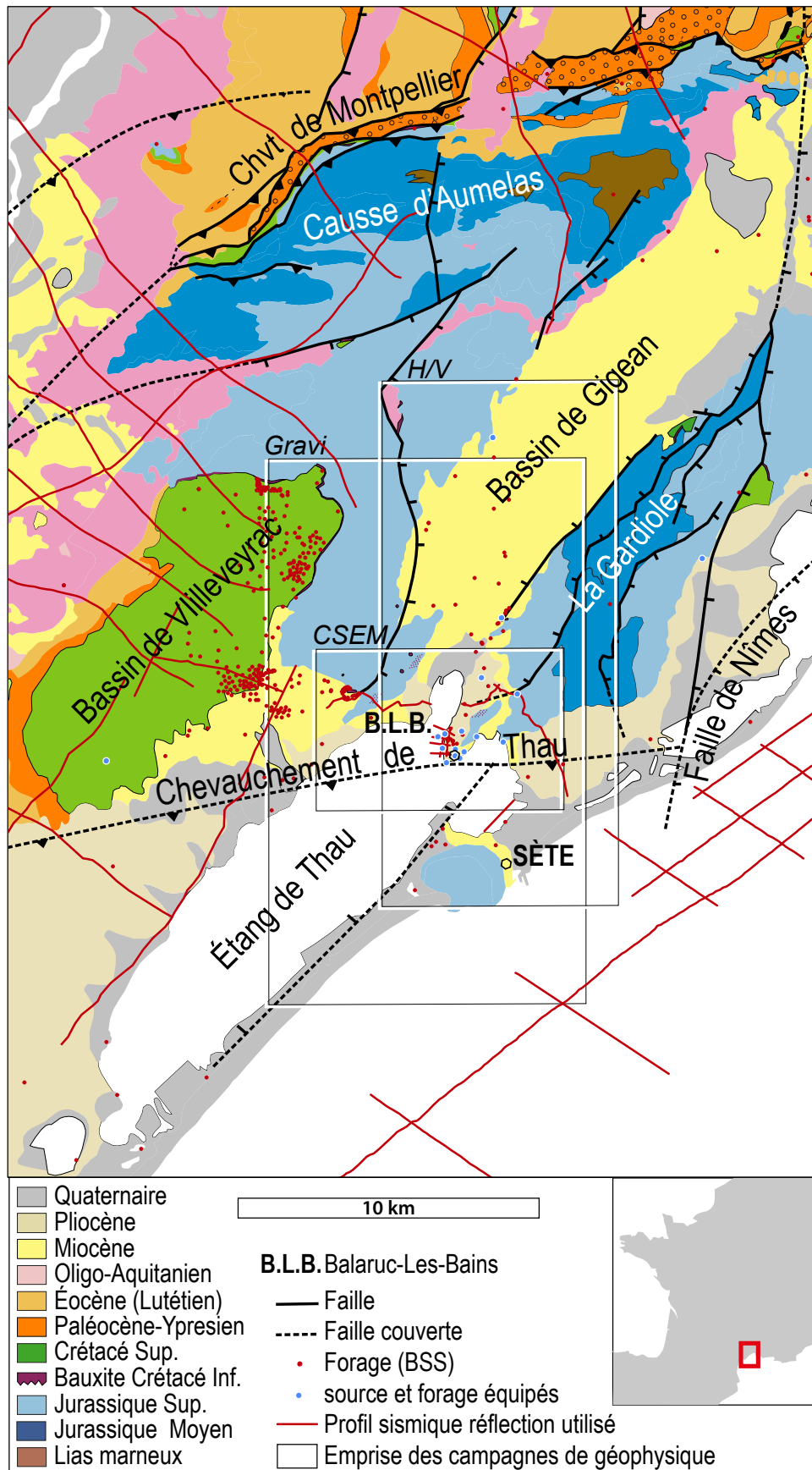


Fig. 2 : Carte géologique de la zone d'étude montrant la base de données utilisées (compilées et/ou acquises) dans le cadre du projet DEM'EAUX THAU.

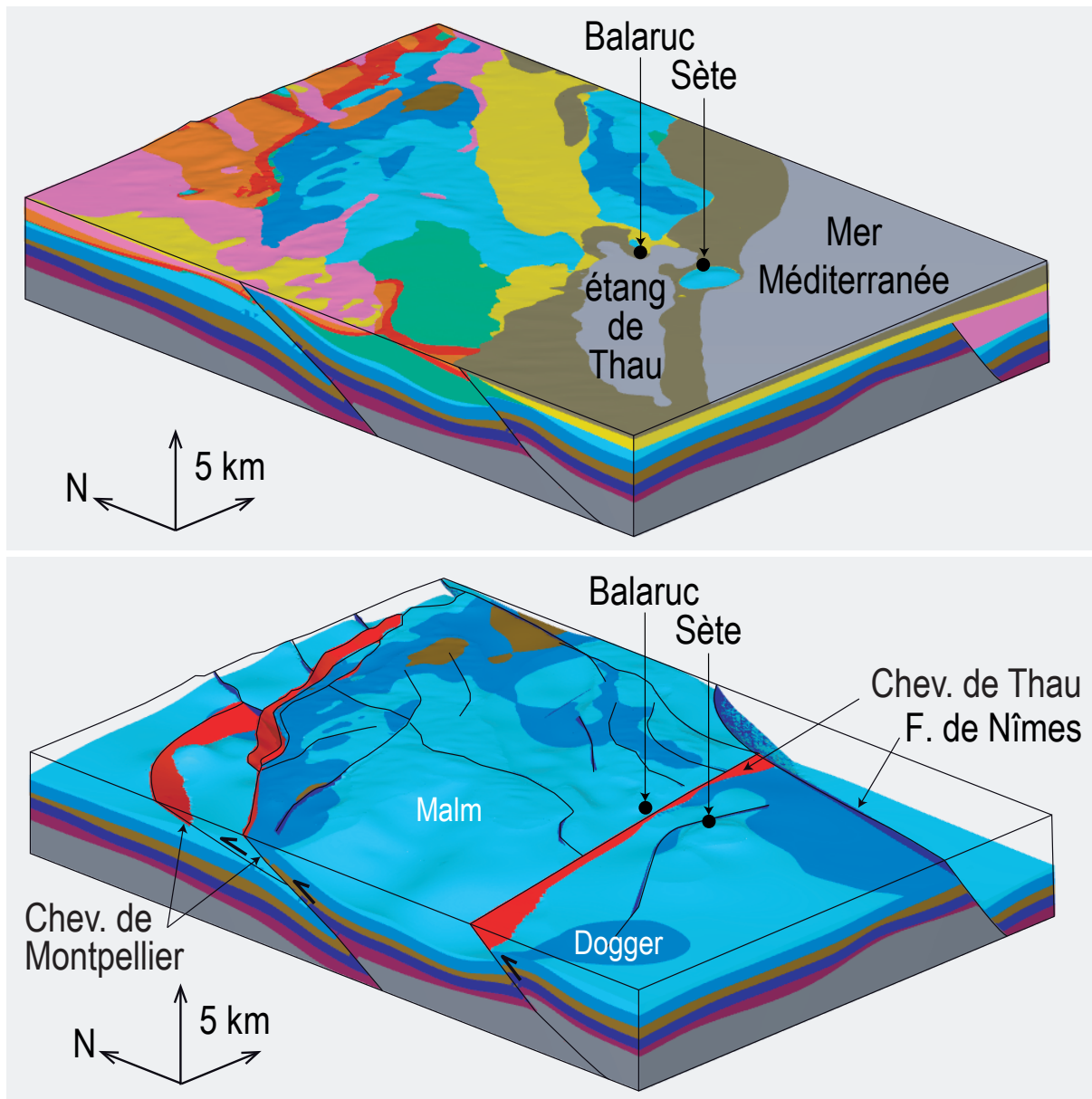


Fig.3: (Haut) Représentation du modèle géologique tridimensionnel réalisé sous Geomodeller™. (Bas) Écorché du modèle géologique 3D montrant le toit du réservoir karstique, affecté par les chevauchements pyrénéens (en rouge) et les failles normales (en bleu marine). Modifié d'après (Hemelsdaël et al., 2021a).

Ensuite, un forage d'exploration entièrement carotté de 760 m de profondeur, implanté dans Balaruc-les-Bains, a révélé la structure et la texture du réservoir Jurassique (Widhen *et al.*, 2023). Sous la couverture Néogène, on identifie un premier réservoir à forte porosité, partiellement dolomitisé (75-190 m). Ce réservoir présente des cavités karstiques décimétriques avec des évidences de circulation actuelle d'eau. Il est séparé par un intervalle marneux d'un deuxième réservoir (210-355 m) entièrement dolomitisé et affecté d'une intense déformation cataclastique. Sous les marnes de l'Oxfordien (350-430m), on observe un réservoir calcaire profond, présentant des conduits karstiques partiellement colmatés de

sédiments fins issus de la surface, jusqu'à plus de 500 m de profondeur. La partie inférieure du forage présente des calcaires marneux et s'arrête dans des marnes noires du Callovien moyen.

L'ensemble de la colonne présente des fractures et des veines minéralisées, témoins des paléofluides qui ont circulé au cours de l'évolution géologique dans les réservoirs superposés. Les circulations actuelles ont été repérées pendant le forage, notamment dans des fentes ouvertes, dont les parois sont tapissées de calcite automorphe et dont les relations structurales montrent qu'elles sont les plus récentes. L'observation en lumière naturelle et en cathodoluminescence de ces calcites indique des précipitations dans une même veine à partir de fluides dont la composition varie au cours du temps entre des eaux marines, douces et thermales.

Géochimie des eaux

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 (Ranchoux *et al.*, 2022).

Du point de vue conceptuel, l'étude permet de confirmer l'existence d'un réservoir d'eau thermale situé en profondeur. Ces eaux 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. Les nombreux calculs de mélanges effectués avec de nombreux traceurs géochimiques (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 des forages thermaux de la presqu'île de Balaruc (70 % d'eaux douce d'origine karstique, 30 % d'eaux d'origine marine). La présence de gaz anthropiques dans les eaux thermales échantillonnées au sein de la presqu'île de Balaruc confirme également l'existence d'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 profonds de Balaruc.

Les informations isotopiques du strontium, du lithium et du carbone permettent de montrer sans ambiguïté l'existence d'un flux d'eau et de gaz en provenance du socle dans le réservoir profond du Jurassique moyen. Ces flux profonds permettent d'expliquer l'excès en Ca, Sr et HCO₃ observés dans les eaux thermales par rapport à la droite de mélange avec l'eau de mer en raison d'interactions eau-roche dans une matrice carbonatée. Les nouvelles informations du forage de reconnaissance (760 m) apportent des informations nouvelles sur les flux karstiques d'eau douce. Les eaux thermales captées (dans le forage F9) seraient composées de 11% d'eau du Jurassique moyen profond, de 58 % d'eau karstique du Jurassique supérieur et de 31% d'eau marine. Le couplage des informations géochimiques (³⁶Cl/³⁵Cl, isotopes du carbone, hélium dissous) et géophysique (gamma ray, porosité) ont permis de raffiner les modèles géochimiques et les estimations précédentes (Aquilina *et al.*, 2002) sur l'âge de l'eau des forages thermaux, de l'ordre de 50 000 ans (± 15 000) pour F9 et de 80 000 ans (± 20 000) pour le forage F8. Ces nouveaux résultats questionnent le schéma conceptuel de structure et de fonctionnement précédemment établi : où le mélange avec l'eau de mer se fait-il ? Deux hypothèses sont envisageables :

- dans un réservoir carbonaté profond, influencé par des flux de socle ;

- dans le réservoir du Jurassique Supérieur sous couverture d'âge Mio-Pliocène, possiblement en connexion hydraulique avec la mer (Sète) et/ou avec la lagune (pointement de calcaire du Jurassique situé entre Sète et Balaruc) et ponctuellement par la source sous-marine de la Vise lors des périodes d'inversac (périodes pendant lesquelles le fonctionnement de la source s'inverse).

Dans la première hypothèse, les mélanges se feraient en profondeur : le réservoir carbonaté profond doit avoir été, ou est localement salé (eau de mer ancienne ?) ce qui pose les questions : (1) de la zone géographique où se produit le mélange en profondeur, (2) de la recharge des eaux karstiques profondes du réservoir jurassique supérieur et moyen qui contribuent au mélange et également, (3) de la température des eaux profondes, en d'autre terme, la question de la profondeur du réservoir thermal profond.

Dans la deuxième hypothèse, les eaux thermales seraient apportées par des flux d'eaux issus du Jurassique Moyen, mais ils devraient être nécessairement plus chauds (>50 °C), ce qui implique une profondeur de ce réservoir d'au moins 2.5 à 3 km.

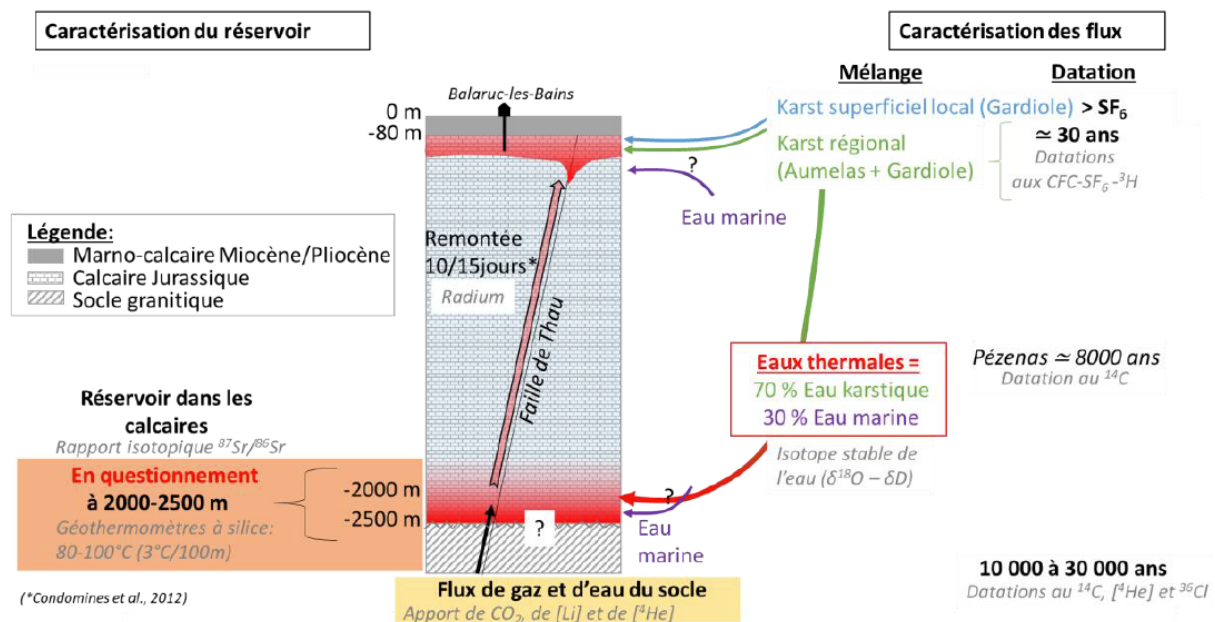


Fig. 4 : Synthèse des principaux résultats des analyses géochimiques des eaux de l'hydrosystème de Balaruc-les-Bains qui contraignent le modèle d'origine des eaux thermales (modifié d'après (Ranchoux et al., 2022)).

Un modèle d'origine des eaux thermales

Les contraintes apportées par la géochimie des eaux thermales combinées à la structure géologique tridimensionnelle des réservoirs permettent de proposer un modèle expliquant l'origine des eaux thermales de Balaruc-les-Bains (Fig. 5).

Le réservoir carbonaté Jurassique Supérieur ou Dogger dans lequel résident les eaux thermales serait situé à une profondeur de 2500 m en accord avec un gradient géothermique d'environ 30°C/km. Or seul le bloc effondré au SE de la Faille de Nîmes atteint de telles profondeurs. De plus, les vitesses rapides de remontée de l'eau thermique indiquent qu'elle emprunte un drain de forte porosité qui correspond bien avec les zones d'endommagement observées autour des failles majeures. L'émergence de l'eau thermique au niveau des

pointements de calcaire jurassique de Balaruc-les-Bains et de Sète, de part et d'autre du Chevauchement de Thau suggère que ce dernier sert de drain dans la partie superficielle du système. On propose donc que les eaux thermales sont issues d'un réservoir profond situé au toit de la Faille de Nîmes, c'est-à-dire au large de Sète, enfoui sous une épaisse charge de sédiments Oligocène et Néogène ; qu'elles remontent le long de la Faille de Nîmes et empruntent le Chevauchement de Thau qui se branche sur cette dernière (Fig. 5).

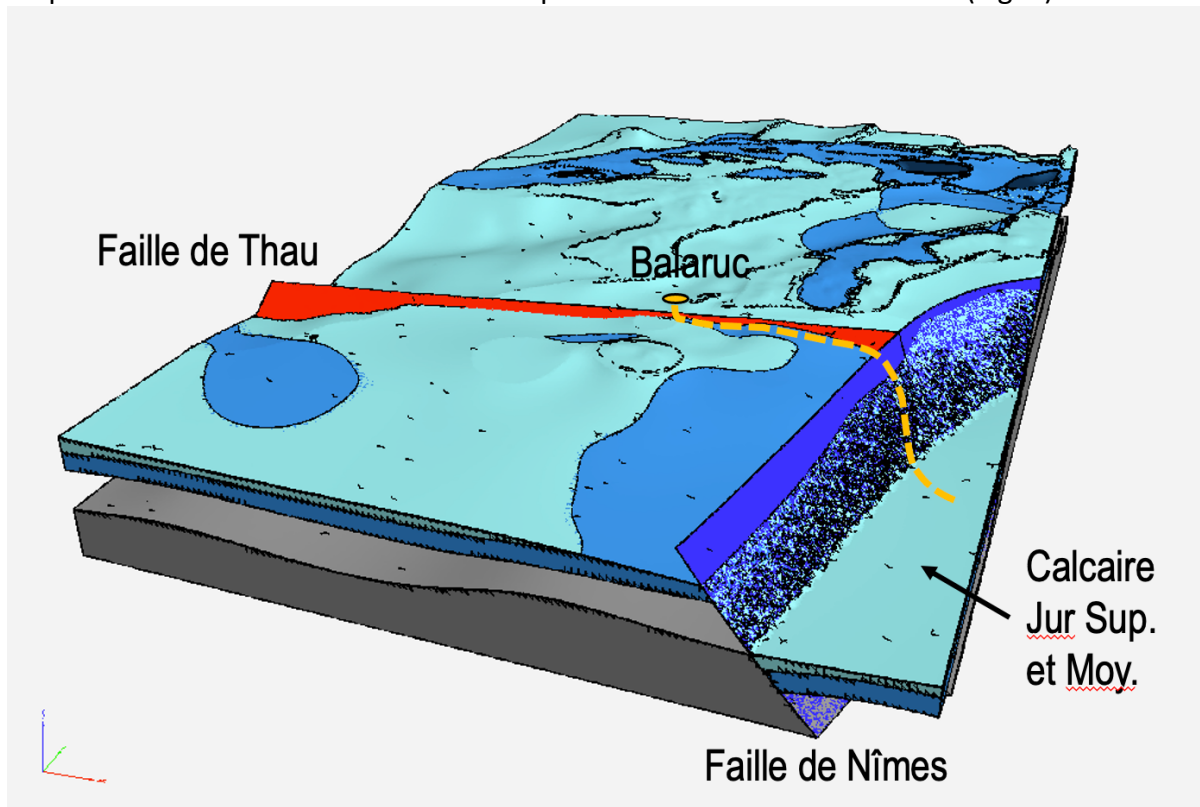


Fig. 5 : Écorché du modèle géologique montrant le réservoir Jurassique profondément enfoui (≥ 2000 m) au SE de la Faille de Nîmes ; les eaux chaudes en équilibre avec le gradient géothermique peuvent remonter rapidement par la Faille de Nîmes et atteindre la surface, drainées par l'intermédiaire du Chevauchement de Thau, jusqu'aux pointements du calcaire à Balaruc.

Les processus de recharge d'un tel réservoir profond sont encore mal compris et constituent un sujet de recherche actuelle. Contrairement aux zones thermales en domaine montagnard, où de forts gradients de pression hydrostatique sont générés par des zones de recharge en reliefs (Taillefer *et al.*, 2017), il est difficile de faire appel à un processus aussi simple dans le cas de Balaruc, situé en zone littorale.

Conclusion

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.

Les avancées géologiques associées aux nouvelles connaissances hydrogéologiques et géochimiques, et ainsi la complémentarité et pluridisciplinarité des différentes équipes de recherche durant le projet, ont permis de revisiter le schéma conceptuel des écoulements des eaux souterraines de l'hydrosystème de Thau-Balaruc, et notamment celui du système thermal de Balaruc-les-Bains. L'implication des différents partenaires financiers et territoriaux a été primordiale dans la réussite de ce projet collaboratif.

Bibliographie

- Aquilina, L., Ladouche, B., Doerfliger, N., Seidel, J.-L., Bakalowicz, M., Dupuy, C. & P., L.S. 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, 1-21.
- Hemelsdaël, R., Séranne, M., Caritg, S., Courrioux, G., Husson, E., Jacob, T. & Lamotte., C. 2021a. Dem'Eaux Thau – Construction d'un modèle géologique 3D du secteur Montpellier-Sète et de l'étang de Thau BRGM. RP-70789-FR,94.
- Hemelsdaël, R., Séranne, M., Husson, E. & Ballas, G. 2021b. 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.
- Pétre, M.-A., Ladouche, B., Seidel, J.-L., Hemelsdaël, R., De Montety, V., Batiot-Guilhe, C. & 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, 5656-5672.
- Ranchoux, C., Ladouche, B., Montety De, V., Seidel, J.-L., Pétre, M.A., Hery, M., Desoeuvre, A., Batiot-Guilhe, C., Lemaitre, L. & Kassime, H. 2022. DEM'Eaux Thau- Rapport d'analyses géochimiques- Apport des campagnes spatiales 2018-2019 - Livrable L5a. Rapport final. BRGM.153.
- Taillefer, A., Soliva, R., Guillou-Frottier, L., Goff, E.L., Martin, G. & Séranne, M. 2017. Fault-related controls on upward hydrothermal flow; an integrated geological study of the Têt Fault, Eastern Pyrénées (France). *Geofluids*, 2017, Article ID 8190109.
- Widhen, F., Séranne, M., Ballas, G., Labaume, P., Le-Ber, E., Pezard, P., Girard, F., Lamotte, C. & Ladouche, B. 2023. 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*, 194.