



Caractérisation géochimique de l'aquifère hydrothermal de Balaruc-les-Bains lors d'un épisode d'inversac

Bernard Ladouche, Romain Millot, Catherine Guerrot, Claudine Lamotte

► To cite this version:

Bernard Ladouche, Romain Millot, Catherine Guerrot, Claudine Lamotte. Caractérisation géochimique de l'aquifère hydrothermal de Balaruc-les-Bains lors d'un épisode d'inversac. Dix-huitièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues. " Ressources et gestion des aquifères littoraux. Cassis 2012. ", Mar 2012, Cassis, France. pp.141-149. hal-00680642

HAL Id: hal-00680642

<https://brgm.hal.science/hal-00680642>

Submitted on 2 Apr 2012

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.

Caractérisation géochimique de l'aquifère hydrothermal de Balaruc-les-Bains lors d'un épisode d'inversac

B. Ladouche, R. Millot, C. Guerrot et C. Lamotte ⁽¹⁾

BRGM EAU/NRE, BRGM MMA/ISO, BRGM SGR/LRO

b.ladouche@brgm.fr, r.millot@brgm.fr, c.guerrot@brgm.fr, c.lamotte@brgm.fr

I. INTRODUCTION

Les ressources en eaux souterraines du secteur de l'étang de Thau et de Balaruc-les-Bains appartiennent à la masse d'eau souterraine FR DG 124 dite du Karst du Pli Ouest de Montpellier. Ces ressources sont d'intérêt majeur pour le territoire concerné, que ce soit pour l'alimentation en eau potable, le développement économique avec en particulier l'activité conchylicole au niveau de l'étang de Thau et le thermalisme sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains (deuxième station thermale de France).

Au cours de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, puis récemment en 2008 et 2010, l'aquifère karstique et thermal de la presqu'île de Balaruc a subi des phénomènes d'intrusion d'eau saumâtre par l'intermédiaire de la source sous-marine de la Vise située dans l'étang de Thau. Ce phénomène dit « d'inversac » qui peut durer plusieurs mois (plus de 6 mois en 2010) a pour conséquence une modification des paramètres physico-chimiques (1) sur les ouvrages des thermes de Balaruc, et (2) sur la source AEP de Cauvy. Le déterminisme de ce phénomène dit « d'inversac » reste largement inexplicé et de nombreuses questions restent à élucider : l'inversac est-il lié à une diminution de la recharge par les pluies efficaces ? et/ou à une augmentation des prélèvements sur la ressource ? à l'augmentation de la charge hydraulique de l'étang de Thau lors d'épisodes météorologiques particuliers (système dépressionnaire accompagné du phénomène de sur-côte de l'étang) ?, à la conjonction de tous ces facteurs ?...

Dans le but de mieux comprendre le fonctionnement du système hydrogéologique de Balaruc-les-Bains et ses environs lors d'un phénomène d'inversac, une campagne de prélèvement d'eau et d'analyses chimiques et isotopiques a été effectuée en octobre 2010, sous maîtrise d'ouvrage du Syndicat Mixte du Bassin de Thau (SMBT). L'objectif de cette étude [1] a été de préciser et quantifier l'importance du phénomène à l'échelle la presqu'île de Balaruc afin d'améliorer le schéma conceptuel de fonctionnement de cet hydrosystème complexe correspondant au lieu de convergence d'eau thermale, d'eaux karstiques froides en provenance des Causses d'Aumelas et de la Gardiole et d'eau d'origine marine (Etang et Mer).

Les résultats acquis dans cette étude constituent une photographie instantanée « géochimique et hydrogéologique » de l'état du système à un instant donné (environ 4 mois après le début du phénomène d'inversac). Les données acquises permettent d'établir une comparaison avec les informations géochimiques ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, tritium, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) collectées en 1996/2000 en contexte normal de fonctionnement [2,3]. Les informations nouvelles apportées par les isotopes du bore ($^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$) et du Lithium ($^7\text{Li}/^6\text{Li}$) permettent de qualifier les interactions eaux-roches (résultats non présentés dans le cadre de ce papier). La synthèse de l'ensemble des résultats permet d'apporter des informations sur l'organisation des écoulements de la presqu'île de Balaruc.

II. ETAT DE LA CONNAISSANCE SUR LES EAUX THERMALES DE BALARUC LES BAINS ET LE SYSTEME KARSTIQUE DE THAU

Le programme d'action mené en 1999-2000 par le BRGM et la DIREN-LRO a permis d'apporter des éléments de connaissance fondamentaux sur le système karstique complexe de Thau et plus particulièrement dans le secteur de la presqu'île de Balaruc-les-Bains [2, 3, 4, 5]. Les principaux éléments de connaissance sont rappelés ci-après.

II. 1 Cadre géologique, structural et hydrogéologique

La ressource thermique est située à l'extrémité Est de l'étang de Thau au niveau de la presqu'île de Balaruc-les-Bains sur un lieu naturel de convergence entre différents types d'eau : eau saumâtre froide d'origine marine, eau douce froide d'origine karstique et eau thermique d'origine profonde. Les sources karstiques de Cauvy, d'Issanka et de la source sous-marine de la Vise ainsi que la source thermique historique constituent les exutoires naturels de différents types d'eau. Les eaux thermales sont aujourd'hui captées, dans un rayon de quelques centaines de mètres autour de l'ancienne source, dans les calcaires du Jurassique situés sous la couverture argilo-silteuse Miocène (jugée peu perméable). Les forages ont des profondeurs variant de 40 m à 490 m mais les arrivées d'eaux thermales sont dans l'ensemble rencontrées dans la partie sommitale du Jurassique.

Ce lieu naturel de convergence entre les différents types d'eau est lié à une structure géologique complexe héritée de trois phases tectoniques distinctes : l'héritage Hercynien et la distension Téthysienne, la collision pyrénéenne, et l'ouverture du Golfe du Lion. Le contexte géométrique et structural de formations carbonatées situées autour de l'étang de Thau apparaît bordé par des accidents tectoniques majeurs, au nord le chevauchement de Montpellier et au sud la faille de Nîmes (figure 1). Dans le secteur de Balaruc, la zone de transfert dite « de la sétouise » (figure 1) affecte l'ensemble des séries sédimentaires jusqu'au substratum. Cette zone de transfert est transverse aux structures régionales (faille de Nîmes et chevauchement de Montpellier de direction SSW-NNE) et passe par le Mont-Saint-Clair (Sète). L'ensemble structural est fortement marqué par un approfondissement des structures du nord-est vers le sud-ouest, qui correspond à la dysharmonie au niveau du toit du socle entre la Gardiole, l'étang de Thau et le bassin de l'Hérault. Cette structure dite en « rampes et paliers » donne lieu à des rejets plus ou moins importants au niveau des principaux accidents. Ces accidents ne constituent pas nécessairement des barrières hydrauliques puisque des connexions par traçages ont été mises en évidence au sein du Jurassique supérieur, entre le Causse d'Aumelas et la source d'Issanka, points situés de part et d'autre du bassin de Montbazin-Gigean [7].

D'une manière générale, les écoulements s'effectuent depuis le nord vers le sud, c'est-à-dire depuis le Causse d'Aumelas jusqu'à la mer. Dans ce schéma conceptuel de fonctionnement hydrogéologique établi en 2001 [6] coexistent deux systèmes d'écoulement dans les formations calcaires :

- 1) un ou des systèmes locaux. Les systèmes locaux traduisent des écoulements proches de la surface dans le karst ; certaines sources drainent ces systèmes (Vène, Issanka, Cauvy, Ambressac)
- 2) un système régional. Le système régional présente des lignes de courant profondes, à la faveur de structures de drainages karstiques qui ont pu se mettre en place lors de la crise messinienne, ou lors des phases de karstification antérieures. Ce système régional mobilise des eaux thermales d'origine profonde (la part d'eau thermique apparaît davantage mobilisée lors des périodes de hautes eaux [6], notamment aux sources de la Vise, de Cauvy et d'Ambressac).

Dans ce schéma conceptuel, il est supposé que l'organisation des écoulements au sein du réservoir thermal (en profondeur) et dans le secteur de la presqu'île de Balaruc-les-Bains est largement contrôlée par des failles normales, à regard Sud-Est et d'orientation N045, liée à la zone de transfert de la sétouise. Les sources de la Vise, de Cauvy et d'Ambressac sont des manifestations de la décharge d'eaux de mélange, influencées par les deux systèmes d'écoulement (régional et locaux).

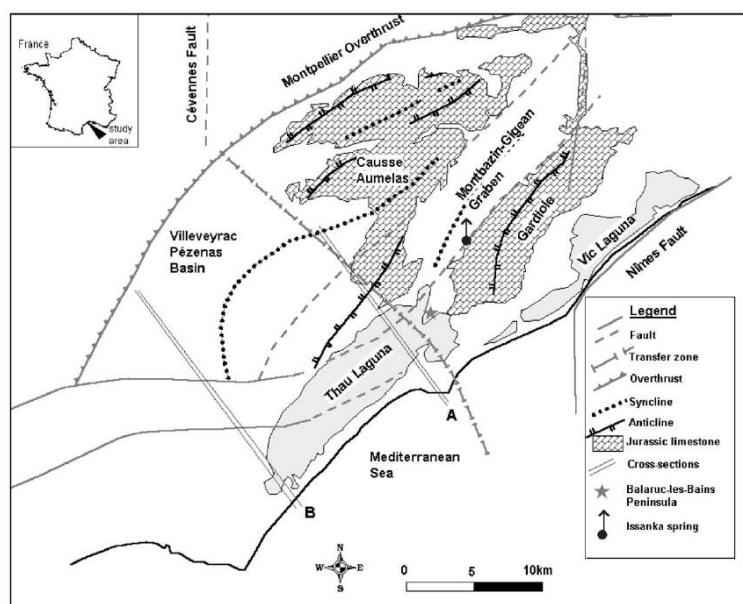


Figure 1. Contexte géologique et structural de la zone d'étude d'après Aquilina et al. 2002

II. 2 Caractéristiques hydrogéochimiques des eaux thermales

Les caractérisations chimiques et isotopiques réalisées entre 1996 et 2000 [2, 3, 4, 5] ont apporté des éléments de réponses sur l'origine des eaux thermales, les temps de séjour, les interactions eau/roche et la profondeur du réservoir.

Les eaux thermales pompées présentent des températures comprises entre 36.7°C (F8) et 49.5°C (F9) et des conductivités de 22 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 17 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement. Les eaux thermales du forage F9 et F8 apparaissent peu ou pas influencées par les eaux karstiques froides (Gardiolle/Aumelas contenant du Tritium), ce qui est confirmé par la très faible variation des teneurs en Cl au cours du temps (+/- 5%).

Les eaux thermales du forage F9 permettent de définir le pôle thermal du système de Balaruc. Ce pôle thermal est constitué d'un mélange entre une eau d'origine marine ancienne ($\approx 30\%$ pour F9) et une eau météorique ancienne ($\approx 70\%$), c'est-à-dire infiltrée avant 1952 car dépourvue de Tritium. La présence de CO_2 d'origine mantellique mis en évidence à l'aide du $\delta^{13}\text{C}$ des bicarbonates (HCO_3^-) ne permet pas l'estimation des âges de l'eau à l'aide de l'activité ^{14}C . Le rapport isotopique du chlore ($^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$) des eaux du forage F9 suggère que les temps de résidence au sein de l'aquifère profond sont de l'ordre de 100 000 à 150 000 ans. L'utilisation des géothermomètres chimiques (Si et Na/K) suggère que la température de l'eau du réservoir profond est de l'ordre de 80°C à 100°C, ce qui, compte tenu du gradient géothermique régional (de l'ordre de 3°C/100 m), situerait le réservoir thermal entre 2000 et 2500 m de profondeur.

III. PRELEVEMENTS ET ANALYSES

La campagne spatiale d'échantillonnage s'est déroulée les 8 et 19 octobre 2010 sur les forages appartenant à la station thermique (F5, F6, F8, F9), le forage AEP Cauvy, la source d'Issanka, les ouvrages de reconnaissance anciens (F3 et F4) ainsi que les piézomètres CGE_Tennis et P4_La Balme (figure 2). L'eau de l'étang de Thau a été également prélevée. L'ouvrage thermal F14 a été échantillonné le 16 décembre 2010. Les paramètres pH, Eh, température, conductivité, concentration en oxygène dissous ont été mesurés directement sur le terrain. Les analyses des isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$), des cations, des anions, des traces, des isotopes du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), du bore ($\delta^{11}\text{B}$) et du lithium ($\delta^7\text{Li}$) et le tritium ont été réalisées dans les laboratoires du service Métrologie Monitoring Analyse du BRGM à Orléans.

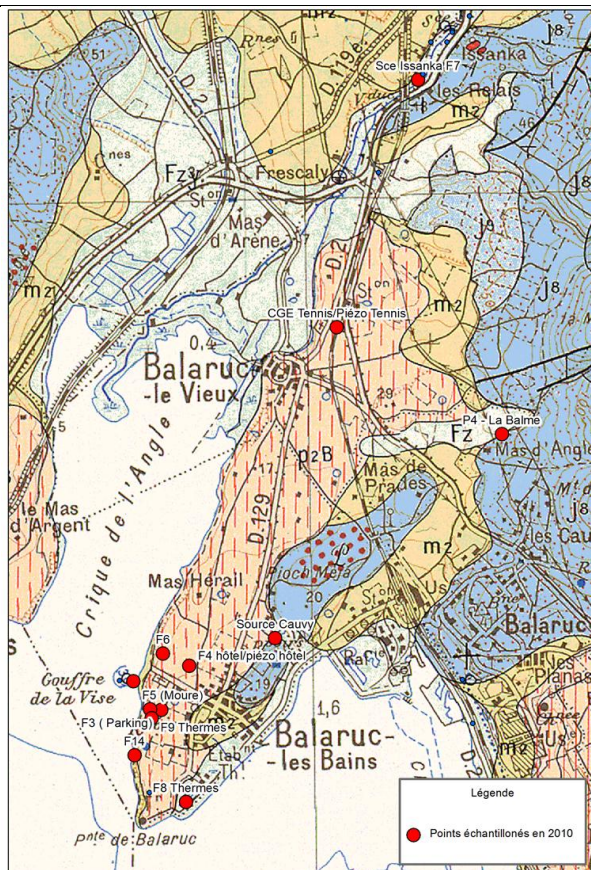


Figure 2. Localisation des points d'eau souterraine prélevés lors de l'inversac de 2010

IV. RESULTATS

Caractérisation des pôles géochimiques

Dans le but de mieux comprendre l'impact de l'inversac sur la qualité des eaux souterraines de la presqu'île de Balaruc-les-Bains et d'apporter des éléments d'information sur l'organisation des écoulements et des masses d'eau, nous avons réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP) sur les résultats des analyses des échantillons d'eau prélevés en octobre 2010.

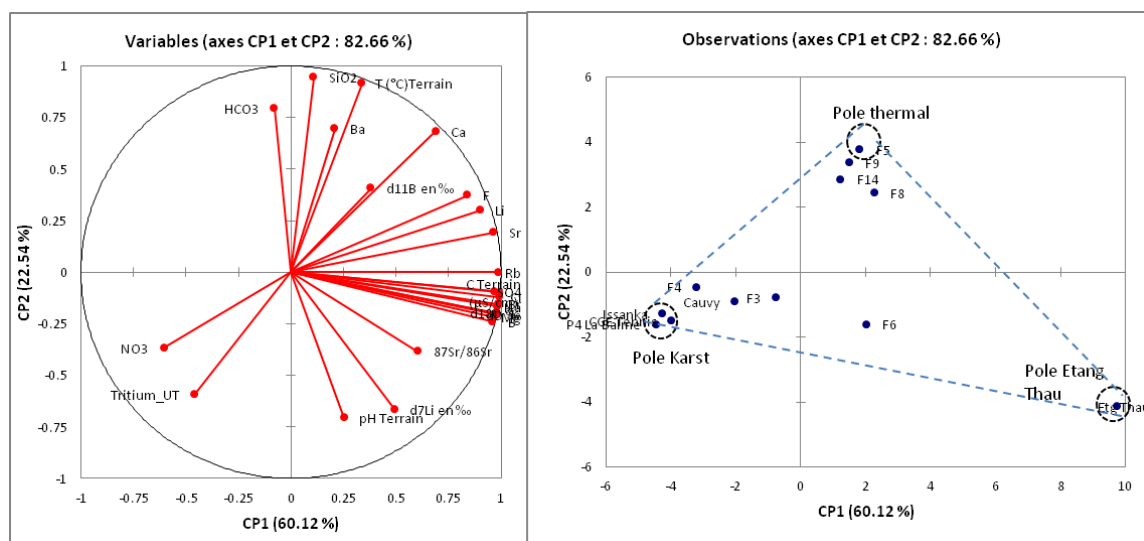


Figure 3 : Analyse en composantes principales sur les résultats des éléments majeurs et traces (B, Sr, Rb, Ba et Li), température et mesures isotopiques (Tritium, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^7\text{Li}$, $\delta^{11}\text{B}$).

La projection des différents échantillons sur le plan factoriel 1-2 (figure 3), permet de bien individualiser les différents pôles géochimiques mis en jeu (pôle Karst, pôle étang et le pôle thermal) et de repérer les échantillons affectés par les processus de mélange.

La composante principale 1 (CP1 : 60.1 % de variance expliquée) permet de qualifier les mélanges entre l'eau d'origine marine et l'eau karstique (variables associées, au 1er ordre : Conductivité, Cl, Na, K, SO₄, Mg, Br, F, B, Sr, Li, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$; au second ordre : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^7\text{Li}$, $\delta^{11}\text{B}$).

La composante principale 2 (CP2 : 22.5 % de variance expliquée) permet de distinguer les eaux thermales (variables associés, au 1er ordre : Température, pH, SiO₂, HCO₃, Ca, Ba, $\delta^7\text{Li}$; au second ordre : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{11}\text{B}$) et permet de qualifier les mélanges avec des eaux récentes (contenant du tritium et des nitrates).

Les variables corrélées à la composante principale 1 (CP1) permettent donc d'identifier et de qualifier les mélanges entre les eaux douces du karst et les eaux d'origine marine, mais ne permettent pas de faire le distinguo (1) entre les eaux marines anciennes et nouvelles (Etang infiltré par l'intermédiaire de la Vise), et (2) entre les eaux du karst anciennes et actuelles.

Cette analyse permet toutefois d'identifier quelles sont les principales variables à considérer pour étudier et quantifier les principaux processus de mélange. Les variables corrélées à la composante principale 2 (CP2) permettent d'identifier et de qualifier les mélanges entre les eaux thermales et les eaux récentes (contenant du tritium) et présentant des teneurs en nitrates significatives. Les eaux thermales se distinguent des eaux karstiques et marines par :

- des pH légèrement acides (compris entre 6.4 et 6.6) et des teneurs en bicarbonate et calcium élevées (respectivement de l'ordre de 550 mg/l et 590 mg/l). Ces résultats sont liés à la présence et à l'action du CO₂ d'origine profonde sur les carbonates (dissolution) ;
- des teneurs en silice relativement élevées (concentrations comprises entre 8 et 25 mg/l) ;
- des teneurs élevées en Ba (concentrations comprises entre 65 et 85 µg/l) pouvant témoigner de la participation d'eau profonde en provenance du socle.

Caractérisation de la contribution d'origine marine

En 2010, l'étude des isotopes stables de l'eau permet de montrer que l'ensemble des eaux des forages thermaux (F3, F5, F6, F8, F9 et F14) ainsi que la source de Cauvy sont impactées par les intrusions d'eau marine en provenance de l'étang par l'intermédiaire de la Vise. Les points se répartissent sur une droite de mélange définie par les pôles marin et karstique (forage P4 La Balme, Figure 4a). La quantification des proportions de mélange indique que la contribution d'eaux d'origine marine est comprise entre 12% (Cauvy) et 40% (F6). Ces résultats corroborent ceux obtenus à l'aide du chlorure (non présentés ici). La contribution des eaux d'origine marine est de l'ordre de 30 % pour (F5, F9 et F14) et de l'ordre de 36% pour F8.

En 1996 et 2000, les points des forages thermaux (à l'exception de F8) se positionnaient sur la droite des eaux de pluies, la salinité des eaux thermales (Cl de l'ordre de 5 700 mg/L pour F9) étant interprétée comme le résultat d'un mélange entre une eau karstique ancienne et une eau marine ancienne. La position des points en 2010 par rapport à la situation de 1996 et/ou 2000 permet, de manière relative, de qualifier l'impact, en terme de modification de salinité, mais ne permet pas de conclure quant à l'origine des augmentations de chlorures. En effet, nous avons montré en 2000 que l'hydrosystème pouvait être influencé, notamment au niveau de l'ouvrage F8, par une nappe d'eaux marines anciennes (car dépourvues de Tritium) présente au sein des calcaires jurassiques de la presqu'île de Balaruc-les-Bains [2]. La discussion de l'origine de la salinité doit donc être abordée en confrontant les informations des isotopes de l'eau et des isotopes du tritium (Figure 4b).

Les eaux karstiques échantillonnées en 2010 (Issanka, P4 La Balme, CGE-Tennis) contiennent du tritium (de l'ordre de 4 UT ± 1) tout comme l'eau marine de l'étang de Thau (3 UT ± 1). Les eaux des forages thermaux F5 et F8 sont dépourvues de tritium contrairement aux autres ouvrages échantillonnés lors de la période d'inversac (Figure 4b). Les résultats suggèrent donc que l'augmentation de salinité des eaux pompées en F5

et F8 serait causée par une augmentation de la part d'eau marine ancienne (dépourvue de Tritium et de $\text{NO}_3 < 0.5 \text{ mg/L}$) présente au sein de l'hydrosystème.

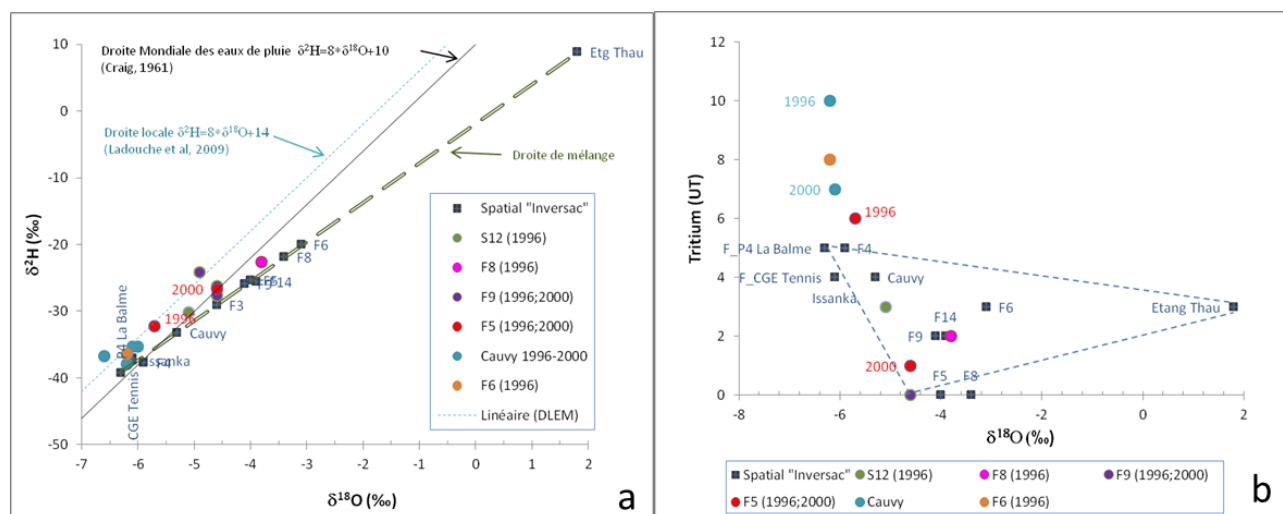


Figure 4. Evolution des teneurs en deutérium (a) et des teneurs en tritium (b) en fonction des teneurs en oxygène 18 des eaux échantillonnées lors de l'inversac (2010). La situation observée en 1996 et/ou 2000 est également reportée.

A l'inverse, les eaux des forages thermaux F9 et F14 présentent des teneurs en tritium significatives (2UT) et on note la présence de nitrates (NO_3 compris entre 0.8 et 3.4 mg/l), ce qui dénote à la fois la participation des eaux de l'étang (3 UT, $\text{NO}_3 = 0.8 \text{ mg/l}$) et également la contribution d'eaux du karst qui présentent des teneurs en tritium significatives (entre 4 UT et 5 UT) et des teneurs en NO_3 comprises entre 5.5 et 12.6 mg/L.

La position de l'eau de l'ouvrage F6 dans la Figure 4b indique clairement l'influence de l'eau de l'étang Thau (inversac). A l'inverse, la source karstique Cauvy apparaît moins influencée par les eaux de l'étang de Thau, ce qui peut s'expliquer par la faible participation d'eau d'origine marine (12%) par rapport à F6 (40% d'eau marine).

Caractérisation des contributions thermique et marine

L'évolution des rapports isotopiques du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) en fonction de l'inverse de la teneur en strontium est présentée sur la figure 5. Ce type de représentation permet de tracer des droites de mélange. La situation isotopique mesurée en 2010 peut être comparée à celle mesurée en 1996 et/ou 2000 en contexte « normal de fonctionnement ». Nous supposons, comme Aquilina et al. 2002 [2], que les eaux du forage F9 échantillonnées en 2000, permettent de qualifier la signature géochimique du pôle thermique « pur », c'est-à-dire non influencé par les eaux karstiques froides et les eaux marines froides présentes au sein des calcaires jurassiques situés sous couverture tertiaire au niveau de la presqu'île de Balaruc-les-Bains. Nous supposons également que les eaux de l'ouvrage P4-La Balme (cf figure 2 pour la localisation) permettent de définir le pôle des eaux froides karstiques qui contribue au fonctionnement de l'hydrosystème de Balaruc-les-Bains (pôle karstique non influencé par les eaux marines).

L'eau de l'étang de Thau présente une signature isotopique identique à celle de l'eau de mer. La signature isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des eaux karstiques apparaît très comparable à celle du pôle thermique pur [F9(2000)], les valeurs des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont compatibles avec les signatures strontium des carbonates du Jurassique [8]. Le pôle des eaux karstiques se distingue du pôle thermique par de faibles teneurs en Sr (Sr de l'ordre de 100 $\mu\text{g/l}$) par rapport aux eaux thermales (Sr = 4600 $\mu\text{g/l}$, [2]).

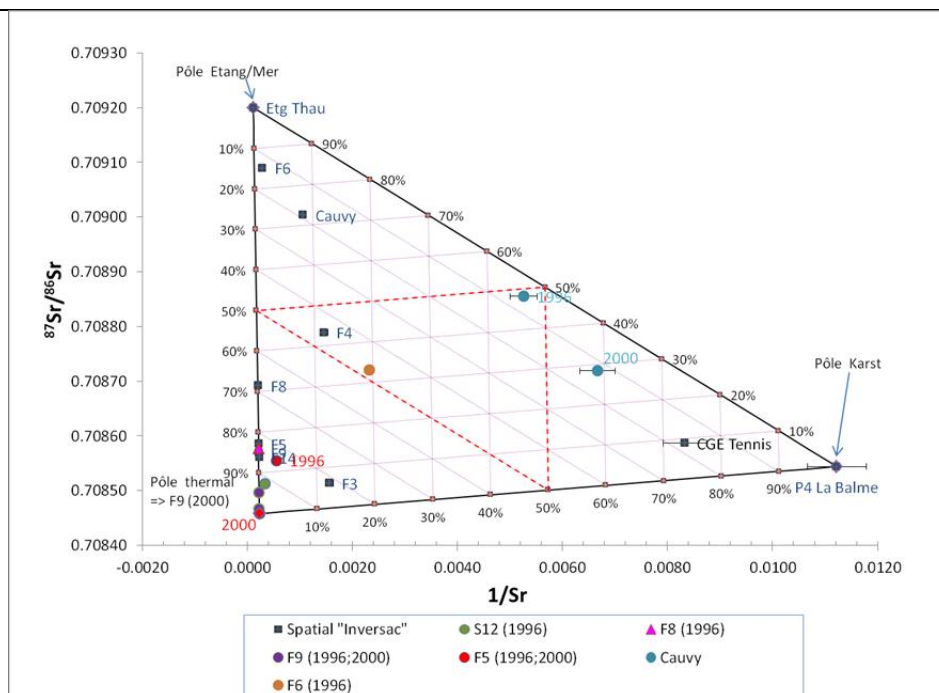


Figure 5. Evolution des rapports isotopiques du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) en fonction de l'inverse de la teneur en strontium mesurées dans les eaux échantillonnées lors de l'inversac (2010). La situation observée en 1996 et/ou 2000 est également reportée.

Les eaux de la source Cauvy, des piézomètres F3 et F4 et dans une moindre mesure celles du forage F6 apparaissent toutes inscrites dans le diagramme de mélange défini par les trois pôles considérés (Figure 5) : pôle marin (étang de Thau et/ou Mer), pôle karstique froid (P4-La Balme) et le pôle thermal (F9).

La signature isotopique du strontium des eaux du forage F6 est très proche de celle mesurée dans l'étang, cette signature pouvant être expliquée pour environ 86% par le pôle Etang et pour 12% environ, par le pôle thermal. Dans ce type de représentation, la contribution du pôle karstique apparaît négligeable (<2%). Pour la source Cauvy, la participation du pôle thermal à la signature isotopique des eaux de Cauvy est de l'ordre de 20% environ, alors que la contribution de ce pôle apparaissait négligeable en 1996 et 2000 (<10%) compte tenu des incertitudes.

Les rapports isotopiques du strontium des eaux des forages thermaux F5, F8 et F9 apparaissent bien plus radiogéniques (rapports plus élevés) que ceux mesurés en 1996/2000. Pour le F14, la comparaison ne peut pas être réalisée car l'ouvrage n'existait pas en 2000. Les signatures des eaux thermales se répartissent sur la droite de mélange défini par les pôles « marin » et « thermal », le pôle karstique dans cette représentation n'apparaît pas être un pôle contributif.

V. DISCUSSION

Les analyses réalisées au cours du phénomène d'inversac de 2010 permettent de montrer sans ambiguïté que la qualité des eaux de l'ensemble de la presqu'île est affectée, à des degrés divers, par le phénomène d'inversac. L'impact sur la qualité des eaux de l'hydrosystème se manifeste particulièrement sur le forage F6 et la source Cauvy et, dans une moindre mesure, sur les forages thermaux (F8, F9, F5 et F14). Le forage F8 qui d'un point de vue hydraulique et géochimique apparaît déconnecté du « compartiment (F5, F6, F9 et F14) » est également impacté par le phénomène d'intrusion, même si d'un point de vue thermique, aucune évolution de température n'a été observée. La comparaison des signatures des isotopes stables mesurées en 2010 avec la situation mesurée en 1996/2000 (« fonctionnement en période d'inversac » versus « fonctionnement normal ») indique clairement une augmentation de la participation d'eaux d'origine marine (de +5% pour le forage F9 par rapport à la situation de 2000 par exemple, et jusqu'à +35% pour F6 par rapport à la situation de 2000). La contribution absolue de l'eau d'origine marine est comprise

entre 5% (F4) et 40% (F6), Tableau 1. La contribution de l'eau douce en provenance de karst est la part complémentaire (60% pour F6 par exemple). A ce stade, nous ne pouvons pas conclure quant à l'origine de la salinité : (1) eau de l'étang de Thau infiltrée par la Vise et/ou eau marine ancienne initialement présente dans le système avant l'inversac, (2) eau minéralisée du pôle thermal. Les isotopes du strontium permettent de faire ce distinguo et indiquent clairement que l'eau d'origine marine contribue majoritairement à expliquer la salinité de l'ouvrage F6 (86%), la part restante (12 %) étant attribuée aux eaux thermales (pôle F9).

En 1996, les caractéristiques isotopiques pour le strontium des eaux du forage F8 différaient de celles du pôle thermal défini par la signature géochimique du forage F9, en raison de la participation d'eau marine ancienne (dépourvue de tritium) présente au sein des calcaires jurassiques. En 1996, la signature isotopique du strontium apparaissait modifiée, d'environ 15% par rapport à l'eau thermique du F9, par le pôle marin. La situation en 2010 indique une modification d'environ 32% par rapport à la signature du pôle thermal (F9). L'absence de tritium au forage F8 indique que cette augmentation est imputable à la part d'eau marine ancienne présente au sein des calcaires jurassiques. L'absence de tritium dans les eaux du forage F5 laisse également penser que c'est l'eau marine ancienne initialement présente dans le système qui contribue à augmenter la salinité du F5. A l'inverse, au forage F9, la modification de signature isotopique du strontium par rapport à la situation de 2000 apparaît liée à l'intrusion d'eau de l'étang car les eaux présentent des teneurs en tritium. Une conclusion similaire est faite pour la source Cauvy et le forage F6.

Compte tenu du débit de pompage, nous pouvons estimer la part respective des différents flux en provenance des pôles de mélange. Nous calculons, par exemple, au forage F6 (Q F6 = 32 m³/h) que :

- 11 m³/h (environ) d'eau provient de l'étang : $[32 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 40\% (\% \text{isotope stable}) \cdot 86\% (\% \text{rapport } 87\text{Sr}/86\text{Sr})]$;
- 1.5 m³/h (environ) d'eau provient du pôle thermal : $[32 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 40\% (\% \text{isotope stable}) \cdot 12\% (\% \text{rapport } 87\text{Sr}/86\text{Sr})]$
- 19 m³/h (environ) d'eau provient du karst : $[32 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 60\% (\% \text{isotope stable})]$

Un exercice similaire peut être conduit pour les autres points d'eau pompée. La synthèse des résultats est présentée dans le tableau 1.

Campagne Spatiale "Inversac" (octobre 2010)

Nom	date	Temp °C	Cl mg/l	Pole Marin d18O %	Sr µg/l	87Sr/86Sr	Tritium (UT)	Débit Pompage (m ³ /h)	Pole Karst 87Sr/86Sr %	Pole Marin 87Sr/86Sr %	Pole Thermal 87Sr/86Sr %	Q Pole Karst (m ³ /h)	Q Pole Marin (m ³ /h)	Q Pole Thermal (m ³ /h)
Etang Thau	08/10/10	20.1	21825		8380	0.709200	3							
P4 La Balme	19/10/10	16.6	24.5		89	0.708544	5							
CGE Tennis	19/10/10	17.4	24		120	0.708587	4							
Cauvy	08/10/10	18.2	1240	12%	946	0.709004	4	60	8%	73% *	19%	52.8	5.2 *	1.4
F6	08/10/10	20.9	8611	40%	3501	0.709090	3	32	2%	85% *	13%	19.2	10.9 *	1.7
F3	19/10/10	25.4	4622	21%	641	0.708514	nm	-	16%	6%	78%			
F4	19/10/10	22.6	591	5%	685	0.708789	5	-	12%	42%	46%			
F9	08/10/10	49.0	6895	27%	4619	0.708569	2	19.5	0%	15% *	85%	14.2	0.8 *	4.5
F14	14/12/10	46.2	7148	30%	4300	0.708561	2	20	0%	15% *	85%	14.0	0.9 *	5.1
F8	08/10/10	35.8	8475	36%	4805	0.708692	<1	27.5	0%	32%	68%	17.6	3.2	6.7
F5	08/10/10	48.2	7089	28%	4590	0.708586	<1	3.8	0%	18%	82%	2.7	0.2	0.9
* pole marin = Etang de Thau														

Tableau 1. Synthèse des contributions calculées à l'aide des teneurs en oxygène 18 et des isotopes du strontium. La quantification volumétrique (exprimé en m³/h) est également reportée.

VI. CONCLUSION

Cette étude a été motivée par la volonté des acteurs locaux, sous l'impulsion du SMBT, et s'inscrit dans une démarche de gestion concertée en vue de la pérennisation de la ressource. Cette étude permet de mieux comprendre l'impact de l'inversac sur l'organisation des écoulements et des masses d'eau souterraines de la presqu'île de Balaruc-les-Bains. Le phénomène a modifié l'équilibre qui prévalait entre les différentes masses d'eau de l'hydrosystème (eau froide karstique, eau thermique et eau marine). L'effet de l'inversac

sur la qualité de l'eau pompée se manifeste clairement au niveau du forage F6 et de la source de Cauvy et dans une moindre mesure au niveau des forages thermaux. Nous confirmons qu'un axe privilégié d'écoulement existe entre la Vise et le forage F6 et qu'il se poursuit jusqu'à la source de Cauvy. Nous montrons que les augmentations de salinité observées sur les différents ouvrages peuvent être liées soit à l'infiltration d'eau de l'étang de Thau par l'intermédiaire de la Vise (F9 et F14, Impact direct), soit à l'augmentation de la contribution d'eau marine initialement présente au sein du système (F5, F8, Impact indirect), soit aux deux composantes (F4, F6 et Cauvy, Impact direct et indirect). Sur la base des résultats obtenus dans cette étude, le volume d'infiltration d'eau de l'étang dans l'hydrosystème est d'au moins 18 m³/h. Il s'agit là d'une estimation minimale calculée sur la base des débits pompés aux différents ouvrages du secteur d'étude. Dans l'état actuel de nos connaissances, nous ne disposons pas des données nécessaires pour évaluer le débit réel d'infiltration d'eau de l'étang de Thau lors d'un inversac.

Références bibliographiques :

- [1] Ladouche B., Millot R., Guerrot C. et Lamotte C. (2011) : Caractérisation géochimique des eaux de l'hydrosystème de la presqu'île de Balaruc-Les-Bains lors d'un épisode d'inversac, BRGM/RP 59922-FR
- [2] Aquilina L., Ladouche B., Doerfliger N., Seidel J.L., Bakalowicz M., Dupuy C., 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 - pp. 1-21
- [3] Ladouche B., Bakalowicz M., Cubizolles J., Dorfliger N., (2001). Etude du pourtour est de l'étang de Thau (Hérault) - phase II- Caractérisation hydrochimique des réservoirs souterrains karstiques et thermaux, volume 3. BRGM/RP-50788-FR -
- [4] Ladouche B., Aquilina L., Doerfliger N., Bakalowicz M. (2003) Caractérisation de l'origine des eaux thermales du système karstique de Thau par l'approche géochimique et isotopique, in AIH - 10ème - Carcassonne - France - 28-29/11/2003, pp. 73-80
- [5] Aquilina L., Ladouche B., Dorfliger N., Bakalowicz M., Seidel J.L. (2003) Hydrochemistry of a complex karstic system : Thau lagoon (Sud de la France), *Ground Water*, Vol. 41, N°6, p. 790-805
- [6] Pinault J.L., Ladouche B., Dorfliger N., Bakalowicz M., (2004) Characterizing a coastal karst aquifer using an inverse modeling approach : The saline springs of Thau, southern France, *Water Resources Research*, 40 W08501
- [7] Ladouche B., Bakalowicz M., Courtois N., Dorfliger N., Pinault J.L., Chemin P., Anus s., Cubizolles J., Venet Ch. (2001) Etude du pourtour de l'étang de Thau (Hérault) - phase II- Fonctionnement hydrogéologique du bassin karstique de Thau, volume 2. BRGM/RP-50787-FR -
- [8] Veizer J.J. (1989) Strontium isotopes in seawater through time. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 17, 141–167.