



HAL
open science

Caractérisation hydrochimique et qualité des eaux de l'aquifère karstique du Lez

Christelle Batiot-Guilhe, Bernard Ladouche, J.L. Seidel, Jean-Christophe Maréchal

► **To cite this version:**

Christelle Batiot-Guilhe, Bernard Ladouche, J.L. Seidel, Jean-Christophe Maréchal. Caractérisation hydrochimique et qualité des eaux de l'aquifère karstique du Lez. *Karstologia*, 2013. <hal-03271602>

HAL Id: hal-03271602

<https://hal.science/hal-03271602v1>

Submitted on 26 Jun 2021

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.



HAL Authorization

Christelle BATIOU-GUILHE¹,
Bernard LADOUCHE²,
Jean-Luc SEIDEL¹ et
Jean-Christophe MARÉCHAL²,

(1) HydroSciences Montpellier UMR 5569
(CNRS, UM1, UM2, IRD),
Université Montpellier Maison des Sciences
de l'Eau, place Eugène Bataillon, CC MSE
34095 Montpellier cedex 5
christelle.guilhe-batiot@univ-montp2.fr

(2) BRGM - D3E/NRE,
1039, rue de Pinville,
34000 Montpellier, France

Caractérisation hydrochimique et qualité des eaux de l'aquifère karstique du Lez

RÉSUMÉ: Les aquifères karstiques constituent des réservoirs d'eau souterraine importants pour faire face aux besoins croissants en eau, liés notamment à l'augmentation démographique de la région méditerranéenne, tout particulièrement sur le littoral et au sein de ses métropoles. La source karstique du Lez est exploitée par une gestion active depuis 1982 par la ville puis par la métropole de Montpellier. Bien qu'ayant fait l'objet de nombreuses études portant sur la caractérisation hydrogéologique et hydrodynamique de son aquifère, le fonctionnement hydrogéologique et notamment l'origine des flux souterrains s'écoulant à l'exutoire restent encore à préciser. Ainsi, une approche géochimique inédite (traceurs hydrochimiques et isotopiques, contaminants anthropiques) a été mise en œuvre de 2009 à 2011 sur ce système karstique. Le couplage de ces résultats avec les données hydrodynamiques a permis de mettre en évidence et de quantifier la complexité des mélanges d'eaux d'origines différentes (flux superficiels et profonds minéralisés) s'écoulant à l'exutoire en fonction des conditions hydrologiques. L'impact des activités anthropiques sur le bassin de la source du Lez a été étudié grâce à quinze campagnes de prélèvements réparties sur ces deux cycles. Ces résultats montrent

que la source du Lez présente globalement une eau de bonne qualité chimique, sans contamination notable et chronique d'origine agricole. Des pics de concentrations en coliformes totaux et *Escherichia Coli*, ou d'autres indicateurs de contaminations anthropiques lors des épisodes de crues, mettent en évidence l'infiltration directe ou indirecte d'eaux usées traitées ou non au sein du système karstique. Les maxima ne dépassent généralement pas les normes de potabilité, mais des éléments concernant la protection de la qualité de la ressource ont ainsi été apportés par cette étude.

MOTS-CLÉS: hydrochimie, isotopes du strontium, aquifère karstique, mélanges, micropolluants, vulnérabilité.

ABSTRACT: HYDROCHEMICAL CHARACTERISATION AND WATER QUALITY OF THE LEZ KARST AQUIFER (SE FRANCE). Karstic aquifers are important subterranean water reservoirs to face the increasing water supply, linked with the demographic increase in the Mediterranean region, particularly on the coastal zones and within the urbanized areas. The Lez karstic spring (SE France) is exploited by an intense pumping since 1981 to supply drinking water to the Montpellier metropolitan region. Many studies have been conducted for the hydrogeological and hydrodynamical

characterisation of the aquifer but the hydrogeological functioning as well as the origin of subterranean fluxes flooding at the outlet need to be specified.

An original geochemical approach (hydrochemical and isotopic tracers, anthropogenic pollutants) was carried out from 2009 to 2011 on this karst system.

Coupling these results with hydrodynamical informations put in evidence and allowed to quantify the complex mixing of different types of water (superficial and deep mineralised fluxes) flooding at the spring in relation with hydrological conditions.

The impact of human activities on the basin was studied with 15 field samplings carried out during these 2 hydrologic cycles. Results showed that the chemical quality of the Lez spring was usually good, without important or persistent impact of agricultural activity. High contents of total coliforms and *Escherichia Coli* or other anthropic pollutants during flood events or very low stages put in evidence direct or indirect infiltration of raw or treated waste waters. Maxima are generally under potability values but informations about the water quality have been clarified thanks to this study.

KEYWORDS: hydrochemistry, Strontium isotopes, karst aquifer, mixing model, micropollutants, vulnerability.

Introduction

L'hydrodynamique du bassin karstique du Lez a été très étudiée depuis les années 1970 jusqu'à nos jours. Les investigations géochimiques sur cette période ont été plus rares. Avant 2006, il n'existait en effet que quelques suivis hydrochimiques effectués avant la mise en exploitation des forages souterrains à la source du Lez en 1981, ou quelques années après [MbaMpondo, 1971; Marjolet et Salado,

1976; Botton, 1984; Joseph et al., 1988]. Ces travaux antérieurs ont permis d'établir la complexité des circulations souterraines et les singularités hydrochimiques des eaux de la source du Lez, seul exutoire pérenne de ce système karstique. Cette source présente des concentrations relativement élevées en chlorures et diverses singularités par rapport aux autres exutoires karstiques régionaux [maxima dépassant 100 mg/l pour les chlorures, MbaMpondo,

1971; Marjolet et Salado, 1975; Joseph et al., 1988].

Les travaux initiés depuis 2006, principalement issus de la thèse de C. Bicalho [2010], ont permis de réactualiser et d'enrichir les informations hydrochimiques disponibles. Ces nouvelles données permettent d'établir une comparaison entre la période actuelle, caractérisée par la gestion active par pompage dans le drain karstique (30 mètres de rabattement maximum), et

la période 1972-1973, caractérisée par la gestion active par pompage dans la vasque (7 mètres de rabattement maximum). La synthèse des nouvelles données acquises par Bicalho [2010] a permis de renforcer le schéma conceptuel de fonctionnement établi par Marjolet & Salado [1976]. L'eau de la source du Lez apparaît composée d'un mélange de plusieurs types d'eaux issues de différents compartiments de l'aquifère :

1. circulations peu profondes au sein de l'aquifère « supérieur » (calcaires du Jurassique supérieur et du Berriasien) ;

2. interactions avec les eaux de surface et influence des eaux ayant été en contact avec les marno-calcaires valanginiens ;
3. circulations profondes des eaux, notamment facilitées par la présence d'importantes failles mettant en contact l'aquifère supérieur avec le réservoir inférieur du Jurassique moyen ;
4. remontée de fluides d'origine plus profonde. Une contribution d'eau ayant circulé au contact avec des évaporites a été suggérée par Bicalho et al. [2011].

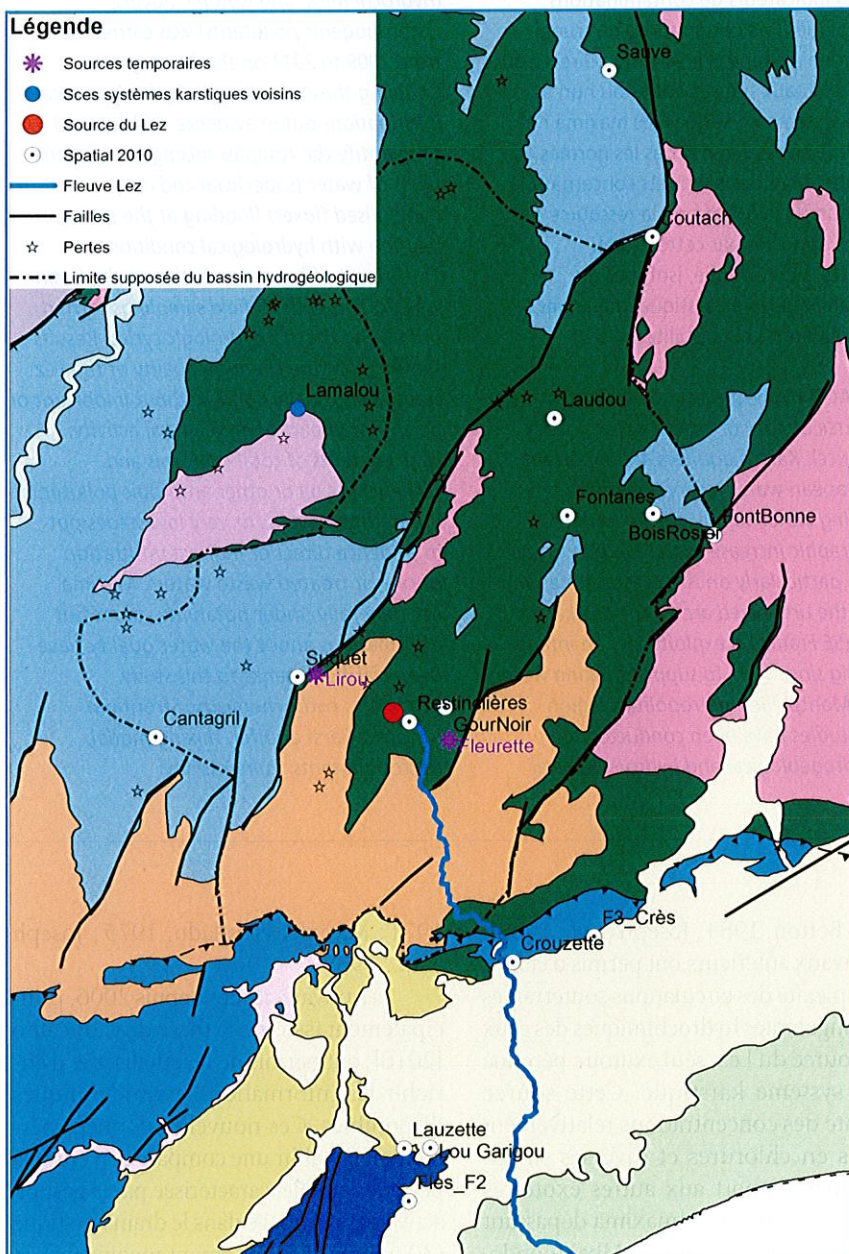
La contribution des pôles profonds (compartiments 3 et/ou 4) se manifeste graduellement lors des périodes estivales et de manière très significative lors des premières crues automnales, par une légère augmentation de la température et un accroissement de la minéralisation des eaux de la source du Lez : augmentation importante des teneurs en Chlore, Sodium, Bore, Lithium, Strontium, Magnésium et enrichissement en carbone-13 indiquant que ces eaux ont bien évolué en profondeur, en milieu fermé [Bicalho et al., 2012].

Au démarrage du projet Lez-GMU, l'origine du pôle profond (compartiments 3 et/ou 4) qui contribue au fonctionnement hydrodynamique du Lez restait encore à préciser. De même, des éléments de connaissances supplémentaires en période de crue devaient être apportés dans le but notamment de mieux évaluer les modalités de transfert des eaux et de caractériser la vulnérabilité du milieu aux activités anthropiques. Pour apporter ces éléments de connaissance sur l'origine des flux, une approche géochimique nouvelle basée sur l'analyse des éléments majeurs et traces, des Terres Rares et le traçage multi-isotopique (isotopes stables de l'eau, isotopes du Strontium, du Bore et du Lithium) a été mise en œuvre dans le cadre du projet Lez - Gestion Multi-Usages. L'objectif est ici de présenter les résultats apportés par les isotopes du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), un modèle de mélange de type End-Member Mixing Analysis et de faire l'état des lieux sur les pressions anthropiques qui s'exercent sur la qualité de cette ressource afin de mieux appréhender son fonctionnement.

I. Matériel et méthodes

Un suivi hydrochimique régulier a été mis en place depuis mars 2006 dans le cadre de l'Observatoire MEDYCYSS de l'OSU OREME (Observatoire Multi Echelle de la DYnamique des Crues et de l'Hydrodynamique Souterraine en milieu karStique), qui couvre un territoire plus vaste que l'hydrosystème Lez. La source du Lez est échantillonnée à pas de temps bimensuel à pluri-journalier en période de crue. Les sources temporaires rattachées à l'aquifère du Lez (Lirou, Fleurette, Gour Noir et Restinclières, cf. figure 1) ont également fait l'objet de suivis

Figure 1 : Localisation des points d'eau prélevés lors de la campagne spatiale d'échantillonnage (août 2010) et localisation des sources suivies dans cette étude (Lez, Fleurette, Restinclières et Lirou).
Sampling points location for the spatial field measurements (august 2010) and studied springs location (Lez, Fleurette, Restinclières and Lirou).



de crue. Ces investigations ont été ensuite complétées et renforcées par le projet Lez-GMU (2009-2013), avec notamment des campagnes spatiales réalisées ponctuellement en 2009, 2010 et 2011. D'autres sources ou forages localisés dans d'autres systèmes aquifères adjacents, karstiques ou non, ont ainsi été échantillonnés de façon à obtenir les signatures géochimiques régionales nécessaires à la caractérisation des écoulements et des éventuels échanges de flux entre aquifères. En effet, compte tenu des singularités hydrogéochimiques des eaux s'écoulant à la source du Lez et la mise en évidence de remontée de flux d'origine profonde, la démarche méthodologique a consisté à replacer les eaux du Lez dans le contexte régional et à caractériser le ou les pôles géochimiques participant aux écoulements. Ce travail initié par Bossier [2009] a permis d'identifier les systèmes aquifères qu'il conviendrait d'échantillonner pour la détermination des signatures chimiques et isotopiques des principaux pôles géochimiques. Des prélèvements complémentaires sur des forages et/ou sources appartenant au système karstique du Lez, sur des systèmes karstiques voisins, ainsi que sur d'autres systèmes régionaux

(sources dans les Corbières et dans la reculée du Lodévois, forage profond situé le long de la faille de Nîmes), ont été réalisés en août 2010 et au printemps 2011 (figure 1, et hors-cadre pour certains). Les points d'eau échantillonnés ou considérés dans cette étude sont :

- les sources karstiques temporaires du Lirou, de Restinclières et de Fleurette en périodes de hautes et moyennes eaux. En période de basses eaux, les sources tarissent. La caractérisation multi-isotopique de ces sources concerne uniquement les crues printanières ;
- les piézomètres du réseau de surveillance de Montpellier Méditerranée Métropole implantés sur le bassin du Lez : Gour Noir, Coutach, Bois des Roziers, Fontanès, Laudou ;
- les forages/sources appartenant à des aquifères voisins de celui du Lez : Sources de Sauve (code BSS-BRGM 09378075/SAUVE) et Fontbonne (09645X0002/SO) et divers forages AEP : Suquet (09903X0111/F), Piste Lauzette (09907X0402/PISTE), Flès (10163X0158/F2), Maurin-Lou Garigou (09907X0364/MAURIN), Crès (09908X0375/F3) et Crouzette

(09908X0351/F). Les eaux de ce dernier ouvrage permettent de qualifier les eaux du Bajocien du pli de Montpellier, les autres ouvrages permettent d'accéder aux eaux du Jurassique supérieur ;

- les eaux carbo-gazeuses de l'ouvrage F40bis (09914X0458/F) situé sur la commune de Vergèze permettent d'accéder aux eaux minérales en provenance du socle et drainées par la faille de Nîmes ;
- les sources sulfatées du synclorium de Saint-Paul-de-Fenouillet (Pyrénées Orientales) : source de Maury (10901X0024/MAURY), sources de la clue de Fou situées en rives droite et gauche de l'Agly (10894X0032/SCATHER, commune de St-Paul-de-Fenouillet) afin de qualifier la signature des eaux sulfatées du Trias (pôle gypse). Les eaux sulfatées de la source de Fontboule (commune de Lauroux, Hérault) permettent également de qualifier un autre pôle gypse du Trias (de la reculée du Lodévois) ;
- les eaux chlorurés-sodiques de la source de Sals (1077X0005/SALEE, commune de Sougraigne ; Aude) afin de qualifier la composante halite du Trias ;
- forage profond d'Antigone (09908X0331). Ce forage n'existe plus, les données utili-

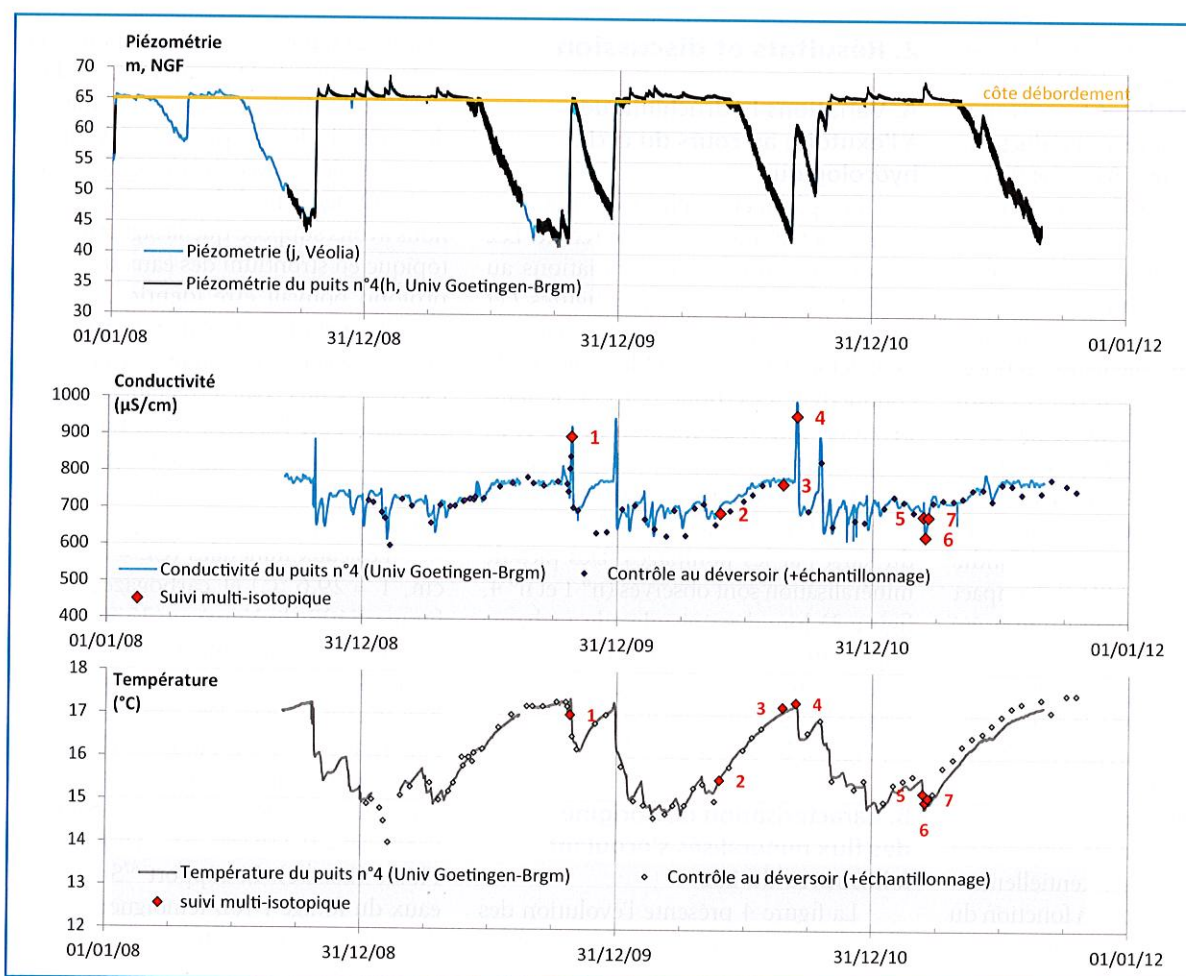
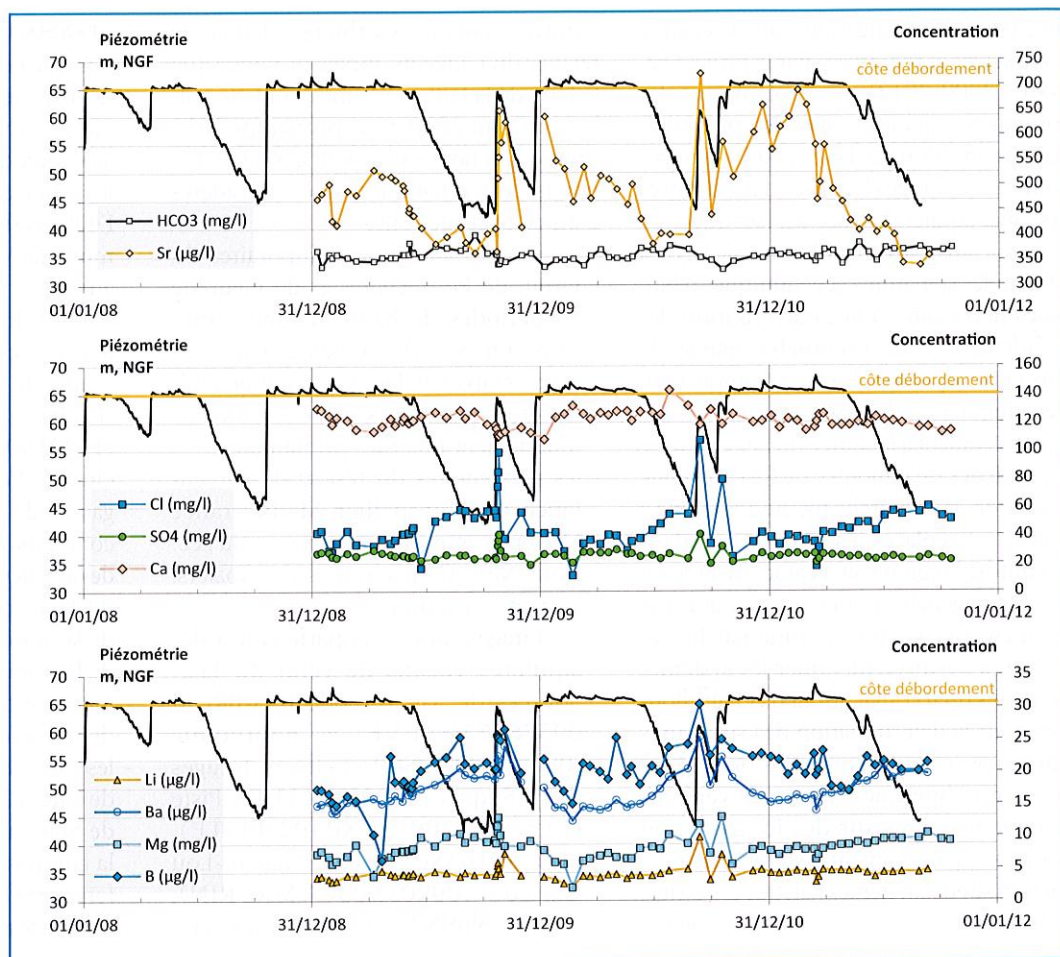


Figure 2: Suivi piézométrique et physico-chimique des eaux de la source du Lez. *Piezometric and physico-chemical evolution at the Lez spring.*

Figure 3: Évolution des teneurs en bicarbonate, strontium, chlorure, sulfate, calcium, lithium, baryum, magnésium et bore, des eaux de la source du Lez sur la période 2009-2011. Bicarbonate, strontium, chloride, sulfate, calcium, lithium, baryum, magnesium and boron concentrations evolution for the Lez spring waters, from 2009 to 2011.



sées dans cette étude sont celles de l'essai par pompage réalisé en 1992 [rapport BRGM 92 LR 963 PR, Chamayou et Auroux, 1992]. Les niveaux producteurs ont été rencontrés entre 843 m et 953 m de profondeur au sein du Bajocien.

Les paramètres physico-chimiques (pH, température, conductivité électrique) ont été mesurés sur le terrain. Les éléments majeurs, éléments en trace, Carbone Organique Total (COT), isotopes du Strontium, Escherichia Coli, ont été analysés systématiquement sur l'ensemble de ces points. Les détails des protocoles expérimentaux des analyses sont présentés de manière approfondie dans Batiot-Guilhe et al. [2012]. L'impact de la contamination domestique a été suivi seulement à la source du Lez à l'aide des organoétains (Monobutylétain, Dibutylétain, Tributylétain), la carbamazépine (résidu médicamenteux), l'anomalie de gadolinium, les coliformes totaux et les Escherichia Coli. De même, l'impact de la contamination agricole a été ciblé sur les produits phytosanitaires potentiellement utilisés sur la zone d'étude en fonction du type de culture majoritaire préalablement identifié sur l'impluvium.

2. Résultats et discussion

A. Variations hydrochimiques à l'exutoire au cours du cycle hydrologique

Les paramètres physico-chimiques et la minéralisation de la source du Lez présentent d'importantes variations au cours du cycle hydrologique (figures 2 et 3). L'eau des périodes hivernales présente globalement les plus faibles valeurs de conductivité électrique (CE) et de température. Une augmentation de CE et de température est observée en période de basses eaux qui coïncide également avec les périodes de sollicitation des réserves du karst par les pompages. Des pics de minéralisation sont observés (n° 1 et n° 4, figure 2) lors des épisodes de recharge importants qui se produisent en fin de période estivale. Ces périodes sont caractérisées par des augmentations de Cl, SO₄, Sr, Mg, Li, Ba et B (figure 3).

B. Caractérisation de l'origine des flux minéralisés s'écoulant à la source du Lez

La figure 4 présente l'évolution des rapports ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr des eaux échantillonnées en fonction du rapport 1/Sr. Nous avons

également reporté les différents pôles triasiques (gypse, halite) caractérisés dans cette étude ainsi que les concentrations des eaux du forage profond d'Antigone qui sont élevées (comprises entre 1 000 et 1 400 µg/l). En l'absence de mesure, nous avons supposé que la signature isotopique en strontium des eaux du forage profond pouvait être identique à celle de la formation carbonatée du Bajocien, dont la signature théorique [Veizer, 1988] est représentée par le rectangle orange nommé «pôle Bajocien». Les teneurs en Cl, Na, K, Li du forage d'Antigone sont élevées: 289 mg/l, 352 mg/l, 30 mg/l, 250 µg/l respectivement.

Les eaux minérales (CE = 2 420 µs/cm, T = 29,6 °C) et carbogazeuses du forage F40B de Vergèze (25 % de gaz dissous) sont faiblement radiogéniques (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0,708054) pour des eaux en provenance du socle. Des rapports ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr supérieurs à 0,710 auraient été attendus, comme par exemple, pour les eaux carbogazeuses de la source de Sallièges (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0,716180, Sr = 3 600 µg/l) à Florac (Lozère). Le rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr des eaux du forage F40B témoignent en fait d'une importante réaction eau-roche avec les formations carbonatées du Crétacé en

présence de CO₂. Le rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr des eaux du forage ne reflète donc pas, a priori, celles du socle sous-jacent situé entre 2 500 m et 3 000 m de profondeur dans la zone d'étude sous couverture de carbonates. Les teneurs en Cl, Na, K, Li et Sr du forage F40B sont respectivement 100 mg/l, 102 mg/l, 19,2 mg/l, 114 µg/l et 1 286 µg/l.

Dans le but de mieux contraindre le pôle Crétacé, nous avons utilisé les données bibliographiques de Ladouche et al., [1999] et de Bicalho [2010]. Ces données concernent la source du Lamalou (Causse de l'Hortus, figure 1) et les forages et sources du secteur de Lauret (Garrigues crétaçées, figure 1).

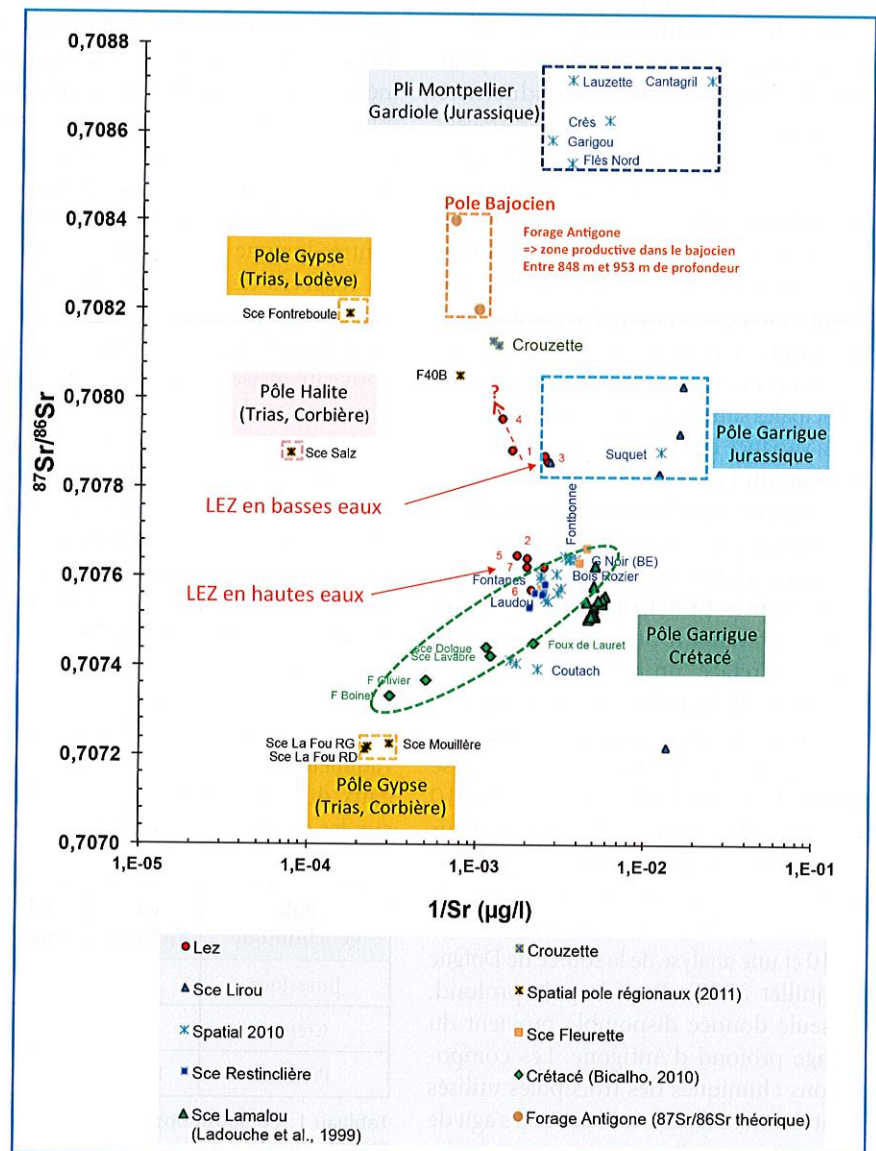
Les différents pôles géochimiques se distinguent bien les uns des autres, tant du point de vue des concentrations que des signatures isotopiques (figure 4). Les eaux des sources Fleurette, Restinclières, Gour Noir ainsi que les eaux échantillonnées dans les piézomètres (Laudou, Fontanès, Gour Noir, Bois des Rosiers, Coutach) paraissent fortement influencées par le pôle Crétacé. La source du Lez en période de hautes eaux (points n° 2, 5, 6 et 7) apparaît très largement influencée par le pôle Crétacé. Ces derniers résultats suggèrent que le réservoir du calcaire du Berriassien (Crétacé inférieur) joue un rôle majeur dans le fonctionnement de l'hydrosystème du Lez en période de crue. En période de hautes eaux, le ruissellement sur les marno-calcaires du Valanginien (Crétacé) peut également contribuer, par le biais des zones de pertes des cours d'eau mises en évidence par des traçages artificiels [Leonardi et al. 2012], à l'alimentation de la zone noyée du système karstique du Lez.

En période de sollicitation des réserves par le pompage, la signature des eaux du Lez évolue: les rapports ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr augmentent tandis que les teneurs en Sr diminuent légèrement (point n°3). Ces observations sont interprétées comme le résultat d'une plus forte sollicitation de l'aquifère jurassique, caractérisé par les rapports ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr de la source du Lirou et le forage du Suquet. Les eaux mobilisées lors de ces périodes doivent néanmoins présenter des concentrations en Cl, B et Li supérieures à celles des eaux circulant au sein des terrains du Jurassique supérieur (compartiment localisé à l'ouest de la source du Lirou, figure 1), pour expliquer les évolutions observées à la source du Lez. Ces résultats suggèrent une mobilisation d'eau jurassique plus profonde (Jurassique moyen), ce qui est en accord avec l'augmentation graduelle de température qui est observée en période de sollicitation des réserves par le pompage.

Lors de l'augmentation temporaire de minéralisation (dit « effet piston ») qui a été échantillonnée les 26/10/2009 (éch. 1) et 13/09/2010 (éch. 4) durant des crues de

reprise du cycle hydrologique (figures 2 et 3), la signature isotopique en strontium des eaux mobilisées est plus radiogénique (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr plus élevé) et les eaux présentent un enrichissement notable en Cl, Na, B et Li (figure 3) par rapport aux eaux d'été. Ces résultats suggèrent que les eaux profondes qui sont graduellement mobilisées lors de la sollicitation par pompage peuvent être plus fortement mobilisées, mais de façon temporaire, lors des crues de reprise du cycle hydrologique. Ce comportement évoque un transfert de masse rapide par effet piston, dans un ou plusieurs conduits karstiques en charge. Les eaux minéralisées mobilisées lors de ces périodes sont d'origine profonde et seraient à relier à une composante d'eau de type carbogazeux en provenance du socle et/ou ayant circulé en contact avec des niveaux évaporitiques. La contribution de ces eaux ne se fait pas de manière directe mais par l'intermédiaire d'un réservoir carbonaté profond dont l'eau présente des minéralisations élevées du type de celles qui ont été mesurées dans l'ouvrage profond d'Antigone. L'évolution des signatures

Figure 4: Rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr des eaux du système karstique du Lez et des systèmes karstiques environnants en fonction du rapport (1/Sr). Les pôles géochimiques régionaux sont également reportés. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratio for the Lez karstic spring waters and for the surrounding karst systems versus 1/Sr ratio. Regional geochemical end-members are plotted on.



isotopiques du strontium des eaux du Lez suggère la participation de la formation bajocienne (Jurassique moyen). Dans ce contexte, les lignes de courant de l'aquifère mobiliseraient les eaux jusqu'à des profondeurs de plus de 1 000 m compte tenu de la localisation de ces formations pour le système aquifère du Lez. De plus, des flux profonds ayant été en contact avec du socle et/ou des niveaux évaporitiques, remonteraient de plus de 2000 m de profondeur et participeraient également à l'écoulement, en se mélangeant plus ou moins aux eaux du réservoir carbonaté profond.

C. Quantification des contributions des pôles de mélange par la méthode EMMA

La méthode EMMA (End-Member Mixing Analysis) a été utilisée pour déterminer les proportions des pôles géochimiques contribuant aux eaux de la source du Lez en suivant les procédures décrites par Christophersen et Hooper [1992]. Les échantillons d'eau du Lez ainsi que les compositions des pôles géochimiques ont été standardisés pour tous les traceurs utilisés (conductivité électrique, ions majeurs, isotopes, traces) en utilisant la moyenne et l'écart-type des mesures à la source du Lez en suivant la procédure décrite par Burns et al. [2001].

L'analyse en composantes principales de la composition de l'eau du Lez en utilisant 7 éléments chimiques (conductivité électrique, teneurs en Cl, SO₄, Sr, Mg, Na et Li) montre que deux composantes principales suffisent pour expliquer 89,3 % de la variance de la composition chimique de l'eau du Lez (figure 5). Après analyse des données géochimiques régionales, il est apparu que cette variance pouvait être encadrée par trois pôles dans l'espace des composantes principales (figure 5): un pôle représentatif de l'aquifère localisé dans le Crétacé, un pôle caractérisant la signature de l'aquifère du Jurassique et un pôle profond. Pour caractériser le pôle de l'aquifère du Jurassique, une analyse d'un échantillon prélevé le 24 août 2010 au forage du Suquet a été retenue. Pour le pôle du Crétacé, la moyenne de trois analyses a été retenue (deux analyses de Fontanès prélevés en août 2009 et août 2010 et une analyse de la source de Dolgue en juillet 2009). Pour le pôle profond, la seule donnée disponible provient du forage profond d'Antigone. Les compositions chimiques des trois pôles utilisés sont données dans le tableau 1. Il s'agit de compositions réellement observées pour les

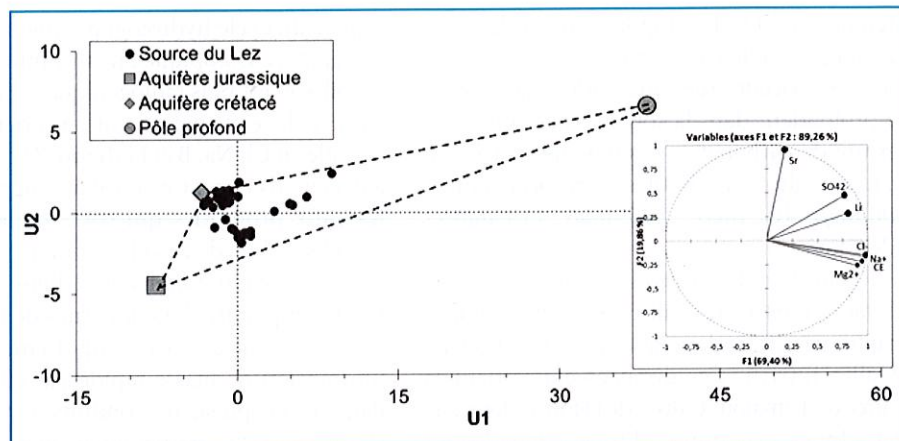


Figure 5: Projection dans l'espace des composantes principales de l'évolution de la composition de l'eau à la source du Lez encadrée par trois pôles géochimiques. L'encadré en bas à droite indique les corrélations entre les paramètres chimiques et les deux composantes principales.

Projection in the principal components space for the evolution of the composition of the Lez spring water, framed by three geochemical end-members. The lower right box indicates the correlations between the chemical parameters and both principal components.

deux premiers pôles et d'une composition légèrement modifiée (baisse de la teneur en Li de 250 µg/l observée à Antigone à 20 µg/l dans le pôle profond).

Dans le diagramme de la figure 5, les eaux de la source du Lez sont très proches du pôle Crétacé qui domine donc dans le mélange. Les contributions relatives des différents pôles sont représentées sur la figure 6. On constate que le pôle Crétacé domine largement lors des périodes de hautes eaux lorsque la source déborde. Par contre, lorsque les pompages sollicitent les réserves de l'aquifère, la contribution du pôle Jurassique augmente jusqu'à prédominer (figure 6). Elle diminue à nouveau brusquement lors de chaque période de recharge. En moyenne globale, la contribution du Crétacé aux flux est de 67 % tandis que celle du Jurassique est de 24 %. La contribution du pôle profond est globalement faible (en moyenne 9 % des flux) avec des pics supérieurs à 20 % (un maximum observé de 27 %) au moment des crues de reprise en automne.

Ce résultat indique le rôle prépondérant joué par la formation du pôle Crétacé (Berriasien) dans le fonctionnement de l'aquifère, notamment en période de hautes eaux durant lesquelles le ruissellement sur les marno-calcaires du Valanginien

peut également contribuer, par le biais des zones de pertes des cours d'eau, à l'alimentation de la zone noyée du système karstique du Lez.

Les résultats de la modélisation par mélange sont très satisfaisants et démontrent que l'EMMA est un très bon prédicteur de la chimie de la source du Lez. Les moyennes des différents éléments sont également très bien reproduites avec une légère surestimation du sodium.

D. Qualité de la ressource en eau et sensibilité aux impacts anthropiques

Parallèlement à la caractérisation hydrochimique de l'origine des flux s'écoulant à la source du Lez, différents types de contaminants ont été suivis de façon à estimer l'impact de la pollution anthropique sur l'aquifère du Lez. Quinze campagnes de prélèvements ont été effectuées entre février 2010 et septembre 2011, dans des contextes hydrologiques différents (basses, hautes et moyennes eaux, figure 7).

L'influence des activités agricoles a été caractérisée par un suivi de seize produits phytosanitaires utilisés essentiellement pour la culture de la vigne et de l'olivier (cultures majoritaires sur la zone), préalablement identifiés [Biesbrouck et

Pôle géochimique	CE (µS/cm)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Sr (µg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Li (µg/l)
Jurassique	584	9,2	6,4	80	3,5	5,3	0,6
Crétacé	674	10,9	22,4	563	6,4	5,5	3,9
Profond	1700	300	90	1300	24	250	20

Tableau 1: Compositions chimiques des pôles géochimiques identifiés et utilisés dans l'approche EMMA. *Chemical content of the used and identified end-members in the EMMA.*

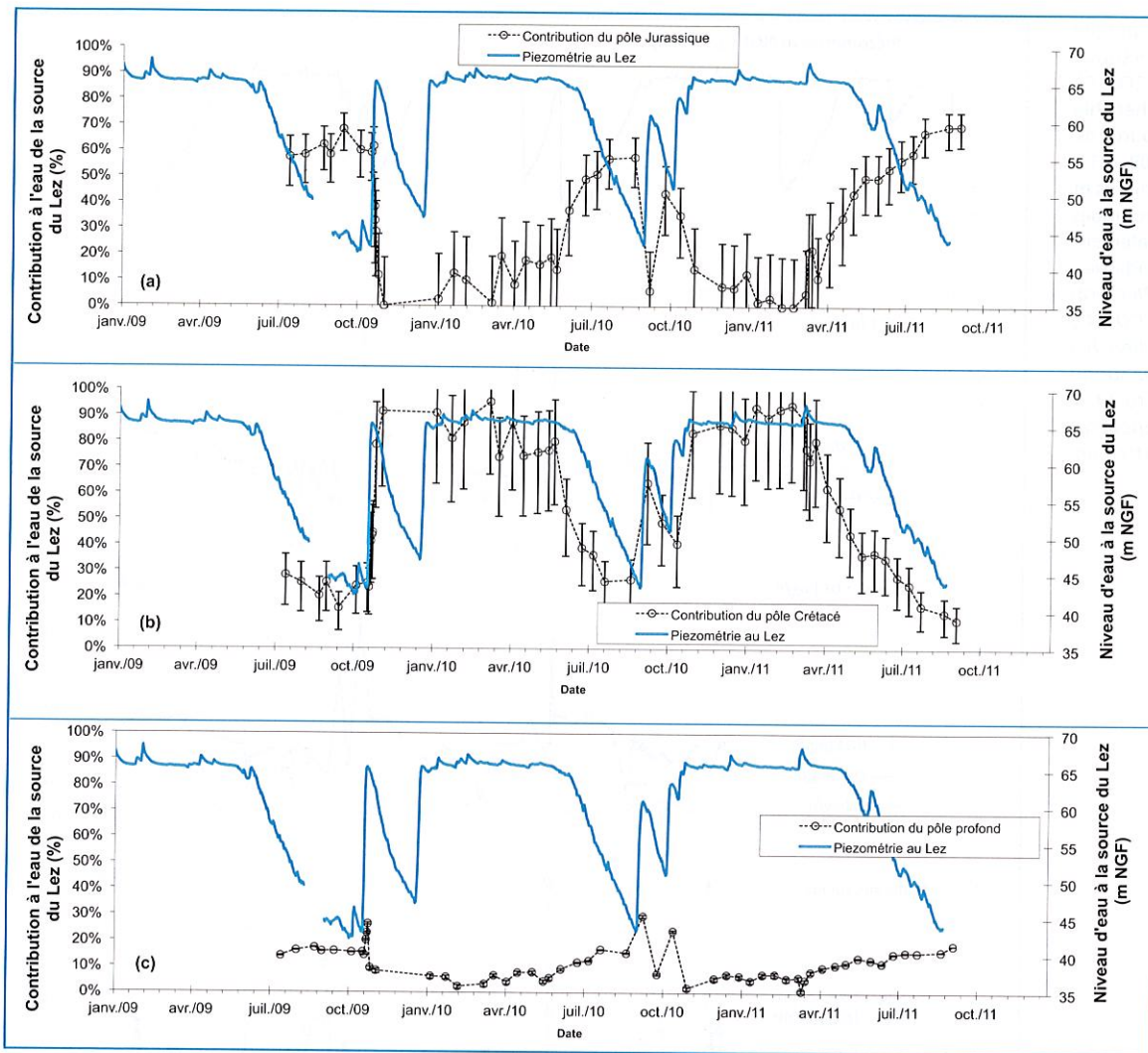


Figure 6 : Évolution des contributions relatives des trois pôles géochimiques aux eaux de la source du Lez sur la période d'étude (2009-2011). Evolution of the relative proportions of the three end-members at the Lez spring, from 2009 to 2011.

al., 2009]. À noter que ce suivi n'est pas exhaustif et ne permet pas une évaluation de la teneur en pesticides totaux.

L'influence des activités urbaines et domestiques a été estimée à partir (1) du suivi des coliformes totaux et *Escherichia Coli*, (2) d'un résidu médicamenteux [la carbamazépine, molécule peu éliminée dans la plupart des stations de traitement (photo 1); Clara et al., 2005], (3) des composés organostanniques (polluants exclusivement d'origine anthropique, non éliminés par les stations d'épuration) et (4) de l'anomalie de Gadolinium [Terre Rare indiquant l'infiltration d'eau usée dans l'aquifère; Rabiet et al., 2009].

Les variations en chlorures sont essentiellement à relier à la participation plus ou moins importante des flux profonds à l'écoulement. Le COT, les nitrates, les coliformes totaux et fécaux varient généralement de façon opposée aux chlorures et traduisent l'écoulement d'eaux récemment infiltrées dans le système. Les teneurs en NO_3 restent relativement faibles (inférieures à 10 mg/l). Les coliformes totaux et *E. Coli* présentent de fortes concentra-

tions, en crue notamment, tout comme les teneurs en COT. Ceci met bien en évidence la contribution d'eaux d'infiltration rapide, ayant une origine naturelle (marquée par l'infiltration à travers le sol) et également une origine anthropique.

Les résultats du suivi des divers contaminants entre février 2010 et septembre 2011 sont présentés de façon synthétique (minima, maxima, moyennes) dans le tableau 2. Cl et SO_4 peuvent avoir une

origine anthropique mais sont ici à relier à la contribution des flux profonds.

Impact de l'activité agricole

Le potassium et les pesticides sont à relier à l'activité agricole sur le bassin. Les teneurs en pesticides indiquent un niveau de contamination très faible (<12 ng/l, la valeur de 100 ng/l étant la norme de potabilité pour les eaux destinées à la consommation humaine). Pour

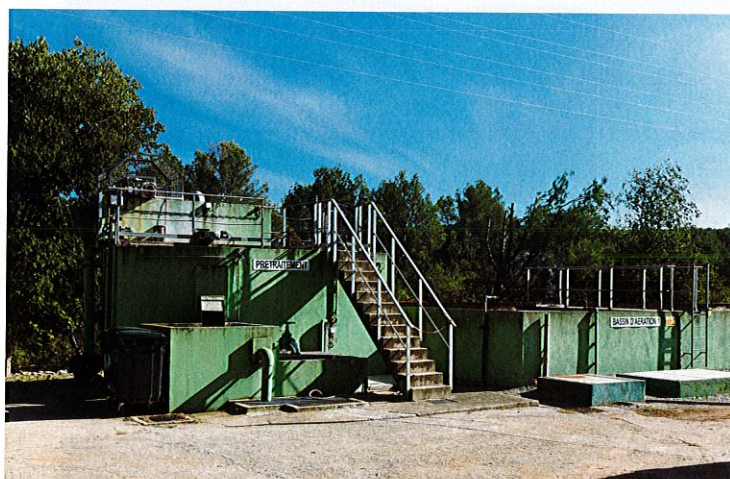


Photo 1 : Station d'épuration de la commune de Saint-Mathieu de Tréviers. Cliché Ph. Crochet. Water treatment plant of Saint-Mathieu de Tréviers Municipality.

Figure 7 : Évolution temporelle de la Conductivité Electrique et des teneurs en NO₃, COT, Cl, coliformes totaux et Escherichia Coli des eaux de la source du Lez, sur la période 2009-2011.

Les suivis piézométriques et des contaminants anthropiques (suivi qualité) sont également indiqués.

Temporal evolution of Electrical Conductivity (CE), NO₃, COT, Cl, total coliforms and Escherichia Coli values for the Lez spring water, from 2009 to 2011.

Piezometric and anthropogenic pollutants are also plotted on.

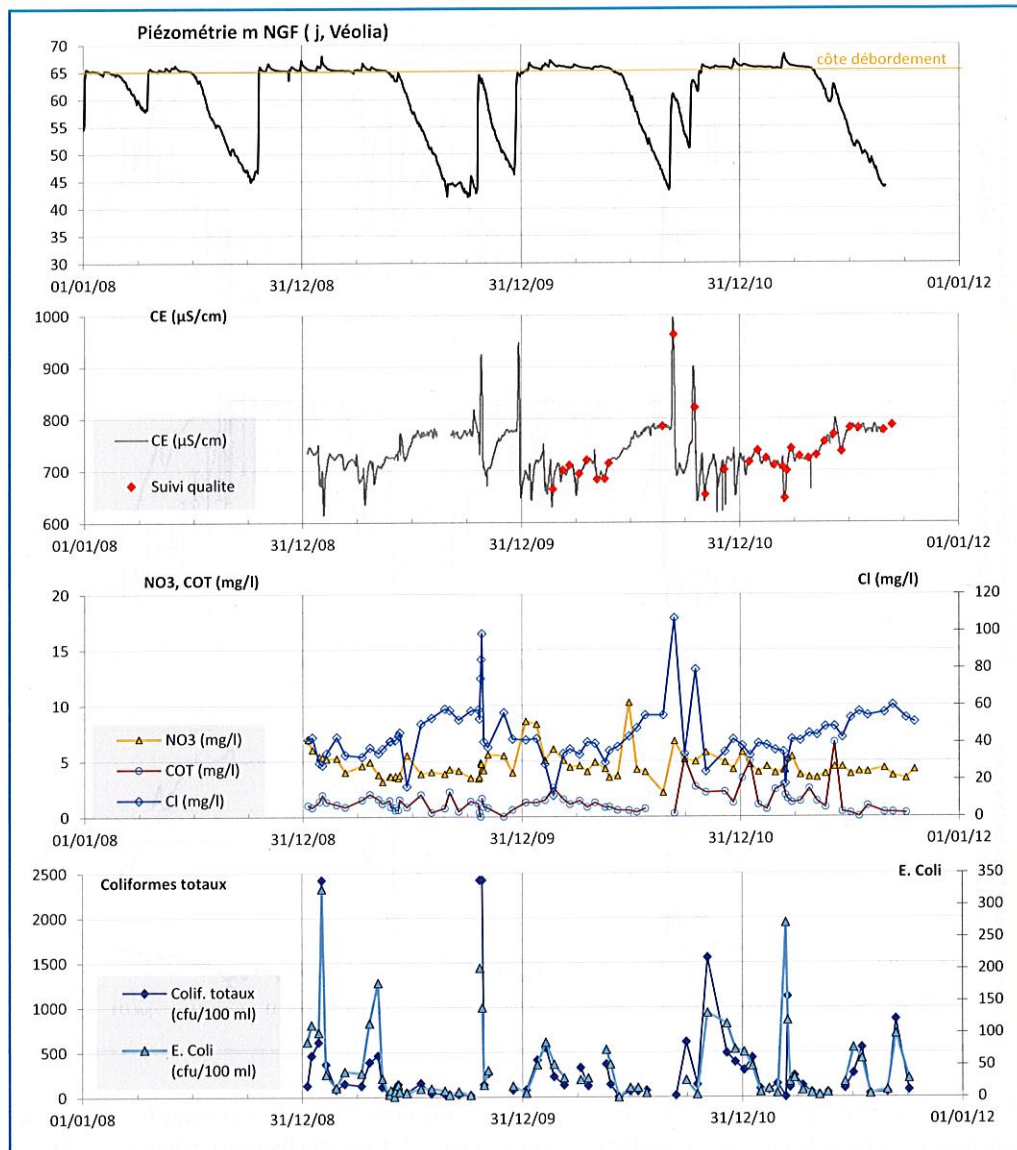


Photo 2: Village de Saint-Jean-de-Cuculles, au pied du Pic Saint-Loup. Cliché Ph. Crochet. St-Jean-de-Cuculles village.



certain composés, les profils de concentrations sont en relation avec une activité saisonnière notamment pour l'application des herbicides. Afin d'établir un état des lieux de contamination en pesticides de la source du Lez sur une période plus large, les données des différents

suivis patrimoniaux existant sur la source du Lez (données issues de la banque de données ADES sur les eaux souterraines) ont été intégrées. Seules les molécules étudiées durant le suivi ont été considérées. Les prélèvements ont été effectués à différentes périodes du cycle hydrologique entre 1997 et 2011. Les concentrations moyennes et maximales observées sont en général faibles (respectivement <30 ng/l et 50 ng/l) pour l'ensemble des molécules. Ponctuellement, certaines molécules comme la simazine ou le diuron peuvent toutefois dépasser la norme de 100 ng/l. À la vue de l'ensemble des résultats, la source du Lez ne présente pas de contamination chronique en pesticides. Il est toutefois possible, notamment en période de crue, que certaines molécules dépassent le seuil de potabilité.

Impact de la pollution domestique

Les teneurs en coliformes totaux, Escherichia Coli, carbamazépine et en organoé-tains mettent en évidence des contaminations domestiques liées aux eaux usées (stations

	Cl- mg/l	NO ₃ - mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	K ⁺ mg/l	COT mg/l	Bactériologie		Résidu méd.	Organostanniques		
						Colif. totaux cfu/100 ml	E. Coli cfu/100ml	Carbam. ng/l	MBT ng(Sn)/L	DBT ng(Sn)/L	TBT ng(Sn)/L
Min	11,4	2,1	20,4	0,3	0,3	14,8	3,1	<LD	0,4	<LD	<LD
Max	106,9	6,8	40,3	2,2	9,8	1553,1	272,3	19,3	3,6	0,9	0,3
Moyenne	42,8	4,4	25,6	1,4	2,1	299,2	51,3	11,0	1,6	0,4	0,2
n éch	31	31	31	31	31	27	26	19	13	13	13

	Pesticides											
	2-hydrox. ng/l	Chlortol. ng/l	Diur. ng/l	Métal. ng/l	Pencon. ng/l	Simaz. ng/l	Terb. ng/l	Terb.dés. ng/l	Azox. ng/l	Flaza. ng/l	Imida. ng/l	Oxad. ng/l
Min	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Max	5,8	6,6	6,8	2,9	2,6	12,0	4,8	10,7	4,1	0,4	6,7	5,8
Moyenne	3,0	2,1	2,5	1,7	1,4	3,7	2,4	3,6	2,9	0,4	2,3	1,6
n éch	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

d'épuration, assainissement autonome), étant donné qu'il y a très peu d'élevages sur le bassin (photo 2).

Pour la plupart des points échantillonnés à différentes périodes du cycle hydrologique, les teneurs en carbamazépine sont inférieures à la limite de détection (LD de 3 ng/l, tableau 3). La source du Lez présente cependant des teneurs en carbamazépine ponctuellement supérieures à 10 ng/l, notamment en hautes et moyennes eaux. Ces valeurs restent toutefois très faibles, et ainsi, l'aquifère karstique du Lez semble peu impacté par les résidus médicamenteux même si ponctuellement des « pics » de carbamazépine apparaissent.

Les composés organostanniques appelés aussi organoétains ou OTs sont des dérivés organiques de l'étain tétravalent. Ils constituent des polluants exclusivement d'origine anthropique [Bueno, 1999]. La concentration en TBT dépasse la NQE-CMA (0.61 ng(Sn)/L) pour l'échantillon du Lez du 28/03/2011. Le monobutylétain (MBT) est présent dans tous les échantillons et le plus souvent présente des concentrations importantes. Comme le dibutylétain, le MBT provient principalement de la dégradation du TBT, mais peut avoir une origine propre. Il est donc difficile d'évaluer la part de MBT provenant de la dégradation du TBT mais tout comme les précédents contaminants, la présence des butylétains dans les eaux traduit la présence d'eaux usées ou d'effluents de STEP.

Le Gadolinium est une Terre Rare dont un composé est utilisé comme agent contrastant en Imagerie par Résonance Magnétique. Après injection au patient, il est excrété et se retrouve dans le réseau de collecte des eaux usées et à l'exutoire des stations d'épuration. Une anomalie positive de Gadolinium supérieure à 1,5 est révélatrice de la présence d'eaux usées [Rabiet et al., 2009].

Deux échantillons de la source du Lez présentent une anomalie positive (02/09/2009, Gd*=1,56 ; 25/08/2010, Gd*=2,86), attestant de la présence d'eaux usées (STEP ou assainissement non collectif).

Conclusion

Les nouvelles données acquises dans le cadre de cette étude apportent des informations fondamentales et un éclairage nouveau sur le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère karstique du Lez et sa vulnérabilité face aux pressions anthropiques existant sur le bassin. L'approche géochimique inédite et complète (traceurs hydrochimiques et isotopiques, contaminants anthropiques) mise en œuvre durant deux cycles hydrologiques sur l'hydrosystème karstique du Lez (sources pérenne et temporaires), ainsi que d'autres systèmes karstiques régionaux, a permis d'améliorer significativement la caractérisation hydrochimique des réservoirs mis en jeu. L'origine des eaux minéralisées observées à la source du Lez lors des périodes de basses eaux et lors des crues de reprise hydrologique (effet piston) est bien profonde. La composition chimique et la signature isotopique en strontium correspondent à un mélange d'eaux issues de la formation bajocienne

Date	Gd*
02-09-09	1,56
27-05-10	1,30
25-08-10	2,86
20-12-10	1,29
04-01-11	1,27
14-03-11	1,48
17-03-11	1,43
21-03-11	1,46
28-03-11	1,50

Tableau 2 : Campagnes de suivis des contaminants à la source du Lez, du 22/02/10 au 12/09/11.

Teneurs minimales, maximales et moyennes en Cl, NO₃, SO₄, K, COT, coliformes totaux, E. Coli, résidus médicamenteux (Carbamazépine),

Organostanniques (Mono, Di et Tributyl-étain), pesticides (2-hydroxy atrazine, Chlortoluron, Diuron, Métalaxyl, Penconazole, Simazine, Terbutylazine, Terbutylazinedéséthyl, Azoxystrobine, Flazasulfuron, Imidaclopride, Oxadixyl).

Results of the different samplings for anthropogenic pollutants at the Lez spring, from 2010/02/22 to 2011/09/12. Maxima, minima and average values for NO₃, SO₄, K, TOC, total coliforms, E. Coli, pharmaceuticals residues (Carbamazepin), Organostannic (Mono, Di et Tributyl-étain), pesticides (2-hydroxy atrazin, Chlortoluron, Diuron, Metalaxyl, Penconazol, Simazin, Terbutylazin, Terbutylazindesethyl, Azoxystrobin, Flazasulfuron, Imidaclopride, Oxadixyl).

Tableau 3 : Anomalies de Gadolinium (Gd*) mesurées à la source du Lez. Gadolinium anomaly (Gd*) measured at the Lez spring.

(Jurassique moyen, à une profondeur de plus de 1 000 m) avec des flux profonds ayant été en contact avec le socle et/ou des niveaux évaporitiques localisés à plus de 2 000 m de profondeur. La contribution de ces flux profonds et minéralisés ne se fait pas de manière directe mais par l'intermédiaire d'un réservoir carbonaté profond. La méthode EMMA a permis une quantification des contributions des trois pôles de mélange identifiés. Le pôle Crétacé joue un rôle prépondérant dans le fonctionnement de l'aquifère (67 % en moyenne), notamment en période de hautes eaux avec une contribution importante de la formation du Berriasien. En période de hautes eaux, le ruissellement sur les marno-calcaires du Valanginien peut également contribuer, par le biais des zones de pertes des cours d'eau, à l'alimentation de la zone noyée du système karstique du Lez. Le pôle « Jurassique supérieur » joue un rôle important (24 % du mélange, en moyenne), notamment lors des crues de reprise du cycle hydrologique, où il peut être largement prédominant. La contribution du pôle « profond » est mineure, mais elle peut cependant être notable (18 %) au moment des crues de reprise.

Enfin, des flux d'infiltration rapide ont également été mis en évidence (NO₃, COT, coliformes totaux et Escherichia

Coli), caractérisant la dynamique de recharge saisonnière de l'aquifère mais également sa potentielle vulnérabilité face à des pollutions d'origine anthropique.

Ainsi, différents contaminants anthropiques (pesticides, carbamazépine, composés organostanniques, coliformes totaux et Escherichia Coli, Gadolinium) ont été suivis à la source du Lez de février 2010 à septembre 2011, à travers une quinzaine de campagnes de prélèvements et analyses. Les valeurs observées sont en général faibles durant les 19 mois de suivi. L'impact agricole semble peu marqué et demeure très ponctuel. Les pics de contamination apparaissent généralement en hautes ou moyennes eaux à la source. La source du Lez est de bonne qualité chimique dans l'ensemble, mais de qualité bactériologique pouvant être médiocre. La principale contamination anthropique est liée à l'impact de rejets d'eaux usées traitées ou non issus des STEP et/ou des assainissements non collectifs présents sur le bassin. Les teneurs des principaux contaminants présents peuvent être importantes, notamment en période de crues, attestant une contamination par des eaux usées (fuites de réseaux de collecte, assainissements autonomes défectueux, rejets de STEP ou débordements dans les systèmes d'assainissement). La présence de

certaines STEP localisées à proximité des pertes semble être la principale cause de cette pollution des eaux souterraines. Ces dernières se trouvent non loin d'une faille majeure constituant un axe de drainage préférentiel des eaux souterraines vers la source du Lez.

Cette étude a en outre permis de mettre en évidence la pertinence de certains traceurs naturels (hydrochimiques et isotopiques) ou anthropiques, et surtout l'intérêt de leur couplage, dans la caractérisation de mélanges complexes de flux d'origines diverses. Cette approche « multitraceurs » est tout à fait transposable à d'autres aquifères karstiques.

Remerciements

Cette étude a été financée grâce au projet « Gestion multi-usages des aquifères karstiques méditerranéens – Le Lez, son bassin versant et son bassin d'alimentation », ainsi que par l'observatoire MEDYCYSS de l'OSU OREME (<http://www.medycyss.org/>). Les auteurs remercient vivement Chrystelle Bancon-Montigny, Hélène Fenet et Sandra Van Exter (HydroSciences Montpellier), ainsi que Catherine Gonzalez et Sylvie Spinelli (École de Mines d'Alès) pour les analyses des contaminants anthropiques. Merci également à la métropole de Montpellier et à Véolia pour leur collaboration.

Bibliographie

BATIOT-GUILHE C., SEIDEL J.-L., MARÉCHAL J.-C., LADOUCHE B., PRIÉ V., CERNESSON F., DORFLIGER N., BLANC M., LEONARDI V. et VION P.-Y., avec la collaboration de C. BANCON, H. FENET, C. GONZALEZ, S. SPINELLI, S. VAN-EXTER, 2012 - Projet de gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez - Caractérisation hydrochimique; qualité chimique, vulnérabilité de l'hydrosystème et de l'écosystème associé. Rapport RP-61013-FR, 292 pages, 17 annexes.

BICALHO C., 2010 - Hydrochemical characterization of transfers in karst aquifers by natural and anthropogenic tracers. Example of a Mediterranean karst system, the Lez karst aquifer (Southern France), thèse AgroParisTech, 133 pages.

BICALHO C., BATIOT-GUILHE C., SEIDEL J.-L., TAUPIN J. D., PATRIS N., VAN EXTER S. and JOURDE H., 2011 - A conceptual model for groundwater circulation by using isotopic ($\delta^{18}O$, δ^2H and $87Sr/86Sr$) and geochemical tracers in a Mediterranean karst system. Congrès H2Karst, 9^{ème} Colloque d'Hydrogéologie en Pays Calcaire, Besançon (France), 1-3 septembre 2011.

BICALHO C., BATIOT-GUILHE C., SEIDEL J.-L., VAN-EXTER S. and JOURDE H., 2012 - Geochemical evidence of water source characterization and hydrodynamic responses in a karst aquifer. *Journal of Hydrology*, 450-451, 11, 206-218.

BIESBROUCK M., DEGUILHEM A. et TEYSSIER M., 2009 - Caractérisation des pesticides utilisés en agriculture sur le bassin versant du Lez. Rapport Master 1 SEEC, Université Montpellier 2, 21 p. + annexes.

BOSSER S., 2009 - Caractérisation d'un aquifère karstique méditerranéen, à partir des données hydrochimiques et hydrogéologiques disponibles. Rapport de stage de MASTER 2 GERE, Univ. Montpellier 2, 73 p.

BOTTON R., 1984 - Etude de certaines modalités du fonctionnement de l'aquifère karstique (zone d'infiltration et zone saturée) sur deux champs de forages nord-montpelliérains. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Montpellier II, 338 p.

BUENO M., 1999 - Etude dynamique des processus de sorption-désorption du tributylétain sur un milieu poreux d'origine naturelle. Laboratoire de chimie analytique bioinorganique et environnement, Thèse de l'Univ. de Pau et des Pays de l'Adour, 183 p.

BURNS D.A., MCDONNELL J.J., HOOPER R.P., PETERS N.E., FREER J.E., KENDALL C. and BEVEN K., 2001 - Quantifying contributions to storm runoff through end-member mixing analysis and hydrologic measurements at the Panola Mountain Research Watershed (Georgia, USA). *Hydrological Processes*, 15, (10), 1903-1924.

CHAMAYOU J. et AUROUX F., 1992 - Les Thermes du Lez - Port Marianne - Source Antigone - Gisement hydrominéral de la «source Antigone» dans son contexte hydrogéologique et structural. Note BRGM/92-LRO-963-PR.

CHRISTOPHERSEN N. and HOOPER R.P., 1992 - Multivariate-analysis of stream water chemical data - The use of Principal Component Analysis for the End-Member mixing problem. *Water Resources Research*, 28, (1), 99-107.

CLARA M., STRENN B. and KREUZINGER N., 2004 - Carbamazépine as a possible anthropogenic marker in the aquatic environment: investigations on the behaviour of Carbamazépine in wastewater treatment and during groundwater infiltration. *Water Research*, 38, (4), 947-954.

JOSEPH C., RODIER C., SOULTE M., SINEGRE F., BAYLET R. et DELTOUR P., 1988 - Approche des trans-

ferts de pollution bactérienne dans une crue karstique par l'étude des paramètres physico-chimiques. *Revue des sciences de l'eau*, 1-2, 73-106.

LADOUCHE B., AQUILINA L., PETELET E., BAKALOWICZ M. et SCHOEN R., 1999 - Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. Vol. 4: Interprétation des données hydrochimiques. Rap. BRGM R 40940, 170 p., 67 fig., 25 tabl.

LEONARDI V., JOURDE H. et MARÉCHAL J.-C., 2012 - Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez - Résultats complémentaires des forages et traçages. Rapport BRGM/RP-61612-FR, 52 p., 24 ill. + ann.

MARJOLET G. et SALADO J., 1975 - Remarques sur les relations observées entre crues et variations chimiques de l'eau d'une émergence karstique. 3^{ème} R.A.S.T., Montpellier, 1975, 247 p.

MARJOLET G. et SALADO J., 1976 - Contribution à l'étude de l'aquifère karstique de la source du Lez (Hérault). Etude de la chimie des eaux de la source du Lez et de son bassin, t. IX, fasc. II, Univ. Montpellier II, 101p.

MBAMPONDO T., 1971 - Contribution à l'étude des variations des teneurs en chlore des eaux souterraines de quelques karsts de la région languedocienne. Thèse, Univ. Montpellier II, 102 pages.

RABIET M., BRISSAUD F., SEIDEL J.-L., PISTRE S. and ELBAZ-POULICHET F., 2009 - Positive gadolinium anomalies in wastewater treatment plant effluents and aquatic environment in the Hérault watershed (South France). *Chemospheres*, 75, 8, 1057-1064.

VEIZER J., 1988 - The Earth and its life: system perspective. *Origins of life*, 18, 13-39.