

proceedings of the
9th Conference on Limestone Hydrogeology

actes du
9ème Congrès d'hydrogéologie en pays calcaire

Besançon, France
September 1-3, 2011

H₂
KARST

Hydrology & Hydrogeology
of the Karst

Artificial tracer test through the regional aquifer mixed carbonate-siliciclastic of the Beausset unit (SE France)

Traçages artificiels à travers l'aquifère régional mixte carbonaté-silicoclastique de l'unité du Beausset (SE France)

Bruno Arfib¹, Thierry Lamarque², Philippe Maurel² & Arnaud Fournillon¹

¹ Laboratoire de Géologie des Systèmes et des Réservoirs Carbonatés, Université de Provence, Case 67 - 3 Place Victor Hugo, 13003 Marseille – France, Email : bruno.arfib@univ-provence.fr

² SpéléH₂O, 405 Av. Bucarin, 83140 Six-Fours – France, Email : speleh2o@wanadoo.fr

Abstract

Groundwater flow in karst is known to be highly heterogeneous in time and space. Watersheds supplying karstic springs are different from hydrological and topographical watersheds. Defining hydrogeological units from a geological one requires crossing multiple methods of study, to ultimately give sustainable managements plan for freshwater resources. We present the recent campaign of multi-tracing tests conducted between Marseille and Toulon (SE France), in an aquifer with high heritage value. The flow is studied in the geological framework of South-Provençal Basin, in the Jurassic-Cretaceous syncline of the Beausset unit. Four tracer tests were carried out between January 2010 and 2011, using Uranine (fluorescein), Sulforhodamine B and Amino G Acid. The "Evenos" tracer test was done in the Upper Cretaceous mixed carbonate-siliciclastic aquifer. It shows the rapid runoff from sinkhole to spring, in a conduit type karst flow. The tracer is detected on a single spring, "La Foux de Sainte Anne d'Evenos". The minimum transit time is less than 12 hours, giving a maximal velocity of 4.8km/day. Almost 100% of the tracer injected is recovered in less than two days, and highlights the need for appropriate monitoring protocol. The other three tracer experiments investigate the farthest limits of the geologic unit.

Résumé

L'écoulement de l'eau souterraine dans le karst est connu pour être très hétérogène dans le temps et dans l'espace. Les bassins versants d'alimentation de sources karstiques sont alors différents des bassins versants hydrologiques ou topographiques. Le découpage d'une unité géologique en unités hydrogéologiques nécessite le croisement de multiples méthodes d'études, pour permettre à terme de mieux gérer la ressource en eau douce souterraine. Nous présentons la récente campagne de multi-traçage réalisée entre Marseille et Toulon (SE France), sur un aquifère à forte valeur patrimoniale. L'écoulement est étudié dans le cadre géologique du bassin sud-Provençal, sur le synclinal jurassico-crétacé de l'unité du Beausset. Quatre traçages ont été réalisés entre janvier 2010 et 2011, utilisant de l'Uranine (fluorescéine), de la Sulforhodamine B et de l'Acide Amino G. Le traçage d'Evenos, dans les calcarénites quartzzeuses du Crétacé supérieur, illustre l'écoulement rapide en crue, de type conduit. Le traceur est détecté sur une seule source, La Foux de Sainte Anne d'Evenos. Il arrive en moins de 12 heures, soit une vitesse de 4,8km/jour. Le temps de passage est très court, moins de 2 jours, et met en évidence la nécessité d'un protocole de suivi adapté. Les trois autres traçages portent sur les relations avec les limites les plus éloignées de l'unité géologique.

1. Introduction

La méthode du traçage artificiel est utilisée en hydrogéologie karstique pour mettre en évidence les relations hydrauliques entre un point d'injection et des points de sortie de l'eau souterraine. Elle permet également de caractériser le mode de circulation de l'eau : vitesse, temps de passage, taux de restitution, dispersion, écoulement uni ou multi-modal (LANG 2003) ; et renseigne ainsi sur le fonctionnement hydrodynamique du karst (BIRK *et al.* 2004, EINSIEDL 2005). En effet, la gestion de la ressource en eau souterraine nécessite la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale et temporelle de l'écoulement, qui découle de l'hétérogénéité des propriétés transmissives et capacitatives de l'aquifère karstique.

Nous proposons dans cet article d'étudier par traçages artificiels l'unité géologique carbonatée du Beausset, constituant un aquifère à forte valeur patrimoniale entre Marseille et Toulon (SE France). Le cadre géologique de l'unité du Beausset est particulièrement intéressant car il présente une large diversité de contextes hydrogéologiques : a) limite d'écoulement au droit d'un chevauchement, b) drainage profond des eaux souterraines en rapport avec leur salinisation par mélange avec l'eau de mer intrusive en zone côtière, c) effet d'écran des marnes aptiennes, d) écoulement à travers les formations mixtes carbonatées et silicoclastiques. Quatre traçages artificiels ont été réalisés entre janvier 2010 et 2011. Le premier traçage dans les calcarénites quartzzeuses du Crétacé Supérieur d'Evenos (Var-SE France) est détaillé, montrant ainsi la composante rapide de l'écoulement de type conduit dans le karst. En complément des concentrations en traceur, le suivi physico-chimique en continu de la source de la Foux de Sainte Anne

d'Evenos permet de discerner deux origines dans l'eau de cette source de trop-plein. Les perspectives offertes par les trois autres traçages sont discutées. Ces traçages permettent également de revenir sur les difficultés dans la mise en œuvre d'opérations de traçage.

2. Matériel et méthode

Traceurs artificiels et injections

Les quatre traçages artificiels ont été réalisés dans des pertes temporaires, absorbant les eaux de ruissellement lors des pluies. Ces points favorisent le transfert rapide du traceur à travers la zone non saturée de l'aquifère, et limite ainsi sa rétention au niveau du point d'injection. Le premier traceur a été injecté directement dans la perte nommée "Perte et Fracas" absorbant la totalité du cours d'eau, à Evenos le 13 janvier 2010 (Fig. 4, Fig. 5). Les trois autres traceurs ont été injectés en janvier et février 2011 dans des pertes non actives le jour de l'injection, et poussés par 12 à 20 m³ d'eau apportés par camion-citerne des pompiers. Les pertes se sont mises en eau naturellement 1 jour, 7 jours et 27 jours après l'injection, respectivement à Signes, Ceyreste, et Cuges (Fig. 4).

Les trois traceurs utilisés sont l'Acide Amino G, l'Uranine et la Sulforhodamine B. Ces trois traceurs présentent de bonnes qualités pour leur détection en multi-traçage et pour la protection de l'environnement (LANG, 2003). Les limites de détection sont variables d'un traceur à l'autre, et dépendent également du bruit de fond naturel. L'acide amino G est le plus sensible au bruit de fond naturel, avec des valeurs de 10 à 50 µg/L. Il a été choisi d'injecter de grandes quantités pour être au-dessus du bruit de fond et pour tenir compte de temps de transfert potentiellement long

sur les traçages de l'année 2011 : 50 kg d'acide amino G en poudre à Cuges, 30 kg de sulforhodamine B à Ceyreste et 150 litres de fluoescéine concentrée à Signes (soit environ 60 kg de poudre).

Détection

La détection des traceurs est assurée sur le terrain par des mesures en continu au pas de temps de 10 à 15 minutes à l'aide de fluorimètres automatiques GGUN (SCHNEGG, 2002) installés sur les sources principales. Ce type d'appareil permet de mesurer et séparer trois catégories de traceurs, correspondant à chaque traceur choisi (uranine, sulforhodamine B, acide amino G). En complément, des prélèvements d'eau manuels sont réalisés sur tous les sites

au pas de temps variable de 2 fois par jour à une fois tous les trois jours. La fluorescence de l'eau est analysée au laboratoire sur spectrofluorimètre (KONTRON pour le traçage 2010, SAFAS FLX pour les traçages 2011). Les solutions étalons sont faites avec le traceur injecté, et de l'eau de source de terrain à pH>7. Les sources équipées d'un fluorimètre de terrain sont également échantillonnées pour valider les résultats douteux, par des spectres.

Certaines sources sont également équipées de sondes de mesure en continu de la conductivité électrique (à 25°C), de la température et de la pression (sonde CTD).

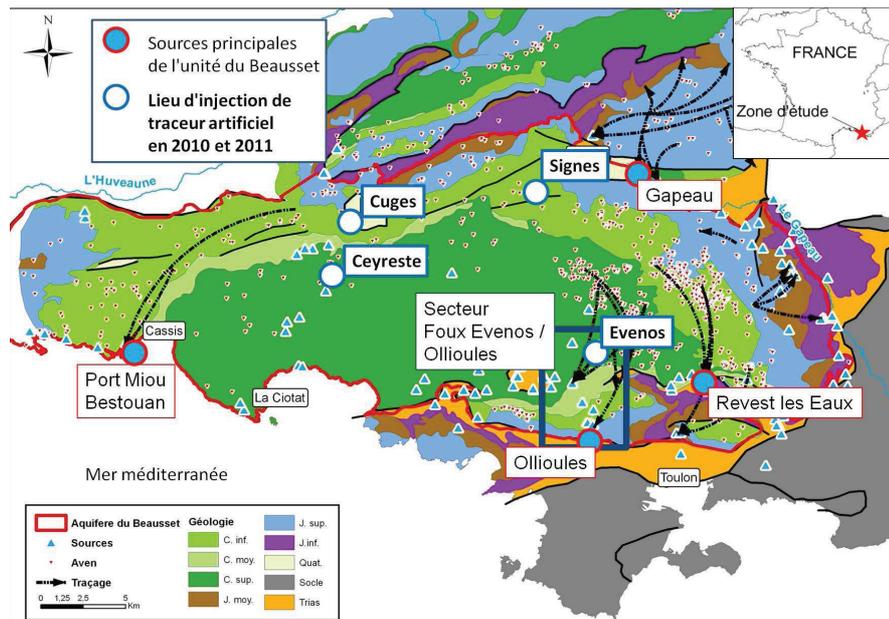


Fig. 4 : Localisation des secteurs d'étude par traçages artificiels sur l'unité géologique du Beausset

3. Contexte géologique et hydrogéologique

L'écoulement est étudié dans le cadre géologique du bassin sud-Provençal, sur le synclinal jurassico-crétacé de l'unité du Beausset. L'unité géologique du Beausset est au cœur de trois unités géologiques chevauchantes du sud vers le nord: chevauchée par l'unité de Bandol au sud et chevauchant l'unité de la Sainte Baume au nord. La série est complète du Trias au Crétacé supérieur (Santonien). En effet, la zone était partiellement immergée lors de l'événement médio-crétacé du bombement durancien, excepté sur la limite orientale caractérisée par les bauxites du Revest. Toutefois, les faciès et les épaisseurs sont variables, pour un même âge en fonction de la distance à l'axe du bassin sédimentaire lors du dépôt.

4. Résultats et discussions

Les trois injections de janvier et février 2011 visent à caractériser l'écoulement à partir de la bordure nord de l'unité du Beausset la plus éloignée des points de drainage majeurs (Fig. 4) : baie de La Ciotat, baie de Cassis (Port Miou et Bestouan), Revest-les-Eaux/Dardennes et Ollioules. Deux mois après les injections, les traceurs ne sont toujours pas sortis, ce qui est conforme aux précédentes études (DUROZOY & PALOC 1969, MAUREL 2008, COURBON & MAUREL 2010). Plus de détails sont disponibles sur www.karsteau.fr

Les études sur le massif de Siou-Blanc ont montré la compartimentation de l'aquifère dans les massifs ouest-Toulonnais. Les résultats développés ici portent sur le traçage de Perte et Fracas.

La "Perte et Fracas" absorbe intégralement l'eau d'un ruisseau temporaire. C'est une cavité explorable sur plusieurs centaines de mètres. La première partie est constituée de passages étroits pour l'homme, entre des dalles effondrées de calcarénites du Coniacien-Santonien (Fig. 5) sur une centaine de mètres. Ensuite, la cavité se développe suivant un méandre s'élargissant de l'amont vers l'aval (de quelques décimètres à quelques mètres), sur une hauteur de quelques mètres à 20 mètres ou plus. Les calcarénites, bien qu'étant une formation mixte carbonatée-silicoclastique, présentent donc des propriétés karstiques. Les carbonates sont dissous, et le sable quartzeux résiduel se trouve emporté par l'eau. Le méandre a subi différentes phases successives de creusement et de comblement par des galets. Des planchers stalagmitiques scellent les galets formés de roches variées visibles en surface à l'affleurement : calcaires, calcarénites, basaltes.

En aval de la perte, coule La Reppe, un ruisseau qui a entaillé toute la série de l'unité du Beausset, du Crétacé supérieur au nord au Trias au sud, et formé les gorges d'Ollioules. En rive gauche de la Reppe se trouvent cinq sources (Fig. 5) : (1) La Foux de Sainte Anne d'Evenos, une source temporaire, (2) La Reppe souterraine, à la base de

l'urgonien, (3) Le Labus, une source salée et chaude, (4) La Maire des Fontaines, au toit du Jurassique supérieur, (5) Bonnefont, dans le Jurassique supérieur dolomitique.

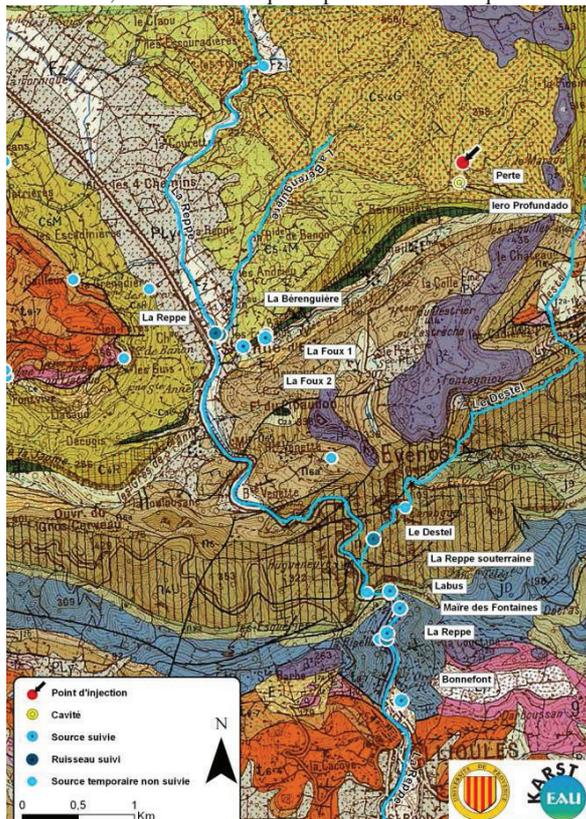


Fig. 5 : Carte géologique du BRGM au 1/50 000 et localisation des points de suivi du traçage de Perte et Fracas du 13/01/10 (voir légende géologique en Fig. 4 et dans le texte)

Le 13 janvier 2010, 10 kg d'acide amino G préalablement dilués ont été injectés dans la Perte et Fracas à 12h14. Il pleut depuis deux jours. Le ruisseau s'infiltrant dans la perte provient des pluies qui ruissellent ; il est peu minéralisé ($CE=239 \mu S/cm$). Par contre, il présente un signal de fluorescence important, égal à 50 ppb (ou $\mu g/L$) sur le couple de longueur d'onde de l'acide amino G ($Exc=356nm/Em=448nm$). La source temporaire de la Foux est en crue, de l'eau turbide s'en déverse. Des échantillons d'eau sont prélevés sur les sources avant l'injection puis durant l'après-midi. Une sonde CTD et un fluorimètre GGUN sont installés à la Foux le soir de l'injection vers 22h. Un autre fluorimètre est installé sur La Maire des Fontaines à Ollioules (Fig. 5). Après deux mois de suivi journalier, seule la source de la Foux de Sainte Anne d'Evenos s'est révélée positive à l'acide amino G. L'eau d'infiltration de la perte traverse donc toutes les alternances de calcarénites, calcaires et conglomérats (résédimentations carbonatées) du Coniacien-Turonien pour sortir finalement à la Foux dans le Cénomanién calcaire. Le bruit de fond à la Foux oscille entre 25 et 30 ppb le 13/01/10 (Fig. 6). C'est à minuit le 13/01/10 que le traceur arrive, la concentration passant de 28 à 36 ppb en une heure, puis de 36 à 68 ppb l'heure suivante. Le temps de première arrivée du traceur est de 12 heures, pour un trajet rectiligne à travers les calcarénites du coniacien de 2,4 km. Le traceur a donc circulé avec une vitesse maximale de 4,8 km/jour, et est arrivé à peine 2 heures après l'installation du fluorimètre automatique sur site. Le pic est rapidement atteint le 14/01/10 à 8h18 avec 510 ppb (Fig. 6), puis la concentration

diminue jusqu'à un palier égal à 33 ppb dès le 15/01/10 11h28, ce qui correspond à un temps de passage de 35,5 heures. Le passage du traceur a été très rapide, avec un seul prélèvement manuel dans le pic de concentration (Fig. 6). Le fluorimètre de terrain a été ici indispensable. La pression a été mesurée, mais le débit n'est pas connu avec précision, rendant le calcul du flux massique et du taux de restitution trop incertain à ce stade de l'étude. Toutefois, en utilisant le débit mesuré le 16/01/10 à 16h30 égal à 332 L/s, on peut calculer un ordre de grandeur du taux de restitution qui est proche de 100 % ($\pm 10\%$). Ce calcul approximatif est en adéquation avec l'allure de la courbe de restitution unimodale et un effet de traîne court. Ces observations montrent que l'écoulement a lieu dans un conduit karstique sans interaction avec la matrice fracturée ou poreuse environnante.

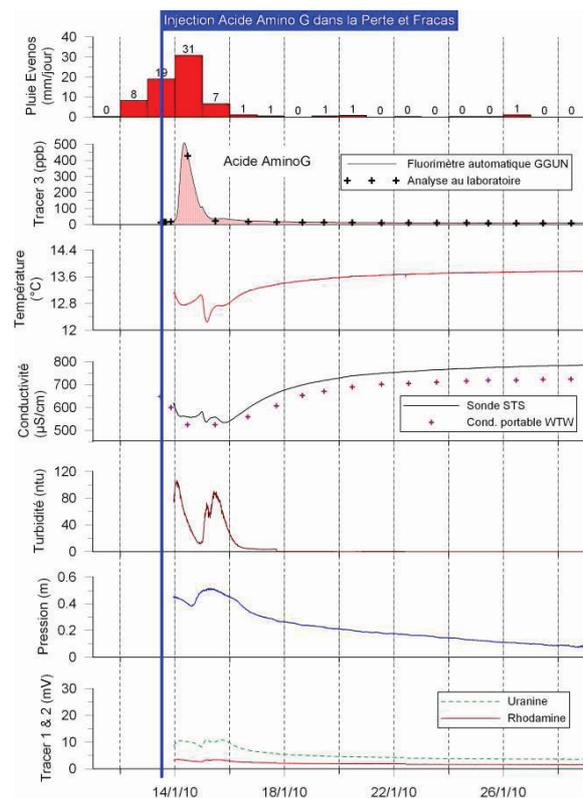


Fig. 6 : Concentration en acide amino G à la source temporaire de la Foux de Sainte Anne d'Evenos lors du traçage du 13/01/10

Par ailleurs, l'évolution de la conductivité électrique et de la température confirment que l'eau de la Foux en crue est constituée d'une proportion variable d'eau de ruissellement de surface à circulation très rapide entre l'infiltration dans la perte et la résurgence à la Foux, et d'une eau plus ancienne beaucoup plus minéralisée arrivant par un phénomène de mise en charge de la nappe profonde (conductivité électrique proche de $700 \mu S/cm$, Fig. 6). Il existe donc ici deux réseaux de drainage souterrain : un réseau superficiel partiellement noyé suivant plus ou moins la pente entre la perte et la Foux, et un réseau totalement noyé profond amenant l'eau lors des mises en charges. Le réseau superficiel est celui qui a été tracé et qui pourrait être exploré, en spéléo, depuis la Perte et Fracas jusqu'à la Foux s'il n'y a pas de siphons suspendus.

5. Conclusion et perspectives

Cette étude par traçage artificiel sur la Foux de Sainte Anne d'Evenos illustre l'écoulement rapide ayant lieu à travers des conduits karstiques dans les calcarénites. La réserve en eau constituant une ressource en eau douce est située plus en profondeur et n'émerge à la source temporaire de la Foux qu'en période de trop plein. Les trois autres traçages en cours renseigneront sur les écoulements profonds, donnant accès aux grandes directions d'écoulement à l'échelle de l'unité du Beausset, et permettant ainsi de mieux caractériser le fonctionnement de cet aquifère patrimonial.

Remerciements:

Cette étude est réalisée dans le cadre du projet KarstEAU, financé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, le Conseil Général du Var, le Conseil Général des Bouches-du-Rhône, et la Région Provence-Alpes-Côtes d'Azur.

Merci aux différents partenaires : Communes des traçages, Pompiers SDIS 13 et 83, Comité Départemental de Spéléologie 83 et 13, Spéléologues : Loulou Deplaye, Adèle Mirlit, Yves Lecouvez, André Taxil.

Références

BIRK S., R. LIEDL, M. SAUTER 2004 Identification of localised recharge and conduit flow by combined analysis of hydraulic and physico-chemical spring

responses (Urenbrunnen, SW-Germany) *Journal of Hydrology* 286, pp.179–193

COURBON P. & MAUREL P. 2010 Les traçages du plateau de Siou-Blanc (1993-2000). Ouvrage collectif: Karst et grottes de France, sous la direction de P. Audra. *Karstologia Mémoires* 19: 32-33.

DUROZOY & PALOC H. 1969 Bassin du Beausset, enseignements apportés par les expériences de coloration. 69 SGL 212 PRC. 22p.

EINSIEDL F. 2005 Flow system dynamics and water storage of a fissured-porous karst aquifer characterized by artificial and environmental tracers. *Journal of Hydrology* 312: 312–321

FOURNILLON A. , B. ARFIB, C. EMBLANCH, J. BORGOMANO 2011 Understanding aquifer compartmentalization in karst terrains by use of hydrochemical natural tracers and 3D structural geological model: the case of the Beausset Basin (SE France). 9th Conference on Limestone Hydrogeology. Proceedings.

LANG P. 2003. Bulletin d'Hydrogéologie N°20. Application of artificial tracers in hydrogeology-Guideline. 87p.

MAUREL P. 2008 - « L'Eau de là » ou l'aventure du projet SPÉLÉ-EAU à Siou Blanc. Comité Départemental de Spéléologie du Var, Toulon. 80 p.

SCHNEGG P.A. 2002 An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement, XXXII IAH and ALHSUD Congress Groundwater & Human Development.