

proceedings of the  
**9<sup>th</sup> Conference on Limestone Hydrogeology**

actes du  
**9<sup>ème</sup> Congrès d'hydrogéologie en pays calcaire**

Besançon, France  
September 1-3, 2011

**H<sub>2</sub>**  
**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 Arfib<sup>1</sup>, Thierry Lamarque<sup>2</sup>, Philippe Maurel<sup>2</sup> & Arnaud Fournillon<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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](mailto:bruno.arfib@univ-provence.fr)

<sup>2</sup> SpéléH<sub>2</sub>O, 405 Av. Bucarin, 83140 Six-Fours – France, Email : [speleh2o@wanadoo.fr](mailto: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 quartzueuses 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 capacitives 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 quartzueuses 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 m<sup>3</sup> 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 fluorescéine 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 du 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).

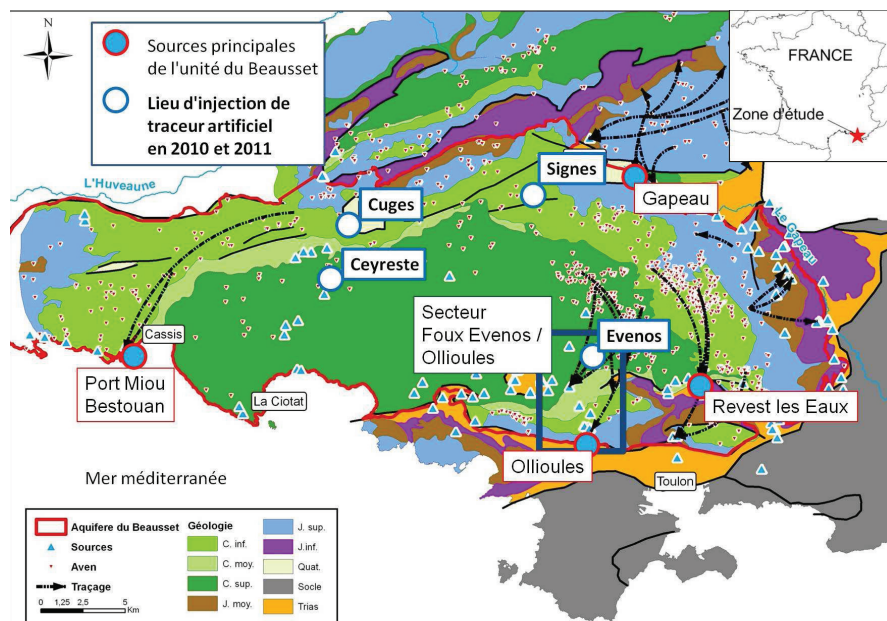


Fig. 4 : Localisation des secteurs d'étude par traçages artificiels sur l'unité géologique du Beausset

### 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](http://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 quartzueux 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





## 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.