

**Colloque**  
**"Gestion des eaux souterraines"**  
**Bordeaux – 2023**

**Article étendu**

<b>Titre</b>
<i>Etude des relations karst-rivière par surveillance de la chlorophylle</i> <i>Intérêt et cas d'études</i>
<b>Nom des auteurs</b>
Hélène GEAIRON <sup>(1)</sup> , Thierry GAILLARD <sup>(1)</sup>
<b>Affiliation</b>
(1) CPGF-HORIZON

**Résumé :**

La caractérisation des relations nappe-rivière en domaine karstique basée sur les outils standards de l'hydrogéologue est parfois insuffisante. Cet article expose deux cas d'utilisation de la chlorophylle-a comme traceur de phénomène d'inversac et plus généralement d'intrusion d'eau superficielle vers un système karstique.

**Introduction**

Plus de 20 % de la population mondiale est alimentée en eau potable à partir d'aquifères karstiques (Ford, et al., 2007). En Europe, les formations carbonatées affleurent sur 21 % du territoire (Chen, et al., 2017). Les aquifères karstiques sont plus sensibles au changement climatique (Yuan, 1997; Loaiciga, et al., 2000), et requièrent une protection renforcée basée sur une compréhension approfondie de leurs fonctionnement. L'étude des aquifères karstiques est souvent abordée par des investigations hydrogéologiques adaptées (Bakalowicz, 2005), des essais de traçage (Goldsheider, et al., 2008; Dewaide, et al., 2016), des suivis hydrogéochimiques (Hunkeler, et al., 2007) et des analyses des séries temporelles (Mangin, 1984; Padilla, et al., 1995). Toutefois, ces outils sont parfois insuffisants. En effet, les eaux superficielle et souterraine ont souvent des caractéristiques chimiques semblables et les différences observables sont souvent dans la gamme d'erreur des appareils de mesures. Plusieurs approches fondées sur l'hydrodynamiques ou l'étude de la chimie des eaux se sont parfois heurtées à la forte productivité des aquifères et un chimisme semblable des eaux courantes et des systèmes karstiques, les uns dépendant des autres. La chlorophylle est un paramètre susceptible de mettre en évidence des relations nappe/ rivière, notamment en présence de phénomène d'inversac à partir de rivières eutrophisées (Gaillard, et al., 2020). En effet, la chlorophylle est produite uniquement dans les eaux superficielles, exposées à la lumière du soleil. Son suivi en continu est basé sur la mesure de la fluorescence enregistrée par des sondes. Le rapport de 3 pour 1 en faveur de la forme chlorophylle-a sur la chlorophylle-b (Lichtenthaler, et al., 1981) conduit à suivre la forme chlorophylle-a. L'utilisation de ce paramètre pour caractériser des relations superficiel/ souterrain est ici présentée dans deux cas : l'apparition du phénomène d'inversac sur une ressource karstique exploitée par Dijon Métropole (Gaillard, et al., 2020) et l'intrusion d'eau superficielle en pompage dans une émergence karstique exploitée par Grand Cognac Agglomération (inédit).

## Cas de la source Crucifix à Velars-sur-Ouche, Côte d'Or, France

De nombreuses ressources en eau potable de Dijon Métropole (source de Morcueil, source du Crucifix, Puits de Plombières, champ captant de Gorgets) émergent des calcaires bathoniens sous les calcaires oxfordiens dans la vallée de l'Ouche et sont en relation avec les eaux superficielles (l'Ouche et le canal de Bourgogne), comme l'attestent les résultats de traçage (Corbier, 2000), avec des vitesses allant de 10 à 50 m/h. La caractérisation des relations nappe-rivière est compliquée par les similitudes chimiques et physico-chimiques entre les eaux de surface et du karst.

Le phénomène d'inversac, connue dans la vallée de l'Ouche, est peu observable sur les suivis standards des captages d'eau potable. Dans le puits du Crucifix de Velars sur Ouche (Fig. 1), aucun inversac n'avait été suspecté en raison de très faibles gradients hydrauliques entre puits, la source du Crucifix et le canal (Fig. 2). Le Puits du

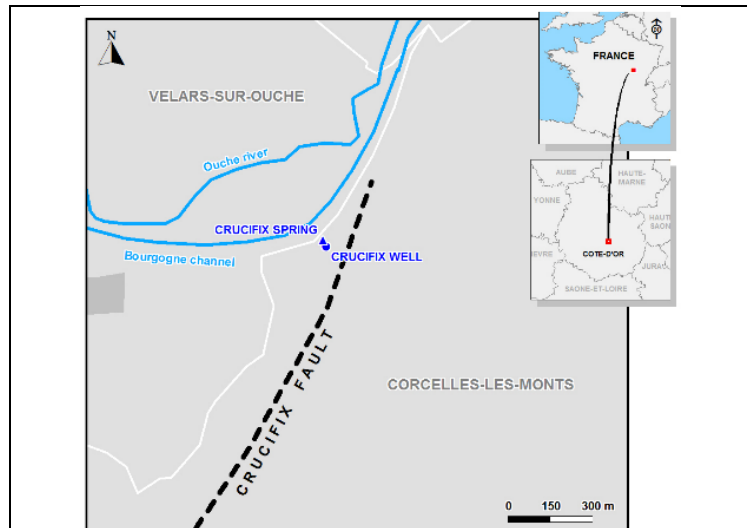


Figure 1 : Localisation du puits et de la source du Crucifix

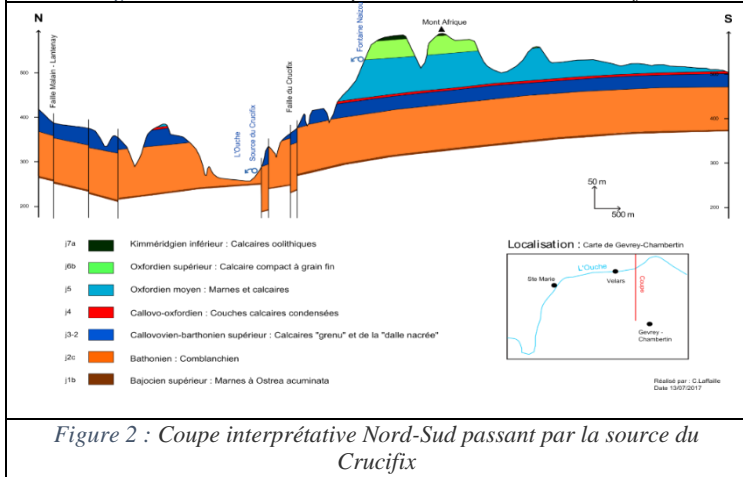


Figure 2 : Coupe interprétative Nord-Sud passant par la source du Crucifix

Crucifix a été construit au début des années 1970 sur la faille du Crucifix en substitution de la source karstique, dont la protection était compliquée par l'aménagement de l'autoroute A38. Le canal de Bourgogne, construit aux 18<sup>e</sup> et 19<sup>e</sup> siècles entre le karst et le cours de l'Ouche, constitue une modification majeure du système karstique. En effet, le canal a recoupé des émergences karstiques et la question d'un inversac entre le canal et les systèmes karstiques captés dans le canal est un enjeu majeur dans la réflexion de Dijon Métropole. En pompage, le rabattement au puits est très limité (<3 cm à 140 m<sup>3</sup>/h) et le faible gradient entre le puits et le canal (de l'ordre de 0,2%) ne permet pas de déterminer la zone d'appel du pompage vers l'aval. En été, la qualité de l'eau du canal est dégradée par l'eutrophisation. La chlorophylle-a devient donc un traceur biologique pertinent pour caractériser le phénomène d'inversac entre le canal de Bourgogne, la source karstique du Crucifix et le puits implanté sur la faille éponyme. Pour tester l'hypothèse d'un inversac, le canal, le puits et la source ont fait l'objet d'un suivi de la chlorophylle-a, des niveaux d'eau et de la température à la cadence de 1 mesure/6 min au cours de l'été 2017. Des essais de pompage ont été réalisés sur le puits pendant le suivi avec un essai de puits (débits testés de 56, 99 et 141 m<sup>3</sup>/h pendant 1 heure à partir de 9h00 le 24/07/17) suivi d'un pompage continu de 24 h à 120 m<sup>3</sup>/h, débuté le 24/07/17 à 14h00. Après ces essais, l'exploitation régulière a repris par cycles de pompage de 2 h par jour à 40 m<sup>3</sup>/h.

Le niveau dans le puits est situé 15 à 20 cm au-dessus du niveau du canal et de la source (Figure 3a). Le niveau du canal contrôle le système et les variations mesurées sur le canal se propagent dans le karst. Le niveau d'eau de la source et du canal sont très proches, avec 4 cm d'écart (niveau de la source au-dessus du niveau du canal), avec toutefois quelques épisodes d'inversions ponctuels qui pourraient être observés après l'essai de pompage, lors de modification du niveau du canal (le niveau du canal est conditionné par un barrage). Le

graphique de suivi des températures (Figure 3b) montre des valeurs entre 21.5 °C et 25.5 °C sur le canal, avec un maximum journalier vers 16h00. Dans le puits, la température reste constante (11.8 C) avec des variations de 0.1 C. La température de la source varie entre 11.8 C et 13 C, l'augmentation de température étant mesurée à 16h00 le 26/07/17, soit 26 h après l'arrêt du pompage continu.

La mesure de chlorophylle-a dans le canal varie entre 3 et 45 µg/ en journée, avec une moyenne de 8 µg/L (Figure 3c). Dans la source du Crucifix, la teneur est non détectable (<0.025µg/L) à l'exception d'une augmentation observée le 26/07/17 (3 µg/L). Sur le puits, le pic de chlorophylle-a dépasse le seuil de détection dès le 25/07/17 avec une valeur maximale toutefois plus faible que sur la source (<1 µg/L). Ce suivi montre que le phénomène d'inversac, non observable par la mesure des gradients hydrauliques et faiblement visibles sur le suivi de température, est caractérisé avec le suivi en continu de la chlorophylle-a. Le phénomène est particulièrement visible sur la source karstique et moins sur le puits (système annexe de conduit karstique, situé plus près du canal).

Ce suivi a donc permis de mettre en évidence le risque d'inversac en fonction de la gestion des niveaux d'eau dans le canal (remplissage et fermeture de porte).

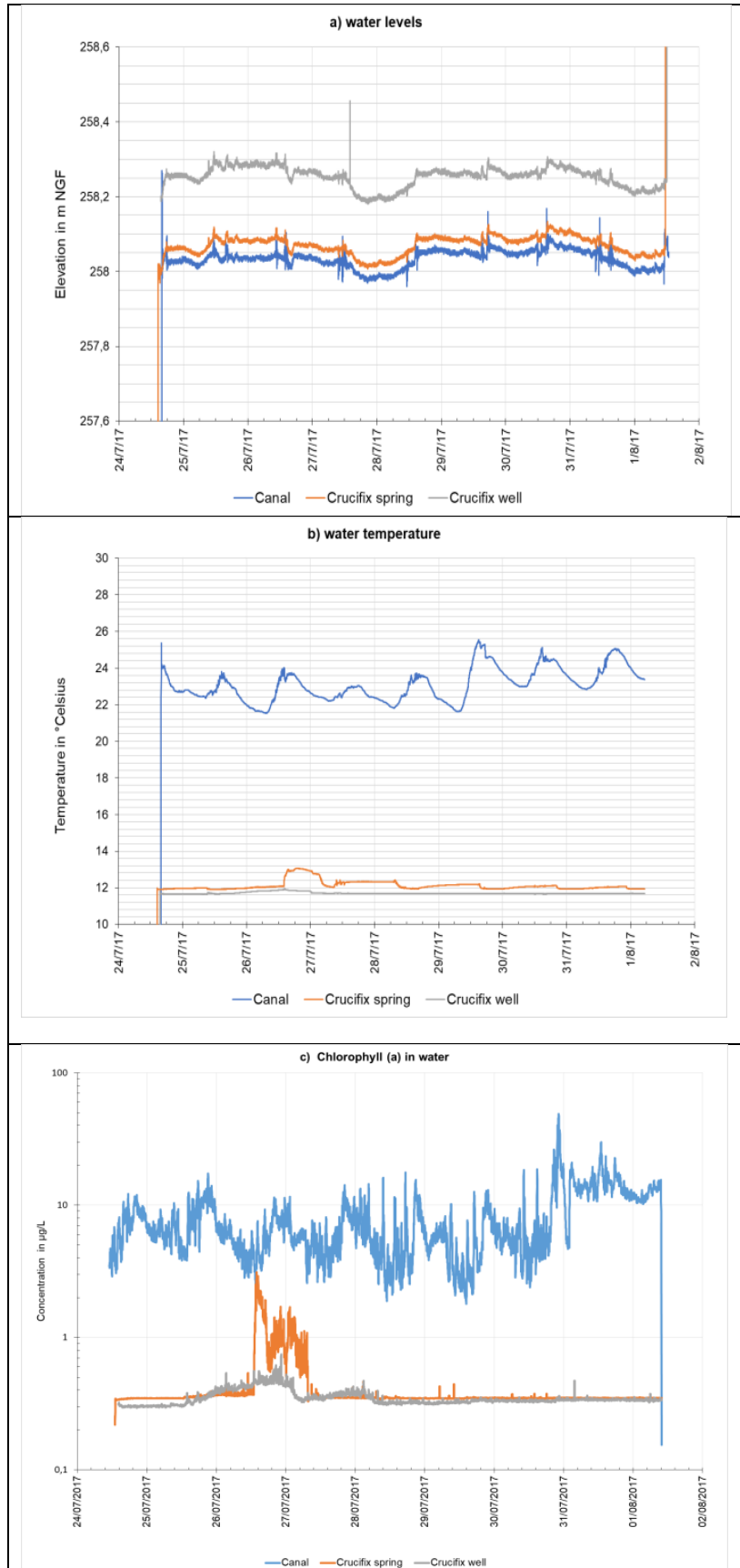


Figure 3 : Résultats du suivi du système karstique du Crucifix

## Cas du captage de Puyrolland à Bourg-Charente, Charente, France

Le captage de Puyrolland est situé sur la commune de Bourg-Charente (Fig. 4). L'ouvrage est exploité par Grand Cognac Agglomération à un débit de 150 m<sup>3</sup>/h pour un volume journalier moyen de 1 730 m<sup>3</sup>.

Le captage de Puyrolland émerge des affleurements calcaires du Santonien de la Petite Champagne (Fig. 5), au niveau d'une dépression semi-fermée au Sud par les collines campaniennes et au Nord par le relief mésocrétacé, qui sépare les bassins du captage et du marais de Puyrolland de celui de la Charente. Selon J.C. Sauret (Service Régional de l'Aménagement des Eaux Poitou-Charentes, 1975), le Santonien basal ne renferme pas d'éponte marneuse entre l'ensemble Santonien-Campanien et l'ensemble Turonien-Coniacien. Il considère un aquifère homogène du Turonien-Coniacien-Santonien qui alimente le marais et le captage de Puyrolland, repris par l'étude préalable à la protection du captage réalisée en 1995 (Valadier, 1995) et l'étude de risques de 2004

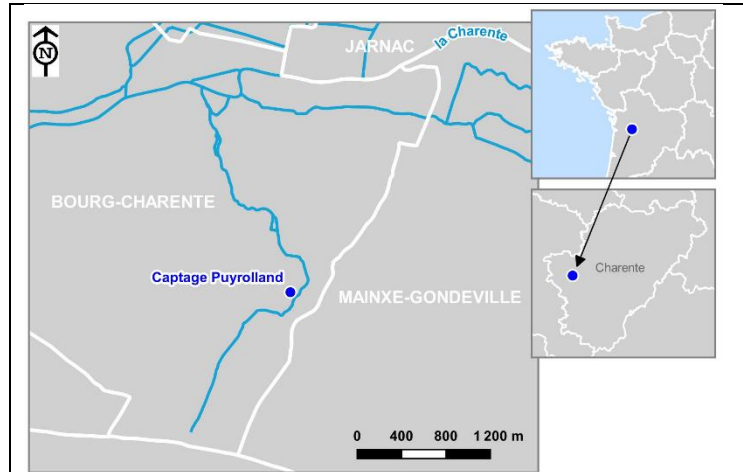


Figure 4 : Localisation du captage de Puyrolland

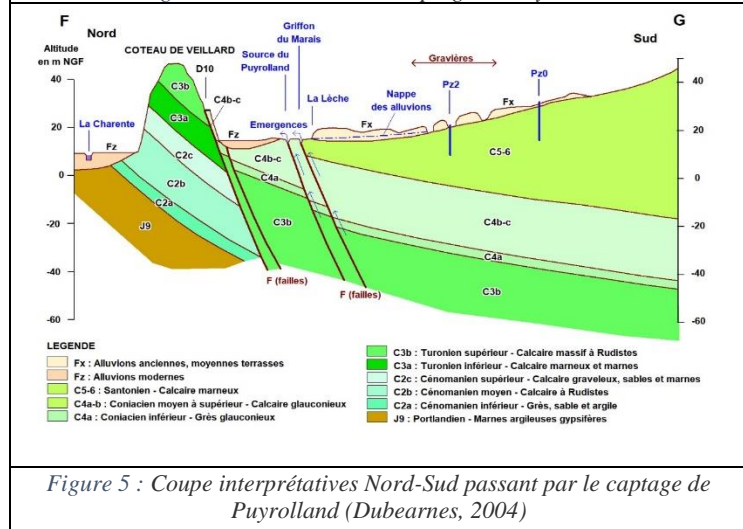


Figure 5 : Coupe interprétative Nord-Sud passant par le captage de Puyrolland (Dubearnes, 2004)

(Dubearnes, 2004). Des travaux sur la craie charentaise ont montré que des systèmes karstiques étaient développés à la base du Coniacien (Mouragues, 2000).

L'ouvrage étudié est un captage de source émergent en une vasque immergée dans le marais de Veillard, dans laquelle débouche un conduit karstique. Pour limiter le développement algal autour de la prise d'eau, un cuvelage en acier inoxydable entoure la vasque (Fig. 6), et sa base est ancrée par des fondations de béton coulées sur place (Fig. 7). Ces fondations présentent un défaut structurel, avec une ouverture à la base du captage, au contact fondation/calcaires santoniens. Le risque d'inversac, notamment en pompage semblait donc inéluctable.



Figure 6 : Captage de Puyrolland



Figure 7 : Défaut structurel à la base du captage (vue sur le marais à l'extérieur depuis l'intérieur)

Pour vérifier l'occurrence d'intrusion d'eau du marais dans le captage, une sonde de mesure de la chlorophylle-a été installée dans le captage et une deuxième dans le marais, à l'extérieur immédiat du cuvelage. Le suivi a eu lieu entre le 27 août et le 14 octobre 2021, en exploitation normale et incluant un test ponctuel de pompage à 300 m<sup>3</sup>/h. Les mesures étaient programmées



au pas de 5 min et la précision est de  $0.025\mu\text{g/L}$ . En parallèle, les niveaux d'eau du marais et de la nappe furent enregistrés en continu. Les résultats montrent des niveaux moyens journaliers très proches sans tendance observable (Figure 8).

La Figure 9 met en évidence les fortes variations de chlorophylle dans le marais, avec des teneurs qui peuvent dépasser ponctuellement plus de  $2\text{ mg/L}$ . Dans le captage, aucune variation n'est observable et toutes les valeurs enregistrées sont inférieures à  $1\mu\text{g/L}$ . Le suivi de la chlorophylle-a permet de conclure à l'absence d'intrusion d'eau superficielle dans le captage de Puyrolland pendant la période de basses eaux 2021.

### Conclusions

L'utilisation de la mesure de la chlorophylle-a sur les émergences karstiques est une méthode adaptée pour tracer les arrivées d'eau

eutrophisées depuis des eaux superficielles stagnantes. La méthode permet l'observation de phénomènes d'inversac avec de faibles gradients hydrauliques entre les masses d'eau. La simplicité de la mesure et sa facilité à être mise en œuvre en font un outil efficace de surveillance et d'alerte d'intrusion d'eau superficielle dans les systèmes souterrains karstiques qui peut être déployé dans les captages d'eau potable.

### Références bibliographiques

**Bakalowicz, M. 2005.** Karst groundwater : a challenge for new ressources. *Hydrogeology Journal*. 2005, 13(1) : 148-160.

**Chen, Z., et al. 2017.** The World Kasrt Aquifer Mappingprojetc : concept, mapping procedure and map of Europe. *Hydrogeology Journal*. 2017, 25 : 771-785.

**Corbier , P. 2000.** *Mise en évidence d'une alimentation des aquifères poreux plio-quaternaires par les massifs karstiques de bordure, Etude des relations entre la côte et l'arrière-côte dijonnaises et la Plaine de Bresse.* s.l. : Thèse Université de Bourgogne, 2000.

**Dewaide, L., et al. 2016.** Solute transport in heterogeneous karst systems : dimensioning andestimation of the transport parameters via multi-sampling tracer tests modelling using the OTIS (One-dimensional Transport with Inflow and Storage) program. *Journal of Hydrology*. 2016, 534 : 567-578.

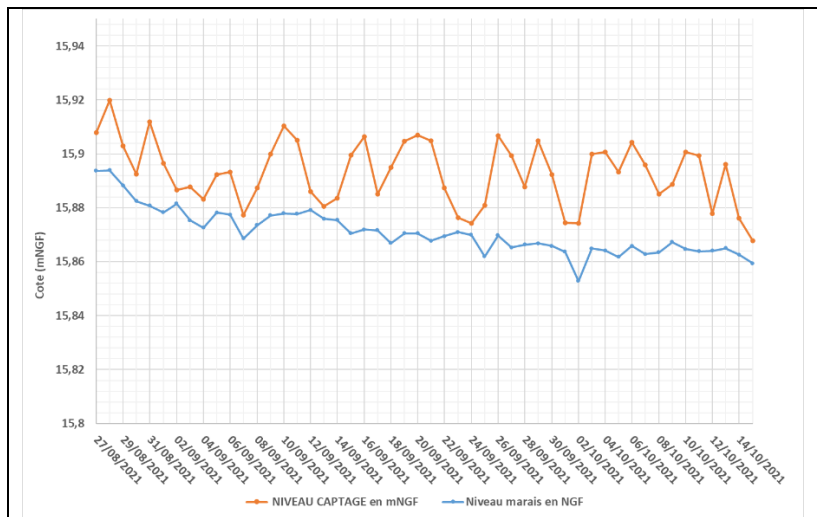


Figure 8 : Niveaux du marais et dans le captage

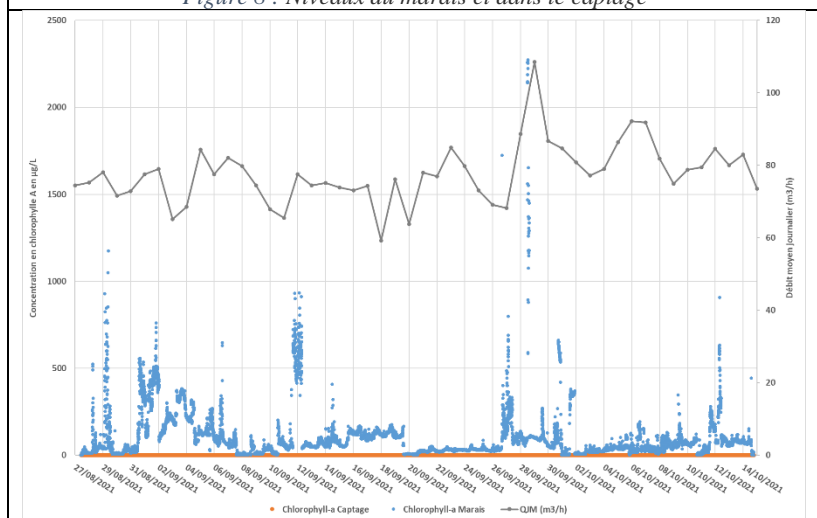


Figure 9 : Chlorophylle-a dans le marais et le captage et débit moyen journalier

**Dubearnes, B. 2004.** *SIAEP de SEGONZAC, Captage de Puyrolland, Etude de risques de pollution.* 2004. D3085.

**Ford., D. et William, P. 2007.** *Karst hydrogeology and geomorphology.* Chister, UK : Wiley, 2007.

**Gaillard, T., et al. 2020.** Use of Chlorophyll-a Monitoring to Determine Karst–River Relationships: A Case Study in the Karstic Limestones of Ouche Valley, Burgundy (France). [éd.] Springer. *In: Bertrand, C., Denimal, S., Steinmann, M., Renard Eurokarst 2018, Besançon. Advances in Karst Science.* 2020, pp. 69–76.

**Goldscheider, N., et al. 2008.** Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *Jouranal of Applied Geophysics/International Journla of Speleology.* 2008, 37 (1): 27-40.

**Hunkeler, D. et Mudry, J. 2007.** Hydrochemical methods. [auteur du livre] N. Goldscheider et D. Drew. *Methods in karst hydrogeology.* London : Taylor&Francis, 2007.

**Lichtenthaler, H.K., et al. 1981.** Photosynthetic activity chloroplasts ultrastructure and leaf characteristics of higt-light and low-light plants and of sun and shade leaves. *Photosynth. Res.* 1981, 2 : 115-141.

**Loaiciga, H.A., Maidment, D.R. et Valdes, J.B. 2000.** Climate-change impacts in a regional karst aquifer, Texas, USA. *Journal of Hydrology.* 2000, 227 : 173-194.

**Mangin, A. 1984.** Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology.* 1984, 67 : 25-43.

**Mouragues, N. 2000.** *Caractérisation et vulnérabilité d'un hydrosystème complexe sub-profond associé à la structure anticlinale de Jonzac (Charente-Maritime.* s.l. : PhD Thesis, Université Bordeaux I, 2000.

**Padilla, A. et Pudillo-Bosch, A. 1995.** Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *Journal of Hydrology.* 1995, 168 : 73-89.

**Service Régional de l'Aménagement des Eaux Poitou-Charentes. 1975.** *Syndicat Intercommunal de la Région de Segonzac - Charente-Alimentation de la source de Puy Rolland.* 1975. S.R.A.E 16-056.

**Valadier, A. 1995.** *Etude environnementale préalable à la définition des périmètres de protection.* 1995. HI 9509111NF.

**Yuan, D. 1997.** Sensitivity ok karst process to environmental change along the PEP II transect. *Quaternary International.* 1997, 37 : 105-113.