

Estimation de la fonctionnalité du karst à partir des enregistrements *CTD* des sources : application à la paramétrisation de la vulnérabilité des aquifères

A. Fournillon, B. Arfib et J. Borgomano

Aix-Marseille Univ, CEREGE Centre Saint-Charles,
3, Place Victor Hugo (Case 67), 13331 Marseille cedex 3, France.
afournillon@gmail.com, arfib@cerege.fr

Résumé

Sur le pourtour méditerranéen, les aquifères karstiques sont souvent l'unique ressource en eau souterraine locale. En dehors de tout problème d'intrusion saline, les ressources karstiques sont fragiles, du fait du transfert rapide à travers les vides karstiques de grande dimension. Afin de mieux contraindre les risques de pollutions des ressources en eau karstique, les gestionnaires des milieux doivent recourir à l'établissement de cartes de vulnérabilité. La fonctionnalité du karst est un des paramètres essentiels nécessaire pour leur paramétrisation. Il est proposé dans ce travail une nouvelle méthode pour caractériser cette fonctionnalité. Cette méthode est basée sur une conversion des variations de hauteur, température et conductivité électrique des sources en une image RGB représentative du fonctionnement de la source. L'image ainsi obtenue permet visuellement de caractériser la fonctionnalité du karst. La méthode basée RGB est comparée et validée avec d'autres méthodes plus classiques de traitement du signal. Cette méthode se veut une aide aux gestionnaires pour la caractérisation de la présence de karst, et dans la phase de paramétrisation des cartes de vulnérabilité.

Mots-clés : fonctionnalité du karst, RGB, CTD, vulnérabilité des aquifères karstiques

I. Introduction

Les roches carbonatées sont largement affleurantes sur le pourtour méditerranéen. Elles constituent des aquifères aux propriétés karstiques, renfermant des vides de grande dimension qui permettent un transfert rapide de l'eau et des polluants, parfois jusqu'à des vitesses de plusieurs kilomètres par jour. Sur la frange littorale, les aquifères sont sujets à l'intrusion saline. Les sources côtières peuvent être naturellement saumâtres, émergeant à terre ou sous-marines (Fleury, 2007), et sont inutilisables sans un traitement préalable par désalinisation. La ressource en eau souterraine est alors localisée plus amont, dans les zones non influencées par l'intrusion saline. Dans un contexte d'aquifères carbonatés, la ressource est limitée à ces aquifères karstiques.

Malgré tout, en dehors de toute intrusion saline, les aquifères karstiques sont par leur nature très sensibles aux pollutions. La mesure de leur vulnérabilité repose sur des méthodes semi-quantitatives et cartographiques (Yildirim & Topkaya, 2007). Ces méthodes ont été développées récemment au cœur de projets européens (e.g. COST 620, 2003) et français (e.g. Dörfliger & Plagnes, 2009). Les cartes de vulnérabilité sont effectuées en intégrant géographiquement des facteurs pondérés. Ces facteurs visent à synthétiser les informations concernant l'aquifère et les risques : environnement de l'aquifère, structure, infiltration, effet réservoir de la roche ou encore fonctionnalité du karst. La plupart de ces méthodes donne un poids important au paramètre K qui est une mesure de l'intensité de la fonctionnalité de l'aquifère (e.g. Andreo et al., 2009 ; Dörfliger & Plagnes, 2009). Ainsi la méthode PaPRIKa (Dörfliger & Plagnes, 2009), qui est la méthode recommandée en France pour les collectivités territoriales (Muet & Vier, 2011), fait intervenir le degré de fonctionnalité du karst Ka avec un des poids les plus importants. Le paramètre Ka est apprécié à partir de l'enregistrement de paramètres sur des sources ou des puits. Il est obtenu soit de manière qualitative (Muet & Vier, 2011) soit quantitative en se basant sur les analyses des courbes de récessions (Mangin, 1970) ou corrélatoires et spectrales (Marsaud, 1997).

Le but de ce travail est de proposer une méthode à mi-chemin entre les approches purement qualitatives et les approches quantitatives pour la mesure de la fonctionnalité du karst. D'une part, les méthodes purement qualitatives souffrent d'un manque de précision dans l'analyse décisionnelle. D'autre part, les méthodes quantitatives reposent sur des approches qui peuvent être complexe pour des collectivités territoriales et qui nécessitent la connaissance des débits des sources en continu. La méthode proposée se base sur l'intégration de trois paramètres, hauteur d'eau, température et conductivité électrique enregistrés en continu aux sources. Cette intégration se fait sous la forme d'une image représentant le fonctionnement de la source au cours du temps. A partir de cette image, il est ensuite aisé de déterminer la valeur de la fonctionnalité du karst sur une échelle semi-quantitative. Pour des applications nécessitant une connaissance approfondie de l'aquifère karstique, cette méthode peut également servir d'étape décisionnelle préliminaire. Les résultats, obtenus sur une source karstique du sud de la France, sont comparés et discutés au regard de méthodes déjà utilisées.

II. MATERIEL ET METHODE

II.1 Matériel

Cette étude est basée sur l'analyse de sources de l'Unité du Beausset qui se situe entre Marseille et Toulon dans le SE de la France. Cette unité est un synclinal mésozoïque à cœur crétacé supérieur avec des terrains allant jusqu'au Trias. Il est caractérisé par de nombreuses sources sur sa bordure est drainant des massifs calcaires et dolomitiques crétacés et jurassiques. La source Werotte qui sourd à Solliès-Toucas (Var, SE France) a été suivie toutes les 15 mn en continu avec une sonde STS DL/N 70 mesurant les paramètres CTD : conductivité électrique (*Conductivity*), température (*Temperature*) et hauteur d'eau (*Depth*). Elle jaillit dans des dolomies sucrosiques à la limite Hettangien – Rhétien.

II.2 Méthode

Avec peu d'expérience, la lecture des enregistrements CTD peut s'avérer ardue. En effet, il faut intégrer les variations concomitantes de trois paramètres. La méthode proposée repose sur une lecture directe et visuelle de ces trois paramètres intégrés sous la forme de variations de couleur. A chaque pas de temps, l'image obtenue représente la contribution de chaque paramètre CTD à l'établissement d'une couleur. Une image numérique en couleur est caractérisée par un codage (Cristobal et al., 2011). Il existe différents type de codage tels le CMY ou le RGB. Ce dernier est utilisé ici car il représente un des codages les plus usités, tous domaines confondus et un des plus simples (Campbell & Wynne, 2011).

Le codage d'une image RGB consiste en une synthèse additive de trois couleurs : rouge, vert et bleu (*Red, Green, Blue* -RGB-). Chacune de ces couleurs varie entre 0 et 255. Le blanc est caractérisé par la synthèse totale des couleurs, RGB (255, 255, 255), et le noir par aucune valeur, RGB(0, 0, 0). Une couleur se retrouve par la contribution respective des trois paramètres R, G et B dans un triangle de Maxwell (Cristobal et al., 2011) comme celui représenté dans la figure 1.

Pour transformer les variations des trois paramètres CTD en une image RGB, chacun est d'abord associé à une couleur. Dans ce travail, la hauteur est associée au rouge, la température au vert et la conductivité électrique au bleu. Les couleurs RGB variant entre 0 et 255, chaque série CTD doit être bornée entre ces deux valeurs : le minimum et le maximum de chaque série deviennent ainsi respectivement 0 et 255. A chaque pas de temps, la valeur de couleur est donc obtenue par la contribution relative des trois paramètres CTD variant entre 0 et 255 (figure 1). L'image finale permet ainsi de comprendre quel paramètre parmi les trois CTD joue le plus grand rôle à chaque pas de temps. Cette image représente donc une mesure en continu des variations des propriétés dynamiques de l'aquifère. L'impact des crues, caractéristique des aquifères karstiques, apparaît directement en terme de fréquence, d'intensité et de durée. Cela permet ainsi de quantifier simplement la fonctionnalité du karst pour déterminer le paramètre K des études de vulnérabilité. Cette méthode est rapide à mettre en œuvre. Il suffit d'un simple tableur pour obtenir les images colorimétriques des sources. Les couleurs RGB sont créées directement dans Excel 2010® à l'aide d'un script, disponible aisément sur internet. Cette méthode a également l'avantage de pouvoir être appliquée sur des séries très discontinues. Pour valider la méthode proposée ici, ces résultats sont comparés avec des méthodes déjà établies. L'hydrogramme des hauteurs d'eau a été analysé, pour la

période du 01/11/09 au 21/12/09, en termes de décrue pour voir les différents médias portant l'écoulement (Shevenell, 1996). La réponse impulsionnelle de la source Werotte a été calculée pour la période du 12/03/09 au 18/03/11. Cette dernière méthode correspond à l'analyse par des corrélogrammes croisés pluie-paramètres CTD de la réponse de l'aquifère face aux précipitations (Marsaud, 1997). Plus cette réponse est brève et intense, plus le karst de l'aquifère est considéré comme fonctionnel (Padilla & Pulido-Bosch, 1995).

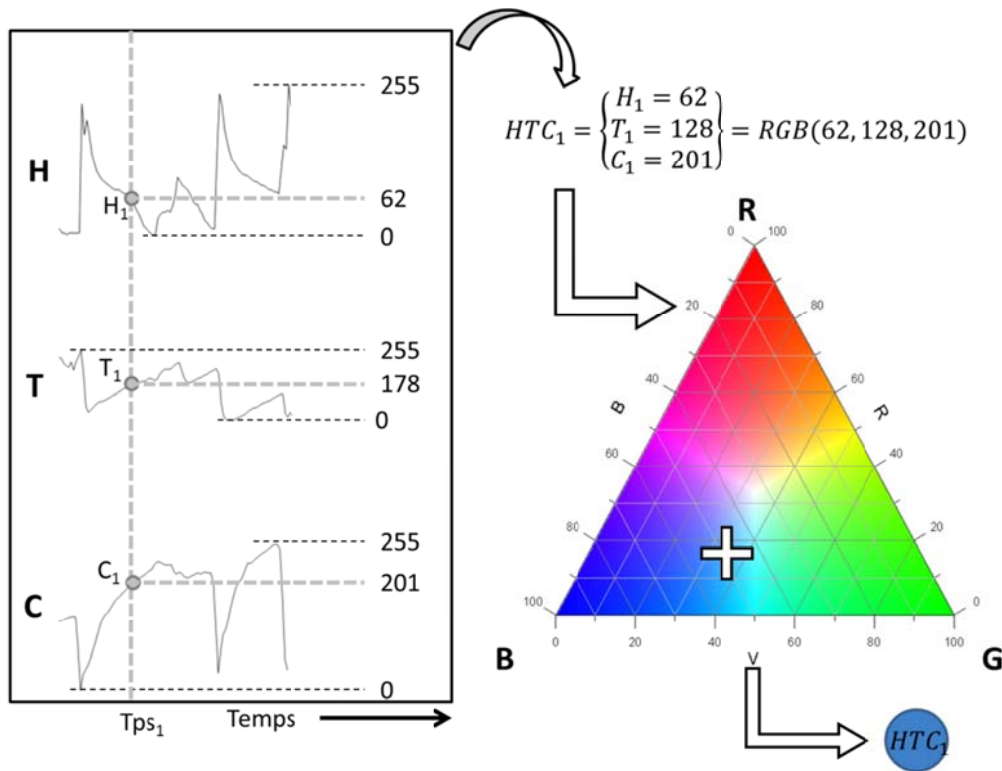


Figure 1 - Extraction ponctuelle d'une propriété couleur RGB à partir des valeurs de hauteur, température et conductivité électrique d'une série temporelle CTD. La hauteur est ici associée au rouge, la température au vert et la conductivité électrique au bleu.

III. Résultats de la méthode basée RGB

L'image RBG du cycle hydrologique de la source Werotte a été construite par la synthèse additive de la hauteur d'eau représentée par une variation de rouge, celle de la température par une variation de vert et la conductivité électrique par une variation de bleu (figure 2). Les trois paramètres montrent des comportements différents. Leur lecture se fait par comparaison de leur variation indiquée par le passage de couleurs foncées, les valeurs faibles, à des couleurs claires, les valeurs fortes.

La hauteur d'eau est caractérisée, la majeure partie du temps, par une valeur basse soulignée par une couleur rouge foncée. Cette faible valeur représente le débit de base. Elle est entrecoupée par des crues soudaines qui sont concentrées dans la période de novembre 2009 à mars 2010. Ces crues sont visibles par le passage au rouge clair. Le signal de température est caractérisé par deux périodes de température élevée, indiquée par un vert clair, séparées par une période de température basse, en vert foncé. Cela correspond aux deux périodes d'étiage et à la période de hautes eaux. Le passage de l'étiage aux hautes eaux se fait de manière progressive sur deux mois. Durant les hautes eaux, les crues impactent peu la température. Le signal de conductivité électrique a un comportement proche de celui de la température, si ce n'est que l'étiage est marqué par une baisse de la conductivité et les hautes eaux par une augmentation de celle-ci. Par contre, les crues sont fortement marquées sur ce signal par l'apparition de bandes bleues foncées.

La synthèse des trois couleurs permet de voir le fonctionnement général de la source en une seule image. Les deux périodes d'étiage sont matérialisées par des couleurs vertes et bleues, montrant ainsi que la hauteur d'eau est faible. Une différence entre les deux périodes d'étiage est même visible par leur différence de couleur, vert pour le premier et turquoise pour le deuxième. La période de hautes eaux est signalée par l'apparition de bandes de couleur rouge caractéristique de l'augmentation de la hauteur, et donc de crues.

Un diagnostic de la fonctionnalité du karst peut être établi en fonction de la morphologie des crues (Shevenell, 1996). Dans les milieux karstiques fonctionnels, celles-ci sont instantanées avec une décroissance plus ou moins lente. Le fait d'ajouter les paramètres de température et de conductivité à la hauteur d'eau permet de caractériser plus finement le mode de chaque crue. Durant les hautes eaux, les crues de la source Werotte sont dominées par les variations de hauteur comme le souligne les bandes rouges (figure 2). Ces crues sont très brusques : la transition de couleur est franche du bleu au rouge. La décroissance est plus lente et dure quelques jours, soulignée par un passage du rouge au violet et au bleu. Les crues durant l'étiage apporte des éléments différents sur le fonctionnement de l'aquifère : les crues sont moins intenses dominées par un effet piston sur la température et leur décroissance est beaucoup plus lente.

L'image RGB de la source Werotte permet d'établir que le karst de l'aquifère est très fonctionnel permettant des crues intenses. Le comportement des crues durant l'étiage précise cependant l'existence d'une porosité double : un karst fonctionnel conduisant les eaux d'infiltrations rapides et un milieu plus inertiel avec une réserve donnant des effets tampons au cours des étiages. Selon la classification de la fonctionnalité du karst de la méthode PaPRIKa (Dörfliger & Plagnes, 2009), la source Werotte est un karst uniaire très fonctionnel et a donc un Ka de 3. La méthode basée RGB permet également de préciser l'existence d'un effet « réservoir de l'aquifère » ce qui pourrait influencer sur le paramètre de réserve R de PaPRIKa. Ce paramètre quantifie l'effet rétention des milieux traversés.

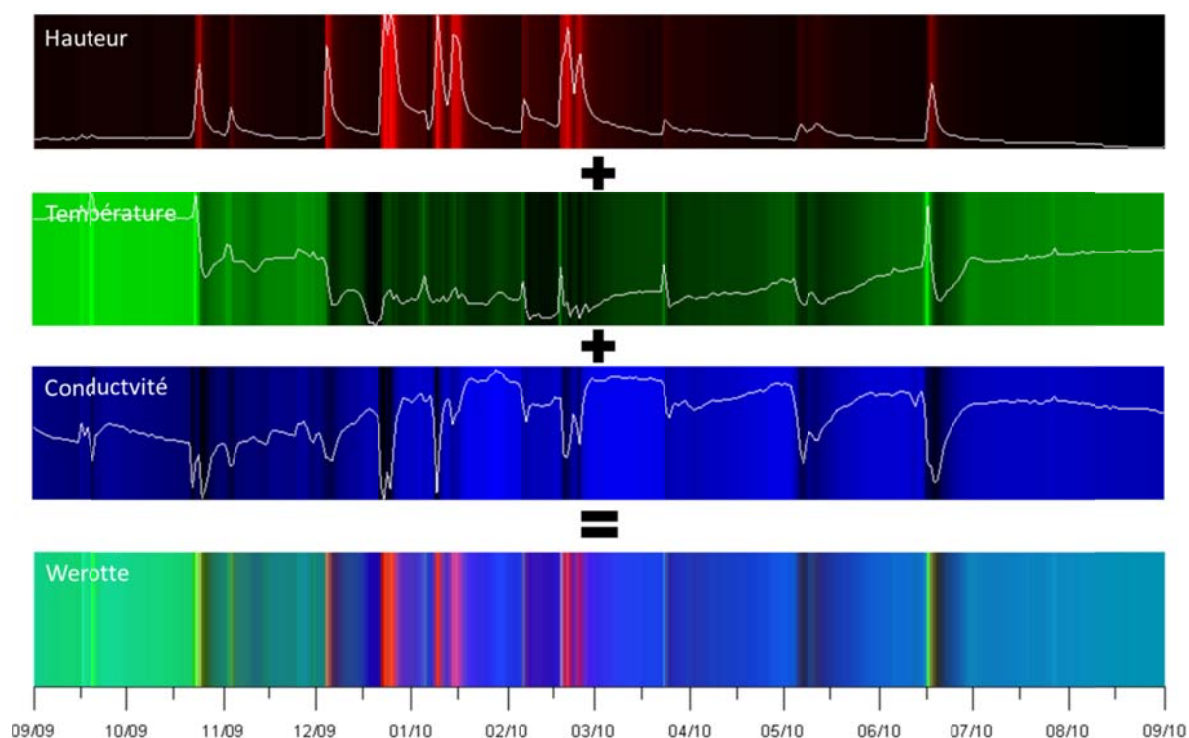


Figure 2 - Synthèse additive des trois paramètres CTD transformés en RGB pour la construction de l'image représentative du fonctionnement de la source Werotte pour le cycle hydrologique de septembre 2009 à 2010. Les variations de chaque paramètre sont dessinées en blanc pour leur couleur correspondante pour faciliter l'interprétation.

IV. Validation et conclusion

La méthode basée RGB indique un karst très fonctionnel pour la source Werotte associé à un autre type de porosité et perméabilité plus inertiel. Deux crues du début des hautes eaux de cette source ont été analysées en termes de décroissance (figure 3A). Cette analyse montre la présence de trois segments sur la décroissance de la courbe de hauteur exprimée en logarithme népérien. Ces segments sont caractéristiques d'un milieu à triple porosité (Shevenell, 1996). Les segments λ_1 et λ_1' sont caractéristiques des eaux circulant dans les conduits, plus ceux-ci sont pentés plus le karst est fonctionnel. Les segments λ_2 et λ_2' représentent un milieu intermédiaire lié aux fractures, à la matrice ou à un karst peu fonctionnel. Et les segments λ_3 et λ_3' sont caractéristiques de la matrice. La décomposition des décroissances montrent la même chose que la méthode RGB : un karst très fonctionnel associé à un autre milieu plus inertiel.

La méthode PaPRIKa recommande l'utilisation des analyses corrélatoires et spectrales pour établir la fonctionnalité du karst. La pluie pouvant être assimilé à un bruit blanc, le corrélogramme croisé pluie-paramètre est la réponse impulsionnelle de ce paramètre (Padilla & Pulido-Bosch, 1995). Plus le premier pic de corrélation est intense et plus la corrélation est faible pour les pas suivants, plus le karst est fonctionnel. La figure 3B expose les corrélogrammes croisés pluie-CTD de la source Werotte. Les corrélogrammes croisés pluie-hauteur et pluie-conductivité montrent une réponse impulsionnelle très intense typique des aquifères très karstiques (Padilla & Pulido-Bosch, 1995). La réponse impulsionnelle de la température est moins intense illustrant ainsi un milieu plus inertiel (Padilla & Pulido-Bosch, 1995). Les corrélogrammes croisés permettent de parvenir aux mêmes conclusions que les méthodes RGB et la décomposition des hydrogrammes.

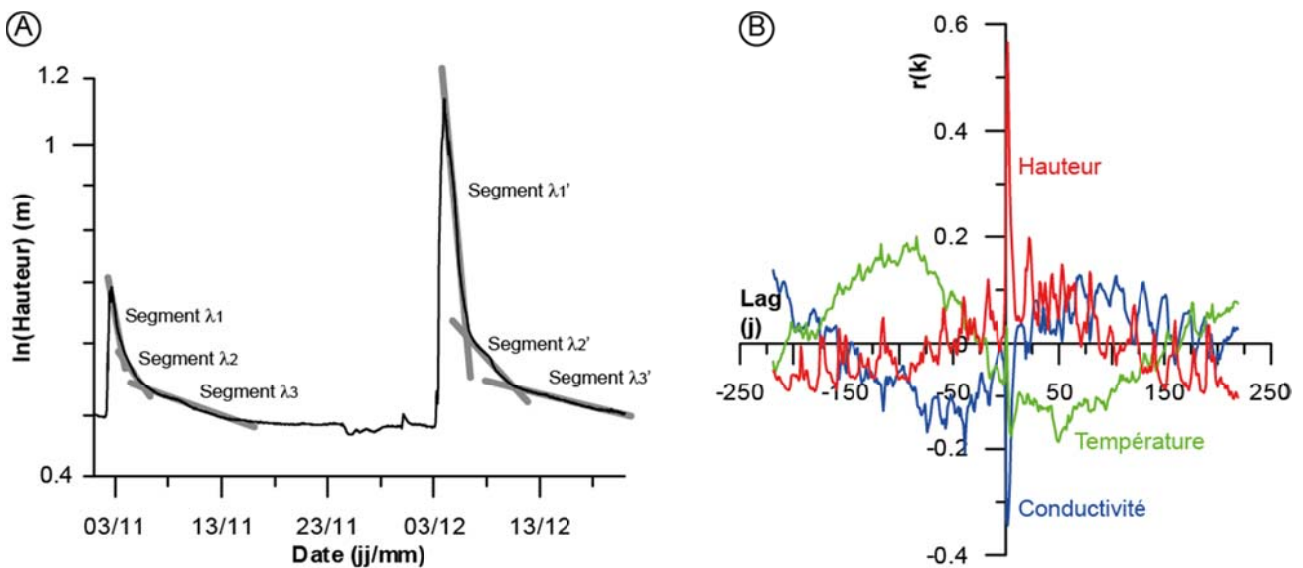


Figure 3 – Différentes approches de la mesure de la fonctionnalité du karst de la source Werotte. (B) Décomposition de décroissances dans l'hydrogramme au pas de temps de 15 mn pour la période du 01/11/09 au 21/12/09. (A) Corrélogrammes croisés pluie-CTD au pas de temps journalier pour la période du 12/03/09 au 18/03/11.

La méthode RGB permet de caractériser un aquifère karstique en termes de fonctionnalité de manière rapide et simple. Les précisions apportées sont comparables à celles apportées par d'autres analyses plus classiques. L'intérêt d'utiliser les paramètres CTD en lieu du seul débit est à la fois d'utiliser des paramètres plus simples à acquérir en continu et d'obtenir des informations plus précises sur le fonctionnement des aquifères. Cette méthode pourrait être intégrée dans des stratégies de protection des ressources karstiques comme aide décisionnelle a priori. Elle peut s'intégrer dans une pré-phase de diagnostic sur la caractérisation de la présence de karst, et dans la phase de paramétrisation des cartes de vulnérabilité.

Remerciements

Cette étude fait partie 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-Côte d'Azur. Les auteurs remercient également Madeleine Werotte pour l'autorisation d'équipement de la source éponyme.

Références bibliographiques

- Andreo B., Ravbar N., Vias J.M., 2008 – Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: application to pilot sites. *Hydrogeology Journal*, 17, p. 749-758.
- Campbell J.B., Wynne R.H., 2011. Introduction to Remote Sensing. *The Guilford Press, New-York – London*, 718 pp.
- Cristobal G., Schelkens P., Thienpoint H. (eds), 2011 – Optical and Digital Image Processing. Fundamentals and Applications. *Wiley – VCH, Weinheim*, 939pp.
- Dörfliger N., Plagnes V., 2009 – Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. Avec la collaboration de K. Kavouri et J. Gouin. *BRGM rapport RP-57527-FR*, 105pp.
- Fleury P., Bakalowicz M., Marsily de G., 2007 - Submarine springs and coastal karst aquifers: A review. *Journal of Hydrology* 339, 79– 92
- Mangin A., 1970 – Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et tarissement. *Annales de Spéléologie*, 25, 3, p. 581-610.
- Marsaud B., 1997 – Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. *Documents du BRGM* 268, 301pp.
- Muet P., Vier E., 2011 – Stratégies de protection des ressources karstiques utilisées pour l'eau potable. Guide Pratique. *Ginger Environnement et Infrastructures, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse et Agence de l'Eau Adour-Garonne*, 84pp.
- Padilla A., Pulido-Bosch A., 1995 – Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *Journal of Hydrology*, 168, p. 73-89.
- Shevenell L., 1996 – Analysis of well hydrographs in a karst aquifer: estimates of specific yields and continuum transmissivities. *Journal of Hydrology*, 174, p. 331-355.
- Yildirim M., Topkaya B., 2007 – Groundwater Protection : A Comparative Study of Four Vulnerability Mapping Methods. *Clean*, 35, 6, p. 594-600.
- Zwahlen F. (ed), 2003 – COST Action 620 Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. *European Commission Report EUR 20912*, 297 pp.