

Le site de la sortie de secours du Laboratoire souterrain à bas bruit, à Rustrel. Photo : Simon Carrière

Étude de la recharge des hydrosystèmes karstiques à l'échelle de la parcelle : modélisation et analyse de corrélation

Site du Laboratoire souterrain à bas bruit de Rustrel

Simon Damien CARRIERE^{*}, Charles DANQUIGNY^{**}, Florence COURDIER, Nicolas MARIOTTE^{***},
Konstantinos CHALIKAKIS^{***}, Hendrik DAVI^{***}, Chloé OLLIVIER^{***}, Nicolas K. MARTIN-STPAUL^{***},
Daniel BOYER^{****}, Christophe EMBLANCH^{***}

RÉSUMÉ

La caractérisation des flux d'eaux qui rechargent ré-
ellement les hydrosystèmes souterrains reste un frein à la
compréhension du fonctionnement hydrogéologique
des milieux souterrains. Lors d'événements pluvieux,
quelle part de l'eau est évapo-transpirée? Quelle part
est temporairement stockée dans le sol? Ces incertitudes
sont particulièrement fortes dans le cas de la recharge
des milieux hétérogènes tel que le karst. En général,
les calculs de recharge des hydrosystèmes karstiques
se basent sur une représentation simplifiée de l'évapo-
transpiration qui considère seulement le climat et pas
le fonctionnement de la végétation. Dans cette étude,
un modèle de végétation permettant de simuler les
transferts d'eaux entre le sol et l'atmosphère en contexte
forestier (le modèle CASTANEA), a été appliqué à une
parcelle de Chêne vert. L'infiltration efficace (un indi-
cateur de la recharge) estimé avec CASTANEA a été
comparée à celle estimée par des approches classiques
ainsi qu'à des séries long terme de flux d'eaux sou-
terraines (9 années). Les résultats de cette analyse révèlent
que l'infiltration efficace modélisée à partir d'un modèle
de végétation comme CASTANEA est plus satisfaisante
que les approches classiques ne tenant pas compte du
fonctionnement de la végétation. Ce travail ouvre des
perspectives intéressantes pour mieux tenir compte du
fonctionnement de la végétation et de l'usage du sol sur
la recharge des hydrosystèmes karstiques.

Mots-clés: hydrogéologie, recharge, karst, corrélation,
CASTANEA, Fontaine de Vaucluse, LSBB.

TITLE

*A study of karst hydrosystem recharge at the parcel
scale, using modeling and correlation analysis - Low
noise underground laboratory of Rustrel site.*

ABSTRACT

*Assessing the recharge of underground hydrosystems remains
an obstacle to understand their hydrogeological function-
ing. During a rain event, which part of the rain is evapo-
transpired? And how much is temporarily stored within
the soil? These questions are particularly relevant in hete-
roogeneous media such as karst hydrosystems. Currently, the
models used to compute recharge of karst hydrosystems, rely
on simplistic formulations of evapotranspiration that do not
account for vegetation functioning. In this study, we used
the vegetation process based model CASTANEA, which is
designed to compute water transfer between soil, plant and
atmosphere. We computed effective infiltration (an index of
recharge) with CASTANEA and with other classical ap-
proach (based on precipitation minus ETP), and for a well-
documented holm oak site in Provence. Our results provide
evidences that effective infiltration computed with CASTA-
NEA yield more satisfactory correlation with measured out-
flow than simulations based on the classical approach. Our
results provide a promising way to improve the simulation of
karst hydrosystem recharge.*

Keywords: hydrogeology, recharge, karst, correlation,
CASTANEA, Fontaine de Vaucluse, LSBB.

^{*} UMR 1114 EMMAH, INRA, Domaine Saint Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon, France – contact : simon.carriere@alumni.univ-avignon.fr

^{**} UMR 1114 EMMAH, UAPV, 301 rue Baruch de Spinoza BP 21239, 84916 Avignon, France.

^{***} UR629, URFM, INRA, Domaine Saint Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon, France.

^{****} Laboratoire souterrain à bas bruit de Rustrel Pays d'Apt, CNRS/UMS 3538, La grande Combe, 84400 Rustrel, France.

1. INTRODUCTION

Les hydrosystèmes karstiques sont des milieux hétérogènes et complexes (Ford & Williams, 2007) dont le fonctionnement reste mal connu (Bakalowicz, 2005). Dans le contexte de changement global et d'augmentation de la pression sur la ressource en eau, il est nécessaire de mieux comprendre le fonctionnement de ces systèmes afin de mieux les exploiter dans les années à venir.

L'estimation de la recharge des aquifères (ou infiltration efficace) est une tâche difficile et particulièrement complexe en milieu hétérogène comme le karst. Cependant, caractériser le flux entrant dans l'hydrosystème souterrain est primordial pour comprendre son fonctionnement hydrogéologique.

Il existe deux types d'approches pour déterminer l'infiltration efficace, l'une expérimentale et l'autre par modélisation. Expérimentalement, il est possible d'évaluer la recharge en mesurant deux termes du bilan hydrique en complément des précipitations : l'**évapotranspiration** qui peut être mesurée par une tour à flux et le ruissellement qui peut être mesuré avec un système de récolte des eaux de **ruissellement**. Cependant, cette approche onéreuse est longue à mettre en œuvre. Autrement, il est possible de modéliser le bilan hydrique à partir des données météorologiques avec des modèles plus ou moins complexes. L'optimum est souvent obtenu en croisant les deux approches, la première permettant de mieux contraindre la deuxième.

À travers cet article, nous souhaitons démontrer qu'il est possible de modéliser plus précisément la recharge des aquifères en prenant mieux en compte les processus qui s'opèrent au niveau du couvert végétal et dans les premiers horizons du sous-sol. Nous souhaitons quantifier cette amélioration en comparant plusieurs modes de calcul.

Sur le site expérimental sélectionné, des estimations de l'infiltration efficace ont déjà été réalisées par le passé. Par exemple, Barbel-Perrineau (2013) a calculé l'infiltration efficace selon la formule de Riou (1980) combiné à un terme de réserve utile (20 mm) définis par Puig (1989). La modélisation de l'infiltration efficace réalisée dans cet article sera donc comparée à ces calculs. Dans un premier temps, les calculs seront comparés sur le plan quantitatif pour évaluer la variation annuelle cumulée entre les modes de calcul. Dans un second temps, nous comparerons les chroniques sur le plan statistique pour déterminer laquelle est la plus satisfaisante pour modéliser l'infiltration efficace.

2. LE SITE EXPÉRIMENTAL

Le site expérimental sélectionné pour mener à bien cette étude est localisé au niveau de la sortie de secours du Laboratoire souterrain à bas bruit de Rustrel (LSBB; www.lsbb.eu), au nord du Parc naturel régional du Luberon. La zone se situe dans un contexte géologique de calcaire karstifié appartenant au périmètre d'alimentation de la Fontaine de Vaucluse (Fig. 1A). Le site expérimental est exceptionnel car il est situé au-dessus d'une galerie du LSBB dans laquelle les dynamiques des points d'écoulement d'eau sont suivies depuis 2003. Quatre points d'écoulement sont permanents et 58 sont temporaires. L'étude des points d'écoulement a fait l'objet de plusieurs thèses qui ont eu pour but de comprendre le fonctionnement hydrogéologique du massif et de développer des techniques de traçage naturel (Garry, 2007; Blondel, 2008; Barbel-Perineau, 2013).

Le point d'écoulement D se situe au droit du site expérimental, à 33 m de profondeur. Il informe sur la dynamique des flux d'eau dans le sous-sol. Le site a été investigué par plusieurs techniques géophysiques afin de comprendre sa structure (Carrière *et al.*, 2013) et son fonctionnement hydrogéologique (Carrière *et al.*, en prép.). L'interprétation de ces investigations géophysiques est synthétisée par le bloc diagramme présenté dans la figure 1D.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Afin d'améliorer la connaissance de la recharge de l'hydrosystème local, nous avons modélisé l'infiltration efficace avec le modèle CASTANEA (Davi *et al.*, 2005; Dufrière *et al.*, 2005), initialement développé pour modéliser les échanges d'eau et de carbone entre le sol, les plantes et l'atmosphère (cf. partie III.2). Pour paramétrer ce modèle nous avons réalisé un inventaire forestier qui a permis de déterminer les caractéristiques locales de la forêt. Pour tester l'amélioration apportée par cette nouvelle modélisation, nous avons étudié les corrélations entre le flux calculé par le modèle et le flux mesuré au niveau du point D. Compte-tenu de la faible profondeur du point D, la dynamique de ce dernier est supposée représentative de l'infiltration efficace avec un temps de retard.

1. Bases de données qui s'étalent dans le temps.

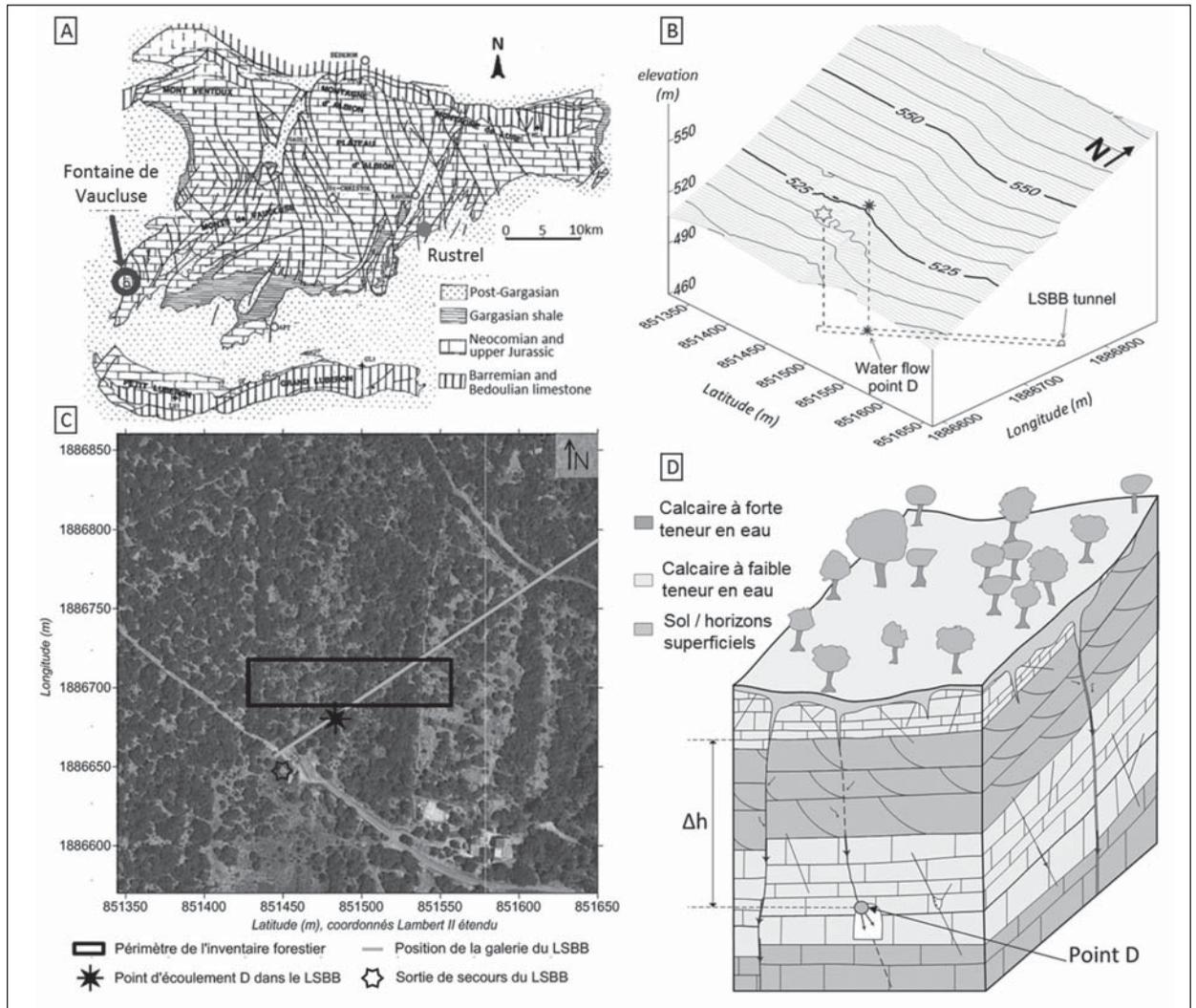


Fig. 1: le site expérimental de la sortie de secours du LSBB. (A) Localisation du site dans l'hydrosystème de Fontaine de Vaucluse sur fond de carte géologique simplifiée (Puig, 1989). (B) Localisation topographique pseudo 3D du site. (C) Localisation du site sur fond de photo aérienne. (D) Synthèse de la structure géologique et du fonctionnement hydrogéologique du site.

3.1. L'inventaire forestier

L'inventaire a été réalisé sur une placette représentative du peuplement, orientée Est/Ouest de manière à recouper les grands linéaments forestiers. La placette s'étend sur 126 m dans l'axe Est/Ouest et 30 m dans l'axe Nord/Sud (Fig. 1C), soit sur 3780 m².

Durant l'inventaire, 881 individus ont été recensés avec une dominante de chênes verts représentant 86 % de la surface terrière² totale. D'autres essences ont été observées, avec par

ordre décroissant d'importance numérique: Buis, Amélan-chier, Genévrier oxycèdre, Nerprun alaterne, Pistachier lentisque, Genévrier de Phénicie, Chêne pubescent et quelques pins d'Alep.

La position de chaque tige ou centre de cépée a été relevée avec un GPS différentiel (Fig. 2A). Pour chaque individu ou fourche basse d'individu, le diamètre ou la circonférence a été relevé à 1 m 30, sauf pour les buis qui ont été recensés dès 50 cm de hauteur.

2. Surface cumulée des sections de troncs mesurées classiquement à 1 m 30. Cette mesure permet d'estimer la biomasse que représente la forêt.

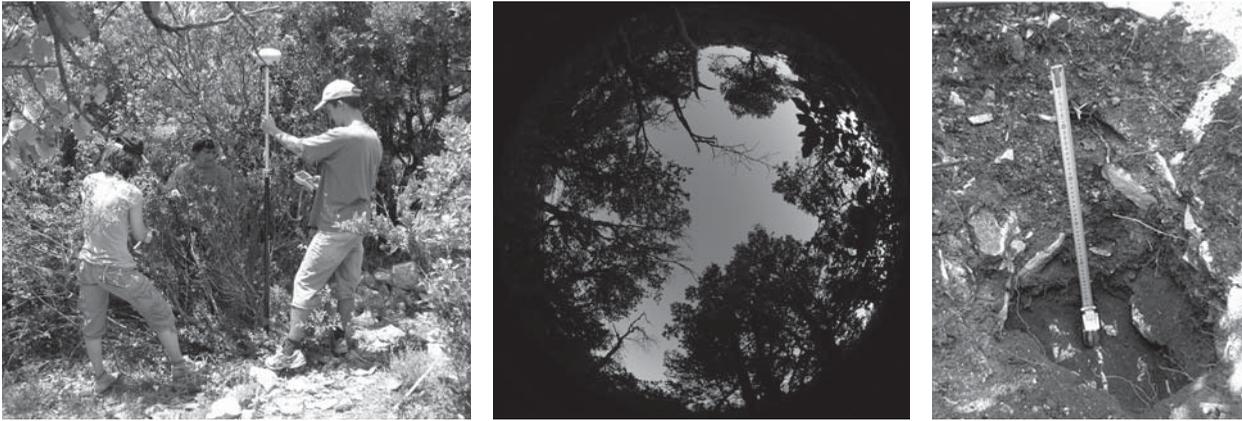


Fig. 2: inventaire forestier sur la placette de la sortie de secours du LSBB. (A) Prise de la position GPS de l'arbre et mesures du diamètre des fourches basses ; (B) Photographie hémisphérique ; (C) Fosse pour estimer la RUM.

Les mesures nécessaires pour l'estimation du LAI (Leaf Area Index)³ et de la biomasse foliaire ont été réalisées à l'aide de 46 photographies hémisphériques associées à 10 échantillonnages de rameaux de Chêne vert sur lesquels ont été mesurées les LMA (Leaf Mass Area)⁴. Trois fosses, représentatives de la disparité de la couverture de sol dans la zone, ont été ouvertes pour l'estimation de la RUM (Réserve Utile Maximale)⁵ selon la méthode de Baize & Jabiol (2011).

3.2. Le modèle CASTANEA

Le modèle CASTANEA a été développé pour modéliser les flux d'eau et de carbone entre le sol, les plantes et l'atmosphère ainsi que la croissance forestière (Dufrene et al 2005; Fig. 3). Ce modèle numérique considère un couvert forestier horizontalement homogène et verticalement stratifié afin de modéliser précisément les processus qui se produisent aux différents étages de la forêt. Ce modèle permet de déterminer l'infiltration efficace en prenant en compte plusieurs processus tels que l'interception de l'eau par la canopée, la transpiration des arbres, l'évaporation au niveau du sol et de la litière, le ruissellement de l'eau le long des troncs ou encore le stockage de l'eau dans le sol.

Le modèle de transpiration est basé sur l'équation de Penman-Monteith en y incluant la modélisation de la fermeture des stomates en fonction du degré de sécheresse du sol. CASTANEA a été validé dans un contexte climatique et géologique semblable (forêt méditerranéenne de Chêne vert) sur le site de Puéchabon (nord montpelliérain) où le flux réel d'éva-

potranspiration y est mesuré grâce à une tour à flux (Davi *et al.*, 2006; Martin-StPaul, 2012).

Les données climatiques qui ont permis de renseigner le modèle, ont été mesurées par le CIRAME (Centre d'information régional agro-météorologique et économique - www.agrometeo.fr) à la station de Saint-Saturnin-lès-Apt situé à environ 5 km du LSBB.

3.3. Corrélation entre flux

L'étude statistique de la corrélation entre la pluie (ou l'infiltration) efficace (P) et le débit (Q) permet de caractériser le lien existant entre ces deux chroniques. Cette approche est couramment employée pour l'étude des hydrosystèmes karstiques (par ex. Mangin, 1984; Padilla & Pulido-Bosch, 1995; Larocque *et al.*, 1998; Labat *et al.*, 2002). L'objectif est de préciser le délai entre l'impulsion pluvieuse et le pic de débit. Les coefficients de covariation (CPQ(k)) et de corrélation (RPQ(k)) sont calculés entre deux échantillons de même taille (N). Les chroniques sont progressivement décalées d'une durée (k) et les coefficients de covariation et de corrélation sont recalculés pour chaque décalage.

$$C_{PQ}(k) = \frac{1}{N} \sum_i^n (P_i - \bar{P}) \cdot (Q_{i+k} - \bar{Q}) \quad [1]$$

$$R_{PQ}(k) = \frac{C_{PQ}(k)}{S_P S_Q} \quad [2]$$

Où : S_P et S_Q sont respectivement les écarts types des séries de pluie et de débit ; N est la longueur de la chronique.

3. Surface cumulée de feuille par unité de surface (en m^2/m^2).

4. Poids de feuilles cumulé par unité de surface (en g/m^2).

5. Réserve hydrique maximale exploitable par les plantes (en mm).

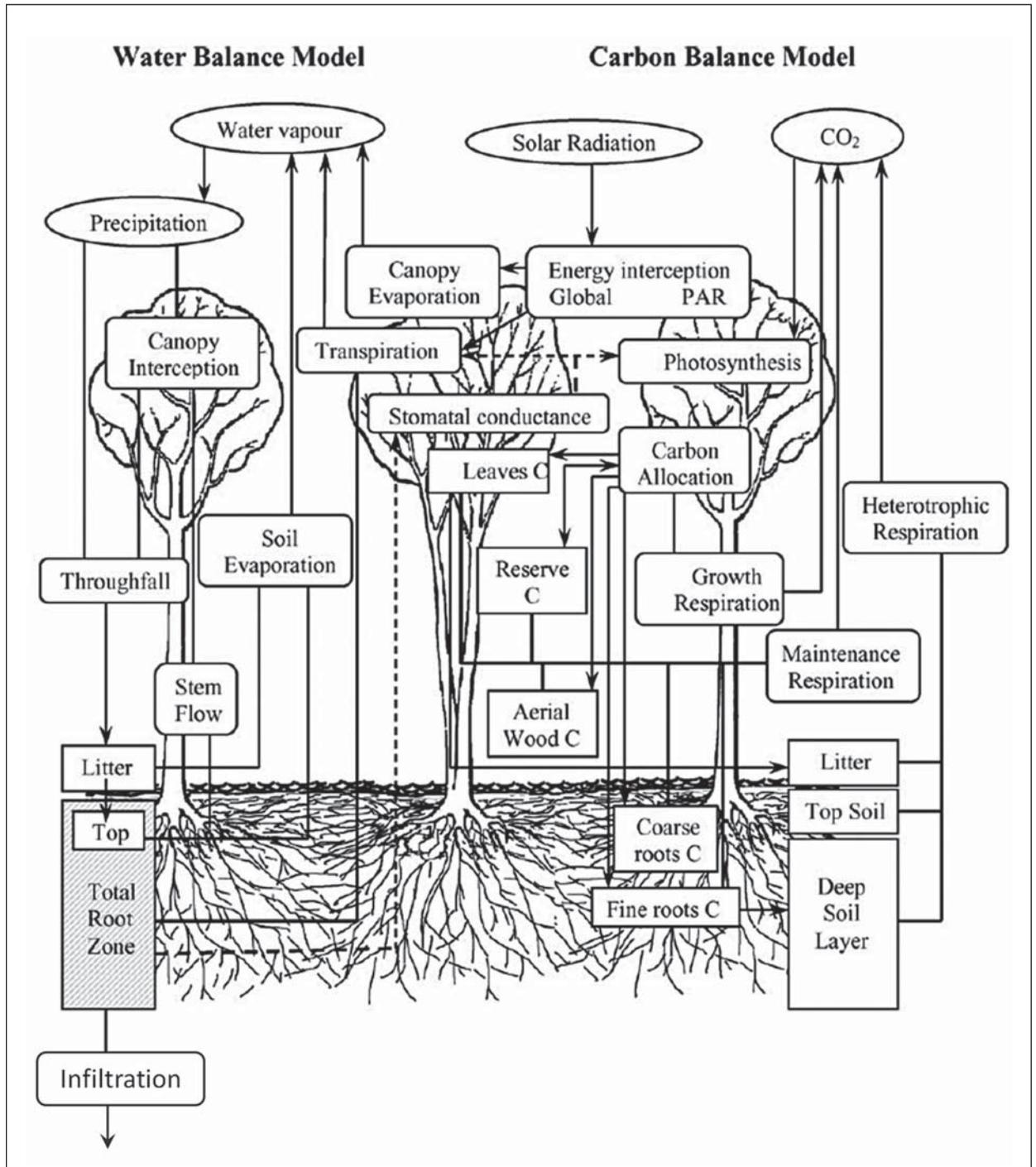


Fig. 3 : schéma de fonctionnement du modèle CASTANEA avec les flux d'eau (gauche) et de carbone (droite) des sous-modèles de CASTANEA. Les rectangles à angles droits sont les variables d'état (C et H₂O), ceux à angles arrondis sont les variables de flux (C et H₂O) et les ellipses sont les variables du forçage météorologique. Chaque flèche correspond à un flux d'eau ou de carbone depuis ou vers des compartiments. Les flèches en pointillés correspondent à (i) l'influence du contenu en eau du sol sur l'ouverture des stomates et (ii) le contrôle stomatique de la transpiration et de la photosynthèse (Dufrêne *et al.*, 2005).

La comparaison des signaux de pluie et de débit nécessite deux chroniques de même taille sur une même durée avec un même pas de temps constant. Si le pas de temps d'échantillonnage (Δt) de la pluie est journalier, celui des débits n'est en moyenne que de 10 jours sur la période 2003-2012. Pour ajuster les chroniques, plusieurs solutions étaient possibles et il a été choisi de considérer les débits comme inchangés entre deux mesures. C'est-à-dire que le débit mesuré à une date est reporté pour tous les jours suivants jusqu'à la prochaine mesure. Cette approximation crée une source d'incertitude considérable qui doit être gardée à l'esprit pour l'interprétation.

Les valeurs d'infiltration efficace, issues de la modélisation avec CASTANEA, ont été utilisées pour estimer le lien entre l'eau infiltrée simulée par le modèle et le débit au niveau du point d'écoulement. Ainsi, l'analyse de corrélation a été réalisée entre les chroniques de pluie brute, d'infiltration efficace et de débit du point D.

4. Résultats et interprétations

4.1. Modélisation CASTANEA

Les résultats de la modélisation, selon les paramètres mesurés lors de l'inventaire forestier, sont présentés pour les années 2011 et 2012 dans la figure 4. Ces résultats sont satisfaisants car les différents processus sont modélisés avec une cohérence remarquable. Par exemple, les orages d'été rechargent la RU (Réserve utile)⁶ mais n'induisent pas ou peu d'infiltration efficace. En revanche, lorsque la RUM (Réserve utile maximale) est atteinte, l'excédent de pluie se traduit directement en infiltration efficace.

Lors des périodes estivales, la RUM peut être proche de 0 % durant plusieurs semaines. La réaction des arbres, lors des périodes de stress hydrique, confirme que le stock en eau est un facteur limitant pour le développement de la forêt car les arbres consomment leurs réserves carbonées durant cette période (Fig. 4).

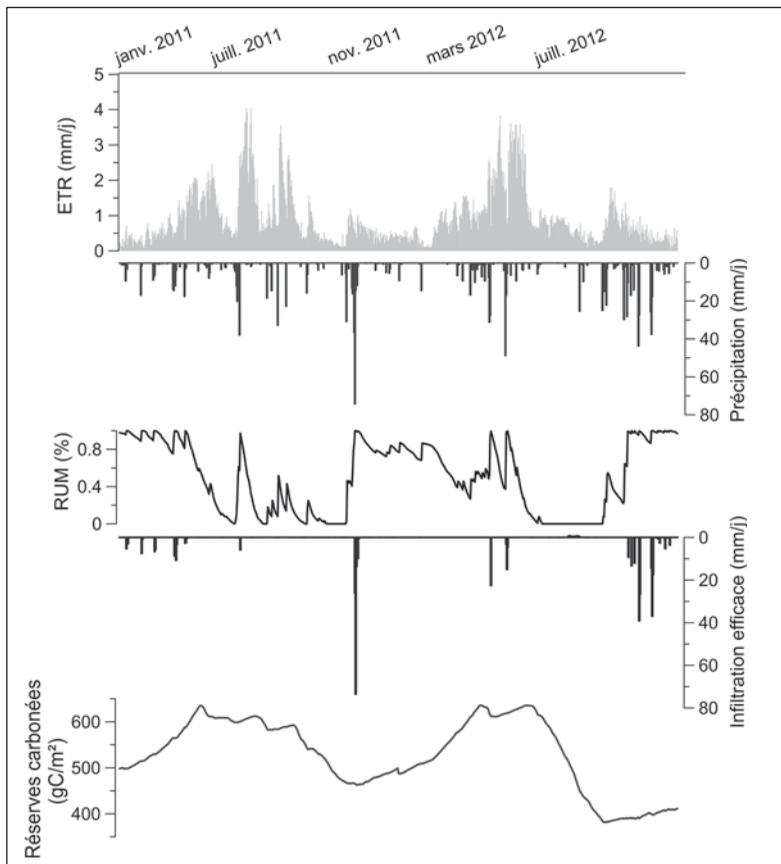


Fig. 4: chroniques de pluies brutes et des principaux paramètres modélisés avec CASTANEA (ETR, RUM, infiltration efficace, réserves carbonées) pour la période 2011-2012.

6. Réserve hydrique exploitable par les plantes à un instant donné (en mm).

Les cumuls annuels des hauteurs d'eau calculées par Barbel-Perineau (2013) ont été comparés à ceux modélisés par CASTANEA. La figure 5 illustre l'incertitude qui existe sur le calcul de l'infiltration efficace. On remarque que sur la période 2004 à 2010, ces variations sont très irrégulières, de moins de -8 % en 2005 à plus de 200 % en 2007. Bien que les deux estimations comparées dans cette figure soient issues de modèles, il est difficile d'affirmer que l'un est plus fiable que l'autre sans argument supplémentaire. Néanmoins, les calculs réalisés avec CASTANEA sont présentés de façon plus détaillée et les flux transpiratoires ont été validés sur des peuplements de Chêne vert très similaire (Davi et al 2005 ; Martin-StPaul 2012).

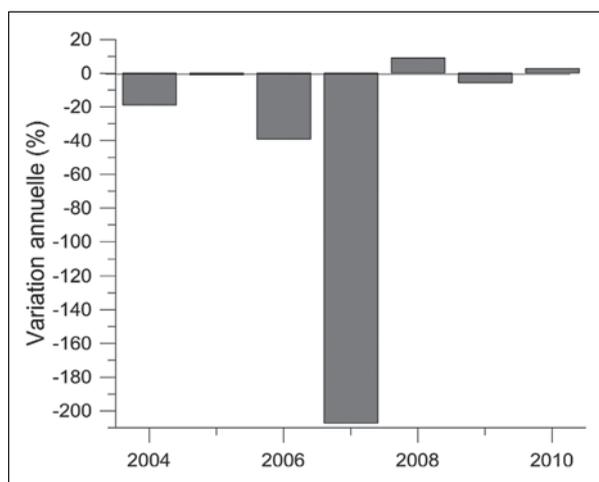


Fig. 5 : écart annuel entre l'infiltration efficace modélisée avec CASTANEA et celle calculée par Barbel-Perineau (2013).

4.2. Analyse de corrélation : infiltration efficace/flux souterrain

Interprétation classique des corrélogrammes

De façon générale, les corrélogrammes (Fig. 6) présentent deux pics de corrélations notables. Le pic majeur se situe à 180 jours tandis qu'un autre apparaît plus discrètement presque immédiatement après l'infiltration de l'eau dans le système. Ces deux pics traduisent les deux composantes principales qui expliquent la dynamique du point D (Carrière, 2014) :

- Une composante rapide liée à un transfert de pression par le biais d'une fracture et/ou d'un conduit karstique, induisant un pic de corrélation à 5 jours. Un transfert direct d'eau semble peu probable du fait de la stabilité des paramètres physico-chimiques du point D (Garry, 2007).

- Une composante annuelle voire pluriannuelle qui permet le maintien d'un débit d'étiage grâce à un réservoir « tampon » à long temps de remplissage et de vidange. Le sol, voire une partie de la roche altérée de sub-surface, ne peuvent probablement pas assurer ce rôle car la forêt semble épuiser les réserves de sub-surface durant chaque période de sécheresse (Fig. 4). Ce soutien du débit d'étiage serait assuré plus en profondeur par un milieu capacitif⁷ relativement peu perméable (Carrière, 2014).

Utilisation des corrélogrammes pour évaluer la qualité des modèles

Dans cet article, compte-tenu de la faible profondeur du point D, l'hydrogramme du point d'écoulement est a priori bien corrélé avec l'infiltration efficace en surface. Nous utilisons donc la corrélation entre les chroniques d'entrée (modélisée) et de sortie de l'hydrosystème local (mesurée au point D) pour évaluer la qualité des chroniques d'entrée. C'est-à-dire qu'une chronique d'entrée bien corrélée avec la chronique de sortie est satisfaisante car elle constitue un bon modèle du flux d'eau qui entre dans l'hydrosystème local. Tandis qu'une chronique d'entrée mal corrélée à la chronique de sortie est moins satisfaisante.

Un indicateur est utilisé dans la figure 6 pour savoir si la corrélation calculée est statistiquement interprétable. Cet indicateur de significativité de la corrélation est la « valeur P ». Plus la corrélation entre deux variables est significative plus la valeur P est petite.

Lorsque l'on étudie les différents corrélogrammes de la figure 6, le corrélogramme point D/infiltration efficace CASTANEA présente les valeurs les plus fortes au niveau des pics à 5 jours et à 180 jours. Cela signifie que la chronique d'entrée modélisée avec CASTANEA est la plus satisfaisante. À l'inverse, les corrélogrammes point D/Pluie brute et l'infiltration efficace de Barbel-Perrineau (2013), sont moins satisfaisants car les corrélations sont systématiquement plus faibles dans la première partie du corrélogramme (jusqu'à environ 200 jours). De plus, pour le premier pic de corrélation (à 5 jours), selon la valeur P, les corrélations ne sont interprétables que pour la chronique CASTANEA.

Ces résultats semblent cohérents car les pluies brutes ne prennent pas en compte les divers phénomènes d'interception et de régulation qui peuvent se produire au niveau du couvert végétal et dans le sol. Par exemple, en période sèche les pluies de faible intensité ne participent pas à la recharge de l'hydrosystème souterrain. Au final, il apparaît que l'estimation de l'infiltration efficace avec CASTANEA est plus satisfaisante que les précédents calculs réalisés pour le site du LSBB par Barbel-Perineau (2013).

7. Milieux à forte capacité de rétention de l'eau que l'on oppose généralement aux milieux transmissifs qui eux ont une forte capacité à laisser passer l'eau.

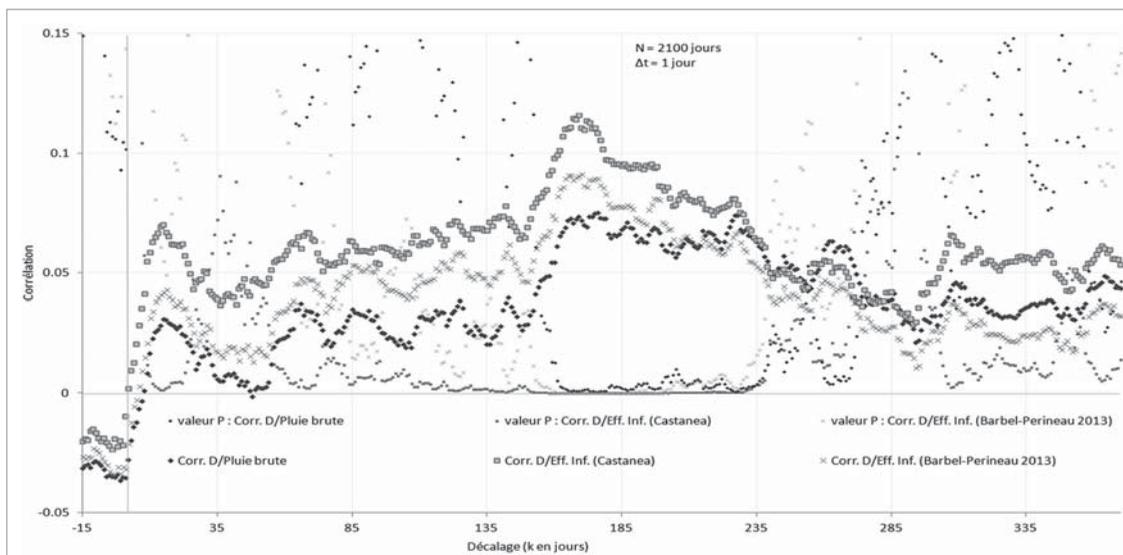


Fig. 6: Corrélogramme entre le flux d'eau au niveau du point D et les différentes chroniques de recharge.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cet article, nous avons réalisé une estimation de l'infiltration efficace prenant en compte les processus qui s'opèrent au niveau du couvert végétal et dans les premiers horizons du sous-sol (par ex. interception de l'eau par les feuilles, transpiration des végétaux). Ces calculs ont été réalisés avec le modèle écophysique CASTANEA. Un inventaire forestier a été réalisé afin de paramétrer le modèle (par ex. LAI, surface terrière, RUM).

Sur le plan quantitatif, nous avons mis en évidence une importante variabilité entre les estimations réalisées avec CASTANEA et celles réalisées selon la formule de Riou (pouvant dépasser 200 %). En l'absence de mesure d'évapotranspiration et de ruissellement sur le site expérimental pour valider nos modélisations, nous avons proposé d'évaluer la qualité des chroniques modélisées par analyse de corrélation. Il apparaît que la chronique modélisée avec CASTANEA est plus satisfaisante que la chronique calculée selon la formule de Riou.

Par ailleurs, l'estimation plus précise de l'infiltration efficace a permis de mieux comprendre le fonctionnement de l'hydrosystème local autour du point D. Dans l'avenir, l'utilisation de modèles écophysiques comparables pourrait être étendue de manière pertinente à l'échelle de l'hydrosystème en particulier dans les zones forestières. Cela permettrait par exemple de mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique de l'hydrosystème de Fontaine de Vaucluse, pour laquelle l'aire d'alimentation est occupée à 85 % par la forêt.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont satisfaisants mais des améliorations peuvent encore être apportées. Dans un tel contexte, l'amélioration de CASTANEA passerait certainement par une prise en compte des infiltrations d'eau rapides qui peuvent se produire même si la RU n'est pas totalement rechargée. De plus, le ruissellement n'est pas pris en compte. Le ruissellement est souvent négligé en milieu karstique à l'échelle du massif (par ex. Devun, 1967; Bezes, 1976), car il est considéré que les eaux qui ruissellent s'infiltrent non loin par le biais d'une zone d'infiltration préférentielle capable d'évacuer vers la profondeur des flux d'eau importants. Cependant, cette hypothèse devient un peu forte lorsqu'on l'applique à l'échelle de la parcelle car en ruisselant sur quelques centaines de mètres, l'eau peut sortir définitivement de la zone modélisée. La quantification du ruissellement n'était pas envisageable dans le cadre de cette étude mais son estimation plus précise permettrait également d'améliorer la modélisation.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier : le CIRAME qui a fourni les données météo indispensables à la réussite de ce projet, toute l'équipe de la plateforme de recherche et R & D interdisciplinaire LSBB, UMS3538 UNS/UAPV/CNRS/AMU/OCA pour avoir accueilli cette expérience et pour leur support technique.

Bibliographie

- BAIZE D. & JABIOL B., 2011. *Guide pour la description des sols*. 2^e édition revue et corrigée. Editions INRA, Paris, 400 p.
- BAKALOWICZ M., 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*. N° 13(1), pp. 148-160.
- BARBEL-PERINEAU A., 2013. *Caractérisation du fonctionnement de la zone non saturée des aquifères karstiques - Approche directe par études hydrodynamiques et hydrochimiques sur le bassin de recherche, d'expérimentation et d'observation de Fontaine de Vaucluse*. Laboratoire souterrain à bas bruit de Rustrel - Pays d'Apt, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon, 226 p.
- BEZES C., 1976. *Contribution à la modélisation des systèmes aquifères karstiques; établissement du modèle Bemmer, son application à quatre systèmes karstiques du Midi de la France*. Mémoire du Centre d'études et de recherches géologiques et hydrogéologiques, Montpellier, 222 p.
- BLONDEL T., 2008. *Traçage spatial et temporel des eaux souterraines dans les hydrosystèmes karstiques par les matières organiques dissoutes. Expérimentation et application sur les sites du Laboratoire souterrain à bas bruit (LSBB) de Rustrel - Pays d'Apt et de Fontaine de Vaucluse*. Thèse: Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, Avignon, 192 p.
- CARRIÈRE S. D., CHALIKAKIS K., SÉNÉCHAL G., DANQUIGNY C. & EMBLANCH C., 2013. Combining electrical resistivity tomography and ground penetrating radar to study geological structuring of karst unsaturated zone, *Journal of applied geophysics*. N° 94(0), pp. 31-41.
- CARRIÈRE S., 2014. *Étude hydrogéophysique de la structure et du fonctionnement de la zone non saturée du karst*. Thèse: Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, Avignon, 218 p.
- CARRIÈRE S. D., CHALIKAKIS K., DAVI H., DANQUIGNY C., OLLIVIER C., MAZZILLI N. & EMBLANCH C. (en prép.). Role of porous matrix rock in water flow regulation within karst unsaturated zone - an integrated hydro-geo-physical approach. *Hydrogeology journal*.
- DAVI H., DUFRENE E., GRANIER A., LE DANTEC V., BARBAROUX C., FRANÇOIS C. & BREDAS N., 2005. Modelling carbon and water cycles in a beech forest: Part II.: Validation of the main processes from organ to stand scale. *Ecological modelling*. N° 185, fasc. 2-4, pp. 387-405.
- DAVI H., DUFRENE E., FRANÇOIS C., LE MAIRE G., LOUSTAU D., BOSCH A., RAMBAL S., GRANIER A. & MOORS E., 2006. Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems, *Agricultural and forest meteorology*. N° 141, fasc. 1, pp. 35-56.
- DEVUN P., 1967. *Étude pluviométrique de l'impluvium de la Fontaine de Vaucluse. Contribution à la recherche d'action concertée Délégation générale à la recherche scientifique et technique (Comité eau) « Étude des réserves dans les karsts. Application à la Fontaine de Vaucluse »*, Bureau des recherches géologiques et minières, pp. 1-33.
- DUFRENE E., DAVI H., FRANÇOIS C., LE MAIRE G., LE DANTEC V. & GRANIER A., 2005. Modelling carbon and water cycles in a beech forest: Part I: Model description and uncertainty analysis on modelled NEE, *Ecological modelling*. N° 185, fasc. 2-4, pp. 407-436.
- FORD D.C. & WILLIAMS P.W., 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley and Sons, Chichester (UK), 562 p.

GARRY B., 2007. *Etude des processus d'écoulements de la zone non saturée pour la modélisation des aquifères karstiques. Expérimentation hydrodynamique et hydrochimique sur les sites du Laboratoire souterrain à bas bruit (LSBB) de Rustrel et de Fontaine de Vaucluse*. Thèse : Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, Avignon, 234 p.

LABAT D., ABABOU R. & MANGIN A., 2002. Analyse multirésolution croisée de pluies et débits de sources karstiques, *Comptes rendus Géoscience*. N° 334, fasc. 8, pp. 551-556.

LAROCQUE M., MANGIN A., RAZACK M. & BANTON O., 1998. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France), *Journal of hydrology*. N° 205, fasc. 3-4, pp. 217-231.

MANGIN A., 1984. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales, *Journal of hydrology*. N° 67, pp. 25-43.

MARTIN-STPAUL N., 2012. *Ajustements fonctionnels du Chêne vert (Quercus ilex L.) à la sécheresse à différentes échelles temporelles : Incidences sur la modélisation des processus*. Thèse : Université de Montpellier II, 239 p.

PADILLA A. & PULIDO-BOSCH A., 1995. Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis, *Journal of hydrology*. N° 168, fasc. 1-4, pp. 73-89.

PUIG J.-M., 1989. *Le système karstique de la Fontaine de Vaucluse*. Thèse : Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, Avignon, 207 p.

RIOU C., 1980. Une formule empirique simple pour estimer l'évapotranspiration potentielle moyenne en Tunisie. *Cahiers de l'ORSTOM, série Hydrogéologie*. N° 17, fasc. 2, pp. 129-137.