

Réponse hydrologique de systèmes karstiques à la variabilité climatique à grande échelle pour différents bassins du Service National d'Observation KARST de l'INSU/CNRS

Nicolas Massei¹, David Labat², Hervé Jourde³, Nicolas Lecoq¹, Naomi Mazzilli⁴.

Introduction

Le Service National d'Observation du karst SNO KARST est un dispositif de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) du Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) qui a pour objectif, par la mise en synergie des activités d'observation de différentes équipes sur des sites variés, d'améliorer la compréhension du fonctionnement des hydro-systèmes karstiques. Cet objectif doit être atteint par l'acquisition de données hydrologiques et physico-chimiques à haute fréquence, mises à disposition de la communauté scientifique, et par l'harmonisation des procédures de suivi des différents paramètres (corpus de données, pas d'échantillonnage, etc.). Le SNO KARST fait également partie de la nouvelle infrastructure de recherche française pour l'observation de la zone critique OZCAR. Le SNO KARST est composé de plusieurs sites karstiques répartis sur la France métropolitaine, situés dans différents contextes physiographiques et climatiques (Méditerranée, Pyrénées, Jura, côte occidentale et nord-ouest près de l'Atlantique ou de la Manche). Le dispositif permet à la communauté scientifique de développer des recherches avancées et des expériences visant à améliorer la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants karstiques.

La présente étude illustre l'intérêt de déployer le potentiel d'un tel réseau national : grâce aux données de plusieurs sites du SNO KARST, nous évaluons *la réponse hydrologique des bassins versants karstiques sur le territoire métropolitain, à la variabilité climatique à grande échelle*. Plus précisément, nous cherchons à relier les variations hydrologiques du court au long terme (variabilité infra-annuelle à pluriannuelle) aux modalités de la circulation atmosphérique à l'échelle du secteur Euro-Atlantique, qui conditionne les flux d'humidité et *in fine*, le contexte hydro-climatique associé aux différents sites. En contexte de changement climatique tout particulièrement, améliorer la connaissance des modalités des variations des ressources en eau en fonction de la variabilité climatique passée et à venir, s'avère être un enjeu décisif. De nombreuses études, en France et dans diverses régions du monde, ont porté sur la compréhension des variations

hydrologiques en lien avec les oscillations climatiques. Ces études concernent généralement les précipitations et les débits des rivières et sont souvent basées sur les corrélations entre des champs ou des indices climatiques tels que l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO), l'Oscillation Atlantique Multidécennale (AMO), l'Oscillation Australe (SOI), etc., et les variables hydrologiques (e.g. Giuntoli *et al.*, 2013 ; Massei *et al.*, 2010 ; Lavers *et al.*, 2015). Parmi les enjeux majeurs, figurent la caractérisation de la variabilité interne multi-décennale du système climatique – qui peut atténuer ou amplifier les tendances à long terme liées au réchauffement global – et des variables hydrologiques (Boé et Habets, 2013) ou encore l'évolution des extrêmes en contexte non stationnaire et leur modélisation (Renard, 2006). Les hydro-systèmes karstiques étant des milieux très hétérogènes, ils sont susceptibles de montrer des comportements hydrologiques divers selon différentes échelles de temps. Par exemple, la réactivité rapide de ces systèmes peut être davantage liée au développement des conduits karstiques, alors que les variations lentes pourraient préférentiellement marquer l'activité des zones les moins transmissives ou encore celle des réservoirs à infiltration lente ou retardée. Nous nous intéressons ici à la caractérisation des tendances et oscillations basse-fréquence contrôlant les variations hydrologiques sur trois hydro-systèmes karstiques, situés dans des contextes physiographiques et climatiques différents, et à leur déterminisme climatique. Dans un second temps, nous montrons comment cette variabilité basse-fréquence impacte la qualité de l'eau et son évolution au cours du temps, au travers de l'occurrence d'événements turbides affectant une source karstique.

Données et méthodologies

Données hydrologiques et climatiques

Afin d'étudier les liens entre la circulation atmosphérique à grande échelle et la variabilité des ressources en eau karstique sur la France métropolitaine, nous avons sélectionné 3 sites du SNO possédant des conditions physiographiques, géologiques et climatiques contrastées : un site en contexte méditerranéen (le système du Lez, dans

1. Normandie Univ, UNIROUEN, UNICAEN, CNRS, 76000 Rouen, France. Courriels : nicolas.massei@univ-rouen.fr, nicolas.lecoq@univ-rouen.fr

2. Géosciences Environnement Toulouse - Université de Toulouse, France. Courriel : david.labat@get.omp.eu

3. Université de Montpellier, Laboratoire HydroSciences Montpellier, France. Courriel : herve.jourde@umontpellier.fr

4. UAPV, UMR1114 EMMAH, F-84914 Avignon, France. Courriel : naomi.mazzilli@univ-avignon.fr

la région de Montpellier), un site en contexte de moyenne montagne (le système du Baget dans les Pyrénées), et un site en contexte pluvio-océanique dans le Nord-Ouest de la France (le système de Radicatel, dans la craie du bassin de Paris, en Seine-Maritime).

L'étude de la variabilité multi-fréquence, i.e. des hautes aux basses fréquences (jusqu'aux échelles pluriannuelles, ici), nécessite le recours à des séries temporelles disposant d'au minimum une quinzaine à une vingtaine d'années d'observation. La période de temps couverte par les données est au total de 18 ans, de 1988 à 2006. Les données de débit sont disponibles au pas journalier, sur toute la période pour les systèmes du Lez et du Baget. Les données de niveau d'eau dans le système de Radicatel correspondent à un piézomètre situé à l'aval du système ; elles sont disponibles au pas bi-hebdomadaire jusqu'en 1997, et au pas journalier après cette date. Pour ce site, aucune donnée de débit n'est disponible sur une aussi grande période de temps. Dans l'objectif de caractériser la variabilité basse-fréquence et son déterminisme en matière de circulation atmosphérique, les séries temporelles ont été ré-échantillonnées – ou plutôt agrégées – au pas mensuel.

Les données retenues pour caractériser l'état de la circulation atmosphérique à l'échelle de l'Atlantique Nord sont des données mensuelles de pression au niveau de la mer (SLP) issues de la réanalyse R1 du *National Center for Environmental Prediction* (Kalnay *et al.*, 1996) fournies par la *Physical Sciences Division* (NOAA / OAR / ESRL, Boulder, Colorado, États-Unis, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>). Elles représentent la dynamique atmosphérique mensuelle de l'Atlantique Nord sur une grille de dimension $75^{\circ}\text{O}-35^{\circ}\text{E}$ et $15^{\circ}-75^{\circ}\text{N}$, avec un angle de $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ de résolution horizontale. Ceci correspond à 1125 points de grille, c'est à dire à 1125 séries temporelles mensuelles de SLP de 1988 à 2006.

Méthodes d'analyse

La démarche suivie repose sur le fait que les séries hydrologiques oscillent selon différentes échelles temporelles, des hautes fréquences (oscillations rapides) aux basses fréquences (oscillations lentes), et que certaines de ces fréquences d'oscillations sont communes à ces séries et aux champs climatiques à grande échelle (Massei *et al.*, 2010 et 2017 ; Massei et Fournier, 2012). Nous cherchons ainsi à déterminer les structures atmosphériques liées aux variations hydrologiques pour différents niveaux de fréquence d'oscillation. Nous avons donc choisi l'approche par transformée en ondelettes discrète dans un cadre multirésolution appliquée à la fois aux variables hydrologiques karstiques (locales) et au champ atmo-

sphérique large-échelle (SLP sur le secteur nord-Atlantique). Le potentiel de ces approches méthodologiques issues du traitement du signal pour l'analyse hydrologique a été largement présenté par Labat *et al.*, 2000, ou encore Labat, 2005. Les différentes variables sont ainsi décomposées en séries temporelles (détails d'ondelettes) des hautes aux basses fréquences, et *la relation entre les variables locales et la variable large-échelle est analysée au moyen de cartes composites*, qui déterminent en chaque point si la pression atmosphérique est plus forte ou au contraire plus faible lorsque le débit ou le niveau d'eau est grand (et inversement lorsque débit ou niveau sont faibles). Une carte est ainsi générée pour chaque niveau de fréquence (ici, les échelles temporelles correspondantes vont d'environ 0.2 à ~ 10 ans). Ces cartes s'interprètent de manière assez similaire à de simples cartes de corrélation, mais présentent l'avantage de prendre en compte la non-linéarité de la relation débit (ou niveau)/SLP. Toutes les analyses ont été conduites au moyen du logiciel R (R Core Team, 2017), en utilisant les packages clim.pact (Benedad, 2011) et wmtsa (Percival et Walden, 2000).

Liens entre la variabilité hydrologique de sites karstiques en France et la variabilité climatique à grande échelle

Pour chaque série hydrologique, l'analyse des cartes composites permet de visualiser à quel type de structure spatiale de la circulation atmosphérique est associée chaque fréquence d'oscillation du débit ou du niveau d'eau (Fig. 1). Les résultats montrent dans un premier temps que ces structures spatiales de circulation atmosphérique ne sont pas rigoureusement identiques en fonction de la fréquence d'oscillation du débit ou du niveau d'eau de chaque site. D'un point de vue physique, l'interprétation de ce résultat uniquement statistique conduirait à conclure que les variations hydrologiques rapides ou lentes ne seraient pas contrôlées par les mêmes conditions de circulation atmosphérique. Beaucoup de ces patrons climatiques révèlent une structure dipolaire montrant des zones de SLP corrélées (rouge) ou anti-corrélées (bleue) avec l'hydrologie locale, rappelant parfois la structure-type bien connue du régime de temps NAO (Hurrell, 1995). C'est le cas par exemple des cartes 0,5 an (voir figure 1, ~ 0.5 yr) pour les 3 sites, bien que les zones de corrélation ne soient pas parfaitement superposées aux centres d'action de référence de la NAO (\sim anticyclone des Açores et dépression d'Islande) ; cela est encore plus flagrant pour le site du Lez. La variabilité ou tendance à long terme, d'environ 10 ans (voir figure 1, ~ 10 yr) montre nettement

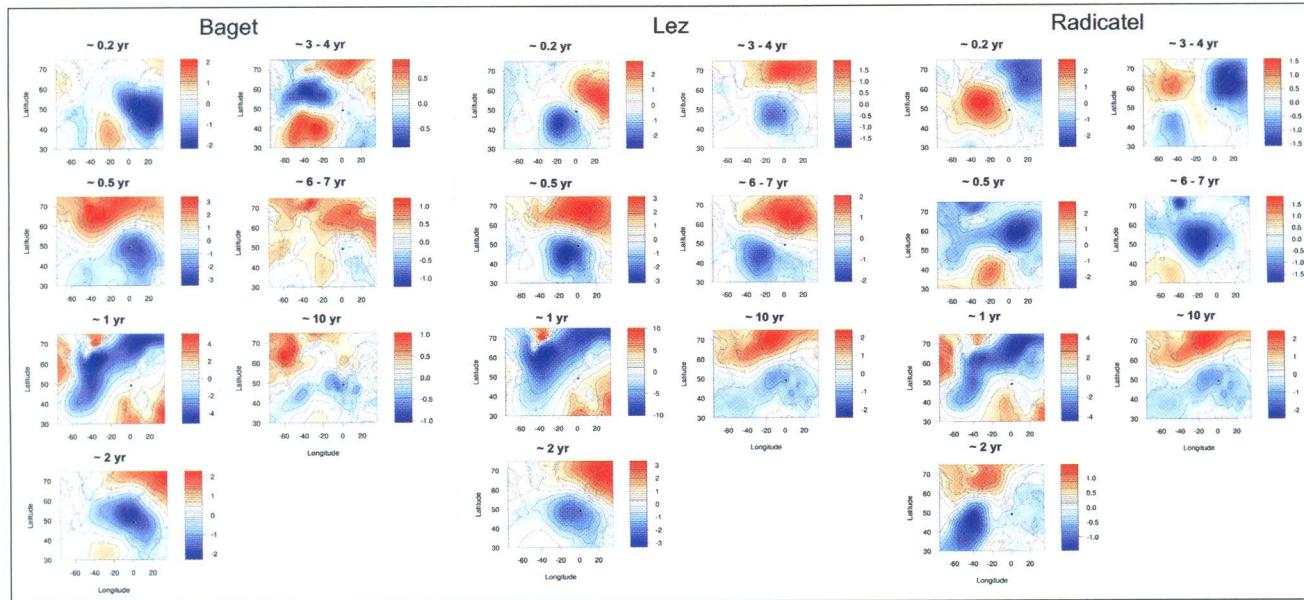


Figure 1. Cartes composites du champ de pression au niveau de la mer (SLP) réalisées aux sites du Baget, du Lez et de Radicatel. Les zones en bleu indiquent les régions dans lesquelles la pression atmosphérique moyenne sur la période 1988-2006 est faible lorsque le débit (ou le niveau d'eau pour Radicatel) est important, et inversement pour les zones en rouge. Pour chaque site, chaque carte illustre ainsi les liens, en termes de co-variation, entre la pression atmosphérique et le débit ou le niveau de l'eau souterraine pour la période d'oscillation correspondante (courtes périodes/hautes fréquences : variabilités rapides ; longues périodes/basses fréquences : variabilités lentes). Source : travail personnel des auteurs, inédit.

une structure commune pour les sites du Lez et de Radicatel ainsi que pour le Baget, quoique dans une moindre mesure. Comparativement aux deux sites méridionaux, Radicatel présente souvent des structures de corrélation de signe opposé à celles de ces derniers, ce qui pourrait correspondre à l'influence contrastée typique de la circulation d'Ouest sur l'hydroclimatologie entre le Sud et le Nord de l'Europe. Baget et Lez ne partagent pas des schémas de circulation fortement ressemblants malgré la proximité de ces 2 sites du Sud de la France : ils présenteraient ainsi des différences significatives sur le plan du contrôle climatique des variations hydrologiques, qui pourraient notamment s'expliquer par une influence marquée de la dynamique méditerranéenne pour le Lez, certainement moins marquée pour le Baget.

La reconstitution des composantes à long terme (échelles supérieures à 6-7 ans) de la variabilité hydrologique permet d'identifier l'expression des oscillations climatiques basse-fréquence dans le débit ou le niveau d'eau des différents sites (Fig. 2). Ces composantes spectrales de la variabilité hydroclimatique, en France métropolitaine et plus largement, à l'échelle de l'Atlantique Nord, sont par ailleurs relativement bien connues et ont été observées et étudiées par de nombreux auteurs (Feliks *et al.*, 2011 ; Massei *et al.*, 2010 et 2017 ; Pinault, 2012). La figure 2 montre qu'une tendance générale se dégage, même si les oscillations ne sont pas parfaitement en phase pour les 3 sites : cela est particulièrement remarquable pour le Lez et Radi-

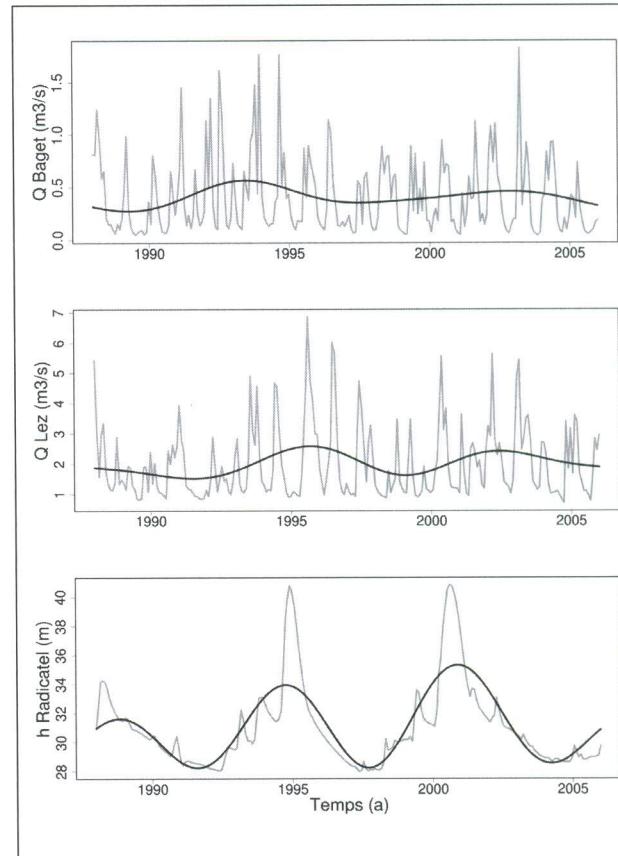


Figure 2. Résidus basse-fréquence (échelles temporelles supérieures à 6-7 ans) de l'analyse multirésolution des débits et niveau d'eau des trois sites karstiques. Source : travail personnel des auteurs, inédit.

catel, bien qu'un déphasage apparaisse assez nettement après 2000. Le site de Radicatel affiche une variabilité à long terme de grande amplitude, avec une composante basse-fréquence fortement marquée, nettement visible dans les données brutes de niveau d'eau du piézomètre situé près de l'exutoire du système (voir figure 2). Cette dynamique lente est liée à la spécificité de ce type d'hydro-système dans la craie karstifiée du bassin de Paris, qui se comporte régionalement comme un grand aquifère poreux et fissuré à recharge essentiellement lente et diffuse au travers d'une couverture hétérogène de formations superficielles semi-perméables (Slimani *et al.*, 2009 ; El Janyani *et al.*, 2012).

Influence des oscillations climatiques basse-fréquence sur le comportement karstique et la qualité des eaux : exemple du système de Radicatel

Le site de Radicatel est un site majeur d'alimentation en eau potable de la communauté d'agglomération havraise (CODAH). À ce titre, la turbidité des eaux captées est suivie de longue date par la CODAH. Les données de turbidité sont ainsi disponibles en moyenne journalière, depuis les années 80. La comparaison de la chronique de turbidité avec celle du niveau d'eau dans le système montre assez clairement que **les épisodes turbides présentent une amplitude significativement plus importante, pendant les périodes interannuelles de recharge de l'aquifère** (Fig. 3A). Au contraire, pendant les périodes de récession pluriannuelle (par exemple, entre 1996 et 1999 et entre 2002 et 2005), les épisodes turbides sont moins intenses. À partir de 1997, les données de niveau d'eau sont disponibles au pas journalier. Il est alors possible, à partir de cette date, de séparer la variabilité haute fréquence de la variabilité totale au sein de ce signal au moyen de l'analyse multirésolution. La confrontation de cette composante haute fréquence du niveau d'eau avec le signal de turbidité entre 1997 et 2006 montre une bonne correspondance entre l'apparition des événements turbides et les variations rapides de charge hydrau-

lique dues au caractère karstique du système (Fig. 3B). Le même comportement que celui de la turbidité au cours du temps est logiquement constaté pour les variations rapides de niveau d'eau: ces variations rapides de charge, inhérentes au comportement karstique du système apparaissent ainsi préférentiellement pendant les périodes pluriannuelles de recharge de l'aquifère. Les variations rapides de charge hydraulique se superposent donc à une variation lente du niveau d'eau. Ces deux composantes traduisent respectivement le comportement karstique et le comportement de type nappe au sein de l'hydro-système, et peuvent-être séparés et reconstruites grâce aux méthodes d'ondelettes multirésolution (Fig. 3C). Le comportement hydrologique karstique du système, particulièrement exacerbé au cours des périodes pluriannuelles de recharge, est donc clairement contrôlé par la variabilité basse-fréquence d'origine climatique, et la qualité des eaux potables en est finalement affectée sous la forme d'épisodes turbides de plus ou moins forte amplitude. La variabilité lente de la charge hydraulique illustre quant à elle l'influence de l'aquifère crayeux poreux/fissuré sur la transmission et la modulation des oscillations climatiques.

Certaines études relativement récentes (Fritier *et al.*,

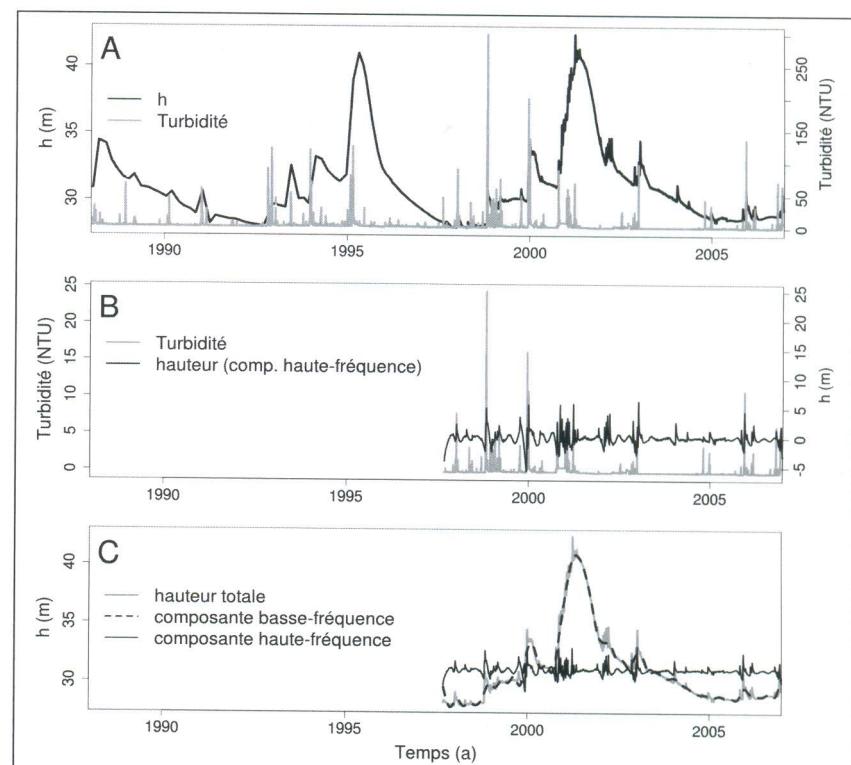


Figure 3. A : charge hydraulique au piézomètre de Radicatel et turbidité mesurée à la source de Radicatel ; B : composante haute-fréquence de la charge hydraulique au piézomètre extraite par analyse multirésolution et turbidité à la source de Radicatel ; C : décomposition statistique de la charge hydraulique au piézomètre de Radicatel permettant d'isoler la composante karstique de la composante « nappe » dans l'hydro-système de Radicatel. Source : travail personnel des auteurs, inédit.

al., 2012) ont montré que la variabilité de la circulation atmosphérique telle que décrite par l'indice NAO depuis la fin du XIX^e siècle avait évolué avec un accroissement, depuis environ la deuxième moitié du siècle dernier, de la variabilité des échelles pluriannuelles à interdécennales identiques à celles observées dans la présente étude. L'étude des précipitations à Paris sur la même période de plus d'un siècle, montrait le même phénomène (Fritier *et al.*, 2012). Cela impliquerait-il un basculement vers un régime caractérisé par l'apparition marquée de séquences pluriannuelles d'épisodes turbides plus importants et plus fréquents, succédant à des années moins affectées par ce phénomène ?

Conclusion

Le SNO KARST, service national d'observation des milieux karstiques du CNRS, permet grâce à l'acquisition sur le long terme de mesures hydrologiques sur différents sites en France métropolitaine, de mettre à disposition de la communauté scientifique, les données nécessaires pour aborder différentes problématiques, dont celle associée aux grandes échelles spatiales et temporelles. La caractérisation et la compréhension des facteurs de contrôle climatique, à grande échelle, de la variabilité hydrologique des milieux karstiques est l'une de ces grandes problématiques environnementales qui nécessite le recours aux bases de données offertes par le SNO KARST. Dans l'étude présentée ici, les différentes oscillations caractéristiques de la variabilité hydrologique de systèmes karstiques ont été extraites et leur déterminisme climatique a été discuté par l'investigation des liens statistiques entre variations hydrologiques et circulation atmosphérique pour chaque fréquence d'oscillation. Les résultats ont montré que la plupart des oscillations étaient associées à des structures climatiques spatiales assez nettes, et donc à des modalités de circulation atmosphérique bien déterminées. Pour tous les sites au Nord ou au Sud de la France, sur le pourtour méditerranéen ou dans les Pyrénées, la variabilité de très basse fréquence semble associée au même régime de circulation atmosphérique; en revanche, des différences notables ont également été constatées pour des composantes oscillatoires de plus petite échelle (i.e. oscillations plus rapides) y compris pour les 2 sites du Sud de la France, pourtant proches géographiquement. Ceci montre des contrôles climatiques à court terme différents entre les sites. L'approfondissement de la démarche au site de Radicatel dans le Nord de la France, a en outre permis de montrer que i) l'intensité du fonctionnement karstique est dépendante des variations d'origine climatique pluriannuelles, ii) le contrôle climatique de l'activi-

té karstique se traduit notamment par des périodes de plusieurs années d'occurrence d'événements turbides de forte amplitude, entrecoupées de périodes moins affectées par ce phénomène. Des investigations complémentaires et plus approfondies, incluant notamment l'analyse d'enregistrements hydroclimatiques de long terme ou le développement de démarches de modélisation de la réponse des hydrosystèmes karstiques sous différents scénarios de variabilité et de changement climatique, pourraient être à même de fournir d'importants éléments d'aide à la décision, en matière d'optimisation de la gestion de la ressource en eau potable.

Bibliographie

- Benestad R.E., 2011. Clim.pact: Climate analysis and empirical-statistical downscaling (ESD) package for monthly and daily data. R package version 2.3-10 (now maintained in CRAN as package "ESD").
- Boé J. et Habets F., 2013. Multi-decadal river flows variations in France. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(9), 11861-11900. <http://doi.org/10.5194/hessd-10-11861-2013>
- Core Team R., 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- El Janyani S., Massei N., Dupont J., Fournier M. et Dorfliger N., 2012. Hydrological responses of the chalk aquifer to the regional climatic signal. *Journal of Hydrology*, 464-465, 485-493.
- Feliks Y., Ghil M., et Robertson A.W., 2011. The atmospheric circulation over the North Atlantic as induced by the SST field. *J. Clim.* 24 (2), 522-542. <http://dx.doi.org/10.1175/2010JCLI3859.1>
- Fritier N., Massei N., Laignel B., Durand A., Dieppois B. et Deloffre J., 2012. Links between NAO fluctuations and inter-annual variability of winter-months precipitation in the Seine River watershed (north-western France). *Comptes Rendus Geoscience*, 344(8), 396-405. <http://doi.org/10.1016/j.crte.2012.07.004>
- Giuntoli I., Renard B., Vidal J.-P. et Bard A., 2013. Low flows in France and their relationship to large-scale climate indices. *Journal of Hydrology*, 482, 105-118. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.038>
- Hurrell J.W., 1995. Decadal trends in the north atlantic oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science (New York, N.Y.)*, 269 (5224), 676-679.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Ellipsis Joseph D., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2).
- Labat D., Ababou R. et Mangin A., 2000. Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part II: Continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. *Journal of Hydrology*, 238(3-4), 149-178. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00322-X](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00322-X)
- Labat D., 2005. Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A

- review of concepts. *Journal of Hydrology*, 314 (1-4), 275-288. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.04.003>.
- Lavers D.A., Hannah D.M. et Bradley C., 2015. Connecting large-scale atmospheric circulation, river flow and groundwater levels in a chalk catchment in southern England. *Journal of Hydrology*, 523, 179-189. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.060>
 - Massei N., Dieppois B., Hannah D.M., Lavers D.A., Fossa M., Laignel B., et Debret M., 2017. Multi-time-scale hydroclimate dynamics of a regional watershed and links to large-scale atmospheric circulation: Application to the Seine river catchment, France. *Journal of Hydrology*, 546, 262-275, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.008>
 - Massei N., Laignel B., Deloffre J., Mesquita J., Motelay A., Lafite R. et Durand A., 2010. Long-term hydrological changes of the Seine River flow (France) and their relation to the North Atlantic Oscillation over the period 1950-2008. *International Journal of Climatology*, 30(14), 2146-2154.
 - Massei N. et Fournier M., 2012. Assessing the expression of

- large-scale climatic fluctuations in the hydrological variability of daily Seine river flow (France) between 1950 and 2008 using Hilbert-Huang Transform. *Journal of Hydrology*, 448-449, 119-128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.052>.
- Percival D.B. et Walden A.T., 2000. *WMTSA : software to book Wavelet Methods for Time Series Analysis*, Cambridge University Press.
 - Pinault J.-L., 2012. Global warming and rainfall oscillation in the 5-10 yr band in Western Europe and Eastern North America. *Climatic Change*, 114(3-4), 621-650. <http://doi.org/10.1007/s10584-012-0432-6>
 - Renard B., 2006. Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse de doctorat de L'INP Grenoble, 364p.
 - Slimani S., Massei N., Mesquita J., Valdés D., Fournier M., Laignel B. et Dupont J.-P., 2009. Combined climatic and geological forcings on the spatio-temporal variability of piezometric levels in the chalk aquifer of Upper Normandy (France) at pluridecennial scale. *Hydrogeology Journal*, 17(8), 1823-1832. <http://doi.org/10.1007/s10040-009-0488-1>

Le pétrole

quelles réserves, quelles productions et à quel prix ?

Malgré la nécessaire diminution des consommations d'énergies fossiles pour lutter contre le changement climatique, le pétrole restera indispensable pendant encore plusieurs décennies pour répondre à une demande énergétique mondiale toujours croissante.

S'appuyant sur une grande diversité de sources, cet ouvrage donne une grille de lecture de la scène pétrière actuelle, de ses évolutions passées et de ses perspectives, en faisant la synthèse des trois grands facteurs étroitement imbriqués que sont les réserves, les conditions de production et les prix.

Évolution des marchés, techniques et perspectives de production, impacts géopolitiques, scénarios pour le futur, les auteurs livrent ici une analyse critique et objective d'un secteur qui soulève trop souvent passions et fantasmes.

« Cet ouvrage de référence arrive à temps pour nous éclairer sur les fondamentaux d'une source d'énergie dont le monde aura besoin longtemps dans un contexte énergétique mouvant. »

Olivier Appert, ancien président d'IFP Énergies nouvelles, délégué général de l'Académie des technologies

Denis Babusiaux
a effectué toute sa carrière à l'IFP (Institut français du pétrole) où il a été notamment directeur du Centre Formation et Gestion de l'IFP School. Il a été Adjunkt professor à l'Université de Pennsylvanie à Philadelphie et président de l'Association des Économistes de l'énergie. Il est aujourd'hui professeur associé à l'IFP School et consultant.

Pierre-René Bauquis
a travaillé 30 ans chez Total et y a occupé différents postes de responsabilité, opérationnels tels que directeur de la Mer du Nord, et fonctionnels comme directeur de la Stratégie. Il a été président de l'ATIP (Association des Techniciens et Professionnels du Pétrole). Il est aujourd'hui professeur associé à l'IFP School et auprès de l'association TPA (Total Professeurs Associés).

Tous deux ont eu de nombreuses activités d'enseignement en France comme à l'étranger.

D. Babusiaux P.-R. Bauquis

Denis Babusiaux • Pierre-René Bauquis



Le pétrole

quelles réserves, quelles productions et à quel prix ?

Avant-propos de Patrick Pouyanné

Préface d'Olivier Appert

