



HAL
open science

Influence de la variabilité basse-fréquence des niveaux piézométriques sur l'occurrence et l'amplitude des extrêmes

Lisa Baulon, Delphine Allier, Nicolas Massei, Hélène Bessiere, Matthieu Fournier, Violaine Bault

► **To cite this version:**

Lisa Baulon, Delphine Allier, Nicolas Massei, Hélène Bessiere, Matthieu Fournier, et al.. Influence de la variabilité basse-fréquence des niveaux piézométriques sur l'occurrence et l'amplitude des extrêmes. *Géologues*, 2020, 207. hal-03138860

HAL Id: hal-03138860

<https://hal.science/hal-03138860>

Submitted on 11 Feb 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Influence de la variabilité basse-fréquence des niveaux piézométriques sur l'occurrence et l'amplitude des extrêmes

Lisa Baulon^{1,2}, Delphine Allier², Nicolas Massei¹, Hélène Bessière², Matthieu Fournier¹, Violaine Bault²

Dans un contexte de changement global, il est crucial de comprendre les liens entre les extrêmes piézométriques, à l'origine des sécheresses hydrogéologiques et des inondations par remontées de nappe, et la variabilité climatique. Pour répondre à cette problématique, une base de données de piézomètres peu influencés par les activités humaines a été constituée. Pour un grand nombre de piézomètres, les fluctuations basse-fréquence d'origine climatique apparaissent responsables de dépassements de seuils (minima ou maxima) tout à fait significatifs durant les dernières décennies.

Introduction

La compréhension des extrêmes hydroclimatiques demeure un enjeu capital en contexte de changement climatique. De nombreuses études ont ainsi été réalisées dans le but d'identifier une potentielle augmentation de l'occurrence et/ou de l'intensité des extrêmes dans les variables environnementales liée au changement climatique (e.g. Coumou et Rahmstorf, 2012 ; Blöschl *et al.*, 2019b). Parallèlement à ces études établissant le lien entre changement climatique et extrêmes hydroclimatiques, d'autres questions majeures demeurent partiellement ou non résolues. L'origine de périodes pluriannuelles riches en sécheresses (*i.e.* succession d'années sèches sur plusieurs années) ou en inondations (*i.e.* succession d'années humides sur plusieurs années) en est un exemple, ce phénomène étant considéré comme l'un des « 23 problèmes non résolus en hydrologie » (Blöschl *et al.*, 2019a).

A cet égard, les variations piézométriques montrent très souvent des variabilités basse-fréquence marquées, en raison du fait que les bassins et aquifères ont tendance à lisser les variations rapides de la source climatique (précipitations), et ce d'autant plus que leur temps caractéristique est long. Diverses études qui ont été menées par le passé ont étudié le déterminisme climatique de cette variabilité basse-fréquence (Massei *et al.*, 2010 et 2017 ; Massei et Fournier, 2012 ; Slimani *et al.*, 2009 ; El Janyani *et al.*, 2012). En fonction de la modulation imposée par les propriétés physiques des hydrosystèmes, la variabilité basse-fréquence d'origine climatique peut être imprimée de façon plus ou moins nette dans les variations de niveaux piézométriques. Une question importante est donc de déterminer si (et dans quelle mesure) la variabilité basse-fréquence climatique est responsable de l'atteinte ou du dépassement des très hauts et très bas niveaux piézométriques observés durant les dernières décennies. Ce travail nécessite donc la constitution d'une base de données de piézomètres peu influencés par les activités anthropiques (*i.e.* les prélèvements) et d'une durée suffisante pour étudier de tels phénomènes.

Cet article présentera dans un premier temps la base de données de piézomètres qu'il a été nécessaire de construire pour aborder la problématique. Dans un second temps, la répartition spatiale de la variabilité multi-échelle temporelle (fluctuations interannuelle à interdécennale) en fonction des secteurs hydrogéologiques sera analysée. Enfin, nous proposons de montrer comment la variabilité basse-fréquence est susceptible de contrôler les dépassements de seuils piézométriques (hauts et bas niveaux de nappe) potentiellement liés aux événements hydrologiques extrêmes.

La base de données de piézomètres peu influencés

Elaboration de la base de données

Une base de données de piézomètres pas ou peu influencés par les prélèvements a été constituée dans le but d'étudier l'impact de la variabilité climatique sur les niveaux piézométriques moyens et extrêmes à l'échelle de la France métropolitaine. Les chroniques piézométriques contenues dans ce jeu de données

¹ Normandie Univ, UNIROUEN, UNICAEN, CNRS, M2C, 76000 Rouen, France – lisa.baulon@etu.univ-rouen.fr

² BRGM, 3, avenue C. Guillemin, 45060 Orléans cedex 2, France

sont issues à la fois de la base de données interne du BRGM (BSS-EAU) et du portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines (ADES; <https://ades.eaufrance.fr/>).

Les chroniques piézométriques ont tout d'abord été sélectionnées par algorithmie qui prend en compte les critères suivants :

- Plus de 30 ans de données dans les régions à fort historique piézométrique (Normandie, Hauts-de-France, Grand Est) et plus de 20 ans de données dans les régions à historique piézométrique plus faible.
- Un nombre minimum de données par mois. Cette quantité minimale est divisée en 2 parties. Dans un premier temps, une date de changement de fréquence d'échantillonnage est identifiée pour chacune des séries piézométriques. En général, cette date correspond à la date d'automatisation de la mesure piézométrique. La fréquence minimale d'échantillonnage est fixée à une donnée mensuelle avant cette date, et trois données mensuelles après cette date.
- Une durée de lacunes consécutives inférieure à 3 ans pour les chroniques piézométriques débutant après 1950, et inférieure à 10 ans pour les chroniques piézométriques débutant avant 1950 pour pallier l'interruption de la mesure lors des deux guerres mondiales. Cette durée maximale de lacunes permet de préserver convenablement l'information sur la variabilité basse-fréquence (*i.e.* pluriannuelle, interdécennale et pluridécennale) des chroniques piézométriques.

Ces critères ont été choisis dans le but de maximiser le nombre de chroniques piézométriques sélectionnées ainsi que leur répartition spatiale lors de cette première étape. A la fin de ce premier processus de sélection, 1000 chroniques piézométriques parmi les 4983 chroniques présentes dans ADES répondaient aux critères énoncés ci-dessus.

A partir de ce premier jeu de données, une analyse individuelle, chronique par chronique, a été faite en trois étapes. Une première visualisation des chroniques piézométriques a été effectuée pour identifier celles les plus influencées par les pompages afin de les éliminer. Après cette première visualisation, environ 700 chroniques ont été conservées.

Par la suite, la deuxième étape consistait à analyser visuellement la chronique tout en effectuant un croisement avec les données spatialisées de pompage issues de la base de données Banque Nationale sur les Prélèvements en Eau (BNPE ; <https://bnpe.eaufrance.fr/>) et les zones irriguées issues du Recensement général agricole. En croisant ces informations, les chroniques piézométriques situées dans les zones fortement pompées et/ou irriguées, et qui semblaient significativement influencées par ces activités humaines ont été éliminées du jeu de données. De plus, lorsque plusieurs piézomètres se situaient à moins de 10 kilomètres de distance dans la même entité hydrogéologique et avec le même dynamisme, seul le piézomètre présentant la plus longue chronique et comportant le moins de lacunes a été sélectionné. Cette deuxième analyse a permis de sélectionner 390 chroniques piézométriques.

Ces 390 chroniques piézométriques ont été visualisées une dernière fois en concertation avec les hydrogéologues régionaux du BRGM et les responsables de réseaux piézométriques. Cette étape a permis de sélectionner plus finement les piézomètres via l'apport de leurs connaissances sur les influences anthropiques avérées et potentielles non référencées dans les bases de données. Une note sur le degré d'influence anthropique sur les niveaux piézométriques a pu être attribuée à chaque piézomètre. Elle s'échelonne de 0 à 4 : (0) pas d'information, (1) non-influencé, (2) faiblement influencé – présence de prélèvements ponctuels (de faible fréquence, de courte durée) affectant peu la variabilité des niveaux piézométriques, (3) modérément influencé – présence de prélèvements d'assez longue durée et/ou de fréquence assez régulière affectant modérément la variabilité des niveaux piézométriques, (4) fortement influencé – présence de prélèvements très réguliers, de longue durée, et d'intensité élevée. Le type d'usage (captage AEP, captage à des fins d'irrigation, etc.) a pu également être précisé lorsqu'un piézomètre est influencé par les activités anthropiques, ainsi que la fréquence d'influence (annuelle, saisonnière, etc.). En fonction du degré d'influence et de la fréquence de pompage, tous les piézomètres

fortement influencés (note de 4) ont été éliminés du jeu de données. Compte-tenu du manque de données piézométriques de longue durée dans certaines régions, certains piézomètres présentant une influence qualifiée de « modérée » mais exploitables pour une étude de variabilité ont été conservés (cas de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur) (3,5% du jeu de données). A l'issue de cette succession de visualisations, 256 chroniques piézométriques pas ou peu influencées ont été retenues pour l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les niveaux piézométriques.

Toutefois, la constitution de cette base de données s'appuie essentiellement sur du « dire d'experts » et le croisement de base de données qualitatives et quantitatives sur les potentielles influences (pompages, irrigations, état des lieux, etc.) qui elles-mêmes possèdent leurs propres limites. Par conséquent, certains piézomètres sélectionnés pourraient tout de même être soumis à une influence des prélèvements sur le long terme mais qui n'est pas forcément identifiable visuellement sur les chroniques piézométriques (e.g. pompages sur le long terme, modifications de l'occupation du sol).

Préalablement aux analyses, un prétraitement a été réalisé sur certaines séries piézométriques pour éliminer les pompages ponctuels et résiduels, corriger les changements de repères altimétriques passés non corrigés dans les séries piézométriques ainsi que les erreurs de bancarisation et les dérives de capteurs. Lors de ce prétraitement, 2 chroniques piézométriques parmi les 256 ont été supprimées de la base de données à cause de doutes sur une trop forte influence anthropique sur les niveaux piézométriques. Au cours de ces analyses, le traitement a été réalisé au pas de temps mensuel. Ce choix est lié à trois facteurs : (i) la volonté de mettre en évidence les différentes dynamiques piézométriques (i.e. ne pas masquer la variabilité annuelle), (ii) l'irrégularité de la fréquence de mesure piézométrique (échantillonnage mensuel puis journalier), et (iii) le temps caractéristique des aquifères dont très peu ont une sensibilité permettant une réponse plus rapide que quelques semaines.

Présentation de la base de données

Formations hydrogéologiques suivies

Les 254 piézomètres sélectionnés se répartissent sur de multiples formations hydrogéologiques : alluviales, sédimentaires, volcaniques et socle (Fig. 1a). La grande majorité des piézomètres sélectionnés se situent dans des aquifères sédimentaires : ils couvrent densément le Bassin Parisien, et plus sporadiquement le Bassin Aquitain. Chaque piézomètre a été rattaché à un secteur hydrogéologique basé sur le croisement entre les masses d'eau, la lithologie (calcaire, craie, etc.) et le dynamisme des nappes.

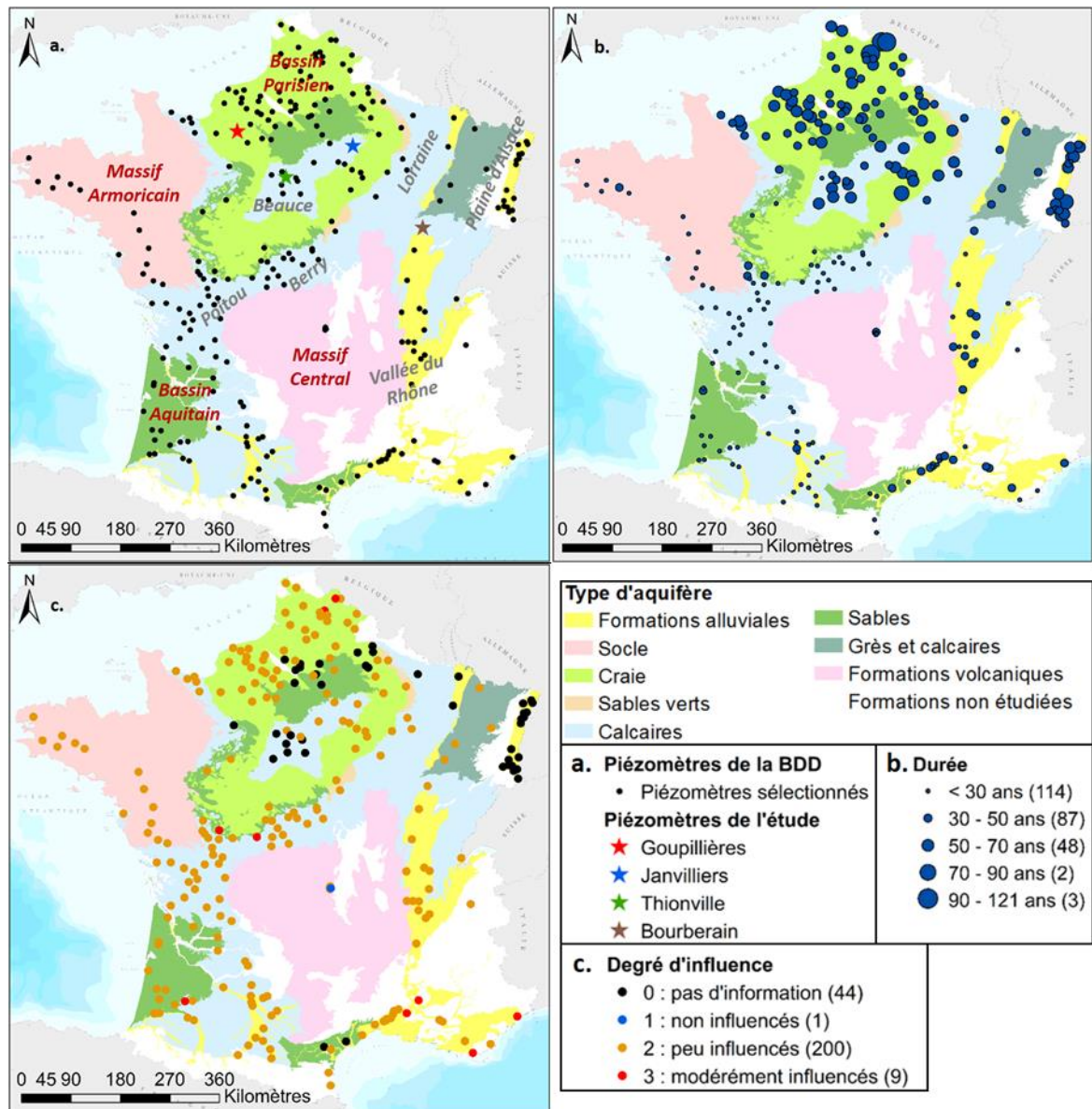


Figure 1. Présentation de la base de données avec (a) les piézomètres constituant la base de données et les piézomètres utilisés pour cette étude, (b) la durée des chroniques piézométriques, (c) le degré d'influence anthropique sur les niveaux piézométriques.

La craie du Séno-Turonien du Bassin Parisien est l'aquifère le plus représenté parmi les piézomètres sélectionnés, suivi des calcaires du Jurassique (Lorraine, Berry, Poitou) sur la bordure du Bassin Parisien et des calcaires de Beauce de l'Eocène. Les piézomètres situés dans le Bassin Aquitain suivent principalement les calcaires fracturés du Jurassique au Nord, et de multiples formations sédimentaires dans la partie sud (sables, calcaires). Enfin, la grande majorité des piézomètres sélectionnés dans la vallée du Rhône se situent dans des formations alluviales et fluvio-glaciaires.

Les piézomètres situés dans des aquifères alluviaux sont aussi nombreux dans le jeu de données sélectionné, notamment en plaine d'Alsace, sur le pourtour méditerranéen et au niveau de la Garonne. Enfin, quelques piézomètres sont situés dans les formations volcaniques du Puy-de-Dôme et dans les formations de socle du massif Armoricaïn.

Durée des chroniques piézométriques

La durée des chroniques sélectionnées s'étend de 20 ans à 121 ans (Fig. 1b). La répartition spatiale de la durée des chroniques présente une sectorisation nord-sud importante avec les plus longues chroniques se situant dans le Bassin Parisien et en Alsace, et des chroniques plus courtes de la Bretagne au Sud de la France. Cet important contraste Nord-Sud est lié à une installation tardive du réseau piézométrique dans le centre et Sud de la France dans les années 1990, alors que ce réseau piézométrique a été installé dans les années 1970 au nord de la France. Il existe localement quelques longues chroniques avec plus de 100 ans de données, comme dans la craie du Séno-Turonien du Bassin Artois-Picardie.

Cette sectorisation nord-sud de la mise en place du réseau piézométrique est un élément limitant pour des analyses nécessitant de longues chroniques piézométriques à l'échelle de la France métropolitaine. Un travail de reconstitution historique de chroniques serait donc nécessaire pour pallier ce manque de données.

Degré d'influence anthropique

Le degré d'influence anthropique sur les niveaux piézométriques est représenté pour chaque piézomètre sur la figure 1c. Lorsque les piézomètres présentent un degré d'influence équivalent à 0, aucune information sur l'influence anthropique n'a été référencée dans les états des lieux du réseau piézométrique ou par les hydrogéologues régionaux. Ces chroniques qui visuellement ne semblaient pas influencées, et situées à une distance raisonnable de captages et de zones d'irrigation intense ont été conservées dans la base de données. Elles se situent principalement dans les calcaires de Beauce, la craie du Séno-Turonien de Picardie et dans les alluvions actuelles et anciennes de la plaine d'Alsace. Elles représentent environ 17% des 254 piézomètres sélectionnés.

La grande majorité des chroniques piézométriques sélectionnées (~79%) sont décrites comme peu influencées. Pour ces chroniques, l'influence anthropique est considérée comme « faible » dans les états des lieux de réseaux piézométriques ou par les hydrogéologues régionaux et responsables de réseaux piézométriques. Enfin, ~3,5% des chroniques piézométriques sélectionnées sont décrites comme modérément influencées et ~0,4% comme non influencées.

Evaluation de la variabilité multi-échelle temporelle des niveaux piézométriques

Les niveaux piézométriques présentent des variations temporelles qui peuvent être qualifiées de « cycliques ». Cette cyclicité peut être annuelle (*i.e.* liée à l'alternance été/hiver), pluriannuelle (*i.e.* succession d'années humides ou sèches sur plusieurs années), ou encore interdécennale (*i.e.* succession d'années humides ou sèches sur plus d'une décennie). Elles peuvent être mises en évidence par décomposition du signal piézométrique selon différentes échelles de variabilité (*e.g.* <1 an, ~1 an, ~7 ans, ~17 ans). Avec la base de données préalablement établie, il est possible de caractériser la variabilité multi-échelle temporelle (*i.e.* des variations temporelles selon différentes périodicités) au sein d'une chronique piézométrique. Cette analyse est effectuée en prenant en compte 2 périodes différentes (1996-2019 et 1976-2019) qui permettent de maximiser la durée des chroniques et la répartition spatiale des piézomètres respectivement à l'échelle de la France métropolitaine puis sur le Nord de la France.

Approche méthodologique

L'analyse de la variabilité multi-échelle des niveaux piézométriques peut être réalisée à l'aide d'une analyse multirésolution par ondelettes (MODWT³). Cette méthode de décomposition est particulièrement efficace pour l'identification des différentes échelles de variabilité des séries environnementales comme les précipitations ou les débits de rivière (*e.g.* Massei *et al.*, 2017).

³ Maximal overlap discrete wavelet transform

Cette méthode permet de décomposer le signal à étudier en plusieurs composantes, appelées détails, chacune représentant l'oscillation du signal à une échelle temporelle donnée. Cette décomposition est réalisée via un processus itératif de filtrage de la série temporelle en utilisant une série de filtres passe-hauts et passe-bas. A chaque itération, le filtre passe-haut dégage une composante haute-fréquence (le détail d'ondelettes) et le filtre passe-bas, une composante basse-fréquence (*i.e.* avec une plus grande périodicité) appelée « approximation ». Ce processus cesse dès que l'approximation ne peut plus être décomposée, ou qu'une profondeur de décomposition préalablement fixée soit atteinte. La somme de tous les détails et de la dernière approximation équivaut au signal d'origine. Plus de détails concernant cette méthodologie sont disponibles dans Cornish *et al.* (2006). Enfin, pour chaque détail, un pourcentage d'énergie représentant la contribution de la composante dans le signal total peut être calculé.

La figure 2 présente un exemple de décomposition par MODWT sur le piézomètre de Janvilliers situé dans les calcaires de Champigny. Le pourcentage d'énergie des détails d'ondelettes indique 3 grandes échelles de variabilité dominantes : ~1 an, ~6,5 ans et ~17 ans. Ces 3 échelles de variabilité expliquent à eux seuls un peu plus de 70% de la variabilité des niveaux piézométriques. Ce piézomètre présente donc un comportement mixte : une variabilité pluriannuelle et interdécennale importante surimposée par une variabilité annuelle marquée.

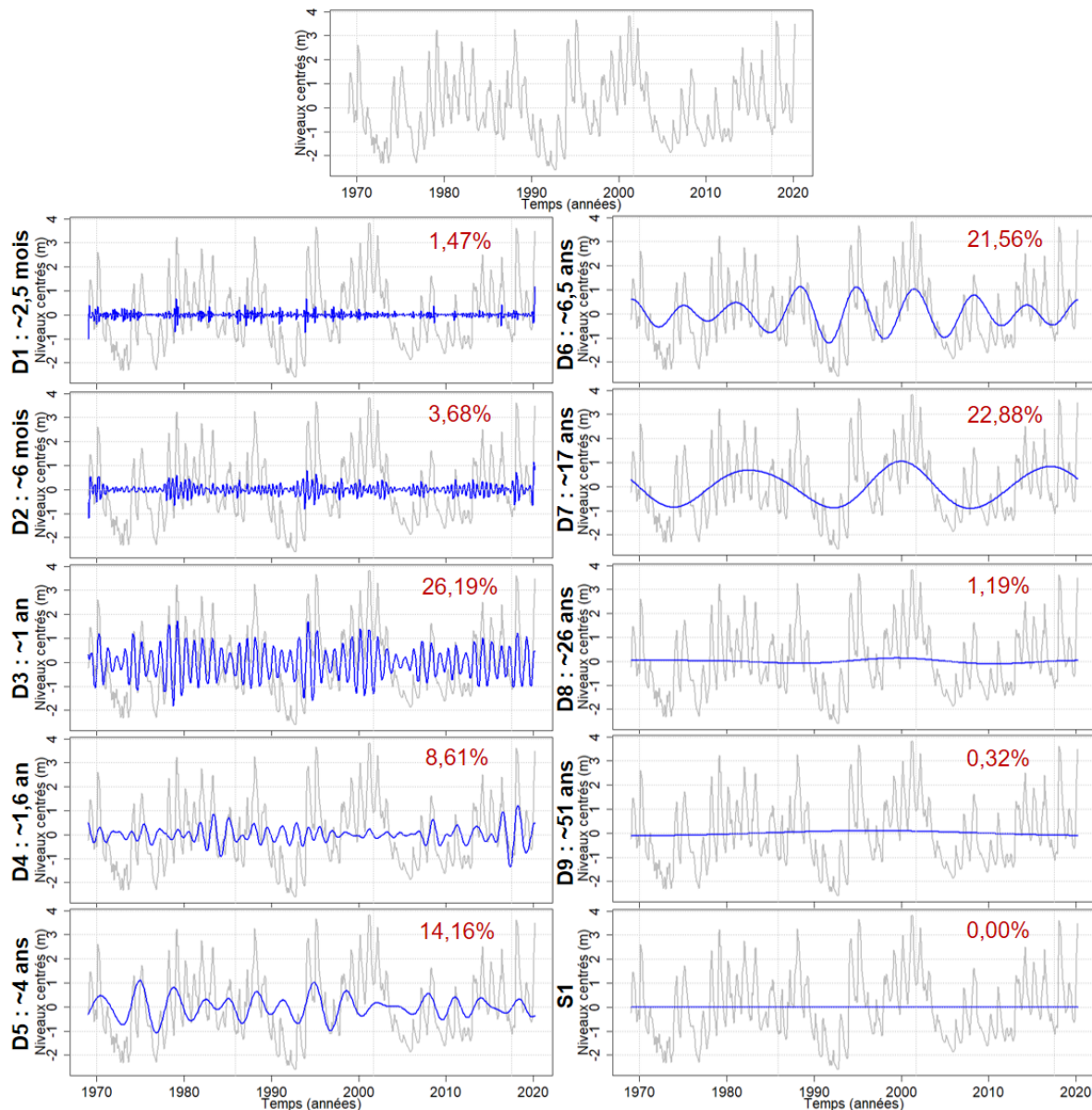


Figure 2. Analyse multirésolution par ondelettes (MODWT) du piézomètre de Javilliers situé dans les calcaires de Champigny. La chronique piézométrique analysée est représentée en gris, les détails d'ondelettes (D1 à D9) associés aux périodicités moyennes ainsi que la dernière approximation (S1) sont représentés en bleu. Le pourcentage d'énergie de chaque détail d'ondelettes est indiqué en rouge.

Variabilité multi-échelle temporelle des niveaux piézométriques

La répartition de l'énergie entre les différentes échelles de variabilité pour l'ensemble des piézomètres étudiés est présentée en figure 3. Cette répartition met en évidence une distribution spatiale de la répartition de l'énergie cohérente avec le contexte hydrogéologique. Les échelles de variabilité pluriannuelle et interdécennale (5-12 ans et 12-24 ans) sont majoritairement dominantes sur une grande partie du Bassin Parisien, depuis les calcaires de Beauce jusqu'à la craie du Séno-Turonien plus au Nord (systèmes aquifères au comportement très inertiel). Ces échelles de variabilité pluriannuelle et interdécennale prévalent également sur la période 1996-2019 dans les formations fluvio-glaciaires de la vallée du Rhône, les calcaires du Jurassique du Poitou, ou encore les formations alluviales de la Garonne (Fig. 3a). L'augmentation de la période d'étude (1976-2019) met en évidence une augmentation de la part explicative de la variabilité 12-24 ans dans les niveaux piézométriques des calcaires de Beauce, mais aussi dans la partie sud de la craie du Séno-Turonien, où elle devient dominante (Fig. 3b). L'importance de cette échelle de variabilité dans les niveaux piézométriques diminue en remontant vers

la partie nord de la craie du Séno-Turonien de Normandie-Picardie où l'énergie se répartit de manière plus égale entre les échelles 12-24 ans et 5-12 ans, ou bien l'échelle 5-12 ans reste prédominante. La prédominance de ces échelles de variabilité pluriannuelles ou interdécennales sur une courte ou longue période met en évidence la nature inertielle (*i.e.* le fort effet mémoire) de ces formations.

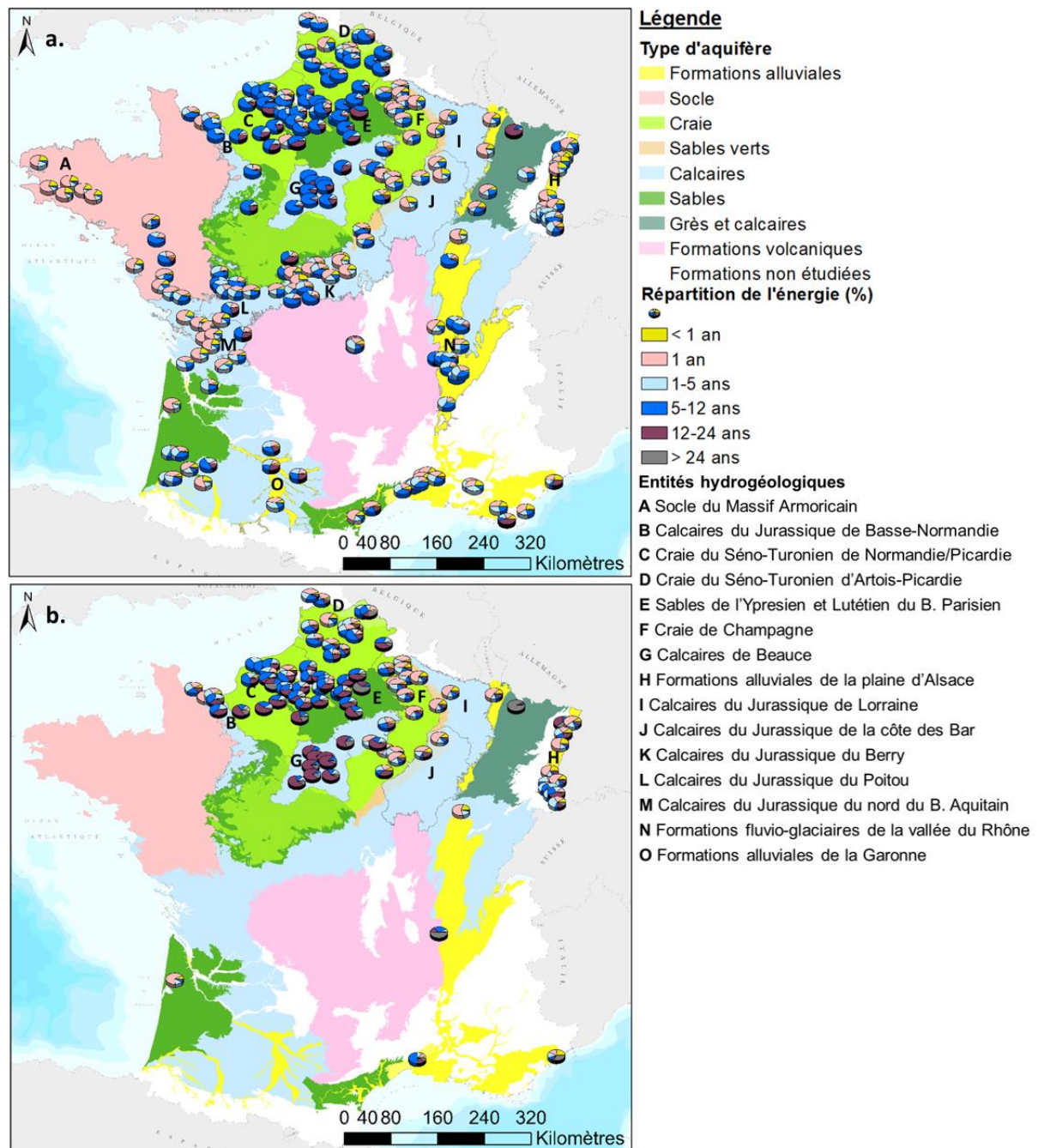


Figure 3. Proportion de la variance totale expliquée par chaque échelle de variabilité (énergie associée à chaque échelle de variabilité, exprimée comme le pourcentage d'énergie totale dans chacune des séries piézométriques de la base de données) sur (a) la période 1996-2019 et (b) la période 1976-2019.

Bien que ces échelles de variabilité pluriannuelle et interdécennale expliquent une part non négligeable de la variabilité des niveaux piézométriques de la craie du Séno-Turonien du bassin Artois-Picardie, la variabilité annuelle s'exprime de manière plus importante qu'en Normandie et en Picardie (Fig. 3). La bordure de la craie du Séno-Turonien en Champagne et en Bourgogne présente également ce type de comportement, même si la variabilité annuelle explique une plus grande part de la variabilité que dans la craie du bassin Artois-Picardie. Cette variabilité annuelle marquée pourrait être en partie liée à un

réseau karstique bien développé dans ces régions. Ce type de résultats a également été décrit par Massei *et al.* (2019) dans la craie du bassin de Paris. Les calcaires du Jurassique en bordure du Bassin Parisien allant de la Lorraine jusqu'au Berry présentent quant à eux une variabilité annuelle prédominante avec une petite part de la variabilité portée par les échelles pluriannuelle et pluridécennale. De manière générale, ces entités hydrogéologiques manifestent un comportement mixte lié à leur double porosité.

La variabilité annuelle devient fortement dominante principalement dans les entités sédimentaires fortement fracturées comme les calcaires du Jurassique du Nord du Bassin Aquitain, ou dans le socle du Massif Armoricain (Fig. 3a).

Généralement, les entités alluviales ne montrent pas de comportement typique à travers la France métropolitaine (Fig. 3a). Il existe aussi bien des entités avec une dynamique pluriannuelle, une dynamique annuelle ou encore une dynamique mixte. Certaines formations alluviales, par exemple celles de la plaine d'Alsace, peuvent présenter tous ces types de comportement. Ainsi, la prédominance d'une ou plusieurs échelles de variabilité dépend fortement du contexte géologique local.

L'étude de la variabilité multi-échelle temporelle des niveaux piézométriques révèle 3 grands types de comportements : annuel, mixte, pluriannuel voire interdécennal dominant. En fonction de leur prédominance dans la variabilité piézométrique, ces différents comportements peuvent fortement influencer l'occurrence et l'amplitude des extrêmes piézométriques, ce qui a donc été étudié par la suite.

Evaluation de l'influence de la variabilité pluriannuelle et interdécennale sur l'occurrence et l'amplitude des extrêmes piézométriques

Approche méthodologique

L'évaluation de l'influence de la variabilité basse-fréquence sur l'occurrence et l'amplitude des extrêmes piézométriques est réalisée en filtrant du signal piézométrique les échelles de variabilité identifiées précédemment par MODWT et en étudiant si le retrait d'une ou des deux composantes pluriannuelle (~7 ans) et interdécennale (~17 ans) conduit à un nombre et à un niveau d'extrêmes différent dans la série piézométrique filtrée par rapport à la série mesurée. L'identification des extrêmes dans les chroniques brutes repose sur le dépassement de seuils préalablement fixés. A ce stade de l'étude, les seuils sont fixés arbitrairement dans les chroniques brutes à partir des percentiles 0.8 et 0.2 (Fig. 4) ; d'autres valeurs de seuils pourraient également être testées dans le cadre d'un approfondissement de cette étude. Une fois ces extrêmes identifiés, pour chacune des chroniques étudiées, un filtrage des détails correspondant à la variabilité pluriannuelle, interdécennale, puis de l'association de ces deux détails est réalisé par simple soustraction au signal original. Par ce procédé, un signal filtré de ces variabilités pluriannuelle et/ou interdécennale est obtenu. On évalue enfin si le retrait de la composante considérée affecte ou non les pics de hautes eaux (HE) ou de basses eaux (BE) initialement extraits dans les données brutes. Dans le cas où les pics de HE dépassent toujours le seuil initial, alors l'échelle de variabilité soustraite a peu d'influence sur l'apparition de ces extrêmes. A l'inverse, si ces pics passent en-dessous du seuil initial, alors l'échelle de variabilité soustraite influence de manière non négligeable l'apparition de ces extrêmes. Cette même évaluation est réalisée avec les pics de BE. Cette analyse est ici effectuée sur la période 1976-2019.

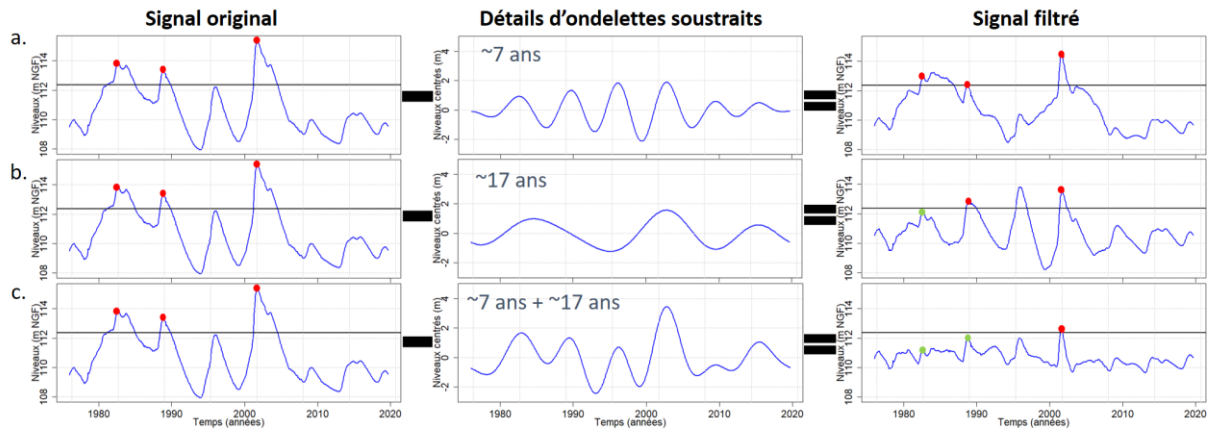


Figure 4. Méthodologie appliquée pour étudier l'influence des échelles de variabilité pluriannuelles et interdécennales sur les pics de HE d'une nappe supérieurs au percentile 0.8 et sur la période 1976-2019. Exemple du piézomètre de Goupillières (craie du Séno-Turonien de Normandie) : (a) filtrage de la variabilité ~7 ans, (b) filtrage de la variabilité ~17 ans, (c) filtrage de la somme des variabilités ~7 ans et 17 ans.

Influence de la variabilité basse-fréquence sur l'occurrence et l'amplitude des extrêmes piézométriques

L'influence de la variabilité pluriannuelle, interdécennale et de leur combinaison sur l'amplitude des extrêmes piézométriques est évaluée pour 4 piézomètres présentant différents types de comportement (Fig. 5 et 6) : le piézomètre de Bourberain (calcaires du Jura) présentant un comportement annuel dominant, le piézomètre de Janvilliers (calcaires de Champigny) présentant un comportement mixte, le piézomètre de Goupillières (craie du Séno-Turonien de Normandie) présentant un comportement pluriannuel et interdécennal dominant, et le piézomètre de Thionville (calcaires de Beauce) présentant un comportement interdécennal dominant.

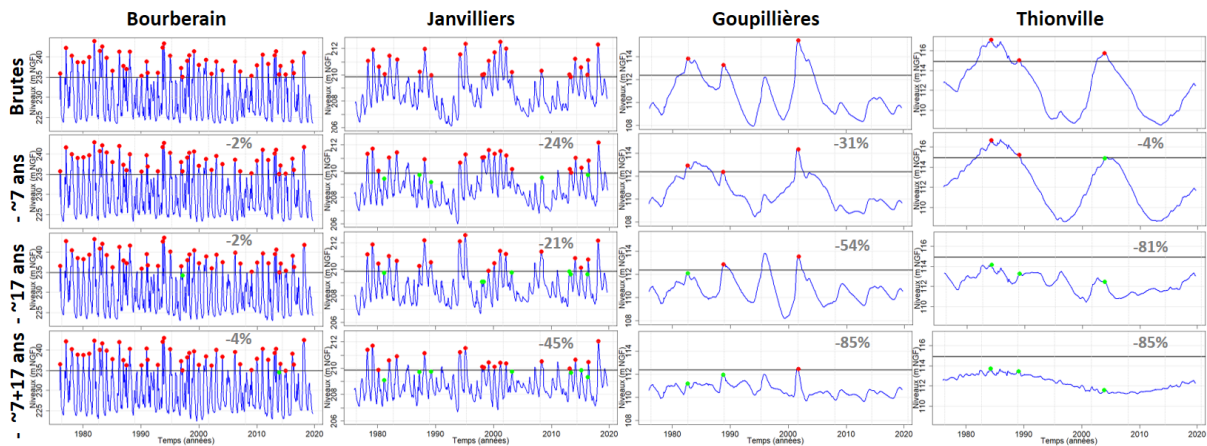


Figure 5. Impact du retrait des échelles de variabilité ~7 ans, ~17 ans et ~7 + 17 ans sur les extrêmes supérieurs au percentile 0.8 à Bourberain (calcaires du Jura ; dynamisme annuel), Janvilliers (calcaires de Champigny ; dynamisme mixte), Goupillières (craie du Séno-Turonien ; dynamisme pluriannuel/interdécennal) et Thionville (calcaires de Beauce ; dynamisme interdécennal). En gris est indiqué le pourcentage d'énergie représenté par la ou les composante(s) soustraites. Pour les données brutes, les points rouges représentent les pics de HE. Pour les données filtrées (~7 ans, ~17 ans et ~7 + 17 ans), les points rouges représentent les pics de HE des données brutes pour lesquels le niveau est toujours supérieur au percentile 0.8 malgré le retrait de la composante pluriannuelle/interdécennale ; les points verts représentent les pics des données brutes pour lesquels le niveau devient inférieur au percentile 0.8 lors du retrait de la composante pluriannuelle/interdécennale.

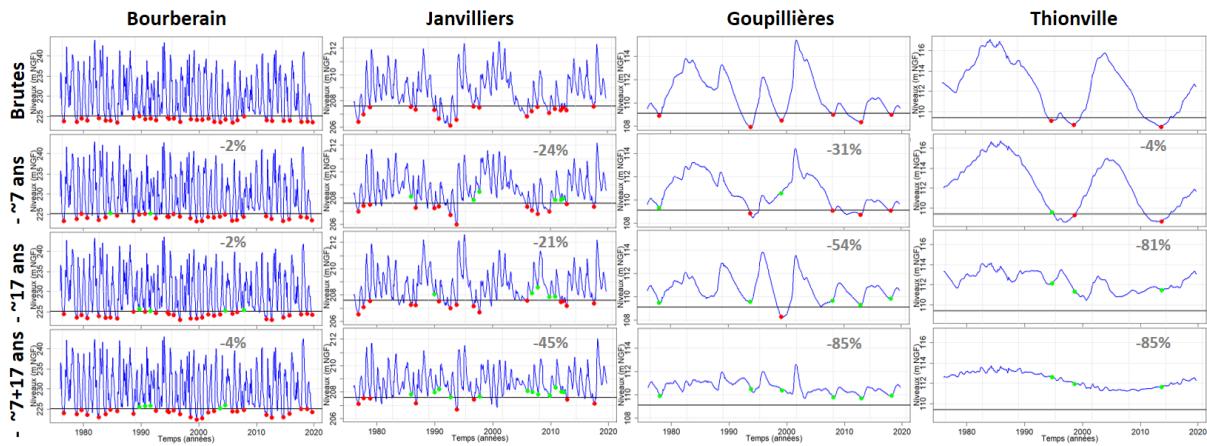


Figure 6. Impact du retrait des échelles de variabilité ~ 7 ans, ~ 17 ans et $\sim 7 + 17$ ans sur les extrêmes inférieurs au percentile 0.2 à Bourberain (calcaires du Jura ; dynamisme annuel), Janvilliers (calcaires de Champigny ; dynamisme mixte), Goupillières (craie du Séno-Turonien ; dynamisme pluriannuel/interdécennal) et Thionville (calcaires de Beauce ; dynamisme interdécennal). En gris est indiqué le pourcentage d'énergie représenté par la ou les composante(s) soustraites. Pour les données brutes, les points rouges représentent les pics de BE. Pour les données filtrées (~ 7 ans, ~ 17 ans et $\sim 7 + 17$ ans), les points rouges représentent les pics de BE des données brutes pour lesquels le niveau est toujours inférieur au percentile 0.2 malgré le retrait de la composante pluriannuelle/interdécennale ; les points verts représentent les pics des données brutes pour lesquels le niveau devient supérieur au percentile 0.2 lors du retrait de la composante pluriannuelle/interdécennale.

Le piézomètre de Bourberain à dominante annuelle présente une fréquence d'apparition des pics de hautes et basses eaux quasiment annuelle (Fig. 5 et 6). Cette fréquence d'apparition est caractéristique des nappes dites réactives. La variabilité pluriannuelle et interdécennale étant très peu explicative de la variabilité totale des niveaux piézométriques (4% de la variance totale), son retrait impacte de manière très négligeable les pics de HE et de BE. En effet, la majorité des pics de HE et BE identifiés dans les données brutes restent supérieurs et inférieurs aux seuils établis malgré le retrait des composantes pluriannuelle et/ou interdécennale. On notera tout de même que malgré l'effet marginal de la variabilité basse-fréquence dans l'apparition des hautes et basses eaux, elle impacte plus les bas niveaux que les hauts niveaux.

Le piézomètre de Janvilliers à comportement mixte présente quant à lui une fréquence d'apparition des HE et BE bien moins importante que celui de Bourberain. Ce phénomène est directement lié à une plus grande influence de la variabilité pluriannuelle et interdécennale dans la variabilité totale des niveaux piézométriques (ces échelles de variabilité comptant pour 45% de la variance totale). Les échelles ~ 7 ans et ~ 17 ans, comptant respectivement pour 24% et 21% de la variabilité totale des niveaux piézométriques, sont à l'origine d'un nombre identique de pics de HE et BE, même si ces deux composantes n'influencent pas forcément les mêmes épisodes. Le retrait des deux niveaux d'échelle (~ 7 ans + ~ 17 ans) indique également que les pics de HE sont plus influencés par la variabilité annuelle alors que les pics de BE sont plus influencés par la variabilité pluriannuelle/interdécennale. En effet, la majorité des pics de BE repassent au-dessus du seuil initial (percentile 0.2) lorsque la variabilité basse-fréquence est éliminée du signal, et ne sont donc plus considérés comme des extrêmes. A l'inverse, la majorité des pics de HE restent au-dessus du seuil initial (percentile 0.8) lorsque la variabilité basse-fréquence est éliminée du signal, et sont donc toujours considérés comme des extrêmes.

Dans le cas du piézomètre de Goupillières à dominante pluriannuelle et interdécennale, le nombre de pics de HE et BE est considérablement réduit par rapport aux piézomètres à dominante annuelle et mixte. Les pics de HE sont principalement portés par l'association des deux échelles de variabilité basse-fréquence (~ 7 ans + ~ 17 ans) qui portent à eux deux 85% de la variabilité totale des niveaux piézométriques. Seul le pic de 2001 demeure identifié comme un extrême lorsque les échelles de variabilité ~ 7 et ~ 17 ans sont filtrées, mais il est tout de même considérablement réduit en amplitude (-4 mètres environ). Ceci signifie qu'en plus d'être porté de manière non négligeable par les échelles ~ 7

ans et ~17 ans, ce pic de 2001 est également provoqué par une recharge annuelle importante. Les pics de BE sont quant à eux plus nombreux que les pics de HE, et ils repassent tous au-dessus du seuil lorsque les échelles de variabilité ~7 et ~17 ans sont filtrées, signifiant que les BE sont également portés par cette variabilité basse-fréquence. Contrairement aux pics de HE qui semblent être principalement portés par l'association des composantes ~7 et ~17 ans puisque le retrait individuel de ces deux composantes affecte assez peu les extrêmes (*i.e.* ils ne passent pas en-dessous du seuil), l'origine des pics de BE peut être plus facilement discriminée. En effet, ces pics de BE sont quant à eux principalement portés par l'échelle de variabilité ~17 ans puisque son retrait affecte la plupart des extrêmes qui passent alors au-dessus du seuil initial.

A l'image du piézomètre de Goupillières, le piézomètre de Thionville présentant un comportement à dominante interdécennale (81% de la variabilité totale) montre également un nombre réduit de pics de HE, mais également de BE, ce qui le distingue du piézomètre de Goupillières. Dans le cas de Thionville, l'influence de l'échelle de variabilité ~17 ans sur les extrêmes est largement prépondérante puisque le retrait de cette échelle engendre une diminution non négligeable de l'intensité des pics de HE et BE.

Ces composantes pluriannuelle et interdécennale jouent un rôle prépondérant dans l'occurrence des extrêmes piézométriques lorsqu'elles expliquent une part non négligeable de la variabilité totale des niveaux piézométriques (*e.g.* Janvilliers, Goupillières, Thionville). Lorsque les deux composantes expliquent toutes deux une part importante de la variabilité totale, elles peuvent soit accentuer, soit atténuer l'effet de l'autre composante sur les extrêmes ou bien ne pas avoir d'impact : c'est le cas pour Goupillières ou Janvilliers. Le piézomètre de Goupillières en est une bonne illustration. Par exemple, les HE de 2001 ont été engendrées par le « phasage » quasi-parfait entre un haut niveau pluriannuel et un haut niveau interdécennal, associés également à une recharge annuelle importante (Fig. 4 et 5). A l'inverse, un haut niveau piézométrique inférieur au seuil fixé est observable en 1996 dans les données brutes. Ce pic est lié à un haut niveau pluriannuel mais qui est modulé par un bas niveau interdécennal, ce qui permet l'atténuation de l'intensité du pic pluriannuel (Fig. 4 et 5). Ainsi, ce haut niveau piézométrique de 1996, visible dans les données brutes, ne dépasse pas le seuil fixé. Dans le cas où il n'y aurait pas eu de modulation de ce haut niveau pluriannuel par un bas niveau interdécennal via une opposition de phase, alors ce haut niveau de 1996 aurait dépassé le seuil fixé et aurait pu être plus intense que celui de 2001 (Fig. 4 et 5).

Conclusion et perspectives

L'étude de la variabilité multi-échelle temporelle des niveaux piézométriques indique une hétérogénéité spatiale à l'échelle de la France métropolitaine de la contribution de la variabilité basse-fréquence dans la variabilité des différentes séries piézométriques. Le type de formation hydrogéologique semble être le facteur déterminant dans cette répartition géographique, bien qu'il ne soit pas possible de quantifier le rôle joué par les états de surface des bassins versants d'après les données de la présente étude. Dans les systèmes à porosité matricielle, comme la craie du Séno-Turonien de Normandie/Picardie, les variabilités pluriannuelles à interdécennales sont prépondérantes dans le comportement des niveaux piézométriques. Une augmentation de la fracturation de ces systèmes pourrait par exemple engendrer une amplification de la variabilité annuelle réduisant la part de la variabilité pluriannuelle et interdécennale dans la variabilité totale des niveaux piézométriques (*e.g.* craie de Champagne). Cette variabilité annuelle est également prépondérante dans les systèmes fortement fracturés comme le socle du Massif Armoricain, ou encore les karsts jurassiques du nord du Bassin Aquitain, rendant négligeable la variabilité pluriannuelle et interdécennale.

Le type de comportement (annuel dominant, mixte, pluriannuel dominant, interdécennal dominant) est un élément clé dans la compréhension des extrêmes. En effet, plus un piézomètre est soumis à une variabilité basse-fréquence (pluriannuelle à interdécennale) importante, plus le nombre de pics de HE et de BE se raréfie, puisqu'ils sont portés par cette variabilité basse-fréquence qui ne comporte, par nature, que peu d'extrema sur une période de temps relativement courte (quelques dizaines d'années). De

manière générale, on notera également une plus forte influence des composantes pluriannuelle et interdécennale sur les bas niveaux piézométriques que sur les hauts niveaux piézométriques. Enfin, dans les systèmes présentant des variabilités pluriannuelles et interdécennales expliquant une part importante de la variabilité totale des niveaux piézométriques, et qui s'expriment dans des proportions à-peu-près égales, ces composantes basse-fréquences peuvent interférer et ainsi accentuer ou atténuer l'amplitude des hauts ou bas niveaux piézométriques.

L'étude de l'influence de la variabilité basse-fréquence sur l'amplitude, l'intensité et l'occurrence des extrêmes piézométriques sera généralisée à l'échelle de la France métropolitaine pour l'ensemble des piézomètres constituant la base de données présentée ici. Ces variabilités pluriannuelles et interdécennales pilotant les extrêmes piézométriques, et plus globalement l'ensemble des variables environnementales (précipitations, débits, etc.), sont connues pour être contraintes par les forçages climatiques et océaniques large-échelle (*e.g.* Giuntoli *et al.*, 2013; Boé et Habets, 2014; Lavers *et al.*, 2015; Massei *et al.*, 2017; Liesch et Wunsch, 2019; Fossa, 2020) et par les forçages géologiques et géomorphologiques. Par conséquent, la poursuite de ce travail visera à étudier le déterminisme climatique de ces variabilités pluriannuelles-interdécennales et des extrêmes piézométriques associés.

Bibliographie

Blöschl, G., Bierkens, M., *et al.*, 2019a. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 64(10), 1141-1158.

Cornish, C.R., Bretherton, C.S., Percival, D.B., 2006. Maximal Overlap Wavelet Statistical Analysis With Application to Atmospheric Turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 119, 339-374.

Lavers, D.A., Hannah, D.M., 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.

Massei, N., Dieppois, B., Hannah, D.M., Lavers, D.A., Fossa, M., Laignel, B., 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.

Massei, N., Fournier, M., Lattelais, C., Dupont, J.-P., 2019. Variabilité des eaux souterraines dans l'aquifère de la craie du bassin de Paris. Programme VARSOUT AESN, Université Rouen-Normandie.