Influence de la variabilité basse fréquence sur l'évaluation des tendances et extrêmes piézométriques : France métropolitaine et focus sur le bassin de la Seine

Lisa Baulon[1,2]*, Delphine Allier[2], Nicolas Massei[1], Hélène Bessiere[2], Matthieu Fournier[1], Violaine Bault[2]

[1] Normandie Univ, UNIROUEN, UNICAEN, CNRS, M2C, 76000 Rouen, France
[2] BRGM, 3, avenue C. Guillemin, 45060 Orléans cedex 2, France
[*] lisa.baulon@etu.univ-rouen.fr

Résumé

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. Dans de nombreux contextes hydrogéologiques, ces extrêmes piézométriques sont générés et soutenus par une variabilité pluriannuelle à pluridécennale d'origine climatique. Cette variabilité basse fréquence peut également avoir une influence importante sur les tendances piézométriques, rendant ainsi leur évaluation délicate. La présente étude en cours dans cette action EXSEINE vise à (i) décrire la variabilité multi-échelle temporelle des niveaux piézométriques à l'échelle de la France métropolitaine, avec un focus sur le bassin de la Seine qui sera ainsi recadré dans un contexte de plus large échelle, (ii) déterminer l'influence de la variabilité basse fréquence sur les tendances piézométriques à partir des observations depuis les dernières décennies (depuis 1976 au mieux), (iii) déterminer l'influence de la variabilité basse fréquence sur l'occurrence et l'amplitude des extrêmes piézométriques. Cette étude permet d'identifier 4 grands types de comportements à l'échelle de la France métropolitaine : annuel dominant, mixte, pluriannuel dominant et interdécennal dominant. Ces comportements sont fortement reliés aux types de formations hydrogéologiques étudiés. Un filtrage par analyse multirésolution (MODWT) des composantes pluriannuelle et interdécennale a permis d'évaluer l'impact de ces variabilités basses fréquences en matière de tendances et d'extrêmes. Ainsi, le nombre d'occurrences d'extrêmes se réduit de façon significative lorsque les variabilités basses fréquences sont filtrées du signal piézométrique, et ce comportement est logiquement d'autant plus marqué que la variance piézométrique est contrôlée par ces fréquences. De plus, la variabilité basse fréquence semble avoir une influence plus importante sur les bas niveaux que sur les hauts niveaux piézométriques. Les mêmes conclusions peuvent être tirées pour les tendances piézométriques, qui peuvent être fortement influencées lorsque la variance des basses fréquences est forte dans la piézométrie. Par ailleurs, cette étude révèle à ce stade que la variabilité pluriannuelle entraîne une élévation des niveaux piézométriques dans le Nord de la France et leur diminution dans le Sud de la France, tandis que la variabilité interdécennale entraîne leur diminution dans le Nord.

Points clefs

- ✓ *Quatre grands types de comportements sont identifiables dans les formations hydrogéologiques de France métropolitaine : annuel, mixte, pluriannuel, interdécennal.*
- ✓ *Une disparité Nord-Sud de l'influence de la variabilité basse fréquence sur les tendances piézométriques est discernable sur le territoire métropolitain.*
- ✓ *La connaissance de la part explicative de la variabilité basse fréquence dans les niveaux piézométriques est déterminante pour comprendre l'occurrence et l'amplitude des extrêmes.*

Abstract

In a context of global change, it is crucial to understand the links between groundwater extremes (at the origin of hydrogeological droughts and floodings) and climate variability. In many hydrogeological contexts, these groundwater extremes are generated and supported by multiannual to multidecadal variability of climatic origin. This low-frequency variability can also have a significant influence on the groundwater level trends, thus making their assessment difficult. The present study in progress in this EXSEINE action aims to (i) describe the multi-temporal variability of groundwater levels at the scale of metropolitan France, with a focus on the Seine basin which will thus be reframed in a broader context, (ii) determine the influence of low-frequency variability on groundwater level trends from observations over the last decades (since 1976 at best), (iii) determine the influence of low-frequency variability on the occurrence and amplitude of groundwater extremes. This study highlights 4 main types of behavior at the scale of metropolitan France: annual, mixed, multiannual, interdecadal. These behaviors are strongly linked to the types of hydrogeological formations studied. Multiresolution analysis (MODWT) filtering of the multiannual and interdecadal components assessed the impact of these low-frequency variabilities in terms of trends and extremes. Thus, the number of occurrences of extremes is significantly reduced when low-frequency variability is filtered from the groundwater signal, and logically this behavior is more pronounced as the groundwater level variance is controlled by these frequencies. In addition, the low-frequency variability seems to have a greater influence on the low levels than on the high groundwater levels. The same conclusions can be drawn for the groundwater level trends, which can be strongly influenced when the low frequency variance is significant. Moreover, this study reveals at this stage that multiannual variability leads to an increase of groundwater levels in the North of France and their decrease in the South of France, while the interdecadal variability leads to their decrease in the North.

Key points

- ✓ Four major types of behavior can be identified in hydrogeological formations in metropolitan France: annual, mixed, multiannual, interdecadal.
- ✓ A North-South discrepancy in the influence of low-frequency variability on groundwater level trends is noticeable over the metropolitan territory.
- ✓ Knowledge of the explanatory part of the low-frequency variability in the groundwater levels is crucial for understanding the occurrence and amplitude of groundwater extremes.

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 basses fréquences 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 menées par le passé ont analysé 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. D'autre part, de nombreuses études ont montré l'influence de la variabilité basse fréquence sur la magnitude et la direction des tendances dans les variables environnementales, et principalement les débits de rivière (*e.g.* Hannaford *et al.*, 2013 ; Stojković *et al.*, 2014). Compte-tenu de l'amplification de la variabilité basse fréquence dans certains systèmes aquifères par rapport à celle contenue dans les précipitations, ce phénomène peut être exacerbé lorsque l'analyse de tendance est réalisée sur les niveaux piézométriques (Seguin, 2016). Par conséquent, plusieurs questions peuvent être soulevées : dans quelle mesure et comment cette variabilité basse fréquence influence-t-elle la direction et la magnitude des tendances ? Peut-on discriminer l'implication de la variabilité pluriannuelle et interdécennale sur la tendance globale des niveaux piézométriques ? Leur influence sur les tendances piézométriques est-elle homogène spatialement ?

L'objectif de ce rapport est donc de présenter les résultats préliminaires concernant l'influence de la variabilité basse fréquence sur les tendances ainsi que les extrêmes (très hauts et très bas niveaux piézométriques). Cette analyse est réalisée à partir d'une base de données de piézomètres peu influencés par les prélèvements et d'une durée suffisante pour analyser ces phénomènes sur le bassin de la Seine et plus largement sur le territoire métropolitain ; base de données dont l'élaboration a occupé une part importante du travail à ce stade de l'étude. Ce rapport présente dans un premier temps la répartition spatiale de la variabilité multi-échelle temporelle (fluctuations interannuelles à interdécennales) en fonction des secteurs hydrogéologiques. Dans un second temps, l'évaluation de l'influence de la variabilité basse fréquence sur les tendances piézométriques est réalisée. Enfin, nous proposons de premiers éléments pour comprendre et estimer 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.

1. Données et méthodologie

1.1. Données piézométriques

Cette étude a été réalisée à partir d'une base de données référence de piézomètres pas ou peu influencés par les prélèvements (Baulon *et al.*, 2020).

Brièvement, cette base de données se constitue de 254 chroniques piézométriques provenant du portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines (ADES ; *https://ades.eaufrance.fr/*). Les critères principaux de sélection de ces chroniques sont présentés ci-dessous :

- 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.
- Une influence des prélèvements sur les niveaux piézométriques minimale.

A l'échelle de la France métropolitaine, les 254 piézomètres sélectionnés s'étendent 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.

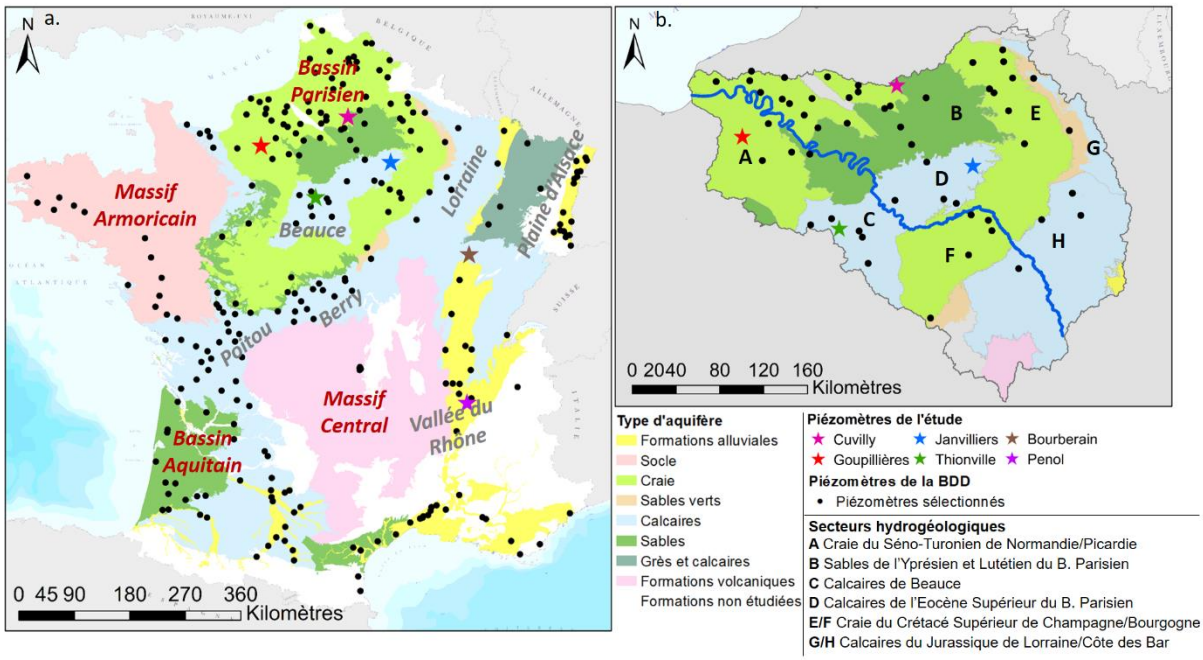

Figure 1. Répartition spatiale des piézomètres sélectionnés dans la base de données (a) à l'échelle de la France métropolitaine, (b) à l'échelle du bassin de la Seine.

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 Armoricain.

A l'échelle du bassin de la Seine, les piézomètres de cette base de données se répartissent sur 9 secteurs hydrogéologiques : la craie du Séno-Turonien de Normandie/Picardie, les sables de l'Yprésien et du Lutétien du bassin Parisien, les calcaires de Beauce, les calcaires de l'Eocène Supérieur du bassin Parisien, la craie du Crétacé Supérieur de Champagne et de Bourgogne, les calcaires du Jurassique de Lorraine et de la Côte des Bar, et les sables verts de l'Albien dans sa partie libre (Fig. 1b).

Dans ce rapport, pour l'étude à l'échelle de la France métropolitaine, seuls les piézomètres présentant des données depuis 1996 seront utilisés (215 piézomètres). Pour le focus sur le bassin de la Seine, compte-tenu de l'important historique piézométrique dans cette région, l'étude sera réalisée à partir des piézomètres présentant des données depuis 1976 (49 piézomètres). Les deux périodes d'étude 1996-2019 et 1976-2019 ont été choisies car elles permettent de maximiser la durée des chroniques et la répartition spatiale des piézomètres respectivement à l'échelle de la France métropolitaine et du bassin de la Seine.

1.2. Méthodologie

1.2.1. Analyse multirésolution par ondelettes (MODWT)

Dans le but d'étudier la variabilité multi-échelle temporelle des niveaux piézométriques à l'échelle de la France métropolitaine et du bassin de la Seine, l'analyse multirésolution par ondelettes (MODWT) sera utilisée lors de cette étude. 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 rivières (*e.g.* Massei *et al.*, 2017).

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-haut et passe-bas. A chaque itération, le filtre passe-haut produit une composante haute-fréquence (le détail d'ondelettes) et le filtre passe-bas produit une composante plus basse fréquence (*i.e.* avec une plus grande périodicité) appelée « approximation ». Cette approximation est ensuite décomposée de nouveau en détail et en approximation jusqu'à ce que l'approximation ne puisse 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 part explicative 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 elles seules 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. Dans certains cas, ces basses fréquences pluriannuelles et interdécennales peuvent à elles seules expliquer plus de 80% de la variance avec une variabilité annuelle négligeable : ces piézomètres présentent donc un comportement pluriannuel ou interdécennal dominant.

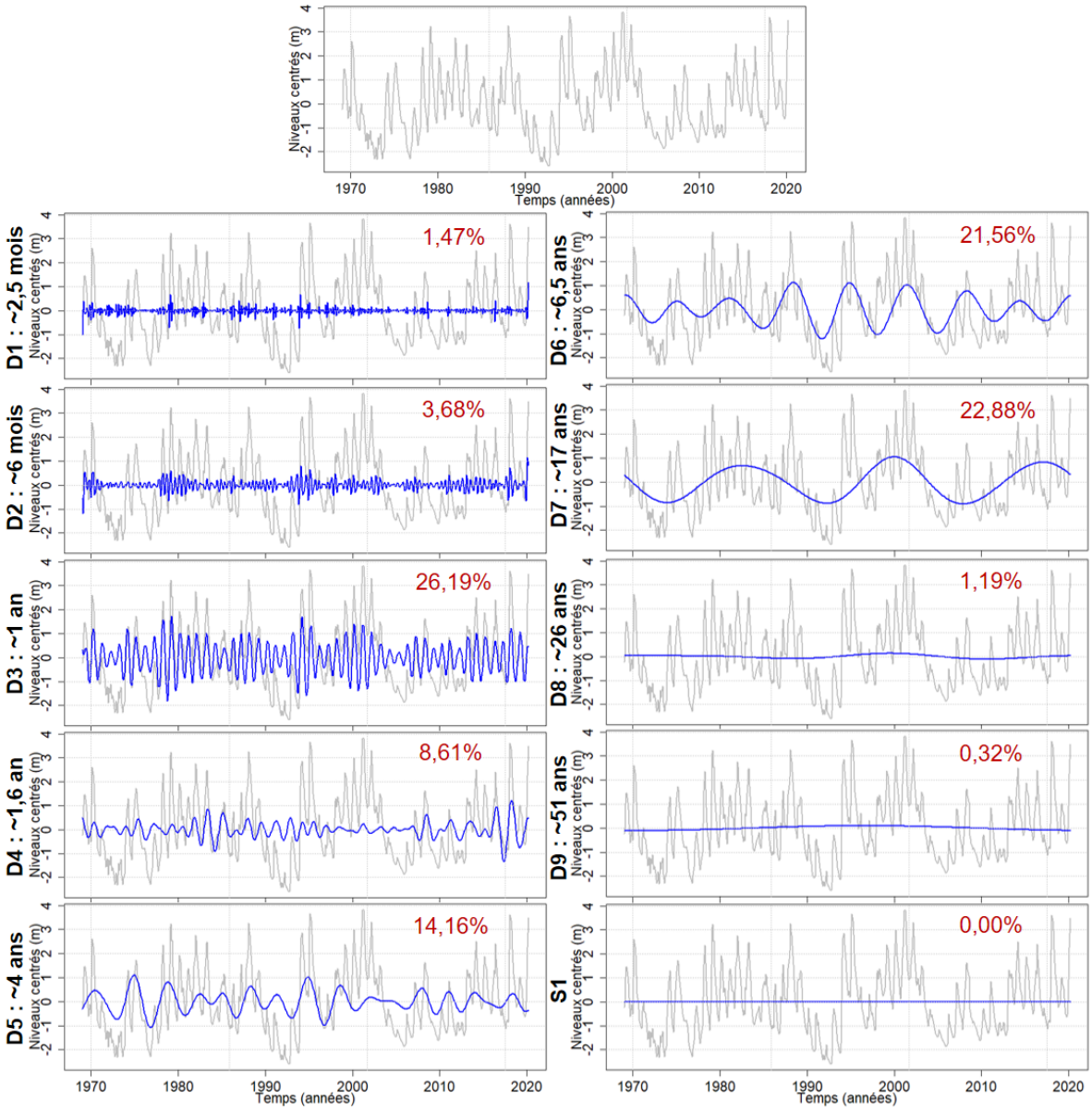

Figure 2. Analyse multirésolution par ondelettes (MODWT) du piézomètre de Janvilliers situé dans les calcaires de Champigny. La chronique piézométrique analysée est représentée en gris, les détails d'ondelettes (D1 à D9) associés aux périodicités moyennes ainsi que la dernière approximation (S1) sont représentés en bleu. Le pourcentage d'énergie de chaque détail d'ondelettes est indiqué en rouge. (Baulon et al., 2020)

1.2.2. Tendances et extrêmes

A partir de l'analyse multirésolution par ondelettes, il est possible d'évaluer l'influence des composantes pluriannuelle (~7 ans) et interdécennale (~17 ans) sur l'évaluation des tendances et extrêmes piézométriques. En effet, la somme des détails et de la dernière approximation permettant de reconstituer le signal original, il est possible de soustraire un détail donné et d'évaluer l'impact de ce retrait sur la tendance et les extrêmes piézométriques (Fig. 3). *In fine*, il devient possible d'établir l'influence de la composante pluriannuelle ou interdécennale sur les niveaux piézométriques moyens et extrêmes.

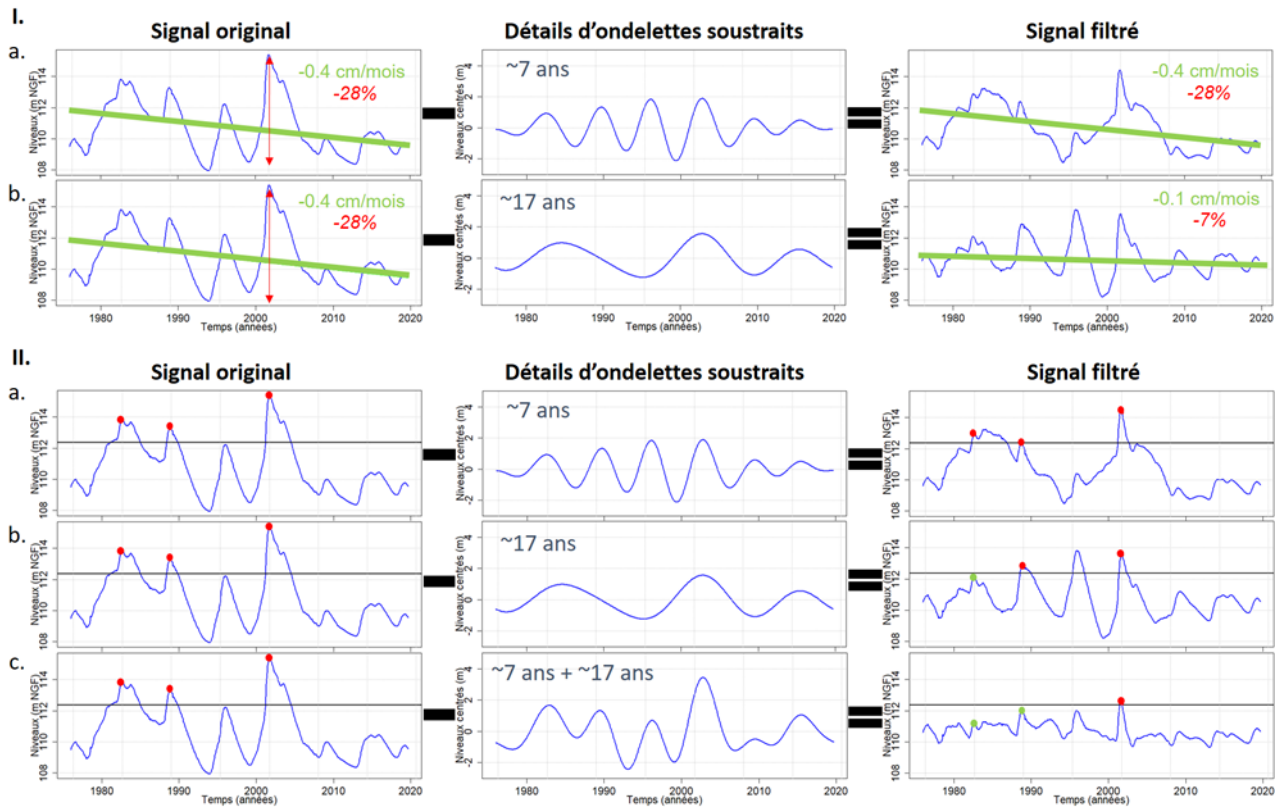

Figure 3. Méthodologie appliquée pour l'évaluation de l'influence de la variabilité pluriannuelle (~7 ans) et interdécennale (~17 ans) sur (I.) les tendances et (II.) les extrêmes piézométriques. Pour (I.) en vert est indiquée la pente de Sen et en rouge l'intensité de la pente de Sen par rapport au battement maximum de la nappe. Pour (II.) le trait noir indique le percentile 0.8 ; les points rouges indiquent dans le signal original les événements de hauts niveaux piézométriques, et dans le signal filtré ces mêmes événements toujours supérieurs au percentile ; les points verts indiquent les événements qui deviennent inférieurs au seuil lorsque les composantes sont filtrées. En (a) impact du filtrage de l'échelle de variabilité ~7 ans, (b) de l'échelle de variabilité ~17 ans, (c) de la combinaison des deux échelles de variabilité (~7 ans et ~17 ans) sur les tendances et extrêmes piézométriques.

L'évaluation de la tendance des niveaux piézométriques mensuels est établie à partir de la pente de Sen (Sen, 1968) pour évaluer leur magnitude et un test de Mann-Kendall modifié adapté aux données autocorrélées pour tester la significativité des tendances (Hamed et Rao, 1998). Cependant, sur ce rapport, les résultats de significativité statistique des tendances piézométriques ne seront pas présentés, l'idée étant de se concentrer sur l'effet des composantes pluriannuelles et interdécennales sur la magnitude et le sens des tendances. L'approfondissement d'un couplage entre l'importance de chaque composante et la significativité des tendances observées fera l'objet de travaux ultérieurs.

La pente de Sen a été privilégiée pour évaluer la magnitude des tendances piézométriques car elle accorde moins d'importance aux valeurs extrêmes par rapport aux régressions linéaires. La pente est définie comme la médiane d'un ensemble de pentes calculées entre chaque paire de points. Pour évaluer l'importance de la pente de Sen par rapport à la dynamique de l'aquifère, un pourcentage de hausse ou de baisse des niveaux piézométriques par rapport au battement maximum de la nappe est calculé en fonction de l'expression suivante :

$$Evolution\ par\ rapport\ au\ battement = \left(\frac{pente\ de\ Sen * durée}{battement\ maximum}\right) * 100$$

Cette normalisation de la pente de Sen par le battement est appliquée à l'ensemble des piézomètres étudiés. Seul le résultat de cette normalisation sera présenté sur les cartes de ce rapport.

Dans un premier temps, la pente de Sen est calculée sur les niveaux piézométriques mensuels, qui seront appelés au cours de ce rapport « données brutes » (Fig. 3.I). La pente de Sen est ensuite normalisée par le battement maximum de la nappe, au droit du piézomètre. Ensuite, ce procédé est de nouveau réalisé sur les

données filtrées de la composante pluriannuelle, puis de la composante interdécennale. Le battement utilisé pour normaliser les pentes de Sen calculées sur les données filtrées reste identique à celui utilisé pour normaliser la pente de Sen des données brutes. L'intérêt de garder un battement fixe pour normaliser les pentes de Sen est d'évaluer uniquement l'effet du retrait d'une composante sur la pente de Sen, et non pas d'évaluer l'effet du retrait de la composante sur la pente combiné à la modification de la variance liée au retrait de la composante. Au final, l'idée est donc de pouvoir comparer la magnitude et le sens des tendances piézométriques des données brutes avec celles des données filtrées.

Cette méthodologie de filtrage des composantes pluriannuelle et pluridécennale peut également être appliquée pour évaluer leur influence sur les extrêmes piézométriques (Fig. 3.II.). Cette méthode permet d'évaluer si le retrait d'une ou des deux composantes pluriannuelle et interdécennale conduit à un nombre et à un niveau d'extrêmes différents dans la série piézométrique filtrée par rapport à la série initiale « réelle ». L'identification des extrêmes dans les chroniques brutes est réalisée en fonction du 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 ; 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 (équivalente à la somme des deux) est réalisé par simple soustraction au signal original. A partir des données filtrées, 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. A ce stade préliminaire de l'étude, cette analyse sera réalisée uniquement sur 4 piézomètres présentant des dynamiques différentes (*i.e.* annuelle, mixte, pluriannuelle et pluridécennale) sur la période 1976-2019.

Au cours de ces analyses, le traitement sera 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.

2. Variabilité multi-échelle temporelle des niveaux piézométriques

2.1. Variabilité à l'échelle de la France métropolitaine (période 1996-2019)

La répartition de l'énergie entre les différentes échelles de variabilité pour l'ensemble des piézomètres étudiés sur le territoire métropolitain est présentée en figure 4a. Cette répartition met en évidence une distribution spatiale de la répartition de l'énergie cohérente avec le contexte hydrogéologique. Les échelles pluriannuelles et interdécennales (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 variabilités pluriannuelles et interdécennales 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. 4a). La prédominance de ces variabilités pluriannuelles ou interdécennales met en évidence l'important effet mémoire de ces formations.

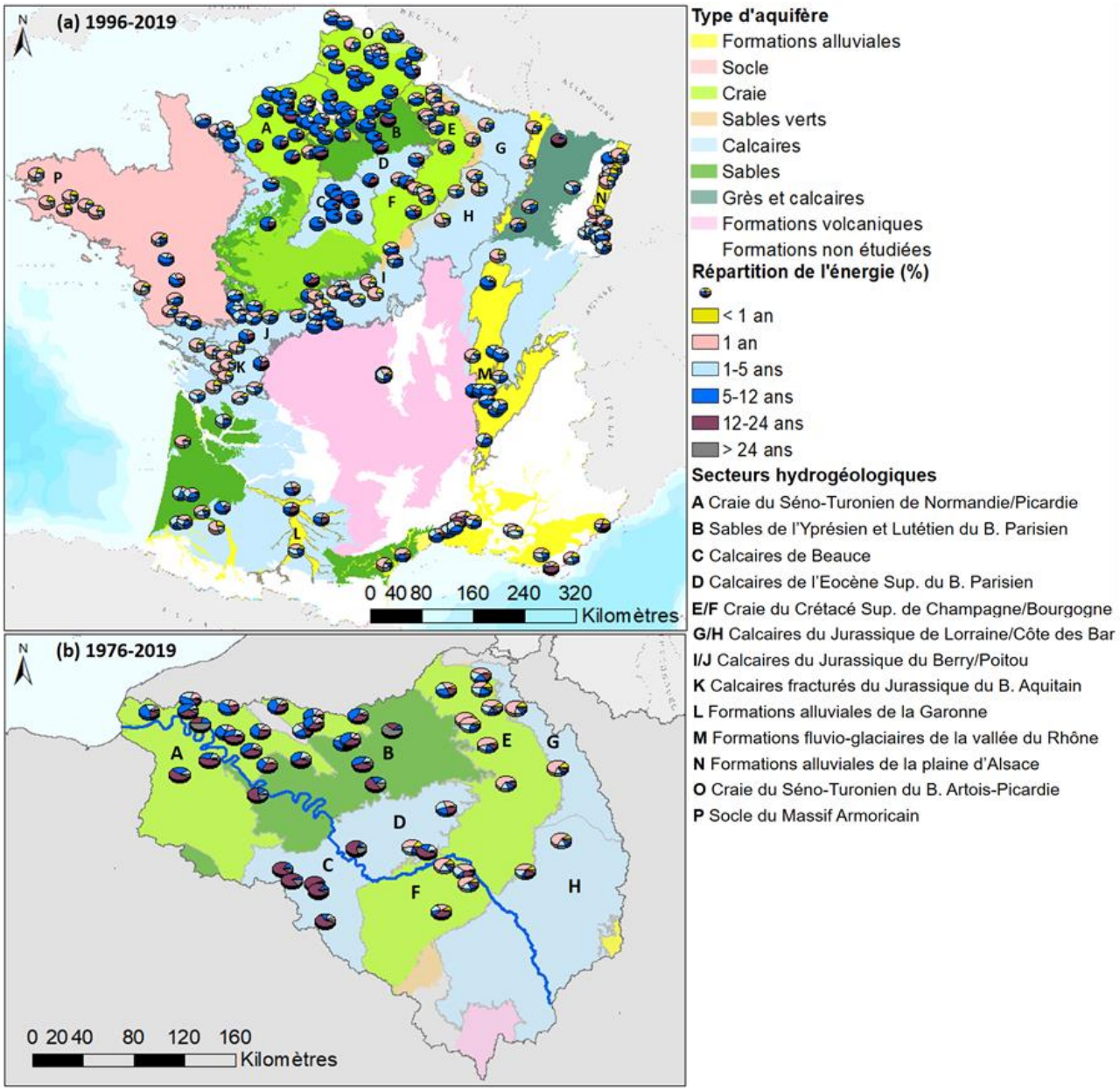

Figure 4. Proportion de la variance totale expliquée par chaque échelle de variabilité (énergie associée à chaque échelle de variabilité, exprimée comme le pourcentage d'énergie totale dans chacune des séries piézométriques) : (a) à l'échelle de la France métropolitaine sur la période 1996-2019 ; (b) à l'échelle du Bassin de la Seine sur la période 1976-2019.

Bien que ces échelles de variabilité basse fréquence (pluriannuelles et interdécennales) 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. 4a). 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 de variabilité pluriannuelles et pluridécennales. De manière générale, ces entités hydrogéologiques manifestent un comportement mixte (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. 4a).

Globalement, les entités alluviales ne montrent pas de comportement typique à travers la France métropolitaine (Fig. 4a). 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. A l'échelle de la France métropolitaine, l'étude de la variabilité multi-échelle temporelle des niveaux piézométriques permet donc de mettre en évidence 4 grands types de comportements : annuel, mixte, pluriannuel voire interdécennal dominant. En fonction de leur prédominance dans la variabilité piézométrique, ces différents types de comportement peuvent ainsi fortement influencer l'occurrence et l'amplitude des extrêmes piézométriques, mais aussi les tendances piézométriques.

2.2. Variabilité à l'échelle du bassin de la Seine (période 1976-2019)

L'évaluation de la variabilité multi-échelle temporelle sur le bassin de la Seine peut être évaluée sur une période temporelle plus longue : 1976-2019 (Fig. 4b). Les piézomètres situés en aval du bassin de la Seine et situés dans la craie du Séno-Turonien de Normandie, les sables de l'Yprésien et Lutétien du bassin parisien et les calcaires de Beauce présentent un effet mémoire important, avec des variabilités pluriannuelles et interdécennales bien marquées. Cette variabilité interdécennale est fortement marquée dans les calcaires de Beauce, tandis que la part de la variabilité pluriannuelle est assez négligeable. En remontant plus au nord dans la craie du Séno-Turonien, la variabilité pluriannuelle s'accentue, alors que la part de la variabilité interdécennale se réduit bien qu'elle soit encore dominante au Sud de la Seine. Au Nord de la Seine dans la craie du Séno-Turonien de Normandie, la variabilité pluriannuelle peut être dominante par rapport à la variabilité interdécennale dans les signaux piézométriques, ou bien être dominante à part égale avec la variabilité interdécennale. Dans ces formations, la variabilité annuelle constitue une faible part de la variabilité totale.

Les piézomètres situés en amont du bassin de la Seine, dans la craie du Crétacé Supérieur de Champagne/Bourgogne et les calcaires du Jurassique de Lorraine/Côte des bar, présentent un autre type de comportement. Pour la très grande majorité des piézomètres, la variabilité annuelle est dominante. Bien que la variabilité annuelle soit dominante dans ces secteurs hydrogéologiques, la variabilité pluriannuelle et pluridécennale peut aussi constituer une part non négligeable de la variabilité des niveaux piézométriques. Ces piézomètres présentent donc des comportements qui peuvent être qualifiés d'annuels et mixtes.

3. Influence de la variabilité basse fréquence sur l'évaluation des tendances piézométriques

De nombreux piézomètres, notamment dans le bassin de la Seine, présentent une variabilité pluriannuelle et/ou interdécennale soit dominante, soit soutenant la variabilité annuelle. Par conséquent, cette variabilité basse fréquence (i.e. pluriannuelle et interdécennale) peut potentiellement influencer les tendances piézométriques. Dans cette partie, il s'agit donc d'évaluer l'influence de la variabilité pluriannuelle et interdécennale sur le sens et la magnitude des tendances piézométriques en supprimant individuellement ces échelles de variabilité basse fréquence des niveaux piézométriques mensuels.

Les figures 5 et 6 présentent la magnitude des tendances (ratio pente de Sen/battement de la nappe) pour chacune des séries piézométriques étudiées. La tendance sur les données brutes est représentée en rouge, la tendance sur les données filtrées de l'échelle de variabilité ~7 ans est représentée en gris, et la tendance sur les données filtrées de l'échelle de variabilité ~17 ans est représentée en bleu (seulement sur la période 1976-2019 pour cette dernière). Ces figures permettent de visualiser l'impact du retrait de la variabilité pluriannuelle ou interdécennale sur la tendance par rapport à celle initialement calculée dans les données brutes. Par conséquent, ces figures décrivent implicitement l'influence du niveau d'échelle considéré (variabilité pluriannuelle ou interdécennale) sur les niveaux piézométriques mensuels en prenant en compte le signe de la soustraction entre la tendance sur les données brutes (rouge) et la tendance sur les données filtrées (gris ou bleu). Néanmoins, quantifier la contribution exacte de la variabilité pluriannuelle ou interdécennale sur la tendance des niveaux piézométriques non filtrés reste difficile puisque d'autres échelles de variabilité (haute ou basse fréquence) peuvent moduler cette contribution.

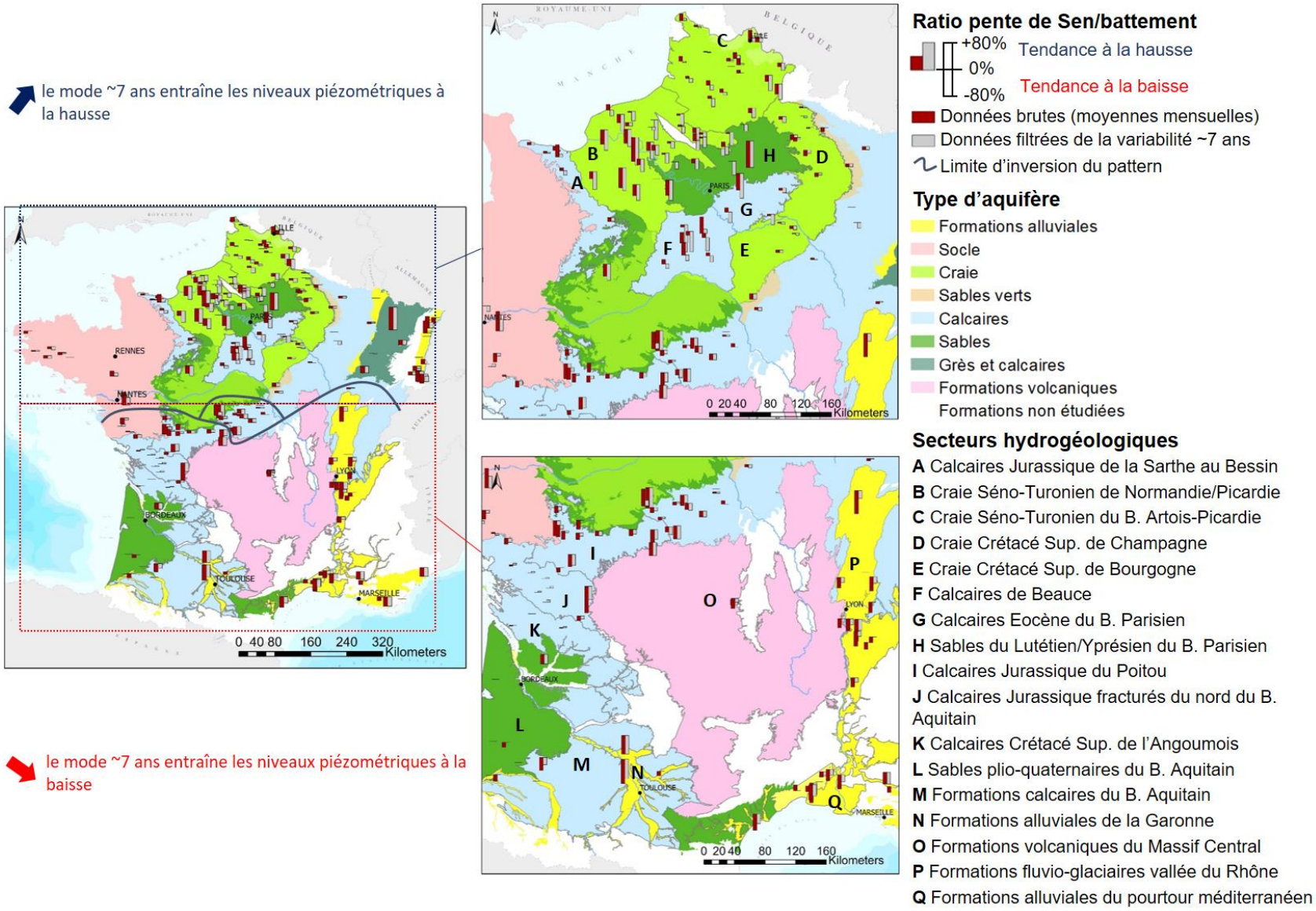

Figure 5. Comparaison de la magnitude des tendances entre les niveaux piézométriques brutes et filtrés de la variabilité ~7 ans sur 1996-2019.

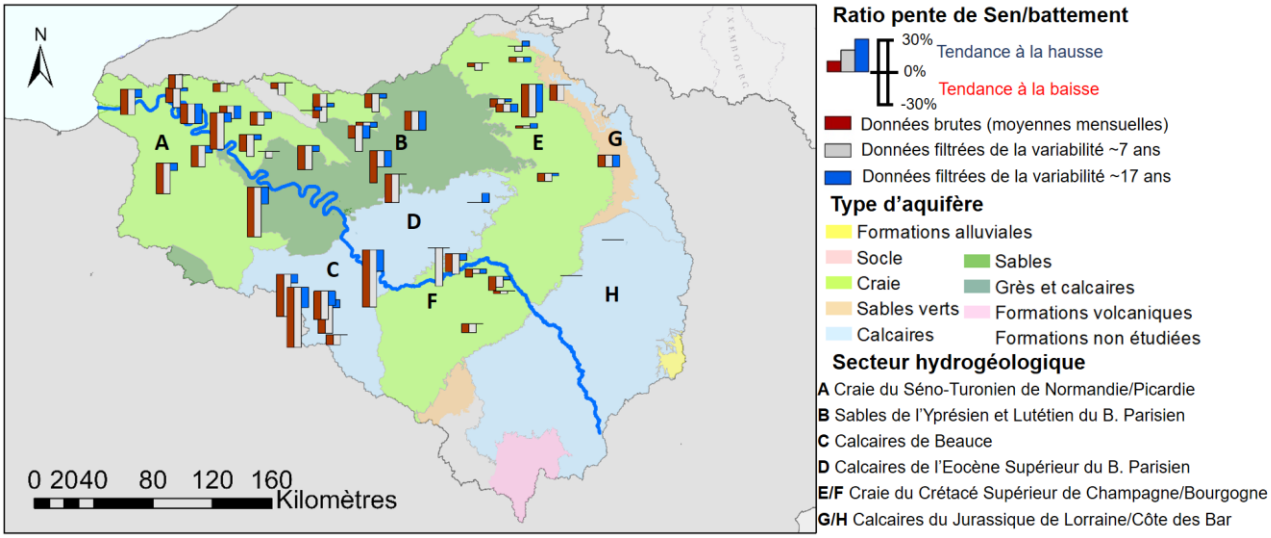

Figure 6. Comparaison de la magnitude des tendances entre les niveaux piézométriques brutes et filtrés de la variabilité ~7 ans et ~17 ans sur 1976-2019.

3.1. Influence de la variabilité pluriannuelle (~7 ans) sur l'évaluation des tendances piézométriques à l'échelle du territoire métropolitain

Tout comme pour l'étude de la variabilité multi-échelle temporelle, l'analyse de l'influence de la variabilité pluriannuelle sur l'évaluation des tendances est réalisée sur la période 1996-2019 à l'échelle du territoire métropolitain.

L'influence de la variabilité pluriannuelle sur les tendances piézométriques présente une configuration spatiale bien établie à travers la France métropolitaine (Fig. 5). Au Nord de la France, et principalement dans les aquifères présentant des comportements mixtes ou inertiels, la variabilité pluriannuelle a tendance à entraîner une élévation des niveaux piézométriques (*i.e.* atténuer les diminutions de niveau ou accentuer les augmentations de niveau). A l'inverse, au Sud de la France, quelle que soit la formation hydrogéologique étudiée, la variabilité pluriannuelle a tendance à entraîner la diminution des niveaux piézométriques (*i.e.* atténuer les augmentations de niveau ou accentuer les diminutions de niveau).

Au Nord de la France, dans les formations hydrogéologiques du bassin Parisien (craie, sables et calcaires de l'Eocène), on observe soit une accentuation des tendances à la baisse (Fig. 7b ; Goupillières), soit une atténuation des tendances à la hausse, soit un changement de signe de la tendance de la hausse vers la baisse lorsque la variabilité pluriannuelle est filtrée du signal piézométrique (Fig. 5). Cet effet du retrait de l'échelle de variabilité ~7 ans sur les tendances piézométriques signifie que dans les niveaux piézométriques bruts (*i.e.* non-filtrés), la variabilité pluriannuelle a tendance à entraîner une élévation des niveaux piézométriques. Un seul secteur hydrogéologique du bassin Parisien n'obéit pas à ce constat : la craie du Crétacé Supérieur de Champagne. Par ailleurs, pour les entités extérieures au bassin Parisien, l'effet de la variabilité pluriannuelle sur les tendances piézométriques est plus sporadique.

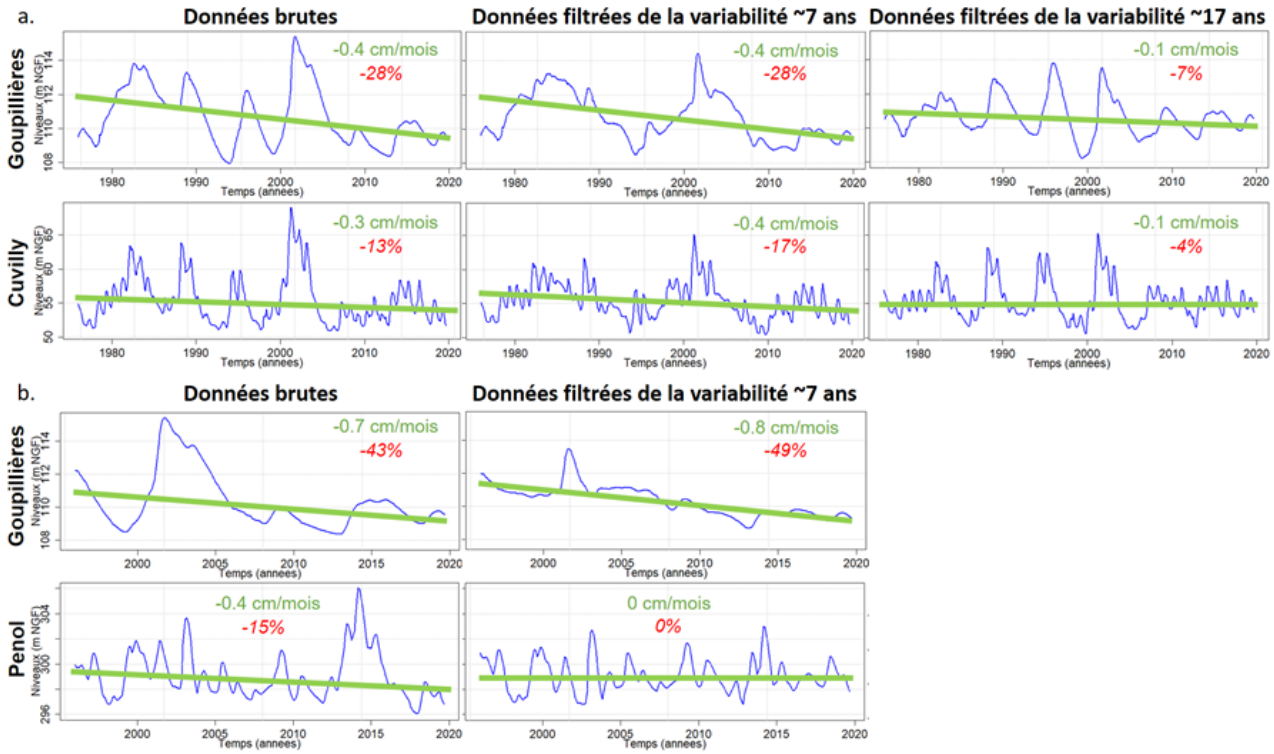

Figure 7. Chroniques piézométriques présentant le schéma typique de l'influence du retrait de la variabilité pluriannuelle (~7 ans) et interdécennale (~17 ans) sur les tendances sur la période (a) 1976-2019 à Goupillières (craie du Séno-Turonien de Normandie) et Cuvilly (craie du Séno-Turonien de Picardie) et (b) 1996-2019 à Goupillières et Penol (formations fluvio-glaciaires de la vallée du Rhône). En vert est indiquée la pente de Sen, en rouge est indiquée l'importance de la pente de Sen par rapport au battement.

Au Sud de la France, on observe le schéma inverse par rapport au Nord de la France. Cette fois-ci, le retrait de l'échelle de variabilité ~7 ans engendre une atténuation des tendances à la baisse (Fig. 7b ; Penol), ou un changement de sens de la tendance de la baisse vers la hausse (Fig. 5). Ce schéma est identifiable dans toutes les formations hydrogéologiques étudiées du Sud de la France même si localement le retrait de l'échelle ~7 ans peut ne pas avoir d'effet sur la tendance. Cette absence d'effet pourrait s'expliquer soit par le fait que l'échelle ~7 ans n'explique pas ou très peu la variabilité des niveaux piézométriques non-filtrés, soit par le fait que cette échelle de variabilité ne porte pas la tendance. Globalement, la variabilité pluriannuelle entraîne une diminution des niveaux piézométriques dans la plupart des secteurs hydrogéologiques du Sud de la France. Une zone de transition entre les patterns du Nord et du Sud de la France est identifiable dans les calcaires du Jurassique du Berry, où aucun schéma n'est discernable (Fig. 5). Dans ce secteur hydrogéologique, la variabilité pluriannuelle peut soit diriger les niveaux piézométriques à la hausse, soit les diriger à la baisse. Cette zone de transition pourrait être liée soit à une zone de transition climatique, soit à une hétérogénéité spatiale de la variabilité des niveaux piézométriques dans ce secteur dû à l'hétérogénéité de cette formation.

3.2. Influence des variabilités pluriannuelle (~7 ans) et interdécennale (~17 ans) sur l'évaluation des tendances piézométriques sur le bassin de la Seine

A l'échelle du bassin de la Seine, sur la période 1976-2019, la variabilité pluriannuelle entraîne toujours l'élévation des niveaux piézométriques, mais cette influence se réduit considérablement par rapport à son influence sur une période plus courte (*i.e.* 1996-2019) (Fig. 6). Le retrait de l'échelle de variabilité ~7 ans engendre soit une accentuation de la tendance à la baisse (Fig. 7a ; Cuvilly), soit n'a pas d'effet sur la tendance (Fig. 7a ; Goupillières). Sur cette période plus longue, la craie de Champagne suit cette fois le même schéma que les entités du bassin de la Seine. En revanche, la partie nord de la craie de Bourgogne ne suit plus ce schéma puisque dans ce secteur hydrogéologique, le retrait de l'échelle de variabilité ~7 ans engendre une atténuation des tendances à la baisse. Ce secteur hydrogéologique constitue la seule exception à l'échelle du bassin de la Seine.

Cette longue période d'étude permet également d'évaluer l'influence de la variabilité interdécennale sur les tendances piézométriques. L'influence de ce niveau d'échelle est homogène à l'échelle du bassin de la

Seine : elle entraîne une diminution des niveaux piézométriques (Fig. 6). Le retrait de l'échelle de variabilité ~17 ans engendre soit une atténuation des tendances à la baisse (Fig. 7a ; Goupillières, Cuvilly), soit une accentuation des tendances à la hausse, soit l'émergence d'une tendance à la hausse. A noter que la figure 7a montre également l'importance de l'amortissement de la variabilité interdécennale depuis la fin des années 2000 dans l'explicabilité de la tendance à la baisse des niveaux piézométriques. Cette tendance est remarquablement atténuée lorsque la variabilité interdécennale est filtrée des niveaux piézométriques.

3.3. Facteurs déterminant l'importance de l'influence de la variabilité basse fréquence sur les tendances piézométriques

L'importance de l'influence de la variabilité pluriannuelle ou interdécennale sur les tendances piézométriques peut être liée à deux facteurs : (i) la variance explicative de l'échelle de variabilité dans la variabilité des niveaux piézométriques, (ii) la durée de la chronique.

Le retrait de la variabilité pluriannuelle ou interdécennale influence fortement les tendances lorsque ces niveaux d'échelle expliquent une large part de la variabilité totale des niveaux piézométriques. Ainsi, plus les formations hydrogéologiques présentent un effet mémoire important, plus les tendances piézométriques sont influencées par cette variabilité basse fréquence. Par exemple, le retrait de l'échelle de variabilité ~7 ans sur la période 1996-2019 affecte fortement les tendances piézométriques dans les calcaires de Beauce, la craie du Séno-Turonien, ou encore les formations fluvio-glaciaires de la vallée du Rhône (Fig. 5). Dans ces secteurs hydrogéologiques, la variabilité pluriannuelle explique une large partie de la variabilité totale des niveaux piézométriques (Fig. 4a). A l'inverse, dans les formations hydrogéologiques où la variabilité pluriannuelle explique peu la variabilité totale des niveaux piézométriques, les tendances piézométriques sont très peu affectées par ce retrait (*e.g.* calcaires fracturés du Jurassique du Nord du bassin Aquitain). Le retrait de l'échelle de variabilité ~17 ans, sur la période 1976-2019 dans les chroniques piézométriques du bassin de la Seine, affecte fortement les tendances piézométriques dans les calcaires de Beauce et la partie sud de la craie du Séno-Turonien, puis cette influence se réduit au Nord de la Seine (Fig. 6). Cette diminution de l'influence de la variabilité interdécennale sur les tendances piézométriques en remontant vers le nord du bassin de la Seine correspond à la diminution de l'explicabilité de la variabilité interdécennale dans la variabilité totale des niveaux piézométriques (Fig. 4b). Sur cette même période (1976-2019) et à l'échelle du bassin de la Seine, l'influence du retrait de la variabilité pluriannuelle sur les tendances piézométriques est également plus forte dans les secteurs où elle explique une part non négligeable de la variabilité totale des niveaux piézométriques (*e.g.* craie du Séno-Turonien au Nord de la Seine) (Fig. 4b et 6).

Outre la variance explicative, l'autre facteur majeur qui affecte l'importance de l'impact du retrait de la variabilité pluriannuelle ou interdécennale sur les tendances piézométriques est la durée d'étude. Ainsi, le retrait du mode de variabilité ~7 ans sur une longue période (1976-2019) a moins d'influence sur la tendance que sur une courte période (1996-2019). Cet effet est visible par exemple pour les piézomètres situés dans la craie du Séno-Turonien au Nord de la Seine. Sur la période 1976-2019, la variabilité pluriannuelle explique toujours une large part de la variabilité des niveaux piézométriques (Fig. 4b), mais son retrait affecte peu les tendances piézométriques (Fig. 6). Ce phénomène peut être lié à une plus grande répétabilité de l'échelle de variabilité ~7 ans sur une chronique plus longue. Par conséquent, son influence sur la tendance est réduite par rapport à une série plus courte.

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

Afin de maximiser l'échantillonnage des extrêmes, l'influence de la variabilité pluriannuelle, interdécennale et de leur combinaison sur l'occurrence et l'amplitude des extrêmes piézométriques est étudiée sur la période 1976-2019. Cette analyse est réalisée pour 4 piézomètres présentant différents types de comportement (Fig. 8 et 9) : 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.

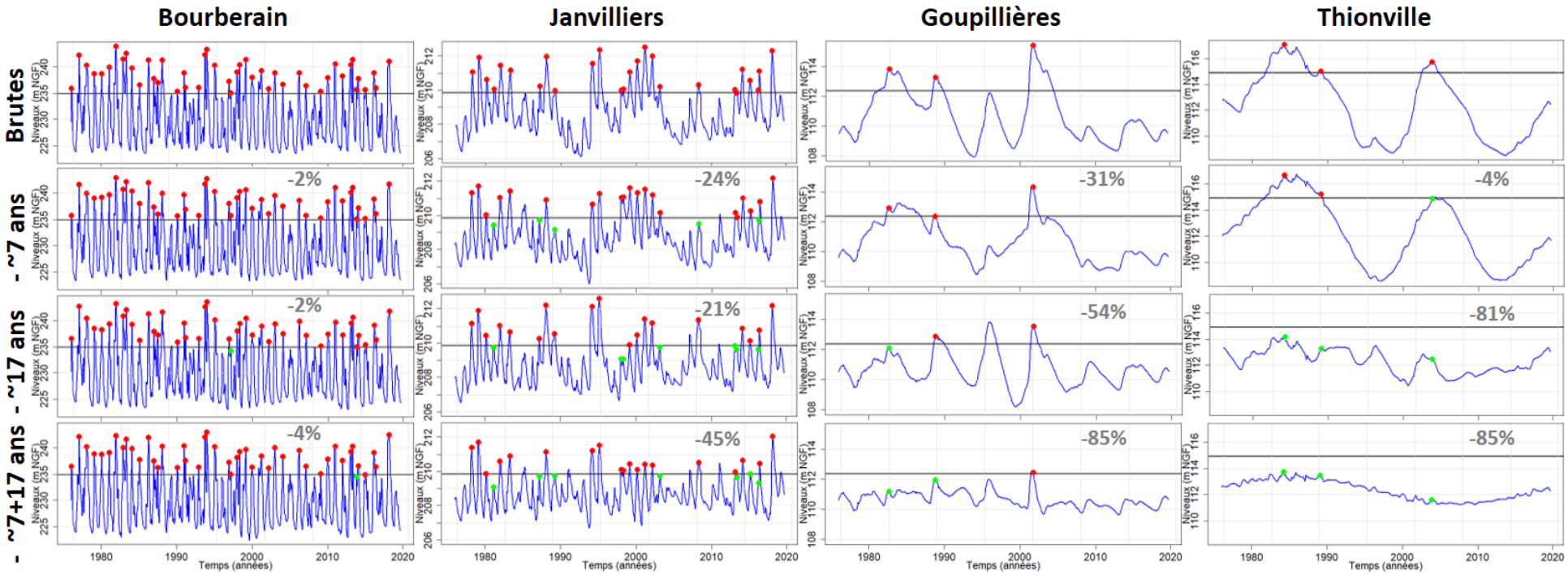

Figure 8. Impact du retrait des échelles de variabilité ~7 ans, ~17 ans, ~7 et ~17 ans sur les extrêmes supérieurs au percentile 0.8 à Bourberain (calcaires du Jura ; dynamisme annuel), Janvilliers (calcaires de Champigny ; dynamisme mixte), Goupillières (craie du Séno-Turonien ; dynamisme pluriannuel/interdécennal) 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, ~7 et ~17 ans), les points rouges représentent les pics de HE identifiés dans les 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.
(Baulon et al., 2020)

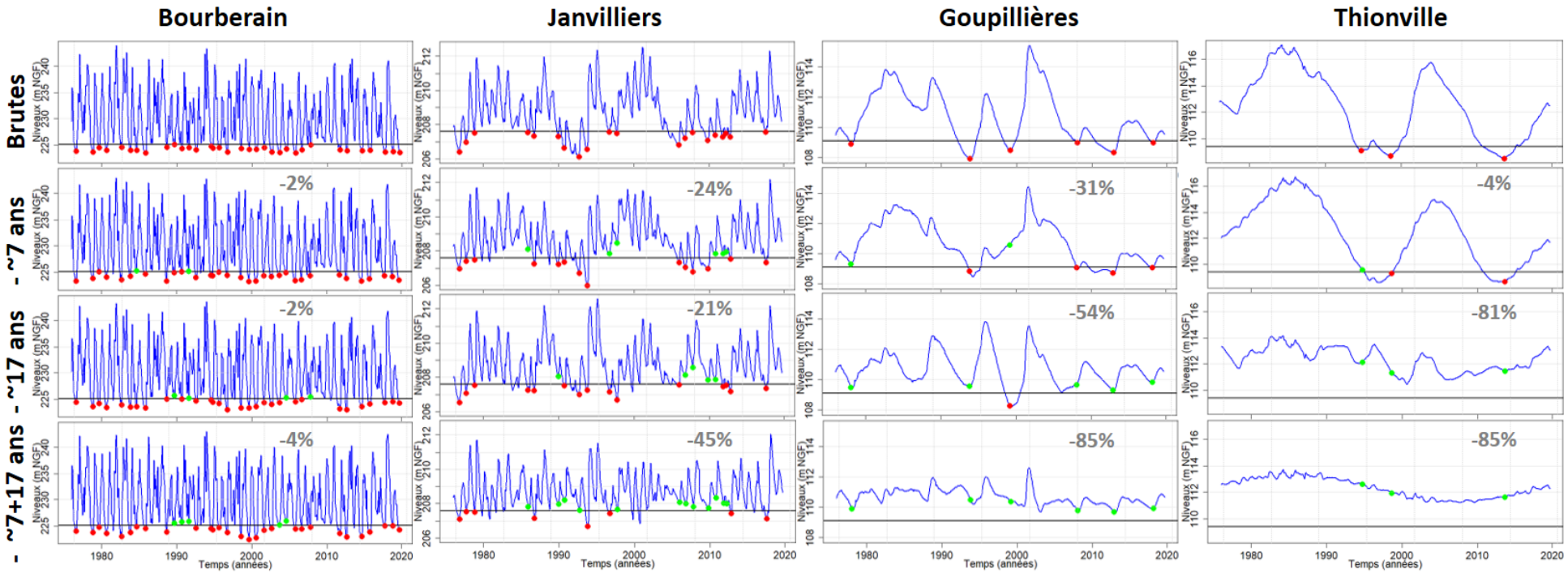

Figure 9. Impact du retrait des échelles de variabilité ~7 ans, ~17 ans, ~7 et ~17 ans sur les extrêmes inférieurs au percentile 0.2 à Bourberain (calcaires du Jura ; dynamisme annuel), Janvilliers (calcaires de Champigny ; dynamisme mixte), Goupillières (craie du Séno-Turonien ; dynamisme pluriannuel/interdécennal) 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, ~7 et ~17 ans), les points rouges représentent les pics de BE identifiés dans les 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.
(Baulon et al., 2020)

Le piézomètre de Bourberain à dominante annuelle présente une fréquence d'apparition des pics de hautes et basses eaux quasiment annuelle (Fig. 8 et 9). 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 pluriannuelles et/ou interdécennales. 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 modes 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 conjoint des deux niveaux d'échelle (~7 ans et ~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 et ~17 ans) qui portent à elles 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 le mode 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 pluriannuelles et interdécennales 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, comme 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. 3.II. et 8). 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. 3.II. et 8). 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. 3.II. et 8).

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. 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, rendant négligeable la variabilité pluriannuelle et interdécennale.

Les tendances piézométriques peuvent être fortement influencées par la variabilité basse fréquence. Ces variabilités pluriannuelle ou interdécennale ont la faculté d'orienter les niveaux piézométriques à la hausse ou à la baisse avec une magnitude plus ou moins importante. Plus ces échelles de variabilité sont marquées dans les signaux piézométriques (*i.e.* sont fortement explicatives de la variabilité totale des niveaux piézométriques), plus elles ont d'influence sur la magnitude de la tendance des niveaux piézométriques. Seule une augmentation de la durée d'étude permet de diminuer leur influence sur les tendances (*e.g.* l'échelle de variabilité ~7 ans dans la craie du Séno-Turonien de Normandie). L'influence de la variabilité basse fréquence sur l'orientation des tendances piézométriques présente aussi une bonne homogénéité spatiale : (i) la variabilité pluriannuelle a tendance à entraîner l'élévation des niveaux piézométriques dans les aquifères à effet mémoire important du Nord de la France, alors qu'elle a tendance à entraîner une diminution des niveaux piézométriques dans les aquifères situés au Sud de la France ; (ii) la variabilité interdécennale a tendance à entraîner une diminution des niveaux piézométriques dans les aquifères du bassin de la Seine.

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 (pluriannuel à interdécennal) 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 de seulement quelques dizaines d'années. De manière générale, on notera également une plus forte influence des composantes pluriannuelles et interdécennales sur les bas niveaux piézométriques que sur les hauts niveaux piézométriques. Enfin, dans les systèmes présentant des variabilités pluriannuelle et interdécennale 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 fréquence peuvent interférer et ainsi accentuer ou atténuer l'amplitude des hauts ou bas niveaux piézométriques.

L'étude de l'évaluation de l'influence de la variabilité basse fréquence sur les extrêmes piézométriques sera généralisée à l'échelle de la France métropolitaine et du bassin de la Seine pour l'ensemble des piézomètres constituant la base de données référence, l'idée étant de pouvoir quantifier l'impact de la variabilité basse fréquence sur l'intensité, l'amplitude et l'occurrence des extrêmes. 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

Baulon, L., Allier, D., Massei, N., Bessiere, H., Fournier, M., Bault, V., 2020. Influence de la variabilité basse-fréquence sur l'occurrence et l'amplitude des extrêmes piézométriques. Revue Géologues n°207, décembre 2020. [A paraître]

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

Blöschl, G., Hall, J., *et al.*, 2019b. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573, 108-111.

Boé, J., Habets, F., 2014. Multi-decadal river flow variations in France. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 691-708.

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.

Coumou, D., Rahmstorf, S., 2012. A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*, 2, 491-496.

El Janyani, S., Massei, N., Dupont, J.-P., Fournier, M., Dörfliger, N., 2012. Hydrological responses of the chalk aquifer to the regional climatic signal. *Journal of Hydrology*, 464-465, 485-493.

Fossa, M., 2020. Non-linear and non-stationary hydroclimate variability in France and the Euro-Atlantic area. Earth Sciences. Normandie Université. English.

Giuntoli, I., Renard, B., Vidal, J.-P., Bard, A., 2013. Low flows in France and their relationship to large-scale climate indices. *Journal of Hydrology*, 482, 105-118.

Hamed, K.H., Rao, A.R., 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182-196.

Hannaford, J., Buys, G., Stahl, K., Tallaksen, L.M., 2013. The influence of decadal-scale variability on trends in long European streamflow records. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 2717-2733.

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.

Liesch, T., Wunsch, A., 2019. Aquifer responses to long-term climatic periodicities. *Journal of Hydrology*, 572, 226-242.

Massei, N., Laignel, B., Deloffre, J., Mesquita, J., Motelay, A., Lafite, R., 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., 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.

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.

Seguin, J.-J., 2016. Analyse de quinze séries piézométriques de la nappe des Calcaires de Beauce. Rapport final. BRGM/RP-65964-FR. 110 p., 71 fig., 3 ann.

Sen, P.K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.

Slimani, S., Massei, N., Mesquita, J., Valdés, D., Fournier, M., Laignel, B., 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 pluridecennal scale. *Hydrogeology Journal*, 17, 1823-1832.

Stojković, M., Ilić, A., Prohaska, S., Plavšić, J., 2014. Multi-Temporal Analysis of Mean Annual and Seasonal Stream Flow Trends, Including Periodicity and Multiple Non-Linear Regression. *Water Ressources Management*, 28, 4319-4335.