Réponses hydrologiques à des scénarisations climatiques sur le bassin de la Seine : une approche par modification du contenu spectral des pluies sur le bassin versant en fonction des caractéristiques spectrales de la variabilité climatique à grande échelle

Manuel Fossa[1*], Nicolas Massei [1], Matthieu Fournier[1], Nicolas Flipo[2], Nicolas Gallois[2], Julien Boé[3], Bastien Dieppois[4]

[1] Normandie Univ, UNIROUEN, UNICAEN, CNRS, M2C, 76000 Rouen, France

[2] MINES ParisTech, PSL Université, Centre de Géosciences, Fontainebleau, France

[3] CECI, CERFACS/CNRS, Toulouse, France

[4] Centre for Agroecology, Water and Resilience (CAWR), Coventry University, Coventry, UK

[*] manuel.fossa1@univ-rouen.fr

Résumé

L'impact du changement climatique sur les ressources en eau est une préoccupation majeure tant pour les scientifiques que les opérationnels. Les simulations de type CMIP (Climate Models Inter-comparison Project) montrent que des modifications majeures du système hydroclimatique sont en cours. Les observations confirment une augmentation de la fréquence et de l'intensité des évènements extrêmes tels que crues, étiages ou vagues de chaleur. L'une des clefs de la compréhension de ce changement, étape indispensable en amont de stratégies d'adaptation, est la coexistence au sein du signal climatique de processus physiques oscillant à diverses échelles de temps, interagissant entre eux. La dynamique du climat se combinant à celle des bassins versants pour contrôler les débits, il est important d'étudier les répercussions de tels changements climatiques sur les niveaux de nappe et les débits des rivières sur le bassin. De précédents travaux ont montré que les fluctuations inter-annuelles à multi-décennales d'origine climatique pouvaient être fortement exprimées sur le bassin, que ce soit dans le débit des rivières ou dans la piézométrie. Ce projet a pour objectif de produire des scénarios de réponse hydrologique du bassin de la Seine en fonction de scénarisations climatiques qui correspondront à des modifications spectrales (i.e. de l'amplitude et de la phase des oscillations) de chroniques de pluie servant d'entrées à la plate-forme de modélisation hydrologique et hydrogéologique CaWaQS. Les simulations CaWaQS devront alors permettre d'étudier la dynamique spectrale des débits et piézométries altérés sur l'ensemble du bassin. Les réponses hydrologiques produites seront ensuite étudiées afin d'établir une régionalisation des sous-bassins versants de la Seine quant à leur sensibilité hydroclimatique.

Points clés

- *Modification de la dynamique spectrale de chroniques de pluies*
- *Simulation de débits correspondants, par le modèle CaWaQS*
- *Régionalisation de la sensibilité hydroclimatique des sous-bassins versant de la Seine*

Abstract

Both models and observations hint at severe changes of the hydroclimate system, including changes in both frequency and intensity of extreme events, such as floods, droughts and heat waves. Those hydrological changes are driven by changes in climate oscillations, and how they interact with catchments characteristics. The signature of those changes can be detected in the modifications of the climate's spectral dynamics (*i.e.* the amplitude and phase of oscillation at a given time scale). The different physical processes within the climate system oscillate at different time scales, from monthly to multi-decadal time scales, and with different timings, and those signatures can be found in hydrological variables such as discharge. It is thus critical to study how changes in the spectral dynamics of the climate signal find their way, through catchment characteristics, into discharge's dynamics.
In this study, we aim at modifying the spectral characteristics of precipitation time series over the Seine catchment. Those modified time series are then used as input in the CaWaQS modelling platform in order to simulate the discharge's response. The new discharge's dynamics are then studied, and a regionalization is computed in order to establish a map of hydroclimate sensitivity for all sub-catchments of the Seine river.

Key points

- Spectral modification of precipitation time series
- CaWaQS simulation of altered discharge time series
- Regionalization of Seine sub-catchments hydroclimate sensitivity

Introduction

Le bassin de la Seine est habité par plus d'un tiers de la population française, et est le siège de nombreuses activités reposant sur la ressource en eau et sa variabilité (transport maritime, agriculture, industries, loisirs). C'est l'un des six bassins principaux de France (Richard et al., 2010). Dans le contexte de changement climatique actuel, de multiples altérations sont déjà observées, notamment une hausse de la température moyenne supérieure à la tendance mondiale, des changements dans la fréquence et l'intensité des évènements extrêmes (crues, étiages, vagues de chaleur), ou bien encore des glissements de saisons hydroclimatiques (*i.e.* allongement des étés, glissement des hivers vers janvier (Boccard, 2018)). Il est donc primordial de mieux comprendre comment les différents sous-bassins versants de la Seine réagissent aux probables changements d'origine climatique.
Le système climatique est caractérisé par de multiples oscillations, à différentes échelles de temps, du mensuel au multi-décennal, dont l'amplitude varie dans le temps, et interagissant entre elles (Fritier et al., 2012; Dieppois et al., 2016; Massei et al., 2017; Fossa, 2020). Cette dynamique spectrale est également présente dans le système hydrologique français, héritée de celle du climat, mais modulée par les caractéristiques des bassins versants (Schuite et al., 2019; Fossa, 2020). Sous le forçage du changement climatique, des changements dans la dynamique spectrale hydroclimatique sont à prévoir (Boé et al., 2009; Kingston et al., 2020; Massei et al., 2020).
Si certains changements dans la dynamique climatique à venir sont déjà identifiés, la modulation du signal climatique par les caractéristiques des différents bassins versants rend la prédiction des changements dans les débits difficile (Blöschl et al., 2019; Massei et al., 2020). Les modèles climatiques ne reproduisent pas correctement les variabilités aux échelles plus grandes que l'inter-annuel (Bracegirdle et al., 2016). Bien que des études de scénarisation (*i.e.* modifier le signal climatique en entrée d'un modèle hydrologique/hydrogéologique

sur divers bassins versants du monde soient disponibles, celles-ci utilisent en général des chroniques de pluies issues de projections climatiques dont elle augmentent les intensités en fonction de scénarios Representative Concentration Pathway (4 scénarios représentant les climats possibles à l'horizon 2300, en fonction de la quantité de gaz à effet de serre émis sur la période 2000-2100) établis par le GIEC, ou bien venant d'autres sources (Bower et al., 2004; Yuan et al., 2018; Pierce et al., 2009; Kwadijk and Middelkoop, 1994; Serpa et al., 2015; Wang et al., 2006). Deux limitations découlent de cette approche. Premièrement, ces études se concentrent sur une réalisation des processus physiques, c'est à dire qu'elles tendent à prédire des valeurs précises de débit qui "vont" se produire, et non pas un ensemble de débits qui pourraient survenir. Ainsi, au lieu d'étudier la dynamique du transfert pluies-débit, elles n'étudient que le résultat d'une réalisation. Deuxièmement, ces études ne prennent pas en compte la complexité spectrale des oscillations *i.e.* les différentes échelles de temps présentes, la variabilité de leur amplitude dans le temps, et comment ces échelles interagissent entre elles.
Ce projet propose une approche originale consistant à coupler l'analyse du signal et une plateforme de modélisation hydrologique et hydro-géologique (CaWaQS, Flipo et al. (2019)) afin de créer des scénarios de sensibilité hydroclimatique : les dynamiques spectrales de chroniques de pluie seront modifiées sur des bases physiques, puis injectées en entrée d'un modèle simulant les débits. Une bibliothèque de modification des pluies ainsi que la réponse spectrale des débits associés permettra d'établir une base de données de sensibilité hydroclimatique, établissant ainsi plusieurs scénarios pluie-débits dans le contexte de changement climatique. L'application de cette méthodologie sur l'ensemble du bassin de la Seine permettra une régionalisation de la sensibilité hydroclimatique des sous-bassins versant de la Seine. Grâce à cette approche non-linéaire et non-stationnaire, tant au niveau de la modification des pluies, que du modèle hydrogéologique lui même, ce projet devrait permettre d'améliorer la compréhension de la réponse de chaque sous-bassin aux potentiels changements d'ordre climatique.

1 Contexte et positionnement de recherche

1.1 Contexte géographique

L'étude est réalisée sur l'ensemble du bassin versant de la Seine. La Figure 1a présente le contexte géologique du bassin versant de la Seine. La structure géologique est concentrique autour de Paris et composée en majeure partie de formations tertiaires (argiles, calcaires et grès) recouvertes de loess (dans le bassin Parisien), de formations du Crétacé sur l'anneau extérieur du bassin parisien, ainsi que des formations du Jurassique dans la région Champagne. Le fonctionnement hydrogéologique est donc fortement contrasté. Le réseau hydrographique est présenté dans la Figure 1b. Les principaux confluents de la Seine sont l'Yonne, la Marne et l'Oise. Lorsque cette dernière est prise en compte (*i.e.* en aval de Paris), le réseau hydrographique est d'ordre 8. La Figure 1c présente l'occupation des sols. La haute densité de population autour de l'axe Seine est visible, là où sont concentrées de nombreuses industries et le plus grand complexe portuaire de France. Les zones arables sont dominées par une des plus grandes concentrations d'activités agricoles au monde (Billen et al., 2007). Toutes ces caractéristiques soulignent la grande dépendance de la population du bassin de la Seine aux ressources en eau.
Dans le cadre de ce projet, les pluies sont choisies sur la grille de la descente d'échelle CERFACS de la réanalyse NOAA 20CR (Compo et al., 2011). La grille, calquée sur celle de la réanalyse SAFRAN (Vidal et al., 2010), possède une résolution de 8km et 1613 nœuds. Afin de déterminer le nombre de chroniques de pluie à modifier, et afin de réduire les temps de calcul, 54 nœuds ont été aléatoirement choisis, représentant une distribution spatiale, *a priori*, normale des pluies (Figure 2). Les chroniques de pluie sur chacun des nœuds sont au pas de temps journalier, et couvrent la période 1851 à 2011.

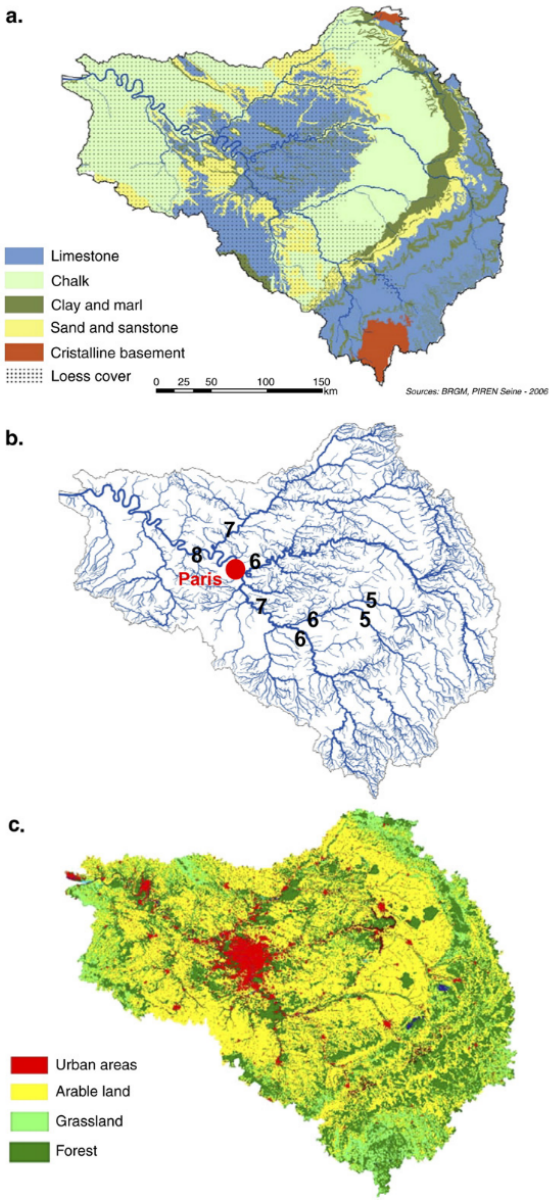

Figure 1. Contexte général du bassin versant de la Seine. a) contexte géologique, b) réseau hydrographique, c) occupation des sols. (Billen et al., 2007)

1.2 Positionnement de recherche

Le travail pour l'année 2020 s'est inscrit dans la deuxième et dernière phase du projet AESN "Aquivar", impliquant le centre de Géosciences MINES ParisTech et l´UMR CNRS M2C de l'Université de Rouen-Normandie. L'objectif de ce projet est la caractérisation physique des fonctions de transfert entre pluies et débits. Une première phase a consisté en l'établissement de fonctions de transfert avec le support de la plate-forme de modélisation CaWaQS Schuite et al. (2019). La présente phase vise à tester la sensibilité hydroclimatique des sous-bassins versants de la Seine, dont la régionalisation permettra de faire correspondre des réponses types à des caractéristiques physiques données par le modèle CaWaQS.
Plus précisément, le travail est organisé selon sept étapes.(1) Dans un premier temps, la variabilité spatiale des pluies sur le bassin de la Seine, caractérisées par leur dynamique spectrale, est établie afin de quantifier le nombre de chronique de pluie à modifier.

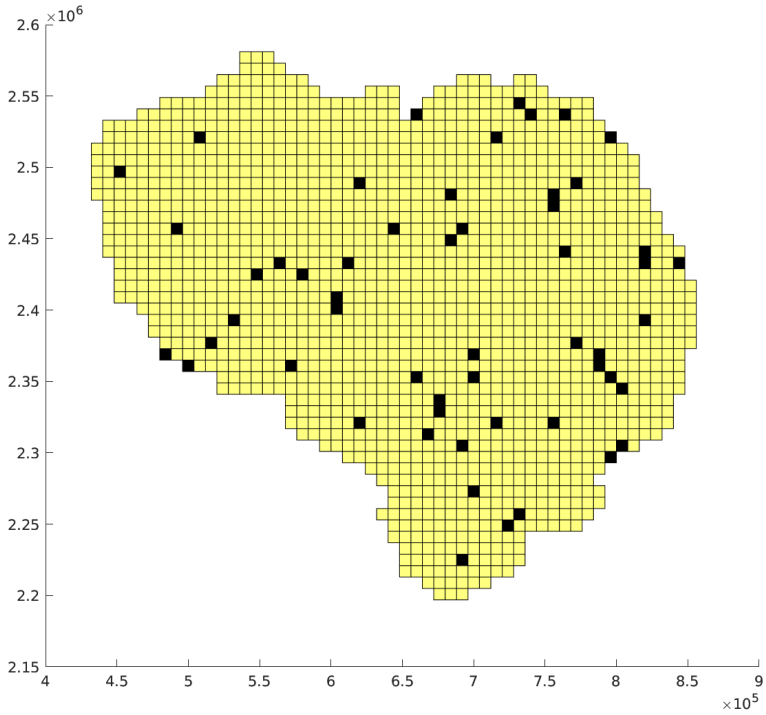

Figure 2. Grille de la descente d'échelle CERFACS de la NOAA 20CR. Les centres de carrés représentent les nœuds, les carrés noirs représentent les stations sélectionnées pour l'étape de détermination du nombre de chroniques de pluies à modifier. Les axes représentent les coordonnées Lambert II etendu.

(2) La sélection des caractéristiques spectrales à modifier est effectuée, basée sur : i) La littérature (Projections CMIP, reconstructions, etc), ii) Des analyses du traitement du signal, notamment pour explorer les interactions entre échelles et iii) L'exploration physique d'un modèle climatique couplé (MPAS-A, NCAR (2018)), en fonction des contraintes de temps, en collaboration avec le Centre de Recherche du Climatologie de Dijon, et le centre CAWR de l'université de Coventry.
(3) La modification des caractéristiques spectrales (phase, amplitude, interactions). (4) La simulation des débits sur la plate-forme CaWAQS.
(5) L'analyse spectrale des débits altérés.
(6) La régionalisation des sensibilités hydroclimatiques.
(7) La caractérisation physique de chacun des types de sensibilité.
A l'heure du présent rapport, l'étape (2,ii) est en phase de finalisation.

2 Analyse de la variabilité spatiale des pluies sur le bassin de la Seine

2.1 Méthode

L'analyse des chroniques de pluie a été réalisée à l'aide de transformées en ondelettes continues (Torrence and Compo (1998)), et leur variabilité spatiale à l'aide d'un algorithme de *fuzzy clustering* (Dunn (1973)). La Figure 3 présente la classification des 54 nœuds retenus pour l'analyse. 15 groupes homogènes ont été identifiés, même si un nombre significatif de nœuds (13) reste sans attribution particulière (Figure 3, en blanc). La Figure 4 permet de préciser les caractéristiques spectrales de chaque groupe. L'examen de la figure permet de différencier deux régimes : (1) les oscillations sub-annuelles (<1 an) qui sont d'amplitude croissante, et (2) les amplitudes inter-annuelles (>1 an) montrant des variabilités marquées en terme d'amplitude (Figure 4). Ce

sont sur ces échelles inter-annuelles que se font les différences entre nœuds, ce qui a révélé la nécessité de reproduire la procédure de classification spatiale, sur des chroniques au pas de temps annuel.

2.2 Résultats

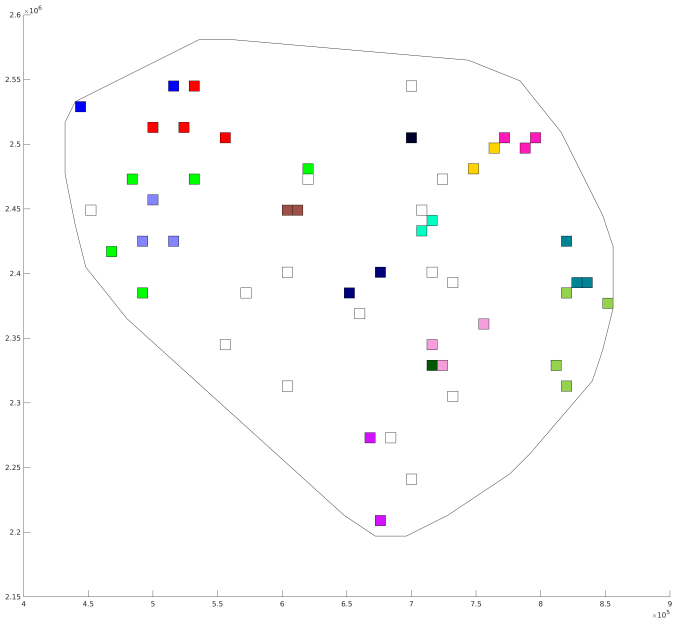

Figure 3. Variabilité spatiale des pluies sur la bassin de la Seine, d'après leur caractéristiques spectrales. Les couleurs déterminent les groupes d'appartenance. Les nœuds de couleur blanche sont ceux dont aucune caractéristique spectrale singulière n'a pu être détectée. Les axes représentent les coordonnées Lambert II étendu.

Les Figures 5 et 6 présentent la classification, au pas de temps annuel, de la variabilité spatiale et les caractéristiques spectrales de chaque groupe, respectivement. La classification révèle à nouveau 15 groupes, mais ceux-ci concernent plus de nœuds, en effet, seul un nœud n'a pas pu être caractérisé de façon singulière (Figure 5). Cela confirme l'intérêt d'avoir isolé les échelles de temps inter-annuelles (>1 an). Les zones géographiques se distinguent en revanche de manière assez similaire avec celles au pas de temps journalier (Figures 3,5). Les caractéristiques spectrales sub-annuelles(<1 an) sont donc tout de même assez singulières même si faibles en amplitude. L'examen de la Figure 6 permet d'identifier des oscillations de forte amplitude dans aux échelles de temps 5-8 et 15 ans. Une très forte augmentation de l'amplitude est observée pour les échelles de temps supérieures à 32 ans. Cependant, au regard de la durée des chroniques (159 ans), il est fort probable que ces amplitudes soient surestimées. Il est en effet courant dans les analyses en ondelette continue que les très grandes échelles de temps soient contenues dans une zone où les effets de bord (*i.e.* la présence de bornes au début et à la fin de la chronique) sont importants et l'interprétation des oscillations doit être faite avec précaution.

3 Sélection des échelles de temps à modifier

Il apparaît donc que les échelles de temps 5-8 et 15 ans figurent parmi les échelles à modifier. Ces échelles correspondent aux principaux résultats de la littérature, que cela soit pour les oscillations climatiques, hydrologiques ou hydroclimatiques. (Massei et al., 2007; Massei and Fournier, 2012; Massei et al., 2017; Dieppois

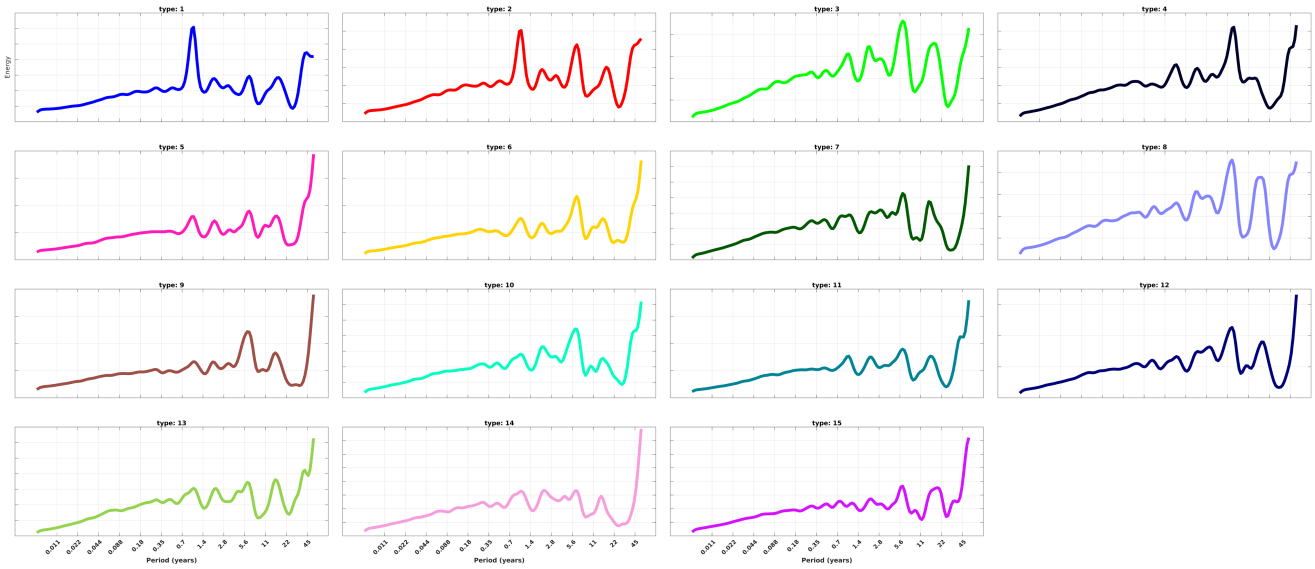

Figure 4. Caractéristiques spectrales des pluies pour chaque groupe défini dans la Figure 3. Chaque panel représente un groupe de nœud homogènes. En abscisses, les échelles de temps auxquelles les pluies varient (en années), en ordonnées, l'amplitude de leur variabilité (sans dimensions).

et al., 2016; Boé and Habets, 2014; Feliks et al., 2011; Fossa, 2020). Il reste cependant une étape importante, celle des interactions entre échelles. Paluš (2014); Jajcay et al. (2018) ont montré que des oscillations à une certaine échelle de temps pouvaient moduler d'autres oscillations à des échelles de temps différentes. Ainsi, la modification d'une échelle peut ne pas représenter un scénario réaliste, à moins que l'on ne s'assure qu'aucune autre échelle ne doive être modifiée de concert. De plus, les interactions entre échelles peuvent révéler des échelles de temps dont l'amplitude n'est pas très importante, mais qui ont une répercussion sur d'autres dont l'amplitude est significative (Fossa, 2020).

3.1 Méthode

Les interactions entre échelles sont des marqueurs de système à *feedback* négatif. Dans un tel système deux variables sont liées par une relation perturbation-amortissement. Par exemple en cas d'augmentation de la température au droit d'un couvert de glace, celle-ci va fondre, augmentation la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère et donc les nuages. Ceux-ci vont agir comme écran au rayonnement entrant du soleil ce qui va refroidir l'atmosphère en dessous. La température plus basse, fera précipiter l'eau, diminuant les nuages et reformant le couvert de glace. Puisque les nuages ont diminué, alors le réchauffement et la fonte du couvert de glace reprennent, et ainsi de suite. L'augmentation de température joue le rôle de perturbation, la formation des nuages d'amortissement. La fréquence et l'amplitude à laquelle les deux varient est dépendante de leur caractéristiques propres. Deux types d'interactions entre échelles de temps sont étudiées : (1) Les interactions phase-phase et, (2) Les interactions phase-amplitude. (1) représente la modification de l'échelle de temps caractéristique d'une oscillation par une autre échelle de temps. Dans le contexte périodique (*i.e.* des oscillations qui se répètent indéfiniment avec la même amplitude), cela revient à dire que la présence d'une oscillation à une certaine fréquence fait dériver la fréquence d'une autre oscillation, couplée à la première, vers une fréquence différente. A titre d'exemple, deux oscillations indépendantes de $x = 8hz$ et $y = 43hz$, respectivement, une fois couplées dans la direction $x \rightarrow y$, verront la fréquence de y dériver, par exemple vers $y = 42.5hz$. Le couplage peut s'effectuer dans les deux sens (*i.e.* $x \rightarrow y \rightarrow x$, de sorte qu'une fois que $y = 42.5hz$, celui-ci fasse à son tour dériver la fréquence de x vers $x = 8.5hz$.
L'interaction phase-amplitude est plus intuitive, puisqu'il s'agit simplement de faire correspondre les phases

(crêtes, creux) d'une oscillation avec l'amplitude d'une autre. Ainsi, on peut imaginer une oscillation x dont l'amplitude augmenterait lorsque y serait à son maximum/minimum (*i.e.* crête ou creux).
L'algorithme utilisé pour calculer ces interactions est celui de l'information conditionnelle mutuelle (Paluš, 2014), qui consiste à quantifier la probabilité que la connaissance du passé et/ou du présent de x améliore la prédiction de y. Dans ce cas, x est dit "causal" de y (au sens de Granger (1969)).

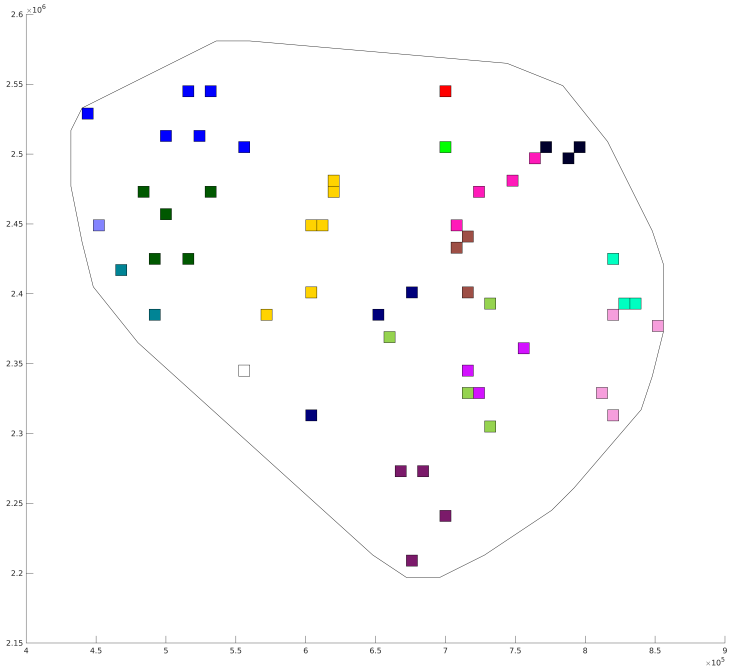

Figure 5. Variabilité spatiale des pluies ***au pas de temps annuel*** *sur la bassin de la Seine, d'après leur caractéristiques spectrales. Les couleurs déterminent les groupes d'appartenance. Les nœuds de couleur blanche sont ceux dont aucune caractéristique spectrale singulière n'a pu être détectée. Les axes représentent les coordonnées Lambert II étendu.*

Le calcul des interactions d'échelles est intense en terme de ressources CPU, aussi nous avons choisi d'effectuer cette analyse sur une seule chronique de pluie moyennée sur le bassin de la Seine. La durée des calculs étant exponentielle avec la résolution en terme d'échelles de temps (*i.e.* le pas de temps entre échelles analysées), nous avons choisi d'adopter une analyse progressive, en commençant par une résolution modérée, jusqu'à la résolution qui permettra de couvrir l'ensemble des échelles présentées dans la Figure 6. En l'état actuel, seules les échelles supérieures à 2 ans ont été analysées.

3.2 Résultats

Au stade d'avancement du projet, le travail a consisté à étudier les échelles temporelles caractéristiques à prendre en compte dans l'approche d´altération du contenu spectral des pluies. La Figure 7 présente les analyses d'interaction entre échelles, pour les échelles de temps supérieures à 2 ans. Le diagramme d'interactions phase-phase montre que la plupart des interactions s'effectuent entre échelles de temps décennales à multi-décennales (Figure 7a). Certaines interactions ont lieu d'une échelle long terme → court terme, mais l'inverse, échelle court terme → long terme, est aussi possible (interactions se situation au dessous/dessus de la diagonale bleue, respectivement, Figure 7a) . Il est donc intéressant de noter qu'un processus physique rapide peut tout autant amortir une processus plus lent, que le perturber. Les interactions phase-amplitude, indiquent

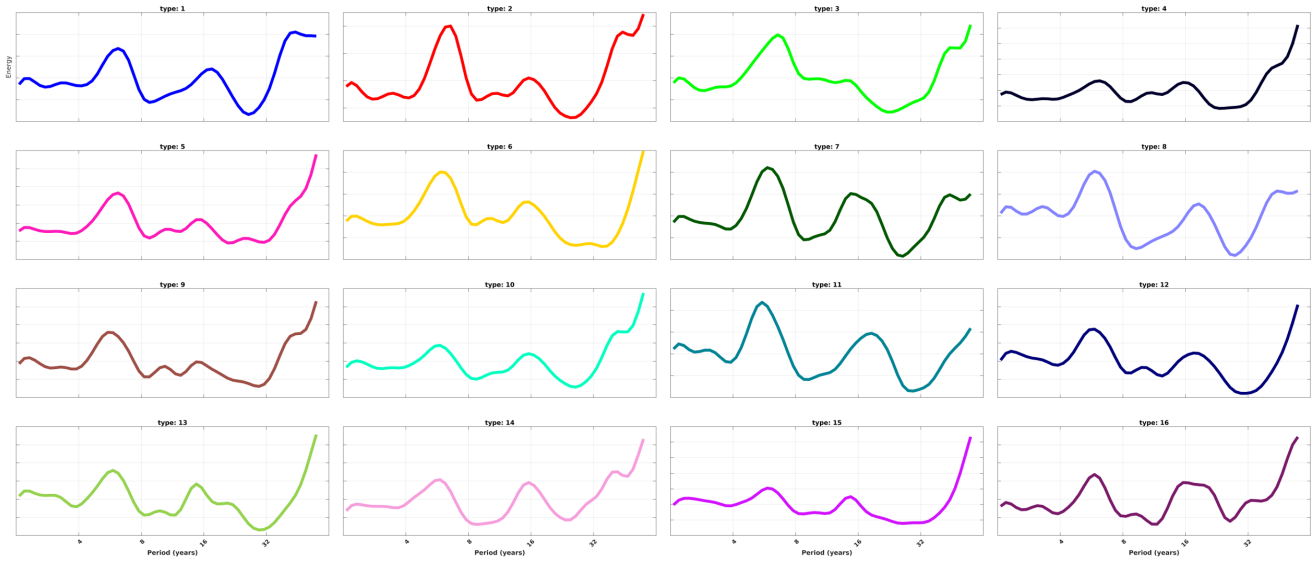

Figure 6. Caractéristiques spectrales des pluies ***au pas de temps annuel*** *pour chaque groupe défini dans la Figure 5. Chaque panel représente un groupe de nœud homogènes. En abscisses, les échelles de temps auxquelles les pluies varient (en années), en ordonnées, l'amplitude de leur variabilité (sans dimensions).*

que lorsqu'un processus oscillant à une échelle de temps, augmente ou décroît, un ou plusieurs autres processus voient leur amplitude augmenter ou diminuer. Ici encore, les interactions phase-amplitude concernent majoritairement les oscillation décennales à multi-décennales (Figure 7a). La caractéristique majeure étant que les échelles 25-28 ans et 15 ans semblent interagir entre elles, puisque l'on peut voir sur la Figure 7a des interactions 25-28 $\rightarrow$ 15, mais aussi 15 $\rightarrow$ 25-28. Il y a donc une double connexion entre les processus physiques oscillant à ces échelles. L'interaction entre les processus atmosphériques, la température, l'humidité des sols et les précipitations apparaît comme un système très puissant, contrôlant les variabilités rencontrées sur le territoire (Boé, 2013; Mariotti et al., 2018). Les modifications des précipitations devront donc prendre en compte ces interactions et donc porter non pas sur une seule échelle, mais plusieurs. De plus les modifications ne doivent se faire d'en amplitude, mais en phase aussi, et en fonction de la phase des échelles connectées.

Conclusion

Ce rapport fait état de l'avancement du projet d'étude de sensibilité de la dynamique spectrale hydroclimatique (*i.e.* pluies-débits) des sous-bassins versants de la Seine. Nous avons montré les résultats des deux premières étapes, à savoir l'étude de la variabilité spatiale des pluies, en fonction de leur caractéristiques spectrales, ainsi que l'étude des échelles de temps devant être modifiées basée sur nos analyses du signal couvrant non seulement les échelles de temps significatives en terme d'amplitude, mais aussi comment les échelles interagissent entre elles. Notre approche a permis de montrer que la simple modification de l'amplitude d'une échelle séparément n'était pas suffisante pour créer un scénario hydroclimatique réaliste. L'étape suivante consistera en la modification des échelles, modification qui nécessite de résoudre certaines difficultés techniques afin de produire des chroniques de pluie réalistes.

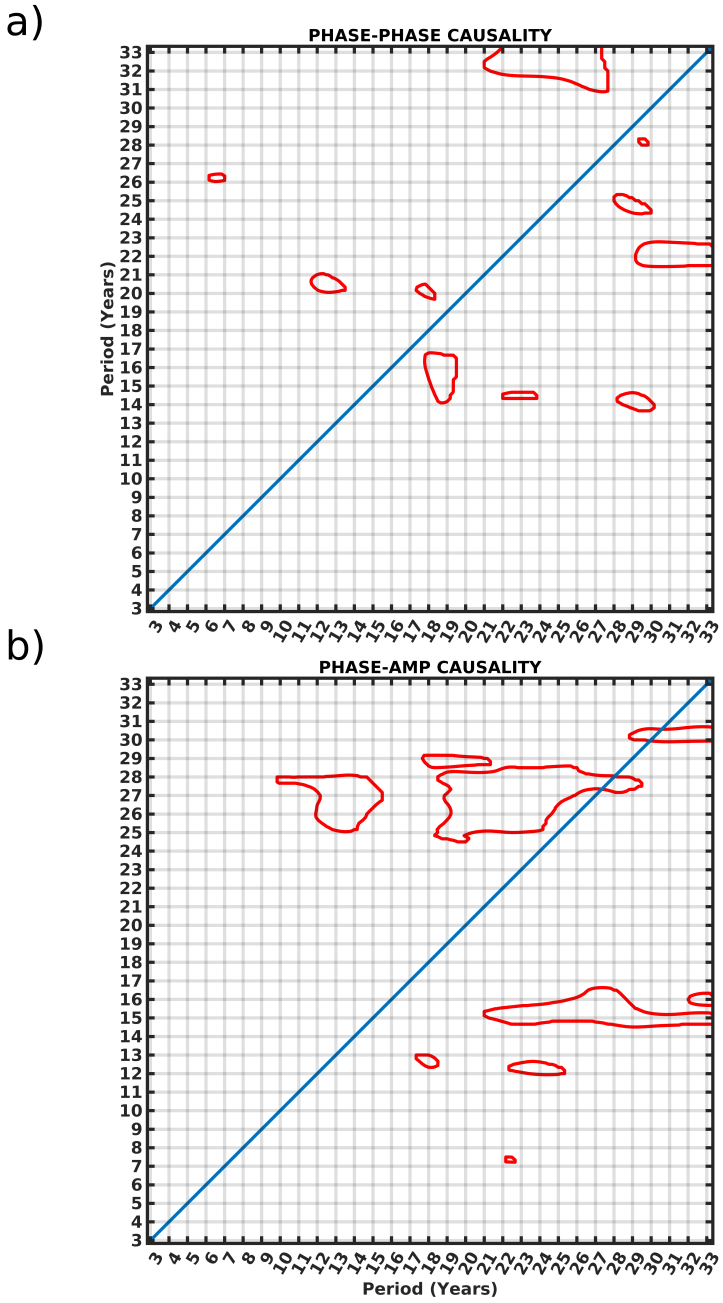

Figure 7. Interactions phase-phase et phase-amplitude entre les oscillations des pluies sur le bassin de la Seine, aux échelles de temps supérieures à 2 ans. (a) interactions phase-phase, (b) interactions phase-amplitude. Les panels se lisent depuis les abscisses vers les ordonnées (échelle de temps en abscisse module celle en ordonnée). Les zones d'interactions délimitées par les bordures rouges sont statistiquement significatives au seuil 95% par rapport à un bruit rouge.

Bibliographie

Billen, G., J. Garnier, J. M. Mouchel, and M. Silvestre (2007). The Seine system : Introduction to a multidisciplinary approach of the functioning of a regional river system. *Science of the Total Environment*.

Blöschl, G., M. F. Bierkens, A. Chambel, C. Cudennec, G. Destouni, A. Fiori, J. W. Kirchner, J. J. McDon-

nell, H. H. Savenije, M. Sivapalan, C. Stumpp, E. Toth, E. Volpi, G. Carr, C. Lupton, J. Salinas, B. Széles, A. Viglione, H. Aksoy, S. T. Allen, A. Amin, V. Andréassian, B. Arheimer, S. Aryal, V. Baker, E. Bardsley, M. H. Barendrecht, A. Bartosova, O. Batelaan, W. R. Berghuijs, K. Beven, T. Blume, T. Bogaard, P. B. de Amorim, M. E. Böttcher, G. Boulet, K. Breinl, M. Brilly, L. Brocca, W. Buytaert, A. Castellarin, A. Castelletti, X. Chen, Y. Chen, Y. Chen, P. Chifflard, P. Claps, M. Clark, A. Collins, B. Croke, A. Dathe, P. C. David, F. P. J. de Barros, G. de Rooij, G. D. Baldassarre, J. M. Driscoll, D. Düthmann, R. Dwivedi, E. Eris, W. H. Farmer, J. Feiccabrino, G. Ferguson, E. Ferrari, S. Ferraris, B. Fersch, D. Finger, L. Foglia, K. Fowler, B. Gartsman, S. Gascoin, E. Gaume, A. Gelfan, J. Geris, S. Gharari, T. Gleeson, M. Glendell, A. G. Bevacqua, M. P. González-Dugo, S. Grimaldi, A. B. Gupta, B. Guse, D. Han, D. Hannah, A. Harpold, S. Haun, K. Heal, K. Helfricht, M. Herrnegger, M. Hipsey, H. Hlaváčiková, C. Hohmann, L. Holko, C. Hopkinson, M. Hrachowitz, T. H. Illangasekare, A. Inam, C. Innocente, E. Istanbulluoglu, B. Jarihani, Z. Kalantari, A. Kalvans, S. Khanal, S. Khatami, J. Kiesel, M. Kirkby, W. Knoben, K. Kochanek, S. Kohnova, A. Kolechkina, S. Krause, D. Kreamer, H. Kreibich, H. Kunstmann, H. Lange, M. L. R. Liberato, E. Lindquist, T. Link, J. Liu, D. P. Loucks, C. Luce, G. Mahé, O. Makarieva, J. Malard, S. Mashtayeva, Shreedhar Maskey, J. Mas-Pla, M. Mavrova-Guirguinova, M. Mazzoleni, S. Mernild, B. D. Misstear, A. Montanari, H. Müller-Thomy, A. Nabizadeh, F. Nardi, C. Neal, N. Nesterova, B. Nurtaev, V. Odongo, S. Panda, S. Pande, Z. Pang, G. Papacharalampous, C. Perrin, L. Pfister, R. Pimentel, M. J. Polo, D. Post, C. P. Sierra, M.-H. Ramos, M. Renner, J. E. Reynolds, E. Ridolfi, R. Rigon, M. Riva, D. Robertson, R. Rosso, T. Roy, J. H. Sá, G. Salvadori, M. Sandells, B. Schaefli, A. Schumann, A. Scolobig, J. Seibert, E. Servat, M. Shafiei, A. Sharma, M. Sidibe, R. C. Sidle, T. Skaugen, H. Smith, S. M. Spiessl, L. Stein, I. Steinsland, U. Strasser, B. Su, J. Szolgay, D. Tarboton, F. Tauro, G. Thirel, F. Tian, R. Tong, K. Tussupova, H. Tyralis, R. Uijlenhoet, R. van Beek, R. J. van der Ent, M. van der Ploeg, A. F. V. Loon, I. van Meerveld, R. van Nooijen, P. R. V. Oel, J.-P. Vidal, J. von Freyberg, S. Vorogushyn, P. Wachniew, A. Wade, P. Ward, I. Westerberg, C. White, E. F. Wood, R. Woods, Z. Xu, K. K. Yilmaz, and Y. Zhang (2019). Twenty-three Unsolved Problems in Hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal 0*(0), 1–33.

Boccard, N. (2018). Natural disasters over France a 35 years assessment. *Weather and Climate Extremes 22*(July), 59–71.

Boé, J. (2013). Modulation of soil moisture-precipitation interactions over France by large scale circulation. *Climate Dynamics 40*(3-4), 875–892.

Boé, J. and F. Habets (2014). Multi-decadal river flow variations in France. *Hydrology and Earth System Sciences 18*(2), 691–708.

Boé, J., L. Terray, E. Martin, and F. Habets (2009). Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resources Research 45*(8), 1–15.

Bower, D., D. M. Hannah, and G. R. McGregor (2004). Techniques for assessing the climatic sensitivity of river flow regimes. *Hydrological Processes 18*(13), 2515–2543.

Bracegirdle, T. J., H. Lu, R. Eade, T. Woolings, and T. Woollings (2016). Do CMIP5 Models Reproduce Observed Low-Frequency North Atlantic Jet Variability ? *Geophysical Research Letters 45*, 7204–7212.

Compo, G. P., J. S. Whitaker, P. D. Sardeshmukh, N. Matsui, R. J. Allan, X. Yin, B. E. Gleason, R. S. Vose, G. Rutledge, P. Bessemoulin, S. BroNnimann, M. Brunet, R. I. Crouthamel, A. N. Grant, P. Y. Groisman, P. D. Jones, M. C. Kruk, A. C. Kruger, G. J. Marshall, M. Maugeri, H. Y. Mok, O. Nordli, T. F. Ross, R. M. Trigo, X. L. Wang, S. D. Woodruff, and S. J. Worley (2011). The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 137*(654), 1–28.

Dieppois, B., D. M. Lawler, V. Slonosky, N. Massei, S. Bigot, and M. Fournier (2016). Multidecadal climate variability over northern France during the past 500 years and its relation to large-scale atmospheric circulation. *International Journal of Climatology 36*, 4679–4696.

Dunn, J. C. (1973). A Fuzzy Relative of the ISODATA Process and Its Use in Detecting Compact Well-Separated Clusters A Fuzzy Relative of the ISODATA Process and Its Use in Detecting Compact Well-Separated Clusters. *Journal of Cybernetics 3*(3), 37–57.

Feliks, Y., M. Ghil, and A. W. Robertson (2011). The atmospheric circulation over the North Atlantic as induced by the SST field. *Journal of Climate 24*(2), 522–542.

Flipo, N., A. Rivière, N. Gallois, B. Labarthe, F. Baratelli, S. Wang, M. Maillot, T. Verbeke, P. Goblet, A. Jost, and L. Abasq (2019). CAtchement WAter Quality Simulator : CaWaOS, dans Mesures hydrogéophysiques et biogéochimiques haute-fréquence et" time lapse" des interfaces nappe-rivière : évolution des ressources en eau. Technical report.

Fossa, M. (2020). *Non-linear and non-stationary hydroclimate variability in France and the Euro-Atlantic area*. Ph. D. thesis, Université de Rouen.

Fritier, N., N. Massei, B. Laignel, A. Durand, B. Dieppois, and J. Deloffre (2012). Links between NAO fluctuations and inter-annual variability of winter-months precipitation in the Seine River watershed (north-western France). *Comptes Rendus - Geoscience 344*(8), 396–405.

Granger, C. (1969). Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods. *Econometrica 37*(3), 424–438.

Jajcay, N., M. Paluš, S. Kravtsov, G. Sugihara, A. A. Tsonis, S. Kravtsov, G. Sugihara, A. A. Tsonis, M. Paluš, S. Kravtsov, G. Sugihara, A. A. Tsonis, and N. Jajcay (2018). Synchronization and causality across time scales in El Niño Southern Oscillation. *npj Climate and Atmospheric Science 1*(1), 33.

Kingston, D. G., N. Massei, B. Dieppois, D. M. Hannah, A. Hartmann, D. A. Lavers, and J. P. Vidal (2020). Moving beyond the catchment scale : Value and opportunities in large-scale hydrology to understand our changing world. *Hydrological Processes 34*(10), 2292–2298.

Kwadijk, J. and H. Middelkoop (1994). Estimation of impact of climate change on the peak discharge probability of the river Rhine. *Climatic Change 27*(2), 199–224.

Mariotti, A., P. M. Ruti, and M. Rixen (2018). Progress in subseasonal to seasonal prediction through a joint weather and climate community effort. *npj Climate and Atmospheric Science 1*(1), 2–5.

Massei, N., B. Dieppois, D. M. Hannah, D. A. Lavers, M. Fossa, B. Laignel, and M. Debret (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., A. Durand, J. Deloffre, J. P. Dupont, D. Valdes, and B. Laignel (2007). Investigating possible links between the North Atlantic Oscillation and rainfall variability in Northwestern France over the past 35 years. *Journal of Geophysical Research Atmospheres 112*(9), 1–10.

Massei, N. and M. Fournier (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., D. G. Kingston, D. M. Hannah, J.-P. Vidal, B. Dieppois, M. Fossa, A. Hartmann, D. A. Lavers, and B. Laignel (2020). Understanding and predicting large-scale hydrological variability in a changing environment. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences 383*, 141–149.

NCAR (2018). MPAS overview.

Paluš, M. (2014). Cross-scale interactions and information transfer. *Entropy 16*(10), 5263–5289.

Pierce, D. W., T. P. Barnett, B. D. Santer, and P. J. Gleckler (2009). Selecting global climate models for regional climate change studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 106*(21), 8441–8446.

Richard, S., G. Bouleau, and S. Barone (2010). Water governance in France : institutional framework, stakeholders, arrangements and process. *Water governance and public policies in Latin America and Europe. Jacobi P. and Sinisgali P.(Eds.)*, 137–178.

Schuite, J., N. Flipo, N. Massei, A. Rivière, and F. Baratelli (2019). Improving the Spectral Analysis of Hydrological Signals to Efficiently Constrain Watershed Properties. *Water Resources Research 55*(5), 4043–4065.

Serpa, D., J. P. Nunes, J. Santos, E. Sampaio, R. Jacinto, S. Veiga, J. C. Lima, M. Moreira, J. Corte-Real, J. J. Keizer, and N. Abrantes (2015). Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments. *Science of the Total Environment 538*, 64–77.

Torrence, C. and G. Compo (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society 79*, 61–78.

Vidal, J. P., E. Martin, L. Franchistéguy, M. Baillon, and J. M. Soubeyroux (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology 30*(11), 1627–1644.

Wang, W., J. K. Vrijling, P. H. A. J. M. Van Gelder, and J. Ma (2006). Testing for nonlinearity of streamflow processes at different timescales. *Journal of Hydrology 322*(1-4), 247–268.

Yuan, Z., J. Xu, and Y. Wang (2018). Projection of future extreme precipitation and flood changes of the Jinsha River basin in China Based on CMIP5 climate models. *International Journal of Environmental Research and Public Health 15*(11).