

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 Massei¹, Matthieu Fournier¹, Nicolas Flipo², Nicolas Gallois², Julien Boé³, Bastien Dieppois⁴

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 pour les opérationnels. L'état de l'art sur les modifications du cycle de l'eau dans ce contexte d'influence anthropique met en avant deux points : i) l'influence humaine sur la circulation atmosphérique à large échelle, les précipitations, les débits et les niveaux piézométriques est difficile à caractériser car la variabilité naturelle est importante et peut compenser l'impact anthropogénique ; ii) bien que dans certains scénarios, les projections CMIP5/6 convergent sur les tendances, elles sous ou sur-estiment les changements sur le cycle de l'eau. Les projections de débits et niveaux de nappes sont affectées par le biais supplémentaire lié au filtre du bassin versant. Les incertitudes liées à la variabilité naturelle, aux biais des modèles, et au filtre du bassin versant sont différentes selon les échelles de temps considérées, impliquant i) que les projections de précipitation, servant d'entrée pour la simulation de débits et niveaux de nappes, sont sous/sur-estimées seulement pour certaines composantes (i.e. oscillations à certaines échelles de temps) ; ii) que la réponse des débits et niveaux de nappe aux projections de précipitation biaisées est modulée par le bassin versant. Dans ce volet de la phase 8, nous étudions la réponse des débits et niveaux piézométriques sur le bassin de la Seine aux précipitations dont certaines composantes ont été modifiées. La méthodologie repose sur la modification spectrale de chroniques de précipitation SAFRAN, en augmentant ou diminuant l'amplitude de certaines composantes par méthodes spectrales, puis en utilisant ces chroniques modifiées en entrée de la plateforme de modélisation CaWaQS afin d'établir une régionalisation de la sensibilité des débits et niveaux piézométriques aux modifications dans les précipitations.

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 versants de la Seine

Abstract

Climate Change is a major source of concern for water resources usage, however recent literature has highlighted that internal variability plays a major role in the water cycle dynamics, making identifying anthropogenic influence difficult, as internal variability may offset any human-induced trend. To the poorly understood internal variability, model uncertainty adds to the bias in projections (such as CMIP5/6), especially for precipitation and temperature. While different models' trends may converge, intensities differ greatly, leading to over/under estimation of future variability. Discharge and ground water level projections face the additional challenge of watershed dynamics modelling. The combined uncertainty from internal variability, model under/over estimation and watershed characteristics depends on the time scale considered, such that ; i) Precipitation projections may be biased only at some given time scales ; ii) The response of discharge and ground water levels may be modulated by the watershed characteristics. For the 8th phase of the PIREN-Seine, we present a sensitivity study of discharge and ground water level in the Seine watershed, to modified precipitation's components. We first use spectral analysis to modify precipitation time series from the SAFRAN reanalysis, either increasing or decreasing given components amplitude, then, we use those modified precipitation time series as input to the CaWaQS modelling platform so as to establish a regional map of discharge and ground water levels' sensitivity to modified precipitation.

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 l'un des six principaux bassins de France (Richard et al., 2010). Il est habité par plus d'un tiers de la population française, et donc le siège de nombreuses activités reposant sur la ressource en eau et sa variabilité (transport maritime, agriculture, industries, loisirs). Dans le contexte actuel de changement climatique, de multiples changements ont déjà été observés, notamment une hausse de la température moyenne supérieure à la tendance mondiale, des changements dans la fréquence et l'intensité des événements 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 changements climatiques.

Ce système est caractérisé par de multiples oscillations, à différentes échelles de temps, d'une quinzaine de jours à plusieurs décennies, dont l'amplitude varie dans le temps, et interagissant entre elles (Dieppoiss et al., 2016; Massei et al., 2017; Fossa et al., 2020, 2021). 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 et al., 2021), si bien que, dans le contexte de changement climatique, les caractéristiques spectrales peuvent être modifiées (Boé, 2020; Kingston et al., 2020; Massei et al., 2020).

Néanmoins, la prédiction des changements dans les débits et niveaux piézométriques reste difficile pour trois raisons : i) Les modèles climatiques prédisant les précipitations, même s'ils convergent en tendance, sur ou sous-estiment les amplitudes (Boé, 2020); ii) La part anthropique dans les changements hydroclimatiques futurs est toujours incertaine en raison de la prépondérance de la variabilité naturelle, qui peut compenser les tendances d'origine anthropique (IPCC, 2021); iii) Les effets de modulation du bassin versant sur les précipitations sont très locaux et peuvent induire des réponses non-linéaires des débits et niveaux piézométriques aux changements des précipitation.

Ce projet propose une approche originale consistant à coupler l'analyse du signal et la plate-forme de modélisation hydrologique et hydro-géologique CaWaQS (Flipo et al., 2019) afin de créer des scénarios de sensibilité hydroclimatique : l'amplitude de certaines composantes (*i.e.* échelles de temps) des chroniques de pluie seront modifiées sur la base de celles identifiées dans la littérature comme faisant partie des oscillations hydroclimatique (Feliks et al. (2010); Fossa et al. (2021)), puis injectées en entrée de la plate-forme CaWaQS afin de simuler la réponse des débits et niveaux piézométriques. Ces scénarios permettront de quantifier la réponse des débits et niveaux piézométriques en termes de modification de l'amplitude de leur différentes composantes. L'application de cette méthodologie sur l'ensemble du bassin de la Seine permettra une régionalisation de la sensibilité hydroclimatique des sous-bassins versants 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 et aux biais introduits par les modèles de circulation générale.

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 confluent 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 réanalyse SAFRAN (Vidal et al., 2010), qui est d'une résolution de 8 km, pour 1 613 nœuds.

1.2 Positionnement de recherche

Le travail pour l'année 2021 s'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 ainsi que leur sensibilité hydroclimatique. 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, en modifiant l'amplitude de trois composantes multi-annuelles.

Plus précisément, le travail est organisé selon deux étapes : i) l'amplification ou la diminution de 50% de l'amplitude inter-annuelle à décennale des précipitations ; ii) la simulation des débits et niveaux piézométriques par la plate-forme de modélisation CaWaQS utilisant les précipitations modifiées en entrée.

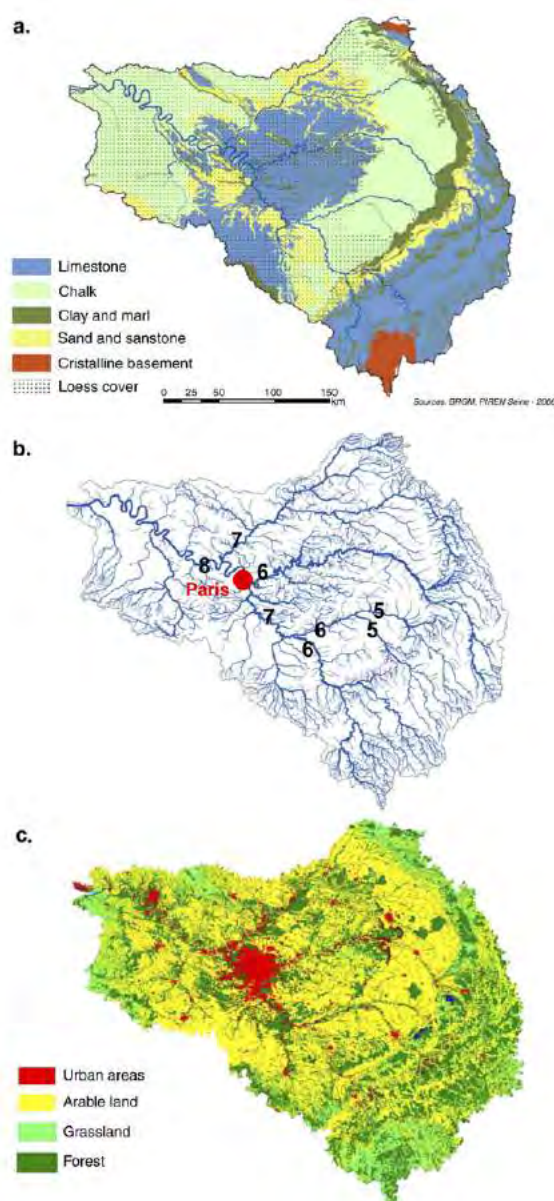


Figure 1. Contexte général du bassin versant de la Seine. a) contexte géologique, b) réseau hydrographique, c) occupation des sols. (Billen et al., 2007)

2 Impact des modifications sur la variabilité des précipitations, débits et niveaux piézométriques

2.1 Méthode

Une chronique peut être décomposée en oscillations de différentes périodes de temps, appelées composantes, chacune exprimant une fraction de la variance totale (Figure 2). Dans le cadre de ce projet, la modification d'une des composantes consiste à décomposer la chronique, puis augmenter ou diminuer l'amplitude d'une composante préalablement choisie, et, finalement, à sommer toutes les composantes pour créer la chronique de précipitation modifiée. Les composantes choisies sont celles de périodes 2-4 ans, 5-8 ans et 15 ans, choisies pour leur omniprésence dans la variabilité hydroclimatique (Feliks et al., 2010; Dieppois et al., 2013;

Massei et al., 2017; Dieppois et al., 2019; Feliks et al., 2021; Fossa et al., 2021). Pour chaque échelle choisie, deux scénarios de modification sont retenus : i) augmentation de 50% de l'amplitude de la composante et ii) diminution de 50% de l'amplitude de la composante. Il y a donc en tout six modifications apportées aux chroniques : deux scénarios (amplitude*1.5, amplitude*0.5) pour chacune des trois périodes (2-4, 5-8 et 15 ans). Les chroniques de précipitation modifiées sont ensuite utilisées en entrée de la plate-forme de modélisation CaWaQS afin de simuler les chroniques de débits et de niveaux piézométriques en réponse aux chroniques de précipitation modifiées. Les résultats sont analysés pour répondre aux questions suivantes :

1. Pour chaque modification :

- (a) La modification entraîne-t-elle un changement dans les cumuls annuels de précipitation ?
- (b) Quelle est la fraction de variance totale exprimée par la composante modifiée par rapport à celle de référence (non modifiée) ?
- (c) Lorsqu'une des composantes est modifiée, quelle est la fraction de variance exprimée par les autres composantes ?
- (d) Quelle est la variabilité spatiale de la réponse des débits et niveaux piézométriques aux précipitations modifiées ?

2. Et plus spécialement pour les débits et niveaux piézométriques :

- (a) Comment les caractéristiques déterminées ci-dessus pour les précipitations sont-elles modifiées par le filtre du bassin versant ?

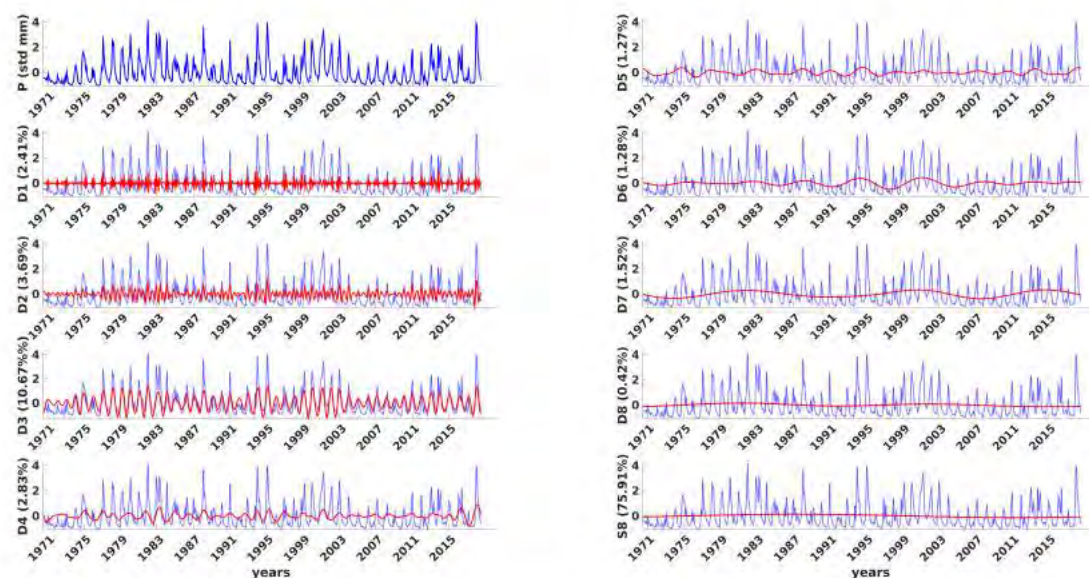


Figure 2. Décomposition d'une chronique de précipitation selon différentes périodes. **Panel en haut à gauche** : Une chronique de précipitation (courbe bleue) peut être représentée comme la somme de composantes D1...S8 de différentes périodes (**panels restants, courbes rouges**). Les périodes des différentes composantes sont approximativement 2^n ans avec $n = 1...8$ (D1 = 0.2 ans ; D2 = 0.5 ans ; D3 = 1 an ; D4 = 2 ans ; D5 = 4 ans ; D6 = 6 ans ; D7 = 13 ans ; D8 = 21 ans). S8 comporte la tendance de la chronique. Les pourcentages représentent la fraction de variance (par rapport au signal total) exprimée par la composante.

2.2 Résultats

2.2.1 Précipitations

Les Figures 3 à 5 présentent les résultats pour chaque composante modifiée en termes de précipitations. Le panel supérieur superpose les cumuls annuels de précipitations de référence (bleu), avec l'amplitude de la composante augmentée de 50% (rouge) et celle diminuée de 50% (vert). Les enveloppes expriment la variabilité spatiale des cumuls annuels. Le panel inférieur représente, pour chaque scénario (référence, augmentation de 50% diminution de 50%), la fraction de variance exprimée par les autres composantes. Les boîtes à moustaches quantifient la variabilité spatiale des fractions de variance exprimées. Quelles que soient la période et la modification considérées, les cumuls annuels changent proportionnellement, même si les modifications de la période 15 ans n'entraînent des changements des cumuls annuels que de 1975 à 1987 et de 1995 à 2001. La période 5-8 ans exprime le plus de variabilité dans les cumuls annuels (19%) par rapport aux périodes 2-4 et 15 ans. La variabilité spatiale des cumuls annuels n'est pas affectée par les modifications (Figures 3, 4, 5, panels supérieurs). La répartition des fractions de variance exprimées par chaque composante reste inchangée quelque soit la modification : la composante 5-8 ans reste celle exprimant le plus de variance, suivie par la composante 2-4 ans, tandis que la composante 15 ans exprime peu de variance (Figures 3, 4, 5, panels inférieurs). La modification de la composante 2-4 ans entraîne des changements sur la composante 5-8 ans, indiquant que la composante 5-8 ans joue un rôle central dans la variabilité des précipitations (Figure 3). Pour les autres modifications (des composantes 5-8 ans et 15 ans), la modification de la variance exprimée ne concerne que la composante modifiée (Figures 4, 5). Tout comme pour les cumuls annuels, la composante 5-8 ans possède le plus de variabilité spatiale.

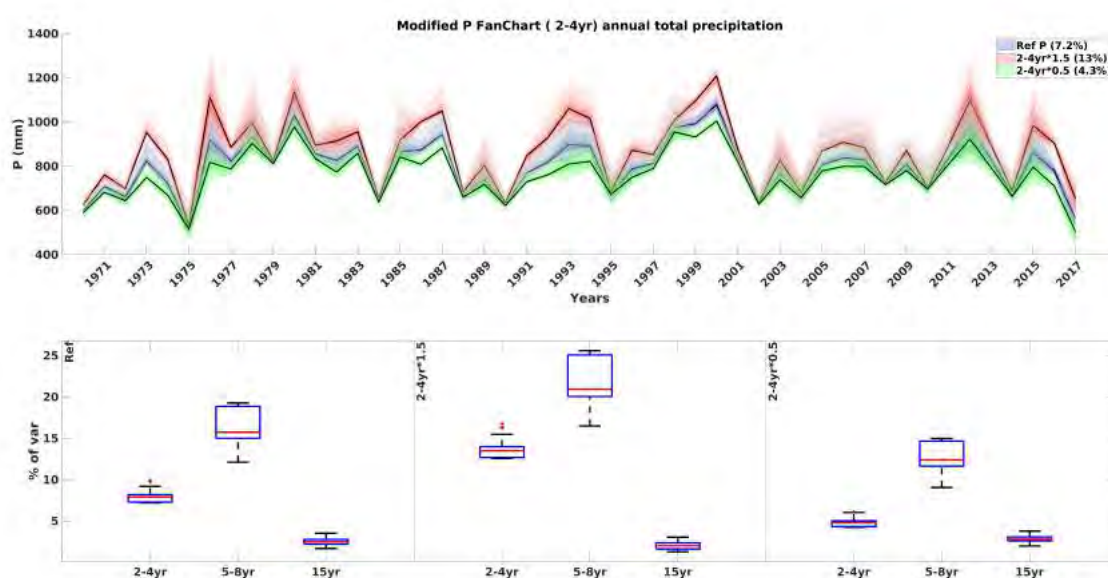


Figure 3. Cumuls annuels de précipitation et répartition de la fraction de variance exprimée pour les scénarios de modification de la composante de période 2-4 ans. **Panel supérieur** : Cumuls annuels de précipitation pour la chronique de référence (bleu), et les deux scénarios de modification : augmentation de l'amplitude la composante 2-4 ans de 50% (rouge) et diminution de la même composante de 50% (vert). Les enveloppes expriment la variabilité spatiale des cumuls annuels. **Panel inférieur** : Répartition des fractions de variance exprimée pour chaque composante pour le scénarios de référence et les deux scénarios de modification (gauche référence, milieu : augmentation de l'amplitude de la composante de 50%, droite : diminution de l'amplitude la composante de 50%). Les boites à moustache expriment la variabilité spatiale des fractions de variance exprimée par chaque composante.

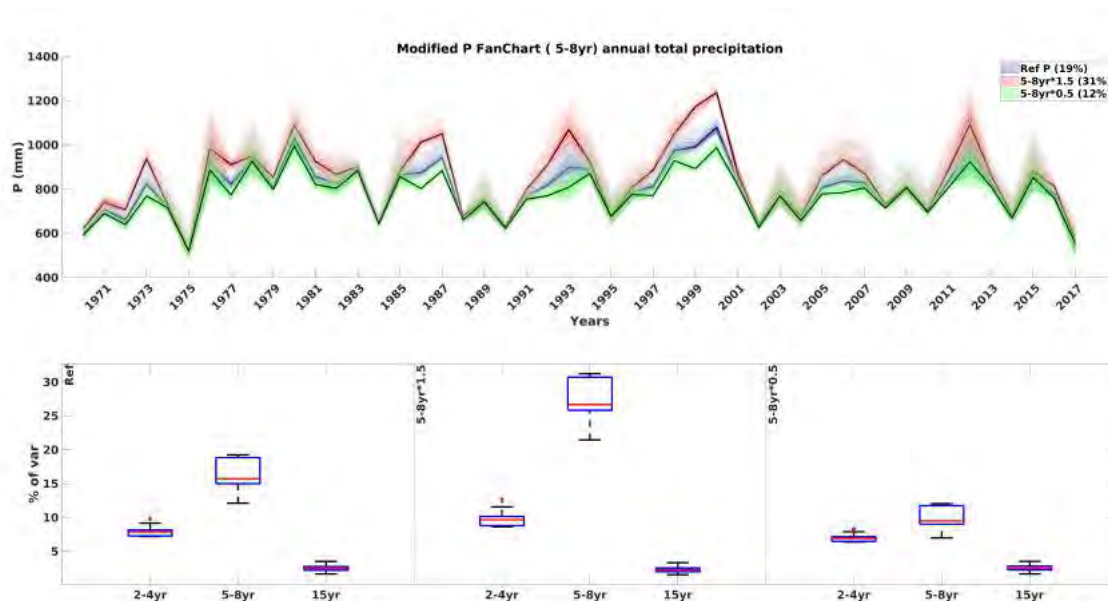


Figure 4. Cumuls annuels de précipitation et répartition de la fraction de variance exprimée pour les scénarios de modification de la composante de période 5-8 ans. **Panel supérieur** : Cumuls annuels de précipitation pour la chronique de référence (bleu), et les deux scénarios de modification : augmentation de l'amplitude la composante 5-8 ans de 50% (rouge) et diminution de la même composante de 50% (vert). Les enveloppes expriment la variabilité spatiale des cumuls annuels. **Panel inférieur** : Répartition des fractions de variance exprimée pour chaque composante pour le scénarios de référence et les deux scénarios de modification (gauche référence, milieu : augmentation de l'amplitude de la composante de 50%, droite : diminution de l'amplitude la composante de 50%). Les boites à moustache expriment la variabilité spatiale des fractions de variance exprimée par chaque composante.

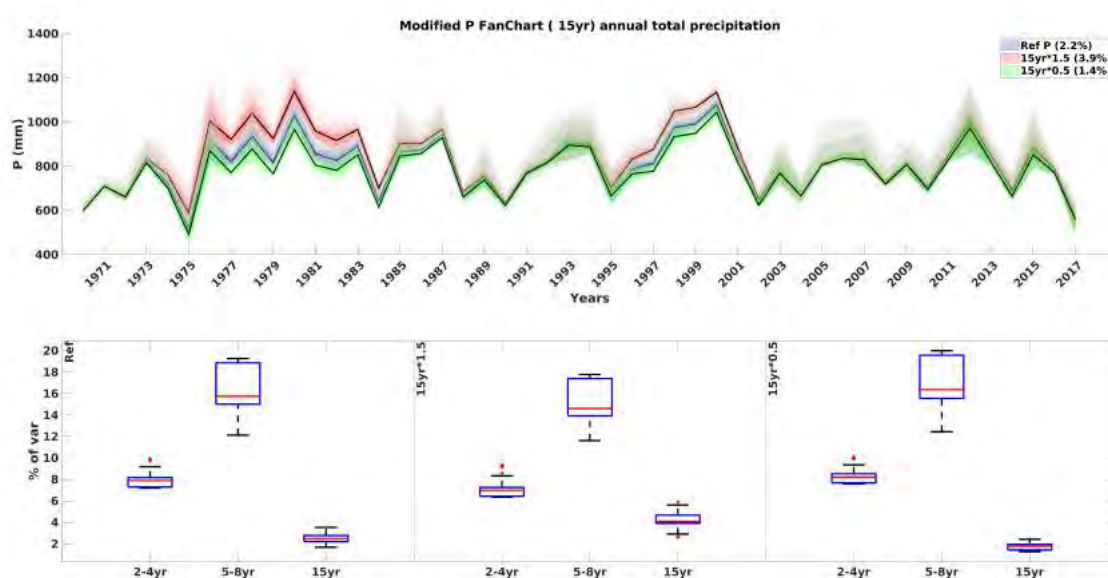


Figure 5. Cumuls annuels de précipitation et répartition de la fraction de variance exprimée pour les scénarios de modification de la composante de période 15 ans. **Panel supérieur** : Cumuls annuels de précipitation pour la chronique de référence (bleu), et les deux scénarios de modification : augmentation de l'amplitude la composante 15 ans de 50% (rouge) et diminution de la même composante de 50% (vert). Les enveloppes expriment la variabilité spatiale des cumuls annuels. **Panel inférieur** : Répartition des fractions de variance exprimée pour chaque composante pour le scénarios de référence et les deux scénarios de modification (gauche référence, milieu : augmentation de l'amplitude de la composante de 50%, droite : diminution de l'amplitude la composante de 50%). Les boites à moustache expriment la variabilité spatiale des fractions de variance exprimée par chaque composante.

2.2.2 Débit

Les Figures 6 à 8 présentent les résultats pour chaque composante modifiée en termes de débits. La réponse des débits en termes de cumuls annuels est plus modérée que pour les précipitations, le scénario de diminution de l'amplitude étant confondu avec le scénario de référence (Figures 6, 7, 8, panels supérieurs, vert). La répartition des fractions de variance exprimée montre des caractéristiques similaires à celle de la précipitation. Il faut néanmoins noter que la composante 15 ans représente maintenant une plus grande fraction de la variance, comparé à celle des précipitations, indiquant un effet filtre passe-bas du bassin versant.

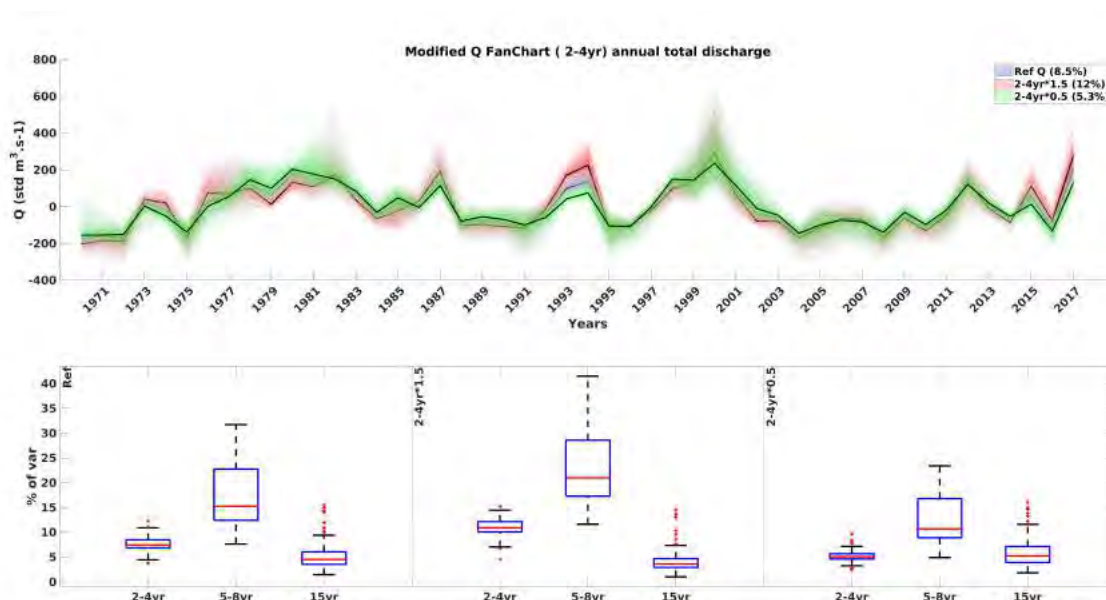


Figure 6. Cumuls annuels de débits (centrés-réduits) et répartition de la fraction de variance exprimée pour les scénarios de modification de la composante de période 2-4 ans. **Panel supérieur** : Cumuls annuels de débits (centrés-réduits) pour la chronique de référence (bleu), et les deux scénarios de modification : augmentation de l'amplitude la composante 2-4 ans de 50% (rouge) et diminution de la même composante de 50% (vert). Les enveloppes expriment la variabilité spatiale des cumuls annuels. **Panel inférieur** : Répartition des fractions de variance exprimée pour chaque composante pour le scénarios de référence et les deux scénarios de modification (gauche référence, milieu : augmentation de l'amplitude de la composante de 50%, droite : diminution de l'amplitude la composante de 50%). Les boîtes à moustache expriment la variabilité spatiale des fractions de variance exprimée par chaque composante.

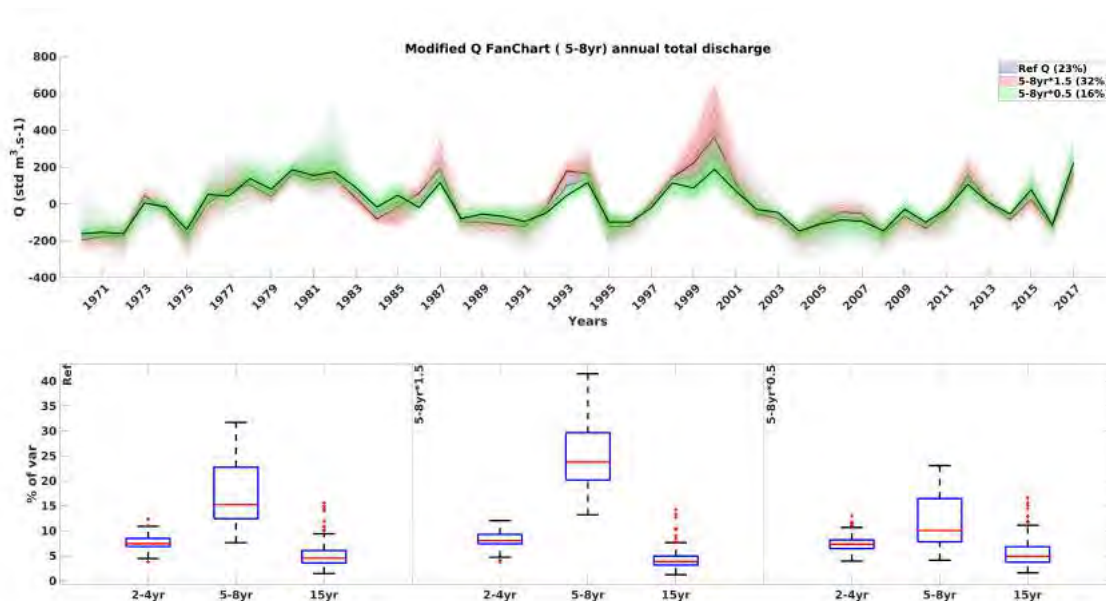


Figure 7. Cumuls annuels de débits (centrés-réduits) et répartition de la fraction de variance exprimée pour les scénarios de modification de la composante de période 5-8 ans. **Panel supérieur** : Cumuls annuels de débits (centrés-réduits) pour la chronique de référence (bleu), et les deux scénarios de modification : augmentation de l'amplitude la composante 5-8 ans de 50% (rouge) et diminution de la même composante de 50% (vert). Les enveloppes expriment la variabilité spatiale des cumuls annuels. **Panel inférieur** : Répartition des fractions de variance exprimée pour chaque composante pour le scénarios de référence et les deux scénarios de modification (gauche référence, milieu : augmentation de l'amplitude de la composante de 50%, droite : diminution de l'amplitude la composante de 50%). Les boîtes à moustache expriment la variabilité spatiale des fractions de variance exprimée par chaque composante.

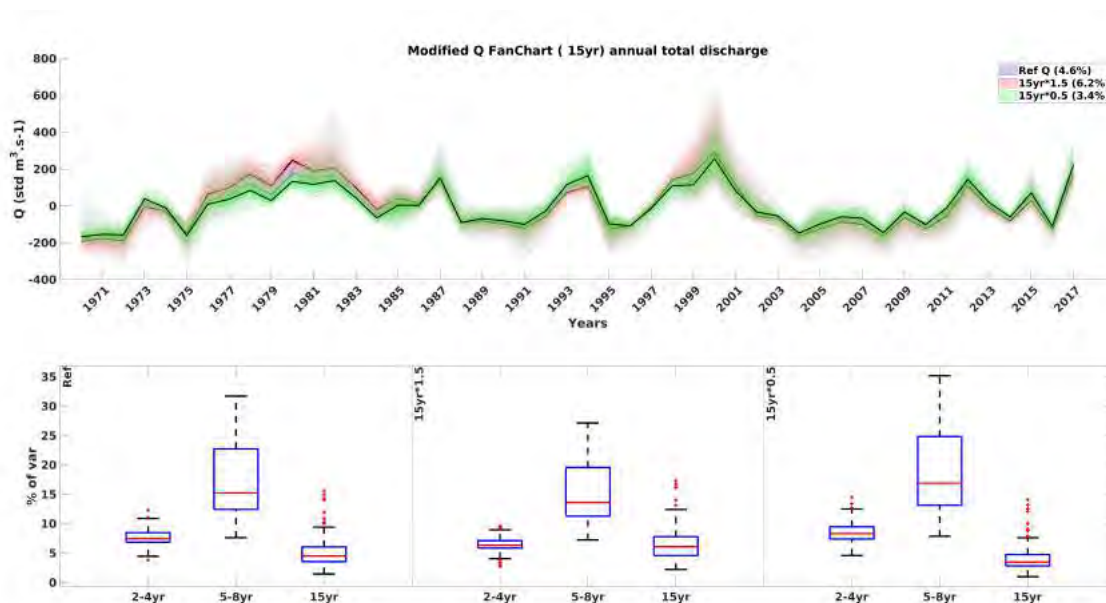


Figure 8. Cumuls annuels de débits (centrés-réduits) et répartition de la fraction de variance exprimée pour les scénarios de modification de la composante de période 15 ans. **Panel supérieur** : Cumuls annuels de débits (centrés-réduits) pour la chronique de référence (bleu), et les deux scénarios de modification : augmentation de l'amplitude la composante 15 ans de 50% (rouge) et diminution de la même composante de 50% (vert). Les enveloppes expriment la variabilité spatiale des cumuls annuels. **Panel inférieur** : Répartition des fractions de variance exprimée pour chaque composante pour le scénarios de référence et les deux scénarios de modification (gauche référence, milieu : augmentation de l'amplitude de la composante de 50%, droite : diminution de l'amplitude la composante de 50%). Les boîtes à moustache expriment la variabilité spatiale des fractions de variance exprimée par chaque composante.

2.2.3 Niveaux piézométriques

Les Figures 9 à 11 présentent les résultats pour chaque composante modifiée en termes de niveaux piézométriques. Tout comme pour les débits, les cumuls annuels des niveaux piézométriques réagissent peu aux précipitations modifiées, et seulement pour certaines portions de la chronique, le scénario de diminution de l'amplitude étant confondu avec le scénario de référence (Figures 9, 10, 11, panels supérieurs, vert). La répartition des fractions de variance exprimée montre des caractéristiques similaires à celle de la précipitation. L'effet filtre passe-bas du bassin versant est plus prononcé que pour les débits, la composante 5-8 ans exprimant une fraction de la variance plus grande, et la composante 15 ans étant beaucoup plus importante que pour les précipitation et débits (Figures 9, 10, 11, panels inférieurs).

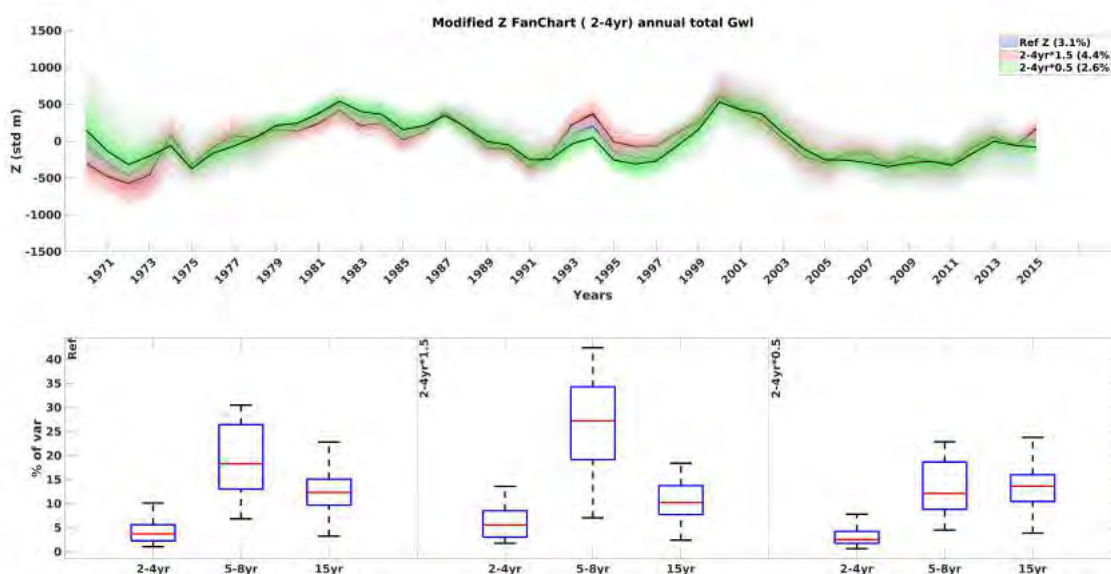


Figure 9. Cumuls annuels de niveaux piézométriques (centrés-réduits) et répartition de la fraction de variance exprimée pour les scénarios de modification de la composante de période 2-4 ans. **Panel supérieur** : Cumuls annuels de piézométriques (centrés-réduits) pour la chronique de référence (bleu), et les deux scénarios de modification : augmentation de l'amplitude la composante 2-4 ans de 50% (rouge) et diminution de la même composante de 50% (vert). Les enveloppes expriment la variabilité spatiale des cumuls annuels. **Panel inférieur** : Répartition des fractions de variance exprimée pour chaque composante pour le scénarios de référence et les deux scénarios de modification (gauche référence, milieu : augmentation de l'amplitude de la composante de 50%, droite : diminution de l'amplitude la composante de 50%). Les boîtes à moustache expriment la variabilité spatiale des fractions de variance exprimée par chaque composante.

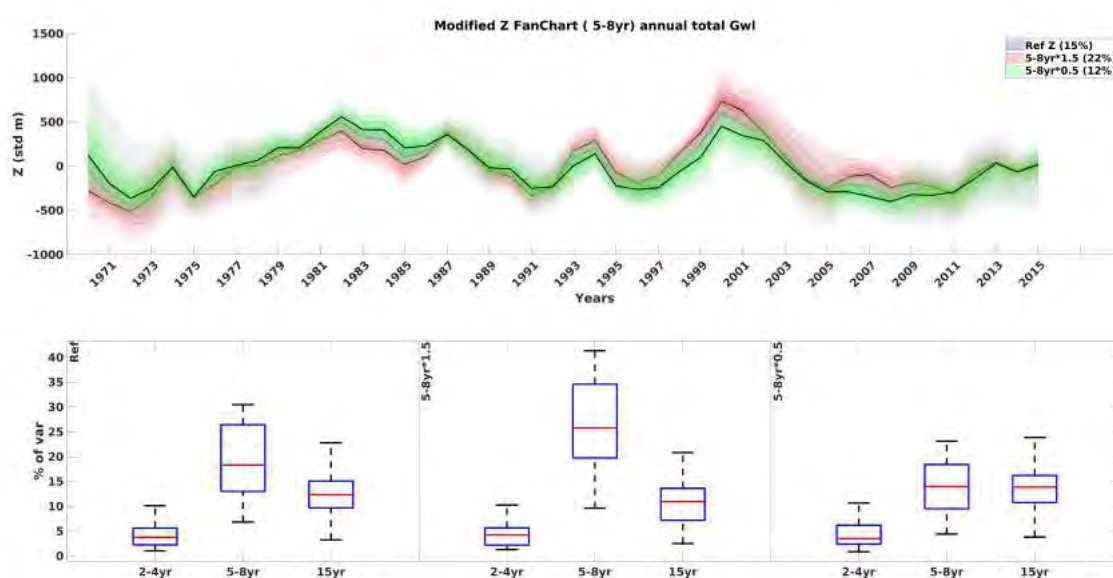


Figure 10. Cumuls annuels de piézométries (centrés-réduits) et répartition de la fraction de variance exprimée pour les scénarios de modification de la composante de période 5-8 ans. **Panel supérieur** : Cumuls annuels de piézométries (centrés-réduits) pour la chronique de référence (bleu), et les deux scénarios de modification : augmentation de l'amplitude la composante 5-8 ans de 50% (rouge) et diminution de la même composante de 50% (vert). Les enveloppes expriment la variabilité spatiale des cumuls annuels. **Panel inférieur** : Répartition des fractions de variance exprimée pour chaque composante pour le scénarios de référence et les deux scénarios de modification (gauche référence, milieu : augmentation de l'amplitude de la composante de 50%, droite : diminution de l'amplitude la composante de 50%). Les boîtes à moustache expriment la variabilité spatiale des fractions de variance exprimée par chaque composante.

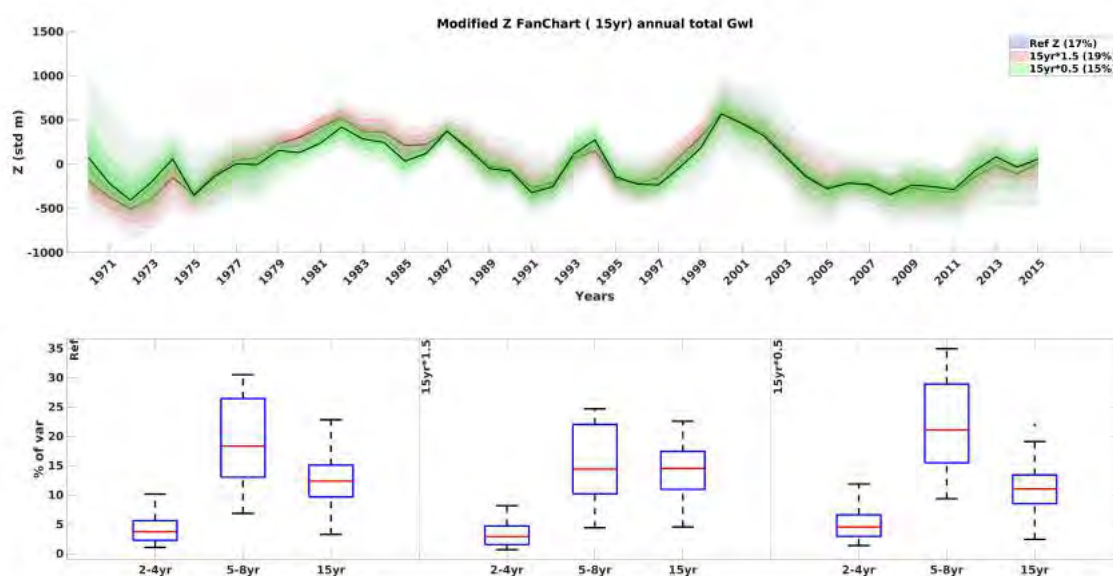


Figure 11. Cumuls annuels de piézométriques (centrés-réduits) et répartition de la fraction de variance exprimée pour les scénarios de modification de la composante de période 15 ans. **Panel supérieur :** Cumuls annuels de piézométriques (centrés-réduits) pour la chronique de référence (bleu), et les deux scénarios de modification : augmentation de l'amplitude la composante 15 ans de 50% (rouge) et diminution de la même composante de 50% (vert). Les enveloppes expriment la variabilité spatiale des cumuls annuels. **Panel inférieur :** Répartition des fractions de variance exprimée pour chaque composante pour le scénarios de référence et les deux scénarios de modification (gauche référence, milieu : augmentation de l'amplitude de la composante de 50%, droite : diminution de l'amplitude la composante de 50%). Les boites à moustache expriment la variabilité spatiale des fractions de variance exprimée par chaque composante.

2.2.4 Synthèse

La modification de l'amplitude des précipitations entraîne un changement proportionnel dans les cumuls annuels et un changement de la fraction de variance exprimée par la composante modifiée (*e.g* une amplification de la composante 2-4 ans augmente la fraction de variance totale exprimée par cette composante). Les modifications ont pour conséquence des changements importants dans les fractions de la variance totale exprimées. Dans le cas de la modification de la composante 2-4 ans, la fraction de variance totale exprimée par la composante 5-8 ans augmente de concert. La composante 5-8 ans est celle qui exprime le plus de variance dans les précipitations. La réponse des cumuls annuels de débits et niveaux piézométriques est plus modérée, et n'est pas homogène dans le temps. La répartition des fractions de variance exprimées des débits et niveaux piézométriques suit celle des précipitations, indiquant que la signature des précipitations est présente dans les deux variables hydrologiques. Cependant, les modifications sont modulées par le bassin versant, qui agit comme un filtre passe-bas, avec pour conséquence la prépondérance des composantes 5-8 et 15 ans. Ainsi, la modification de la composante 2-4 ans n'implique que peu de changements dans les débits et niveaux piézométriques, tandis que les modifications de 5-8 et 15 ans entraînent des changements significatifs. La composante 15 ans est particulièrement significative dans les niveaux piézométriques, allant jusqu'à exprimer une fraction similaire à la composante 5-8 ans quand cette dernière est diminuée de 50%.

3 Variabilité spatiale de la réponse des débits et niveaux piézométriques

Les figures 3 à 11 montrent qu'il existe une variabilité spatiale dans les cumuls annuels et fractions de variance exprimées, quelles que soient la composante modifiée et la modification considérées. La question de l'existence d'une structuration spatiale des réponses se pose donc. La figure 12 rappelle les caractéristiques hydrogéologiques du bassin de la Seine. La figure 13 représente quant à elle les composantes du bilan hydrique du bassin. Les figures 14 à 25 spatialisent les figures 3 à 11, montrant pour chaque scénario et chaque station/piézomètre la fraction de variance totale expliquée par chaque composante (2-4, 5-8 et 15 ans).

3.1 Débits

Les figures 14 à 19 montrent la répartition spatiale des fractions de variance exprimées par chaque composante des débits, pour chaque scénario de modification. Quel que soit le scénario de modification, la répartition spatiale est uniforme excepté pour deux zones : i) Au sud de Paris et à l'est de Chartres, où la composante 15 ans représente la plus grande fraction de variance ; ii) Le territoire jurassique tout à l'est du bassin (zone blanche, figure 12). La singularité de la zone jurassique s'explique probablement par l'absence de prise en compte des échanges nappe-rivière dans la calibration utilisée pour cette étude. Une extension de la calibration CaWaQS au domaine jurassique est en cours. La figure 13 ne montre pas de caractéristique hydrogéologique particulière pour la zone i), exceptée l'infiltration importante qui laisse penser à des échanges nappe-rivières importants (figure 13d)).

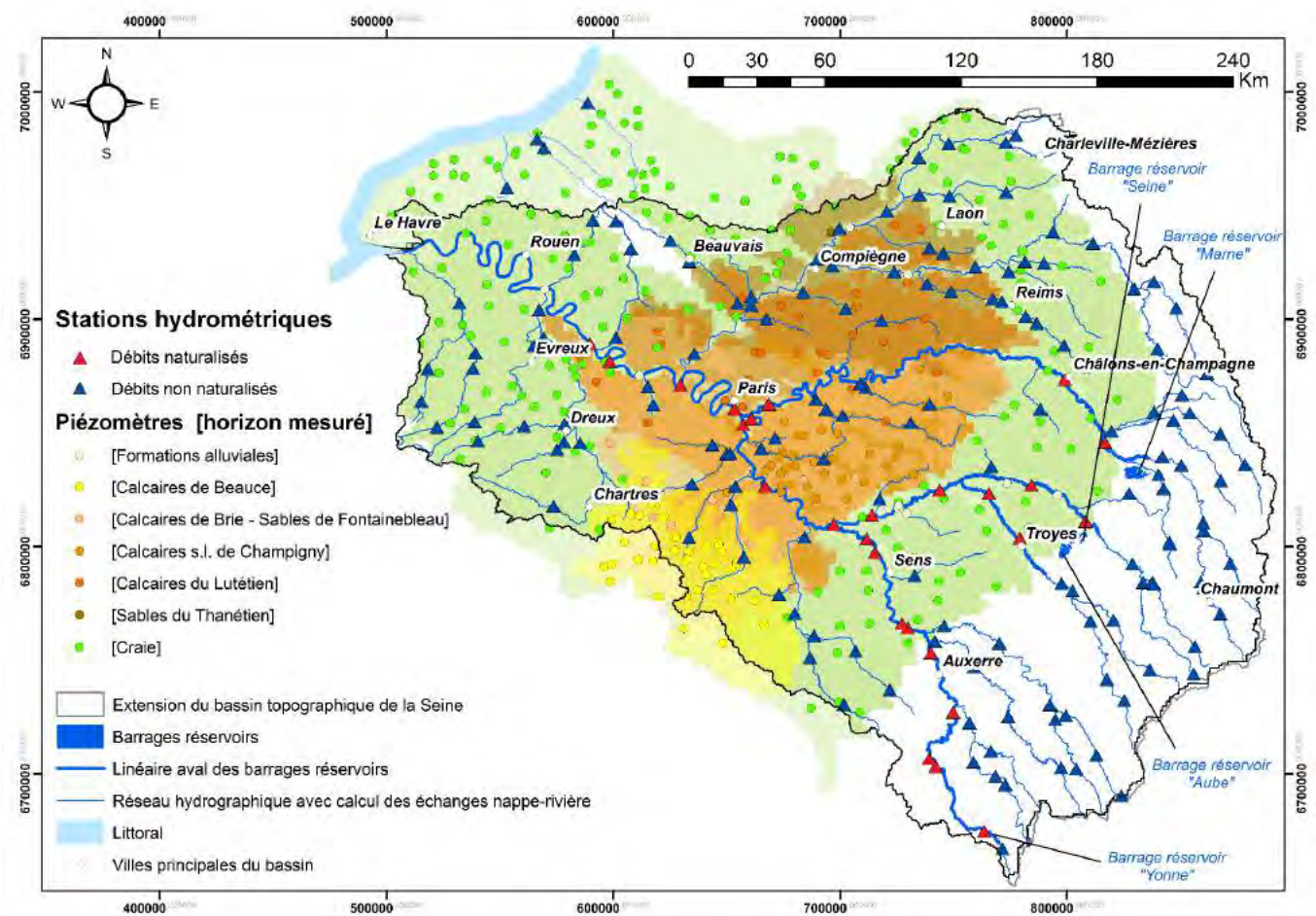


Figure 12. Caractéristiques hydrogéologiques du bassin de la Seine

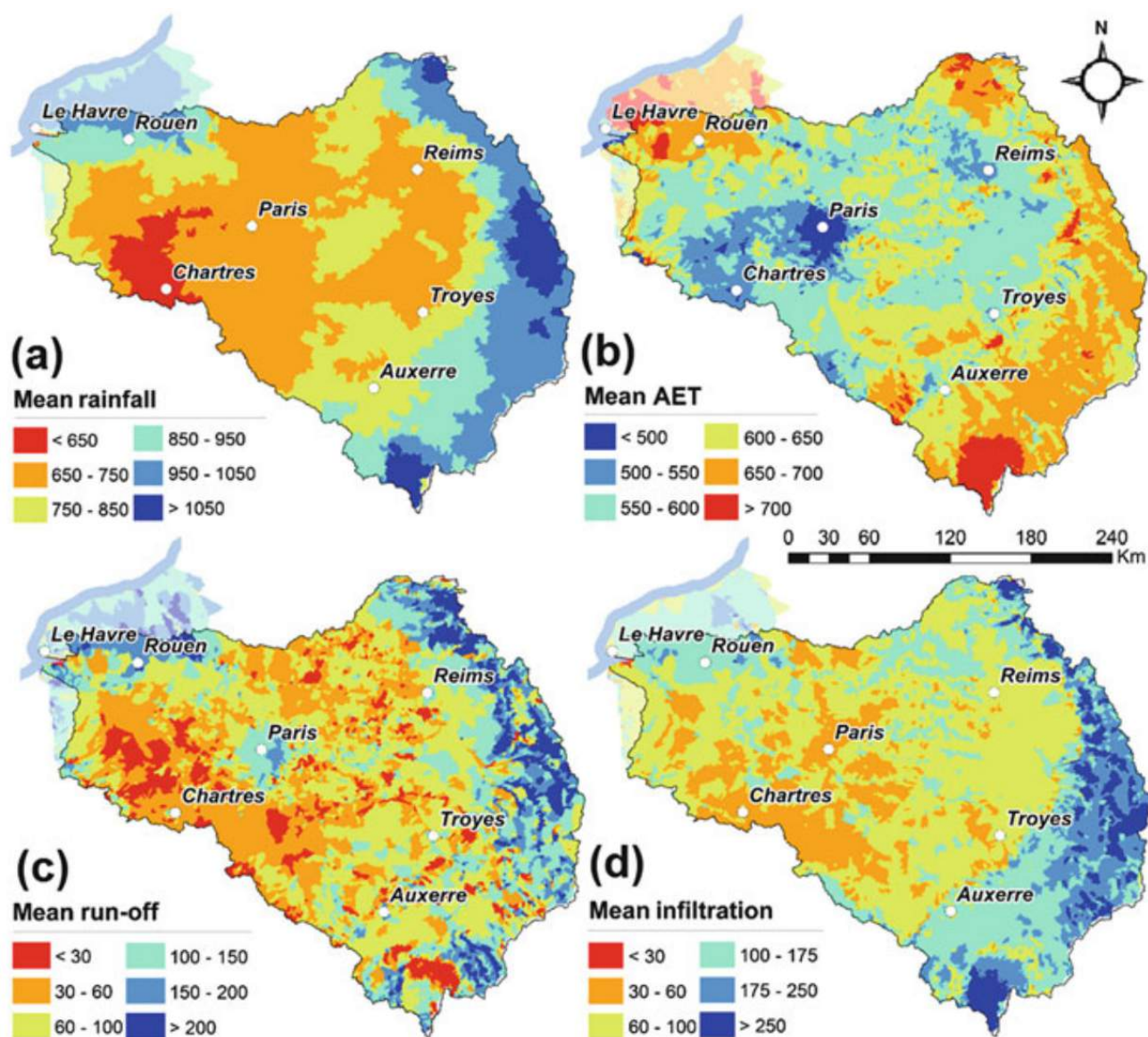


Figure 13. Distributions spatiales sur la période 1993-2010 : a) cumuls annuels de précipitation, b) cumuls annuels d'évapotranspiration, c) cumuls annuels de ruissellement, d) cumuls annuels d'infiltration (Flipo et al., 2021)

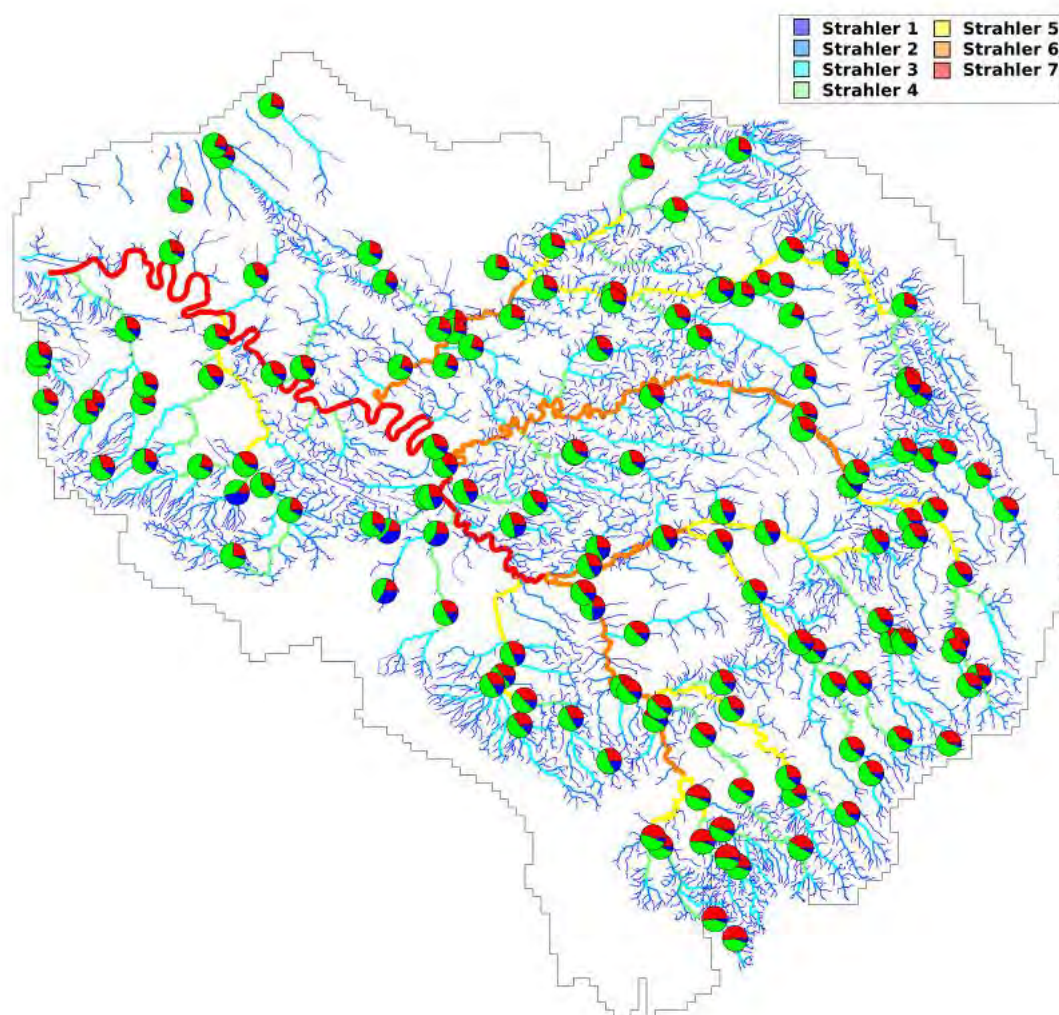


Figure 14. Répartition spatiale de la fraction de variance des débits expliquée par chaque composante pour le scénario 2-4ans augmentée de 50%. Chaque part de camembert représente la fraction de variance exprimée par chaque composante : 2-4 ans (rouge), 5-8 ans (vert), 15 ans (bleu)

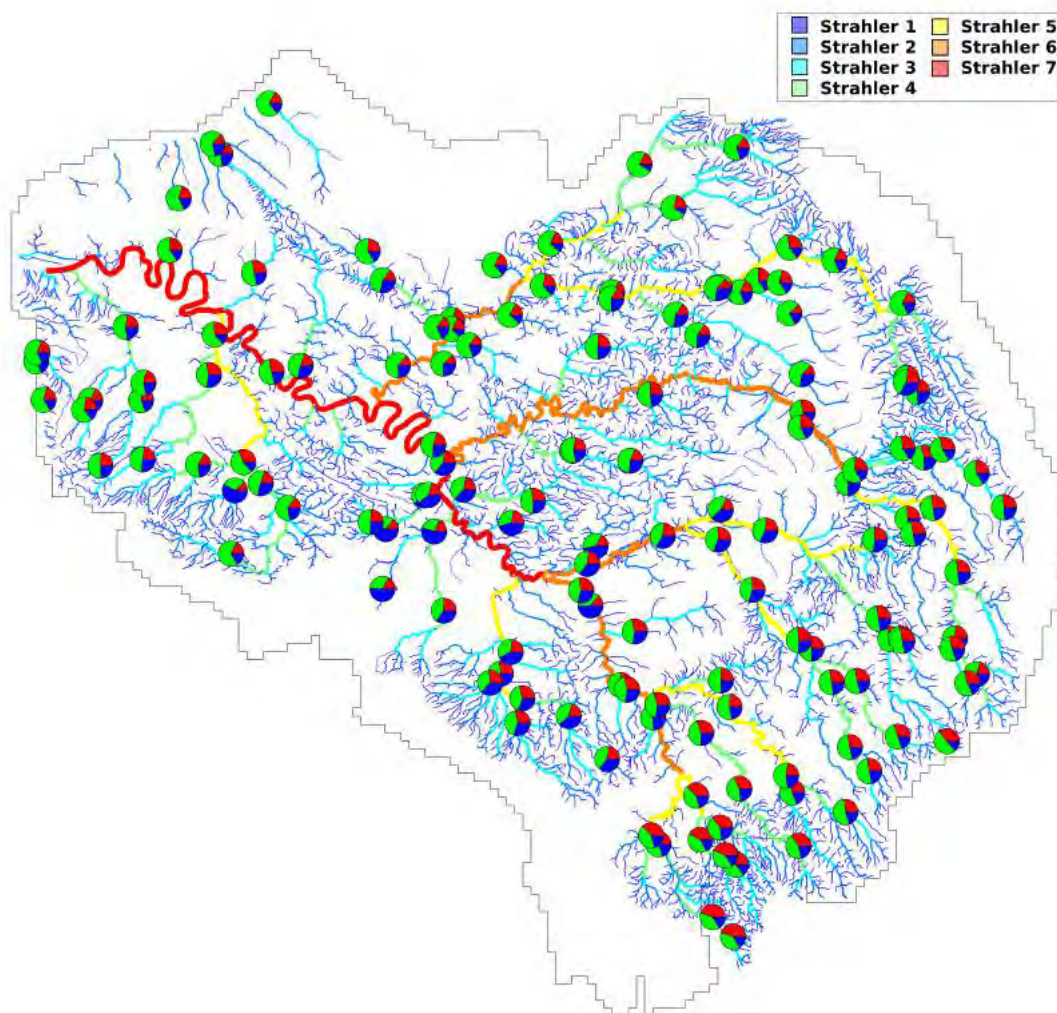


Figure 15. Répartition spatiale de la fraction de variance des débits expliquée par chaque composante pour le scénario 2-4ans diminuée de 50%. Chaque part de camembert représente la fraction de variance exprimée par chaque composante : 2-4 ans (rouge), 5-8 ans (vert), 15 ans (bleu)

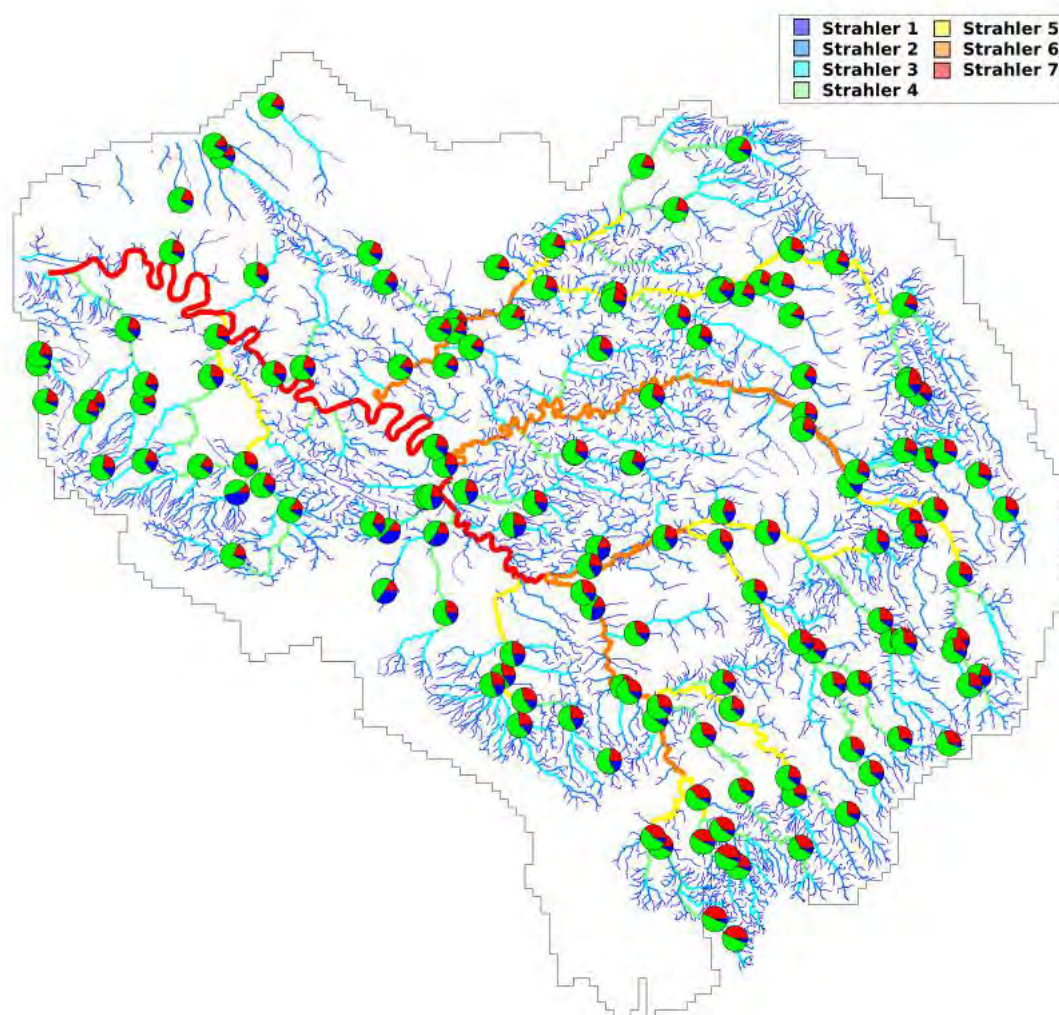


Figure 16. Répartition spatiale de la fraction de variance des débits expliquée par chaque composante pour le scénario 5-8 ans augmentée de 50%. Chaque part de camembert représente la fraction de variance exprimée par chaque composante : 2-4 ans (rouge), 5-8 ans (vert), 15 ans (bleu)

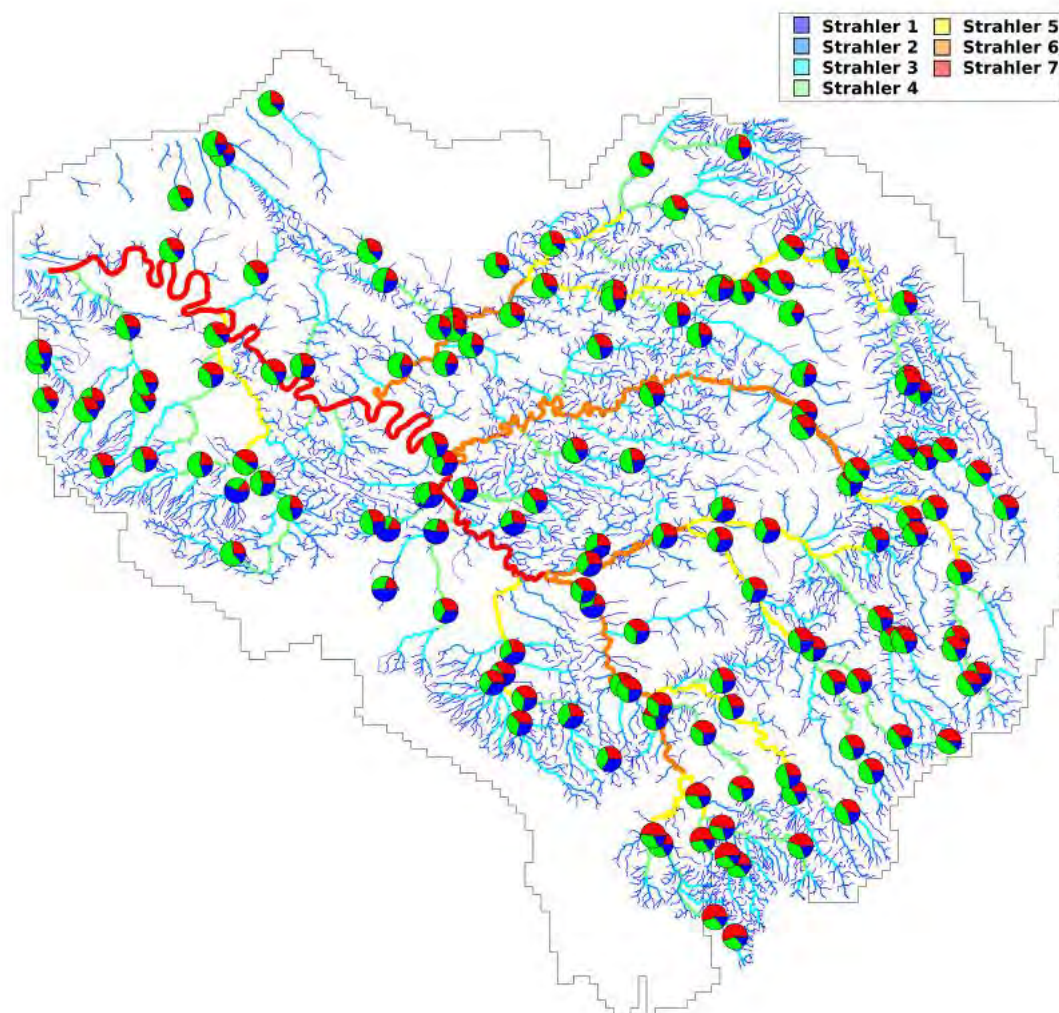


Figure 17. Répartition spatiale de la fraction de variance des débits expliquée par chaque composante pour le scénario 5-8 ans diminuée de 50%. Chaque part de camembert représente la fraction de variance exprimée par chaque composante : 2-4 ans (rouge), 5-8 ans (vert), 15 ans (bleu)

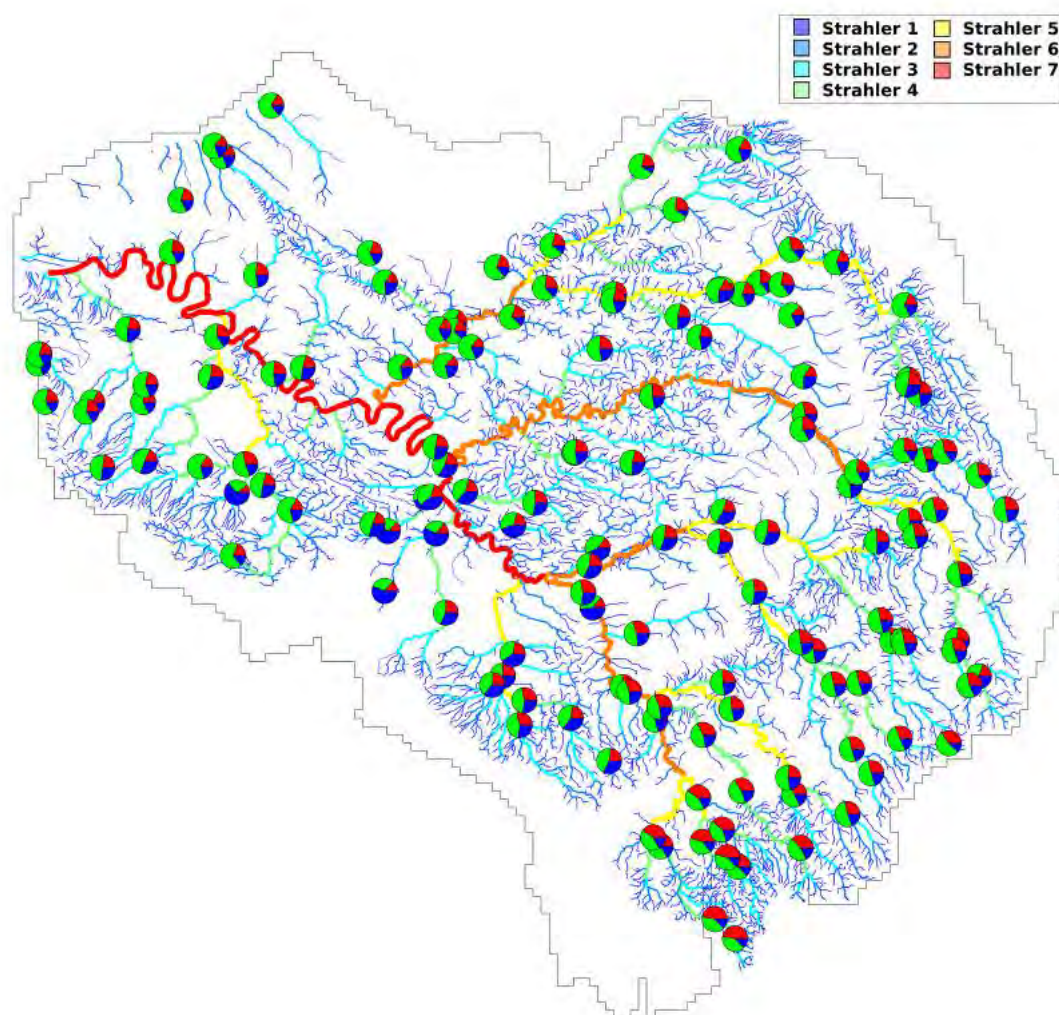


Figure 18. Répartition spatiale de la fraction de variance des débits expliquée par chaque composante pour le scénario 15 ans augmentée de 50%. Chaque part de camembert représente la fraction de variance exprimée par chaque composante : 2-4 ans (rouge), 5-8 ans (vert), 15 ans (bleu)

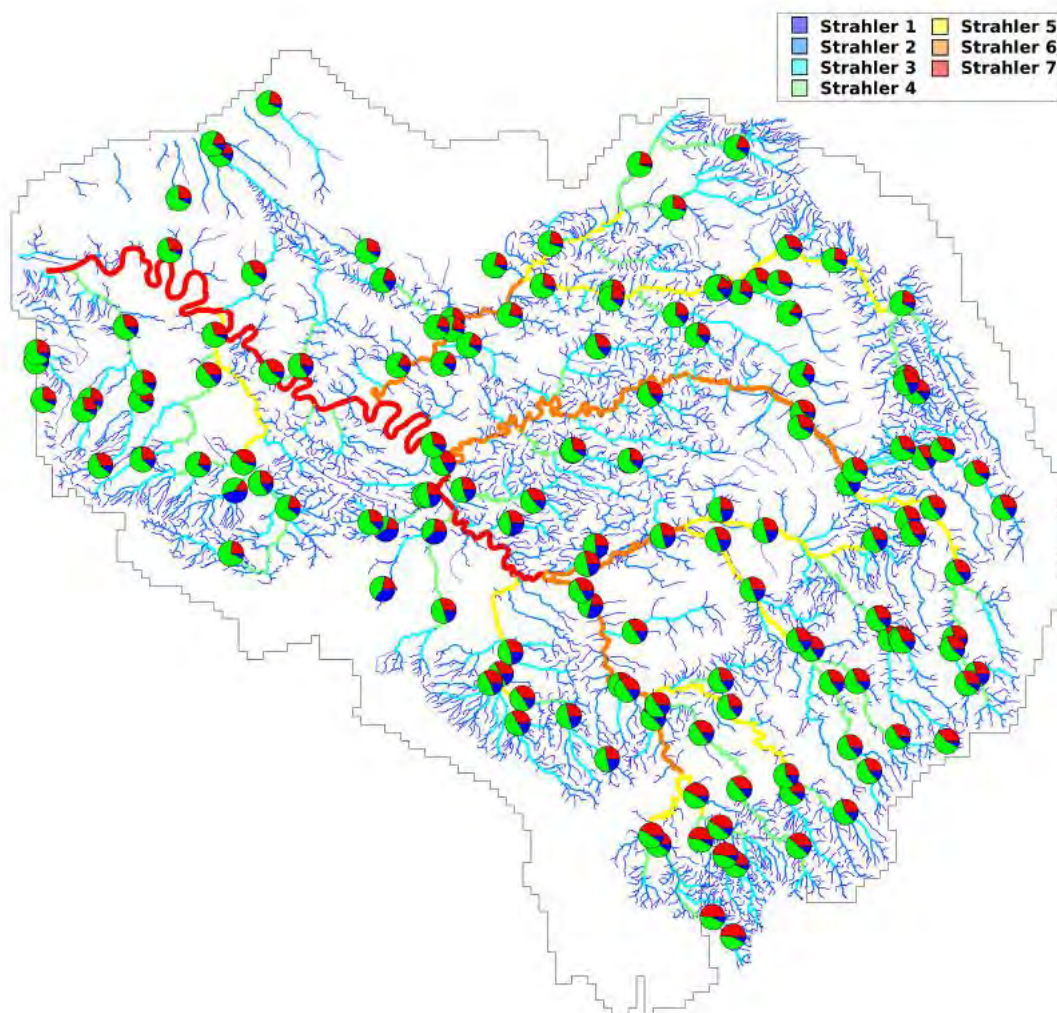


Figure 19. Répartition spatiale de la fraction de variance des débits expliquée par chaque composante pour le scénario 15 ans diminuée de 50%. Chaque part de camembert représente la fraction de variance exprimée par chaque composante : 2-4 ans (rouge), 5-8 ans (vert), 15 ans (bleu)

3.2 Niveaux piézométriques

Les figures 20 à 25 montrent la répartition spatiale des fractions de variance exprimées par chaque composante des niveaux piézométriques, pour chaque scénario. Comparée à celle des débits, la répartition spatiale des fractions de variance est moins homogène, quel que soit le scénario. Bien que la prédominance des composantes 5-8 et 15 ans soit bien visible sur l'ensemble des piézomètres, l'équilibre entre ces deux composantes est variable spatialement. Par exemple, dans le cas de l'augmentation de 50% de la variance de la composante 5-8 ans, certains piézomètres sont, comme attendu, dominés par cette composante, mais d'autres gardent une composante 15 ans très importante (figure 22). Lorsque la composante 15 ans est amplifiée de 50%, certains piézomètres voient la fraction de cette composante dominer, mais certains restent avec une fraction de la composante 5-8 ans dominante (figure 24). Les figures 20 à 25 font apparaître certaines zones homogènes. La craie autour de Laon et à l'est du bassin (figure 14) est dominée par la composante 5-8 ans, tandis que le reste du bassin est plus hétérogène. La zone de la région de Laon est caractérisée par une faible évapotranspiration et infiltration.

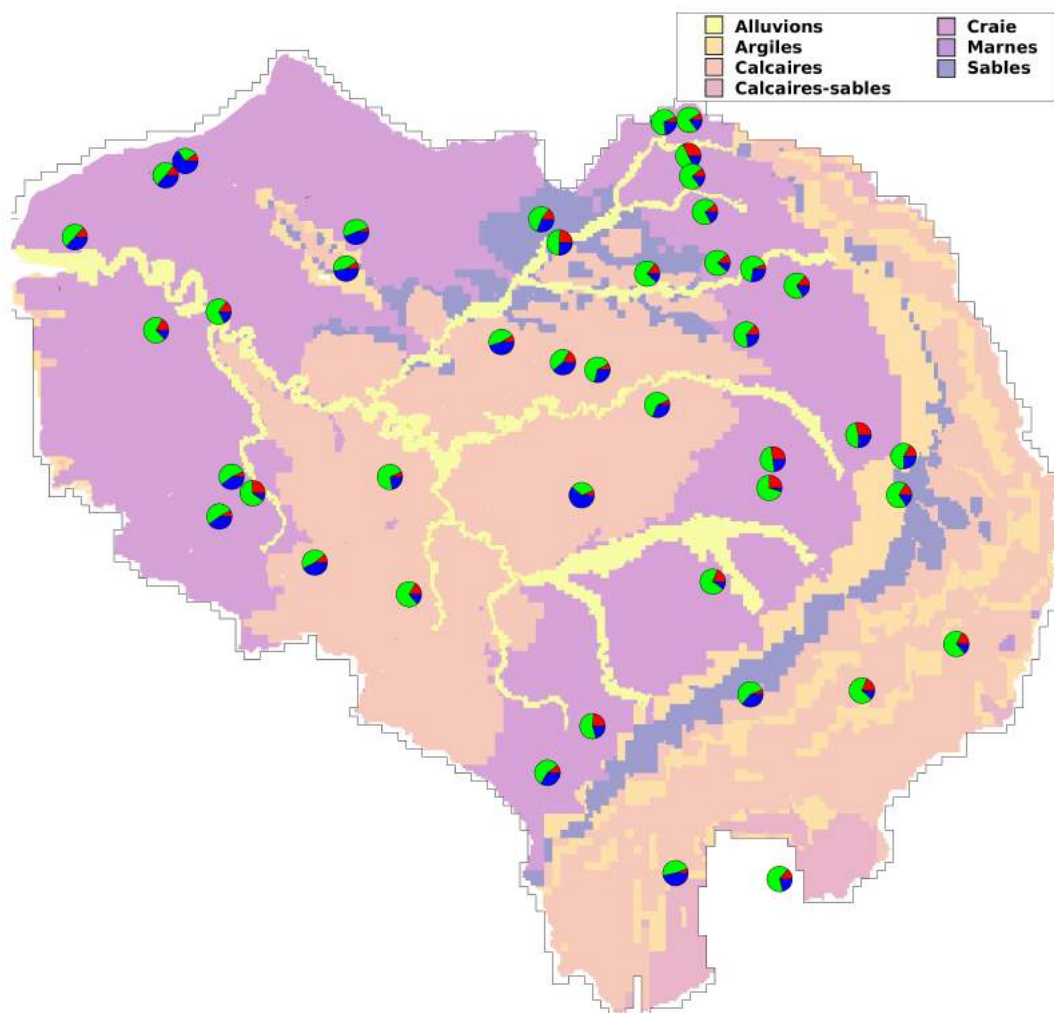


Figure 20. Répartition spatiale de la fraction de variance des niveaux piézométriques expliquée par chaque composante pour le scénario 2-4ans augmentée de 50%. Chaque part de camembert représente la fraction de variance exprimée par chaque composante : 2-4 ans (rouge), 5-8 ans (vert), 15 ans (bleu)

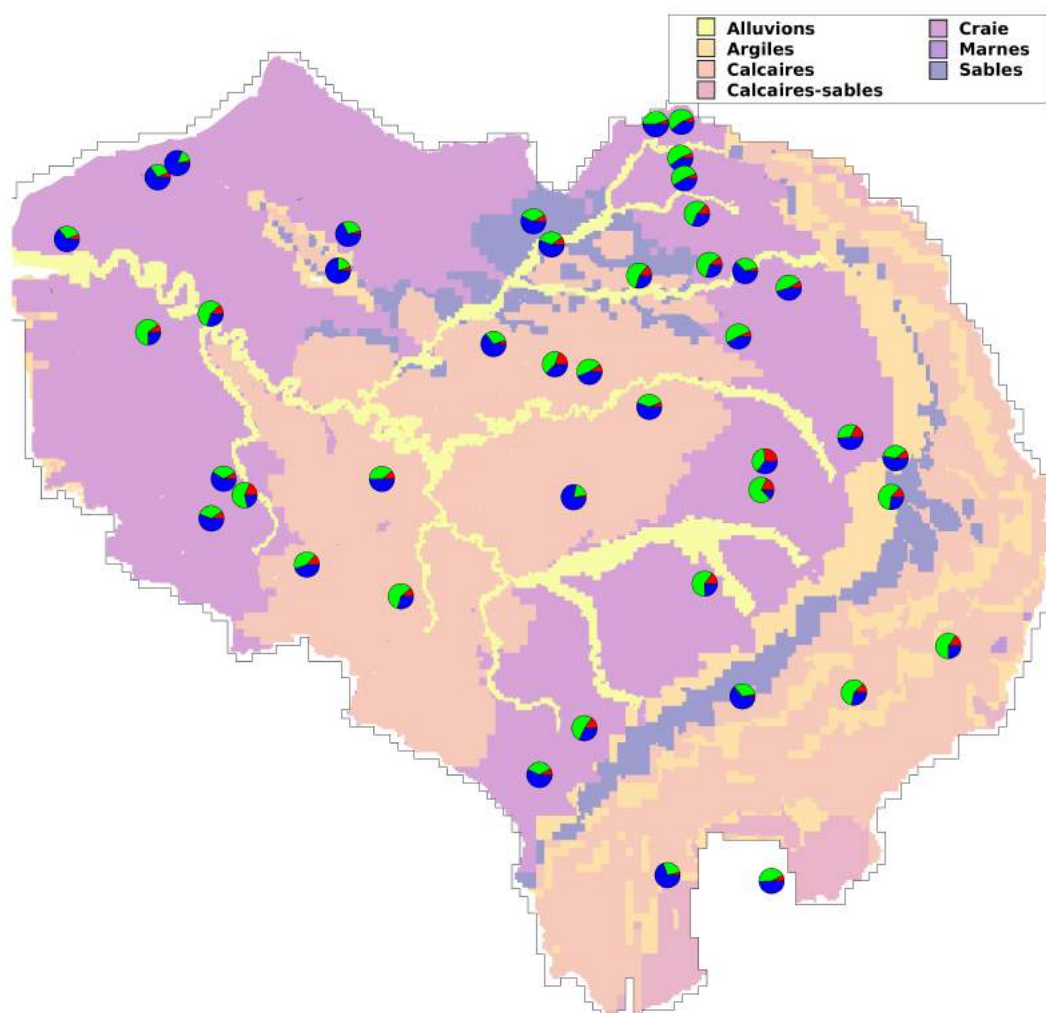


Figure 21. Répartition spatiale de la fraction de variance des niveaux piézométriques expliquée par chaque composante pour le scénario 2-4ans diminuée de 50%. Chaque part de camembert représente la fraction de variance exprimée par chaque composante : 2-4 ans (rouge), 5-8 ans (vert), 15 ans (bleu)

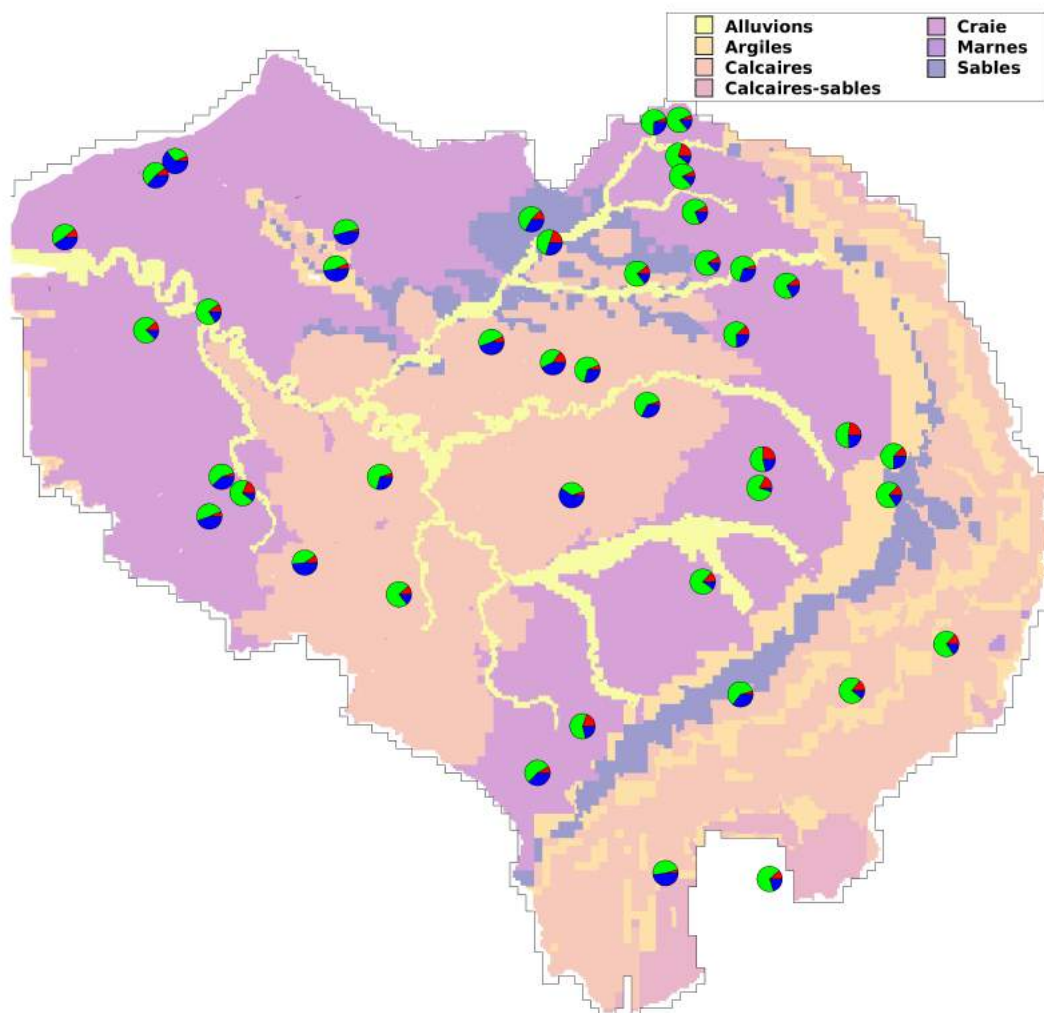


Figure 22. Répartition spatiale de la fraction de variance des niveaux piézométriques expliquée par chaque composante pour le scénario 5-8 ans augmentée de 50%. Chaque part de camembert représente la fraction de variance exprimée par chaque composante : 2-4 ans (rouge), 5-8 ans (vert), 15 ans (bleu)

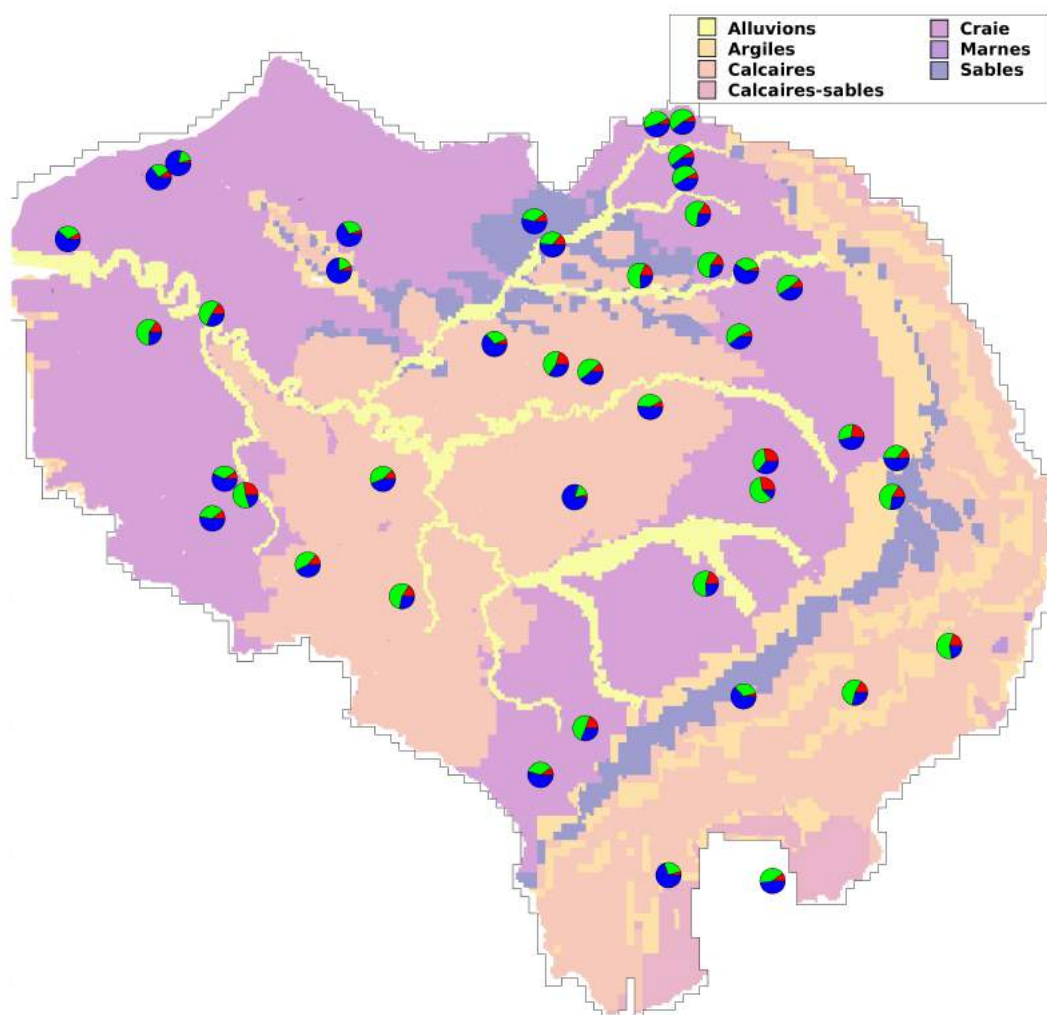


Figure 23. Répartition spatiale de la fraction de variance des niveaux piézométriques expliquée par chaque composante pour le scénario 5-8 ans diminuée de 50%. Chaque part de camembert représente la fraction de variance exprimée par chaque composante : 2-4 ans (rouge), 5-8 ans (vert), 15 ans (bleu)

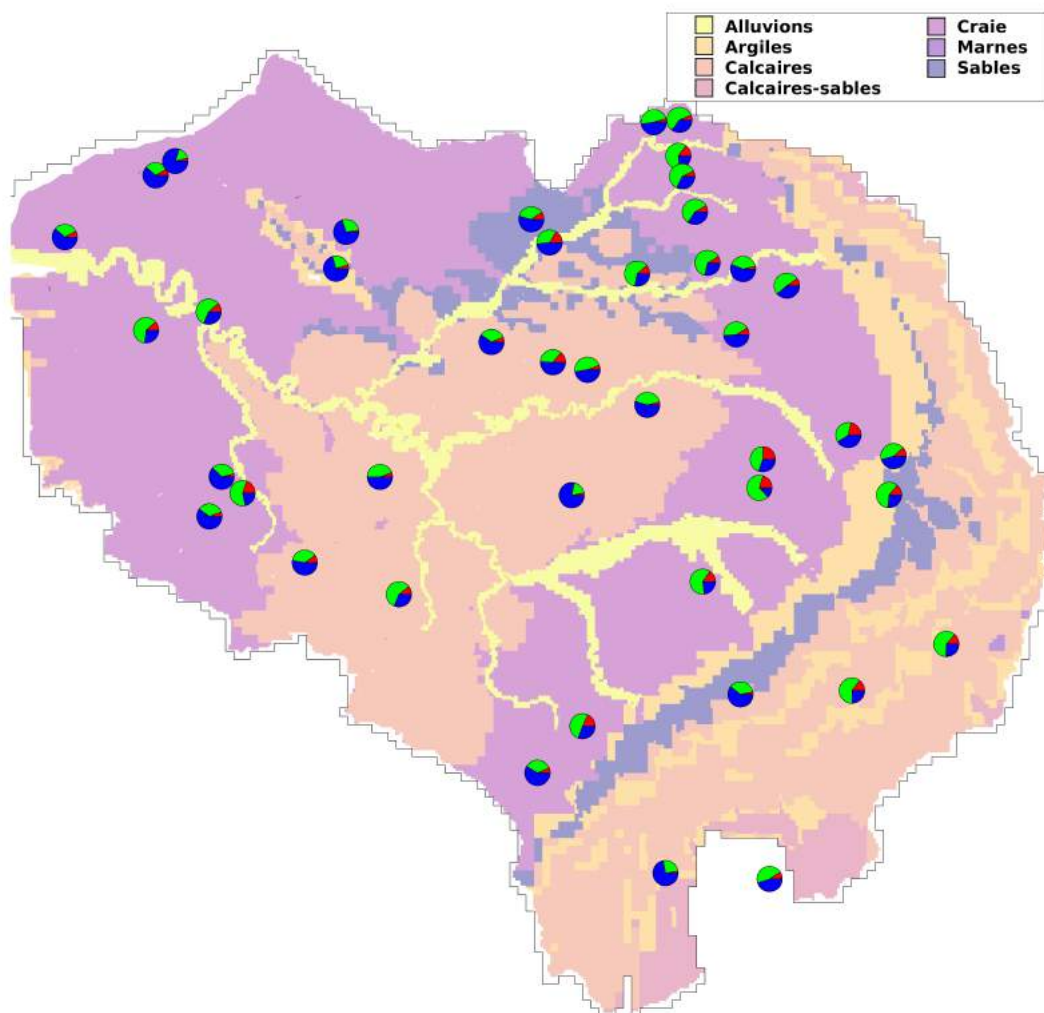


Figure 24. Répartition spatiale de la fraction de variance des niveaux piézométriques expliquée par chaque composante pour le scénario 15 ans augmentée de 50%. Chaque part de camembert représente la fraction de variance exprimée par chaque composante : 2-4 ans (rouge), 5-8 ans (vert), 15 ans (bleu)

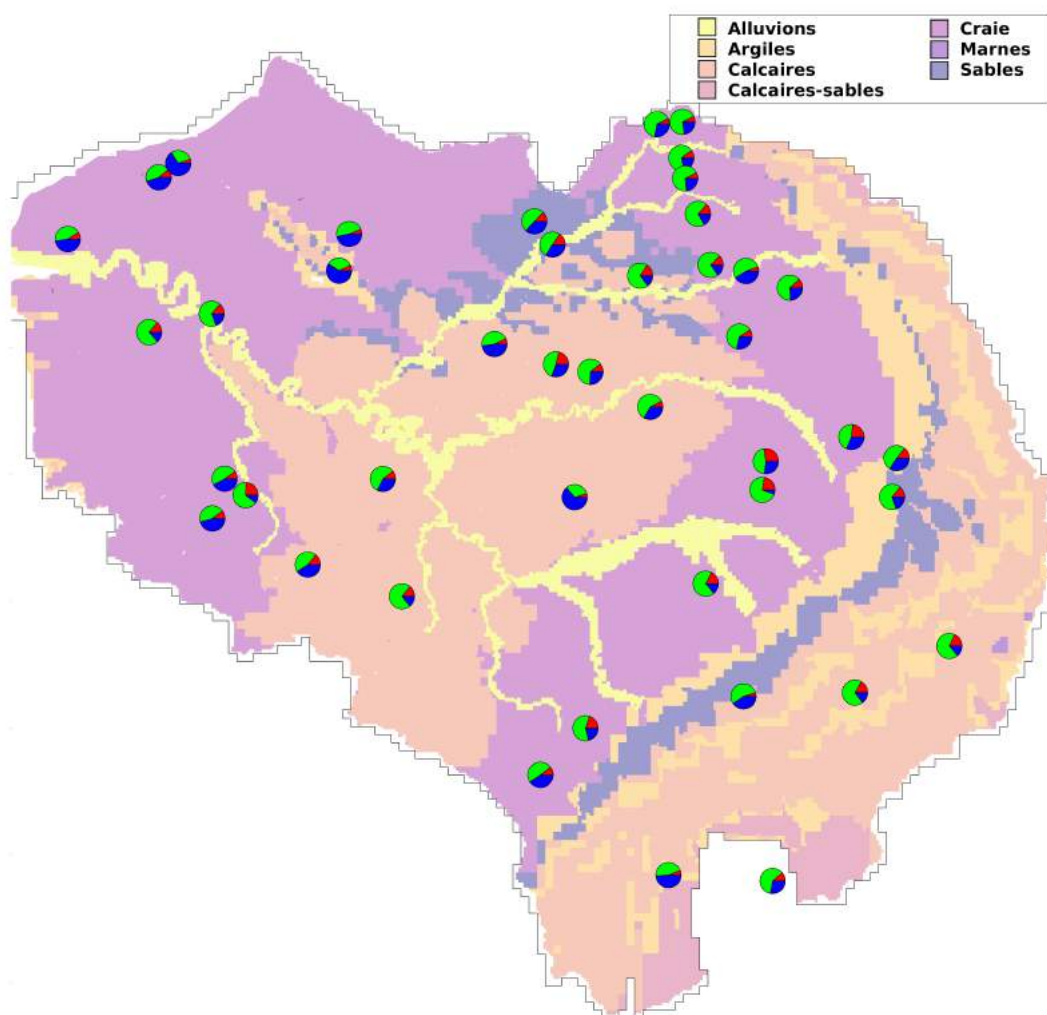


Figure 25. Répartition spatiale de la fraction de variance des niveaux piézométriques expliquée par chaque composante pour le scénario 15 ans diminuée de 50%. Chaque part de camembert représente la fraction de variance exprimée par chaque composante : 2-4 ans (rouge), 5-8 ans (vert), 15 ans (bleu)

Conclusion

Ce rapport fait état de l'avancement du projet d'étude de sensibilité de la dynamique spectrale hydroclimatique (*i.e.* pluies-débits/niveaux piézométriques) des sous-bassins versants de la Seine. Nous avons montré les résultats de six scénarisations climatiques, chacune caractérisée par la modification de l'amplitude d'une des composantes 2-4, 5-8 et 15 ans des chroniques de précipitation SAFRAN sur la bassin de la Seine. Deux types de modifications ont été simulées : i) augmentation de 50% de l'amplitude d'une composante donnée ; ii) diminution de 50% de l'amplitude de cette même composante. Les résultats sont présentés sous trois formes : i) comparaison des cumuls annuels, pour chaque composante en fonction de la modification de l'amplitude ; ii) pour chaque modification d'une composante, la fraction de variance expliquée par chacune des composantes ; iii) répartition spatiale des fractions identifiées en ii). Les résultats montrent que les modifications apportées sur les pluies se répercutent dans les débits et les niveaux piézométriques, cependant, les modifications effectuées sur la composante 2-4 ans sont atténuées dans les débits et les niveaux piézométriques au profit de la composante 5-8 ans sous l'effet du filtre passe-bas du bassin versant. Les modifications de la composante 15 ans se répercutent faiblement dans les débits, mais de façon très significative dans les niveaux piézométriques, au point d'exprimer autant de variance que la composante 5-8 ans dans certains scénarios. Chacune des modifications résulte en des changements dans les cumuls annuels et des changements significatifs dans la fraction de variance exprimée par chaque composante. La répartition spatiale des modifications des débits est homogène, sauf pour une région comprise entre le sud de Paris et l'est de Chartres, caractérisée par une prépondérance de la composante 15 ans, contrairement à la prédominance de la composante 5-8 ans pour les autres stations. Les niveaux piézométriques se répartissent de façon plus hétérogène, mais la craie à l'est de Paris, partant de Laon au nord, est homogène, avec une prépondérance de la composante 5-8 ans, dans toutes les modifications. Les étapes restantes du projet sont les suivantes : i) caractérisation des paramètres hydrogéologiques pouvant expliquer la répartition spatiale de fractions de variance exprimées par chaque modification ; ii) extension de l'analyse à la zone jurassique à l'est de Bassin.

Références

Bibliographie

- Billen, G., J. Garnier, J.-M. Mouchel, and M. Silvestre (2007, April). The seine system : introduction to a multidisciplinary approach of the functioning of a regional river system. *Sci. Total Environ.* 375(1-3), 1–12.
- Boccard, N. (2018, December). Natural disasters over france a 35 years assessment. *Weather and Climate Extremes* 22, 59–71.
- Boé, J. (2020). Résultats des nouvelles projections climatiques sur le bassin de la seine et évaluation de leur capacité à simuler la variabilité basse- fréquence. Technical report, PIREN-Seine.
- Dieppois, B., A. Durand, M. Fournier, and N. Massei (2013, May). Links between multidecadal and interdecadal climatic oscillations in the north atlantic and regional climate variability of northern france and england since the 17th century : N ATLANTIC AND NW EUROPEAN CLIMATE. *J. Geophys. Res.* 118(10), 4359–4372.
- Dieppois, B., D. M. Lawler, V. Slonosky, et al. (2016, December). Multidecadal climate variability over northern france during the past 500 years and its relation to large-scale atmospheric circulation :. *Int. J. Climatol.* 36(15), 4679–4696.
- Dieppois, B., B. Pohl, J. Crétat, et al. (2019, September). Southern african summer-rainfall variability, and its teleconnections, on interannual to interdecadal timescales in CMIP5 models. *Clim. Dyn.* 53(5), 3505–3527.

- Feliks, Y., M. Ghil, and A. W. Robertson (2010, August). Oscillatory climate modes in the eastern mediterranean and their synchronization with the north atlantic oscillation. *J. Clim.* 23(15), 4060–4079.
- Feliks, Y., J. Small, and M. Ghil (2021, December). Global oscillatory modes in high-end climate modeling and reanalyses. *Clim. Dyn.* 57(11), 3385–3411.
- Flipo, N., N. Gallois, B. Labarthe, et al. (2021). Pluri-annual water budget on the seine basin : Past, current and future trends. In N. Flipo, P. Labadie, and L. Lestel (Eds.), *The Seine River Basin*, pp. 59–89. Cham : Springer International Publishing.
- Flipo, N., A. Rivière, N. Gallois, et al. (2019). CAtchment WAter quality SIMulator : CaWaQS. *Rapports de synthèse de la phase VII du PIREN-Seine, Volume 4, 2019 4*, 11–46.
- Fossa, M., B. Dieppois, N. Massei, et al. (2021). Spatio-temporal and cross-scale interactions in hydroclimate variability : a case-study in france. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25(11), 5683–5702.
- Fossa, M., N. Massei, M. Fournier, et al. (2020). *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*. Ph. D. thesis, PIREN-Seine.
- IPCC (2021). Water cycle changes. In *IPCC AR6 WGI Full Report*.
- Kingston, D. G., N. Massei, B. Dieppois, et al. (2020, May). Moving beyond the catchment scale : Value and opportunities in large-scale hydrology to understand our changing world. *Hydrol. Process.* 34(10), 2292–2298.
- Massei, N., B. Dieppois, D. M. Hannah, et al. (2017, March). Multi-time-scale hydroclimate dynamics of a regional watershed and links to large-scale atmospheric circulation : Application to the seine river catchment, france. *J. Hydrol.* 546, 262–275.
- Massei, N., D. G. Kingston, D. M. Hannah, et al. (2020). Understanding and predicting large-scale hydrological variability in a changing environment.
- Richard, S., G. Bouleau, and S. Barone (2010). Water governance in france : institutional framework, stakeholders, arrangements and process. In *Water governance and public policies in Latin America and Europe. Jacobi P. and Sinisgali P. (Eds.)*, pp. 137–p. 178. Anna Blume.
- Schuite, J., N. Flipo, N. Massei, et al. (2019, May). Improving the spectral analysis of hydrological signals to efficiently constrain watershed properties. *Water Resour. Res.* 55(5), 4043–4065.
- Vidal, J.-P., E. Martin, L. Franchistéguy, et al. (2010, September). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over france with the safran system : A 50-YEAR HIGH-RESOLUTION ATMOSPHERIC REANALYSIS OVER FRANCE. *Int. J. Climatol.* 30(11), 1627–1644.