

# Éléments de caractérisation d'évolution long-terme du fonctionnement du réseau hydrographique du bassin de la Seine (1900 - 2100)

Nicolas Gallois<sup>1,\*</sup>, Nicolas Flipo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mines Paris - PSL, Centre de Géosciences, 77 300 Fontainebleau, France

\* [nicolas.gallois@minesparis.psl.eu](mailto:nicolas.gallois@minesparis.psl.eu)

## Résumé

*La mise en œuvre de la nouvelle version de l'application couplée et recalibrée CaWaQS-Seine (Schuite et al., 2019; Gallois et al., 2021; Flipo et al., 2022), a permis d'identifier un ensemble de marqueurs d'impact de l'évolution climatique séculaire passée et à venir sur le bassin de la Seine. L'état évolutif de l'hydrosystème régional est évalué sous rejou historique (i.e. début du XX<sup>ème</sup> siècle) ainsi que sous climat futur tel que dicté par plusieurs produits climatiques issus du projet CMIP5, sélectionnés pour leur capacité à reproduire les tendances pluri-annuelles (Flipo et al., 2020). Trois échéances sont évaluées : horizon 2100 sous scénario médian RCP4.5, horizons 2050 et 2100 sous scénario émetteur RCP8.5. Ces simulations permettent d'établir des trajectoires hydrologiques du bassin soumis à un climat futur. À cet effet, plusieurs indicateurs d'évolution de la ressource en eau souterraine sont suivis à travers la piézométrie à l'affleurement et le comportement du réseau hydrographique principal ( $\approx 6\,850$  km), du point de vue de ses modalités d'alimentation par le système aquifère. La trajectoire issue du modèle climatique sélectionné illustre la poursuite d'une tendance générale amorcée depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle, caractérisée par une pression croissante sur la ressource en eau souterraine (déficits accrus en précipitations et en recharge aquifère, baisse généralisée des niveaux piézométriques, diminutions des volumes d'eau souterraine alimentant le réseau, augmentation des durées et de sévérité des étiages). Si l'évolution de l'hydrosystème Seine s'inscrit, sous scénario RCP4.5, dans une dynamique de continuum, caractérisée par une pression toujours plus marquée, pour atteindre un état de stress hydrique généralisé en fin de siècle, la nature des impacts associés à la projection RCP8.5 rompt cette dynamique dans la seconde moitié du XXI<sup>ème</sup> siècle. Elle traduit d'un comportement instable du système en accord avec la poursuite de l'accroissement exponentiel de la température moyenne de l'atmosphère au XXII<sup>ème</sup> dans le cadre de ce scénario. L'augmentation des précipitations hivernales, source accrue d'inondations potentielles, s'intensifie en amont de bassin notamment. Malgré des recharges satisfaisantes des formations souterraines, assurant un retour partiel du soutien d'étiage, des modifications sensibles du régime hydrologique du réseau sont identifiées, dont un accroissement des débits de hautes eaux. Ce rapport initie une série de documents à venir qui compléteront les résultats ici proposés, à la lumière des nouveaux produits climatiques désagrégés (Boé and Mass, 2021), issus du projet CMIP6.*

## Points clés

- Caractérisation spatialisée et continue des perturbations de fonctionnement du réseau hydrographique principal du bassin sous changement climatique,
- Mise en lumière d'indicateurs illustrant une pression croissante sur la ressource en eau souterraine, amorcée depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle,
- Accélération drastique des échéances (d'ici 2050) sous projection RCP8.5 pour atteindre un stress quantitatif comparable à celui identifié sous scénario RCP4.5 (2100).

## Abstract

The implementation of the latest version of the coupled and recalibrated CaWaQS-Seine application (Schuite et al., 2019; Gallois et al., 2021; Flipo et al., 2022) has allowed to identify past and potential forthcoming evolution trends of a set of climate change markers in the basin. Hindcast hydrosystem state (early 20<sup>th</sup> century) is evaluated as well as its evolutionary hydrological response under climate forecasts as defined by carefully selected (Flipo et al., 2020) climate time series from the CMIP5 project. Three time frames are evaluated : end-of-century (moderate RCP4.5 projection), middle and end-of-century (high emitting RCP8.5 projection). A proper emphasis is given to (i) the spatialized and continuous characterization of the main hydrographic network behavior (about 6 850 kms) as well as (ii) its feeding modalities by the aquifer system and (iii) the identification of hydrological regime disturbances occurring under climate change. Regarding results, a panel of consistant indicators tend to illustrate a continuation in a general trend, characterized by an increasing pressure on groundwater since the beginning of the 20<sup>th</sup> century : increased deficits in precipitation and aquifer recharge, generalized drop in hydraulic heads, decrease in hydraulic network groundwater feed water quantity, increase in duration of more severe low-water levels. General evolution trend in the hydrosystem response under prospective RCP4.5 scenario tends to show a continued momentum, with an increasingly strong pressure on water resource, reaching a generalized stress state by 2100. A similar state is reached twice as fast under extreme RCP8.5 forcing, showing a more unstable behavior in the later part of the 21<sup>st</sup> century. Source of potential flooding, the increase in winter precipitation intensifies, especially on the upstream part of the basin. In spite of more satisfactory aquifer recharge rates, compensating partially low water levels, modifications in river network regime are identified, including a significant increase in high-flow periods. This report acts a first update of previous work focused on the characterization of long-term behavior of the Seine hydrosystem (Flipo et al., 2020). It initiates a series of documents which will complement these results, in light of upcoming disaggregated climate products (Boé and Mass, 2021) from the CMIP6 project.

## Key points

- Spatialized and continuous characterization of disturbances in the functioning of the Seine basin river network under climate change,
- Set of indicators highlighting an increasing pressure on groundwater resource since the turn of the 20<sup>th</sup> century,
- Significant acceleration under high emitting RCP8.5 scenario (by 2050) in reaching similar RCP4.5 end-of-century generalized quantitative stress.

## Introduction

Ce rapport s'inscrit dans la continuité des résultats issus de [Flipo et al. \(2020\)](#), centrés autour de la caractérisation du comportement à long terme de l'hydrosystème Seine au cours des  $XX^{ième}$  et  $XXI^{ième}$  siècles. Plusieurs améliorations récentes dans les méthodes et outils mobilisés ont motivé une première actualisation de ces travaux, trame de fond de ce document. Retenons, tout particulièrement :

- le développement d'une nouvelle méthodologie de calibration du bilan hydrique (méthode HYMIT - [Schuite et al. \(2019\)](#)) ainsi que son application à l'échelle du bassin de la Seine. Cette approche a permis de significativement réévaluer la distribution des propriétés physiques du bassin (analyse menée à l'échelle de 220 sous-bassins versants) et leur influence sur la déformation locale du signal de précipitations. Une méthodologie de calibration emboîtée a ainsi été mise en œuvre afin d'intégrer ces éléments de connaissance à l'application hydrologique et hydrogéologique CaWaQS-Seine <sup>1</sup> ([Flipo et al., 2022](#));
- l'intégration récente, à cette application, d'une représentation explicite des horizons aquifères et aquitards du Crétacé inférieur et du Jurassique. Cette extension de structure à la frange orientale du bassin a rendu possible l'ajout de 2 300 km de linéaire amont, couplés au système aquifère ([Gallois et al., 2021](#)). Outre une couverture désormais complète du système aquifère du bassin, cette amélioration permet une représentation spatiale intégrale des échanges nappe-rivière le long du réseau hydrographique principal du bassin, soit environ 6 850 km.

Fort de ces avancées, et dans l'attente de la mise à disposition prochaine des nouveaux produits climatiques désagrégés ([Boé and Mass, 2021](#)), issus du sixième exercice du GIEC (projet CMIP6 - *Sixth Coupled Model Intercomparison Project*), les données de projections issues de l'itération précédente CMIP5 ([Taylor et al., 2012](#)) sont ici utilisées afin de d'ores et déjà proposer une première mise à jour des travaux de [Flipo et al. \(2020\)](#). Ainsi, ce rapport initie une série de documents qui compléteront prochainement les résultats ici proposés.

Après un détail des différentes configurations retenues de simulation pour actualiser cette trajectoire à long terme du bassin (§. 1), l'ensemble des produits et résultats générés, rassemblés selon quatre thématiques, structureront la seconde partie du document. Des résultats d'impacts régionalisés sur les niveaux aquifères (§. 2.1), les régimes de contribution du système souterrain au réseau hydrographique (§. 2.2), les variations des durées moyennes d'étiages (§. 2.3) et les régimes hydrologiques et hydrauliques (§. 2.4) seront présentés.

## 1 Méthodologie d'évaluation d'une trajectoire long-terme de l'hydrosystème Seine

### 1.1 Choix des forçages climatiques

À l'échelle globale, une multitude de réanalyses et de projections climatiques produites par les Modèles de Circulation Générale (MCG) existent. De par les différences respectives qui caractérisent ces modèles, que celles-ci soit structurelles, conceptuelles ou encore de paramétrage, les séries climatiques qui en résultent font état de comportements très variés, impactant, *de facto*, les prédictions des modèles hydrologiques et hydrogéologiques les utilisant ([Dayon, 2015](#)). Si la calibration de ces derniers et la manière dont ils représentent un hydrosystème sont capitales, les modélisateurs du climat s'accordent sur le fait que les produits issus de MCG constituent une source majeure d'incertitude dans le cadre de projections hydrologiques et hydrogéologiques ([Hattermann et al., 2018](#); [Her et al., 2019](#); [Ashraf-Vaghefi et al., 2019](#)).

1. Développé au Centre de Géosciences, Mines Paris - PSL, CaWaQS modélise le comportement dynamique intégré d'un hydrosystème. Il assure un calcul couplé des flux d'eau, de matière et d'énergie au sein des différents compartiments d'un bassin versant (*i.e.* sub-surface, réseau hydrographique, zone vadose, système aquifère multicouches et échanges nappe-rivière). Sous licence *open-source* EPL v2, il est accessible à l'adresse <https://gitlab.com/cawaqs/cawaqs>. Pour plus d'informations, une *fiche 'outils du PIREN-Seine'* dédiée est consultable sur le site du PIREN-Seine.

Dans l'optique d'évaluer les impacts du changement climatique sur un hydrosystème, plusieurs approches sont classiquement utilisées (Maraun et al., 2010), ayant recours à des procédés de désagrégation statistique (Dayon et al., 2018; Dayon, 2015) ou encore à l'usage de modèles plus régionaux comme dans le cadre du projet EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014). Comme recommandé par Radanovics et al. (2013), le choix a été fait ici, dans la continuité des travaux de Flipo et al. (2020), de ne considérer que les produits climatiques issus d'un unique MCG : le modèle climatique MIROC5. Cette sélection résulte de la mise en œuvre d'une méthode capable d'évaluer, pour chacun des MCG traités<sup>2</sup>, la capacité de leurs réanalyses historiques respectives à reproduire l'état du climat actuel, tel que dicté par les données SAFRAN (Vidal et al., 2010). Cette méthode, fondée sur une décomposition des séries historiques de précipitations dans le domaine fréquentiel<sup>3</sup>, opérée pour quatre régions aux climats contrastés du bassin, permet la dissociation des différentes gammes de périodes présentes dans ces signaux. Elle permet d'établir la présence et la stabilité (ou non) de fluctuations climatiques de large-échelle/basse fréquence, comme l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) dont les traces de plusieurs marqueurs ont été identifiées dans les signaux de réponse hydrologique du bassin (Massei et al., 2010). Pour chacun des MCG, des écarts significatifs aux données de référence ont été établis (Flipo et al., 2020), se traduisant, entre autres, par une restitution assez médiocre de cette variabilité basse fréquence. Ce constat est peu surprenant étant donné les difficultés connues, liées à la modélisation du climat et aux méthodes de désagrégation (Martin et al., 2014; Dayon, 2015). Cependant, les séries de précipitations issues du modèle MIROC5 ont démontré une meilleure cohérence globale avec les données SAFRAN, d'où leur sélection ici, dans la mise en place de simulations en temps futur.

Afin d'évaluer le comportement historique de l'hydrosystème régional, des séries climatiques récemment reconstituées par Bonnet (2018) ont été utilisées, fondées sur une réanalyse atmosphérique à long terme. Ces chroniques utilisent les données du projet NOAA 20CRv2C<sup>4</sup> (Compo et al., 2011), désagrégées (Bonnet et al., 2017) selon une approche statistique (Boé et al., 2007; Dayon, 2015) et projetées à l'échelle de la grille SAFRAN (pas spatial de 8 km). Elles intègrent, dans le processus de changement d'échelle, l'utilisation de mesures en vue d'assurer une reproduction satisfaisante de la variabilité spatio-temporelle des précipitations, de la température ainsi que des débits en rivière. Cette méthode produit des chroniques de précipitations et d'évapotranspiration potentielle (ETP), en cohérence avec les réanalyses SAFRAN (cf. Fig. 1).

L'évaluation d'une trajectoire long-terme de l'hydrosystème Seine, entre un état historique et de potentiels états futurs, suppose de définir des conditions de calcul, et notamment de forçage climatique, permettant la simulation d'un état hydrodynamique de référence. Compte tenu des éléments précédents, le choix s'est donc porté en faveur d'une simulation de référence, forcée par les données de Bonnet (2018) (cf. Fig. 1) plutôt que d'utiliser la série de réanalyse MIROC5. Deux constats majeurs ont motivé ce choix :

- une simulation CaWaQS opérée sous série de rejeu historique MIROC5 a présenté des difficultés à restituer les pics de crue en aval de Seine. Ce constat est imputable à des profils d'ETP élevés en périodes hivernales pour ce jeu de données, entraînant des valeurs d'évapotranspiration réelle (ETR) et de lames d'eau disponibles à l'écoulement beaucoup trop faibles. De fait, l'utilisation de ces données aurait donné lieu à des interprétations biaisées de l'évolution des régimes hydrauliques en temps futur,
- le comportement intrinsèque du modèle (*i.e.* tendance humide ou sec au cours du temps) reste conservé, comme illustré en figure 2, que celui-ci soit exprimé relativement à une valeur de référence<sup>5</sup> issue des données Bonnet (2018) ou des données historiques, propres au modèle climatique MIROC5.

2. Les données de quatre MCG à disposition ont été analysées : CanESM2 (Canada), MIROC5 (Japon), BCC-CSM-1-1-m (Chine) et CSIRO-Mk3-6-0 (Australie).

3. Méthode de Transformation Continue en Ondelettes (ou CWT - *Continuous Wavelet Transform*).

4. National Oceanic and Atmospheric Administration.

5. La valeur de référence est la moyenne inter-annuelle sur une période d'analyse donnée (cf. Tab. 1).



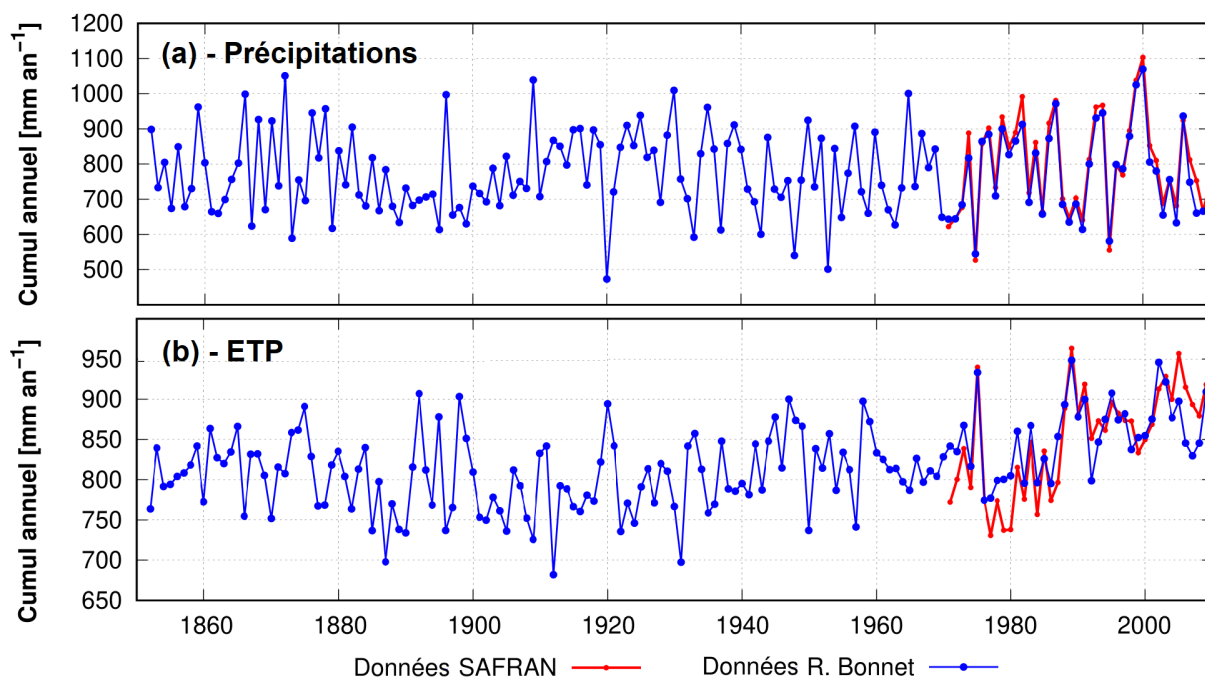


Figure 1. Cumuls annuels (mm) comparés (a) de précipitations et (b) d'ETP (méthode de Penman), entre d'une part, les données de reconstitution historique issues de Bonnet (2018) (courbes bleues, 1850-2010) et, d'autre part, les données SAFRAN (courbes rouges, 1970-2010).

Données agrégées dans les limites du bassin topographique de la Seine à son exutoire.

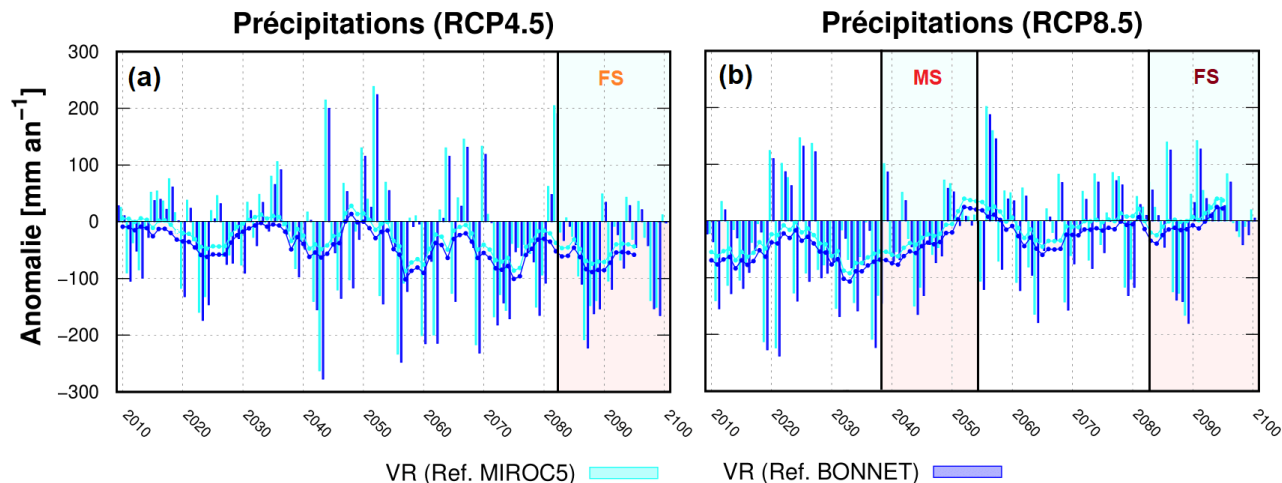


Figure 2. Anomalies annuelles (= écarts à la référence considérée) de précipitations (mm an<sup>-1</sup>), identifiées sur la base des données climatiques des projections (a) MIROC5-RCP4.5 et (b) MIROC5-RCP8.5.

Expression de cette anomalie relativement, d'une part, à la propre référence historique du modèle MIROC5 (histogrammes bleus clairs) et, d'autre part, à la référence BONNET-Temps présent (histogrammes bleus foncés). Une anomalie positive (resp. négative) traduit d'une phase à comportement plus humide (resp. plus sec) que la référence considérée. Pour une meilleure lisibilité des tendances, un lissage des tendances est proposé par moyenne mobile décennale centrée. Données brutes agrégées dans les limites de l'extension du bassin de la Seine à l'estuaire. Les segments 'MS' et 'FS' correspondent aux périodes retenues par la suite, pour l'analyse des sorties de simulation (cf. Tab. 1, page 8).

Deux projections climatiques ont été considérées (cf. Fig. 2). En effet, le cinquième exercice du GIEC a abouti à la construction de plusieurs scénarios, en partie fondés sur la variabilité des paramètres majeurs agissant sur le climat ; le plus important étant le forçage radiatif<sup>6</sup> à horizon 2100. La stratégie de conception employée pour la création de ces scénarios tient compte de rétroactions entre les émissions des gaz à effet de serre, de conditions socio-économiques, de la chimie de l’atmosphère et du cycle du carbone. Cet exercice a abouti à plusieurs profils de forçage radiatif nommés ‘profils représentatifs d’évolution de concentration’ (Stocker et al., 2013; Ouzeau et al., 2014) dits ‘scénarios RCP’ (*Radiative Concentration Pathways*). Deux de ces scénarios sont considérés dans la suite des travaux :

- RCP4.5, forçage médian, suivant un profil d’évolution de forçage radiatif marqué par une stabilisation à  $4,5 \text{ W m}^{-2}$  sur la période 2070-2100 (valeur moyenne en temps présent d’environ  $2,0 \text{ W m}^{-2}$  en 2010),
- RCP8.5, profil extrême fort, en croissance continue vers une valeur de  $8,5 \text{ W m}^{-2}$  à l’horizon 2100.

## 1.2 Intégration de modifications dans l’occupation du sol

Au sein du module de surface de CaWaQS, les caractéristiques d’occupation, de texture du sol (ou *fonctions-productions*) et de zonages météorologiques déterminent des unités de réponses hydrologiques (ou HRU en anglais), à l’échelle desquelles les calculs de bilan hydrique sont réalisés (estimation de l’ETR, calculs des lames d’eau destinées à l’infiltration, au ruissellement, etc.).

Dans le cadre de simulations rétrospectives et/ou prospectives, il est ainsi possible de tenir compte d’évolutions estimées d’occupation du sol pour les trois principaux types de zones recensées sur le bassin (*i.e.* urbaines, arables et forestières) :

- Pour les zones urbaines, des données départementales issues des recensements INSEE 1901 et 2009 ont contribué à évaluer les proportions de territoire potentiellement occupées par des aires artificialisées sur le domaine d’étude, au début du XX<sup>ième</sup> siècle. La relation empirique  $S_a = 1475 p^{-0.6}$  a été utilisée pour convertir la densité de population  $p$  ( $\text{hab km}^{-2}$ ) en surfaces artificialisées  $S_a$  (en  $ha$  pour 1000 habitants) (Couturier et al., 2017). Ces données ont été localement affinées sur le secteur de Paris et son agglomération (cf. Fig. 3), par mobilisation de données de l’IAU (Institut d’Aménagement et d’Urbanisme) de la région Île-de-France, permettant d’intégrer avec précision l’extension significative des surfaces urbaines au cours du temps et ses conséquences sur le bilan hydrique local. Dans le cas des simulations en temps futur, les projections démographiques proposées par le projet Explore2070 (Explore2070, 2012) ont été mobilisées pour déterminer une possible évolution des surfaces urbaines.
- Dans le cas des surfaces forestières, les proportions d’évolutions entre 1950 et 2010, aussi disponibles à l’échelle départementale, ont été extraites des recensements forestiers (AGRESTE, 2009). Cependant, aucune donnée n’est disponible avant 1950. Les taux de variation sur la première moitié du XX<sup>ième</sup> siècle étant, par ailleurs, négligeables (Koerner et al., 2000), les données associées à 1950 ont été retenues dans le cadre de la simulation historique. Pour la partie prospective, les surfaces forestières ont été considérées constantes par rapport à la période actuelle.
- Les proportions de surfaces urbaines et forestières ont été ajustées au détriment ou bénéfice des évolutions en terres arables sur l’ensemble du domaine, qu’il s’agisse d’une simulation historique ou prospective.

6. Exprimé en  $\text{W m}^{-2}$ , un forçage radiatif est une modification du bilan radiatif (différence entre le rayonnement entrant et le rayonnement sortant) au sommet de la troposphère ou de l’atmosphère, dû à un changement d’un des facteurs d’évolution du climat, comme la concentration des gaz à effet de serre.

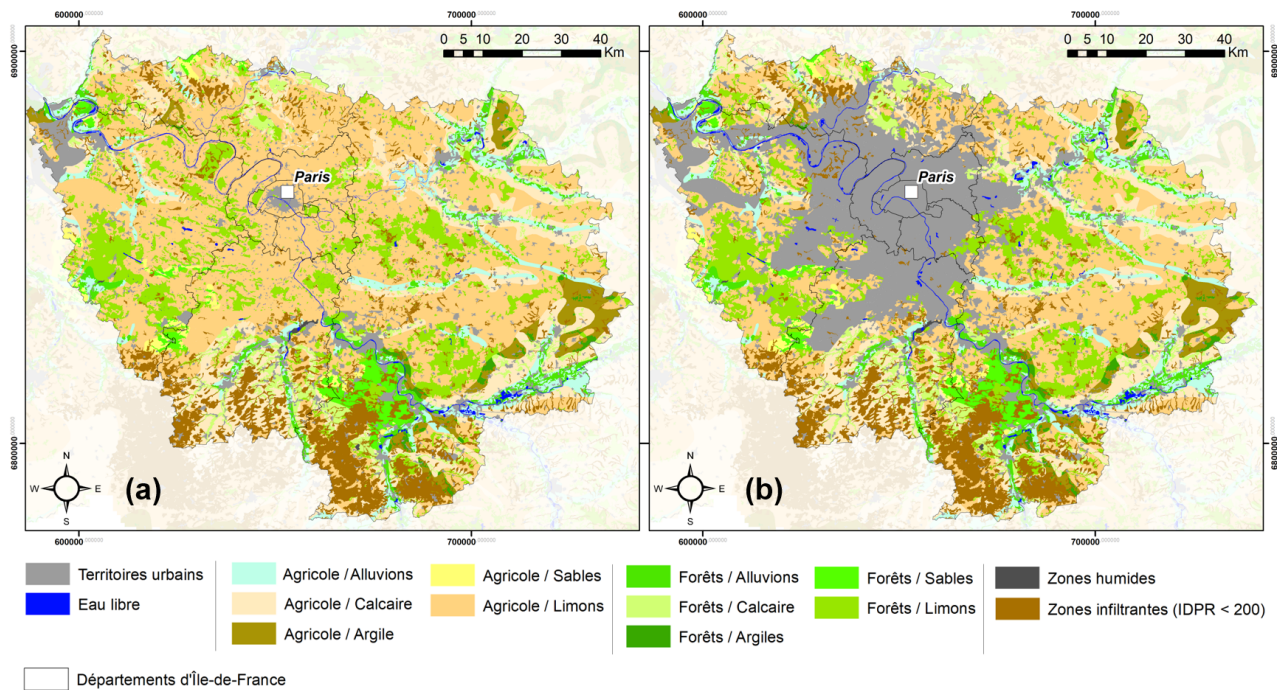


Figure 3. Illustration comparée de l'occupation des sols considérée, à l'échelle de la région Île-de-France. Représentation sous forme de 'fonctions-productions' CaWaQS. Distributions (a) dans le cas de la simulation historique et (b) pour la simulation de référence.

### 1.3 Estimation des évolutions de prélèvements en système aquifère

Les projections issues d'Explore2070 ont également permis de tenir compte, dans les simulations en temps futur, de tendances d'évolutions des prélèvements souterrains. Ces tendances sont exprimées *via* des coefficients de variations, affectés aux prélèvements de référence actuels. Ces coefficients sont différenciés selon le type (alimentation en eau potable (AEP), industrie et irrigation) et la localisation géographique du point de prélèvement (sectorisation par grands sous-bassins versants - cf. Fig. 4). Ces projections, étroitement liées à des hypothèses sur l'évolution des taux et flux de population issues des prévisions INSEE, estiment le nombre d'habitants sur le bassin à l'horizon 2070 à 21 millions.

Concernant l'AEP, les tendances prévoient une augmentation de 40 % du nombre de foyers sur la période 2006-2070, conjointement à une diminution globale de la consommation en eau, différenciée selon le type d'habitat. Une amélioration des systèmes d'adduction d'eau est aussi intégrée. Pour l'industrie, trois aspects principaux sont considérés : le taux de production, les tendances amorcées sur la période passée et le type de circuits de refroidissement. Ces projections anticipent une diminution générale annuelle de 4,0 % des prélèvements, majoritairement compensée par un accroissement de la production industrielle. Elles font également la part belle à la poursuite de la fermeture des circuits de refroidissement, conjointement à des améliorations de leur efficacité. Enfin, pour les besoins en irrigation, les demandes en eau des plantes sont calculées en tenant compte du type de plante, de leurs besoins respectifs<sup>7</sup>, des précipitations ainsi que de la méthode d'irrigation considérée (goutte-à-goutte, irrigation gravitaire, etc.) et de son efficacité. La figure 4 synthétise pour chacun des trois types de prélèvements, les coefficients de modulation des prélèvements actuels (référence : année 2006) pour la construction du jeu de données de prélèvements utilisés dans les simulations en temps futur.

7. Il convient de garder à l'esprit que ces projections n'intègrent pas d'impact du changement climatique sur ces besoins en eau.

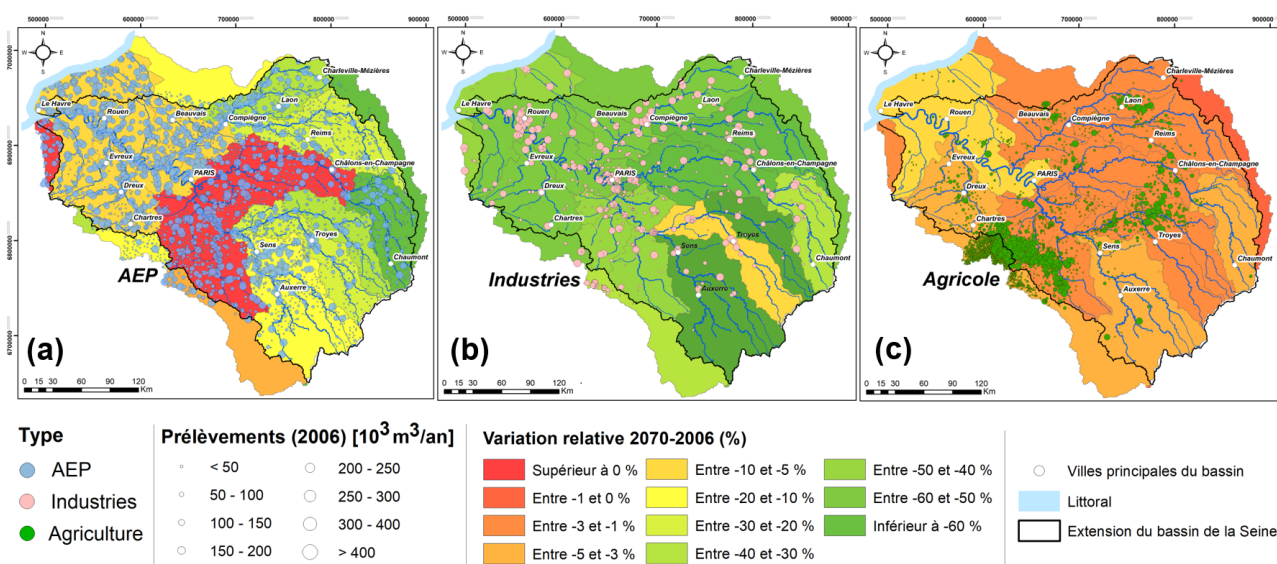


Figure 4. Coefficients de modulation (%) opérés sur les prélèvements souterrains actuels (référence : année 2006), tels que proposés par les projections Explore2070 pour construire les chroniques de prélèvements utilisées dans les simulations en temps futur. Cas des prélèvements de type (a) AEP, (b) Industrie et (c) Agricole. Pour chaque type, les figurés ponctuels précisent la densité et l'intensité des prélèvements de référence (données : Agence de l'Eau Seine-Normandie - AESN).

En parallèle d'une unique simulation historique (*i.e.* évaluation de l'hydrodynamisme du système Seine au début du  $\text{XX}^{\text{ème}}$  siècle), des résultats de simulation en temps futur ('TF') sont, dans la suite du document, évalués à horizons mi-siècle ('MS') et fin de siècle ('FS'). Trois temporalités (cf. Fig. 2) sont étudiées : 'FS' sous forçage RCP4.5 d'une part, 'MS' et 'FS' sous forçage RCP8.5 d'autre part. En synthèse des paragraphes précédents, le tableau 1 rassemble l'ensemble des simulations réalisées par la suite et définit la nomenclature générale ainsi que la palette de couleur utilisées dans le reste du document pour les désigner. Il précise, par ailleurs, les périodes d'analyses retenues pour l'exploitation des produits de simulation. Ces périodes s'étendent sur 17 ans, en cohérence avec des travaux antérieurs ayant démontré la stationnarité<sup>8</sup> de signaux hydrologiques (Massei and Fournier, 2012; Massei et al., 2010; Labarthe, 2016) et hydrogéologiques (Flipo et al., 2012) du bassin sur une telle durée.

Tableau 1. Ensemble des conditions retenues de simulation pour l'analyse de l'évolution long-terme de l'hydrosystème Seine.

Nomenclature : **Hist.** : reconstitution **historique** ; **TP** : référence '**Temps Présent**' ; **TF** : projection '**Temps Futur**' ; **MS** : horizon '**Milieu de Siècle**' ; **FS** : horizon '**Fin de Siècle**'.

| Simulation / Forçage climatique | Période d'analyse | Occupation des sols                      | Prélèvements souterrains  |
|---------------------------------|-------------------|------------------------------------------|---------------------------|
| BONNET-Hist.                    | 1917-1934         | Estimée<br>(données INSEE, IAU, AGRESTE) | Aucun                     |
| BONNET-TP                       | 1993-2010         | Actuelle<br>(données CLC 2012)           | Actuels<br>(données AESN) |
| MIROC5-TF FS RCP4.5             | 2083-2100         | Estimée<br>(données INSEE/Explore2070)   | Projection Explore2070    |
| MIROC5-TF MS RCP8.5             | 2038-2055         |                                          |                           |
| MIROC5-TF FS RCP8.5             | 2083-2100         |                                          |                           |

8. La variabilité des signaux hydrologiques du bassin de la Seine comporte une forte composante sinusoïdale (Flipo et al., 2012), ce qui signifie que la moyenne de ces signaux n'a de sens que pour des périodes temporelles correspondant à un multiple de la période d'oscillation de ce signal, à savoir ici, 17 ans.



## 2 Résultats

### 2.1 Impacts régionalisés sur la piézométrie des formations aquifères affleurantes

La récente révision du paramétrage intégral du bilan hydrique de l'application CaWaQS-Seine (Gallois et al., 2021; Flipo et al., 2022), à l'aide de la méthode HYMIT, a fortement incité, dans le cadre de cette mise à jour, à une nouvelle analyse des principales tendances d'évolution long-terme de ce bilan (profils d'évolutions en ETR, modes de fractionnement de la lame d'eau efficace, etc.). Étant donné le choix ici fait de focaliser les résultats autour du réseau hydrographique, ces nouveaux éléments ne seront pas illustrés. Cependant utiles à la compréhension des paragraphes suivants, listons les principales conclusions à retenir à ce sujet :

1. Un fort stress hydrique en situation RCP4.5-FS, caractérisé par une diminution moyenne annuelle de la recharge aquifère ( $-26\%$ ,  $-34\text{ mm an}^{-1}$ ), conséquence d'un déficit généralisé de précipitations sur l'ensemble du bassin ( $-9\%$ ,  $-69\text{ mm an}^{-1}$ ). Cette diminution est particulièrement sensible ( $-30\%$ ,  $-46\text{ mm an}^{-1}$ ) sur les impluviums de Craie et du Tertiaire (cf. Fig. 7), pouvant localement atteindre jusqu'à  $-60\text{ mm an}^{-1}$  sur les secteurs de Champagne, Brie, Laonnois et de Seine aval. Les régimes saisonniers d'infiltration montrent, cependant, sous ces conditions, un différentiel positif de la recharge sur les mois de septembre à novembre ( $+29\%$ ,  $+7\text{ mm}$  à l'échelle du bassin).
2. Des évolutions très similaires sont constatées pour la situation RCP8.5-MS. Cependant, ce cas se démarque par une augmentation des précipitations hivernales (Ouzeau et al., 2014; Flipo et al., 2020), des mois de septembre à novembre ( $+5\%$ ). Ce phénomène s'accroît en intensité et s'allonge d'octobre à février, en situation RCP8.5-FS ( $+21\%$ ,  $+71\text{ mm}$ ), occasionnant des taux de recharge des formations aquifères comparables, voire localement supérieurs, à la situation en temps présent.
3. Par ailleurs, cette configuration RCP8.5-FS s'accompagne d'une forte augmentation des lames d'eau ruisselées de septembre à février ( $+40\%$ ,  $+18\text{ mm}$  sur l'ensemble du bassin), dont une hausse extrêmement marquée sur la partie amont (Jurassique) sur bassin ( $+35\text{ mm}$  sur la période de décembre à février).

La figure 5 traduit l'impact de ces tendances d'évolution de l'infiltration sur les niveaux piézométriques des formations aquifères affleurantes. Plus précisément, elle présente, pour les quatre configurations de simulation précédemment définies, les écarts moyens<sup>9</sup> exprimés en  $m$  (encarts 5b à 5e), relativement à la piézométrie simulée sous conditions de référence (encart 5a).

L'encart 5b témoigne d'une situation piézométrique historique plus confortable que sous référence, avec des différentiels généralement positifs, compris entre  $+2$  et  $+6\text{ m}$ . Un état similaire à celui simulé sous temps présent est identifié pour certains secteurs (Laonnois, Soissonais, Champagne nord, Beauce intérieure). La situation piézométrique moyenne simulée à fin de siècle, sous projection climatique RCP8.5 (cf. Fig. 5e), est comparable à la référence du fait de recharges hivernales conséquentes, à l'exception de la frange Jurassique où persistent des différentiels négatifs.

En cohérence avec les évolutions des précipitations, les tendances simulées sous forçages RCP4.5-FS et RCP8.5-MS (encarts 5c et 5d respectivement) font état de situations critiques très semblables, marquées par des baisses piézométriques significatives, notamment au centre du bassin, au niveau des formations du Tertiaire et du Crétacé supérieur. Plus concrètement, ces diminutions, comprises entre  $-6$  et  $-10\text{ m}$ , pourraient être dommageables, en particulier, pour les formations de plus faible épaisseur et entraîner leur assèchement local.

9. Il s'agit donc ici, d'écarts calculés entre les cartes piézométriques à l'affleurement, respectivement moyennées sur les périodes d'analyse associées aux simulations en question (cf. Tab. 1).



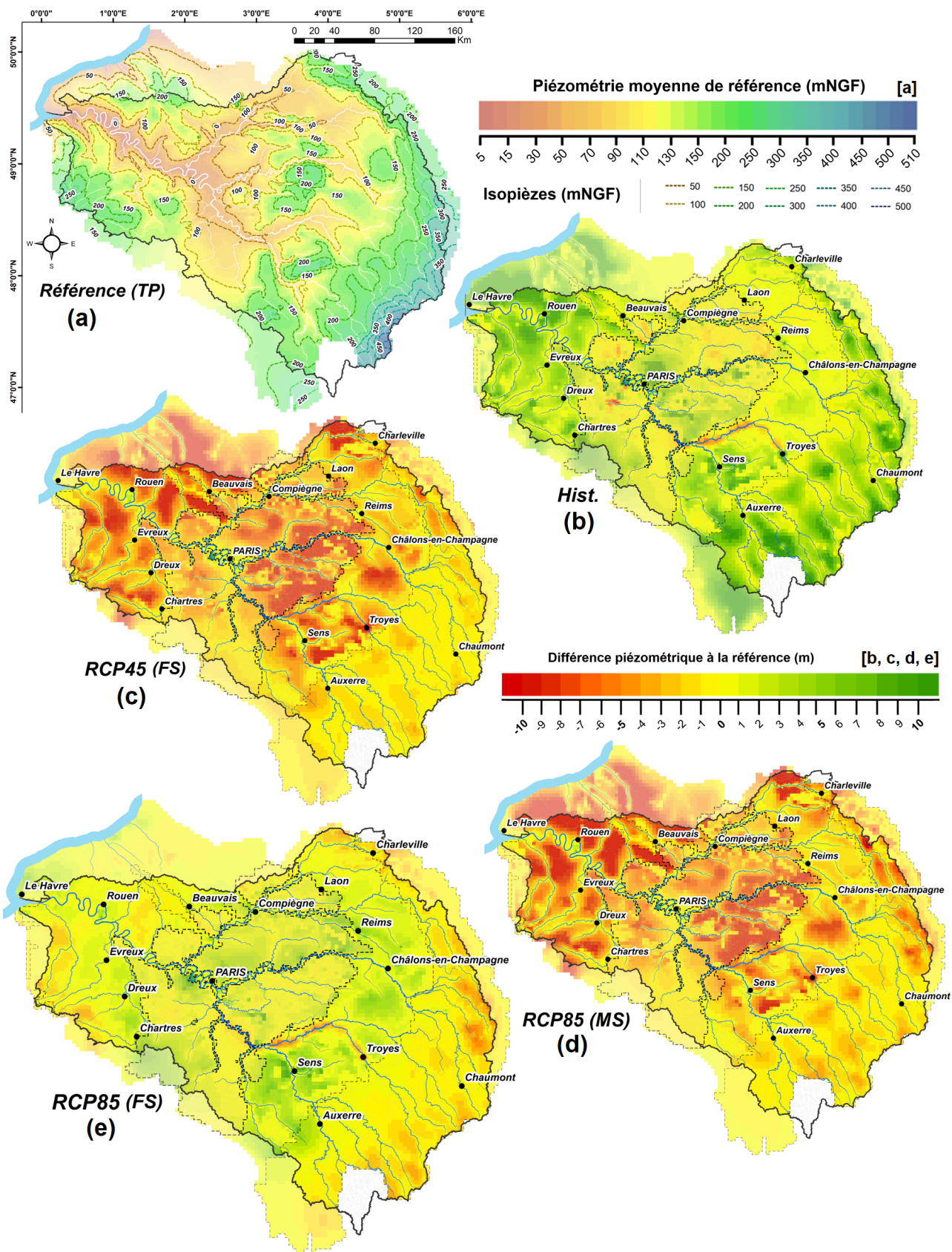


Figure 5. (a) Piézométrie affleurante moyenne simulée (mNGF) associée à la simulation de référence BONNET-TP. (b à e) : Écarts à la référence (a), en m, calculés en considérant la piézométrie moyenne simulée dans les limites de la période d'analyse (cf. Tab. 1) respectivement associée à la simulation (b) historique, (c) RCP4.5 fin de siècle (FS), (d) RCP8.5 milieu de siècle (MS) et (e) RCP8.5 fin de siècle (FS).

Suivant cette trajectoire établie avec le modèle MIROC5, une crise de l'eau pluri-décennale aurait lieu au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle, engendrant des assèchements locaux des formations aquifères (cf. Fig. 6), dont, du plus récent au plus ancien : l'ensemble multicouche complexe des Calcaires de Beauce (Miocène, Oligocène), les Calcaires de Brie et Sables de Fontainebleau (Oligocène), les Calcaires de Champigny (Éocène supérieur), les Calcaires du Lutétien et du Cuisien (Éocène moyen) et les Sables du Thanétien (Paléocène). Ce type d'impact est principalement notable dans le cas de la formation des Calcaires de Brie ainsi qu'au niveau de la frange intérieure des Calcaires de Beauce.

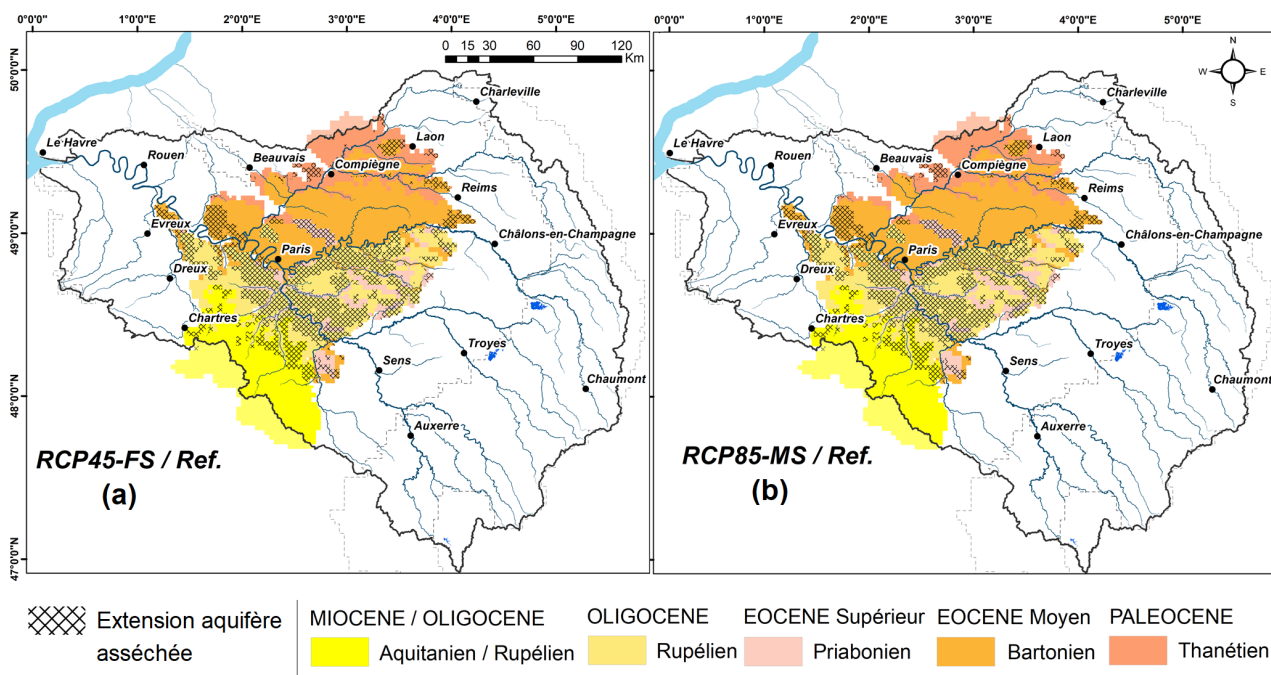


Figure 6. Extensions des formations tertiaires affleurantes asséchées. Simulations associées aux forçages (a) RCP4.5 fin de siècle et (b) RCP8.5 milieu de siècle.

Ces assèchements locaux pourraient, par ailleurs, également entraîner l'apparition d'amonts de rivières non pérennes, voire la disparition de portions de linéaires, conséquence directe d'un soutien très affaibli de ces formations au débit du réseau hydrographique.

## 2.2 Contributions spatialisées du système aquifère au réseau hydrographique

### 2.2.1 Distributions sous climat actuel

Dans le cas de l'hydrosystème Seine, deux origines distinctes caractérisent tout ou partie d'un débit mesuré en rivière. D'une façon dominante à l'échelle du bassin, ce dernier résulte, d'une part, d'un volume d'eau exfiltré depuis les formations aquifères sub-affleurantes vers le réseau et, d'autre part, d'une contribution associée au phénomène de ruissellement en surface ou proche surface (sub-surface) ; type d'apport particulièrement présent en période hivernale. Pour illustration, la figure 7b compare les évolutions des débits mesurés à la station de la Seine à Vernon et les volumes d'eau simulés alimentant le réseau amont de cette station, distingués selon leur origine.

Outre le fait que ces contributions relatives fluctuent au cours de l'année en un point donné, celles-ci sont également distribuées de façon hétérogène le long du réseau. De récents travaux, fondés sur l'analyse de la variabilité spatio-temporelle des signaux de débits du bassin de la Seine ont mis en exergue une forte hétérogénéité dans la manière dont est scindé le signal d'entrée de pluie efficace entre écoulements rapides et

lents <sup>10</sup> entre les parties amont et aval du réseau (Schuite et al., 2019; Flipo et al., 2020). La spatialisation obtenue, qui trouve une bonne cohérence avec de multiples critères (géologie dominante du substratum des versants amonts, géomorphologie, occupation des sols, etc.) ou encore d'indicateurs tiers comme l'IDPR <sup>11</sup> (Mardhel et al., 2021), avait identifié :

- une zone amont dominée par un fractionnement de la lame d'eau efficace vers une dominante ruisselante, associée aux formations du Jurassique et du Crétacé inférieur (plateau Langrois, Barrois, Champagne humide, etc.),
- des secteurs à fractionnement infiltrant très marqué sur l'extension de la craie du Crétacé supérieur et des formations du Tertiaire du centre du bassin (Beauce, Gâtinais, pays de Caux, etc.),
- dans le cas des linéaires les plus longs, en particulier ceux traversant à la fois les terrains jurassiques et crétacés, une croissance progressive à la faveur d'une infiltration (Yonne, Seine et Marne).

L'exploitation des produits de la simulation couplée CaWaQS-Seine récemment recalibrée, forcée sous conditions météorologiques SAFRAN, permet de proposer ici, en figure 7a, la première représentation spatiale continue des taux distribués de contribution du système aquifère (fraction notée  $f_{aq}$ ) à l'alimentation du réseau principal <sup>12</sup>. Cet indicateur, adimensionnel, est borné entre 0 (*i.e.* alimentation exclusive par des écoulements rapides de sub-surface) et 1 (*i.e.* alimentation totale d'origine souterraine). Il résulte d'une synthèse des bilans volumiques journaliers, successivement réalisés en tout point du réseau, sur la période 2003-2020. Pour une meilleure lisibilité, les valeurs précises de cette fraction  $f_{aq}$  sont mentionnées aux avals directs de chaque confluence du réseau simulé.

Cette figure met en exergue :

- une répartition générale des valeurs, effectivement zonée selon les trois principaux impluviums du bassin (ensemble du Jurassique, Craie du Crétacé et formations du Tertiaire). Cet aspect est tout particulièrement visible pour les rivières secondaires, de faibles longueurs de linéaires, contenues dans les limites d'un unique impluvium. Cette observation s'applique à la fois aux rivières amont du bassin (Cure, Serein, Saulx, Ornain, Ource) caractérisées par de faibles contributions souterraines ( $f_{aq} \leq 0,4$ ) mais aussi aux cours d'eau du centre du bassin, connectés aux formations du Tertiaire (Essonne, Yerres, Ourcq, Vesle, Suippe, etc.) dont la contribution au débit est largement dominante ( $0,75 < f_{aq} < 0,97$ ),
- une contribution relative du système aquifère effectivement croissante, le long des rivières et fleuves majeurs du domaine (Seine, Marne, Yonne),
- une contribution du compartiment souterrain de 66 % au débit de la Seine à l'estuaire.

Deux graphiques complémentaires rappellent les dynamiques distinctes dans les débits effectivement mesurés aux stations de l'Essonne à Ballancourt (7c) et de l'Aube à Arcis (7d), venant corroborer ces résultats. L'encart 7c illustre, tout particulièrement, la présence d'une composante basse fréquence clairement perceptible dans les chroniques de débit de l'Essonne, marqueur de la forte inertie propre au compartiment souterrain, contrairement au cas de la station de l'Aube.

Obtenue sous ces mêmes conditions de simulation, la figure 8 propose une première représentation de la variabilité temporelle de ce type d'alimentation. Les débits moyens saisonniers y sont représentés sous forme spécifique (*i.e.* rapportés à la surface du bassin amont correspondant et exprimés en  $L s^{-1} km^{-2}$ ) afin de rendre les valeurs comparables sur l'ensemble du linéaire simulé. Quelques étiquettes viennent à nouveau préciser, en aval des principales confluences le long de la Seine et de ses affluents de premier ordre, la valeur du débit calculé, dans les limites du bassin amont associé.

10. Ces deux types d'écoulements référencent, respectivement le phénomène de ruissellement hypodermique rapide, à destination du réseau hydrographique, d'une part et les flux d'eau infiltrés vers le domaine souterrain avant d'être drainés par le réseau, d'autre part.

11. Indicateur de Développement et de Persistance des Réseaux.

12. L'expression 'alimentation d'origine souterraine' (ou tout équivalent) regroupe ici, à la fois, l'ensemble des volumes d'eau exfiltrés par drainage des formations aquifères par le réseau et les volumes de débordements aquifères à la surface du sol.



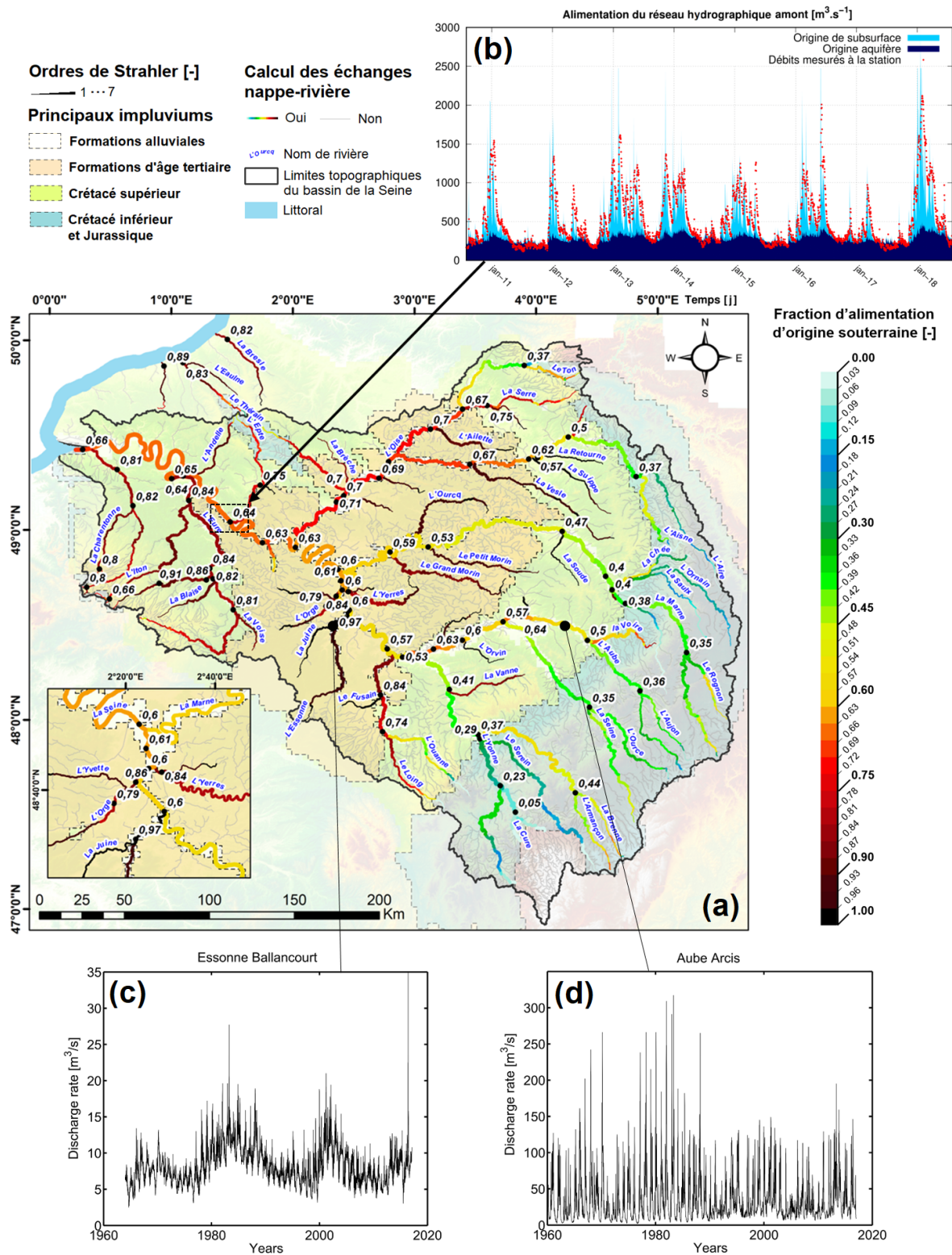


Figure 7. **(a)** Cartographie de la fraction moyenne d'alimentation d'origine souterraine  $f_{aq}$  ( $0 \leq f_{aq} \leq 1$ ) du réseau hydrographique principal, obtenue sous forçage SAFRAN (moyenne 2003-2020), à l'issue de la récente re-calibration de l'application CaWaQS-Seine (Gallois et al., 2021; Flipo et al., 2022). **(b)** Décomposition du débit total simulé d'alimentation du réseau hydrographique ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) dans les limites du bassin amont de la station de la Seine à Vernon. Distinction selon le type d'apport : origine souterraine (domaine bleu foncé) ou de sub-surface (domaine bleu clair). Illustration par superposition aux débits effectivement mesurés à Vernon (figurés ponctuels rouges - source : [HydroPortail](#)), sur la période août 2010 - juillet 2018. **(c)** et **(d)** Chroniques de débits mesurés ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) aux stations de l'Essonne à Ballancourt-sur-Essonne et de l'Aube à Arcis-sur-Aube.



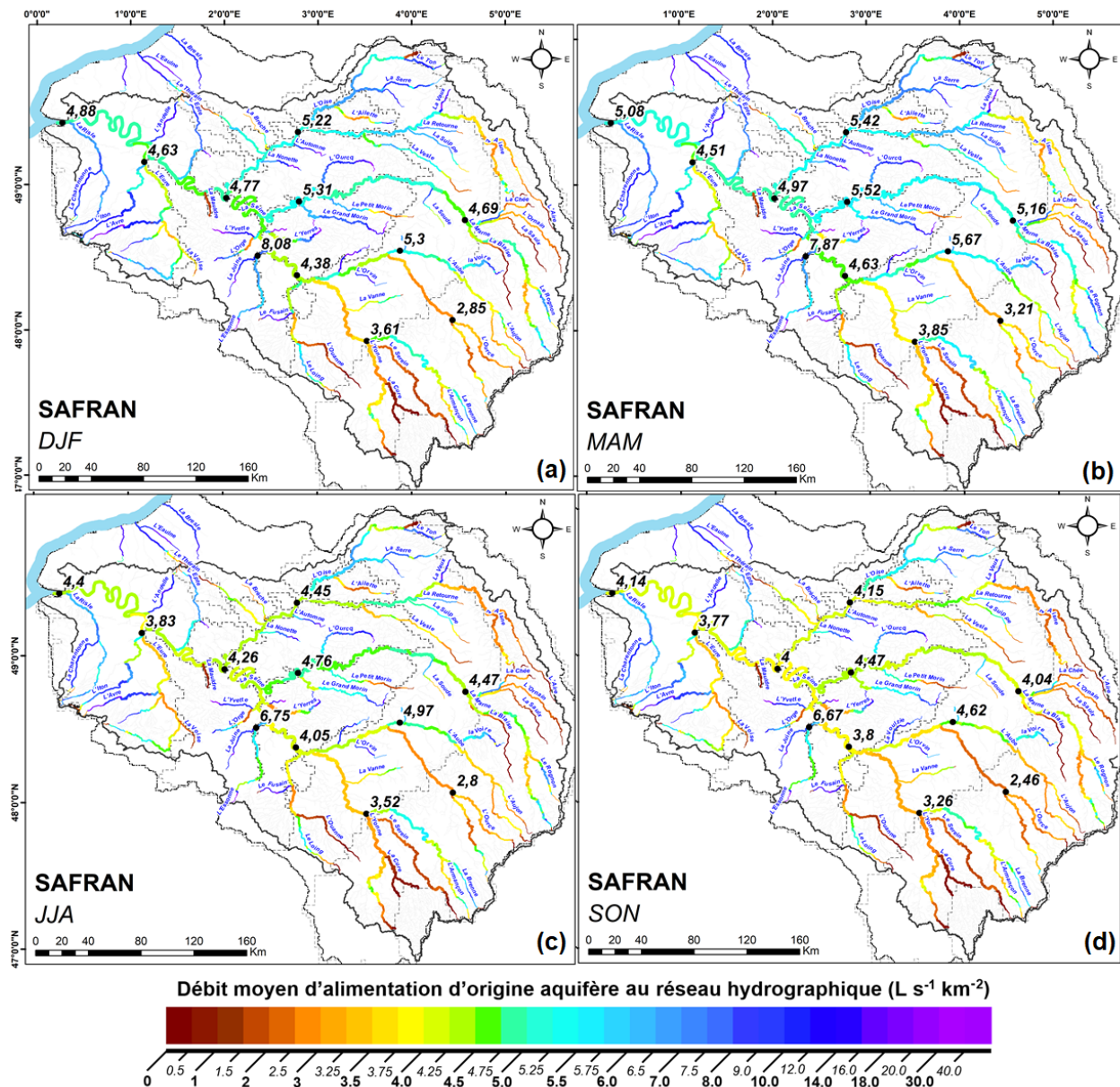


Figure 8. Distributions moyennes (période 2003-2020) des débits d'alimentation d'origine souterraine au réseau hydrographique principal. Valeurs en débits moyens spécifiques, exprimées en  $L s^{-1} km^{-2}$ , simulées par l'application CaWaQS-Seine recalibrée sous forçage météorologique SAFRAN. Cartographies saisonnières : (a) hiver (décembre à février - DJF), (b) printemps (mars à mai - MAM), (c) été (juin à août - JJA) et (d) automne (septembre à novembre - SON).

Si, d'une manière générale, la distribution des zones caractérisées par des faibles (ou forts) débits d'alimentation en provenance du système souterrain ne subit pas de réorganisation significative à l'échelle saisonnière, notons une contribution absolue du compartiment souterrain en augmentation sur la période de décembre à mai (Figs. 8 a et 8 b). Ainsi, les débits hivernaux en rivière cumulent, à la fois, une contribution accrue des deux types d'alimentation (*i.e.* souterrain et de sub-surface). La période associée aux taux d'alimentation les plus faibles se situe, elle, en période automnale (Fig. 8 d). Par ailleurs, outre cette forte variabilité spatiale attendue, de fortes hétérogénéités en intensité sont à souligner, variant de 2 à 4  $L s^{-1} km^{-2}$  sur les cours d'eau amont du bassin jusqu'à environ 15  $L s^{-1} km^{-2}$  pour les rivières en connexion avec les formations du Tertiaire.

## 2.2.2 Perturbations des régimes d'exfiltration du système aquifère sous changement climatique

Cette variabilité temporelle a été précisée à l'échelle mensuelle pour quelques confluences majeures du réseau. La figure 9 propose ainsi, pour chacune des singularités retenues, les régimes mensuels moyens<sup>13</sup> d'alimentation aquifère au réseau hydrographique, sous forçage SAFRAN d'une part, mais aussi, et surtout, sous l'intégralité des forçages associés aux simulations historiques, de référence et projections en temps futur (cf. Tab. 1).

En cohérence avec les résultats d'impacts piézométriques (cf. Fig. 5), se dénotent ici :

- une très forte similarité de comportement entre les projections RCP4.5-FS et RCP8.5-MS, caractérisées par des diminutions sensibles, tout au long de l'année, et ce, de façon généralisée sur l'ensemble du réseau. Des baisses des débits moyens de contribution au réseau généralement comprises en -10 et -15 % à la référence sont identifiées,
- la cohérence de résultats est également ici assurée dans le cas de la simulation historique, qui, à l'inverse, présente des distributions de contributions globalement plus élevées en intensité, sur l'ensemble de l'année,
- le résultat obtenu sous projection RCP8.5-FS se caractérise globalement par des contributions hivernales supérieures à la situation de référence.

Ces variations relatives à la simulation de référence sont rassemblées en tableau 2, sous forme de moyennes annuelles, pour chaque station et chaque simulation. Notons au passage, une cohérence globale effectivement satisfaisante entre les profils calculés, pour la même période, sous forçage de référence (Bonnet, 2018) et sous données SAFRAN.

Tableau 2. Variations relatives du débit moyen de contribution du système aquifère au réseau hydrographique. Calculs réalisés à hauteur de quelques singularités majeures du réseau principal (confluences, exutoire). Variations exprimées en %, relativement aux débits correspondants simulés sous conditions de référence. Valeurs en vert (resp. en rouge) supérieures (resp. inférieures) aux valeurs de référence.

|                     | Aube → Seine | Yonne → Seine | Essonne → Seine | Marne → Seine    | Oise → Seine |
|---------------------|--------------|---------------|-----------------|------------------|--------------|
| <b>Hist.</b>        | +5,9         | +15,9         | +19,4           | +10,6            | +9,0         |
| <b>TF FS RCP4.5</b> | -10,7        | -7,4          | -16,9           | -12,6            | -17,0        |
| <b>TF MS RCP8.5</b> | -7,3         | -3,4          | -10,6           | -11,2            | -14,1        |
| <b>TF FS RCP8.5</b> | +2,9         | +2,5          | +12,6           | +2,0             | +5,1         |
|                     | Aisne → Oise | Aire → Aisne  | Eure → Seine    | Seine (exutoire) |              |
| <b>Hist.</b>        | +8,5         | +27,7         | +20,6           | +14,5            |              |
| <b>TF FS RCP4.5</b> | -14,0        | -14,2         | -16,0           | -12,5            |              |
| <b>TF MS RCP8.5</b> | -12,1        | -19,1         | -11,9           | -9,4             |              |
| <b>TF FS RCP8.5</b> | +7,3         | -6,5          | +3,7            | +5,1             |              |

En complément, la figure 10 propose une représentation spatiale et continue le long du réseau principal de ces écarts à la référence. Elle permet d'apprécier l'impact des différentes configurations simulées (état historique et projections climatiques) sur la contribution du système souterrain au débit des rivières. Cet impact est ainsi exprimé sous forme d'une variation relative (en %) à la référence des volumes exfiltrés du compartiment souterrain en tout point du réseau. Cette évaluation se focalise sur la période hivernale (de décembre à février - ligne du haut, encarts 10a à 10d) et estivale (de juin à août - ligne du bas, encarts 10a' à 10d').

13. Pour une simulation donnée, le profil présenté intègre l'ensemble du linéaire amont, associé au point de calcul considéré.

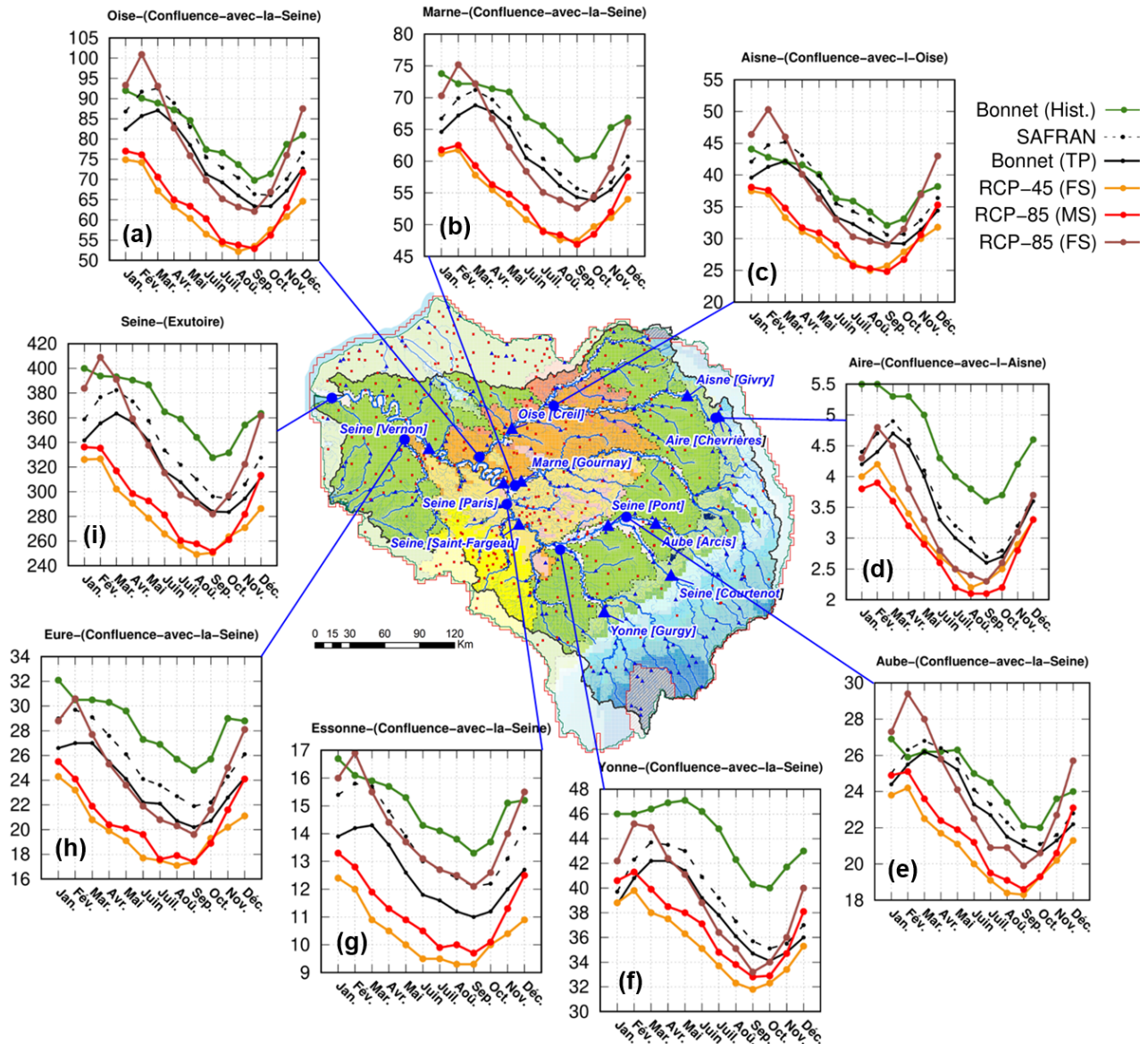


Figure 9. Profils, en  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , des régimes de contribution du système aquifère au réseau hydrographique principal, déterminés en moyenne sur les durées des périodes d'analyse associées à chaque simulation (cf. Tab. 1). En supplément des quatre simulations (i.e. historique et trois projections futures), les courbes noires, en traits pleins et pointillés précisent respectivement les profils obtenus pour la simulation de référence retenue (BONNET-TP) et pour une simulation sous forçage SAFRAN.

À l'exception de l'encart (i) (Seine à son exutoire), chaque graphique un point de confluence majeure du réseau : (a) Oise → Seine, (b) Marne → Seine, (c) Aisne → Oise, (d) Aire → Aisne, (e) Aube → Seine, (f) Yonne → Seine, (g) Essonne → Seine et (h) Eure → Seine.



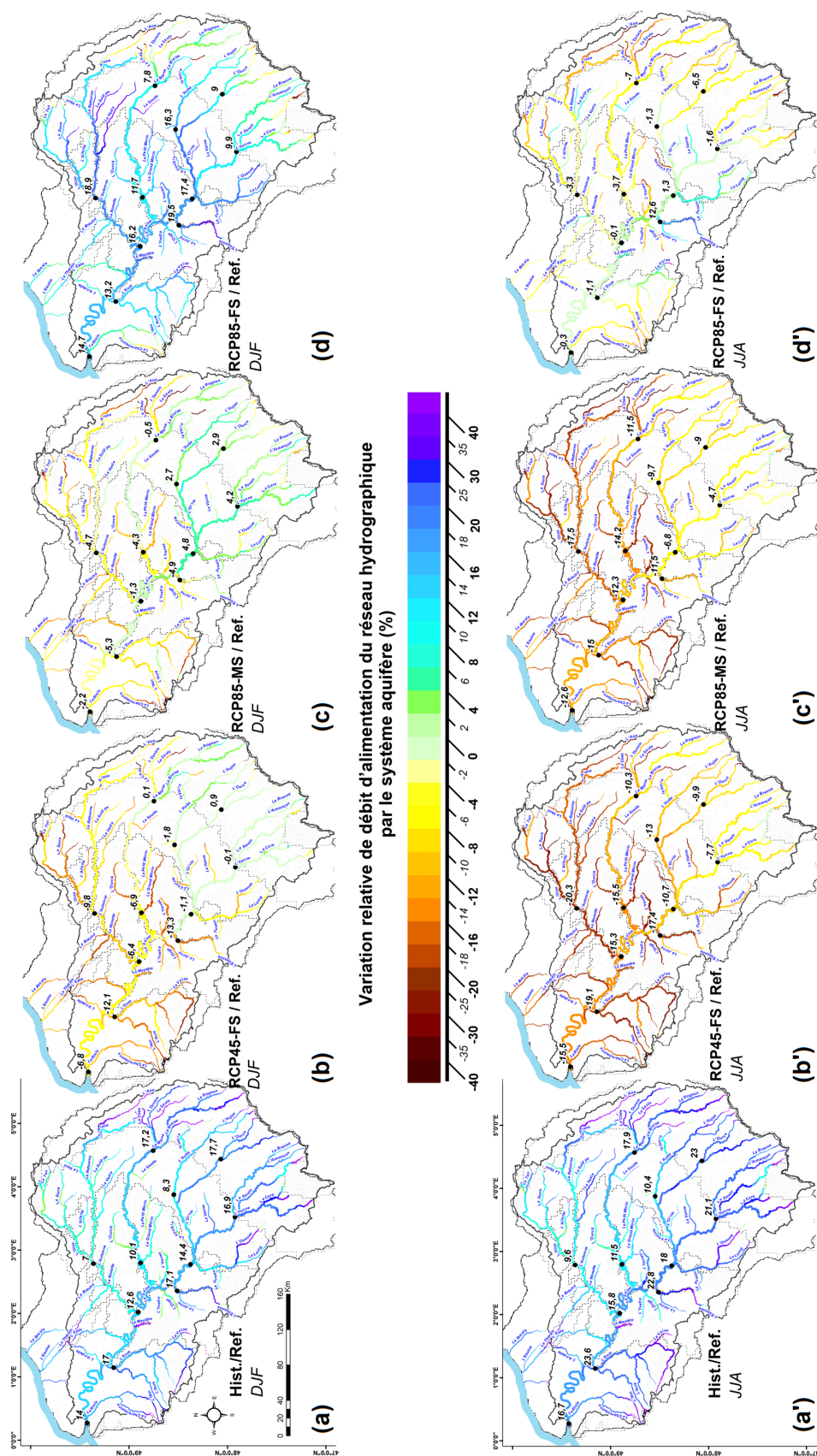


Figure 10. Variations relatives saisonnières, exprimées en %, du débit d'alimentation du réseau hydrographique par le système aquifère. Moyennes sur la période hivernale (mois de décembre à février - ligne du haut) et estivale (mois de juin à août - ligne du bas). Variations exprimées relativement à la situation obtenue sous simulation de référence.



Dans la lignée des résultats précédents, les trois principaux constats suivants sont à formuler :

- en contexte historique, été comme hiver, une contribution du souterrain au réseau hydrographique plus forte par rapport à la simulation de référence est identifiée. Si celle-ci s'échelonne généralement à l'échelle du réseau entier entre +15 et +20 %, notons la présence des variations les plus élevées sur la quasi-totalité des amonts du réseau, jusqu'à des valeurs de +30 %. Cette observation traduit un stress croissant déjà présent sur ces linéaires fragiles du réseau,
- une comparaison des situations hivernales historiques et RCP8.5-fin de siècle reste en accord avec les résultats précédents. En effet, la tendance générale de contribution identifiée repart à la hausse en temps futur, à des intensités équivalentes à celles simulées sous cas historique. Cependant, elle ne concerne principalement que la partie aval du réseau et exclut les amonts du Jurassique, sur lesquels une pression quantitative persiste,
- un futur soutien d'étiage fortement dégradé est anticipé sur l'ensemble du réseau, de juillet à août, qu'il s'agisse du scénario RCP4.5-fin de siècle (cf. Fig. 10b') ou RCP8.5-mi-siècle (cf. Fig. 10c'). À la lumière des nouveaux éléments de connaissance apportés quant à la spatialisation des contributions du souterrain au réseau (cf. Fig. 7), cette dégradation s'exprime assez logiquement par des valeurs négatives les plus élevées au niveau des cours d'eau secondaires de Craie et du Tertiaire (variations comprises entre -15 et -20 %).

Ces constats, dont les diminutions sensibles des débits de contribution estivale, en particulier, ont incité à une caractérisation concrète de l'évolution des périodes d'étiage.

### 2.3 Évolution long-terme des durées d'étiage

Le traitement des débits journaliers simulés sous conditions de référence a permis de construire, pour chaque station hydrométrique mobilisée dans la récente recalibration de l'application CaWaQS-Seine (Flipo et al., 2020; Gallois et al., 2021), la courbe de distribution annuelle moyenne de débits classés. Certaines valeurs clés issues de ce type de distributions permettent classiquement d'aborder la caractérisation des périodes d'étiages, et ce, de manière simple, sans recours à un traitement statistique élaboré.

Le Débit Caractéristique d'Étiage (ou DCE) a été retenu dans le cadre de cet exercice, comme seuil descripteur des périodes d'étiage. De façon simple, le DCE<sub>x</sub> correspond au débit égalé ou dépassé *x* % du temps dans une année. Ainsi, le DCE<sub>80</sub> ici choisi, représente en un point donné du réseau, un seuil de débit dépassé environ 290 jours sur 365. Cette valeur seuil a ainsi été déterminée pour chaque station sous conditions de référence. Pour chaque année de la période d'analyse de référence (*i.e.* 1993-2010 - cf. Tab. 1), la durée maximum, définie par le plus grand nombre de jours consécutifs avec un débit strictement inférieur au DCE<sub>80</sub> a été identifiée. Pour chaque station, la moyenne inter-annuelle est reportée sur la figure 11a, qui présente les durées moyennes des étiages simulés, sous référence. Dans un second temps, cette identification des plus longues périodes d'étiages a été réitérée sur la base des débits simulés sous simulations en temps passé et futurs. Les figures 11b à 11e illustrent ainsi les variations moyennes de durées, en jours, de la période d'étiage pour chaque station, relativement à la situation de référence.

Une sélection des 40 stations de mesure aux dynamiques de débits très bien reproduites par le modèle sous forçage SAFRAN (*i.e.* critère de Nash > 0,7) (Nash and Sutcliffe, 1970), permettent d'identifier :

- une durée moyenne d'étiage de 54 jours pour l'état de référence (méd. = 55,  $Q_1 = 37$ ,  $Q_3 = 65$ )<sup>14</sup>. Un allongement progressif de ces étiages est identifiable pour les plus longs linéaires, d'amont en aval, marqué par les changements d'impluvium (cf. Fig. 7). À titre d'exemple, les durées s'échelonnent entre 37 et 73 jours, de Mussey à Créteil, pour la Marne et entre 64 et 74 jours, de Saint-Fargeau-Ponthierry à Vernon, pour la Seine,

14.  $Q_1$  et  $Q_3$  désignent respectivement les premier et troisième quartiles. Méd. = médiane.

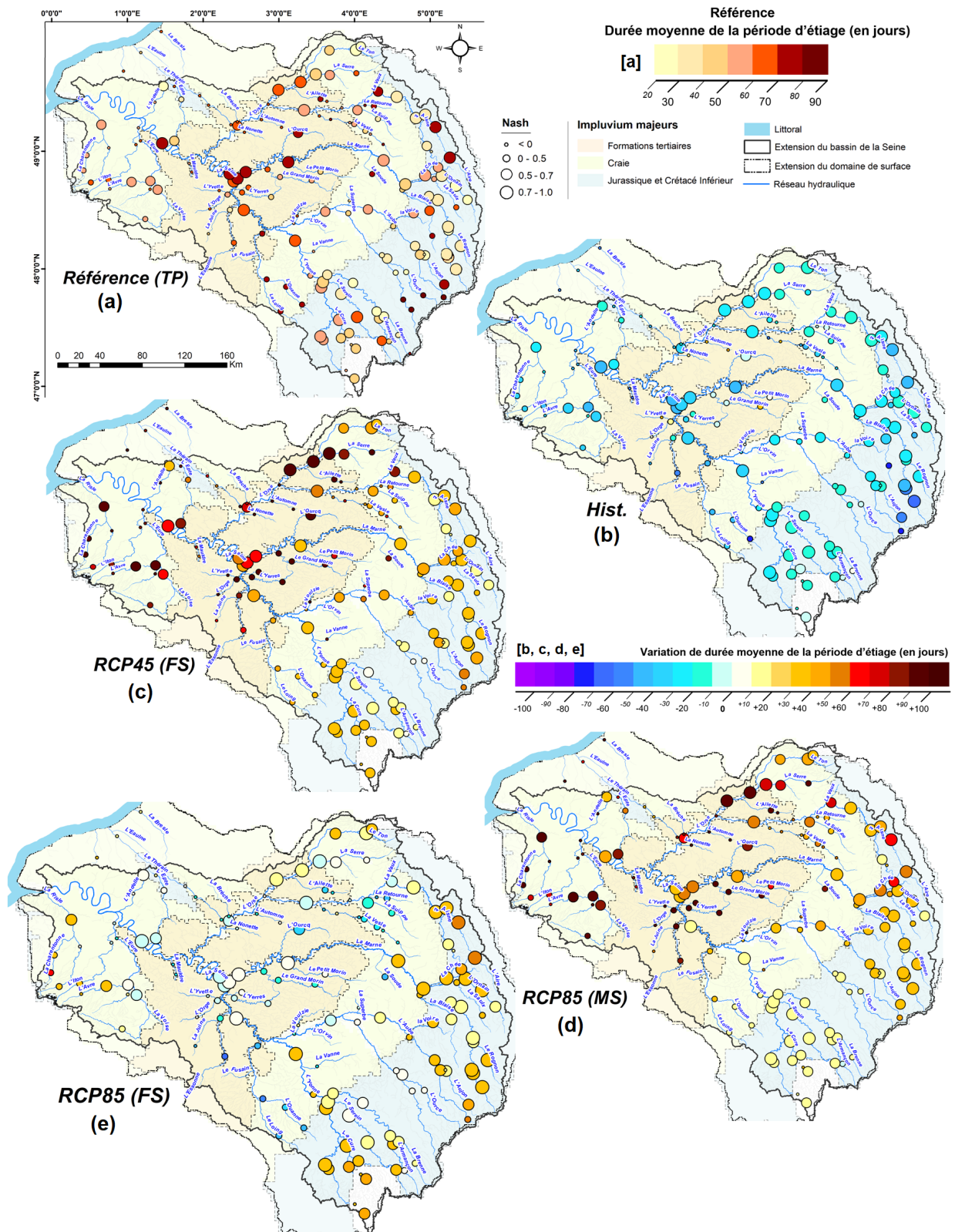


Figure 11. (a) Durées moyennes d'étiage simulées, exprimées en jours, sous simulation de référence BONNET-Hist. (b à e) Variations moyennes de durées (jours) de la période d'étiage pour une simulation donnée relativement à la référence (a) (valeur > 0 : allongement, valeur ≤ 0 : raccourcissement). Cas des simulations (b) historique, (c) RCP4.5 fin de siècle, (d) RCP8.5 milieu de siècle et (e) RCP8.5 fin de siècle. Sur chaque figure, la taille du figuré ponctuel correspond à la valeur du critère statistique de Nash (Nash and Sutcliffe, 1970), obtenue à l'issue de la plus récente recalibration de l'application, sous forçage SAFRAN.

- la configuration historique ne présente exclusivement que des étiages plus courts, de durée moitié moindre en moyenne (moy. = 25 jours, méd. = 26,  $Q_1 = 14$ ,  $Q_3 = 31$ ),
- comme attendu, l'analyse comparée des simulations RCP4.5-FS et RCP8.5-MS identifie des comportements très proches et des durées exclusivement plus longues que sous référence, allongées d'environ 40 jours (96 et 91 jours en moyenne respectivement),
- la projection RCP8.5-FS présente un zonage mixte, à étiages plus longs dans les secteurs amont des formations jurassiques du réseau d'une part, et plus courts, pour les deux impluviums intérieurs, d'autre part. Cette distribution est, à la fois, cohérente avec (i) l'état piézométrique présenté en figure 5e, (ii) la distribution de l'infiltration moyenne pour ce scénario (non présentée ici), plus élevée que sous référence et (iii) les tendances spatialisées de variations de contributions estivales du compartiment souterrain au réseau (cf. Fig. 10d'), négatives sur la frange orientale et positives au centre du bassin. Pour ce scénario, l'étiage s'allonge en moyenne de 19 jours par rapport à la référence, pour atteindre une durée moyenne de 73 jours.

## 2.4 Modifications des régimes hydrologiques

Une comparaison des régimes de débits au niveau d'un ensemble de stations du bassin a été menée pour identifier d'éventuelles perturbations de comportements hydrologiques. Cette analyse est ici présentée pour 10 stations, sélectionnées selon trois critères : (i) une très bonne restitution des débits observés par l'application calibrée sous forçage SAFRAN<sup>15</sup>, (ii) une couverture homogène du réseau permettant (iii) une évaluation de ces régimes à l'aval des cours d'eau principaux. Ainsi, les distributions temporelles des débits (cf. Fig. 12) et l'évaluation d'*extrema* en période d'étiage complètent ici les résultats du paragraphe précédent. Pour évaluer ces derniers, deux types de débits caractéristiques usuels ont été retenus :

- le QMNA5, débit (Q) mensuel (M) minimal (N) de chaque année civile (A), associé à une période de retour quinquennale. Il permet d'apprécier statistiquement le plus petit écoulement d'un cours d'eau sur une période donnée et traduit ainsi la sévérité de l'étiage. À ce titre, le tableau 3 synthétise les variations relatives (%) des QMNA5 simulés, entre un scénario donné (historique et configurations futures) et la référence BONNET-TP,
- le VCN30 (non illustré ici), valeur minimale de la moyenne glissante sur 30 jours consécutifs au cours d'une année calendaire.

Les évolutions comparées des régimes présentés en figure 12, apparaissent pleinement cohérentes avec les tendances précédemment évoquées des précipitations (cf. §. 2.1), des relations nappe-rivière (cf. §. 2.2) et des étiages (cf. §. 2.3). Il est à retenir :

- une diminution significative généralisée des débits d'étiage sur l'ensemble du bassin sous scénarios RCP4.5-FS et RCP8.5-MS, particulièrement marquée sur l'amont du réseau (Aire, Aisne, Oise). Cette tendance semble être dans la continuité de celle amorcée depuis le début des années 1900, comme le soulignent les variations positives des QMNA5 historiques (cf. Tab. 3),
- une certaine stabilité des débits futurs d'étiage sous forçage RCP8.5-FS, forçage se démarquant très clairement par des débits hivernaux très supérieurs à la référence temps présent, laissant présager d'un risque potentiel accru d'inondations.

Une étude complémentaire menée sur ces débits caractéristiques, dont le VCN30, a identifié une réduction significative de leurs variabilités temporelles sous temps futur (RCP4.5-FS et RCP8.5-MS), traduisant une fréquence accrue à l'avenir de situations estivales marquées par un déficit en eau.

15. Ces performances sont ici rappelées *via* les valeurs des critères statistiques usuels de Nash (Nash and Sutcliffe, 1970) et KGE (Kling-Gupta Efficiency) (Kling et al., 2012). Pour rappel, pour ces deux critères, une valeur supérieure à 0,7 (optimum de 1,0) traduit d'une très bonne restitution des dynamiques mesurées.



Tableau 3. Variations relatives de débit caractéristique *QMNA5* (%), exprimées relativement aux résultats obtenus sous simulation de référence *BONNET-TP*. La colonne (*Nash-KGE*) rappelle les valeurs de critères de performances de restitution des débits mesurés à ces stations, après calibration sous forçage météorologique *SAFRAN*. Localisations des stations illustrées en figure 12.

| Station                        | (Nash-KGE) [-] | Hist.     | TF FS<br>RCP4.5 | TF MS<br>RCP8.5 | TF FS<br>RCP8.5 |
|--------------------------------|----------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Période                        | 1993-2010      | 1900-1933 | 2067-2100       | 2038-2055       | 2067-2100       |
| Aire [ <i>Chevrières</i> ]     | (0,84 - 0,72)  | +25,0     | -12,5           | -18,8           | -12,5           |
| Aisne [ <i>Givry</i> ]         | (0,81 - 0,71)  | +5,4      | -10,7           | -17,9           | -7,1            |
| Aube [ <i>Arcis</i> ]          | (0,71 - 0,77)  | +6,1      | -9,6            | -11,4           | +0,9            |
| Oise [ <i>Creil</i> ]          | (0,65 - 0,69)  | +8,9      | -8,1            | -13,9           | +5,6            |
| Yonne [ <i>Gurgy</i> ]         | (0,83 - 0,90)  | +22,3     | -3,9            | -1,0            | ≈ 0             |
| Marne [ <i>Gournay</i> ]       | (0,79 - 0,81)  | +8,5      | -8,3            | -11,8           | +5,3            |
| Seine [ <i>Courtenot</i> ]     | (0,25 - 0,61)  | +13,3     | ≈ 0             | -6,7            | ≈ 0             |
| Seine [ <i>Pont</i> ]          | (0,51 - 0,61)  | +7,8      | -9,2            | -11,5           | +4,6            |
| Seine [ <i>St-Fargeau</i> ]    | (0,73 - 0,75)  | +18,2     | -4,8            | -4,0            | +10,6           |
| Seine [ <i>Paris-Auster.</i> ] | (0,84 - 0,83)  | +13,9     | -7,8            | -10,0           | +7,8            |
| Seine [ <i>Vernon</i> ]        | (0,77 - 0,73)  | +10,9     | -8,3            | -10,2           | +5,4            |

Équivalent spatial de l'illustration 12, la planche 13 propose une évaluation continue des variations (%) de débits estivaux en rivière. Celles-ci sont exprimées, en moyenne, de mars à mai d'une part (ligne du haut, encarts 13 a à 13 d) et de juin à juillet d'autre part (ligne du bas, encarts 13 a' à 13 d'), et ce, relativement aux débits équivalents simulés sous référence. Cette figure précise et complète les observations précédentes, en mettant plus clairement en exergue :

- le plus fort impact, réparti de façon homogène sur l'ensemble de la frange amont, quant à la diminution des débits d'étiages estivaux historiques vers l'actuel (cf. Fig. 13 a' - de juin à août), d'un ordre de grandeur compris en 30 et 50 %,
- outre les réponses similaires, à nouveau mises en évidence, sous configurations RCP4.5-FS et RCP8.5-MS (cf. Figs. 13 b, c), l'impact simulé sous RCP4.5-FS semble persister plus longtemps au cours de l'année, sur l'ensemble du réseau (cf. Figs. 13 b, b') que sous forçage RCP8.5-MS,
- en cohérence avec la figure 11 e, une pression sur l'amont sous scénario RCP8.5-FS, accompagnée de diminutions comprises entre -10 et -20 % persistantes en amont du réseau hydrographique (Fig. 13 d), et ce, malgré un retour à des niveaux comparables à ceux simulés sous temps présent.

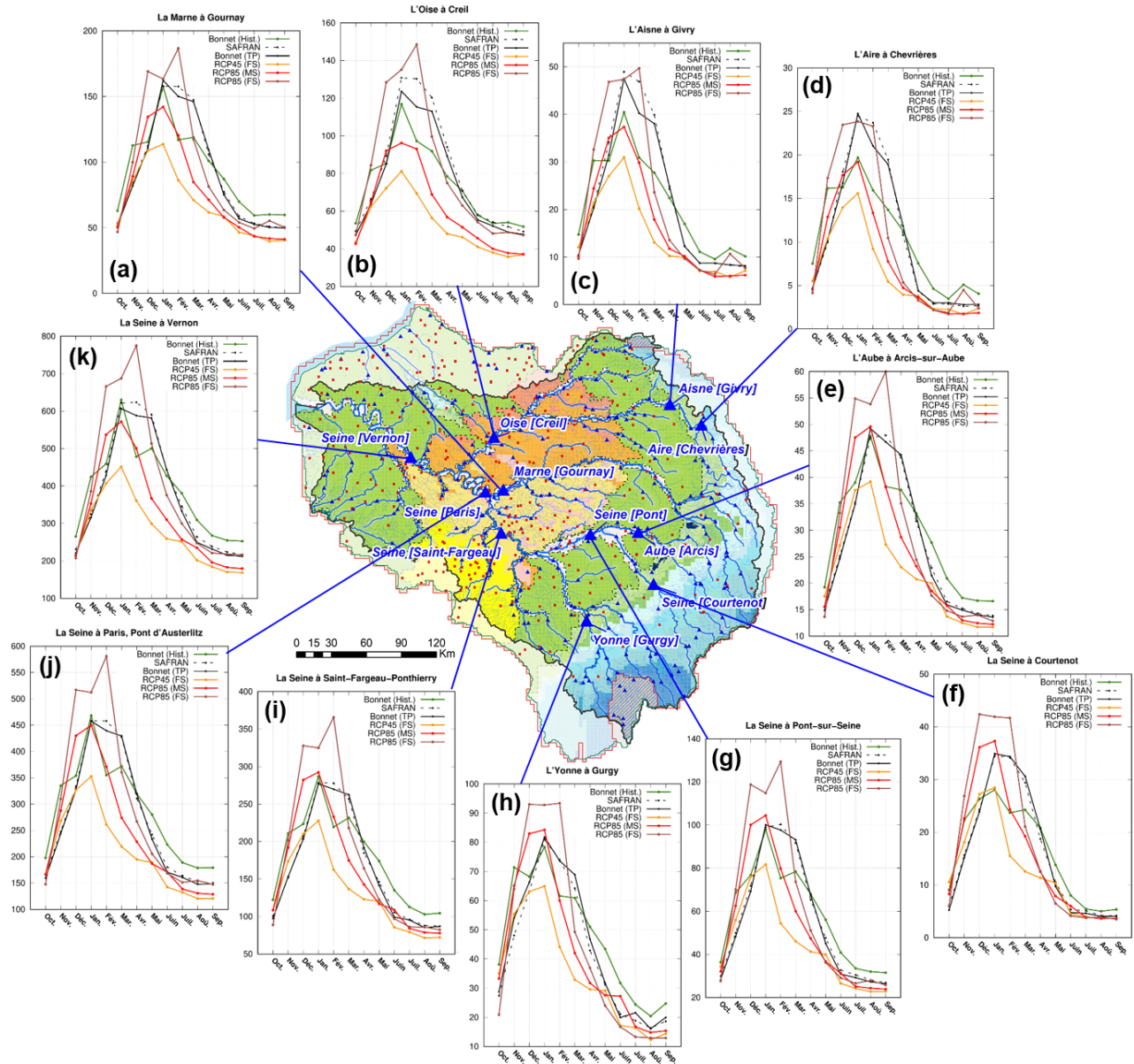


Figure 12. Régimes hydrauliques moyens (débits en rivière, exprimés en  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ), déterminés pour chacune des quatre simulations (i.e. historique et trois projections futures). De même qu'en figure 9, les profils noirs, en traits pleins et pointillés, précisent respectivement les évolutions obtenues pour la simulation de référence retenue (BONNET-TP) et pour une simulation sous forçage SAFRAN. Les dix stations illustrées correspondent à celles listées en tableau 3. L'illustration centrale rappelle succinctement, au passage, la structure générale de l'application CaWaQS utilisée (Gallois et al., 2021).

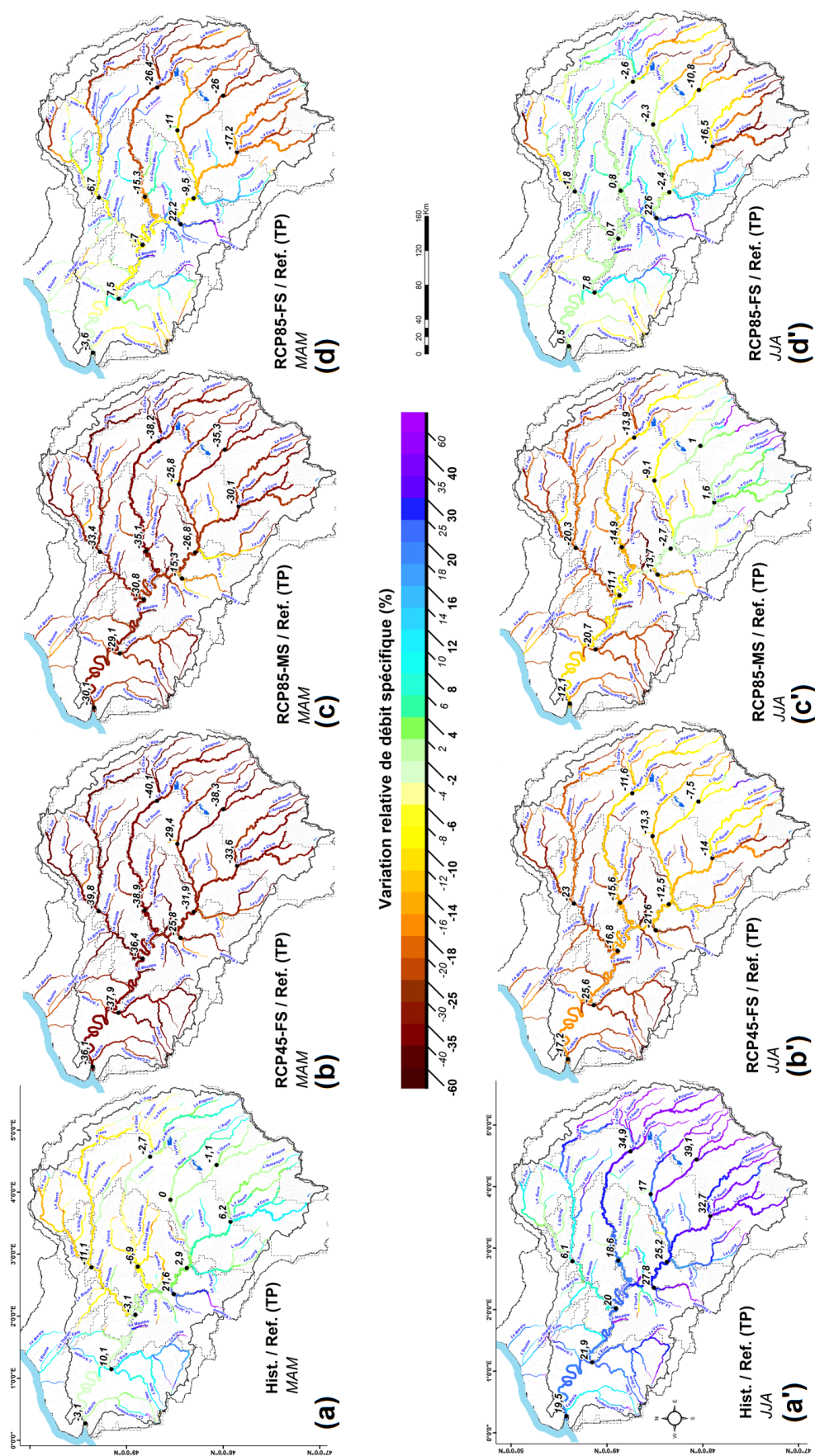


Figure 13. Variations relatives (%) du débit spécifique en rivière. Moyennes saisonnières : de mars à mai (MAM) (a, b, c et d) et de juin à août (JJA) (a', b', c' et d'). Variations exprimées par rapport à la simulation de référence.



## Conclusion

Sur une couverture temporelle de presque deux siècles, l'application du modèle couplé et re-calibré Ca-WaQS sur l'ensemble du bassin a permis d'identifier plusieurs marqueurs concordants d'impact de l'évolution climatique passée et à venir. Ces travaux seront prochainement complétés et renforcés par une analyse détaillée d'un panel plus large de nouvelles projections climatiques CMIP6. Dans l'attente, un premier rejeu du modèle, contraint en temps futur par plusieurs produits climatiques issus du projet CMIP5, sélectionnés sur leur capacité à reproduire les tendances pluri-annuelles (Flipo et al., 2020), formalise et confirme ici la poursuite d'une tendance générale amorcée depuis le début du XX<sup>ième</sup> siècle, caractérisée par une pression croissante sur la ressource en eau souterraine, soit :

- en moyenne annuelle, des déficits accrus en précipitations et en recharge aquifère (cf. §. 2.1),
- une baisse généralisée des niveaux piézométriques (Fig. 5b),
- des diminutions des volumes d'eau d'origine souterraine contribuant à l'alimentation du réseau hydrographique (Figs. 9, 10), se traduisant par un allongement d'un mois environ (de 25 à 54 jours en moyenne) des durées d'étiage (Fig. 11b), avec un impact très marqué sur les amonts fragiles du réseau (Fig. 13a').

Chacun de ces marqueurs, évalués à fin de siècle (horizon 2100) sous projection RCP4.5, se retrouve de nouveau identifié, en intensité quasi équivalente, d'ores et déjà à mi-siècle (horizon 2050) sous projection RCP8.5. L'intensification de ces impacts à l'avenir se traduit, concrètement, à ces deux échéances, par :

- un stress hydrique persistant, en moyenne 10 mois de l'année (cf. §. 2.1, Fig. 12),
- des baisses piézométriques critiques (cf. Figs. 5c, 5d), potentiellement causes :
  - d'assèchements locaux, en particulier pour les formations aquifères de plus faible épaisseur (cf. Fig. 6),
  - de modifications plus ou moins réversibles du fonctionnement des rivières secondaires du réseau (linéaires non pérennes, assèchements), conséquence d'une dégradation (cf. Figs. 9, 10) du soutien de ces formations au chevelu hydrographique (cf. Fig. 7),
  - d'un allongement, en conséquence, d'un mois supplémentaire en situation d'étiage, soit 90 jours au total environ, ces durées pouvant être significativement plus allongées, en aval de réseau (+60 à +70 jours) (cf. Fig. 11c, 11d). Outre cet allongement, plusieurs indicateurs semblent également indiquer un accroissement de la sévérité (cf. Tab. 3) et de la fréquence de ces étiages.

Si, sous scénario RCP4.5, l'évolution de l'hydrosystème Seine semble s'inscrire dans une dynamique de *continuum*, caractérisée par une pression toujours plus marquée, pour atteindre un état de stress hydrique généralisé à fin de siècle, la nature des impacts associés à la projection RCP8.5 rompent cette dynamique dans la seconde moitié du XXI<sup>ième</sup> siècle.

Une augmentation des précipitations hivernales, phénomène déjà sensible à mi-siècle (cf. §. 2.1), s'intensifie de septembre à février, et ce, particulièrement en amont de bassin, entraînant un accroissement des lames d'eau ruisselées, source accrue d'inondations potentielles. Malgré des recharges hivernales satisfaisantes des formations aquifères (cf. Fig. 5e), permettant le retour d'un soutien d'étiage (cf. Tab. 3, Fig. 10d), plus marqué sur la partie aval du réseau (Fig. 11e), des modifications sensibles du régime hydrologique général du réseau sont identifiées, dont un accroissement des débits de hautes eaux (cf. Fig. 12). Ainsi, cette trajectoire, plus instable, présente plusieurs états successifs qui nécessiteront des stratégies d'adaptations différentes.

Quelle que soit la trajectoire considérée, les marqueurs identifiés convergent vers une crise de l'eau qui semble inévitable, révélant dans tous les cas, d'un besoin crucial d'élaborer les stratégies d'adaptation de la gestion de la ressource en eau du bassin. Une dérive du réchauffement planétaire, comme proposée par le scénario émetteur RCP8.5 (i.e. +4°C à l'horizon 2100), semble accélérer drastiquement (d'ici 2050) les échéances pour atteindre un état critique comparable à celui identifiable sous scénario RCP4.5 à fin de siècle (i.e. réchauffement de +2°C). Cette situation serait ainsi déjà perceptible pour la génération actuelle, illustrant, à nouveau que '*chaque demi-degré compte*' (Jouzel, IPCC (2021)), afin de renforcer notre résilience dans l'adaptation à un panel de situations extrêmes très contrastées.

## Bibliographie

- AGRESTE (2009). [La statistique agricole annuelle : Présentation générale](#). Notice d'information, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.
- Ashraf-Vaghefi, S., M. Iravani, D. Sauchyn, Y. Andreichuk, G. Goss, and M. Faramarzi (2019). [Regionalization and parameterization of a hydrologic model significantly affect the cascade of uncertainty in climate-impact projections](#). *Climate Dynamics* 53, 2861–2886.
- Boé, J. and A. Mass (2021). [Méthode de désagrégation hybride statistico-dynamique pour les scénarios climatiques sur le bassin de la Seine](#). Rapport technique PIREN-Seine, PIREN-Seine.
- Bonnet, R. (2018). [Variations du cycle hydrologique continental en France des années 1850 à aujourd'hui](#). Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III. Hydrologie.
- Bonnet, R., J. Boé, G. Dayon, and E. Martin (2017). [Twentieth-Century Hydrometeorological Reconstructions to Study the Multidecadal Variations of the Water Cycle Over France](#). *Water Resources Research* 53(10), 8366–8382.
- Boé, J., L. Terray, F. Habets, and E. Martin (2007). [Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies](#). *International Journal of Climatology* 27, 1643–1655.
- Compo, G., J.-S. Whitaker, P. D. Sardeshmukh, and al. (2011). [The Twentieth Century Reanalysis Project](#). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137(654), 1–28.
- Couturier, C., M. Charru, S. Doublet, and P. Pointereau (2017). [Le scénario Afterres 2050](#). Rapport technique d'étude, Solagro.
- Dayon, G. (2015). [Évolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies](#). Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III. Hydrologie.
- Dayon, G., J. Boé, E. Martin, and J. Gailhard (2018). [Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties](#). *Comptes Rendus - Geoscience* 350(4), 141–153.
- Explore2070 (2012). [Explore2070 - Prospective socio-économique et démographique : Pressions anthropiques](#). Rapport technique d'étude, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Énergie.
- Flipo, N., N. Gallois, B. Labarthe, F. Baratelli, P. Viennot, J. Schuite, A. Rivière, R. Bonnet, and J. Boé (2020). [The Seine River Basin](#), Chapter [Pluri-annual water budget on the Seine basin: past, current and future trends](#), pp. 59–89. Handbook of Environmental Chemistry. Cham, Switzerland : Springer.
- Flipo, N., N. Gallois, and J. Schuite (2020). [Recalibration du bilan hydrologique de surface du bassin de la Seine à l'aide de la méthode HYMIT](#). Rapport technique PIREN-Seine, PIREN-Seine.
- Flipo, N., N. Gallois, and J. Schuite (2022). [Regional coupled surface-subsurface hydrological model fitting based on a spatially distributed minimalist reduction of frequency-domain discharge data](#). *Geoscientific Model Development Discussions* 2022, 1–40.
- Flipo, N., C. Monteil, M. Poulin, C. de Fouquet, and M. Krimissa (2012). [Hybrid fitting of a hydrosystem model: long term insight into the Beauce aquifer functioning \(France\)](#). *Water Resources Research* 48, W05509.
- Gallois, N., N. Flipo, and J. Schuite (2021). [Actualisation de l'application CaWaQS-Seine : Extension du système aquifère à la frange orientale du bassin et calibration de son comportement hydrodynamique](#). Rapport technique PIREN-Seine - Centre de Géosciences, Mines Paris/ARMINES, PSL Université, PIREN-Seine.

- Hattermann, F., T. Vetter, L. Breuer, and al. (2018). [Sources of uncertainty in hydrological climate impact assessment: A cross-scale study](#). *Environmental Research Letters* 13(1), 015006.
- Her, Y., S.-H. Yoo, J. Cho, S. Hwang, J. Jeong, and C. Seong (2019). [Uncertainty in hydrological analysis of climate change: multi-parameter vs. multi-GCM ensemble predictions](#). *Scientific Report* 9, 4974.
- IPCC (2021). [IPCC Sixth Assessment Report : Climate Change 2021 - The Physical Science Basis - Summary for policymakers](#). Rapport technique, IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jacob, D., J. Petersen, B. Eggert, and al. (2014). [EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research](#). *Regional Environmental Change* 14(2), 563–578.
- Kling, H., M. Fuchs, and M. Paulin (2012). [Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios](#). *Journal of Hydrology* 424-425, 264–277.
- Koerner, W., B. Cinotti, J.-H. Jussy, and M. Benoit (2000). [Évolution des surfaces boisées en France depuis le début du XIX<sup>ème</sup> siècle : Identification et localisation des boisements des territoires agricoles abandonnés](#). *Revue forestière française* 3, 249–269.
- Labarthe, B. (2016). [Quantification des échanges nappe-rivière au sein de l'hydrosystème Seine par modélisation multi-échelle](#). Thèse de doctorat, MINES ParisTech, PSL Research University.
- Maraun, D., F. Wetterhall, A. M. Ireson, and al. (2010). [Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user](#). *Reviews of Geophysics* 48(3), RG3003.
- Mardhel, V., S. Pinson, and D. Allier (2021). [Description of an indirect method \(IDPR\) to determine spatial distribution of infiltration and runoff and its hydrogeological applications to the French territory](#). *Journal of Hydrology* 592, 125609.
- Martin, E. R., C. Thorncroft, and B. Booth (2014). [The Multidecadal Atlantic SST-Sahel Rainfall Teleconnection in CMIP5 Simulations](#). *Journal of Climate* 27(2), 784–806.
- 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., B. Laignel, J. Deloffre, J. Mesquita, A. Motelay, R. Lafite, and A. Durand (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.
- Nash, J. and J. Sutcliffe (1970). [River flow forecasting through conceptual models. Part I, a discussion of principles](#). *Journal of Hydrology* 10, 282–290.
- Ouzeau, G., M. Déqué, M. Jouini, S. Planton, R. Vautard, and J. Jouzel (2014). [Le climat de la France au XXI<sup>e</sup> siècle - Volume 4 - Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer](#). Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie : Direction générale de l'Énergie et du Climat.
- Radanovics, S., J.-P. Vidal, E. Sauquet, A. Ben Daoud, and G. Bontron (2013). [Optimising predictor domains for spatially coherent precipitation downscaling](#). *Hydrology and Earth System Sciences* 17(10), 4189–4208.
- 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.



- Stocker, T., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley (2013). *Climate Change 2013 :The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : IPCC.
- Taylor, K., R. Stouffer, and G. Meehl (2012). *An Overview of CMIP5 and the Experiment Design*. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4), 485 – 498.
- 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, 1627–1644.