

Fascicule #23

PiREN
Seine



Trajectoires
hydrologiques
du bassin
de la Seine

Sous la direction de Nicolas Flipo, Nicolas Gallois et Julien Boé



Trajectoires hydrologiques du bassin de la Seine

Sous la direction de :
Nicolas Flipo^[1], Nicolas Gallois^[1] et Julien Boé^[2]

Contributeurs :
Nicolas Masséi^[3], Jonathan Schuite^{[4],[1]}, Juliette Deman^[2], Lisa Baulon^{[3],[5]}, Manuel Fossa^[3]

[1] Centre de Géosciences, Mines Paris-PSL Université / ARMINES, [2] CECI, Université de Toulouse, CERFACS/CNRS,
[3] Université de Normandie, UNIROUEN, UNICAEN, CNRS, M2C, 76000 Rouen, [4] TerraScience, [5] BRGM, 45060 Orléans

Le socio-hydrosystème Seine en bref



Le bassin de la Seine s'étend sur plus de 76 000 km², dont 65 000 km² en amont de son estuaire, l'exutoire du bassin étant situé à Poses. La Seine prend sa source sur le plateau de Langres, en Côte-d'Or, avant de se jeter dans la Manche, entre le Havre et Honfleur. Représentatif de l'Anthropocène, le bassin versant de la Seine est fortement influencé par la société humaine. Depuis plusieurs siècles, il subit et continue de subir une forte pression anthropique, en raison de son industrie et de l'agriculture liées notamment au développement de l'agglomération parisienne, creuset économique et social de la France.

Entre 1901 et 2016, la densité de population de la région Île-de-France, et plus particulièrement de l'agglomération parisienne, n'a cessé de croître et de s'étendre spatialement (Figure A). Dans cette région, elle varie entre 1 000 et 5 000 habitants par km² dans les zones urbaines, alors que la densité moyenne est de 250 habitants par km² pour l'ensemble du bassin, et est inférieure à 20 habitants par km² dans les zones en amont. Actuellement, environ 18 millions de personnes, soit plus du quart de la population française, y habitent.

Cette évolution de la densité de la population se traduit par une pression urbaine sur le réseau hydrographique qui augmente d'amont en aval, pour culminer à l'aval de l'agglomération parisienne. Elle se traduit notamment par

des modifications des niveaux d'oxygène, des teneurs en matières organiques, en nitrites, ainsi qu'en bactéries fécales (importantes lors d'événements orageux). À ces pressions urbaines s'ajoutent des pressions agricoles qui se manifestent par des pollutions diffuses, plus difficiles à contrôler que des pollutions ponctuelles en aval de points de rejet. En effet, après la Seconde Guerre mondiale, l'agriculture française a subi une transformation profonde sous l'impulsion de grandes politiques telles que le plan Monnet (1945), le plan Marshall (1947), et la Politique agricole commune (1962). Ces décisions avaient alors pour but de favoriser des exploitations à la fois plus grandes et plus productives pour répondre à la demande parisienne de plus en plus forte, mais également aux demandes européenne et mondiale.

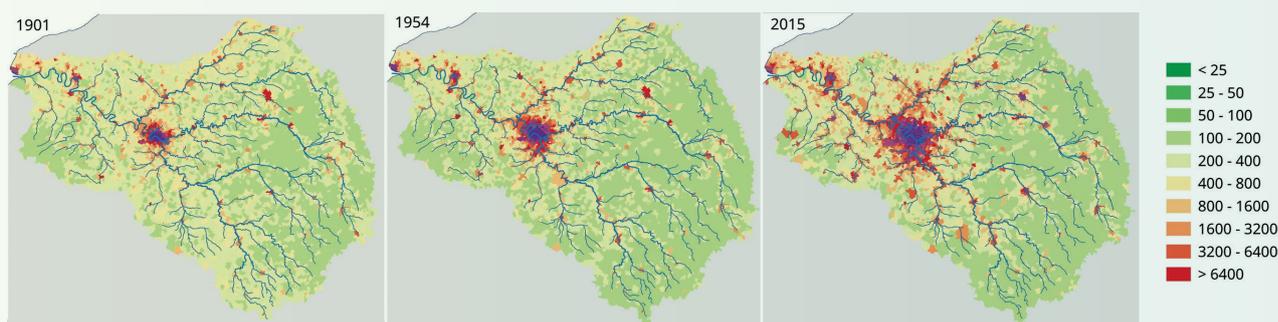


Figure A : Évolution de la densité de population du bassin de la Seine (en hab/km²) en 1901, 1954 et 2015 (d'après Flipo et al., 2020).

Ces politiques se traduisent aujourd’hui par une occupation du sol du bassin de la Seine très contrastée avec près de 8 % de sols artificialisés, principalement avec l’agglomération parisienne et les métropoles de Rouen et du Havre (Figure B). Soixante pour cent de la surface du bassin est, quant à elle, dédiée à l’agriculture, dont la très grande

majorité est occupée par des terres arables. La prédominance de grandes cultures, couplée à un usage étendu des pesticides et des engrais azotés, a largement contribué à la dégradation de nombreuses masses d’eau souterraines et de surface. Une pression qui risque de s’accroître avec le changement climatique et la raréfaction de la ressource en eau.

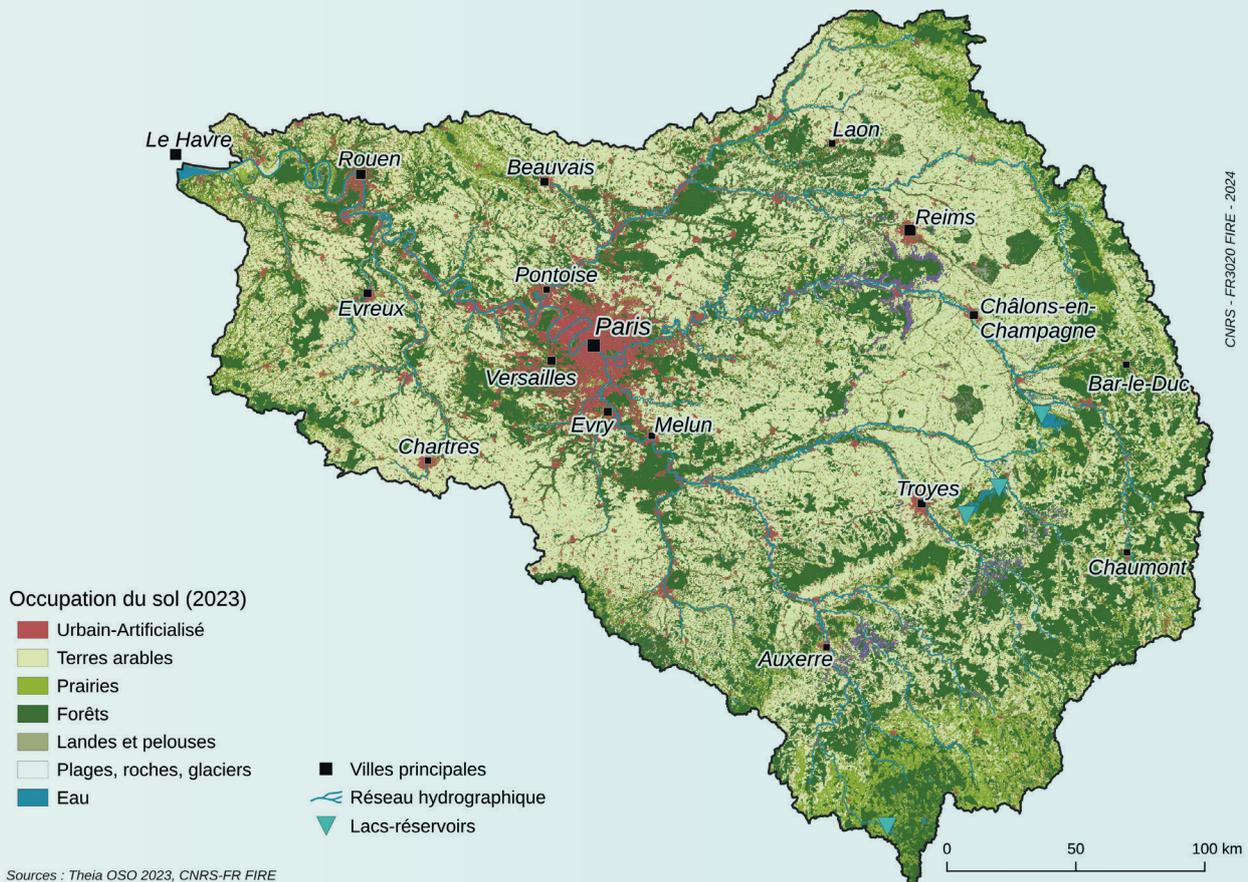


Figure B : Occupation du sol du bassin versant de la Seine (d’après Théia OSO, 2023).

Type de sol	Occupation du sol (en %)
Terres arables	45,7
Urbain-Artificialisé	8
Prairies	13,5
Cultures permanentes	1
Forêts	30
Landes et pelouses	0,5
Plages, roches, glaciers	0,04
Surfaces en eau	0,8
Serres	0,01

Tableau : Statistiques de l’occupation du sol sur le bassin de la Seine (données Theia OSO 2023).

L'hydrogéologie du bassin de la Seine en bref

Le bassin versant de la Seine coiffe une grande partie du bassin sédimentaire de Paris, ce dernier abritant l'un des plus grands réservoirs d'eau souterraine d'Europe. De ce fait, les ressources en eau dans le bassin de la Seine y sont très importantes. Le bassin de Paris est composé d'un empilement de roches calcaires, argileuses et sableuses déposées lors des ères secondaires, tertiaires et quaternaires (Figure C). Les nombreuses nappes phréatiques et alluviales qui le composent contribuent significativement à l'alimentation des cours d'eau et des rivières suivant le pendage naturel du bassin du sud-est vers le nord-ouest, son relief étant peu marqué avec une altitude moyenne inférieure à 300 m. L'ensemble de ces rivières et cours d'eau représente un linéaire de 27 500 km.

La pluviométrie du bassin (en moyenne sur la période 2003-2020) est d'environ 760 mm/an, avec, cependant, de fortes disparités régionales. En effet, son centre (Beauce, Gâtinais, etc.) ne reçoit que 550 mm/an en moyenne, contre plus de 1 200 mm/an pour les côtes normandes et secteurs amonts comme le Morvan. De cette eau apportée par les précipitations,

70 % repartent dans l'atmosphère par évapotranspiration, et 17 % rechargent les nappes, qui en retour contribuent aux deux tiers du débit de la Seine à l'entrée de son estuaire à Poses. Par ailleurs, la saisonnalité de l'évapotranspiration est marquée entre l'hiver et l'été, jouant également sur le débit saisonnier des rivières.

À titre d'exemple, le débit moyen de la Seine à la station de Paris, Pont Austerlitz est de 310 m³/s, avec des extrêmes hydrologiques marqués : d'un minimum de 20 m³/s pour la sécheresse historique de 1921 à un maximum de 2 600 m³/s pour la crue historique de 1910.

Cette variabilité spatiotemporelle des débits (Figure D) est aujourd'hui, en grande partie, compensée par quatre grands lacs-réservoirs disposés à l'amont du bassin. Ces « Grands Lacs de Seine », gérés par l'EPTB Seine Grands Lacs, peuvent stocker 840 millions de m³. Construits durant la seconde moitié du XX^e siècle, ils ont pour but de réguler le débit de la Seine, en le soutenant lors des étiages et en écrétant les crues. Ce dispositif permet également de maintenir un niveau d'eau plus ou moins constant nécessaire aux activités humaines.



Figure C : Géologie à l'affleurement du bassin de la Seine et réseau hydrographique principal.



Sources : CNRS - FR3020 FIRE - 2024

Figure D : Réseau hydrographique du bassin de la Seine et principaux sous-bassins versants.

Numéro sur la carte	Station	Nom du cours d'eau	Débit moyen (2007-2023) en m ³ s ⁻¹
1	Bazoches-lès-Bray	Seine	70,9
2	Saint-Fargeau	Seine	199,1
3	Austerlitz	Seine	307,9
4	Vernon	Seine	462,5
5	Creil	Oise	101,4
6	Créteil	Marne	100,2
7	Arcis-sur-Aube	Aube	32,5
8	Pont-sur-Yonne	Yonne	88,7
9	Épisy	Loing	19
10	Ballancourt	Essonne	8
11	Morsang	Orge	3,9
12	Louviers	Eure	21,2

Tableau : Débits moyens sur la période 2007-2023 aux différentes stations hydrologiques de la Seine et celle à l'aval des sous-bassins du bassin de la Seine (d'après les données Hydroportail / EauFrance).

Les pratiques anthropiques influencent fortement le devenir de la ressource en eau souterraine. Outre les pollutions liées aux activités humaines, 1,15 milliards de m³ sont prélevés chaque année dans les aquifères, ce qui représente un tiers des prélèvements totaux pour les usages anthropiques (alimentation en eau potable, secteur industriel et agriculture). Les deux autres tiers correspondent aux prélèvements qui ont lieu directement en rivière.

La gestion de la ressource en eau se trouve actuellement confrontée à des tensions significatives. Cette pression est appelée à s'intensifier, d'une part, en raison de la croissance démographique au sein du bassin, et d'autre part, sous l'effet des bouleversements climatiques affectant le bassin de la Seine. Face à ces défis croissants, il devient impératif d'interroger nos stratégies collectives afin d'anticiper ces évolutions, d'atténuer les impacts du changement climatique et, *in fine*, d'assurer une adaptation durable à ces transformations.



Sommaire

CHAPITRE 1 : Fonctionnement hydrologique actuel moyen du bassin de la Seine (2003–2020)**12**

1. Bilan hydrique 19
2. Variabilité spatiale de la pluie efficace et des taux d'infiltration dans les sols 22
3. Piézométrie à l'affleurement 24
4. Distribution de la contribution des eaux souterraines aux débits des rivières 24

CHAPITRE 2 : Fonctionnement du bassin au début du XX^e siècle**30**

1. Modifications des régimes hydrologiques 32
2. Évolution de la piézométrie des formations aquifères affleurantes 35
3. Contributions spatialisées du système aquifère au réseau hydrographique 37

CHAPITRE 3 : Impacts du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique du bassin de la Seine**40**

1. Étudier les impacts du changement climatique à l'échelle du bassin versant : une chaîne méthodologique complexe 42
2. Changements climatiques dans le bassin de la Seine 45
3. Évolution des flux d'eau 49
4. Changements des hauteurs piézométriques 54
5. Évolution des débits moyens 60
6. Évolution du régime hydrologique à l'aval du bassin de la Seine 64
7. Changements des débits intenses à Paris Austerlitz 65
8. Évolution des étiages 66

Références 70

Glossaire 74

Sigles 75



Introduction

La gestion de l'eau est devenue l'un des plus grands défis du XXI^e siècle. Aujourd'hui, moins de 1 % du stock mondial d'eau est directement disponible pour les activités humaines, parmi lesquelles seule une fraction constitue un stock d'eau renouvelable (Oki et Kanae, 2006; Roche et Zimmer, 2006 ; de Marsily, 2008). Dans l'ensemble, la pression sur l'hydrosystème terrestre est telle qu'environ 500 millions de personnes connaissent déjà un stress hydrique tout au long de l'année (Mekonnen et Hoekstra, 2016). Bien que des incertitudes persistent quant à la quantification des impacts du changement climatique sur les ressources en eau (Taylor et al., 2013), le nombre de personnes exposées à un stress hydrologique augmentera dans un avenir proche.

À l'ère de l'Anthropocène (Crutzen, 2002; Crutzen et Steffen, 2003), ce n'est pas seulement le climat qui affecte la trajectoire des grands bassins versants, mais aussi la pression humaine, telle que les changements d'utilisation des terres et les prélèvements d'eau, pouvant parfois devenir facteurs de contrôle de ces systèmes, bien au-delà des facteurs naturels (Rockström et al., 2009). Dans certaines régions du monde, la demande en eau pour répondre aux usages des sociétés conduira également à des changements dans le cycle de l'eau du même ordre de grandeur que celui que le changement climatique pourrait provoquer (Haddeland et al., 2014). Il est ainsi reconnu que les outils de modélisation intégrée à l'échelle du bassin régional sont les plus adaptés pour la gestion et la planification de l'eau (Perkins et Sophocleous, 1999; Flipo et al., 2014; Barthel et Banzhaf, 2016), que ce soit pour tester des scénarios (Hattermann et al., 2017), ou

pour démêler les impacts du changement climatique sur le cycle de l'eau de ceux de la croissance de la demande en eau associée à la croissance démographique (Jackson et al., 2001; Flipo et al., 2020).

Depuis plusieurs années le changement climatique devient de plus en plus tangible dans le bassin de la Seine avec des records de températures estivales de l'air et de l'eau qui se succèdent, ainsi qu'un allongement des périodes d'apparition de ces températures chaudes jusqu'au début de l'automne. Ces modifications thermiques ont des effets sur le climat et, *a fortiori*, sur le cycle de l'eau. Ainsi, avons-nous pu vivre en 2016 une crue de printemps d'une rare intensité sur le bassin du Loing (Flipo et al., 2018), mais également une diminution inquiétante des débits en eau souterraine du bassin de la Seine en 2021 et 2022.

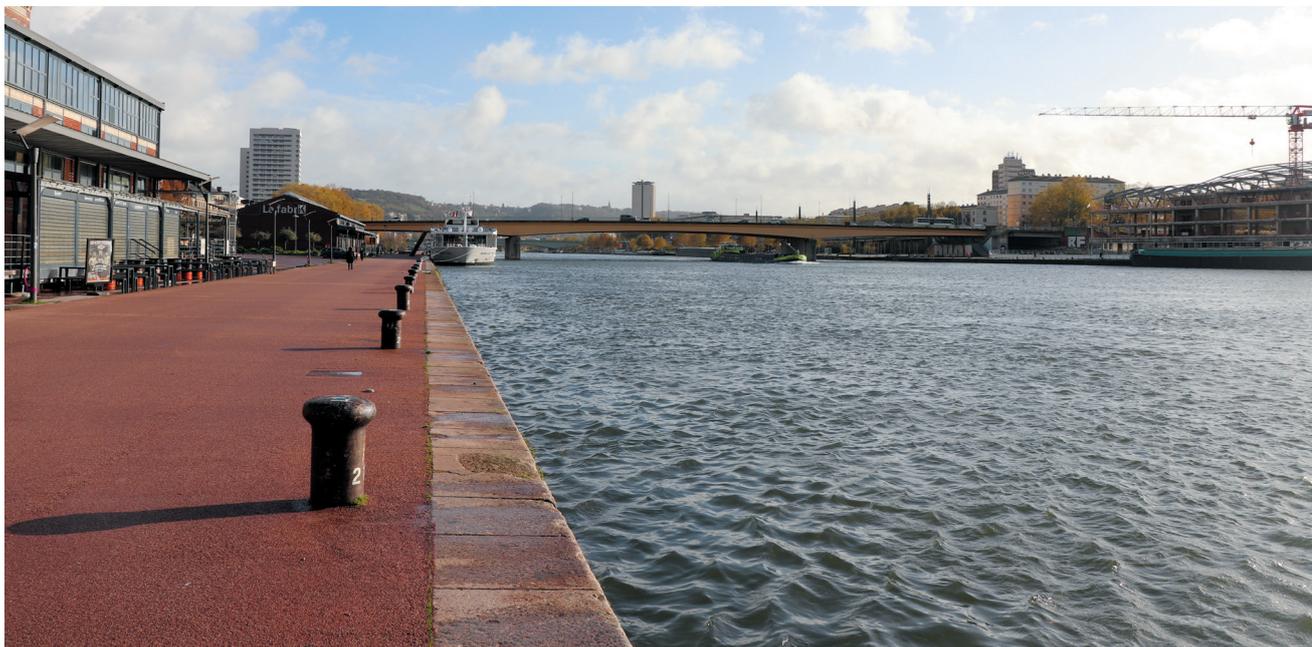
Ces phénomènes intenses, que la normale qualifiait auparavant de rares, sont-ils amenés à devenir la norme dans le futur ? Quelles stratégies collectives pouvons-nous adopter pour nous en prémunir, pour atténuer les effets du changement climatique et ultimement, comment nous y adapter ? Telles sont des questions prégnantes à l'esprit des citoyens, politiques, chercheurs et gestionnaires de l'eau et des milieux aquatiques.

Au vu de l'urgence de la situation et pour éclairer quantitativement les initiatives régionales ou locales de gestion de l'eau et des milieux aquatiques, les chercheurs du PIREN-Seine ont réalisé des travaux de construction de trajectoires passées et futures pour évaluer les impacts du changement climatique sur la ressource en eau du bassin de la Seine. Contrairement aux territoires du sud de la France, des incertitudes importantes demeurent au sujet du bassin de la Seine, avec des désaccords récurrents entre modèles mobilisés dans le cadre des inter-comparaisons internationales.

Ces travaux, relatés dans ce fascicule, mobilisent des méthodes numériques avancées pour reconstruire, évaluer des forçages hydroclimatiques représentatifs et quantifier leurs impacts *via* le modèle hydrologique CaWaQS. Ils mettent en évidence une tension grandissante sur la ressource en eau au cours du XX^e siècle, en croisant effets climatiques et pression anthropique. La prospective, quant à elle, est encore soumise à des incertitudes, mais permet d'ores et déjà de réaffirmer l'importance de l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre par le respect

des accords de Paris sur le climat. Elle est, en effet, un levier extrêmement important pour le bassin de la Seine puisque le respect de ces accords permettrait de stabiliser la situation hydrologique actuelle. Certes, la raréfaction de l'eau n'est pas à écarter dans ce scénario, mais reste assez limitée spatialement et dans le temps, avec des **étiages**¹ projetés légèrement plus sévères et un peu plus longs en fin de XXI^e siècle. Toutefois, le régime hydrologique des rivières du bassin semble stable, n'engendrant pas de risque accru d'inondations hivernales. Les modèles sollicités s'accordent sur le bienfait du respect des accords de Paris, nous poussant à rappeler la nécessité pour les citoyens et les politiques de s'en emparer pour soutenir les transitions nécessaires à l'atteinte de ces objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Au-delà de ce constat, les incertitudes restent fortes, laissant possiblement les décideurs face à des choix d'adaptation sur tous les plans depuis la raréfaction de la ressource en période d'étiages jusqu'à de possibles événements de crue plus fréquents en hiver et au printemps. Des situations catastrophiques pourraient alors se produire, comme un effondrement des ressources souterraines (disparition d'aquifères et des cours d'eau amont qui en dépendent) et, en conséquence, un effondrement généralisé du socio-écosystème du bassin. Les situations hydroclimatiques pluri-annuelles menant à cet effondrement seront analysées dans le cadre de la prochaine phase 9 du PIREN-Seine afin de poursuivre l'accompagnement des politiques de l'eau sur le bassin.



1 Les mots en gras sont explicités dans le glossaire à la fin de l'ouvrage.



CHAPITRE 1



Fonctionnement hydrologique actuel moyen du bassin de la Seine (2003–2020)

Le changement climatique de plus en plus prégnant et les pressions anthropiques exercées sur la ressource en eau du bassin de la Seine soulèvent aujourd'hui de nombreuses questions de la part des habitants et des gestionnaires du bassin quant à son avenir. Depuis sa création en 1989, le PIREN-Seine s'attache à étudier le fonctionnement hydrogéologique du bassin, en combinant mesures de terrain, exploitation de données historiques et modélisation

numérique. Ce chapitre explore les dernières innovations techniques et méthodologiques réalisées en matière de modélisation de l'ensemble du réseau hydrographique de la Seine et de ses aquifères sous-jacents. Il en dresse un bilan hydrologique et hydrogéologique pluriannuel sur une période de 17 ans actuelle (2003-2020), et fournit une vision spatialisée de la dépendance des rivières du bassin aux eaux souterraines.

Afin de comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin de la Seine, les scientifiques du PIREN-Seine ont mis en place un jumeau numérique du bassin : CaWaQS-Seine (cf. encarts CaWaQS et CaWaQS-Seine). Cette application est utilisée pour estimer les flux hydrologiques caractéristiques du bassin, distribués dans l'espace et le temps. On retrouve ainsi les précipitations efficaces, les taux d'infiltration, les écoulements de surface ainsi que les échanges entre les unités aquifères ou entre les aquifères et les rivières. Ces flux fournissent une vision unique de la relation qui existe entre les eaux de surface visibles et les eaux souterraines qui les soutiennent notamment en période d'étiage. Ces données sont également synthétisées par un bilan hydrique complet de l'hydrosystème régional. Ce bilan est établi pour une période pertinente hydrologiquement en lien avec la variabilité pluri-décennale du climat. Pour le bassin de la Seine, une période de 17 ans a été identifiée préalablement (Flipo et al., 2012; Massei et al., 2010, 2017). Ainsi, l'ensemble des résultats présenté dans ce fascicule correspond à la moyenne des flux entre le 1^{er} août 2003 et le 31 juillet 2020.

L'application CaWaQS-Seine recalibrée offre pour la première fois une image très détaillée du fonctionnement du bassin de la Seine dans son ensemble, mais aussi à l'échelle des territoires. Tous les flux hydrologiques sont donc estimés de manière cohérente aussi bien du point de vue de leur durée que de leur fréquence : des flux classiques tels que l'évapotranspiration réelle, les débits des rivières, aux flux plus complexes comme la contribution des eaux souterraines aux débits des rivières, ou encore les échanges entre les unités aquifères, en passant par la répartition entre l'écoulement rapide en surface et l'infiltration plus lente. À la connaissance des auteurs, c'est la première fois qu'une telle caractérisation du comportement du système hydrologique d'un bassin versant fluvial à l'échelle régionale est proposée, reproduisant les observations aussi bien dans le domaine temporel que dans le domaine fréquentiel.

De manière originale, le modèle met plus particulièrement en avant la dépendance croissante d'amont en aval des rivières à leur système aquifère sous-jacent. Les rivières du secteur central Tertiaire du bassin très majoritairement alimentées par les eaux souterraines, les rendant extrêmement dépendantes de la recharge hivernale des nappes.

L'application CaWaQS-Seine intègre l'action de la société sur le milieu en incluant les pressions locales induites par les prélèvements d'eau. Cette pression est renseignée via des données de prélèvements d'eau souterraine, collectées auprès de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) depuis 1994 jusqu'à 2010, date à partir de laquelle elle a téléversé ses données dans la BNPE (Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau). L'exploitation de cette base a permis d'actualiser les prélèvements jusqu'en 2020. Les volumes annuels déclarés pour l'alimentation en eau potable ou des activités industrielles sont répartis uniformément au cours des mois de l'année. En revanche, les prélèvements agricoles sont concentrés sur la période estivale, entre mai à août, selon la répartition suivante, exprimée en pourcentages du volume annuel au point de données considéré : 20 % en mai, 30 % en juin, 30 % en juillet et 20 % en août.

À titre d'illustration, sur la période couverte par la mise à jour des données (2012-2020), le volume moyen total prélevé en nappe, s'élève à 1,15 km³, réparti selon 72,1 % (823 km³), 11,1 % (128 km³) et 16,8 % (194 km³) à destination respectivement de l'alimentation en eau potable (AEP), des secteurs industriels et agricoles.

Les performances de CaWaQS-Seine ont été récemment améliorées dans le cadre du projet de recherche *AquiVar* (Flipo et al., 2021), notamment grâce au développement d'une nouvelle méthodologie de calibration emboîtée, qui s'appuie sur la mise en œuvre de la méthodologie HYMIT (*HYdrological MINimalist Transfer function* - (Schuite et al., 2019; Flipo et al., 2023)). Fondée sur l'étude des transformations des signaux de précipitations et de débits mesurés sur le bassin par HYMIT, l'application de cette nouvelle méthodologie de calibration s'est appuyée sur 221 stations hydrométriques et 268 piézomètres. Elle a abouti à une caractérisation distribuée et quantifiée d'indicateurs hydrologiques fondamentaux tels que le fractionnement de la pluie en évapotranspiration réelle (ETR), d'une part, et d'autre part, en lames d'eau soumises aux écoulements lents (**infiltration** vers les aquifères) et rapides (**ruissellement** vers le réseau hydrographique). S'appuyant sur des procédures d'optimisation de type MCMC (*Monte Carlo Markov Chain*), elle a permis de déterminer des jeux de paramètres CaWaQS utilisés pour la simulation du bilan de surface. Le calcul de ce bilan de surface détermine ainsi la recharge des nappes, capitale pour la paramétrisation de l'hydrodynamisme du système aquifère.





L'outil de modélisation hydrologique CaWaQS

Le modèle couplé CaWaQS, développé par Mines Paris - PSL sous licence libre EPL v 2.0¹ est fondé sur des principes physiques (*CATCHment WATER Quality Simulator* – Flipo (2005) ; Labarthe et Flipo (2016) ; Flipo et al. (2023)). Il s'agit d'un modèle spatialement distribué qui simule les bilans d'eau, de matière et d'énergie ainsi que la dynamique des écoulements et des stocks dans tous les compartiments d'un hydrosystème. Ainsi, le modèle représente les dynamiques de surface, de subsurface et de nappe via cinq modules principaux au pas de temps quotidien (Labarthe et Flipo, 2016) :

- ▶ Un module de surface (Figure 1a), qui calcule les estimations de l'évapotranspiration réelle, du ruissellement rapide et des flux d'infiltration dans les sols. S'appuyant sur une approche conceptuelle basée sur des réservoirs (Girard et al., 1980), les calculs du bilan hydrique tiennent compte des données climatiques ainsi que des distributions de l'utilisation des terres et du matériau parental du sol ;
- ▶ Un module de zone non saturée (Figure 1c), qui transfère verticalement la lame d'eau infiltrée jusqu'au toit des nappes d'eau souterraine². Il diffuse l'infiltration du sol sur la base d'une cascade de réservoirs de Nash (Besbes et De Marsily, 1984) vers le système aquifère. Cette approche diffusive est particulièrement adaptée à l'échelle régionale pour analyser les fluctuations du niveau de la nappe phréatique (Cao et al., 2016) ;
- ▶ Un module de nappe ou de système aquifère (Figure 1d), basé sur l'équation de diffusivité pseudo-3D (de Marsily, 1986), résolue à l'aide d'un schéma numérique semi-implicite en volumes finis, appliqué sur des grilles gigognes à mailles carrées. En plus d'intégrer la recharge et les prélèvements anthropiques, il permet de représenter le comportement de nappes libres et confinées, de même que les transitions réversibles entre ces deux états pour un même horizon. Les échanges entre les unités aquifères sont simulés sur la base d'une simplification verticale monodimensionnelle des flux d'eau, qui sont supposés être linéairement liés à la différence de charges entre les unités aquifères en connexion hydraulique ;
- ▶ Un modèle de conductance non linéaire (Figure 1e), prenant en compte une limitation du flux d'infiltration en cas de déconnexion des rivières et des aquifères (Rivière et al., 2014), est intégré dans une approche itérative de Picard pour calculer les échanges nappe-rivière (Flipo et al., 2014) ;
- ▶ Un module hydraulique (Figure 1b), qui transfère les débits d'eau dans le lit de la rivière en utilisant un schéma de routage de Muskingum (David et al., 2011). Pour chaque cellule du réseau fluvial, les débits calculés intègrent les flux d'échanges nappe-rivière, les contributions dues au ruissellement de surface ainsi que les éventuelles injections d'eau par des rejets anthropiques.

1 Téléchargeable à l'adresse <https://gitlab.com/cawaqs/cawaqs>

2 Une nappe d'eau souterraine correspond à l'eau qui sature la porosité des formations géologiques constituant le sous-sol. Lorsque les propriétés de ces formations permettent une bonne circulation de l'eau autorisant de soutenir un prélèvement dans le temps, on parle alors d'aquifère.

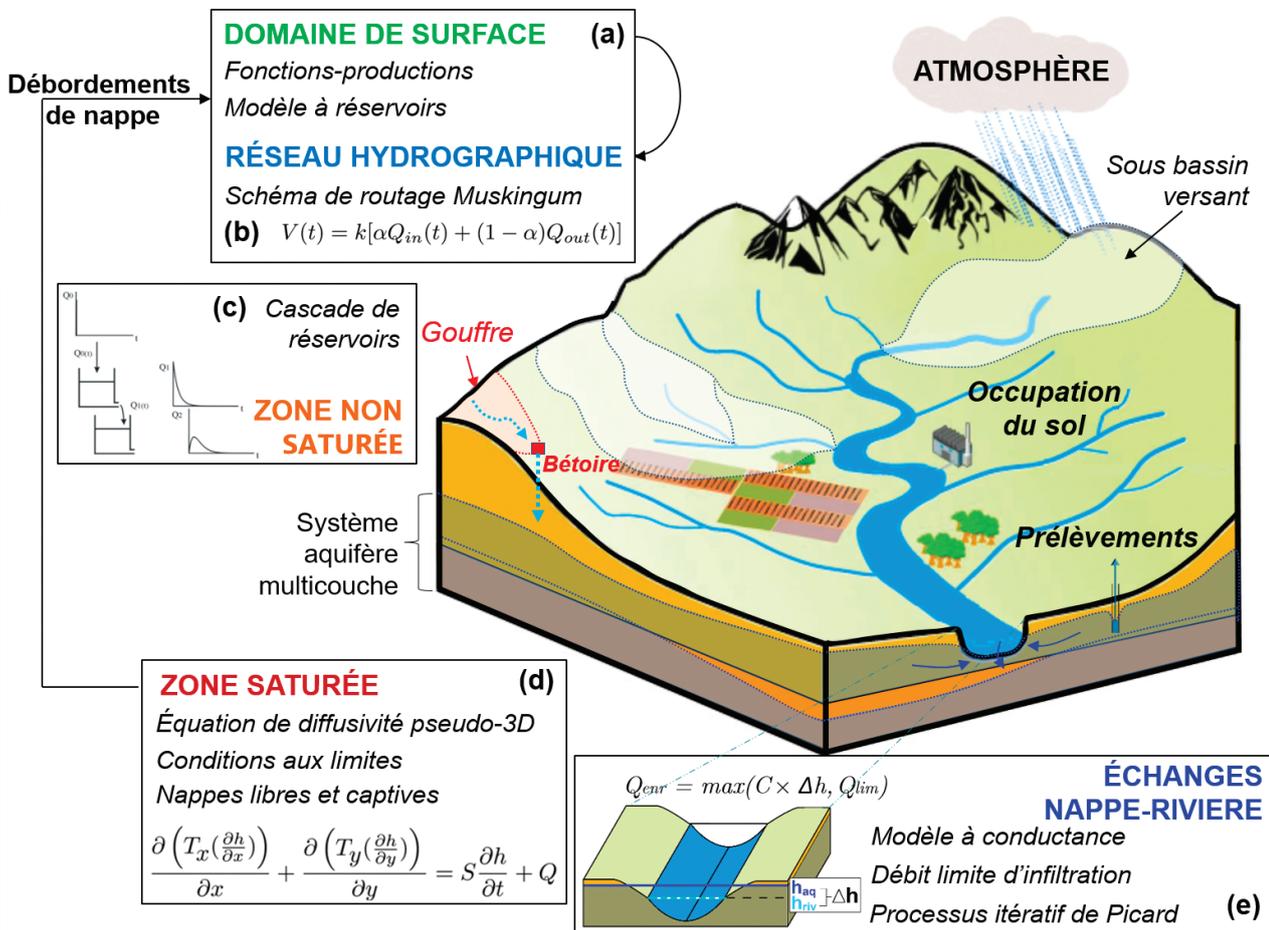


Figure 1. Illustration simplifiée de la structure de la plateforme de modélisation CaWaQS 3.x et des principaux concepts impliqués dans les calculs d'écoulement d'eau.

Notations : (b : Réseau fluvial) α : un paramètre de pondération ($\in [0;1]$), K : temps de transfert entre deux éléments de rivière adjacents, (Q_{in} , Q_{out}) : débits d'entrée et de sortie des éléments de rivière, V : volume d'eau contenu dans un élément de calcul de rivière. (d : Zone saturée) (T_x , T_y) : coefficients de transmissivité dans les directions x et y , S : coefficient de stockage, Q : terme source. (e : Échanges cours d'eau-nappe) C : coefficient de conductance, Q_{enr} : écoulement d'échanges cours d'eau-nappe, Q_{lim} : taux d'infiltration limite cours d'eau-nappe, Δh : différence de hauteur d'eau dans la rivière (h_{riv}) et la tête hydraulique de la nappe (h_{aq}).



La modélisation du bassin de la Seine avec CaWaQS-Seine

L'application CaWaQS-Seine s'appuie sur deux décennies de modélisation hydrologique du bassin de la Seine (Gomez et al., 2003; Pryet et al., 2015; Labarthe et Flipo, 2016; Baratelli et al., 2018) et intègre aujourd'hui :

- Une couche de surface couvrant l'ensemble du bassin de la Seine ($\approx 95\,100\text{ km}^2$), divisée en environ 11 000 cellules élémentaires de calcul d'une surface moyenne de $8,8\text{ km}^2$;
- Un réseau fluvial, connecté aux eaux souterraines, qui correspond à 6 830 km de rivières. Principalement pour des raisons de temps de calcul, ceux pour les échanges cours d'eau-nappe ont été limités aux rivières comprenant des tronçons d'ordres de Strahler (Strahler, 1957) de 3 à 7 ou 8 en fonction de la définition des rivières pérennes dans la base de données utilisée pour définir le réseau fluvial ;
- Un système aquifère multicouche divisé en 20 unités lithologiques. Celles-ci sont maillées à l'aide de grilles imbriquées à plusieurs échelles avec des cellules carrées variant entre 100 et 3 200 m de côté. De la plus ancienne à la plus récente, ces unités peuvent être regroupées en quatre catégories principales (cf. Figure 2) :
 - (i) un ensemble alternant unités aquifères et unités argileuses, principalement composées d'associations calcaires et marneuses, respectivement. Dans l'ensemble, elles s'étendent du Jurassique inférieur (Hettangien, - 195 Ma) au Crétacé inférieur (Albien, - 100 Ma) et affleurent principalement à l'extrémité orientale du bassin,
 - (ii) une grande couche de craie du Crétacé supérieur, (iii) un ensemble complexe de cinq couches du Tertiaire, situé au centre du bassin, composé d'unités principalement calcaires et sablonneuses, datant du Paléocène jusqu'au Miocène, et (iv) les dépôts alluviaux récents (Pléistocène et Holocène, de -2,5 Ma à -10 000 ans, respectivement) entourant les principales rivières. Les zones où le socle cristallin affleure (Morvan, Ardennes) ne sont pas explicitement simulées ($\approx 1,9\%$ de la surface totale modélisée).

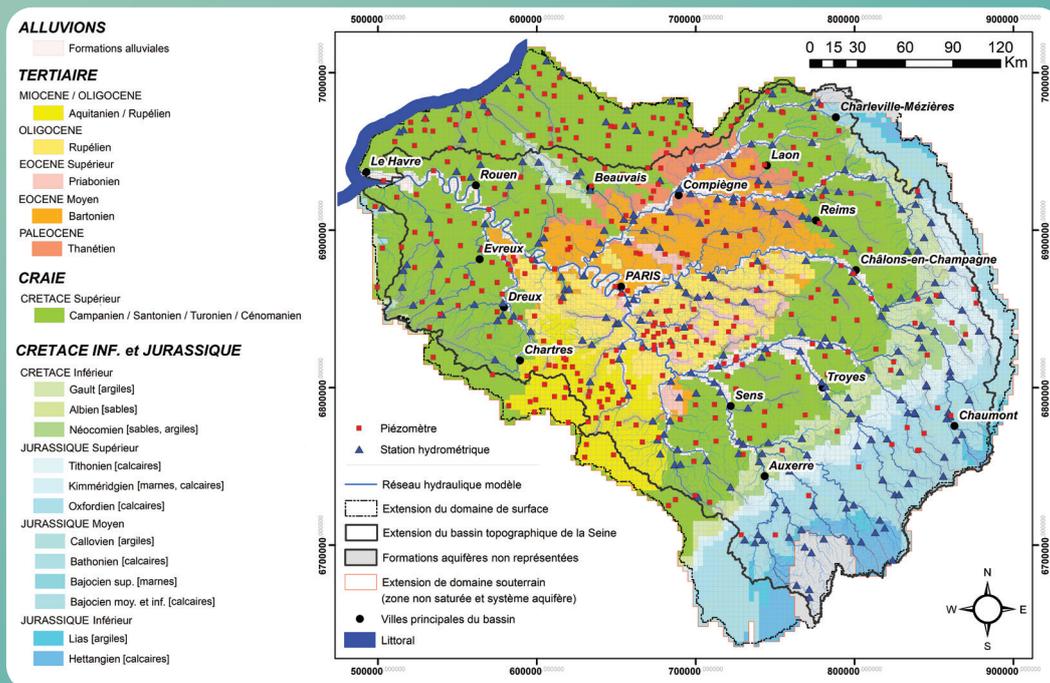


Figure 2. Vue d'ensemble de la plus récente structure de l'application CaWaQS-Seine. Les horizons modélisés sont regroupés selon les quatre ensembles principaux définis. Le type de lithologie dominante de chaque formation est spécifié entre crochets.

1. Bilan hydrique

Dans les limites du bassin topographique de la Seine (soit environ 76000 km²), les valeurs moyennes interannuelles des forçages climatiques utilisés (base de données SAFRAN) sont respectivement de 765 mm an⁻¹ [1837 m³ s⁻¹] et 888 mm an⁻¹ [2133 m³ s⁻¹] pour les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Une très large partie (73,8 %) de ces précipitations est convertie en évapotranspiration réelle (ETR) (lame moyenne de 564 mm an⁻¹ [1356 m³ s⁻¹])

La fraction efficace restante, soit 26,2 % (lame moyenne de 201 mm an⁻¹ [482 m³ s⁻¹]) est principalement répartie entre, d'une part, un flux d'infiltration représentant 17,6 % des précipitations (134 mm an⁻¹ [323 m³ s⁻¹]) et,

d'autre part, un flux de ruissellement à hauteur de 8,6 % (66 mm an⁻¹ [158 m³ s⁻¹]). Des flux négligeables (< 0,1 % des précipitations), associés au stock d'eau dans les sols ainsi qu'à un court-circuit hydraulique³ pour les secteurs au droit desquels aucun aquifère n'est représenté sont également simulés (le socle du Morvan principalement).

Un flux total d'eau infiltrée de 443 m³ s⁻¹ (soit 185 mm an⁻¹) est simulé en transit au travers de l'ensemble de la zone non saturée (d'environ 96000 km²), alimentant les différents secteurs affleurants des formations aquifères. Le tableau 1 distingue plus précisément, entre autres, pour chacune des formations modélisées du souterrain, la valeur moyenne de recharge simulée, en mm an⁻¹, ainsi que la fraction de surface à l'**affleurement** associée. L'ensemble de ces chiffres clé est synthétisé en figure 3.

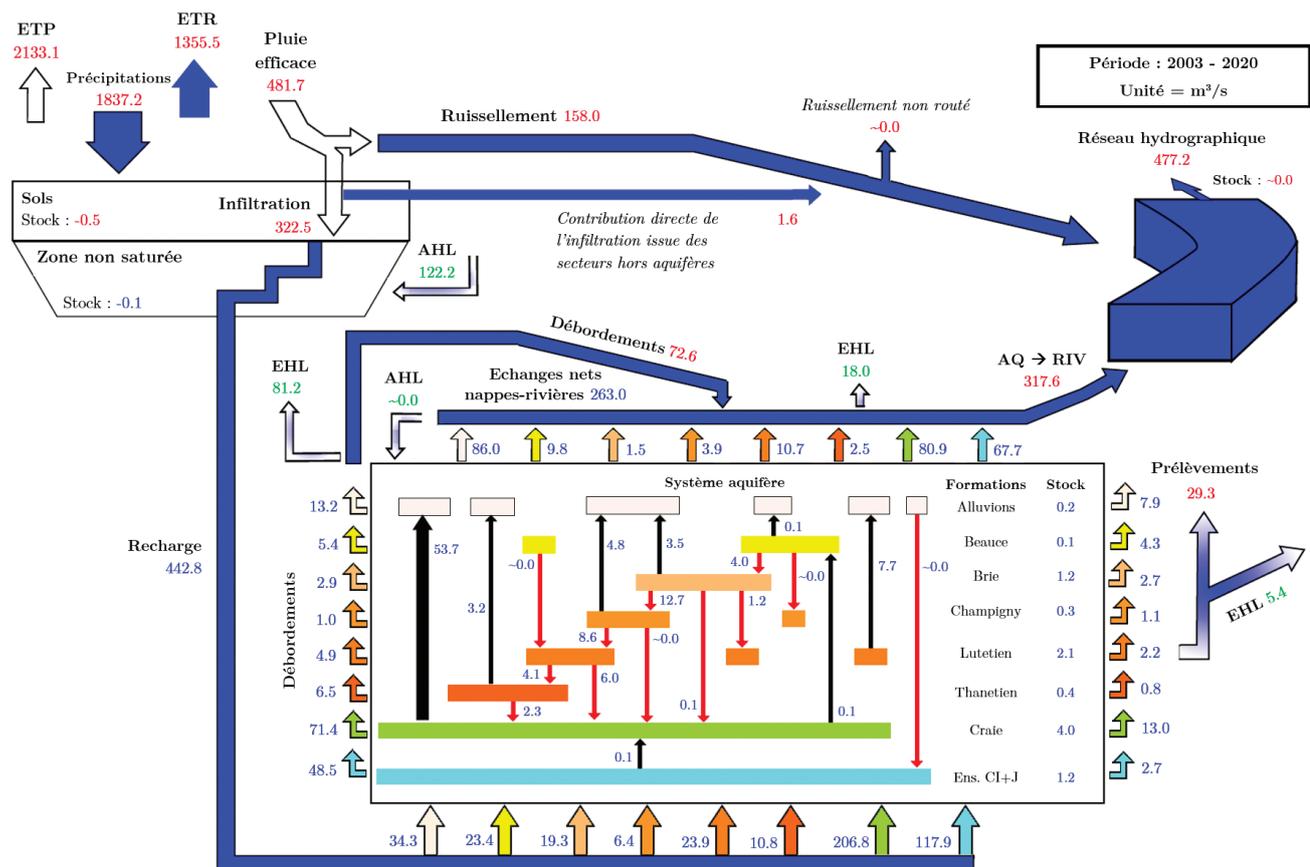


Figure 3. Fonctionnement moyen de l'hydrosystème Seine, simulé par l'application CaWaQS-Seine.

Tous les débits (m³ s⁻¹) sont exprimés en valeurs moyennes interannuelles, sur la période 2003-2020.

« Beauce » : ensemble des calcaires de Beauce, « Brie » : calcaires de Brie et sables de Fontainebleau, « Champigny » : calcaires de Champigny, « Lutétien » : calcaires du Lutétien, « Thanétien » : sables thanétiens, « Ens. Jurassique et Crétacé inférieur » : ensemble Jurassique et Crétacé inférieur.

EHL (« Exports hors limites ») : Flux d'eau souterraine sortant au-delà de la projection verticale des limites du bassin topographique de la Seine sur l'extension du système aquifère. **AHL** (« Apports hors limites ») : Flux d'eau souterraine entrant dans l'enceinte de la projection verticale du bassin sur l'extension du système aquifère.

3 Sur ces zones, la lame d'eau journalière simulée est directement transformée en ruissellement et transférée au réseau hydrographique.

Les prélèvements anthropiques du système aquifère (incluant les exports hors limites) représentent 7,8 % de la recharge totale des aquifères (environ $1,09 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$). La caractérisation des flux verticaux échangés entre les unités en communication hydraulique met notamment en exergue deux principaux points :

- Dans le cas des formations alluviales, une alimentation globale par flux ascendants, en particulier depuis la Craie, supérieure à sa recharge par **impluvium** ($53,7$ contre $34,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivement),
- Une recharge principale de la formation des calcaires du Champigny par drainance depuis la formation du Brie ($12,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ contre $6,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en recharge au travers de la zone non saturée), constat en partie expliqué par sa surface restreinte à l’affleurement (Tableau 1).

Le régime d’exfiltration du système aquifère vers le réseau hydraulique domine largement les échanges rivière-aquifère, comme le montrent les valeurs de l’échange net positives dans la Figure 3. Dans les limites du bassin, les flux drainés depuis le système souterrain sont en moyenne responsables de 67 % ($318 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) du débit de la Seine à l’exutoire du bassin à Poses ($477 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Un apport complémentaire au réseau fluvial est constitué par les écoulements de surface contribuant à $160 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ce qui représente 33 % du débit de la rivière à l’exutoire.

L’un des principaux avantages des modèles distribués est leur capacité à calculer les bilans hydriques également pour les sous-bassins du bassin régional de la Seine. Plus de détails sur la répartition spatiale du bilan hydrique sur le bassin de la Seine sont fournis dans le Tableau 2.



	All.	Bea.	Bri.	Cha.	Lut.	Tha.	Cra.	C.I.J.	Total
Surface totale (km ²)	5 430	5 625	10 000	8 663	16 250	7 950	67 530	96 205	-
Proportion à l'affleurement (%)	100	99	65	19	42	33	58	30	-
<i>Flux caractéristiques</i>									
Recharge (mm an ⁻¹)	199	131	94	123	110	128	167	130	185
Recharge (m ³ s ⁻¹)	34,3	23,4	19,3	6,4	23,8	10,8	206,8	117,9	442,7
Prélèvements (m ³ s ⁻¹)	-7,9	-4,3	-2,7	-1,1	-2,2	-0,7	-13,0	-2,7	-34,4
Débordements (m ³ s ⁻¹)	-13,2	-5,4	-2,9	-1,0	-4,9	-6,5	-71,4	-48,5	-153,7
Bilan net d'échange nappes-rivières (m ³ s ⁻¹)	-86,0	-9,8	-1,5	-3,9	-10,7	-2,5	-80,9	-67,7	-262,8
Echanges avec les unités sous-jacentes (m ³ s ⁻¹)	72,7	-3,9	-13,7	-8,6	-10,0	-2,3	0,1	0,0	34,2
Stock (m ³ s ⁻¹)	0,1	0,1	1,0	0,3	1,8	0,4	3,5	1,1	8,3

Tableau 1. Flux moyens d'eau au travers des différentes unités aquifères modélisées, calculés sur la période 2003-2020. Pour chaque unité aquifère, un flux positif (respectivement négatif) traduit d'une entrée (respectivement sortie) d'eau dans/de la formation.

All. : Formations alluviales quaternaires, Bea. : nappe des calcaires de Beauce, Bri. : calcaires de Brie et sables de Fontainebleau, Cha. : calcaires de Champigny, Lut. : calcaires du Lutétien, Tha. : sables du Thanétien, Cra. : Craie, C.I.J. : ensemble du Crétacé inférieur et du Jurassique.

	Secteur principal [Surface - km ²]	Précipitations (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	Infiltration (mm)	Écoulement de surface (mm)	Prélèvement souterrain/infiltration (%)
(a)	Aisne [7 904]	776	867	564 (0,726)	155 (0,200)	58 (0,074)	4,0
	Yonne [10 695]	849	943	602 (0,709)	109 (0,128)	138 (0,163)	7,0
	Aube [4 551]	790	907	567 (0,718)	142 (0,179)	81 (0,103)	3,3
	Essonne [1 932]	652	902	525 (0,805)	118 (0,181)	9 (0,014)	21,0
	Eure [5 991]	657	845	516 (0,787)	118 (0,179)	22 (0,034)	12,3
	Marne [12 675]	802	884	572 (0,713)	138 (0,172)	92 (0,115)	4,9
	Oise [16 804]	758	862	557 (0,735)	153 (0,201)	49 (0,065)	5,7
	Seine (Paris) [43 162]	786	918	578 (0,736)	123 (0,156)	84 (0,107)	8,4
	Seine (Vernon) [63 843]	773	900	571 (0,738)	131 (0,169)	72 (0,093)	8,4
	Seine (exutoire) [75 499]	766	890	565 (0,738)	135 (0,176)	66 (0,086)	8,9
(b)	Jurassique et Crétacé inférieur [30 547]	895	895	605 (0,676)	123 (0,138)	167 (0,187)	2,1
	Crétacé supérieur et Tertiaire [64 562]	724	878	549 (0,759)	151 (0,208)	24 (0,034)	10,3
	Ensemble du système aquifère [96 204]	-	-	-	145 (-)	-	7,8

Tableau 2. Valeurs des principales composantes du bilan hydrique simulé, en mm an⁻¹. Moyennes sur la période 2003-2020, agrégées à l'échelle (a) du bassin de la Seine et de ses principaux sous-bassins versants et (b) des principaux domaines géologiques. Concernant les composantes du bilan hydrique, les valeurs entre parenthèses sont exprimées en tant que fraction des précipitations.



2. Variabilité spatiale de la pluie efficace et des taux d'infiltration dans les sols

Les précipitations efficaces (pluie moins évapotranspiration réelle) varient considérablement spatialement dans le bassin de la Seine (Figure 4d). Les taux de précipitations

efficaces les plus faibles se trouvent autour de la ville de Paris et dans le bassin de l'Eure, autour de Chartres et Dreux. La partie centrale du bassin connaît principalement des taux de précipitations efficaces inférieurs à 130 mm an⁻¹, tandis que la crête orientale jurassique est soumise à des taux supérieurs à 250 mm an⁻¹. Une situation similaire est observée dans la partie nord du bassin (Normandie, Pays de Caux), au nord de Rouen.

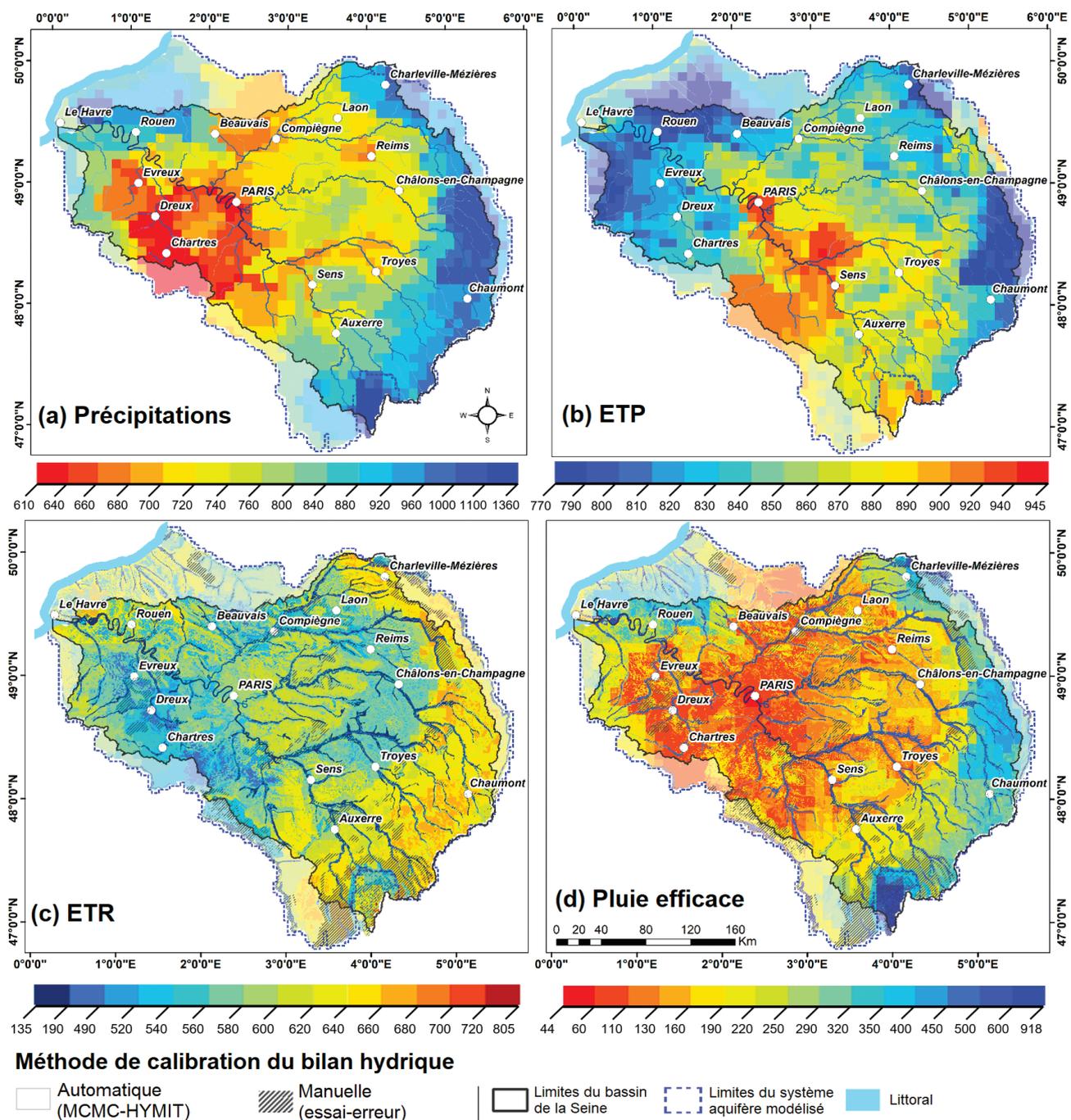


Figure 4. Distributions moyennes (a) des précipitations, (b) d'ETP, (c) d'ETR, et (d) des précipitations efficaces, sur la période 2003-2020. Grandeurs exprimées en mm an⁻¹ (extrait de Flipo et al. (2023)).

Une information clé pour les hydrogéologues et les gestionnaires des eaux souterraines est l'estimation de la recharge des aquifères. Un calcul complet du bilan hydrique à l'aide du modèle CaWaQS permet la simulation des distributions des précipitations efficaces, du ruissellement rapide de surface et des eaux infiltrées à l'échelle temporelle journalière avec une résolution spatiale élevée.

Les taux d'infiltration sur l'ensemble du bassin sont relativement modérés (inférieurs à 120 mm an⁻¹), sauf dans la région normande du « Pays de Caux » au nord de Rouen où ils peuvent atteindre 400 mm an⁻¹ et, dans une moindre mesure sur la région crayeuse (Figure 5). En particulier, les taux d'infiltration sont contrôlés par la géologie, car ils sont plus faibles dans les zones avec des précipitations efficaces élevées que dans les zones avec des précipitations efficaces plus faibles (ex : 123 mm an⁻¹ sur les unités aquifères jurassiques et crétacées inférieures et 151 mm an⁻¹ sur les unités aquifères crétacées supérieures et tertiaires (Tableau 2)).

Les zones principalement agricoles (respectivement urbaines) sont marquées par une infiltration plus élevée (respectivement plus faible) comme par exemple, la région crayeuse ou la région centrale de l'Île-de-France qui entoure la ville de Paris (Figure 5). De plus, des zones d'infiltration privilégiée apparaissent clairement sur la carte d'infiltration, avec des taux d'infiltration supérieurs à la moyenne régionale (voir, par exemple, la région du Pays de Caux ou à l'est de Chartres).

Enfin, les caractéristiques géologiques émergent également de la zonation où les secteurs dominés par des sols classiquement plus perméables et conducteurs pour l'infiltration (par exemple, les sables ou les alluvions) délimitent des zones de taux d'infiltration supérieurs à la tendance régionale. Une telle configuration est observable pour des régions telles que la Sologne ou la forêt de Fontainebleau, ou encore les sables du Thanétien et les dépôts alluviaux (cf. encart modélisation du bassin avec CaWaQS-Seine).

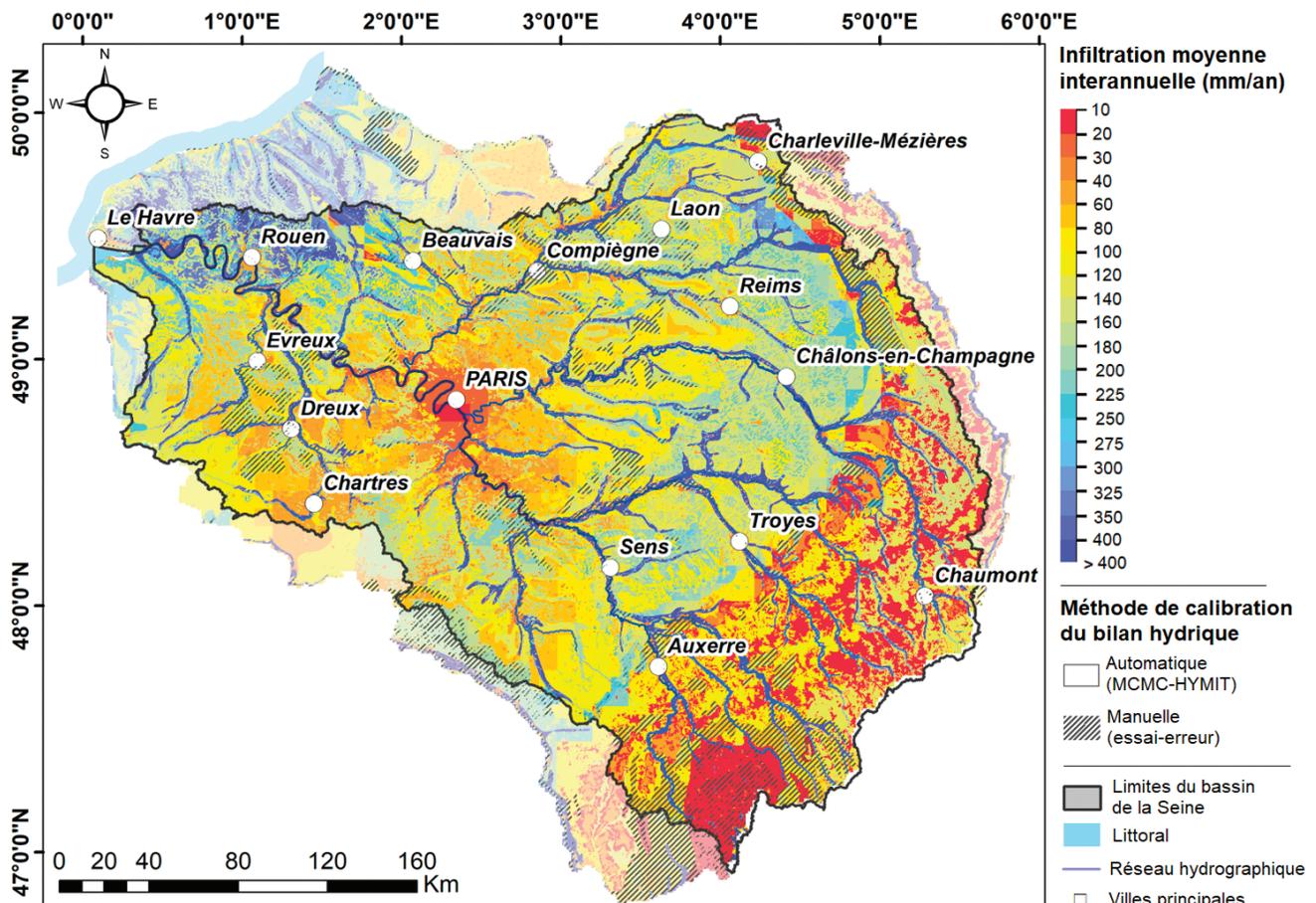


Figure 5. Taux d'infiltration annuels moyens, en mm an⁻¹, simulés par l'application CaWaQS-Seine. Moyennes sur la période 1971-2019.



3. Piézométrie à l’affleurement

La carte piézométrique moyenne pluriannuelle à l’affleurement s’appuie sur la bonne reproduction des données piézométriques par l’application CaWaQS-Seine. Globalement, les eaux souterraines s’écoulent vers l’estuaire

du bassin selon un **pendage** généralisé sud-est vers le nord-ouest. Ce plan d’écoulement est systématiquement entaillé par les grandes rivières du bassin qui s’écoulent dans des plaines alluviales qui entaillent les plateaux agricoles (Figure 6).

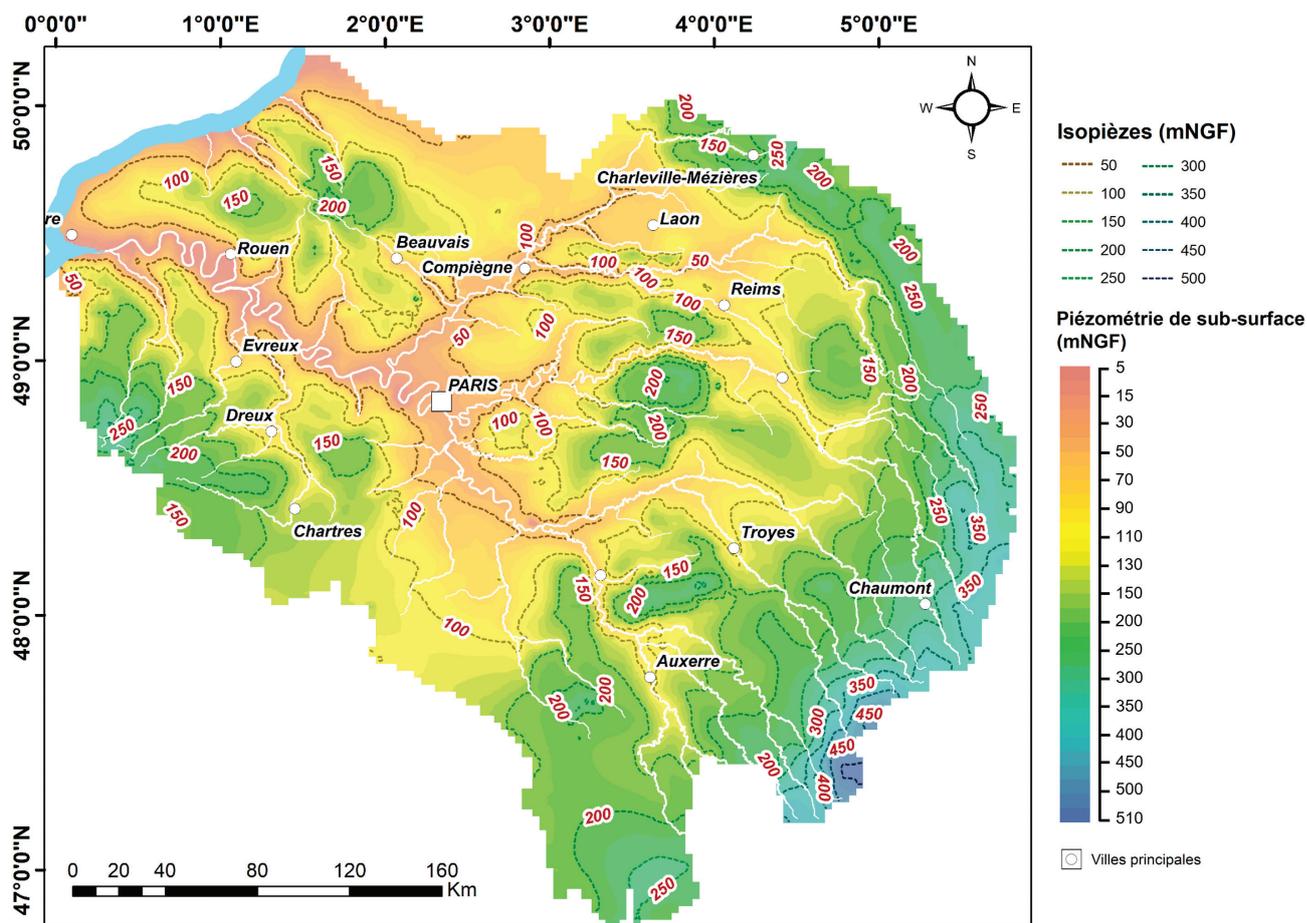


Figure 6. Cartographie des niveaux piézométriques moyens simulés des formations aquifères sub-affleurantes. Valeurs en mNGF, moyennées sur la période 2003-2020.

4. Distribution de la contribution des eaux souterraines aux débits des rivières

La contribution moyenne pluriannuelle (2003-2020) des eaux souterraines aux débits des rivières est calculée le long du réseau hydrographique principal du bassin. La contribution identifiée du compartiment souterrain au débit de la Seine à l’estuaire est ainsi de 67 %. Trois tendances spécifiques de la contribution des eaux souterraines aux écoulements de base des rivières sont mises en évidence :

- Dans le cas des linéaires les plus longs, en particulier ceux traversant à la fois les terrains jurassiques et crétacés, une augmentation amont-aval de la contribution des eaux souterraines aux débits des cours d’eau et rivières (Yonne, Seine et Marne) est identifiée ;
- Une zone amont dominée par une faible contribution des eaux souterraines aux débits des rivières, associée aux formations du Jurassique et du Crétacé inférieur (plateaux langrois et du Barrois, Champagne humide, etc.). Ainsi, les eaux souterraines contribuent à moins de 40 % des débits de la Cure, du Serein, de la Saulx, de l’Ornain et de l’Ource ;

► Une contribution très élevée, de plus de 60 %, des eaux souterraines aux écoulements de base des rivières sur les l'extension de la craie du Crétacé supérieur et des formations du Tertiaire (Beauce et Gâtinais, pays de Caux, Soissonnais, Craie champenoise, Eure, etc.) (Figure 7). C'est le cas notamment pour l'Essonne, l'Ourcq, la Vesle, la Suipe, la Vanne, l'Andelle, la Saane et l'Eaulne.

Si, d'une manière générale, la distribution des zones caractérisées par de 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. 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. De plus, 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 (Gallois et Flipo, 2024).

Les rivières fortement affectées par les pompages en aquifère sont concentrées, pour la majeure partie, sur l'axe Seine moyen et aval, à proximité des plus gros prélèvements AEP. Les pompages ont donc deux principaux effets sur les échanges nappe-rivière. D'une part, ils diminuent l'alimentation des rivières par les aquifères, et d'autre part, augmentent la ré-infiltration des eaux de la rivière vers la nappe. En moyenne, la diminution de l'exfiltration des eaux souterraines, sur l'ensemble du territoire, est environ de 17 m³ s⁻¹, et l'augmentation de l'infiltration des eaux des rivières vers les aquifères de 2 m³ s⁻¹, soit une diminution du débit net échangé de l'ordre de 19 à 20 m³ s⁻¹. Hormis la Seine amont, les pompages ont, en moyenne, un impact relativement faible (inférieur à 1 L s⁻¹ km⁻¹) sur les échanges nappe-rivière dans les parties crayeuses du bassin. Cependant, cela n'est pas le cas dans la partie Tertiaire du bassin, et notamment dans le secteur du Champigny et dans les boucles de la Seine à l'aval de Paris, où les pompages contribuent à drainer plus de 10 L s⁻¹ km⁻¹ (Gallois et Flipo, 2024).



Prélèvements et recharge aquifère par masses d'eau souterraine

La recharge moyenne pluriannuelle a été calculée à l'échelle de chaque masse d'eau souterraine du bassin (MESO). Les zones de recharge les plus faibles, inférieures à 125 mm an^{-1} , sont situées au centre du bassin, sur la partie Tertiaire ainsi qu'au sud-est, sur les terrains en amont d'âge Jurassique. Sur la période d'analyse 1988-2022, la recharge moyenne est d'environ 151 mm an^{-1} . Elle est quasiment deux fois plus faible en année sèche (64 mm sur 1995-1996), et doublée en année humide (320 mm sur 2000-2001). Cette recharge, comparée aux intensités des prélèvements souterrains (Figure 8b), issues des données AESN et BNPE, sont ici rassemblées sous la forme de ratios indicateur de pression anthropique (Figure 8c). En moyenne, les prélèvements totaux représentent 8 % de la recharge inter-annuelle. Ceux-ci, de l'ordre de $10^9 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$, ne variant qu'assez peu d'une année à l'autre, la pression exercée est en opposition directe de phase avec les variations de recharge. Cet indice de pression évolue ainsi entre 4 et 20 %, d'un contexte humide à très sec. Spatialement, cette pression est la plus significative pour les masses d'eau du centre du bassin, cumulant à la fois prélèvements intenses et relativement faible recharge (GG092 (Beauce), HG102 (Mantois-Hurepoix) et HG103 (Brie, Champigny)).

Par ailleurs, bien que bénéficiant de taux de recharge très supérieurs à la moyenne du centre du bassin (Figure 8a), les masses d'eau alluviales concentrent de très forts prélèvements AEP, d'où des pressions significatives identifiées localement (Figure 8c). Il est cependant à noter que l'indicateur de pression des plaines alluviales (HG001 à HG008) est pessimiste, car il ne considère pas les apports des aquifères régionaux à l'aquifère alluvial. En effet, l'analyse détaillée des flux d'eau échangés verticalement entre formations aquifères du bassin a mis en exergue un flux d'alimentation dominant depuis les aquifères régionaux vers les formations alluviales sus-jacentes (Gallois et Flipo, 2024 ; Flipo et al., 2023). Ces apports ascendants, de l'ordre de $77 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, se révèlent, pour ces masses d'eau, environ deux fois plus importants que ceux occasionnés par les lames infiltrées depuis la base du compartiment de sol ($34 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). La prise en compte de ce flux dans le calcul de l'indicateur de pression est ainsi susceptible de faire évoluer notre vision des pressions anthropiques en **plaine alluviale**.

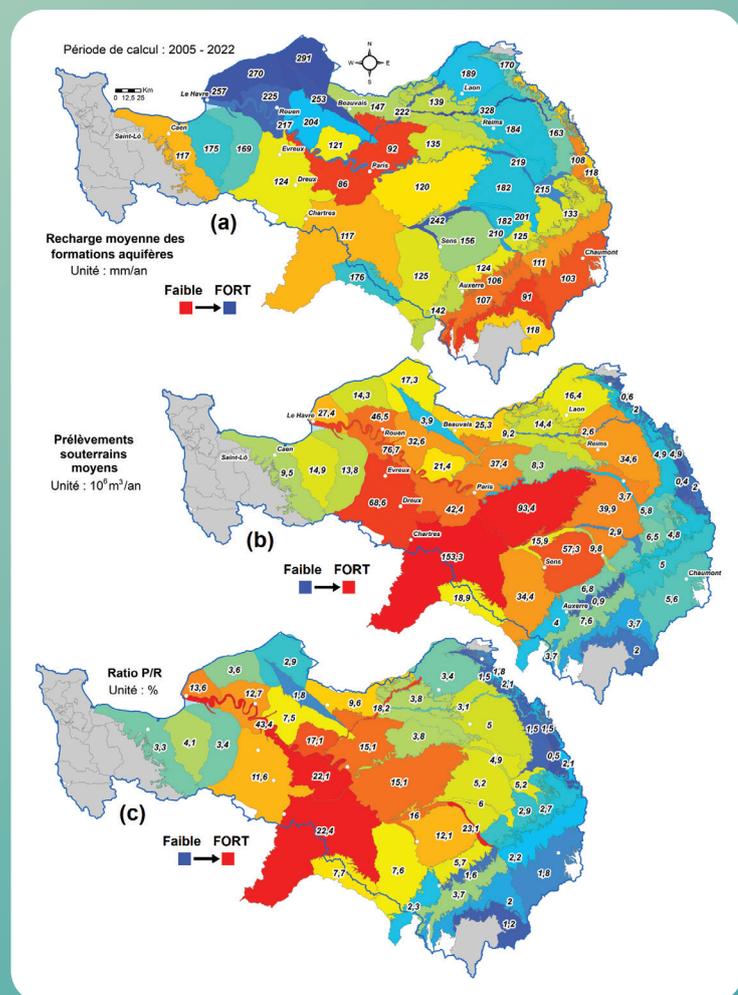


Figure 8. Agrégations à l'échelle des masses d'eau souterraine (MESO - période 2005-2022)

(a) recharge moyenne inter-annuelle (R) des formations aquifères, par alimentation via infiltration depuis la sub-surface sur leurs impluviums uniquement. Valeurs moyennes en mm an^{-1} .

(b) Prélèvements souterrains moyens P, en $10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$.

(c) Indices moyens P/R de pression anthropique, exprimés en %.

Influence des prélèvements sur les échanges nappe-rivière

Le comportement pluri-annuel de l'ensemble du réseau simulé identifie une très large portion soumise à un régime dominant d'exfiltration depuis le système aquifère vers les rivières. À hauteur de la Seine à Vernon, le débit moyen d'apport net provenant des aquifères vers les rivières est de $22,3 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-1}$. En moyenne inter-annuelle, seuls environ 4 % du linéaire, soit 550 km, sont le siège d'une infiltration marquée depuis les rivières (seuil de débit linéique net $< -2 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-1}$).

La cartographie du débit net linéique (*i.e.* différence entre débit exfiltré et infiltré, rapportée à la longueur de masse d'eau cours d'eau simulée), met en exergue deux secteurs d'Île-de-France : le tracé de l'Yerres et de ses affluents directs, d'une part, pour lequel les intensités moyennes annuelles d'exfiltration et d'infiltration apparaissent comparables, entre 1 et $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, et le secteur des bassins de l'Yvette, de la Bièvre et de l'Orge, d'autre part.

Les pompages en aquifère ont un effet sur les échanges nappe-rivière en diminuant le débit net linéique échangé dans un système non perturbé qui exclut tout pompage. Les linéaires identifiés par des teintes variant de l'orange au marron sur la figure ci-dessous, voient l'intensité du débit exfiltré depuis le système aquifère diminuer, tout en conservant un régime d'exfiltration dominant, après introduction des prélèvements. De façon plus minoritaire, les prélèvements induisent localement un changement de régime d'exfiltration en infiltration, au niveau des masses d'eau matérialisées en traits épais noirs.

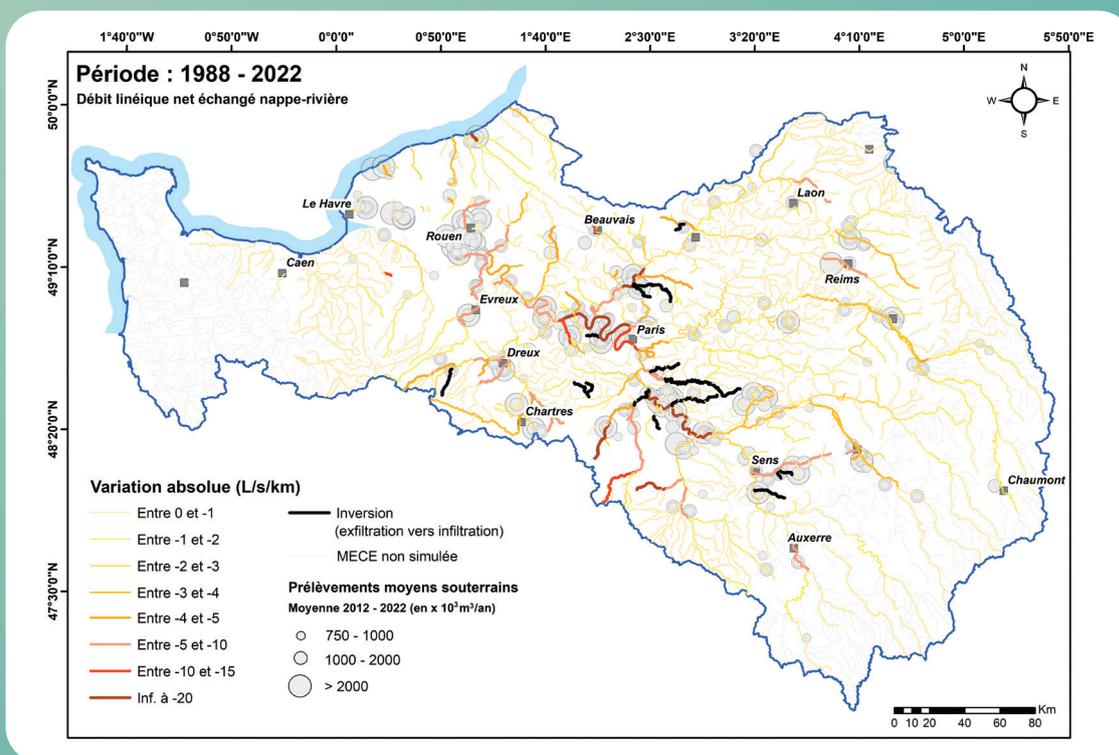


Figure 9. Impacts des prélèvements souterrains sur les échanges nappe-rivière. Impacts caractérisés en termes de variation absolue du débit net linéique moyen inter-annuel (1988-2022), par rapport à une situation naturalisée. Valeurs en $\text{L s}^{-1} \text{ km}^{-1}$, représentées à l'échelle des masses d'eau modélisées. Une valeur négative témoigne d'une diminution de la contribution du souterrain au réseau hydrographique. Les linéaires identifiés en noir subissent un changement de régime dominant, d'exfiltration vers infiltration. Les cercles vides identifient la localisation des plus importants points de prélèvements (données BNPE, 2012-2022). Pompages inférieurs à $750\,000 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$ non représentés. D'après Gallois et Flipo (2024).





CHAPITRE 2



Fonctionnement du bassin au début du XX^e siècle

L'application CaWaQS-Seine sur l'ensemble du bassin a également permis de caractériser la trajectoire hydrologique du bassin de la Seine au cours du XX^e, soumis à une évolution climatique ainsi qu'à une évolution des pressions anthropiques. Cette trajectoire est illustrée d'un côté, par l'évolution du bilan hydrologique complet du bassin d'une part, et d'un autre côté par l'évolution du soutien du réseau hydrographique par les aquifères.

Ce travail met en exergue une pression croissante s'exprimant au cours du XX^e siècle sur la ressource en eau souterraine, menant aux principales évolutions suivantes :

- › En moyenne annuelle, des déficits accrus en précipitations et en recharge aquifère ;
- › Une baisse généralisée des stocks d'eau souterraine, via une diminution des niveaux piézométriques ;
- › Des diminutions des volumes d'eau d'origine souterraine contribuant à l'alimentation du réseau hydrographique, et plus particulièrement en période d'étiage qui voit sa durée s'allonger.

Reconstitution des forçages hydroclimatiques

Des séries climatiques récemment reconstituées (Bonnet, 2018) ont été utilisées, fondées sur une réanalyse atmosphérique à long terme réalisée dans le projet NOAA 20CRv2C⁴ (Compo et al., 2011). Cette réanalyse a ensuite été désagrégée (Bonnet et al., 2017) selon une approche statistique (Boé et al., 2007; Dayon et al., 2015) puis projetée à l'échelle de la grille SAFRAN, d'un pas spatial de 8 km. Cette méthode intègre, 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. Elle produit des chroniques de précipitations et d'ETP depuis le milieu du XIX^e siècle (Figure 10), en cohérence avec les réanalyses SAFRAN, utilisées pour reconstituer le bilan hydrologique du bassin sur la période 2003-2020.

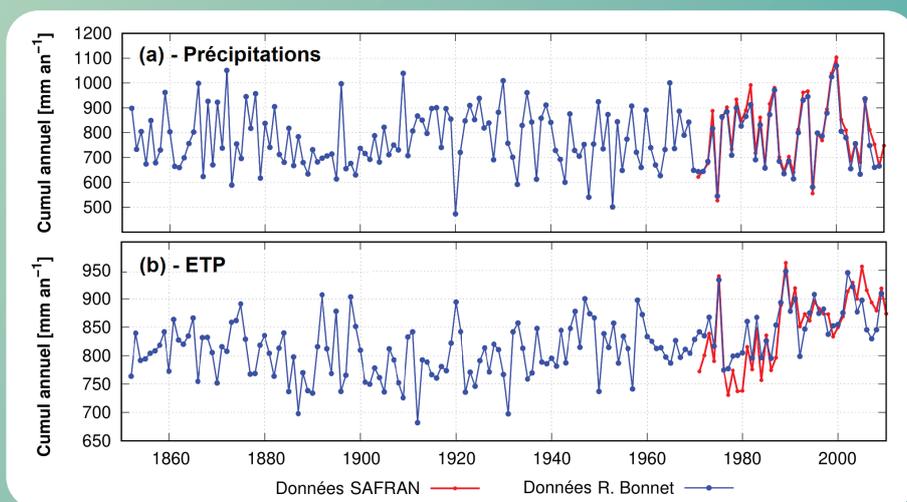


Figure 10. Cumuls annuels (mm) comparés (a) de précipitations et (b) d'ETP (méthode de Penman), entre d'une part, les données de reconstitution historique issues de Bonnet et al., 2018 (courbes bleues, 1850-2010) et, d'autre part, les données SAFRAN (courbes rouges, 1970-2010). Données agrégées dans les limites du bassin topographique de la Seine à son exutoire.

1. Modifications des régimes hydrologiques

Évolution des débits pluriannuels

Les débits pluriannuels moyens ont eu tendance à diminuer de quelques pourcents au cours du XX^e siècle (Tableau 4). Seul le bassin de l'Oise fait exception, puisque l'Aisne et l'Oise ont vu leur débit pluriannuel évoluer à la marge de 1 à 2 %, ce qui compte tenu des incertitudes n'est pas significatif. Le débit pluriannuel de la Seine d'amont en aval a quant à lui diminué d'environ 5 %.

Une évaluation des évolutions saisonnières des débits aux stations de contrôle est également présentée. Elle permet de visualiser l'évolution du régime hydrologique⁵ de ces

rivières (Figure 12). Elle met en avant l'augmentation des débits hivernaux et la diminution des débits d'étiage depuis le début des années 1900, ainsi que l'augmentation de la durée de ce dernier.

Afin de mieux préciser l'évolution du fonctionnement des rivières en période de bas débit, le QMNA5⁶ est calculé. 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. Les étiages du bassin de la Seine se sont ainsi renforcés au cours du XX^e siècle, puisque tous les QMNA5 subissent une diminution variant entre 5 et 18 % (Tableau 5). Pour la Seine d'amont en aval, le QMNA5 a ainsi diminué d'environ 10 %. Même l'Aisne et l'Oise, qui présentaient une relative stabilité de leur débit pluriannuel, sont touchées par cette diminution, pouvant atteindre 8 % pour l'Oise à Creil.

4 National Oceanic and Atmospheric Administration

5 Le régime hydrologique d'une rivière est représenté par la distribution des débits mensuels moyens calculés sur une base pluriannuelle.

6 Débit (Q) mensuel (M) minimal (N) de chaque année civile (A), associé à une période de retour quinquennale.

Reconstitution de l'occupation du sol

Dans le cadre de la mise en œuvre de simulations rétrospectives, les évolutions de l'occupation du sol pour les trois principaux types de zones recensées sur le bassin (*i.e.* urbaines, arables et forestières) ont été intégrées :

- › 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^e siècle, reconstituées à partir de la densité de population (Couturier et al., 2017). Ces données ont été localement affinées sur le secteur de Paris et son agglomération (cf. Figure 11), en mobilisant des données locales mises à disposition par l'IAU (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme) de la région Île-de-France. Elles permettent de quantifier avec précision l'extension significative des surfaces urbaines au cours du temps et ses conséquences sur le bilan hydrique local ;
- › 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^e siècle étant, par ailleurs, négligeables (Koerner et al., 2000), les données associées à 1950 ont été retenues dans le cadre de la simulation historique ;
- › Les proportions complémentaires de surfaces urbaines et forestières ont été ajustées au détriment ou au bénéfice des évolutions en terres arables sur l'ensemble du territoire.

Simulation / Forçage climatique	Période d'analyse	Occupation des sols	Prélèvements souterrains
Reconstitution historique	1917-1934	Estimée (données INSEE, IAU, AGRESTE)	Aucun
Temps présent	1993-2010	Actuelle (données CLC 2012)	Actuels (données AESN)

Tableau 3. Ensemble des conditions retenues de simulation pour l'analyse de l'évolution long-terme de l'hydrosystème Seine.

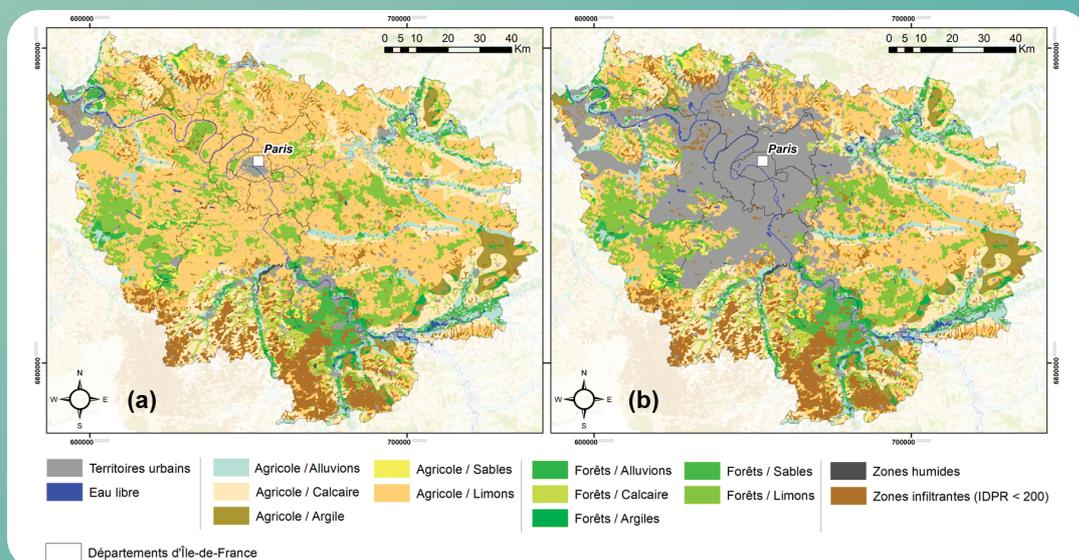


Figure 11. Illustration comparée de l'occupation des sols considérée, à l'échelle de la région Île-de-France. (a) dans le cas de la simulation historique et (b) de la simulation de référence.



	Débit début XX ^e (m ³ s ⁻¹) 1917-1937	Débit fin XX ^e (m ³ s ⁻¹) 1993-2010	Variation (%)	Surface BV (km ²)
L'Aire à Chevrières	10,45	10,36	-0,8 %	1001
L'Aisne à Givry	21,38	21,60	1,0 %	2942
L'Aube à Arcis	29,13	27,27	-6,4 %	3493
L'Yonne à Gurgy	47,86	44,12	-7,8%	3752
La Marne à Gournay	93,47	91,42	-2,2 %	12 575
L'Oise à Creil	74,43	75,76	1,8 %	14 045
La Seine à Courtenot	16,01	16,01	0,0 %	2313
La Seine à Pont	57,97	55,26	-4,7 %	8668
La Seine à St-Fargeau	176,92	163,61	-7,5%	25851
La Seine à Austerlitz	287,65	269,73	-6,2 %	43 565
La Seine à Vernon	387,49	368,86	-4,8 %	63 848

Tableau 4. Évolution des débits (m³ s⁻¹) en certains points du bassin de la Seine, entre le début et la fin du XX^e siècle.

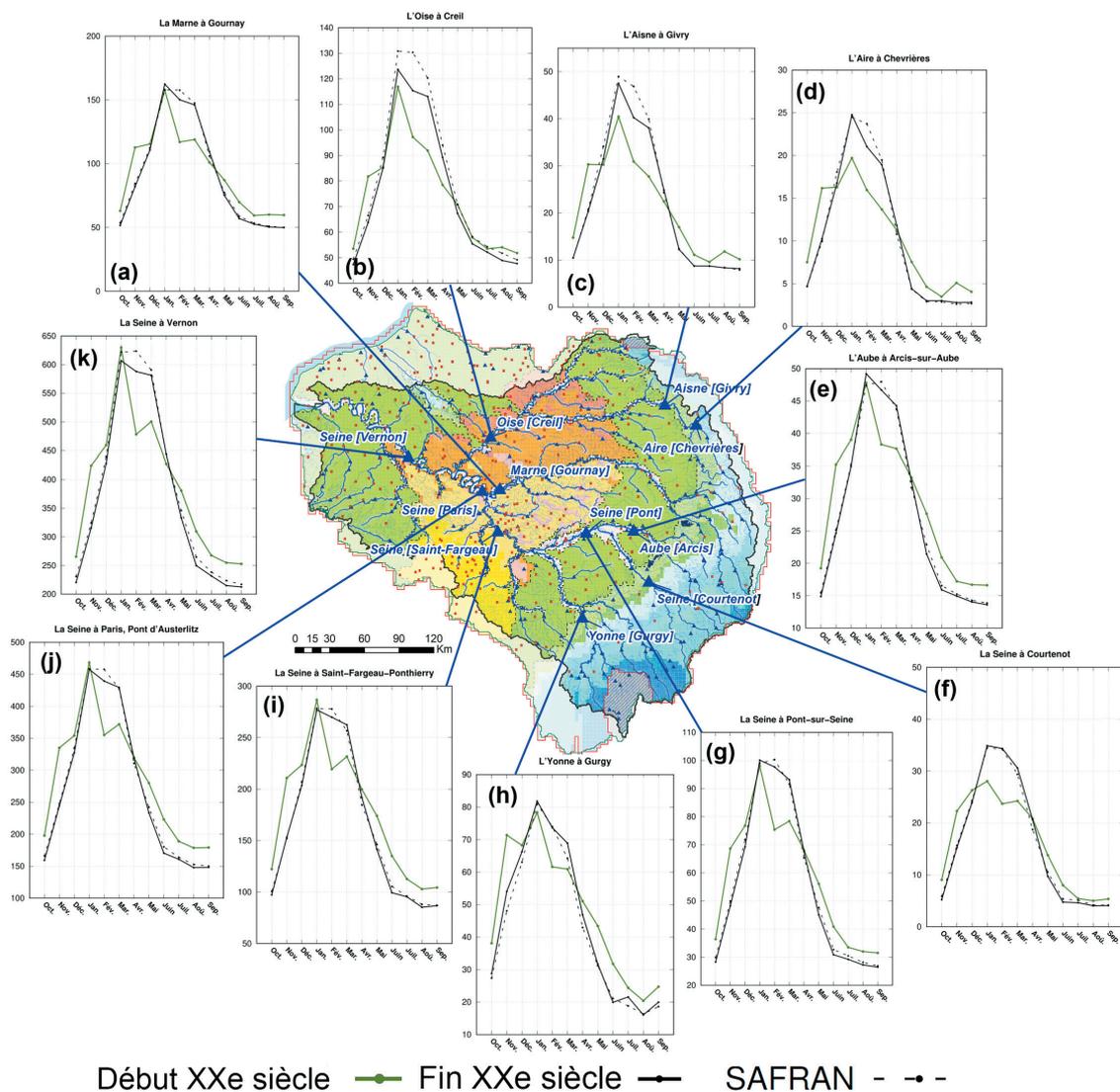


Figure 12. (a à k) Régimes hydrauliques (débits moyens mensuels inter-annuels en rivière, exprimés en m³ s⁻¹), calculés dans le cas de la simulation de référence (courbes noires) et de la simulation historique (courbes vertes) pour quelques stations distribuées le long du linéaire hydrographique principal. Les profils en pointillés rappellent les évolutions obtenues sous forçage SAFRAN. Les stations représentées correspondent à celles listées en tableau 4.

Station	Diminution du QMNA5 au cours du XX ^e (%)	Surface BV (km ²)
L'Aire à Chevrières	-20,0	1001
L'Aisne à Givry	-5,1	2942
L'Aube à Arcis	-5,7	3493
L'Yonne à Gurgy	-18,2	3752
La Marne à Gournay	-7,8	12 575
L'Oise à Creil	-8,2	14 045
La Seine à Courtenot	-11,7	2313
La Seine à Pont	-7,2	8668
La Seine à St-Fargeau	-15,4	25851
La Seine à Austerlitz	-12,2	43 565
La Seine à Vernon	-9,8	63 848

Tableau 5. Variations relatives de débit caractéristique QMNA5 (%). Localisations des stations associées illustrées en Figure 12.

Évolution long-terme des durées d'étiage

Les durées moyennes des étiages ont été déterminées statistiquement pour les simulations en début et fin de XX^e siècle. Le Débit Caractéristique d'Étiage (ou DCE) a été retenu comme seuil descripteur des périodes d'étiage. De façon simple, le DCE_x correspond au débit égalé ou dépassé x % du temps au cours d'une année. Ainsi, le DCE₈₀ ici choisi représente en un point donné du réseau, un seuil de débit dépassé environ 290 jours par an. 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), la durée maximum, définie par le plus grand nombre de jours consécutifs avec un débit strictement inférieur au DCE₈₀, a été identifiée. Pour chaque station, la moyenne interannuelle est reportée en Figure 13a, 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. Les variations moyennes de durées, en jours, de la période d'étiage pour chaque station, relativement à la situation de référence, sont évaluées en 40 stations du bassin (Figure 13b). Selon notre critère retenu, la durée d'étiage a globalement doublé au cours du XX^e siècle, passant de 25 à 50 jours.

2. Évolution de la piézométrie des formations aquifères affleurantes

L'application CaWaQS-Seine permet d'estimer que la **piézométrie** moyenne à l'affleurement du bassin de la Seine a diminué en moyenne de 2,8 m au cours du XX^e siècle (Figure 14b). Cette diminution moyenne n'est pas uniformément répartie puisque les plus fortes diminutions, pouvant atteindre 6 m, sont présentes en Normandie ainsi que dans la frange orientale du bassin couvrant les formations jurassiques, alors que le secteur central tertiaire serait plutôt à l'équilibre, avec quelques rares territoires bénéficiant d'une légère augmentation des niveaux piézométriques, notamment dans la plaine alluviale de la Bassée, ainsi que dans les territoires des Laonnois, du Soissonais, de Champagne Nord et de la Beauce intérieure.



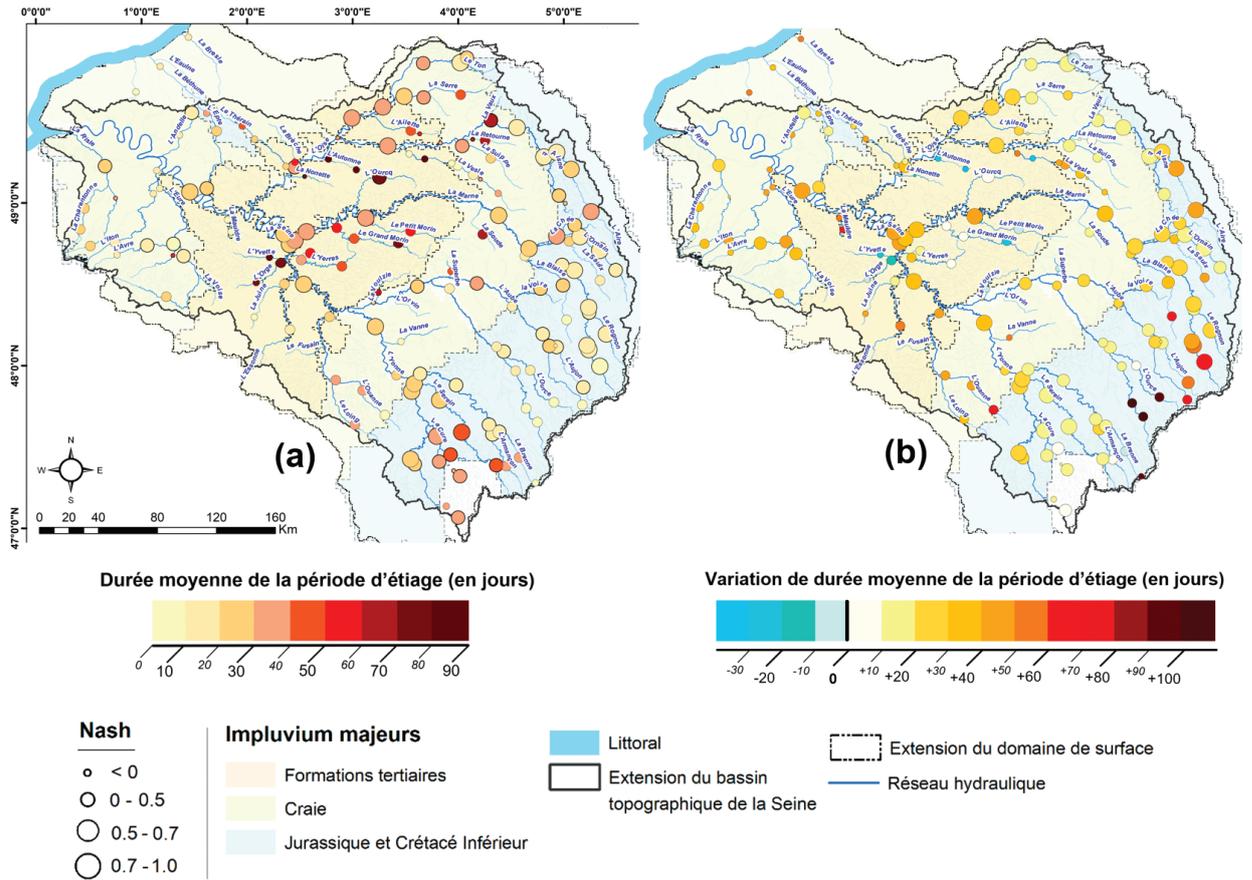


Figure 13. (a) Durées moyennes d'étiage simulées, exprimées en jours, en fin de XX^e siècle. (b) Variations moyennes de durées (jours) de la période d'étiage entre le début et la fin du XX^e siècle (valeur > 0 : allongement, valeur ≤ 0 : raccourcissement). Sur chaque figure, la taille du figuré ponctuel correspond à la valeur du critère statistique de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970), obtenue à l'issue de la plus récente recalibration de l'application, sous forçage SAFRAN.

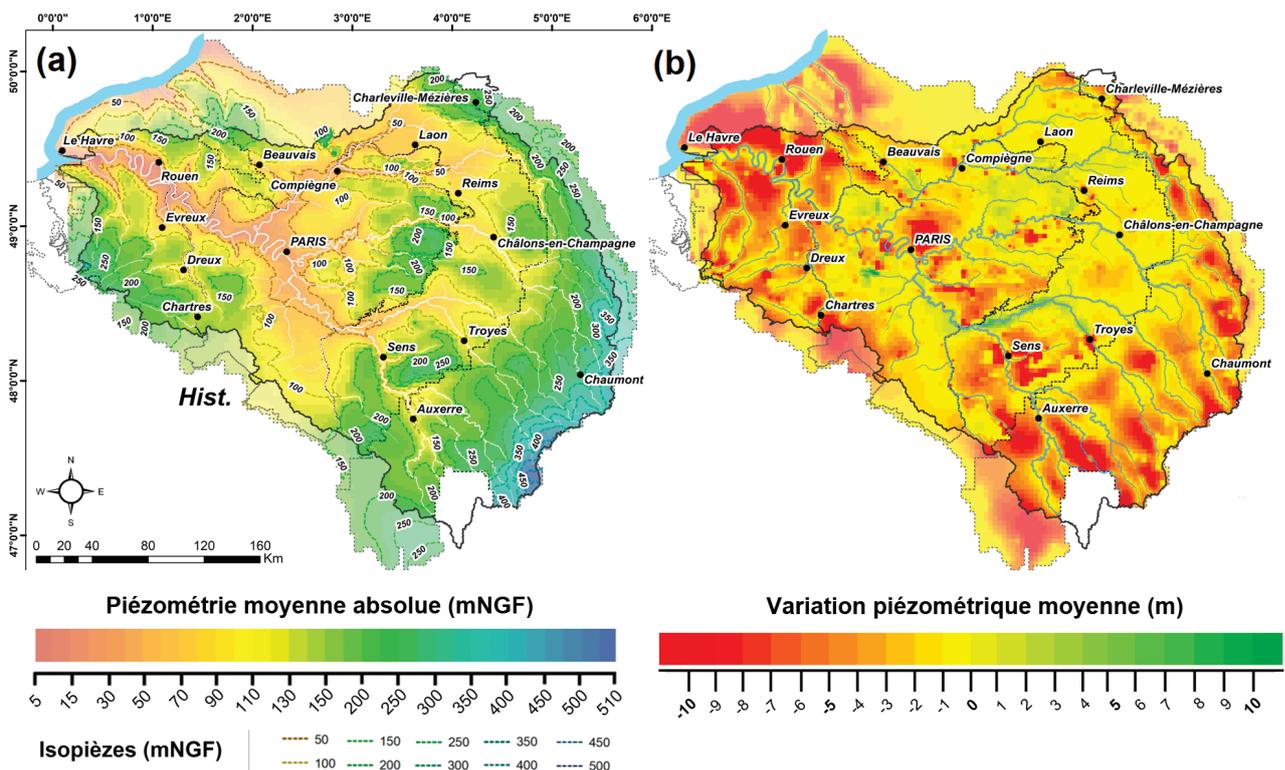


Figure 14. (a) Piézométrie affleurante moyenne simulée (mNGF) au début du XX^e siècle (« simulation historique » - 1917-1937 - Tableau 3). (b) Variation piézométrique moyenne simulée au cours du XX^e siècle, en mètre.



3. Contributions spatialisées du système aquifère au réseau hydrographique

La variabilité temporelle de la contribution des aquifères aux débits des rivières a été précisée à l'échelle mensuelle pour quelques confluences majeures du réseau. Au début du XX^e siècle, les contributions des aquifères au débit des rivières étaient globalement plus élevées en intensité qu'aujourd'hui, et ce, tout au long de l'année pour de nombreuses stations du bassin de la Seine

comme le montrent les évolutions des régimes mensuels d'alimentation des rivières par les eaux souterraines (Figure 15). La diminution de la contribution des eaux souterraines au débit de la Seine à Vernon atteint quasiment 13 % durant ce siècle. Cette diminution de la contribution des aquifères aux débits des rivières a ainsi diminué en valeur absolue au cours du siècle d'environ 15 % dans l'ensemble du bassin (Tableau 6), pouvant atteindre 25 % dans la quasi-totalité des amonts du réseau, ce qui traduit un stress croissant sur ces linéaires fragiles du réseau.

Confluence	VR (%)	Confluence	VR (%)	Confluence	VR (%)
Aube › Seine	-5,6	Marne › Seine	-9,6	Aire › Aisne	-21,7
Yonne › Seine	-13,7	Oise › Seine	-8,3	Eure › Seine	-17,1
Essonne › Seine	-16,2	Aisne › Oise	-7,8	Seine (exutoire)	-12,7

Tableau 6. Variations relatives (VR) au cours du XX^e siècle du débit moyen de contribution du système aquifère au réseau hydrographique pour des singularités majeures du réseau principal (confluences ou exutoire).

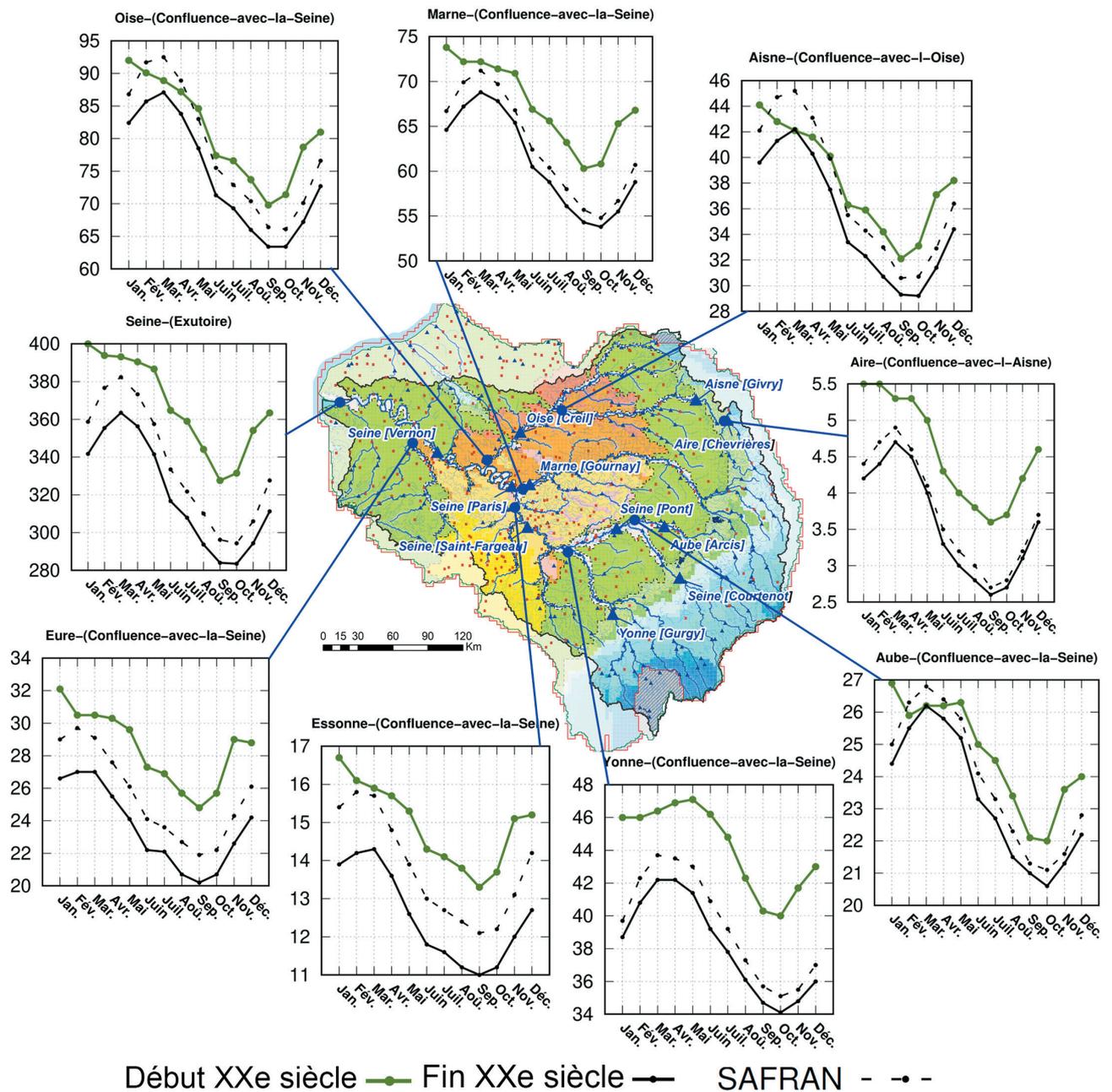


Figure 15. Profils, en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, des régimes de contribution du système aquifère au réseau hydrographique principal, déterminés en moyenne sur les durées des périodes d'analyse associées à chaque simulation (Tableau 3). Les courbes noires, en traits pleins et pointillés, précisent respectivement les régimes obtenus en fin de XX^e siècle pour un modèle forcé par la réanalyse (voir encart ci-contre) et par les données de référence SAFRAN. Chaque graphique cible un point de confluence majeure du réseau ou son exutoire.

Évolutions printanières et estivales des débits des rivières

La Figure 16 propose une évaluation spatialement continue des variations (%) de débits spécifiques saisonniers, printaniers et estivaux. Les débits spécifiques permettent de s'abstraire des effets de taille, et marquent ainsi l'intensité des phénomènes dans les territoires. Le marqueur de cette intensité est la variation en pourcentages des débits spécifiques. Sans surprise, il apparaît dès lors

une diminution nette des débits spécifiques printaniers (Figure 16a) et estivaux (Figure 16b) sur l'ensemble du réseau hydrographique de la Seine au cours du XX^e siècle. L'intensité de cette diminution de débit varie le long de la Seine en été de l'ordre de 20 % en amont jusqu'à 10 % en aval. Cet assèchement estival est particulièrement marqué sur les petites rivières de la frange orientale du bassin, où les diminutions du débit estival peuvent atteindre plus de 30 % au cours du XX^e siècle. C'est également le cas dans les territoires amont de l'Eure et de l'Essonne.

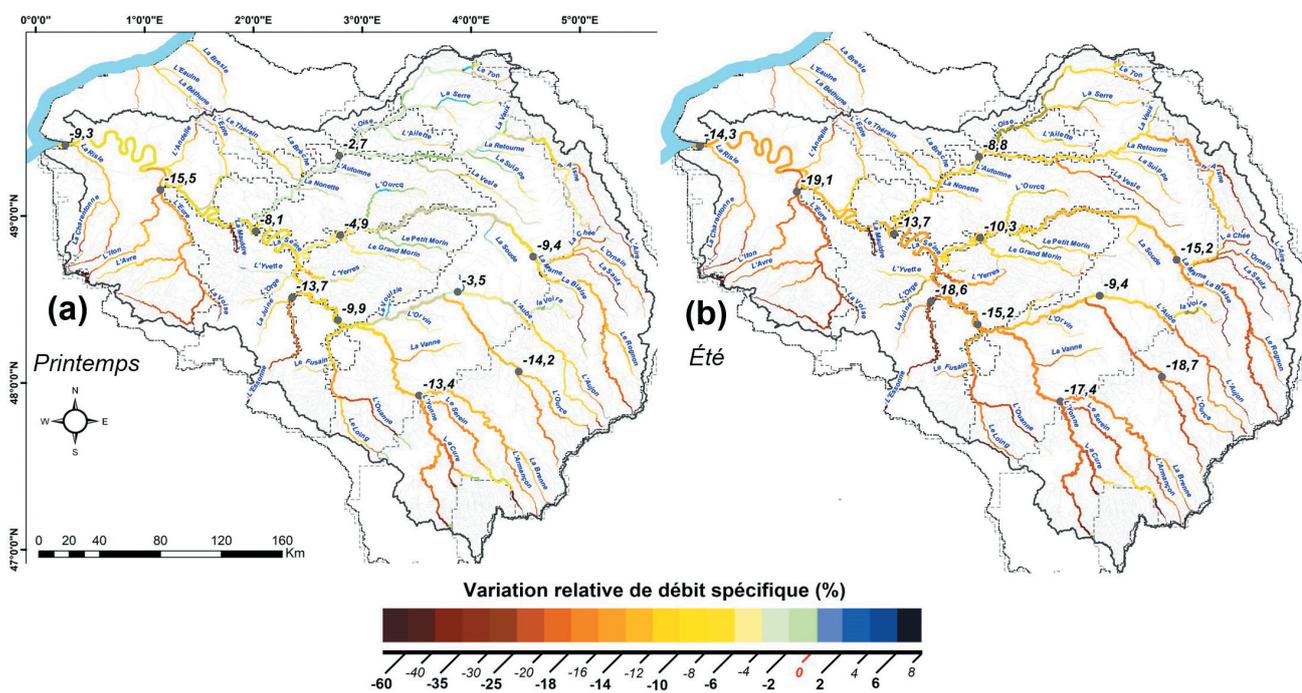
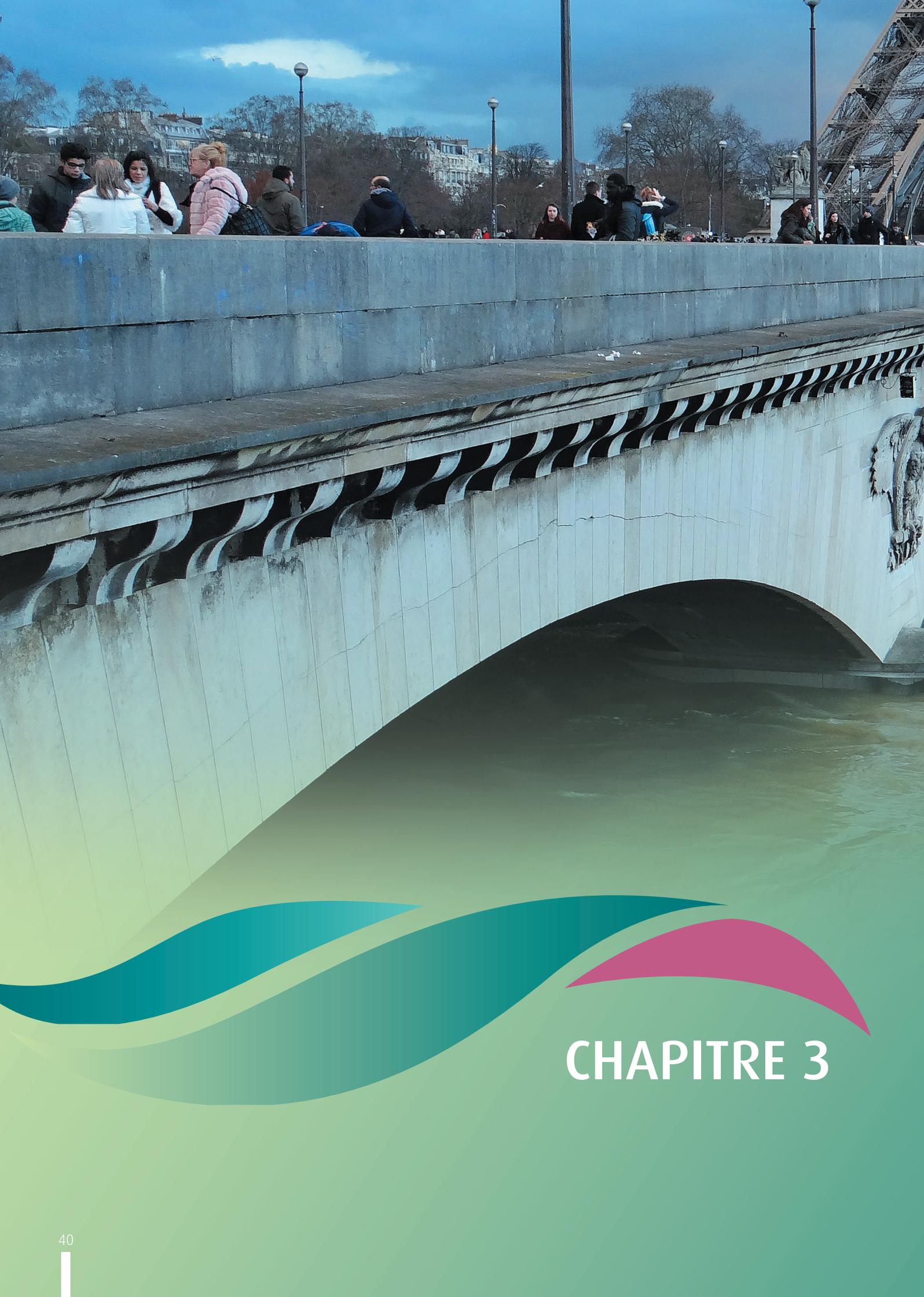


Figure 16. Variations relatives (%) du débit spécifique en rivière au cours du XX^e siècle. Moyennes saisonnières : (a) printemps et (b) été. Variations des débits simulés sous temps présent, exprimées par rapport à la simulation historique.





CHAPITRE 3



Impacts du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique du bassin de la Seine

L'étude des impacts du changement climatique sur un bassin versant régional comme le bassin de la Seine nécessite de mobiliser une chaîne méthodologique complexe, avec des incertitudes à de nombreux niveaux, qui se répercutent sur les résultats. Ces incertitudes ne sont pas toutes caractérisées ici, mais nous produisons un ensemble de trajectoires contrastées représentant des évolutions plausibles de l'hydrologie du bassin de la Seine, permettant de tester la vulnérabilité du bassin à différents types d'évolutions.

Les changements hydrologiques sont généralement relativement faibles au niveau annuel sur le bassin de la Seine en raison de sa situation dans une zone de transition. Le signe des changements annuels est souvent incertain. Cependant, des contrastes saisonniers importants existent, avec généralement plus d'eau disponible en surface en hiver et moins en été. Le stockage naturel par les aquifères de l'eau en hiver et le déstockage en été joue un rôle majeur dans l'évolution des débits en été et des sécheresses. Les changements estivaux sont souvent plus marqués sur l'est du bassin, où les aquifères jouent un rôle plus faible de soutien d'étiage.

Un résultat majeur des travaux menés est que les mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre sont essentielles pour limiter les impacts du changement climatique. Pour le bassin de la Seine, le respect des accords de Paris permettrait de stabiliser le régime hydrologique des territoires du bassin de la Seine et les ressources en eau souterraine à la situation actuelle (1993-2010). Cependant, les trajectoires ne sont pas linéaires et une forte variabilité décennale naturelle, intrinsèque au système climatique, existe dans le bassin de la Seine. Elle peut temporairement masquer ou amplifier le signal du changement climatique sur les débits. Elle doit être prise en compte dans les stratégies d'adaptation au changement climatique.

Pour le scénario pessimiste d'un développement économique débridé basé sur les hydrocarbures, des impacts du changement climatique sur les extrêmes sont visibles, avec des sécheresses potentiellement bien plus sévères. Des augmentations des débits intenses sont également possibles, et il n'est donc pas impossible qu'il faille s'adapter à ces deux types d'impacts.

1. Etudier les impacts du changement climatique à l'échelle du bassin versant : une chaîne méthodologique complexe

Méthodologie générale

Les résultats de projections climatiques globales constituent le point de départ pour étudier les impacts du changement climatique. Ces projections se fondent sur des modèles climatiques couvrant l'intégralité du globe. Ils représentent numériquement les différentes composantes du système climatique et leurs interactions. Ils couplent notamment un modèle de circulation générale atmosphérique, similaire aux modèles utilisés pour la prévision météorologique, un modèle de circulation générale océanique, un modèle de surface continentale pour notamment calculer les bilans d'eau et d'énergie à la surface, et un modèle pour représenter la glace de mer, pour ne citer que les principales composantes.

Ces modèles climatiques globaux permettent de projeter l'évolution du climat planétaire au cours du XXI^e siècle et au-delà, en réponse à différents scénarios possibles

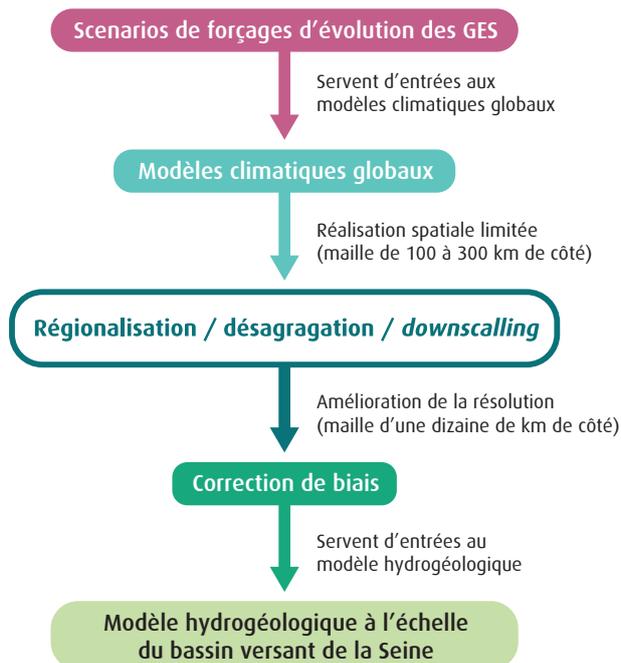


Figure 17. Chaîne de modélisation pour la simulation des impacts hydrologiques d'origine climatique. GES : Gaz à Effet de Serre

d'évolution des principaux facteurs d'origine humaine pouvant impacter le climat. On parle de « **forçages anthropiques** » pour désigner ces facteurs. Il s'agit notamment des gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, le méthane ou le protoxyde d'azote, et des aérosols d'origine humaine tels que les aérosols sulfatés. Ces modèles permettent également de simuler le climat passé, en général depuis les années 1850, en utilisant les évolutions observées des facteurs anthropiques et naturels pouvant affecter le climat.

Les scénarios d'évolution future des forçages anthropiques correspondent à différentes trajectoires socio-économiques contrastées possibles du monde. Par exemple, certaines trajectoires considèrent un fort développement économique au cours du XXI^e siècle toujours basé sur les énergies fossiles. D'autres considèrent, au contraire, des dynamiques sociétales plus favorables pour le climat, pouvant notamment permettre de répondre aux objectifs des Accords de Paris sur le climat, visant à maintenir le réchauffement global à moins de 2 °C par rapport à la période pré-industrielle.

Grâce aux modèles climatiques globaux et à ces différents scénarios d'évolution des forçages anthropiques, des projections de l'évolution possible du climat sur l'intégralité de la planète sont obtenues. À l'heure actuelle, en raison du coût de calcul de ces modèles, leur résolution spatiale est limitée. Typiquement, ils fournissent des données climatiques sur des mailles de 100 à 300 km de côté. Cette résolution est bien entendu insuffisante pour représenter les variations spatiales du climat à l'échelle de la France, et encore plus à l'échelle d'un bassin versant français comme celui de la Seine.

C'est pour cette raison qu'avant de pouvoir étudier les impacts du changement climatique sur l'hydrologie d'un bassin versant, une étape supplémentaire de régionalisation (on parle également de **désagrégation** ou de *downscaling* en conservant le terme anglais) est nécessaire (Figure 17). Cette étape vise à d'obtenir des informations climatiques à fine échelle spatiale⁷ sur le domaine d'intérêt, à partir des données à basse résolution des projections climatiques globales. L'étape de régionalisation peut se fonder sur des modèles climatiques régionaux, simulant l'évolution du climat avec une plus haute résolution uniquement sur un domaine réduit d'intérêt (par exemple l'Europe) à partir

des données des modèles climatiques globaux imposées à leurs frontières. On parle alors de régionalisation dynamique. L'étape de régionalisation peut aussi se baser sur des méthodes statistiques, utilisant les relations observées entre les variables climatiques locales à fine échelle nécessaires à la modélisation hydrologique et les variables climatiques à grande échelle.

Comme les données climatiques à fine échelle obtenues après régionalisation peuvent encore être biaisées (*i.e.* présenter des différences climatologiques significatives par rapport aux observations sur une période commune), des méthodes statistiques de correction de biais sont souvent mises en œuvre afin de corriger ces biais.

Finalement, les données climatiques ainsi obtenues, à haute résolution et débiaisées, peuvent servir en entrée d'un modèle hydrologique, pour projeter l'évolution des débits des rivières, et possiblement de la hauteur des nappes, en réponse aux évolutions potentielles du climat (Figure 17).

La démarche du PIREN-Seine

Les projections hydrologiques sur le bassin de la Seine réalisées dans le cadre de la phase 8 du programme PIREN-Seine se basent sur la plateforme de modélisation hydrologique et hydrogéologique CaWaQS (cf. encarts pp. 16-18) décrite précédemment. En ce qui concerne les données climatiques, des projections climatiques globales de dernière génération ont été mobilisées, produites dans le cadre du projet international « *Coupled Model Intercomparison Project phase 6* » (CMIP6, Eyring et al. (2016)) par les différents groupes de modélisation climatique du monde. Ces projections climatiques CMIP6 servent notamment de base au dernier rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, IPCC (2021)).

Dans le cadre de ce programme, une cinquantaine de modèles climatiques globaux ont été utilisés pour réaliser des simulations climatiques dites historiques (sur la période 1850-2014), puis des projections futures au minimum sur la période 2015-2100. Sur la période historique, les modèles sont contraints par l'évolution observée des facteurs

naturels et anthropiques pouvant affecter le climat (gaz à effet de serre, aérosols anthropiques, aérosols volcaniques, etc.). À partir de 2015, des scénarios d'évolution des forçages anthropiques (nommés *Shared Socio-economic Pathways* ou SSP), correspondant à différentes évolutions socio-économiques possibles du monde, sont utilisés.

Quatre scénarios principaux sont considérés dans CMIP6 : SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5. Le scénario SSP1-2.6 correspond à une évolution très favorable du point de vue environnemental, avec un réchauffement global limité en fin de XXI^e siècle à des valeurs proches de l'ambition des Accords de Paris sur le climat (1,3 °C à 2,4 °C). Le scénario SSP5-8.5 correspond à l'inverse à une évolution du monde extrêmement défavorable du point de vue climatique, avec un fort développement reposant sur les énergies fossiles, sans mise en place de politiques climatiques et menant donc à un très fort réchauffement global (3,3 °C à 5,7 °C). Les deux autres scénarios sont intermédiaires, et conduisent à un réchauffement encore très marqué pour les scénarios SSP3-7.0 (2,8 °C à 4,6 °C), et plus modéré pour le scénario SSP2-4.5 (2,1 °C à 3,5 °C). Les chiffres donnés pour chaque scénario correspondent à la fourchette très probable du réchauffement en 2081-2100 par rapport à 1850-1900, donnés dans le dernier rapport du GIEC de 2021.

Le très grand nombre de projections climatiques CMIP6 disponibles⁸, ainsi que le temps et les ressources informatiques nécessaires pour les traiter, en termes de désagrégation puis de modélisation hydrologique, rend la sous-sélection d'un certain nombre de projections quasi nécessaire dans ce type d'étude.

D'autre part, il est de plus en plus souvent considéré qu'une approche de type probabiliste, visant à traiter le maximum de projections climatiques, pour ensuite essayer d'établir une distribution statistique des changements hydrologiques escomptés, correctement représentative de toutes les incertitudes sous-jacentes (liées au scénario d'émission de gaz à effet de serre, aux modèles climatiques, à la variabilité interne du climat, à la modélisation hydrologique, etc.), peut présenter des limites. Elle peut en effet présenter des difficultés théoriques. De plus, la quantité de données générées peut rendre l'utilisation pratique des résultats compliquée dans le

8 Jusqu'à une cinquantaine de modèles climatiques, 4 scénarios d'émission de gaz à effet de serre principaux, et pour certains modèles un grand nombre de membres, *i.e.* de simulations différant uniquement par les conditions initiales, permettant d'estimer les incertitudes dues à la variabilité interne du climat.

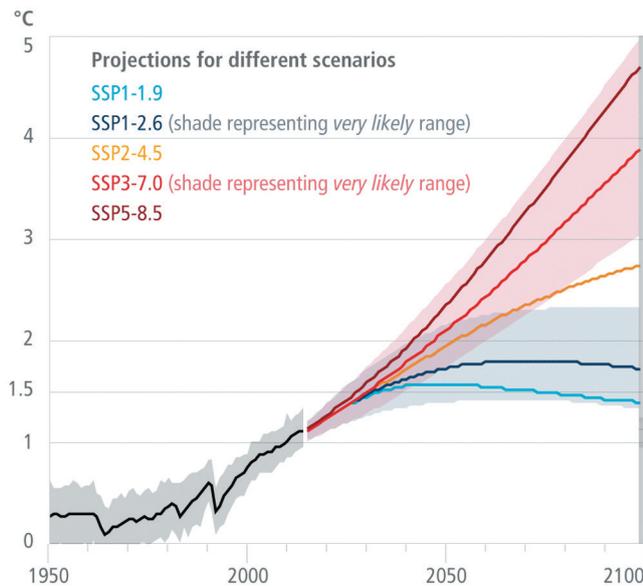


Figure 18. Évolution de la température de surface du globe selon les différents scénarios SSP. D'après le résumé du 6^e rapport du GIEC pour les décideurs politiques (<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/summary-for-policymakers/>)

contexte de l'adaptation. Dans ce travail, nous avons choisi de suivre une approche alternative dite en « *storylines* » (Shepherd et al., 2018), en nous focalisant sur un nombre limité de trajectoires hydrologiques sur le bassin de la Seine contrastées, pouvant être ensuite utilisées pour tester la vulnérabilité du bassin versant.

Pour construire ces trajectoires, nous avons sélectionné un faible nombre de modèles climatiques selon un certain nombre de critères et de contraintes. Tout d'abord, de nombreux modèles climatiques CMIP6 ne fournissent simplement pas toutes les variables climatiques journalières élémentaires à la modélisation hydrologique pour les trois scénarios d'émission de GES à étudier (SSP1-2.6, SSP2-4.5, et SSP5-8.5). D'autre part, quelques modèles n'utilisent toujours pas un calendrier standard, ce qui peut poser un problème à l'étape de modélisation hydrologique. Ces contraintes pratiques diminuent déjà très fortement le nombre de modèles climatiques utilisables en pratique, pour n'en laisser qu'une quinzaine. Parmi ces modèles, certains sont très similaires et produisent donc des résultats très proches (Boé, 2018). Ces doublons sont donc également écartés.

Dans Ribes et al. (2022), une contrainte observationnelle permet de réduire la dispersion des changements de température sur la France projetés par les modèles climatiques CMIP6 en sélectionnant les évolutions les plus réalistes au regard des changements de température

observés sur le XX^e siècle et le début du XXI^e. Nous avons donc choisi dans le cadre du PIREN-Seine des modèles climatiques dont les projections pour le scénario SSP5-8.5 sont globalement compatibles avec les changements annuels contraints de Ribes et al. (2022). Cela revient à éliminer quelques modèles ayant un très fort ou un très faible réchauffement. Finalement, parmi les derniers modèles restants, quatre présentant des changements de température et de précipitations contrastés sur le bassin de la Seine, ainsi que des caractéristiques correctes ont été sélectionnés.

Une nouvelle méthode hybride statisco-dynamique a été développée, puis appliquée à ces projections afin de les régionaliser (Boé et Mass, 2021; Boé et al., 2022). Cette méthode de régionalisation hybride vise à conjuguer les points forts des méthodes de régionalisation dynamique et statistique habituellement utilisées séparément. Finalement, avant modélisation hydrologique, une méthode de correction de biais a été appliquée. Cette méthode avancée, décrite dans Switanek et al. (2017), est particulièrement intéressante par sa capacité à ne pas modifier artificiellement le signal du changement climatique, contrairement à beaucoup d'autres méthodes (Casanueva et al., 2020).

En pratique, les variables journalières des modèles climatiques CMIP6 sélectionnés nécessaires à la modélisation hydrologique (précipitations, température,

Méthodologie : définition des périodes de référence pour les évaluations des impacts hydrologiques du changement climatique

L'évaluation des impacts du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique des bassins est soumise à de nombreuses sources d'incertitudes. Celles sur la variabilité interne du climat sont notamment très fortes. Lorsque l'on a recours à un modèle hydroclimatique pour reconstituer un climat passé, la comparaison des résultats de ce modèle par rapport aux données connues sur cette période permet d'évaluer la capacité d'un modèle donné à reproduire cet événement. Cependant un même modèle initialisé avec des conditions légèrement différentes peut mener à des résultats significativement différents. Dès lors, la chaîne d'évaluation des impacts du changement climatique qui mobilise des modèles hydroclimatiques forçant des modèles hydrologiques est soumise à ces incertitudes. La question se pose alors de la base de comparaison à utiliser pour quantifier les impacts du changement climatique. Deux possibilités s'offrent alors à nous qui prennent au choix une référence absolue (temps présent enregistré) ou relative (temps présent reconstitué par un modèle climatique). Afin de nous affranchir des incertitudes sur la variabilité interne du climat, nous avons décidé, dans ce fascicule, d'effectuer nos comparaisons en relatif.

vent, humidité, rayonnement solaire et infrarouge) ont été régionalisées sur une grille à 12 km de résolution, puis la méthode de correction de biais a été appliquée à chaque variable, en utilisant les données de l'analyse observationnelle SAFRAN (Quintana-Seguí et al., 2008) sur la période 1961-1990 comme référence, après interpolation des données régionalisées sur la grille à 8 km de SAFRAN. Les données ainsi obtenues ont finalement été utilisées en entrée du modèle CaWaQS.

Dans les analyses à suivre, trois périodes sont considérées : la période dite présente : 1980-2014, la période dite « milieu de siècle » : 2032-2066 et la période dite fin de siècle : 2066-2100. Les changements des variables hydrologiques entre ces différentes périodes sont calculés selon l'approche d'écrite dans l'encart : « Définition des périodes de référence pour les évaluations des impacts hydrologiques du changement climatique ».

2. Changements climatiques dans le bassin de la Seine

À l'échelle de l'Europe, le changement climatique se caractérise globalement par une augmentation des précipitations annuelles sur le nord du continent et une diminution sur le sud. Entre ces deux zones se trouve une zone de transition, dans laquelle se situe le bassin de la

Seine. Les modèles climatiques projettent généralement sur cette zone des changements de précipitations modérés (Figure 19) et de signes potentiellement différents.

En plus des changements de précipitations, les changements d'évapotranspiration réelle sont particulièrement importants pour la simulation des débits et des hauteurs piézométriques. En effet, la différence entre les précipitations (gain d'eau pour la surface) et l'évapotranspiration (perte d'eau) contrôle l'eau disponible en surface, pouvant alimenter le ruissellement ou la recharge des nappes.

Tout comme les précipitations, l'évapotranspiration annuelle telle que projetée par les modèles climatiques de dernière génération a tendance à augmenter dans le nord de l'Europe, et à diminuer dans le sud. Sur cette zone de transition incluant la Seine, les changements moyens sont faibles. Ceux-ci cachent cependant des incertitudes assez fondamentales : beaucoup de modèles projettent en effet des changements absolus importants par rapport à la variabilité passée, mais sans accord sur le signe de ces changements.

La latitude de la zone de transition entre augmentation et diminution de précipitations évolue au cours de l'année. Elle se situe plus au sud de l'Europe en hiver, et plus au nord en été, si bien que la Seine sort de cette zone de transition durant ces saisons. Des augmentations des précipitations en hiver et des diminutions en été sont

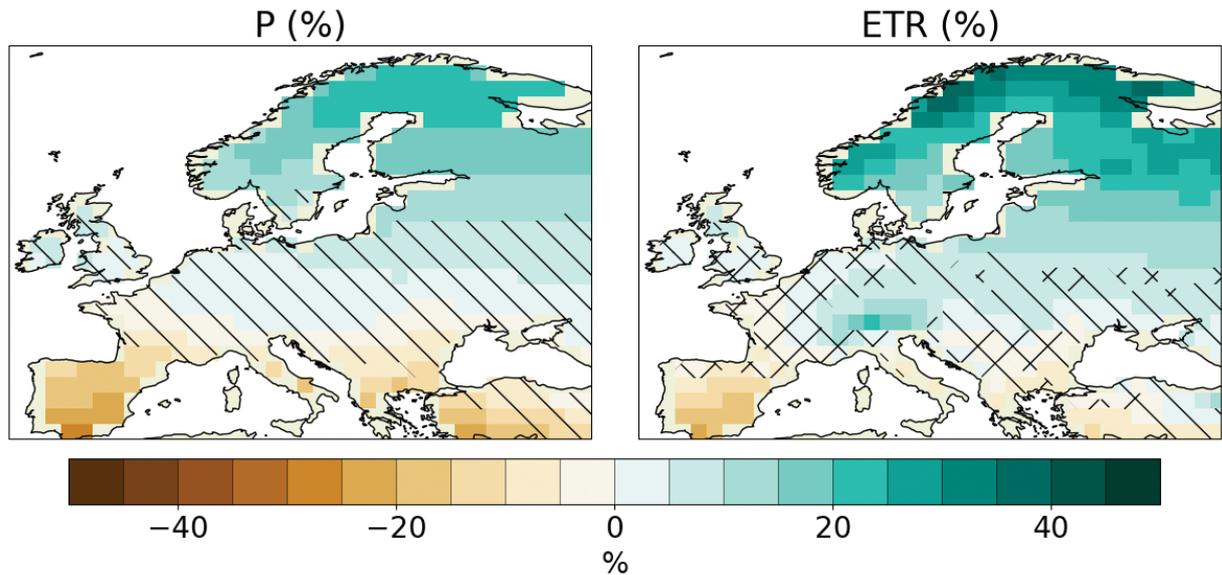


Figure 19. Changement annuel relatif (%) entre 2066-2100 et 1980-2014 des précipitations (à gauche) et de l'évapotranspiration (à droite), en moyenne pour un large ensemble de modèles climatiques CMIP6 pour le scénario d'émission de gaz à effet de serre le plus sévère (SSP5-8.5). Les hachures indiquent que moins de 66 % des modèles projettent des changements supérieurs à la variabilité passée. Les zones hachurées correspondent donc aux régions où le signal du changement climatique est généralement faible. Les croix indiquent que plus de 66 % des modèles projettent des changements significatifs par rapport à la variabilité passée, mais que moins de 80 % des modèles s'accordent sur le signe des changements.

ainsi généralement projetées sur la Seine, comme le montre la Figure 20, qui représente l'évolution projetée des précipitations en moyenne sur le bassin en hiver et été pour différents scénarios d'émission ainsi que pour les observations. Ce contraste saisonnier fort des changements des précipitations est un aspect caractéristique des changements du cycle hydrologique sur le bassin de la Seine.

Les modèles sont globalement en accord avec les observations du XX^e siècle ainsi qu'au début du XXI^e siècle, avec une tendance positive modérée en hiver et peu de changement en été jusqu'à la période actuelle. Le scénario d'émission joue un rôle important, notamment en été. Les diminutions sont très marquées pour le scénario le plus sévère (SSP5-8.5) et bien plus limitées pour le scénario le plus favorable (SSP1-2.6).

Le changement climatique dans le bassin de la Seine se caractérise également par des contrastes saisonniers des changements de température, avec une augmentation des températures plus marquée en été qu'en hiver. En fin de XXI^e siècle, le réchauffement moyen sur le bassin de la Seine par rapport au début du XX^e siècle atteint 8 °C en été et 5 °C en hiver pour le scénario d'émission le plus sévère. Bien entendu, le scénario d'émission, et donc la trajectoire socio-économique sous-jacente, influencent également fortement le réchauffement projeté. Pour le

scénario d'émission le plus modéré, le réchauffement est limité à 2 °C en hiver et 3 °C en été.

Le réchauffement simulé depuis la moitié du XX^e siècle en moyenne par les modèles en été est souvent plus faible qu'observé (Boé et al. (2020) et Figure 20), même si les observations se situent dans la dispersion des modèles en été, comme en hiver.

Les projections futures s'inscrivent globalement dans une certaine continuité avec les tendances observées, sauf pour les précipitations estivales. En effet, les changements de précipitations estivales observés jusqu'à aujourd'hui sont très faibles, ce qui est également le cas des évolutions simulées par les modèles climatiques sur cette période. C'est seulement au cours du XXI^e siècle, dans les prochaines décennies, qu'une diminution des précipitations apparaît, en moyenne sur l'ensemble des modèles, pour les scénarios les plus sévères. Les évolutions passées sur le XX^e siècle et le début du XXI^e siècle ne sont donc pas forcément représentatives de ce à quoi il faut s'attendre au cours du XXI^e siècle en termes de changement du cycle hydrologique sur le bassin de la Seine.

Au-delà du scénario d'émission, des incertitudes très importantes demeurent, liées à la variabilité interne naturelle du climat et aux modèles climatiques. Pour le scénario le plus sévère, les changements des précipitations

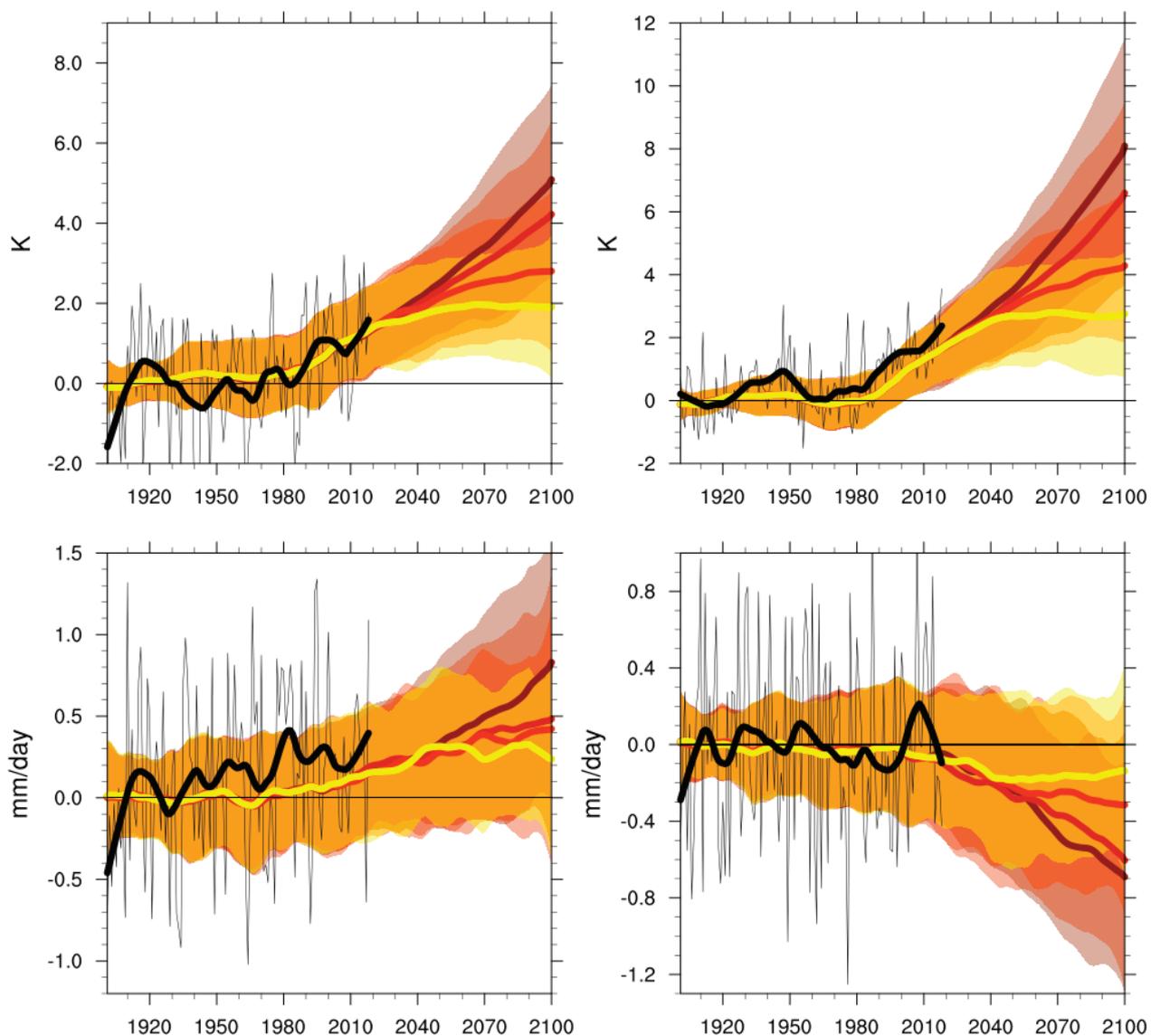


Figure 20. (a), (b), (c) (d) Évolutions (a, b) de la température (°C) et (c, d) des précipitations (mm/jour) sur le bassin de la Seine entre 1902 et 2010 dans les observations et pour quatre scénarios d'émission de gaz à effet de serre (respectivement du jaune au marron) : SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5. (a,c) Hiver ; (b,d) Été. La référence pour calculer les anomalies est la période 1902-1931. Un filtre est appliqué pour lisser les évolutions à l'exception du trait fin noir qui montre les valeurs annuelles observées. Bandes de couleur : intervalle de confiance à 5-95 % basé sur l'écart-type pondéré selon le nombre de membres des différents modèles. Les mêmes 32 modèles climatiques sont utilisés pour les quatre scénarios.

en été peuvent ainsi aller de -0,2 mm/jour jusqu'à -1,2 mm/jour. Pour les températures de la même saison, les changements s'échelonnent entre 3°C et 11°C.

Cette analyse des évolutions des températures et des précipitations projetées par un large ensemble de modèles climatiques et de scénarios d'émission de dernière génération montre clairement l'importance de l'atténuation. En suivant une trajectoire limitant fortement les émissions de gaz à effet de serre, globalement compatible avec les objectifs des Accords de Paris sur le climat, il est

possible de fortement contenir les changements futurs de précipitations et de température sur le bassin de la Seine. Sans des efforts importants, des changements sévères sont en revanche à craindre.

Comme mentionné dans la première partie de ce chapitre, un sous-échantillon de projections climatiques a été sélectionné pour réaliser des projections hydrologiques sur le bassin de la Seine à l'aide du modèle CaWaQS. Quatre modèles de circulation générale désagrégés, auxquels sont systématiquement associés trois scénarios



socio-économiques, ont ainsi été sélectionnés pour fournir les forçages climatiques pour CaWaQS parmi l'ensemble quasi complet des projections CMIP6. Ceux-ci présentent effectivement des changements contrastés (Figure 21) de précipitations en fonction des changements de température en moyenne sur le bassin de la Seine à Vernon.

Pour le scénario pessimiste SSP5-8.5, le modèle MPI-ESM1-2-LR montre, par exemple, une diminution marquée des précipitations annuelles, avec une très forte diminution en été (-50 %), tandis que le modèle EC-Earth3-Veg présente une augmentation annuelle et une faible diminution estivale. Aucun des quatre modèles sélectionnés ne correspond aux augmentations

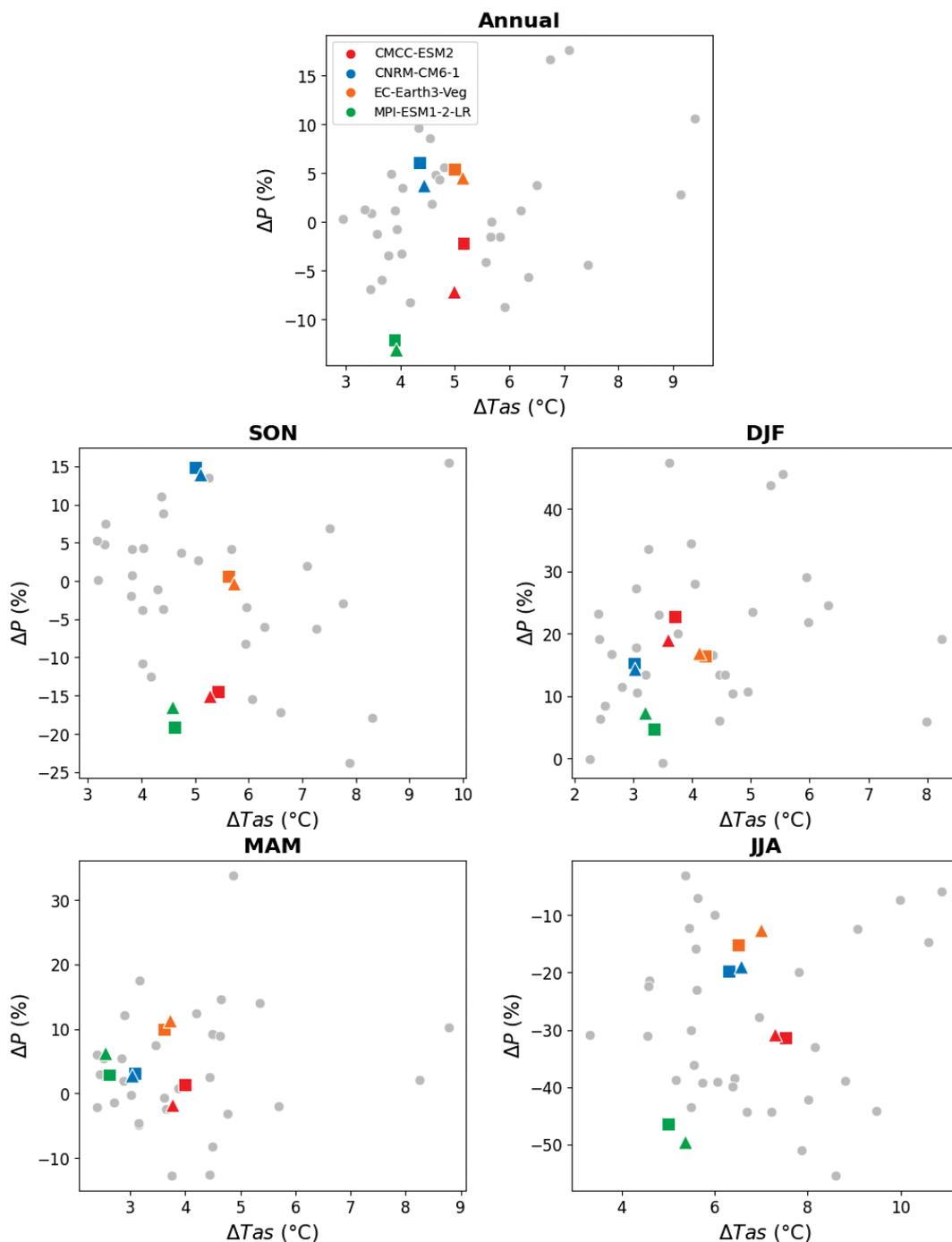


Figure 21. Changements relatifs de précipitations (%) versus changements de température (°C) sur le bassin de la Seine à Vernon, entre 2070-2099 et 1971-2000 pour le scénario SSP5-8.5, en moyennes annuelles et saisonnières (SON : automne, DJF : hiver, MAM : printemps et JJA : été). Les résultats des projections CMIP6 sont montrés à l'aide de cercle gris et de triangles colorés pour les quatre modèles sélectionnés pour les projections d'impacts hydrologiques. Les résultats de ces projections après désagrégation et correction de biais sont montrés à l'aide de triangles.

de température les plus marquées de l'ensemble CMIP6 complet, car ces changements ne sont le plus souvent pas compatibles avec la contrainte observationnelle proposée par Ribes et al. (2022)). Les changements de température et de précipitations des modèles sélectionnés, après désagrégation et correction de biais sont très proches des changements originaux (triangles *versus* carrés sur la Figure 21), montrant que la méthode de désagrégation puis celle de correction de biais ne modifient pas les signaux climatiques à grande échelle.

3. Évolution des flux d'eau

Comme évoqué précédemment, la différence entre l'apport d'eau à la surface par les précipitations et les pertes par l'évapotranspiration réelle contrôle l'eau disponible pour alimenter le ruissellement rapide de surface et la recharge des nappes. Les changements de ce bilan hydrique de surface constituent donc un aspect critique de la réponse du bassin versant au changement climatique.

Les changements des précipitations, de l'évapotranspiration, et de la somme du ruissellement et de l'infiltration (aussi appelé pluie efficace par la suite), en moyennes annuelles et saisonnières pour les quatre projections hydrologiques, sont cohérents avec des aspects connus du changement climatique sur le bassin de la Seine (Figure 22 pour le scénario SSP5-8.5 sur le bassin de la Seine à Vernon). On retrouve une compensation partielle entre une augmentation des précipitations en hiver et une diminution en été, résultant en des changements de précipitations à l'échelle annuelle incertains, même en termes de signe, et d'intensités généralement faibles.

Un aspect généralement robuste du changement climatique est que l'évapotranspiration potentielle tend à augmenter de façon quasi généralisée, de façon maximum en été, notamment en raison de l'augmentation des températures et de l'énergie disponible à la surface. Quand les stocks d'eau du sol et en surface le permettent, l'évapotranspiration réelle augmente en réponse à l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle. L'évapotranspiration a donc tendance à augmenter lors des saisons plus humides (hiver, printemps), puis à diminuer lorsque les stocks d'eau deviennent insuffisants, comme c'est généralement le cas

en été. Finalement, l'évapotranspiration réelle annuelle diminue ici dans les quatre projections, voire très faiblement dans celles présentant une augmentation annuelle et un peu moins faiblement dans celles présentant une diminution des précipitations annuelles. Les changements d'évapotranspiration tendent donc à modérer l'impact des changements de précipitations sur la pluie efficace. Comme dans des études précédentes (e.g. Dayon et al. (2018)), un fort contraste saisonnier existe, avec une augmentation de la pluie efficace en hiver et une diminution en été.

Les résultats des projections hydrologiques pour le scénario le plus sévère sont donc contrastés. L'une d'entre elles montre une diminution de la pluie efficace à l'échelle annuelle, de forts assèchements estivaux et une augmentation quasi nulle de la pluie efficace en hiver. Les autres montrent une augmentation, faible, du ruissellement total à l'échelle annuelle, et donc des ressources en eau renouvelables disponibles sur le bassin, avec de fortes augmentations en hiver et des diminutions plus ou moins prononcées en été. Ces évolutions sont généralement compatibles avec celles notées dans des études précédentes comme Dayon et al. (2018).



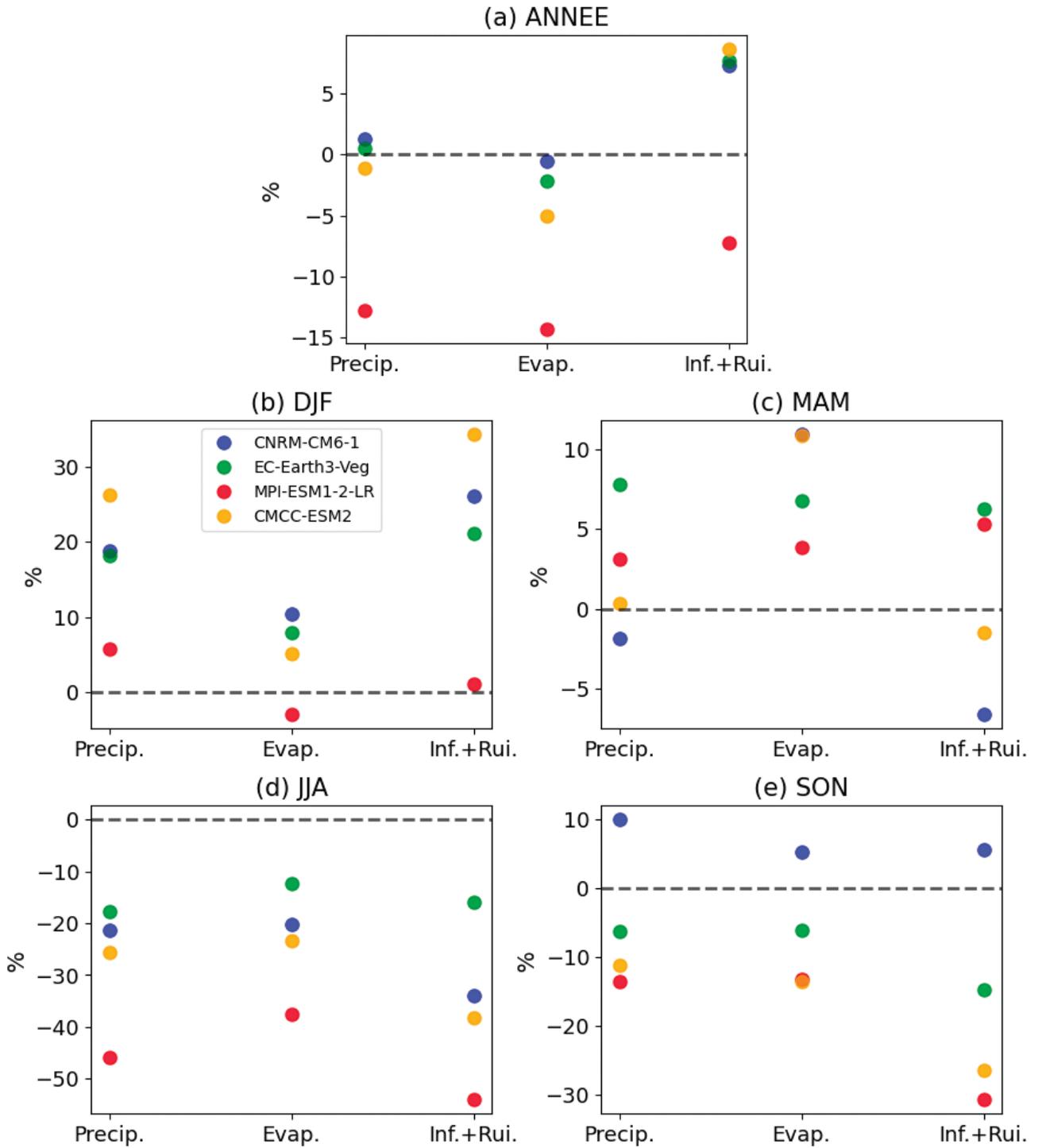


Figure 22. Changements relatifs (%) des variables du bilan hydrique en surface (Precip : précipitations, Evap : évapotranspiration réelle, Inf+Rui : somme du ruissellement et de l'infiltration), entre 2066-2100 et 1980-2014, en moyennes annuelles et saisonnières, pour le scénario pessimiste (SSP5-8.5), après modélisation hydrologique avec CaWaQS. Chaque point correspond à un modèle climatique dont le nom est précisé en figure (b).



alma

WEST OXERI

Évolution temporelle des termes du bilan hydrique

Un focus sur les projections climatiques aboutissant aux états finaux en fin de XXI^e siècle les plus secs et humides a été réalisé. Il met en lumière un champ des possibles en termes d'évolution des précipitations et de la recharge des aquifères associée. Ces « bornes » de variations sont caractérisées par un modèle « humide », CNRM, et « sec », MPI, jouant, d'une part, un scénario optimiste proche des accords de Paris (SSP 1-2.6), et, d'autre part, un scénario pessimiste basé sur un développement économique débridé fondé sur les énergies fossiles (SSP 5-8.5).

Que ce soit pour les précipitations ou l'infiltration, peu de changements sont visibles avant 2040 (Figure 23). Les tendances de trajectoires humides ou sèches s'illustrent effectivement, au-delà de cette date pour le scénario pessimiste, et renforcent les spécificités humide ou sèche de chaque trajectoire en fin de siècle. Ainsi les précipitations et l'infiltration augmentent-elles en moyenne pluriannuelle pour la trajectoire humide, alors qu'elles diminuent pour la trajectoire sèche.

Deux fenêtres temporelles, milieu de siècle (MSC, 2032-2066) et fin de siècle (FSC, 2066-2100), sont exploitées pour moyenniser les résultats pluriannuellement et ainsi quantifier en moyenne ces évolutions. Dans la trajectoire sèche sous scénario pessimiste, la recharge des aquifères diminuerait ainsi de 12,5 % en fin de XXI^e siècle, alors qu'elle augmenterait de 4 % en trajectoire humide sous le même scénario.

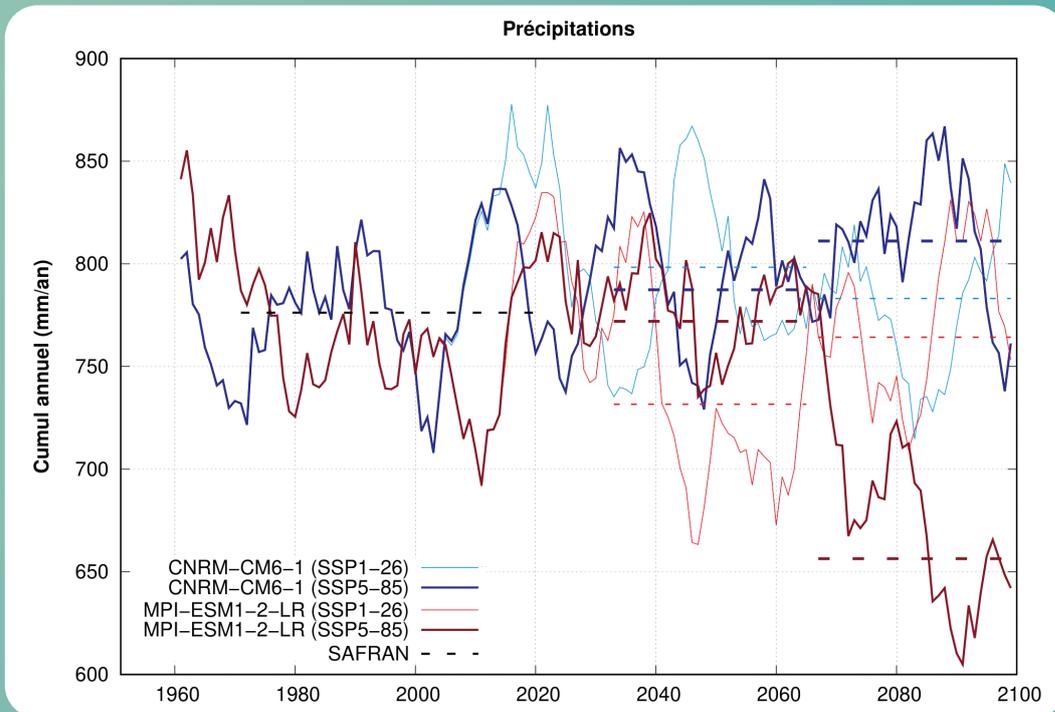
Au sein de chacune des trajectoires, les scénarios optimiste et pessimiste ne présentent pas les mêmes tendances, puisque le scénario optimiste s'illustre par une variation de quelques pourcents en milieu de siècle, suivi d'un retour à la moyenne actuelle pour la fin de siècle. Le scénario pessimiste mène en revanche, à une exacerbation de la tendance de la trajectoire en fin de XX^e siècle (humide plus humide et sec plus sec), alors que le scénario optimiste présente une grande stabilité de la recharge des aquifères tout au long du XX^e siècle (Tableau 7).

Le scénario pessimiste SSP5-8.5 est d'autant plus négatif pour la ressource en eau que les variations saisonnières sont également renforcées dans chaque trajectoire en se superposant aux tendances de fond humides ou sèches.

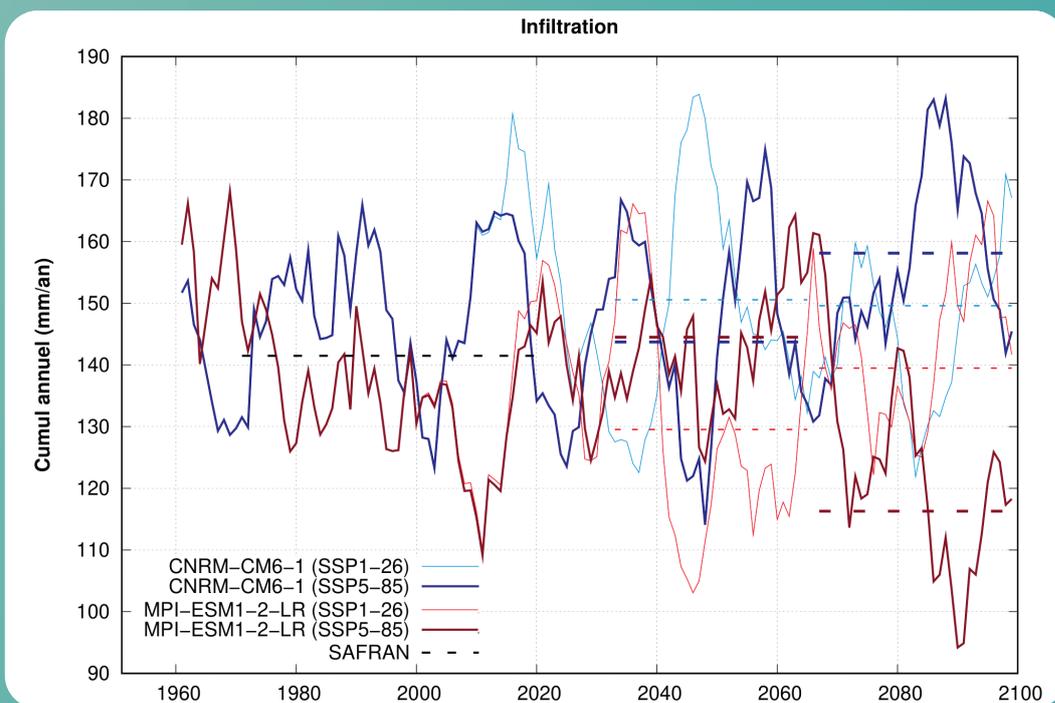
Confluence	Précipitation [mm an ⁻¹]	Infiltration [mm an ⁻¹]
SAFRAN (1981-2014)	810	146
MPI (1981-2014)	755	131
CNRM (1981-2014)	793	152
MPI 1-2.6 - MSC	732	130
MPI 1-2.6 - FSC	764	140
MPI 5-8.5 - MSC	772	145
MPI 5-8.5 - FSC	656	116
CNRM 1-2.6 - MSC	799	151
CNRM 1-2.6 - FSC	783	150
CNRM 5-8.5 - MSC	787	143
CNRM 5-8.5 - FSC	811	158

Tableau 7. Évolutions des précipitations et de l'infiltration en milieu de XXI^e siècle (MSC) et en fin de XXI^e siècle (FSC), en temps présent, suivant les trajectoires sèches (MPI) et humides (CNRM) sous scénario optimiste (Accords de Paris, 1-2.6) et pessimiste (développement basé sur les énergies fossiles, 5-8.5). Les codes couleur rouge (respectivement bleu) indiquent une diminution (respectivement une augmentation) par rapport à la valeur de référence de la trajectoire.

Au-delà des tendances à plus long terme, ces différentes trajectoires montrent également des variations d'une décennie à l'autre pouvant être importantes, très certainement liées à la variabilité naturelle interne du système climatique. Ces variations décennales peuvent venir temporairement renforcer ou au contraire limiter les évolutions provoquées par le changement climatique d'origine anthropique.



a)



b)

Figure 23. Évolution en amont de l'estuaire de la Seine des moyennes mobiles sur dix ans de la moyenne annuelle (a) des précipitations annuelles et (b) de l'infiltration en mm an⁻¹.

4. Changements des hauteurs piézométriques

Avant de finaliser l'étude de l'évolution des débits des rivières alimentées en partie par les eaux souterraines, et ce, notamment durant l'étiage quand la pluie fait défaut, il est important de mieux comprendre le devenir de la ressource en eau souterraine dans le cadre du changement climatique.

L'un des avantages du modèle CaWaQS est de permettre une cartographie de la ressource en eau souterraine à l'affleurement, permettant ainsi d'associer à chaque trajectoire et scénario, une évaluation spatialisée de la variation des premiers niveaux d'eau du sous-sol, rencontrés depuis la surface du sol. Ces variations des niveaux piézométriques sont en première analyse parfaitement cohérentes avec celles de la recharge des aquifères indiquées dans l'encart « Évolution temporelle des termes du bilan hydrique », et plus spécifiquement dans le tableau 8. Ainsi, la diminution de la recharge de 12,5 % en trajectoire sèche sous scénario pessimiste mène-t-elle à une diminution globale de la ressource en eau souterraine de 1,3 m en moyenne à l'échelle du bassin de la Seine en fin de XXI^e siècle. La faible augmentation de 4 % de l'infiltration sous scénario pessimiste en trajectoire humide n'a quant à elle pas d'impact sur la ressource en eau souterraine à l'horizon fin de XXI^e siècle (Tableau 8).

Les spécificités des territoires pondèrent cependant l'intensité des variations autour de ces valeurs moyennes (Figure 24). Cependant, quels que soient les scénarios et trajectoires suivies, quelques constantes apparaissent, comme une diminution importante de la ressource en eau dans le secteur de Chartres et des poches d'augmentation du niveau autour de l'Yonne et de la Seine, depuis Sens

jusqu'aux boucles de la Seine en aval de l'agglomération parisienne.

La frange jurassique située à l'est du bassin semble, quant à elle, toujours impactée par une diminution de la ressource en eau souterraine, avec des effets de raréfaction d'autant plus marqués pour les scénarios pessimistes qu'ils soient humide ou sec (Figures 24b,d). Cela ne fait que renforcer les problématiques d'étiages intenses dans ces secteurs qui cumulent alors diminution des pluies estivales et diminution du débit de base fournie par les aquifères.



Au sein des trajectoires humide et sèche sous scénario pessimiste, il apparaît qu'à mi-siècle les réserves en eau souterraine pourraient suivre une tendance inverse à leur état en fin de XXI^e siècle. Cela pourrait rajouter une difficulté supplémentaire à la définition de stratégies d'adaptation puisqu'une trajectoire menant à la raréfaction de la ressource en eau en fin de siècle pourrait tout d'abord passer par un stade en milieu de siècle d'apparente augmentation de ces réserves.

Trajectoire	Scénario	Forçage climatique	Projection	2032-2066	2066-2100
humide	optimiste	CNRM-CM6-1	SSP1-26	-0,42	-0,54
humide	pessimiste	CNRM-CM6-1	SSP5-85	-0,86	-0,03
sèche	optimiste	MPI-ESM1-2-LR	SSP1-26	-0,73	0,76
sèche	pessimiste	MPI-ESM1-2-LR	SSP5-85	-0,85	-1,27

Tableau 8. Variation, en mètre, de la piézométrie moyenne à l'affleurement du bassin de la Seine à horizons milieu de siècle (2032-2066) et fin de siècle (2066-2100) pour les trajectoires « humide » et « sèche » sous scénarios optimiste et pessimiste. Pour chaque trajectoire, la variation est calculée par rapport à la référence 1980-2014. Les cases rouges indiquent une diminution de la piézométrie moyenne par rapport à la référence, alors que les cases bleues font état d'une augmentation.

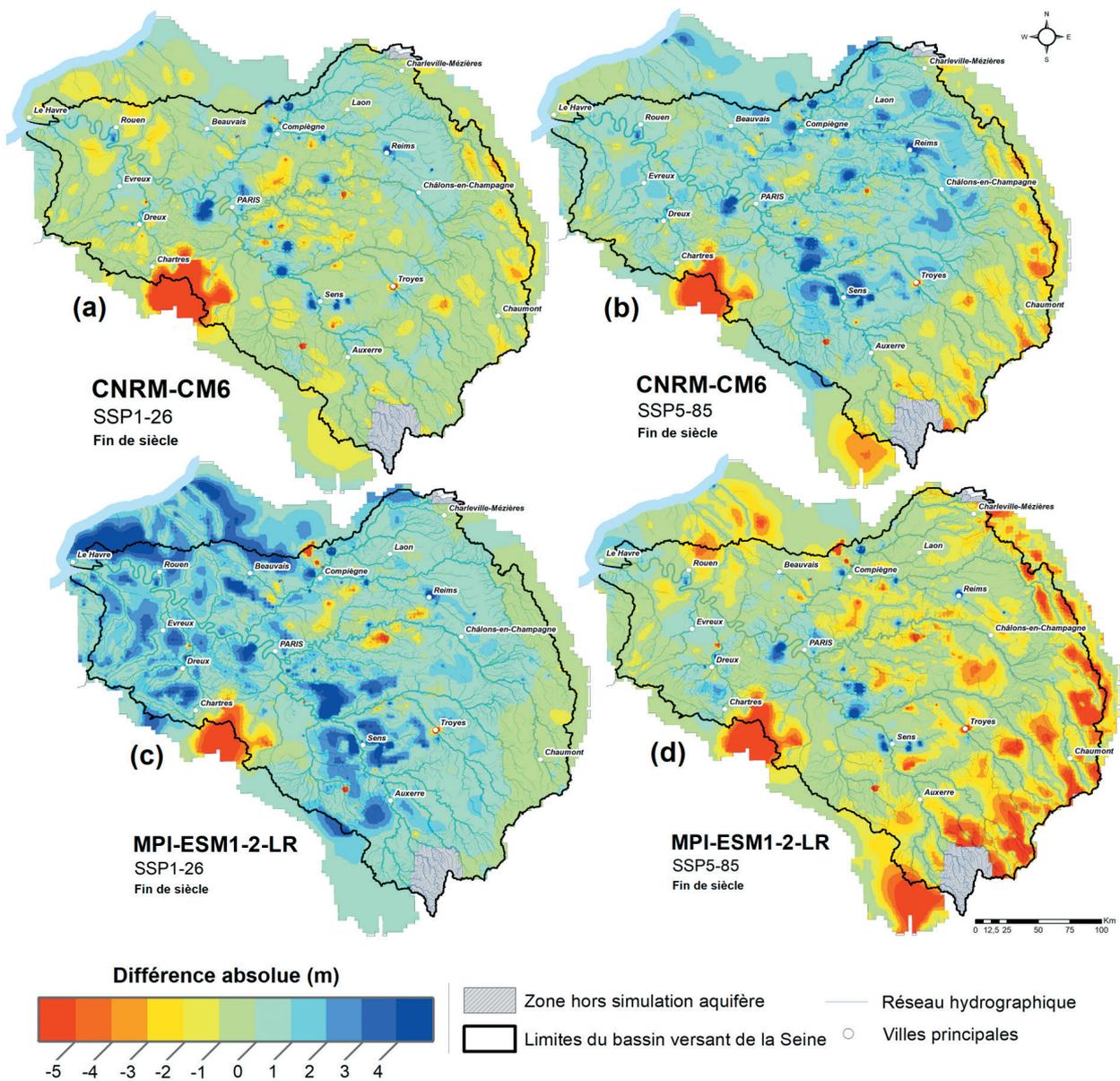
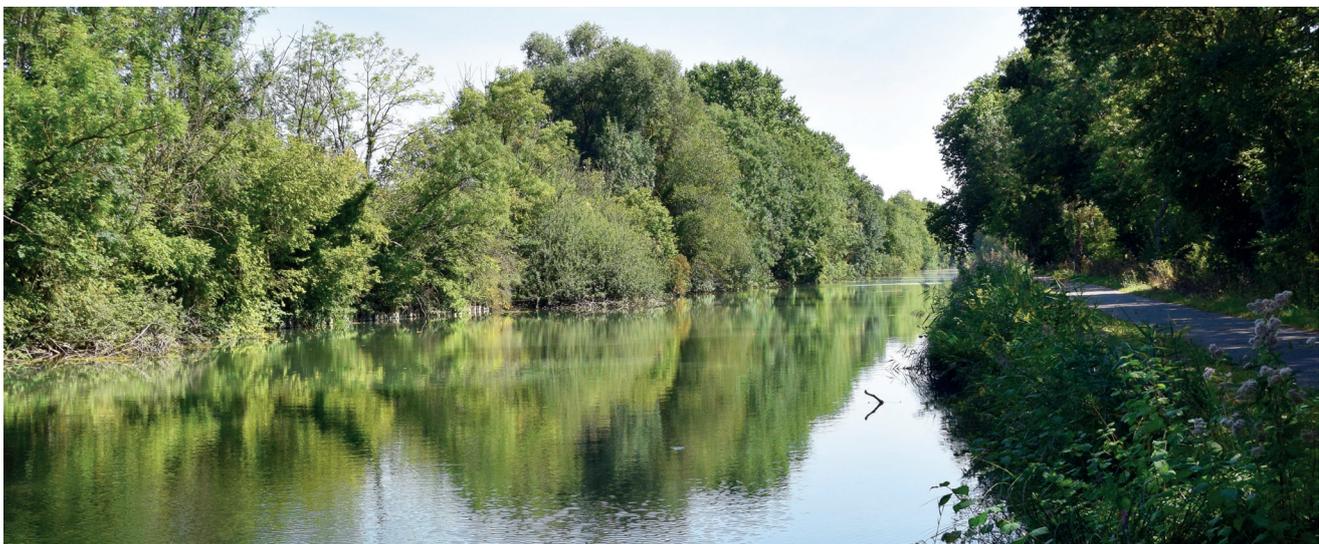


Figure 24. Cartographies des variations moyennes des niveaux d'eau dans le sous-sol en fin de XXI^e pour les trajectoires humide (a,b) et sèche (c,d) sous scénarios optimiste (a,c) et pessimiste (b,d). Pour chaque trajectoire, les variations sont calculées relativement par rapport aux niveaux moyens de la période de référence 1980-2014.





Une approche empirique pour estimer la sensibilité des niveaux de nappes du bassin à la variabilité climatique naturelle interannuelle à décennale

L'impact du changement climatique sur les ressources en eau est habituellement traité par l'utilisation de projections issues de modèles climatiques globaux, désagrégées à l'échelle des hydrosystèmes étudiés, pour différents scénarios d'émission et de trajectoires socio-politiques (comme des mesures d'atténuation par exemple). Les variables climatiques issues de ces projections sont ensuite utilisées pour réaliser des simulations d'impacts au moyen de modèles hydrologiques. L'incertitude associée à ces projections a donc de multiples origines liées à la nature du modèle climatique, et à son initialisation, aux différents scénarios socio-économiques, à la variabilité climatique interne⁹, et *in fine* à la nature du modèle hydrologique utilisé.

En matière de changements futurs, la variabilité naturelle à long terme ou «basse fréquence», qui représente donc une partie significative de l'incertitude totale des projections climatiques et finalement hydrologiques, peut jouer un rôle crucial en modulant les effets du changement climatique auxquels elle se superpose en amplifiant ou en masquant les tendances hydro-climatiques et les extrêmes associés. Cependant, comme l'a montré Boé (2020), une importante disparité existe dans la manière dont les différents modèles climatiques restituent cette variabilité basse fréquence, de sorte que le choix du ou des modèles s'avère crucial pour développer des scénarisations hydro-climatiques pertinentes sur le bassin de la Seine. Si la variabilité aux échelles décennales à multidécennales paraît la plus digne d'intérêt lorsque l'on s'intéresse aux grandes tendances hydro-climatiques futures, la façon dont les échelles temporelles plus courtes, interannuelles à décennales, sont restituées dans les projections ou bien la manière dont la variabilité correspondante pourrait évoluer représente également un enjeu. Dans un grand nombre de cas, ces fluctuations correspondent à des événements hydrologiques marquants (par exemple les hauts niveaux exceptionnels de 2001) et décrivent des périodes pluriannuelles de successions d'années sèches ou humides auxquelles les activités humaines sont particulièrement vulnérables. Blöschl et al. (2019) classent d'ailleurs la compréhension de ces phénomènes parmi les «23 problèmes hydrologiques non résolus». Les variabilités concernées correspondent généralement à des oscillations et téléconnexions climatiques relativement bien définies comme l'Oscillation nord-atlantique (NAO) ou l'El Niño-Southern Oscillation (ENSO) (Massei et al., 2007, 2010 ; Holman et al., 2011 ; Liesch et Wunsch, 2019 ; Rust et al., 2019), dont le devenir sous dérèglement climatique est également incertain.

C'est dans ce contexte qu'une approche complémentaire a été développée pour évaluer la sensibilité des niveaux de nappe et la réponse des aquifères en termes de niveaux piézométriques moyens ou extrêmes à l'amplitude de la variabilité basse fréquence interannuelle à décennale - qu'il s'agisse d'une mauvaise représentation par les modèles climatiques, ou de «réels» changements susceptibles de se produire au cours des prochaines décennies. Cette approche est basée sur la modification de l'amplitude de la variabilité basse fréquence d'un champ de précipitations «observé» à l'aide d'une méthode de traitement du signal avant d'utiliser ce nouveau champ de précipitations artificiel comme entrée dans le modèle CaWaQS. Les réponses produites par CaWaQS (débits de rivières et niveaux de nappes) permettent finalement d'évaluer la sensibilité du bassin à différents scénarios de variabilité climatique basse fréquence. L'approche permet notamment d'envisager des scénarios de variabilité climatique qui pourraient ne pas être couverts par les projections issues des modèles climatiques.

La méthodologie adoptée se déroule en 3 étapes (Figure 25). La première consiste à détecter et «extraire» les oscillations principales caractérisant la variabilité basse fréquence au sein de chaque série temporelle de la grille de précipitations SAFRAN (Vidal et al., 2010) correspondant au bassin de la Seine. Trois composantes en

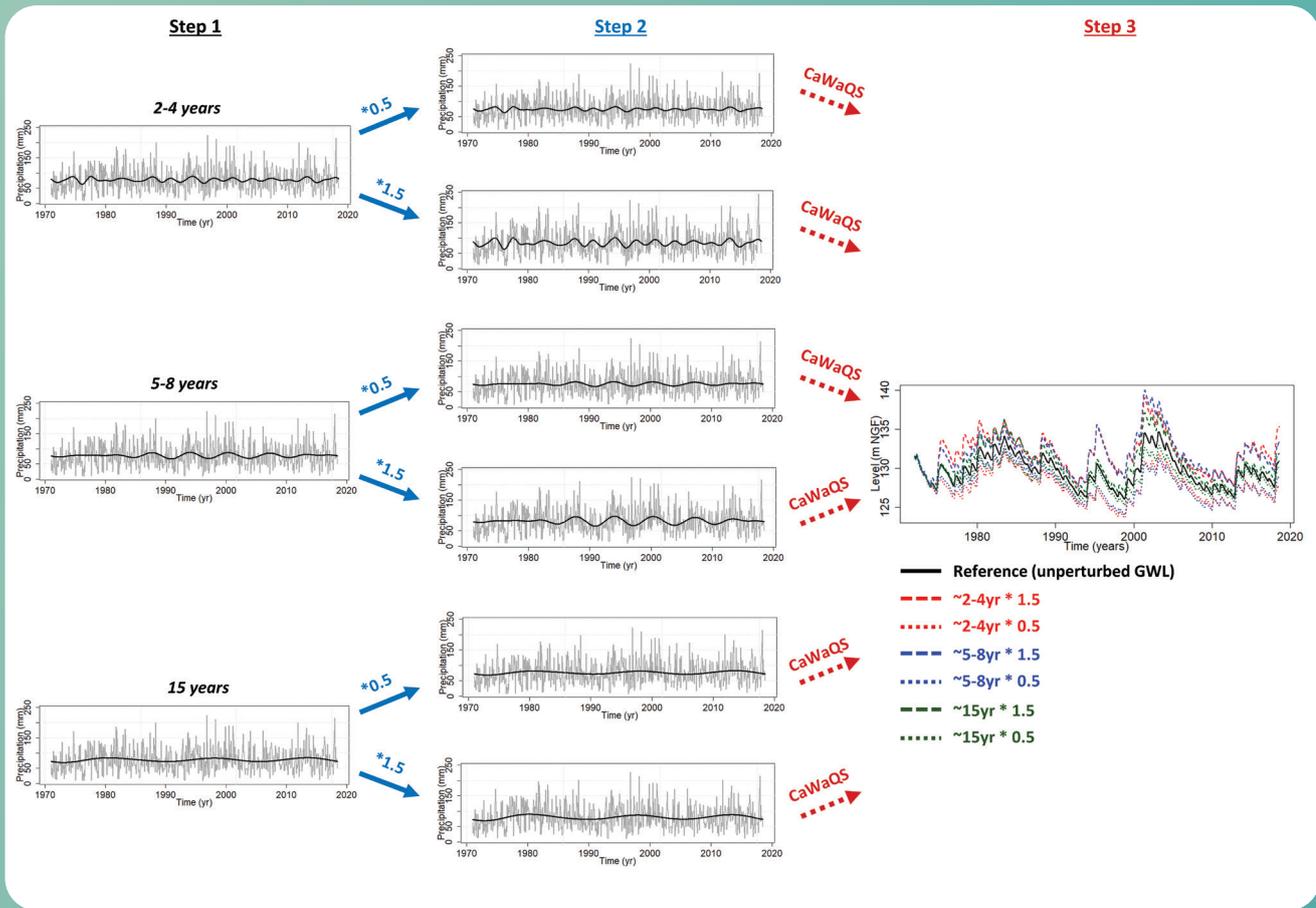


Figure 25. Méthodologie générale en 3 étapes : 1- identification et extraction des 3 composantes oscillant à basse fréquence dans chaque série de précipitation de la grille (« Step 1 »); 2- modification de l’amplitude de chaque composante selon 2 scénarios (« Step 2 »); 3- Simulation des séries temporelles piézométriques issues de l’utilisation des précipitations modifiées en entrée du modèle CaWaQS (« Step 3 »).

particulier sont ciblées, qui expliquent l’essentiel de la variabilité basse fréquence des précipitations, et que l’on retrouve d’ailleurs dans les observations piézométriques sur le bassin : 2 à 4 ans, 5 à 8 ans, et 15 ans. Ces composantes peuvent paraître plus ou moins périodiques, mais elles ne le sont précisément pas et ne doivent pas être considérées comme telles. La deuxième étape consiste à modifier l’amplitude des variations de chacune de ces composantes. En lien avec le travail mené par Boé (2020), il est apparu pertinent de considérer des amplitudes soit 50 % plus faibles, soit 150 % plus fortes que les amplitudes réelles (par exemple, pour représenter les cas où les modèles climatiques sous-estiment ou surestiment la variabilité basse fréquence, respectivement). Une fois l’amplitude modifiée, la composante considérée est « réintroduite » dans le signal de précipitations, conduisant ainsi à des séries de précipitations artificielles dont une composante basse fréquence possède une amplitude 2 fois plus faible (ou 1,5 fois plus forte) que la variabilité observée. La troisième et dernière étape consiste finalement à utiliser ce nouveau champ de précipitations artificiel en entrée du modèle CaWaQS, pour obtenir différentes réponses hydrologiques du bassin, correspondant à ces différentes perturbations du champ de précipitations.

A titre d’exemple, la Figure 25 illustre le résultat des perturbations effectuées sur la variabilité pluriannuelle de l’ordre de 5-8 ans sur la moyenne des niveaux piézométriques sur la période d’étude (1972-2018), sur les hautes eaux exceptionnelles de l’année 2001, et sur les très bas niveaux de 1998. Cette échelle 5-8 ans est en effet particulièrement remarquable dans les variations piézométriques, spécifiquement dans les séries piézométriques correspondant aux aquifères « inertiels », c’est à dire dominés par la variabilité basse fréquence ou « mixte », selon



la nomenclature du BRGM. Pour chaque station piézométrique considérée, la sensibilité des niveaux moyens est mesurée par une simple différence entre la moyenne de la série piézométrique observée et la moyenne de la série issue de la perturbation appliquée (scénario $\times 0,5$ ou $\times 1,5$). Pour les très hauts et très bas niveaux piézométriques, la Figure 26 représente l'augmentation (ou la diminution) de la sévérité de l'événement consécutive à une variabilité pluriannuelle plus forte ou plus faible dans la pluie : la sévérité correspond ici à une mesure de l'importance du changement entre le niveau réellement atteint par l'événement (par exemple, niveau maximum de 2001) et celui qu'il aurait atteint considérant une variabilité pluriannuelle plus forte ou plus faible des précipitations. L'importance de ce changement est exprimée en pourcentage, normalisée par l'amplitude maximale de la série piézométrique considérée sur l'ensemble de la période 1972-2018, pour rendre comparables les résultats obtenus pour les différents piézomètres du bassin.

La Figure 26 (bandeau du milieu) montre que le niveau piézométrique moyen est systématiquement plus faible lorsque la variabilité pluriannuelle des précipitations est amortie (scénario $\times 0,5$). À l'inverse, les niveaux de nappes sont en moyenne plus forts lorsque l'amplitude des variations pluriannuelles est 50 % plus importante (scénario $\times 1,5$). Les niveaux moyens sont en outre plus sensibles à une variabilité pluriannuelle 50 % plus forte que 50 % plus faible. L'importance du changement dans la réponse des nappes n'est pas homogène sur le bassin ; il dépend essentiellement du comportement de la nappe, de type « annuel », « inertiel », ou « mixte » pour la station concernée, comportement lui-même intimement lié aux propriétés de l'aquifère et du bassin. La sensibilité la plus forte est assez logiquement retrouvée pour les nappes inertielles (stations indiquées par un « i » dans la Figure 26).

Sans surprise, dans le cas des hauts niveaux exceptionnels de 2001, les nappes les plus inertielles s'avèrent plus sensibles à l'amplitude exprimée par la variabilité pluriannuelle dans les précipitations. La diminution de l'amplitude de la variabilité pluriannuelle dans la pluie entraîne une diminution de la sévérité de l'événement de 2001, qui peut parfois être substantielle. À l'inverse, son augmentation entraîne une augmentation de la sévérité de l'événement : les niveaux atteints seraient alors jusqu'à 50 % plus forts. Dans l'ensemble, la sévérité des événements qui *in fine* favoriseraient potentiellement crues ou inondations par remontée de nappe serait donc d'autant plus importante que la variabilité pluriannuelle des précipitations est forte. Le phénomène inverse est observé pour les bas niveaux piézométriques, comme l'illustre l'exemple de l'événement de 1998, et l'interprétation de ce résultat est a priori moins évidente que pour le cas des hauts niveaux. Une diminution de la variabilité pluriannuelle des précipitations (scénario $\times 0,5$) induit une augmentation de la sévérité de l'événement, et inversement pour le scénario $\times 1,5$. Une diminution de l'amplitude pluriannuelle des précipitations correspond à des variations moins importantes de part et d'autre de la normale par rapport à l'observation historique : les valeurs de cumuls supérieures à la normale ont donc dans ce cas une amplitude moins importante que la référence observée, ce qui impliquerait une alimentation en eau et une recharge plus faible conduisant *in fine* à une sévérité accrue pour les périodes de bas niveau de nappe comme l'événement de 1998. Enfin, il est à noter que la sensibilité de cet événement n'est pas aussi marquée que pour celui des hauts niveaux de 2001 : on relève une sévérité plus faible en général pour toutes les stations piézométriques. Une analyse plus approfondie permet d'en fournir une interprétation qui ne sera pas développée ici.

L'étude présentée consiste en une expérience statistique/numérique de sensibilité, loin d'être complète et se rapprochant plutôt d'une « expérience de pensée ». Il faut, par exemple, rappeler que la démarche suivie ne fait aucune hypothèse quant à l'impact de la variabilité climatique naturelle sur la température atmosphérique, dont les données historiques sont reprises pour la modélisation, alors qu'il est évident que la variabilité climatique naturelle ne se résume pas à un effet sur la variabilité pluviométrique basse fréquence. Néanmoins, les résultats

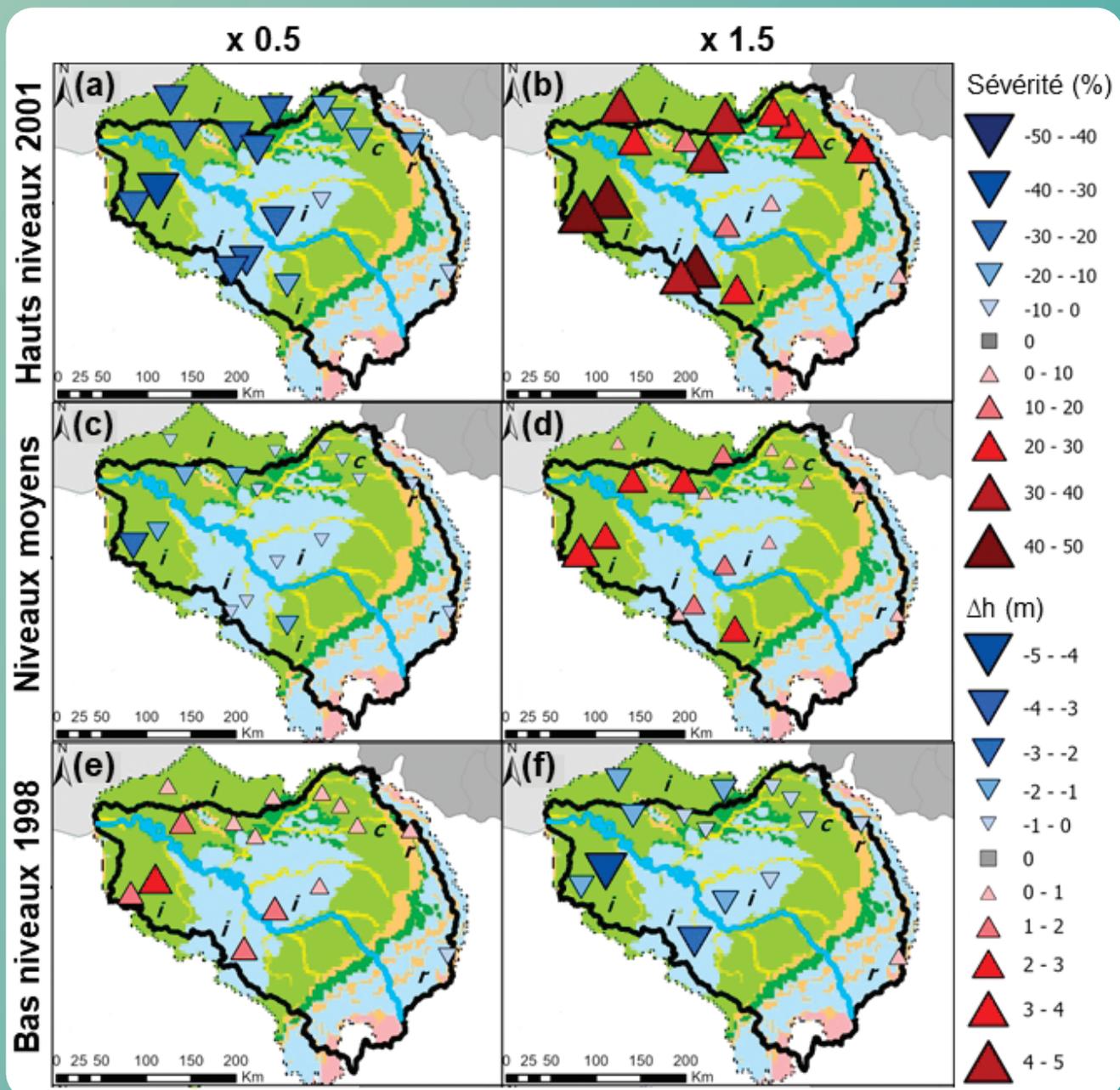


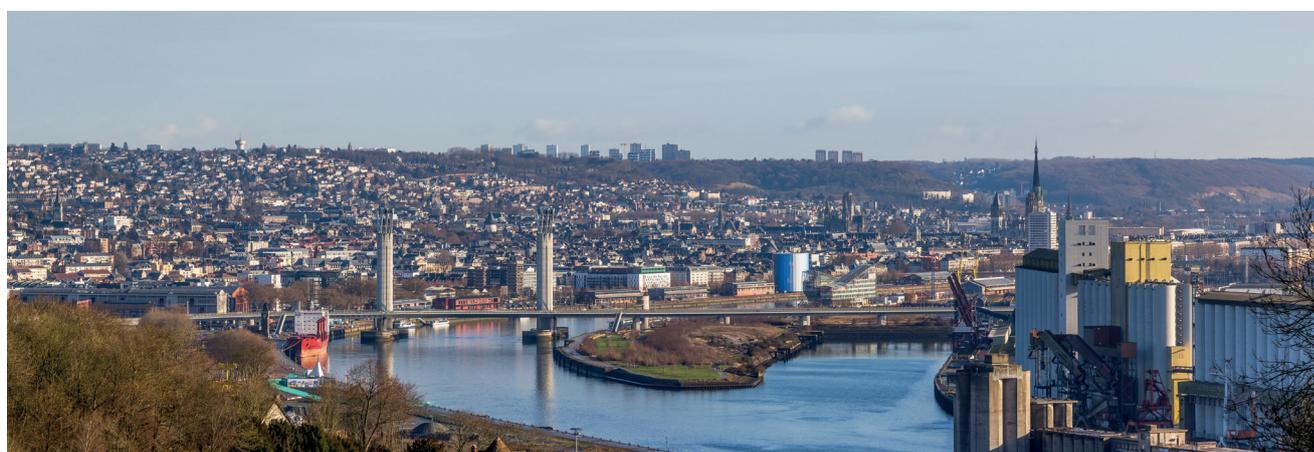
Figure 26. Effet de la modification de la variabilité basse fréquence 5-8 ans dans la pluie (scénarios x50 % ou x150 %) sur la sévérité des événements piézométriques exceptionnels (hautes eaux de 2001 et basses eaux de 1998) du bassin de la Seine, et sur le changement h produit sur les niveaux piézométriques moyens. Les lettres sur les cartes correspondent à la dynamique des nappes : le « i » correspond aux nappes inertielles, le « c » aux nappes à dynamique mixte, le « r » aux nappes réactives (typiquement à forte variabilité saisonnière).

de ce travail présentent l'avantage de montrer comment une mauvaise représentation de la variabilité basse fréquence par les modèles climatiques (ou bien comment des changements de la variabilité « naturelle » sous l'effet du dérèglement climatique) peut influencer l'estimation de certains types d'événements potentiellement extrêmes. Cette approche peut fournir des éléments de réflexion préalable à la question de l'incertitude sur les projections réalisées pour les prochaines décennies. Il est clair, toutefois, qu'une analyse intégrant la variabilité climatique dans son ensemble, abordée ici par le biais des précipitations seulement, permettrait un traitement plus pertinent de cette problématique.

5. Evolutions des débits moyens

Les changements de débits annuels simulés par CaWaQS issus des différents modèles sont généralement faibles, de quelques pourcents en milieu de siècle, entre 2032 et 2066 (Tableau 9). Plus le scénario socio-économique est pessimiste, plus les écarts se creusent entre débits actuels et débits à venir en fin de siècle par rapport au scénario optimiste qui présente moins de variabilité dans ces projections. Quels que soient les modèles, le scénario socio-économique optimiste, qui repose sur un effort d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre suivant les accords de Paris de 2015, permet de stabiliser

les débits moyens de l'ensemble des stations du bassin à leurs niveaux de la période de référence 1993-2010, et ce de manière assez stable tout au long du XXI^e siècle. Ce n'est pas du tout le cas avec le scénario pessimiste (Figure 27), qui amplifie la variabilité temporelle des modifications de débit, rendant l'analyse du système particulièrement complexe, menant à une probable nécessité d'adaptation aux deux situations amplifiées d'étiages sévères et de risque inondation. Ainsi en milieu ou fin de siècle, les débits moyens sont susceptibles, dans ce scénario, de varier de l'ordre de plus ou moins 10 % sans qu'aucune tendance notable ne se dégage.



Station	Présent		MS SSP1-2.6		MS SSP5-8.5		FS SSP1-2.6		FS SSP5-8.5	
	CNRM	MPI	CNRM	MPI	CNRM	MPI	CNRM	MPI	CNRM	MPI
L'Aire à Chevrières	12	10	11	9	11	11	12	10	13	8
L'Aisne à Givry	24	20	24	20	23	22	24	20	27	18
L'Aube à Arcis	30	27	29	26	29	29	29	27	31	23
L'Oise à Creil	80	70	83	70	80	79	84	73	92	65
L'Yonne à Gurgi	46	44	46	42	46	46	45	45	48	39
La Marne à Gournay	100	88	99	85	95	95	98	88	105	78
La Seine à Courtenot	18	16	18	15	17	17	18	16	20	14
La Seine à Pont	60	54	60	52	58	58	60	55	65	48
La Seine à St-Fargeau	179	163	178	158	175	176	178	170	192	149
La Seine à Paris-Auster.	296	266	293	257	284	287	291	273	315	240
La Seine à Vernon	400	357	401	349	387	391	400	370	435	328

Tableau 9. Débits moyens annuels (m³/s) à dix stations du bassin pour les périodes présentes (1980-2014), milieu du XXI^e siècle (MS, 2032-2066) et fin du XXI^e siècle ((FS, 2066-2100) incluant deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre (SSP1-2.6 et SSP5-8.5) pour les simulations hydrologiques incluant le forçage climatique dérivé des modèles CNRM-CM6-1 et MPI-ESM1-2-LR.

Si les moyennes pluri-annuelles peuvent présenter des variations importantes suivant le scénario pessimiste, ces variations sont encore plus fortes à l'échelle des saisons. En hiver, trois trajectoires vont vers une augmentation des débits sur la plupart des stations du bassin en fin de siècle, et la dernière mène généralement à de faibles diminutions. Les changements au printemps sont généralement faibles. En été et en automne, les tendances sont généralement à la diminution des débits, très marquées pour certains modèles (jusqu'à -30 % ou -40 %) et bien plus limités dans d'autres.

Une variabilité spatiale des changements des débits existe sur le bassin versant. Les diminutions des débits sont généralement plus marquées pour les stations à l'est du bassin, là où la contribution des aquifères à la genèse des débits est plus faible (voir section 4 de ce chapitre), et où les débits sont donc plus sensibles à la diminution des précipitations estivales généralement projetée. Pour les stations où les aquifères jouent un rôle important, généralement situées plus à l'ouest du bassin, la diminution des débits en été est limitée par l'apport d'eau provenant des aquifères, stockée en hiver, grâce à des bilans d'eau

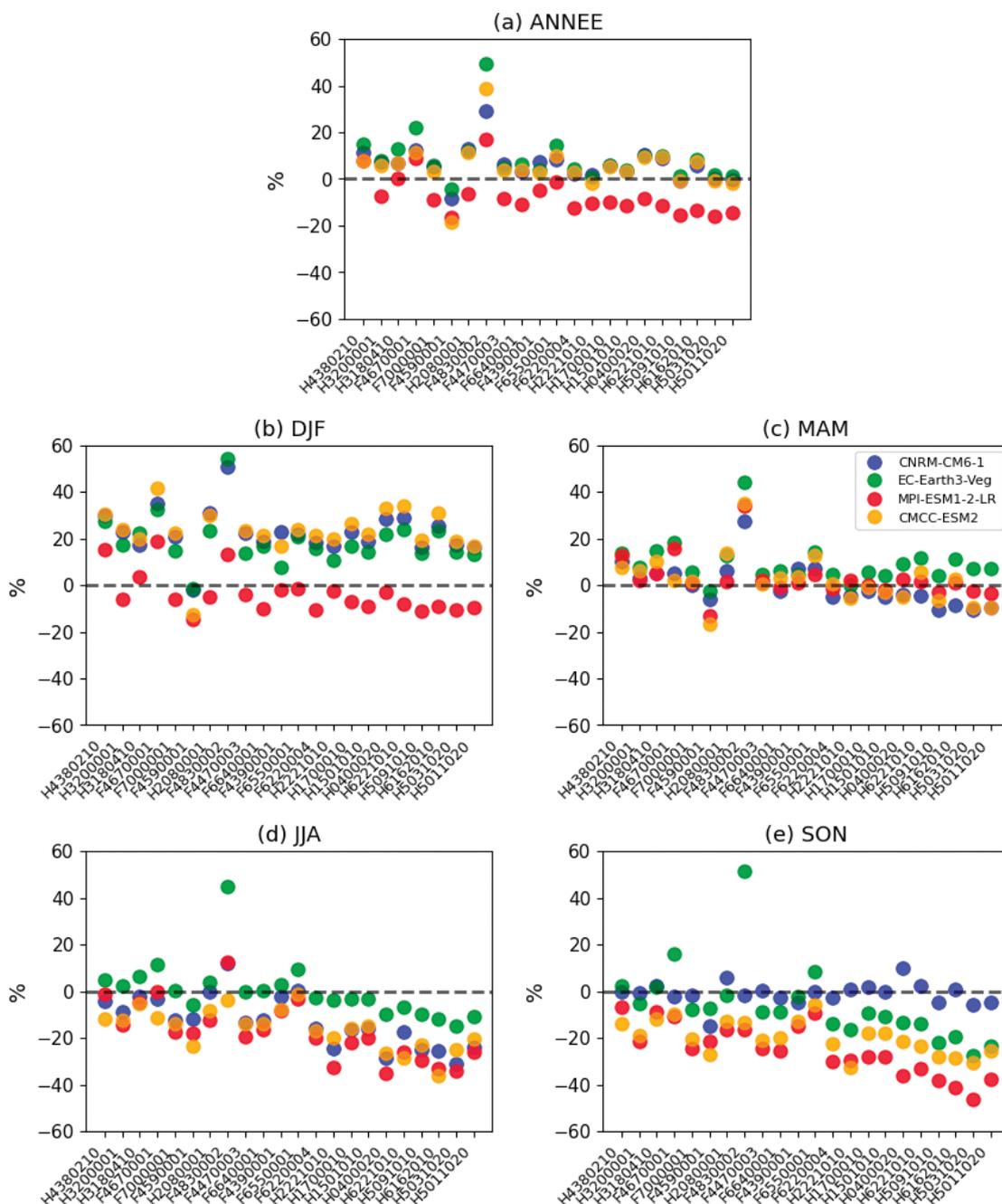


Figure 27. Changements relatifs des débits (%) entre 2066-2100 et 1980-2014 aux différentes stations d'intérêt pour les 4 trajectoires hydrologiques pour le scénario SSP5-8.5. Les stations sont ordonnées selon leur longitude, de l'ouest vers l'est.



généralement favorables en cette saison. A noter que ces simulations hydrologiques ne prennent pas en compte l'évolution potentielle de prélèvements pour l'agriculture sous changement climatique, ce qui aurait un impact supplémentaire sur l'évolution des débits.

Les changements des débits obtenus avec le scénario modéré d'émissions SSP2-4.5 (Figure 28) présentent des similarités avec ceux obtenus pour le scénario le plus

sévère (faibles changements annuels, augmentations fréquentes en hiver, diminutions robustes en été sur l'est du bassin), mais ces changements sont généralement moins sévères en été et en automne. Avec le scénario SSP1-2.6 (Figure 29), l'assèchement estival potentiel est bien moins clair, mais des diminutions importantes en automne sont visibles pour deux trajectoires, notamment sur l'est du bassin.

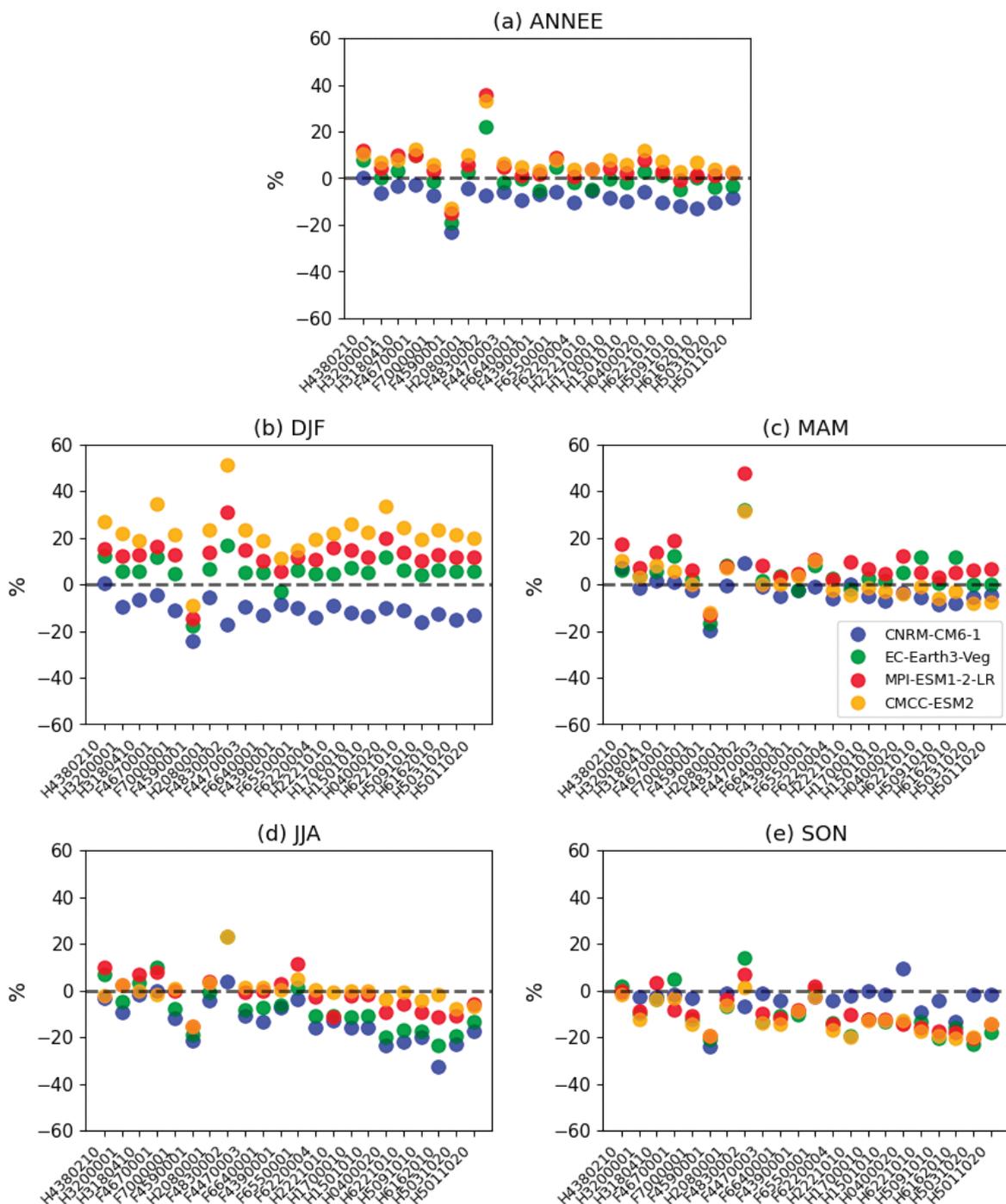


Figure 28. Changements relatifs des débits (%) entre 2066-2100 et 1980-2014 aux différentes stations d'intérêt pour les 4 trajectoires hydrologiques pour le scénario SSP2-4.5. Les stations sont ordonnées selon leur longitude, de l'ouest vers l'est.

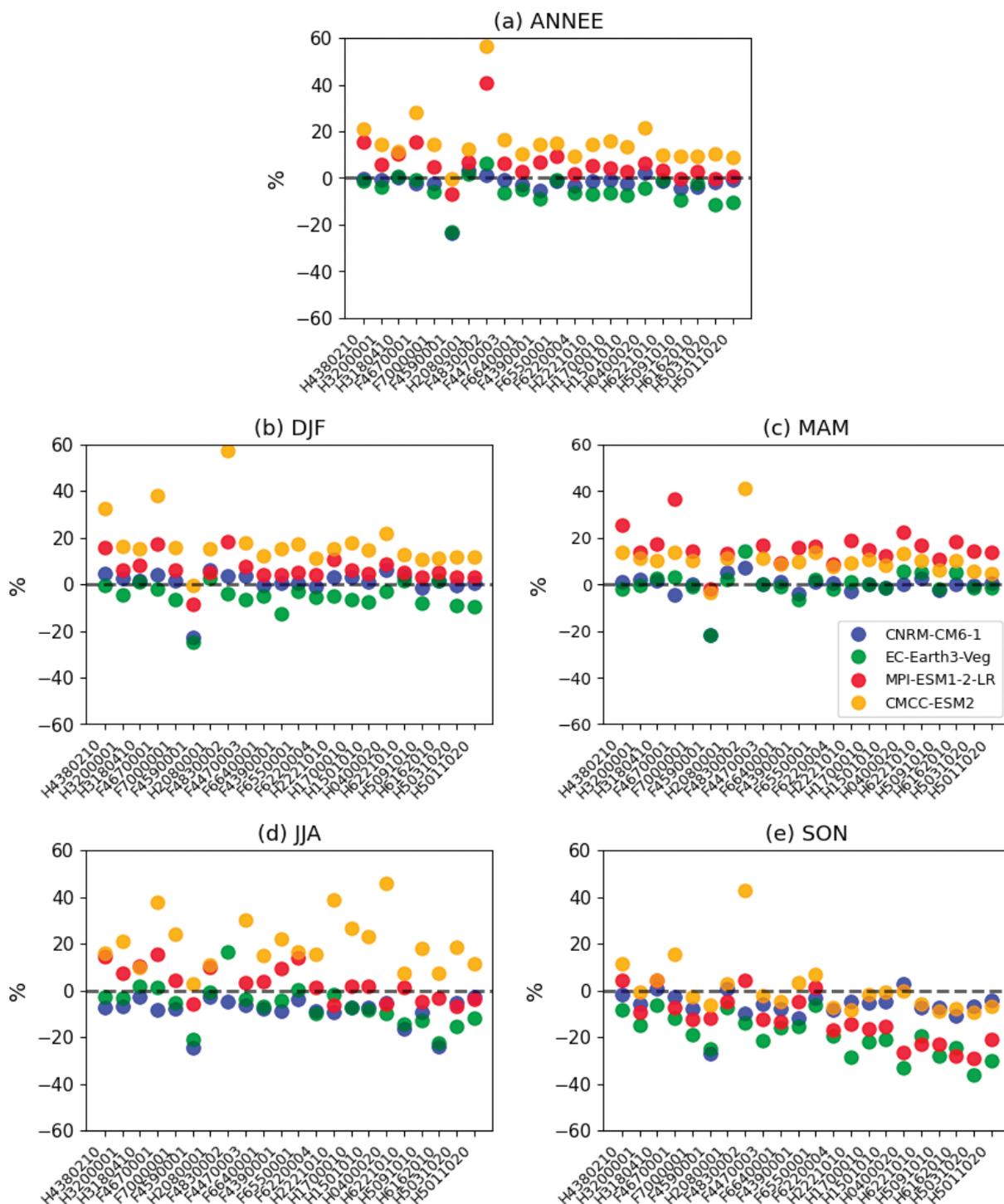


Figure 29. Changements relatifs des débits (%) entre 2066-2100 et 1980-2014 aux différentes stations d'intérêt pour les 4 trajectoires hydrologiques pour le scénario SSP1-2.6. Les stations sont ordonnées selon leur longitude, de l'ouest vers l'est.



6. Évolution du régime hydrologique à l'aval du bassin de la Seine

La trajectoire humide mène en fin de XXI^e siècle (2066-2100), pour le scénario optimiste, à une relative stabilité du régime hydrologique de la Seine à la station aval de Vernon (Figure 30a). Cependant les étiages sont, comme pour le scénario pessimiste, plus intenses et plus longs d'une dizaine de jours (Figure 30a,b). Cependant, le scénario d'émissions pessimiste aboutit en sus à de fortes augmentations des débits hivernaux qui renforcent le risque d'inondation (Figure 30b).

La trajectoire sèche indique également des projections contrastées en fin de XXI^e siècle suivant le scénario socio-économique choisi. Le scénario optimiste permet

de préserver les étiages du bassin à leurs valeurs actuelles moyennant un décalage dans le temps de leurs démarrages de quelques jours (Figure 30c). Ce qui n'est pas le cas du scénario pessimiste, qui génère une diminution systématique des débits mensuels moyens tout au long de l'année (Figure 30d). L'étiage est alors d'autant plus sévère qu'il apparaît beaucoup plus intense dès le mois de juillet, et s'allonge significativement jusqu'à la fin novembre, soit un doublement de sa durée passant de 60 jours actuellement à plus de 100 jours projetés.

En croisant ces deux trajectoires et ces deux scénarios, il apparaît que nos actions sont cruciales pour le régime hydrologique de la Seine. Le respect des accords de Paris permettrait de préserver le régime hydrologique de la Seine quelle que soit la trajectoire suivie, humide ou sèche (Figure 30a,c). Ce n'est en revanche pas le cas des scénarios pessimistes qui mèneraient dans un cas à

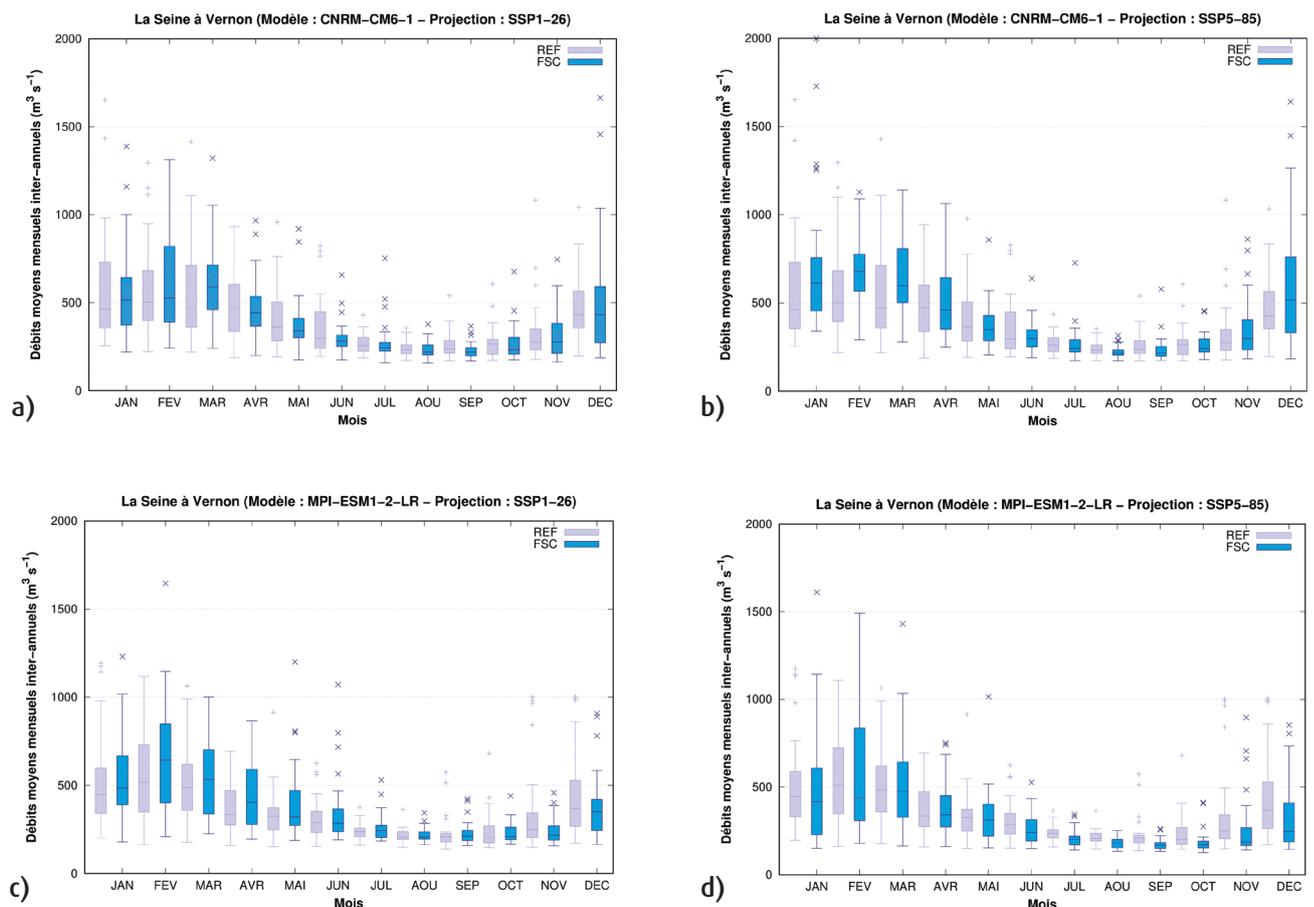


Figure 30. Régime hydrologique de la Seine à Vernon en fin de XXI^e siècle (2066-2100) pour les trajectoires humide (a,b), et sèche (c,d) sous scénario socio-économique optimiste proche des accords de Paris (a,c), et pessimiste basé sur l'utilisation débridée des énergies fossiles (b,d). Les projections pour la fin de siècle en bleu sont à comparer à la période de référence simulée par le modèle lui-même en gris. Cela explique la différence entre les régimes hydrologiques historiques des deux modèles humides, CNRM, ou sec, MPI. Une augmentation de la taille d'une boîte indique une augmentation de la variabilité de la valeur du débit mensuel. La barre noire interne à chaque boîte indique la valeur moyenne du débit mensuel sur la période considérée (2066-2100).

une raréfaction de la ressource en eau (trajectoire sèche), et dans l'autre à une augmentation des débits hivernaux (trajectoire humide). Ces deux projections ne nécessitent pas les mêmes mesures d'adaptation. Or, leur caractère supposé équiprobable nécessite de les prendre toutes les deux en compte dans notre stratégie d'adaptation qui devrait ainsi être double pour se prémunir des risques d'inondation et de raréfaction de la ressource en eau. Le scénario pessimiste mène en quelque sorte à une double peine...

7. Changements des débits intenses à Paris Austerlitz

Les changements des précipitations intenses, souvent à l'origine des crues, ne suivent pas forcément les changements des précipitations moyennes. En raison du réchauffement de l'atmosphère, la capacité de l'air à contenir de la vapeur d'eau augmente, ce qui se traduit généralement par une augmentation de l'humidité atmosphérique. Quand les conditions sont favorables, comme lors des épisodes de précipitations intenses, cette augmentation de l'humidité atmosphérique peut se traduire par une augmentation des précipitations (Douville et al., 2021), avec un impact potentiel sur les crues.

Néanmoins, l'état des sols et des aquifères peut également jouer un rôle important dans les changements des crues, potentiellement opposé à celui des changements de précipitations intenses.

Le débit journalier maximum annuel subit des évolutions importantes, pour certains modèles et scénarios. Pour le scénario pessimiste d'émission le plus sévère (SSP5-8.5, Fig 31c), pour la trajectoire humide forcée par le modèle CNRM-CM6-1, on constate une augmentation prononcée des débits intenses, dépassant 50 % en fin de XXI^e siècle. Ce qui n'est pas le cas pour la trajectoire sèche, forcée avec le modèle MPI-ESM1-2-LR, pour laquelle une très faible diminution de ce débit maximum annuel est projetée (SSP5-8.5, Figure 31d). Des débits journaliers dépassant 2000 m³ s⁻¹ sont cependant projetés pour les deux trajectoires, avec même dans un cas plus de 2500 m³ s⁻¹.

Pour le scénario d'émission optimiste (SSP1-2.6, Figure 31a,b), les tendances des débits intenses sont moins marquées, pointant de nouveau clairement l'intérêt de l'atténuation. Néanmoins, des variabilités interannuelles fortes (comme c'est le cas avec la trajectoire humide forcée par CNRM-CM6-1) ou des augmentations éventuelles de variabilité peuvent mener ponctuellement à des débits journaliers annuels maximums forts au cours du XXI^e siècle avec ce scénario.

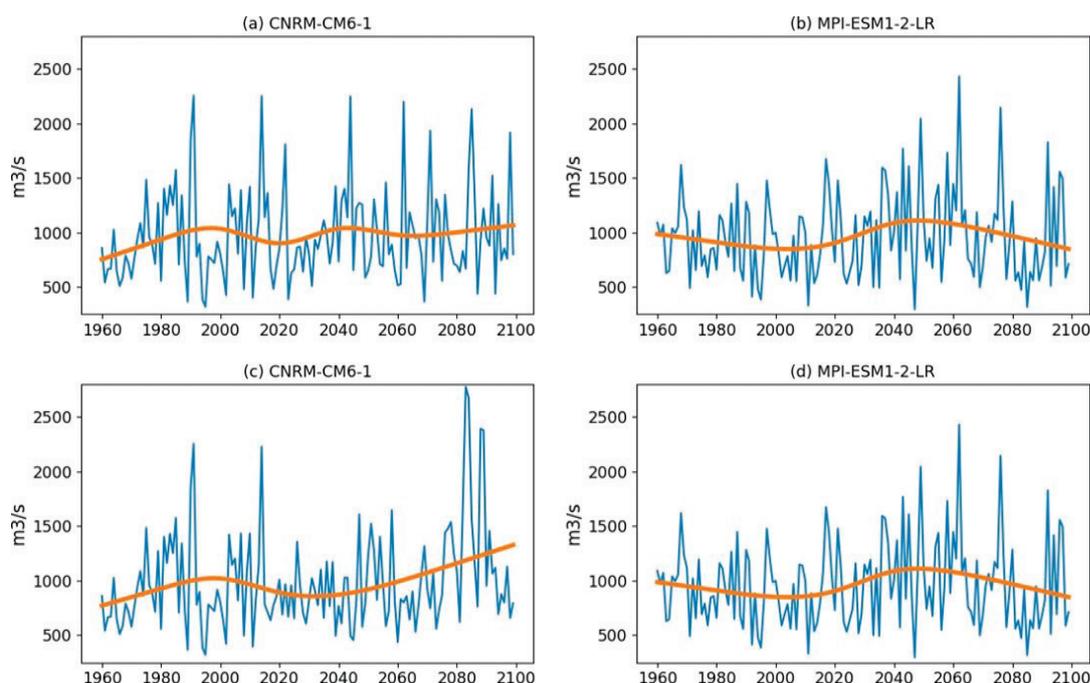


Figure 31. Débit journalier annuel maximum de la Seine à Paris (m³ s⁻¹) simulé par CaWaQS forcé par les projections climatiques extrêmes pour le scénario optimiste SSP1-2.6 (a,b) et pessimiste SSP5-8.5 (c,d), pour les trajectoires humides (a,c) et sèche (b,d). La ligne orange indique la tendance basse fréquence estimée par un lissage par spline.



Une variabilité décennale forte du débit journalier maximum annuel, très certainement liée à la variabilité interne climatique, est également visible (par exemple pour la trajectoire humide forcée par MPI-ESM1-2-LR pour le scénario pessimiste SSP5-8.5, avec des valeurs plus fortes autour des années 2050).

8. Évolution des étiages

Les débits d'étiage des rivières et cours d'eau dépendent de l'intensité des précipitations en période estivale et automnale ainsi que des réserves d'eau des aquifères constituée de l'automne au printemps lorsque la pluie est abondante et que les températures plus fraîches de l'air modèrent l'évapotranspiration.

On distingue plusieurs types de rivières et cours d'eau en fonction de leur dépendance aux eaux souterraines :

➤ Des rivières à forte variabilité de leur débit, car dépendant presque exclusivement de processus de surface rapides ;

➤ Des rivières inertielles qui dépendent fortement des eaux souterraines et qui présentent un débit à faible variabilité.

Si le premier type est moins fréquent dans le bassin de la Seine, il est très représenté dans la frange est jurassique du bassin de la Seine qui présente de plus un risque plus élevé de raréfaction de la ressource eau souterraine (voir section 4 « Changement des hauteurs piézométriques »). Pour les scénarios pessimistes secs, ces cours d'eau peuvent voir leurs débits estivaux diminuer de 35 % en fin de XXI^e siècle pour les scénarios pessimistes du fait des effets combinés de la diminution des précipitations et de l'apport des nappes à cette période. C'est cependant le déficit de précipitations qui a le plus fort impact sur ces cours d'eau, et la raréfaction de la ressource en eau souterraine renforce ce déficit.

Les rivières inertielles sont, quant à elles, principalement affectées par la ressource en eau souterraine, notamment en période d'étiage où leur débit est quasiment exclusivement composé d'eaux provenant des aquifères. Afin de caractériser l'évolution des débits d'étiage au

Trajectoire	Humide						Sèche					
	Scénario Horizon	Référence m ³ s ⁻¹ 1990-2014	Optimiste 2032-2066	Optimiste 2066-2100	Pessimiste 2032-2066	Pessimiste 2066-2100	Référence m ³ s ⁻¹ 1990-2014	Optimiste 2032-2066	Optimiste 2066-2100	Pessimiste 2032-2066	Pessimiste 2066-2100	
Aire@Chevrières	2,0	-10,4 %	-5,4	-11,9	-9,0 %	1,7	-12,9 %	3,5 %	9,4 %	-21,8 %		
Aisne@Givry	6,0	-2,7 %	0,3 %	-5,6 %	-7,7 %	5,3	-9,7 %	2,5 %	4,4 %	-20,3 %		
Aube@Arcis	11,8	-0,9 %	-2,9 %	-3,3 %	-4,3 %	10,6	-11,0 %	5,9 %	7,7 %	-15,7 %		
Yonne@Gurgy	11,6	-5,4 %	-6,3 %	-7,5 %	-12,4 %	10,1	-12,3 %	6,8 %	6,2 %	-14,4 %		
Marne@Gournay	44,7	-3,3 %	-3,1 %	-5,2 %	-0,9 %	39,7	-9,2 %	1,3 %	6,5 %	-13,6 %		
Oise@Creil	38,8	2,0 %	-3,6 %	-2,3 %	9,3 %	33,3	-3,7 %	7,5 %	12,0 %	-12,7 %		
Seine@Courtenot	3,1	-1,9 %	-5,1 %	-3,5 %	-7,7 %	2,9	-13,6 %	5,4 %	4,8 %	-18,7 %		
Seine@Pont	22,4	-3,2 %	-5,8 %	-5,5 %	-5,9 %	20,4	-14,5 %	2,3 %	4,5 %	-18,6 %		
Seine@St-Fargeau	75,1	-4,4 %	-1,4 %	-7,8 %	-7,8 %	65,6	-12,3 %	7,6 %	7,5 %	-15,8 %		
Seine@Austerlitz	132,4	-6,1 %	-4,8 %	-7,7 %	-4,1 %	117,0	-12,1 %	5,9 %	4,9 %	-15,5 %		
Seine@Vernon	191,3	-5,5 %	-4,4 %	-8,2 %	-1,0 %	167,1	-10,0 %	5,6 %	6,0 %	-14,8 %		

Tableau 10. Projections d'évolution des débits minimums moyens annuels quinquennaux (QMNA5) en onze stations de jaugeage du bassin de la Seine sous changement climatique.

cours du temps, nous calculons le QMNA5 (débit minimum moyen annuel quinquennal¹⁰) en certaines stations du réseau hydrographique (Tableau 10). Les résultats traduisent directement les tendances déjà mises en lumière pour la piézométrie. Ainsi la trajectoire sèche sous scénario pessimiste est très critique pour les débits d'étiage des rivières qui diminueraient systématiquement de plus de 12,5 %, pouvant atteindre 20 % dans les secteurs plus en amont comme l'Aire à Chevrières ou l'Aisne à Givry. La Seine à Vernon verrait son QMNA5 diminuer significativement jusqu'à -15 % en fin de XXI^e siècle. Si la trajectoire humide pessimiste engendrait un renforcement des débits moyens en fin de siècle, le QMNA5 de la Seine pourrait être affecté par une diminution de quelques pourcents en fin de XXI^e siècle.

Pour les QMNA5 encore, il apparaît que le scénario optimiste permet de stabiliser les débits minimum moyens annuels quinquennaux dans une fourchette de +/- 5 %, ce qui ne nécessiterait pas d'engager des mesures d'adaptation lourde. Tout comme la piézométrie, la réponse moyenne du système en milieu de XXI^e siècle pourrait présenter des situations trompeuses quant à l'atterrissage du système en fin de siècle. C'est ainsi que la trajectoire sèche sous scénario optimiste pourrait passer par un état dégradé de ses QMNA5 en milieu de XXI^e siècle, avec des diminutions généralisées du QMNA5 de l'ordre de -10 %, certes moins importantes qu'en fin de siècle sous scénario pessimiste (-15 %), mais tout de même conséquentes avant d'atterrir en fin de siècle sur des QMNA5 légèrement augmentés. À l'inverse, le scénario pessimiste pourrait pour cette même trajectoire présenter une augmentation d'environ 5 % du QMNA5 de la Seine en milieu de XXI^e siècle.

De manière contre-intuitive, la trajectoire humide mène en fin de siècle à des étiages de la Seine à Vernon plus intenses (Figure 32a,b), plus longs (10 jours, Figure 32a',b'), et plus fréquents (resserrement des boites à moustaches en fin de XXI^e siècle).

La trajectoire sèche mène à des projections contrastées en fin de XXI^e siècle suivant le scénario socio-économique choisi. Le scénario optimiste

¹⁰ Le débit minimum moyen annuel quinquennal a une chance sur cinq d'être observé une année quelconque



permet de préserver les étiages du bassin à leurs valeurs actuelles (Figure 32c,c'). En revanche, dans le cas du scénario pessimiste, l'étiage s'intensifie (diminution

du QMNA5 de -15 % à Vernon) et double de durée (Figure 32d'), dépassant cent jours suivant la méthode de calcul retenue.



La Seine à Vernon

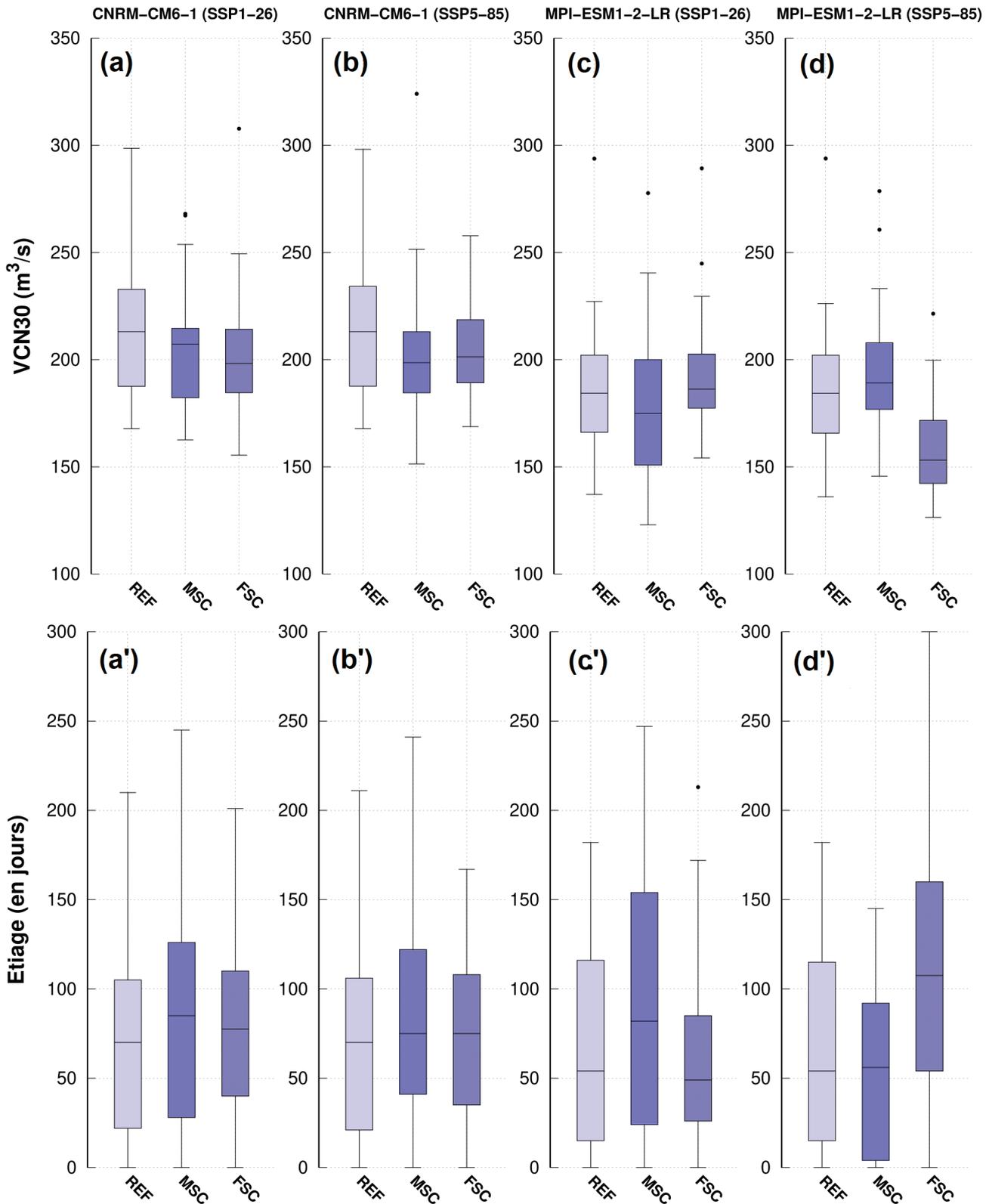


Figure 32. Caractérisation de la Seine à Vernon par le biais des débits minimum annuels en moyenne glissante sur 30 jours (VCN30, a-d) et des durées associées à ces étiages (a» -d'). Les résultats sont présentés sous forme de boîtes à moustache pour lesquelles la médiane et les quantiles formant la boîte (25-75 %) et les moustaches sont représentées pour la période de référence (1990-2014 (REF), 2032-2066 (MSC) et 2066-2100 (FSC). (a,b) VCN30 de la trajectoire humide sous scénario optimiste (a) et pessimiste (b). c,d) VCN30 de la trajectoire sèche sous scénario optimiste (c) et pessimiste (d). Même convention pour les durées en ajoutant un prime.

Références



- AGRESTE (2009). La statistique agricole annuelle : Présentation générale. Notice d'information, Ministère de l'agriculture et de l'alimentation.
- Baratelli, F., N. Flipo, A. Rivière, and S. Biancamaria (2018). Retrieving river baseflow from SWOT spaceborne mission. *Remote Sensing and Environment* 218, 44–54.
- Barthel, R. and S. Banzhaf (2016). Groundwater and Surface Water Interaction at the Regional-scale– A Review with Focus on Regional Integrated Models. *Water Resources Management* 30, 1–32.
- Besbes, M. and G. De Marsily (1984, November). From infiltration to recharge : use of a parametric transfer function. *Journal of Hydrology* 74(3-4), 271–293.
- Blöschl, G., Bierkens, M. F.P., Chambel, A. et al., (2019) Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 64 (10). pp. 1141-1158. doi: 10.1080/02626667.2019.1620507
- Bonnet, R. (2018). *Variations du cycle hydrologique continental en France des années 1850 à aujourd'hui*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse 3 Paul Sabatier.
- 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. (2018). Interdependency in Multimodel Climate Projections : Component Replication and Result Similarity. *Geophysical Research Letters* 45(6), 2771–2779.
- 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. Rapport, PIREN-Seine.
- Boé, J. and A. Mass (2021). Méthode de désagrégation hybride statistico-dynamique pour les scénarios climatiques sur le bassin de la Seine. Rapport, PIREN-Seine.
- Boé, J., A. Mass, and J. Deman (2022, November). A simple hybrid statistical–dynamical downscaling method for emulating regional climate models over Western Europe. Evaluation, application, and role of added value ? *Climate Dynamics*.
- 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(12), 1643–1655.
- Boé, J., L. Terray, M.-P. Moine, S. Valcke, A. Bellucci, S. Drijfhout, R. Haarsma, K. Lohmann, D. A. Putrasahan, C. Roberts, M. Roberts, E. Scoccimarro, J. Seddon, R. Senan, and K. Wyser (2020, August). Past long-term summer warming over western Europe in new generation climate models : role of large-scale atmospheric circulation. *Environmental Research Letters* 15(8), 084038.
- Cao, G., B. R. Scanlon, D. Han, and C. Zheng (2016). Impacts of thickening unsaturated zone on groundwater recharge in the North China Plain. *Journal of hydrology* 537, 260–270. Publisher : Elsevier.
- Casanueva, A., S. Herrera, M. Iturbide, S. Lange, M. Jury, A. Dosio, D. Maraun, and J. M. Gutiérrez (2020, July). Testing bias adjustment methods for regional climate change applications under observational uncertainty and resolution mismatch. *Atmospheric Science Letters* 21(7).

- Compo, G. P., J. S. Whitaker, P. D. Sardeshmukh, N. Matsui, R. J. Allan, X. Yin, B. E. Gleason, R. S. Vose, G. Rutledge, P. Bessemoulin, S. Brönnimann, M. Brunet, R. I. Crouthamel, A. N. Grant, P. Y. Groisman, P. D. Jones, M. C. Kruk, A. C. Kruger, G. J. Marshall, M. Maugeri, H. Y. Mok, O. Nordli, T. F. Ross, R. M. Trigo, X. L. Wang, S. D. Woodruff, and S. J. Worley (2011). The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137(654), 1–28.
- Couturier, C., M. Charru, S. Doublet, and P. Pointereau (2017). Le scénario Afterres 2050. Solagro. Crutzen, P. (2002). *Geology of mankind. Nature* 415(6867), 23.
- Crutzen, P. and W. Steffen (2003). How long have we been in the Anthropocene era? An Editorial Comment. *Climatic Change* 61(3), 251–257.
- David, C. H., F. Habets, D. R. Maidment, and Z.-L. Yang (2011). RAPID applied to the SIM-France model. *Hydrological Processes* 25(22), 3412–3425. Publisher : John Wiley & Sons, Ltd.
- Dayon, G., J. Boé, and E. Martin (2015). Transferability in the future climate of a statistical downscaling method for precipitation in France. *Journal of Geophysical Research* 120(3), 1023–1043.
- 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.
- De Marsily, G. (1986). *Quantitative Hydrogeology*. Academic Press, Inc., Orlando, FL.
- De Marsily, G. (2008). Eau, changements climatiques, alimentation et évolution démographique. *Revue des Sciences de l'Eau/Journal of Water Science* 21(2), 111–128.
- Douville, H., K. Raghavan, J. Renwick, R. Allan, P. Arias, M. Barlow, R. Cerezo-Mota, A. Cherchi, T. Gan, J. Gergis, D. Jiang, A. Khan, W. Pokam Mba, D. Rosenfeld, J. Tierney, and O. Zolina (2021). Water cycle changes. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021 : The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA : Cambridge University Press. Section : 8 Type : Book Section.
- Eyring, V., S. Bony, G. Meehl, C. Senior, B. Stevens, R. Stouffer, and K. Taylor (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development* 9(5), 1937–1958.
- Flipo, N. (2005). *Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et les rivières : Application au bassin du Grand Morin*. Thèse de doctorat, Centre d'Informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- 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, PIREN Seine.
- Flipo, N., N. Gallois, and J. Schuite (2023, January). Regional coupled surface–subsurface hydrological model fitting based on a spatially distributed minimalist reduction of frequency domain discharge data. *Geoscientific Model Development* 16(1), 353–381.
- Flipo, N. et Gallois, N (2023). Trajectoires hydrologiques, passées, présentes et futures du bassin de la Seine, Rapport de fin de Phase 8, volume 3, PIREN-Seine.
- Flipo, N., Labadie, P., Lestel, L. (eds). (2020). The Seine River Basin. The Handbook of Environmental Chemistry, vol 90. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/698_2019_437.
- Flipo, N., L. Lestel, P. Labadie, M. Meybeck, and J. Garnier (2021). The Seine River Basin. Volume 90 of *Handbook of Environmental Chemistry*, pp. 1–28. Cham, Switzerland : Springer. Section : Trajectories of the Seine River Basin.
- Flipo, N., C. Monteil, M. Poulin, C. d. 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.

- ▶ Flipo, N., J. M. Mouchel, C. Fisson, S. Wang, M. Le Gall, S. Ayrault, P. Labadie, J. Gasperi, S. Guillon, H. Budzinski, O. Evrard, T. Romary, E. Chautru, D. Abhervé, G. Chevillotte, J. B. Narcy, A. Catten, and M. Meybeck (2018). Les effets de la crue de juin 2016 sur la qualité de l'eau du bassin de la Seine. Fascicule #17 du PIREN-Seine.
- ▶ Flipo, N., A. Mouhri, B. Labarthe, S. Biancamaria, A. Rivière, and P. Weill (2014). Continental hydrosystem modelling : the concept of nested stream-aquifer interfaces. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 3121–3149.
- ▶ Gallois, N. et N. Flipo (2024). Relations eaux souterraines - réseau hydrographique sur le territoire Seine- Normandie. Quantification des flux hydriques en préparation de l'état des lieux 2025. Rapport R15032024NGAL, ARMINES/Mines Paris, PSL Université.
- ▶ Gallois, N., Flipo, Nicolas, 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. Thèse de doctorat, PIREN-Seine.
- ▶ Girard, G., E. Ledoux, and J.-P. Villeneuve (1980). An integrated rainfall, surface and underground runoff model. *La Houille Blanche* 4/5, 315–320.
- ▶ Gomez, E., E. Ledoux, P. Viennot, C. Mignolet, M. Benoît, C. Bornerand, C. Schott, B. Mary, G. Billen, A. Ducharne, and D. Brunstein (2003). Un outil de modélisation intégrée du transfert des nitrates sur un système hydrologique : Application au bassin de la Seine. *La Houille Blanche* 3-2003, 38–45.
- ▶ Haddeland, I., J. Heinke, H. Biemans, S. Eisner, M. Flörke, N. Hanasaki, M. Konzmann, F. Ludwig, Y. Masaki, J. Schewe, T. Stacke, Z. Tessler, Y. Wada, and D. Wisser (2014). Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111(9), 3251–3256.
- ▶ Hattermann, F., V. Krysanova, S. Gosling, R. Dankers, P. Daggupati, C. Donnelly, M. Flörke, S. Huang, Y. Motovilov, S. Buda, T. Yang, C. Müller, G. Leng, Q. Tang, F. Portmann, S. Hagemann, D. Gerten, Y. Wada, Y. Masaki, T. Alemayehu, Y. Satoh, and L. Samaniego (2017). Cross-scale intercomparison of climate change impacts simulated by regional and global hydrological models in eleven large river basins. *Climatic Change* 141(3), 561–576.
- ▶ Holman, I. P., M. Rivas-Casado, J. P. Bloomfield, and J. J. Gurdak (2011, September). Identifying non- stationary groundwater level response to North Atlantic ocean-atmosphere teleconnection patterns using wavelet coherence. *Hydrogeology Journal* 19(6), 1269–1278.
- ▶ IPCC (2021). *Climate change 2021 : The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA : Cambridge University Press. Type : Book.
- ▶ Jackson, R., S. Carpenter, C. Dahm, R. McKnight, D. M. and\ Naiman, S. Postel, and S. Running (2001). Water in a changing world. *Ecological Applications* 11(4), 1027–1045.
- ▶ Koerner, M., B. Cinotti, J.-H. Jussy, and M. Benoit (2000). Evolution des surfaces boisées en France depuis le début du XIX^e siècle : Identification et localisation des boisements des territoires agricoles abandonnés. *Revue forestière française* 3, 249–269.
- ▶ Labarthe, B. and N. Flipo (2016). Dynamique des échanges hydriques entre un réseau hydrographique, une plaine alluviale, et leur aquifère régional. Technical report, PIREN Seine.
- ▶ Liesch, T. and A. Wunsch (2019, May). Aquifer responses to long-term climatic periodicities. *Journal of Hydrology* 572, 226–242.
- ▶ Massei, N., B. Dieppois, D. M. Hannah, D. A. Lavers, M. Fossa, B. Laignel, and M. Debret (2017). Multi- time-scale hydroclimate dynamics of a regional watershed and links to large-scale atmospheric circulation : Application to the Seine river catchment, France. *Journal of Hydrology* 546, 262–275.
- ▶ Massei, N., A. Durand, J. Deloffre, J. P. Dupont, D. Valdes, and B. Laignel (2007, May). Investigating possible links between the North Atlantic Oscillation and rainfall variability in northwestern France over the past 35 years. *Journal of Geophysical Research* 112(D9), D09121.

- 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. *Int. J. Climatol.* 30(14), 2146–2154.
- Mekonnen, M. and A. Hoekstra (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances* 2(2), e1500323.
- Nash, J. and J. Sutcliffe (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3), 282–290.
- Oki, T. and S. Kanae (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Science* 313(5790), 1068–1072.
- Perkins, S. P. and M. Sophocleous (1999). Development of a Comprehensive Watershed Model Applied to Study Stream Yield under Drought Conditions. *Ground Water* 37(3), 418–426.
- Pryet, A., B. Labarthe, F. Saleh, M. Akopian, and N. Flipo (2015). Reporting of stream-aquifer flow distribution at the regional scale with a distributed process-based model. *Water Resources Management* 29, 139–159.
- Quintana-Seguí, P., P. L. Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy, and S. Morel (2008). Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47, 92–107.
- Ribes, A., J. Boé, S. Qasmi, B. Dubuisson, H. Douville, and L. Terray (2022, October). An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint. *Earth System Dynamics* 13(4), 1397–1415.
- Rivière, A., J. Gonçalves, A. Jost, and M. Font (2014). Experimental and numerical assessment of transient stream-aquifer exchange during disconnection. *Journal of Hydrology* 517, 574–583.
- Roche, P.-A. and D. Zimmer (2006). Les eaux continentales. pp. 9–102. Institut de France - Académie des Sciences. Section : Eau, aménagements et usages.
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, A. Persson, F. Chapin, E. Lambin, T. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. Schellnhuber, B. Nykvist, C. De Wit, T. Hughes, S. Van Der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. Corell, V. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, and J. Foley (2009). A safe operating space for humanity. *Nature* 461(7263), 472–475.
- Rust, W., I. Holman, J. Bloomfield, M. Cuthbert, and R. Corstanje (2019, August). Understanding the potential of climate teleconnections to project future groundwater drought. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(8), 3233–3245.
- 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*.
- Shepherd, T. G., E. Boyd, R. A. Calel, S. C. Chapman, S. Dessai, I. M. Dima-West, H. J. Fowler, R. James, D. Maraun, O. Martius, C. A. Senior, A. H. Sobel, D. A. Stainforth, S. F. B. Tett, K. E. Trenberth, B. J. J. M. Van Den Hurk, N. W. Watkins, R. L. Wilby, and D. A. Zenghelis (2018, December). Storylines : an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change. *Climatic Change* 151(3–4), 555–571.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *geophys. Union Trans.* 38, 913–920.
- Switanek, M. B., P. A. Troch, C. L. Castro, A. Leuprecht, H.-I. Chang, R. Mukherjee, and E. M. C. Demaria (2017, June). Scaled distribution mapping : a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology and Earth System Sciences* 21(6), 2649–2666.
- Taylor, R. G., B. Scanlon, P. Doll, M. Rodell, R. v. Beek, Y. Wada, L. Longuevergne, M. Leblanc, J. S. Famiglietti, L. Konikow, T. R. Green, J. Chen, M. Taniguchi, M. F. P. Bierkens, A. MacDonald, Y. Fan, R. M. Maxwell, Y. Yechieli, J. J. Gurdak, D. M. Allen, M. Shamsudduha, K. Hiscock, I. Holman, and H. Treidel (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change* 3, 322–329.
- Vidal, J.-P., E. Martin, L. Franchistéguy, F. Habets, J.-M. Soubeyroux, M. Blanchard, and M. Baillon (2010). Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 459–478.

Glossaire



- › **Affleurement** : Extension spatiale d'un aquifère en contact direct avec l'atmosphère à travers le sol et une zone vadose.
- › **Désagrégation (downscaling)** : Méthode mathématique permettant, à partir de simulations de résolution grossière, d'estimer des distributions à résolution plus fine. Dans le cas des travaux sur les impacts du changement climatique, la désagrégation consiste à transférer les résultats des modèles de circulation générale d'une résolution de l'ordre de 100 km x 100 km vers une grille des forçages hydrométéorologiques de Météo France, SAFRAN de résolution 8 km x 8 km.
- › **Étiage** : Période de bas débit annuel dans les cours d'eau.
- › **Forçages anthropiques** : Regroupe l'ensemble des actions humaines qui modifient les flux naturels sans action de l'homme. Dans le cadre de l'étude du changement climatique, un des forçages anthropiques est l'émission de gaz à effet de serre. Dans le cadre de l'étude des ressources en eau, les pompages constituent des forçages anthropiques, ainsi que le déploiement de barrages réservoirs, de navigation. L'artificialisation des sols urbains et agricoles ont également un impact sur le cycle de l'eau.
- › **Impluvium** : Affleurement d'un aquifère qui permet la recharge de ce dernier par les eaux de pluie qui s'infiltrent à travers le sol et la zone vadose sous-jacente.
- › **Lame d'eau écoulée** : Volume d'eau total écoulé pendant un temps donné, divisé par la superficie du bassin versant.
- › **Pendage** : Pente d'une couche sédimentaire, d'un filon dans une mine.
- › **Piézométrie** : C'est la mesure de la profondeur où se situe le haut d'une nappe d'eau souterraine. Elle est exprimée en mètres, soit par rapport à la surface du sol, soit par rapport à l'altitude zéro du niveau de la mer.
- › **Ruissellement** : Partie de la précipitation qui s'écoule vers un cours d'eau à la surface du sol (ruissellement ou écoulement de surface) ou dans le sol (écoulement hypodermique ou ruissellement retardé).

Sigles



- **AEP** : Alimentation en eau potable
- **AEP** : Apport en eau potable
- **AESN** : Agence de l'eau Seine Normandie
- **AGRESTE** : La statistique, l'évaluation et la prospective du ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté alimentaire et de la Forêt
- **ARCEAU IdF** : Association Recherche Collectivités dans le domaine de l'eau en Île de France
- **BNPE** : Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau
- **BRGM** : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- **CaWaQS** : CAthment Water Quality Simulator
- **CMIP6** : Coupled Model Intercomparison Project phase 6
- **DCE** : Débit Caractéristique d'Étiage
- **ENSO** : El Nino-Southern Oscillation
- **ETP** : Évapotranspiration potentielle
- **ETR** : Évapotranspiration réelle
- **GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
- **HYMIT** : Hydrological Minimalist Transfer function
- **IAU** : Institut d'Aménagement et d'Urbanisme
- **INSEE** : Institut national de la statistique et des études économiques
- **KGE** : Coefficient d'efficacité de Kling-Gupta
- **MCMC** : Monte Carlo Markov Chain
- **MESO** : Masses d'eau souterraines
- **NAO** : Oscillation nord-atlantique
- **NASH** : Coefficient de performance de Nash et Sutcliffe
- **NOAA** : National Oceanic and Atmospheric Administration
- **PIREN-Seine** : Programme interdisciplinaire de Recherche sur l'eau et l'environnement du bassin de la Seine
- **QMNAS** : Débit ayant la probabilité de ne pas se reproduire plus qu'une fois par 5 ans
- **SAFRAN** : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie
- **VCN30** : Débit minimum annuel en moyenne glissante sur 30 jours

Pour citer cet ouvrage :

Nicolas Flipo, Nicolas Gallois, Julien Boé (2024), *Trajectoires hydrologiques du bassin de la Seine, Fascicule #23 du PIREN-Seine*, ISBN : 978-2-490463-28-2, ARCEAU-IdF, 80 p.

Cet ouvrage est édité par la cellule transfert des connaissances du PIREN-Seine, et son contenu est issu des recherches menées au sein du programme. Sauf mention contraire, les productions du PIREN-Seine sont régies par licence Creative Commons CC-BY-NC-SA v4.0 ou ultérieure (pas d'utilisation commerciale, partage des conditions initiales à l'identique).



Editeur :

ARCEAU-IdF 2024
www.arceau-idf.fr

Création graphique et impression :

 www.idbleue.com



PEFC/10-31-1510



IMPRIM'VERT®

Crédits photos :

Page de couverture : guitou60 / p. 8 : Mortimer62 / pp. 10, 11, 12-13, 35, 37, 49, 55 : François Mercier / p. 15 : Hubert Denies / p. 20 : Domaine public / pp. 30-31 : Paris Musées / Musée Carnavalet - Histoire de Paris / pp. 25, 29, 37, 39 : Alexandre Deloménie / p. 51 : Audrey Marescaux / pp. 40-41 : Ibex73 / p. 54 : Alan Levine / p. 60 : Raymond Spekking / p. 66 : Cangadoba / p. 68 : Mathilde Resch



Le **PIREN-Seine** est un programme de recherche interdisciplinaire en environnement dont l'objectif est de développer une vision d'ensemble du fonctionnement du bassin versant de la Seine et de la société humaine qui l'investit, pour permettre une meilleure gestion qualitative et quantitative de la ressource en eau. Il est l'un des programmes composant la Zone Atelier Seine du CNRS.

La *cellule transfert des connaissances* a pour but de valoriser les productions de savoirs scientifiques issues des recherches du **PIREN-Seine**, et de favoriser la mise à disposition de ces informations à un large public, des professionnels de la gestion de l'eau aux élus en passant par les usagers. Soutenue par l'Agence de l'eau Seine-Normandie et l'EPTB Seine Grands Lacs, et animée depuis octobre 2016 par l'association ARCEAU-IdF, cette cellule répond à une forte volonté de la part des chercheurs de participer au transfert des savoirs scientifiques et techniques vers la société civile. Elle est ainsi chargée de la rédaction et de l'édition de documents thématiques, de la mise en ligne de contenus scientifiques adaptés à la fois aux professionnels et au grand public, et de la mise en place d'ateliers de co-réflexion du programme.

La collection des fascicules du **PIREN-Seine** analyse différents aspects du fonctionnement du bassin de la Seine, correspondant aux multiples domaines de recherche du programme. Ils s'adressent à tous les publics concernés par l'analyse et la gestion du bassin versant de la Seine et des problématiques environnementales et humaines qui y sont liées. Tous ces fascicules sont disponibles en téléchargement gratuit au format PDF sur le site du programme. Une première série de neuf fascicules a été publiée en 2009. En 2011, six nouveaux titres sont venus enrichir la collection. En 2017, la production des fascicules reprend avec une nouvelle collection, pour permettre aux acteurs du domaine de l'eau et de l'environnement de rester informés des dernières recherches scientifiques menées par le **PIREN-Seine**.

Pour plus d'informations,
retrouvez-nous sur :
www.piren-seine.fr

ISBN 978-2-490463-28-2



9 782490 463282



Les partenaires opérationnels de la phase 8 du PIREN-Seine



Les partenaires scientifiques de la phase 8 du PIREN-Seine

