

# Synthèse des résultats de projections hydroclimatiques de diverses origines sur le bassin de la Seine

Julien Boé<sup>1\*</sup>, Juliette Deman<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CECI, Université de Toulouse, CNRS, CERFACS, IRD

\* boe@cerfacs.fr

## *Résumé*

Ce rapport vise à évaluer la cohérence des résultats issus des principales études publiées au cours de la dernière décennie sur les changements hydroclimatiques futurs sur le bassin de la Seine. Ces études sont basées sur différents types d'outils numériques (modèles hydrologiques, modèles climatiques globaux et régionaux) et différentes chaînes méthodologiques (incluant les étapes de désagrégation et de correction de biais). Les chaînes de modélisation étudiées sont tout d'abord présentées, puis leurs résultats sont comparés. L'analyse se concentre sur les projections de fin de 21<sup>e</sup> siècle pour un scénario d'émissions de gaz à effet de serre sévère, afin de mieux mettre en lumière les différences éventuelles entre les différentes chaînes de modélisation. L'attention est portée principalement sur les variations annuelles, qui sont plus comparables entre les différentes chaînes.

Malgré la diversité des outils et chaînes de modélisation considérés, aucune incohérence majeure n'est constatée dans ce contexte. En effet, en médiane d'ensemble, des changements faibles des débits annuels sont notés pour toutes les chaînes de modélisation, parfois faiblement négatifs, parfois faiblement positifs. Cette relativement bonne cohérence est en partie due à des compensations entre les changements des précipitations et d'évapotranspiration. Cependant, pour tous les types d'outils et de chaînes de modélisation considérés, selon les modèles climatiques et/ou hydrologiques utilisés, il est possible d'obtenir des changements annuels importants à la hausse comme à la baisse, signe d'incertitudes importantes.

---

## *Points clefs*

- ✓ Analyse comparative des principales projections hydroclimatiques sur le bassin de la Seine depuis plus de 10 ans
- ✓ Pas de différences majeures entre les changements médians de débits annuels entre les différentes chaînes de modélisation
- ✓ Large gamme de changements possibles pour chaque chaîne de modélisation

## Abstract

*This report aims to assess the consistency of results from major studies published over the past decade on future hydro-climatic changes in the Seine River basin. These studies rely on various types of numerical tools (hydrological models, global and regional climate models) and different modelling chains (including downscaling and bias-correction steps). The modelling chains under consideration are first described, and their respective results compared. The analysis focuses on end-21st-century projections under a high greenhouse gas emission scenario, in order to better highlight potential differences between modelling chains. Attention is mainly given to annual variations, which are more comparable across modelling frameworks.*

*Despite the diversity of models and methodological chains considered, no major inconsistencies are found in this context. Indeed, the ensemble medians of annual discharge changes are generally small in magnitude, sometimes slightly negative, sometimes slightly positive for all chains. This relatively good consistency is partly due to compensating effects between changes in precipitation and evapotranspiration. However, for all types of modelling tools and methodological chains considered, depending on the climate and/or hydrological models used, large annual changes—either increases or decreases—can still occur, indicating persistent uncertainties.*

## Key points

- ✓ Comparative analysis of the main hydro-climatic projections for the Seine River basin over the past decade
- ✓ No major differences in median annual flow changes across the different modelling chains
- ✓ Wide range of possible changes within each individual modelling chain

## Introduction

Afin de pouvoir s'adapter au changement climatique, il est nécessaire de disposer d'informations robustes sur les évolutions potentielles du climat et de l'hydrologie au cours du 21<sup>e</sup> siècle. Au fil des ans, plusieurs études se sont intéressées aux changements hydrologiques sur la France et/ou le bassin de la Seine dans le contexte du changement climatique anthropique. Sur la dernière dizaine d'années, nous pouvons notamment mentionner l'étude Dayon *et al.* (2018), l'étude réalisée dans le cadre de la phase 8 du programme du PIREN Seine (Flipo *et al.* 2023 b) basée sur le modèle hydrogéologique CaWaQS (Flipo *et al.* 2023 a), et le projet Explore2 (Sauquet *et al.* 2025), qui a réuni un grand nombre de groupes de modélisation hydrologique en France.

Ces études partagent certaines grandes lignes méthodologiques communes, mais présentent aussi des différences importantes. Les données de base pour caractériser le changement climatique et par suite ses impacts sont dans tous les cas les modèles climatiques globaux, qui couplent notamment un modèle numérique d'atmosphère, d'océan, de surface climatique, de glace de mer. Ces modèles climatiques prennent en entrée l'évolution des forçages climatiques naturels et anthropiques, comme les gaz à effet de serre et les aérosols. Il s'agit de l'évolution observée pour les simulations passées dites « historiques » et de scénarios pour l'évolution future, basés sur différentes hypothèses socio-économiques d'évolution du monde.

De grands projets internationaux, les projets CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*), réunissent les différents groupes de modélisation climatique dans le monde pour la réalisation de projections climatiques coordonnées. Les données produites dans ce contexte sont un élément essentiel des rapports du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). L'étude Dayon *et al.* (2018) et le

projet Explore2 (Sauquet *et al.* 2025, Sauquet *et al.* 2024) sont basés sur les données de la 5<sup>e</sup> phase de CMIP (CMIP5, Taylor *et al.* 2012) et l'étude réalisée lors de la phase 8 du programme PIREN-Seine (Flipo *et al.* 2023 b) est basée sur CMIP6 (Eyring *et al.* 2016).

En raison de leur coût de calcul, la résolution de ces modèles climatiques globaux est limitée à l'heure actuelle, généralement autour de 100-300 km. Avant de pouvoir forcer un modèle d'impact, par exemple un modèle hydrologique, pour étudier les impacts du changement climatique plus finement, ces projections climatiques globales doivent être désagrégées (on dit également « régionalisées »).

Deux types d'approches existent : la désagrégation statistique et la désagrégation dynamique. La désagrégation statistique consiste à établir avec des observations un modèle statistique reliant les variables climatiques de grande échelle pertinentes et les variables climatiques locales nécessaires à l'étude d'impact. Ce modèle statistique est ensuite appliqué en utilisant en entrée les variables climatiques de grande échelle issues de projections climatiques globales. La désagrégation dynamique consiste quant à elle à utiliser un ou des modèles climatiques régionaux, à haute résolution sur la zone d'intérêt. Ces modèles simulent généralement uniquement un domaine limité spatialement, sans modélisation de l'océan, et sont forcés aux frontières par les données d'un modèle climatique global. Il est possible d'atteindre couramment des résolutions de l'ordre de la douzaine de kilomètres aujourd'hui avec ces modèles climatiques régionaux. Des expériences coordonnées de modélisation climatique régionale sont réalisées sur l'Europe dans le cadre du projet Euro-CORDEX (Jacob *et al.* 2014). L'étude Explore2 (Sauquet *et al.* 2024 ; Sauquet *et al.* 2025) est basée sur les simulations climatiques régionales Euro-CORDEX désagrégant des modèles climatiques CMIP5. L'étude Dayon *et al.* (2018) utilise une méthode de désagrégation statistique décrite dans Dayon *et al.* (2015) pour également désagréger les modèles CMIP5. De nouvelles approches hybrides de désagrégation, dites statistico-dynamiques, existent, comme celle utilisée dans le cadre de la phase 8 du PIREN-Seine pour réaliser des projections avec CaWaQS (Boé *et al.* 2023).

Malgré une résolution plus élevée, des biais (*i.e.* des différences avec les observations) importants peuvent encore exister sur les données climatiques après désagrégation, notamment celles basées sur la désagrégation dynamique ou hybride. Ces données issues de la désagrégation dynamique sont souvent corrigées à l'aide de méthodes dites de correction de biais, comme ADAMONT (Verfaillie *et al.* 2017) ou CDF-t (Michelangeli *et al.* 2009) utilisées pour Explore2, ou la méthode décrite par Switanek *et al.* (2017) pour l'étude PIREN-Seine.

Au final, les données climatiques désagrégées et éventuellement corrigées sont utilisées en entrée des modèles hydrologiques. L'étude PIREN-Seine utilise le modèle CaWaQS (Flipo *et al.* 2023a), l'étude Dayon *et al.* (2018) utilise le modèle Isba-Modcou (Habets *et al.* 2008), tandis que le programme Explore2 utilise un large ensemble de modèles hydrologiques développés par différents groupes en France (Sauquet *et al.* 2024 ; Sauquet *et al.* 2025).

Les études d'impacts basées sur la modélisation hydrologique comme Dayon *et al.* (2018), Explore2 (Sauquet *et al.* 2024, Sauquet *et al.* 2025), ou l'étude de la phase 8 du programme PIREN-Seine (Flipo *et al.* 2023 b) ne sont pas les seules sources d'information sur les potentielles évolutions hydroclimatiques. Les modèles climatiques globaux et régionaux, en plus de fournir les données atmosphériques nécessaires à la modélisation hydrologique, et notamment les précipitations, peuvent aussi être utiles dans la caractérisation directe des changements hydroclimatiques de surface. Ils présentent certaines caractéristiques intéressantes dans ce contexte. Ils simulent les couplages bidirectionnels entre l'hydrologie continentale et l'atmosphère. En effet, non seulement les précipitations peuvent influencer l'évapotranspiration et les débits, mais l'évapotranspiration peut également influencer en retour les précipitations au travers des mécanismes de rétroaction sol-atmosphère (Seneviratne *et al.* 2010). Les modèles climatiques globaux actuels permettent également souvent de prendre en compte l'effet direct du CO<sub>2</sub> sur la végétation et son effet indirect via les changements climatiques, qui peuvent avoir des impacts importants sur l'hydrologie continentale (Douville *et al.* 2021). Les modèles climatiques présentent cependant également des limites importantes, comme des résolutions encore très limitées pour les modèles climatiques globaux, des biais souvent forts, et l'absence de représentation dans la plupart d'entre eux de certains processus hydrologiques importants (*e.g.* aquifères).

Les résultats de projections climatiques, notamment globales, sont couramment utilisés dans les rapports internationaux tels que ceux du GIEC y compris pour les questions hydroclimatiques, notamment à grande échelle, et ces rapports sont potentiellement considérés dans le cadre des politiques climatiques nationales. À

l'échelle du bassin versant, des études plus spécifiques basées sur la modélisation hydrologique sont réalisées pour atteindre une vision suffisamment détaillée des évolutions attendues. La question de la cohérence de ces deux types d'information se pose donc dans un contexte pratique.

De façon plus générale, la multiplicité des études au cours du temps, basées sur différents outils, chaînes de modélisation et différentes générations de modèles climatiques, complique l'obtention d'une vision synthétique des changements hydroclimatiques potentiels. L'objectif de cette étude est donc de fournir une vue globale des changements hydroclimatiques sur le bassin de la Seine tels que projetés par les études de la dernière dizaine d'années, et d'étudier leur cohérence, en prenant en compte les spécificités des différents outils.

## 1. Présentation des données utilisées

Les données étudiées dans ce document proviennent d'un large ensemble de projections climatiques, et hydrologiques sur le bassin de la Seine, réalisées sur la dernière quinzaine d'années. Les différentes chaînes de modélisation sont représentées sur la Figure 1.

Nous étudions ici :

- les projections hydrologiques du projet Explore2 (Sauquet *et al.* 2024 ; Sauquet *et al.* 2025), notées EXPLORE2 ou EX2 sur les figures dans la suite du document (Fig. 1, à droite, chaînes EXPLORE2-A et EXPLORE2-C). Ces projections hydrologiques sont dérivées des projections climatiques CMIP5 (Taylor *et al.* 2012) désagrégées (méthode dynamique) par un ensemble de modèles climatiques régionaux européens dans le cadre du projet Euro-CORDEX (Jacob *et al.* 2014). Deux méthodes différentes sont utilisées afin de corriger les biais des projections régionales : la méthode ADAMONT (Verfaillie *et al.* 2017) et la méthode CDF-t (Michelangeli *et al.* 2009). Un large ensemble de modèles hydrologiques appliqués à la France ou à certains bassins versants français a ensuite été forcé par les projections climatiques obtenues. Les données étudiées ici correspondent à celles obtenues avec la méthode ADAMONT, plus largement utilisée dans le projet. Les résultats obtenus avec sept modèles hydrologiques sont considérés ici.
- les projections hydrologiques décrites dans Dayon *et al.* (2018) (Fig. 1, au milieu, chaîne DAYON). Les données nécessaires au modèle hydrogéologique Isba-Modcou (Habets *et al.* 2008) sont obtenues par désagrégation statistique des projections climatiques CMIP5 avec la méthode décrite dans Dayon *et al.* (2015).
- les projections hydrologiques réalisées dans le cadre de la phase 8 du programme PIREN-Seine (Flipo *et al.* 2023 b) avec le modèle hydrologique CaWaQS (Flipo *et al.* 2023a) (Fig. 1, à gauche, chaîne CaWaQS). Pour ces simulations, quatre projections climatiques CMIP6 représentatives ont été sélectionnées et désagrégées à l'aide d'une méthode hybride décrite dans Boé *et al.* (2023). Le processus de sélection des projections est décrit dans Flipo *et al.* (2023 b).

Nous considérons également les changements hydroclimatiques directement simulés par les modèles climatiques globaux de dernière génération (CMIP6, Eyring *et al.* 2016) et de génération précédente (CMIP5, Taylor *et al.* 2012), ainsi que les modèles climatiques Euro-CORDEX désagrégant les modèles climatiques CMIP5 (Jacob *et al.* 2014) (chaînes notées CMIP5, CMIP6 et CORDEX sur la Fig. 1).

Nous étudions les changements moyens sur le bassin versant de la Seine à Poses. Pour les modèles climatiques, nous calculons une estimation du débit annuel à partir du ruissellement simulé moyen sur le bassin versant. Pour les modèles hydrologiques, nous considérons directement les débits qu'ils simulent. Cette comparaison entre cette estimation des débits issue des modèles climatiques et les débits des modèles hydrologiques peut être faite pour les valeurs moyennes annuelles, mais pas pour les valeurs saisonnières, pour lesquelles les effets de stockage / déstockage d'eau sur le bassin sont très importants. Nous parlons de « débits » dans tous les cas par la suite. L'évapotranspiration annuelle directement simulée ou bien estimée comme la différence entre les précipitations et des débits rapportés à la surface du bassin versant pour les modèles hydrologiques est également considérée.

Dans ce contexte, nous étudions donc principalement les valeurs annuelles pour lesquelles les hypothèses de calcul précédentes peuvent être faites et la comparaison des modèles climatiques et hydrologiques est possible pour les débits et l'évapotranspiration.

L'évapotranspiration potentielle est calculée pour les modèles climatiques selon la formule de Penman-Monteith au pas de temps journalier, telle que définie par la *Food and Agriculture Organization* (Pereira *et al.* 1999).

Nous comparons les résultats obtenus pour les scénarios d'émission les plus sévères RCP8.5 (van Vuuren *et al.* 2011) et SSP5-8.5 (O'Neill *et al.* 2017). Le scénario RCP8.5 est celui utilisé dans le cadre du projet CMIP5, et donc par les projections hydrologiques en découlant, tandis que le scénario SSP5-8.5 correspond au projet CMIP6, et est donc utilisé pour les simulations CaWaQS forcées par CMIP6. Ces scénarios sont très proches, sans être parfaitement identiques. Nous ferons implicitement dans la suite l'hypothèse que l'impact de ces petites différences des scénarios sur les résultats discutés est marginal. Ces scénarios, particulièrement sévères, sont notamment choisis afin de maximiser le signal du changement climatique et par conséquent les potentielles différences entre les changements obtenus avec les différents outils.

Sur les figures de la suite du document, les boîtes à moustaches montrent le 25<sup>e</sup> et le 75<sup>e</sup> centile, et la médiane. Les moustaches s'étendent jusqu'au minimum ou au maximum de la distribution ou bien jusqu'à 1,5 fois l'écart interquartile plus ou moins le 75<sup>e</sup> et le 25<sup>e</sup> centile si des valeurs sont en dehors de cet intervalle ; ces valeurs sont alors montrées à l'aide de cercle.

L'ensemble des données étudiées, et les chaînes de modélisation correspondantes, sont représentées sur la Figure 1.

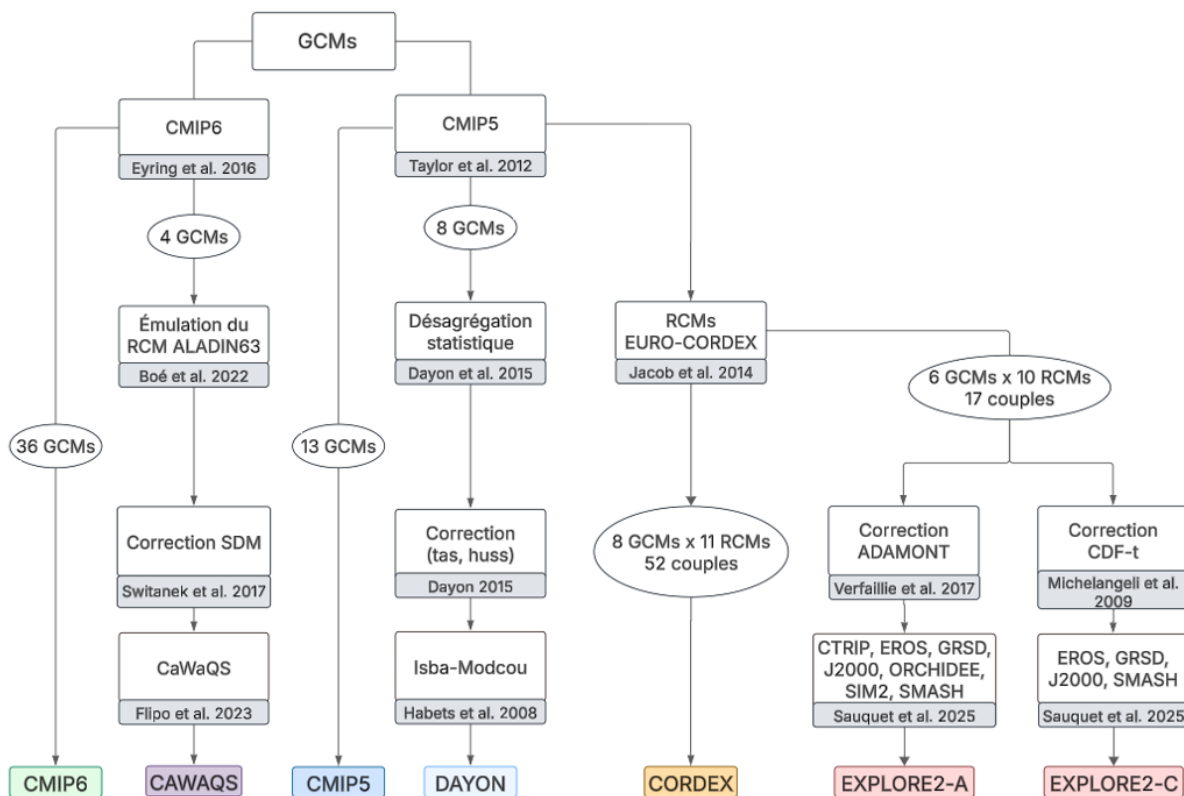


Figure 1 : Synthèses des différentes données étudiées, avec les chaînes de modélisation correspondantes et les références des modèles et méthodes associés.

Toutes les variables ne sont pas forcément disponibles pour tous les modèles dans toutes les chaînes de modélisation, le nombre de modèles étudiés dans chaque ensemble peut varier selon l'analyse. Ce nombre est indiqué sur les figures dans la suite du document.

## 2. Résultats : changements hydroclimatiques sur le bassin de la Seine

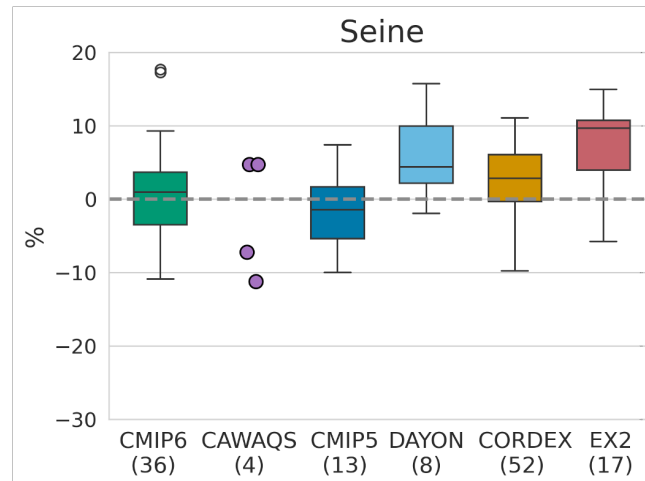


Figure 2 : Distribution des changements relatifs des précipitations annuelles (%) sur le bassin versant de la Seine à Poses entre les périodes 2070-2099 et 1976-2005 pour les scénarios RCP8.5 ou SSP5-8.5. Les 5 boîtes à moustaches représentent la distribution des changements des simulations CMIP6, CMIP5, CMIP5 désagrégées statistiquement et utilisées pour forcer Isba-Modcou (DAYON), Euro-CORDEX, et Euro-CORDEX corrigées par la méthode ADAMONT utilisée pour forcer les modèles hydrologiques du projet Explore2 (EX2). Le nombre de modèles considérés pour chaque ensemble est indiqué entre parenthèses sous le nom de la chaîne de modélisation. Les quatre points violets correspondent aux quatre simulations CMIP6 désagrégées et corrigées utilisées pour forcer le modèle CaWaQS.

Sur le bassin de la Seine, les changements annuels de précipitations sont en médiane modérés pour la plupart des ensembles issus des différentes chaînes de modélisation, et compris entre +5 et -5 % (Fig. 2). Seule la médiane de l'ensemble Explore2 étudié ici sort de cet intervalle, avec une médiane proche de 10 %.

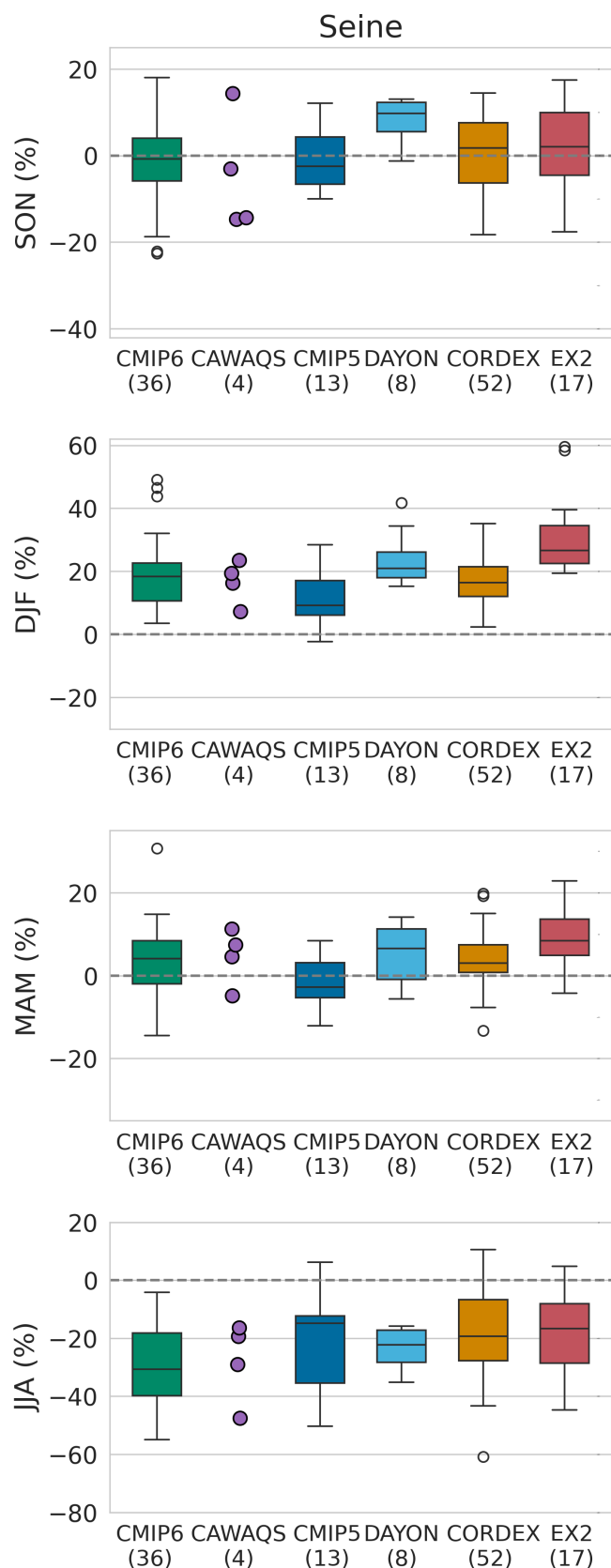


Figure 3 : Distribution des changements relatifs saisonniers des précipitations (%) (DJF : Hiver, MAM : Printemps, JJA : Été, SON : Automne) sur le bassin versant de la Seine à Poses entre les périodes 2070-2099 et 1976-2005 pour les scénarios RCP8.5 ou SSP5-8.5. La légende est identique à celle de la Fig. 2.

Ces changements annuels faibles des précipitations masquent toutefois des changements saisonniers importants et opposés, avec une augmentation en hiver et une diminution en été dans la plupart des modèles des différentes chaînes de modélisation (Fig. 3). Des différences substantielles existent en hiver, avec une médiane allant de 10 % (CMIP5) à presque 30 % (Explore2). Une différence substantielle existe par ailleurs entre les changements Explore2 et les changements des projections Euro-CORDEX dont ils sont dérivés (voir également le chapitre « *Discussion : causes possibles de différences* »). En été, la grande majorité des simulations des différentes chaînes projettent une diminution des précipitations, avec une médiane allant de -30 % (CMIP6) jusqu'à -15 % (Explore2). Les changements aux saisons intermédiaires (printemps, automne) sont en général faibles en médiane, mais certaines différences entre les chaînes de modélisation existent. Les changements de Dayon *et al.* (2018) en automne sont par exemple en médiane plus importants que ceux des autres outils.

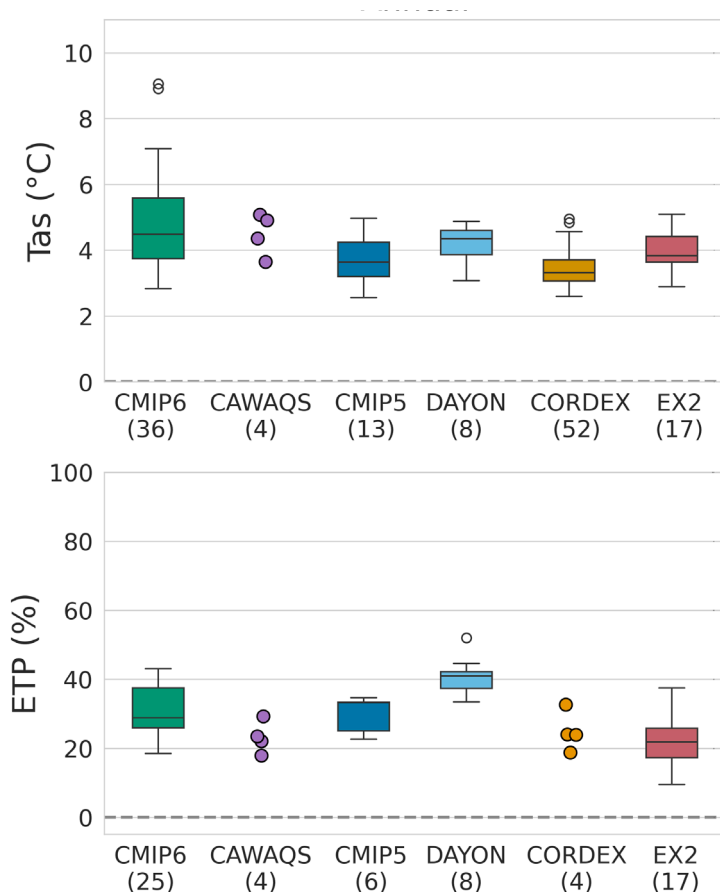


Figure 4 : Distribution (en haut) des changements de température à 2 m (°C) et (en bas) des changements relatifs d'évapotranspiration potentielle (%) sur le bassin versant de la Seine à Poses entre les périodes 2070-2099 et 1976-2005 pour les scénarios RCP8.5 ou SSP5-8.5. Les boîtes à moustaches représentent la distribution des changements des simulations CMIP6, CMIP5, CMIP5 désagrégées statistiquement et utilisées pour forcer Isba-Modcou (DAYON), Euro-CORDEX, et Euro-CORDEX corrigées par la méthode ADAMONT utilisées pour forcer les modèles hydrologiques du projet Explore2 (EX2). Le nombre de modèles considérés pour chaque ensemble est indiqué entre parenthèses sous le nom. Les quatre points violets correspondent aux quatre simulations CMIP6 corrigées et désagrégées utilisées pour forcer le modèle CaWaQS. Les quatre points orange sur la figure du bas correspondent aux quatre modèles Euro-CORDEX pour lesquels toutes les variables nécessaires au calcul de l'évapotranspiration potentielle selon la formule de Penman-Monteith étaient accessibles.

Les changements de débits annuels ne dépendent pas que des changements de précipitations, mais également de ceux d'évapotranspiration. Ces changements d'évapotranspiration sont en partie contrôlés par ceux d'évapotranspiration potentielle, *i.e.* la quantité maximale d'eau qui pourrait s'évaporer et être transpirée par

la végétation si l'eau du sol n'était pas limitante, et qui dépend de variables atmosphériques. La température joue un rôle important dans ce contexte.

La température annuelle augmente comme attendu dans tous les ensembles, avec des médianes allant de 3,5 °C pour Euro-CORDEX jusqu'à 4,5 °C pour CMIP6 (Fig. 4 haut). Ces différences ont déjà été notées par exemple dans Ribes *et al.* (2022), qui montrent par ailleurs que les valeurs projetées par CMIP6 sont très probablement plus réalistes, même si potentiellement elles-mêmes un peu sous-estimées.

L'évapotranspiration potentielle augmente logiquement dans tous les ensembles et dans tous les modèles (Fig. 4 bas). Cette augmentation est notamment liée à l'augmentation de la température et de l'énergie radiative disponible à la surface. Cette augmentation va en médiane de 20 % pour Explore2 jusqu'à 40 % pour Dayon *et al.* (2018). Une différence substantielle est ainsi notée entre l'évapotranspiration potentielle projetée directement par les modèles CMIP5 et celle projetée par Dayon *et al.* (2018), qui se base sur les modèles CMIP5. Cette différence s'explique donc très certainement par l'étape de désagrégation statistique (voir également la partie Discussion).

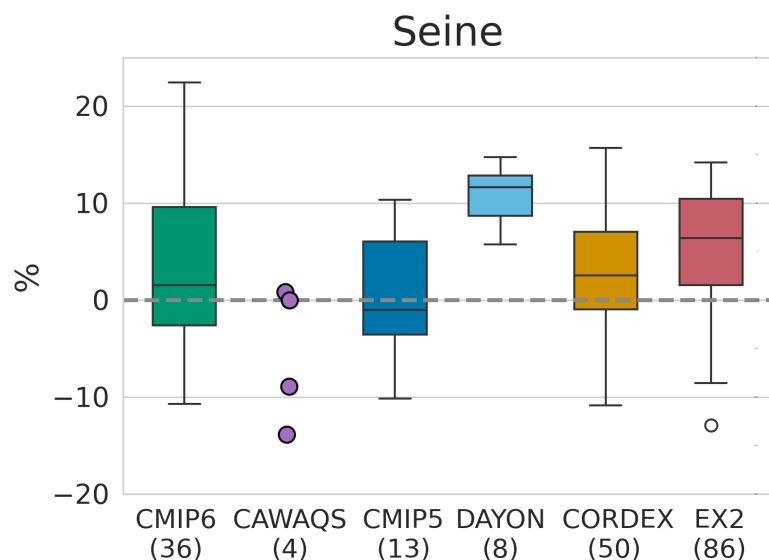


Figure 5 : Distribution des changements relatifs d'évapotranspiration annuelle (%) sur le bassin versant de la Seine à Poses entre les périodes 2070-2099 et 1976-2005 pour les scénarios RCP8.5 ou SSP5-8.5. Les 5 boîtes à moustaches représentent la distribution des changements des simulations CMIP6, CMIP5, simulés par Isba à partir des simulations CMIP5 désagrégées statistiquement et utilisés dans la chaîne Isba-Modcou (DAYON), dans les simulations Euro-CORDEX, et par les modèles hydrologiques du projet Explore2 (EX2) forcés par les données Euro-CORDEX corrigées avec la méthode ADAMONT. Le nombre de modèles considéré pour chaque ensemble est indiqué entre parenthèses sous le nom. Les quatre points violets correspondent aux quatre simulations CMIP6 corrigées et désagrégées utilisées pour forcer le modèle CaWaQS.

Les changements d'évapotranspiration (réelle) ne dépendent pas uniquement des changements d'évapotranspiration potentielle : la disponibilité d'eau en surface est également essentielle dans ce contexte. C'est pour cette raison que les changements d'évapotranspiration sont largement différents de ceux d'évapotranspiration potentielle, avec des augmentations bien plus faibles ou même des diminutions dans un nombre substantiel de modèles pour les différentes chaînes de modélisation (Fig. 5). Néanmoins, des augmentations importantes d'évapotranspiration sont notées dans Dayon *et al.* (2018), de 10 % pour la médiane, très probablement directement liées à la forte augmentation d'évapotranspiration potentielle notée précédemment. Les projections Explore2 montrent aussi une augmentation dépassant les 5 % en médiane. À noter que parmi les 4 simulations CaWaQS, deux montrent une diminution substantielle d'évapotranspiration de l'ordre de 10 % et les deux ne montrent pas de changements.

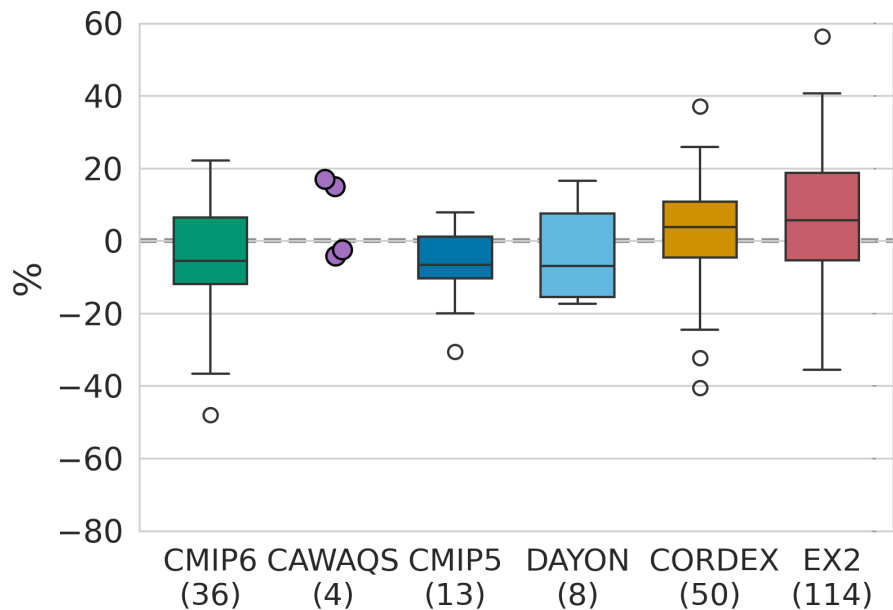


Figure 6 : Distribution des changements relatifs des débits annuels (%) de la Seine à Poses entre les périodes 2070-2099 et 1976-2005 pour les scénarios RCP8.5 ou SSP5-8.5. Les 5 boîtes à moustaches représentent la distribution des changements des simulations CMIP6, CMIP5, simulés par Isba-Modcou à partir des simulations CMIP5 désagrégées statistiquement (DAYON), dans les simulations Euro-CORDEX, et par les modèles hydrologiques du projet Explore2 (EX2) forcés par les données Euro-CORDEX corrigées avec la méthode ADAMONT. Le nombre de modèles considéré pour chaque ensemble est indiqué entre parenthèses sous le nom. Les quatre points violets correspondent aux quatre simulations CMIP6 corrigées et désagrégées utilisées pour forcer le modèle CaWaQS. Pour les modèles climatiques, le débit est estimé à partir du ruissellement sur le bassin versant.

Au final, les changements de débit annuels (Fig. 6) dépendent de la différence entre les changements de précipitations et ceux d'évapotranspiration. Des compensations sont ainsi visibles. Dans Dayon *et al.* (2018), les changements de précipitations sont plus positifs en médiane que tous les autres outils sauf Explore2 (Fig. 2), mais les changements d'évapotranspiration sont également largement positifs, les plus forts parmi les différentes chaînes de modélisation (Fig. 5). Au final, les débits de Dayon *et al.* (2018) diminuent très légèrement en médiane, comme ceux de CMIP6 et CMIP5. À l'inverse, une faible augmentation des débits est notée en médiane pour les ensembles Euro-CORDEX et Explore2. Au final, les résultats des différentes chaînes de modélisation convergent sur un faible changement de débits annuels en médiane sur le bassin de la Seine. Aucune incohérence majeure entre les différentes chaînes n'est donc constatée.

Cependant, dans les ensembles obtenus avec chaque chaîne, des simulations montrent des changements possibles forts, à la hausse comme à la baisse, allant par exemple de quasiment -40 % à quasiment +60 % dans Explore2 (voir EX2 sur Fig. 6). La seule exception concerne les projections réalisées avec CaWaQS : aucune ne montre de diminution notable des débits annuels, malgré des diminutions de précipitations substantielles dans deux d'entre elles (Fig. 2). Le nombre de simulations est, il est vrai, limité comparé aux autres ensembles. D'autres points sont intéressants à noter sur la Fig. 6. En particulier, un nombre substantiel de simulations dans Explore2 mènent à des augmentations supérieures à 20 %, alors que ce type de changement est très rare dans les autres ensembles. On constate également que les diminutions les plus fortes dans Dayon *et al.* (2018), proches de -20 %, n'atteignent pas celles visibles (certes très rarement) dans d'autres ensembles.

Dans le cadre de la trajectoire de réchauffement de référence pour s'adapter au changement climatique définie par les autorités françaises (Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique, ou TRACC)<sup>1</sup>, les changements climatiques pour caractériser les impacts sont considérés à un niveau de réchauffement sur la France donné, et non en fonction d'un scénario d'émission de forçage

<sup>1</sup> <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/document-reference-TRACC.pdf>

anthropique. Nous reprenons ici les trois niveaux de réchauffement sur la France notables de la TRACC, 1.4 °C / 2.1 °C / 3.4 °C, exprimés par rapport à la période de référence 1976-2005, qui correspondent à des réchauffements globaux de 1 °C, 2 °C et 3 °C respectivement par rapport à la période préindustrielle. Les changements hydrologiques à ces différents niveaux de réchauffement sont maintenant caractérisés.

Caractériser les impacts à un niveau de réchauffement fixé sur la France permet de neutraliser l'incertitude due aux réchauffements différents notés précédemment entre les différentes chaînes de modélisation en considérant une période fixe (Fig. 4 haut). Néanmoins, même à un niveau de réchauffement donné, des incertitudes importantes demeurent, montrant que les différences de réchauffement ne sont pas responsables dans une large mesure des différences des changements hydrologiques discutés précédemment (Fig. 7 ; voir le chapitre « Discussion : causes possibles de différences » pour la discussion d'autres facteurs).

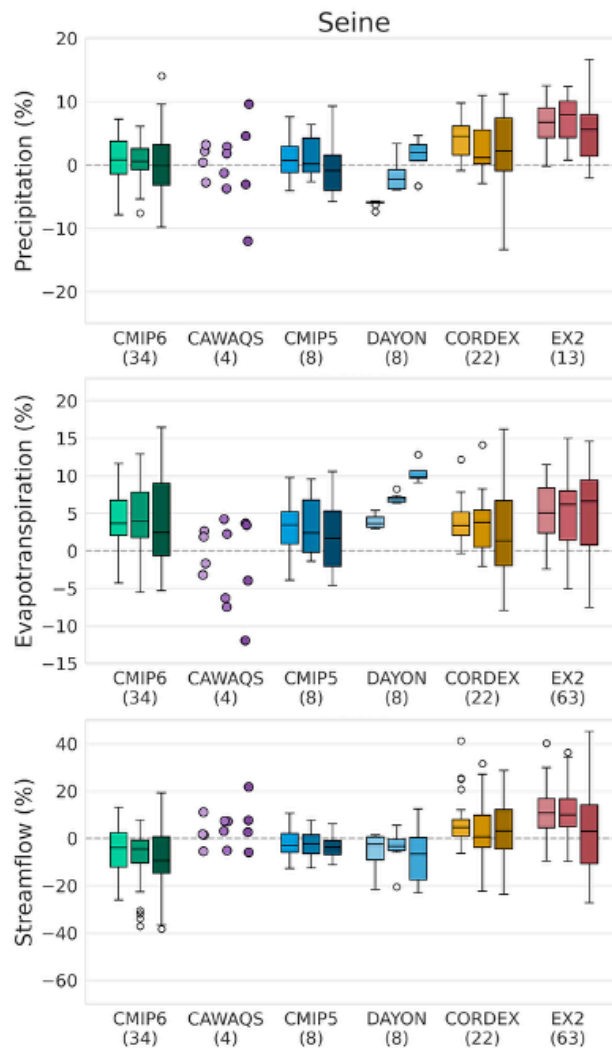


Figure 7 : Changement des précipitations (en haut), évapotranspiration (au milieu) et du ruissellement / débit (en bas) pour les différentes chaînes de modélisation. Pour chaque chaîne de modélisation, trois boîtes à moustaches sont montrées, qui correspondent respectivement aux changements pour un réchauffement sur la France de 1.4 °C, 2.1 °C et 3.4 °C par rapport à la période 1976-2005.

La gradation entre le niveau de réchauffement projeté sur la France et les changements hydrologiques correspondants est en général relativement modérée : les impacts à un niveau de réchauffement plus élevé ne sont pas toujours plus marqués, notamment sur les débits (Fig. 7 bas). Cela est dû en partie au fait qu'on caractérise ici des changements annuels. Le réchauffement a tendance à renforcer à la fois l'augmentation de

précipitation en hiver et la diminution en été (Fig. 3), et donc l'effet du réchauffement sur la magnitude des changements peut avoir tendance à s'annuler à l'échelle de temps annuelle.

Travailler à un niveau de réchauffement donné ne change donc pas fondamentalement la vision globale obtenue sur une période fixe, avec, par exemple à 3.4 °C de plus sur la France, une médiane des changements de débits plus positive pour CaWaQS, Euro-CORDEX et Explore2 comme noté pour les changements en fin de 21<sup>e</sup> siècle.

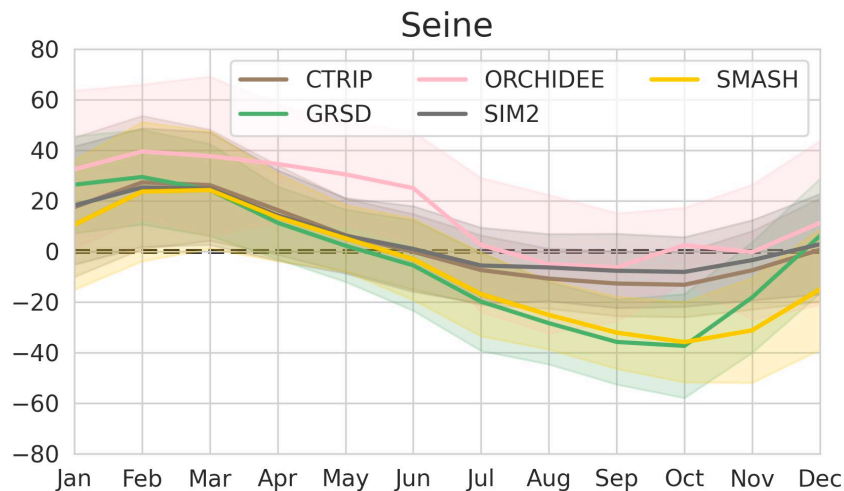


Figure 8 : Changements du cycle annuel des débits (%) de la Seine à Poses entre les périodes 2070-2099 et 1976-2005 pour le scénario RCP8.5, issus de plusieurs modèles hydrologiques du projet Explore2 forcés par les mêmes projections climatiques. Les lignes épaisses montrent la moyenne obtenue par un modèle hydrologique à partir de multiples projections climatiques et les surfaces colorées montrent la moyenne plus ou moins un écart-type calculé sur l'ensemble des projections hydrologiques faites avec ce modèle à partir de différentes projections climatiques.

Les comparaisons précédentes se sont principalement focalisées sur les changements annuels, notamment car la plupart des modèles climatiques ne représentent pas certains processus nécessaires pour capturer le cycle saisonnier des débits, comme l'effet des aquifères. Pour étudier ces changements, critiques en termes d'impacts, tout comme les changements d'étiage et de crues, l'utilisation de modèles hydrologiques est indispensable. La Figure 8 montre les changements selon le mois de l'année obtenus par différents modèles hydrologiques dans le cadre du projet Explore2 soumis aux mêmes projections climatiques. Pour tous les modèles hydrologiques, un cycle saisonnier très marqué des changements des débits est noté, avec des augmentations fortes en hiver et des diminutions en été et automne, mais très variables d'un modèle à l'autre. Même si les modèles partagent les mêmes forçages climatiques, des différences très marquées sont donc notées selon le modèle hydrologique en été et automne, avec des diminutions maximums en moyenne multi-modèles climatiques atteignant 40 % en octobre dans certains modèles hydrologiques, mais des diminutions très faiblement négatives dans d'autres.

## Discussion : causes possibles de différences

Des hypothèses sur certaines causes de différences entre les changements obtenus à partir de différentes chaînes de modélisation peuvent être formulées.

Les modèles Euro-CORDEX ont tendance à réchauffer moins sur l'Europe centrale et de l'ouest que les modèles climatiques globaux CMIP5 et CMIP6, notamment en été (Boé *et al.* 2020), avec des changements sur la France probablement moins réalistes (Ribes *et al.* 2022). Des différences de précipitations ont aussi été notées notamment en été (Boé *et al.* 2020), mais les causes des différences sont moins claires. Des changements des précipitations annuelles légèrement plus marqués dans les projections climatiques régionales que dans les

projections climatiques globales sont aussi notés sur la Fig. 2, sans que les causes aient été identifiées à notre connaissance.

Les changements de précipitations annuelles dans Explore2 sont plus importants que les changements des projections régionales Euro-CORDEX desquels ils découlent. Cela peut être dû au sous-échantillonnage des projections Euro-CORDEX utilisées dans Explore2, mais également à des modifications du signal du changement climatique des précipitations par la méthode de correction de biais (ADAMONT ici, Verfaillie *et al.* 2017), un problème assez courant avec les méthodes de correction de biais (*e.g.* Casanueva *et al.* 2020 ; Maraun *et al.* 2017). Des méthodes ont été développées pour limiter ces problèmes comme celle utilisée dans la chaîne CMIP6 / CaWaQS (Switanek *et al.* 2017).

De façon intéressante, à l'échelle de la France les augmentations d'évapotranspiration potentielle sont plus faibles après correction de biais à la fois pour CaWaQS et Explore2 (non montré), ce qui est cohérent avec les valeurs plutôt basses des augmentations d'évapotranspiration potentielle notées pour ces ensembles.

Les méthodes de correction de biais utilisées dans les deux cas sont dites univariées : chaque variable est corrigée indépendamment des autres. Or, plusieurs variables sont nécessaires pour estimer l'évapotranspiration potentielle, comme avec la formule de Penman-Monteith. Corriger les variables de façon séparée ne permet pas de prendre en compte la dépendance potentielle des biais d'une variable à une autre. Ceci pourrait expliquer les différences constatées entre les changements d'évapotranspiration potentielle avant et après correction de biais. Il est aussi possible que les biais des variables sans correction conduisent à des erreurs lors du calcul de l'évapotranspiration potentielle, différente dans les conditions futures et présentes, à cause de non-linéarités induites par la combinaison de plusieurs variables, et qui ne s'annuleraient donc pas lors du calcul des changements entre la période future et la période présente. Des méthodes de correction de biais multivariées existent, permettant de corriger les biais de plusieurs variables en prenant en compte leurs dépendances mutuelles, mais elles ne sont pas encore couramment utilisées en pratique, et il n'est pas certain qu'elles soient adaptées pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle qui demande de nombreuses variables d'entrée, en raison des échantillons temporels limités généralement disponibles. Il serait en tout cas intéressant de progresser sur ces questions, afin de mieux comprendre l'impact éventuel de la correction de biais sur les changements d'évapotranspiration potentielle.

La désagrégation statistique pourrait aussi avoir des impacts non désirés sur les changements projetés d'évapotranspiration potentielle. Dans Dayon *et al.* (2018), des augmentations d'évapotranspiration potentielle plus fortes qu'avec les autres chaînes sont notées (Fig. 4 bas). Cela pourrait être lié à la méthode de désagrégation statistique utilisée, pour laquelle une hypothèse doit être faite pour extrapoler la température et par suite l'humidité spécifique au-delà des bornes actuelles (Dayon *et al.* 2018 – Supplementary data).

Une autre cause potentielle de divergence des changements hydrologiques projetés par différents outils est celle de la représentation de la réponse de la végétation à l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>. Beaucoup des modèles utilisés ici ne prennent en effet pas en compte l'effet physiologique du CO<sub>2</sub> : cet effet est pris en compte par la grande majorité des modèles CMIP6, certains modèles CMIP5, et un modèle hydrologique utilisé dans Explore2 (ORCHIDEE). Les autres modèles (et notamment les modèles climatiques régionaux et modèles hydrologiques) ne le prennent pas en compte.

L'augmentation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> pourrait favoriser le développement de la végétation (effet fertilisant) si les conditions climatiques ne deviennent pas trop extrêmes et les nutriments disponibles le permettent, ce qui aurait tendance à faire augmenter l'évapotranspiration. Néanmoins, les stomates des plantes ont également généralement tendance à se refermer quand la concentration en CO<sub>2</sub> augmente, ce qui réduit l'évapotranspiration : c'est l'effet anti-transpirant du CO<sub>2</sub> (Douville *et al.* 2021). Il est généralement considéré que l'effet anti-transpirant domine (Lemordant *et al.* 2018), ce qui fait que l'évapotranspiration augmente moins ou diminue plus quand la réponse de la végétation à l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> est prise en compte.

Seul le modèle ORCHIDEE prend en compte cet effet dans les projections hydrologiques Explore2 (Evin *et al.* 2024), ce qui peut être une cause des augmentations de débits plus fortes qu'il simule en hiver et des diminutions plus faibles qu'il simule en été (Fig. 8). À noter que dans les modèles climatiques, en raison des couplages sol/atmosphère, la diminution de l'évapotranspiration par effet anti-transpirant peut aussi mener par suite à une diminution des précipitations : les changements d'évapotranspiration sont plus négatifs ou moins positifs (ce qui limite la diminution des débits), mais les changements de précipitations le sont potentiellement

également, avec au final un effet sur les débits complexe (Lesk *et al.* 2025). Ce n'est pas vrai dans la modélisation hydrologique, où il n'y a pas de couplage entre la surface et l'atmosphère et où les changements d'évapotranspiration calculés par le modèle hydrologique n'influencent donc pas les changements de précipitations. Quand un modèle hydrologique prenant en compte l'effet physiologique du CO<sub>2</sub> est forcé par les précipitations provenant de modèles climatiques régionaux qui ne le prennent pas en compte (comme les modèles régionaux Euro-CORDEX), des incohérences pourraient exister. Il faut noter que l'effet physiologique du CO<sub>2</sub> en lui-même est très incertain (Douville *et al.* 2021) et donc une source d'incertitude des changements hydroclimatiques potentiellement importante. Au final, il est difficile de dire dans quelle mesure la prise en compte ou non de l'effet physiologique du CO<sub>2</sub> sur la végétation pourrait impacter les différences entre les différents outils montrés ici, mais il s'agit d'une question sur laquelle il est important de progresser.

Pour finir, la simple modélisation hydrologique reste très incertaine, même sans considérer l'effet physiologique du CO<sub>2</sub>, avec notamment des changements estivaux très variables selon le modèle hydrologique, même à forçages climatiques identiques (Fig. 8). Il est probable que l'impact de la représentation des aquifères, particulièrement importants sur la Seine pour les étiages, joue un rôle important dans ce contexte.

## Conclusion

Dans cette étude, nous avons comparé les changements hydrologiques sur le bassin de la Seine obtenus par plusieurs études et projets de cette dernière dizaine d'années : projections climatiques globales de dernière et d'avant-dernière génération, projections climatiques régionales, et projections hydrologiques obtenues à partir de différentes chaînes de modélisation mettant en œuvre différentes méthodes de désagrégation, correction de biais et différents modèles hydrologiques. La comparaison s'est plus particulièrement focalisée sur les changements annuels, que tous les outils peuvent capturer.

Au niveau annuel, nous ne constatons pas d'incohérence majeure entre les résultats médians obtenus avec les différents outils et chaînes de modélisation. C'est d'autant plus vrai pour les débits, grâce à une certaine compensation entre les différences de changement notées pour les précipitations et l'évapotranspiration. Néanmoins, dans les ensembles de simulations réalisées par les différentes chaînes de modélisation, une large gamme de changements possibles demeure, avec des changements annuels inférieurs à -20 % ou supérieurs à + 20 % possible dans beaucoup de chaînes, voire inférieurs à -40 % et supérieurs + 30 % pour certaines chaînes. Il est important de noter qu'il s'agit là de changements annuels, qui masquent généralement sur le bassin de la Seine des contrastes saisonniers importants, avec des augmentations hivernales et des diminutions en été et automne. Il est également important de noter que les résultats obtenus avec les différentes chaînes de modélisation ne sont pas indépendants : Dayon *et al.* (2018), Explore2 et Euro-CORDEX se basent tous sur les projections climatiques CMIP5, et Explore2 utilise plus spécifiquement les données Euro-CORDEX. Les données CaWaQS utilisent les données CMIP6.

Il importe donc de se demander comment utiliser les résultats de toutes ces études concrètement dans le contexte de l'adaptation. Évidemment, en raison de leur volume il n'est pas possible d'utiliser toutes ces données en pratique, et ce n'est d'ailleurs pas souhaitable si l'on veut obtenir un message intelligible et synthétique.

Un moyen d'avancer pourrait être, surtout en présence de telles incertitudes, de partir de la définition des vulnérabilités par les acteurs, et ensuite de sélectionner des trajectoires, parmi celles projetées par les modèles hydrologiques, les mettant à l'épreuve. Il faut s'assurer dans ce contexte que ces trajectoires sont plausibles, voire représentatives par rapport au corpus d'études passées. Sur le bassin de la Seine, on ne peut, par exemple, pas écarter des futurs plausibles ni les augmentations substantielles des débits annuels (*e.g.* de l'ordre de 10 %), ni les diminutions modérées (5 à 10 %) que l'on retrouve dans de multiples chaînes. Des scénarios extrêmes avec une forte diminution des débits annuels que l'on voit par exemple dans Explore2 sont aussi obtenus dans d'autres chaînes de modélisation, ce qui renforce l'idée qu'ils ne peuvent pas être écartés.

La discussion précédente fait implicitement l’hypothèse que les résultats obtenus avec les différentes chaînes de modélisation / modèles sont équiprobables. L’objectif de ce travail n’est pas de juger du réalisme respectif des résultats des différentes études, et des modèles utilisés à l’intérieur de chaque étude. Bien entendu, il serait intéressant de pouvoir identifier les trajectoires les plus plausibles parmi toutes celles simulées. Il s’agit d’une question très complexe sur laquelle il est nécessaire de progresser. Une évaluation des modèles se focalisant sur des processus physiques cruciaux pour la réponse au changement climatique, une évaluation de tendances de différentes variables hydrologiques pour lesquelles des estimations observationnelles existent ou peuvent être dérivées, et des études de sensibilité pour mieux comprendre l’influence de certains facteurs sur les changements hydrologiques projetés pourraient être utiles pour progresser. Il reste important de garder en tête dans ce contexte qu’une part substantielle des incertitudes des changements hydroclimatiques sur l’Europe de l’Ouest est due à la variabilité interne du climat (Deman et Boé 2025), et que ce type d’incertitudes n’est de toute façon pas réductible, au-delà, au mieux de quelques années.

### ***Pour retrouver les outils et données***

Les données Explore2 sont disponibles sur la base de données DRIAS les futurs de l’eau <https://www.drias-eau.fr>. Les données CMIP5, CMIP6, Euro-CORDEX sont disponibles sur la Earth System Grid Federation (ESGF), par exemple <https://esgf-metagrid.cloud.dkrz.de/search>

## **Bibliographie**

- Boé, J., Somot, S., Corre, L., and Nabat, P. (2020). Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models : causes and consequences. *Climate Dynamics* 545, 2981–3002.
- Boé, J., Mass, A., and Deman, J. (2023). A simple hybrid statistical–dynamical downscaling method for emulating regional climate models over Western Europe. Evaluation, application, and role of added value? *Climate Dynamics* 611, 271–294.
- Casanueva, A, Herrera, S, Iturbide, M, et al. (2020) Testing bias adjustment methods for regional climate change applications under observational uncertainty and resolution mismatch. *Atmospheric Science Letters* 21, 21:e978
- Dayon, G., Boé, J., Martin, , and Gailhard, J. (2018). Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties. *Comptes Rendus. Géoscience* 3504, 141–153.
- Dayon, G., Boé, J., and Martin, E. (2015). Transferability in the future climate of a statistical downscaling method for precipitation in France. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 1203, 1023–1043
- Deman, J. and Boé, J. (2025). Unraveling uncertainties in near-term runoff projections across Europe : the major role of atmospheric noise. *Environmental Research Letters* 207, 074005.
- Douville, H., K. Raghavan, J. Renwick, R.P. Allan, P.A. Arias, M. Barlow, R. Cerezo-Mota, A. Cherchi, T.Y. Gan, J. Gergis, D. Jiang, A. Khan, W. Pokam Mba, D. Rosenfeld, J. Tierney, and O. Zolina, 2021: *Water Cycle Changes. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., 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.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1055–1210, doi:10.1017/9781009157896.010.

- Évin, G., Hingray, B., Reverdy, A., Ducharne, A. and Sauquet, E. (2024). Ensemble de projections Explore2 : Changements moyens et incertitudes associées, <https://doi.org/10.57745/KWH320>, Recherche Data Gouv, V2
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development* 95, 1937–1958.
- Flipo, N., Gallois, N., and Schuite, J. (2023a). Regional coupled surface–subsurface hydrological model fitting based on a spatially distributed minimalist reduction of frequency domain discharge data. *Geoscientific Model Development* 161, 353–381.
- Flipo, N., coordonné par (2023 b), Trajectoires hydrologiques passée, présente et futures du bassin de la Seine. *Rapport de synthèse de la phase 8 du Piren-Seine (2020-2023)*. [https://piren-seine.fr/rapports/rapport\\_de\\_synthese/rapports\\_de\\_phase\\_8/trajecotires\\_hydrologiques\\_passee\\_presente\\_et](https://piren-seine.fr/rapports/rapport_de_synthese/rapports_de_phase_8/trajecotires_hydrologiques_passee_presente_et)
- Habets, F., Boone, A., Champeaux, J. L., Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana Seguí, P., Rousset-Regimbeau, F., and Viennot, P. (2008). The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 113D6
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., and Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX : new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 142, 563–578.
- Lemordant, L., Gentine, P., Swann, A.S., Cook, B.I. & Scheff, J. (2018), Critical impact of vegetation physiology on the continental hydrologic cycle in response to increasing CO<sub>2</sub>, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A* 115 (16), 4093-4098.
- Lesk, C.S., Winter, J.M. & Mankin, J.S. (2025), Projected runoff declines from plant physiological effects on precipitation. *Nature Water* 3, 167–177
- Maraun, D., Shepherd, T. G., Widmann, M., Zappa, G., Walton, D., Gutiérrez, J. M., Hagemann, S., Richter, I., Soares, P. M. M., Hall, A., and Mearns, L. O. (2017). Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Climate Change* 711, 764–773
- Michelangeli, P.-A., Vrac, M., and Loukos, H. (2009). Probabilistic downscaling approaches : Application to wind cumulative distribution functions. *Geophysical Research Letters* 36, L11708
- O’Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., and Solecki, W. (2017). The roads ahead : Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change* 42, 169–180
- Pereira, L. S., Perrier, A., Allen, R. G., and Alves, I. (1999). Evapotranspiration : Concepts and Future Trends. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 1252, 45–51.
- Ribes, A., Boé, J., Qasmi, S., Dubuisson, B., Douville, H., and Terray, L.: An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint (2022). *Earth System Dynamics* 13, 1397–1415
- Sauquet, Éric ; Strohmenger, Laurent; Thirel, Guillaume ; Le Lay, Matthieu (2024), "Explore2\_Rapport\_Hydrologie\_Surface\_Changement\_Regime\_VF.pdf", Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale?, <https://doi.org/10.57745/00R6YU>, Recherche Data Gouv, V4
- Sauquet, E., Evin, G., Siauve, S., Aissat, R., Arnaud, P., Bérel, M., Bonneau, J., Branger, F., Caballero, Y., Colléoni, F., Ducharne, A., Gailhard, J., Habets, F., Hendrickx, F., Héraut, L., Hingray, B., Huang, P., Jaouen, T., Jeantet, A., Lanini, S., Le Lay, M., Magand, C., Mimeau, L., Monteil, C., Munier, S., Perrin, C., Robelin, O., Rousset, F., Soubeyroux, J.-M., Strohmenger, L., Thirel, G., Tocquer, F., Tramblay, Y., Vergnes, J.-P., and Vidal, J.-P. (2025). A large transient multi-scenario multi-model ensemble of future streamflow and groundwater projections in France. *EGUsphere Preprint repository*, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025->

1788

Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., and Teuling, A. J. (2010). *Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate : A review. Earth-Science Reviews* 993, 125–161

Switanek, M. B., Troch, P. A., Castro, C. L., Leuprecht, A., Chang, H.-I., Mukherjee, R., and Demaria, E. M. C. (2017). Scaled distribution mapping : a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology and Earth System Sciences* 21-6, 2649–2666.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A. (2012). *An Overview of CMIP5 and the Experiment Design* 93, 485-498

van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., and Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways : an overview. *Climatic Change* 109, 5.

Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M. (2017). The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models. *Geoscientific Model Development* 1011, 4257–4283