

Résultats des nouvelles projections climatiques sur le bassin de la Seine et évaluation de leur capacité à simuler la variabilité basse-fréquence

Julien Boé^{1*}

¹ CECI, Université de Toulouse, CNRS / CERFACS

* boe@cerfacs.fr

Résumé

Les projections à l'aide de modèles climatiques globaux constituent la première étape nécessaire à la caractérisation des impacts des changements du climat. Le premier objectif de cette étude est de caractériser les changements climatiques simulés par les modèles climatiques de nouvelle génération sur le bassin de la Seine et de les contextualiser par rapport aux résultats des projections de génération précédente. Le second objectif est d'évaluer la capacité de ces modèles à représenter correctement la variabilité climatique interannuelle et multidéennale des précipitations sur le bassin de la Seine. Ces analyses serviront de base à la sélection des modèles qui seront utilisés pour réaliser ultérieurement les scénarisations hydro-climatiques sur le bassin de la Seine.

Les résultats des modèles de nouvelle génération sont globalement cohérents avec ceux des projections climatiques de génération précédente, avec néanmoins un réchauffement plus marqué, et une dispersion plus faible des changements de précipitation en été. Grâce à un nouveau jeu de simulations, nous montrons par ailleurs que d'importants changements de variabilité climatique sont à attendre sur la Seine, avec notamment une augmentation de la variabilité des températures en été et des précipitations en hiver. La capacité des modèles climatiques de nouvelle génération à capturer la variabilité interannuelle et multidéennale des précipitations sur le bassin de la Seine est très variable selon le modèle. Au printemps, saison où la variabilité multidéennale est la plus marquée, beaucoup de modèles ont tendance à sous-estimer cette variabilité multidéennale par rapport à la variabilité interannuelle, en raison de biais dans la représentation de la variabilité multidéennale de la circulation atmosphérique de grande échelle.

Points clefs

- ✓ *Projections climatiques de nouvelle génération globalement cohérentes avec celles de génération précédente sur la Seine, avec néanmoins un réchauffement plus marqué*
- ✓ *Forts changements de variabilité climatique sur le bassin de la Seine avec le changement climatique*
- ✓ *Capacité des modèles à capturer la variabilité multidéennale des précipitations sur le bassin de la Seine très variable*

Abstract

Projections with global climate models are the first step in characterizing the impacts of climate change. The first objective of this study is to characterize the climate changes simulated by the new generation climate models on the Seine basin and to contextualize them in relation to the results of the previous generation climate projections. The second objective is to evaluate the skill of these models in correctly capturing the interannual and multi-decadal climate variability of precipitation on the Seine basin. These analyses will serve as a basis for the selection of models that will be used later to derive hydro-climate scenarios on the Seine basin.

The results of the new generation models are globally consistent with those of climate projections of the previous generation, with nevertheless a stronger warming, and a smaller spread in summer precipitation changes. Thanks to a new set of simulations, we also show that large changes in climate variability are to be expected on the Seine, with an increase in temperature variability in summer and in precipitation variability in winter. The ability of new generation climate models to capture the interannual and multi-decadal variability of precipitation on the Seine basin is highly variable depending on the model. In spring, when multi-decadal variability is stronger, many models tend to underestimate multi-decadal variability relative to interannual variability, due to biases in the representation of the multi-decadal variability of large-scale atmospheric circulation.

Key points

- ✓ New-generation climate projections are broadly consistent with those of previous generations on the Seine basin, but with more pronounced warming.
- ✓ Strong changes in climate variability on the Seine basin with climate change
- ✓ Models' ability in capturing the multi-decadal variability of precipitation on the Seine basin is highly variable

Introduction

Des études passées ont montré que le bassin de la Seine pourrait subir des changements hydro-climatiques forts, par exemple en ce qui concerne les étiages (e.g. Dayon et al. 2018), avec des impacts associés dans de nombreux domaines (e.g. agriculture). Des incertitudes importantes, par exemple quant à la magnitude des changements à attendre ou à l'évolution des extrêmes, existent néanmoins encore, et des progrès demeurent nécessaires.

En lien avec le prochain rapport majeur du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) à paraître en 2021, de nouvelles projections climatiques globales réalisées par les différents groupes de modélisation dans le monde sont en cours de finalisation. Ces simulations du projet *Coupled Model Intercomparison Project* phase 6 (CMIP6, Eyring et al. 2016) se basent sur la dernière génération de modèles climatiques et utilisent de nouveaux scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES) et des autres forçages anthropiques ("Shared Socio-economic Pathways", Riahi et al. 2017), plus pertinents d'un point de vue socio-politique.

Les modèles de nouvelle génération présentent souvent des améliorations théoriques dans la représentation de certains processus (e.g. effet physiologique du CO₂ pris en compte dans de nouveaux modèles, meilleure représentation de l'hydrologie continentale et notamment prise en compte des nappes dans certains modèles, etc.) Les ensembles de simulations sont plus grands et permettent de mieux caractériser les incertitudes en jeu, qu'elles soient liées au scénario d'émission de GES, à la variabilité interne du climat, ou à la modélisation climatique. Ces simulations sont amenées à servir de base pour les études des impacts du changement climatique pour de nombreuses années à venir. Elles seront ainsi utilisées dans le cadre de la scénarisation hydro-climatique pour le programme PIREN-Seine.

La résolution des modèles climatiques globaux CMIP6, même si elle a souvent progressé, reste encore limitée : la résolution horizontale aux moyennes latitudes va d'environ 50 km à 200 km, avec beaucoup de modèles dans l'intervalle 100-150 km. Elle est donc insuffisante pour caractériser les variations spatiales de petite échelle. Les données CMIP6 seront donc désagrégées par la suite afin d'obtenir la haute résolution nécessaire à la scénarisation hydro-climatique sur le bassin de la Seine. Toutes les simulations n'étant pas traitables dans ce contexte, des analyses préliminaires sur le bassin de la Seine sont nécessaires afin de sélectionner les modèles à utiliser.

L'objectif de cette étude est donc double. Il s'agit tout d'abord de caractériser ces nouvelles projections climatiques, à l'échelle agrégée du bassin de la Seine, et de les mettre en perspective avec les projections climatiques de génération précédente. Nous profiterons également de la nouvelle disponibilité de quelques très grands ensembles de simulations pour caractériser pour la première fois de façon robuste l'évolution de la variabilité du climat sur le bassin de la Seine avec le changement climatique.

Dans un second temps, il s'agit d'établir les éléments qui serviront de base à la sélection des modèles climatiques que nous utiliserons ultérieurement pour développer les scénarios régionaux sur le bassin de la Seine. Nous nous focaliserons dans ce cadre sur la représentation correcte de la variabilité climatique décennale à multidécennale.

1. Données

Le tableau 1 synthétise les simulations climatiques de nouvelle génération du projet CMIP6 étudiées. La quasi-intégralité des modèles disponibles à la fin de l'été 2020 est utilisée. Les simulations pré-industrielles sont des simulations de longueur variable dans lesquelles les forçages climatiques externes anthropiques (e.g. GES, aérosols, utilisation des sols) et naturels (e.g. volcanisme, constante solaire) sont maintenus constants, aux valeurs pré-industrielles.

Tableau 1. Simulations climatiques CMIP6 étudiées. Les chiffres de la première colonne correspondent aux numéros des modèles donnés sur les figures de la section 4. Ceux de la colonne "pré-industrielles" correspondent aux nombres d'années de la simulation pré-industrielle du modèle. Les chiffres des colonnes "historiques" et des différents "SSP" correspondent aux nombres de membres disponibles pour ces simulations. XXXX signifie qu'aucune simulation n'est disponible, et/ou, pour la colonne "Pré-industrielles", que le nombre d'années disponibles est jugé insuffisant pour nos analyses.

		Pré-industrielles	historiques (tas)	SSP126 (tas)	SSP245 (tas)	SSP370 (tas)	SSP585 (tas)
1	ACCESS-CM2	500	2	1	1	1	1
2	ACCESS-ESM1-5	900	3	3	3	3	3
3	AWI-CM-1-1-MR	500	5	1	1	5	1
4	BCC-CSM2-MR	600	3	1	1	1	1
5	CAMS-CSM1-0	500	2	2	2	2	2
13	CanESM5	1000	40	40	40	40	40
14	CanESM5-CanOE	501	3	3	3	3	3
6	CESM2	1200	11	3	3	3	3
7	CESM2-FV2	500	3	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX
8	CESM2-WACCM	499	3	1	3	1	3
9	CESM2-WACCM-FV2	500	3	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX
10	CMCC-CM2-SR5	500	1	1	1	1	1
11	CNRM-CM6-1	500	30	6	6	6	6
	CNRM-CM6-1-HR	XXXX	1	1	1	1	1
12	CNRM-ESM2-1	500	9	5	5	5	5
15	E3SM-1-0	500	5	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX
	EC-Earth3	XXXX	23	7	22	7	7
16	EC-Earth3-Veg	500	5	4	5	4	4
17	FGOALS-f3-L	561	3	1	1	1	1
18	FGOALS-g3	700	3	1	1	1	1
	FIO-ESM-2-0	XXXX	3	3	3	XXXX	3
19	GFDL-CM4	500	1	XXXX	1	XXXX	1
20	GFDL-ESM4	500	3	1	3	1	1
21	GISS-E2-1-G	851	29	2	15	2	2
22	HadGEM3-GC31-LL	500	4	1	1	XXXX	3
23	HadGEM3-GC31-MM	500	2	1	XXXX	XXXX	3
24	INM-CM4-8	531	1	1	1	1	1
25	INM-CM5-0	1201	10	1	1	5	1
26	IPSL-CM6A-LR	1200	32	6	11	11	6
	KACE-1-0-G	XXXX	3	2	3	3	3
27	MCM-UA-1-0	500	2	1	1	1	1
28	MIROC-ES2L	500	10	2	1	1	1
29	MIROC6	800	10	3	3	3	3
30	MPI-ESM-1-2-HAM	780	2	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX
31	MPI-ESM1-2-HR	500	10	2	2	10	2
32	MPI-ESM1-2-LR	1000	10	10	10	10	10
33	MRI-ESM2-0	701	5	1	1	5	2
34	NESM3	500	5	2	2	XXXX	2
35	NorCPM1	500	30	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX
	NorESM2-LM	XXXX	3	1	3	1	1
36	NorESM2-MM	500	1	1	1	1	1
37	SAM0-UNICON	700	1	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX
38	TaiESM1	500	1	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX
39	UKESM1-0-LL	1100	17	5	5	5	5

Ces simulations permettent de caractériser la variabilité interne climatique, se produisant en l'absence de toute variation des forçages externes, en raison des interactions entre les multiples composantes du système. Les simulations historiques sont des simulations forcées par l'évolution des forçages externes anthropiques et naturels observés, sur la période 1850-2014, permettant une comparaison aux variations observées. Les 4 scénarios SSP ("*Shared Socio-economic Pathways*" ; Riahi et al. 2017) pour la période 2015-2100 correspondent à différentes évolutions possibles des forçages climatiques anthropiques, et notamment des GES, en réponse à des trajectoires d'évolution socio-économique de base, auxquelles peuvent s'ajouter différentes politiques climatiques d'atténuation des GES.

Plusieurs membres sont souvent disponibles pour les simulations historiques et les scénarios SSP. Ces membres correspondent à des simulations avec le même modèle climatique différant uniquement par les conditions initiales (en 1850). Les différences entre membres d'un même modèle sont uniquement dues aux variations internes du climat et permettent donc de les caractériser.

Pour la comparaison aux observations, les données CRU-TS4 (Harris et al. 2020) disponibles sur une longue période sont utilisées pour la température et les précipitations. Pour la pression réduite au niveau de la mer, la réanalyse NOAA-20CR (V3) (Slivinski et al. 2019) est utilisée.

2. Changements climatiques sur le bassin de la Seine dans les modèles de nouvelle et ancienne génération

Les évolutions des températures et des précipitations sur le bassin de la Seine projetées par les modèles climatiques de nouvelle génération (CMIP6) et de la génération précédente (CMIP5) sont comparées pour deux scénarios d'émission quasi-identiques, ainsi qu'avec les observations sur la période historique.

Les résultats CMIP6 et CMIP5 sont relativement similaires (Fig. 1, courbes rouge sombre et bleue). Globalement, les modèles climatiques CMIP6 comme CMIP5 représentent correctement l'évolution observée des précipitations et températures sur la Seine sur le XX^{ème} siècle, avec une tendance au réchauffement, amplifiée en été, une augmentation modérée des précipitations en hiver et peu de changement des précipitations en été. Le réchauffement récent simulé en moyenne par les modèles en été est plus faible qu'observé, néanmoins les observations se situent dans l'intervalle de confiance des modèles.

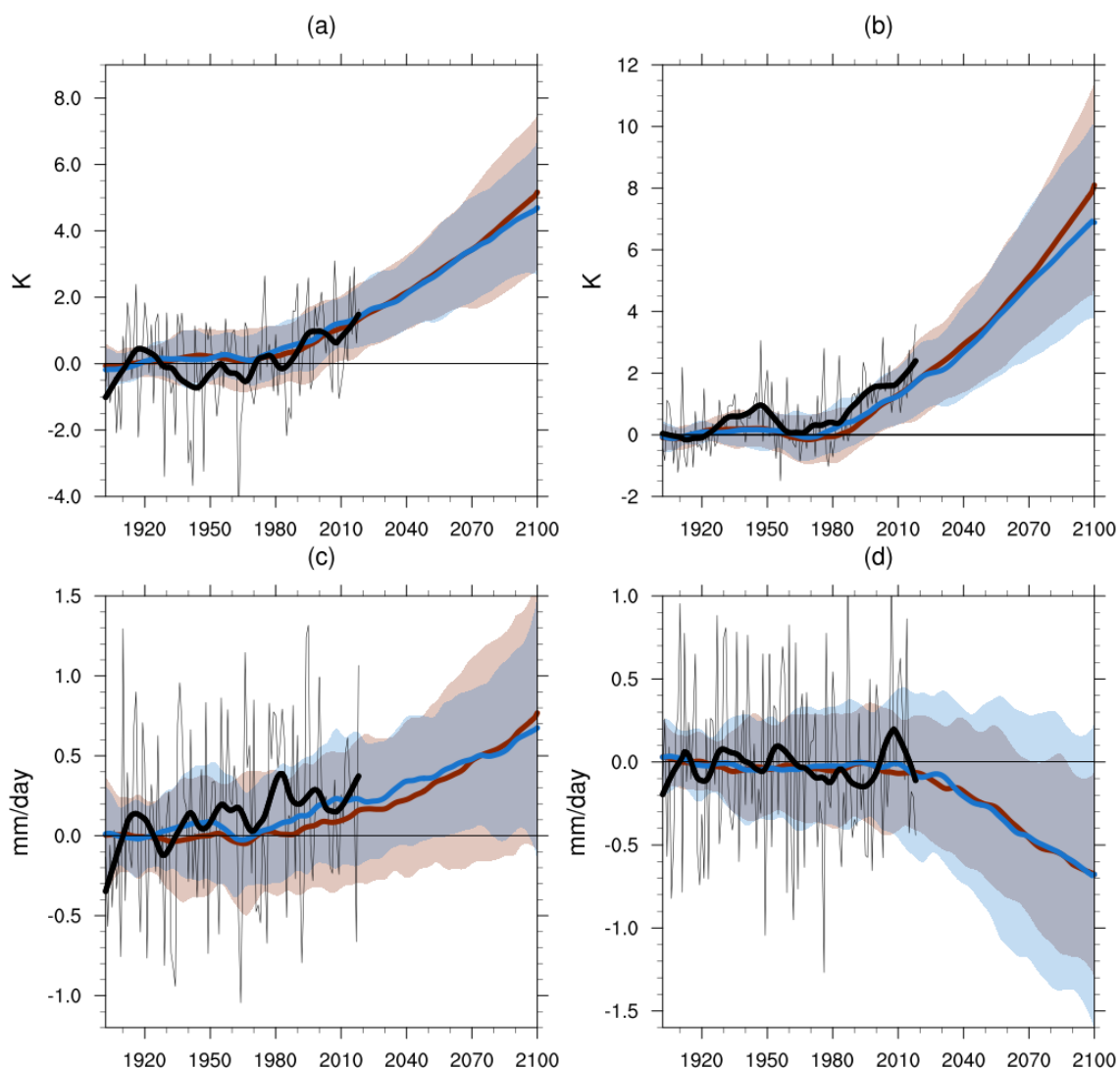


Figure 1. Evolution (a, b) de la température (°C) et (c, d) des précipitations (mm/jour) sur le bassin de la Seine entre 1902 et 2100 dans les modèles CMIP6 pour le scénario SSP585 (rouge sombre), CMIP5 pour le scénario RCP85 (bleu), et les observations (CRU TS4) (noir). (a, c) Hiver; (b,d) Été. Un filtre LOESS est appliqué pour lisser les évolutions sauf pour le trait fin noir qui montre les valeurs annuelles brutes observées. La référence pour calculer les anomalies est la période 1902-1931. Bandes de couleur : intervalle de confiance à 5-95% basé sur l'écart-type pondéré selon le nombre de membres des différents modèles pour CMIP6 (rouge clair) et CMIP5 (bleu clair)

Des différences entre CMIP6 et CMIP5 sont à noter sur le XXI^{ème} siècle. Le réchauffement sur la Seine est plus marqué dans CMIP6, notamment en été avec quasiment 1°C de différence en fin du XXI^{ème} siècle (8°C versus 7°C). De plus, la dispersion des changements des précipitations en été dans CMIP6 est plus faible, montrant une réduction des incertitudes dans ce contexte.

Il est intéressant de noter que les changements projetés des précipitations en été commencent réellement à apparaître à partir des années 2020-2030. Jusqu'à aujourd'hui, les changements observés aussi bien que simulés en été ont été très faibles (Fig. 1d). Si les dernières décennies, marquées par un réchauffement important, donnent un avant-goût qualitatif des impacts à venir en relation avec l'augmentation des températures, il n'en est rien en ce qui concerne ceux liés directement aux précipitations.

Afin de caractériser plus finement la réponse au changement climatique sur le bassin de la Seine et les différences entre l'ancienne et la nouvelle génération de modèles, les changements relatifs de précipitation en fonction des changements de température sont montrés en hiver et en été dans les projections CMIP5 et CMIP6 prises individuellement (Fig. 2).

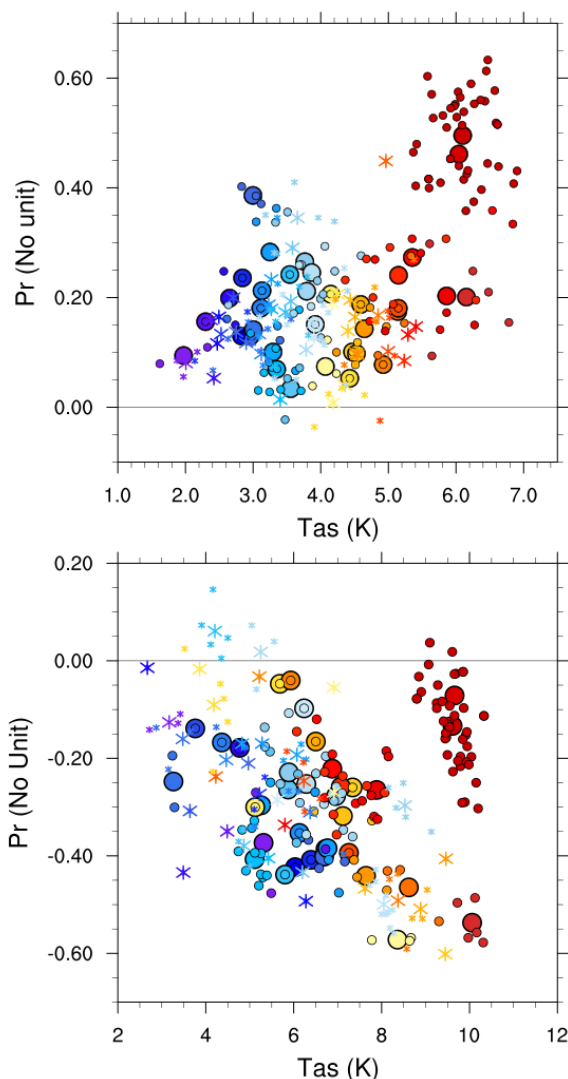


Figure 2. (Haut) Changement relatif en hiver (décembre-janvier-février) de précipitation (sans unité) versus changement de température ($^{\circ}\text{C}$), pour CMIP5 (astérisques) et CMIP6 (cercles). Scénarios RCP85 et SSP585 respectivement. 2070/2099 - 1961/1990. Grands symboles : moyennes d'ensemble. Petits symboles : membres. (Bas) comme (haut) pour l'été (juin-juillet-août). Chaque couleur correspond à un modèle climatique, en allant du bleu foncé pour les modèles se réchauffant le moins en hiver au rouge foncé pour les modèles se réchauffant le plus.

De façon intéressante, deux modèles (CanESM5 et CanESM5-CanOE, qui sont très proches et ne diffèrent en fait que par la composante biogéochimique marine ; points rouge foncé sur la Fig. 2) simulent un type de changement non observé dans les modèles de génération précédente. Les forts réchauffements en été sont habituellement associés à de fortes diminutions des précipitations, en raison notamment des rétroactions sol-atmosphère. Les modèles CanESM5 et CanESM5-CanOE simulent par contre de très forts réchauffements en été (autour de 10°C) associés à de faibles diminutions des précipitations. Ce sont également les deux modèles qui produisent les plus fortes augmentations de précipitation en hiver, aussi associées à un très fort réchauffement. Il est difficile de se prononcer sur le réalisme de ces changements sans étude plus poussée. A ce stade, il est donc impossible de rejeter les résultats de ces modèles. Même si leur probabilité semble faible, compte tenu du caractère inhabituel de ces changements par rapport aux projections précédentes, il pourrait être intéressant d'étudier à quels types d'impacts hydrologiques ils mènent.

Un autre aspect intéressant de la comparaison de la réponse des modèles de précédente et nouvelle génération concerne les faibles changements conjugués de précipitation et température en été (Fig. 2 bas). Moins de modèles CMIP6 simulent de tels changements, bien entendu plus favorables en termes d'impacts.

Les résultats discutés précédemment concernent un seul scénario d'émission de GES, sévère (SSP585). Pour CMIP6, de nombreux groupes de modélisation ont réalisé des projections pour différents scénarios. La Fig. 3 montre les résultats pour les 4 scénarios les plus largement disponibles. Sans surprise, de grandes incertitudes liées à l'évolution socio-économique du monde et aux politiques climatiques éventuelles existent en ce qui concerne les changements de précipitation et de température sur le bassin de la Seine. En ce qui concerne les 20 prochaines années, on peut tout de même constater que les évolutions restent proches, les divergences apparaissant ensuite.

Il est important de noter que le scénario en jaune sur la Fig. 3 (SSP126), menant aux changements les plus modérés, correspond à une évolution très favorable de la société vis-à-vis des problématiques environnementales, ainsi qu'à la mise en œuvre de politiques climatiques d'atténuation des GES très poussées.

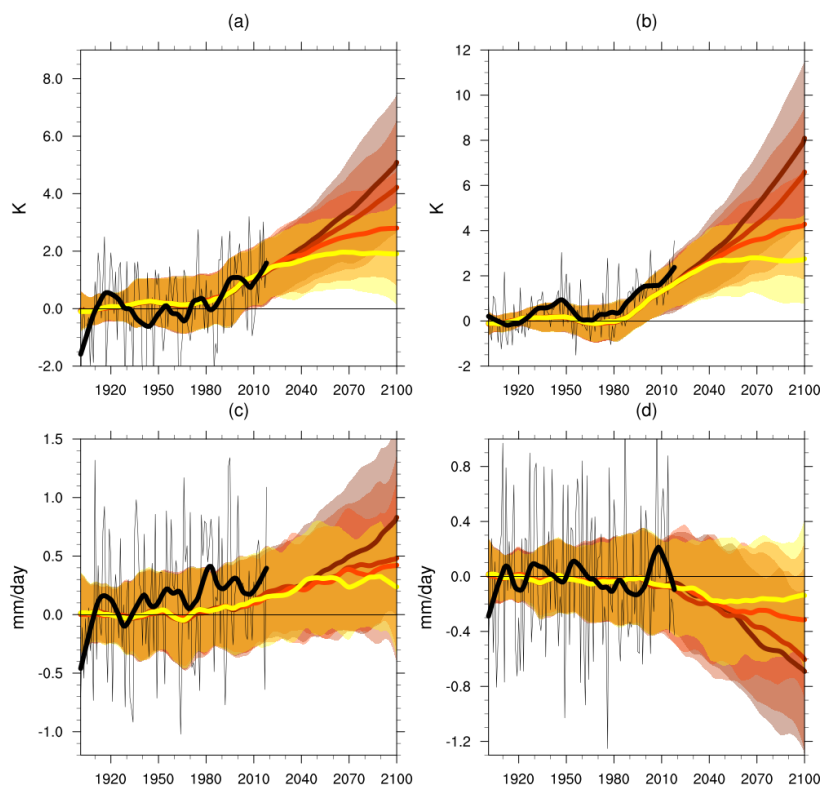


Figure 3. Evolution (a, b) de la température ($^{\circ}\text{C}$) et (c, d) des précipitations (mm/jour) sur le bassin de la Seine entre 1902 et 2100 dans les observations (CRU TS4) et pour 4 scénarios d'émission de gaz à effet de serre : du plus chaud au plus froid sur (a): SSP585, SSP370, SSP245, SSP126. (a,c) Hiver; (b,d) Été. La référence pour calculer les anomalies est la période 1902-1931. Un filtre LOESS est appliqué pour lisser les évolutions sauf pour le 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 4 scénarios.

3. Evolution de la variabilité interannuelle

Au-delà des changements des moyennes, les changements de variabilité du climat (e.g. les contrastes entre les années les plus sèches et les années les plus humides), et en particulier l'augmentation de la variabilité, peuvent avoir des impacts très importants en termes de gestion des ressources. Il était très difficile de caractériser les changements de variabilité interannuelle correctement jusqu'à maintenant en raison de problèmes d'échantillonnage : caractériser de façon robuste les changements de variabilité climatique demande en effet une quantité importante de données.

La disponibilité récente de grands ensembles de simulations climatiques réalisées avec un même modèle (de génération précédente) et différant uniquement par les conditions initiales (ou membres, jusqu'à 100 membres dans un cas), permet pour la première fois d'évaluer de façon robuste l'évolution temporelle de la variabilité climatique interannuelle au cours du XXI^{ème} siècle (voir légende de la Fig. 4 pour description de

la méthode). Les 5 principaux grands ensembles disponibles aujourd'hui avec plus de 30 membres sont utilisés (Deser et al. 2020).

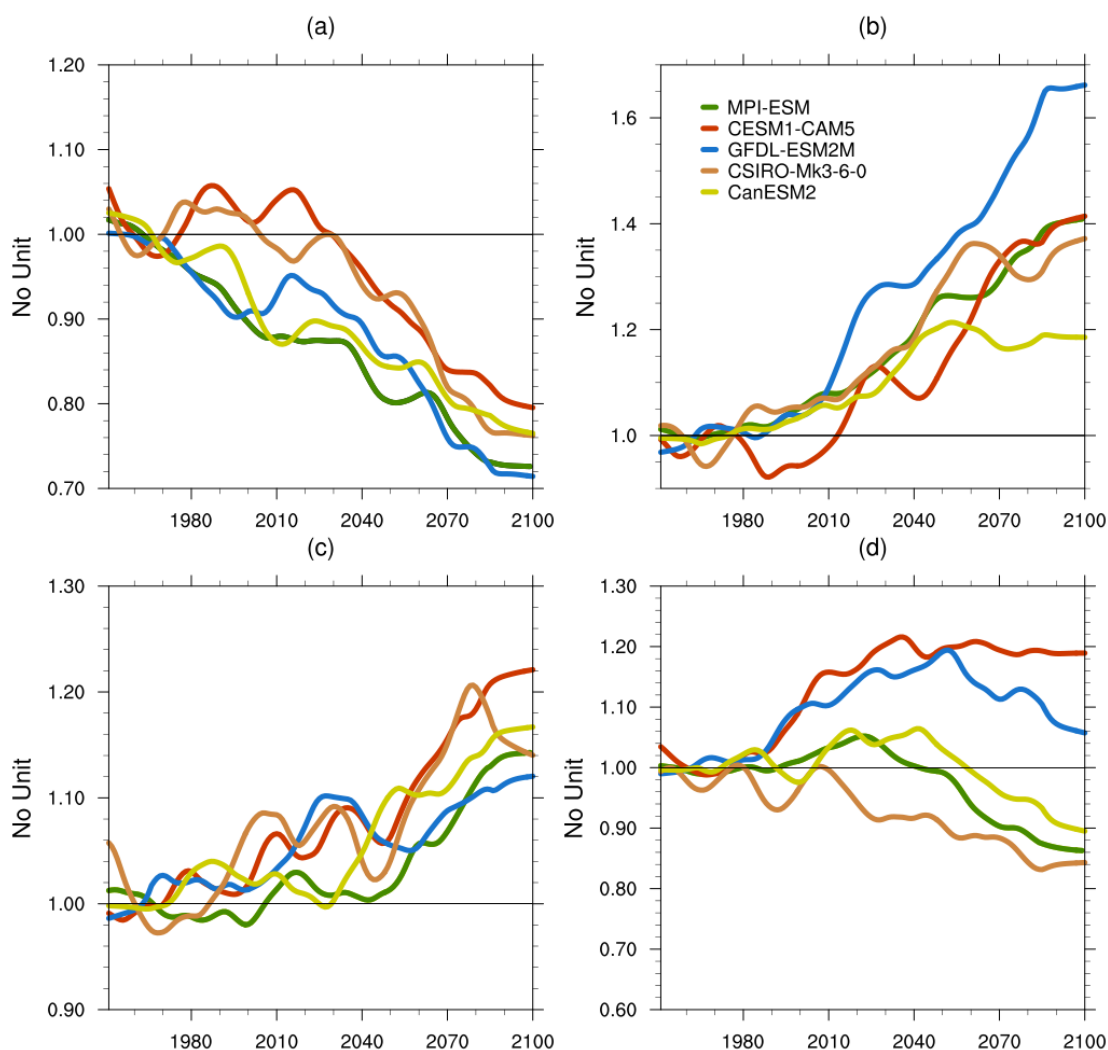


Figure 4. Evolution de la variabilité interannuelle pour 5 modèles disposant d'un large ensemble de membres pour (a, b) la température et (c, d) les précipitations en (a, c) hiver et (b, d) été. L'écart-type est calculé chaque année sur tous les membres du modèle: cela permet de caractériser la variabilité interannuelle localement en une année. Le ratio avec l'écart-type moyen sur 1951-1980 est ensuite calculé pour chaque année et un filtre LOESS est finalement appliqué pour lisser les résultats. 5 modèles climatiques forcés par le scénario RCP8.5 sont utilisés. MPI-ESM (100 membres); CESM1-CAM5 (40 membres); GFDL-ESM2 (30 membres); CSIRO-Mk3-6-0 (30 membres); CanESM2 (50 membres). Voir Deser et al. (2020) pour une description de ces grands ensembles

Des changements importants de la variabilité interannuelle des températures et des précipitations sur le bassin de la Seine sont projetés (Fig. 4). Il y a un accord des modèles pour une diminution de la variabilité interannuelle des températures en hiver, de l'ordre de 20-30%, et une augmentation en été, entre 20% et 60%. Pour les précipitations en hiver, la variabilité augmente, entre 10 et 25%. En été, un désaccord entre les modèles existe : dans deux des modèles, la variabilité augmente de 10-20%, dans trois autres, elle diminue de 10-20%.

Ces résultats montrent que le changement climatique sur le bassin de la Seine ne se traduira pas seulement par un simple changement de moyenne, mais également par un changement de variabilité. Ils montrent ainsi qu'il n'est pas possible de se baser uniquement sur la variabilité hydrologique passée (et donc observée) pour anticiper la variabilité future. Le recours aux projections climatiques, permettant de projeter les changements de variabilité, est nécessaire. Dans ce contexte, il est important qu'elles reproduisent correctement la variabilité passée afin de donner confiance dans les futurs changements de variabilité projetés.

4. Evaluation de la variabilité des précipitations

4.1. Motivation

L'analyse des projections climatiques globales en moyenne sur le bassin de la Seine donne une indication intéressante des grandes tendances futures. Néanmoins, la résolution limitée des modèles climatiques globaux ne permet pas une description fine des changements à attendre, et ne permet donc pas d'étudier les impacts du changement climatique, sur l'hydrologie par exemple. Dans cette optique, une étape de régionalisation des simulations globales est nécessaire. Compte tenu de la complexité de cette étape et du coût et temps de calcul qui seraient nécessaires à la modélisation hydrologique à partir de toutes les projections climatiques disponibles (voir Tab. 1), il est virtuellement impossible de toutes les traiter pour une étude d'impact. Un sous-échantillon de projections climatiques doit donc tout d'abord être sélectionné. Différents objectifs peuvent être suivis dans ce contexte : (i) sélection d'un petit nombre de modèles climatiques dont les changements sont représentatifs des changements de l'ensemble complet, (ii) sélection d'un petit nombre de modèles jugés indépendants, le manque d'indépendance des modèles pouvant mener à une mauvaise estimation du signal et des incertitudes, (iii) sélection des modèles dont les résultats sont jugés les plus réalistes.

Un aspect original sur lequel nous souhaitons travailler dans le cadre du programme PIREN-Seine pour la sélection des modèles concerne le réalisme de la représentation de la variabilité climatique, en particulier "basse fréquence", c'est à dire à des échelles de temps décennales à multidécennales. Le climat possède en effet une variabilité interne aux échelles de temps décennales à multidécennales, c'est-à-dire se produisant sans variation des forçages externes naturels (e.g. volcanisme) ou anthropiques (e.g. GES). Des travaux passés (e.g. Boé and Habets 2014, Bonnet et al. 2020) ont ainsi montré qu'une forte variabilité hydrologique aux échelles de temps multidécennales existe sur la France, bassin de la Seine inclus.

Cette variabilité aléatoire modulera l'évolution future du cycle hydrologique due aux forçages anthropiques aux échelles de temps climatiques, c'est-à-dire même pour des moyennes sur quelques dizaines d'années. Elle viendra atténuer le signal anthropique pendant certaines décennies et l'amplifier pendant d'autres. Or, l'adaptation au changement climatique demande non seulement de s'adapter aux changements climatiques anthropiques, mais également de pouvoir faire face aux périodes pendant lesquelles les effets de la variabilité basse fréquence interne viennent renforcer le signal anthropique.

Dans ce contexte, il est nécessaire que la variabilité climatique basse fréquence soit représentée correctement dans les scénarios hydro-climatiques et donc simulée correctement par les modèles climatiques, ce qui n'est pas nécessairement le cas (Qasmi et al. 2017).

Il faut noter que contrairement à l'état moyen, ou à la distribution journalière, il n'existe pas de méthode de correction que l'on puisse utiliser pour corriger d'éventuels biais dans la représentation de cette variabilité basse fréquence avant modélisation d'impact. Il est donc d'autant plus crucial que les projections climatiques la représentent correctement.

4.2. Méthode

Une difficulté majeure existe dans l'évaluation de la variabilité climatique décennale à multidécennale. La période dite instrumentale, pour laquelle des observations existent, est très courte : on dispose de très peu d'observations avant 1900, et quasiment d'aucune avant 1850. Or, 120 ans, et même 170 ans, sont des périodes très courtes pour caractériser de façon robuste des variations de pseudo-périodes de plus de 10 ans voire 50 ans, comme ce sera montré par la suite. Une méthodologie permettant d'évaluer de façon la plus robuste possible la variabilité basse fréquence dans les modèles climatiques en prenant en compte les très fortes incertitudes d'échantillonnage est ici mise en œuvre.

Les moyennes saisonnières des précipitations sur le bassin de la Seine sont calculées pour chaque année de la période 1901-2014. Pour chacune des 4 séries saisonnières, la tendance linéaire est retranchée et l'écart-type est calculé afin de caractériser la variabilité interannuelle. Dans un second temps, une moyenne glissante de 21 ans est calculée sur les séries saisonnières. Les écarts-types des séries résultantes sont calculés afin de caractériser la variabilité basse fréquence.

Ce calcul est fait pour les observations (ligne rouge sur Fig. 5 à 8) et les simulations CMIP6 historiques (points verts). Le nombre de membres varie selon le modèle (Tab. 1). Il est parfois beaucoup trop faible pour une comparaison satisfaisante de la variabilité aux observations. Les écarts-types des séries saisonnières

interannuelles et basse fréquence de précipitation sont donc également calculés pour toutes les périodes de 114 ans (durée de la période utilisée pour les observations et simulations historiques) des simulations pré-industrielles (Tab. 1) de façon glissante, avec décalage d'un an à chaque fois. La distribution statistique de ces écarts-types est ensuite calculée pour chaque modèle et représentée avec des boîtes à moustaches sur les Fig. 5 à 8.

Ce travail sur les simulations pré-industrielles permet de quantifier approximativement la dispersion des écart-types même pour les modèles ayant réalisé peu de membres historiques. Néanmoins, la comparaison demeure largement moins rigoureuse qu'entre les simulations historiques et les observations en raison de l'effet potentiel des forçages anthropiques non présents dans les simulations pré-industrielles.

4.3 Résultats

Avant tout chose, on peut constater la forte incertitude d'échantillonnage existante lorsqu'on caractérise la variabilité interannuelle même sur une période aussi longue que 114 ans (Fig. 5). Pour certains modèles, en hiver par exemple, l'écart-type peut varier de quasiment 50% entre des simulations qui ne diffèrent que par les conditions initiales. Pour la variabilité multidécennale, comme montré sur la Fig. 6, l'écart-type peut varier de plus de 200% selon la période de 114 ans choisie.

Ces résultats montrent que de fortes différences d'écarts-types entre une simple simulation et les observations peuvent exister, sans que cela soit le signe d'un problème dans la représentation de la variabilité. L'évaluation dans ce contexte ne peut être que probabiliste. Un modèle est compatible avec les observations en ce qui concerne la variabilité interannuelle ou multidécennale observée si la distribution de ses écart-types contient la valeur des observations. C'est à cette aune que sera jugé le réalisme des modèles pour les analyses suivantes.

La variabilité interannuelle est surestimée par environ 3/4 des modèles en hiver et au printemps. En été et en automne, ce sont respectivement environ la moitié et les deux tiers des modèles qui sont compatibles avec les observations (Fig. 5). C'est au printemps que la variabilité multidécennale observée est largement la plus forte (Fig. 6), de façon cohérente avec les études précédentes (e.g. Boé et Habets 2014). Comme noté précédemment, de très larges incertitudes d'échantillonnage existent dans l'estimation de la variabilité multidécennale sur une période de 114 ans. Quasiment tous les modèles sont compatibles avec les observations en été et en automne. En hiver, beaucoup de modèles surestiment la variabilité multidécennale. A l'inverse, au printemps, saison pour laquelle une forte variabilité multidécennale observée existe, beaucoup de modèles sous-estiment la variabilité observée.

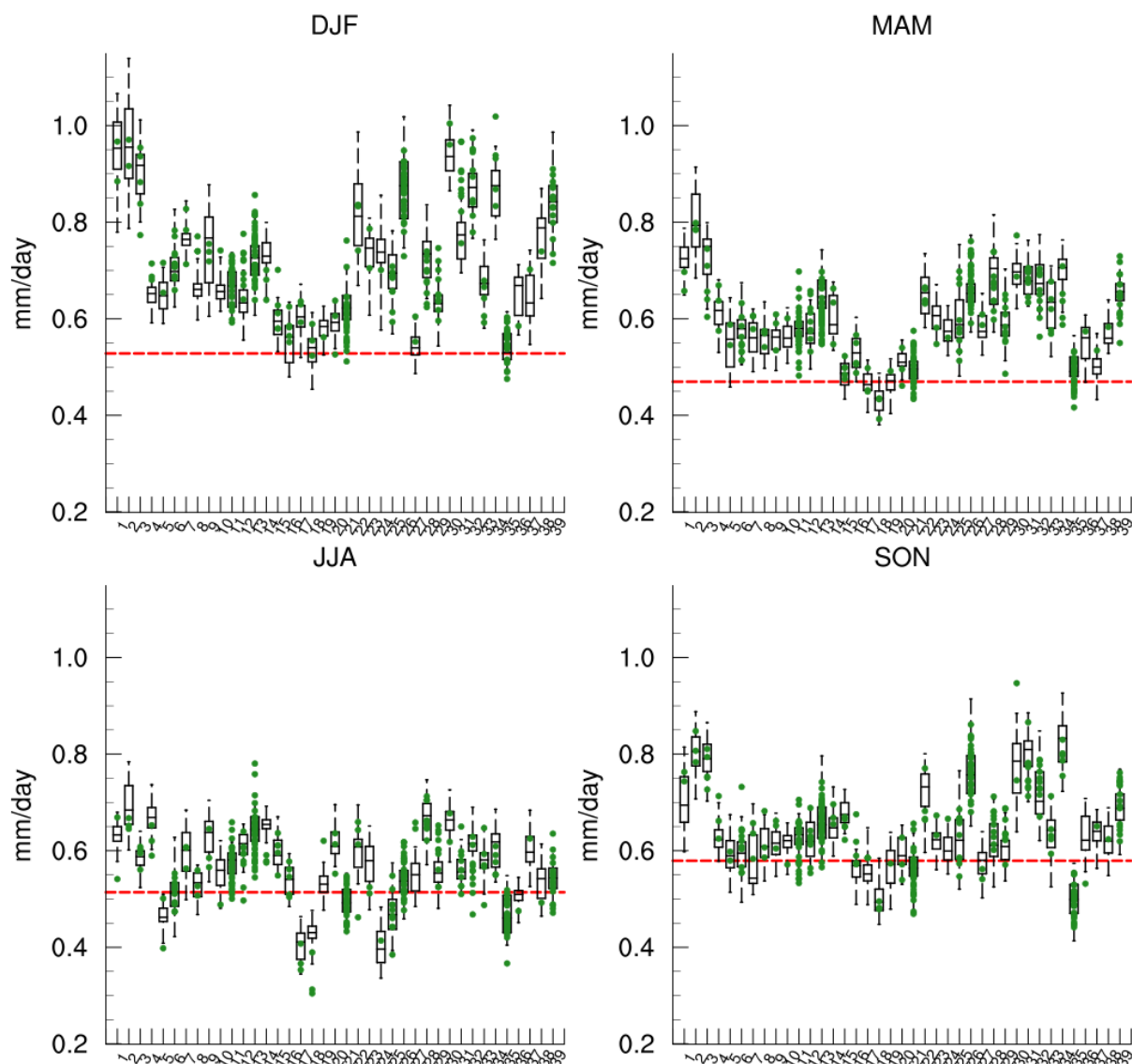


Figure 5. Écarts-types interannuels des précipitations moyennes sur le bassin de la Seine pour la saison indiquée en titre (DJF: décembre-janvier-février; MAM: mars-avril-mai; JJA: juin-juillet-août; SON: septembre-octobre-novembre), pour les simulations pré-industrielles (boîtes), les simulations historiques (points verts) et les observations (ligne rouge). La période utilisée pour les simulations historiques et les observations est 1901-2014. Voir section 4.2 pour la description de la méthode. Les boîtes-à-moustaches montrent la médiane, les 25^{ème} et 75^{ème} centiles ainsi que le minimum et le maximum.

Alors qu'au printemps les observations se situent généralement plutôt parmi les valeurs hautes des modèles en ce qui concerne la variabilité multidécennale, elles se situent dans les valeurs basses pour la variabilité interannuelle. Il est donc possible que certains modèles soient compatibles avec les observations au niveau multidécennal en raison d'une trop forte variabilité interannuelle, et non d'une bonne représentation intrinsèque de la variabilité multidécennale. Afin de tester cette hypothèse, la Fig. 7 montre le ratio des écarts-types des séries basse fréquence sur ceux des séries interannuelles. Ce ratio est beaucoup plus élevé au printemps (plus de 0,3) que dans les autres saisons (0,10-0,14) pour les observations, soulignant l'importance de la variabilité basse fréquence à cette saison. En été et automne, quasiment tous les modèles sont globalement compatibles avec les observations. Ce n'est pas le cas au printemps : les observations se situent vraiment dans les extrêmes de la distribution des modèles, et un nombre important de modèles ne sont pas compatibles avec les observations.

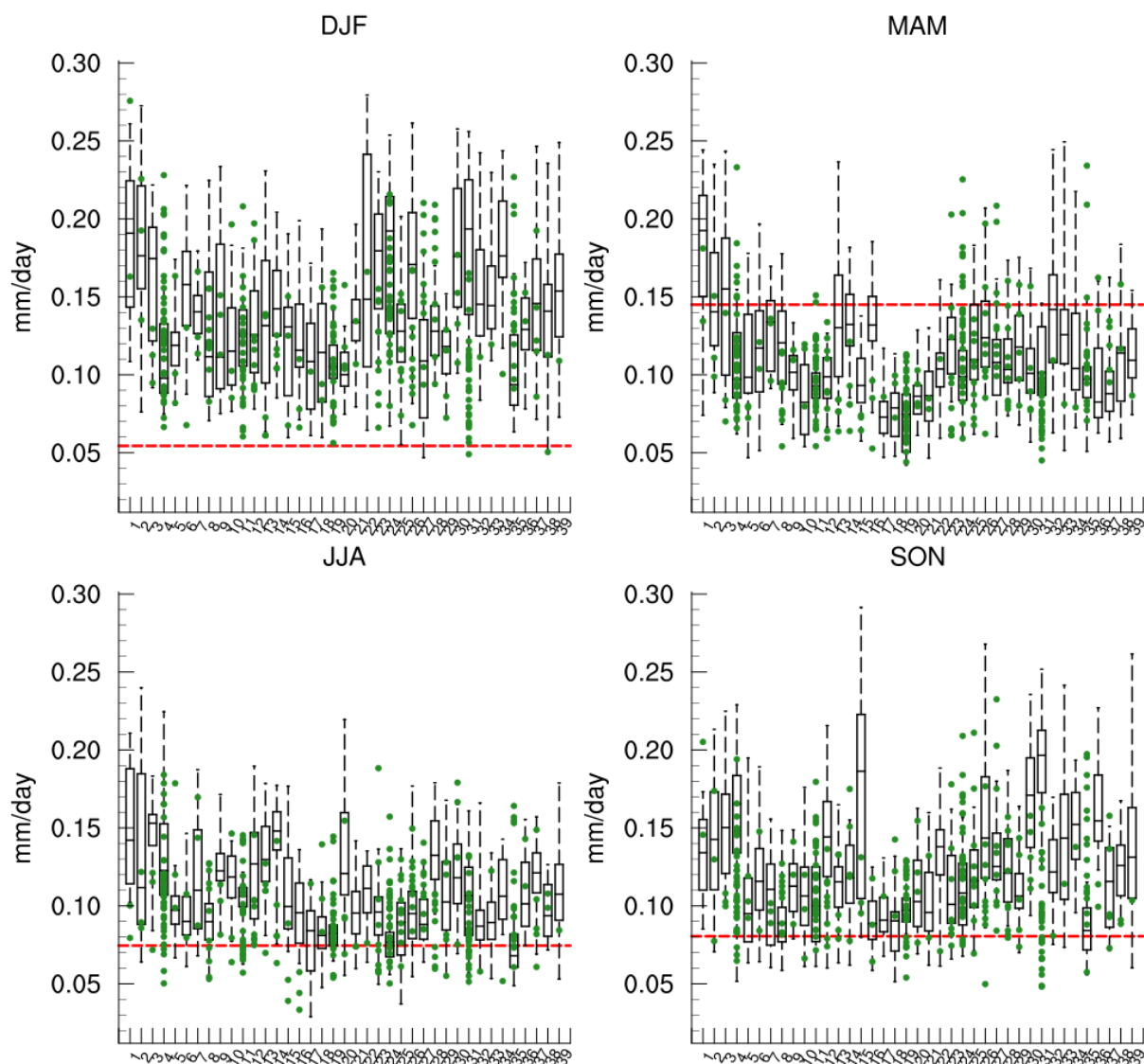


Figure 6. Écarts-types de la série des précipitations moyennes sur le bassin de la Seine pour la saison indiquée en titre (DJF: décembre-janvier-février; MAM: mars-avril-mai; JJA: juin-juillet-août; SON: septembre-octobre-novembre), pour les simulations pré-industrielles (boîtes), les simulations historiques (points verts) et les observations (ligne rouge). Une moyenne glissante de 21 ans est calculée avant le calcul des écarts-types afin de caractériser la variabilité basse fréquence. La période utilisée pour les simulations historiques et les observations est 1901-2014. Voir section 4.2 pour la description de la méthode. Les boîtes-à-moustaches montrent la médiane, les 25^{ème} et 75^{ème} centiles ainsi que le minimum et le maximum.

Des études ont montré que la variabilité multidécennale des précipitations au printemps sur la France était liée à des variations de la circulation atmosphérique de grande échelle (e.g. Boé et Habets 2014, Bonnet et al. 2020). Il est donc possible que les difficultés des modèles à représenter correctement la variabilité multidécennale des précipitations soient liées à la variabilité de la circulation atmosphérique. Cette hypothèse est testée.

Un mode de circulation atmosphérique en particulier est important dans ce contexte. Il est caractérisé par la différence de pression moyenne entre la boîte 35°N/60°N; 12°W/25°E et la boîte 20°N/45°N; 40°W/12°W (Boé et Habets 2014). Lorsque l'indice de pression est positif, la composante sud du flux atmosphérique sur la France est renforcée. Cela correspond à une advection d'un air plus chaud et plus sec, et mène donc à des précipitations plus faibles que la normale.

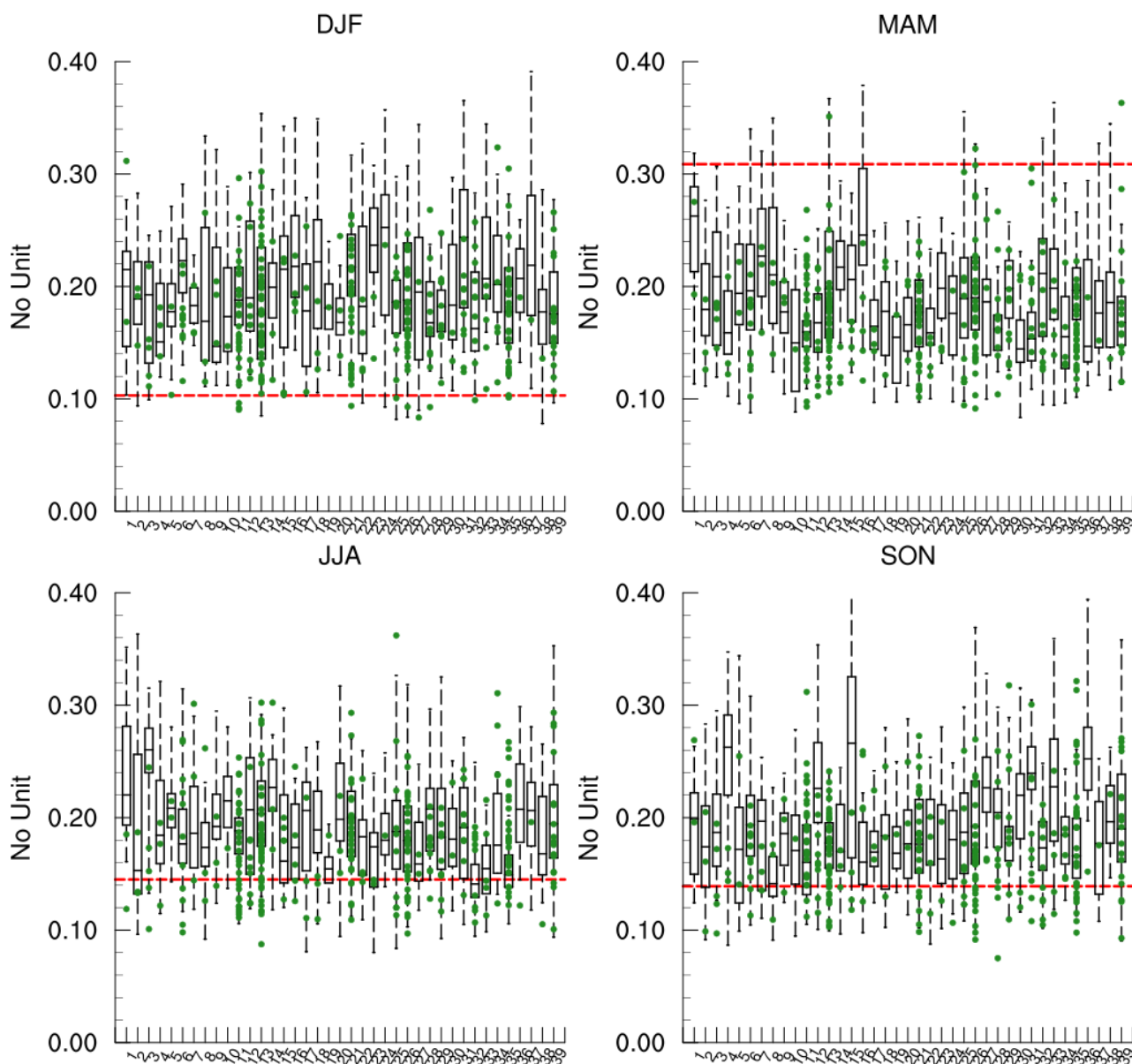


Figure 7: Ratio des écarts-types des moyennes glissantes de 21 ans et des séries interannuelles des précipitations moyennes sur le bassin de la Seine pour la saison indiquée en titre (DJF: décembre-janvier-février; MAM: mars-avril-mai; JJA: juin-juillet-aout; SON: septembre-octobre-novembre), pour les simulations pré-industrielles (boites), les simulations historiques (points verts) et les observations (ligne rouge). La période utilisée pour les simulations historiques et les observations est 1901-2014. Voir section 4.2 pour la description de la méthode. Les boites-à-moustaches montrent la médiane, les 25^{ème} et 75^{ème} centiles ainsi que le minimum et le maximum.

La Figure 8 évalue la capacité des modèles climatiques à représenter la variabilité multidécennale de ce mode de circulation de grande échelle. De façon cohérente avec ce qui a été noté pour la variabilité multidécennale des précipitations sur la France au printemps, la variabilité basse fréquence de l'indice de pression est plus faible qu'observée dans de nombreux modèles. Plusieurs modèles sont néanmoins compatibles avec les observations, même si ces dernières se situent dans la partie extrême supérieure de la distribution des modèles.

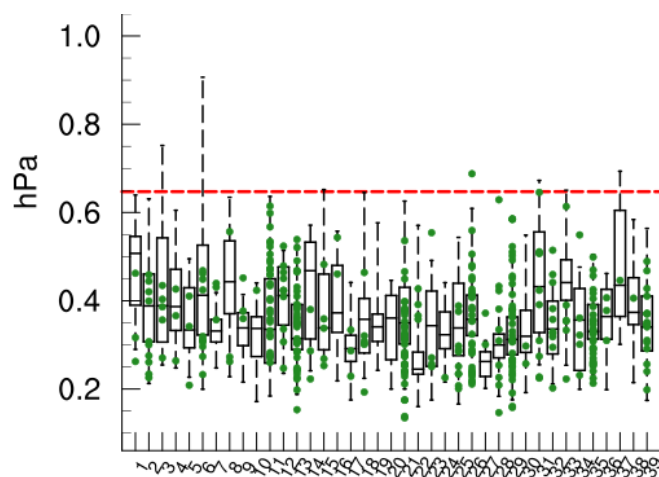


Figure 8: Écarts-types de l'indice de pression au printemps (mars-avril-mai) défini comme la différence de pression moyenne de la boîte 35°N/60°N; 12°W/25°E et la boîte 20°N/45°N; 40°W/12°W pour les simulations pré-industrielles (boîtes), les simulations historiques (points verts) et les observations (ligne rouge). Une moyenne glissante de 21 ans est calculée avant le calcul des écarts-types afin de caractériser la variabilité basse fréquence. Les données observées (ligne rouge) viennent de la réanalyse NOAA-20CR (voir section 1). La période utilisée pour les simulations historiques et les observations est 1901-2014. Les boîtes-à-moustaches montrent la médiane, les 25^{ème} et 75^{ème} centiles ainsi que le minimum et le maximum.

En résumé, une forte variabilité multidécennale des précipitations existe dans les observations au printemps sur la Seine. Beaucoup de modèles présentent une variabilité multidécennale compatible avec les observations au printemps seulement parce qu'ils surestiment la variabilité interannuelle, ce qui n'est pas souhaitable. Si on prend en compte cette possible compensation d'erreur, et comme l'étude du mode de circulation atmosphérique responsable de la variabilité multidécennale des précipitations le montre, le nombre de modèles compatibles avec les observations diminue grandement. Même pour ces modèles compatibles, les observations se situent dans le haut de la distribution. Une interprétation possible de ces résultats est que la période récente est exceptionnelle en termes de variabilité multidécennale dans les observations (et qu'elle n'est donc pas représentative des conditions "moyennes" de variabilité à attendre sur une période de 114 ans). L'autre interprétation possible est que les modèles tendent généralement à sous-estimer la variabilité multidécennale des précipitations et que le niveau de variabilité multidécennale des observations ne peut être atteint que lors de périodes exceptionnelles dans les modèles. La portée relativement modeste de ces conclusions est liée aux fortes incertitudes d'échantillonnage qui existent lorsqu'on cherche à caractériser la variabilité multidécennale sur une période de 114 ans. Afin d'obtenir des conclusions plus fortes, il faudrait pouvoir étudier une période bien plus longue. Malheureusement, les données observationnelles sont très rares avant le XX^{ème} siècle. Dans tous les cas, il reste possible de trouver des modèles compatibles avec les observations en termes de variabilité multidécennale et interannuelle, ce qui nous permettra de sélectionner les modèles que nous utiliserons dans la suite du programme PIREN-Seine.

Conclusion

Les projections climatiques de nouvelle génération confortent les résultats obtenus par le passé pour le bassin de la Seine dans le cas d'un fort accroissement des concentrations en GES : augmentation modérée des précipitations en hiver, forte diminution en été, et réchauffement amplifié en été. Cependant, le réchauffement est plus important dans la nouvelle génération de modèles que précédemment, notamment en été. L'incertitude des changements de précipitations en été diminue, réduisant notamment la probabilité d'avoir des changements quasi-nuls des précipitations en cette saison, favorables en termes d'impacts hydrologiques. Une forte augmentation de la variabilité interannuelle est aussi à attendre pour la température en été et les précipitations en hiver, tandis qu'une diminution est projetée pour la température en hiver. En ce qui concerne les précipitations en été, il n'y a pas d'accord entre les modèles, soulignant l'importance de progresser sur cette question, compte tenu des impacts pratiques potentiels des changements de variabilité pour la gestion des ressources.

Même si de fortes incertitudes d'échantillonnage existent lorsque l'on cherche à évaluer la variabilité multidécennale simulée par les modèles climatiques en raison de la brièveté de la période observationnelle, il est clair que certains modèles représentent bien mieux que d'autres ce type de variabilité. Cela pourra servir de base à la sélection des modèles climatiques à utiliser pour la scénarisation hydro-climatique sur le bassin de la Seine. Nous pourrions aussi conjointement utiliser l'analyse de la réponse des modèles (Fig. 2) pour également sélectionner des modèles représentatifs de l'ensemble complet en termes de changements futurs.

Bibliographie

- Boé, J., and F. Habets: Multi-decadal river flows variations in France (2014). *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 691-708
- Bonnet, R., J. Boé, and F. Habets: Influence of multidecadal variability on high and low flows: the case of the Seine basin (2020). *Hydrology and Earth System Sciences* 24, 1611–1631
- Dayon G., J. Boé, E. Martin and J. Gailhard: Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties (2018). *Comptes Rendus Geoscience*, 350(4), 141-153
- Deser, C., F. Lehner, K.B. Rodgers, T. Ault, T.L. Delworth, P.N. DiNezio, A. Fiore, C. Frankignoul, J.C. Fyfe, D.E. Horton, J.E. Kay, R. Knutti, N.S. Lovenduski, J. Marotzke, K.A. McKinnon, S. Minobe, J. Randerson, J.A. Screen, I.R. Simpson, and M. Ting (2020): Insights from earth system model initial-condition large ensembles and future prospects. *Nature Climate Change* 10, 277–286
- Eyring, V., S. Bony, G.A. Meehl, C.A. Senior, B. Stevens, R.J. Stouffer, and K.E. Taylor (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geoscientific Model Development* 9, 1937–1958
- Harris, I., T.J. Osborn, P. Jones et al. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data* 7, 109.
- Qasmi, S., C. Cassou, and J. Boé: Teleconnection between Atlantic Multidecadal Variability and European temperature: diversity and evaluation of the Coupled Model Intercomparison Project phase 5 models (2017). *Geophysical Research Letters* 44, 11,140–11,149
- Riahi, K., D.P. Van Vuuren, E. Kriegler, J. Edmonds, B.C. O'Neill, S. Fujimori et al. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change* 42, 153-168
- Slivinski, L.C., G.P. Compo, J.S. Whitaker et al. (2019) Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system. *QJR Meteorological Society* 145, 2876– 2908