Régionalisation de projections climatiques globales à l'aide d'une méthode de désagrégation hybride statistico-dynamique.

Julien Boé[1*]
Juliette Deman[1]

[1] CECI, Université de Toulouse, CNRS / CERFACS

[*] boe@cerfacs.fr

Résumé

Dans ce rapport, nous décrivons l'application pratique d'une nouvelle méthode de désagrégation hybride statistico-dynamique, basée sur l'émulation de modèles climatiques régionaux. Cette méthode vise à obtenir, à partir des données à basse résolution des projections climatiques globales, les projections climatiques régionales à haute résolution nécessaires à l'étude des impacts du changement climatique sur le bassin de la Seine.

La méthode de désagrégation hybride statistico-dynamique est utilisée pour désagréger un large ensemble de modèles climatiques globaux de dernière génération, et les résultats sont analysés. La méthode permet de très bien reproduire le signal de grande échelle des projections climatiques globales, sans le modifier, quelle que soit son intensité. La méthode permet de plus de très bien capturer les contrastes régionaux des changements climatiques à petite échelle tels que projetés par les modèles régionaux.

La variabilité climatique interannuelle à multidécennale des projections climatiques globales est également très bien conservée lors de la désagrégation hybride, ce qui est important pour être en mesure de quantifier correctement l'impact de la variabilité climatique interne dans le cadre de l'évaluation des impacts du changement climatique.

Comme la méthode de désagrégation hybride vise à émuler les modèles climatiques régionaux, elle en reproduit également les biais, qui peuvent être importants et qu'il est souvent nécessaire de corriger avant d'utiliser ces données en entrée d'un modèle d'impact. Nous appliquons une méthode évoluée de correction de biais, permettant de corriger l'intégralité de la distribution statistique, aux résultats de la désagrégation hybride et montrons qu'elle permet bien de corriger les biais climatologiques présents, sans modifier artificiellement les changements climatiques projetés, comme c'est souvent le cas pour les méthodes de correction de biais classiques.

Points clefs

- ✓ *Une méthode de désagrégation hybride statistico-dynamique est appliquée pour désagréger un large ensemble de projections climatiques globales de dernière génération.*
- ✓ *Cette méthode permet de très bien capturer à la fois le signal de changement climatique de grande échelle des projections globales et les contrastes spatiaux à fine échelle des projections régionales.*
- ✓ *Une méthode avancée de correction de biais permet de corriger les biais climatologiques des projections désagrégées sans modifier le signal du changement climatique.*

Abstract

In this report, we describe the practical application of a new hybrid statistical-dynamical downscaling method, based on the emulation of regional climate models. This method aims at obtaining, from the low-resolution data of global climate projections, the high-resolution regional climate projections necessary to study the impacts of climate change on the Seine River basin.

The hybrid statistical-dynamical downscaling method is used to downscale a large ensemble of latest generation climate models, and the results are analyzed. The method allows to accurately reproduce the large-scale signal of global climate projections, without modifying it, regardless of its intensity. The method also correctly captures the regional contrasts of small-scale climate changes as projected by regional models.

The inter-annual to multi-decadal climate variability of global climate projections is also very well preserved by the hybrid downscaling method, which is important to be able to correctly assess the impact of internal climate variability in the context of climate change impact assessment.

Since the hybrid downscaling method aims to emulate regional climate models, it also reproduces their biases, which can be large and often need to be corrected before using these data as input to an impact model. We apply an advanced bias correction method allowing the correction of the entire statistical distribution to the results of the hybrid downscaling method and show that it does indeed allow the correction of present-day climatological biases, without artificially modifying projected climate changes, as is often the case for classical bias correction methods.

Key points

- ✓ *A hybrid statistical-dynamical downscaling method is applied to downscale a large ensemble of state-of-the-art global climate projections.*
- ✓ *This method reliably captures both the large-scale climate change signal of global projections and the fine-scale spatial contrasts of regional projections.*
- ✓ *An advanced bias correction method allows to correct the climatological biases of downscaled projections without modifying climate change signals.*

Introduction

Les projections climatiques globales, réalisées à partir de modèles climatiques globaux (*global climate models* en anglais, GCMs) sont indispensables à l'étude des impacts du changement climatique. Néanmoins, leur résolution est encore souvent trop limitée (de l'ordre de 100 à 250 km aujourd'hui selon les modèles) pour une utilisation directe dans ce contexte. Les projections globales doivent être désagrégées (on dit également régionalisées) pour en dériver l'information climatique à haute résolution nécessaire, par exemple pour étudier les impacts du changement climatique sur le bassin de la Seine.

Comme décrit dans un précédent rapport (Boé et Mass 2021) et dans Boé et al. (2022), nous avons développé une nouvelle méthode de désagrégation hybride statistico-dynamique visant à émuler les modèles climatiques régionaux (*regional climate models* en anglais, RCMs). Cette méthode cherche à combiner les avantages des deux grands types d'approches de désagrégation existants : la désagrégation dynamique et la désagrégation statistique. La désagrégation dynamique consiste à utiliser des RCMs à haute résolution sur la zone d'intérêt, forcés aux frontières par des projections climatiques globales à basse résolution. La

désagrégation statistique consiste à construire à partir d'observations (et donc dans le climat présent) un modèle statistique reliant des prédicteurs de grande échelle et la (ou les) variable(s) locale(s) d'intérêt nécessaire(s) à l'étude d'impact, pour l'appliquer ensuite aux projections de GCMs.

Tout comme une méthode de désagrégation statistique, notre approche hybride est simple à mettre en œuvre et a un coût de calcul limité, et tout comme pour la désagrégation dynamique les résultats de notre approche sont supposés prendre en compte tous les mécanismes importants en lien avec le changement climatique, et être robustes car ces résultats reposent *in fine* sur les principes fondamentaux de la physique, tels que représentés dans les RCMs.

D'un point de vue pratique, comme dans le cadre du programme PIREN-Seine, utiliser notre propre méthode nous permet de contrôler totalement l'étape de désagrégation et donc de sélectionner les projections climatiques globales (modèles, scénarios, membres etc.) à régionaliser. Plutôt que de devoir composer avec des ensembles de scénarios régionalisés existants qui ne sont pas forcément adaptés à nos problématiques, nous pouvons ainsi choisir les projections en fonction de nos objectifs particuliers. Nous voulions notamment être en mesure de travailler avec les projections climatiques de dernière génération issues du projet *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6), ayant servi de base au sixième rapport du GIEC paru l'année dernière (IPCC 2021). Ces projections n'ont pas encore été désagrégées avec des RCMs, le portail national français DRIAS proposant encore aujourd'hui des projections régionales basées sur CMIP5. Nous voulions également être en mesure de pouvoir travailler sur des trajectoires hydro-climatiques d'intérêt particulier pour le bassin, ce qui implique de pouvoir choisir les projections à désagréger.

Une évaluation de la méthode de désagrégation est présentée dans un précédent rapport (Boé et Mass 2021), dans une approche dite en modèle parfait, consistant à agréger les projections d'un modèle régional haute résolution sur une grille basse résolution typique des GCMs, puis à le désagréger à haute résolution avec la méthode hybride pour comparer au final le résultat de la désagrégation à la simulation originale à haute résolution. Ces analyses ont démontré la capacité de la méthode à capturer correctement les changements climatiques à petite échelle. Cette méthode peut donc être appliquée en pratique.

Dans ce rapport, après avoir rappelé brièvement le fonctionnement de la méthode et décrit les données utilisées, nous présentons dans un premier temps l'application en cas réel de la méthode de désagrégation hybride statistico-dynamique à des GCMs. De plus, la méthode émulant des RCMs, elle émule également leur biais, qui peuvent être importants (IPCC 2021). Tout comme les projections régionales des RCMs, il est donc nécessaire de corriger les biais de projections obtenues par désagrégation hybride avant de forcer les modèles d'impacts. Dans ce rapport, nous présentons donc dans un second temps l'application et l'évaluation d'une méthode de correction de biais avancée pour les résultats de la désagrégation hybride.

1. Méthode et données

La méthode de désagrégation hybride statistico-dynamique est décrite dans un rapport précédent (Boé et Mass 2021) et dans Boé et al. (2022). Nous en rappelons ici très rapidement le principe. La méthode consiste à établir une relation statistique entre des données de projections climatiques à basse résolution et les données correspondantes de projections à haute résolution sur la zone d'intérêt. Deux modes de désagrégation existent en pratique avec cette méthode : le mode RCM / RCM, dans lequel l'apprentissage se fait entre les données agrégées à basse résolution d'un RCM et ses données à la haute résolution originale, et le mode GCM / RCM, dans lequel l'apprentissage se fait entre un modèle global et un modèle régional forcé par le modèle global (Boé et al. 2022).

Dans un premier temps, nous désagrégeons le modèle climatique global CNRM-CM5, de génération CMIP5 (*Coupled Models Intercomparison Project Phase 5*; Taylor et al. 2012), en utilisant trois RCMs Euro-CORDEX (Jacob et al. 2016 ; Tableau 1), dans les deux modes afin d'en comparer les résultats. Cette analyse nous conduit à choisir ici le mode RCM / RCM. La méthode de désagrégation hybride est donc ensuite appliquée en mode RCM / RCM pour désagréger un grand ensemble de projections climatiques de nouvelle génération issues de CMIP6 (Eyring et al. 2016), en utilisant trois RCMs différents (Tableau 1) pour

l'apprentissage. Les projections climatiques basse résolution historiques et du scénario ssp5-8.5 des treize modèles CMIP6 suivants sont utilisées : ACCESS-CM2, CMCC-ESM2, CNRM-ESM2-1, CanESM5, EC-Earth3-Veg-LR, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, KIOST-ESM, MIROC-ES2L, MPI-ESM1-2-HR, NESM3, NorESM2-MM et TaiESM1.

Les projections climatiques régionales (*i.e.* la combinaison d'un GCM forceur issu du projet CMIP5 et d'un RCM) utilisées dans cette étude pour l'apprentissage, issues du projet Euro-CORDEX (Jacob et al. 2016) sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Projections climatiques régionales du projet Euro-CORDEX (Jacob et al. 2016) utilisées dans cette étude. Lignes : modèle climatique régional. Colonnes : modèle climatique global CMIP5 forçant le modèle climatique régional. Le scénario RCP8.5 est utilisé. La résolution approximative du modèle climatique est donnée entre parenthèses sous son nom sur la première ligne. La résolution des modèles régionaux est d'environ 12km. Les croix (X) indiquent les simulations régionales utilisées pour la désagrégation de CNRM-CM5 en mode GCM / RCM et RCM / RCM, tandis que les zéros (0) indiquent les simulations utilisées pour désagréger l'ensemble de projections climatiques CMIP6.

		GCM			
		CNRM-CM5 (150 km)	EC-EARTH (120 km)	HadGEM2-ES (135 km)	NorESM1-M (203 km)
RCM	CNRM ALADIN63	X 0			
	KNMI RACMO22E	0			
	CLMcom CCLM4-8-17		0		
	DMI HIRAM5			X	
	SMHI RCA4				X

La méthode de correction de biais ensuite appliquée aux données désagrégées est la « *scaled distribution mapping* » de Switanek et al. (2017). Il s'agit d'une méthode de type correction quantile-quantile qui corrige l'intégralité de la distribution, dont le principe est, grossièrement, de calculer une différence « futur moins présent » pour chaque quantile du modèle pour le superposer au quantile présent observé correspondant. Elle corrige également explicitement la fréquence des précipitations nulles (ou très faibles). Cette méthode vise à éviter les modifications injustifiées des signaux de changement climatique que les méthodes de correction de biais introduisent souvent. L'étude d'intercomparaison de méthodes de correction de biais de Casanueva et al. (2020) montre qu'il s'agit d'une des méthodes de correction de biais les plus performantes dans ce contexte. Pour l'application de la méthode de correction de biais, les données de l'analyse SAFRAN (Quintana-Segui et al. 2008) sont utilisées comme référence observationnelle.

Mode GCM / RCM versus RCM / RCM

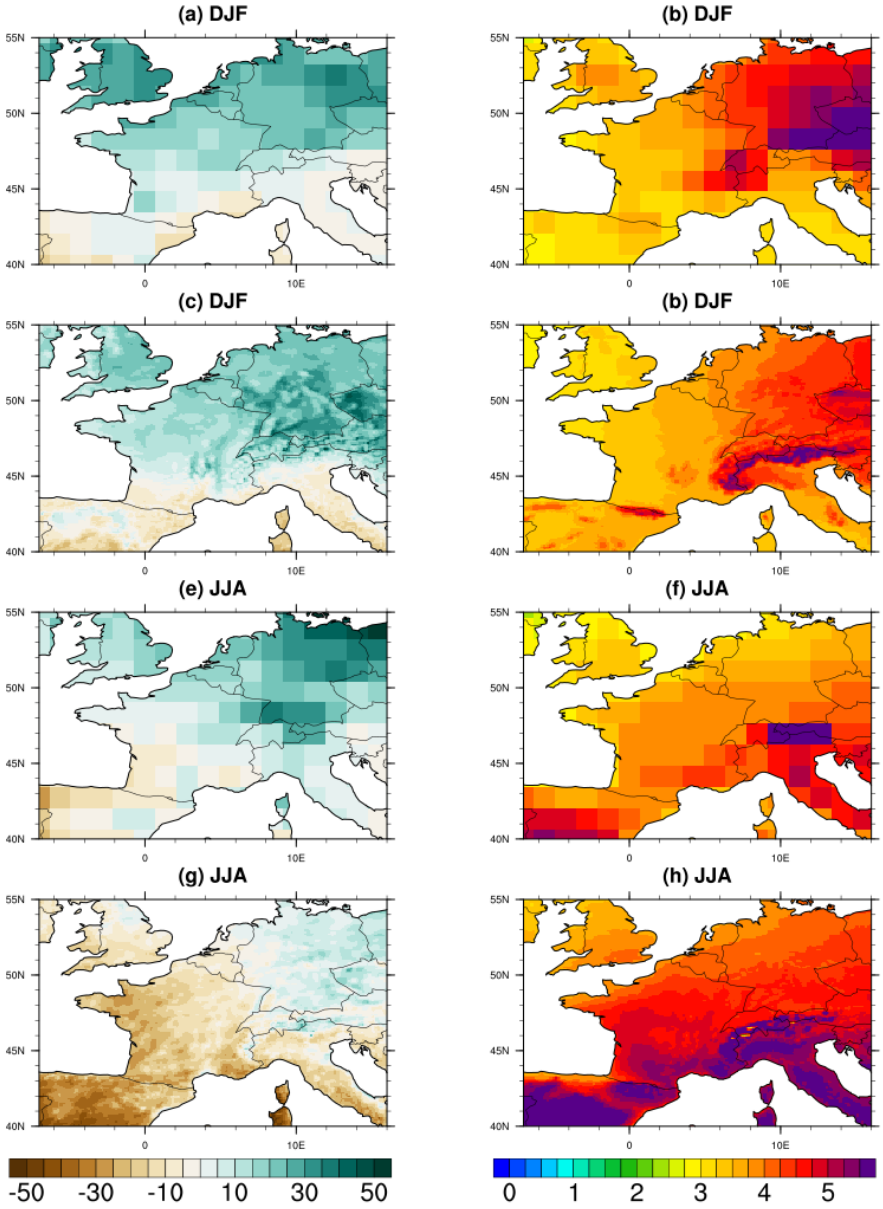

Figure 1 : Changement de précipitation (en relatif, %) et de température (K) (2070/2099 – 1971/2000), (a,b,e,f) pour le GCM à désagréger (CNRM-CM5) et (c, d, g, h) pour la moyenne d'ensemble des trois RCMs Euro-CORDEX RCMs utilisés pour l'apprentissage de la méthode hybride en (a, b, c, d) hiver (DJF) et (e, f, g, h) été (JJA) pour (a, c, e, g) les précipitations et (b, d, f, h) la température

Grâce à l'évaluation en modèle parfait décrite dans Boé et Mass (2021) et dans Boé et al. (2022), les performances de la méthode de désagrégation hybride ont été démontrées. Cela permet d'envisager son application pour désagréger des projections climatiques en situation réelle, comme dans le cadre du programme PIREN-Seine.

Il existe deux modes de désagrégation en situation réelle (Boé et al. 2022) : le mode RCM / RCM et le mode GCM / RCM. Nous caractérisons dans un premier temps l'impact du mode de désagrégation sur les résultats des projections désagrégées. Pour ce faire, un GCM issu du projet CMIP5, CNRM-CMR5, est désagrégé en mode RCM / RCM et GCM / RCM, sur la base de trois simulations régionales Euro-CORDEX : ALADIN63 forcé par CNRM-CM5, HIRAM5 forcé par HadGEM2-ES et RCA4 forcé par NorESM1-M (Tableau 1). Ces trois paires GCM / RCM ont été sélectionnées pour cette analyse parce qu'elles présentent différents niveaux d'incohérence en ce qui concerne les signaux de changement climatique à grande échelle,

d'après Boé et al. (2020). En été, ALADIN63 projette un réchauffement légèrement plus important (0,5 K) que son modèle forceur CNRM-CM5, tandis que HIRAM5 projette un réchauffement beaucoup plus faible (-4,5 K) que HadGEM2-ES. La troisième paire (NorESM1-M / RCA4) présente un comportement intermédiaire, avec un réchauffement modérément moins sévère (-1 K) projeté par le RCM comparé au GCM.

Tout d'abord, les changements futurs projetés par CNRM-CM5 et les trois simulations climatiques régionales utilisées pour la désagrégation hybride sont caractérisés afin de faciliter l'interprétation ultérieure des résultats. CNRM-CM5 est classiquement caractérisé par une augmentation des précipitations sur le nord de l'Europe de l'Ouest en hiver, incluant une grande partie de la France, et un réchauffement plus fort dans l'est du domaine (Figure 1). La réponse de CNRM-CM5 est beaucoup moins habituelle en été, avec une augmentation des précipitations sur une large partie de l'Europe, incluant une part importante de la France et de l'Italie, alors que dans l'ensemble complet CMIP5, les précipitations y diminuent (Terray et Boé 2013). En outre, le réchauffement estival est relativement faible par rapport à celui projeté par l'ensemble des modèles CMIP5 (Terray et Boé 2013).

En moyenne d'ensemble, les changements projetés par les trois RCMs sont assez similaires à grande échelle à ceux de CNRM-CM5 en hiver, mais largement différents en été. Ils sont en effet plus proches de ce qui est généralement attendu en été, avec une forte amplification du réchauffement et une diminution des précipitations sur une grande partie de la zone (Figure 1). Le réchauffement en été est plus important dans ces simulations régionales que dans CNRM-CM5, ce qui est l'inverse de ce que l'on observe habituellement. En effet, les RCMs Euro-CORDEX se réchauffent généralement largement moins en été que les GCMs CMIP5 (Boé et al. 2020).

À petite échelle, certains signaux absents dans CNRM-CM5 sont visibles dans les RCMs. Ils sont notamment liés à l'orographie, avec une amplification du réchauffement sur les Pyrénées et les Alpes, très probablement due à la rétroaction neige-albédo en hiver. Un GCM ne peut pas capturer correctement ces mécanismes et ces changements en raison de la mauvaise représentation de l'orographie à basse résolution.

Les changements futurs de température obtenus après désagrégation avec les modes GCM / RCM et RCM / RCM sont maintenant analysés (Figure 2 pour la température et Figure 3 pour les précipitations). Dans les deux modes, on note une forte amplification du changement de température sur les Alpes et les Pyrénées en hiver, qui n'existe pas dans le GCM original, ainsi que, dans une moindre mesure, en été. Cette amplification existe également dans les RCMs (voir Figure 1 pour trois d'entre eux et Coppola et al. (2021) pour un ensemble Euro-CORDEX plus complet). Ce résultat illustre bien l'intérêt de la méthode de désagrégation hybride, qui permet d'obtenir des signaux de changement climatique à petite échelle, typiquement projetés par les RCMs à haute résolution, à partir des données de GCMs à basse résolution où ils n'existent pas.

Les modes RCM / RCM et GCM / RCM donnent des résultats similaires en hiver, avec toutefois un réchauffement légèrement plus important sur les Alpes avec le mode GCM / RCM (Figure 2). De grandes différences sont par contre notées en été, avec généralement un réchauffement beaucoup plus important (près de 1°C) en mode RCM / RCM qu'en mode GCM / RCM. La dispersion des changements projetés due au choix du RCM pour l'apprentissage est également très différente entre les modes GCM / RCM et RCM / RCM. L'écart-type est ainsi bien plus important avec le mode GCM / RCM, surtout en été.

À grande échelle, on s'attend par construction à ce que les résultats de la désagrégation en mode RCM / RCM soient très semblables à ceux du GCM, ce qui n'est pas le cas du mode GCM / RCM, car un RCM peut transformer le signal de son GCM forceur même à grande échelle, notamment en été (Boé et al., 2020). Cela explique pourquoi les signaux de changement climatique à grande échelle après désagrégation sont différents de ceux du GCM avec le mode GCM / RCM (comparer la Figure 2g et la Figure 1f). De plus, la façon dont le signal de changement climatique est modifié par les RCMs par rapport aux GCMs forceurs dépend également beaucoup du couple GCM / RCM (Boé et al. 2020). Cela explique pourquoi la dispersion des changements désagrégés associée au choix de la simulation régionale utilisée pour l'émulation peut être très importante à grande échelle dans le mode GCM / RCM, comme on le voit en été (Fig. 2h).

Les mêmes conclusions générales s'appliquent aux changements de précipitations (Figure 3), bien que les différences entre les modes GCM / RCM et RCM / RCM discutées ci-dessus pour la température soient souvent plus subtiles. À grande échelle, les changements de précipitations issus de l'émulation sont plus

semblables à ceux du GCM à désagréger avec le mode RCM / RCM qu'avec le mode GCM / RCM en été. Des différences intermodèles beaucoup plus importantes à grande échelle existent également avec le mode GCM / RCM.

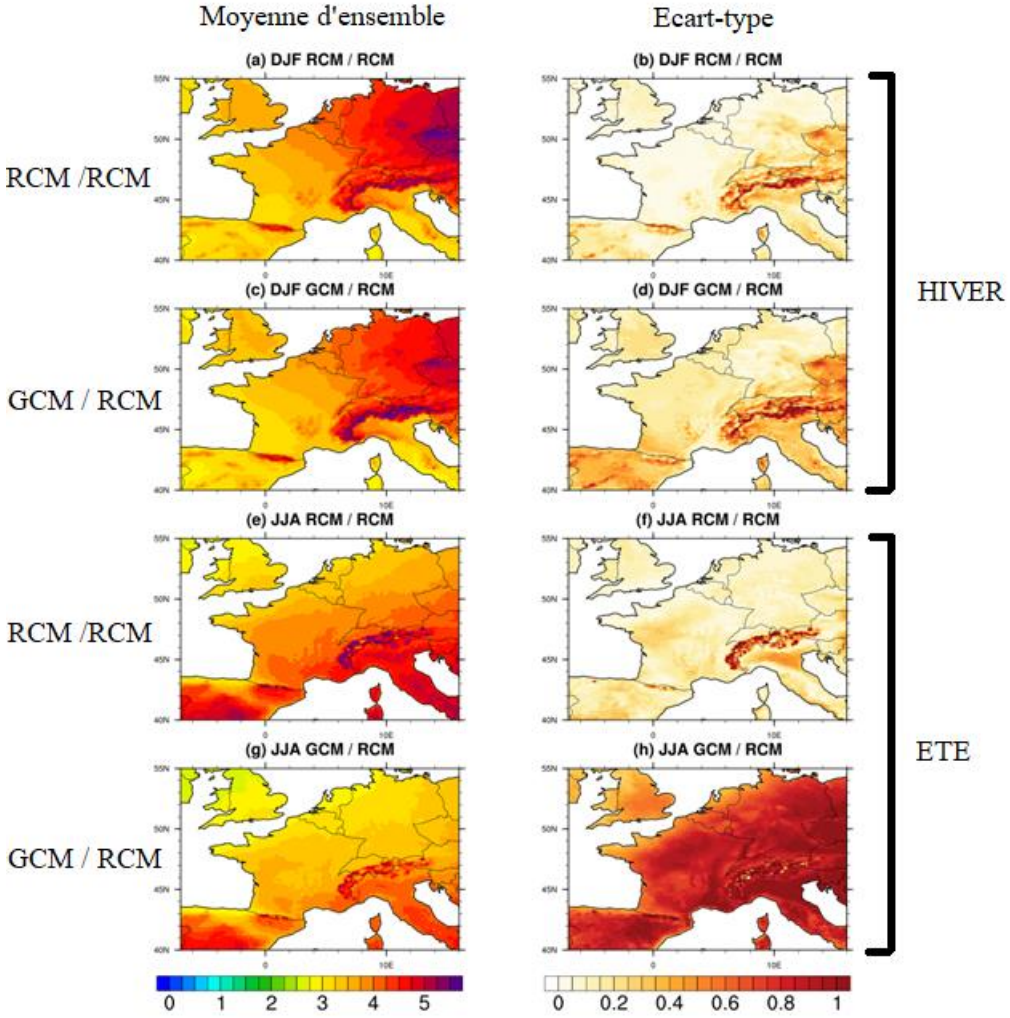

Figure 2 : Changements de température désagrégée (K, 2070/2099 -1971/2000) en (a, b, c, d) hiver et (e, f, g, h) été pour CNRM-CMR5 avec la méthode de désagrégation hybride avec (a, b, e, f) le mode RCM / RCM et (c, d, g, h) le mode GCM / RCM, en utilisant trois projections régionales pour l'apprentissage (CNRM-CM5 / ALADIN63 ; HadGEM2-ES / HIRAM5 ; NorESM1-M / RCA4. Voir Tableau 1). (a, c, e, g) Moyenne d'ensemble; (b, d, f, h) Ecart-type d'ensemble

Compte tenu de ces résultats, nous nous focalisons pour la suite de ce travail sur la désagrégation hybride en mode RCM / RCM :

- ✓ Le mode GCM / RCM tend à modifier le signal de grande échelle du GCM à désagréger, et en l'état actuel de la recherche on peut penser que cette modification se fait pour de mauvaises raisons.
- ✓ La large dispersion due au choix de la simulation régionale dans le mode GCM / RCM même à grande échelle obligerait à utiliser un large ensemble de simulations régionales issues de différents couples GCM / RCM pour chaque GCM à désagréger ce qui compliquerait l'application de la méthode en pratique pour une étude des impacts du changement climatique.

A noter qu'une dispersion existe également dans le mode RCM / RCM, mais elle est limitée aux petites échelles et notamment aux zones de relief. Elle ne joue ainsi quasiment pas sur le bassin de la Seine.

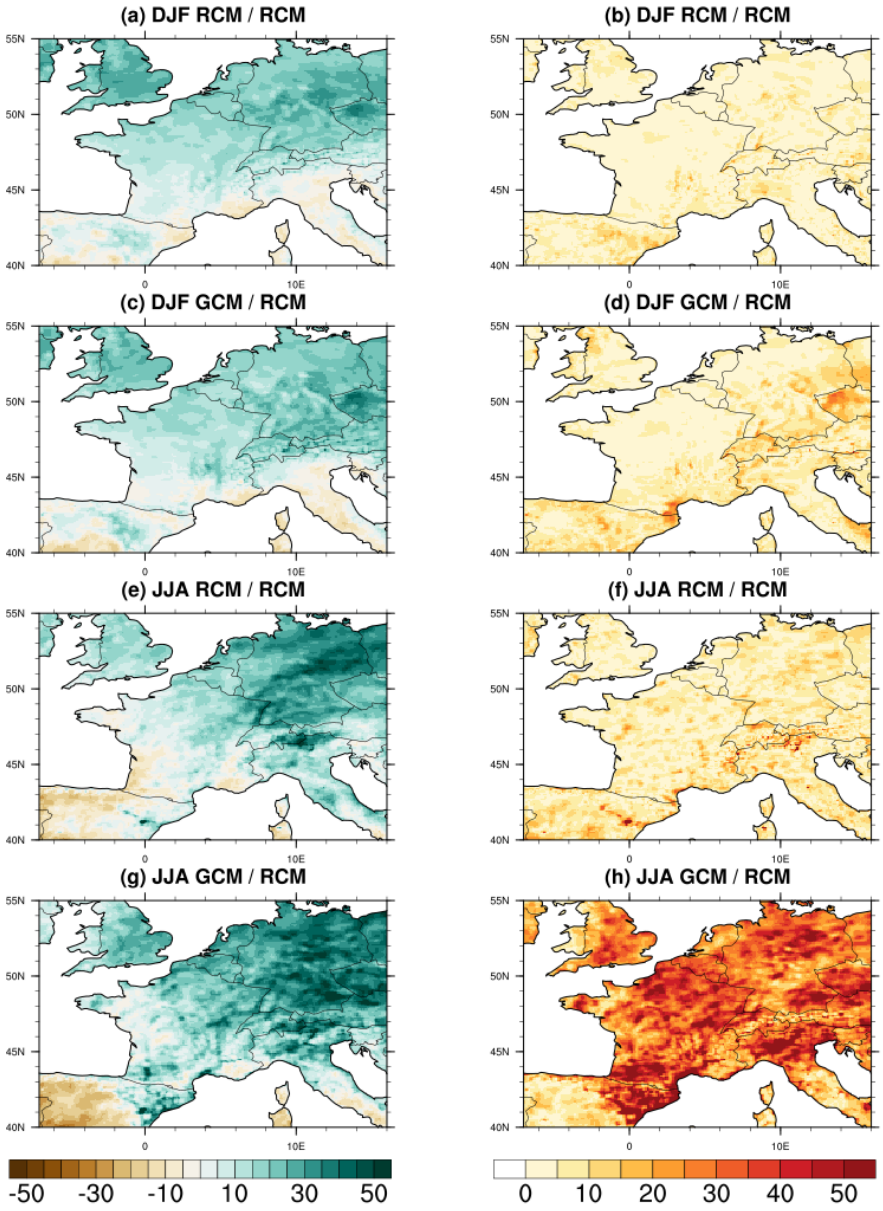

Figure 3 : Changements relatifs de précipitations désagrégées (%, 2070/2099 -1971/2000) en (a, b, c, d) hiver et (e, f, g, h) été pour CNRM-CMR5 avec la méthode de désagrégation hybride avec (a, b, e, f) le mode RCM / RCM et (c, d, g, h) le mode GCM / RCM, en utilisant trois projections régionales pour l'apprentissage (CNRM-CM5 / ALADIN63; HadGEM2-ES / HIRAM5; NorESM1-M / RCA4. Voir Tableau 1). (a, c, e, g) Moyenne d'ensemble; (b, d, f, h) Ecart-type d'ensemble

2. Application de la désagrégation hybride à des projections climatiques CMIP6

Les résultats de la section précédente nous conduisent à favoriser dans le cadre du projet PIREN-Seine le mode de désagrégation hybride RCM / RCM. Nous l'appliquons ici pour désagréger un large ensemble de projections climatiques de dernière génération issues du projet CMIP6 (Eyring et al. 2016), afin de pouvoir évaluer comment l'approche fonctionne pour une large gamme de signaux climatiques, issus de différents GCMs.

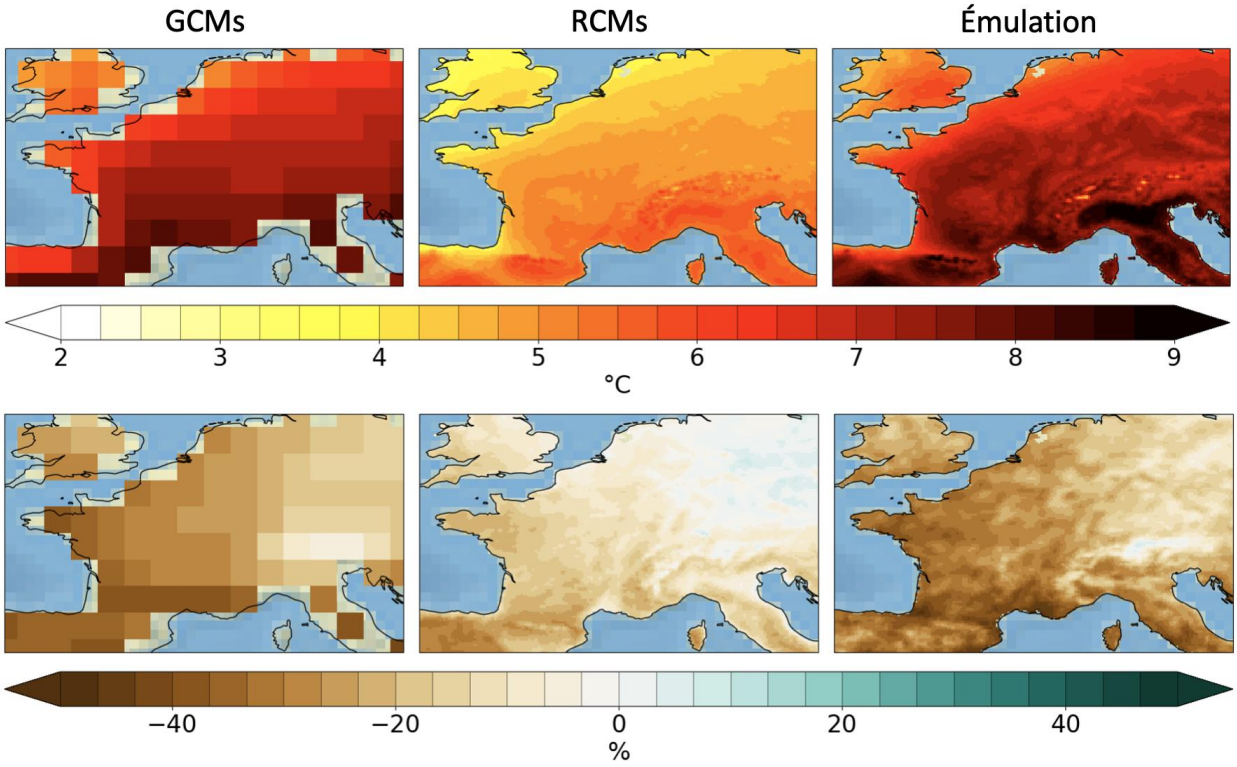

Figure 4 : (1ère ligne) Changement de température (°C) et (2ème ligne) changement relatif de précipitations (%) issus (GCMs, 1ère colonne) directement d'un ensemble de modèles CMIP6, (2ème colonne) d'un ensemble de 11 modèles climatiques régionaux Euro-CORDEX et (3ème colonne) de l'ensemble des modèles CMIP6 désagrégés avec la méthode hybride et en utilisant la simulation régionale CNRM-CM5 / ALADIN63 pour l'apprentissage.

Tout d'abord, les projections des GCMs bruts, des GCMs désagrégés avec la méthode hybride et d'un ensemble de RCMs sont comparés (Figure 4). Les GCMs ont des signaux de grande échelle plus sévères que les RCMs actuels Euro-CORDEX, avec en été un réchauffement bien plus marqué et une diminution des précipitations plus forte. C'était le cas pour les GCMs CMIP5 (Boé et al., 2020), et c'est toujours le cas pour les GCMs CMIP6 qui se réchauffent eux-mêmes plus que les GCMs CMIP5 (e.g. Boé 2020, Ribes et al. 2022). La désagrégation hybride permet de bien reproduire le signal de grande échelle des GCMs et mène donc à un réchauffement plus marqué que celui des RCMs. Par contre, la désagrégation hybride permet aussi de reproduire des contrastes spatiaux de petite échelle visibles dans les RCMs, comme ici un réchauffement plus marqué dans les Pyrénées, la vallée du Rhône et le sud des Alpes en Italie (Figure 4).

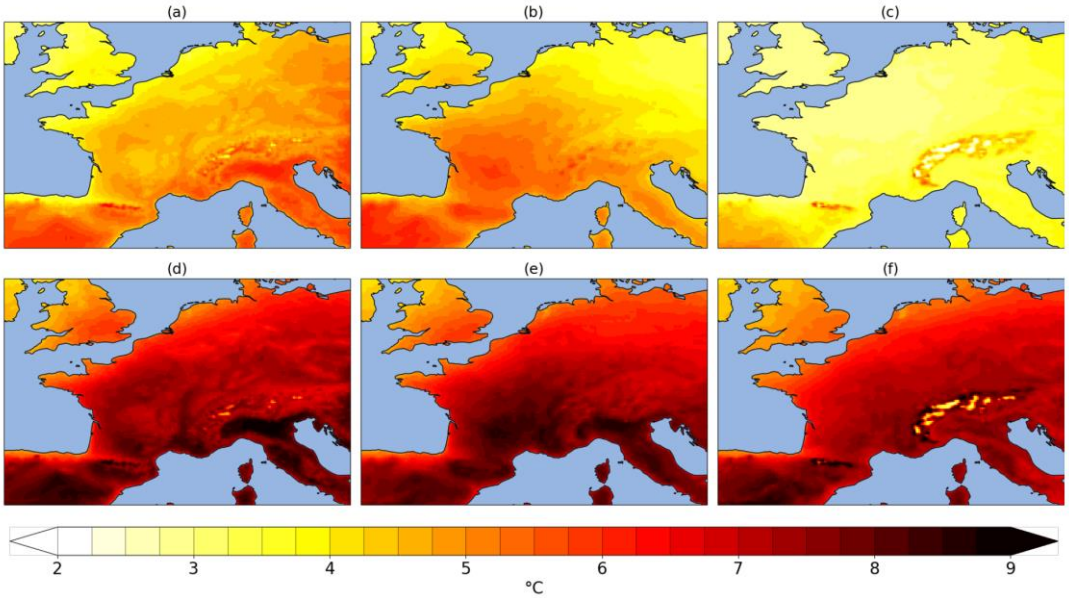

Figure 5 : Changement de température (°C) en été entre 2071-2100 et 1961-1990 projetés par les RCMS (a) CNRM-CM5 / ALADIN63, (b) EC-EARTH / CCLM4 et (c) CNRM-CM5 / RACMO22E pour le scénario RCP8.5 et moyenne multimodèle de la désagrégation hybride de l'ensemble des 13 GCMs CMIP6 (section 1) pour le scénario ssp5-8.5 en utilisant pour l'apprentissage (d) CNRM-CM5 / ALADIN63, (e) EC-EARTH / CCLM4 et (f) CNRM-CM5 / RACMO22E

Pour l'analyse précédente, un seul RCM est utilisé pour l'apprentissage de la méthode de désagrégation hybride. La Figure 5 illustre maintenant l'impact du choix du RCM utilisé pour l'apprentissage sur les changements désagrégés. Sur la première ligne sont montrés les changements de température projetés par trois RCMs différents. Sur la deuxième ligne sont montrés la moyenne des changements obtenus après la désagrégation hybride du même large ensemble de GCMs CMIP6 en utilisant le RCM de la ligne supérieure pour l'apprentissage. Les changements à grande échelle des données désagrégées sont globalement similaires, avec un niveau très proche de réchauffement moyen, indépendamment de celui du RCM utilisé pour l'apprentissage, ce qui est cohérent avec les résultats discutés précédemment. En revanche, des différences dans les contrastes spatiaux des changements à petite échelle sont visibles dans les données désagrégées, et ces contrastes sont hérités du RCM utilisé pour l'apprentissage. On retrouve par exemple les variations spatiales très spécifiques des changements de température sur les Alpes de CNRM-CM5 / RACMO22E (Figure 5 c et f), un réchauffement un peu moindre sur le Massif central, mais amplifié dans la vallée du Rhône avec CNRM-CM5 / ALADIN63 (Figure 5 a et d), et un réchauffement plus marqué sur le Massif central pour EC-EARTH / CCLM4 (Figure 5 b et e).

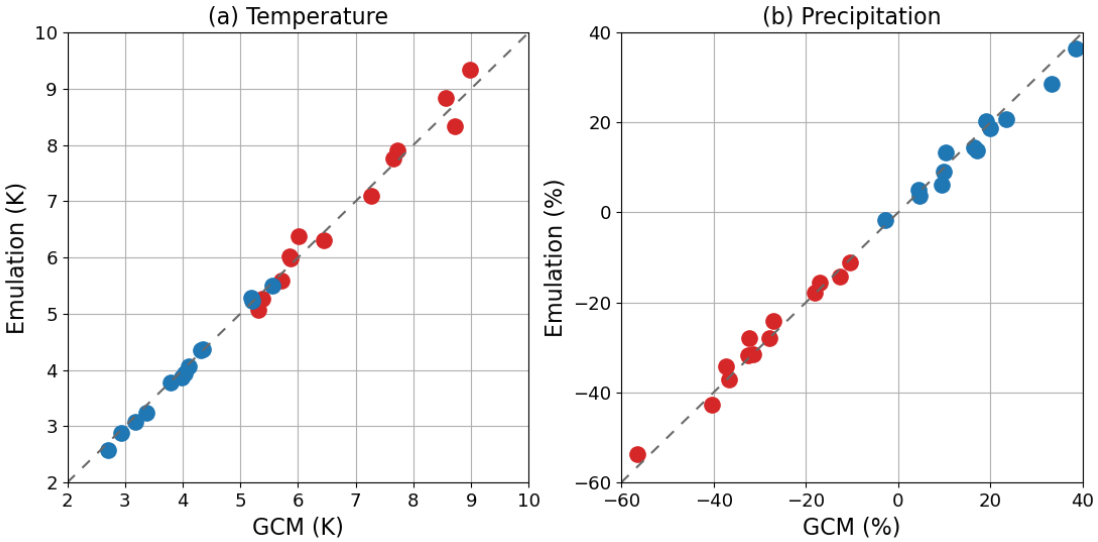

Figure 6 : (a) Changement de température (K) et (b) changement relatif de précipitations (%) entre 2070/2099 et 1971/2000 en (rouge) été et (bleu) hiver pour le scénario SSP5-8.5 en moyenne sur la France (points terre dans la boite ayant pour limites 42°N - 51°N ; -5°E - 9°E), (abscisse) tels que projetés directement par 13 GCMs CMIP6 versus (ordonnée) résultat de la désagrégation hybride en utilisant la simulation régionale CNRM-CM5 / ALADIN63 pour l'apprentissage.

Afin de vérifier plus en détail dans quelle mesure la méthode de désagrégation hybride permet de capturer le signal de changement climatique du GCM à grande échelle, la Figure 6 présente les changements climatiques en moyenne sur la France tels que projetés par les GCMs et tels qu'obtenus par désagrégation hybride, pour les températures et les précipitations en été et hiver. On vérifie que les changements de grande échelle des modèles globaux sont très bien capturés par la méthode d'émulation, qu'ils soient très forts ou plus modérés, aussi bien en été qu'en hiver. La méthode de désagrégation hybride permet donc de très bien reproduire la dispersion des changements projetés par les GCMs, et donc l'incertitude associée, ce qui est critique pour une étude des impacts du changement climatique.

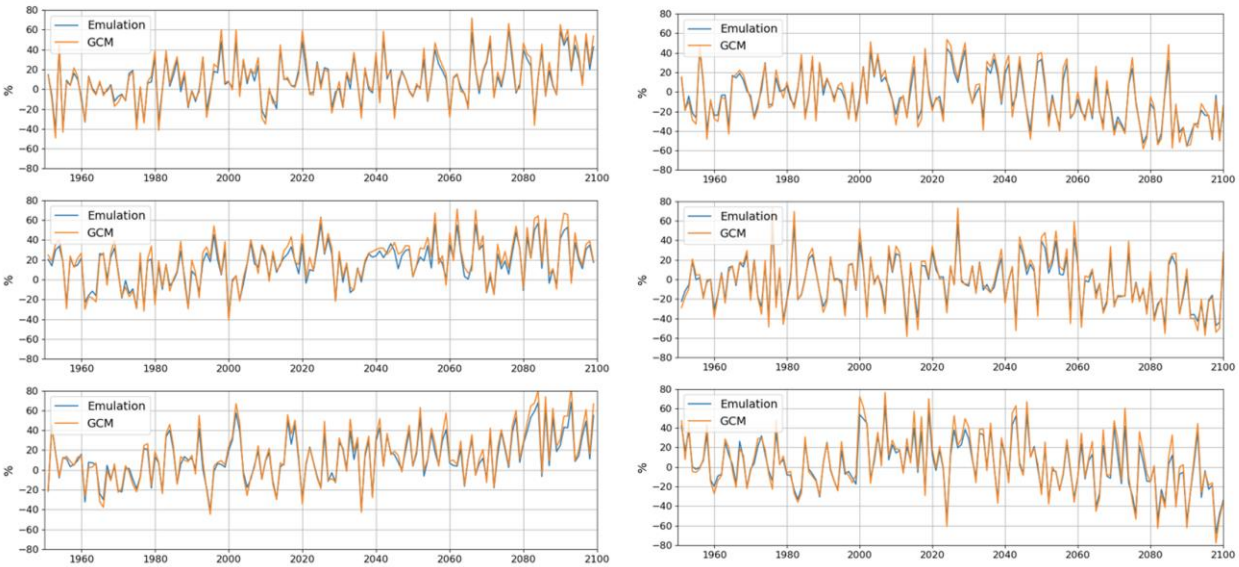

Figure 7 : Anomalie relative des précipitations (référence: 1961-1990) sur la France en (gauche) hiver et (droite) été, pour trois membres de EC-Earth3-Veg pour le scénario ssp5-8.5 (simulations réalisées dans CMIP6) et après désagrégation hybride en utilisant la simulation régionale CNRM-CM5 / ALADIN63 pour l'apprentissage.

La Figure 7 montre que la méthode de désagrégation hybride est également capable de très bien capturer la variabilité interannuelle et décennale de différents membres d'un même modèle (i.e. projections climatiques différant uniquement par les conditions initiales). Elle peut donc permettre d'obtenir des ensembles de membres à haute résolution pour explorer l'impact de la variabilité interne sur le cycle hydrologique dans le contexte du changement climatique, ce qui peut être une composante importante d'une étude d'impact.

3. Correction de biais

La méthode de désagrégation hybride vise à émuler les RCMs et elle en reproduit donc également les biais, qui peuvent être importants (IPCC 2021). Comme pour les études d'impact du changement climatique basées sur les résultats de RCMs, une étape supplémentaire de correction des biais des projections obtenues par désagrégation hybride est donc nécessaire avant de forcer un modèle d'impact, par exemple un modèle hydrologique.

La Figure 8 montre les biais absolus moyens sur la France obtenus après désagrégation hybride en moyenne pour l'ensemble des modèles CMIP6 désagrégés en utilisant la simulation régionale CNRM-CM5 / ALADIN63 pour l'apprentissage, ainsi qu'après l'étape supplémentaire de correction de biais en utilisant la méthode présentée en partie 1. Comme attendu, des biais importants existent pour les deux variables d'intérêt après désagrégation hybride. La méthode de correction de biais permet bien d'éliminer ces biais quasi parfaitement, comme attendu.

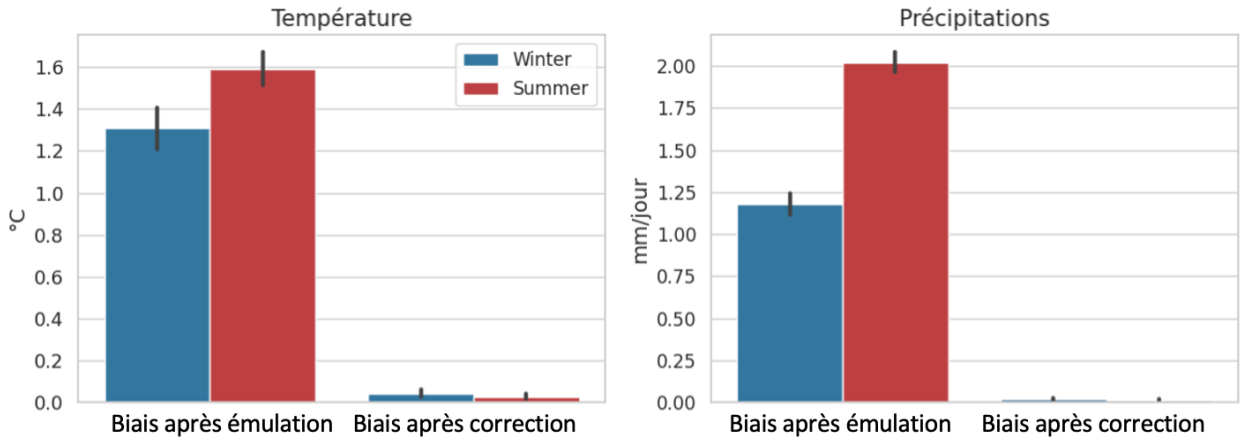

Figure 8 : Biais climatologique absolu annuel moyen sur la France pour la période 1961-1990 pour la température et les précipitations, en moyenne d'ensemble pour la désagrégation de 13 modèles CMIP6. La référence observationnelle est l'analyse SAFRAN.

Les résultats de ce type d'évaluation sont en fait prévisibles : par construction, les méthodes de correction de biais sont supposées éliminer les biais et il est donc tout à fait normal d'obtenir ces résultats. En revanche, la littérature montre que les méthodes de correction de biais ont également souvent tendance à modifier le signal futur projeté du changement climatique de façon artificielle, ce qui est problématique.

Nous avons ainsi choisi une méthode de correction de biais qui a justement été développée dans l'optique de préserver correctement le signal du changement climatique du modèle dont on corrige les biais climatologiques présents (Switanek et al. 2017, voir partie 1) et qui s'avère effectivement très performante

dans ce contexte (Casanueva et al. 2020). Il demeure néanmoins nécessaire de vérifier que c'est bien le cas pour nos données issues de la désagrégation hybride, sur la France, et pour nos variables d'intérêt.

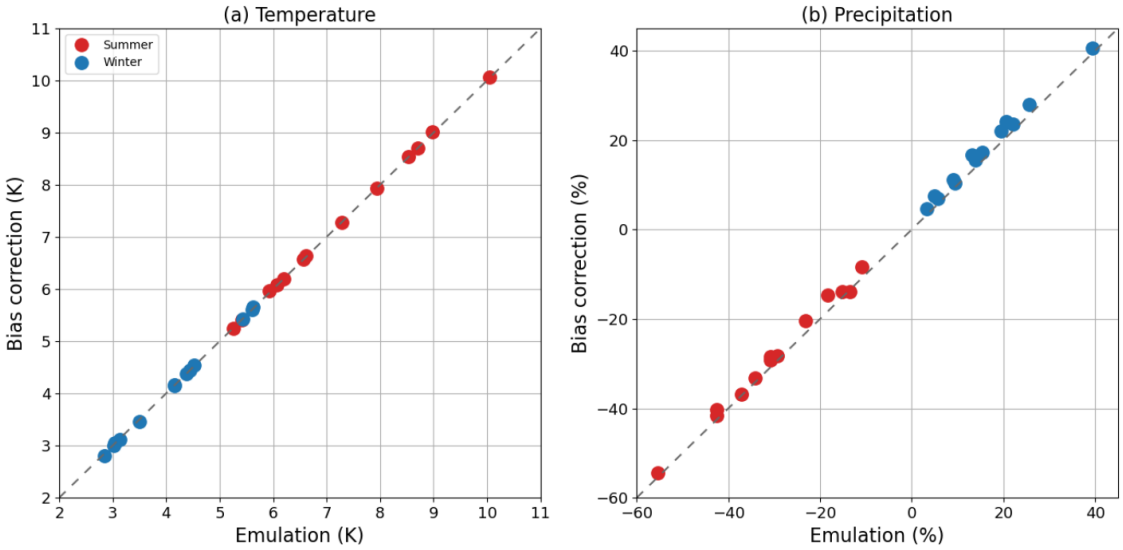

Figure 9: Changements futurs (2071-2100 - 1961-1990) en moyenne sur la France obtenus (abscisse) par désagrégation hybride (émulation) et (ordonnée) après l'étape supplémentaire de correction de biais. Chaque point correspond à un modèle climatique global CMIP6 en (rouge) été et (bleu) hiver pour (a) la température (K) et (b) les précipitations (le changement relatif est montré dans ce cas, %).

La Figure 9 compare les changements obtenus en moyenne sur la France avant et après correction de biais pour la température et les précipitations, en hiver et en été. Pour les deux variables, les changements futurs avant et après correction sont extrêmement proches. La méthode de correction de biais permet donc bien de corriger les biais climatologiques présents, tout en conservant le signal projeté du changement climatique et peut donc être appliquée en toute confiance dans l'étude des impacts du changement climatique sur le bassin de la Seine.

Conclusion

Dans ce rapport, nous décrivons l'application pratique d'une nouvelle méthode de désagrégation hybride statistico-dynamique (Boé et Mass 2021, Boé et al. 2022), visant à émuler les résultats de modèles climatiques régionaux, pour étudier les impacts du changement climatique.

Deux modes de désagrégation existent en pratique avec cette méthode : le mode RCM / RCM, dans lequel l'apprentissage se faite entre les données agrégées à basse résolution d'un RCM et ses données à haute résolution, et le mode GCM / RCM, dans lequel l'apprentissage se fait entre un modèle global et un modèle régional forcé par le modèle global. Nous montrons tout d'abord que le mode RCM / RCM semble préférable pour l'utilisation souhaitée de la méthode dans le cadre du programme PIREN-Seine. Le mode GCM / RCM conduit en effet à de fortes différences entre les changements de grande échelle du modèle à désagréger et les résultats désagrégés, qui s'expliquent probablement par des problèmes dans certains RCMs (Boé et al. 2020). De plus, il existe une très forte dispersion des résultats de la désagrégation en fonction du choix du RCM utilisé pour l'apprentissage avec le mode GCM / RCM même à grande échelle, ce qui compliquerait son application pratique.

Nous montrons ensuite que la méthode de désagrégation hybride appliquée dans le mode RCM / RCM permet de très bien conserver le signal de grande échelle du GCM, quelle que soit l'intensité des changements

projetés. La méthode permet de plus de bien capturer les contrastes spatiaux à fine échelle issus du modèle climatique régional utilisé pour l'apprentissage. La variabilité interne basse fréquence du modèle climatique global est également très bien reproduite, permettant par exemple d'utiliser la méthode de désagrégation pour étudier l'impact de la variabilité interne basse-fréquence sur l'hydrologie.

Comme la méthode reproduit par construction les biais des RCMs utilisés pour l'apprentissage, qui sont souvent importants, nous mettons en œuvre, après la désagrégation, et évaluons une méthode de correction de biais nommée *Scaled Distribution Mapping* décrite dans Switanek et al. (2017). Nous montrons que la méthode de correction de biais permet de très bien corriger les biais climatologiques présents, ce qui est attendu, mais qu'elle préserve également très bien le signal de changement climatique, ce qui n'est souvent pas le cas avec les méthodes de correction de biais et peut poser un problème important.

L'approche de désagrégation hybride, associée à la méthode de correction de biais par Scaled Distribution Mapping, pourra donc être mise en œuvre pour désagréger les projections climatiques nécessaires dans le cadre du projet PIREN-Seine. Les projections globales pourront être choisies selon des critères propres au PIREN-Seine, en s'appuyant notamment sur les travaux d'analyse des résultats des projections CMIP6 sur la Seine réalisés précédemment (Boé 2020).

Bibliographie

Boé, J, Somot S, Corre L, Nabat P (2020) Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models: causes and consequences. Clim Dyn 54:2981–3002. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05153-1

Boé J. (2020) Résultats des nouvelles projections climatiques sur le bassin de la Seine et évaluation de leur capacité à simuler la variabilité basse-fréquence. Rapport PIREN-Seine 2020, phase 8. https://www.piren-seine.fr/rapports/rapports_annuels/rapports_dactivite_2020/resultats_des_nouvelles_projections_climatiques

Boé, J., A Mass (2021) Méthode de désagrégation hybride statistico-dynamique pour les scénarios climatiques sur le bassin de la Seine. Rapport PIREN-Seine 2021, phase 8. https://www.piren-seine.fr/sites/default/files/piren_documents/rapports_dactivite_2021/a1b2_boe_piren_2021_vf.pdf

Boé, J., A. Mass, J. Deman (2022) A simple hybrid statistical-dynamical downscaling method for emulating regional climate models over Western Europe. Evaluation, application, and role of added value? Actuellement en revision dans climate dynamics. Preprint disponible à https://www.researchsquare.com/article/rs-1585025/v1

Casanueva, A, Herrera, S, Iturbide, M, et al. (2020) Testing bias adjustment methods for regional climate change applications under observational uncertainty and resolution mismatch. Atmos Sci Lett.; 21: 21:e978. https://doi.org/10.1002/asl.978

Coppola E, Nogherotto R, Ciarlo' JM, Giorgi F, van Meijgaard E, Kadygrov N, Iles C, Corre L, Sandstad M, Somot S, et al. (2021) Assessment of the european climate projections as simulated by the large euro-cordex regional and global climate model ensemble. J Geophys Res: Atmospheres 126:e2019JD032356.

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

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [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, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

Jacob, D., J. Petersen, B. Eggert et al. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Regional Environmental Change 14, 563–578.

Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., & Morel, S. (2008). Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47(1), 92–107.

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, Earth Syst. Dynam., 13, 1397–1415, https://doi.org/10.5194/esd-13-1397-2022, 2022.

Switanek MB, Troch PA, Castro CL, Leuprecht A, Chang HI, Mukherjee R, Demaria EMC (2017) Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 2649–2666, https://doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017

Taylor, K.E., R.J. Stouffer, and G.A. Meehl (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. Bulletin of American Meteorological Society 93, 485–498

Terray L, Boé J (2013) Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties, Comptes Rendus Geoscience, 345 (3):136-149, doi:10.1016/j.crte.2013.02.003