

Méthode de désagrégation hybride statistico-dynamique pour les scénarios climatiques sur le bassin de la Seine

Julien Boé¹*, Alexandre Mass¹

¹ CECI, Université de Toulouse, CNRS / CERFACS

* boe@cerfacs.fr

Résumé

Dans ce rapport, une nouvelle méthode de désagrégation, devant permettre d'obtenir des scénarios climatiques à haute résolution sur le bassin de la Seine à partir des projections climatiques globales à basse résolution, est présentée. Il s'agit d'une approche hybride statistico-dynamique, qui vise à émuler un modèle climatique régional à l'aide d'une approche d'apprentissage automatique.

Cette méthode vise à combiner les points forts de la désagrégation dynamique par modélisation climatique régionale (prise en compte à un niveau fondamental de tous les mécanismes pouvant jouer un rôle dans le changement climatique et donc robustesse des résultats) et de la désagrégation statistique (faible coût de calcul, facilité de mise en œuvre) tout en minimisant leurs points faibles respectifs. Elle utilise une approche par analogues construits.

Une méthodologie de type « modèle parfait » ou « pseudo-réalité », utilisant un large ensemble de projections climatiques régionales, est mise en œuvre afin d'évaluer cette nouvelle méthode de désagrégation et en particulier de s'assurer de sa capacité à capturer correctement les signaux du changement climatique à fine échelle, afin de pouvoir l'utiliser pour étudier les impacts hydrologiques du changement climatique sur un bassin comme celui de la Seine.

La nouvelle méthode de désagrégation hybride s'avère très performante, même appliquée à des modèles climatiques globaux à très basse résolution. Ses performances sont en outre largement meilleures en ce qui concerne les changements futurs qu'une méthode de désagrégation statistique classique.

Points clefs

- ✓ *Une nouvelle méthode de désagrégation hybride statistico-dynamique visant à émuler un modèle climatique régional par apprentissage automatique est présentée*
- ✓ *Une stratégie d'évaluation dite en « modèle parfait » permettant de s'assurer des performances de la méthode dans le contexte de l'étude des impacts du changement climatique est mise en œuvre*
- ✓ *La nouvelle méthode se montre très performante. Peu sensible à la résolution du modèle à désagréger, elle mène à des projections climatiques à fine échelle bien plus réalistes qu'une méthode de désagrégation statistique classique*

Abstract

In this report, a new downscaling method is presented, intended to derive high resolution climate scenarios over the Seine basin from low resolution global climate projections. It is a hybrid statistical-dynamical approach, which emulates a regional climate model thanks to machine learning.

This downscaling method aims to combine the strengths of dynamical downscaling with regional climate models (whereby all the mechanisms that may play with climate change are taken into account at a fundamental level, which should guarantee the robustness of results) and of statistical downscaling (low computational cost, ease of implementation), while minimizing their respective weaknesses. This downscaling method is based on constructed analogues.

A "perfect model" or "pseudo-reality" framework, using a large ensemble of regional climate projections, is implemented in order to evaluate this new downscaling method and in particular to evaluate its ability to correctly capture fine-scale climate change signals, so that the method can be used to study the hydrological impacts of climate change on a river basin like the Seine.

The new hybrid downscaling method is shown to be very skillful, even when applied to very low-resolution global climate models. Moreover, it clearly outperform a classical downscaling method regarding the representation of fine-scale climate changes.

Key points

- ✓ A new hybrid statistical-dynamical downscaling method that emulates a regional climate model thanks to machine learning is presented
- ✓ A "perfect model" evaluation strategy to ensure the performance of the method in the context of the study of climate change impacts is implemented
- ✓ The new method is very skillful. The sensitivity to the resolution of the model to be downscaled is weak, and the method leads to fine-scale climate projections that are much more realistic than obtained with a standard statistical downscaling method.

Introduction

Les modèles climatiques globaux (GCM), tels que ceux du *Coupled Model Intercomparison Project* phase 6 (CMIP6, Eyring et al. 2016) couplant au minimum un modèle de circulation générale atmosphérique et océanique, constitue l'outil de base pour projeter l'évolution du climat au cours du XXI^{ème} siècle en réponse à l'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre (GES) atmosphériques d'origine humaine.

La résolution actuelle de ces modèles est malheureusement limitée en raison de leur coût de calcul. Aujourd'hui, cette résolution est typiquement de l'ordre de 150-250 km. A ces résolutions, l'orographie, le trait de côte ou encore l'utilisation des sols sont bien entendu représentés de façon très grossière. Or, ces caractéristiques physiographiques ont un fort impact sur le climat régional. La résolution des GCM actuels est donc insuffisante pour étudier les variations et changements régionaux à fine échelle du climat, et donc les impacts du changement climatique pour une majorité d'applications, comme l'hydrologie à l'échelle du bassin de la Seine.

Des méthodes, dites de désagrégation (également nommée régionalisation, ou *downscaling* en anglais), doivent ainsi être mises en œuvre afin de dériver les données climatiques à haute résolution nécessaires aux études d'impact à partir des données à basse résolution des GCM. Deux types d'approches sont généralement utilisées. La désagrégation dynamique consiste à utiliser un modèle climatique régional

(RCM) à haute résolution sur la zone d'intérêt. Cet accroissement de résolution est en général permis par la limitation de la simulation à un domaine limité, et l'utilisation d'un simple modèle atmosphérique (*i.e.* sans couplage avec un modèle d'océan). Ce modèle régional doit être forcé à ses frontières par une projection climatique provenant d'un modèle climatique global.

L'inconvénient principal de cette approche est son coût de calcul élevé et sa difficulté de mise en œuvre. Il est ainsi quasi-impossible de réaliser de très larges ensembles de projections climatiques régionales, ce qui est problématique pour la caractérisation correcte de toutes les incertitudes en jeu dans l'étude des changements climatiques régionaux (incertitudes dues au modèle climatique global, au modèle climatique régional, au scénario d'émission et à la variabilité interne). Même des ensembles de taille relativement modeste ne peuvent se faire qu'au travers de larges exercices internationaux coordonnés, très lourds et longs à mettre en œuvre. A l'heure actuelle, par exemple, les dernières modélisations climatiques régionales sur l'Europe (issues du projet Euro-CORDEX, Jacob et al. 2014) désagrègent les modèles climatiques d'anciennes générations (CMIP5, Taylor et al. 2012), alors que les projections climatiques globales de nouvelle génération (CMIP6, Eyring et al. 2016), utilisées dans le dernier rapport du GIEC paru en août 2021, sont souvent disponibles depuis plus d'un an.

Dans ce contexte, une étude d'impact du changement climatique est contrainte par les choix des modélisateurs climatiques régionaux. Il n'est par exemple pas possible pour une étude d'impact de sélectionner les modèles climatiques globaux ou encore les scénarios qu'elle voudrait voir désagréger, en fonction de sa problématique particulière. L'étude d'impact est ainsi contrainte par les données disponibles, produites par ces exercices internationaux coordonnés, qui ne sont pas forcément bien adaptées à ses objectifs, à ses enjeux et à ses contraintes.

En revanche, la désagrégation dynamique présente l'avantage de prendre en compte tous les mécanismes possiblement impliqués dans les changements climatiques régionaux, en se basant autant que faire se peut sur les lois fondamentales de la physique.

La deuxième approche, la désagrégation statistique, consiste à construire dans le climat observé un modèle statistique reliant des prédicteurs de grande échelle et la (ou les) variable(s) locale(s) d'intérêt (prédicteur) nécessaire à l'étude d'impact. Ce modèle statistique est ensuite appliqué en utilisant les prédicteurs de grande échelle issus de projections climatiques à basse résolution, pour dériver la (ou les) variable(s) climatique(s) projetée(s) à haute résolution nécessaire à l'étude d'impact.

Cette approche est relativement simple à mettre en œuvre et permet donc une grande souplesse pour le choix des projections pour une étude d'impact du changement climatique. Son principal point faible est l'hypothèse de stationnarité sur laquelle elle se base : la relation statistique établie dans le climat présent est censée rester valide dans le climat futur, modifié par les forçages anthropiques. Dans l'absolu, rien ne garantit que cela soit le cas et la question de la robustesse des résultats de la désagrégation statistique peut se poser.

L'objectif de ce rapport est de présenter et d'évaluer une nouvelle approche de désagrégation, hybride, dite statistico-dynamique, conjuguant les points forts de la désagrégation statistique et de la désagrégation dynamique, tout en s'affranchissant de leurs limites respectives. Cette approche, peu coûteuse en temps de calcul et relativement simple à mettre en œuvre (tout comme la désagrégation statistique), doit ainsi être robuste comme la désagrégation dynamique en ne reposant pas sur l'hypothèse de stationnarité de la désagrégation statistique. Il s'agit d'un émulateur de modèle climatique régional, basé sur une approche d'apprentissage automatique. Cet émulateur doit permettre de reproduire les résultats d'un modèle climatique régional à un coût de calcul très limité.

La méthode est décrite dans la section 1. La stratégie d'évaluation est introduite en section 2 et ses résultats sont décrits en section 3. Les principales conclusions et perspectives sont finalement discutées.

1. Méthode de désagrégation

1.1 Principes et motivations

La méthode de désagrégation utilisée repose sur le concept d'analogues construits (Maurer et al. 2010). L'approche des analogues construits est une évolution de la méthode des analogues, utilisée depuis de nombreuses années, notamment pour la désagrégation statistique (e.g. Martin et al. 1997).

La méthode des analogues part du principe que si les champs de grande échelle (ou prédicteurs, circulation atmosphérique de grande échelle par exemple) d'un jour j_1 sont quasi-similaires à ceux d'un jour j_2 (on dit alors que j_2 est un jour d'analogue de j_1 , et inversement), alors la variable régionale d'intérêt à haute résolution (ou prédicteur, par exemple les précipitations sur la France) du jour j_2 est proche de celle du jour j_1 . Basé sur ce principe, à partir des prédicteurs de grande échelle issus d'une projection climatique, pour chaque jour de la projection on cherche dans une base de données observée son analogue, et on lui associe la variable locale d'intérêt observée à haute résolution du jour correspondant. Bien entendu, le choix du ou des prédicteurs pour un prédicteur donné est crucial, du même que celui du domaine où l'analogie est recherchée.

La méthode des analogues classiques présente trois difficultés importantes :

(i) Comme pour toutes les méthodes de désagrégation statistique, la relation entre prédicteur(s) et prédicteur est supposé ne pas changer dans le climat futur. Comme mentionné en introduction, cette hypothèse de stationnarité est problématique.

(ii) Comme pour toutes les méthodes de désagrégation statistique, les bons prédicteurs doivent être sélectionnés. Il est par exemple clair que si les précipitations locales ne sont pas entièrement déterminées par la circulation atmosphérique de grande échelle, cette circulation comme seul prédicteur ne permettra pas de capturer toutes les variations et changements des précipitations. Le choix des prédicteurs est ainsi déterminant pour l'hypothèse de stationnarité.

(iii) Le troisième problème est spécifique à la méthode des analogues classiques. Les bases de données observées ne sont pas infinies et il peut être difficile de trouver des analogues suffisamment bons, c'est-à-dire des jours avec des prédicteurs de grande échelle suffisamment proches de ceux du jour cible.

Dans ce travail, une méthode hybride, statistico-dynamique, basée sur les analogues, mais visant à résoudre ces trois difficultés est développée. Au lieu de chercher le meilleur analogue existant, qui peut en fait être mauvais, une méthode de constructions d'analogues par combinaison linéaire des meilleurs analogues est utilisée. L'analogue construit est donc toujours très proche du jour cible. En ce qui concerne les prédicteurs, le choix est fait de prendre la même variable que le prédicteur. Pour les précipitations à haute résolution, les précipitations à basse résolution sont ainsi utilisées comme prédicteur, et pour la température à haute résolution, la température à basse résolution est utilisée comme prédicteur. Le choix de ces prédicteurs vise à capturer au mieux possible les variations et changements des prédicteurs. Maurer et al. (2010) font par exemple ce choix pour développer une méthode de désagrégation statistique.

La principale nouveauté de la méthode développée dans cette étude par rapport à une méthode des analogues construits classique est que les analogues ne sont pas cherchés dans une base de données observées, et donc nécessairement dans le climat passé, mais dans les décennies autour du jour cible dans une projection d'un modèle climatique régional, et donc potentiellement dans le climat futur. Cette approche vise ainsi à émuler un modèle climatique régional, d'où son caractère hybride statistico-dynamique. Elle permet de prendre en compte l'évolution potentielle des liens entre prédicteurs et prédicteurs avec le changement climatique et ne souffre pas de l'hypothèse de stationnarité sur laquelle reposent les méthodes de désagrégation statistique classiques. Elle doit ainsi permettre d'aboutir à des scénarios régionaux à haute résolution plus robustes.

1.2 Description détaillée

Le fonctionnement de la méthode de désagrégation hybride par émulation de RCM est schématisé en Figure 1. La zone en rouge correspond aux données à basse résolution. La zone en bleu correspond aux données à haute résolution. *MOD* est la simulation climatique à basse résolution à désagréger. « *Coarse-Scale Ref* » est une simulation de référence à basse résolution dans laquelle les analogues sont recherchés. Une étape préliminaire consiste à interpoler les données de *Coarse-Scale Ref* sur la grille de *MOD* et à corriger les biais de *MOD* par rapport à *Coarse-Scale Ref* avec une méthode quantile-quantile (Cannon et al. 2015) afin de pouvoir les comparer.

Pour la description ci-dessous, nous prenons l'exemple où l'on cherche à désagréger les précipitations sur la France. Pour chaque jour cible de *MOD* X_i (X_i étant dans l'exemple choisi le champ de précipitation journalier à basse résolution sur un domaine bien choisi), ses N_a meilleurs analogues sont recherchés dans la simulation de référence à basse résolution (*Coarse-Scale Ref*). Sur la Figure 1, seulement deux analogues sont montrés pour illustration, A1 et A2, mais le nombre d'analogues N_a peut être plus grand et est à choisir. A1 et A2 sont les deux jours de *Coarse-Scale Ref* avec le champ de précipitations sur le domaine choisi les plus similaires à X_i , c'est-à-dire avec la distance euclidienne à X_i la plus faible. Malgré cela, en pratique, les analogues A1 et A2 sont imparfaits et même potentiellement relativement éloignés de X_i . L'idée des analogues construits est de chercher la combinaison linéaire des analogues se rapprochant le plus possible de X_i . On cherche donc les coefficients c_1 et c_2 , à l'aide d'une régression, tels que $c_1.A1 + c_2.A2 \approx X_i$.

Nous disposons par ailleurs également d'une simulation à haute résolution associée à *Coarse-Scale Ref* (« *Fine-Scale Ref* »), qui couvre la zone d'intérêt. Le champ de précipitation d'un jour donné dans *Fine-Scale Ref* correspond ainsi au champ de précipitation du même jour dans *Coarse-Scale Ref*, mais à haute résolution.

Les jours analogues à haute résolution correspondant à A1 et A2 dans *Fine-Scale Ref* sont extraits (a_1 et a_2), puis combinés grâce aux coefficients c_1 et c_2 précédemment obtenus pour obtenir le jour émulé à haute résolution $x_i = c_1.a_1 + c_2.a_2$, c'est-à-dire ici les précipitations à haute résolution sur la France correspondant à X_i après désagrégation. En procédant de la sorte pour chaque jour de *MOD*, on obtient les précipitations désagrégées à haute résolution sur le domaine d'intérêt correspondant à la simulation climatique à basse résolution *MOD* : *EMU* sur la Figure 1.

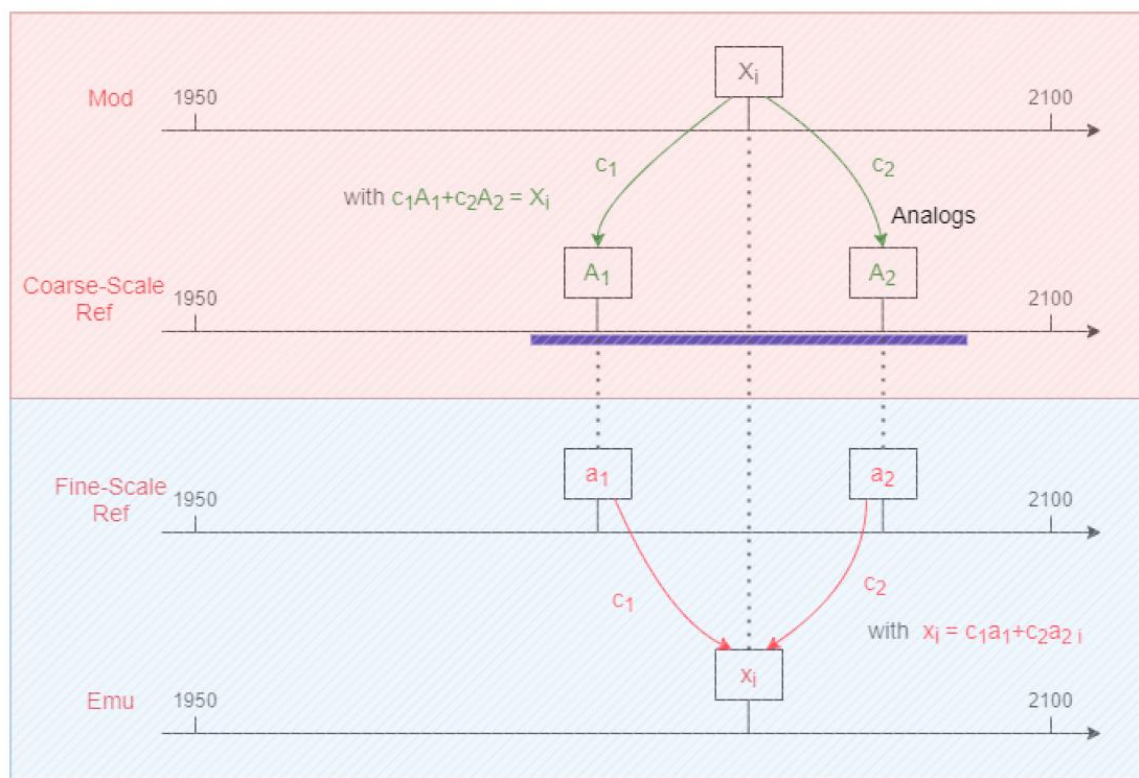


Figure 1. Schéma synthétique de la méthode d'émulation, ici pour la période 1950-2100. Les explications sont données dans le texte.

Dans une approche de désagrégation statistique classique comme dans Maurer et al. (2010), *Coarse-Scale Ref* et *Fine-Scale Ref* sont respectivement des observations à basse et haute résolution. Elles sont limitées à la période passée et les analogues sont donc recherchés uniquement dans la période observée passée. Pour l'émulation, ici, *Coarse-Scale Ref* et *Fine-Scale Ref* sont des projections climatiques s'étendant à la période future. Les analogues sont recherchés dans une fenêtre glissante centrée sur le jour cible X_i (symbolisée par une ligne bleue épaisse sur la Figure 1), et donc dans le climat futur lorsque X_i correspond à une période future. On s'affranchit ainsi de l'hypothèse de stationnarité nécessaire à la désagrégation statistique classique.

En pratique deux modes existent pour la méthode d'émulation : le mode GCM / RCM et le mode RCM / RCM. Dans le mode GCM / RCM, *Fine-Scale Ref* est une simulation climatique régionale à haute résolution dont le modèle forceur est *Coarse-scale Ref*. Dans le mode RCM / RCM, *Coarse-Scale Ref* est simplement la simulation *Fine Scale Ref* agrégée à la basse résolution du modèle à désagréger (*MOD*).

Différents paramètres de la méthode d'émulation par analogues construits doivent être choisis : le domaine spatial sur lequel la recherche des analogues se fait, le nombre d'analogues utilisés dans la construction, la taille de la fenêtre temporelle glissante sur laquelle la recherche des analogues se fait.

Pour les précipitations, des valeurs légèrement négatives peuvent apparaître lors de la reconstruction. Elles sont mises à 0 ici, mais en pratique une méthode de correction de biais sera utilisée après désagrégation. En effet, la méthode de désagrégation vise à émuler un modèle climatique régional et elle reproduit donc également ses biais. En pratique, pour une étude d'impact, les biais doivent donc être corrigés comme on le ferait pour les projections d'un modèle climatique régional.

2. Mise en œuvre de la méthode de désagrégation et stratégie d'évaluation

Il est difficile d'évaluer correctement une méthode de désagrégation dans le contexte de l'étude des impacts du changement climatique. L'objectif final de la désagrégation dans ce contexte est d'obtenir des changements climatiques à petites échelles réalistes. Évidemment, il est impossible de comparer les résultats de la désagrégation aux observations dans ce contexte futur afin d'évaluer le réalisme de la méthode.

Il est toujours possible d'évaluer une méthode de désagrégation dans le climat présent, en comparant ses résultats aux observations, par exemple en termes de représentation des moyennes climatologiques, de la variabilité, des tendances, etc. Cependant, ces tests ne permettent pas de vérifier l'hypothèse de stationnarité de la désagrégation statistique classique. Rien ne garantit en effet que de bonnes performances dans le passé se traduisent nécessairement par de bonnes performances en ce qui concerne les changements futurs. Différentes méthodes de désagrégation statistique classiques ont d'ailleurs très souvent des performances proches et très satisfaisantes lorsqu'on les évalue dans le climat passé, mais leurs résultats futurs peuvent très largement diverger.

Dayon et al. (2015) mettent en œuvre une approche dite « en modèle parfait » ou « pseudo-réalité », afin d'évaluer le mieux possible une méthode de désagrégation statistique classique dans le contexte du changement climatique. Dans cette approche, un modèle est considéré comme la réalité et ses résultats jouent donc le rôle des observations. On applique ainsi la méthode de désagrégation comme si les résultats de ce modèle étaient des observations. L'intérêt de cette approche est que dans cette « pseudo-réalité », le futur est alors également connu, et il est donc possible d'évaluer la méthode de désagrégation dans sa capacité à reproduire les changements climatiques futurs. Bien sûr, un modèle n'est pas la réalité : comme dans Dayon et al. (2015), plusieurs modèles différents jouent tour à tour le rôle de modèle parfait, afin d'évaluer la méthode de désagrégation sur un échantillon de plusieurs pseudo-réalités possibles.

Une telle approche en modèle parfait est mise en œuvre ici pour évaluer la méthode d'émulation. Nous nous focalisons principalement sur la capacité de la méthode à reproduire les variations et changements climatiques à petite échelle, au travers de l'analyse des corrélations présentes. Le plus important pour une méthode de désagrégation vouée à être utilisée pour l'étude des impacts du changement climatique est d'être capable de reproduire les changements climatiques futurs à petite échelle correctement.

En modèle parfait, nous prenons donc les résultats d'une projection climatique régionale à 12 km, issue du projet Euro-CORDEX (Jacob et al. 2014), comme « pseudo-réalité ». Nous agrégeons ses résultats à la résolution typique d'un modèle climatique global (150 km pour la majorité des tests effectués), puis nous désagrégeons ces données basse résolution à l'aide de la méthode d'émulation sur la grille originelle à haute résolution. Nous comparons ensuite sur cette grille haute résolution les résultats émulsés et ceux de la simulation de départ. Le scénario d'émission RCP8.5, sévère, est utilisé, afin de s'assurer que la méthode d'émulation est capable de traiter même les changements les plus forts. La question principale testée est de savoir si à partir d'une information climatique à basse résolution nous arrivons à reproduire après désagrégation les propriétés du climat à haute résolution, et en particulier les signaux du changement climatique.

Pour reprendre la terminologie de la Figure 1, *MOD* et *Coarse-Scale Ref* correspondent ici à une projection climatique régionale Euro-CORDEX agrégée sur une grille à basse résolution typique d'un GCM. *Fine-Scale Ref* correspond à cette même projection sur sa grille originelle à haute résolution. Les résultats de l'émulation (*EMU*) sont ensuite comparés à *Fine-Scale Ref*. Lors de la désagrégation, les jours de l'année courante sont exclus lors de la recherche des analogues pour éviter des performances artificielles. Le Tableau 1 synthétise les simulations Euro-CORDEX utilisées pour cette étude.

Tableau 1. Projections climatiques régionales utilisées pour l'évaluation en modèle parfait de la méthode d'émulation. Lignes : modèle climatique régional. Colonnes : modèle climatique global forçant le modèle climatique régional. La résolution approximative du modèle climatique est donnée entre parenthèses sous son nom dans la première ligne. Les croix (x) indiquent les simulations utilisées.

	CNRM-CM5 (150 km)	EC-EARTH (120 km)	HadGEM2-ES (135 km)	MPI-ESM-LR (200 km)	NorESM1-M (203 km)
CNRM ALADIN63	x		x	x	x
GERICS REMO2015	x				x
KNMI RACMO22E	x				
CLMcom CCLM4-8-17		x			
DMI HIRAM5			x		
ICTP RegCM4-6					x
SMHI RCA4					x

Des tests préliminaires en modèle parfait ont tout d'abord été conduits pour déterminer de bonnes valeurs pour les paramètres de la méthode ainsi que pour caractériser la sensibilité des résultats à la valeur de ces paramètres. Finalement, 120 analogues sont utilisés. La fenêtre temporelle de recherche des analogues est de 41 ans et centrée sur le jour cible.

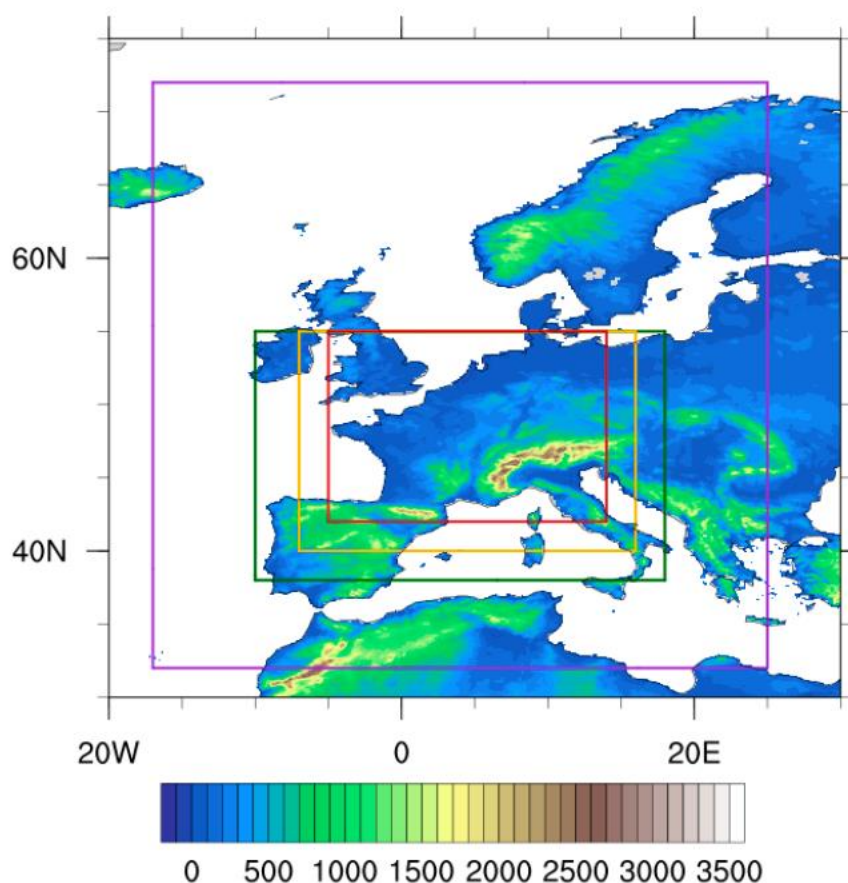


Figure 2. Les différents domaines d'analogie testés.

La méthode implique également le choix du domaine d'analogie, c'est-à-dire du domaine où sont calculées les distances entre le champ du jour cible et les jours de *Coarse-Scale Ref* afin de trouver les analogues. Différents domaines potentiels ont été testés en modèle parfait (Figure 2). En général, plus le

domaine est petit, plus les résultats obtenus sont bons. Toutefois, un domaine très petit va impliquer des variations du domaine effectif selon la résolution et la grille du modèle d'origine à désagréger, ce qui n'est pas souhaitable. A la fin, le domaine jaune de la Figure 2 a été choisi. Tous les points (terre et mer) à l'intérieur du domaine sont pris en compte pour le calcul des distances dans la recherche des analogues.

3. Évaluation

La résolution des modèles climatiques actuels est très variable, et va de quasiment 50 km à plus de 500 km, avec une valeur médiane probablement autour de 150-200 km. Nous avons tout d'abord cherché à évaluer la capacité de la méthode d'émulation à désagréger des GCM même à très basse résolution, ainsi que la sensibilité des résultats de la désagrégation à la résolution du modèle à désagréger. Pour l'évaluation en modèle parfait, comme expliqué dans la section précédente, les données du RCM doivent d'abord être agrégées sur une grille basse résolution typique d'un GCM. Ici, les données du modèle climatique régional ALADIN63 sont agrégées sur trois grilles avec des résolutions largement différentes avant émulation :

- ✓ « *Low resolution* » : grille d'environ 550 km de résolution
- ✓ « *Intermediate resolution* » : grille d'environ 150 km de résolution
- ✓ « *High resolution* » : grille d'environ 80 km de résolution

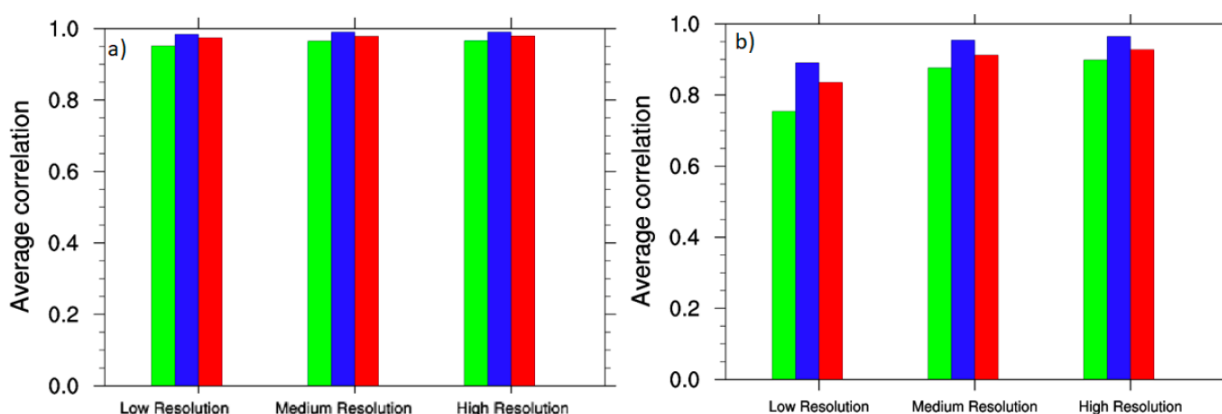


Figure 3. Moyenne sur la France des corrélations journalières (en vert), interannuelles en hiver (en bleu) et interannuelles en été (en rouge) entre (a) les températures et (b) les précipitations à haute résolution simulées et émulées en modèle parfait entre 1970 et 2000. Pour les températures journalières, les cycles annuels ont été retranchés avant le calcul des corrélations. Emulation en modèle parfait d'ALADIN63 forcé par CNRM-CM5.

Les résultats de la désagrégation par émulation de ces données sont ensuite évalués. Ces résultats, en termes de corrélation sur la France par exemple (Figure 3), sont peu sensibles à la résolution originale du modèle désagrégué. Les différences sont même quasi-inexistantes pour la température. Pour les précipitations, les corrélations sont légèrement plus faibles pour la grille à basse résolution, mais les différences restent modestes et les valeurs des corrélations restent bonnes. Il faut d'ailleurs noter qu'une résolution aussi basse est particulièrement extrême et n'est quasiment pas utilisée dans les GCM actuels pour effectuer des projections climatiques. Cette analyse montre ainsi que les variations du climat à haute résolution sur la France sont bien reproduites grâce à l'émulation, même à partir de données initiales à très basse résolution. Pour la suite des analyses en modèle parfait de ce rapport, la grille intermédiaire à 150 km de résolution est utilisée pour l'étape d'agrégation à basse résolution.

Un objectif de l'émulation de modèles climatiques régionaux est de s'affranchir des problèmes de stationnarité de la relation prédicteur / prédicteur propre aux méthodes de désagrégation statistique classiques. L'émulation doit permettre de prendre en compte l'évolution des liens entre le prédicteur de grande échelle et le prédicteur à haute résolution avec le changement climatique et donc finalement de permettre une meilleure représentation des changements climatiques futurs.

Il est donc intéressant d'évaluer dans quelle mesure l'émulation améliore les résultats par rapport à une méthode de désagrégation classique. L'approche en modèle parfait permet de faire cette comparaison. Les Figures 4 et 5 montrent ainsi l'erreur quadratique moyenne spatiale sur la France pour les changements de température et précipitations en fin de XXI^{ème} siècle, pour la méthode d'émulation décrite en section 1, et pour le même algorithme, or la fenêtre de recherche des analogues n'est pas glissante (voir Figure 1), mais fixée à la période 1970-2000. Trois modèles régionaux sont ici émulés en modèle parfait. Sans fenêtre glissante, la méthode est simplement une méthode de désagrégation statistique classique par analogues construits, comme dans Maurer et al. (2010).

Il est clair que l'émulation produit des changements futurs à haute résolution plus réalistes que la désagrégation statistique classique, avec des erreurs quadratiques bien plus faibles (Figure 4 et 5). C'est d'autant plus vrai pour la température, variable pour laquelle l'hypothèse de stationnarité de la relation prédicteur / prédicteur est donc particulièrement forte.

Il est intéressant de noter que nous utilisons ici la même variable pour le prédicteur à basse résolution et le prédicteur à haute résolution. Les différences de performance en modèle parfait entre l'émulation et la désagrégation statistique classique signifient donc que le simple lien entre la température à grande échelle et la température à petite échelle évolue fortement avec le changement climatique. Des rétroactions locales, neige-température en hiver ou humidité des sols-précipitations en été, sont probablement à l'œuvre ici. Les liens grandes échelles / petites échelles changent également pour les précipitations, mais dans une moindre mesure, car l'écart entre *downscaling* statistique classique et émulation est un peu plus faible, même s'il reste important.

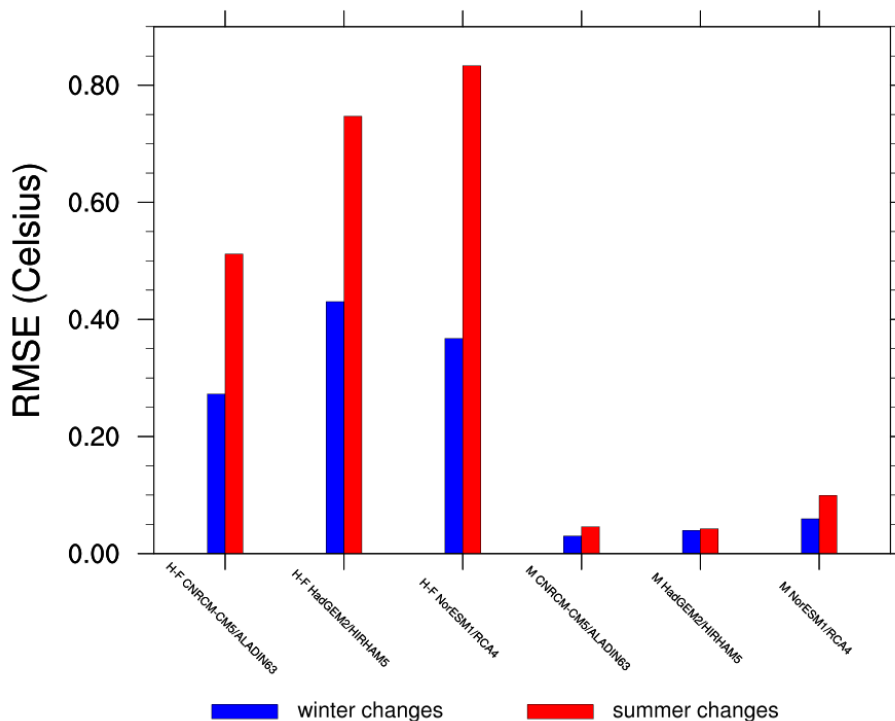


Figure 4. Racine de l'erreur quadratique moyenne spatiale des changements de température (°C) sur la France entre 2070-2100 et 1970-2000 pour 3 modèles régionaux émulés en modèle parfait. Les six barres de gauche montrent les résultats de la désagrégation statistique classique en hiver et en été pour les trois modèles, tandis que les six barres de droite montrent les résultats de la désagrégation par émulation de RCM telle que décrite dans la section 1.

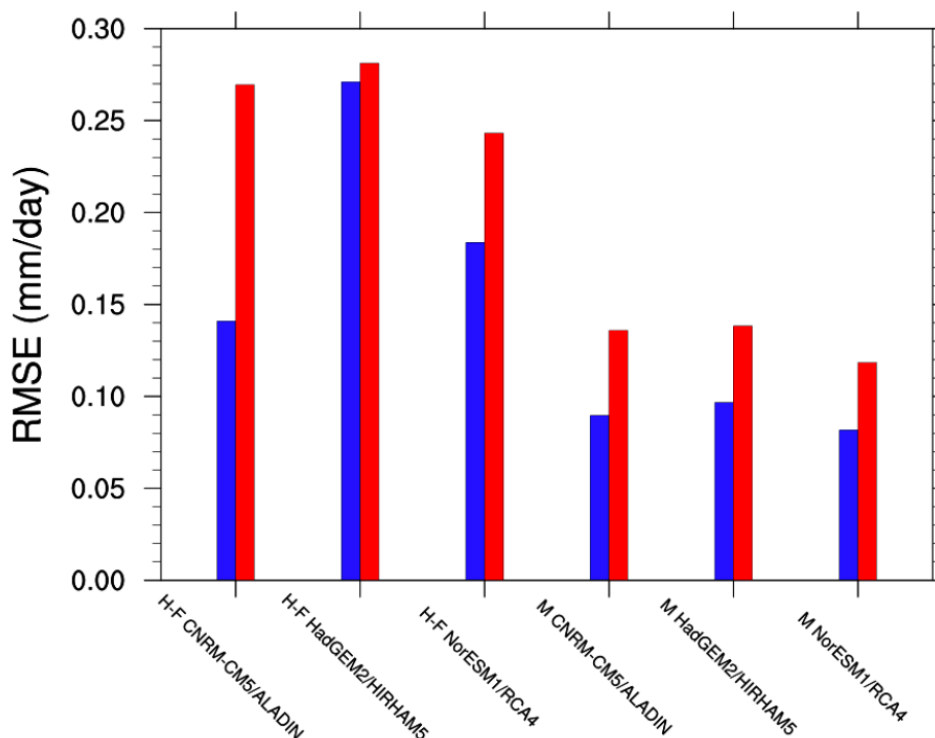


Figure 5. Racine de l'erreur quadratique moyenne spatiale des changements de précipitations (mm/jour) sur la France entre 2070-2100 et 1970-2000 pour 3 modèles régionaux émulsés en modèle parfait. Les six barres de gauche montrent les résultats de la désagrégation statistique classique en hiver et en été pour les trois modèles, tandis que les six barres de droite montrent les résultats de la désagrégation par émulation de RCM telle que décrite dans la section 1.

En modèle parfait, l'émulation permet donc d'obtenir des changements de température et de précipitations sur la France et les régions voisines très proches de ceux de la simulation cible, même à très fine échelle spatiale, aussi bien en été qu'en hiver (Figure 5, 6, 7, 8 pour ALADIN63 forcé par CNRM-CM5). En partant de données ici à une résolution de 150 km, typique des modèles climatiques globaux actuels, la méthode d'émulation permet de capturer par exemple la forte amplification de température en hiver sur les Pyrénées espagnoles ou les Alpes (Figure 6), ou les contrastes nord-est / sud-ouest des changements de précipitations en été du modèle cible (Figure 8).

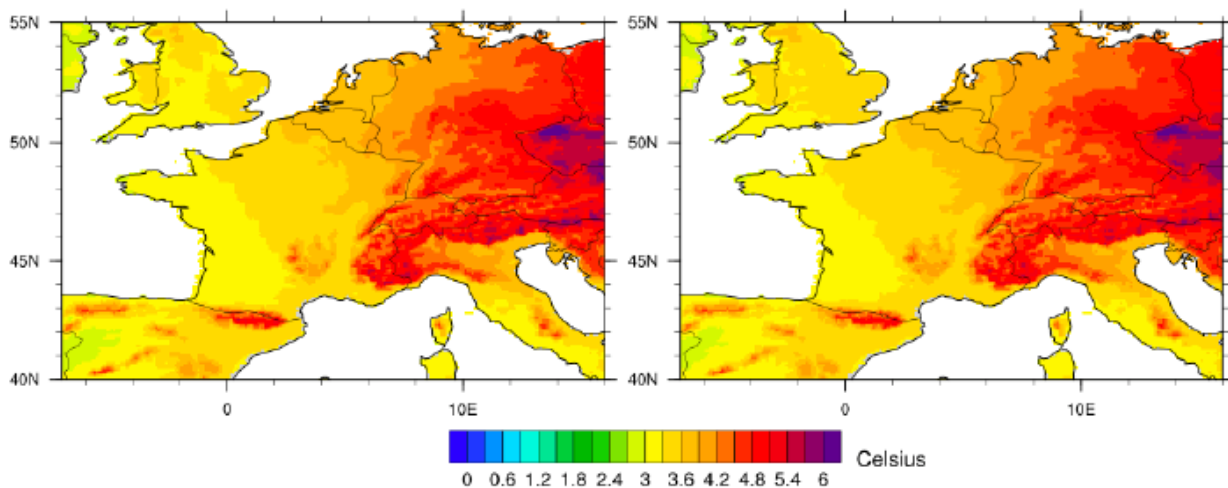


Figure 6. Changements des températures à 2 m ($^{\circ}\text{C}$) en hiver (décembre-janvier-février) sur l'Europe de l'Ouest entre 2070-2100 et 1970-2000 dans la simulation régionale de référence (ALADIN63 forcé par CNRM-CM5) à gauche et dans son émulation en mode modèle parfait à droite.

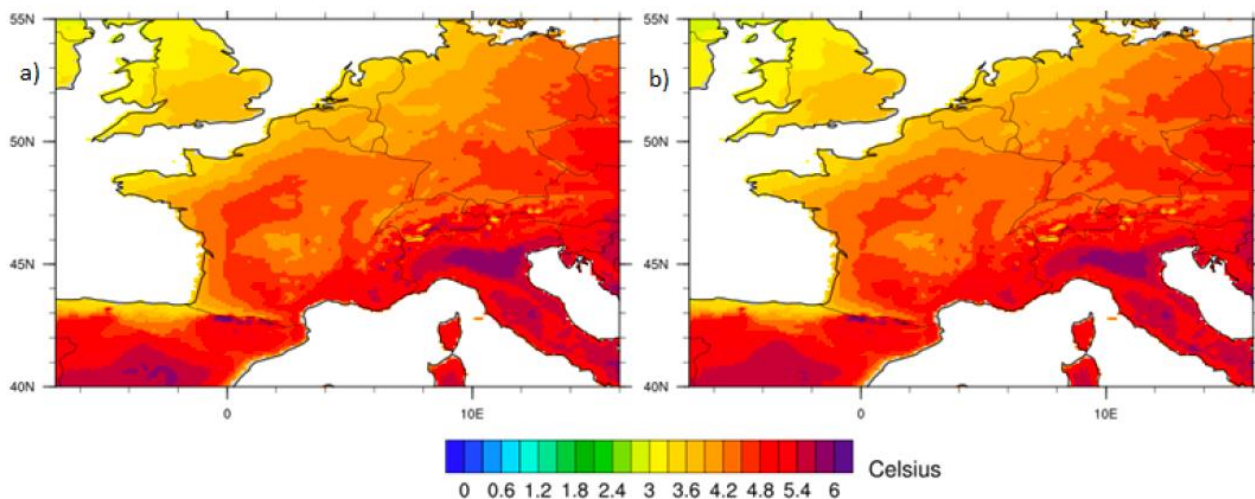


Figure 7. Changements des températures à 2 m ($^{\circ}\text{C}$) en été (juin-juillet-août) sur l'Europe de l'Ouest entre 2070-2100 et 1970-2000 dans la simulation régionale de référence (ALADIN63 forcé par CNRM-CM5) à gauche et dans son émulation en mode modèle parfait à droite.

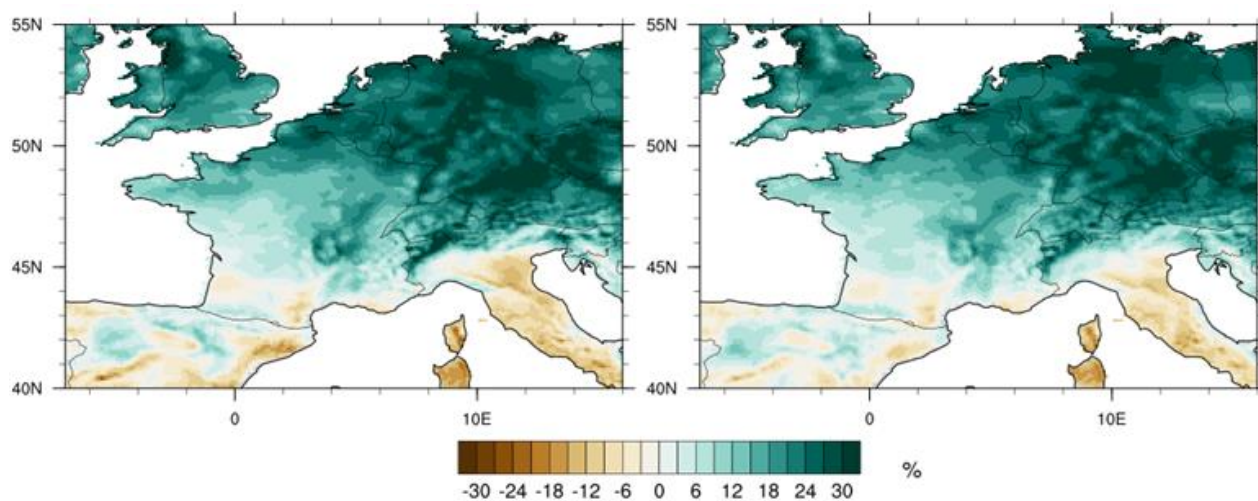


Figure 8. Changements des précipitations (changement relatif en %) en hiver (décembre-janvier-février) sur l'Europe de l'Ouest entre 2070-2100 et 1970-2000 dans la simulation régionale de référence (ALADIN63 forcé par CNRM-CM5) à gauche et dans son émulation en mode modèle parfait à droite.

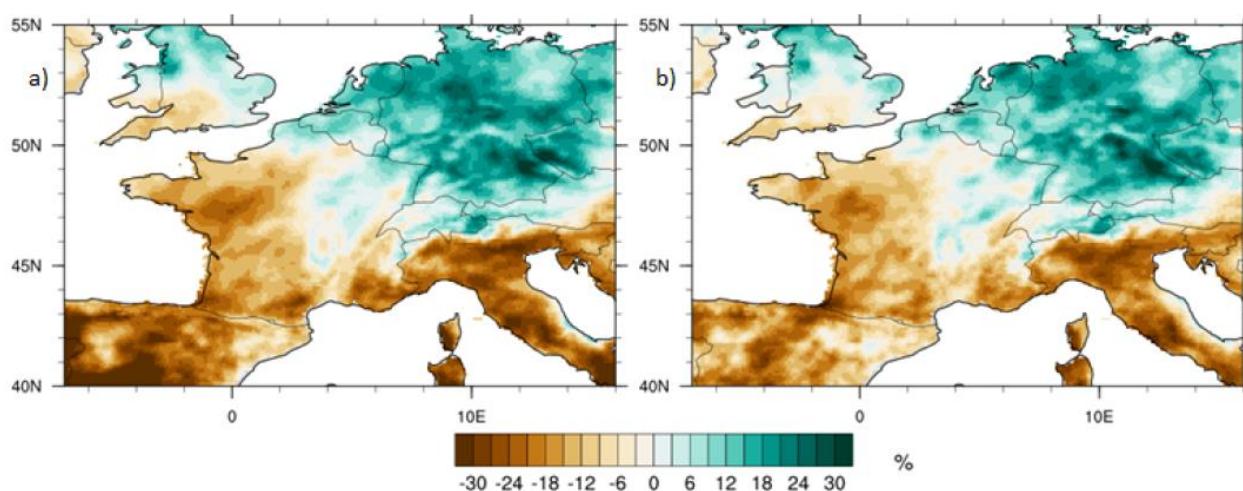


Figure 9. Changements des précipitations (changement relatif en %) en été (juin-juillet-août) sur l'Europe de l'Ouest entre 2070-2100 et 1970-2000 dans la simulation régionale de référence (ALADIN63 forcé par CNRM-CM5) à gauche et dans son émulation en mode modèle parfait à droite.

Il existe une forte dispersion dans les changements climatiques projetés sur l'Europe de l'Ouest comme sur la plupart des régions du globe, que ces modèles soient globaux ou régionaux. Ces différences de changements s'expliquent par la représentation différente de certains processus physiques par les modèles. Il n'est donc pas suffisant que la méthode de désagrégation fonctionne bien pour un modèle spécifique, et donc des changements spécifiques, en mode parfait. Elle doit également être performante pour un large éventail de changements projetés potentiels.

Onze simulations présentant des changements contrastés ont donc été désagrégées au total en mode parfait, et les changements climatiques moyens sur la France simulés et émulés sont comparés (Figure 10 pour les températures et Figure 11 pour les précipitations). Les changements moyens de température et de précipitations sur la France en hiver et été sont quasiment identiques dans les émulations et les simulations de référence, avec une corrélation inter-modèles quasi-parfaite. L'émulation fonctionne ainsi très bien, que les changements simulés soient modérés ou très sévères.

En ce qui concerne le changement du maximum annuel de température (Figure 10c) et de précipitations (Figure 11c), des différences un peu plus importantes entre les changements simulés et émulés sont visibles, même s'ils restent extrêmement corrélés. Une petite sous-estimation quasi-générale du changement du maximum annuel de température est en revanche notée (de l'ordre de 0,2°C). Pour les changements du maximum annuel de précipitations, les différences entre simulations et émulation sont variables et de quelques % au maximum.

Compte tenu du fort impact de la variabilité interne sur les extrêmes et de la difficulté très importante à représenter les changements des extrêmes avec les méthodes de désagrégation statistique classiques, ces résultats n'en demeurent pas moins très satisfaisants. Il est par ailleurs possible qu'une étape supplémentaire de correction de biais corrigeant la distribution entière (de type quantile-quantile, e.g. Cannon et al. 2015), qui devrait être mise en œuvre dans une étude des impacts du changement climatique après l'émulation, puisse améliorer ces résultats.

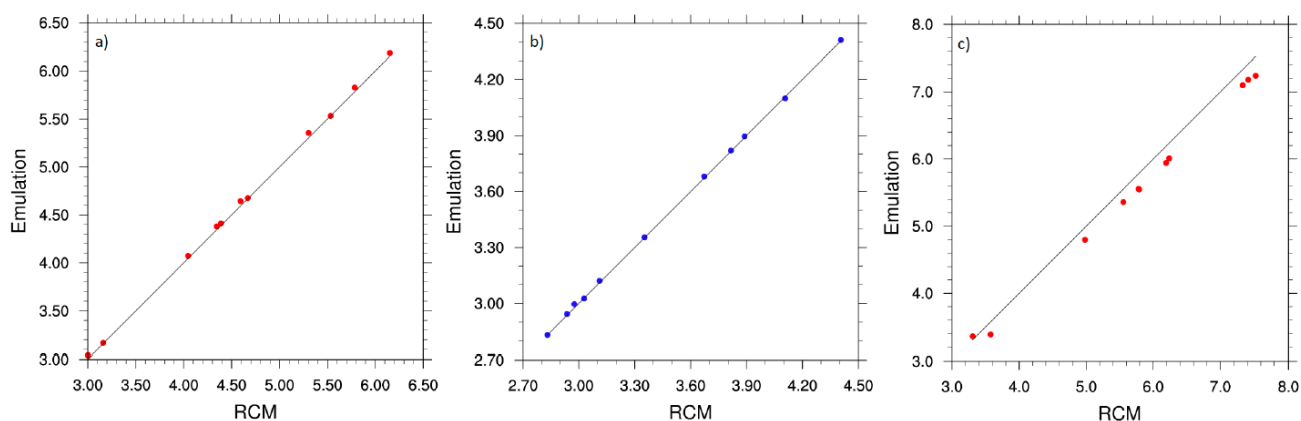


Figure 10. Diagramme de dispersion des changements de température à 2 m (°C) moyennés sur la France entre 2070-2100 et 1970-2000 pour les simulations régionales de référence (abscisse) et les émulations correspondantes (ordonnée). La ligne en noir est la droite d'identité. (a) Température moyenne en été ; (b) Température moyenne en hiver ; (c) Température journalière maximale annuelle

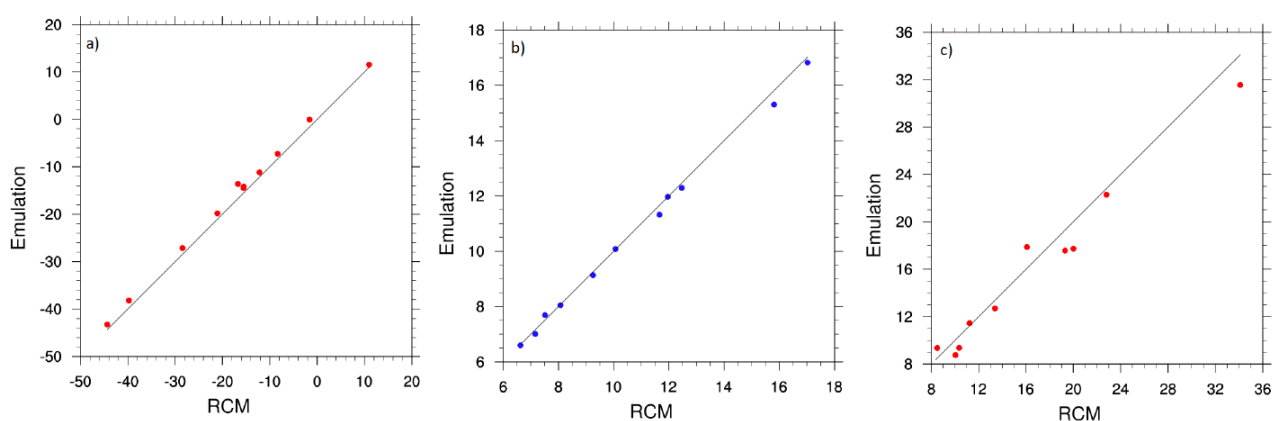


Figure 11. Comme Figure 10 pour les changements relatifs de précipitation.

Conclusion

Dans ce rapport, une méthode de désagrégation hybride statistico-dynamique est présentée et évaluée. Elle vise à émuler un modèle climatique régional à l'aide d'une approche d'apprentissage automatique, avec un coût de calcul limité. Elle cherche à combiner les points forts de la désagrégation dynamique (la capacité à prendre en compte tous les mécanismes physiques pouvant jouer dans le changement climatique régional) et de la désagrégation statistique (facilité de mise en œuvre, temps de calcul très faible), tout en éliminant leurs points faibles respectifs. Le principal point faible de la désagrégation statistique est l'hypothèse de stationnarité qui doit être faite, *i.e.* l'hypothèse que la relation statistique de désagrégation établie dans le climat présent reste valide dans le climat futur. Le principal point faible de la désagrégation dynamique est son coût de calcul et la difficulté de la mise en œuvre.

Une approche dite en « modèle parfait » ou « pseudo-réalité », proposée notamment dans Dayon et al. (2015) pour l'évaluation de la désagrégation statistique, est mise en œuvre pour évaluer les performances de la méthode de désagrégation par émulation de RCM dans un contexte d'étude des impacts du changement climatique. Nous nous intéressons en particulier à sa capacité à représenter les changements de précipitations et de température sur la France à fine échelle.

La méthode de désagrégation hybride présentée dans ce rapport se montre très performante. Relativement simple à mettre en œuvre, elle permet notamment de très bien reproduire les changements des modèles climatiques régionaux, même en partant de données à une résolution très grossière, caractéristiques des modèles climatiques de plus basse résolution à l'heure actuelle. L'intérêt de l'approche par rapport à une méthode de désagrégation statistique classique est également démontré : les résultats de l'émulation sont bien meilleurs que ceux de la désagrégation statistique classique, en termes de changements futurs projetés.

La méthode décrite dans ce rapport pourra donc être utilisée pour désagréger les nouvelles projections climatiques CMIP6 et produire des scénarios climatiques, et par la suite hydrologiques et agricoles, sur le bassin de la Seine.

Il est important de noter qu'il s'agit d'une méthode d'émulation de modèles climatiques régionaux, ce qui signifie que l'émulation va également reproduire les biais de ces modèles, qui peuvent être importants. Avant d'étudier les impacts du changement climatique grâce à ces scénarios désagrégés, il peut être important d'en corriger les biais. Bien qu'il ne s'agisse pas de l'objet de la présente étude, il est prévu de mettre en œuvre une méthode de correction de biais, de type quantile-quantile par exemple, avant son utilisation pratique, comme il est habituel de le faire pour les résultats des modèles climatiques régionaux.

Bibliographie

Cannon, A.J., S.R. Sobie, and T.Q. Murdock, T. Q. (2015). Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *Journal of Climate* 28(17), 6938-6959.

Dayon, G., J. Boé and E. Martin (2015) Transferability in the future climate of a statistical downscaling method for precipitation in France. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere* 120, 1023–1043

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

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.

Martin, E., B. Timbal, and E. Brun (1997), Downscaling of general circulation model outputs: Simulation of the snow climatology of the French Alps and sensitivity to climate change, *Climate Dynamics* 13, 45– 56.

Maurer, E.P., H.G. Hidalgo, T. Das, M.D. Dettinger, and D.R. Cayan (2010). The utility of daily large-scale climate data in the assessment of climate change impacts on daily streamflow in California. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6), 1125-1138.

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