



PONDÉRATION DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES D'INFO-CRUE SUR LA BASE DE L'UNICITÉ ET DE LA PERFORMANCE DES SIMULATIONS HYDROLOGIQUES

Rapport technique
Juillet 2021

*Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques*

Québec 

PONDÉRATION DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES D'INFO-CRUE SUR LA BASE DE L'UNICITÉ ET DE LA PERFORMANCE DES SIMULATIONS HYDROLOGIQUES

Rapport technique

Juillet 2021

ÉQUIPE DE RÉALISATION :

Gabriel Rondeau-Genesse, Ouranos

Marco Braun, Ouranos

Louis-Philippe Caron, Ouranos

Titre du projet Ouranos: Pondération des scénarios hydrologiques

Numéro du projet Ouranos: 703100

Citation suggérée : Rondeau-Genesse, G., Braun, M., Caron, L.P. (2021). *Pondération des scénarios climatiques d'INFO-Crue sur la base de l'unicité et de la performance des simulations hydrologiques*. Rapport technique présenté à la Direction de l'expertise hydrique du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Ouranos, Montréal, Canada. 51 p. + annexes.

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres. Toute utilisation ultérieure du document sera au seul risque de l'utilisateur sans la responsabilité ou la poursuite juridique des auteurs.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été rendu possible grâce au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) dans le cadre du projet gouvernemental INFO-Crue.

Nous remercions le groupe de travail sur la modélisation régionale et le groupe de travail sur la modélisation couplée du *World Climate Research Programme*, précédemment en charge de la coordination de CORDEX et responsable pour CMIP5. Nous remercions les divers centres de modélisation (Tableau 1 et Tableau 2 de ce rapport) pour avoir produit et rendues disponibles les sorties de leurs modèles. Nous remercions le *U.S. Department of Energy's Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison* pour son support dans le développement de l'infrastructure informatique de CMIP, en partenariat avec le *Global Organization for Earth System Science Portals*. Nous remercions également le U.S. Department of Defense ESTCP pour son support dans l'archivage des données NA-CORDEX.

La production de ClimEx a été financée par le *Bavarian State Ministry for the Environment and Consumer Protection*. Le MRCC5 a été développé au centre ESCER de l'Université du Québec à Montréal (UQÀM; www.escer.uqam.ca) en collaboration avec Environnement et Changements climatiques Canada. Nous remercions le Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique d'Environnement et Changements climatiques Canada pour avoir produit en rendu disponible le grand ensemble CanESM2, et le *Canadian Sea Ice and Snow Evolution Network* pour avoir proposé ces simulations. Les calculs du MRCC5 pour le projet ClimEx ont été réalisés sur le super-ordinateur SuperMUC du *Leibniz Supercomputing Centre* (LRZ), à la *Bavarian Academy of Sciences and Humanities*. L'opération de ce super-ordinateur est financée par le *Gauss Centre for Supercomputing* (GCS) du *German Federal Ministry of Education and Research* et par le *Bavarian State Ministry of Education, Science and the Arts*.



Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques

Québec 

RÉSUMÉ

À l'hiver 2019, 180 scénarios climatiques ont été produits à Ouranos à partir de simulations des ensembles CMIP5, NA-CORDEX et ClimEx. Pendant l'été et l'automne 2019, ces scénarios ont été employés en intrant à six plateformes du modèle hydrologique HYDROTEL afin de produire des projections hydrologiques sur 28 035 tronçons de rivière pour les fins du projet gouvernemental INFO-Crue. Cet ensemble est toutefois constitué d'une multitude de modèles globaux et régionaux de climat, dont certains ne possèdent qu'une seule réalisation, tandis que d'autres, comme CSIRO-Mk3.6.0 ou ClimEx, en possèdent jusqu'à 10 ou 50. De plus, dans l'ensemble NA-CORDEX, deux modèles globaux (CanESM2 et MPI-ESM) pilotent environ la moitié des simulations disponibles. Ce type d'ensemble est souvent interprété comme un « ensemble d'opportunités », c'est-à-dire que l'échantillonnage des simulations dépend en grande partie des ressources et des intérêts de chaque centre de recherche, qui contribuent par un nombre arbitraire de réalisations, de modèles et de scénarios.

Outre cet enjeu de la dépendance des modèles de climat, une problématique supplémentaire associée à l'utilisation d'un ensemble de scénarios climatiques ou hydroclimatiques pour l'adaptation est que ce type d'ensemble n'est souvent pas calibré en fonction de l'habileté des modèles à simuler le climat ou le régime hydrologique observé. Dans une telle situation, il peut être justifié de mettre une emphase particulière sur l'identification des « meilleurs modèles » pour une application donnée, puisque cela permet souvent de contraindre l'incertitude des projections futures et d'éliminer des simulations dont le signal de changements climatiques est moins crédible.

À cet effet, un cadre d'analyse a été établi afin d'évaluer la performance des simulations hydroclimatiques utilisées pour INFO-Crue en période historique, ainsi que le niveau d'indépendance de leur signal de changements climatiques. Les résultats sont largement en accord avec les conclusions de plusieurs autres études, soit qu'il demeure difficile, voire impossible, d'appliquer une « calibration » unique et universelle. Dans le cas spécifique des scénarios hydroclimatiques d'INFO-Crue et des analyses effectuées dans ce rapport, cela signifie que pour toute station ou tout indicateur où il semble y avoir soit une disparité entre les performances des ensembles climatiques, soit un manque d'indépendance entre un MRC et son pilote, ou entre deux modèles climatiques provenant d'un même centre de modélisation, il existe d'autres stations, indicateurs ou horizons temporels où ces conclusions ne tiennent pas.

On obtient donc un portrait général où la distribution des biais est difficile à établir, et où l'élimination de modèles ou de simulations est encore plus difficile à justifier et à défendre lorsque l'objectif est de chercher à utiliser la même liste de modèles climatiques pour l'ensemble du territoire, des plateformes HYDROTEL et des indicateurs hydrologiques. Ainsi, pour les fins d'INFO-Crue, toutes les simulations hydroclimatiques pourraient être utilisées.

Au niveau de l'indépendance des simulations, même si une multitude d'alternatives pourraient exister selon le niveau de détail utilisé dans la description et la comparaison des composantes des modèles climatiques, les analyses effectuées dans le cadre de ce rapport démontrent que les résultats sont robustes peu importe le schéma exact de pondération utilisé. Par conséquent, l'emphase ne devrait pas être à tenter d'identifier le schéma universel idéal (celui-ci n'existe pas), mais plutôt à tenter de mieux comprendre l'impact associé à cette source d'incertitude. Par conséquent, si la DEH souhaite utiliser un maximum d'information provenant de l'ensemble hydroclimatique, alors le schéma PHYS-GP proposé dans ce rapport serait recommandé. Ce schéma utilise les mêmes hypothèses que la pondération recommandée en 2020 et se rapproche d'une définition classique de la méthodologie « 1 modèle 1 vote » couramment employée dans la pratique, mais avec une définition un peu plus physique de ce que constitue un modèle. Ce schéma pose également comme hypothèse que les modèles régionaux amènent une information distincte de leurs pilotes, ce qui semble s'avérer la plupart du temps.

Toutefois, ces hypothèses ne semblent pas systématiquement s'appliquer à tous les bassins versants ou à tous les indicateurs hydrologiques. Par conséquent, et si la DEH souhaite posséder une meilleure compréhension de l'incertitude associée au schéma de pondération, il serait tout à fait justifiable, voire recommandé, de comparer ou de combiner les résultats obtenus par PHYS-GP avec les schémas MCG-GP et CM-GP, aussi proposés et explorés dans ce rapport. Ceux-ci supposent que l'indépendance réelle du signal de changements climatiques est plutôt dépendante du modèle global de climat ou du centre de modélisation, respectivement.

Finalement, les conclusions présentées ici sont apportées dans une optique où les résultats doivent être appliqués à l'ensemble des tronçons de rivière visées par INFO-Crue. D'un point de vue local plutôt que global, il serait tout à fait justifiable (par une municipalité, une firme d'experts, un organisme de bassin versant, etc.) de raffiner la méthodologie et le schéma de pondération afin de mieux représenter un bassin versant ou un indicateur hydrologique donné. Toutefois, tout exercice de ce genre devrait s'assurer d'avoir un nombre acceptable de simulations climatiques afin de bien représenter l'étendue des changements climatiques futurs, et ce nombre peut être sensiblement élevé dans le cas d'indicateurs tels que les crues de faible récurrence.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	ii
Résumé	iii
Table des matières	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
1. Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Objectifs.....	4
1.3 Données disponibles.....	4
1.3.1 Réalisations multiples connues	7
1.3.2 Autres regroupements possibles.....	8
1.4 Stations.....	9
2. Performance des simulations	11
2.1 Méthodologie	11
2.1.1 Évaluation de la performance des simulations hydroclimatiques et identification des modèles ou simulations de faible performance	12
2.1.2 Impact de l'exclusion de simulations ou de modèles sur le biais et sur la distribution des signaux de changements climatiques	13
2.2 Résultats.....	13
2.2.1 Performance des ensembles climatiques en fonction des indicateurs, des périodes d'analyse et des plateformes de simulation hydrologique.....	13
2.2.2 Identification des simulations de faible performance	17
2.2.3 Impact de la réduction de l'ensemble	20
2.3 Conclusions partielles et impact sur les schémas de pondération.....	22
3. Indépendance des simulations et schémas de pondération	23
3.1 Méthodologie	23
3.1.1 Pondération proposée en mai 2020	23
3.1.2 Autres schémas de pondération possibles	23
3.1.3 Pondérations possibles à l'intérieur d'un groupe indépendant.....	25
3.2 Résultats.....	28

3.2.1	Différences entre les schémas de pondération	29
3.2.2	Écarts entre les modèles régionaux et leurs pilotes	33
3.2.3	Impact du nombre de groupes indépendants	36
4.	Sélection d'une seule simulation par groupe indépendant (1S) et nombre optimal de simulations climatiques	40
5.	Conclusions	46
5.1	Discussion	46
5.2	Recommandations	47
5.2.1	Liste de simulations à utiliser	47
5.2.1	Schéma pondération recommandé	48
Références	49
Annexes	52

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Schéma de modélisation utilisé pour générer les 50 membres de CanESM2-LE qui ont servi à piloter ClimEx	7
Figure 2.	Différence entre un modèle climatique et un modèle de système terrestre ...	9
Figure 3.	Distribution géographique des 280 tronçons de rivière utilisées pour les fins de l'analyse	10
Figure 4.	Histogramme de l'aire drainée par les 280 tronçons de rivière où se trouvent des stations hydrométriques.	10
Figure 5.	Performance de 180 simulations hydroclimatiques pour l'indicateur Q1MAX20AN moyenné sur toutes les tailles de bassin versant et pour la plateforme LN24HA 14	
Figure 6.	Performance de 180 simulations hydroclimatiques en fonction des indicateurs Q1MAX2*, Q1MAX5*, Q1MAX10*, Q1MAX20*, Q1MAX100*, Q1MAX350* ..	15
Figure 7	Comme la Figure 6C mais pour les plateformes MG24HA (A), MG24HI (B) et MG24HS (C)	16
Figure 8.	Identification des simulations peu performantes dans l'ensemble, basé sur 8 indicateurs (carré rouge) et la plateforme LN24HA	18
Figure 9.	Identification des modèles peu performants dans l'ensemble, basé sur 8 indicateurs (carré rouge) et la plateforme LN24HA	19
Figure 10.	Changement dans la distribution des biais (A) et dans la distribution des signaux de changements climatiques à travers les simulations individuelles (B), pour la période future 2041-2070, après l'application de l'approche de réduction de l'ensemble hydroclimatique	21
Figure 11.	Exemples d'application des différentes alternatives de pondération pour les simulations provenant ou pilotées par les modèles climatiques des centres CCCma, GFDL et MPI-M	28
Figure 12.	Changements projetés (%) pour l'indicateur Q1MAX350AN à l'horizon 2050 (2041-2070 vs. 1981-2010), calculé par la méthodologie DEH2020-GP	30
Figure 13.	Différence (% absolu) entre la méthodologie DEH2020-GP et les alternatives possibles pour le calcul du 50 ^e percentile de changements de l'indicateur Q1MAX350AN	31
Figure 14.	Différence (% absolu) entre la méthodologie DEH2020-GP et les alternatives possibles pour le calcul du consensus sur la direction de changement et pour le calcul de la dispersion de l'indicateur Q1MAX350AN	32
Figure 15.	Différences entre le signal de changements climatiques du 1 ^{er} membre de cinq modèles globaux et les simulations régionales CORDEX pilotées par ces simulations	34
Figure 16.	Différences entre les statistiques de changements climatique pour l'indicateur Q1MAX350AN tel que calculées par un sous-ensemble de simulations CMIP5 utilisées comme pilotes dans CORDEX	35

Figure 17. Pour 280 tronçons, écart-type associé au calcul du 50 ^e percentile de changements pour Q1MAX350AN à l’horizon 2050	38
Figure 18. Différence (% absolus) entre la méthodologie <i>DEH2020-GP</i> et les alternatives possibles (méthodologie <i>1S</i>) pour le calcul du 50 ^e percentile de changements de l’indicateur Q1MAX350AN	41
Figure 19. Différence (% absolus) entre la méthodologie <i>DEH2020-GP</i> et les alternatives possibles pour le calcul du consensus sur la direction de changement et pour le calcul de la dispersion de l’indicateur Q1MAX350AN	42
Figure 20. Pour 280 tronçons, écart-type associé au calcul du 50 ^e percentile de changements pour Q1MAX350AN à l’horizon 2050	43
Figure 21. Pour 280 tronçons et 87 indicateurs, réduction cumulative possible de l’écart-type associé au calcul du 50 ^e percentile de changement relatif, en fonction du nombre de simulations climatiques dans l’ensemble	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Simulations régionales utilisées pour INFO-Crue	5
Tableau 2. Simulations globales utilisées pour INFO-Crue.....	6
Tableau 3. Modèles ayant produit plusieurs réalisations.....	8
Tableau 4. Schémas de pondération	25
Tableau C1. Schémas de pondération pour les simulations du RCP4.5.....	75
Tableau C2. Schémas de pondération pour les simulations du RCP8.5.....	77

1. INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Le projet gouvernemental INFO-Crue, sous la responsabilité du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), vise à outiller le Québec par rapport aux risques d'inondation. Dans ce contexte, Ouranos a reçu une subvention pour réaliser de la recherche et du développement en soutien direct à INFO-Crue sous différents volets. L'un de ces volets porte sur l'évolution du climat et l'impact que cela pourrait avoir sur la cartographie des zones inondables. Or, prévoir l'évolution des crues dans un contexte de changements climatiques est un problème d'une grande complexité qui nécessite la mise en place d'une chaîne de modélisation pouvant couvrir un spectre allant du système climatique à l'échelle globale jusqu'aux impacts hydrologiques à l'échelle locale (Olsson et al., 2016). Les résultats d'une telle chaîne dépendent de plusieurs choix méthodologiques qui se traduisent en incertitude dans les projections futures, autant d'un point de vue climatique qu'hydrologique (Giuntoli et al., 2018; Hawkins & Sutton, 2009).

À l'hiver 2019, 180 scénarios climatiques ont été produits à Ouranos à partir de simulations des ensembles CMIP5 (Taylor et al., 2011), NA-CORDEX (Mearns et al., 2017) et ClimEx (Leduc et al., 2019). Pendant l'été et l'automne 2019, ces scénarios ont été employés en intrant à six plateformes du modèle hydrologique HYDROTEL afin de produire des projections hydrologiques sur 28 035 tronçons de rivière. Ces résultats couvrent la période 1955-2100, seront utilisés pour bâtir l'édition 2021 de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional et serviront à appuyer le projet gouvernemental INFO-Crue.

L'ensemble de simulations climatiques (ESC) créé à l'hiver 2019 tient compte des principales sources d'incertitude présentes dans les intrants climatiques :

- 1) L'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre (GES) dans le futur (van Vuuren et al., 2011);
- 2) La sensibilité climatique des modèles globaux de climat;
- 3) La variabilité naturelle du climat (échantillonnée par de multiples réalisations d'un même modèle climatique);

L'ESC est toutefois constitué d'une multitude de modèles globaux (MCG) et régionaux de climat (MRC), dont certains ne possèdent qu'une seule réalisation, tandis que d'autres, comme CSIRO-Mk3.6.0 ou ClimEx, en possèdent jusqu'à 10 ou 50. De plus, dans l'ensemble NA-CORDEX, deux modèles globaux (CanESM2 et MPI-ESM) pilotent environ la moitié des simulations disponibles. Ce type d'ensemble est souvent interprété comme un « ensemble d'opportunités », c'est-à-dire que l'échantillonnage des simulations dépend en grande partie des ressources et des intérêts de chaque centre de recherche, qui contribuent par un nombre arbitraire de réalisations, de modèles

et de scénarios (Tebaldi & Knutti, 2007). De par la nature même d'un ensemble d'opportunités, toute interprétation probabiliste des résultats de l'ensemble quant aux changements climatiques ou hydrologiques futurs est potentiellement problématique, si les particularités de cet ensemble ne sont pas adéquatement prises en compte. En l'absence de consensus scientifique sur une manière de contourner ce problème, l'approche utilisée par défaut est celle de la démocratie des modèles (« un modèle, un vote »), où tous les modèles sont considérés comme étant équiprobables (Collins et al., 2013).

Plusieurs auteurs ont proposé des alternatives à la méthodologie « un modèle, un vote », dans le but entre autres de parvenir à représenter la variabilité de l'ensemble avec un nombre restreint de simulations. Le critère de convergence des projections futures défini par Giorgi et Mearns (2002), par exemple, accorde moins de poids à un modèle au fur et à mesure que sa projection s'éloigne du consensus des autres modèles. Ceci a pour effet de réduire l'influence des modèles se situant dans les queues de distributions. Bien qu'un fort consensus entre modèles puisse à un certain égard augmenter le niveau de confiance dans les résultats des projections futures, un contre-argument est que la notion de convergence pourrait être interprétée comme le reflet d'un manque d'indépendance entre les modèles (Masson & Knutti, 2011). Une conséquence directe du partage entre les institutions de connaissances, de code informatique et de protocoles de validation est que les modèles climatiques peuvent partager certains types d'erreurs. En réponse à cet enjeu, certains auteurs proposent plutôt une méthodologie contraire et visent plutôt à maximiser la différence entre les projections futures des modèles (Cannon, 2015; Dalelane et al., 2018; Sanderson et al., 2015; Seo et al., 2019). Il s'agit encore d'un sujet vivement discuté et, pour l'instant, il n'y a aucune approche communément acceptée dans la littérature ou dans la communauté scientifique pour traiter le problème de la dépendance des modèles de climat.

Outre cet enjeu de la dépendance des modèles de climat, une problématique supplémentaire associée à l'utilisation d'un ensemble de scénarios climatiques ou hydroclimatiques pour l'adaptation est que ce type d'ensemble n'est souvent pas calibré en fonction de l'habileté des modèles à simuler le climat ou le régime hydrologique observé. Une évaluation de la performance de neuf modèles hydrologiques à base physique sur 1787 bassins versants allant de 10 à 10 000 km² a par exemple identifié que le critère de Nash-Sutcliffe (NSE) médian était inférieur à 0, soit que le débit annuel moyen possédait un meilleur pouvoir prédictif que les neuf modèles hydrologiques combinés (Beck et al., 2016). Dans une telle situation, le signal de changement décrit par ces modèles devrait être jugé peu crédible et leur inclusion dans une analyse d'ensemble pourrait mener à des résultats erronés, voire à de la maladaptation (Krysanova et al., 2018).

La fiabilité d'un scénario futur est généralement basée sur l'hypothèse qu'un scénario ayant une bonne performance en climat récent offrira aussi une telle performance en climat futur. Ceci est en effet une condition nécessaire, mais pas nécessairement suffisante (Krysanova et al., 2018). Cette hypothèse a néanmoins été utilisée à de maintes reprises dans la littérature. Notamment, Christensen et al. (2010) a utilisé plusieurs métriques en lien avec différents processus d'intérêt comme les patrons de circulation à grande échelle, la variabilité spatiale dans la méso-échelle, les distributions de probabilités de différentes variables, ainsi que les tendances historiques, le

cycle annuel et les extrêmes. En combinant ainsi plusieurs métriques représentant différents aspects du système climatique (p. ex. variables climatiques, saisons et régions), les performances générales des modèles peuvent être évaluées en vue d'utiliser cette information pour pondérer les projections climatiques. Bien que l'étude de Christensen et al. (2010) ait mis en évidence le fait que certains modèles performaient généralement mieux que d'autres, la moyenne pondérée de l'ensemble offrait peu d'améliorations par rapport aux observations en comparaison avec la moyenne arithmétique non pondérée. Ce résultat est en accord avec Chen et al. (2017), qui a démontré qu'une pondération basée sur la performance et sur les projections futures de températures et de précipitations offrait peu d'avantages lorsque les sorties du modèle hydrologique étaient analysées. Ce résultat diffère cependant des conclusions de Seo et al. (2019), qui a démontré qu'une sélection basée sur un ensemble d'indicateurs climatiques spécifiques au phénomène étudié (dans ce cas, les crues extrêmes dues à la mousson) permettait de bien capturer la variabilité de l'ensemble avec un nombre limité de modèles et ce, même si les modèles climatiques étaient ensuite utilisés en intrant dans un modèle hydrologique. Un constat général à la combinaison de plusieurs métriques de performance pour trouver les « meilleurs modèles » est que cette approche peut dissimuler une certaine complexité dans les forces et faiblesses des différents modèles. Tel que soulevé par Sanderson et al. (2017), il est peu probable qu'un modèle offre de bonnes performances dans un grand nombre de métriques. La combinaison de plusieurs métriques de performance peut avoir comme effet de diminuer l'impact de la pondération. D'un autre côté, il peut être justifié de mettre une emphase particulière sur les métriques les plus pertinentes pour une application donnée, puisque cela permet souvent de contraindre l'incertitude des projections futures (Christensen et al., 2010; Knutti et al., 2017; Seo et al., 2019). Par exemple, certains modèles climatiques montrent une trop faible couverture de glace de mer en climat présent. Cette sous-estimation du couvert de glace signifie que la glace de mer disparaît très tôt dans le futur, ce qui a pour effet de fausser les projections multi-modèles (Knutti et al., 2017). En hydrologie, un problème similaire pourrait se présenter avec la crue printanière si l'équivalent en eau de la neige est déjà fortement biaisé en période de référence (Krysanova et al., 2018).

L'approche de pondération développée par Sanderson et al., 2015 est une méthodologie intéressante qui permet d'appliquer un poids aux modèles climatiques ou hydroclimatiques à partir d'analyses faisant appel aux enjeux discutés précédemment, soit : 1) la performance du modèle en climat historique, et 2) le caractère « unique » de ce modèle par rapport aux autres simulations de l'ensemble. En appliquant cette méthode, un modèle obtiendra un poids plus faible s'il montre une forte différence par rapport au climat observé, et si l'information fournie par ce dernier est fortement dupliquée dans l'ensemble. Cette méthode a été appliquée dans d'autres études et a démontré une certaine flexibilité quant à l'impact du schéma de pondération, en fonction de deux paramètres reliés au « rayon de similarité » entre deux modèles, et entre un modèle et les observations (Brunner et al., 2020; Dalelane et al., 2018; Knutti et al., 2017; Merrifield et al., 2020; Sanderson et al., 2017). Cette approche permet aussi de combiner des métriques en lien avec plusieurs variables, ainsi que de leurs statistiques (climatologie, variabilité interannuelle, tendances).

Dans ce contexte où plusieurs méthodologies de complexité variable existent et où aucun consensus n'a été établi, il devient important, voire essentiel, de connaître la sensibilité des résultats finaux face à ces choix qui peuvent paraître arbitraires, mais qui ont le potentiel d'avoir un impact significatif sur le signal de changements climatiques.

1.2 OBJECTIFS

En l'absence de consensus scientifique sur la manière de pondérer un ensemble d'opportunités tel que celui produit pour INFO-Crue, les objectifs du projet ont été séparés en deux volets.

Objectif général #1 : Établir un cadre de pondération de l'ensemble hydroclimatique qui soit apte à être utilisé à des fins réglementaires et pour une première version de l'édition 2021 de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional.

Objectif spécifique 1.1 : À l'aide de métriques robustes et connues de la communauté scientifique, évaluer la performance en période historique des simulations hydroclimatiques, notamment pour les indicateurs de crues maximales annuelles.

Objectif spécifique 1.2 : Déterminer s'il serait justifiable de retirer certaines simulations hydroclimatiques sur la base de leur performance hydrologique historique.

Objectif spécifique 1.3 : Sur la base de l'information disponible sur les modèles climatiques, bâtir plusieurs schémas de pondération alternatifs à la méthodologie « 1 modèle, 1 vote », mais qui soient robustes, défendables et simples à appliquer.

Objectif spécifique 1.4 : Déterminer l'impact des différents schémas de pondérations définis en 1.3 sur le signal de changements climatiques.

Objectif général #2 : Évaluer, pour chacun des tronçons de rivière et chacun des horizons temporels, la performance et le niveau de duplication de l'information contenue dans l'ensemble hydroclimatique.

L'Objectif 2 se veut une approche plus complexe, dont le but premier sera d'évaluer l'impact réel d'un tel schéma sur les résultats produits par la DEH, en comparaison aux différentes alternatives plus simples qui auront été explorées dans le cadre de l'Objectif 1. Les travaux sont en cours pour l'Objectif 2, mais ce rapport ne présente que les conclusions de l'Objectif 1.

1.3 DONNÉES DISPONIBLES

L'ensemble des simulations globales et régionales disponibles pour le Québec en date du 1^{er} février 2019 ont été extraites et fournies à la DEH pour INFO-Crue. Les simulations globales proviennent du *Fifth Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5; Taylor et al. (2011)). Seuls les scénarios RCP (*Representative Concentration Pathway*) 4.5 et 8.5 ont été retenus, puisqu'ils sont utilisés pour la grande majorité des simulations disponibles et que l'évolution projetée du

climat se situe présentement quelque part entre ces deux scénarios (Hausfather & Peters, 2020). Les simulations régionales, quant à elles, proviennent du domaine nord-américain du *COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment* (CORDEX-NA; Mearns et al. (2017)). L'ensemble CORDEX a été bonifié à l'aide de simulations du CRCM5 réalisées à Ouranos et qui suivent un protocole similaire à CORDEX-NA. Pour les fins de simplicité, et puisque ces simulations sont maintenant intégrées à CORDEX, elles seront analysées conjointement à l'ensemble régional dans ce rapport. Les cinquante membres du grand ensemble ClimEx ont également été fournis à la DEH (Leduc et al., 2019). L'ensemble ClimEx a été créé en pilotant le modèle régional CRCM5 avec les 50 membres du grand ensemble CanESM2 (Sigmond & Fyfe, 2016). Les Tableaux 1 et 2 présentent la liste de modèles et le nombre de simulations disponibles.

Tableau 1. Simulations régionales utilisées pour INFO-Crue

Centre de modélisation	Modèle régional	Pilote	Nombre de membres		Résolution de la grille atmosphérique (degrés)
			RCP4.5	RCP8.5	
Université du Québec à Montréal (UQÀM)	CRCM5	CanESM2	1	1	0.44
		MPI-ESM-LR	1		0.44
		MPI-ESM-MR		1	0.44
Ouranos	CRCM5	CanESM2		50*	0.11
			1	5	0.22
		MPI-ESM-LR	1	1	0.22
		CNRM-CM5	1	1	0.22
		GFDL-ESM2M	1	1	0.22
Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)	RCA4	CanESM2	1	1	0.44
		EC-EARTH	1	1	0.44
Iowa State University (ISU) National Center for Atmospheric Research (NCAR)	RegCM4	MPI-ESM-LR		1	0.22
				1	0.44
		GFDL-ESM2M		1	0.22
				1	0.44
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	CanRCM4	CanESM2	1	1	0.22
			1	1	0.44
Danish Meteorological Institute (DMI)	HIRHAM5	EC-EARTH	1	1	0.44
Total			11	19 + 50	

* Les 50 simulations CanESM2_CRCM5 à 0.11° font partie de l'ensemble ClimEx.

Errata : Une simulation MPI-ESM-MR_CRCM5-UQAM_RCP4.5 avait originellement été fournie à la DEH, mais il s'est avéré qu'il s'agit d'une erreur d'archivage (doublon de la simulation pilotée par MPI-ESM-LR) détectée par l'UQÀM en 2018 et retirée de CORDEX.

Tableau 2. Simulations globales utilisées pour INFO-Crue

Centre de modélisation	Modèle	Nombre de membres		Résolution de la grille atmosphérique (degrés)	
		RCP4.5	RCP8.5	Latitude	Longitude
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation / Bureau of Meteorology (CSIRO-BOM)	ACCESS1.0	1	1	1.25	1.875
	ACCESS1.3	1	1	1.25	1.875
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration (BCC)	BCC-CSM1.1	1	1	2.7906	2.8125
	BCC-CSM1.1(m)	1	1	1.1215	1.125
College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University (GCESS)	BNU-ESM	1	1	2.7906	2.8125
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	CanESM2	5	5	2.7906	2.8125
Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (CMCC)	CMCC-CESM	-	1	3.4431	3.75
	CMCC-CM	1	1	0.7484	0.75
	CMCC-CMS	1	1	1.8653	1.875
Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS)	CNRM-CM5	1	1	1.4008	1.40625
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence (CSIRO-QCCCE)	CSIRO-Mk3.6.0	10	10	1.8653	1.875
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences / Tsinghua University (LASG-CESS)	FGOALS-g2	1	1	2.7906	2.8125
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA GFDL)	GFDL-CM3	3	1	2	2.5
	GFDL-ESM2G	1	1	2.0225	2
	GFDL-ESM2M	1	1	2.0225	2
NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA GISS)	GISS-E2-H	1	-	2	2.5
	GISS-E2-R	2	-	2	2.5
Institute for Numerical Mathematics (INM)	INM-CM4	1	1	1.5	2
Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)	IPSL-CM5A-LR	4	4	1.8947	3.75
	IPSL-CM5A-MR	1	1	1.2676	2.5
	IPSL-CM5B-LR	1	1	1.8947	3.75
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo) / National Institute for Environmental Studies / Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	MIROC-ESM	1	1	2.7906	2.8125
	MIROC-ESM-CHEM	1	1	2.7906	2.8125
	MIROC5	3	3	1.4008	1.40625
Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	MPI-ESM-LR	3	3	1.8653	1.875
	MPI-ESM-MR	3	1	1.8653	1.875
Meteorological Research Institute (MRI)	MRI-CGCM3	1	1	1.12148	1.125
	MRI-ESM1	-	1	1.12148	1.125
Norwegian Climate Centre (NCC)	NorESM1-M	1	1	1.8947	2.5
Total		52	47		

1.3.1 Réalisations multiples connues

Dans plusieurs cas, les centres de modélisations ont produit plusieurs réalisations du même modèle climatique afin d'évaluer l'influence de la variabilité naturelle. Ces réalisations sont explicitement identifiées dans CMIP5 et CORDEX à l'aide de la nomenclature "rip", où "r" ("réalisation") représente le numéro du membre. CanESM2, par exemple, possède des membres nommés "r1i1p1" à "r5i1p1" : ce sont cinq membres qui peuvent être jugés équivalents et regroupés pour des fins statistiques. Dans ce rapport, la notion de « réalisations explicites » fait donc référence à la nomenclature "rip" et aux simulations qui ont été explicitement identifiées comme provenant du même modèle climatique. Un changement mineur dans un modèle (e.g. changement dans un paramétrage) entraîne un changement de la valeur p ("physique").

Le large ensemble CanESM2, et par conséquent ClimEx, utilise une nomenclature "r-rpi" légèrement différente, puisque les 50 membres de cet ensemble sont créés en 1950 à partir des 5 membres CanESM2 utilisés pour CMIP5 (Figure 1). Pour les fins de l'analyse des données INFO-Crue, cela signifie que les cinquante membres de ClimEx ont été pilotés par des réalisations de CanESM2 uniques, qui ne se trouvent ni dans CMIP5, ni dans CORDEX.

Le Tableau 3 indique la liste de modèles pour lesquels plusieurs réalisations ont été produites.

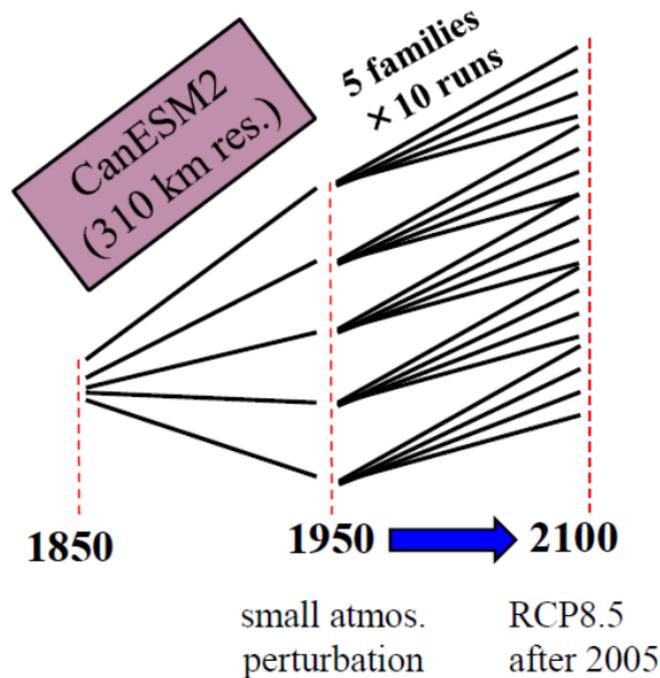


Figure 1. Schéma de modélisation utilisé pour générer les 50 membres de CanESM2-LE qui ont servi à piloter ClimEx (tiré de : <https://www.climex-project.org/en/module-climate>). Les 5 lignes (membres) entre 1850 et 1950 sont les simulations CanESM2 utilisées pour CMIP5 et pour piloter les modèles régionaux de CORDEX.

Tableau 3. Modèles ayant produit plusieurs réalisations

Modèle	Nombre de réalisations	
	RCP4.5	RCP8.5
CanESM2	5	5
CanESM2_CRCM5-Ouranos		5
CanESM2_CRCM5-Ouranos (ClimEx)		50
CSIRO-Mk3.6.0	10	10
GFDL-CM3	3	
IPSL-CM5A-LR	4	4
MIROC5	3	3
MPI-ESM-LR	3	3
MPI-ESM-MR	3	

1.3.2 Autres regroupements possibles

Le tableau à l'Annexe A regroupe les modèles qui proviennent d'un même centre de modélisation climatique ou, dans le cas des modèles régionaux, qui ont le même pilote. Un travail a été effectué afin de tenter d'identifier les différences entre ces modèles. Une analyse des composantes a été effectuée de manière sommaire pour les modèles provenant d'un même centre, ACCESS1.0 et ACCESS1.3 par exemple, mais pas entre les différentes institutions.

Trois grandes catégories ont été identifiées :

A. Même modèle, mais résolutions différentes

Il s'agit d'exemples tels que CanESM2_CanRCM4, où la simulation existe à deux résolutions différentes (0.22° et 0.44°) et où, à notre connaissance, il n'existe aucune différence dans la physique ou dans le paramétrage du modèle.

B. Versions différentes du même modèle

Il s'agit d'exemples tels que ACCESS1.0 et ACCESS1.3, où deux versions d'un même modèle existent. Généralement, le saut dans le numéro de version indique l'importance des changements. Dans le cas d'ACCESS, par exemple, la version utilisée pour CMIP6 se nomme maintenant ACCESS-CM2 (version 2.0).

Les versions d'un même modèle pour lesquels certains paramétrages diffèrent, tel que les deux versions du modèle IPSL-CM5, IPSL-CM5A et IPSL-CM5B, ont également été placés dans cette catégorie.

Finalement, dans le cas de CMIP5, certains « modèles climatiques » (*Climate Model*) ont été utilisés comme base pour construire des « modèles de système terrestre » (*Earth System Model*), dont l'ajout principal est une modélisation explicite du cycle du carbone. Un schéma est présenté à la Figure 2. Un exemple de ceci est MRI-ESM1, qui a été construit à partir de MRI-CGCM3.

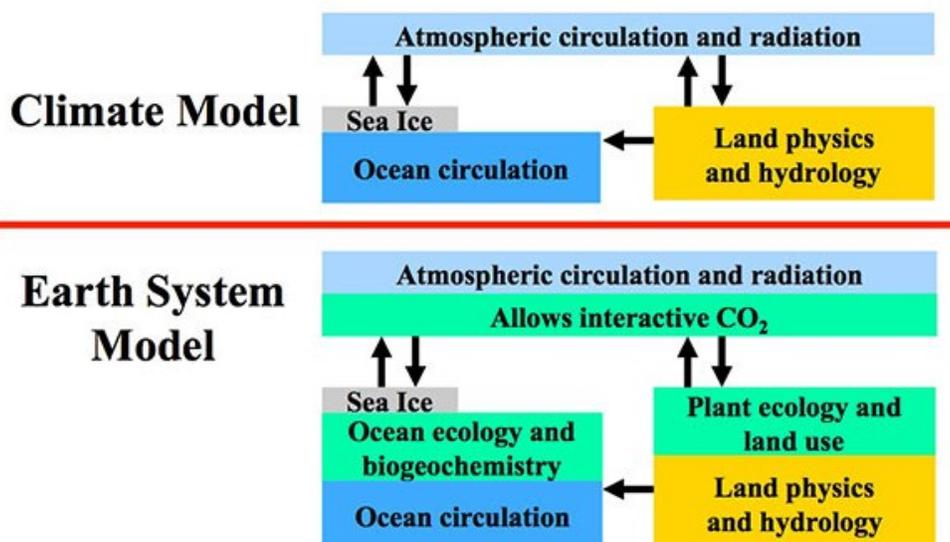


Figure 2. Différence entre un modèle climatique et un modèle de système terrestre (Source : <https://soccom.princeton.edu/content/what-earth-system-model-esm>)

C. Pilote et modèle régional

Les simulations régionales se démarquent généralement peu de leur pilote pour les projections de température, mais peuvent avoir des différences significatives pour les précipitations. Les crues au Québec étant généralement le résultat de la combinaison des températures et des précipitations (e.g. fonte du couvert neigeux), les projections pourraient être biaisées en faveur des pilotes ayant alimenté de nombreux modèles régionaux. Cet aspect sera exploré dans le rapport.

1.4 STATIONS

La plupart des analyses dans ce rapport ont été réalisées aux 280 tronçons où sont situées des stations hydrométriques, sauf là où stipulé autrement. Cela a été effectué d'une part afin de réduire le temps de calcul nécessaire et ainsi pouvoir comparer le plus grand nombre de schémas de pondération, et d'autre part parce qu'en étant près d'une station, une confiance accrue peut être attribuée aux simulations du Portrait hydrologique lorsqu'une comparaison avec les données historiques est nécessaire.

Les 280 stations hydrométriques sont distribuées à travers tout le Québec méridional, mais avec un biais en faveur du côté sud du fleuve Saint-Laurent (Figure 3). Cet échantillon de tronçons est

également biaisé en faveur des rivières de relativement petite taille ($< 1000 \text{ km}^2$), avec très peu de tronçons dépassant $10\,000 \text{ km}^2$ (Figure 4).

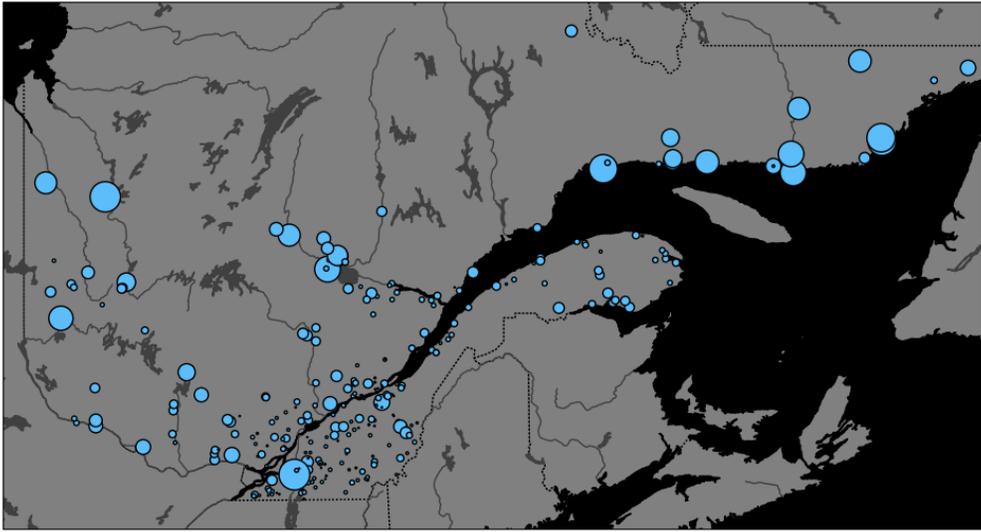


Figure 3. Distribution géographique des 280 tronçons de rivière utilisées pour les fins de l'analyse. La taille des points bleus est fonction de l'aire drainée.

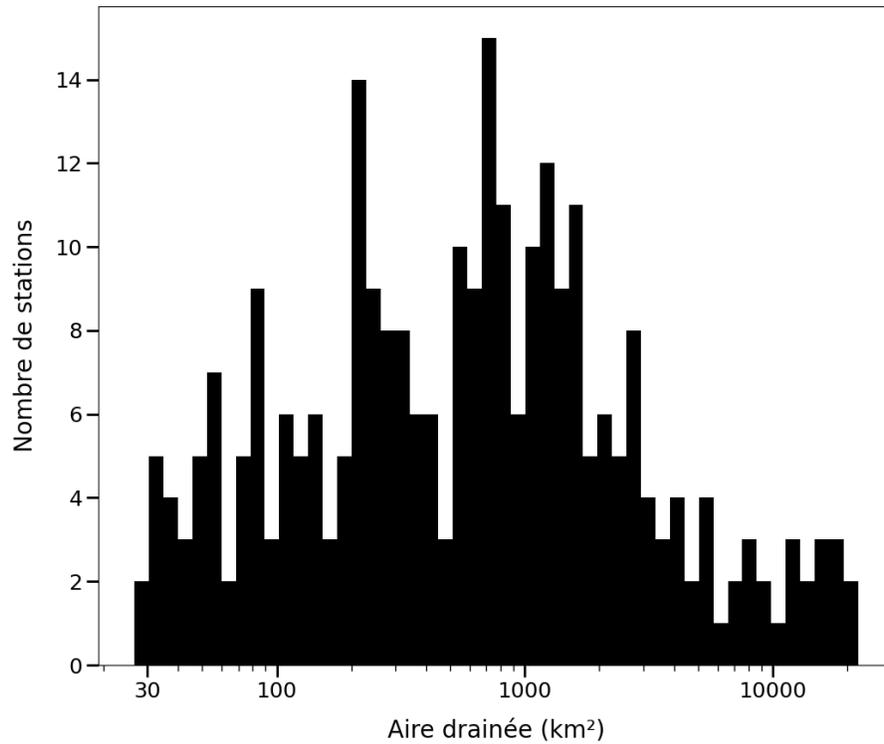


Figure 4. Histogramme de l'aire drainée par les 280 tronçons de rivière où se trouvent des stations hydrométriques.

2.PERFORMANCE DES SIMULATIONS

2.1 MÉTHODOLOGIE

L'analyse de la performance des simulations hydrologiques a été réalisée afin d'évaluer l'adéquation des modèles climatiques comme source de données d'entrée pour la modélisation hydrologique. Cette évaluation a utilisé comme produit de référence le Portrait hydrologique produit par la DEH, qui consiste en six plateformes hydrologiques HYDROTEL légèrement différentes pilotées par des observations météorologiques passées, pour le sud du Québec.

Ce produit de référence a été comparé aux résultats de la modélisation hydrologique effectuée avec les mêmes six plateformes, mais piloté avec des variables d'état atmosphériques simulées par les modèles climatiques. L'objectif de la détermination de la performance était de contrôler la composition de l'ensemble de simulations climatiques INFO-Crue d'un point de vue de leur performance hydrologique, ce qui peut être fait soit en influençant le poids des simulations pour le calcul des différentes statistiques, soit en éliminant certains modèles climatiques individuels ou certaines simulations de l'ensemble sur la base d'une performance minimale requise. Différents indicateurs hydrologiques peuvent être considérés à cet effet, mais ils doivent être appropriés dans leur ensemble pour parvenir à une estimation et à une évaluation adéquate à l'échelle de la zone d'étude, soit le sud de Québec.

Comme cette analyse vise spécifiquement à appuyer la DEH dans le cadre d'INFO-Crue, les indicateurs hydrologiques représentant les crues de différentes récurrences ont été utilisés pour mesurer la performance des simulations hydroclimatiques en période historique. Ceux-ci ont été regroupés selon les périodes "annuelle" (AN), "hiver-printemps" (HP) et "été-automne" (EA). Pour ces trois périodes, les indicateurs de crues de récurrence de 2, 5, 10, 20, 100 et 350 ans ont été considérés (Q1MAX2*, Q1MAX5*, Q1MAX10*, Q1MAX20*, Q1MAX100*, Q1MAX350*). Les autres indicateurs, tels que les étiages, les volumes de crue et les indicateurs mensuels, n'ont pas été pris en compte.

Les écarts entre les observations (Portrait hydrologique - *obs*) et les simulations hydroclimatiques (*sim*) pour leurs indicateurs (*Ind*) respectifs ont été déterminés en utilisant l'erreur quadratique moyenne du débit spécifique (*specific discharge* – *SpecDisc*).

$$SpecDisc_{Ind} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{sim_i - obs_i}{A_i} \right)^2}$$

Dans l'équation, A_i dénote la superficie du bassin versant i . Tel que proposé par Merrifield et al. (2020), le *SpecDisc* de chaque indicateur est normalisé par $((SpecDisc_{min} + SpecDisc_{max}) / 2)$ pour permettre la combinaison des indicateurs. Afin d'évaluer la sensibilité des résultats à cette métrique, les performances ont également été comparées aux résultats obtenus avec deux autres métriques, soient l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur relative quadratique moyenne

(RMSRE). Même si le choix de la métrique a démontré exercer une influence sur les résultats spécifiques, les principales conclusions ne sont peu ou pas affectées. Par conséquent, et afin de simplifier la lecture de ce rapport, la métrique "*SpecDisc*" basée sur le débit spécifique a été préférée pour l'analyse complète des résultats, puisque cette métrique prend mieux en compte le fait que les volumes de ruissellement varient considérablement en magnitude dans le domaine d'étude en raison de bassins versants de tailles très différentes.

Finalement, puisque la résolution spatiale des modèles climatiques varie considérablement ($\sim 0,11^\circ$ à $\sim 3,75^\circ$; voir Tableaux 1 et 2) et que le ratio entre la taille des mailles d'un modèle climatique et d'un bassin versant donnés pourrait avoir un impact significatif sur la performance des modèles, la sensibilité des résultats et des conclusions à la taille des bassins versants a aussi été étudiée en répétant les analyses sur différentes classes de tailles de bassin versant. Puisque les conclusions principales ne sont pas impactées par cette analyse approfondie, ces figures sont plutôt illustrées à l'Annexe B.

2.1.1 Évaluation de la performance des simulations hydroclimatiques et identification des modèles ou simulations de faible performance

L'approche utilisée pour déterminer de façon objective les modèles ou les simulations à exclure dans l'ensemble, en raison d'une performance trop faible, est basée sur les travaux de Knutti et al. (2017) et de Merrifield et al. (2020). Selon cette approche, il est d'abord nécessaire de déterminer les critères de qualité et de performance pertinents sur la base desquels cette exclusion peut avoir lieu. Parmi les indicateurs de crue mentionnés précédemment, la préférence a été donnée à ceux qui peuvent être mesurés avec une bonne représentativité en période historique. Les indicateurs de crue centennale et 350 ans ont ainsi été exclus. De plus, les indicateurs hydrologiques relatifs à la crue maximale annuelle (AN) dans le sud du Québec sont principalement dominés par l'événement de crue printanière, qui est déjà suffisamment couverte par les indicateurs "hiver-printemps" (HP). Or, dans un contexte de changements climatiques, il est pertinent d'également évaluer la performance des simulations hydroclimatiques pour la crue "été-automne" (EA), puisqu'il est attendu que les événements convectifs s'intensifient dans le futur. Ainsi, l'identification des modèles ou des simulations de faible performance a été réalisée à partir de 8 indicateurs : Q1MAX2HP, Q1MAX5HP, Q1MAX10HP, Q1MAX20HP, Q1MAX2EA, Q1MAX5EA, Q1MAX10EA, Q1MAX20EA. La sélection a ensuite été évaluée avec les indicateurs annuels, ainsi qu'avec les indicateurs de récurrence 100 et 350 ans.

Pour déterminer les simulations peu performantes, deux approches ont été testées. La première consiste à ne sanctionner que les modèles de circulation générale (MCG), tandis que la deuxième évalue toutes les simulations individuelles (régionales et globales). Pour ces deux méthodes, les « n » simulations les moins performantes pour chacun des 8 indicateurs sont d'abord identifiées, puis la fréquence d'apparition des modèles (ou des simulations) parmi ces 8 indicateurs est déterminée. Comme les fréquences d'occurrence diffèrent entre les deux méthodologies, une approche différenciée a été adoptée à l'étape subséquente.

Pour éliminer les modèles, le critère « un MCG apparaît plus de 4 fois parmi les $8*n$ simulations les moins performantes » a été utilisé. Ce décompte inclut autant les simulations d'un MCG que les simulations régionales où un MCG est utilisé comme pilote. Ce critère peut être interprété comme « le modèle performe mal pour environ la moitié des indicateurs ». Seules les simulations globales sont ainsi identifiées et enlevées par cette approche, puisqu'il est posé comme hypothèse que la résolution spatiale grossière des simulations CMIP5 peut mener à des pertes importantes en performance hydrologique, même après post-traitement. Le nombre de simulations enlevé par cette approche varie en fonction de n et du nombre de simulations d'un modèle dans l'ensemble. **Note** : une analyse similaire pourrait être réalisée avec l'option d'éliminer autant les MCGs que les MRCs. Toutefois, il est peu probable que cette alternative modifie les résultats et les conclusions présentées dans ce rapport.

Dans l'approche qui vise l'élimination des simulations individuelles, le critère « la simulation apparaît 3 fois ou plus parmi les $8*n$ simulations les moins performantes » a plutôt été utilisé. Ce critère peut être interprété comme « la simulation performe mal pour au moins 3 indicateurs sur 8 ». Le nombre de simulations enlevées par cette approche varie en fonction de n , et pénalise environ $1.5*n$ simulations.

2.1.2 Impact de l'exclusion de simulations ou de modèles sur le biais et sur la distribution des signaux de changements climatiques

Afin de tester l'efficacité de la procédure d'exclusion des modèles décrite à la Section 2.1.1, une dernière analyse a consisté à étudier comment les distributions des biais et des signaux de changements climatiques sont impactés lorsque des simulations ou des modèles climatiques sont retirés de l'ensemble. À cette fin, les modèles les moins performants ont été identifiés, pour un nombre d'exclusion n variable, et les nouvelles distributions ont été comparées entre les ensembles réduits et l'ensemble complet.

2.2 RÉSULTATS

2.2.1 Performance des ensembles climatiques en fonction des indicateurs, des périodes d'analyse et des plateformes de simulation hydrologique

La **Figure 5** illustre en exemple l'évaluation de la performance pour l'indicateur Q1MAX20AN (crue maximale annuelle de récurrence 20 ans). Avec une accumulation de simulations ClimEx (jaune) et CORDEX (bleu) à gauche, on peut constater que, dans ce cas précis, les simulations effectuées avec les MRCs performent généralement mieux que les simulations pilotées par des MCGs de l'ensemble CMIP5 (rouge). Cependant, quelques simulations des modèles globaux ont des biais semblables aux simulations les plus performantes et, plus généralement, les biais

semblent comparables entre la meilleure simulation et la 170^e (environ), après quoi le biais augmente rapidement. D'ailleurs, alors que les simulations avec les biais les plus grands sont majoritairement celles de l'ensemble CMIP5, il se trouve également des simulations ClimEx, à haute résolution, parmi les candidats de faible performance (à droite complètement).

Ce type de graphique est réutilisé pour la suite de ce rapport afin d'illustrer les différences de performance détectées en fonction des indicateurs, des périodes d'analyse et des plateformes de simulation hydrologique.

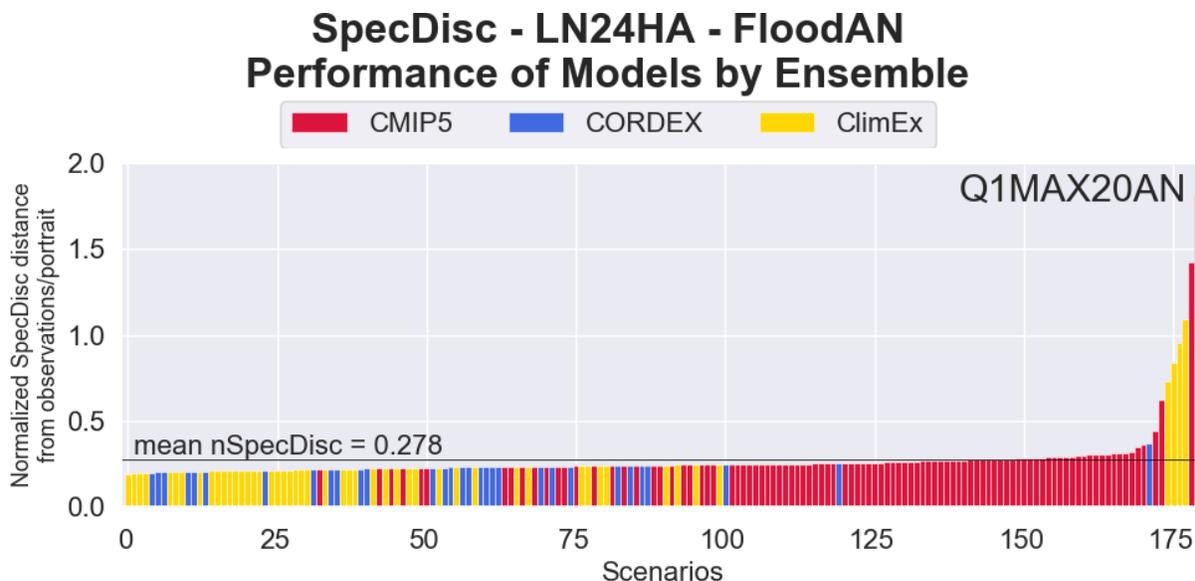


Figure 5. Performance de 180 simulations hydroclimatiques pour l'indicateur Q1MAX20AN moyenné sur toutes les tailles de bassin versant et pour la plateforme LN24HA. Les simulations sont triées par leur performance évaluée comme l'erreur quadratique moyenne du débit spécifique par rapport au Portrait hydrologique. Cette performance diminue de la gauche vers la droite. L'appartenance des simulations aux trois ensembles CMIP5, CORDEX et ClimEx est marquée par la couleur. La ligne horizontale indique la valeur moyenne des biais.

Dans le but d'obtenir une première appréciation de la répartition des performances en fonction de la récurrence des crues et de la période de l'année pour laquelle l'indicateur est calculé, la **Figure 6** illustre le triage des simulations pour 6 indicateurs de crue (lignes – crues de récurrence 2, 5, 10, 20, 100 et 350 ans) et pour les périodes "annuelle" (AN), "hiver-printemps" (HP) et "été-automne" (EA) (colonnes), pour la plateforme hydrologique LN24HA. À noter que l'impact de la taille des bassins versants sur le classement n'est illustré que dans les graphiques plus complexes à l'Annexe B.

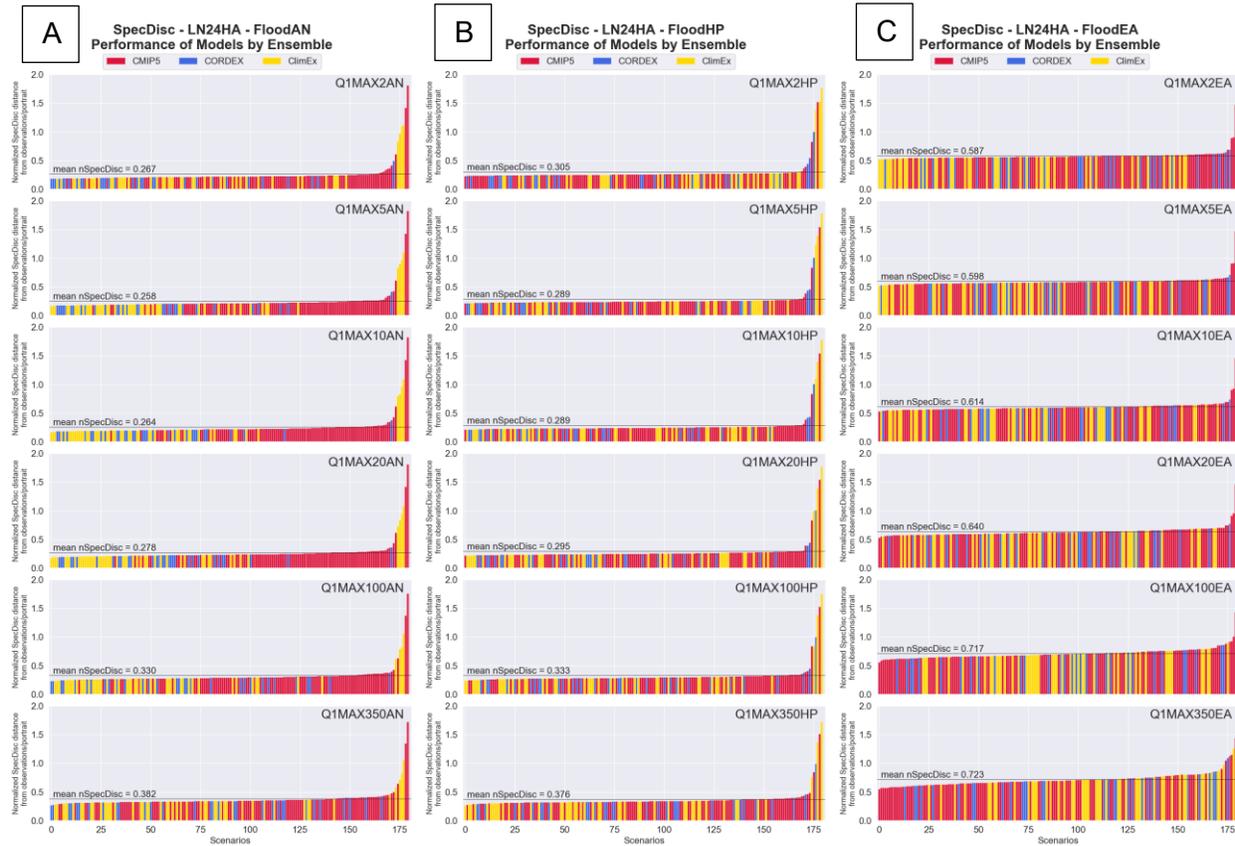


Figure 6. Performance de 180 simulations hydroclimatiques en fonction des indicateurs Q1MAX2*, Q1MAX5*, Q1MAX10*, Q1MAX20*, Q1MAX100*, Q1MAX350* (lignes). Les colonnes affichent les périodes d'analyse 'annuelle' (A), 'hiver-printemps' (B), et 'été-automne' (C). Les couleurs indiquent l'appartenance des simulations aux trois ensembles CMIP5, CORDEX et ClimEx. Seule la plateforme LN24HA est montrée. Voir l'Annexe B pour les résultats des autres plateformes.

On peut constater que l'ordre des simulations par rapport à leur appartenance aux trois ensembles climatiques est variable, notamment entre les trois périodes de l'année (AN, HP, EA) utilisées pour calculer les crues. Pour les indicateurs annuels (panneau A), les simulations régionales (CORDEX, ClimEx) performant généralement mieux, quoique cela est moins vrai pour les indicateurs Q1MAX2AN et Q1MAX350AN. Pour les indicateurs HP (panneau B), on constate une distribution plus uniforme, puisque plus de simulations CMIP5, donc de modèles globaux, semblent bien performer. En été-automne (panneau C), on constate que même pour les indicateurs de récurrence faible (20, 100, 350 ans), plusieurs simulations CMIP5 se situent dans les plus performantes. À noter qu'avec une plus grande incertitude sur les observations des indicateurs de crue de récurrence de 20 ans et plus, l'estimé de la performance des simulations et l'ordre des simulations est potentiellement impacté par des artefacts dus aux valeurs observées moins fiable.

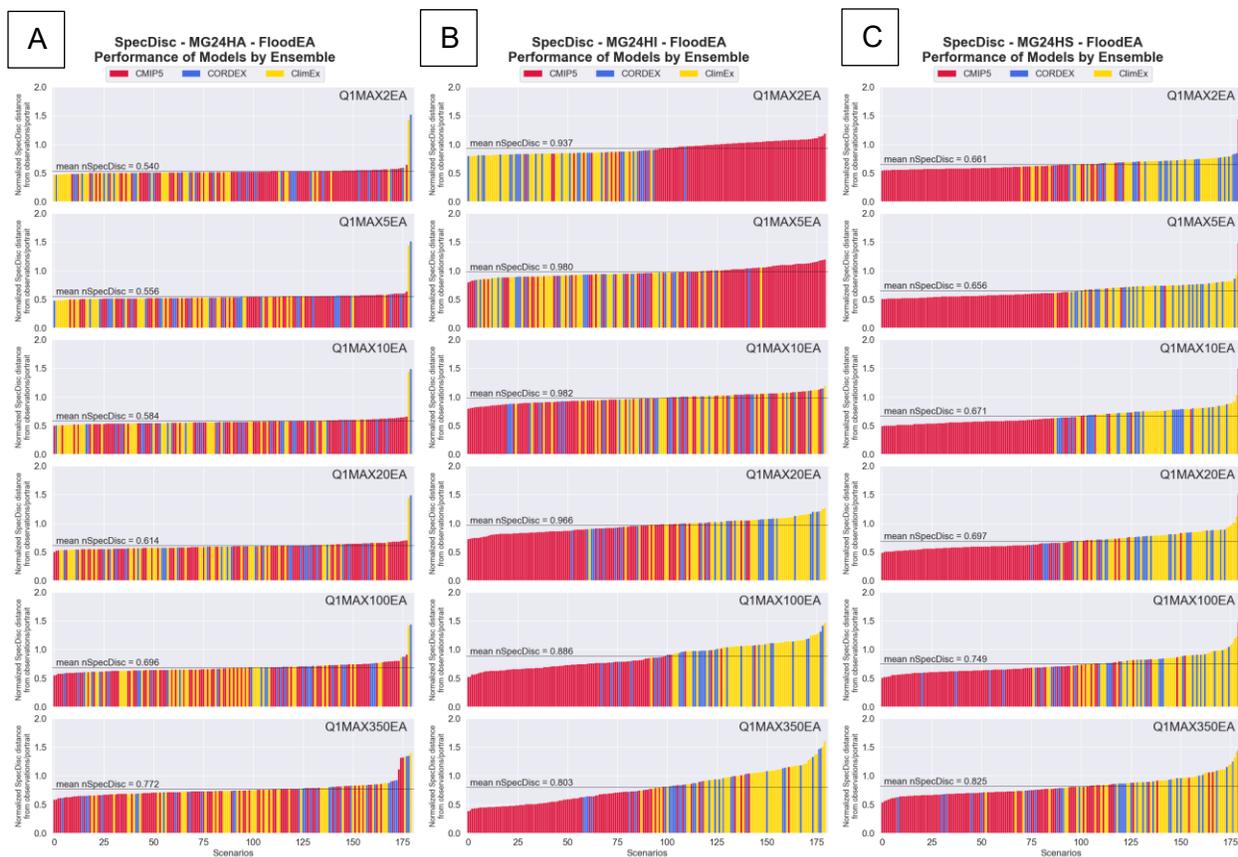


Figure 7 Comme la Figure 6C mais pour les plateformes MG24HA (A), MG24HI (B) et MG24HS (C)

La **Figure 7** illustre la performance des simulations selon différentes plateformes de simulation hydrologique, pour la période EA. On remarque ici que les résultats montrés à la **Figure 6** pour la plateforme LN24HA sont réordonnés. Si l'on considère par exemple les simulations hydroclimatiques provenant de CMIP5 (rouge), on voit qu'avec la plateforme MG24HA (panneau A) la performance des MCGs est répartie sur tout le spectre des biais, alors que les plateformes MG24HI et MG24HS (panneaux B et C) illustrent une différence claire dans la performance des ensembles climatiques. Pour ces deux plateformes, la quasi-totalité des simulations CMIP5 ont un biais plus faible que celui des MRCs. Toutefois, ce constat s'inverse pour la plateforme MG24HI (panneau B) et les indicateurs de crue de récurrences de 2 et 5 ans, où les simulations CMIP5 se retrouvent plutôt à droite du graphique. Une meilleure compréhension des plateformes et de la manière dont elles gèrent les pluies d'été pourraient permettre de comprendre le comportement particulier affiché par la plateforme MG24HI.

De façon similaire, si l'on analyse le tri des performances en fonction de la taille des bassins versants (Annexe B), on peut, dans certains cas, constater une meilleure performance des simulations à haute résolution (CORDEX - bleu, ClimEx – jaune). Or, alors qu'il semblerait intuitif que les intrants météorologiques à plus fine échelle produisent de meilleurs résultats sur les petits bassins versants, l'Annexe B illustre à quel point un constat qui a priori pourrait paraître simple n'est pas stable et varie fortement en fonction de l'indicateur, de la période de l'année et de la plateforme de modélisation hydrologique.

2.2.2 Identification des simulations de faible performance

Tel qu'indiqué précédemment à la Section 2.1.1, pour chaque plateforme, l'identification des simulations de faible performance a été réalisée sur la base de 8 indicateurs : Q1MAX2HP, Q1MAX5HP, Q1MAX10HP, Q1MAX20HP, Q1MAX2EA, Q1MAX5EA, Q1MAX10EA, Q1MAX20EA. La **Figure 8** illustre le résultat pour $n=10$, où les indicateurs hydrologiques sont encadrés en rouge. Parmi ces 80 (8x10) simulations les moins performantes, une simulation donnée est éliminée si elle « apparaît 3 fois ou plus ». Celles-ci sont marquées en couleur, dans la figure.

On peut constater que les tris sont différents selon les indicateurs et qu'une simulation identifiée comme étant moins performante (colorée) n'est pas systématiquement faible pour tous les indicateurs. Les simulations à éliminer apparaissent ainsi à travers une grande partie du spectre de biais de l'ensemble. L'approche ne fonctionne bien que pour les 8 indicateurs utilisés pour déterminer les simulations peu performantes, malgré une certaine dispersion, ce qui démontre un faible potentiel de généralisation. D'ailleurs, il peut être observé que certaines des simulations identifiées comme peu performantes semblent très peu biaisées pour les indicateurs non considérés dans la calibration, comme Q1MAX100EA, Q1MAX350EA (panneau C) et les indicateurs annuels (panneau A).

Dans le contexte d'INFO-Crue, ces indicateurs de faible récurrence sont d'un intérêt particulier et l'analyse effectuée ici devrait permettre de dévoiler des candidats qui, si enlevés de l'ensemble, permettraient de réduire le biais total pour ces indicateurs. Or, les résultats présentés à la **Figure 8** démontrent qu'une « performance » basée sur les indicateurs de crues de fortes récurrences, qui peuvent être observés et validés avec une certaine confiance, ne semble pas permettre d'adéquatement généraliser l'information aux autres indicateurs. Nonobstant la difficulté à quantifier ou à interpréter la notion de « performance » pour des indicateurs comme les crues de récurrence 100 ou 350 ans, la sélection effectuée sur les crues saisonnières ne parvient même pas à identifier les plus mauvaises simulations pour les crues annuelles de récurrence 2 à 20 ans, alors que cette information devrait intrinsèquement exister dans l'information des indicateurs HP (compte-tenu de la prépondérance des crues printanières au Québec).

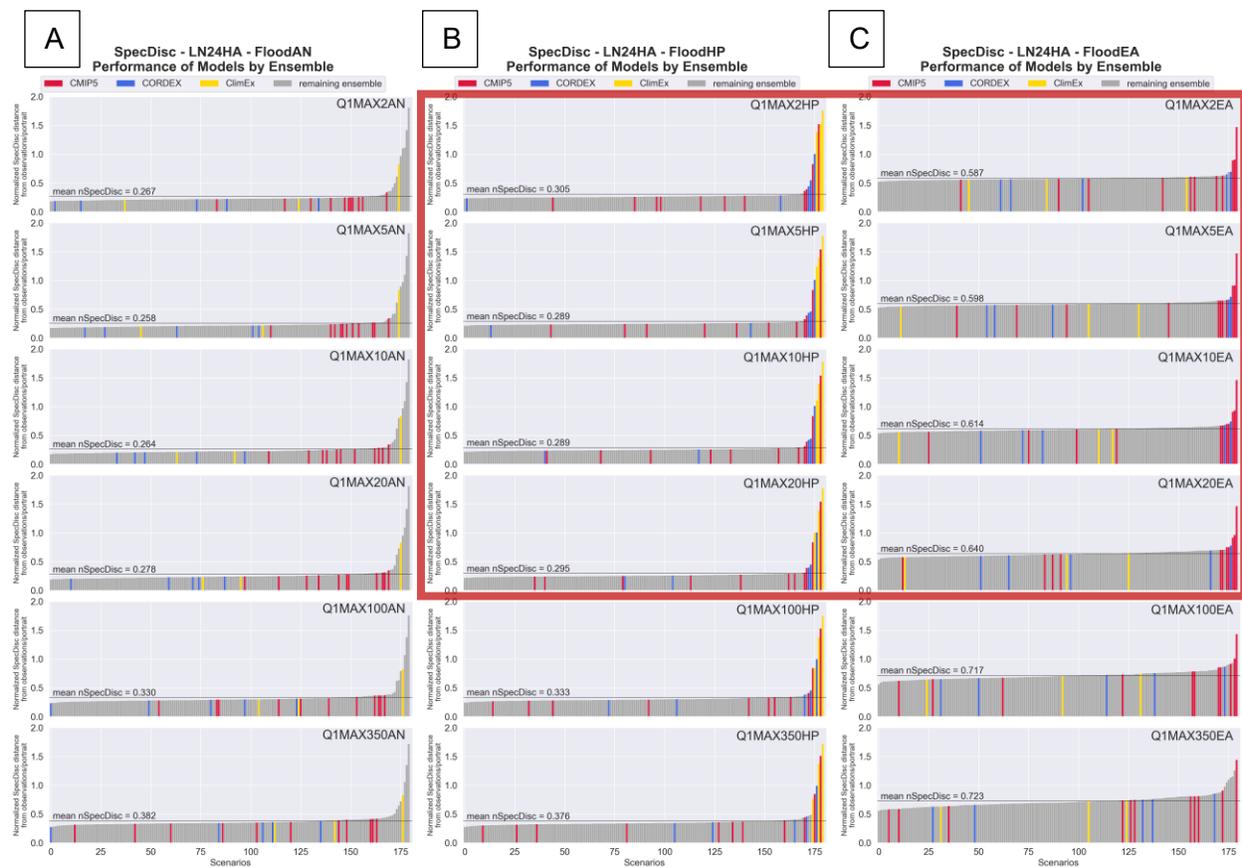


Figure 8. Identification des simulations peu performantes dans l'ensemble, basé sur 8 indicateurs (carré rouge) et la plateforme LN24HA. Les simulations sont identifiées si elles « apparaissent 3 fois ou plus parmi les 8x10 simulations les moins performantes ».

Une analyse équivalente à la Figure 8 a été effectuée, mais cette fois-ci en sélectionnant des modèles plutôt que des simulations individuelles. Les résultats sont illustrés à la **Figure 9**. Cette approche vise uniquement les simulations hydroclimatiques produites à l'aide de MCG, donc même si les simulations provenant de MRCs peuvent servir à identifier des pilotes moins performants, les simulations régionales elles-mêmes ne sont pas affectées. Dans cette approche, un modèle possédant des simulations qui se retrouvent « plus de 4 fois parmi les 80 (8x10) simulations les moins performantes » est identifié et considéré comme non performant. Cette approche pénalise donc toutes les simulations d'un modèle, plutôt que des simulations individuelles comme présenté précédemment, et pose donc comme hypothèse que ce sont les caractéristiques d'un modèle qui influencent la performance des simulations hydroclimatiques.

Or, les résultats ne sont pas très probants et il est évident (**Figure 9**) que l'approche n'enlève pas les simulations les moins performantes, au contraire. On peut même constater que pour les indicateurs d'HP (panneau B), les simulations des modèles retirés n'affectent presque pas les simulations de faible performance, puisque celles-ci étaient principalement des simulations ClimEx et CORDEX (Figure 8) qui, de par les hypothèses posées a priori, ne pouvaient pas être retirées. L'approche semble tout de même adéquatement identifier quelques simulations peu performantes pour les indicateurs annuels (panneau A) non-considérés dans la détermination

des modèles à enlever, mais les résultats ne permettent pas de statuer que cette méthodologie est efficace pour cet objectif.

Même en ajoutant les simulations régionales dans la liste de modèles pouvant être exclus, il est peu probable que les résultats auraient été meilleurs. En effet, la **Figure 6** illustre que la queue de distribution pour les indicateurs HP comporte plusieurs simulations ClimEx et quelques simulations CORDEX. Or, ClimEx et CORDEX ont tous deux une bonne performance à la fois pour les indicateurs EA qu'annuels, et leur retrait aurait été tout autant difficile à justifier. Ainsi, l'ajout des MRCs dans la liste d'exclusion aurait possiblement permis de retirer quelques modèles supplémentaires, mais n'aurait pas mené à des conclusions très différentes.

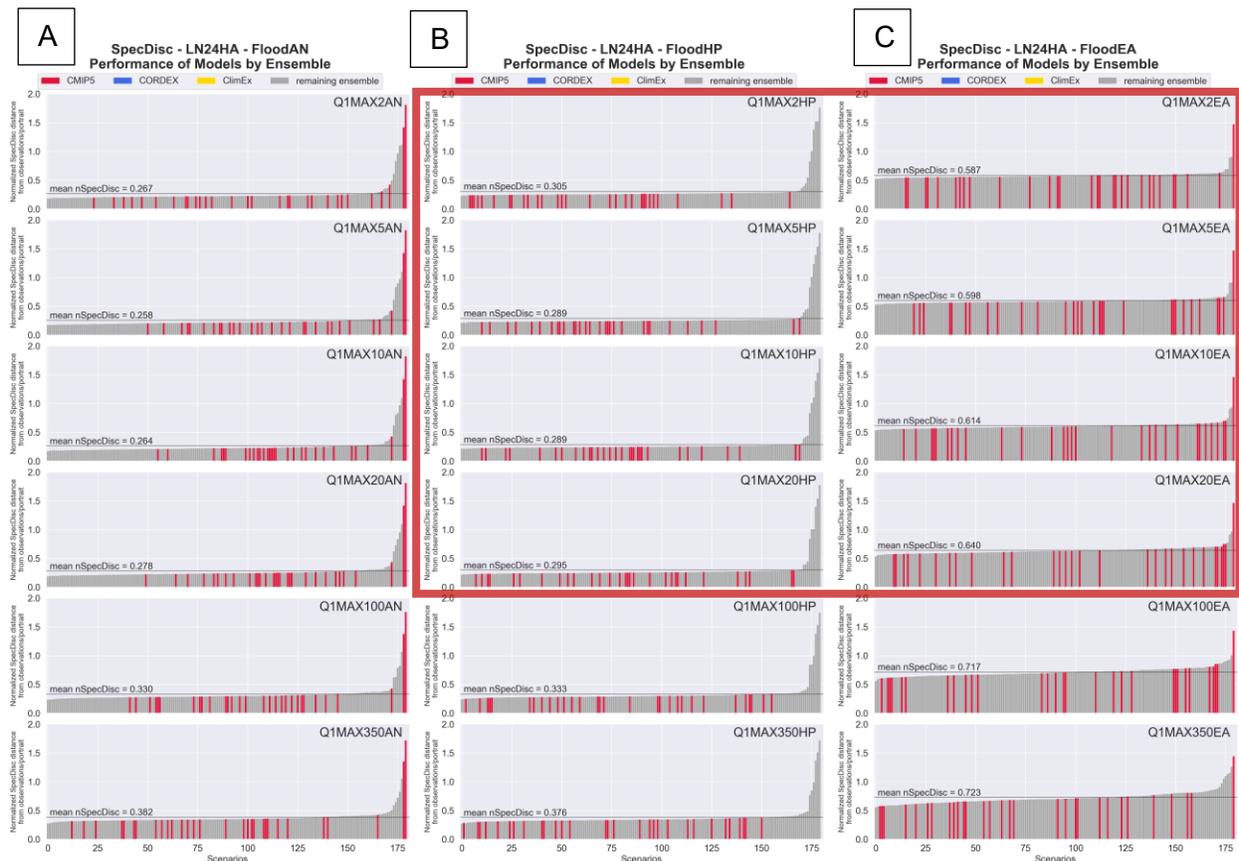


Figure 9. Identification des modèles peu performants dans l'ensemble, basé sur 8 indicateurs (carré rouge) et la plateforme LN24HA. Les modèles sont identifiés s'ils « apparaissent plus de 4 fois parmi les 8x10 simulations les moins performants ».

Tel que démontré dans les Figures 8 et 9, il est difficile de généraliser le concept de « mauvaises simulations » ou de « mauvais modèles ». Alors qu'on peut identifier des simulations ou des modèles qui performant moins bien dans un contexte spécifique, les critères appliqués pour identifier ces simulations ou modèles ne permettent pas d'extrapoler les résultats aux indicateurs de crue de différentes récurrences ou calculés sur une période différente. Ces enjeux surviennent à l'intérieur d'une même plateforme hydrologique, et, tel qu'illustré à la **Figure 7**, les résultats

varient d'une plateforme hydrologique à une autre et rendent impossible l'identification d'une liste unique pouvant s'appliquer à l'ensemble hydroclimatique d'INFO-Crue.

2.2.3 Impact de la réduction de l'ensemble

Outre les enjeux et les difficultés à tenter d'identifier des simulations à retirer de l'ensemble, il y a lieu de se poser la question quant à l'impact réel de la réduction de l'ensemble hydroclimatique. La conséquence la plus évidente serait une réduction du biais dans les simulations hydroclimatiques en période historique de l'ensemble, puisque la technique vise directement à éliminer les simulations ayant les biais les plus importants. Toutefois, et tel que démontré dans Knutti et al. (2017), l'élimination des simulations les moins performantes en climat historique peut aussi avoir un effet significatif sur le signal de changements climatiques pour un horizon futur. La **Figure 10** illustre donc les changements dans la distribution des biais (A) et dans la distribution des signaux de changements climatiques à travers les simulations individuelles (B), pour les indicateurs de crue printanière.

L'analyse présentée en (B) élimine des simulations individuelles et, par conséquent, explore les différences dans la distribution brute des 180 simulations hydroclimatiques, plutôt que de pondérer les simulations (par exemple, « 1 modèle 1 vote ») pour obtenir un signal de changements climatiques adéquat. Cela pourrait être exploré, mais demanderait préférablement d'exclure des modèles, plutôt que des simulations individuelles, puisqu'il est difficilement justifiable dans le calcul d'un signal de changements climatiques d'éliminer un membre d'un modèle sur la base de sa performance, mais d'en garder un autre. Or, tel que présenté à la **Figure 9**, il semble très difficile, voire impossible, d'identifier une liste de modèles climatiques pouvant être retirés de l'ensemble.

D'ailleurs, les résultats présentés à la **Figure 10** indiquent que l'impact de retirer un nombre, parfois considérable, de simulations climatiques est relativement négligeable. Alors que les queues de distribution changent légèrement en fonction du nombre des simulations moins performantes enlevées, les changements dans les médianes et les intervalles interquartiles sont très faibles. Il faut enlever entre un tiers et la moitié des simulations disponibles avant qu'un effet puisse être constaté sur les biais ou sur le signal de changements climatiques.

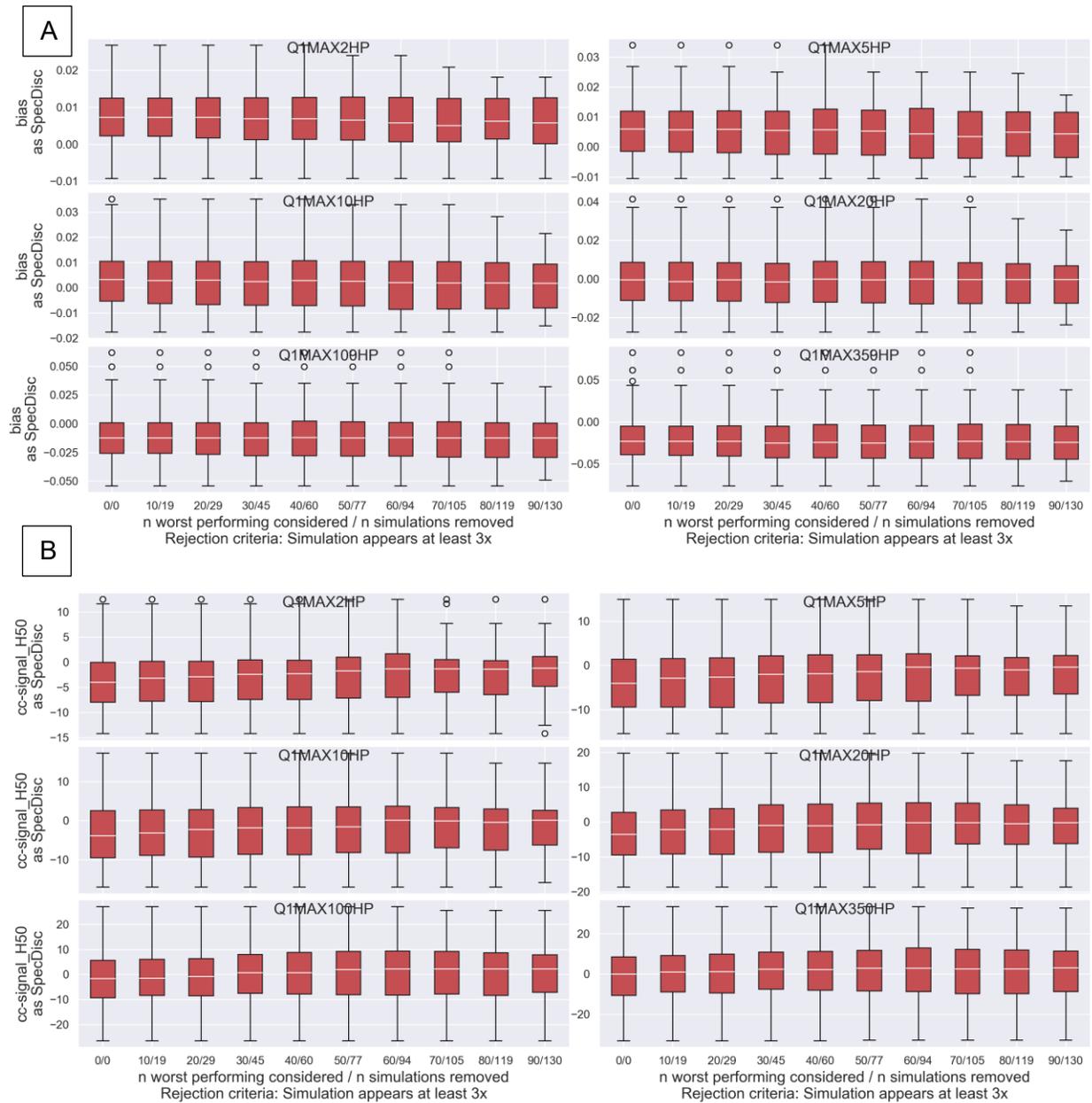


Figure 10. Changement dans la distribution des biais (A) et dans la distribution des signaux de changements climatiques à travers les simulations individuelles (B), pour la période future 2041-2070, après l'application de l'approche de réduction de l'ensemble hydroclimatique. Les boîtes à moustache sont déterminées en retirant différents nombres de simulations, basés sur des critères de performance. Le chiffre en abscisse représente « le nombre n de simulations non performantes à identifier selon chaque indicateur / le nombre de simulations retirées de l'ensemble ». La figure montre les 6 indicateurs de crue pour la période HP et la plateforme LN24HA.

2.3 CONCLUSIONS PARTIELLES ET IMPACT SUR LES SCHÉMAS DE PONDÉRATION

L'analyse de la performance des modèles climatiques pour les simulations hydrologiques illustre la difficulté d'identifier clairement les « mauvaises » simulations, et encore plus les « mauvais » modèles. Afin de parvenir à une évaluation objective des écarts ou des performances pour les scénarios hydroclimatiques, il est nécessaire d'inclure plusieurs critères.

Or, même si, dans certaines conditions spécifiques, il est possible d'identifier des patrons dans le tri des simulations en fonction de leurs performances, ceux-ci ne sont guère stables et sont difficiles, voire impossibles à extrapoler à des indicateurs n'ayant pas été utilisés pour construire le tri. De plus, la plateforme de modélisation hydrologique elle-même joue un rôle dominant dans la performance des simulations hydroclimatiques et les différences sont majeures entre chaque plateforme.

Par conséquent, la tentative effectuée dans ce rapport, qui visait à déterminer une liste de simulations ou de modèles moins performants qui auraient pu être retirés de l'ensemble INFO-Crue afin d'accroître le niveau de confiance dans les résultats, n'est que partiellement réussie, car la transférabilité des résultats reste insuffisante. En outre, le retrait de quelques dizaines de simulations dans l'ensemble semble avoir peu d'effet sur les biais ou sur la distribution des signaux de changements climatiques. Seule une réduction de l'ensemble d'un tiers ou plus (60+ simulations) a un effet sur ces statistiques.

Ainsi, puisqu'une identification fiable et robuste d'un groupe de simulations hydroclimatiques moins performantes s'avère peu possible et que, de plus, l'identification de quelques "mauvaises pommes" ne modifie pas significativement les propriétés statistiques considérées dans l'ensemble, il ne semble guère opportun, pour les analyses ultérieures visant la pondération des simulations de l'ensemble, de réduire l'ensemble à priori sur la base de critères de performance. Dans ce contexte, on peut se permettre de garder toutes les simulations pour le schéma de pondération.

3. INDÉPENDANCE DES SIMULATIONS ET SCHEMAS DE PONDÉRATION

3.1 MÉTHODOLOGIE

3.1.1 Pondération proposée en mai 2020

En mai 2020, une première pondération a été proposée à la DEH (Annexe C). Les principes directeurs étaient les suivants :

Principes généraux

- Tous les modèles sont considérés comme indépendants, y compris les modèles provenant d'une même institution et les modèles dont le nom est similaire.
- Dans un cas où le paramétrage d'un même modèle serait différent (valeur différente de "p" dans l'identifiant "rip"), alors les deux membres d'un même modèle sont considérés comme indépendants. Ce cas a été développé spécifiquement pour GISS-E2-R, où deux paramétrages ont été réalisés dans le cadre de CMIP5 (r6i1p1 et r6i1p3).

Spécificités pour les modèles régionaux

- Un modèle régional et son pilote sont considérés comme indépendants.
- Dans un cas où un modèle existe à plusieurs résolutions spatiales, ces simulations ne sont pas considérées indépendantes.
- Deux modèles régionaux pilotés par le même MCG sont considérés comme indépendants.
- Les différences entre le CRCM5 d'Ouranos et de l'UQAM ne sont pas considérées comme assez importantes pour juger qu'il s'agit de deux modèles différents.
- ClimEx est considéré comme son propre ensemble, distinct des autres simulations CanESM2_CRCM5.

3.1.2 Autres schémas de pondération possibles

Tel qu'énoncé dans la mise en contexte à la Section 1.1, le niveau réel d'indépendance entre les modèles climatiques est un sujet complexe pour lequel il n'existe pas de consensus scientifique.

Par exemple, dans le cadre de l'élaboration des scénarios climatiques nationaux suisses (CH2018), Sørland et al. (2020) a tenté de maximiser l'information contenue dans CORDEX-EUR en considérant comme indépendantes deux simulations provenant d'un même modèle si 1) leur numéro de version était différent et si 2) leur grille était elle aussi différente. Il y a lieu de se demander si ces deux conditions sont trop contraignantes pour les simulations de CMIP5, où des modèles comme ACCESS1.0 et ACCESS1.3 ont la même résolution spatiale, mais des

composantes physiques différentes qui pourraient justifier de considérer ces deux simulations comme indépendantes. Dans tous les cas, l'hypothèse sous-jacente posée par Sørland et al. (2020) est que des différences potentiellement mineures dans la structure d'un modèle peuvent justifier de considérer deux simulations d'un même modèle régional comme complètement indépendantes.

Une hypothèse tout aussi valable pourrait au contraire estimer que les modèles régionaux ne possèdent pas assez de degrés de liberté et que leur signal de changement climatique est par conséquent fortement contrôlé par leur pilote, ce qui justifierait de regrouper toutes les simulations climatiques dont le pilote est le même. Il s'agit d'ailleurs de l'hypothèse posée dans la version précédente des scénarios suisses, CH2011 (Sørland et al., 2020). Dans ce même sens, et tel qu'argumenté dans Leduc et al. (2016) et dans Abramowitz et al. (2018), l'échange de codes informatiques et la réutilisation de composantes physiques entre les modèles climatiques pourraient justifier de considérer que des modèles globaux provenant d'un même centre de modélisation ne possèdent pas une indépendance parfaite, et qu'il serait par conséquent justifié de donner un poids égal aux centres de modélisation climatique, plutôt qu'aux modèles eux-mêmes.

Toutes ces hypothèses représentent des variations autour du concept « 1 modèle 1 vote » et, à leur manière, extrapolent le concept pour plutôt signifier « 1 vote par groupe de simulations climatiques dont le niveau d'indépendance est jugé insuffisant ». Les différences majeures entre les hypothèses mettent en évidence non seulement la difficulté à définir à quel niveau l'indépendance réelle se situe (MCG, MRC ou centre de modélisation), mais également la nébulosité quant à la définition exacte de ce que constitue un « modèle ». Tel que présenté précédemment en exemple, ACCESS1.0 et ACCESS1.3 pourraient être groupés, puisqu'il s'agit de deux versions différentes de ACCESS, mais pourraient tout autant être identifiés comme deux modèles indépendants, puisque plusieurs composantes physiques diffèrent.

Les regroupements potentiels dans l'ensemble hydroclimatique INFO-Crue peuvent par conséquent être vus comme la combinaison de deux hypothèses :

1. Niveau maximal d'indépendance pouvant être atteint entre deux simulations :
 - a. Modèles régionaux de climat
 - b. Modèles globaux
 - c. Centres de modélisation climatique
2. Différences nécessaires entre deux simulations pour considérer qu'il s'agit de modèles différents :
 - a. Noms différents
 - b. Composantes physiques différentes
 - c. Composantes physiques et résolutions différentes

Les scénarios suisses CH2018, par exemple, correspondraient ici aux catégories 1a-2c, tandis que la pondération proposée à la DEH en mai 2020 serait plutôt 1a-2a. Plusieurs combinaisons possibles ont été explorées afin d'évaluer la sensibilité du signal de changements climatiques de

l'ensemble INFO-Crue face à ces alternatives possibles. Les schémas de pondération sont présentés au Tableau 4 et détaillés à l'Annexe C. Les acronymes correspondent à la nomenclature qui sera utilisée dans ce rapport. Il est à noter que malgré un nombre de simulations plus important pour le RCP8.5 (116) par rapport au RCP4.5 (63), les schémas de pondérations ont un nombre similaire de groupes entre les RCPs.

Tableau 4. Schémas de pondération

Description & Acronyme	Niveau maximal d'indépendance des simulations	Différences nécessaires entre deux modèles	Nombre de groupes indépendants	
			RCP4.5	RCP8.5
Schémas utilisant toutes les simulations disponibles				
Pondération proposée en 2020 (DEH2020)	1a	2a*	36	38
Indépendance au niveau des paires MCG-MRC, mais avec une définition plus physique des modèles (PHYS)	1a	2b	32	33
Méthodologie suisse (CH2018)	1a	2c	29	31
Indépendance contrôlée par les modèles climatiques globaux (MCG)	1b	2b	24	24
Indépendance contrôlée par les centres de modélisation (CM)	1c	2b	17	16
Schémas utilisant un sous-ensemble de simulations				
Sous-ensemble CMIP5 seulement , bâti comme l'Atlas hydroclimatique 2018 (A18)	1b	2a	28	27
Sous-ensemble de modèles régionaux seulement (REG)	1a	2b	8	10

* À l'exception du MRCC5, où le MRCC5-Ouranos et MRCC5-UQAM sont jugés trop similaires malgré des noms différents, et où ClimEx est jugé comme un ensemble indépendant des simulations réalisées pour CORDEX.

3.1.3 Pondérations possibles à l'intérieur d'un groupe indépendant

Une subtilité supplémentaire apparaît lorsque vient le temps de pondérer adéquatement les simulations faisant partie d'un groupe ayant été jugé comme ne possédant pas un niveau d'indépendance suffisant. Le modèle MPI-ESM, par exemple, possède 3 simulations à faible résolution « LR » et une seule simulation à résolution moyenne « MR ». Dans cette situation, doit-on donner un poids de 0.5 à MPI-ESM-MR et de 0.5 (redivisé en 3) à MPI-ESM-LR, ou

simplement donner un poids de 0.25 aux quatre simulations, qui sont essentiellement le même modèle climatique réalisé à des résolutions spatiales différentes ? Ce questionnement se complexifie davantage pour les schémas de pondération *MCG* et *CM* au Tableau 4, qui tentent de donner un poids unique à toutes les simulations produites ou pilotées par un même modèle climatique ou centre de modélisation.

Pour les fins de l'analyse, deux sous-schémas de pondération seront utilisés :

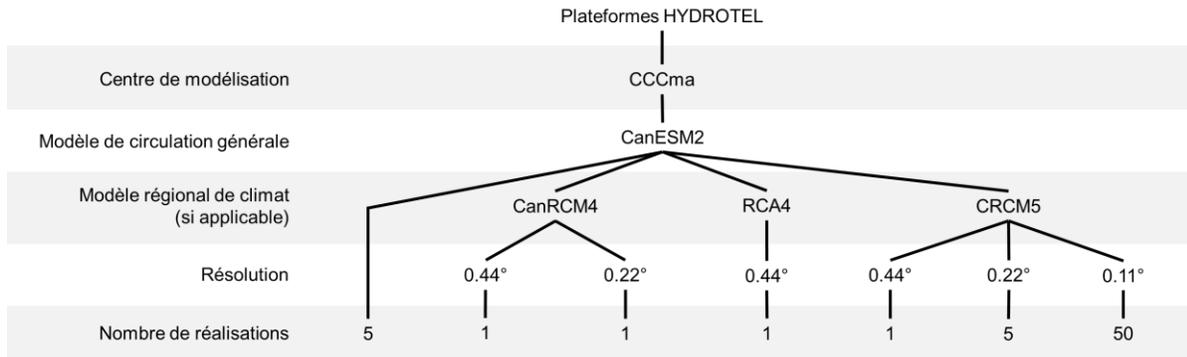
- **Groupes pondérés (GP)** : Parmi un groupe déterminé comme non-indépendant, un respect strict de l'arborescence « centre de modélisation – modèle global – modèle régional » est imposé. Si un modèle a produit plusieurs simulations à des résolutions différentes, ces simulations sont regroupées et se voient attribuer un poids égal (totalisant un poids de 1). Par exemple :
 - MPI-ESM-LR (3 réalisations) : 0.25 chacune
 - MPI-ESM-MR (1 réalisation) : 0.25
- **1 simulation par groupe (1S)** : Parmi un groupe déterminé comme non-indépendant, une seule simulation est choisie. La priorité est donnée à la simulation ayant la résolution la plus fine et, s'il y a lieu, ayant la version de modèle la plus récente. Par exemple :
 - MPI-ESM-LR (3 réalisations) : 0
 - MPI-ESM-MR (1 réalisation) : 1

L'alternative aux groupes pondérés mentionnée dans le premier paragraphe de cette section, qui consiste plutôt à diviser de manière égale le poids donné à un modèle en fonction du nombre de résolutions produites, a également été brièvement explorée. Pour rappel, dans l'exemple mentionné avec MPI-ESM, ce schéma donnerait plutôt un poids de 0.5 à MPI-ESM-MR et de 0.167×3 (0.5 redivisé en 3 réalisations) à MPI-ESM-LR. Cette analyse a permis de constater que même si des différences peuvent être notées, notamment dans le cas de CanESM2 où se trouve ClimEx, l'impact sur le calcul des statistiques requises par la DEH (changement médian, écart interquartiles, consensus sur la direction du changement) est assez faible pour supposer que les résultats présentés dans ce rapport sont valides pour les deux alternatives de pondération. Il n'existe aucun consensus quant à laquelle de ces deux alternatives est préférable et des arguments pourraient être soulevés en faveur de chacune. Par conséquent, même si un choix a été fait pour ce rapport, il ne s'agit pas d'une recommandation ferme quant à la manière de pondérer les simulations se trouvant dans un même groupe.

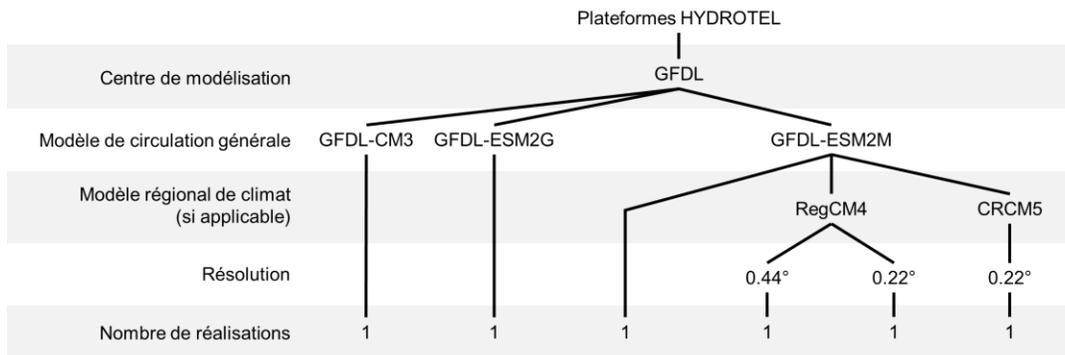
Une troisième alternative pondérée pourrait consister à donner un poids égal à toutes les simulations se trouvant dans un groupe donné, sans égard à la nature de ces simulations. Toutefois, une analyse sommaire de ce schéma (non illustrée) a permis de conclure que les résultats deviennent très fortement biaisés en faveur du modèle ayant produit le plus de simulations, tel que ClimEx, mais que ce biais est difficilement justifiable puisqu'il combine des simulations de nature potentiellement très différentes, et que la pondération ne dépend que de la capacité ou de la volonté d'un centre de modélisation climatique donné à produire plusieurs

réalisations. Cette alternative n'est donc **pas** recommandée et n'a par conséquent pas été explorée plus en détail.

Afin d'aider à la visualisation de ce que peuvent réellement signifier les différents schémas de pondération qui seront explorés dans ce rapport, la Figure 11 illustre quelques exemples d'application pour certains des cas les plus complexes.



	Pondérations (GP)						Poids total	
DEH2020	<u>0.20 x 5</u>	0.50	<u>0.50</u>	<u>1</u>	0.167	<u>0.167 x 5</u>	<u>0.02 x 50</u>	5
PHYS	<u>0.20 x 5</u>	0.50	<u>0.50</u>	<u>1</u>	0.0179	0.0179 x 5	<u>0.0179 x 50</u>	4
CH2018	<u>0.20 x 5</u>	0.50	<u>0.50</u>	<u>1</u>	0.0179	0.0179 x 5	<u>0.0179 x 50</u>	4
MCG	0.05 x 5	0.125	0.125	0.25	0.00446	0.00446 x 5	<u>0.00446 x 50</u>	1
CM	0.05 x 5	0.125	0.125	0.25	0.00446	0.00446 x 5	<u>0.00446 x 50</u>	1
A18	<u>0.20 x 5</u>	0	0	0	0	0	0	1
REG	0	0.50	<u>0.50</u>	<u>1</u>	0.0179	0.0179 x 5	<u>0.0179 x 50</u>	3



	Pondérations (GP)						Poids total
DEH2020	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	0.50	<u>0.50</u>	<u>1</u>	5
PHYS	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	0.50	<u>0.50</u>	<u>1</u>	5
CH2018	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	0.50	<u>0.50</u>	<u>1</u>	5
MCG	<u>1</u>	<u>1</u>	0.33	0.167	<u>0.167</u>	0.33	3
CM	0.33	0.33	0.11	0.055	<u>0.055</u>	0.11	1
A18	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	0	0	0	3
REG	0	0	0	0.50	<u>0.50</u>	<u>1</u>	2

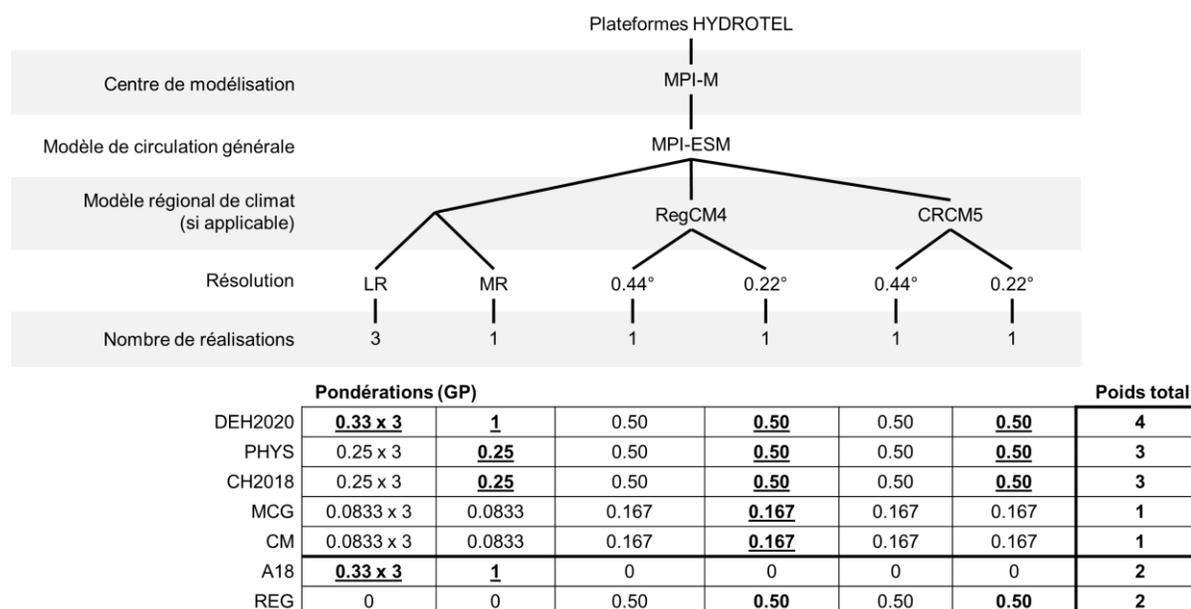


Figure 11. Exemples d'application des différentes alternatives de pondération pour les simulations provenant ou pilotées par les modèles climatiques des centres CCCma, GFDL et MPI-M. Dans le tableau, les cases en gras-souligné indiquent les groupes à partir desquels une simulation est pigée pour la méthodologie « 1S ».

3.2 RÉSULTATS

Pour chacune des 1080 (180 simulations x 6 plateformes hydrologiques) simulations hydroclimatiques de l'ensemble INFO-Crue et pour les 28 035 tronçons de rivière, la DEH a calculé l'impact des changements climatiques, en pourcentage relatif par rapport à la période 1981-2010, pour 89 indicateurs hydrologiques d'intérêt et pour les horizons 2030 (2021-2050), 2050 (2041-2070) et 2080 (2071-2100).

La question demeure toutefois quant à la manière de combiner l'information provenant de ces 1080 simulations afin d'en dégager un signal de changements climatiques qui soit robuste et adéquat compte-tenu de la nature hétérogène de cet ensemble. Pour ce faire, aux 280 stations où se trouvent une station hydrographique (Figure 3), les schémas de pondération présentés au Tableau 4 ont été utilisés pour calculer et comparer :

- Le 50^e percentile de changements futurs dans l'ensemble hydroclimatique. Cette statistique représente l'ampleur médiane de l'impact des changements climatiques pour un indicateur donné.
- Le pourcentage de simulations indiquant un signal de changements positif (augmentation du débit). Cette statistique représente le consensus entre les modèles quant à la direction des changements futurs pour un indicateur donné.

- La différence entre le 75^e et le 25^e percentile (écart interquartile) de changements futurs dans l'ensemble hydroclimatique. Cette statistique représente la dispersion du signal de changements climatiques pour un indicateur donné.

Pour les fins du rapport et compte-tenu de l'objectif principal qui vise à appuyer la DEH pour une meilleure compréhension des crues des 50 prochaines années, les indicateurs Q1MAX20AN, 100AN et 350AN (débit maximal annuel de récurrence 20-100-350 ans) seront analysés en priorité et ce, pour la période 2041-2070 (Horizon 2050), pour le RCP8.5 et pour l'ampleur et le consensus sur la direction de changement. Les autres horizons temporels, RCPs, indicateurs hydrologiques et la dispersion peuvent être consultés dans un dossier numérique fourni avec ce rapport.

3.2.1 Différences entre les schémas de pondération

Comme première analyse, la différence entre la méthodologie recommandée en 2020 (*DEH2020-GP*, Figure 12) et les alternatives présentées précédemment a été explorée pour le calcul du 50^e percentile de changements futurs dans l'ensemble hydroclimatique¹. Les résultats sont présentés à la Figure 13 pour l'indicateur Q1MAX350AN. Les indicateurs Q1MAX20AN et Q1MAX100AN sont visuellement pratiquement identiques, mais couvrent un plus petit spectre de valeurs. Ceux-ci sont présentés à l'Annexe D.

Un premier constat est qu'il est difficile de tirer des conclusions en analysant les cartes elles-mêmes. Il ne semble pas exister de patron spatial clair, ni de lien entre la taille d'un tronçon (taille du cercle) et sa sensibilité aux schémas de pondération. La seule exception est que les couleurs (représentant la différence entre un schéma donné et le schéma *DEH2020-GP*) semblent souvent être inverses entre *REG-GP* et *A18-GP* et ce, pour de nombreux indicateurs. À ce stade-ci, il est difficile d'expliquer ce phénomène.

On remarque néanmoins dans cette figure que les différences demeurent généralement faibles, avec des médianes près de 0 et un écart-type de moins de 3 % dans la plupart des schémas. L'écart-type est encore plus faible dans le cas de Q1MAX20AN ou Q1MAX100AN (non illustré). Ce n'est toutefois pas le cas du schéma n'utilisant qu'un sous-ensemble de modèles régionaux, *REG-GP*, qui présente plutôt un écart-type de 7.7 %. Ce constat, soit que *REG-GP* illustre des différences plus marquées par rapport aux 5 autres schémas, semble pouvoir se généraliser aux autres indicateurs et aux autres horizons temporels (voir dossier numérique). Plusieurs phénomènes pourraient être en cause :

¹ Dû à la nature des données utilisées, qui sont des pourcentages de changements futurs pour des indicateurs hydrologiques, la plupart des figures dans cette section illustrent la différence absolue dans le calcul des changements relatifs. L'unité utilisée est donc le pourcent (%), mais doit être interprétée comme une valeur absolue. Une différence de +2 % signifierait par exemple qu'un tronçon de rivière pour lequel l'ampleur des changements est de +12 % selon une méthode de référence, serait +14 % selon l'autre méthodologie.

1. Les modèles régionaux ne sont pilotés que par 4 modèles globaux différents. Pour des indicateurs hydrologiques spécifiques, notamment ceux où l'augmentation des températures a un rôle important, le signal de changements climatiques indiqué par CORDEX pourrait être fortement influencé par ces quelques pilotes et le manque de diversité. Dans le cas des crues, les températures jouent un rôle à la fois sur la diminution de la neige et sur l'augmentation des précipitations (quantités et intensité).
2. Si l'on suppose qu'HYDROTEL est plus à même de générer des crues et une hydrologie réaliste avec les modèles à plus haute résolution spatiale, alors les différences entre *REG* et les autres schémas pourraient provenir du fait qu'HYDROTEL génère des crues futures fondamentalement différentes en étant alimenté par des simulations CORDEX, pour des changements climatiques similaires à CMIP5. Cette hypothèse demeure possible, mais pour l'instant, les résultats présentés à la Section 2 ne semblent pas appuyer cette explication (**Figure 7**).
3. D'un point de vue purement statistique, les calculs réalisés sur *REG* sont effectués sur un nombre réduit de simulations (19 + ClimEx) et de groupes jugés indépendants (10). Les différences pourraient donc également provenir d'une incertitude d'échantillonnage, notamment pour les indicateurs comme Q1MAX20, 100 et 350AN où la variabilité naturelle est élevée.

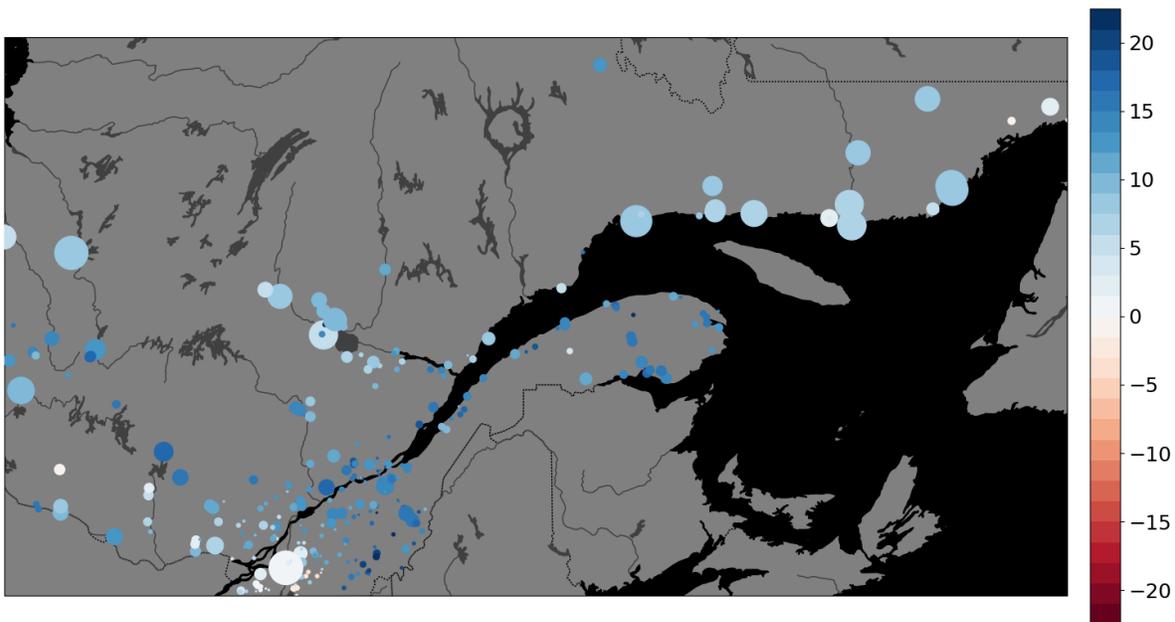


Figure 12. Changements projetés (%) pour l'indicateur Q1MAX350AN à l'horizon 2050 (2041-2070 vs. 1981-2010), calculé par la méthodologie DEH2020-GP.

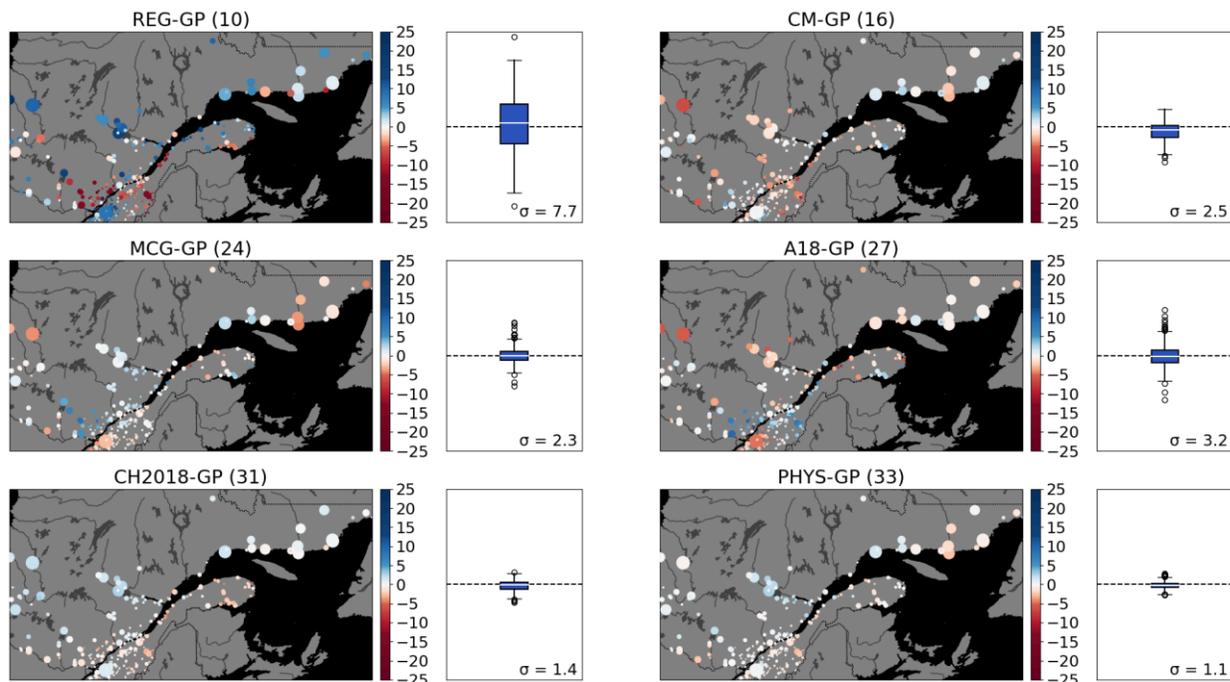


Figure 13. Différence (% absolu) entre la méthodologie DEH2020-GP et les alternatives possibles pour le calcul du 50^e percentile de changements de l'indicateur Q1MAX350AN. Les résultats présentés sont pour l'horizon 2050 (2041-2070 vs. 1981-2010, en pourcentage de changement) et le RCP8.5. Le chiffre entre parenthèses indique le nombre de groupes indépendants associé à chaque schéma de pondération. La référence DEH2020-GP en possède 38.

Afin de valider que les conclusions tirées avec la Figure 13 s'appliquent aux deux autres statistiques communément employées par la DEH pour l'Atlas hydroclimatique, l'exercice a été répliqué pour le consensus entre les modèles quant à la direction des changements et pour la dispersion. Les résultats sont présentés à la Figure 14. Seules les boîtes à moustache ont été affichées.

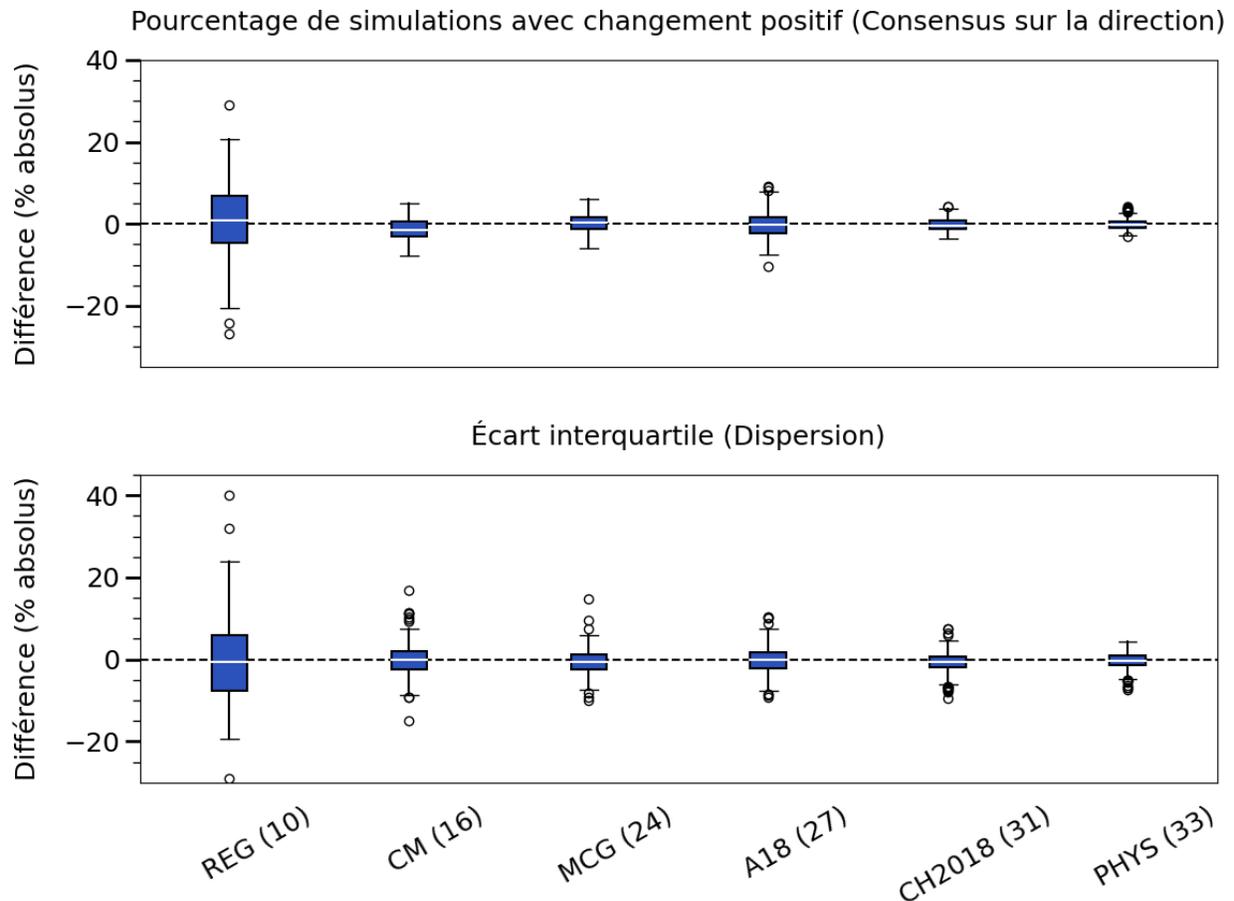


Figure 14. Différence (% absolu) entre la méthodologie DEH2020-GP et les alternatives possibles pour le calcul du consensus sur la direction de changement et pour le calcul de la dispersion de l'indicateur Q1MAX350AN. Les résultats présentés sont pour l'horizon 2050 (2041-2070 vs. 1981-2010, en pourcentage de changement) et le RCP8.5. Le chiffre entre parenthèses indique le nombre de groupes indépendants associé à chaque schéma de pondération. La référence DEH2020-GP en possède 38.

On remarque que les résultats sont comparables à ceux obtenus pour l'ampleur. Les mêmes constats peuvent donc être appliqués à ces deux statistiques supplémentaires. Nonobstant le schéma *REG*, qui est discuté plus en détails dans la suite du rapport, cela indique que dans le cas spécifique des crues maximales annuelles, les résultats sont robustes face aux hypothèses d'indépendance des simulations climatiques, puisque les statistiques calculées en utilisant un schéma de pondération donné sont similaires aux alternatives, à quelques pourcents près.

Dans cette optique, les schémas peuvent tous être jugés adéquats, voire interchangeables, mais il demeure pertinent de mieux comprendre la source des différences observées dans le schéma *REG*, si ce n'est que pour déterminer la pertinence d'inclure ou non ce schéma dans les calculs d'incertitude. Les Sections 3.2.2 et 3.2.3 visent donc à explorer certaines des hypothèses citées précédemment.

3.2.2 Écarts entre les modèles régionaux et leurs pilotes

Une des causes possibles expliquant les différences marquées entre le schéma de pondération *REG*, formé uniquement d'un sous-ensemble de modèles régionaux, et les autres schémas de pondération est qu'il n'existe que 5 pilotes dans l'ensemble CORDEX (6, si on considère MPI-ESM-LR et MR comme différents). Ces quelques pilotes couvrent un large spectre de sensibilités climatiques (<https://na-cordex.org/simulation-matrix.html>) et pilotent chacun un nombre relativement comparable de simulations régionales, mais il demeure que ce manque de diversité pourrait, du moins en partie, expliquer pourquoi le signal dans CORDEX semble si différent de CMIP5.

Toutefois, cette hypothèse suppose :

1. que le pilote a une influence notable sur le signal de changements climatiques d'un modèle régional.
2. que les pilotes couvrent mal l'étendue des changements futurs pour les indicateurs hydrologiques, par rapport à un ensemble CMIP5 plus complet.

Afin de tester la validité de cette hypothèse, le signal de changements climatiques a d'abord été comparé entre le 1^{er} membre de CanESM2, MPI-ESM, GFDL-ESM2M et CNRM-CM5 et les modèles régionaux pilotés par ces simulations, pour les 280 tronçons de rivière où se trouve une station hydrographique. Les résultats pour QMOYAN (le débit annuel moyen) et Q1MAX350AN sont présentés à la Figure 15.

On remarque que les différences sont potentiellement majeures entre une simulation régionale et son pilote, et peut atteindre près de 300 % dans le cas le plus extrême pour Q1MAX350AN. Avec cet indicateur, dans le cas de MPI-ESM-MR, un fort biais positif peut même être identifié dans la simulation régionale (CRCM5-UQÀM). D'ailleurs, ces différences ne sont pas seulement dues à l'incertitude statistique inhérente aux indicateurs de crues extrêmes, puisqu'une validation supplémentaire sur d'autres indicateurs confirme que des différences élevées et des biais positifs ou négatifs (médiane loin de 0) sont relativement communs (Figure 15 pour QMOYAN et dossier numérique pour les autres indicateurs). Cela laisse donc supposer qu'une transformation appréciable du signal de changements climatiques a lieu entre un modèle global et une simulation régionale. Cela pourrait avoir lieu au niveau des tendances futures pour les températures et les précipitations, mais aussi dans la manière dont HYDROTEL reçoit et gère l'information climatique qui existe à des échelles spatiales différentes.

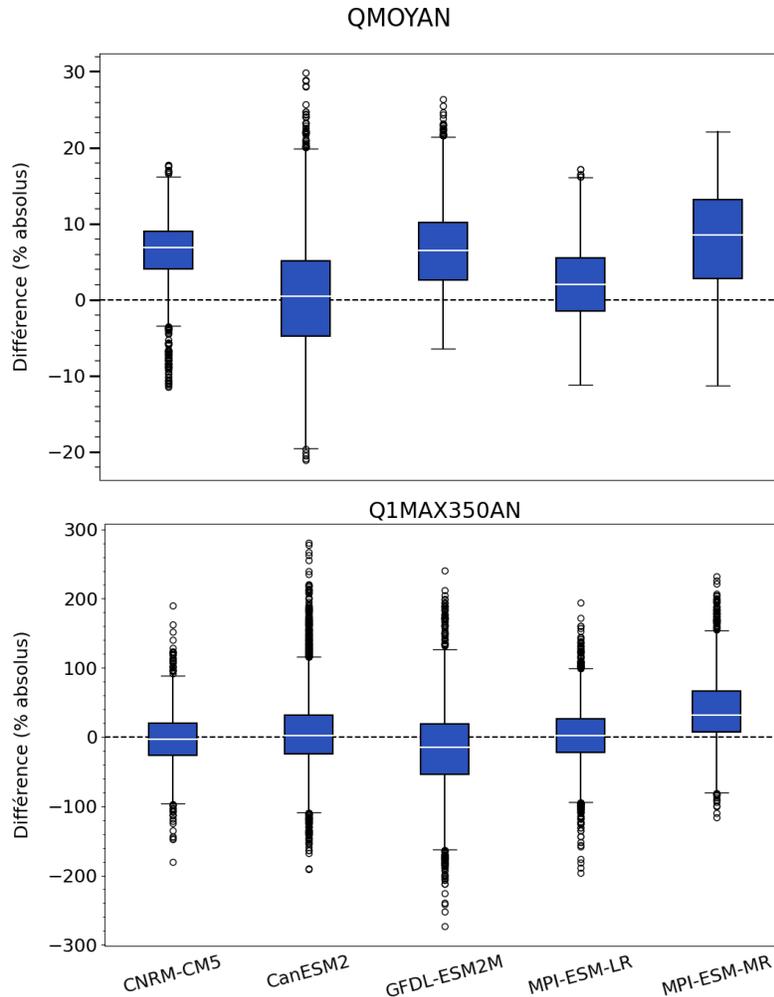


Figure 15. Différences entre le signal de changements climatiques du 1^{er} membre de cinq modèles globaux et les simulations régionales CORDEX pilotées par ces simulations. Les résultats présentés sont pour l'horizon 2050 (2041-2070 vs. 1981-2010, en pourcentage de changement) et le RCP8.5.

Toutefois, cette information à elle seule ne fournit qu'une partie de la réponse. En effet, même si les modèles CORDEX modifient sensiblement le signal de changements climatiques par rapport à leurs pilotes, le schéma de pondération *REG* pourrait tout de même être influencé par les pilotes s'ils sont très fortement biaisés par rapport à CMIP5. Dans cette optique, la Figure 16 illustre la différence dans les statistiques telles que calculées par un sous-ensemble formé uniquement des pilotes de CORDEX, par rapport à un ensemble complet (représenté par le schéma de référence *DEH2020-GP*).

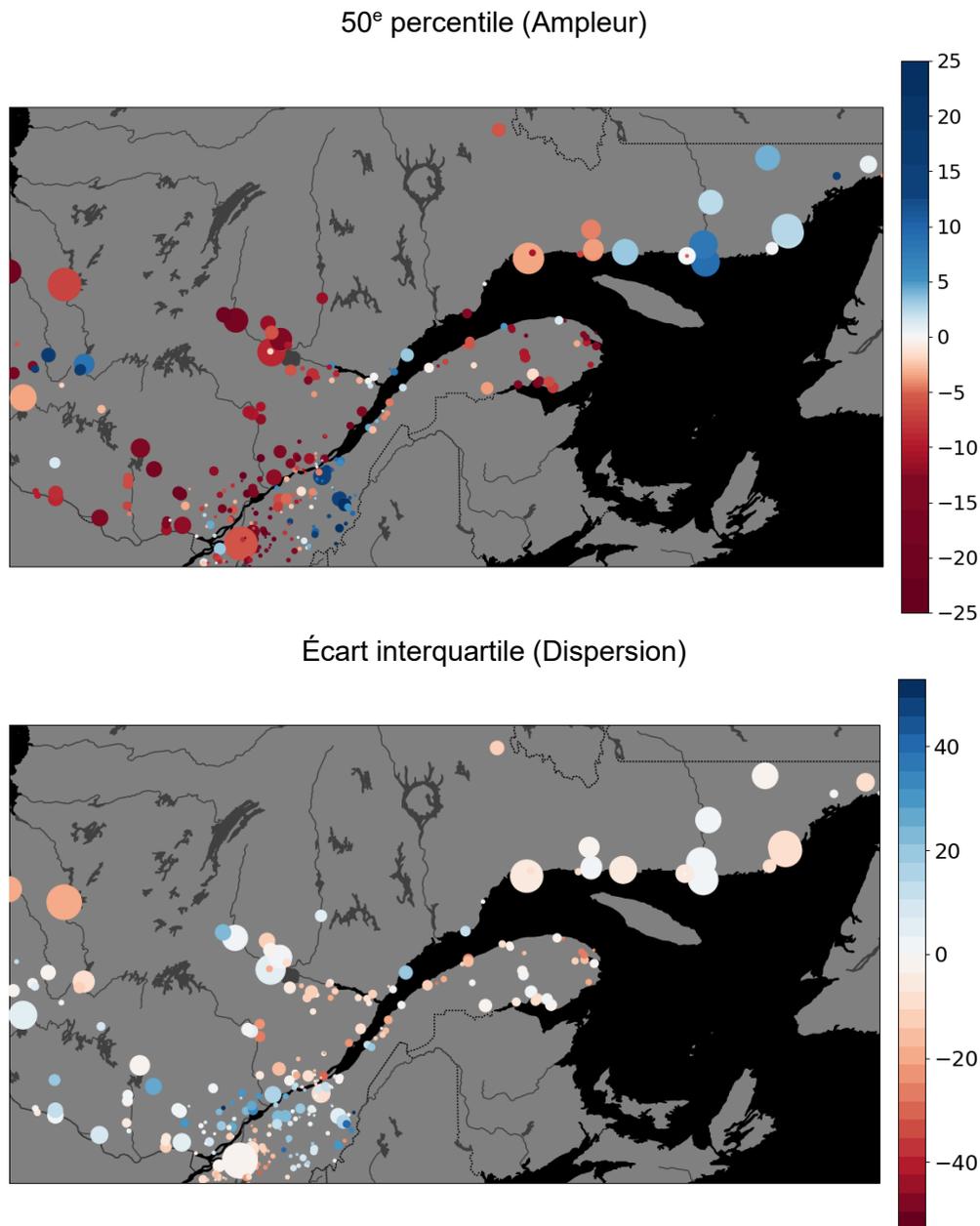


Figure 16. Différences entre les statistiques de changements climatique pour l'indicateur Q1MAX350AN tel que calculées par un sous-ensemble de simulations CMIP5 utilisées comme pilotes dans CORDEX, par rapport au schéma *DEH2020-GP*. Les résultats présentés sont pour l'horizon 2050 (2041-2070 vs. 1981-2010, en pourcentage de changement) et le RCP8.5.

On observe un biais négatif important dans le 50^e percentile de changement (ampleur) par rapport au schéma de référence *DEH2020-GP*, mais l'existence d'un biais n'est pas surprenant puisqu'il s'agit de seulement 4 simulations, par rapport à un ensemble de 38. Un constat intéressant, toutefois, est que ces différences sont souvent dans le sens contraire de ce qui avait été noté pour l'ensemble régional *REG-GP* (Figure 13). Par exemple, plusieurs tronçons en Montérégie, au Lac-Saint-Jean et en Gaspésie affichent ici à la fois une différence de -15 % ou plus (ton rouge foncé) dans le 50^e percentile et une sous-estimation de l'écart interquartile, ce qui indique que les

pilotes sont fortement biaisés et couvrent une plage de valeurs trop faible. Or, l'ensemble régional *REG-GP* affiche plutôt une différence positive de +15 % ou plus (ton bleu foncé) à la Figure 13 ce qui indique que même dans ces cas les plus extrêmes, il y a une transformation notable du signal de changements climatiques des pilotes.

L'analyse effectuée dans cette section permet donc de conclure que les modèles régionaux transforment le signal des pilotes, mais, en l'absence de simulations régionales supplémentaires qui permettraient de combler les lacunes en nombre de pilotes pour CORDEX, il n'est pas possible, à ce stade-ci, d'exclure la possibilité que les différences qui ressortent entre *REG-GP* et les autres schémas de pondérations proviennent, du moins partiellement, d'un manque de diversité de pilotes dans CORDEX. Il est donc raisonnable de conclure, de manière prudente, que les pilotes pourraient exercer une certaine influence sur le signal de changements climatiques présenté par les modèles régionaux, mais que cette influence est variable selon la station, l'horizon temporel et le l'indicateur hydrologique. Dans le cas spécifique des crues maximales annuelles, les pilotes ont, au mieux, une influence partielle sur les différences observées entre le schéma *REG* et les autres schémas de pondération, mais n'en sont pas la cause principale.

3.2.3 Impact du nombre de groupes indépendants

Tel que souligné à la Section 3.2.1, il est possible que les différences entre le schéma de pondération *REG-GP* à la Figure 13 et les autres alternatives de pondération s'expliquent, du moins partiellement, par le fait que les calculs sont réalisés sur un nombre réduit de simulations (19 + ClimEx) et de groupes indépendants (10) et, donc, qu'il s'agirait d'une erreur d'échantillonnage plutôt que d'une réelle différence entre les modèles globaux et régionaux.

Afin de tester la sensibilité du calcul des statistiques d'ensemble face au nombre de simulations disponibles ou au nombre de groupes indépendants pouvant exister dans un ensemble climatique donné, un cadre d'analyse par la méthode de Monte-Carlo a été implémenté, avec 1000 itérations et un nombre de groupes indépendants (n) variant entre 3 et 39. À chaque itération, l'algorithme :

- Choisit aléatoirement un schéma de pondération, dont le niveau d'indépendance est déterminé par soit :
 - Les centres de modélisation climatiques (16 groupes indépendants)
 - Les modèles globaux de climat, basé sur les composantes physiques des modèles (24 groupes indépendants)
 - Les modèles globaux de climat, basé sur le nom de modèles (27 groupes indépendants)
 - Les paires de modèles globaux-régionaux de climat, basé sur les composantes physiques des modèles (33 groupes indépendants)
 - Les paires de modèles globaux-régionaux de climat, basé sur le nom des modèles (39 groupes indépendants)
- Tire au hasard n groupes. Si un certain schéma ne possède pas assez de groupes, alors tous sont choisis.

- Calcule le 50^e percentile de changements futurs (ampleur) en pondérant les simulations selon l'arborescence (méthode *GP*).

Ce cadre d'analyse permet donc de tester conjointement plusieurs hypothèses sous-jacentes aux schémas de pondération, soient le niveau d'indépendance réel et l'impact de choisir une arborescence plutôt qu'une autre, ainsi que la sensibilité au nombre de modèles disponibles ou choisis. La Figure 17 illustre les résultats à l'horizon 2050 (2041-2070) pour l'indicateur Q1MAX350AN, tandis que les résultats pour Q1MAX20AN et Q1MAX100AN se trouvent à l'Annexe D. Les autres horizons et les autres indicateurs sont fournis dans un dossier numérique externe.

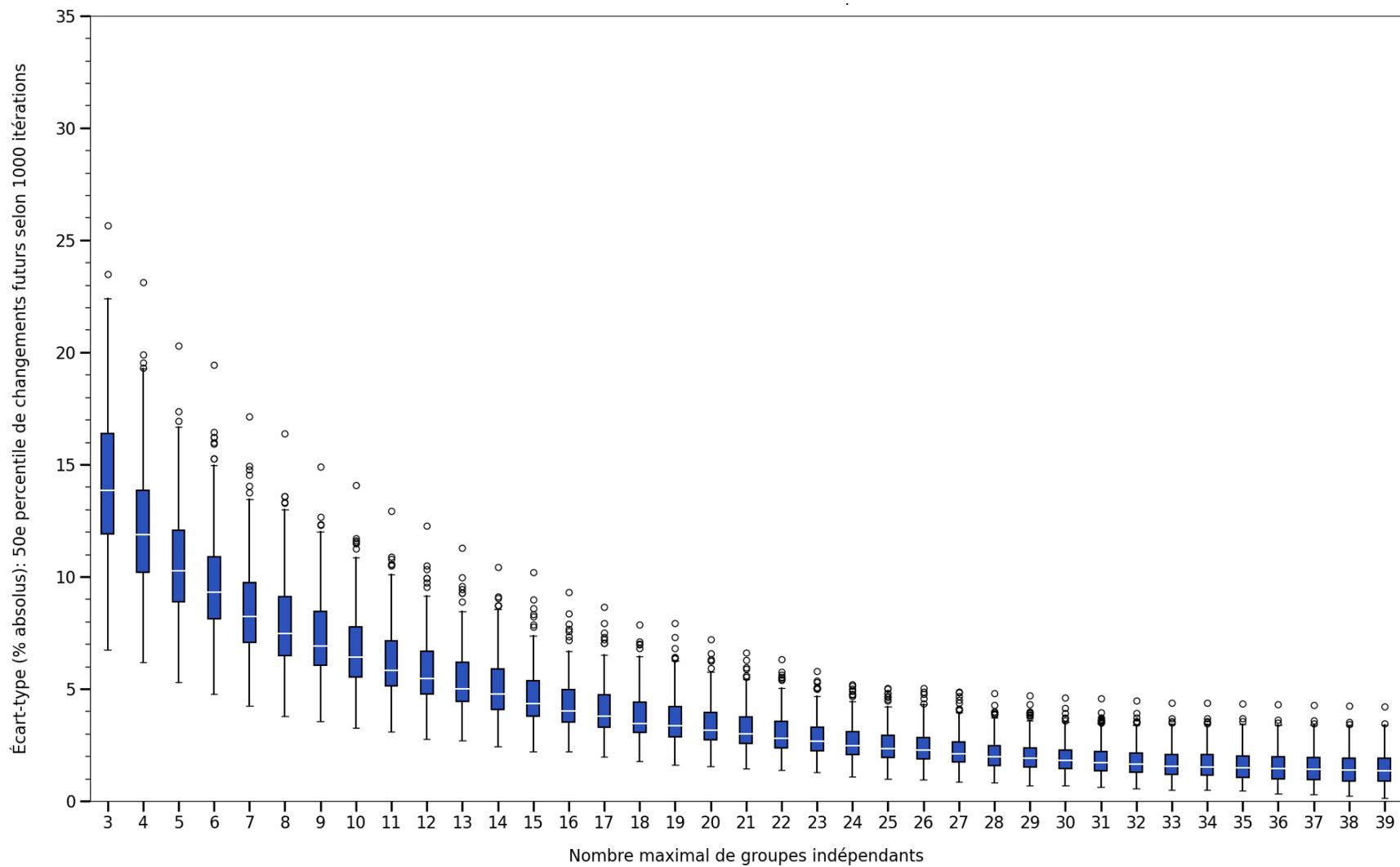


Figure 17. Pour 280 tronçons, écart-type associé au calcul du 50^e percentile de changements pour Q1MAX350AN à l’horizon 2050 avec 1000 itérations Monte Carlo.

Quelques conclusions intéressantes peuvent être tirées de cette expérience. Premièrement, pour $n \leq 18$ (environ), l'écart-type le long des 1000 itérations de la méthode Monte Carlo diminue rapidement pour chaque groupe indépendant ajouté, autant en termes de valeur médiane le long de l'axe des Y (écart-type diminue) qu'en termes de taille de la boîte à moustache (les résultats deviennent plus homogènes entre les 280 tronçons). La cause principale est probablement la diminution de l'erreur d'échantillonnage, puisqu'à $n=3$, par exemple, le calcul du 50^e percentile est réalisé sur seulement 3 groupes tirés au hasard. Comme la variabilité naturelle est élevée pour les indicateurs de crue analysés, il y a une forte sensibilité à quels 3 groupes ont été pigés aléatoirement à chaque itération. Également, plus n est petit et plus l'ajout d'un groupe supplémentaire est susceptible d'amener une nouvelle information complètement indépendante, ce qui n'est pas le cas lorsque le nombre de groupes indépendants est plus élevé.

Au-delà de $n=18$, l'écart-type continue à décroître, quoique de plus en plus lentement. Cela indique que même après avoir échantillonné tous les centres de modélisation climatique, il demeure possible d'avoir un gain d'information provenant des MCG ou MCG-MRC individuels. La taille des boîtes à moustache semble se stabiliser quelque part entre $n=25$ et 28, où le gain en échantillonnage est contrebalancé par l'incertitude méthodologique (arborescence pigée au hasard), ainsi que par un gain en information qui est de plus en plus difficile à obtenir, puisque le signal de changement climatique des modèles est (potentiellement) de moins en moins réellement indépendant.

Ces résultats semblent donc confirmer qu'une part importante des différences vues avec le schéma *REG*, formé d'un sous-ensemble de simulations régionales, pourraient provenir du fait que ce schéma ne comporte qu'une dizaine de groupes et serait donc sujet à une plus grande incertitude d'échantillonnage par rapport aux autres schémas de pondération explorés, dont la plupart ont plus de 20 groupes indépendants.

4. SÉLECTION D'UNE SEULE SIMULATION PAR GROUPE INDÉPENDANT (1S) ET NOMBRE OPTIMAL DE SIMULATIONS CLIMATIQUES

Les résultats présentés à la Section 3.2.3 soulignent le fait que le calcul de statistiques telles que le 50^e percentile de changements futurs peut être très sensible à la composition de l'ensemble lorsque l'échantillon est petit, ce qui se confirme également pour les autres horizons et les autres indicateurs hydrologiques (voir dossier numérique). En utilisant la méthodologie *GP*, comme la DEH compte le faire pour ses besoins dans INFO-Crue, cela signifie qu'il est préférable et plus robuste d'utiliser toutes les simulations disponibles, puis de les pondérer adéquatement.

Toutefois, dans l'optique où d'autres organisations n'ayant pas les mêmes capacités informatiques pourraient vouloir produire des projections pour les crues futures, il est pertinent d'élaborer davantage sur la méthodologie *1S* introduite à la Section 3.1.3. Pour ce faire, certaines figures présentées précédemment dans la Section 3 ont été régénérées en incluant cette méthodologie supplémentaire. Comme l'exercice vise à mieux connaître l'incertitude provenant du fait de ne pas avoir les capacités informatiques nécessaires pour traiter adéquatement 180 (voire 1080) simulations hydroclimatiques, la référence pour la Figure 18 et la Figure 19 demeure *DEH2020-GP*, afin de quantifier les différences par rapports aux résultats produits par la DEH le calcul des diverses statistiques d'ensemble : 50^e percentile de changements futurs, pourcentage de simulations avec un changement positif et écart interquartile.

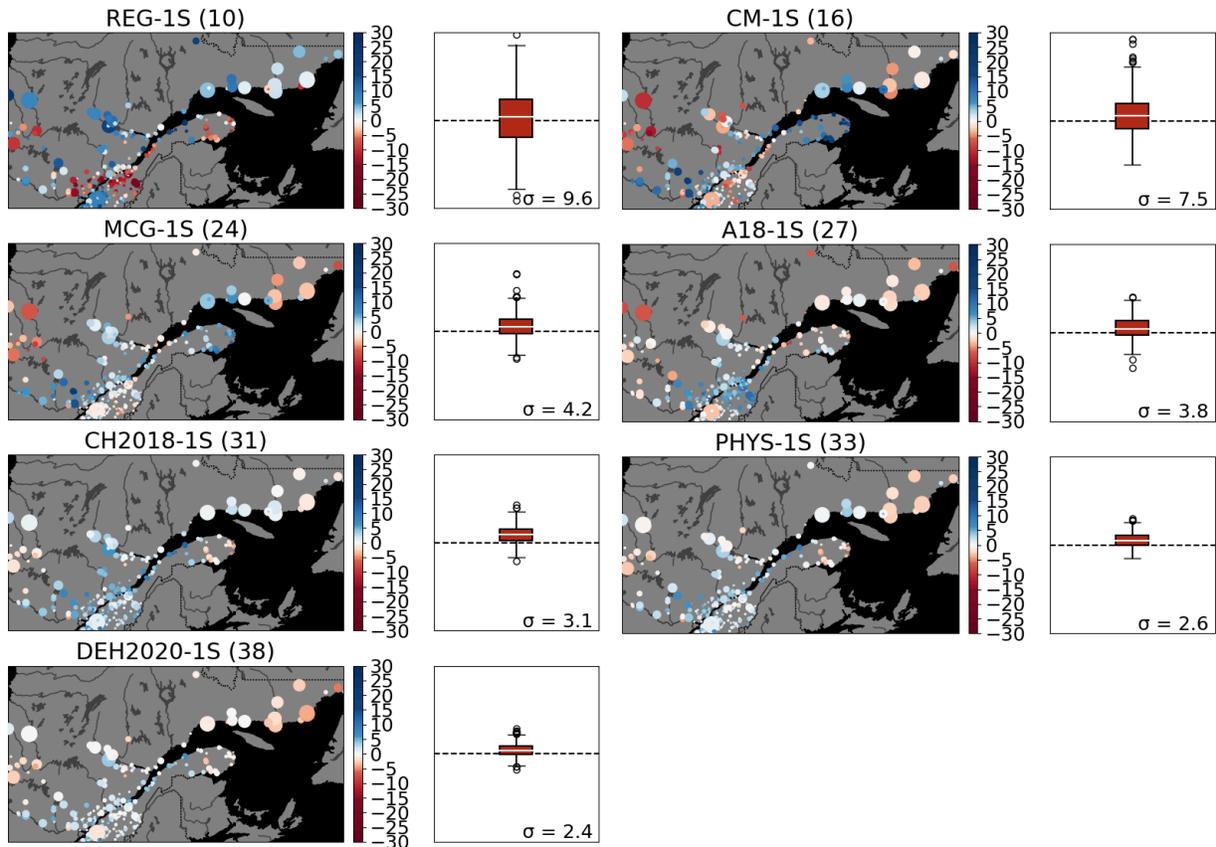


Figure 18. Différence (% absolu) entre la méthodologie *DEH2020-GP* et les alternatives possibles (méthodologie *1S*) pour le calcul du 50^e percentile de changements de l'indicateur Q1MAX350AN. Les résultats présentés sont pour l'horizon 2050 (2041-2070 vs. 1981-2010, en pourcentage de changement) et le RCP8.5. Le chiffre entre parenthèses indique le nombre de groupes indépendants associé à chaque schéma de pondération. La référence *DEH2020-GP* en possède 38.

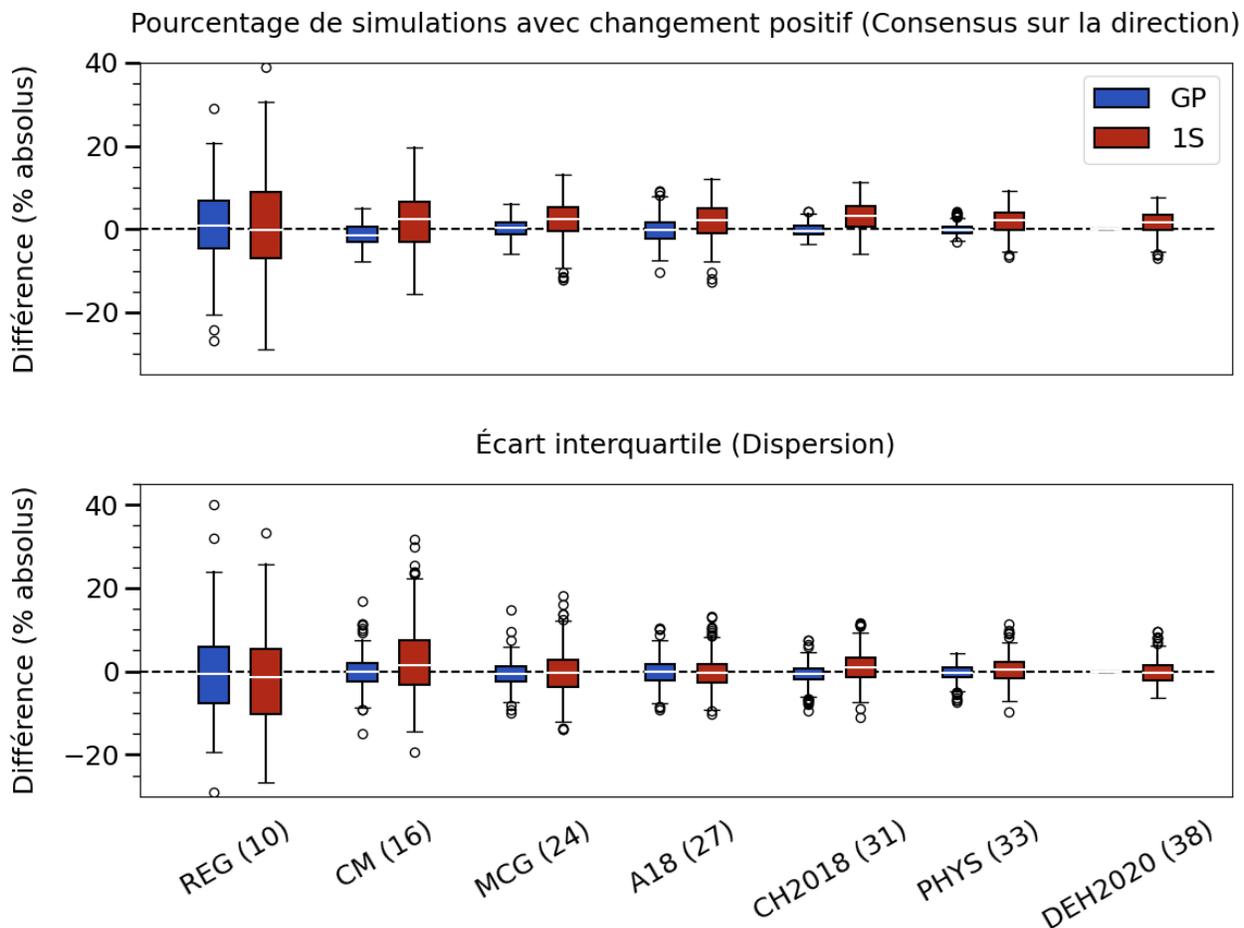


Figure 19. Différence (% absolu) entre la méthodologie *DEH2020-GP* et les alternatives possibles pour le calcul du consensus sur la direction de changement et pour le calcul de la dispersion de l'indicateur Q1MAX350AN. Les résultats présentés sont pour l'horizon 2050 (2041-2070 vs. 1981-2010, en pourcentage de changement) et le RCP8.5. Le chiffre entre parenthèses indique le nombre de groupes indépendants associé à chaque schéma de pondération. La référence *DEH2020-GP* en possède 38.

Autant pour le 50^e percentile que pour le pourcentage de simulations avec un changement positif, et autant pour Q1MAX350AN que pour Q1MAX20AN et 100AN (voir dossier numérique), la méthode *1S* affiche un biais positif par rapport à la référence *DEH2020-GP*. Ce biais est difficile à interpréter, mais pourrait être causé par la pige de la simulation unique parmi chaque groupe indépendant, qui aurait favorisé des simulations ayant des changements un peu plus intenses. Un autre constat est que *DEH2020-1S* affiche déjà des différences notables par rapport à *DEH2020-GP*, dont le biais déjà mentionné, mais également un écart-type à la Figure 18 qui est de l'ordre de grandeur des différences qui existaient entre *DEH2020-GP* et les schémas de pondérations *MCG-GP* ou *CM-GP*, qui ne possèdent respectivement que 24 ou 16 groupes indépendants.

La variance (taille des boîtes à moustache) devient de plus en plus grande au fur et à mesure que le nombre de groupes, et donc de simulations sélectionnées, diminue. Cela souligne une plus grande sensibilité pour le calcul des différentes statistiques, puisque ceux-ci sont réalisés

sur de moins en moins de simulations. Au contraire, la méthodologie pondérée permet de maintenir une variance plus faible et plus cohérente entre les schémas de pondération même si le poids relatif des différentes simulations individuelles devient réduit, d'où la plus grande robustesse pour le calcul des différentes statistiques d'ensemble.

Ces mêmes constats peuvent être appliqués aux résultats de l'analyse Monte-Carlo (Figure 20 pour un exemple avec Q1MAX350AN), où l'écart-type pour la méthodologie 1S est systématiquement plus élevé qu'avec la méthodologie GP et ce, peu importe le nombre de groupes indépendants. Cela signifie que le calcul du 50^e percentile est sensible à la pige aléatoire d'une simulation parmi celles disponibles pour un groupe donné.

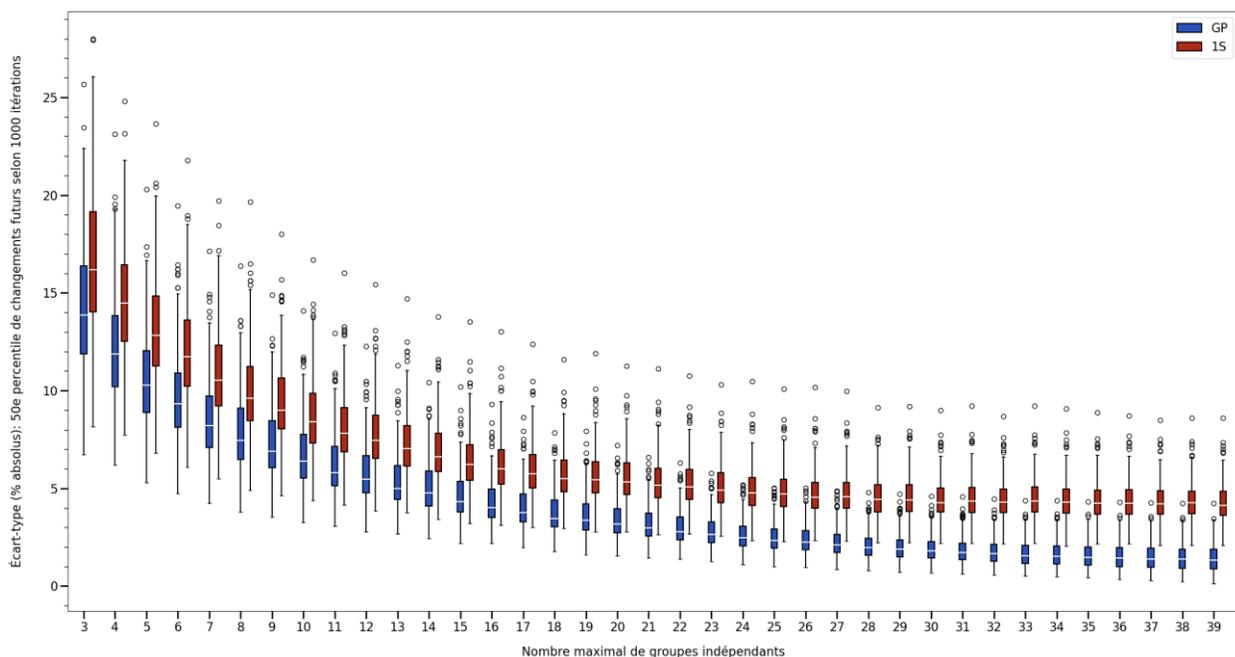


Figure 20. Pour 280 tronçons, écart-type associé au calcul du 50^e percentile de changements pour Q1MAX350AN à l'horizon 2050 avec 1000 itérations Monte Carlo.

Comme il l'avait été noté précédemment pour la méthodologie GP, l'écart-type provenant de l'analyse Monte-Carlo diminue rapidement au fur et à mesure que des simulations sont ajoutées, lorsque le nombre de simulations est faible. Cela renforce la notion qu'il est nécessaire d'avoir en main un certain nombre minimal de simulations pour pouvoir avoir confiance dans les statistiques calculées. Un 50^e percentile de changements futurs pour Q1MAX350AN calculé à partir de seulement 3 simulations, par exemple, aurait un écart-type inhérent d'environ ± 16 % selon la valeur médiane de la Figure 20. Dans ce cas précis, il semble optimal d'utiliser au moins une dizaine de simulations, mais on observe une diminution rapide du gain apporté par l'ajout d'une simulation supplémentaire, signe que ce gain en échantillonnage devient contrebalancé par les autres sources d'incertitude.

Afin de généraliser cette expérience et tenter de déterminer s'il existe un nombre optimal de simulations hydroclimatiques à utiliser dans le cas où il n'est pas possible d'utiliser et de pondérer

l'ensemble des simulations disponibles, une analyse supplémentaire sur les résultats de la méthode Monte-Carlo a été réalisée. Celle-ci a consisté à :

- Pour chacun des indicateurs calculés par la DEH :
 - Faire l'analyse Monte-Carlo, tel que présentée précédemment.
 - Calculer la différence entre l'écart-type médian à $n=3$ et à $n=39$. Cela représente le « gain » maximal pouvant être réalisé en ajoutant des simulations.
 - Pour chaque n entre 3 et 39, calculer, de manière cumulative, le gain réalisé en termes de réduction de l'écart-type médian.

Par exemple, selon la Figure 20, l'écart-type médian pour la méthodologie 1S est de 16 % à $n=3$ et de 4 % à $n=39$. Cela signifie qu'on peut, au mieux, diminuer de 12 % l'écart-type associé au calcul du 50^e percentile de changements pour Q1MAX350AN. C'est ce qui est identifié comme le « gain » maximal. Comme ce gain n'est pas acquis linéairement entre $n=3$ et 39, l'exercice vise à connaître le nombre optimal de simulations permettant d'aller chercher la plus grande partie de ce 12 %.

Les résultats étant très similaires, la Figure 21 combine les 87 indicateurs calculés par la DEH, soit tous, à l'exception de DUREE_HIVER et JQ1MAXHP dont les unités n'étaient pas compatibles. La figure indique qu'avec un ensemble de 7 à 8 simulations bien choisies, soit faisant partie de modèles, voire de centre de modélisation différents, on parvient déjà à aller chercher 50 % du gain possible en termes de la réduction de l'écart-type associé aux différentes sources d'incertitude (échantillonnage, indépendance, etc.). Il faut autour de 13 simulations pour aller chercher 75 %. Un ensemble de 16 simulations, correspondant par exemple à un ensemble constitué d'une simulation prise au hasard dans chaque centre de modélisation, va chercher environ 85 %. **Il faut environ 20 simulations pour atteindre 90 %, et 24 pour atteindre 95 % de la diminution possible de l'écart-type.** Ce dernier cas représente par exemple un échantillonnage de tous les MCG. Cela signifie également que l'ajout de 15 simulations supplémentaires permet à peine de réduire davantage l'écart-type, tel qu'identifié précédemment par l'apparition d'un « plateau » pour les valeurs plus élevées de n .

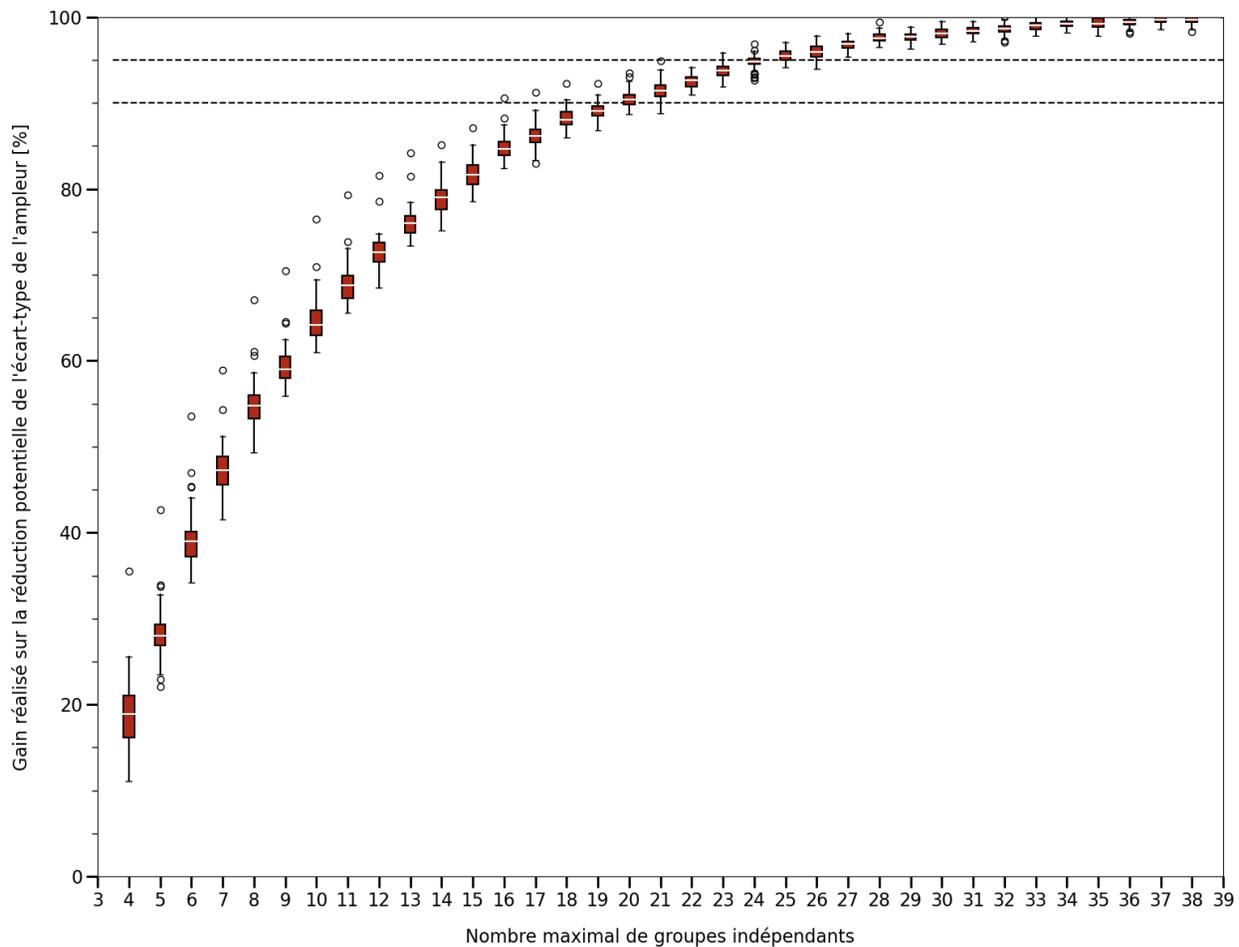


Figure 21. Pour 280 tronçons et 87 indicateurs, réduction cumulative possible de l'écart-type associé au calcul du 50e percentile de changement relatif, en fonction du nombre de simulations climatiques dans l'ensemble. Les lignes pointillées indiquent un gain de 90 % et 95 %.

5. CONCLUSIONS

5.1 DISCUSSION

Plusieurs analyses ont été présentées dans les sections précédentes, autant au niveau de la performance des simulations hydroclimatiques en période historique que du niveau d'indépendance de leur signal de changements climatiques. Les résultats sont en accord avec les conclusions d'Abramowitz et al. (2018), soit qu'il demeure difficile, voire impossible, d'appliquer une « calibration » unique et universelle.

Dans le cas spécifique des scénarios hydroclimatiques d'INFO-Crue et des analyses effectuées dans ce rapport, cela signifie que pour toute station ou tout indicateur où il semble y avoir soit une disparité entre les performances des ensembles climatiques, soit un manque d'indépendance entre un MRC et son pilote, ou entre deux modèles climatiques provenant d'un même centre de modélisation, il existe d'autres stations, indicateurs ou horizons temporels où ces conclusions ne sont pas valides. Cela suggère qu'il existe une forte variabilité spatio-temporelle dans les résultats, soit en fonction de l'indicateur hydrologique, de la taille d'un bassin versant, de sa localisation ainsi que de l'horizon temporel envisagé.

Même en ne s'attardant qu'aux indicateurs directement utiles à la mise à jour de la cartographie des plaines inondables, soient les débits maximums annuels de récurrence 20, 100 et 350 ans, il est extrêmement difficile, voire impossible, de pouvoir recommander un seul schéma de pondération ou une seule liste de modèles performants qui s'applique à la fois aux petits bassins versants agricoles du sud du Québec et aux grands bassins versants forestiers de l'Abitibi.

Par conséquent, deux options s'offrent à la DEH :

1. Utilisation d'un schéma universel pour tous les tronçons et tous les indicateurs hydrologiques d'intérêt, malgré les enjeux relatifs à tenter d'identifier un résultat unique.
2. Utilisation d'un schéma plus complexe, qui serait plus difficile à implémenter et à expliquer, mais plus représentatif des conditions locales.

Il est possible que cette deuxième option soit explorée dans le cadre d'une deuxième phase (voir Objectif général #2 à la Section 1.2), par exemple en utilisant la méthodologie proposée par Sanderson et al. (2015) et récemment raffinée par Brunner et al. (2020) pour implémenter à la fois la performance et l'indépendance des simulations dans un schéma spatio-temporel complexe. Toutefois, la nature exacte de cette deuxième phase demeure à être confirmée et pourrait plutôt explorer d'autres sujets, à la demande de la DEH.

Dans le cas d'un schéma universel, Abramowitz et al. (2018) argumente en faveur soit de la « démocratie des composantes », qui peut être difficile à réaliser en pratique puisque le même niveau de détail n'existe pas dans la littérature scientifique pour tous les modèles, soit de la

démocratie institutionnelle (identifiée comme le schéma *CM* dans ce rapport), avec le retrait potentiel de modèles très similaires entre deux institutions, ainsi que le maintien de modèles d'une même institution s'ils sont jugés assez distincts. Ces subtilités ajoutent une grande part de complexité et de subjectivité et, en prenant en compte le fait d'avoir un mélange de modèles globaux et régionaux comme c'est le cas pour l'ensemble INFO-Crue, cette argumentation pointe vers un schéma de pondération qui se situerait quelque part entre les schémas *PHYS* et *CM* explorés dans ce rapport.

Même si une multitude d'alternatives pourraient exister selon le niveau de détail utilisé dans la description et la comparaison des composantes des modèles climatiques, les analyses effectuées dans le cadre de ce rapport démontrent que les résultats sont robustes peu importe le schéma exact de pondération utilisé, notamment pour la gamme de schémas potentiels se situant autour du nombre de groupes indépendants de *PHYS* et de *CM*. Par conséquent, l'emphase ne devrait pas être à tenter d'identifier le schéma universel idéal (celui-ci n'existe pas), mais plutôt à tenter de mieux comprendre l'impact associé à cette source d'incertitude.

5.2 RECOMMANDATIONS

5.2.1 Liste de simulations à utiliser

L'analyse de la performance des simulations hydroclimatiques réalisée dans le cadre de ce rapport illustre bien la difficulté à distinguer entre une « bonne » et une « mauvaise » simulation, puisque ce concept dépend de multiples facteurs et que la réponse obtenue sera différente selon le cadre d'analyse utilisé. Dans plusieurs cas, les membres d'un même modèle peuvent apparaître à la fois très et peu performants, ce qui pourrait indiquer que les mesures de performances utilisées dans ce rapport et les résultats sont fortement influencés par la variabilité naturelle. Compte-tenu du post-traitement effectué préalablement sur les simulations climatiques, ce constat n'est peut-être pas si surprenant.

De plus, il a été identifié que la plateforme hydrologique elle-même a un rôle dominant dans cette performance et peut complètement inverser la distribution des biais entre CMIP5, CORDEX et ClimEx. Par exemple, alors que les modèles régionaux semblent être capables de bien représenter les crues été-automne de faible période de retour avec la plateforme MG24HI, ce sont plutôt les simulations CMIP5 qui ont le biais le plus faible pour la plateforme MG24HS.

On obtient donc un portrait général où la distribution des biais est difficile à établir, et où l'élimination de modèles ou de simulations est encore plus difficile à justifier et à défendre lorsque l'objectif est de chercher à utiliser la même liste de modèles climatiques pour l'ensemble du territoire, des plateformes HYDROTEL et des indicateurs hydrologiques. Ainsi, pour les fins d'INFO-Crue, toutes les simulations hydroclimatiques pourraient être utilisées.

Cela ne veut toutefois pas dire qu'il est impossible ou déconseillé d'utiliser un ensemble réduit, notamment pour des situations où l'on cherche un ensemble permettant de mieux représenter

une application spécifique, tel que les crues été-automne pour un bassin versant précis ou une région d'intérêt. D'ailleurs, certaines des figures présentées dans ce rapport laissent penser que les ensembles climatiques ClimEx et CORDEX pourraient être plus adéquats pour certaines plateformes hydrologiques (et similairement pour CMIP5). Un travail plus fin et détaillé pourrait ainsi permettre de mieux comprendre les interactions entre les paramètres d'HYDROTEL et l'adéquation des simulations hydroclimatiques.

Finalement, il est possible que le projet 701000 d'Ouranos présentement en cours, qui vise à évaluer l'ensemble INFO-Crue sur une base climatique plutôt qu'hydrologique, arrive à la conclusion que certains modèles climatiques devraient être retirés de l'ensemble, même si leur performance hydrologique semble adéquate.

5.2.1 Schéma pondération recommandé

Il existe une flexibilité quant au schéma de pondération à utiliser pour les fins d'INFO-Crue. En mai 2020, la pondération proposée était largement basée sur le nom des modèles climatiques. Or, il s'avère que certaines simulations, notamment dans CMIP5, sont des versions identiques d'un modèle climatique utilisant des résolutions spatiales différentes. Par conséquent, si la DEH souhaite utiliser un maximum d'information provenant de l'ensemble hydroclimatique, alors le schéma *PHYS-GP* proposé dans ce rapport serait recommandé. Ce schéma utilise les mêmes hypothèses que la proposition initiale et se rapproche de la méthodologie « 1 modèle 1 vote » couramment employée dans la pratique, mais avec une définition plus physique de ce que constitue un modèle. Ce schéma pose également comme hypothèse que les modèles régionaux amènent une information distincte de leurs pilotes, ce qui semble s'avérer la plupart du temps.

Toutefois, ces hypothèses ne semblent pas systématiquement s'appliquer à tous les bassins versants ou à tous les indicateurs hydrologiques. Par conséquent, et si la DEH souhaite posséder une meilleure compréhension de l'incertitude associée au schéma de pondération, il serait tout à fait justifiable, voire recommandé, de comparer ou de combiner les résultats obtenus par *PHYS-GP* avec les schémas *MCG-GP* et *CM-GP*. Ceux-ci supposent que l'indépendance réelle du signal de changements climatiques est plutôt dépendante du modèle global de climat ou du centre de modélisation, respectivement.

Finalement, et tel que souligné également à la Section 5.2.1, les conclusions présentées ici sont réalisées dans une optique où ces résultats peuvent être appliqués à l'ensemble des tronçons de rivière visées par INFO-Crue. D'un point de vue local plutôt que global, il serait justifiable (par une municipalité, une firme d'experts, un organisme de bassin versant, etc.) de raffiner la méthodologie et le schéma de pondération afin de mieux représenter un bassin versant donné. Abramowitz et al. (2018) offre plusieurs pistes méthodologiques intéressantes à cet effet.

RÉFÉRENCES

- Abramowitz, G., Herger, N., Gutmann, E., Hammerling, D., Knutti, R., Leduc, M., Lorenz, R., Pincus, R., & Schmidt, G. (2018). Model dependence in multi-model climate ensembles: weighting, sub-selection and out-of-sample testing. *Earth System Dynamics Discussions*, 6, 1–20. <https://doi.org/10.5194/esd-2018-51>
- Beck, H., Van Dijk, A., de Roo, A., Miralles, D., McVicar, T., Schellekens, J., & Adrian, B. (2016). Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, 52, 3599–3622. <https://doi.org/10.1002/2015WR018247>.Received
- Brunner, L., Pendergrass, A. G., Lehner, F., Merrifield, A. L., Lorenz, R., & Knutti, R. (2020). Reduced global warming from CMIP6 projections when weighting models by performance and independence. *Earth System Dynamics*, 11(4), 995–1012. <https://doi.org/10.5194/esd-11-995-2020>
- Cannon, A. J. (2015). Selecting GCM scenarios that span the range of changes in a multimodel ensemble: Application to CMIP5 climate extremes indices. *Journal of Climate*, 28(3), 1260–1267. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00636.1>
- Chen, J., Brissette, F. P., Lucas-Picher, P., & Caya, D. (2017). Impacts of weighting climate models for hydro-meteorological climate change studies. *Journal of Hydrology*, 549(April), 534–546. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.025>
- Christensen, J. H., Kjellström, E., Giorgi, F., Lenderink, G., & Rummukainen, M. (2010). Weight assignment in regional climate models. In *Climate Research* (Vol. 44, Issues 2–3, pp. 179–194). <https://doi.org/10.3354/cr00916>
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W. J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A. J., & Wehner, M. (2013). Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1029–1136). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.024>
- Dalelane, C., Früh, B., Steger, C., & Walter, A. (2018). A pragmatic approach to build a reduced regional climate projection ensemble for Germany using the EURO-CORDEX 8.5 ensemble. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(3), 477–491. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0141.1>
- Giorgi, F., & Mearns, L. O. (2002). Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the “Reliability Ensemble Averaging” (REA) method. *Journal of Climate*, 15(10), 1141–1158. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1141:COAURA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1141:COAURA>2.0.CO;2)
- Giuntoli, I., Villarini, G., Prudhomme, C., & Hannah, D. M. (2018). Uncertainties in projected runoff over the conterminous United States. *Climatic Change*, 150(3–4), 149–162. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2280-5>

- Hausfather, Z., & Peters, G. P. (2020). Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading. *Nature*, 577(7792), 618–620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>
- Hawkins, E., & Sutton, R. (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. In *Bulletin of the American Meteorological Society* (Vol. 90, Issue 8, pp. 1095–1107). <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1>
- Knutti, R., Sedláček, J., Sanderson, B. M., Lorenz, R., Fischer, E. M., & Eyring, V. (2017). A climate model projection weighting scheme accounting for performance and interdependence. *Geophysical Research Letters*, 44(4), 1909–1918. <https://doi.org/10.1002/2016GL072012>
- Krysanova, V., Donnelly, C., Gelfan, A., Gerten, D., Arheimer, B., Hattermann, F., & Kundzewicz, Z. W. (2018). How the performance of hydrological models relates to credibility of projections under climate change. *Hydrological Sciences Journal*, 63(5), 696–720. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1446214>
- Leduc, M., Laprise, R., de Elía, R., & Šeparović, L. (2016). Is institutional democracy a good proxy for model independence? *Journal of Climate*, 29(23), 8301–8316. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0761.1>
- Leduc, M., Mailhot, A., Frigon, A., Martel, J.-L., Ludwig, R., Brietzke, G. B., Giguère, M., Brissette, F., Turcotte, R., Braun, M., & Scinocca, J. (2019). ClimEx project: a 50-member ensemble of climate change projections at 12-km resolution over Europe and northeastern North America with the Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 663–693. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-18-0021.1>
- Masson, D., & Knutti, R. (2011). Climate model genealogy. *Geophysical Research Letters*, 38(8), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2011GL046864>
- Mearns, L., McGinnis, S., Korytina, D., Arritt, R. W., Biner, S., Bukovsky, M. S., Chang, H.-I., Christensen, O. B., Herzmann, D., Jiao, Y., Kharin, S., Lazare, M., Nikulin, G., Qian, M., Scinocca, J., Winger, K., Castro, C., Frigon, A., & Gutowski, W. J. (2017). *The NA-CORDEX dataset, version 1.0*. NCAR Climate Data Gateway, Boulder CO. <https://doi.org/10.5065/D6SJ1JCH>
- Merrifield, A. L., Brunner, L., Lorenz, R., Medhaug, I., & Knutti, R. (2020). An investigation of weighting schemes suitable for incorporating large ensembles into multi-model ensembles. *Earth System Dynamics*, 11(3), 807–834. <https://doi.org/10.5194/esd-11-807-2020>
- Olsson, J., Arheimer, B., Borris, M., Donnelly, C., Foster, K., Nikulin, G., Persson, M., Perttu, A. M., Uvo, C. B., Viklander, M., & Yang, W. (2016). Hydrological climate change impact assessment at small and large scales: Key messages from recent progress in Sweden. *Climate*, 4(3). <https://doi.org/10.3390/cli4030039>
- Sanderson, B. M., Knutti, R., & Caldwell, P. (2015). Addressing interdependency in a multimodel ensemble by interpolation of model properties. *Journal of Climate*, 28(13), 5150–5170. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00361.1>
- Sanderson, B., Wehner, M., & Knutti, R. (2017). Skill and independence weighting for multi-model assessments. *Geoscientific Model Development Discussions*, 10, 2379–2395.

<https://doi.org/10.5194/gmd-2016-285>

- Seo, S. B., Kim, Y. O., Kim, Y., & Eum, H. II. (2019). Selecting climate change scenarios for regional hydrologic impact studies based on climate extremes indices. *Climate Dynamics*, 52(3–4), 1595–1611. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4210-7>
- Sigmond, M., & Fyfe, J. C. (2016). Tropical Pacific impacts on cooling North American winters. *Nature Climate Change*, June, 1–22. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3069>
- Sørland, S. L., Fischer, A. M., Kotlarski, S., Künsch, H. R., Liniger, M. A., Rajczak, J., Schär, C., Spirig, C., Strassmann, K., & Knutti, R. (2020). CH2018 – National climate scenarios for Switzerland: How to construct consistent multi-model projections from ensembles of opportunity. *Climate Services*, 20(November). <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2020.100196>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2011). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Tebaldi, C., & Knutti, R. (2007). The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1857), 2053–2075. <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2076>
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1), 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

ANNEXES

ANNEXE A – MODÈLES PROVENANT DU MÊME CENTRE DE MODÉLISATION ET DIFFÉRENCES CONNUES

Modèles	
<ul style="list-style-type: none"> ACCESS1.0 ACCESS1.3 	<p>B. Versions différentes du même modèle</p> <p>ACCESS1.3 est une version plus à jour de ACCESS1.0, qui partage de nombreuses composantes. L'écart de version entre les deux simulations laisse supposer que les changements ne sont pas assez majeurs pour justifier un changement de chiffre.</p> <p>https://research.csiro.au/access/what/pre-cmip6-model-versions/</p>
<ul style="list-style-type: none"> BCC-CSM-1.1 BCC-CSM-1.1(m) 	<p>A. Même modèle, mais résolutions différentes</p> <p>Ces deux simulations utilisent le modèle BCC-CSM-1.1, mais la version (m) possède une atmosphère à résolution plus fine.</p> <p>http://forecast.bccsm.ncc-cma.net/web/channel-63.htm</p>
<ul style="list-style-type: none"> CanESM2 CanESM2_CanRCM4 CanESM2_RCA4 CanESM2_CRCM5-UQAM CanESM2_CRCM5-Ouranos ClimEx (RCP8.5) 	<p>A. Même modèle, mais résolutions différentes</p> <ul style="list-style-type: none"> CanESM2-CanRCM4 existe à deux résolutions, soient 0.22° et 0.44°. CanESM2_CRCM5 existe à trois résolutions, soient 0.44° (version UQÀM), 0.22° (version Ouranos) et 0.11° (ClimEx). <p>B. Versions différentes du même modèle</p> <p>CRCM5-Ouranos et CRCM5-UQAM ont des paramétrages légèrement différents, notamment dans le nombre de couches de sol, dans les fractions de lac pour les réservoirs d'Hydro-Québec et quelques autres différences mineures.</p>

	<p>C. Pilote et modèle régional</p> <p>Toutes ces simulations ont en commun qu'elles sont pilotées par CanESM2 et, dans plusieurs cas, par le même membre de CanESM2.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • CMCC-CM • CMCC-CMS • CMCC-CESM (RCP8.5) 	<p>A. Même modèle, mais résolutions différentes</p> <ul style="list-style-type: none"> • CMCC-CMS utilise CMCC-CM, mais avec une stratosphère résolue. Entre autres, cela explique la plus faible résolution ($\sim 1.875^\circ$) de cette simulation, en comparaison à CMCC-CM (0.75°). À notre connaissance, il n'existe aucune différence au niveau des composantes elles-mêmes. <p>B. Versions différentes du même modèle</p> <ul style="list-style-type: none"> • RCP8.5 : CMCC-CESM est la version « modèle de système terrestre » de CMCC-CM dans laquelle le cycle du carbone est simulé explicitement. <p>https://www.cmcc.it/models/cmcc-cm https://www.cmcc.it/models/cmcc-esm-earth-system-model</p>
<ul style="list-style-type: none"> • CNRM-CM5 • CNRM-CM5_CRCM5-Ouranos 	<p>C. Pilote et modèle régional</p> <p>Ces simulations ont en commun qu'elles sont pilotées par le premier membre de CNRM-CM5.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • EC-EARTH_HIRHAM5 • EC-EARTH_RCA4 	<p>C. Pilote et modèle régional</p> <p>Ces simulations ont en commun qu'elles sont pilotées par EC-EARTH. Toutefois, la réalisation utilisée est différente (r3i1p1 et r12i1p1, respectivement).</p>
<ul style="list-style-type: none"> • GFDL-CM3 • GFDL-ESM2G • GFDL-ESM2M • GFDL-ESM2M_RegCM4 (RCP8.5) • GFDL-ESM2M_CRCM5-Ouranos 	<p>A. Même modèle, mais résolutions différentes</p> <p>RCP8.5 : GFDL-ESM2M_RegCM4 existe à deux résolutions, soient 0.22° et 0.44°.</p> <p>B. Versions différentes du même modèle</p> <ul style="list-style-type: none"> • GFDL-ESM2(G et M) ont été bâtis à partir de GFDL-CM2.1.

	<ul style="list-style-type: none"> • La seule différence entre GFDL-ESM2G et 2M est dans le modèle d'océan utilisé, Generalized Ocean Layer Dynamics (GOLD) et Modular Ocean Model v4.1 respectivement. <p>https://www.gfdl.noaa.gov/coupled-physical-model-cm3/ https://www.gfdl.noaa.gov/earth-system-model/</p> <p>C. Pilote et modèle régional</p> <p>Plusieurs de ces simulations ont en commun qu'elles sont pilotées par le premier membre de GFDL-ESM2M.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • GISS-E2-H (RCP4.5) • GISS-E2-R (RCP4.5) 	<p>B. Versions différentes du même modèle</p> <ul style="list-style-type: none"> • RCP4.5 : La seule différence entre GISS-E2-H et GISS-E2-R est dans le modèle d'océan utilisé, HYCOM et Russell respectivement. • RCP4.5 : Deux simulations de GISS-E2-R existent avec un paramétrage différent (r6i1p1 et r6i1p3). <p>https://portal.enes.org/data/enes-model-data/cmip5/resolution</p>
<ul style="list-style-type: none"> • IPSL-CM5A-LR • IPSL-CM5A-MR • IPSL-CM5B-LR 	<p>A. Même modèle, mais résolutions différentes</p> <p>IPSL-CM5A existe à deux résolutions, soient LR (<i>low resolution</i>) et MR (<i>mid-resolution</i>).</p> <p>B. Versions différentes du même modèle</p> <p>IPSL-CM5A et IPSL-CM5B sont deux variations de IPSL-CM5, avec des différences dans le modèle d'océan et dans le paramétrage de l'atmosphère.</p> <p>http://cmc.ipsl.fr/international-projects/cmip5/</p>
<ul style="list-style-type: none"> • MIROC5 • MIROC-ESM • MIROC-ESM-CHEM 	<p>B. Versions différentes du même modèle</p> <ul style="list-style-type: none"> • MIROC-ESM est un modèle de système terrestre bâti sur le « modèle climatique global MIROC ». Il s'agit potentiellement de MIROC5 ou d'une version antérieure, mais il est difficile de trouver cette information.

	<ul style="list-style-type: none"> • MIROC-ESM-CHEM est une version de MIROC-ESM couplée avec un modèle de chimie atmosphérique. <p>https://gmd.copernicus.org/preprints/4/1063/2011/gmdd-4-1063-2011.pdf https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/23/23/2010jcli3679.1.xml</p>
<ul style="list-style-type: none"> • MPI-ESM-LR • MPI-ESM-MR • MPI-ESM-LR_CRCM5-UQAM (RCP4.5) • MPI-ESM-MR_CRCM5-UQAM (RCP8.5) • MPI-ESM-LR_CRCM5-Ouranos • MPI-ESM-LR_RegCM4 (RCP8.5) 	<p>A. Même modèle, mais résolutions différentes</p> <ul style="list-style-type: none"> • La composante d’océan de MPI-ESM existe à deux résolutions, soient LR (<i>low resolution</i>) et MR (<i>mid resolution</i>). • RCP8.5 : MPI-ESM-LR_RegCM4 existe à deux résolutions, soient 0.22° et 0.44 <p>https://www.wcrp-climate.org/images/modelling/WGCM/WGCM15/21Oct/GIORGETTA_MPIM.pdf</p> <p>B. Versions différentes du même modèle</p> <p>CRCM5-Ouranos et CRCM5-UQAM ont des paramétrages légèrement différents, notamment dans le nombre de couches de sol, dans les fractions de lac pour les réservoirs d’Hydro-Québec et quelques autres différences mineures.</p> <p>C. Pilote et modèle régional</p> <p>Plusieurs de ces simulations ont en commun qu’elles sont pilotées par les premiers membres de MPI-ESM-LR ou MR.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • MRI-CGCM3 • MRI-ESM1 (RCP8.5) 	<p>B. Versions différentes du même modèle</p> <p>RCP8.5 : MRI-ESM1 est un modèle de système terrestre bâti à partir de MRI-CGCM3.</p> <p>https://www.jstage.jst.go.jp/article/mripapers/64/0/64_1/pdf/-char/ja</p>

ANNEXE B – PERFORMANCE DES SIMULATIONS CLIMATIQUES POUR LES INDICATEURS HYDROLOGIQUES PAR TAILLE DE BASSIN VERSANT ET SELON LES PLATEFORMES DE SIMULATION HYDROLOGIQUES

Les Figures dans l'annexe B montrent les différences de la performance des 180 simulations climatiques en fonction de 5 différents classes de taille de bassin versant (<150 km², 150 à 500 km², 500 à 1000 km², 1000 à 10 000 km², et >10 000 km² - horizontal) et de six indicateurs ainsi que leur moyenne (Première ligne : biais moyen des indicateurs, lignes suivantes : Q1MAX2*, Q1MAX5*, Q1MAX10*, Q1MAX20*, Q1MAX100*, Q1MAX350* - verticale). Les groupes de Figures contiennent les graphiques pour les différents plateformes LN24HA, MG24HA, MG24HI, MG24HK, MG24HQ et MG24HS. Les groupes affichent les périodes d'analyse des indicateurs, soit 'annuelle', 'hiver-printemps', 'été-automne. Les couleurs indiquent l'appartenance des simulations aux trois ensembles CMIP5, CORDEX et ClimEx.

Groupe I : Indicateurs annuels

Performance des simulations pour:
Indicateurs annuels – plateforme MG24HS:



Performance des simulations pour: Indicateurs annuels – plateforme MG24HQ:



Performance des simulations pour: Indicateurs annuels – plateforme MG24HI:



Performance des simulations pour: Indicateurs annuels – plateforme MG24HK:



Performance des simulations pour: Indicateurs annuels – plateforme MG24HA:



Performance des simulations pour: Indicateurs annuels – plateforme LN24HA:



Groupe II : Indicateurs estivaux (été – automne)

Performance des simulations pour:
Indicateurs estivaux (EA) – plateforme MG24HS:



Performance des simulations pour: Indicateurs estivaux (EA) – plateforme MG24HQ:



Performance des simulations pour: Indicateurs estivaux (EA) – plateforme MG24HI:



Performance des simulations pour: Indicateurs estivaux (EA) – plateforme MG24HK:



Performance des simulations pour: Indicateurs estivaux (EA) – plateforme MG24HA:



Performance des simulations pour: Indicateurs estivaux (EA) – plateforme LN24HA:



Groupe III : Indicateurs hivernaux (hiver – printemps)

Performance des simulations pour:
Indicateurs hivernaux (HP) – plateforme MG24HS:



Performance des simulations pour: Indicateurs hivernaux (HP) – plateforme MG24HQ:



Performance des simulations pour: Indicateurs hivernaux (HP) – plateforme MG24HI:



Performance des simulations pour: Indicateurs hivernaux (HP) – plateforme MG24HK:



Performance des simulations pour: Indicateurs hivernaux (HP) – plateforme LN24HA:



ANNEXE C – SCHÉMAS DE PONDÉRATION

Les tableaux ci-dessous détaillent les schémas de pondération analysés. Les lignes regroupent les simulations d'un même centre de modélisation et, à l'intérieur d'un centre de modélisation donné, l'alternance de couleurs blanches et grises représente les différents sous-groupes formés par les schémas de pondération. Une version CSV est disponible dans le dossier numérique.

Tableau C1. Schémas de pondération pour les simulations du RCP4.5.

Ensemble	Centre de modélisation (MCG)	MCG	MRC	Résolution (degrés)		Membre	Codification cQ2	DEH2020		PHYS		CH2018		MCG		CM		A18		REG			
				Latitude	Longitude			1S	GP	1S	GP	1S	GP	1S	GP	1S	GP	1S	GP	1S	GP	1S	GP
				CMIP5	CSIRO-BOM			ACCESS1.0		1.25	1.875	r1i1p1	CM5_A10_XXX_R41	1	1	1	1	0	0.5	1	1	0	0.5
CMIP5	CSIRO-BOM	ACCESS1.3		1.25	1.875	r1i1p1	CM5_A13_XXX_R41	1	1	1	1	1	0.5	1	1	1	0.5	1	1	0	0		
CMIP5	BCC	BCC- CSM1.1		2.7906	2.8125	r1i1p1	CM5_BC1_XXX_R41	1	1	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.5	1	1	0	0		
CMIP5	BCC	BCC- CSM1.1(m)		1.1215	1.125	r1i1p1	CM5_B1M_XXX_R41	1	1	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	1	0	0		
CMIP5	GCESS	BNU-ESM		2.7906	2.8125	r1i1p1	CM5_BNU_XXX_R41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
CMIP5	CCCma	CanESM2		2.7906	2.8125	r1i1p1	CM5_CE2_XXX_R41	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.05	0	0.05	1	0.2	0	0		
CMIP5	CCCma	CanESM2		2.7906	2.8125	r2i1p1	CM5_CE2_XXX_R42	1	0.2	1	0.2	1	0.2	0	0.05	0	0.05	0	0.2	0	0		
CMIP5	CCCma	CanESM2		2.7906	2.8125	r3i1p1	CM5_CE2_XXX_R43	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.05	0	0.05	0	0.2	0	0		
CMIP5	CCCma	CanESM2		2.7906	2.8125	r4i1p1	CM5_CE2_XXX_R44	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.05	0	0.05	0	0.2	0	0		
CMIP5	CCCma	CanESM2		2.7906	2.8125	r5i1p1	CM5_CE2_XXX_R45	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.05	0	0.05	0	0.2	0	0		
CORDEX	CCCma	CanESM2	CanRCM4	0.22	0.22	r1i1p1	COR_CE2_CA2_R41	1	0.5	1	0.5	1	0.5	0	0.125	0	0.125	0	0	1	0.5		
CORDEX	CCCma	CanESM2	CanRCM4	0.44	0.44	r1i1p1	COR_CE2_CA4_R41	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.125	0	0.125	0	0	0	0.5		
CORDEX	CCCma	CanESM2	RCA4	0.44	0.44	r1i1p1	COR_CE2_RC4_R41	1	1	1	1	1	1	0	0.25	0	0.25	0	0	1	1		
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5- UQAM	0.44	0.44	r1i1p1	COR_CE2_CU4_R41	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.125	0	0.125	0	0	0	0.5		
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.22	0.22	r1i1p1	COR_CE2_CO2_R41	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.125	1	0.125	0	0	1	0.5		
CMIP5	CMCC	CMCC-CM		0.7484	0.75	r1i1p1	CM5_CMM_XXX_R41	1	1	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.5	1	1	0	0		
CMIP5	CMCC	CMCC- CMS		1.8653	1.875	r1i1p1	CM5_CMS_XXX_R41	1	1	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	1	0	0		
CMIP5	CNRM- CERFACS	CNRM-CM5		1.4008	1.40625	r1i1p1	CM5_CN5_XXX_R41	1	1	1	1	1	1	0	0.5	0	0.5	1	1	0	0		

CORDEX	CNRM-CERFACS	CNRM-CM5	CRCM5-Ouranos	0.22	0.22	r1i1p1	COR_CN5_CO2_R41	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	0.5	0	0	1	1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r1i1p1	CM5_CSI_XXX_R41	1	0.1	1	0.1	1	0.1	1	0.1	1	0.1	1	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r2i1p1	CM5_CSI_XXX_R42	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r3i1p1	CM5_CSI_XXX_R43	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r4i1p1	CM5_CSI_XXX_R44	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r5i1p1	CM5_CSI_XXX_R45	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r6i1p1	CM5_CSI_XXX_R46	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r7i1p1	CM5_CSI_XXX_R47	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r8i1p1	CM5_CSI_XXX_R48	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r9i1p1	CM5_CSI_XXX_R49	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r10i1p1	CM5_CSI_XXX_410	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CORDEX	ECMWF	EC-EARTH	HIRHAM5	0.44	0.44	r3i1p1	COR_ECE_HH4_R43	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	0.5	0	0	1	1
CORDEX	ECMWF	EC-EARTH	RCA4	0.44	0.44	r12i1p1	COR_ECE_RC4_412	1	1	1	1	1	1	0	0.5	0	0.5	0	0	1	1
CMIP5	LASG-CESS	FGOALS-g2		2.7906	2.8125	r1i1p1	CM5_FGO_XXX_R41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-CM3		2	2.5	r1i1p1	CM5_GF3_XXX_R41	1	0.333	1	0.333	1	0.333	1	0.333	0	0.111	1	0.333	0	0
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-CM3		2	2.5	r3i1p1	CM5_GF3_XXX_R43	0	0.333	0	0.333	0	0.333	0	0.333	0	0.111	0	0.333	0	0
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-CM3		2	2.5	r5i1p1	CM5_GF3_XXX_R45	0	0.333	0	0.333	0	0.333	0	0.333	0	0.111	0	0.333	0	0
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2G		2.0225	2	r1i1p1	CM5_GFG_XXX_R41	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.333	1	1	0	0
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M		2.0225	2	r1i1p1	CM5_GFM_XXX_R41	1	1	1	1	1	1	0	0.5	0	0.167	1	1	0	0
CORDEX	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M	CRCM5-Ouranos	0.22	0.22	r1i1p1	COR_GFM_CO2_R41	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	0.167	0	0	1	1
CMIP5	NASA-GISS	GISS-E2-H		2	2.5	r6i1p1	CM5_GIH_XXX_R46	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.333	1	1	0	0
CMIP5	NASA-GISS	GISS-E2-R		2	2.5	r6i1p1	CM5_GIR_XXX_R45	1	1	1	1	1	0.5	1	1	1	0.333	1	1	0	0
CMIP5	NASA-GISS	GISS-E2-R		2	2.5	r6i1p3	CM5_GIR_XXX_R46	1	1	1	1	0	0.5	1	1	0	0.333	1	1	0	0
CMIP5	INM	INM-CM4		1.5	2	r1i1p1	CM5_INM_XXX_R41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1.8947	3.75	r1i1p1	CM5_IAL_XXX_R41	1	0.25	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.1	1	0.25	0	0
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1.8947	3.75	r2i1p1	CM5_IAL_XXX_R42	0	0.25	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.1	0	0.25	0	0
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1.8947	3.75	r3i1p1	CM5_IAL_XXX_R43	0	0.25	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.1	0	0.25	0	0
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1.8947	3.75	r4i1p1	CM5_IAL_XXX_R44	0	0.25	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.1	0	0.25	0	0
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1.8947	3.75	r1i1p1	CM5_IAM_XXX_R41	1	1	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.1	1	1	0	0

CMIP5	IPSL	IPSL-CM5B-LR	1.8947	3.75	r1i1p1	CM5_IBL_XXX_R41	1	1	1	1	1	1	0	0.5	1	1	0	0		
CMIP5	MIROC	MIROC5	1.4008	1.40625	r1i1p1	CM5_MI5_XXX_R41	1	0.333	1	0.333	1	0.333	1	0.333	0	0.111	1	0.333	0	0
CMIP5	MIROC	MIROC5	1.4008	1.40625	r2i1p1	CM5_MI5_XXX_R42	0	0.333	0	0.333	0	0.333	0	0.333	0	0.111	0	0.333	0	0
CMIP5	MIROC	MIROC5	1.4008	1.40625	r3i1p1	CM5_MI5_XXX_R43	0	0.333	0	0.333	0	0.333	0	0.333	0	0.111	0	0.333	0	0
CMIP5	MIROC	MIROC-ESM	2.7906	2.8125	r1i1p1	CM5_MIE_XXX_R41	1	1	1	1	0	0.5	1	1	0	0.333	1	1	0	0
CMIP5	MIROC	MIROC-ESM-CHEM	2.7906	2.8125	r1i1p1	CM5_MIC_XXX_R41	1	1	1	1	1	0.5	1	1	1	0.333	1	1	0	0
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-LR	1.8653	1.875	r1i1p1	CM5_MPL_XXX_R41	1	0.333	0	0.167	0	0.167	0	0.0833	0	0.0833	1	0.333	0	0
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-LR	1.8653	1.875	r2i1p1	CM5_MPL_XXX_R42	0	0.333	0	0.167	0	0.167	0	0.0833	0	0.0833	0	0.333	0	0
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-LR	1.8653	1.875	r3i1p1	CM5_MPL_XXX_R43	0	0.333	0	0.167	0	0.167	0	0.0833	0	0.0833	0	0.333	0	0
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-MR	1.8653	1.875	r1i1p1	CM5_MPM_XXX_R41	1	0.333	1	0.167	1	0.167	0	0.0833	0	0.0833	1	0.333	0	0
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-MR	1.8653	1.875	r2i1p1	CM5_MPM_XXX_R42	0	0.333	0	0.167	0	0.167	0	0.0833	0	0.0833	0	0.333	0	0
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-MR	1.8653	1.875	r3i1p1	CM5_MPM_XXX_R43	0	0.333	0	0.167	0	0.167	0	0.0833	0	0.0833	0	0.333	0	0
CORDEX	MPI-M	MPI-ESM-LR	0.44	0.44	r1i1p1	CRCM5-UQAM	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.25	0	0.25	0	0	0	0.5
CORDEX	MPI-M	MPI-ESM-LR	0.22	0.22	r1i1p1	CRCM5-Ouranos	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.25	1	0.25	0	0	1	0.5
CORDEX	MPI-M	MPI-ESM-MR	0.44	0.44	r1i1p1	CRCM5-UQAM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CMIP5	MRI	MRI-CGCM3	1.12148	1.125	r1i1p1	CM5_MR3_XXX_R41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
CMIP5	NCC	NorESM1-M	1.8947	2.5	r1i1p1	CM5_NOE_XXX_R41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0

Tableau C2. Schémas de pondération pour les simulations du RCP8.5.

Ensemble	Centre de modélisation (MCG)	MCG	Résolution (degrés)		Membre	Codification cQ2	DEH2020		PHYS		CH2018		MCG		CM		A18		REG	
			Latitude	Longitude			1S	GP	1S	GP	1S	GP	1S	GP	1S	GP	1S	GP	1S	GP
CMIP5	CSIRO-BOM	ACCESS1.0	1.25	1.875	r1i1p1	CM5_A10_XXX_R81	1	1	1	1	0	0.5	1	1	0	0.5	1	1	0	0
CMIP5	CSIRO-BOM	ACCESS1.3	1.25	1.875	r1i1p1	CM5_A13_XXX_R81	1	1	1	1	1	0.5	1	1	1	0.5	1	1	0	0
CMIP5	BCC	BCC-CSM1.1	2.7906	2.8125	r1i1p1	CM5_BC1_XXX_R81	1	1	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.5	1	1	0	0
CMIP5	BCC	CSM1.1(m)	1.1215	1.125	r1i1p1	CM5_B1M_XXX_R81	1	1	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	1	0	0

CMIP5	GCESS	BNU-ESM	2.7906	2.8125	r1i1p1	CM5_BNU_XXX_R81	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
CMIP5	CCCma	CanESM2	2.7906	2.8125	r1i1p1	CM5_CE2_XXX_R81	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.05	0	0.05	1	0.2	
CMIP5	CCCma	CanESM2	2.7906	2.8125	r2i1p1	CM5_CE2_XXX_R82	1	0.2	1	0.2	1	0.2	0	0.05	0	0.05	0	0.2	
CMIP5	CCCma	CanESM2	2.7906	2.8125	r3i1p1	CM5_CE2_XXX_R83	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.05	0	0.05	0	0.2	
CMIP5	CCCma	CanESM2	2.7906	2.8125	r4i1p1	CM5_CE2_XXX_R84	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.05	0	0.05	0	0.2	
CMIP5	CCCma	CanESM2	2.7906	2.8125	r5i1p1	CM5_CE2_XXX_R85	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.05	0	0.05	0	0.2	
CORDEX	CCCma	CanESM2	CanRCM4	0.22	0.22	r1i1p1	COR_CE2_CA2_R81	1	0.5	1	0.5	1	0.5	0	0.125	0	0.125	0	0
CORDEX	CCCma	CanESM2	CanRCM4	0.44	0.44	r1i1p1	COR_CE2_CA4_R81	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.125	0	0.125	0	0
CORDEX	CCCma	CanESM2	RCA4	0.44	0.44	r1i1p1	COR_CE2_RC4_R81	1	1	1	1	1	1	0	0.25	0	0.25	0	0
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5- UQAM	0.44	0.44	r1i1p1	COR_CE2_CU4_R81	0	0.167	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.22	0.22	r1i1p1	COR_CE2_CO2_R81	0	0.167	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.22	0.22	r2i1p1	COR_CE2_CO2_R82	0	0.167	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.22	0.22	r3i1p1	COR_CE2_CO2_R83	0	0.167	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.22	0.22	r4i1p1	COR_CE2_CO2_R84	1	0.167	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
CORDEX	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.22	0.22	r5i1p1	COR_CE2_CO2_R85	0	0.167	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r1- r1i1p1	CMX_CE2_CO1_KDA	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	1	0.004464	1	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r1- r2i1p1	CMX_CE2_CO1_KDB	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r1- r3i1p1	CMX_CE2_CO1_KDC	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r1- r4i1p1	CMX_CE2_CO1_KDD	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r1- r5i1p1	CMX_CE2_CO1_KDE	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r1- r6i1p1	CMX_CE2_CO1_KDF	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r1- r7i1p1	CMX_CE2_CO1_KDG	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r1- r8i1p1	CMX_CE2_CO1_KDH	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r1- r9i1p1	CMX_CE2_CO1_KDI	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r1- r10i1p1	CMX_CE2_CO1_KDJ	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r2- r1i1p1	CMX_CE2_CO1_KDK	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r2- r2i1p1	CMX_CE2_CO1_KDL	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r2- r3i1p1	CMX_CE2_CO1_KDM	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r2- r4i1p1	CMX_CE2_CO1_KDN	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5- Ouranos	0.11	0.11	r2- r5i1p1	CMX_CE2_CO1_KDO	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0

ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0.11	0.11	r5-r5i1p1	CMX_CE2_CO1_KES	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0	0	0.01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0.11	0.11	r5-r6i1p1	CMX_CE2_CO1_KET	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0	0	0.01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0.11	0.11	r5-r7i1p1	CMX_CE2_CO1_KEU	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0	0	0.01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0.11	0.11	r5-r8i1p1	CMX_CE2_CO1_KEV	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0	0	0.01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0.11	0.11	r5-r9i1p1	CMX_CE2_CO1_KEW	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0	0	0.01786
ClimEx	CCCma	CanESM2	CRCM5-Ouranos	0.11	0.11	r5-r10i1p1	CMX_CE2_CO1_KEX	0	0.02	0	0.01786	0	0.01786	0	0.004464	0	0.004464	0	0	0	0.01786
CMIP5	CMCC	CMCC-CESM		3.4431	3.75	r1i1p1	CM5_CMC_XXX_R81	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.5	1	1	0	0
CMIP5	CMCC	CMCC-CM		0.7484	0.75	r1i1p1	CM5_CMM_XXX_R81	1	1	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.25	1	1	0	0
CMIP5	CMCC	CMCC-CMS		1.8653	1.875	r1i1p1	CM5_CMS_XXX_R81	1	1	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.25	1	1	0	0
CMIP5	CNRM-CERFACS	CNRM-CM5		1.4008	1.40625	r1i1p1	CM5_CN5_XXX_R81	1	1	1	1	1	1	0	0.5	0	0.5	1	1	0	0
CORDEX	CNRM-CERFACS	CNRM-CM5	CRCM5-Ouranos	0.22	0.22	r1i1p1	COR_CN5_CO2_R81	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	0.5	0	0	1	1
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r1i1p1	CM5_CSI_XXX_R81	1	0.1	1	0.1	1	0.1	1	0.1	1	0.1	1	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r2i1p1	CM5_CSI_XXX_R82	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r3i1p1	CM5_CSI_XXX_R83	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r4i1p1	CM5_CSI_XXX_R84	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r5i1p1	CM5_CSI_XXX_R85	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r6i1p1	CM5_CSI_XXX_R86	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r7i1p1	CM5_CSI_XXX_R87	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r8i1p1	CM5_CSI_XXX_R88	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r9i1p1	CM5_CSI_XXX_R89	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CMIP5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0		1.8653	1.875	r10i1p1	CM5_CSI_XXX_810	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
CORDEX	ECMWF	EC-EARTH	HIRHAM5	0.44	0.44	r3i1p1	COR_ECE_HH4_R83	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	0.5	0	0	1	1
CORDEX	ECMWF	EC-EARTH	RCA4	0.44	0.44	r12i1p1	COR_ECE_RC4_812	1	1	1	1	1	1	0	0.5	0	0.5	0	0	1	1
CMIP5	LASG-CESS	FGOALS-g2		2.7906	2.8125	r1i1p1	CM5_FGO_XXX_R81	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-CM3		2	2.5	r1i1p1	CM5_GF3_XXX_R81	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.333	1	1	0	0
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2G		2.0225	2	r1i1p1	CM5_GFG_XXX_R81	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.333	1	1	0	0
CMIP5	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M		2.0225	2	r1i1p1	CM5_GFM_XXX_R81	1	1	1	1	1	1	0	0.333	0	0.111	1	1	0	0
CORDEX	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M	RegCM4	0.22	0.22	r1i1p1	COR_GFM_RM2_R81	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.167	1	0.056	0	0	1	0.5
CORDEX	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M	RegCM4	0.44	0.44	r1i1p1	COR_GFM_RM4_R81	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.167	0	0.056	0	0	0	0.5

CORDEX	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M	CRCM5-Ouranos	0.22	0.22	r1i1p1	COR_GFM_CO2_R81	1	1	1	1	1	1	0	0.333	0	0.111	0	0	1	1	
CMIP5	INM	INM-CM4		1.5	2	r1i1p1	CM5_INM_XXX_R81	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1.8947	3.75	r1i1p1	CM5_IAL_XXX_R81	1	0.25	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.1	1	0.25	0	0	0
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1.8947	3.75	r2i1p1	CM5_IAL_XXX_R82	0	0.25	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.1	0	0.25	0	0	0
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1.8947	3.75	r3i1p1	CM5_IAL_XXX_R83	0	0.25	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.1	0	0.25	0	0	0
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-LR		1.8947	3.75	r4i1p1	CM5_IAL_XXX_R84	0	0.25	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.1	0	0.25	0	0	0
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5A-MR		1.2676	2.5	r1i1p1	CM5_IAM_XXX_R81	1	1	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.1	1	1	0	0	0
CMIP5	IPSL	IPSL-CM5B-LR		1.8947	3.75	r1i1p1	CM5_IBL_XXX_R81	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.5	1	1	0	0	0
CMIP5	MIROC	MIROC5		1.4008	1.40625	r1i1p1	CM5_MI5_XXX_R81	1	0.333	1	0.333	1	0.333	1	0.333	0	0.111	1	0.333	0	0	0
CMIP5	MIROC	MIROC5		1.4008	1.40625	r2i1p1	CM5_MI5_XXX_R82	0	0.333	0	0.333	0	0.333	0	0.333	0	0.111	0	0.333	0	0	0
CMIP5	MIROC	MIROC5		1.4008	1.40625	r3i1p1	CM5_MI5_XXX_R83	0	0.333	0	0.333	0	0.333	0	0.333	0	0.111	0	0.333	0	0	0
CMIP5	MIROC	MIROC-ESM		2.7906	2.8125	r1i1p1	CM5_MIE_XXX_R81	1	1	1	1	0	0.5	1	1	0	0.333	1	1	0	0	0
CMIP5	MIROC	MIROC-ESM-CHEM		2.7906	2.8125	r1i1p1	CM5_MIC_XXX_R81	1	1	1	1	1	0.5	1	1	1	0.333	1	1	0	0	0
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-LR		1.8653	1.875	r1i1p1	CM5_MPL_XXX_R81	1	0.333	0	0.25	0	0.25	0	0.0833	0	0.0833	1	0.333	0	0	0
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-LR		1.8653	1.875	r2i1p1	CM5_MPL_XXX_R82	0	0.333	0	0.25	0	0.25	0	0.0833	0	0.0833	0	0.333	0	0	0
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-LR		1.8653	1.875	r3i1p1	CM5_MPL_XXX_R83	0	0.333	0	0.25	0	0.25	0	0.0833	0	0.0833	0	0.333	0	0	0
CMIP5	MPI-M	MPI-ESM-MR		1.8653	1.875	r1i1p1	CM5_MPM_XXX_R81	1	1	1	0.25	1	0.25	0	0.0833	0	0.0833	1	1	0	0	0
CORDEX	MPI-M	MPI-ESM-LR	RegCM4	0.22	0.22	r1i1p1	COR_MPL_RM2_R81	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.167	1	0.167	0	0	1	0.5	0
CORDEX	MPI-M	MPI-ESM-LR	RegCM4	0.44	0.44	r1i1p1	COR_MPL_RM4_R81	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.167	0	0.167	0	0	0	0.5	0
CORDEX	MPI-M	MPI-ESM-LR	CRCM5-Ouranos	0.22	0.22	r1i1p1	COR_MPL_CO2_R81	1	0.5	1	0.5	1	0.5	0	0.167	0	0.167	0	0	1	0.5	0
CORDEX	MPI-M	MPI-ESM-MR	CRCM5-UQAM	0.44	0.44	r1i1p1	COR_MPM_CU4_R81	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.167	0	0.167	0	0	0	0.5	0
CMIP5	MRI	MRI-CGCM3		1.12148	1.125	r1i1p1	CM5_MR3_XXX_R81	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.5	1	1	0	0	0
CMIP5	MRI	MRI-ESM1		1.12148	1.125	r1i1p1	CM5_MRE_XXX_R81	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	1	0	0	0
CMIP5	NCC	NorESM1-M		1.8947	2.5	r1i1p1	CM5_NOE_XXX_R81	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0

ANNEXE D – INDÉPENDANCE DES SIMULATIONS : INDICATEURS Q1MAX20AN ET Q1MAX100AN

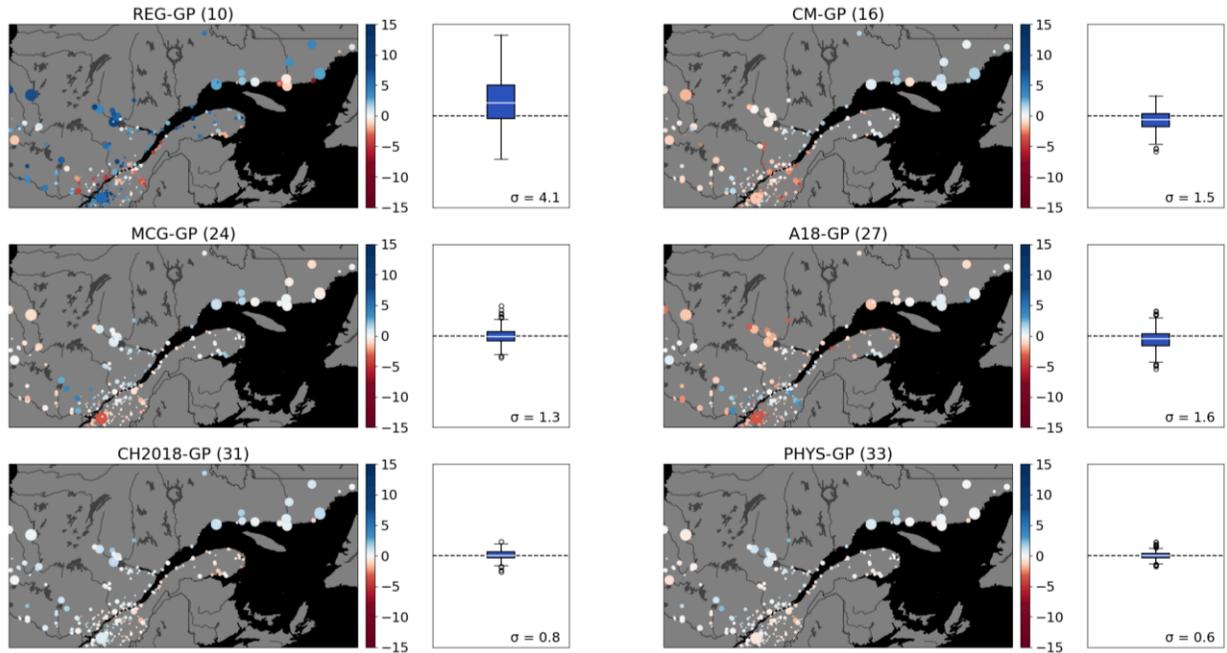


Figure D1 Différence (% absolu) entre la méthodologie DEH2020-GP et les alternatives possibles pour le calcul du 50^e percentile de changements de l'indicateur Q1MAX20AN. Les résultats présentés sont pour l'horizon 2050 (2041-2070 vs. 1981-2010, en pourcentage de changement) et le RCP8.5. Le chiffre entre parenthèses indique le nombre de groupes indépendants associé à chaque schéma de pondération. La référence DEH2020-GP en possède 38.

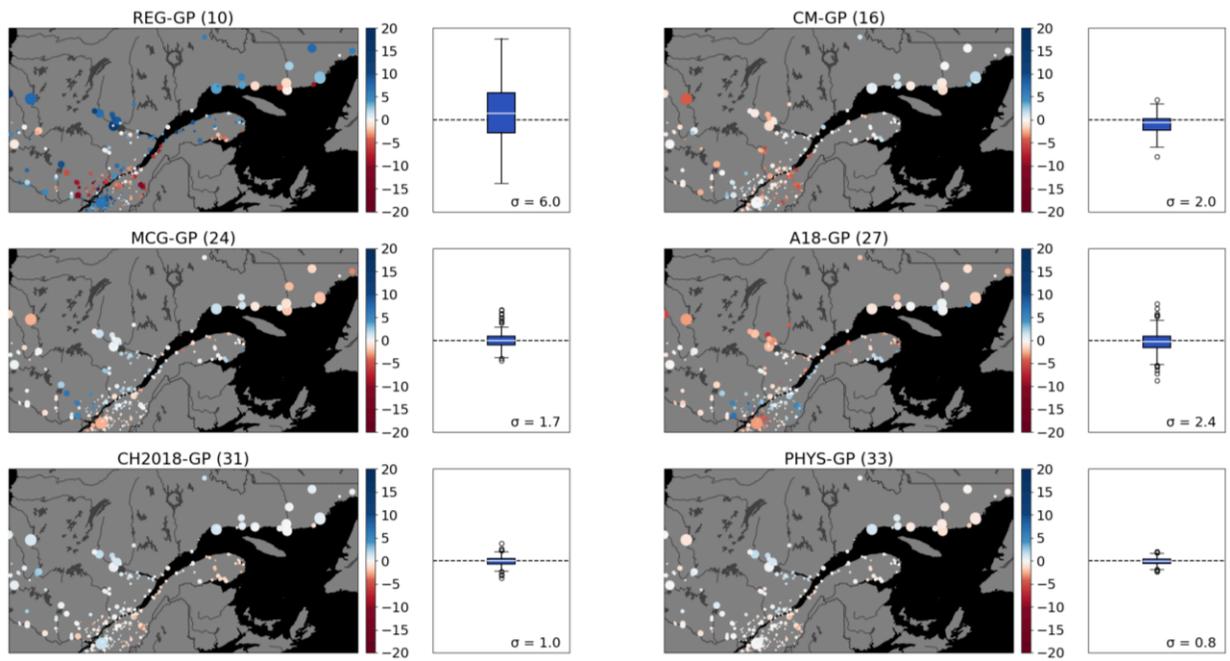


Figure D2 Différence (% absolus) entre la méthodologie DEH2020-GP et les alternatives possibles pour le calcul du 50^e percentile de changements de l'indicateur Q1MAX100AN. Les résultats présentés sont pour l'horizon 2050 (2041-2070 vs. 1981-2010, en pourcentage de changement) et le RCP8.5. Le chiffre entre parenthèses indique le nombre de groupes indépendants associé à chaque schéma de pondération. La référence DEH2020-GP en possède 38.

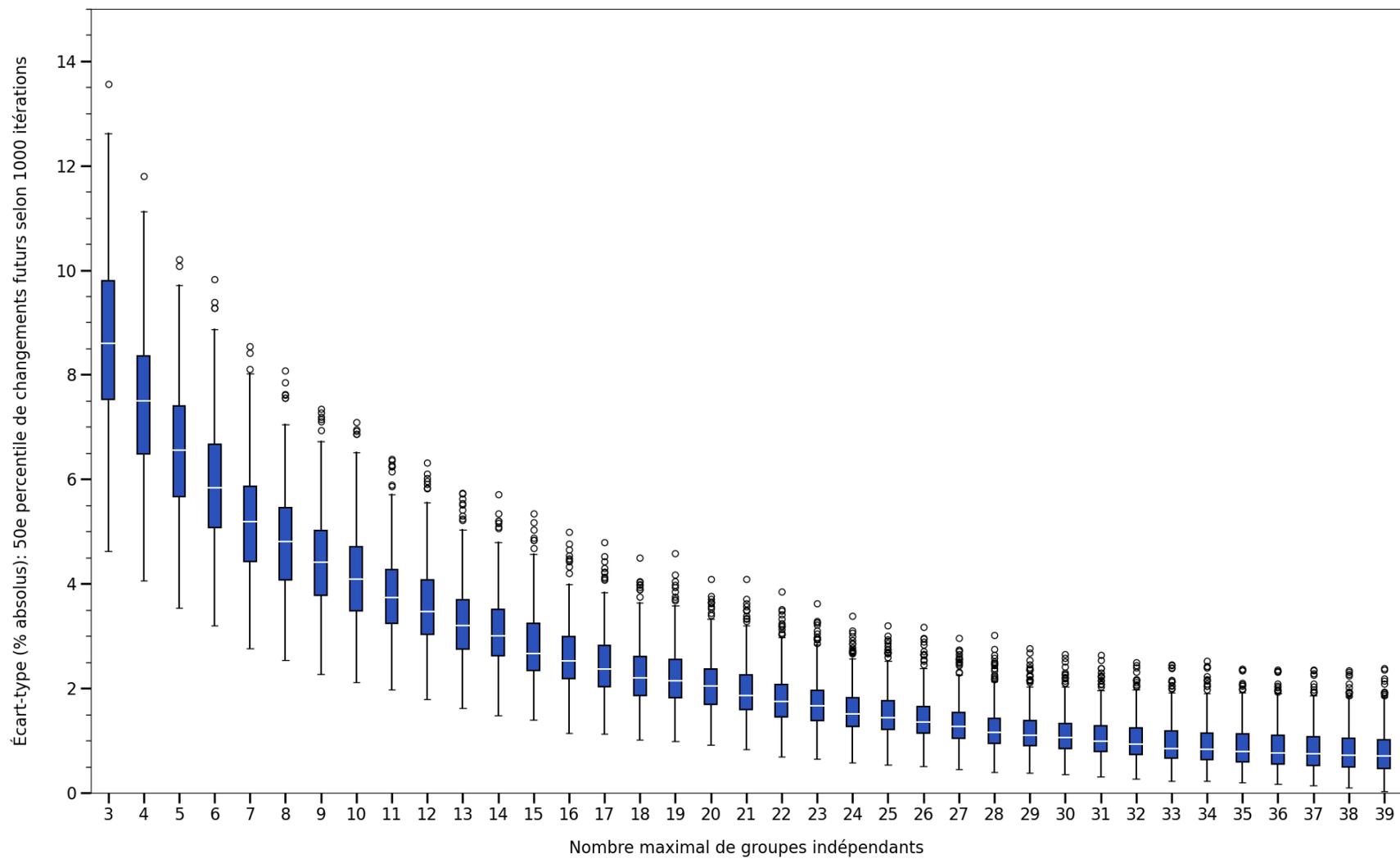


Figure D3. Pour 280 tronçons, écart-type associé au calcul du 50^e percentile de changements pour Q1MAX20AN à l'horizon 2050 avec 1000 itérations Monte Carlo.

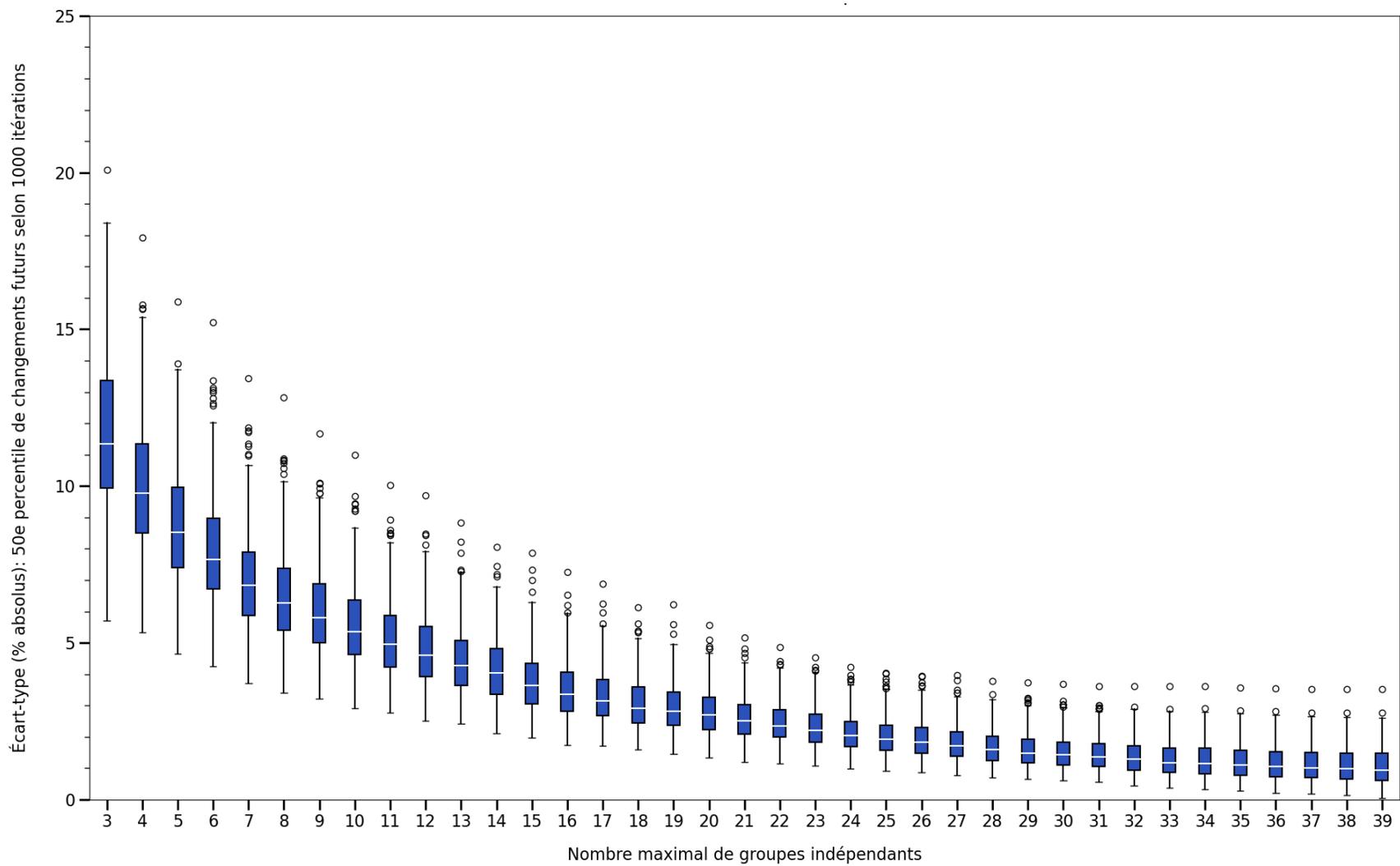


Figure D4. Pour 280 tronçons, écart-type associé au calcul du 50e percentile de changements pour Q1MAX100AN à l'horizon 2050 avec 1000 itérations Monte Carlo.

