



Environnement
Canada

Environment
Canada

Système de prévision interannuelle et saisonnière canadien, version 2 (SPISCanv2)

Note technique du Centre météorologique canadien

H. Lin¹, W.J. Merryfield², R. Muncaster¹, G. Smith¹, M. Markovic³,
A. Erfani³, S. Kharin², W.-S. Lee² et M. Charron¹

1 - Division de la recherche météorologique

2 - Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique (CCmaC)

3 - Centre météorologique canadien (CMC)

7 mai 2019

Révisions			
<u>Version</u>	<u>Date</u>	<u>Auteurs</u>	<u>Remarques</u>
1.0	2019/04/22	Hai Lin	Première ébauche
1.1	2019/04/26	Hai Lin	Chiffres de biais corrigés. Commentaires de Ryan Muncaster et Bill Merryfield.
1.2	2019/05/01	Hai Lin	Les figures pour SPISCanv2 utilisent MCCan4i plus GEM-NEMO.
1.3	2019/05/03	Bill Merryfield et Hai Lin	Ajout de renseignements sur MCCan4i, vérification de la glace de mer, 6.6 et 9.
1.4	2019/05/06	Hai Lin	Toutes les figures produites par SPISCanv2 avec MCCan4i et GEM-NEMO ont été fournies par Slava Kharin.

Table des matières

1	Introduction	4
2	Modifications apportées aux modèles	6
2.1	MCCan4i	6
2.2	GEM-NEMO	7
3	Initialisation des prévisions	7
3.1	MCCan4i	8
3.2	GEM-NEMO	8
4	Reprévisions	9
4.1	MCCan4i	9
4.2	GEM-NEMO	9
5	Erreurs systématiques	10
6	Évaluation de l'habileté du système SPISCanv2 par rapport à SPISCan	15
6.1	Température de l'air en surface	16
6.2	Précipitations	19
6.3	Hauteur géopotentielle à 500 hPa	22
6.4	TSM et ENSO	25
6.5	Téléconnexion PAN et oscillations NAO	27
6.6	Glace de mer	29
7	Évaluation qualitative des passages parallèles	31
8	Modalités de mise en œuvre	31
9	Résumé	32
10	Remerciements	33
11	Références	34
	Annexe A. Liste des abréviations	37

1 Introduction

En septembre 1995, le Centre météorologique canadien (CMC) a amorcé la diffusion des prévisions de températures moyennes saisonnières près de la surface et des précipitations accumulées au Canada au moyen d'un système de prévision dynamique d'ensemble à deux modèles, basé sur le Projet de prévisions historiques ou PPH (Derome et coll. 2001). Ces prévisions pour les saisons standards DJF, MAM, JJA et SON ont été diffusées quatre fois l'an : les 1^{er} décembre, 1^{er} mars, 1^{er} juin et 1^{er} septembre. Au départ, les deux modèles de circulation atmosphérique à deux composantes, comptant chacun six membres dans l'ensemble, étaient le modèle AGCM2 du CCmaC (McFarlane et coll. 1992), et le modèle spectral global SEF mis au point par Recherche en prévision numérique (RPN; Ritchie, 1991). Le modèle GEM (Côté et coll. 1998) créé par RPN a remplacé le modèle SEF en mars 2004.

Le CMC a commencé à publier des prévisions statistiques sur un plus long terme des températures moyennes saisonnières près de la surface et des précipitations accumulées au Canada, fin 1996. Ces prévisions, avec des échéances de 3, 6 et 9 mois, reposaient sur l'application de l'analyse de corrélation canonique (ACC) avec des moyennes saisonnières des températures de la surface de la mer (TSM) et une hauteur géopotentielle de 500 mb au cours des 12 mois précédents, à titre de prédicteurs (Shabbar et Barnston 1996). Les prévisions du système couvraient les mêmes saisons que les prévisions dynamiques sans échéance (sauf qu'ici l'échéance était plus longue) et les dates d'émission étaient également les mêmes.

En octobre 2007, le système de prévisions saisonnières dynamique du CMC a reçu une amélioration majeure pour devenir un système à quatre modèles — AGCM2, SEF, GEM et AGCM3 du CCmaC (Scinocca et coll. 2008) —, donnant un total de 40 membres dans l'ensemble, soit 10 par modèle. Dès le début, chaque ensemble de modèles à 10 membres a été construit à partir de conditions initiales décalées de 24 heures couvrant les 10 jours précédant le début de la prévision. Cette période a été ramenée à 5 jours en 2008 avec des décalages de 12 heures. Les prévisions saisonnières ont été publiées avec une échéance de 0 mois (mois 1 à 3) et de 1 mois (mois 2 à 4), le premier jour de chaque mois, et une prévision du premier mois pour la température de surface seulement était publiée les 1^{er} et 15 de chaque mois. Les prévisions *a posteriori* pour la correction des biais et l'évaluation des habiletés ont été fournies par la deuxième version du Projet de prévisions historiques (HFP2; Kharin et coll. 2009). On a continué à publier quatre fois l'an les prévisions à plus long terme fondées sur l'ACC.

L'habileté d'un système de prévisions saisonnières dynamique désigne surtout sa capacité de modéliser la réponse atmosphérique à des conditions limites variant relativement lentement, principalement des anomalies de la température à la surface de la mer (TSM). Comme tous les modèles composant les systèmes PPH et HFP2 sont des modèles de circulation atmosphérique sans océan dynamique, les valeurs TSM futures dans ces prévisions ont dû être prescrites en fonction des informations disponibles au début de la prévision. Bien qu'il existe de nombreux

choix possibles pour une telle prescription, les TSM pour les périodes de prévision dans les systèmes PPH et HFP2 ont été spécifiées comme étant les anomalies moyennes des TSM au cours des 30 jours précédent la prévision, ajoutées à la climatologie de la TSM variant selon les saisons. Bien entendu, cette prescription de persistance des anomalies comporte une limite sérieuse : les anomalies de la TSM réelle évoluent sur des échelles de temps typiques de quelques mois, de sorte que les anomalies de TSM prescrites à la fin de la prévision peuvent ne pas ressembler aux anomalies de la TSM réelle à ce moment-là. Cela limite l'utilité de ces systèmes de prévision « à deux niveaux » au-delà des périodes de prévision de quelques mois, c'est pourquoi les prévisions PPH étaient limitées à trois mois, et les prévisions HFP2 à quatre mois.

Le système de prévisions saisonnières à deux niveaux a été remplacé par le Système de prévision interannuelle et saisonnière canadien (SPISCan) en décembre 2011, lequel est un système global couplé à un niveau. SPISCan utilise deux modèles climatiques couplés atmosphère-océan, MCCan3 et MCCan4, créés au CCmaC, pour un ensemble total de 20 membres, soit 10 membres par modèle. À partir du début de chaque mois, 10 membres de l'ensemble pour chaque modèle ont été produits pour les prévisions sur 12 mois à partir des conditions initiales consistant en de petites perturbations simultanées, c.-à-d. selon une approche de démarrage en rafale. Merryfield et coll. (2013) décrivent en détail système SPISCan.

Il convient de souligner que SPISCan fait partie intégrante de plusieurs activités internationales liées aux prévisions saisonnières par des ensembles multimodèles, notamment l'ensemble multimodèle nord-américain (NMME) (p. ex., Kirtman et coll. 2014), l'ensemble multimodèle de prévision à long terme de l'OMM (p. ex., Kim et coll. 2015), et le projet de prévision climatique multimodèle de l'Asian-Pacific Economic Cooperation Climate Center (APCC) (p. ex., Min et coll. 2014).

De septembre 1995 à juin 2015, on a utilisé les résultats du premier mois du système de prévisions saisonnières pour produire la prévision des anomalies de température moyennée sur 30 jours, qui était le seul produit de prévisions mensuelles au Canada. Depuis juillet 2015, la prévision mensuelle est produite au CMC à l'aide du Système global de prévision d'ensemble (SGPE; Gagnon et coll. 2015), qui tire parti de la résolution accrue et de l'initialisation améliorée du SGPE (Lin et coll. 2016).

Selon la mise à jour la plus récente, le modèle de prévision météorologique numérique (PNT) d'ECCC, soit le GEM, est couplé avec le modèle océanique NEMO pour développer un modèle couplé global atmosphère-océan-glace de mer, basé sur la PNT, appelé GEM-NEMO. Le modèle MCCan4 est mis à niveau vers MCCan4i, qui a une meilleure initialisation. Le modèle GEM-NEMO remplace MCCan3 dans SPISCan et est combiné avec MCCan4i pour former la deuxième version de SPISCan pour la prévision saisonnière d'ensemble multimodèle. Le

modèle de prévisions saisonnières GEM-NEMO a surtout été élaboré chez RPN, qui a mis à profit son expertise en modélisation et modèles couplés. Ce travail a également bénéficié de la contribution du projet CONCEPTS.

Le présent document décrit les récentes modifications apportées au Système de prévision interannuelle et saisonnière canadien, qui est devenu le système SPISCan version 2, ci-après SPISCanv2. À la partie 2, nous présentons les modifications apportées aux composantes de prévision de SPISCan à l'appui de la mise en œuvre opérationnelle du (?) juin 2019 pour remplacer SPISCan. La partie 3 décrit l'initialisation de la prévision. La reprévision est présentée à la partie 4. La partie 5 décrit les erreurs systématiques de CanCM2 et GEM-NEMO. Les résultats de l'évaluation de l'habileté du système sont présentés à la partie 6. La partie 7 contient une évaluation des passages parallèles. La mise en œuvre est décrite en détail à la partie 8. Enfin, les résultats sont résumés à la partie 9.

La nouvelle version a profité des efforts cumulatifs de nombreuses personnes, non seulement les équipes des modèles MCCan4i et GEM-NEMO, mais aussi d'autres groupes comme les sections de modélisation et de post-traitement des divisions de recherche et de développement, et les sections opérationnelles d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) du Centre météorologique canadien (CMC) à Dorval (Québec).

2 Modifications apportées aux modèles

Tout comme ses prédécesseurs (les systèmes PPH, HFP2 et SPISCan), le système SPISCanv2 est un système multimodèles qui tire parti de l'habileté généralement plus grande des systèmes multimodèles par rapport aux systèmes à modèle unique pour une taille d'ensemble donnée (p. ex., Kharin et coll. 2009).

Le système SPISCan2 consiste en deux modèles couplés globaux, MCCan4i et GEM-NEMO. Le modèle MCCan4i applique une initialisation améliorée à la même version du modèle MCCan4 qui était précédemment utilisé dans SPISCan. Ce modèle est décrit en détail par Merryfield et coll. (2013), de sorte que seuls ses principaux aspects sont décrits ici. D'autre part, GEM-NEMO est un nouveau modèle introduit dans SPISCanv2 et sera décrit en détail dans les pages qui suivent.

2.1 MCCan4i

Tout comme le modèle MCCan4, le modèle MCCan4i couple le modèle atmosphérique de quatrième génération CanAM4 à la composante océanique CanOM4 du CCmaC. Sa résolution horizontale atmosphérique est T63, ce qui correspond à une grille gaussienne de 128×64 , avec 35 niveaux verticaux et un sommet à 1 hPa. La grille 256×192 du modèle CanOM4 donne une résolution horizontale d'environ $1,4^\circ$ de longitude et $0,94^\circ$ de latitude, avec 40 niveaux verticaux. La version 2.7 du schéma de surface terrestre CLASS et un modèle de glace de mer à

fluide cavitant de catégorie unique sont utilisés, tous deux étant formulés sur la grille du modèle atmosphérique.

2.2 GEM-NEMO

Mis au point par Recherche en Prévision Numérique (RPN), GEM-NEMO est un modèle entièrement couplé avec la composante atmosphérique de GEM (Côté et coll. 1998) et la composante océanique de NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean, <http://www.nemo-ocean.eu>).

La version GEM utilisée est 4.8-LTS.13, avec une résolution horizontale de 256×128 points de grille (environ 155 km) uniformément espacés sur une grille latitude-longitude, 79 niveaux verticaux et un sommet à 0,075 hPa. Le schéma terrestre est ISBA (Noilhan et Planton, 1989; Noilhan et Mahfouf, 1996), dans lequel chaque point de grille est présumé indépendant (pas d'échange horizontal). Le schéma de paramétrage de la convection atmosphérique profonde de Kain-Fritsch (Kain et Fritsch 1990) est utilisé. Le schéma Kuo-transitoire (Bélair et coll. 2005) est appliqué pour les convections peu profondes. Le modèle tient compte de l'évolution saisonnière de la végétation et de l'ozone pendant l'intégration. On traite l'évolution des forçages radiatifs anthropiques tout simplement en spécifiant les concentrations équivalentes de CO₂ avec une tendance linéaire. Le modèle GEM est intégré avec un pas de temps d'une heure. Parmi les 10 membres de l'ensemble dans la prévision et la reprévision, le flux de surface implicite est utilisé dans les membres 1 à 5 et le flux de surface explicite est appliqué aux membres 6 à 10.

Le modèle océanique NEMO est NEMO 3.6 ORCA 1, avec une résolution horizontale de $1^\circ \times 1^\circ$ (1/3 de degré méridional près de l'équateur) et 50 niveaux verticaux. Le modèle CICE 4.0 (Community Ice CodE, Hunke et Lipscomb 2010) est utilisé pour la composante glace de mer, avec cinq catégories de glace. Le modèle NEMO est exécuté avec un pas de temps de 30 minutes.

Les modèles GEM et NEMO sont couplés une fois par heure à l'aide du coupleur GOSSIP. Aucune correction de flux n'est utilisée dans le modèle couplé.

3 Initialisation des prévisions

À l'instar du système SPISCan, chacun des deux modèles de SPISCanv2 — MCCan4i et GEM-NEMO — fait sa prévision en temps réel une fois par mois, avec initialisation au début de chaque mois. Chaque modèle produit des prévisions pour 10 membres de l'ensemble, et toutes les intégrations débutent à la même date pour une durée de 12 mois. Cependant, les deux modèles adoptent des approches différentes relativement à l'initialisation des prévisions.

3.1 MCCan4i

Le seul changement dans l’initialisation des prévisions avec MCCan4i par rapport à l’initialisation de MCCan4 dans SPISCan est que les conditions initiales pour l’épaisseur de la glace de mer dans l’hémisphère Nord (Arctique) sont obtenues à partir du modèle statistique SMv3 de Dirkson et coll. (2017). (La partie 4 présente d’autres changements apportés à l’initialisation de la prévision pour améliorer la cohérence entre les prévisions et les prévisions en temps réel.) Tout comme MCCan4 dans SPISCan, chaque membre de l’ensemble MCCan4i est initialisé à partir d’un modèle d’assimilation distinct dans lequel la température atmosphérique, l’humidité, les vents horizontaux, la TSM et la concentration de glace de mer sont limités par les valeurs de l’analyse du Système global de prévision déterministe (SGPD). Les variables de la surface terrestre sont initialisées par la réponse de la composante de la surface terrestre aux conditions atmosphériques dans les passages du modèle d’assimilation, tandis que les températures océaniques sous la surface sont contraintes par les valeurs obtenues par les analyses du Système global de prévision océan-glace (SGPOG), grâce à une procédure hors ligne. Merryfield et coll. (2013) donnent de plus amples renseignements sur les méthodes d’initialisation.

3.2 GEM-NEMO

Dans la prévision, les conditions atmosphériques initiales de GEM-NEMO proviennent du Système global de prévision d’ensemble (SGPE; Gagnon et coll. 2015), qui sont générées par le filtre FKE avec assimilation des données. Dix des conditions initiales perturbées du SGPE sont utilisées pour la prévision saisonnière avec GEM-NEMO.

En ce qui concerne les conditions initiales de la surface terrestre, il est important, en plus de tirer parti de l’analyse du CMC, de les rendre compatibles avec la prévision. Dans la prévision, décrite à la section 4.2, nous initialisons la surface terrestre en utilisant le Système de prévision de surface, ou SPS (Carrera et coll. 2010), avec forçage par l’atmosphère proche de la surface et les champs de précipitations obtenus par les réanalyses du projet ERA-Interim. Dans la prévision en temps réel, les champs initiaux de la surface terrestre sont générés en forçant le SPS avec l’analyse du CMC.

Dans les prévisions, les conditions initiales de l’océan et de la glace de mer proviennent de l’analyse SGPOG du CMC (Smith et coll. 2016). La température de l’air près de la surface selon le SGPE et la profondeur de la neige selon le SPS sont utilisées pour l’initialisation de ces variables au-dessus de la glace de mer dans le modèle CICE. Pour ce qui est de la prévision, les conditions initiales de l’océan et de la glace de mer sont décrites à la section 4.2. Tous les membres de l’ensemble ont les mêmes conditions initiales pour l’océan et la glace de mer.

4 Reprévisions

La dérive et les erreurs systématiques du modèle deviennent un problème sérieux qui contamine la qualité des prévisions saisonnières. En prévision saisonnière, une pratique courante consiste à effectuer une reprévision historique (ou prévision *a posteriori*) pour estimer la climatologie et les statistiques du modèle, afin de pouvoir faire des prévisions calibrées des anomalies. Un autre objectif de la reprévision est de générer une longue série de données prévisionnelles permettant de quantifier la performance du système de prévision. C'est pourquoi la reprévision constitue un aspect important du système de prévisions saisonnières. Tout comme avec SPISCan, la reprévision est effectuée à l'aide de chaque modèle individuel, couvrant 31 années — de 1980 à 2010 — avec 10 membres d'intégration sur 12 mois à partir du début de chaque mois. Dans la reprévision, chaque modèle individuel a la même configuration que dans la prévision.

4.1 MCCan4i

Le modèle MCCan4i exploite plusieurs changements apportés à la procédure d'initialisation de reprévision du modèle MCCan4, décrite par Merryfield et coll. (2013). En premier lieu, à l'instar des prévisions en temps réel, l'épaisseur modélisée de la glace de mer est contrainte près des valeurs du modèle statistique SMv3 de Dirkson et coll. (2017), lequel est beaucoup plus réaliste que la climatologie stationnaire fondée sur un modèle utilisé pour MCCan4, en partie parce qu'il représente l'amincissement à long terme de la glace arctique. Deuxièmement, la concentration modélisée de la glace de mer est contrainte à des valeurs proches de celles du produit Had2CIS décrit à la section 4.2. Ce produit offre une meilleure cohérence temporelle tout au long de la période de reprévision, ainsi qu'une meilleure cohérence avec les concentrations de glace de mer fournies par l'analyse SGPD utilisée en temps réel, par rapport aux concentrations de la glace de mer produites et utilisées pour initialiser les prévisions par MCCan4. Enfin, les températures initiales de l'océan sous la surface sont contraintes par la réanalyse de l'océan avec ORAP5 (Zuo et coll. 2015), dont la formulation est plus proche de celle de l'analyse SGPOG utilisée en temps réel, et donc les tendances sont plus réalistes que celles fournies par la réanalyse de l'océan utilisée pour initialiser les prévisions avec MCCan4.

4.2 GEM-NEMO

Dans la reprévision, les conditions atmosphériques sont initialisées à l'aide des réanalyses faites par le modèle ERA-Interim (Dee et coll., 2011). Des perturbations isotropes aléatoires sont ajoutées aux champs de réanalyse pour créer dix conditions initiales différentes. Les perturbations atmosphériques sont homogènes et isotropes, comme dans Gauthier et coll. (1999). Seules la fonction de flux et les températures déséquilibrées sont perturbées comme avec le filtre FKEN (voir Houtekamer et coll., 2009). Ces champs perturbés sont ensuite transformés en vent, température et pression de surface.

Les champs initiaux océaniques proviennent de la réanalyse océanique ORAP5 (Zuo et coll. 2015). Les valeurs mensuelles de la température, de la salinité et des courants zonaux et

méridionaux sont interpolées en valeurs quotidiennes. Les champs initiaux de la concentration de glace de mer sont ceux du Had2CIS, qui ont été préparés par Woo-Sung Lee du CCmaC en combinant les cartes numérisées de glace de mer fournies par le Service canadien des glaces (SCG) avec le système HadISST2.2. Le système HadISST2.2 original employait une correction du biais basée sur la carte des glaces, appliquée à l'enregistrement passif des hyperfréquences (Titchner et Rayner 2014). Les données mensuelles HadISST2.2, les cartes hebdomadaires numérisées des glaces de mer du SCG au-dessus de la région arctique et les « cartes de glace des Grands Lacs » hebdomadaires du SCG sont interpolées en données quotidiennes avant d'être combinées. L'épaisseur de la glace de mer est interpolée à partir des données ORAP5 mensuelles. La température de l'air près de la surface, fournie par ERA-Interim, et l'épaisseur de la neige fournie par le SPS sont utilisées pour l'initialisation de ces variables au-dessus de la glace de mer dans le modèle CICE.

Pour l'initialisation de la surface terrestre, nous utilisons les données historiques des champs de surface produites par le SPS (Carrera et coll. 2010). Cet ensemble de données était auparavant connu sous le nom de « GEM-surf », et il a été utilisé dans plusieurs études à haute résolution (voir Separovic et coll. 2014, Ioannidou et coll. 2014, et Bernier et Bélair 2012). Pour générer des conditions de surface terrestre plus réalistes, nous avons utilisé le SPS pour la période 1980-2010 afin de créer des champs de surface compatibles avec le schéma de surface du modèle. Le SPS représente tout simplement les schémas de surface (terre, glace de mer, glacier) du modèle GEM utilisé en mode hors ligne. Pour initialiser les champs de surface terrestre dans la prévision, nous avons forcé le SPS en utilisant les champs de précipitations et atmosphériques près de la surface fournis par les réanalyses du projet ERA-Interim. La pression de surface, la température à 2 m et la dépression du point de rosée, ainsi que les flux radiatifs solaire et infrarouge descendants à la surface sont fournis au SPS avec des intervalles de 3 heures. Pour limiter l'accumulation de neige sur les glaciers, l'épaisseur maximale de neige est fixée à 12 mètres comme conditions initiales.

5 Erreurs systématiques

Dans cette partie, l'erreur systématique est analysée pour les modèles MCCan4i et GEM-NEMO, qui est la différence entre la climatologie prévue et observée au cours de la période de prévision de 1981-2010. L'objectif est de démontrer le comportement général des deux modèles par rapport à leur dérive. Lors de la prévision saisonnière, des prévisions des anomalies sont produites, dans lesquelles le climat du modèle estimé à partir de la prévision est soustrait, et l'erreur systématique est retirée de la prévision. Il semble donc qu'il n'y ait pas d'impact direct de l'erreur systématique sur l'habileté de la prévision, ce dont il est question à la partie suivante. Cependant, l'erreur systématique influe sur l'habileté des prévisions via la dynamique du modèle. Par exemple, un courant-jet d'ouest biaisé aux latitudes moyennes entraînerait des erreurs dans les profils de téléconnexion et de propagation des ondes de Rossby en raison du

forçage par les oscillations ENSO, ce qui entraînerait une prévision inexacte des anomalies. Il est donc important de réduire le biais du modèle.

Les données de vérification proviennent des réanalyses de ERA-Interim pour la température de l'air à 2 m (T2m) et du vent zonal à 200 hPa (U200), de l'ensemble de données du Projet mondial pour une climatologie des précipitations (GPCP; Huffman et coll. 2009) pour les précipitations, et du système NOAA Optimum Interpolation (OI) Sea Surface Temperature V2 de la NOAA (Reynolds et coll. 2002). L'erreur systématique présentée ici concerne la moyenne saisonnière avec échéance de 1 mois, moyennée sur les 12 mois d'initialisation.

Nous examinons d'abord le biais du modèle pour la TSM, qui est illustré à la Figure 1. Comme on le voit, MCCan4i fait un bon travail pour ce qui est de réduire la dérive du modèle, les biais ne se retrouvent que dans peu de zones près de la côte ouest de l'Amérique du Sud, de la côte est de l'Extrême-Orient et de l'Amérique du Nord, et le long de la zone tropicale du Pacifique, et aux latitudes élevées de l'Atlantique-Nord et Sud (Figure 1a). Par ailleurs, le modèle GEM-NEMO présente des biais systématiques de basse température dans les océans tropicaux (Figure 1b), ce qui indique une dérive relativement forte du modèle dans GEM-NEMO. Il s'agit d'un aspect de GEM-NEMO qu'il faudra ultérieurement améliorer.

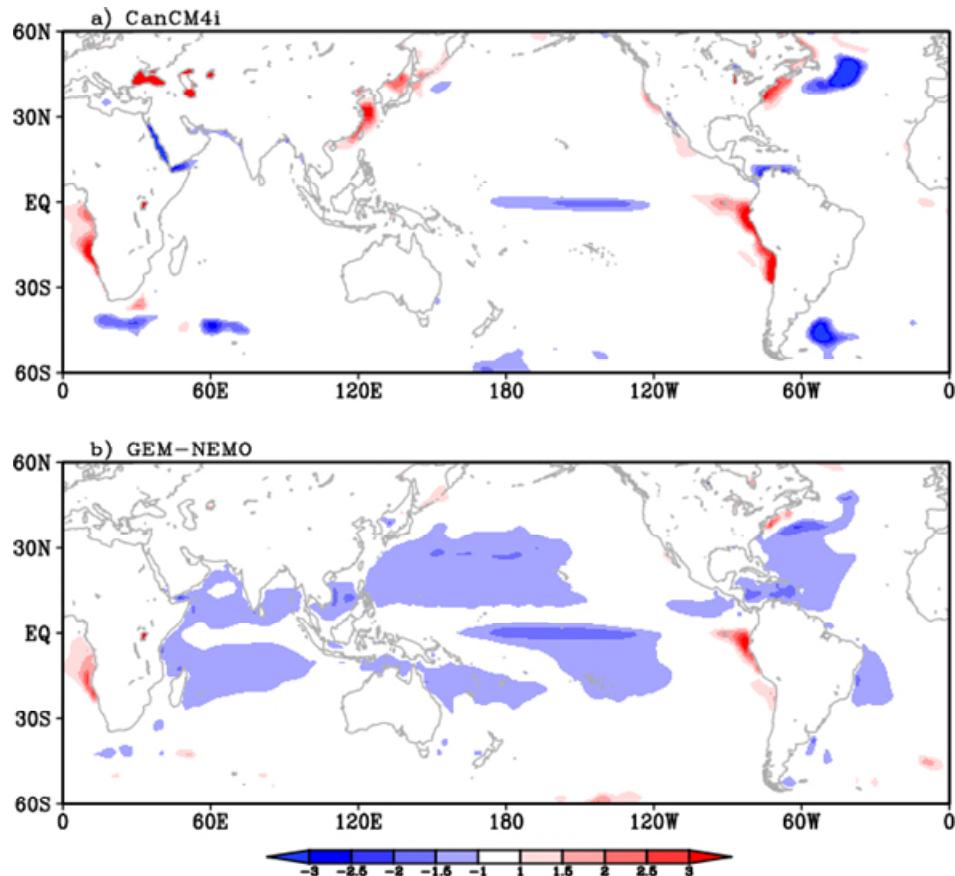


Figure 1. Erreur systématique pour la TSM moyenne saisonnière avec échéance de 1 mois pour les 12 mois d'initialisation : a) pour MCCan4i, et b) pour GEM-NEMO.

La Figure 2 montre la distribution géographique de l'erreur systématique pour T2m. On juge que le modèle MCCan4i présente de très forts biais de basse température dans la région polaire de l'hémisphère Nord (Figure 2a), qui peuvent être dus au traitement de la physique de la glace de mer ou de la physique de l'atmosphère au-dessus de cette glace. Les deux modèles présentent des biais de haute température pour T2m sur les continents aux latitudes moyennes à élevées de l'hémisphère Nord, et des biais de basse température au-dessus des montagnes. Le modèle MCCan4i présente des biais de haute température au-dessus de la partie équatoriale de l'Amérique du Sud. Au-dessus des océans, MCCan4i présente quelques biais de haute température près de la côte ouest de l'Amérique du Sud, et des côtes est de l'Extrême-Orient et de l'Amérique du Nord. On observe des biais de basse température avec GEM-NEMO dans la partie tropicale du Pacifique, qui sont associés aux biais pour la TSM décrits ci-dessus.

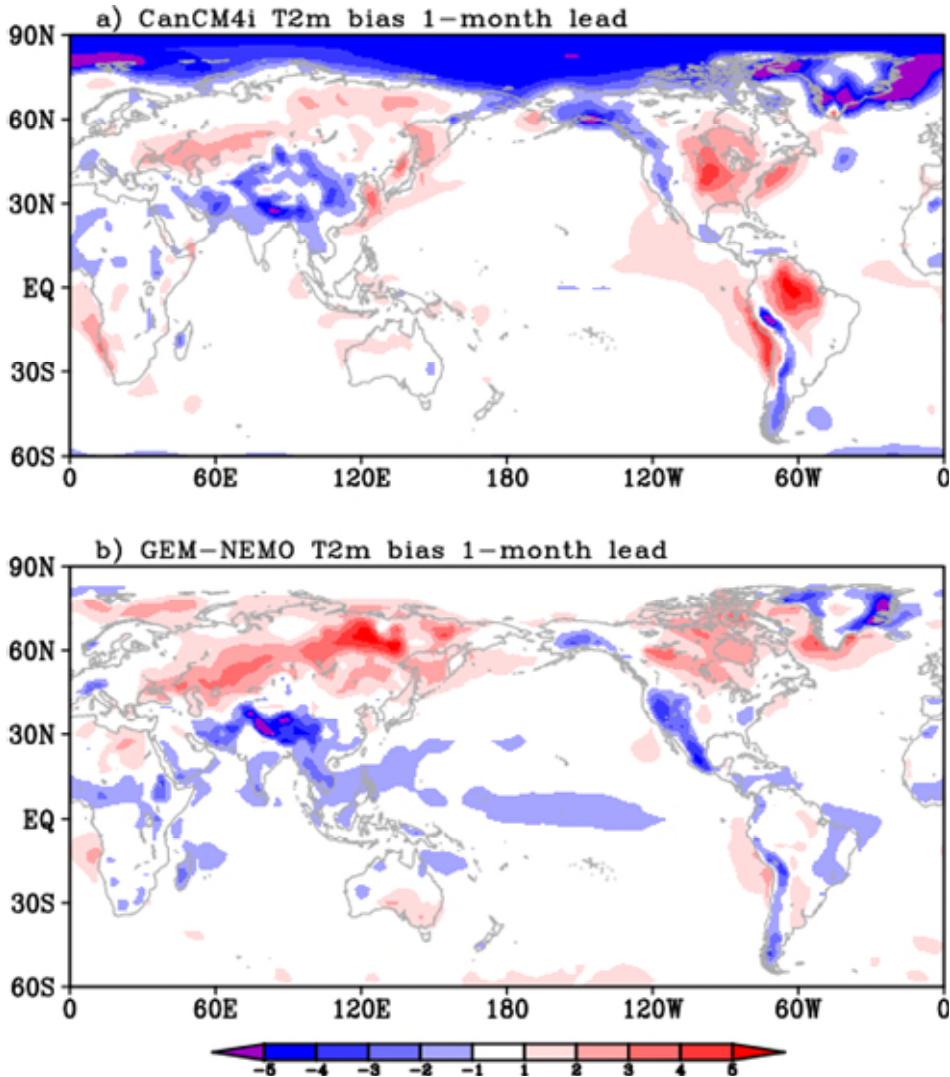


Figure 2. Erreur systématique en °C pour la T2m moyenne saisonnière avec échéance de 1 mois pour MCCan4i (haut) et GEM-NEMO (bas).

La Figure 3 montre l'erreur systématique pour le taux de précipitations. Les deux modèles semblent présenter une même distribution des biais pour les précipitations. On constate des précipitations excessives dans une grande partie des tropiques et des précipitations insuffisantes sur le Pacifique équatorial, une caractéristique de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) double qui est commune à de nombreux modèles couplés de circulation générale (p. ex., Lin 2007). L'importance du biais pour les zones humides dans MCCan4i est plus grande que dans GEM-NEMO. Le modèle MCCan4i présente également un biais pour une plus grande humidité dans la partie tropicale de l'océan Indien, biais qui est absent du modèle GEM-NEMO. Au-dessus de la partie tropicale de l'Amérique du Sud, MCCan4i présente un biais pour les zones sèches plus grand que GEM-NEMO.

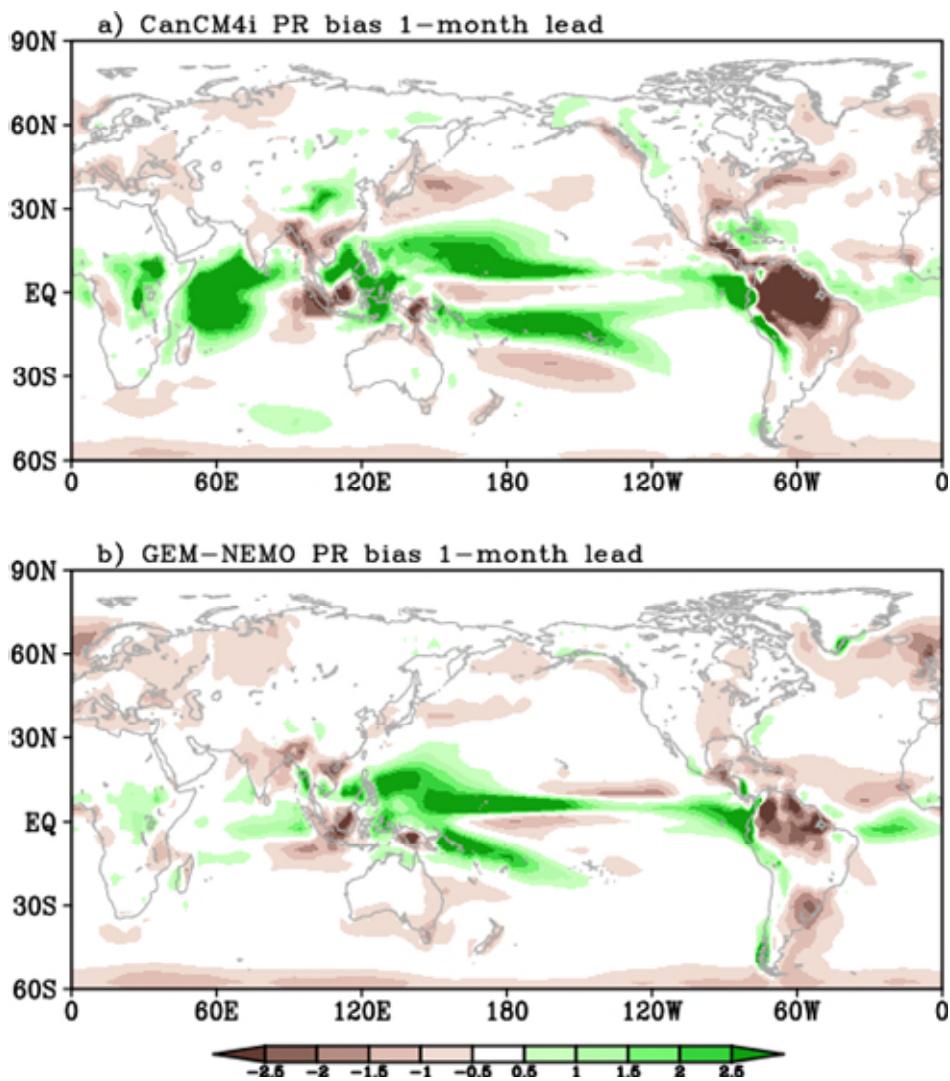


Figure 3. Erreur systématique en mm/jour pour les précipitations avec une échéance de 1 mois pour MCCan4i (haut) et GEM-NEMO (bas).

De nombreuses études antérieures ont traité de l’importance de la circulation zonale extratropicale de l’air depuis l’ouest pour la propagation des ondes de Rossby (p. ex., Hoskins et Ambrizzi, 1993). La figure 4 montre l’erreur systématique pour U200. Les deux modèles ont des distributions très différentes du biais pour U200 dans les régions extratropicales. Le modèle MCCan4i a tendance à surestimer les zones de vents d’ouest aux latitudes moyennes de l’hémisphère Nord, tandis que GEM-NEMO présente des erreurs systématiques pour le vent zonal depuis l’Est.

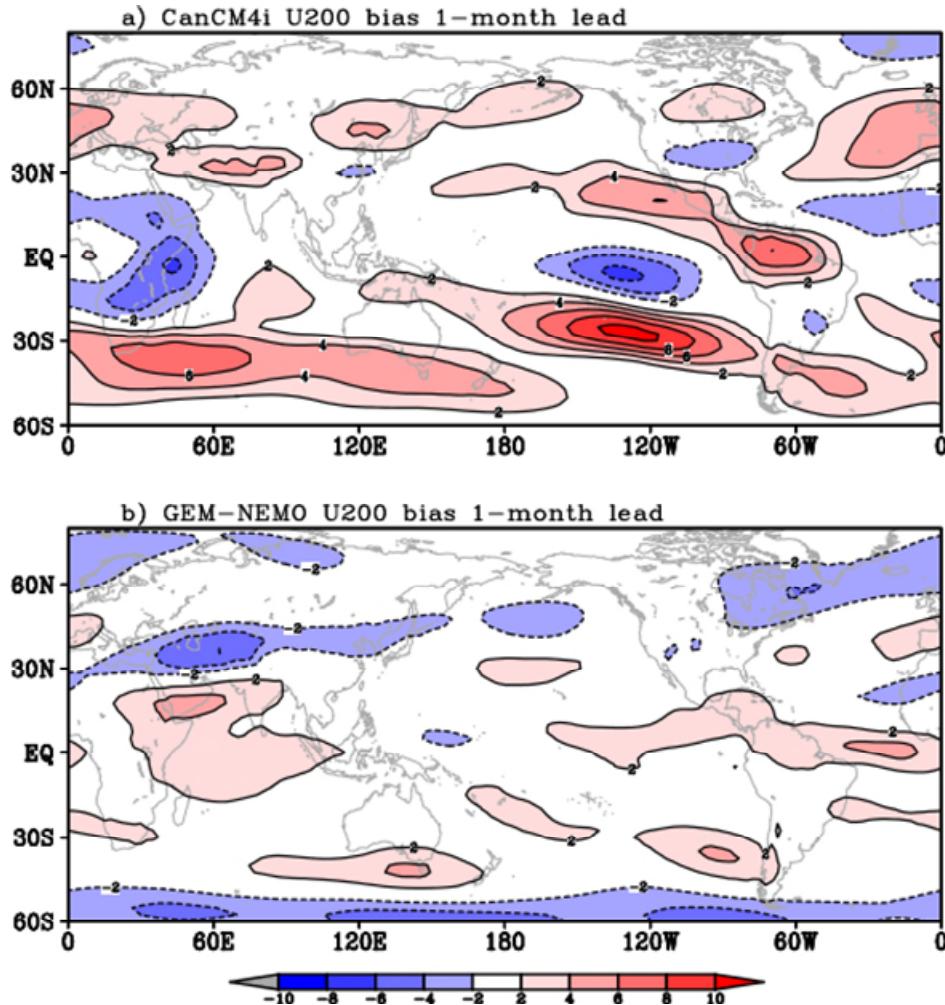


Figure 4. Erreurs systématiques en m/s pour le vent zonal à 200 hPa avec une échéance de 1 mois pour MCCan4i (haut) et GEM-NEMO (bas).

6 Évaluation de l'habileté du système SPISScanv2 par rapport à SPISScan

La performance de SPISScanv2 a été évaluée par rapport à celle de SPISScan pour la période de prévision *a posteriori* de 1981-2010. Les données de vérification utilisées sont les résultats des réanalyses ERA-Interim pour la température de l'air et la hauteur géopotentielle, et l'ensemble de données GPCP V2.3 pour les précipitations.

Les mesures de l'habileté examinées ici portent sur les prévisions déterministes, établies à partir de la moyenne d'ensemble des anomalies prévues. En plus des cartes mondiales pour les prévisions hivernales et estivales, nous examinons les moyennes régionales (la planète, la masse continentale de la Terre, l'Amérique du Nord et le Canada pour la température et les précipitations; et planète, zones extratropicales de l'hémisphère Nord, zones tropicales et zones extratropicales de l'hémisphère Sud pour la hauteur géopotentielle à 500 hPa) des corrélations

des anomalies, c.-à-d. le coefficient de corrélation entre les anomalies prévues et observées. De plus, dans cette évaluation de l'habileté des prévisions d'ensemble au-dessus du Canada, nous traitons de l'indice continu de probabilité ordonné (indice CRPSS; p. ex., Bradley et Schwartz 2011) qui mesure les différences entre les prévisions et les distributions observées. Voici une comparaison de l'habileté des deux systèmes.

6.1 Température de l'air en surface

La Figure 5 montre la distribution géographique mondiale de l'habileté de corrélation des anomalies pour la prévision de la moyenne saisonnière de la température de l'air en surface à partir de la prévision *a posteriori* de SPISCan (gauche) et de la nouvelle prévision *a posteriori* de SPISCanv2 (droite), pour la saison DJF avec une échéance de 0 mois. Comme c'est généralement le cas, c'est les tropiques que les deux systèmes sont les plus habiles, en particulier dans la zone tropicale du Pacifique, où les anomalies pour la TSM sont les plus persistantes et où les oscillations ENSO confèrent une prévisibilité relativement élevée. L'habileté est également importante dans de nombreux endroits sur les masses continentales, y compris la majeure partie de l'Amérique du Nord où une bonne partie de la prévisibilité saisonnière, particulièrement en hiver et au début du printemps, est attribuable aux influences téléconnectées d'ENSO. En général, la répartition de l'habileté des deux systèmes est comparable. L'habileté moyenne globale de SPISCanv2 est supérieure à celle de SPISCan. On peut tirer une conclusion semblable pour la saison JJA (Figure 6), ainsi que pour d'autres saisons (non illustrées).

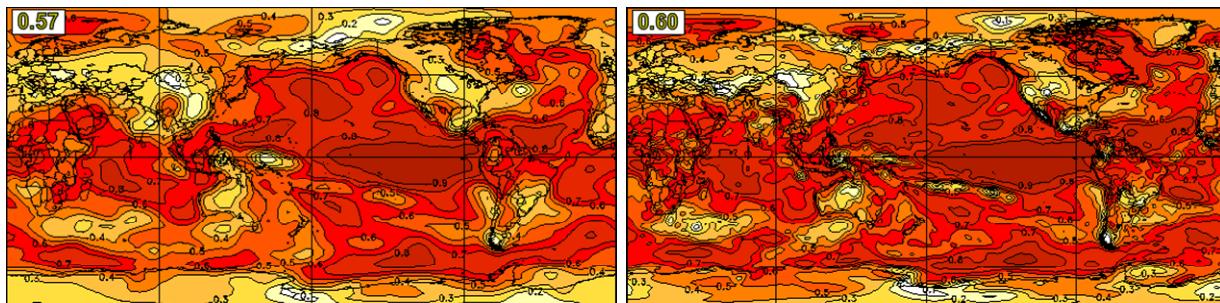


Figure 5. Distribution géographique de l'habileté de corrélation des anomalies pour la prévision des moyennes saisonnières de la température de l'air près de la surface pour la saison DJF avec aucune échéance, pour les systèmes SPISCan (gauche) et SPISCanv2 (droite), d'après les prévisions historiques pour 1981-2010. Les données de vérification sont basées sur les analyses ERA-Interim. Les habiletés moyennes pour l'ensemble de la planète apparaissent dans le coin gauche supérieur de chaque panneau.

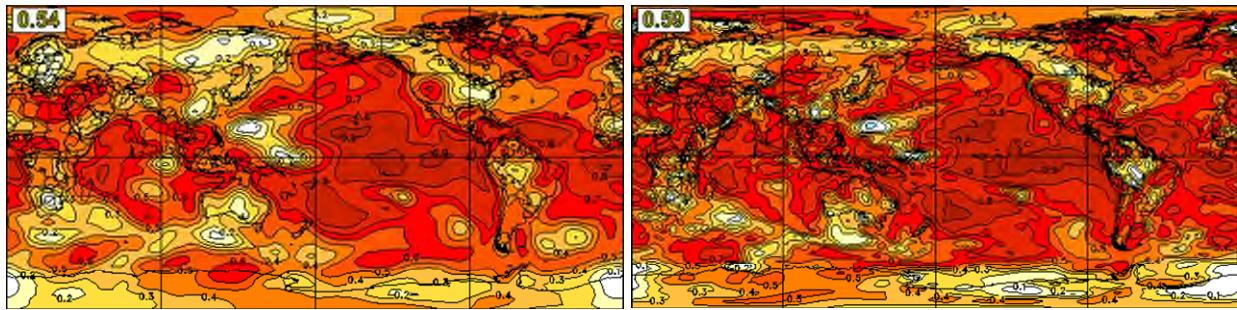
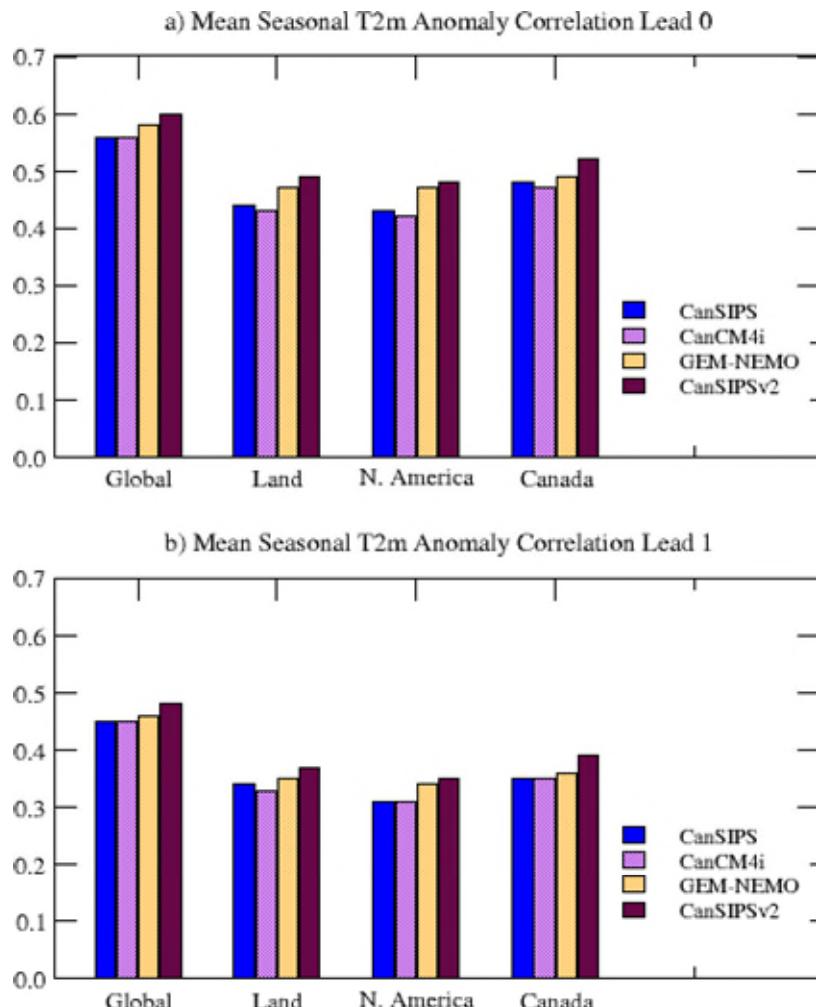


Figure 6. Semblable à la Figure 5, mais pour la saison JJA.

La Figure 7 présente l’habileté de corrélation des anomalies pour T2m, pour différentes régions et pour des échéances de 0 mois (haut) et 1 mois (bas), moyennées pour l’ensemble des 12 mois d’initialisation. Il est manifeste que GEM-NEMO utilisé seul a une performance comparable ou supérieure à celle de SPISCan. En combinant GEM-NEMO et MCCan4i, l’habileté de SPISCan2 se trouve grandement améliorée par rapport aux prévisions *a posteriori* de SPISCan pour toutes les régions.



*Figure 7. Habilité de corrélation des anomalies pour les prévisions *a posteriori* des moyennes saisonnières de la température de l'air près de la surface avec une échéance de 0 mois (haut) et de 1 mois (bas). Les habiletés illustrées sont moyennées pour l'ensemble des 12 mois d'initialisation. Les habiletés de prévision *a posteriori* de SPISCanv2 sont présentées séparément des habiletés pour les modèles individuels MCCan4i et GEM-NEMO, et également pour les prévisions *a posteriori* SPISCanv2 combinées. Les indices sont comparés aux valeurs pour SPISCan.*

Pour mesurer la qualité des prévisions de probabilité pour le système d'ensemble, nous présentons à la Figure 8 les indices d'habileté CRPSS pour la moyenne saisonnière DJF des prévisions de T2m avec une échéance de 0 mois au Canada. On observe que les deux systèmes SPISCan et SPISCanv2 présentent des indices d'habileté élevés pour une grande partie du nord-est du Canada et des régions côtières de l'Ouest. L'habileté est plutôt faible dans les Prairies. La distribution des habiletés selon l'indice CRPSS est conforme à la corrélation des anomalies de la prévision moyenne de l'ensemble, présentée à la Figure 5. Si on compare les deux systèmes, il est manifeste que le système SPISCanv2 donne de meilleurs résultats que SPISCan, particulièrement dans l'est du Canada. On observe une caractéristique similaire des indices d'habileté CRPSS pour la saison JJA (Figure 9). On observe également que l'habileté est meilleure avec SPISCanv2 qu'avec SPISCan.

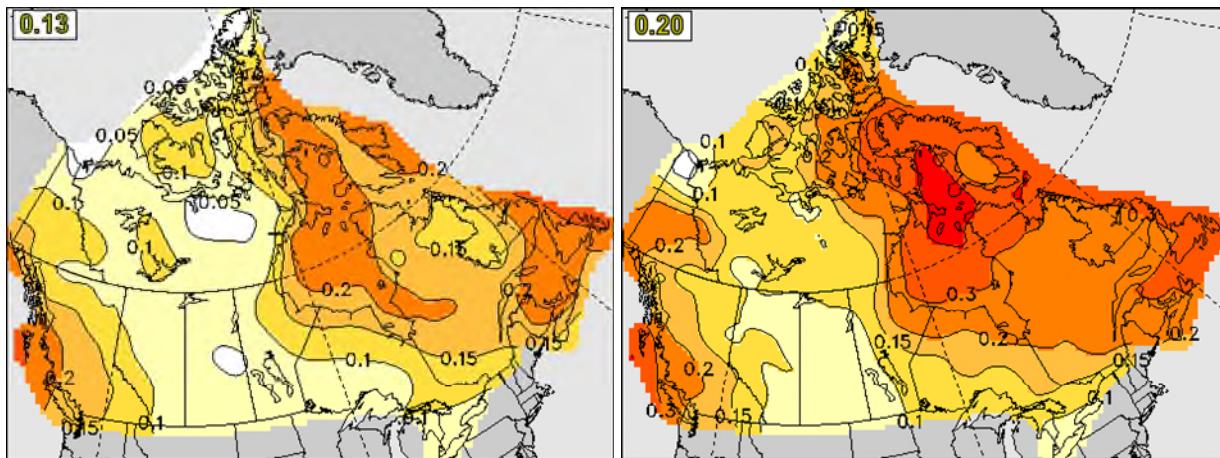


Figure 8. Habilité selon l'indice CRPSS pour la moyenne saisonnière de la température de l'air près de la surface, saison DJF, avec une échéance de 0 mois, pour les systèmes SPISCan (gauche) et SPISCanv2 (droite), d'après les prévisions historiques pour 1981-2010. Les données de vérification proviennent des analyses ERA-Interim. Les habiletés moyennes globales sont indiquées dans le coin supérieur gauche de chaque panneau.

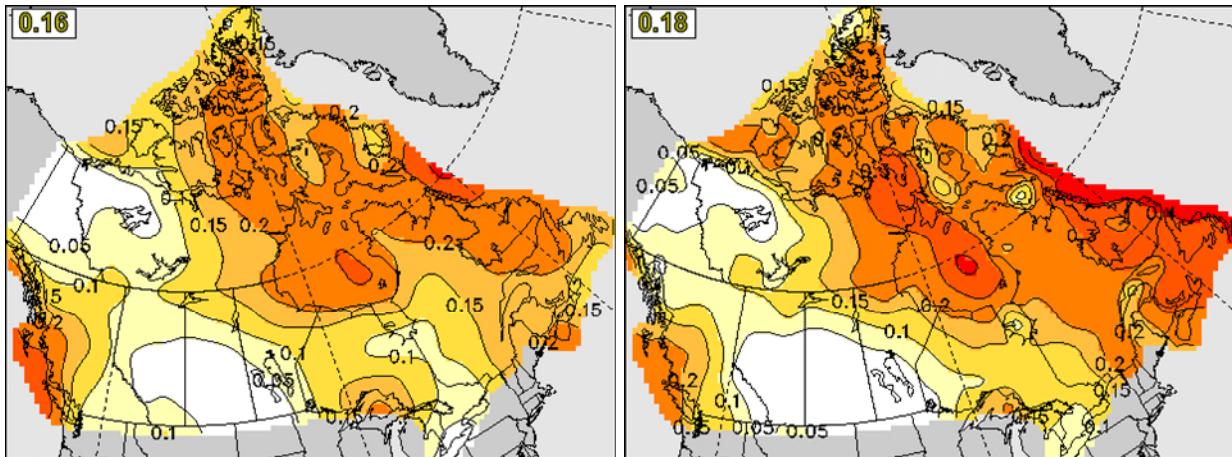


Figure 9. Semblable à la Figure 8, mais pour la saison JJA.

6.2 Précipitations

La distribution globale de l'habileté de corrélation des anomalies pour la prévision des précipitations moyennes saisonnières pour la saison DJF, avec une échéance de 0 mois, est présentée à la Figure 10 pour les prévisions *a posteriori* de SPISCan (gauche) et de SPISCanv2 (droite). De nouveau, on observe une habileté élevée dans les régions tropicales, ce qui reflète la contribution des oscillations ENSO. On constate une certaine habileté pour les précipitations dans les régions côtières ouest et est de l'Amérique du Nord. L'habileté moyenne globale de SPISCanv2 est supérieure à celle de SPISCan, bien que la distribution des deux systèmes soit très similaire. Pour ce qui est des prévisions pour la saison JJA, l'habileté des prévisions des précipitations présente une distribution similaire à celle de la saison DJF, mais est plus faible (Figure 11). Pour cette saison, les deux systèmes produisent des prévisions habiles des précipitations saisonnières au-dessus de l'ouest de l'Amérique du Nord. De nouveau, l'habileté moyenne globale des précipitations avec SPISCanv2 est supérieure à celle de SPISCan.

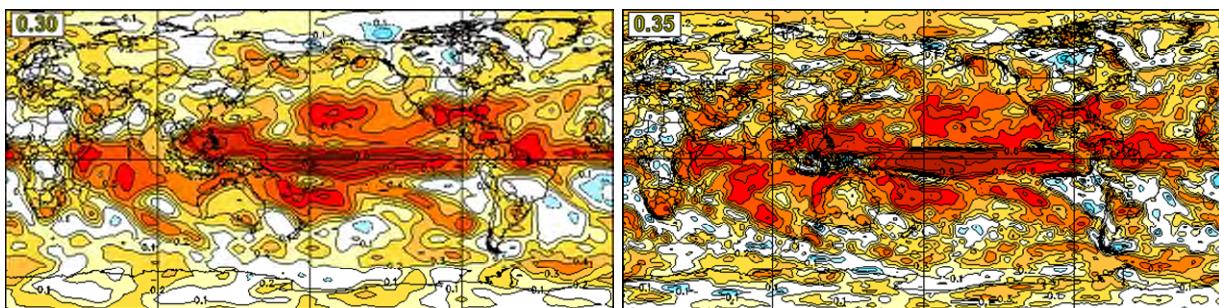


Figure 10. Distribution géographique de l'habileté de corrélation des anomalies pour les prévisions des précipitations moyennes saisonnières, saison DJF, avec une échéance de 0 mois, pour les systèmes SPISCan (gauche) et SPISCanv2 (droite), d'après les prévisions historiques pour 1981-2010. Les données de vérification proviennent de l'ensemble de données GPCP V2.3. Les habiletés moyennes globales sont indiquées dans le coin supérieur gauche de chaque panneau.

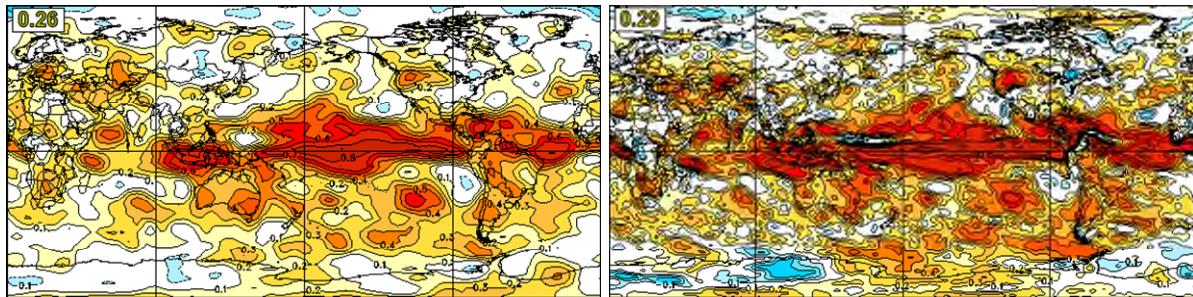


Figure 11. Semblable à la Figure 10, mais pour la saison JJA.

Les habiletés de corrélation des anomalies pour les précipitations, moyennées pour l'ensemble des 12 mois d'initialisation pour différentes régions, sont montrées à la Figure 12 pour des échéances de 0 mois (haut) et 1 mois (bas). En général, l'habileté pour les précipitations est faible, particulièrement avec l'échéance de 1 mois. On voit que SPISCanv2 donne de meilleurs résultats que SPISCan pour la prévision des précipitations dans toutes les régions, pour les prévisions saisonnières avec échéance de 0 mois. Pour l'échéance de 1 mois, nous constatons une amélioration de l'habileté des prévisions des précipitations pour la planète et pour les masses terrestres, mais une certaine dégradation au-dessus de l'Amérique du Nord et du Canada, bien que l'habileté soit très faible.

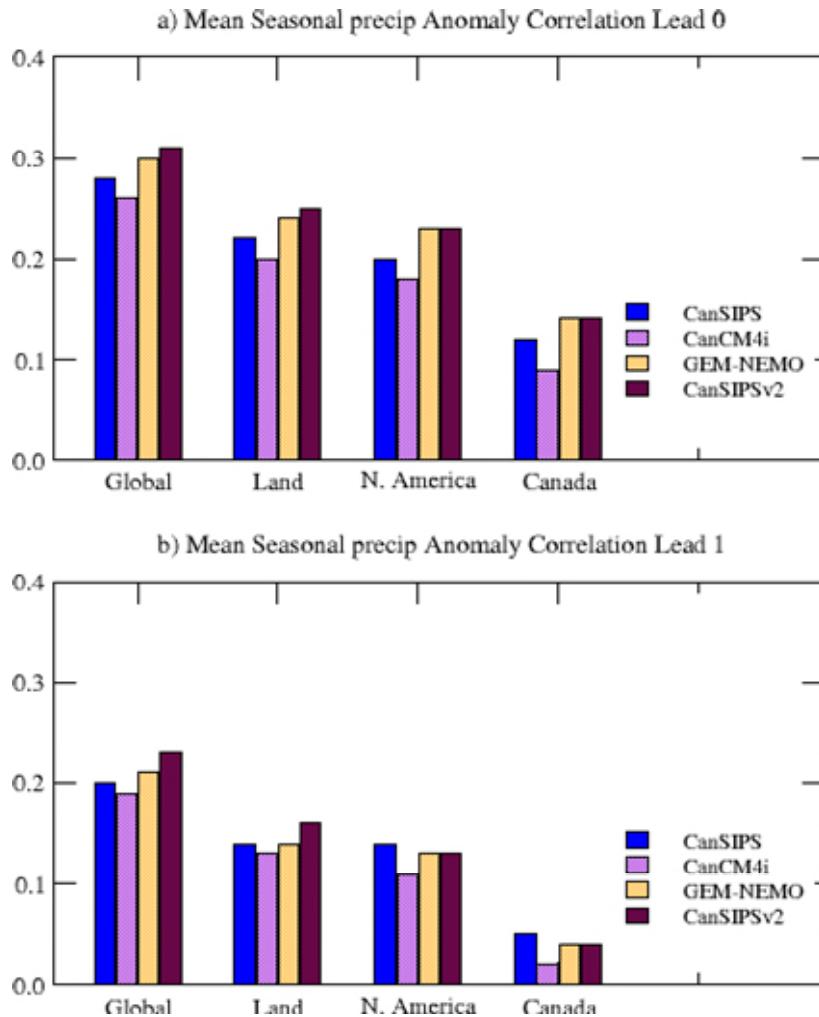


Figure 12. Semblable à la Figure 7, sauf que les précipitations ont été vérifiées par rapport à l'ensemble de données GPCP V2.3, avec des échéances de 0 mois (haut) et de 1 mois (bas).

Les habiletés selon l'indice CRPSS pour les prévisions des précipitations moyennes saisonnières, saisons DJF et JJA, avec une échéance de 0 mois au Canada, sont respectivement illustrées aux figures 13 et 14. Bien que l'habileté des prévisions des précipitations soit faible, on peut constater une amélioration appréciable avec SPISCanv2 pour la saison DJF. Les deux systèmes présentent une habileté comparable, selon l'indice CRPSS, pour la saison JJA.

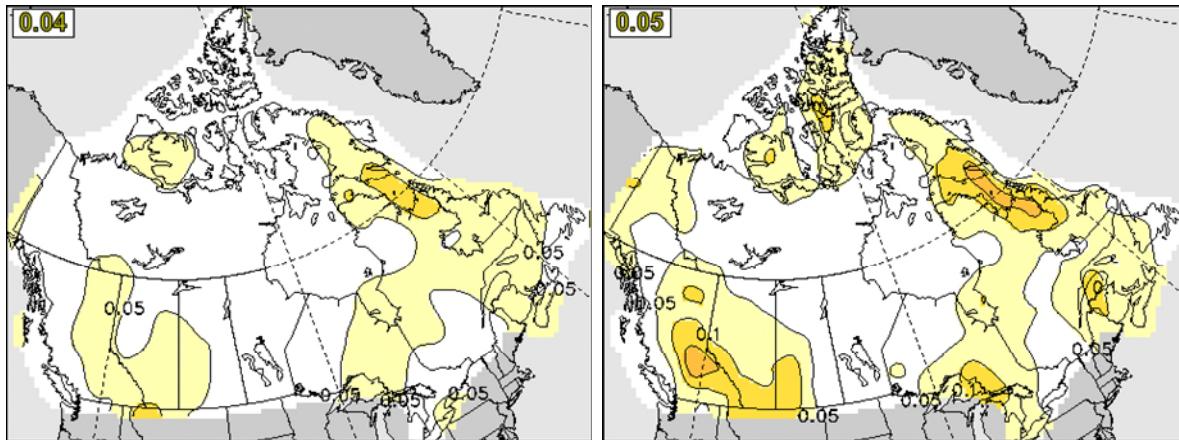


Figure 13. Habilité selon l'indice CRPSS pour les précipitations moyennes saisonnières, saison DJF, avec une échéance de 0 mois, selon SPISCan (gauche) et SPISCanv2 (droite), d'après les prévisions historiques pour 1981-2010. Les données de vérification proviennent de l'ensemble de données GPCP V2.3. Les habiletés moyennes globales sont indiquées dans le coin supérieur de chaque panneau.

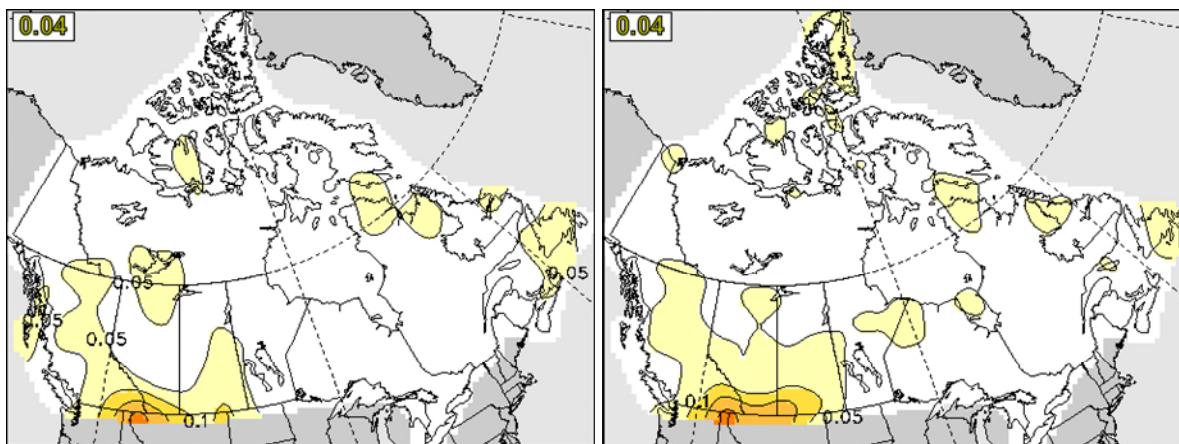


Figure 14. Semblable à la Figure 13, mais pour la saison JJA.

6.3 Hauteur géopotentielle à 500 hPa

Dans cette section, nous évaluons l'habileté de la prévision saisonnière de la hauteur géopotentielle à 500 hPa (Z500). La distribution spatiale de l'habileté des prévisions avec une échéance de 0 mois pour l'hiver (saison DJF) et l'été (saison JJA) est présentée.

L'habileté de corrélation des anomalies pour la moyenne saisonnière de la Z500, saison DJF, avec une échéance de 0 mois, c.-à-d. avec initialisation le 1^{er} décembre, est comparée pour les systèmes SPISCan et SPISCanv2 à la Figure 15. Tout comme pour T2m et les précipitations, on trouve une habileté importante pour la Z500 dans les tropiques. Dans les zones extratropicales de l'hémisphère Nord, l'habileté de corrélation est élevée au-dessus du Pacifique Nord et de la

majeure partie du Canada, ce qui résulte de la variabilité du régime PAN associé aux oscillations ENSO (p. ex., Wallace et Gutzler 1981). Une habileté de corrélation relativement élevée est observée au-dessus du Groenland et aux latitudes moyennes de l'Atlantique Nord, et semble être associée aux oscillations NAO. En général, les deux systèmes présentent une distribution similaire de l'habileté. Cependant, l'habileté au-dessus du Pacifique Nord et du Groenland, ainsi que la moyenne pour la planète, est plus élevée avec SPISCanv2 qu'avec SPISCan.

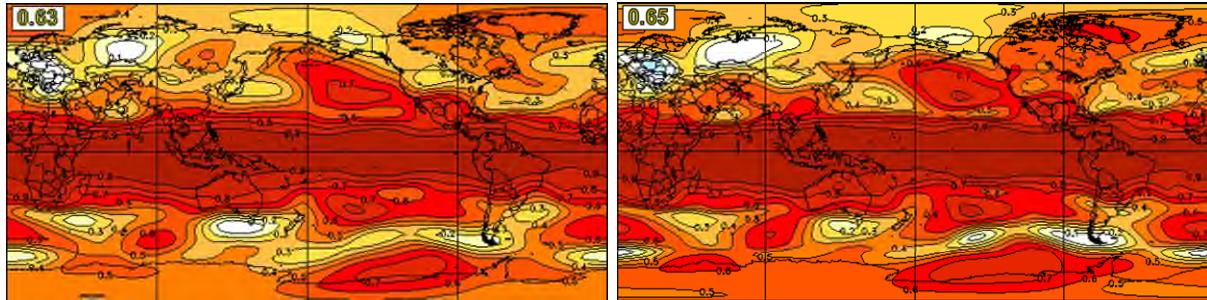


Figure 15. Distribution géographique de l'habileté de corrélation des anomalies pour la moyenne saisonnière de la hauteur géopotentielle à 500 hPa, saison DJF, avec une échéance de 0 mois, selon SPISCan (gauche) et SPISCanv2 (droite), d'après les prévisions historiques pour 1981-2010. Les données de vérification proviennent des réanalyses ERA-Interim. Les habiletés moyennes globales sont indiquées dans le coin supérieur gauche de chaque panneau.

Pour la saison JJA, illustrée à la Figure 16, l'habileté des prévisions pour la Z500 moyenne saisonnière est également élevée dans les tropiques. Dans les zones extratropicales de l'hémisphère Nord, hormis le Groenland et les régions polaires, on trouve quatre centres de grande habileté dans un patron d'onde le long des latitudes moyennes, à savoir l'est de l'Europe, la Chine, le Pacifique Nord et l'ouest de l'Amérique du Nord. Cette dernière région est probablement responsable des habiletés élevées de prévision de la température et des précipitations pour l'ouest de l'Amérique du Nord, illustrées aux figures 6 et 11. Le système SPISCan2 présente une habileté moyenne globale supérieure à SPISCan, bien que les deux systèmes présentent une distribution très similaire de l'habileté.

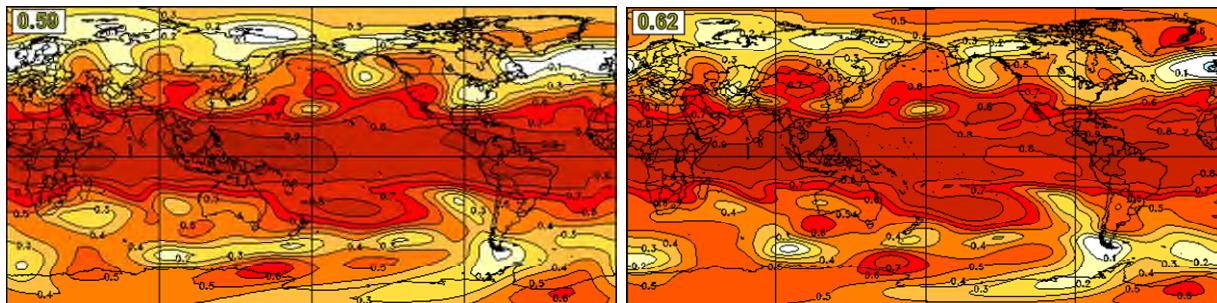


Figure 16. Semblable à la Figure 15, mais pour la saison JJA.

La figure 17 présente la moyenne de l'habileté de corrélation des anomalies, pour tous les 12 mois d'initialisation et différentes régions, c.-à-d. la planète, les zones extratropicales de l'hémisphère Nord ($30^{\circ}\text{N}-90^{\circ}\text{N}$), les tropiques ($30^{\circ}\text{S}-30^{\circ}\text{N}$) et les zones extratropicales de l'hémisphère Sud ($90^{\circ}\text{S}-30^{\circ}\text{S}$), pour des échéances de 0 mois (haut) et de 1 mois (bas). De nouveau, le système SPISCanv2 surpassé le système SPISCan dans toutes les régions, et ce, pour les deux échéances.

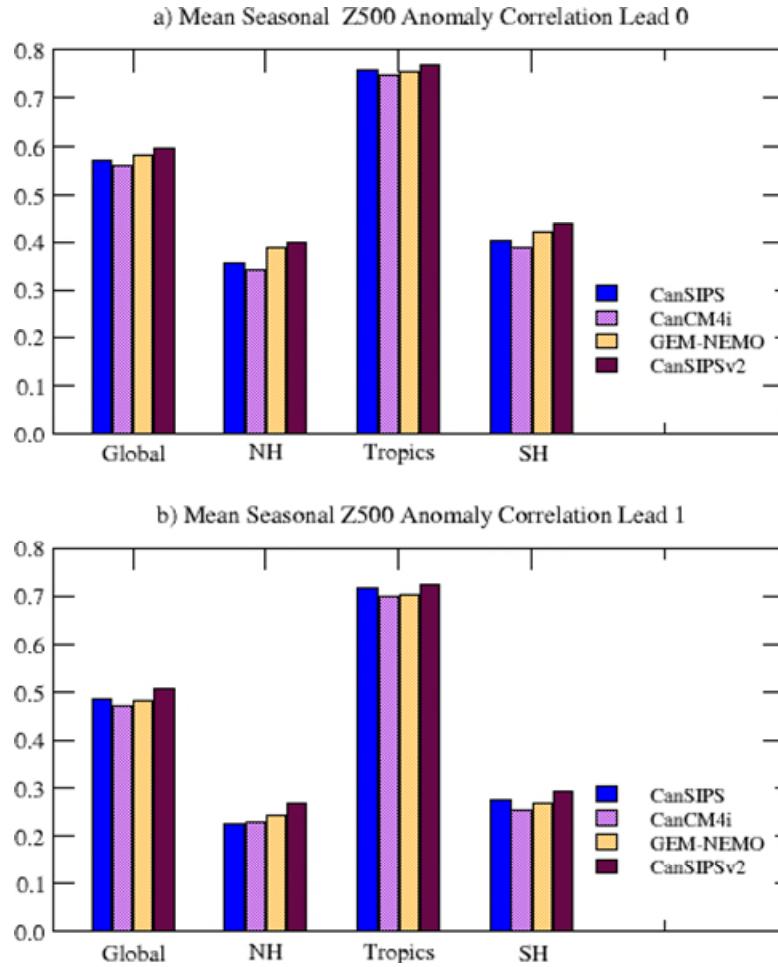


Figure 17. Habilétés de corrélation des anomalies pour les prévisions a posteriori de la Z500 moyenne saisonnière avec des échéances de 0 mois (haut) et de 1 mois (bas). Les habiletés présentées sont des moyennes pour l'ensemble des 12 mois d'initialisation pour la planète, les zones extratropicales de l'hémisphère Nord ($30^{\circ}\text{N}-90^{\circ}\text{N}$), les tropiques ($30^{\circ}\text{S}-30^{\circ}\text{N}$) et les zones extratropicales de l'hémisphère Sud ($90^{\circ}\text{S}-30^{\circ}\text{S}$). Les habiletés de prévision a posteriori de SPISCanv2 sont présentées séparément des habiletés pour les modèles individuels MCCan4i et GEM-NEMO, et également pour les prévisions a posteriori SPISCanv2 combinées. Les indices sont comparés aux valeurs pour SPISCan.

Afin d'illustrer l'évolution de l'habileté avec une augmentation de l'échéance, la Figure 18 présente la moyenne de l'habileté de corrélation des anomalies pour la Z500, pour l'ensemble de

la planète, en fonction de l'échéance. Les habiletés illustrées sont des moyennes pour l'ensemble des 12 mois d'initialisation. Comme on peut le constater, l'habileté des prévisions de SPISCanv2 est meilleure que SPISCan pour toutes les échéances.

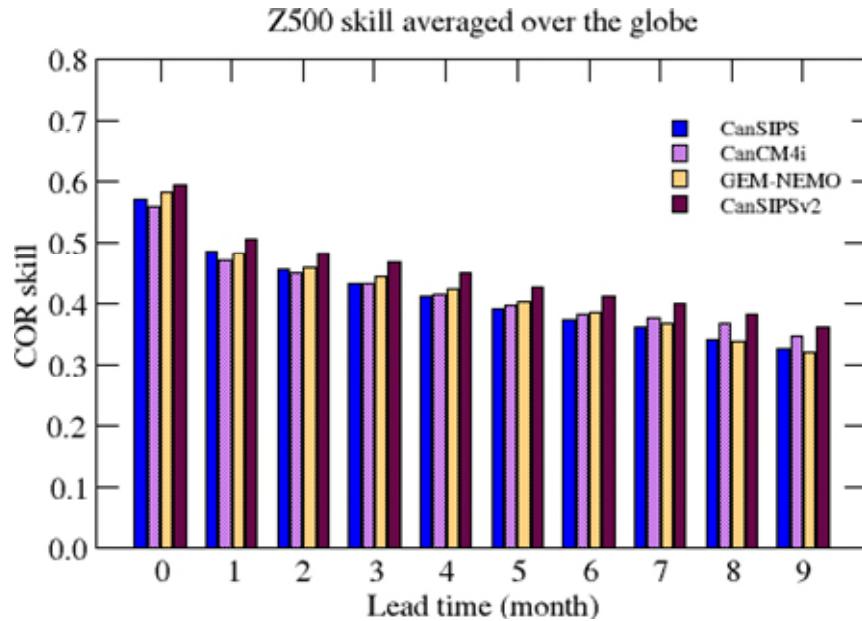


Figure 18. Moyenne mondiale de l'habileté de prévision de la corrélation des anomalies pour la Z500 moyenne saisonnière en fonction de l'échéance. Les habiletés illustrées sont des moyennes pour l'ensemble des 12 mois d'initialisation.

6.4 TSM et ENSO

À la Figure 19, nous présentons d'abord l'habileté de corrélation des anomalies de la moyenne saisonnière de la TSM, saison DJF, avec une échéance de 1 mois, c.-à-d. avec initialisation le 1^{er} novembre. Les deux systèmes ont une distribution très semblable des habiletés. L'habileté élevée de la prévision de la TSM se situe au-dessus des océans de la planète, l'habileté maximale étant dans la région ENSO de la partie équatoriale de l'est du Pacifique. L'habileté moyenne globale de SPISCanv2 (0,61) est plus élevée que celle de SPISCan (0,55). L'habileté pour la prévision de la TSM avec échéance de 1 mois pour la saison JJA présente une distribution similaire à celle de la saison DJF, mais elle est plus faible et moins concentrée dans la région ENSO (Figure 20).

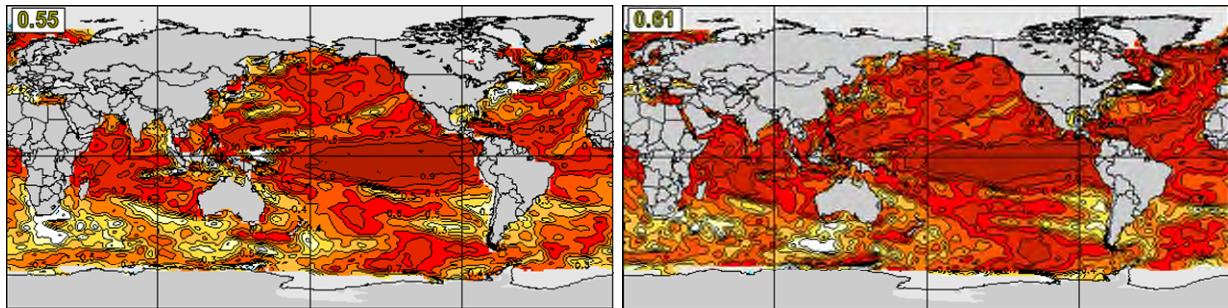


Figure 19. Habilité de prévision de la corrélation des anomalies pour la moyenne saisonnière de la TSM, saison DJF, avec échéance de 1 mois. Données vérifiées par rapport aux données OISST. À gauche : SPISCan, à droite : SPISCanv2. Les habiletés moyennes globales sont indiquées dans le coin supérieur gauche de chaque panneau.

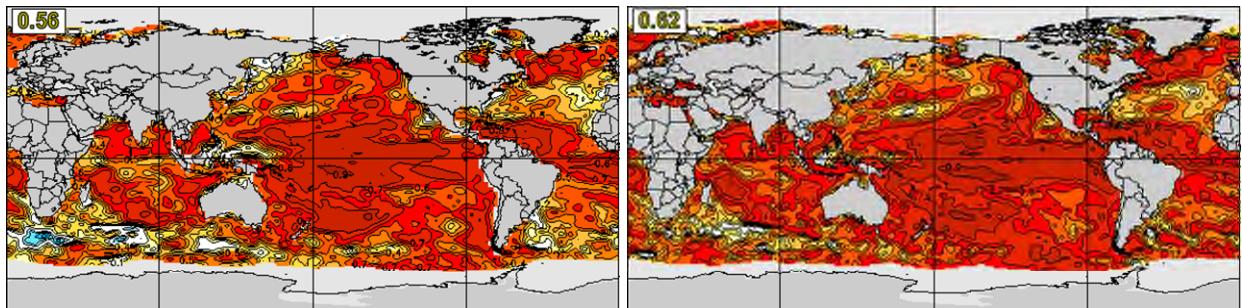


Figure 20. Semblable à la Figure 19, mais pour la prévision pour JJA, avec initialisation le 1^{er} mai.

Pour démontrer l'habileté des prévisions des oscillations ENSO, nous utilisons l'indice Nino3.4 qui est défini comme étant l'anomalie de la TSM moyennée dans la région de 5° N-5° S, 170° O-120° O. La Figure 21 présente un résumé de l'habileté de corrélation de l'indice Nino3.4 pour la moyenne saisonnière en fonction de la saison cible (axe vertical) et du temps d'échéance en mois (axe horizontal). Les indices d'habileté moyennés tout au long des saisons cibles en fonction de l'échéance sont imprimés au haut de la figure, tandis que les indices moyennés pour toutes les échéances en fonction de la saison cible sont indiqués du côté droit. La moyenne générale pour toutes les saisons cibles et les échéances est imprimée dans le coin droit supérieur à l'intérieur de la figure. En général, les deux systèmes présentent une habileté comparable pour la prévision des oscillations ENSO. Le système SPISCan2 a une habileté globale légèrement meilleure. Pour les saisons cibles d'hiver, SPISCanv2 affiche une meilleure performance. Par exemple, pour les saisons DJF et JFM, l'habileté des prévisions de 0,90 pour SPISCanv2 atteint une échéance de sept mois, ce qui est environ deux fois plus long qu'avec SPISCan.

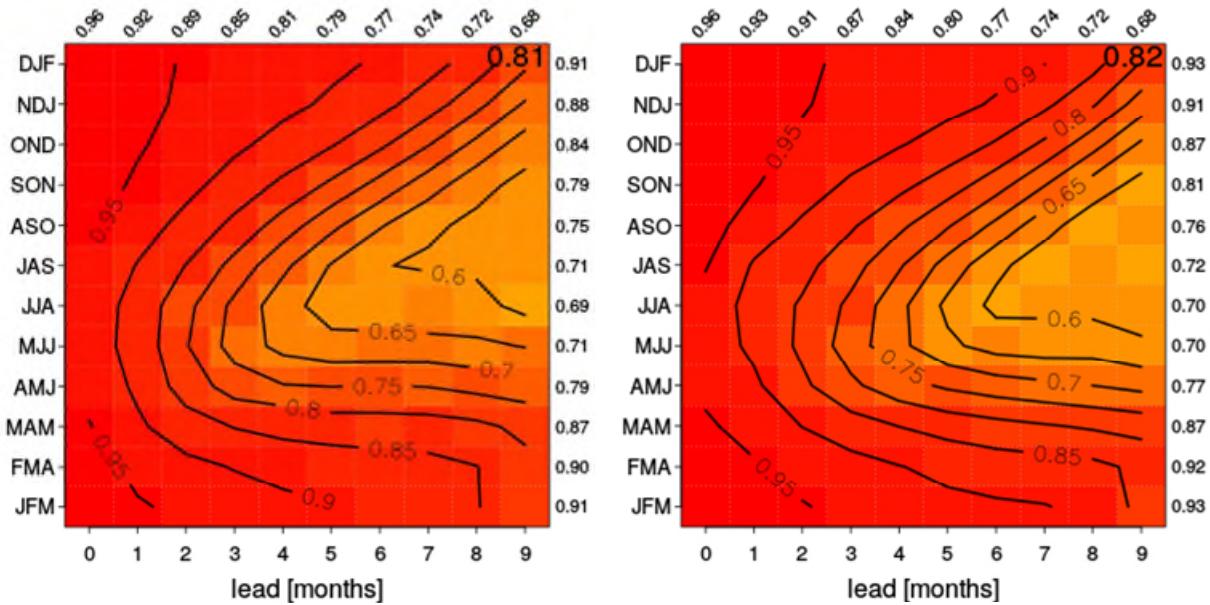


Figure 21. Habilité de prévision de la corrélation des anomalies de l'indice Niño3.4 moyen saisonnier en fonction de la saison cible (axe vertical) et de l'échéance (axe horizontal). Données vérifiées par rapport aux données OISST. À gauche : SPISCan, à droite : SPISCanv2.

6.5 Téléconnexion PAN et oscillations NAO

La téléconnexion Pacifique-Amérique du Nord et les oscillations de l'Atlantique Nord (NAO) sont deux des principaux modes de variabilité interannuelle de la circulation moyenne saisonnière dans les zones extratropicales de l'hémisphère Nord (p. ex., Wallace et Gutzler 1981) qui influent fortement sur le temps et le climat. Nous analysons ici l'habileté des prévisions de ces deux régimes.

Les régimes PAN et NAO sont définis comme étant les premier et deuxième modes de la fonction orthogonale empirique permutée (REOF) de la hauteur géopotentielle à 500 hPa moyenne mensuelle au-dessus de l'hémisphère Nord d'après les réanalyses NCEP/NCAR, selon Barnston et Livezey (1987). Les anomalies moyennes mensuelles pour tous les 12 mois civils sont utilisées. Comme la variabilité des régimes PAN et NAO présente la plus grande variance pendant la saison froide, les caractéristiques hivernales dominaient donc dans ces régimes. Les indices PAN et NAO sont calculés sous forme de projections des anomalies de la hauteur géopotentielle moyenne saisonnière de 500 hPa d'après leurs régimes REOF respectifs. Dans les paragraphes qui suivent, nous comparons les habiletés de prévision des régimes PAN et NAO par SPISCan et SPISCanv2. Les indices de vérification sont obtenus par projection de l'anomalie pour la Z500 moyenne saisonnière, d'après les résultats du projet ERA-Interim, sur les régimes PAN et NAO.

Les habiletés de corrélation de l'indice PAN en fonction de la saison cible sont présentées à la Figure 22 pour une échéance de 0 mois (haut) et de 1 mois (bas). L'habileté des prévisions du régime PAN change en fonction de la saison cible, l'habileté étant élevée en hiver, au printemps et au début de l'été. À la fin de l'été et en automne, lorsque le régime PAN n'est pas bien défini, l'habileté est faible. En général, l'habileté des prévisions du régime PAN par SPISCanv2 est similaire à celle de SPISCan. En hiver, l'habileté des prévisions du régime PAN est meilleure avec SPISCanv2 qu'avec SPISCan avec une échéance de 0 mois (Figure 22a). Cependant, avec une échéance de 1 mois, on constate une certaine dégradation de l'habileté des prévisions du régime PAN en hiver, particulièrement pour les saisons DJF et JFM (Figure 22b).

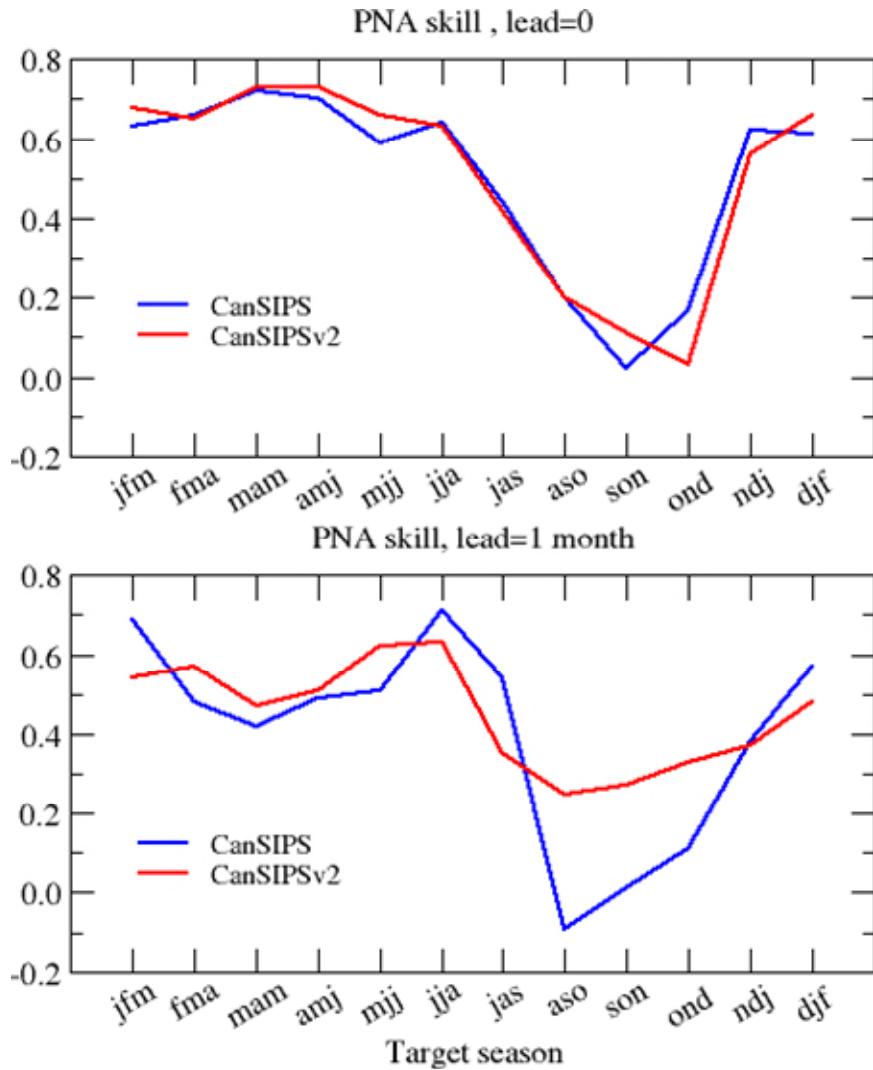


Figure 22. Habiléty de corrélation de l'indice PAN moyen saisonnier en fonction de la saison cible et pour une échéance de 0 mois (haut) et de 1 mois (bas).

L'habileté des prévisions de l'indice NAO est illustrée à la Figure 23. On observe également une habileté relativement élevée de prévision des oscillations NAO pour les saisons cibles d'hiver et du printemps. Pour la prévision de la plupart des saisons cibles, le système SPISCanv2 surpassé SPISCan, surtout pour les prévisions avec une échéance de 1 mois.

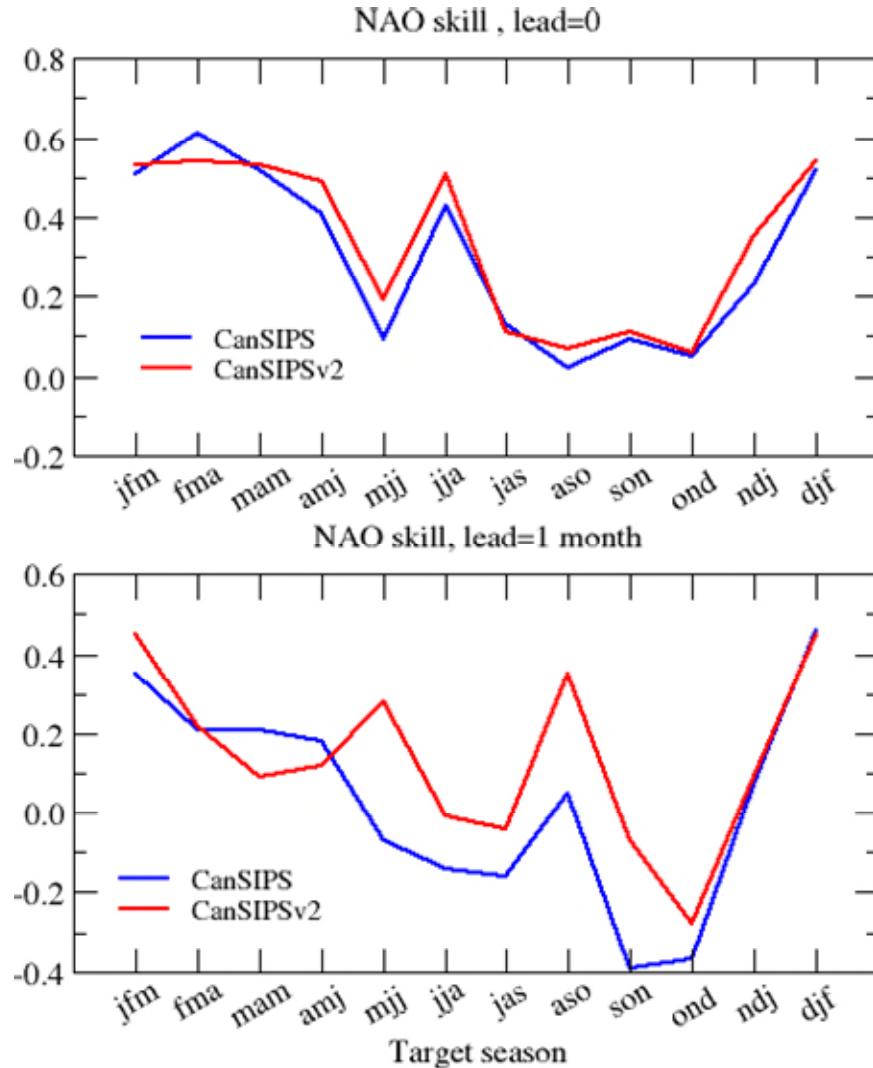


Figure 23. Semblable à la Figure 22, mais pour l'indice NAO.

6.6 Glace de mer

SPISCan a été l'un des premiers systèmes de prévision saisonnière à disposer d'une composante interactive de modélisation de la glace de mer qui, en principe, permet d'établir des prévisions saisonnières de la glace de mer. Dans la pratique, l'habileté de prévision de la glace de mer dans l'Arctique de SPISCan, bien qu'appréciable, est principalement attribuable à la tendance à long terme qui tend cependant à être sous-représentée dans les prévisions (Sigmond et coll., 2013). Cela indique qu'on peut faire mieux et, en fait, on a relevé des lacunes dans l'initialisation par

SPISCan de la glace de mer, ce qui risque de dégrader son habileté. Il s'agit notamment de tendances irréalistes relatives à l'étendue de la glace de mer arctique dans les données utilisées pour initialiser la concentration de la glace de mer dans les prévisions, ainsi que l'utilisation d'une climatologie à variation saisonnière, basée sur un modèle, qui ne comporte pas de tendance d'amincissement à long terme pour initialiser l'épaisseur de la glace de mer.

Une autre lacune dans l'initialisation de la glace de mer pour les prévisions faites avec SPISCan est que la concentration de la glace de mer (CGM) qui a été utilisée est biaisée à la baisse par rapport à l'analyse SGPD, particulièrement pendant la saison de fonte estivale. Cela a contribué à un biais plutôt élevé, en temps réel, dans les prévisions de SPISCan de l'étendue de la glace en mer Arctique, résultats qui n'étaient pas utiles en grande partie pour cette raison.

Les modifications apportées à l'initialisation de la glace de mer dans les prévisions MCCan4i et prévisions décrites aux sections 3.1 et 4.1 visent à résoudre les problèmes susmentionnés et à assurer une plus grande habileté des prévisions de la glace de mer dans le modèle MCCan4i, par rapport à MCCan4, et à réduire les biais importants et les erreurs résultantes dans les prévisions en temps réel. À titre d'exemple, la Figure 24 compare l'habileté de prévision de la corrélation des anomalies pour la CGM en septembre avec échéance de 4 mois (avec initialisation au début de mai) dans les modèles MCCan4 et MCCan4i.

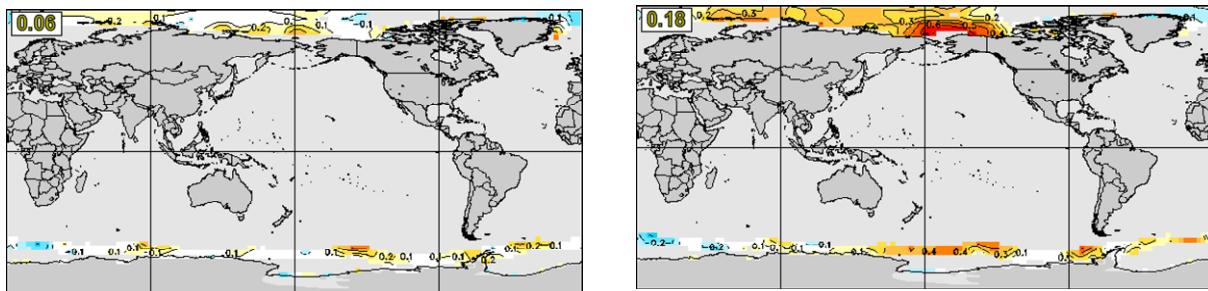


Figure 24. Habillement de prévision de la corrélation des anomalies pour la CGM mensuelle moyenne en septembre avec échéance de 4 mois (et initialisation au début de mai), et vérification par rapport à Had2CIS. À gauche : MCCan4 avec SPISCan, et à droite : MCCan4i avec SPISCanv2. L'habileté moyenne globale pour les régions couvertes de glace est indiquée dans le coin gauche supérieur de chaque panneau.

Le modèle couplé GEM-NEMO permet d'améliorer l'habileté des prévisions de la glace de mer par SPISCanv2, qui est encore plus habile que MCCan4i (p. ex., la corrélation moyenne globale des anomalies pour les régions couvertes de glace, pour la CGM en septembre avec une échéance de 4 mois, approche la valeur 0,30). Cette amélioration globale est illustrée à la Figure 25, qui compare les habiletés de prévision de la corrélation des anomalies pour la prévision de la CGM en septembre avec une échéance de 4 mois, selon SPISCan et SPISCanv2.

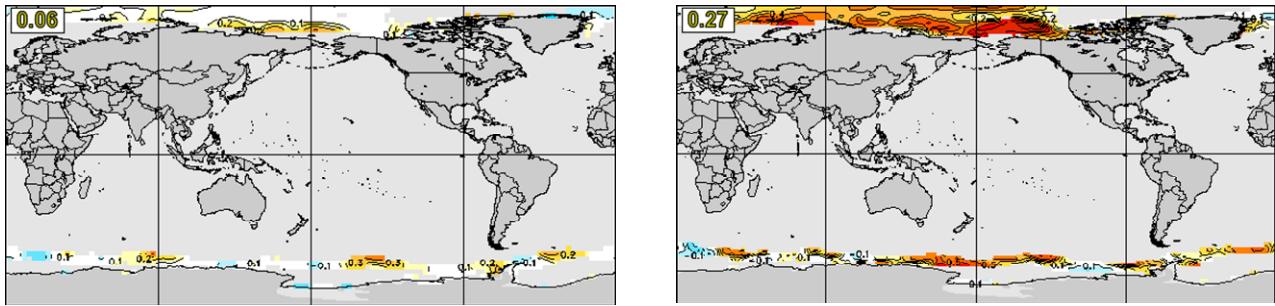


Figure 25. Semblable à la Figure 24, mais avec comparaison de SPISCan (gauche) et SPISCanv2 (droite).

7 Évaluation qualitative des passages parallèles

Les passages parallèles de mai et juin 2019 ont produit des prévisions saisonnières cohérentes avec le système opérationnel SPISCan.

8 Modalités de mise en œuvre

Un aspect important de tout système opérationnel de prévision saisonnière est l'utilisation des mêmes versions et méthodes d'initialisation des modèles pour la production des prévisions et des reprévisions. Les deux modèles SPISCanv2 répondent à cette exigence. Toutefois, comme les analyses du SMC utilisées pour initialiser les prévisions en temps réel ne sont pas disponibles pour la période de reprévision, il y aura inévitablement des différences entre les produits-données utilisés pour initialiser les prévisions et les reprévisions, comme il est décrit dans les parties 3 et 4. En général, le choix des produits-données pour initialiser les reprévisions est guidé par des considérations de compatibilité avec les analyses correspondantes utilisées en temps réel. Par exemple, la réanalyse océanique ORAP5 utilisée par les deux modèles de SPISCanv2 est formulée à l'aide du même système de modélisation (NEMO) et de la même grille de base (ORCA025) que l'analyse océanique SGPOG utilisée pour l'initialisation en temps réel. En outre, le produit « concentration de glace de mer » Had2CIS a été élaboré et choisi pour l'initialisation des reprévisions dans les deux modèles, car il présente des biais plus faibles par rapport à l'analyse GPDS employée en temps réel que pour les autres produits, comme ORAP5, qui présente un biais important vers des concentrations plus faibles que le produit GPDS, particulièrement en période de fonte estivale.

Un autre aspect de la version opérationnelle de SPISCanv2 qui diffère des reprévisions est le suivant : alors que les reprévisions sont initialisées une fois par mois à 0 h UTC le premier jour de chaque mois, les prévisions opérationnelles sont initialisées et exécutées chaque jour selon l'horaire suivant, avec initialisation à 0 h UTC dans chaque cas :

- 15^e jour du mois : prévision jusqu'à la fin du mois en cours plus 6 mois supplémentaires (c.-à-d. prévisions sur 6 mois avec échéance de 0,5 mois), ce qui donne un « aperçu » de la prévision au milieu du mois;
- 4^e jours jusqu'au dernier jour du mois : prévision sur 12 mois avec échéance de 4 jours, qui sert de sauvegarde en cas de problème avec la prévision officielle;
- dernier jour du mois : prévision sur 12 mois avec échéance de 1 jour, qui sert de prévision officielle;
- tous les 2 jours : prévisions jusqu'à la fin du mois en cours plus un mois supplémentaire, pour suivre le fonctionnement du système.

Notons en particulier l'échéance de 1 jour pour les prévisions officielles (par rapport à l'échéance de 0 jour pour les prévisions), ce qui assure leur livraison en temps voulu au début de chaque mois, mais qui n'aura probablement pas d'impact mesurable sur l'habileté des prévisions saisonnière.

Les produits « prévision officielle probabiliste » sont disponibles aux adresses suivantes :

- https://meteo.gc.ca/saisons/index_f.html
- <http://scenarios-climatiques.canada.ca/index.php?page=seasonal-forecasts>

Pour ce qui est de SPISCan, ces prévisions probabilistes calibrées sont post-traitées selon la méthode décrite par Kharin et coll. (2017). On améliore ainsi la fiabilité des prévisions, ce qui signifie que les probabilités de prévision donnent une juste mesure de la probabilité que les conditions de prévision se réalisent vraiment, plutôt que d'être surestimées ou sous-estimées, d'après les prévisions.

9 Résumé

Les principaux aspects du système SPISCanv2 sont résumés ci-dessous.

- Tout comme SPISCan, SPISCanv2 emploie deux modèles globaux couplés atmosphère-océan-glace de mer pour produire des prévisions saisonnières d'ensemble multimodèles. Un des modèles climatiques utilisés dans SPISCan, MCCan3, a été remplacé par GEM-NEMO, qui est un modèle couplé basé sur la PNT. L'autre modèle climatique dans SPISCan, MCCan4, a été mis à niveau vers MCCan4i avec une meilleure initialisation.
- SPISCanv2 surpassé SPISCan pour ce qui est de la prévision de la température de l'air en surface et de la hauteur potentielle de 500 hPa dans toutes les régions et pour toutes les échéances.
- Bien que l'habileté des prévisions des précipitations soit faible, le système SPISCanv2 offre une meilleure habileté des prévisions des précipitations moyennes saisonnières avec une échéance de 0 mois, par rapport à SPISCan.

- De plus, l’habileté des prévisions de la TSM et des oscillations ENSO est meilleure avec SPISCanv2 qu’avec SPISCan, particulièrement pour les saisons d’hiver de l’hémisphère Nord.
- L’habileté des prévisions de l’oscillation NAO dans SPISCanv2 est en général meilleure que dans SPISCan. L’habileté des prévisions du régime PAN est équivalente dans les deux systèmes, mais avec une légère dégradation de l’habileté en hiver.
- Le système SPISCanv2 permet d’améliorer de manière appréciable la qualité de la prévision de la glace de mer par rapport au système précédent.

10 Remerciements

Les membres du Forum saisonnier et de nombreux collègues de RPN, du CCmaC et du CMC ont contribué à l’élaboration et à la mise en œuvre du SPISCanv2. En particulier, nous aimerais remercier les collègues suivants pour leurs diverses contributions à ce projet :

Frédéric Dupont, François Roy, Jean-François Lemieux, Jean-Marc Bélanger, Normand Gagnon, Peter Houtekamer, Ron McTaggart-Cowan, Ayrton Zadra, Paul Vaillancourt, Michel Roch, Stéphane Chamberland, Vivian Lee, Michel Desgagné, Stéphane Bélair, Maria Abrahamowicz, Marco Carrera, Nicola Gasset, Katja Winger.

11 Références

- Barnston, A.G. et R.E. Livezey, 1987 : « Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns », *Mon. Wea. Rev.*, vol. 82, p. 1083 – 1126.
- Bélair, S., J. Mailhot, C. Girard et P. Vaillancourt, 2005 : « Boundary layer and shallow cumulus clouds in a medium-range forecast of a large-scale winter system ». *Mon. Wea. Rev.*, vol. 133, p. 1938 – 1960.
- Bernier, N.B. et S. Bélair, 2012 : « High horizontal and vertical resolution limited-area model : Near-surface and wind energy forecast applications », *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol 51, p. 1061 – 1078.
- Bradley, A.A. et S.S. Schwartz, 2011 : « Summary verification measures and their interpretation for ensemble forecasts », *Mon. Wea. Rev.*, vol. 139, p. 3075 – 3089.
- Carrera, M.L., S. Bélair, V. Fortin, B. Bilodeau, D. Charpentier et I. Doré (2010), « Evaluation of snowpack simulations over the Canadian Rockies with an experimental hydrometeorological modeling system », *J. Hydrometeorol.*, vol. 11, p. 1123 – 1140.
- Charron, M., R. Frenette et N. Gagnon, 2011 : *Première mise en œuvre opérationnelle du système régional de prévision d'ensemble* (SRPE 1.0.0).
- Côté, J., S. Gravel, A. Méthot, A. Patoine, M. Roch et A. Staniforth, 1998 : « The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model. Part I : Design considerations and formulation ». *Mon. Wea. Rev.*, vol. 126, p. 1373 – 1395.
- Dee, D.P. et 35 collègues, 2011 : « The ERA-Interim reanalysis : configuration and performance of the data assimilation system ». *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 137, p. 553 – 597.
- Derome, J., Brunet, G., Plante, A., Gagnon, N., Boer, G. J., Zwiers, F. W., Lambert, S. et Ritchie, H. 2001. « Seasonal predictions based on two dynamical models ». *Atmosphere-Ocean*, vol. 39, p. 485 – 501.
- Dirkson, A., W.J. Merryfield et A.H. Monahan, 2017 : « Impacts of sea ice thickness initialization on seasonal Arctic sea ice predictions ». *J. Climate*, vol. 30, p. 1001 – 1017, doi :10.1175/JCLI-D- 16-0437.1.
- G. Kim, J.-B. Ahn, V.N. Kryjov, S.-J. Sohn, W.-T. Yun, R. Graham, R.K. Kolli, A. Kumar et J.-P. Ceron, 2016 : « Global and regional skill of the seasonal predictions by WMO Lead Centre for Long-Range Forecast Multi-Model Ensemble ». *Int. J. Climatol.*, vol. 36, p. 1657 – 1675, doi : 10.1002/joc.4449.
- Gauthier, P., M. Buehner et L. Fillion, 1999 : « Background-error statistics modelling in a 3D variational data assimilation scheme : Estimation and impact on the analyses ». *Proc. ECMWF Workshop on Diagnosis of Data Assimilation Systems*, Reading (Royaume-Uni), ECMWF, p. 131 – 145.
- Hoskins, B.J. et T. Ambrizzi, 1993 : « Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow ». *J. Atmos. Sci.*, vol. 50, p. 1661 – 1671.
- Houtekamer, P. L., Mitchell H.L. et Deng X. 2009 : « Model Error Representation in an Operational Ensemble Kalman Filter », *Mon. Wea. Rev.*, vol. 137, p. 2126 – 2143.

- Huffman, G.J., R.F. Adler, D.T. Bolvin et G. Gu, 2009 : « Improving the global precipitation record : GPCP Version 2.1 », *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, p. L17808, doi :10.1029/2009GL040000.
- Hunke, E.C. et Lipscomb, W.H. 2010. *CICE : the Los Alamos sea ice model, documentation and software user's manual*, version 4.1. Los Alamos, (Nouveau-Mexique), Los Alamos National Laboratory. (Tech. Rep. LA-CC- 06-012.)
- Ioannidou, L., W. Yu et S. Bélair, 2014 : « Forecasting of surface winds over Eastern Canada using the Canadian offline land surface modeling system », *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 53, p. 1760 – 1774, doi :10.1175/JAMC-D- 12-0284.1.
- Kain, J.S. et J.M. Fritsch, 1990 : « A one-dimensional entraining detraining plume model and its application in convective parameterization ». *J. Atmos. Sci.*, vol. 47, p. 2784 – 2802.
- Kharin, V.V., Q. Teng, F.W. Zwiers, G.J. Boer, J. Derome et J.S. Fontecilla, 2009 : « Skill assessment of seasonal hindcasts from the Canadian Historical Forecast Project ». *Atmos. Ocean.*, vol. 47, p. 204 – 223.
- Kharin, V.V., W.J. Merryfield, G.J. Boer et W.-S. Lee, 2017 : « A postprocessing method for seasonal forecasts using temporally and spatially smoothed statistics ». *Mon. Wea. Rev.*, vol. 145, p. 3545 – 3561, doi :10.1175/MWR-D- 16-0337.1.
- Kirtman, B.P., D. Min et J.M. Infanti, 2014 : « The North American Multimodel Ensemble : Phase- 1 seasonal-to-interannual prediction; phase- 2 toward developing intraseasonal prediction ». *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 95, p. 585 – 601, doi :[10.1175/BAMS-D-12-00050.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00050.1).
- Lin, H., N. Gagnon, S. Beauregard, R. Muncaster, M. Markovic, B. Denis et M. Charron, 2016 : « GEPS based Monthly Prediction at the Canadian Meteorological Centre ». *Mon. Wea. Rev.*, doi :10.1175/MWR-D-16-0138.1.
- Lin, J.-L., 2007 : « The double-ITCZ problem in IPCCAR4 coupled GCMs : ocean-atmosphere feedback analysis ». *J. Climate*, vol. 20, p. 4497 – 4525.
- McFarlane, N. A., G.J. Boer, J.-P. Blanchet et M. Lazare, 1992 : « The Canadian Climate Centre second-generation general circulation model and its equilibrium climate ». *J. Climate*, vol. 5, p. 1013 – 1044.
- Merryfield, W. J., W.-S. Lee, G.J. Boer, V.V. Kharin, J.F. Scinocca, G.M. Flato, R.S. Ajayamohan, J.C. Fyfe, Y. Tang et S. Polavarapu, 2013 : « The Canadian Seasonal to Interannual Prediction System. Part I : Models and Initialization », *Mon. Wea. Rev.*, vol. 141, p. 2910 – 2945, doi :10.1175/MWR-D-12-00216.1.
- Min, Y.-M., V.N. Kryjov et S.M. Oh, 2014 : « Assessment of APCC multimodel ensemble prediction in seasonal climate forecasting : Retrospective (1983–2003) and real-time forecasts (2008–2013) », *JGR Atmosphere*, vol. 119, p. 12132 – 12150.
- N. Gagnon, X.-X. Deng, P.L. Houtekamer, A. Erfani, M. Charron, S. Beauregard, R. Frenette, D. Racette et R. Lahliou, 2015 : *Système global de prévision d'ensemble (SGPE) : mise à jour de la version 4.0.1 à la version 4.1.1. Note technique du Centre météorologique canadien*. [Disponible sur demande auprès d'Environnement Canada, Centre météorologique canadien, Division du développement, 2121 route Transcanadienne, 4^e étage, Dorval

(Québec), H9P1J3, ou à partir du site Web suivant :
http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/product_guide/docs/lib/technote_geps-411_20151215_f.pdf.

- Noilhan, J. et J.F. Mahfouf, 1996 : « The ISBA land surface parameterisation scheme », *Global Planet. Change*, vol. 13, p. 145 – 159.
- Noilhan, J. et S. Planton, 1989 : « A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models ». *Mon. Wea. Rev.*, vol. 117, p. 536 – 549.
- Reynolds, R.W., N.A. Rayner, T.M. Smith, D.C. Stokes et W. Wang, 2002 : « An improved in situ and satellite SST analysis for climate ». *J. Climate*, vol. 15, p. 1609 – 1625.
- Ritchie, H., 1991 : « Application of the semi-Lagrangian method to a multilevel spectral primitive-equations model ». *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, vol. 117, p. 91 – 106.
- Scinocca, J.F., N.A McFarlane, M. Lazare et J. Li, 2008 : « The CCCma third generation AGCM and its Extension into the Middle Atmosphere ». *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 8, p. 7055 – 7074.
- Separovic, L., S.Z. Husain, W. Yu et D. Fernig (2014), « High-resolution surface analysis for extended-range downscaling with limited-area atmospheric models », *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 119, p. 13 651 – 13 682, doi :10.1002/2014JD022387.
- Shabbar, A. et A.G. Barnston, 1996 : « Skill of seasonal climate forecasts in Canada using canonical correlation analysis ». *Mon. Wea. Rev.*, vol. 124, p. 2370 – 2385.
- Sigmond, M., J.C. Fyfe, G.M. Flato, V.V. Kharin et W.J. Merryfield, 2013 : « Seasonal forecast skill of Arctic sea ice area in a dynamical forecast system », *Geophys. Res. Lett.*, vol. 40, p. 529 – 534, doi :10.1002/grl.50129.
- Smith, G.C., F. Roy, M. Reszka, D. Surcel Colan, Z. He, D. Deacu, J.-M. Belanger, S. Skachko, Y. Liu, F. Dupont, J.-F. Lemieux, C. Beaudoin, B. Tranchant, M. Drévillon, G. Garric, C.-E. Testut, J.-M. Lellouche, P. Pellerin, H. Ritchie, Y. Lu, F. Davidson, M. Buehner, M. Lajoie et A. Caya, 2016 : « Sea ice Forecast Verification in the Canadian Global Ice Ocean Prediction System ». *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, vol. 142, p. 659 – 671, doi : 10.1002/qj.2555.
- Titchner, H.A. et N.A. Rayner (2014), « The Met Office Hadley Centre sea ice and sea surface temperature data set, version 2 : 1. Sea ice concentrations », *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 119, p. 2864 – 2889, doi : 10.1002/2013JD020316.
- Wallace, J.M. et D.S. Guztler, 1981 : « Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter ». *Mon. Wea. Rev.*, vol. 109, p. 784 – 812.
- Zuo, H., M.A. Balmaseda et K. Mogensen, 2015. « The new eddy-permitting ORAP5 ocean reanalysis : description, evaluation and uncertainties in climate signals ». *Climate Dynamics*, doi : 10.1007/s00382-015-2675-1.

Annexe A. Liste des abréviations

ACC	analyse de corrélation canonique
CCmaC	Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique
CGM	concentration de la glace de mer
CICE	Community of Ice CodE
CMC	Centre météorologique canadien
CONCEPTS	Réseau opérationnel canadien de systèmes couplés de prévision environnementale
CRPSS	indice continu de probabilité ordonnée
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
ENSO	El Niño-oscillation australe
FKEn	filtre de Kalman d'ensemble
GEM	Modèle global environnemental multiéchelles
GEM-NEMO	modèle couplé GEM-NEMO
GOSSIP	Globally Organized System for Simulation Information Passing
GPCP	Projet mondial d'établissement d'une climatologie des précipitations
Had2CIS	HadISST2, combiné avec les cartes de glace de mer du SCG
HadISST2	Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature Version 2
MCCan3	Troisième génération du modèle couplé climatique global
MCCan4	Quatrième génération du modèle couplé climatique global
MCCan4i	Quatrième génération du modèle couplé climatique global, avec initialisation améliorée
NAO	oscillations de l'Atlantique Nord
NCAR	National Center for Atmospheric Research (États-Unis)
NCEP	National Centers for Environmental Prediction (États-Unis)
NEMO	Nucleus for European Modelling of the Ocean
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (États-Unis)
OISST	Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (NOAA, États-Unis)
ORAP5	Ocean Reanalyses Prototype 5
ORAS5	Ocean Reanalysis System 5
PAN	téléconnexion Pacifique-Amérique du Nord
PNT	prévision numérique du temps
PPH	Projet de prévisions historiques
REOF	fonction orthogonale empirique permutée
RPN	Recherche en Prévision Numérique
SCG	Service canadien des glaces
SGPD	Système global de prévision déterministe
SGPE	Système global de prévision d'ensemble
SGPOG	Système global de prévision océan-glace
SMC	Service météorologique du Canada (Environnement et Changement climatique Canada)
SPISCan	Système de prévision interannuelle et saisonnière canadien
SPISCanv2	SPISCan version 2

SPS	Système de prévision de surface
T2m	température de l'air à 2 m
TSM	température de la surface de la mer
Z500	hauteur géopotentielle à 500 hPa