



Environnement et
Changement climatique Canada

Environment and
Climate Change Canada

RAPPORT TECHNIQUE CONJOINT DE PROGRESSION DE
L'ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE (OMM)
SUR LE SYSTÈME GLOBAL DE TRAITEMENT DES
DONNÉES ET DE PRÉVISION ET LES ACTIVITÉS DE
RECHERCHE POUR 2017

CANADA

Final 15 février 2019

Service météorologique du Canada
Direction générale des sciences et de la technologie,
Environnement et Changement climatique Canada

Table des matières

1	Généralités	5
1.1	Points saillants pour 2017	5
1.2	Infrastructure de superinformatique	8
1.2.1	Composantes de la superinformatique.....	8
1.3	Utilisation des données et des produits du Système mondial de télécommunications (SMT) 10	
1.3.1	Données	10
1.3.2	Produits	10
1.4	Horaire d'exécution du système et périodes de prévision.....	11
1.5	Sommaire de la vérification annuelle	15
2	Système opérationnel de prévision	16
2.1	Système global de prévision déterministe (SGPD).....	16
2.1.1	Assimilation de données et analyse objective	16
2.1.2	Prévision.....	17
2.1.3	Techniques et produits statistiques	19
2.2	Système global de prévision d'ensemble (SGPE)	22
2.2.1	Assimilation de données et analyse objective	22
2.2.2	Prévision.....	24
2.2.3	Système de re-prévisions.....	26
2.2.4	Techniques et produits statistiques	28
2.3	Système régional de prévision déterministe (SRPD).....	29
2.3.1	Assimilation de données et analyse objective	29
2.3.2	Prévision.....	31
2.3.3	Techniques et produits statistiques	33
2.4	Système régional de prévision d'ensemble (SRPE)	36
2.4.1	Assimilation de données et analyse objective	36
2.4.2	Prévision.....	36
2.4.3	Techniques et produits statistiques	38
2.5	Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD).....	40
2.5.1	Assimilation de données	40
2.5.2	Modèle.....	40
2.5.3	Techniques et produits statistiques	42
2.6	Qualité de l'air.....	43
2.6.1	Système régional de prévision déterministe de la qualité de l'air (SRPDQA)	43

2.6.2	Système régional de prévision déterministe de la qualité de l'air pour les incendies de feux de forêt (SRPDQA-FW)	45
2.6.3	Analyse régionale déterministe de la qualité de l'air (ARDQA)	46
2.6.4	Prévision de l'ozone et de l'indice UV	46
2.7	Autres systèmes spécialisés	47
2.7.1	Assimilation et analyse des champs de surface	47
2.7.2	Analyse régionale déterministe de précipitations (ARDP)	48
2.7.3	Prévision immédiate.....	48
2.8	Systèmes de prévision océanique.....	50
2.8.1	Système global de prévision océan-glace (SGPOG).....	50
2.8.2	Prévision régionale couplée atmosphère-océan-glace	50
2.8.3	Prévision des vagues.....	50
2.9	Prévisions à échéance prolongée et à longue échéance	55
2.9.1	Prévisions à échéance prolongée (de 10 à 30 jours).....	55
2.9.2	Prévisions à longue échéance (de 30 jours à 2 ans) : SIPSCan	55
2.10	Réponse aux urgences environnementales	58
2.10.1	Modèle de dispersion.....	58
2.10.2	Modèle trajectoire	60
2.10.3	Produits	60
3	Activités de recherche prévues et modifications du STDP opérationnel attendues au cours des prochaines années	62
3.1	Système global de prévision déterministe (SGPD).....	62
3.1.1	Assimilation de données	62
3.1.2	Modèle.....	64
3.2	Système global de prévision d'ensemble (SGPE)	66
3.2.1	Assimilation des données	66
3.2.2	Modèle.....	66
3.3	Système régional de prévision déterministe (SRPD).....	67
3.3.1	Assimilation des données	67
3.3.2	Modèle.....	67
3.4	Système régional de prévision d'ensemble (SRPE)	68
3.4.1	Assimilation des données et analyse objective	68
3.4.2	Modèle.....	68
3.5	Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD).....	69
3.5.1	Assimilation des données	69
3.5.2	Modèle.....	69
3.6	Systèmes de prévision de la qualité de l'air	70

3.6.1	Système régional de prévision déterministe de la qualité de l'air (SRPDQA)	70
3.6.2	Analyse régionale déterministe de la qualité de l'air (ARDQA)	71
3.6.3	Assimilation des données chimiques	71
3.6.4	Assimilation de l'ozone et prévision de l'indice UV	72
3.7	Systèmes spécialisés	78
3.7.1	Assimilation et analyse des champs de surface	78
3.7.2	Analyse des précipitations	79
3.8	Modélisation des océans et modélisation couplée	80
3.8.1	Système global de prévision glace-océan (SGPGO)	80
3.8.2	Système régional de prévision de glace-océan(SRPGO)	80
3.8.3	Système régional de prévision couplée atmosphère-océan-glace	81
3.8.4	Système global couplé atmosphère-océan-glace	81
3.8.5	Prévision des vagues	81
3.8.6	Prévision des ondes de tempête	82
3.8.7	Système de prévision hydrodynamique bidimensionnel	82
3.8.8	Système de modélisation de l'hydrologie et du cycle d'eau	82
3.8.9	Modélisation urbaine	83
3.8.10	Système déterministe de prévision de surface à haute résolution (HRDSPS)	84
3.9	Prévisions à échéance prolongée et à longue échéance	85
3.9.1	Prévisions à longue échéance (de 30 jours à 2 ans)	85
3.10	Intervention en cas d'urgence environnementale	86
4	Bibliographie	88

1 Généralités

1.1 Points saillants pour 2017

Le jeudi 14 décembre 2017 - Le Système haute résolution de prévision déterministe (SHRPD) est déclaré opérationnel au Centre météorologique canadien (CMC)

En date du 14 décembre 2017, suite à plusieurs ans d'exécution en mode expérimental, le Centre météorologique canadien (CMC) du Service météorologique du Canada déclare opérationnel le Système haute résolution de prévision déterministe (SHRPD v4.4.0).

La note officielle annonçant ce changement [est disponible via ce lien](#).

Une note technique avec plus de détails sur la version 4.2.0 de ce système (en anglais) [est disponible en cliquant ici](#).

Le mercredi 1er novembre 2017 - Mise à jour majeure du Système global de prévision déterministe (SGPD) 6.0.0 du Centre météorologique canadien (CMC)

Le mercredi 1er novembre 2017, à compter de la passe de 1200 UTC, le Centre météorologique canadien (CMC) va procéder à la mise en œuvre opérationnelle de la version 6.0.0 de son Système global de prévision déterministe (SGPD).

Résumé des éléments majeurs que comporte cette mise à jour:

- Changements au modèle de prévision:
 - **Couplage bi-directionnel avec un modèle océan-glace.** Avec le nouveau SGPD 6.0.0, les conditions de surface marine évolue dans le temps du au couplage avec la composante prévision du Système global de prévision océan-glace (SGPOG). [Cliquez ici pour les détails de SGPOG](#).
 - **Utilisation de la version 4.8.2 du modèle GEM.** Les changements principaux sont associés avec l'interface à la surface, avec seulement des changements mineurs à la physique et la dynamique du modèle.
- Dans cette mise à jour, aucun changement n'a été fait au système d'assimilation, ni aux observations qui sont utilisés par le SGPD.

Le mercredi 1 novembre 2017 - Mise à jour du Système global de prévision océan-glace (SGPOG) 2.3 du Centre météorologique canadien (CMC)

Le mercredi 1er novembre 2017, le Centre météorologique canadien (CMC) va procéder à la mise en œuvre opérationnelle de la version 2.3 de son Système global de prévision océan-glace (SGPOG).

Les changements majeurs de cette mise à jour se situent principalement dans la composante prévision:

- **Introduction d'un couplage bi-directionnel entre les composantes de prévision du SGPD et du SGPOG.** Ce couplage permet une interaction bi-directionnel entre le modèle atmosphérique et le modèle océan-glace, de telle sorte que l'évolution des conditions marines influence l'atmosphère dans le SGPD qui en retour influence la prévision des champs océan-glace du SGPOG.

La composante d'assimilation de SGPOG n'est pas modifiée de façon significative dans cette mise à jour. L'annonce officielle pour l'implantation de ces changements est incluse dans le GENOT émis pour le [SGPD 6.0.0](#).

Le mercredi 1er novembre 2017 - Le Système global de prévision déterministe des vagues (SGPDV) est déclaré opérationnel au Centre météorologique canadien (CMC)

En date du 1er novembre 2017, suite à plus de deux ans d'exécution en mode expérimental, le Centre météorologique canadien (CMC) du Service météorologique du Canada déclare opérationnel le Système global de prévision déterministe des vagues (SGPDV v1.3.0).

Le mercredi 1er novembre 2017 - Le Système régional de prévision déterministe d'onde de tempête (SRPDOT) est déclaré opérationnel au Centre météorologique canadien (CMC)

En date du 1er novembre 2017, suite à deux ans d'exécution en mode expérimental, le CMC a déclaré opérationnel le Système régional de prévision déterministe d'onde de tempête (SRPDOT v1.3.0). Le SRPDOT fournit des prévisions d'onde de tempête le long du littoral Atlantique du Canada. Les prévisions sont émises deux fois par jour à 00 et 12 UTC et couvrent une période de 10 jours. Des vents et la pression de surface horaires pour la prévision sont fournis par le Système global de prévision déterministe (SGPD). Les produits du SRPDOT sont générés sur une grille latitude-longitude de 1/30 degrés de résolution couvrant de 42N à 60N et de 72W à 44W.

Le SRPDOT a été développé en partenariat avec Dalhousie University. Il est basé sur le modèle d'onde de tempête Dalcoast5.

Le mercredi 6 septembre 2017 - Nouvelle infrastructure de calcul haute performance

La migration vers une nouvelle infrastructure de superinformatique utilisée par le Service météorologique du Canada a été effectuée avec succès le 6 septembre 2017. Cette migration a été le résultat de plusieurs mois d'efforts soutenus et conjoints de la part des artisans du Centre météorologique canadien, de la Direction générale des sciences et de la technologie et de Services partagés Canada.

Notre capacité de calcul haute performance atteint maintenant le pétaflop (10^{15} flops), un niveau comparable à celui des principaux centres météorologiques mondiaux. Cette mise à jour majeure nous permettra dans les années à venir de transférer les technologies de la recherche et du développement

vers les opérations, soutenant ainsi l'amélioration en continue des services en prévisions météorologiques et environnementales offerts aux Canadiens et Canadiennes, aux agences gouvernementales fédérales et provinciales, ainsi qu'aux autres usagers et partenaires.

1.2 Infrastructure de superinformatique

L'infrastructure de superinformatique utilisée par le Service météorologique du Canada a reçu une mise à jour majeure qui s'est terminée avec succès le 6 septembre 2017. Toutes les composantes ont été mises à jour dans le cadre d'une implémentation complexe, incluant les superordinateurs, les grappes de pré et post-traitement, les interconnexions réseaux, les capacités de stockage et le système d'archivage de données. Ce résultat est le travail d'un effort conjoint et constants sur plusieurs années d'experts du Centre Météorologique Canadien, la Direction des Sciences et Technologie et Services Partagés Canada.

1.2.1 Composantes de la superinformatique

L'infrastructure superinformatique est indispensable pour le support 24/7 des opérations au CMC. Pour assurer un plus grand degré de redondance en cas de contingence, l'infrastructure est distribuée sur deux sites indépendants. Plus qu'un simple superordinateur, l'infrastructure comprend plusieurs composantes auxiliaires, tel que décrits plus bas.

1.2.1.1 Superordinateur

L'épine dorsale de la structure consiste en deux superordinateurs Cray XC40, avec 856 nœuds de calcul (30 816 cœurs) chacun. Chaque nœud est constitué de 2 processeurs Intel Broadwell et de 128 Go de RAM. Avant de devenir opérationnel, ces deux superordinateurs étaient classés au 162^{ème} et 163^{ème} rang dans la liste du top500.org¹ Cette liste contient les plus puissants ordinateurs commerciaux au monde.

Les supercalculateurs exécutent un système d'exploitation Linux qui, dans ce cas, est un dérivé d'une distribution SLES (SUSE Linux Enterprise Server). Le planificateur de travaux et le gestionnaire de ressources utilisés sont PBS Pro lié à Cray ALPS. Chaque superordinateur a son propre système de fichiers de travail fourni via Lustre sur un Sonexion 2000 avec environ 3,6 Po de stockage. Tous les logements des utilisateurs sont accessibles depuis un système de stockage IBM ESS IOPS élevé (voir ci-dessous) via un pont Cray DVS vers un pont GPFS (General Parallel File System).

1.2.1.2 Frontaux : grappes de pré et post-traitement (PPP)

Les frontaux consistent en deux systèmes, chacun étant associé avec un des superordinateurs. Ils peuvent être utilisés de façon interactive ou en lots. Les utilisateurs opérationnels et en recherche et développement peuvent utiliser ces systèmes pour prétraiter (contrôle de qualité, formatage, etc ...) leurs données pour être ensuite soumis au superordinateur. On y traite aussi des plus petits modèles qui ne rouleraient pas de façon optimale sur le superordinateur. Finalement on y roule plusieurs systèmes de post-traitement.

Ils consistent en deux grappes HPC (High Performance Computer), chacune étant un Cray CS400 avec 158 nœuds de calcul (6952 cœurs). Chaque nœud est constitué de 2 processeurs Intel Broadwell et de 256 Go de RAM. Les nœuds des grappes sont interconnectés via une structure InfiniBand. Les grappes HPC exécutent un système d'exploitation Linux. Ceux-ci utilisent le planificateur de travaux et le gestionnaire de ressources PBS Pro. Tous les logements des utilisateurs sont accessibles depuis un système de stockage IBM Elastic Storage Server (IOPS) IOPS élevé (voir ci-dessous), alors que le stockage principal est fourni par un système de stockage IBM ESS (voir ci-dessous).

¹ The June 2017 edition of the Top 500 list: <https://www.top500.org/list/2017/06>

1.2.1.3 Stockage primaire

Le stockage principal utilisé par la plate-forme frontale est un système de stockage IBM ESS présentant des systèmes de fichiers via Spectrum Scale GPFS. Chaque grappe HPC a son propre stockage principal. Ces systèmes de stockage se composent de 24 serveurs présentant environ 16 PB.

1.2.1.4 Stockage des *homes*

Le stockage des *homes* utilisé à la fois par le superordinateur et par la plate-forme frontale est un système de stockage IBM ESS à IOPS élevé, présentant les systèmes de fichiers via *Spectrum Scale* GPFS. Le système de fichiers à domicile unique a une redondance intégrée avec la réplication GPFS et offre environ 185 To de stockage à tous les composants de la solution.

1.2.1.5 Système de stockage de masse

Un très grand volume de données doit être conservé à long terme pour des raisons de sauvegarde, légales, de vérification et de recherche. Les besoins en archivage de l'environnement superinformatique sont remplis avec l'aide d'une grappe de traitement dédié ainsi que d'un robot pour accéder aux dérouleurs de bande qui permet d'offrir un accès à haute disponibilité et une intégrité des données.

Le Service météorologique du Canada utilise une installation de stockage / archivage robotisée pour Environnement Canada depuis 1994 afin de stocker et de sécuriser les services critiques et les données ministérielles, notamment :

- données de prévisions météorologiques numériques (essentiels pour améliorer les prévisions);
- les scénarios de changement climatique (y compris les résultats du Panel international sur le changement climatique, du GIEC,) et la base de données Climate Archive;
- Les sauvegardes de l'ordinateur, les journaux et les journaux / données du routeur et du pare-feu (essentiels dans les enquêtes sur les incidents de sécurité, les statistiques de performance, etc.).

Notre système HPNLS (High Line Nearing Storage) actuel comprend un système HPSS (High Performance Storage System) IBM avec 2 bibliothèques. Chaque bibliothèque contient un peu plus de 10 000 bandes. Toutes les bandes sont des cartouches 3592 d'une capacité de 10 To pour un total d'environ 100 PB non compressées par librairie. Dans le cadre du HPNLS, il existe 2 PB de cache disque. Les deux bibliothèques agissent comme un seul système couvrant deux halls de données.

1.3 Utilisation des données et des produits du Système mondial de télécommunications (SMT)

1.3.1 Données

Les types d'observations suivants sont actuellement utilisés pour l'assimilation de données aérologiques au Centre. Les chiffres indiquent la quantité habituelle de données (rapports ou pixels) reçues au cours d'une période de 24 heures en décembre 2017. Lorsque deux jeux de chiffres sont fournis, le premier correspond aux données ASCII et le deuxième, aux données BUFR. L'astérisque (*) signifie que la source de données n'a pas été assimilée :

SYNOP/SHIP	96,500/87,500
TEMP	1,325/1,000
PILOT	850/300
DRIFTER/BUOY	29,000/44,500
AIREP/ADS	23,400
AMV (y compris DB)	7,020,000
AMDAR/BUFR	834,000
PROFILER	
GB-GPS (NOAA, E_GVAP)	482,500
GEO radiances (CSR)	4,443,000
AMSU-A (y compris RARS)	2,959,000
AMSU-B/MHS (y compris RARS)	24,840,000
ATMS (NPP)	3,051,000
SSM/I/S	5,492,000
AIRS (AQUA)	321,000
CrIS (NPP)	311,500
IASI (Metop-A/B)	647,500
ASCAT (Metop-A/B)	1,908,000
GPS-RO	1,975

1.3.2 Produits

- GRIB ECMF
- GRIB KWBC
- GRIB EGRR
- FDCN KWBC
- FDUS KWBC

- Produits Difax des É.-U.
- Prévisions du temps significatif
- Prévisions des vents/températures pour les divers niveaux de vol

1.4 Horaire d'exécution du système et périodes de prévision

Horaire d'exécution de l'assimilation et de l'analyse finale (toutes les heures sont exprimées en UTC)				
Description	Nom	Heure	Temps de coupure	Remarques
Assimilation globale	G2	00, 06, 12, 18	00 : T+9:00 12 : T+8:15 06,18 : T+6:00	Détails à la section 2.1
Analyse globale finale	G6	00, 06, 12, 18	00: T+8:45 06: T+5:15 12: T+8:00 18: T+5:15	Détails à la section 2.1
Assimilation des données d'ensemble globale	E2	00, 06, 12, 18	00 : T+9:00 06 : T+6 :10 12 : T+8:15 18 : T+6:15	Détails à la section 2.2
Système global de prévision océan-glace (SGPOG-A)	GD	00	00: T+159:30 (les mardis)	Détails à la section 2.8
	GR	00	00:T+4:30 (les mercredis)	
Analyse régionale finale	R3	00, 06, 12, 18	T+7:00	Détails à la section 2.3
Système global de prévision déterministe de vagues (pseudo-analyse)	SGPDV-PA	00, 06, 12, 18	00: T+9:50 12: T+9:05 06,18: T+6:50	Détails section 2.8
Système régional de prévision déterministe d'ondes de tempêtes (pseudo-analyse)	SRPDOT-PA	00, 06, 12, 18	00: T+10:05 12: T+9:20 06,18: T+7:05	Détails section 2.8
Système régional de prévision océan-glace	SRPOG-A	00, 06, 12, 18,	T+3:00	Détails à la section 2.8
Système régional de prévision marine du golfe Saint-Laurent (pseudo-analyse)	SRPM-GSL	00, 06, 12, 18	T+0:35	Détails à la section 2.8
Système de prévision du cycle de l'eau – les Grands Lacs (pseudo- analyse)	SRPM-GL	00, 12	T+1:45	Détails à la section 2.8
Assimilation des données SPISCan	M2	00	T+11:00	Détails à la section 2.9
Analyse régionale déterministe de	ARDP	00, 06, 12, 18	T+0:55 (prélim) T+6:55 (finale)	Détails à la section 2.7

précipitations				
Analyse régionale déterministe de précipitations à haute résolution	ARDPH	00, 06, 12, 18	T+0:55 (prélim) T+6:55 (final)	Détails à la section 2.7

Horaire d'exécution des prévisions (toutes les heures sont exprimées en UTC)					
Description	Nom	Heure	Temps de coupure	Période de prévision	Remarques
Global	G1	00, 12	T+3:00	240 heures à 00	Détails à la section 2.1 Tous les produits disponibles à T+5:00.
Régional	R1	00, 12 06, 18	T+2:00	48 heures 54 heures 48-84h expérimental	Détails à la section 2.3 Tous les produits disponibles à T+3:30.
Local haute résolution	National Arctique	00, 12 06, 18 00, 06 12, 18	S.O.	48 heures 00, 12 : 6 heures 06 : 30 heures 18 : 18 heures	Détails à la section 2.5 (Modèle GEM-LAM expérimental, 2,5 km)
Ensemble global	E1	00, 12	T+3:00	16 jours 32 jours les jeudis à 00	Détails à la section 2.2
Ensemble régional	ER	00, 12	S.O.	72 heures	Détails à la section 2.4
Prévision Globale Glace-Océan	SPGGO	00, 12	T+0 h:40	240 heures	Détails à la section 2.8
Prévision régionales Glace-Océan	SPRGO	00, 06, 12, 18	S-O	48 heures	Détails à la section 2.8
Qualité de l'air	GM	00, 12	S.O.	48 heures	Détails à la section 2.6
Système global de prévision déterministe de vague	SGPDV	00, 12	S.O.	120 heures	Détails section 2.8
WAM alimenté par le SGPD	WG	00, 12	S.O.	120 heures	Détails à la section 2.8
WAM alimenté par le SRPD	WR	00, 12 06, 18	S.O.	48 heures 54 heures	Détails à la section 2.8
Système régional de prévisions déterministes d'ondes de tempêtes	SRPDOT	00, 12	S.O.	240 heures	Détails section 2.8
Système regional de prévision	SRPEOT	00, 12	S.O.	240 heure	Détails section 2.8

d'ensemble d'ondes tempêtes					
Prévisions mensuelles	M1	00	T+11:00	Un mois	Détails à la section 2.9 Produites au début et au milieu de chaque mois.
Prévisions saisonnnières	MA	00	T11:00	Périodes de 3 mois couvrant 1 an	Détails à la section 2.9 Produites au début de chaque mois.
Prévisions immédiates	SIPI	Chaque heure	T+15 min	Prévisions de 12 heures	Détails à la section 2.7
autoTAF Système automatisé pour l'aérodrome	ATAGS	Chaque heure	T+15 min	48 heures	Détails à la section 2.7
Système régional de prévision déterministe couplé-Golfe du Saint-Laurent	SRPD- CGSL	00, 06, 18, 12	S.O.	48 heures	Détails à la section 2.8
Système de prévision du cycle de l'eau	RDPS- CGL	00, 12	T+2h30	84 heures	Détails à la section 2.8

1.5 Sommaire de la vérification annuelle

Le CMC procède continuellement à une vérification objective de ses modèles numériques opérationnels. Il participe à un échange mensuel des données de vérification du système de PNT conformément aux recommandations de l'OMM/CSB. Ce système a initialement été implanté en 1987. Les normes à suivre pour les échanges, qui avaient été établies en 1998, ont été révisées en 2016. Le tableau ci-dessous est un résumé des scores de vérification du CMC pour 2016 conformément aux nouvelles normes.

Sommaire de la vérification – 2016 Centre météorologique canadien Système global de prévision déterministe (25 km, 80 niveaux)

Vérification contre analyses

Région	Paramètres	T+24h		T+72h		T+120h	
		00UTC	12UTC	00UTC	12UTC	00UTC	12UTC
Hémisphère Nord	EQME (m), GZ, 500 hPa	7.0	7.2	21.5	21.4	45.1	45.2
	EQMVE (m/s), Wind, 250 hPa	3.6	3.6	8.0	7.9	13.3	13.2
Tropiques	EQMVE (m/s), Wind, 850 hPa	2.2	2.2	3.6	3.6	4.5	4.4
	EQMVE (m/s), Wind, 250 hPa	3.6	3.6	6.2	6.3	8.1	8.1
Hémisphère sud	EQME (m), GZ 500 hPa	8.8	8.8	26.8	26.7	54.4	54.6
	EQMVE (m/s), Wind, 250 hPa	3.5	3.5	8.4	8.3	14.1	14.1

Vérification contre radiosondes

Réseaux	Paramètres	T+24h		T+72h		T+120 h	
		00UTC	12UTC	00UTC	12UTC	00UTC	12UTC
Amérique du Nord	EQME (m), GZ 500 hPa	9.0	9.3	21.9	22.4	43.6	44.7
	EQMVE (m/s), Wind, 250 hPa	5.8	5.8	9.9	9.9	15.5	15.5
Europe	EQME (m), GZ 500 hPa	10.9	10.7	24.2	23.6	52.5	52.9
	EQMVE (m/s), Wind, 250 hPa	5.1	4.9	9.6	9.3	15.7	15.6
Asie	EQME (m), GZ 500 hPa	13.1	12.9	21.4	21.3	38.4	38.5
	EQMVE (m/s), Wind, 250 hPa	5.4	5.5	8.6	8.6	12.5	12.6
Australie- N.Z.	EQME (m), GZ 500 hPa	8.5	9.9	15.9	19.4	30.3	38.5
	EQMVE (m/s), Wind, 250 hPa	5.0	5.3	8.0	8.3	12.1	12.6
Tropique	EQMVE (m/s), Wind, 850 hPa	4.0	4.0	5.0	4.8	5.7	5.5
	EQMVE (m/s), Wind, 250 hPa	5.2	5.2	7.0	7.1	8.2	8.4
Hémisphère Nord	EQME (m), GZ 500 hPa	12.3	12.3	23.5	23.5	45.9	46.4
	EQMVE (m/s), Wind, 250 hPa	5.2	5.2	8.9	8.9	14.1	14.1
Hémisphère sud	EQME (m), GZ 500 hPa	10.9	12.7	20.5	23.0	38.5	42.1
	EQMVE (m/s), Wind, 250 hPa	5.4	5.5	8.6	8.8	13.1	13.2

2 Système opérationnel de prévision

2.1 Système global de prévision déterministe (SGPD)

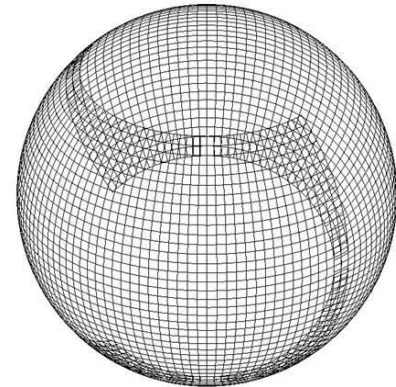
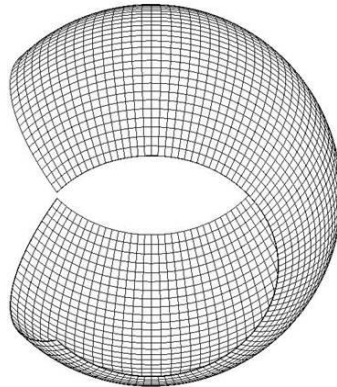
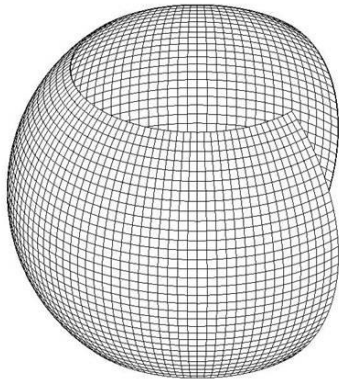
2.1.1 Assimilation de données et analyse objective

SGPD – Assimilation – Version 5.0.1	
Approche d'assimilation	<p>Système d'assimilation variationnelle d'ensemble quadrimensionnelle (4DEnVar) combinant l'assimilation des données variationnelles et un filtre Kalman d'ensemble, qui sert à obtenir un ensemble d'ébauches afin de préciser la portion dépendante de l'écoulement des covariances d'erreur d'ébauche pour le 4DEnVar. Pas de boucle externe (70 itérations des boucles internes), incréments calculés chaque heure.</p> <p>Les données sont assimilées à des intervalles de 15 minutes à l'intérieur d'une fenêtre de 6 heures. Voir Buehner <i>et al.</i> (2013a, 2014, 2015).</p>
Variables	T, Ps, U, V et log q (humidité spécifique)
Domaine	Global
Niveaux	Les mêmes 80 niveaux hybrides décalés que dans le modèle de prévision
Grille horizontale à incrément d'analyse	Grille gaussienne de 0,45° x 0,45°
Champs d'essai	Prévision de 9 h (voir la section 2.1.2 pour des détails sur les caractéristiques du modèle)
Données de radiance assimilées (nombre de canaux)	AMSU-A (11), AMSU-B (4), MHS (4), SSMIS (7), imageurs géostationnaires (1), AIRS (142), IASI (142) <u>Nouveau</u> : ATMS (17), CrIS (103). Corrélation intercanaux pour la matrice des erreurs d'observation de radiance (voir Desroziers <i>et al.</i> , 2005).
Autres données satellitaires	Réfraction GPS-RO, AMV, diffusiomètre de vents, ZTD de GB-GPS au-dessus de l'Amérique du Nord et de l'Europe.
Autres données utilisées	TEMP, PILOT, SYNOP/SHIP, BUOY/DRIFTER, ASCAT, données d'aéronefs
Traitement des données des radiosondes et des aéronefs	Radiosondes : utiliser la durée mesurée ou calculée appropriée et la position horizontale pour chaque niveau de pression. Aéronefs : correction statique de biais de température
Correction de biais des radiances satellites	Coefficients calculés à partir de l'analyse Obs-minus au moyen d'une analyse 3DVar séparée qui ne comprend pas les radiances, se fondant sur les 7 derniers jours, 4 fois par jour, mais statiques pour les canaux AMSU-A 13-14, ainsi que ATMS 14-15
Covariances d'erreurs d'ébauche	Surface à ~40 hPa : Moyenne des covariances de la méthode NMC et des covariances d'ensemble 4D de 256 membres de l'ensemble (FKEn) chaque heure au cours de la fenêtre d'assimilation de 6 h; Au-dessus d'environ 10 hPa : Seulement les covariances de la méthode NMC 3D.
Traitement des	Variables des vents et variables thermodynamiques près de la surface,

variables près de la surface	correctement attribuées à 10 m et à 1,5 m au-dessus du sol.
Temps de coupure	3 heures pour les passes de prévisions. 9 heures pour les analyses finales de 00/12 UTC et 6 heures pour celles de 06/18 UTC.
Fréquence	Toutes les 6 heures, au moyen des données recueillies dans les 3 heures précédant ou suivant 00, 06, 12 et 18 UTC.
Temps de traitement	17 minutes pour l'analyse en tant que telle à l'aide de 640 cœurs de processeur (excluant le traitement des données, les vérifications d'ébauche, le traitement des membres de l'ensemble FKen, etc.).

2.1.2 Prévision

SGPD – Prévision – Version 5.0.0	
Modèle	Modèle global environnemental multiéchelle (GEM), version 4.7.2
Schéma d'initialisation du modèle	4D-IAU (mise à jour de l'analyse différentielle) au cours d'une fenêtre d'assimilation de 6 heures (c.-à-d. de T-3 h à T+3 h). Cela permet le recyclage d'une variété de variables physiques : Condensat total, énergie cinétique turbulente, régime de turbulence, longueur de mélange, vitesse de frottement et hauteur de la CLP.
Formulation	Équations primitives hydrostatiques.
Domaine	Global.
Technique numérique	Différences finies : grille C d'Arakawa dans l'horizontale et grille Charney-Phillips dans la verticale (Girard <i>et al.</i> , 2014).
Grille	2 grilles Yin-Yang horizontales de 1 287 × 417. La résolution horizontale est quasi uniforme et la distance entre les points de grille varie d'une limite inférieure de 17,2 km à une limite supérieure de 25 km (Kageyama et Sato, 2004; Qaddouri et Lee, 2011 et 2015).
Niveaux verticaux	80 niveaux hybrides décalés (même nombre de niveaux pour la quantité de mouvement et les variables thermodynamiques) et 2 niveaux pour le diagnostic à 10 m et à 1,5 m pour les vents et la température/le point de rosée près de la surface. Toit du modèle à 0,1 hPa (Girard <i>et al.</i> , 2014).
Temps d'intégration	Implicite, semi-lagrangien (3D), 2 niveaux temporels, pas de temps de 720 secondes (Côté <i>et al.</i> , 1998a et 1998b).
Variables indépendantes	x, y, ζ et temps.
Variables prévisionnelles	Vents tridimensionnels, température virtuelle, déplacement des coordonnées verticales, hauteur du géopotential, humidité spécifique, pression, rapport de mélange du condensé nuageux, énergie cinétique turbulente (ECT).
Variables calculées	Pression au niveau moyen de la mer, humidité relative, quantité de précipitations prévues (QPP), taux de précipitations, oméga, couverture nuageuse, hauteur de la couche limite et de nombreuses autres.



Yin sous-maille (gauche) Yang sous-maille (milieu) grille Yin-Yang (droite)

<p>Variables géophysiques</p>	<p>Températures et humidité du sol à la surface et en profondeur. Épaisseur de la neige, albédo de la neige et densité de la neige : - valeurs calculées à partir des analyses au temps initial, prédictives; valeurs relatives au sol du schéma ISBA (Noilhan et Planton, 1989; Bélaïr <i>et al.</i>, 2003a et 2003 b);</p> <p>Épaisseur et étendue de la glace de mer et température à la surface de la mer :</p> <p>Obtenu à partir du système GIOPS (décrit à la section 2.8.1), qui fonctionne en mode de couplage à 2 voies avec le modèle atmosphérique. Les systèmes GIOPS produisent des analyses de la couverture de glace de mer et de la température de surface de la mer. Elles sont fournies au système au moment initial, tandis que l'épaisseur de la glace de mer est recyclée d'une exécution à l'autre.</p> <p>Orographie, longueur de rugosité de surface (sauf sur l'eau), paramètres orographiques d'échelle inférieure à la maille pour la résistance causée par les ondes de gravité et le blocage de bas niveau, caractéristiques de la végétation, coefficients thermique et hydraulique du sol, fraction des glaciers. - valeurs calculées au moyen d'un logiciel interne utilisant diverses bases de données géophysiques récentes, fixes dans le temps.</p>
<p>Diffusion horizontale (explicite)</p>	<p>Application de Del-6 aux variables de quantité de mouvement seulement (4 %), mais application de Del-2 aux variables de température et de quantité de mouvement au toit (6 niveaux supérieurs) du modèle, et conservation de la masse d'air sec. Le même opérateur Del-6 est appliqué à la diffusion de la température potentielle avec un coefficient de 1 %.</p>
<p>Résistance causée par les ondes de gravité orographiques</p>	<p>Paramétré (McFarlane, 1987; McFarlane <i>et al.</i>, 1987).</p>

Résistance causée par les ondes de gravité non orographiques	Paramétré (Hines, 1997a, b).
Blocage de bas niveau	Paramétré (Lott et Miller, 1997; Zadra <i>et al.</i> , 2003) avec un coefficient de résistance amélioré (Wells <i>et al.</i> , 2008; Vosper <i>et al.</i> 2009).
Rayonnement	Rayonnement solaire et infrarouge de distribution k-corrélée (Li et Barker, 2005).
Schéma de surface	Approche mosaïque comprenant 4 types : terre, eau, glace de mer et glacier (Bélair <i>et al.</i> , 2003a et 2003b).
Longueur de la rugosité de surface au-dessus de l'eau	Formule de Charnock, sauf que Z0T est constant dans les Tropiques
Mélange turbulent (diffusion verticale)	Repose sur l'énergie cinétique turbulente (Benoît <i>et al.</i> , 1989; Delage, 1988a et 1988 b), avec une longueur de mélange provenant de Bougeault-Lacarrère (1989, voir aussi Bélair <i>et al.</i> , 1999), sauf près de la surface et dans la haute troposphère). Comprends l'hystérèse du nombre de Richardson (McTaggart-Cowan et Zadra, 2015).
Convection peu profonde	1) Flux turbulents dans l'air partiellement saturé (Girard, comm. perso.). 2) Schéma transitoire de Kuo (Bélair <i>et al.</i> , 2005).
Condensation à l'échelle de la grille	Schéma de Sundqvist (Sundqvist <i>et al.</i> , 1989; Pudykiewicz <i>et al.</i> , 1992. Pour les évaluations des QPP, voir Bélair <i>et al.</i> , 2009).
Convection profonde	Schéma de Kain et Fritsch (Kain et Fritsch, 1990 et 1993).
Fréquence et temps de coupure	Quatre prévisions de 48h sont produites chaque jour, à 00, 06, 12 et 18 TUC. Elles sont initialisées à partir des analyses du SGPD valident 6 heures plus tôt afin de générer les champs d'essai pour le Modèle à aire limité (MAL) ainsi que son pilote. À chaque étape de l'analyse, le pilote ainsi que le MAL ont un temps de coupure de T+2h. Les données à l'intérieur d'une fenêtre de +/- 3 heures sont utilisées.
Temps de calcul	11 minutes pour l'analyse sur l'aire limitée en utilisant 640 unités de traitement (sans compter le temps requis pour le prétraitement des données, le contrôle de qualité, le traitement des membres des ensembles, etc).

2.1.3 Techniques et produits statistiques

Analyses

Divers produits classiques d'analyse sont disponibles sous forme électronique ou de carte (épaisseur de neige et couverture de neige, température de surface de la mer, couverture de glace, pression au niveau moyen de la mer et fronts, épaisseur à 1 000-500 hPa, hauteur géopotentielle, température et vents à différents niveaux de pression).

Prévisions

Divers produits classiques d'analyse sont disponibles sous forme électronique ou de carte (pression au niveau moyen de la mer et épaisseur de la couche à 1 000-500 hPa, hauteur géopotentielle et tourbillon absolu à 500 hPa, précipitations cumulatives sur des périodes données et vitesse verticale, hauteur géopotentielle à 700 hPa et humidité relative).

Un vaste éventail de bulletins de prévisions en un point pour de nombreux sites sont produits. De même, d'autres produits spécialisés sont élaborés comme la prévision du type de précipitations, la prévision de la probabilité de précipitations ainsi que la prévision de la température et des anomalies de température.

Plusieurs calculs utilisant SPOOKI (voir l'article suivant de cette section) sont maintenant disponibles jusqu'à 192 heures à 00 et 12 UTC.

- Les totaux entiers, George-K et les indices SWEAT.
- Les niveaux de congélation, le refroidissement éolien et les types de précipitations instantanées selon la méthode Bourgoïn.

SPOOKI

Le système appelé SPOOKI, pour « *Système de production orienté objet contenant une kyrielle d'informations* », est basé sur une approche modulaire où chaque module est une fonction spécialisée, réutilisable et autonome. Ces caractéristiques de la programmation orientée objet simplifient l'entretien du système.

Ce système produit les calculs décrits ci-dessus liés au temps violent estival et hivernal.

Prévision parfaite

Prévision de probabilité de précipitations pour 6 h et 12 h au seuil de 0,2, 2 et 10 mm, à tous les temps de projection entre 0 h et 144 h à 00UTC, et entre 0 et 72 heures à 12 UTC (Verret, 1987). Un mécanisme de rétroaction des erreurs est appliqué à la prévision de la probabilité de précipitations afin d'éliminer les biais (Verret, 1989). La cohérence est forcée entre les prévisions de la probabilité de précipitations à 6 h et 12 h par l'utilisation d'un système à base de règles qui favorise la précision des prévisions.

Opacité totale des nuages en un point à des intervalles de 3 heures entre les temps de projection de 0 et 72 heures (12 UTC) ou 144 heures (00 UTC) (Verret, 1987). Un système de rétroaction des erreurs est appliqué aux prévisions afin d'éliminer les biais et de forcer les prévisions à montrer une distribution de fréquence typique en forme de « U » comme celle observée (Verret, 1989).

Températures de surface en un point à des intervalles de 3 heures entre les temps de projection de 0 et 72 heures (12 UTC) ou 144 heures (00 UTC) (Brunet, 1987). Un schéma de réduction des anomalies est appliqué aux prévisions afin qu'elles convergent vers la climatologie aux heures de prévision plus longues.

L'ozone stratosphérique est utilisé pour calculer l'indice UV canadien (Burrows *et al.*, 1994).

Statistiques de sortie de modèle (MOS)

Pour le modèle global, la température à 2 m est post-traitée au moyen de la suite logicielle UMO (Wilson et Vallée, 2001 et 2002). Cela est effectué à intervalles de 3 heures de 0 h à 144 h pour les deux passes du SGPD (00 et 12 UTC). Il est important de noter que les autres éléments météorologiques du modèle global (vents, probabilité de précipitations et couverture nuageuse) sont statistiquement post-traités à l'aide de la méthode de prévision parfaite.

Avant de mettre une nouvelle version du modèle numérique en œuvre, les statistiques sont mises à jour à l'aide des essais finaux de R et D.

Prévisions météorologiques automatisées en langage clair – SCRIBE

Le système SCRIBE est utilisé à tous les bureaux météorologiques régionaux du Canada afin de générer une série de produits de prévision météorologique automatisée en langage clair à partir d'un ensemble de matrices d'éléments météorologiques pour les jours 3 à 7 inclusivement (Verret *et al.*,

1993, 1995, 1997). Voir la section suivante intitulée « Matrices d'éléments météorologiques ». SCRIBE est le principal outil de préparation de prévisions maritimes opérationnelles destinées au public. Les météorologues aux opérations utilisent une interface pour ajouter de la valeur aux prévisions automatisées, au besoin. Une fois que le météorologue a passé en revue les éléments météorologiques, le système Scribe génère automatiquement les produits de prévision.

Matrices d'éléments météorologiques

Un ensemble de matrices d'éléments météorologiques, y compris les guides statistiques d'éléments météorologiques, les paramètres de sortie directe du modèle et les valeurs climatologiques, est préparé à une résolution temporelle de 3 h à 1 559 points au Canada et sur les eaux adjacentes. Les données sont valides pour des temps de projection entre 0 h et 144 h. Les matrices comprennent les éléments météorologiques suivants : températures maximum et minimum climatologiques sur une fenêtre locale de temps; prévisions statistiques de températures en un point; prévisions des températures maximum/minimum calculées à partir des températures en un point sur une fenêtre locale de temps; fréquences climatologiques des précipitations (traces ou plus) sur des périodes de 6 h et de 12 h; fréquences climatologiques des précipitations de 10 mm ou plus sur des périodes de 12 h; opacité statistique des nuages en un point; prévisions statistiques de probabilité de précipitations sur des périodes de 6 h et de 12 h au seuil de traces et de 10 mm; quantités de précipitations modélisées; hauteur modélisée des nuages, indice de Showalter; déplacement vertical à 850 hPa; type de précipitations conditionnelles; épaisseurs diverses; direction et vitesse du vent à la surface; dépression modélisée du point de rosée à la surface; indice ultraviolet canadien; nébulosité totale modélisée; probabilité diagnostique de précipitations sur des périodes de 6 h et de 12 h; température de surface modélisée, température et dépression modélisées du point de rosée près du niveau 0,97; température de surface de la mer; couverture de glace; épaisseur de la neige; prévisions de la hauteur des vagues et prévisions des accumulations d'embruns verglaçants. Ces matrices sont transmises aux bureaux météorologiques régionaux où elles sont utilisées pour alimenter un système interactif d'élaboration de prévisions météorologiques appelé « SCRIBE » (Verret *et al.*, 1993; 1995 et 1997).

2.2 Système global de prévision d'ensemble (SGPE)

2.2.1 Assimilation de données et analyse objective

Version 4.2.0 du SGPE – Assimilation	
Version du modèle	Modèle global environnemental multiéchelle (GEM), version 4.6.3
Méthode	Le filtre de Kalman d'ensemble est utilisé pour effectuer les analyses afin d'initialiser les prévisions globales d'ensemble. Une trajectoire de prévisions de 3 à 9 heures avec GEM (Houtekamer <i>et al.</i> , 2013; Houtekamer <i>et al.</i> , 2009) est utilisée comme champs d'essai afin d'assimiler les observations perturbées. Un ensemble de 256 champs d'essai est exécuté avec différentes configurations de modèle (voir ci-dessous pour plus de détails). Le pas de temps de ces modèles est de 15 minutes. Ils sont sous-divisés en 8 sous-ensembles de 32 membres (configuration de modèle). De plus, des perturbations supplémentaires sont ajoutées avec les champs d'erreur aléatoires du modèle isotrope homogène (Houtekamer <i>et al.</i> 2009). La longueur de la fenêtre d'assimilation est de 6 heures.
Variabes	T, Ps, U, V et q (humidité spécifique).
Niveaux	74 niveaux hybrides. Toit du modèle à 1,45 hPa.
Domaine	Global
Grille	Résolution uniforme de 0,45° (~50 km)
Fréquence	Toutes les 6 heures, au moyen des données recueillies dans les 3 heures précédant ou suivant 00, 06, 12 et 18 UTC.
Temps de coupure	<ul style="list-style-type: none"> ○ 9 heures pour les analyses finales de 00/12 UTC et 6 heures pour celles de 06/18 UTC ○ 3 heures pour les passes de prévisions deux fois par jour, à 00 et 12 UTC, vingt membres représentatifs sont choisis parmi les 256 analyses afin d'initialiser les prévisions à moyen terme. La moyenne de ce sous-ensemble d'analyses est contrainte à être égale à la moyenne de l'ensemble d'analyses des 256 membres.
Temps de traitement	Analyse de 25 à 30 minutes (avec un maximum de 2 304 cœurs) et 35 à 40 minutes supplémentaires pour l'intégration du modèle afin de produire les essais (256 × 32 cœurs) sur l'IBM P7.
Données utilisées	Radiosonde en altitude, radiosonde en surface, surface, avion, vent satellitaire, diffusiomètre de vents océaniques, ATOVS de niveau 1b (AMSU-A; AMSU-B-MHS, GLOBAL et RARS), GPS-RO et ATMS.

Perturbations d'ensemble	
<ul style="list-style-type: none"> • Les observations sont perturbées en fonction de leurs statistiques d'erreur • Les erreurs d'observation pour les données GPS-RO sont configurées comme étant statiques et ne dépendent strictement que de la hauteur des observations). • Des perturbations isotropes et homogènes sont également ajoutées à la fin du processus d'assimilation (coefficient de 0,33 du cycle continu de coupure longue et de 0,66 pour les analyses de coupure courte) 	
Perturbations dans les configurations du champ d'essai :	
Convection profonde	Soit le schéma de Kain et Fritsch (Kain et Fritsch, 1990 et 1993) soit un schéma de type Kuo (Geleyn, 1985) est utilisé.
Convection peu profonde	Le schéma Girard (appelé « conres ») qui calcule les flux turbulents dans l'air partiellement saturé (voir Mailhot <i>et al.</i> , 1998) est utilisé par chaque membre. De plus, pour la moitié des membres, le schéma transitoire de Kuo (appelé « ktrans_mg », voir Bélair <i>et al.</i> , 2005) est également utilisé (associé au schéma de convection de Kain & Fritsch).
Précipitations stables	Deux formules différentes (appelées « consun » et « newsund ») du schéma Sundqvist <i>et al.</i> sont utilisées pour la moitié des membres, respectivement; (voir Pudykiewicz <i>et al.</i> , 1992. Pour les évaluations des QPP, voir Bélair <i>et al.</i> (2009). La version « consun » est associée au schéma de Kain & Fritsch alors que la « newsund » est liée au schéma de convection profonde de Kuo;
Résistance causée par les ondes de gravité orographiques	Elle est paramétrée selon la méthode de McFarlane (1987) et de McFarlane <i>et al.</i> (1987). 2 coefficients différents sont utilisés (faible = 4.E-6 ou fort = 1.2E-5). Le témoin (membre 0) utilise 8.E-6.
Mélange turbulent (diffusion verticale)	Nous utilisons l'énergie cinétique turbulente (Benoît <i>et al.</i> , 1989; Delage, 1988a et 1988b) avec une longueur de mélange tirée de Bougeault-Lacarrère (1989; voir également Bélair <i>et al.</i> , 1999), sauf près de la surface et dans la haute troposphère, ou calculée à l'aide de la formule Blackadar (1962). Tous les membres comprennent l'hystérèse du nombre de Richardson (McTaggart-Cowan et Zadra 2014) De plus, 2 valeurs différentes (0,85 ou 1,0) pour le paramètre de diffusion verticale turbulente (inverse du nombre de Prandtl) sont utilisées.
Blocage de bas niveau (orographique)	Paramétré (Lott et Miller, 1997; Zadra <i>et al.</i> , 2003). 2 coefficients différents sont utilisés (0,5 ou 1,5). Le membre 0 utilise le coefficient 1.0.
Longueur de rugosité de surface de l'océan	Nous utilisons maintenant la formulation de Deacu <i>et al.</i> (2012) pour calculer la longueur de la rugosité au-dessus de l'océan pour la moitié des membres (clé de modèle Z0TRDPS300).
Effet de la salinité sur l'humidité spécifique de saturation	Nous tenons désormais compte de l'effet de la salinité des océans sur l'humidité spécifique de saturation à la surface des océans, qui représente la condition limite pour le calcul des flux de chaleur latente. Encore une fois, cette option est activée pour la moitié des membres, alors que ce n'est pas le cas pour l'autre moitié.

Diffusion de la température potentielle (thêta)	<p>Veillez noter qu'il ne s'agit plus d'une perturbation, étant donné que la diffusion numérique des champs thêta (avec la version 4.1.1 du SGPE) est appliquée à tous les membres (clé de modèle Hzd_Inr_theta) avec un coefficient de 0,04 et un degré de 6 (Del-6). Une enveloppe d'atténuation a été ajoutée pour limiter la diffusion près des pôles de calcul (qui coïncident avec les pôles géographiques). Nous avons utilisé une réduction linéaire de la diffusion en fonction de la distance entre les points de grille et le pôle (plus de réduction plus près du pôle), à partir de 20 points de grille du pôle.</p>
--	---

2.2.2 Prévision

Version 4.2.0 du SGPE – Prévision	
Version du modèle	Modèle global environnemental multiéchelle (GEM), version 4.6.3
Initialisation	Filtre diabatique numérique (Fillion <i>et al.</i> , 1995).
Formulation	Équations primitives hydrostatiques.
Domaine	Global
Technique numérique	Différences finies : Grille C d'Arakawa dans l'horizontale et grille Charney-Phillips dans la verticale.
Grille	Grille 800 x 400 (latitude-longitude) ayant une résolution uniforme de 0,45° (~ 50 km)
Niveaux	40 niveaux hybrides. Toit du modèle à 2 hPa.
Temps de traitement	De 55 à 60 minutes pour des prévisions de 16 jours (avec des cœurs de 21 x 128) sur l'IBM P7.
Temps d'intégration	Implicite, semi-lagrangien (3D), 2 niveaux temporels, pas de temps de 900 secondes (Côté <i>et al.</i> , 1998a et 1998b).
Variables indépendantes	x, y, η et temps.
Variables prévisionnelles	Vents est-ouest et nord-sud, température, humidité spécifique et logarithme de la pression de surface, contenu en eau des nuages, énergie cinétique turbulente (ECT).
Variables calculées	Pression au niveau moyen de la mer, humidité relative, quantité de précipitations prévues (QPP), taux de précipitations, oméga, couverture nuageuse, hauteur de la couche limite et de nombreuses autres.

<p>Variables géophysiques</p>	<p>Températures et humidité du sol à la surface et en profondeur; épaisseur de la neige, albédo de la neige, densité de la neige :</p> <ul style="list-style-type: none"> - calculées à partir des analyses au temps initial, prédictives; variables relatives au sol du schéma ISBA (Noilhan et Planton, 1989; Bélair <i>et al.</i>, 2003a et 2003b); <p>Épaisseur de la glace de mer : valeurs calculées à partir des données climatologiques au temps initial, fixes dans le temps</p> <p>Température de la surface de la mer : valeurs calculées à partir des analyses, qui ont évolué en ajoutant la persistance d'anomalie aux analyses.</p> <p>Couverture de glace de mer : valeurs calculées à partir des analyses, qui ont évolué dans le temps de façon linéaire en fonction des seuils de température de la surface de la mer</p> <p>Divers (orographie, longueur de rugosité de surface (sauf sur l'eau), paramètres orographiques d'échelle inférieure à la maille pour la résistance causée par les ondes de gravité et le blocage de bas niveau, caractéristiques de la végétation, coefficients thermiques et hydrauliques du sol, fraction des glaciers) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - calculées à partir d'une variété de bases de données géophysiques récentes utilisées dans des logiciels internes, fixes dans le temps
<p>Diffusion horizontale</p>	<p>Application de Del-6 aux variables de quantité de mouvement seulement, sauf pour l'application de Del-2 aux variables de température et de quantité de mouvement au toit (les 4 niveaux supérieurs) du modèle.</p>
<p>Rayonnement</p>	<p>Rayonnement solaire et infrarouge de distribution k-corrélée (Li et Barker, 2005).</p>
<p>Schéma de surface</p>	<p>Approche mosaïque comprenant 4 types : terre, eau, glace de mer et glacier (Bélair <i>et al.</i>, 2003a et 2003b).</p>

Configuration d'ensemble	
Prévision produite pour 20 membres. Ils diffèrent dans leurs conditions initiales, leurs schémas de la physique et leurs perturbations des tendances de la physique ainsi que la rétrodiffusion de l'énergie cinétique stochastique sont également appliquées (avec différents points de départ). Pour plus de détails, voir Gagnon <i>et al.</i> (2015).	
Perturbations d'ensemble (voir la configuration détaillée dans le tableau ci-dessous) :	
<ul style="list-style-type: none"> ○ Chaque membre est initialisé avec un ensemble de conditions atmosphériques initiales différentes provenant du FKEn global (voir la section 1) 	
<ul style="list-style-type: none"> ○ De plus, les perturbations dans les configurations de modèle utilisées pour produire les champs d'essai (voir les perturbations d'ensemble dans la section 1) sont également appliquées pour produire les prévisions à moyen terme. Les deux schémas suivants sont également actifs dans la configuration du modèle de prévision (membres 1 à 20 uniquement, mais pas pour le témoin) : 	
Perturbations stochastiques des tendances de la physique	<ul style="list-style-type: none"> ○ Les perturbations stochastiques des tendances physiques (PTP) et les chaînes Markov avec un nombre aléatoire entre 0,5 et 1,5 avec différentes sources sont utilisées pour tous les membres, sauf le membre 0 (voir la description dans Charron <i>et al.</i>, 2010 et Li <i>et al.</i>, 2008). <p>Remarque : Aucune perturbation n'est appliquée dans les aires d'instabilité convective (voir Gagnon <i>et al.</i>, 2013a et Erfani <i>et al.</i>, 2013)</p>
Rétrodiffusion de l'énergie cinétique stochastique	<ul style="list-style-type: none"> ○ Une mise en œuvre du schéma Shutts (SKEB) 2005 est utilisée avec différentes sources (voir Charron <i>et al.</i>, 2010) pour tous les membres, sauf le membre 0.

2.2.3 Système de re-prévisions

Une procédure de re-prévision semblable à celle décrite dans Hagedorn (2008) est opérationnelle (voir Gagnon *et al.*, 2013b; Gagnon *et al.*, 2014b). Cette procédure consiste à faire des prévisions historiques s'étendant sur les 20 dernières années dans cette version du système (jusqu'à 18), avec le même système de prévision que celui utilisé aux opérations afin de produire une base de données qui sera utilisée pour effectuer un post-traitement et améliorer les prévisions finales (voir Hamill *et al.*, 2008). L'initialisation des re-prévisions est effectuée à l'aide des perturbations autour des champs atmosphériques des analyses ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011). Des perturbations isotropes aléatoires (voir la section 3a de Houtekamer *et al.*, 2009) sont ajoutées aux champs des réanalyses pour créer 4 conditions initiales différentes pour les 4 membres qui seront utilisés, plutôt que 20, afin de réduire au minimum les coûts informatiques. Les 4 membres sont choisis en fonction de l'année afin de s'assurer que chacune des 20 configurations de modèle soit choisie aussi souvent que les autres (ex. : pour 1995, nous avons utilisé les membres 1, 6, 11 et 16; pour 1996, les membres 2, 7, 12 et 17, etc.). Puis, chaque semaine, 80 prévisions historiques de 32 jours pour la période de 1995 à 2014 sont produites par les opérations du CMC.

Les champs de surface sont tirés d'une intégration de 30 ans du Système de prévision de surface (SPS) forcée par les champs près de la surface des réanalyses ERA-Interim ainsi que par les quantités de précipitation sur 3 heures. Ce système hors ligne comprend un schéma de surface terrestre, ISBA (Noilhan & Planton, 1989 et Noilhan et Mahfoud, 1996), ainsi que des schémas de glace de mer et de glacier. Chacun de ces schémas est utilisé dans le modèle GEM lui-même. Ce système s'appelait auparavant GEM-SURF (voir Carrera *et al.*, 2010). Il a été utilisé dans plusieurs études de surface à haute résolution (voir Separovic *et al.*, 2014, Bernier et Bélair 2012, Ioannidou *et al.*, 2014).

N°	Convection profonde	Résistance causée par les ondes de gravité	Longueur de mélange	Diffusion verticale	Blocage orographique	Deacu Z0T	Salty QSAT	SKEB	PTP
0	Kain & Fritsch	Normale	Bougeault	1,0	1,0	Oui	Oui	Non	Non
1	Kain & Fritsch	Forte	Blackadar	1,0	0,5	Oui	Non	Oui	Oui
2	OldKuo	Forte	Blackadar	1,0	0,5	Non	Non	Oui	Oui
3	Kain & Fritsch	Faible	Bougeault	0,85	1,5	Oui	Oui	Oui	Oui
4	OldKuo	Faible	Bougeault	0,85	1,5	Non	Non	Oui	Oui
5	Kain & Fritsch	Faible	Blackadar	1,0	0,5	Non	Non	Oui	Oui
6	OldKuo	Faible	Blackadar	1,0	1,5	Oui	Oui	Oui	Oui
7	Kain & Fritsch	Faible	Bougeault	1,0	0,5	Non	Oui	Oui	Oui
8	OldKuo	Faible	Bougeault	1,0	1,5	Non	Oui	Oui	Oui
9	Kain & Fritsch	Forte	Bougeault	1,0	1,5	Oui	Oui	Oui	Oui
10	OldKuo	Forte	Bougeault	1,0	1,5	Non	Oui	Oui	Oui
11	Kain & Fritsch	Forte	Bougeault	0,85	1,5	Non	Non	Oui	Oui
12	OldKuo	Forte	Bougeault	0,85	0,5	Non	Non	Oui	Oui
13	Kain & Fritsch	Faible	Blackadar	0,85	1,5	Oui	Non	Oui	Oui
14	OldKuo	Faible	Blackadar	0,85	0,5	Oui	Oui	Oui	Oui
15	Kain & Fritsch	Forte	Blackadar	0,85	1,5	Oui	Oui	Oui	Oui
16	OldKuo	Forte	Blackadar	0,85	1,5	Non	Oui	Oui	Oui
17	Kain & Fritsch	Forte	Blackadar	1,0	0,5	Non	Non	Oui	Oui
18	OldKuo	Forte	Blackadar	1,0	1,5	Non	Oui	Oui	Oui
19	Kain & Fritsch	Forte	Bougeault	0,85	0,5	Non	Non	Oui	Oui
20	OldKuo	Faible	Bougeault	0,85	1,5	Non	Oui	Oui	Oui

2.2.4 Techniques et produits statistiques

Prévision parfaite

Les guides d'éléments météorologiques pour la probabilité de précipitations et la nébulosité totale en un point, comme décrits à la section 2.1.3, sont également produits à partir de chaque membre du système de prévision d'ensemble à tous les temps de projection entre 0 et 240 heures, parallèlement aux températures de surface en un point à des intervalles de 3 heures pour les temps de projection entre 0 et 240 heures (Denis et Verret, 2006).

Matrices d'éléments météorologiques

L'éventail de matrices d'éléments météorologiques produit à l'aide des données du SGPD (voir la section 2.1.3) est prolongé à 7 jours à l'aide des résultats du SGPE.

Autres produits SPE

Les produits SPE suivants sont disponibles dans le Web sous forme de cartes à l'adresse suivante :

http://meteo.gc.ca/ensemble/index_f.html

- Moyenne sur 10 jours de l'anomalie de température
- Cartes spaghetti des hauteurs à 500 hPa
- Probabilités étalonnées de précipitations équivalentes pour divers seuils
- Accumulation de précipitations
- Pression au niveau de la mer
- Hauteurs géopotentielle à 500 hPa

La dispersion d'ensemble des champs d'essai est également disponible dans la page Web.

Un indice de prévision extrême (IPE) est calculé pour les températures maximales et minimales, les vitesses maximales des vents et les quantités de précipitations maximales. Il est rendu disponible dans l'URL suivant :

<http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/cmc-prob-products/>

Les données maillées de prévision du SPE provenant d'un serveur du SMC sont disponibles en format numérique (GRIB2). Les détails techniques ainsi que les conditions d'utilisations de ces données sont disponibles à cette adresse :

http://meteo.gc.ca/grib/index_f.html

Les sorties d'ensembles canadiens sont utilisées dans le projet du Système de prévision d'ensemble nord-américain (SPENA), une initiative conjointe comprenant le SMC, le Service météorologique national (NWS) des États-Unis et les services météorologiques nationaux du Mexique (SMNM). Les produits suivants fondés sur les prévisions d'ensemble conjointes du SPENA sont disponibles sur le serveur Web officiel du SMC :

http://meteo.gc.ca/ensemble/naefs/index_f.html

- Anomalie de température pour la deuxième semaine (aperçu pour les jours 8 à 14). Il s'agit d'un produit commun développé par le SMC et le NWS.
- EPSgrammes pour plus de 300 villes au Canada, au Mexique et aux États-Unis
- Cartes des écarts-types et des moyennes des ensembles pour divers champs maillés
- Cartes de probabilités pour plusieurs éléments météorologiques

Les trajectoires des centres de pressions dans le SPE canadien sont calculées au niveau opérationnel et les cartes de ces trajectoires sont mises à la disposition des prévisionnistes.

2.3 Système régional de prévision déterministe (SRPD)

2.3.1 Assimilation de données et analyse objective

SRPD – Assimilation – Version 4.1.0	
Approche d'assimilation	Ce système de prévision adopte une stratégie de cycle intermittent en altitude où l'analyse de 25 km provenant du SGPD sert à initialiser le LAM 6 heures avant le temps d'analyse T . Cette prévision LAM sert ensuite de champs d'essai pour l'étape d'analyse au temps T en utilisant la méthode 4DEnVar.). Voir Caron <i>et al.</i> (2014 et 2015).
Variables	T, Ps, U, V, et log q (humidité spécifique).
Domaine	Un domaine LAM, couvrant l'Amérique du Nord et les océans adjacents et le domaine global pour le pilote
Niveaux	80 niveaux hybrides (décalés).
Grille horizontale à incréments d'analyse	Grille gaussienne de $0,45^\circ \times 0,45^\circ$. Ce sous-ensemble des incréments d'analyse en vigueur à l'heure d'analyse est ensuite transposé sur le domaine du LAM et ajouté à l'ébauche de 6 heures du LAM.
Champs d'essai	Prévision de 9 heures (aux 15 minutes) à la fois pour le pilote et le LAM (voir la section 2.3.2 pour des détails sur les caractéristiques du modèle).
Données de radiance assimilées (nombre de canaux)	AMSU-A (11), MHS (4), SSMIS (7), imageurs géostationnaires (1), AIRS (142), IASI (142) ATMS (17), CrIS (103); prise en compte de la corrélation des erreurs entre les canaux pour toutes les données satellites hyperfréquences et infrarouges.
Autres données satellitaires	Réfraction GPS-RO, AMV, diffusiomètre de vents, ZTD de GB-GPS au-dessus de l'Amérique du Nord et également au-dessus de l'Europe (modèle pilote global seulement).
Autres données utilisées	TEMP, PILOT, SYNOP/SHIP, BUOY/DRIFTER, ASCAT, données d'aéronefs
Traitement des données de radiosondes et d'aéronefs	Radiosondes : utiliser la durée mesurée ou calculée appropriée et une position horizontale pour chaque niveau de pression. Aéronefs : correction des biais des températures statiques
Correction des biais de radiance satellite	Coefficients calculés à partir de l'analyse Obs-minus du SGPD au moyen d'une analyse 3DVar séparée qui ne comprend pas les radiances, se fondant sur les 7 derniers jours, 2 fois par jour, mais statiques pour les canaux AMSU-A 13-14 et les canaux ATMS 14-15.

Covariances d'erreurs d'ébauche	<p>Comme le SGPD.</p> <p>Surface à ~40 hPa : Mélange (50/50) de covariances homogènes et isotropes du modèle global (obtenues au moyen de la méthode appelée NMC) et de covariances d'ensemble 4D issues de 256 membres d'ensemble (FKEn) toutes les heures pendant la fenêtre d'assimilation de 6 heures.</p> <p>Au-dessus de ~10 hPa : Passage graduel à des covariances du modèle global entièrement homogènes et isotropes (le toit des membres du FKEn, à 2 hPa, étant inférieur à celui du SRPD, à 0,1 hPa).</p>
Fréquence et temps de coupure	<p>Quatre prévisions de 48 heures sont produites chaque jour à 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC et 18 UTC. Celles-ci sont démarrées à partir des analyses du SGPD valides 6 heures plus tôt (avec des temps de coupure de 3 heures à 00 UTC ou 12 UTC; et de 6 heures à 06 UTC ou 18 UTC) afin de produire les champs d'essai pour le LAM et le pilote global. Dans chaque étape d'analyse, l'analyse 4DEnVar utilise un temps de coupure de 2 heures à la fois pour le pilote global et le LAM. On utilise les données recueillies dans les 3 heures précédant ou suivant l'heure d'analyse.</p>
Temps de traitement	<p>11 minutes pour l'analyse LAM en tant que telle utilisant 640 cœurs (ce qui ne comprend pas le traitement des données, le contrôle de la qualité des données, le traitement des membres du FKEn, etc.).</p>

2.3.2 Prévision

SRPD – Prévision – Version 4.1.0	
Modèle pilote	
La version du modèle de pilotage global du SRPD est identique au SGPD.	
Modèle LAM	
Modèle	Modèle global environnemental multiéchelle (GEM), version 4.8
Schéma d'initialisation du modèle	Filtre diabatique numérique (Fillion <i>et al.</i> , 1995).
Formulation	Équations primitives hydrostatiques.
Domaine	Domaine du LAM.
Technique numérique	Différences finies : Grille C d'Arakawa dans l'horizontale et A dans la verticale.
Grille	Grille 996 x 1 028 (latitude-longitude) ayant une résolution uniforme de 0,09° (~ 10 km) couvrant l'Amérique du Nord et les océans adjacents. Remarque : Ce LAM est piloté par un modèle global, à une résolution de 25 km. La grille du modèle global est pivotée afin d'être alignée à la grille du LAM.
Niveaux	80 niveaux hybrides non décalés; le niveau le plus bas du modèle sert au diagnostic pour les vents, la température et le point de rosée à la surface. Toit du modèle à 0,1 hPa.
Temps d'intégration	Implicite, semi-lagrangien (3D), 2 niveaux temporels, pas de temps de 300 secondes (Côté <i>et al.</i> , 1998a et 1998b).
Variables indépendantes	x, y, η et temps.
Variables prévisionnelles	Vents est-ouest et nord-sud, température, humidité spécifique et logarithme de la pression de surface, contenu en eau des nuages, énergie cinétique turbulente (ECT).
Variables calculées	Pression au niveau moyen de la mer, humidité relative, quantité de précipitations prévues (QPP), taux de précipitations, oméga, couverture nuageuse, hauteur de la couche limite et de nombreuses autres.

Variables géophysiques	<p>Températures et humidité du sol à la surface et en profondeur; épaisseur de la neige, albédo de la neige, densité de la neige :</p> <ul style="list-style-type: none"> - valeurs calculées à partir des analyses au temps initial, prédictives; variables relatives au sol du schéma ISBA (Noilhan et Planton, 1989; Bélair <i>et al.</i>, 2003a et 2003b) <p>Épaisseur de la glace de mer :</p> <ul style="list-style-type: none"> - valeurs calculées à partir des données climatologiques au temps initial, fixes dans le temps <p>Couverture de glace marine; température de la surface de la mer :</p> <ul style="list-style-type: none"> - valeurs calculées à partir des analyses, fixes dans le temps <p>Orographie, longueur de rugosité de surface (sauf sur l'eau), paramètres orographiques d'échelle inférieure à la maille pour la résistance causée par les ondes de gravité et le blocage de bas niveau, caractéristiques de la végétation, coefficients thermique et hydraulique du sol, fraction des glaciers.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Calculées à partir d'une vaste gamme de bases de données géophysiques récentes faisant appel à des logiciels internes, fixes dans le temps
Diffusion horizontale	<p>Application de Del-6 aux variables de quantité de mouvement, mais 'application de Del-2 aux variables de température et de quantité de mouvement au toit (les 6 niveaux supérieurs) du modèle.</p>
Résistance causée par les ondes de gravité orographiques	<p>Paramétré (McFarlane, 1987; McFarlane <i>et al.</i>, 1987).</p>
Résistance causée par les ondes de gravité non orographiques	<p>Paramétré (Hines, 1997a, b).</p>
Blocage de bas niveau	<p>Paramétré (Lott et Miller, 1997; Zadra <i>et al.</i>, 2003).</p>
Rayonnement	<p>Rayonnement solaire et infrarouge de distribution k-corrélée (Li et Barker, 2005).</p>
Schéma de surface	<p>Approche mosaïque comprenant 4 types : terre, eau, glace marine et glacier (Bélair <i>et al.</i>, 2003a et 2003b).</p>
Longueur de rugosité de surface au-dessus de l'eau	<p>Formule de Charnock pour la quantité de mouvement. Formule de Deacu pour ZOT, mais constante dans les tropiques.</p>
Mélange turbulent de la couche limite (diffusion verticale) avec formule humide	<p>Repose sur l'énergie cinétique turbulente (Benoît <i>et al.</i>, 1989; Delage, 1988a et 1988b), avec représentation statistique des nuages d'échelle inférieure à la maille (Mailhot et Bélair, 2002; Bélair <i>et al.</i>, 2005). Longueur de mélange de Blackadar. Comprends l'hystérèse du nombre de Richardson (McTaggart-Cowen et Zadra, 2015).</p>

Convection peu profonde	Schéma transitoire de Kuo (Bélair <i>et al.</i> , 2005).
Précipitations stables	Schéma de Sundqvist (Sundqvist <i>et al.</i> , 1989; Pudykiewicz <i>et al.</i> , 1992).
Convection profonde	Schéma de Kain et Fritsch (Kain et Fritsch, 1990 et 1993).

2.3.3 Techniques et produits statistiques

Analyses

Divers produits classiques d'analyse sont disponibles sous forme électronique ou de carte (pression au niveau moyen de la mer et fronts, épaisseur à 1 000-500 hPa, hauteur géopotentielle, température et vents à différents niveaux de pression).

Prévisions

Un vaste éventail de produits de prévision est disponible sous forme électronique ou de carte. Parmi ces derniers figurent les cartes classiques comme celle de la pression au niveau moyen de la mer et de l'épaisseur de la couche à 1 000-500 hPa, les hauteurs géopotentielles à 500 hPa et le tourbillon absolu, les précipitations cumulatives et la vitesse verticale, les hauteurs géopotentielles à 700 hPa et l'humidité relative. Diverses cartes spéciales sont produites dans le contexte du temps violent d'été ou d'hiver (tropopause, indices de stabilité, cisaillement du vent, hélicité, refroidissement éolien, contenu en eau à l'état liquide, lignes de courant, vent maximal de bas niveau, mouvement vertical, etc.) ou dans le contexte des prévisions pour l'aviation (givrage, niveau de congélation, hauteur du plafond des nuages, flux de quantité de mouvement, cisaillement vertical, hauteur de la tropopause, niveaux de turbulence moyen et élevé, etc.). Les cartes d'ozone et de l'indice UV pour un temps de projection de 18 heures (deux panneaux) sont produites à 00 et 12 UTC. Un vaste éventail de bulletins contenant des prévisions en un point sont produits pour de nombreux endroits en Amérique du Nord.

Certaines cartes pour l'aviation et de temps violent estival et hivernal sont produites par les services opérationnels à l'aide des paramètres calculés par le système SPOOKI (voir la section 2.1.3). Davantage de calculs doivent être convertis à ce système dans un avenir rapproché.

SPOOKI

Semblable à la section 2.1.3, sauf qu'il repose sur le modèle régional et pour une échéance entre 48 et 54 heures.

Techniques diagnostiques relatives aux champs de sortie directe du modèle

Les calculs pour les cartes suivantes sont en cours de conversion à l'outil de post-traitement SPOOKI (voir la section 2.1.3).

Produits pour l'aviation : Cartes des prévisions de givrage (Tremblay *et al.*, 1995), de la turbulence (Ellrod, 1989), de la couverture nuageuse avec bases et plafonds, des niveaux de congélation et des hauteurs de la tropopause. Les cartes sont produites à intervalles de 6 heures sur une période de 24 heures.

Produits pour le temps violent d'été : Des cartes de prévision de l'énergie convective, de l'hélicité, de l'indice de temps violent convectif, de l'indice de soulèvement, de l'indice SWEAT, du cisaillement du vent dans les bas niveaux, de l'eau précipitable, du vent maximum dans les bas et hauts niveaux, de la température de surface et du point de rosée, des hauteurs et contours à 250 hPa et des hauteurs de la tropopause. Les cartes sont produites à intervalles de 6 heures sur une période de 24 heures.

Produits pour le temps violent d'hiver : Cartes de prévision du type de précipitations (Bourgouin, 2000), des contours et des hauteurs à 250 hPa, du tourbillon, de l'eau précipitable, des hauteurs de précipitations sur 6 heures, du refroidissement éolien, de la température de surface, des épaisseurs et des couches d'air chaud, ou au-dessus du niveau de congélation, avec les bases et les sommets. Les cartes sont produites à intervalles de 6 heures sur une période de 24 heures.

Cartes de prévision de la pression au niveau moyen de la mer à 21 UTC avec les hauteurs de précipitations prévues entre 12 UTC et 00 UTC; cartes des lignes de courant à 21 UTC avec le parcours du vent (intégration temporelle de la vitesse du vent) entre 12 UTC et 00 UTC; cartes de la hauteur minimum et maximum prévue de la couche limite et du coefficient de ventilation. Ces cartes sont en vigueur pour la journée même et le lendemain.

Les sorties directes du modèle sont utilisées pour prévoir les vents et la température en altitude pour l'aviation. Plusieurs paramètres sont interpolés à partir des données des stations, puis formatés et transmis aux bureaux régionaux à des fins opérationnelles.

Prévision parfaite

Semblable à la section 2.1.3, sauf qu'il repose sur le modèle régional et pour une échéance entre 48 et 54 heures.

Statistiques de sortie de modèle (MOS)

Système MOS ajustable (Wilson et Vallée, 2001 et 2002) émis pour le post-traitement statistique des sorties directes du modèle régional. Le système régional de post-traitement fournit actuellement des prévisions entre 0 et 48 heures à 00 et 12 UTC, et entre 0 et 54 heures à 06 et 18 UTC pour les prédictants suivants :

- Les températures à 2 m de la surface et les températures du point de rosée à des sites ponctuels à intervalles de 3 heures.
- La direction et la vitesse du vent à 10 m à des sites ponctuels à intervalles de 3 heures.
- La probabilité de précipitations sur 6 h et 12 h à des sites ponctuels avec seuil de 0,2 mm.
- La probabilité d'une nébulosité totale dans quatre catégories à intervalles de trois heures.
- Les vents de surface à des sites maritimes (principalement des bouées) à intervalles de 3 heures. Des prévisions sont produites pour 73 emplacements, y compris une partie des océans Pacifique et Atlantique, mais également pour quelques grandes masses d'eaux continentales canadiennes.
- Les prévisions sont fournies pour les quatre passes du SRPD (00, 06, 12 et 18 UTC).

Avant de mettre une nouvelle version du modèle numérique en œuvre, les statistiques sont mises à jour à l'aide des essais finaux de R et D.

Prévisions météorologiques automatisées en langage clair – SCRIBE

Un système, nommé SCRIBE, est utilisé à tous les bureaux météorologiques régionaux du Canada afin de générer une série de produits de prévision météorologique automatisée en langage clair, y compris des prévisions destinées au grand public et des prévisions météorologiques agricoles, forestières ou maritimes, de neige ou de la qualité de l'air et ce, à partir d'une série de matrices d'éléments météorologiques pour les jours 1, 2 et 3 (Verret *et al.*, 1993; 1995; 1997). Voir la section suivante intitulée « Matrices d'éléments météorologiques ». SCRIBE est le principal outil de préparation de prévisions opérationnelles destinées au public. Les météorologues aux opérations utilisent une interface pour ajouter de la valeur aux prévisions automatisées, au besoin. Une fois que le météorologue a passé en revue les éléments météorologiques, le système SCRIBE génère les produits de prévision automatiquement.

Matrices d'éléments météorologiques

Mêmes éléments que pour la section 2.1.3, sauf que les données sont en vigueur au temps de projection entre 0 et 48 heures et le guide UMOS est utilisé au lieu des prévisions parfaites, et enfin, les prévisions de la dépression du point de rosée près de la surface sont basées sur les statistiques. Les matrices de SCRIBE sont produites quatre fois par jour à 00, 06, 12 et 18 UTC.

2.4 Système régional de prévision d'ensemble (SRPE)

2.4.1 Assimilation de données et analyse objective

Le système prend les conditions aux frontières latérales du FKE global préparées pour le système global de prévision d'ensemble (SGPE). Les conditions aux frontières latérales pour le SRPE sont fournies par la prévision du SGPE chaque heure. Le SRPE est également piloté à partir du haut par les champs du SGPE à l'aide de la méthode de pilotage de McTaggart-Cowan *et al.* (2011). Le toit du modèle pilote SGPE est à 2 hPa, alors que celui du SRPE est à 10 hPa. Le seul changement apporté au SRPE en 2015 est qu'il est maintenant piloté par la version 4.1.1 du SGPE, une version plus récente.

2.4.2 Prévision

SRPE – Prévision – Version 2.2.0	
Version du modèle	Modèle global environnemental multiéchelle (GEM), version 4.6.1
Initialisation	Filtre diabatique numérique (Fillion <i>et al.</i> , 1995).
Formulation	Équations primitives hydrostatiques.
Domaine	Domaine LAM.
Technique numérique	Différences finies : Grille C d'Arakawa dans l'horizontale et grille Charney-Phillips dans la verticale.
Grille	Grille 600 × 635 (latitude-longitude) ayant une résolution uniforme de 0,1375° (~ 15 km) couvrant l'Amérique du Nord et les océans adjacents. Remarque : Ce LAM est piloté par le Système global de prévision d'ensemble (SGPE).
Niveaux	48 niveaux hybrides décalés. Toit du modèle à 10 hPa.
Temps d'intégration	Implicite, semi-lagrangien (3D), 2 niveaux temporels, pas de temps de 450 secondes (Côté <i>et al.</i> , 1998a et 1998b).
Variables indépendantes	x, y, η et temps.
Variables prévisionnelles	Vents est-ouest et nord-sud, température, humidité spécifique et logarithme de la pression de surface, contenu en eau des nuages, énergie cinétique turbulente (ECT).
Variables calculées	Pression au niveau moyen de la mer, humidité relative, quantité de précipitations prévues (QPP), taux de précipitations, oméga, couverture nuageuse, hauteur de la couche limite et de nombreuses autres.

Variables géophysiques	<p>Température et humidité du sol à la surface et en profondeur. Épaisseur de la neige, albédo de la neige, densité de la neige :</p> <ul style="list-style-type: none"> - valeurs calculées à partir des analyses au temps initial, prédictives; variables relatives au sol du schéma ISBA (Noilhan et Planton, 1989; Bélair <i>et al.</i>, 2003a et 2003b); <p>Épaisseur de la glace marine :</p> <ul style="list-style-type: none"> - valeur calculée à partir des données climatologiques au temps initial, fixes dans le temps <p>Couverture de glace marine; température de la surface de la mer :</p> <ul style="list-style-type: none"> - valeurs calculées à partir des analyses, fixes dans le temps <p>Orographie, longueur de rugosité de surface (sauf sur l'eau), paramètres orographiques d'échelle inférieure à la maille pour la résistance causée par les ondes de gravité et le blocage de bas niveau, caractéristiques de la végétation, coefficients thermiques et hydrauliques du sol, fraction des glaciers.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Valeurs calculées à partir d'une variété de bases de données géophysiques récentes utilisées dans des logiciels internes, fixes dans le temps
Diffusion horizontale	<p>Explicite. Application de Del-6 aux variables de quantité de mouvement seulement, mais application de Del-2 aux variables de température et de quantité de mouvement au toit (les 6 niveaux supérieurs) du modèle.</p>
Résistance causée par les ondes de gravité orographiques	<p>Paramétré (McFarlane, 1987; McFarlane <i>et al.</i>, 1987).</p>
Résistance causée par les ondes de gravité non orographiques	<p>Paramétré (Hines, 1997a.b).</p>
Blocage de bas niveau	<p>Paramétré (Lott et Miller, 1997; Zadra <i>et al.</i>, 2003).</p>
Rayonnement	<p>Rayonnement solaire et infrarouge de distribution k-corrélée (Li et Barker, 2005).</p>
Schéma de surface	<p>Approche mosaïque comprenant 4 types : terre, eau, glace marine et glacier (Bélair <i>et al.</i>, 2003a et 2003b).</p>
Longueur de rugosité de surface au-dessus de l'eau	<p>Formule de Charnock, sauf ZOT constante dans les Tropiques.</p>
Mélange turbulent (diffusion verticale)	<p>Repose sur l'énergie cinétique turbulente (Benoît <i>et al.</i>, 1989; Delage, 1988a et 1988b), avec représentation statistique des nuages d'échelle inférieure à la maille (Mailhot et Bélair, 2002; Bélair <i>et al.</i>, 2005).</p> <p>Comprends l'hystérèse du nombre de Richardson (McTaggart-Cowen et Zadra, 2014).</p>

Convection peu profonde	1) Flux turbulents dans l'air partiellement saturé (Girard, communication personnelle). 2) Schéma transitoire de Kuo (Bélair <i>et al.</i> , 2005).
Précipitations stables	Schéma de Sundqvist (Sundqvist <i>et al.</i> , 1989; Pudykiewicz <i>et al.</i> , 1992). Pour les évaluations des QPP, voir Bélair <i>et al.</i> , 2009).
Convection profonde	Schéma de Kain et Fritsch (Kain et Fritsch, 1990 et 1993).
Perturbation stochastique	<ul style="list-style-type: none"> • Perturbations stochastiques des tendances physiques et des chaînes de Markov avec nombre aléatoire entre 0,3 et 1,3, décrites dans Charron <i>et al.</i> (2010) et Li <i>et al.</i> (2008). • Remarque : Aucune perturbation n'est appliquée aux aires d'instabilité convective et de vitesse verticale topographiquement améliorée de plus de 0,5 m/s.

2.4.3 Techniques et produits statistiques

Les cartes suivantes sont produites opérationnellement et peuvent être accessibles à cette URL.

<http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/cmc-prob-products.reps/>

Cartes de percentiles: 25 %, 50 % et 75 % à partir des variables et intervalles suivants

Variables	Intervalles (heures)
Quantité totale des précipitations	12, 24, 48, 72
Accumulation de pluie	12, 24
Équivalent en eau de la neige	12, 24
Équivalent en eau de la pluie verglaçante	12, 24
Équivalent en eau du grésil	12, 24
Vitesse maximale des vents à 10m	12
Température maximale à 2 m	24
Température minimale à 2 m	24
Humidex maximal	24
Refroidissement éolien minimal	24

Les cartes de probabilité de dépassement des seuils sont produites à partir des variables et des seuils suivants :

Variables	Seuils
Quantité totale des précipitations	0.2, 1.0, 2,5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200 mm
Accumulation de pluie	0.2, 1.0, 2,5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200 mm
Équivalent en eau de la neige	0.2, 1.0, 2,5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 75, 100 mm
Équivalent en eau de la pluie verglaçante	0.2, 1.0, 2,5, 5, 10, 15, 20, 25 mm

Équivalent en eau du grésil	0.2, 1.0, 2,5, 5, 10, 15, 20, 25 mm
Vitesse maximale des vents	20, 30, 40, 50, 65, 75, 90, 100, 118 km/h
Température maximale à 2 m	-30, -25, -20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 °C
Température – minimale à 2m	-40, -35, -30, -25, -20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 °C
Humidex maximal	25, 30, 35, 38, 40, 42 °C
Refroidissement éolien minimal	-50, -45, -40, -35, -30, -25, -20 °C

2.5 Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD)

Le CMC utilise depuis plusieurs années, à titre expérimental, une configuration du modèle GEM à résolution de 2,5 km sur une grille pancanadienne. Ce modèle est devenu opérationnel en 2017 avec 4 analyses par jour, chacune produisant des prévisions sur 48 heures. Ce modèle est initialisé et piloté au niveau de ses limites latérales avec les champs RDPS opérationnels, sur la base d'une approche dite de réduction d'échelle. Les conditions initiales de la surface terrestre sont fournies par CaLDAS (directement sur la grille de calcul de 2,5 km).

Plus au nord, il existe un autre modèle (SPDHR Nord) avec une résolution de 0,0225° (~ 2,5 km), fonctionnant toujours sur un mode expérimental pour l'Arctique canadien. Ce modèle est également initialisé et piloté à ses limites latérales avec les champs RDPS opérationnels. Cependant, les conditions initiales de la surface terrestre sont fournies par la SRPD.

2.5.1 Assimilation de données

Aucune

2.5.2 Modèle

SHRPD – Prévision – Version 4.1.0	
Modèle LAM	
Modèle	Modèle global environnemental multiéchelle (GEM), version 4.8.2
Schéma d'initialisation du modèle	Utilisation des surfaces initiales et des champs d'hydrométéores d'un système couplé au SHRPD - assimilation de données à une résolution de 2,5 km. Pour le domaine Arctique, les champs de surface proviennent du système régional.
Formulation	Équations primitives non hydrostatiques. (Girard <i>et al.</i> , 2014)
Domaine	Domaine LAM (national) pancanadien et domaine Arctique. (Voir la remarque après le présent tableau)
Technique numérique	Différences finies : grille C d'Arakawa sur l'horizontale et grille A d'Arakawa sur la verticale.
Grille	Grille pancanadienne : latitude-longitude de 2 560 × 1 310 à résolution uniforme de 0,0225° (~2,5 km) couvrant le Canada, le nord des États-Unis et les océans adjacents. Grille Arctique : latitude -longitude 1580x880 avec résolution uniforme de 0.0225 ° (2,5km) sur l'Arctique canadien. Remarque : Ces LAM sont pilotés par un modèle régional ayant une résolution de 10 km. Les conditions aux frontières latérales sont actualisées toutes les heures.
Niveaux	62 niveaux hybrides décalés; 2 niveaux diagnostics à 10 m et à 1,5 m pour les vents et la température/humidité spécifique près de la surface. Toit du modèle à 10 hPa avec pilotage sur 3 niveaux;

Intégration temporelle	Implicite, semi-lagrangien (3D), 2 niveaux temporels, pas de temps de 60 secondes
Variables indépendantes	x, y, η et temps.
Variables prévisionnelles	Vents est-ouest et nord-sud, température, humidité spécifique et logarithme de la pression à la surface, contenu en eau liquide, énergie cinétique turbulente (ECT), rapport de mélange du condensé nuageux.
Variables calculées	Pression au niveau moyen de la mer, humidité relative, quantité de précipitations prévues, taux de précipitations, oméga, couverture nuageuse, hauteur de la couche limite et de nombreuses autres.
Variables géophysiques	<p>Température et humidité à la surface et en profondeur du sol; épaisseur de neige, albédo de la neige et densité de la neige :</p> <ul style="list-style-type: none"> - valeurs fournies à partir d'une configuration couplée à résolution de 2,5 km du Système canadien d'assimilation des données au sol (CaLDAS) pour le domaine pancanadien, alors que dans le cas du domaine Arctique, les valeurs proviennent du système régional de prévision (SRPD) <p>Épaisseur de la glace marine :</p> <ul style="list-style-type: none"> - calculée à partir d'une analyse du SRPD, mais dans le cas d'une portion du domaine pancanadien, elle est fournie par l'analyse couplée océan-atmosphère pour la région du golfe du Saint-Laurent. <p>Couverture de glace marine; température de la surface de la mer :</p> <ul style="list-style-type: none"> - calculées à partir d'analyses, mais dans le cas d'une portion du domaine pancanadien, sont fournies par une analyse couplée océan-atmosphère pour la région du golfe du Saint-Laurent. <p>Orographie, longueur de la rugosité de surface (sauf sur l'eau), paramètres orographiques d'échelle inférieure à la maille pour la résistance causée par les ondes de gravité et le blocage de bas niveau, caractéristiques de la végétation, coefficients thermiques et hydrauliques du sol, fraction des glaciers :</p> <ul style="list-style-type: none"> - valeurs calculées au moyen d'un logiciel interne faisant appel à diverses bases de données géophysiques récentes, fixes dans le temps.
Diffusion horizontale	Application de Del-2 aux variables de quantité de mouvement et de Del-6 aux variables de température potentielle.
Résistance causée par les ondes de gravité orographiques	s.o.
Résistance causée par les ondes de gravité non orographiques	s.o.

Blocage de bas niveau	s.o.
Rayonnement	Schéma de transfert radiatif de Li-Barker faisant appel à une distribution k corrélée (appel aux 15 min).
Schéma de surface	Approche mosaïque comprenant 4 types : terre, eau, glace de mer et glacier ISBA (Bélair <i>et al.</i> , 2003a et 2003b).
Longueur de rugosité de surface au-dessus de l'eau	Formulation de Charnock pour la quantité de mouvement. Formulation de Deacu pour Z0T.
Mélange turbulent de la couche limite (diffusion verticale) avec formule humide	Basé sur l'énergie cinétique turbulente (Benoît <i>et al.</i> , 1989; Delage, 1988a et 1988b), avec représentation statistique sous maille des nuages (Mailhot et Bélair, 2002; Bélair <i>et al.</i> , 2005). Longueur de mélange issue de Blackadar. Comprend l'hystérésis du nombre de Richardson (McTaggart-Cowan et Zadra, 2015).
Convection peu profonde	Schéma transitoire de Kuo (Bélair <i>et al.</i> , 2005).
Précipitations stables	Schéma microphysique à 2 moments de Milbrandt-Yau (Milbrandt, J. A., et M. K. Yau, 2005).
Convection profonde	Schéma de Kain et Fritsch (Kain et Fritsch, 1990 et 1993).

2.5.3 Techniques et produits statistiques

Passes de post-traitement du SHRPD après l'exécution du modèle SHRPD. Les données sont en vigueur toutes les heures de 0 à 48 heures, à partir de 00, 06, 12 et 18 UTC, pour le domaine pancanadien. Dans le cas de la grille Arctique, les temps de prévisions sont à toutes les heures de 0 à 6 heures pour les départs à 00 et 12 TUC, et à toutes les heures de 0 à 30 heures pour la lancement du modèle à 06 TUC, et enfin à toutes les heures de 0 à 18 heures pour le lancement de 18 TUC.

Les produits obtenus sont des champs 2D ou 3D, sur la même grille que le modèle principal. Des images sont également produites. La plupart des champs de sortie, mais pas tous, sont produits à l'aide des modules complémentaires de SPOOKI (décrits à la section 2.1.3).

Dans les produits de temps violent, les indices de convection tels que Total-Total, George-K, SWEAT, énergie de convection positive, SSI, Showalter, et indices de soulèvement, hélicité et de cisaillement de vent vertical sont calculés. Le refroidissement éolien, les niveaux de congélation et les types de précipitations de Bourguin sont des sorties des produits météorologiques d'hiver. L'humidité relative est calculée dans les produits thermodynamiques. La quantité de précipitations accumulée depuis le début de l'intégration est également disponible.

Matrice d'éléments du temps :

De même que décrit à la section 2.1.3 avec les nuances suivantes : les données sont valides de 0 à 48 heures aux lancements de 00 et 12 TUC, et jusqu'à 42 heures aux lancements de 06 et 18 TUC. Il n'y a pas de valeurs ajoutées statistiques ou de diagnostics. Il s'agit de données issues directement du modèle. À ce stade il n'y a pas de prévision de vagues ni de prévisions d'embrun verglaçant dans ces matrices.

2.6 Qualité de l'air

2.6.1 Système régional de prévision déterministe de la qualité de l'air (SRPDQA)

Depuis novembre 2009, le Système régional de prévision déterministe de la qualité de l'air (SRPDQA) a été fondé sur le modèle de qualité de l'air GEM-MACH d'ECCC. GEM-MACH combine le modèle de prévision du temps GEM avec un modèle de transport chimique en ligne. Les représentations des processus liées à la qualité de l'air comprennent la chimie en phase gazeuse, la chimie en phase aqueuse, la chimie hétérogène et les processus aérosols. Il utilise une représentation en section à deux intervalles de la distribution granulométrique des PM, mais la composition chimique des PM est traitée de façon plus détaillée et des processus additionnels ayant une incidence sur les concentrations de PM ont été incorporés (Anselmo *et al.*, 2010; Moran *et al.*, 2012). En octobre 2012, la résolution de la grille dans le plan horizontal est passée à 10 km avec 80 niveaux verticaux. Le code du modèle a été mis à jour en février 2013 afin d'élargir le module de lessivage des précipitations qui comprend l'élimination des polluants par voie humide par convection à l'échelle inférieure à la maille (consulter Moran *et al.*, 2013 pour plus de détails). Depuis, le modèle a été mis à jour dans les bibliothèques les plus récentes, GEM 4.8.3 et PHY 5.8.0 (à la fin de 2016). Pour une description de la configuration de la partie météorologie du modèle, se reporter à la section 2.3 portant sur le SRPD, version 4.1.0.

Début 2016	SRPDQA_013	Au début de 2016, la situation était la même qu'à la dernière mise à jour de juin 2015, laquelle était une harmonisation avec la bibliothèque du modèle GEM conformément à la version 3.3.8.2-ISBA.
07 avril 2016	SRPDQA_015	Mise à jour de la bibliothèque du modèle GEM conformément à la version 4.6.2 Ceci inclut entre autres : <ul style="list-style-type: none">• Passage à la nouvelle grille Yin-Yang d'une résolution horizontale de 10 km.• Passage à 80 niveaux hybrides décalés dans la verticale.• Mise à jour des conditions frontière chimiques latérales obtenues à partir du modèle MOZART• L'advection des traceurs chimiques se fait maintenant en utilisant un schéma de type semi-lagrangien qui conserve la masse.• Les traceurs chimiques utilisent maintenant le même opérateur de diffusion verticale que les variables météorologiques.
07 septembre 2016	SRPDQA_016	Mise à jour de la bibliothèque du modèle GEM conformément à la version 4.8
06 octobre 2016	SRPDQA_017	Mise à jour de la bibliothèque du modèle GEM conformément à la version 4.8.3

--	--	--

Le système de traitement des émissions SMOKE est utilisé pour produire, sur la grille du SRPDQA d'orientation latitude-longitude tournée, des fichiers de données d'entrée par heure sur les émissions anthropiques. Les fichiers sur les émissions prennent en considération les heures, les jours et les mois ainsi que les principaux types d'émissions (sources mobiles routières, sources mobiles hors route et sources diffuses, ponctuelles majeures et mineures et sources biosynthétiques). Les émissions biosynthétiques sont évaluées en ligne à l'aide des algorithmes BEIS v3.09 et dépendent de la température près de la surface, du rayonnement solaire et du jour julien (consulter Moran *et al.* (2013) pour plus de détails). Les inventaires d'émissions pour le Canada et les États-Unis ont été mis à jour en juin 2015. L'ensemble de données d'émissions du SRPDQA précédent était fondé sur l'inventaire des émissions canadiennes de 2006 et un inventaire d'émissions états-uniennes de 2012 projeté à partir des données de la version de 2005. Le nouvel ensemble de données est fondé sur l'inventaire national canadien des émissions de 2010 et l'inventaire national états-unien des émissions de 2011 (voir Moran *et al.* [2015] pour plus de détails).

Le SRPDQA est exécuté deux fois par jour à 00 et à 12 UTC pour produire des prévisions de 48 heures. Le domaine à aire limitée couvre une grande partie de l'Amérique du Nord et des eaux adjacentes et est initialisé et piloté aux frontières par des champs météorologiques du SRPD (voir la section 2.3). Les espèces chimiques sont initialisées au moyen de la prévision de 12 heures de la passe précédente du SRPDQA. Les profils chimiques de climatologie mensuelle du modèle MOZART sont appliqués aux frontières latérales.

Survol des outils opérationnels post-traitement en appui à la production de prévisions et d'avertissements publics sur la qualité de l'air	
Statistiques de sortie de modèle (MOS)	<p>Utilisation d'un système MOS ajustable (Wilson et Vallée, 2001 et 2002) pour le post-traitement statistique des sorties directes du modèle régional de qualité de l'air. Ce système de post-traitement de données sur la qualité de l'air fournit actuellement des prévisions à plus de 200 sites d'observation pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les concentrations d'ozone au niveau du sol à des intervalles d'une heure pour des temps de projection entre 0 et 48 heures. • Les concentrations de particules fines (PM_{2,5}) au niveau du sol à des intervalles d'une heure pour des temps de projection entre 0 et 48 heures. • Les concentrations de dioxyde d'azote (NO₂) au niveau du sol à des intervalles d'une heure pour des temps de projection entre 0 et 48 heures. • Les équations sont valides pour les deux passes (00, 12 UTC). <p>Avant de mettre en œuvre la nouvelle version d'un système, les statistiques sont mises à jour à l'aide des essais finaux de R et D</p>
Prévisions météorologiques automatisées en langage clair :	<p>Le système SCRIBE (voir la section 2.3.3) est utilisé afin de générer une série de produits de prévision météorologique automatisée de la qualité de l'air en langage clair pour les jours 1 et 2. Voir la section suivante « Matrice d'éléments météorologiques ».</p>

SCRIBE	
Matrices d'éléments météorologiques	Des matrices d'éléments météorologiques supplémentaires ont été élaborées et mises en œuvre pour les concentrations d'ozone près de la surface, pour les PM _{2,5} , NO ₂ , ainsi que les PM ₁₀ , NO et SO ₂ . La résolution temporelle de ces matrices est de 3 heures, avec des temps de projection jusqu'à 48 heures. Les matrices des trois premiers (O ₃ , PM _{2,5} et NO ₂) sont obtenues à l'aide d'une interpolation statistique des incréments entre les statistiques de sortie de modèle (MOS) aux sites d'observation et les concentrations prévues du modèle de qualité de l'air. Pour les polluants restants (PM ₁₀ , NO et SO ₂), les matrices sont obtenues à l'aide des concentrations prévues du modèle de qualité de l'air.

Les données de sortie opérationnelles du SRPDQA comprennent les concentrations par heure d'ozone troposphérique, de PM_{2,5}, de PM₁₀, de dioxyde d'azote, de monoxyde d'azote et de dioxyde de soufre de même que des champs météorologiques sélectionnés. Les prévisions de concentrations de PM sont fondées sur les émissions de PM primaires et sur la formation chimique de PM secondaires (sulfate, nitrate, ammonium et composés organiques secondaires).

Les prévisions canadiennes de la qualité de l'air sont communiquées au public au moyen de la Cote air santé (CAS). La CAS indique au public le niveau de risque associé à l'exposition à un mélange des matières polluantes O₃, PM_{2,5} et NO₂. Les données de sortie du modèle provenant du SRPDQA sont corrigées avec l'ensemble de post-traitement statistique UMOS-QA et sont fournies aux prévisionnistes avec les observations traitées sur les polluants afin d'aider à la préparation des prévisions de la CAS. Les observations et les prévisions relatives à la CAS pour l'ensemble des 74 sites actifs au Canada sont disponibles à l'adresse suivante :

https://meteo.gc.ca/airquality/pages/index_f.html

En outre, le post-traitement est appliqué sur les données brutes de sortie du SRPDQA pour fournir aux utilisateurs spécialisés les prévisions maximales et moyennes des concentrations d'ozone, de PM_{2,5} et de PM₁₀ dans la couche limite, par période de 6 heures visées par les prévisions. Ces produits sont disponibles à l'adresse suivante :

http://meteo.gc.ca/aqfm/index_f.html

2.6.2 Système régional de prévision déterministe de la qualité de l'air pour les incendies de feux de forêt (SRPDQA-FW)

Depuis avril 2016, le système régional de prévision déterministe de la qualité de l'air pour les incendies de feux de forêt (SRPDQA-FW, ou « FireWork ») a été implémenté opérationnellement. Le modèle SRPDQA-FW est identique au modèle SRPDQA. Cependant il inclut en plus les émissions pour les incendies de feux de forêt en temps quasi réel. Le SRPDQA-FW est exécuté deux fois par jour à 00 et à 12 UTC pour produire des prévisions de 48 heures de particules fines (PM_{2,5}). Les émissions de feux de forêt sont estimées à partir des données nord-américaines de télédétection des feux et de consommation de combustibles fournies par le système Canada d'information sur les feux de végétation (SCIVF) de Ressources Naturelles Canada. Les données sur les feux sont mises à jour deux fois par jour tout juste avant le lancement du modèle.

Résumés sur les versions du SRPDQA-FW exécutées en 2016		
14 avril 2016	SRPDQA-FW_015	Mise à jour de la bibliothèque du modèle GEM conformément à la version 4.6.2
07 septembre 2016	SRPDQA-FW_016	Mise à jour de la bibliothèque du modèle GEM conformément à la version 4.8
06 octobre 2016	SRPDQA-FW_017	Mise à jour de la bibliothèque du modèle GEM conformément à la version 4.8.3

2.6.3 Analyse régionale déterministe de la qualité de l'air (ARDQA)

L'analyse régionale objective pour les polluants de surface, l'ozone et les PM_{2,5}, est devenue opérationnelle en février 2013. L'ARDQA a une résolution de 10 km et est produite chaque heure. Elle repose sur un algorithme d'interpolation optimal modifié et combine, toutes les heures, les champs d'essai chimique provenant du SRPDQA et les observations de surface provenant de la base de données AirNow de l'EPA des États-Unis (environ 1 250 sites pour l'ozone, 850 sites pour les PM_{2,5}, 220 sites pour les PM₁₀, 350 sites pour le NO₂, 300 sites pour le SO₂) et de la plupart des stations terrestres canadiennes, y compris des réseaux RCEPA et RNSPA (environ 200 sites). En avril 2015, le programme de l'ARDQA a été élargi afin d'inclure le NO₂, le NO, le SO₂, les PM₁₀ et la CAS. Cependant, les analyses ne sont pas utilisées pour initialiser le modèle de prévision de la qualité de l'air et, par conséquent, l'ARDQA est hors-ligne.

2.6.4 Prévision de l'ozone et de l'indice UV

Le modèle global canadien est utilisé pour établir les prévisions de l'ozone et de l'indice UV au temps de projection de 18 et 42 heures selon les données de 00 UTC, et au temps de projection de 30 heures selon les données de 12 UTC (Burrows *et al.*, 1994). Une méthode statistique de prévision parfaite est utilisée pour prédire l'ozone total, à laquelle on ajoute ensuite une procédure de rétroaction des erreurs. L'indice UV est calculé à partir des prévisions corrigées sur l'ozone. Des facteurs de correction ont été ajoutés pour prendre en considération l'albédo de la neige, l'élévation et la réponse angulaire du spectromètre de Brewer.

Des cartes de prévision de l'ozone total et de l'indice UV sont préparées et transmises aux bureaux régionaux. Des bulletins de prévision de l'indice UV sont également générés pour un ensemble de stations dans tout le Canada et disponibles à l'adresse suivante :

- https://meteo.gc.ca/forecast/public_bulletins_f.html?Bulletin=fpcn48.cwao

2.7 Autres systèmes spécialisés

2.7.1 Assimilation et analyse des champs de surface

	Grille(s) d'analyse	Méthode	Champ d'essai	Fréquence	Source de données
Température de l'air à la surface	Globale : gaussienne, de 1 080 x 540 Régionale : lat-long ~10 km	Interpolation optimale	Température prévue par le modèle au niveau diagnostique = 1,5m	Globale : 6 heures Régionale : 24 heures (à 18Z)	Synop, METAR, SA, navire, bouée, bouée dérivante, METAR
Dépression du point de rosée à la surface	Globale : gaussienne, de 1 080 x 540 Régionale : lat-long ~10 km	Interpolation optimale	Dépression du point de rosée prévue par le modèle au niveau diagnostique = 1,5m	Globale : 6 heures Régionale : 24 heures (à 18Z)	Synop, METAR, SA, navire, bouée, bouée dérivante
température de surface de la mer	Globale lat-lon typeB 1801x901 (-> 0,2°) :	Interpolation optimale	Analyse précédente	24 heures (à 00Z)	In-situ : navire, bouée dérivante, bouée Données satellitaires : AVHRR, NOAA18 et 19, MetOPA et B(Brasnett, 2008); Plus AAMS-R pour b) (Brasnett, 2008)
Épaisseur de neige	Globale : gaussienne, de 1 080 x 540 Régionale : lat-long ~10 km	Interpolation optimale	Analyse précédente avec estimation de l'accumulation de neige et de la fonte des neiges	6 heures	Synop, METAR, SA (Brasnett, 1999)
Couverture de glace	4 000 x 2 000 sur une grille lat-long pivotée	3D-VAR et retour à la climatologie des lacs lorsque les données ne sont pas disponibles.	Analyse précédente	6 heures	Données SSM/I et SSMI/S data. Algorithme d'extraction de l'équipe 2 de la NASA (NT2). Données sur la glace de lac et la glace de mer du Service canadien des glaces.
Température du sol	Globale : yin-yang de 1 249 x 834 Régionale : lat-long ~10 km	Interpolation optimale 1D	Température du sol prévue par le modèle (schéma ISBA de niveaux 1 et 2)	Globale : 6 heures Régionale : 24 heures (à 00Z)	Analyse des valeurs de température au niveau de la mer (données utilisées comme observations) (Bélaïr, 2003)
Humidité du sol	Globale : yin-yang de 1 249 x 834 Régionale : lat-long ~10 km	Interpolation optimale 1D	Humidité du sol prévue par le modèle (niveaux 1 et 2)	Globale : 6 heures Régionale : 24 heures (à 00Z)	Analyse des valeurs de température et d'humidité relative au niveau de la mer (données utilisées comme observations)

Teneur en eau du sol	Globale : yin-yang de 1 249 x 834 Régionale : lat-long ~10 km	Interpolation optimale 1D	Teneur en eau du sol prévue par le modèle (niveaux 1 et 2)	Globale : 6 heures Régionale : 24 heures (à 00Z)	Analyse des valeurs de température et d'humidité relative au niveau de la mer (données utilisées comme observations)
-----------------------------	--	---------------------------	--	---	--

2.7.2 Analyse régionale déterministe de précipitations (ARDP)

Depuis 2011, ECCC produit une estimation quantitative des précipitations en temps quasi réel, nécessaire pour de multiples applications. Ce produit est connu sous le nom d'analyse régionale déterministe des précipitations (ARDP) et est généré à l'aide du système canadien d'analyse des précipitations (SCAP-CaLDAS en anglais). Son domaine est presque identique à celui du SRPD, qui couvre l'ensemble de l'Amérique du Nord avec une résolution de 10 km. Le système SCAP est basé sur la combinaison optimale d'observations de précipitations en temps quasi réel provenant de réseaux à la fois in situ et radar, avec une première estimation fournie par le champ de précipitation cumulative SRPD avec des délais de 6 et 12 heures. Le système génère deux couches d'informations: une Quantité de précipitation estimée (QPE) et une estimation de la qualité du produit, exprimée par un indice de confiance. Les analyses d'accumulation sur six heures valables à 0000, 0600, 1200 et 1800 UTC sont générées une heure après la fin de la période d'accumulation et mises à jour six heures plus tard. Une analyse d'accumulation séparée sur 24 heures est également produite et valide à 1200 UTC.

Une mise à niveau du système a été mise en œuvre en septembre 2017 en réponse à la migration majeure du calcul haute performance. Cette nouvelle version (version 4.1.0) n'incorpore que des modifications techniques mineures qui n'ont pratiquement aucun impact sur les sorties. Les petites différences observées proviennent principalement du fait que le champ d'essai fourni par le RDPS est légèrement différent de la version précédente.

2.7.3 Prévision immédiate

Le système expert de production de prévisions météorologiques, SCRIBE ingère, toutes les heures, les dernières observations et données de prévision provenant de modèles de prévision immédiate pour mettre à jour les éléments météorologiques de SCRIBE. Le système de prévision immédiate intégrée (SPII) a été élaboré afin de réduire au minimum les ajustements manuels qui doivent être faits par le prévisionniste pour fusionner les conditions météorologiques actuelles avec les prévisions.

Le SPII utilise les observations de surface (METAR, SPECI, SYNOP), les images composites de radar de l'Amérique du Nord et les données sur la foudre du réseau de détection de la foudre. Ces observations servent également à alimenter les modèles de prévision immédiate. Un modèle statistique appelé PubTools utilise les observations de surface pour prévoir les probabilités d'éléments météorologiques.

En plus des modèles de prévision immédiate, le système régional de prévision déterministe (SRPD) et ses champs de post-traitement et de prévisions statistiques en un point (UMOS) sont utilisés comme solution de rechange ou ensemble de données complémentaires. Toutes ces données observées et de prévision sont traitées par un système basé sur des règles afin de déterminer la meilleure séquence d'éléments météorologiques cohérents représentant les observations actuelles et les tendances à court terme.

Pour les stations sans capteurs de couvert nuageux, un champ constitué du maximum entre CF² et NT³ est utilisé. La composite radar est créé à partir des quantités d'accumulation horaire observées en utilisant une technique du ARDP⁴. Le champ diagnostique CF est alors employé pour filtrer les « *faux échos* ».

MAPLE⁵ est utilisé pour extrapoler dans le temps la réflectivité radar et le nombre d'éclairs observés à parti d'un vecteur de déplacement calculé à partir des données observées.

SPII est démarré 10 minutes après l'heure.

Une composante pour le support aux prévisions d'aérodromes (TAF) a été ajoutée en septembre 2016. Cette composante, aTAGS⁶, est exécuté toutes les heures, à la suite du SPII, afin de produire des prévisions ponctuelles pour environ 200 aérodromes canadiens. La période de validité des prévisions va de 0 à 48 heures et le pas de temps est d'une heure. Le cœur d'aTAGS est un module fondé sur des règles qui combine les diverses données d'entrée (observations, sorties de modèle, post-traitement statistique et données climatologiques) pour en faire un ensemble cohérent de données de prévisions uniformes pour l'aviation. Parallèlement un ensemble de métadonnées fournit une indication sur la fiabilité de la prévision basée sur l'accord, ou non, des différents intrants.

Des algorithmes de post-traitement de PNT ont été développés, particulièrement pour les hauteurs de plafond nuageux et la visibilité horizontale de surface. Le travail se poursuit afin d'améliorer la performance de ces algorithmes.

Plus de détails sont disponibles à

http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/CMOI/product_guide/docs/tech_notes/technote_atags-100_f.pdf

² la fraction nuageuse (CF) déterminé par observation satellitaire

³ le couvert de nuage total prévu par le SRPD

⁴ Système d'Analyse Régionale Déterministe de Précipitations

⁵ MAPLE pour *McGill Algorithm for Precipitation Lagrangian Extrapolation*, Zawadzki et Germann, 2002 et 2004

⁶ autoTAF Automated Guidance System

2.8 Systèmes de prévision océanique

2.8.1 Système global de prévision océan-glace (SGPOG)

Le SGPOG a été élaboré pour fournir des analyses globales quotidiennes des conditions des glaces et des océans tridimensionnel (température, salinité, niveau de la mer, courants et champs de glace). Le système a été conçu pour répondre aux nombreux besoins des services essentiels de prévisions maritimes au Canada. Ces besoins comprennent la fourniture des conditions initiales et latérales de la surface marine aux modèles couplés et forcés de prévisions numériques du temps et des vagues, la fourniture des conditions frontière ouvertes aux systèmes régionaux glace-océan et la fourniture d'une capacité de base à l'intervention d'urgence en milieu marin (p. ex. déversement d'hydrocarbures). Le système d'assimilation globale océanique a été développé par le groupe Mercator Océan et il est exécuté en temps réel au CMC depuis 2011. Il a été déclaré pleinement opérationnel en août 2015. Il existe quelques différences en comparaison au système Mercator, p. ex. le modèle océanique est couplé à un modèle de glace marine différent, les données de forçage atmosphérique et de température de surface de la mer ne sont pas identiques. L'analyse par mise à jour incrémentale a été ajoutée au système en juin 2016, ce qui réduit le choqe initial dans la composante prévision. Le SGPOG est désormais limité à une d'analyse (SGPOG-A) alors que la composante prévision est couplée avec le système global de prévision (SGPD) depuis 2017, et en fait partie intégrante depuis .

Le SGPOG-A s'appuie sur SAM2 (« Système d'assimilation Mercator », version 2, Tranchant *et al.*, 2008; Lellouche *et al.*, 2013). La méthode d'analyse repose sur un filtre de Kalman d'ordre réduit fondé sur une formule du Filtre de Kalman étendu singulier et évolutif (SEEK). SAM2 assimile les observations d'anomalies du niveau de la mer, de la température de surface de la mer (SST) et des profils locaux de température et de salinité. Une analyse en mode différé est produite chaque mardi et est valide pour les 6 jours précédents avec une fenêtre d'assimilation de 7 jours. On a recours à cette analyse afin d'initialiser une analyse en temps réel chaque mercredi à 00 UTC à l'aide également d'une fenêtre de 7 jours. Le SGPOG suit également un cycle en temps réel d'un jour pour les autres jours de la semaine qui assimile seulement les observations de la température de la mer. Ces analyses conjointement avec les analyses des glaces servent à initialiser la prévision quotidienne de 10 jours. Ce système a été mis en œuvre en mode expérimental en septembre 2013 et déclaré opérationnel en août 2015.

2.8.2 Prévision régionale couplée atmosphère-océan-glace

Un système de prévision couplé entièrement interactif atmosphère-océan-glace pour le golfe du Saint-Laurent (GSL) est exécuté au Centre météorologique canadien (CMC) depuis le 9 juin 2011 et est opérationnel depuis novembre 2014. Ce système comprend un cycle quotidien de pseudo-analyse et fournit les conditions initiales pour le modèle glace-océan (Smith *et al.* 2012) et les prévisions quotidiennes de 48 heures à l'aide d'un modèle atmosphère-glace-océan entièrement couplé. Au cours de l'année 2013, une nouvelle version de ce système a été élaborée avec un modèle glace-océan différent. Le nouveau système s'appuie sur le modèle océanique NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) et sur le modèle de glace marine CICE (Community ICe CodE) de Los Alamos. De plus, le nouveau système a recours à une approche de couplage des flux plutôt qu'au couplage par variables propre au système actuel. Le système mis à jour utilise les mêmes grilles atmosphériques et océaniques que le système précédent (avec des résolutions respectives de 10 km et 5 km).

2.8.3 Prévision des vagues

2.8.3.1 Système Global de prévisions de vagues

Le Système global de prévision déterministe des vagues (SGPDV) fondé sur le modèle dynamique de prévision des vagues WaveWatch III^{MD}, version 5.16 est passé du mode expérimental au mode opérationnel en novembre 2017. . Le domaine SGPDV couvre tous les océans du monde à une résolution de ¼ degré jusqu'à 86° N. Outre le cycle de prévision, le système comprend un cycle de pseudo-analyse. À l'heure actuelle, il n'y a pas d'assimilation de données sur les vagues dans la pseudo-analyse. La pseudo-analyse est exécutée quatre fois par jour, pour une période de 6 heures, à 00, 06, 12 et 18 UTC, selon les conditions horaires de la dernière analyse G2 des prévisions atmosphériques. Chaque nouvelle pseudo-analyse est simplement une continuation régulière de la passe précédente. Le cycle de prévision est exécuté deux fois par jour, soit à 00 et à 12 UTC, pendant 240 heures, et repose sur la plus récente pseudo-analyse disponible utilisée comme conditions initiales. Il est forcé par les vents prévus du SGPD et selon l'évolution des glaces du Système global de prévision océan-glace (SGPOG). La résolution spectrale du système est de 36 intervalles de fréquence et de 36 intervalles de direction. Plus de détails concernant ce système sont présentés dans *Bernier et al. 2015*.

Les propriétés des divers systèmes de prévision des vagues, en modes opérationnel et expérimental, sont résumées dans le tableau à la fin de la section 8.

2.8.3.2 Système régional de prévision de vagues

Le Système régional de prévision déterministe des vagues (SRPDV) utilise, en autres, le modèle dynamique de prévision des vagues WAM (WAVE Model – version 4.5.1). La composante WAM du SRPDV est configuré de manière à fournir les prévisions de l'état de la mer dans les domaines suivants : les océans Arctique, Pacifique Est et Atlantique Nord, le golfe du Saint-Laurent et quatre Grands Lacs (Ontario, Érié, Huron et Supérieur). Le modèle est exécuté pour chaque domaine jusqu'à six fois par jour à 00, 06, 12 et 18 UTC. Quatre passes de prévision de 48 heures sont forcées par les vents prévus du Système régional de prévision déterministe (SRPD). Les deux autres passes de prévision sont destinées aux prévisions à long terme (120 heures) et reposent sur les vents prévus provenant du Système global de prévision déterministe (SGPD). La résolution utilisée pour les océans Arctique et Pacifique Est de 0,5°, pour l'océan Atlantique Nord de 0,15° et pour le golfe du Saint-Laurent et les Grands Lacs de 0,05°. Les systèmes ont une résolution spectrale de 25 classes de fréquence et 24 classes directionnelles. Les domaines WAM de l'Arctic, du Pacifique, ainsi que de l'Atlantique Nord, ont graduellement été retirés en Novembre 2017 lors de l'implémentation du Système global de prévision déterministe de vagues (SGPDV).

Un Système régional de prévision déterministe de vagues (SRPDV) basé sur WaveWatch III a été implémenté en parallèle le 19 octobre 2017. Il est configuré pour fournir des prévisions de l'état de la mer sur les cinq Grands Lacs (Ontario, Érié, Huron-Michigan et Supérieur). Chaque domaine fonctionne quatre fois par jour à 00, 06, 12 et 18 UTC pendant 48 heures et est soumis aux vents du système de prévision déterministe à haute résolution (SPDHR). La résolution est de 1 km (0,009 x 0,0124 degré). Les systèmes ont une résolution spectrale de 40 fréquences et 36 fréquences directionnelles.

Un système régional de prévision d'ensemble de vagues (SRPEV) basé sur WaveWatch III a été mis en œuvre parallèlement le 19 octobre 2017. Il est configuré pour fournir des prévisions de l'état de la mer sur les cinq Grands Lacs. Le système a 20 membres plus 1 contrôle. La prévision fonctionne deux fois par jour à 00 et 12 UTC pendant 72 heures et est soumise aux vents prévus du système régional de prévision d'ensemble (SRPE). La résolution est de 2,5 km (0,0225 x 0,0310 degré). Le système a une résolution spectrale de 40 canaux de fréquence et 36 canaux directionnels.

Les propriétés des divers systèmes de prévision des vagues, en mode opérationnel et expérimental, sont résumées dans le tableau

Systèmes de prévisions de vagues fondés sur le modèle WAM						
Domaine	Latitude et longitude	Espacement de grille	Période de prévision	Vents à 10 m	Glace	Passes par jour
Pacifique (longue échéance)	200° O à 120° O 25° N à 60° N	0,5° x 0,5°	120 h	SGPD aux 3 heures	SGPD analyse des glaces	00, 12Z
Arctique (longue échéance)	165° O à 45° O 49° N à 85° N	0,4° x 0,8°	120 h	SGPD aux 3 heures	SGPD analyse des glaces	00, 12Z
Arctique (courte échéance)	"	"	48 h	SRPD aux heures	SRPD analyse des glaces	00, 06, 12, 18Z
Atlantique (longue échéance)	82° O à 15° O 25° N à 70° N	0,5° x 0,5°	120 h	SGPD aux 3 heures	SGPD analyse des glaces	00, 12Z
Atlantique (courte échéance)	97,925° O à 0,25° E 20,075° N à 70,175° N	0,15° x 0,15°	48 h	SGPD aux heures	SRPD analyse des glaces	00, 06, 12, 18Z
Golfe du Saint-Laurent (courte échéance)	54,425° O à 70,925° O 44,075° N à 52,025° N	0,05° x 0,05°	48 h	SRPD aux heures	SRPD-CGSL aux heures	00, 06, 12, 18Z
Lac Supérieur (longue échéance)	84,043° O à 92,312° O 46,318° N à 48,984° N	0,05554° x 0,08187°	120 h	SGPD aux 3 heures	SGPD analyse des glaces	00, 12Z
Lac Supérieur (courte échéance)	"	"	48 h	SRPD aux heures	SRPD analyse des glaces	00, 06, 12, 18Z
Lac Huron (longue échéance)	79,378° O à 84,773° O 42,936° N à 46,347° N	0,05502° x 0,07819°	120 h	SGPD aux 3 heures	SGPD analyse des glaces	00, 12Z
Lac Huron (courte échéance)	"	"	48 h	SRPD aux heures	SRPD analyse des glaces	00, 06, 12, 18Z
Lac Érié (courte échéance)	78,75° O à 83,6° O 41,3° N à 43° N	0,05° x 0,05°	120 h	SGPD aux 3 heures	SGPD analyse des glaces	00, 12Z
Lac Érié (courte échéance)	"	"	48 h	SRPD aux heures	SRPD analyse des glaces	00, 06, 12, 18Z
Lac Ontario (longue échéance)	76,074° O à 79,851° O 43,164° N à 44,188° N	0,05688° x 0,07553°	120 h	SGPD aux 3 heures	SGPD analyse des glaces	00, 12Z
Lac Ontario (courte échéance)	"	"	48 h	SRPD aux heures	SRPD analyse des glaces	00, 06, 12, 18Z

Systèmes de prévisions de vagues fondés sur le modèle WaveWatch III						
Domaine	Latitude et longitude	Espacement de grille	Période de prévision	Vents à 10 m	Glace	Passes par jour
Global (pseudo-analyse)	0° à 360° 80° S à 86° N	0,25° x 0,25°	6 h	Analyse GDPS récente (G2) aux heures	Analyse GDPS récente des glaces (G2)	00, 06, 12, 18Z
Global (longue échéance)	0° à 360° 80° S à 86° N	0,25° x 0,25°	240 h	SGPD aux heures	SGPOG aux 3 heures	00, 12Z
L. Supérieur	92.3116° to 84.1648° W 46.2590° to 49.1120° N	0.009° x 0.0124°	48 h	SRPDHR 30-minutes pour 24h et ensuite aux heures	Analyse de glace du SRPDHR	00, 06, 12, 18Z
L. Huron-Michigan	88.1452° to 79.5024° W 41.4260° to 46.5740° N	"	"	"	"	"
L. Erie	83.6068° to 78.6840° W 41.2190° to 43.1000° N	"	"	"	"	"
L. Ontario	79.9736° to 75.6708° W 43.0640° to 44.4770° N	"	"	"	"	"
Ensemble des grands-lacs	92.4790° to 75.4600° W 41.0984° to 49.2520° N	0.0225° x 0.0310°	72 h	SRPE aux heures	Analyse de glace du SRPE	00, 12Z

2.8.4 Prévision des ondes de tempête

Le Centre de prévision des tempêtes de l'Atlantique (CPTA) situé à Halifax et le bureau météorologique de Terre-Neuve-et-Labrador situé à Gander produisent des prévisions opérationnelles des ondes de tempête dans l'est du Canada à l'aide de Dalcoast1 développé spécialement à l'Université Dalhousie pour cette région (Bobanović 1997). Il est exécuté deux fois par jour (00 UTC et 12 UTC). Le modèle des ondes de tempête est alimenté par la pression atmosphérique en surface et les vents du système régional de prévision déterministe (SRPD). Le système de prévision des ondes de tempête a une résolution de 1/12 ° et couvre l'océan Atlantique Nord-Ouest, le golfe du Saint-Laurent et le plateau du Labrador.

Une version à long terme de ce modèle, le système régional de prévision déterministe des ondes de tempête (SRPDOT) est passé de l'état expérimental à l'état opérationnel le 1er novembre 2017. Il utilise le modèle Dalcoast5 et s'intègre à 240 heures. Le système comprend une pseudo-analyse et un cycle de prévision. La pseudo-analyse est basée sur les conditions horaires issues de l'analyse atmosphériques tardives de la passe G2. Chaque nouvelle pseudo-analyse est simplement une continuation en douceur de la précédente. La pseudo-analyse est effectuée quatre fois par jour pendant 6 heures centrées sur 00, 06, 12 et 18 UTC. Le cycle de prévision est exécuté deux fois par jour à 00 h et à 12 UTC pendant 240 heures, en utilisant la dernière pseudo-analyse disponible comme condition initiale. Les prévisions sont établies en fonction de la pression atmosphérique en surface et des vents du système global de prévisions déterministes (SGPD). Le système couvre l'océan Atlantique Nord-Ouest, le golfe du Saint-Laurent et le plateau du Labrador à une résolution de 1/30 °.

Le système régional de prévision d'ensemble des ondes de tempête d'ensemble (SRPEOT) a été mis en œuvre avec le statut expérimental le 7 novembre 2017. Le système compte 20 membres et 1 contrôle. Il utilise le modèle Dalcoast5 et s'intègre jusqu'à 240 heures. Ce modèle d'ondes de tempête est alimenté par la pression atmosphérique en surface et les vents du système de prévision d'ensemble global (SPEG). Il fonctionne deux fois par jour (00 UTC et 12 UTC). Le système couvre l'océan Atlantique Nord-Ouest, le golfe du Saint-Laurent et le plateau du Labrador à une résolution de 1/12 °.

Une description détaillée du SRPDOT et du SRPEOT se trouve dans Bernier et Thompson 2015.

2.9 Prévisions à échéance prolongée et à longue échéance

2.9.1 Prévisions à échéance prolongée (de 10 à 30 jours)

2.9.1.1 Système

Devenu opérationnel en 2015, ce système de prévisions mensuelles (aussi appelées prévisions infrasaisonnnières) repose sur le Système global de prévision d'ensemble (SGPE) décrit à la section 2.2 du présent document. Les prévisions sont produites par prolongation de l'échéance jusqu'à 32 jours, une fois par semaine (voir Gagnon *et al.*, 2013, Gagnon *et al.*, 2014a, et Lin *et al.*, 2016, présenté pour publication). Bien qu'il s'agisse encore d'un système à deux niveaux, c.-à-d. d'un système non couplé avec des conditions précisées de température à la surface de la mer et de glace de mer, il saisit probablement la plupart des principales sources de prévisibilité à l'échelle infrasaisonnnière. Pour produire des prévisions d'anomalies ainsi que pour étalonner à terme les prévisions de probabilité, une reprévision (prévision a posteriori) est exécutée en mode opérationnel, « au vol », de manière à toujours utiliser la plus récente version du SGPE. Cette revue de la prévision par le modèle a permis d'établir une climatologie sur 20 ans (1995 à 2014). Pour davantage de détails sur la conception et l'application de la reprévision, veuillez consulter la section 2.2.3 **Système de re-prévisions**.

2.9.1.2 Produits

Les produits de prévision sont générés d'abord par l'élimination des 4 premiers jours, puis par le moyennage des périodes suivantes :

- semaine 1 (jours 5 à 11)
- semaine 2 (jours 12 à 18)
- semaine 3 (jours 19 à 25)
- semaine 4 (jours 26 à 32)

et

- semaines 1 à 4 (jours 5 à 32)

Les prévisions probabilistes publiques officielles de la température près de la surface pour un mois (semaines 1 à 4) figurent sur le site Web de renseignements météorologiques du gouvernement du Canada :

http://meteo.gc.ca/saisons/image_f.html?img=mfe1t_s

Les prévisions expérimentales hebdomadaires de température et de précipitations sont accessibles sur le site Web suivant :

http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/ensemble/monthly/prev_mens_geps.html

2.9.2 Prévisions à longue échéance (de 30 jours à 2 ans) : SIPSCan

2.9.2.1 Système

En décembre 2011, le Centre météorologique canadien (CMC) a commencé à utiliser un système global saisonnier couplé aux fins de prévision des conditions climatiques mensuelles à multisaisonnnières. Ce système, appelé SPISCan pour Système de prévision interannuelle et saisonnière canadien, remplace le système de prévision non couplé (2 niveaux) utilisé précédemment pour la production de prévisions saisonnières avec des échéances entre zéro et un mois, et remplace le système de prévision statistique CCA utilisé précédemment pour produire des prévisions avec des échéances supérieures à quatre mois.

SPISCan peut également prévoir habilement le phénomène ENSO et son influence sur le climat jusqu'à un an à l'avance. L'élaboration, la mise en œuvre et l'amélioration continue de ce système de prévision multisaisonnier sont le résultat d'une étroite collaboration entre le CMC et le Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique (CCmaC).

SPISCan est un système d'ensemble multi-modèle (MME) fondé sur deux modèles climatiques élaborés par CCmaC. Il s'agit d'un système de prévision entièrement couplé atmosphère-océan-glace-sol, qui est intégré à la suite de prévisions opérationnelles du CMC et utilisant l'infrastructure d'assimilation des données du CMC pour obtenir les conditions initiales de l'atmosphère, de la température de surface de la mer et de la glace marine. Les deux modèles utilisés par SPISCan sont les suivants :

CanCM3

Ce modèle utilise le modèle atmosphérique CanAM3 (aussi connu sous le nom AGCM3) ayant une résolution horizontale d'environ 315 km (T63) et 31 niveaux verticaux, conjointement avec le modèle océanique CanOM4 ayant une résolution horizontale d'environ 100 km et 40 niveaux verticaux et le modèle de surface (sol) CLASS. La dynamique et la thermodynamique de la glace marine sont explicitement modélisées.

CanCM4

Ce modèle utilise le modèle atmosphérique CanAM4 (aussi connu sous le nom AGCM4) ayant également une résolution horizontale d'environ 315 km (T63), mais 35 niveaux verticaux. Les autres composants sont essentiellement les mêmes que dans le modèle CanCM3 : CanOM4 pour les éléments océaniques, CLASS pour les éléments terrestres et le même traitement dynamique pour la glace marine.

Une description détaillée de ces modèles est fournie dans Merryfield *et al.* (2013a).

SPISCan possède deux modes de fonctionnement :

Mode assimilation

SPISCan utilise un cycle d'assimilation continu pour les variables atmosphériques tridimensionnelles suivantes : la température, le vent, l'humidité spécifique, ainsi que pour la température de la surface de la mer et la glace marine. Les données assimilées proviennent des analyses atmosphériques globales finales 4D-VAR du CMC aux 6 heures et des analyses quotidiennes de la température de la surface de la mer et de la glace marine du CMC. De plus, juste avant de lancer l'intégration des prévisions, une analyse de l'océan tridimensionnelle des NCEP est assimilée dans le champ d'essai du modèle océanique de SPISCan. Toutes les conditions initiales des 20 membres sont indépendantes, mais statistiquement équivalentes en ce sens que leurs différences sont du même ordre que les incertitudes liées aux observations.

Mode prévision

Les prévisions du SPISCan reposent sur un ensemble de 10 prévisions produites par chacun des deux modèles climatiques du CCmaC pour un total d'ensemble de 20 membres. Les prévisions mensuelles à multi-saisons jusqu'à 12 mois sont émises le premier jour de chaque mois. De plus, une prévision d'un mois et une prévision de six mois sont émises au milieu du mois (le 15^e jour). Des prévisions déterministes et probabilistes des températures de surface et des précipitations sont produites pour chaque catégorie (au-dessus des normales/près des normales/sous les normales) pour les saisons composées des mois 1 à 3, 2 à 4, 4 à 6, 7 à 9, 10 à 12. Les prévisions probabilistes sont déterminées en comptant les membres de chacune des trois catégories possibles de prévision : inférieure à la normale, près de la normale et supérieure à la normale, et en ajustant cette probabilité à l'aide d'une méthode d'étalonnage afin de tenir compte de ce qui a été observé dans le passé.

La climatologie du SPISCan, qui repose sur des prévisions rétrospectives couvrant la période de 1981 à 2010, a été produite au cours de la deuxième phase des efforts de recherche du Projet de prévision historique couplée (PPH2). La taille de l'ensemble (20 membres) est la même pour la prévision et les prévisions rétrospectives.

D'autres renseignements techniques à propos de SPISCan sont disponibles dans Merryfield *et al.* (2011).

2.9.2.2 Produits

Les produits déterministes et probabilistes des prévisions saisonnières sont disponibles dans Internet :

http://meteo.gc.ca/saisons/index_f.html

Les produits probabilistes des prévisions saisonnières sont disponibles avec une échéance de 0, 1, 3, 6, et 9 mois. Les produits déterministes des prévisions saisonnières sont disponibles avec une échéance de 0 mois seulement. Ces prévisions couvrent des périodes de trois mois et sont publiées le premier jour de chaque mois.

Les cartes et les grilles de sortie du modèle pour la saison 1 sont disponibles en temps réel dans Internet au site suivant :

http://meteo.gc.ca/grib/grib2_cansips_f.html

Les données numériques de prévision se trouvent sur une grille de 2,5 degrés dans un format GRIB2. Les moyennes mensuelles des températures de l'air à la surface, des précipitations, des hauteurs à 500 hPa, des températures à 850 hPa et la pression au niveau moyen de la mer sont disponibles pour chacune des 20 passes des modèles utilisées pour préparer la prévision officielle. De plus, les données des prévisions rétrospectives ainsi que leurs moyennes climatologiques sont disponibles pour chaque modèle.

2.10 Réponse aux urgences environnementales

Le CMC est en mesure de fournir des estimations en temps réel des concentrations de polluants atmosphériques et du dépôt en surface de ces polluants. Ces champs sont obtenus des modèles de transport et de dispersion atmosphériques de courte à longue distance. Opérationnellement, le CMC utilise deux modèles de dispersion de particules lagrangiens stochastiques : MLDPn et MLCD. Parmi les applications importantes de ces modèles figure l'estimation des concentrations de radionucléides et de cendres volcaniques. Grâce à cette capacité opérationnelle, le CMC est désigné par l'OMM comme Centre météorologique régional spécialisé (CMRS) dans les produits de modélisation du transport atmosphérique pour les réponses aux urgences environnementales. De plus, le CMC a été désigné par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) comme Centre d'avis de cendres volcaniques (CACV). On a observé une utilisation accrue de ces outils opérationnels de modélisation du transport atmosphérique en matière de dispersion d'agents chimiques et biologiques dans le contexte d'une réponse aux urgences environnementales locales.

Les modèles lagrangiens de dispersion de particules sont des modèles « hors ligne ». Par conséquent, on doit leur fournir les champs de vent, d'humidité, de température et de hauteurs géopotentielle. Ces derniers sont obtenus à partir des Systèmes global ou régional de prévision déterministe (SGPD; SRPD) ou des prévisions et analyses du Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD) ou encore, dans le cas du Modèle lagrangien à courte distance (MLCD), directement aussi des observations en surface. Veuillez-vous reporter aux précédentes sections pour de plus amples renseignements sur ces produits de PNT.

Tous les modèles de réponse aux urgences environnementales (RUE) peuvent être exécutés facilement avec une interface utilisateur graphique (IUG) flexible appelée SPI. Cette application a été conçue pour la réponse aux urgences opérationnelles. Le CMC a mis de nombreuses années à mettre au point l'interface SPI qui permet aux agents de service de répondre efficacement aux demandes de produits de modélisation au cours d'urgences.

2.10.1 Modèle de dispersion

2.10.1.1 MLDPn (Modèle lagrangien de dispersion de particules d'ordre n)

Le MLDPn, décrit dans D'amours *et al.* (2015), est un modèle lagrangien de dispersion de particules qui combine les modèles de dispersion antérieurs, soit MLDP0 et MLGI (D'Amours et Malo, 2004; D'Amours *et al.*, 2010; Flesch *et al.*, 2004). Ce modèle est conçu pour des problématiques associées à des événements ayant des conséquences locales, régionales, continentales ou encore globales. Dans ce modèle, la dispersion est estimée en calculant les trajectoires d'un très grand nombre de particules (ou parcelles) d'air. Les calculs des trajectoires sont effectués en deux parties : déplacements tridimensionnels dus au transport par l'élément synoptique du vent, puis déplacements tridimensionnels dus aux mouvements turbulents non résolus. Le dépôt sec est modélisé au moyen d'un paramètre de vitesse de dépôt.

Le choix du modèle de diffusion turbulente est fonction de l'échelle spatiale et temporelle du problème. Pour les événements de grande échelle, lorsque l'échelle spatiale est de plus de 200km, et temporelle de plus de 12 heures, un schéma de diffusion d'ordre zéro est utilisé (MLDP0, les trajectoires des parcelles est mise à jour par déplacements incrémentaux). Lors de problématiques de courtes échéances et d'échelles plus locales, un schéma de premier ordre, plus élaboré, est utilisé (MLDP1, les trajectoires des parcelles sont calculées à partir de vents incrémentaux). Dans le schéma d'ordre 1, la composante fluctuante due à la turbulence du vent est obtenue en utilisant l'énergie cinétique turbulente diagnostiquée au sein du modèle de prévision numérique du temps qui produit les prévisions de vents.

Le dépôt humide dans le MLDPn est traité à l'aide d'un schéma de taux d'interception mouillé lorsque la particule est dans un environnement saturé (nuage). Le champ de précipitation n'est pas directement utilisé dans le MLDPn, mais le taux de retrait du traceur est proportionnel à la fraction nuageuse locale et la masse de la particule. La fraction nuageuse locale est fonction de l'humidité relative. Bien que non utilisé par défaut, un paramétrage physique plus réaliste peut être activé lorsque des champs de taux de précipitation sont disponibles. Le dépôt sec en MLDPn se produit lorsqu'une particule est soumise à une réflexion à la surface du sol. Il est modélisé en termes de vitesse de dépôt à sec et de probabilité d'absorption. La vitesse de dépôt est calculée en supposant qu'une particule contribue au flux total de dépôt en surface proportionnellement au matériau traceur qu'elle porte lorsqu'elle se trouve dans une couche adjacente à la surface du sol.

La source des émissions peut prendre en compte des taux d'émission qui varient dans le temps pour chacun des radionucléides ou polluants. En ce qui concerne les éruptions volcaniques, on utilise la distribution granulométrique des particules pour modéliser les effets de la sédimentation gravitationnelle dans les calculs de trajectoires selon la loi de Stokes. Ce schéma peut-être activé opérationnellement selon le cas. La masse émise peut être estimée à partir de formules empiriques adaptées de Sparks *et al.* (1997) et de Mastin *et al.*, 2009,, lesquelles sont fonction de la densité des particules, de la hauteur du panache et de la durée effective des émissions. Dans le MLDPn, les concentrations de traceur à un moment et un lieu donnés sont obtenues en supposant que les particules transportent une certaine quantité de traceur. Les concentrations sont ensuite établies en calculant le temps de résidence moyen des particules, pendant une période donnée et avec un volume d'échantillonnage donné, et en les pondérant en fonction de la quantité de matière transportée par la particule.

Le MLDPn peut être exécuté en mode prévision jusqu'au jour 10 à l'aide des données du SGPD opérationnel, et jusqu'à 84 ou 48 heures à l'aide des données du SRPD opérationnel ou des produits du SHRPD en mode expérimental. Il peut également être exécuté en mode de simulation rétrospective, à l'aide des champs analysés provenant des systèmes global ou régional de modélisation. Le modèle peut être exécuté en mode inverse adjoint afin de retourner en arrière dans le temps et reconstituer la source (localisation de la source d'émission, intensité, temps et durée de l'émission). Le modèle a été largement utilisé dans cette configuration dans le cadre de la coopération entre l'OMM et le CTBTO⁷.

2.10.1.2 MLCD (Modèle lagrangien à courte distance)

Le MLCD est un modèle lagrangien de dispersion de particules décrit de façon détaillée par Flesch *et al.* (2002). Il est conçu pour l'estimation des concentrations atmosphériques et du dépôt en surface de polluants à de très courtes distances (moins de 10 km environ de la source). Comme le modèle MLDPn, ce modèle lagrangien tridimensionnel de dispersion calcule les trajectoires d'un très grand nombre de particules atmosphériques. Le MLCD est un modèle lagrangien de dispersion de particules du premier ordre, comme le MLDPn, à schéma de diffusion d'ordre 1.

L'équation stochastique de Langevin est basée sur les éléments de turbulence du vent en association avec l'énergie cinétique turbulente (ECT). Ces éléments verticaux et horizontaux variables sont générés à partir d'une série d'observations du vent « fournies par l'utilisateur » (vitesse + direction) dépendantes du temps par l'intermédiaire d'un modèle à « deux couches » (Wilson et Flesch, 2004). Le modèle MLCD peut prendre en considération la diffusion horizontale pour les échelles non résolues survenant à des échelles de temps plus longues que celles associées à l'ECT. Les processus d'élimination que sont la

⁷ CTBTO signifie Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization)

décroissance de la radioactivité, le lessivage par voie humide et le dépôt sec peuvent également être simulés par le modèle. Le modèle MLCD peut être exécuté en mode avant ou inverse.

2.10.2 Modèle trajectoire

Le modèle trajectoire est un outil simple conçu pour calculer la trajectoire de quelques parcelles d'air se déplaçant dans le champ de vent de l'atmosphère en 3D. Le modèle est décrit dans D'Amours et Pagé (2001). Seul le transport par les vents est considéré sans tenir compte de tout autre processus physique ou atmosphérique. L'advection d'une masse d'air est calculée selon un schéma de Runge-Kutta d'ordre 4.

Le modèle estime les trajectoires des parcelles, leur provenance ou arrivée au même emplacement géographique, pour différents niveaux dans la verticale. L'emplacement et les niveaux sont définis par l'utilisateur. Le modèle peut être exécuté afin d'obtenir une estimation rapide de la trajectoire attendue d'une parcelle d'air, dont les points d'origine et d'arrivée (rétro-trajectoire) sont précisés en tant que paramètre d'entrée.

2.10.3 Produits

2.10.3.1 Mandats nationaux

La section de Réponses aux urgences environnementales (SRUE) du CMC fournit une orientation spécialisée sur la dispersion des matières dangereuses (chimiques, biologiques) qui ont été libérées dans l'atmosphère. Les demandes sont reçues par l'entremise du Centre national des urgences environnementales (CNUE) d'Environnement et changement climatique Canada (ECCC). Les produits sont adaptés à chaque situation spécifique et peuvent comprendre des trajectoires tridimensionnelles, des concentrations de polluants dans l'air pour différentes couches, des cartes de dépôt humide et sec. Le CMC possède un système, appelé AutoSim, qui produit automatiquement des simulations de phénomènes de longue durée comme des incendies de forêt, des éruptions volcaniques continues (Eyjafjallajökull) ou des rejets nucléaires (p. ex. Fukushima Daiichi).

En cas de rejets de matières radiologiques dans l'atmosphère, le CMC appuie le Plan fédéral en cas d'urgence nucléaire (PFUN) du Canada à l'aide de la modélisation de la dispersion atmosphérique en mode avant ou inverse aux fins de planification, de calcul des doses qui permet d'évaluer les répercussions sur la population au moyen d'un système de support en cas d'accident-incident nucléaire nommé ARGOS (Système opérationnel de signalement d'accident et de conseil)..

2.10.3.2 Mandats internationaux

Dès la réception d'une demande de soutien en cas d'urgence nucléaire ou radiologique provenant du pouvoir délégué d'un pays membre de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), le Centre météorologique régional spécialisé (CMRS de Montréal, situé au CMC) fournira l'ensemble normalisé des produits de base suivants :

- Trajectoires tridimensionnelles commençant à 500, 1 500 et 3 000 m au-dessus du sol, avec l'emplacement de particules indiquées aux heures synoptiques.
- Concentration de polluants, en Bq/m³, intégrée dans le temps dans la couche située à 500 m au-dessus du sol.
- Dépôt total (humide et sec), en Bq/m², du temps de rejet jusqu'à la fin de la troisième période.

Le CMC peut également fournir des cartes d'estimation des concentrations atmosphériques pour de nombreux niveaux de l'atmosphère de même que des cartes d'estimation du dépôt total à la surface à divers intervalles.

La modélisation inverse est fournie sur demande afin de soutenir les activités de l'Organisation du Traité d'interdiction complète, comme le définit le *Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision* de l'OMM.

Le CMC est également désigné comme le Centre d'avis de cendres volcaniques de Montréal. Il fournit des produits de modélisation et des aides à la prévision des cendres volcaniques dans sa zone de responsabilité, selon l'Annexe 3 de la Convention relative à l'aviation civile internationale, publiée par l'Organisation de l'aviation civile internationale, pour la prestation des services météorologiques pour la navigation aérienne internationale.

3 Activités de recherche prévues et modifications du STDP opérationnel attendues au cours des prochaines années

3.1 Système global de prévision déterministe (SGPD)

3.1.1 Assimilation de données

- **Assimilation des données de radiance**

Les données produites par quatre capteurs IR hyperspectraux (AIRS et IASI [METOP 1-2], 142 canaux; CrIS, 103 canaux) ainsi que les données des canaux micro-ondes de l'ATMS sont assimilées aux opérations. La corrélation des erreurs entre les canaux est prise en compte pour toutes les radiances. À l'aide de cette nouvelle configuration, une étude sur l'assimilation des données des canaux infrarouges sensibles à la surface terrestre a été réalisée et a révélé des effets importants (Dutta *et al.*, 2016). Afin de mieux coordonner les analyses relatives à la surface et à l'atmosphère, la R et D est maintenant axée sur l'assimilation, à l'aide du CaLDAS, des données de température de l'épiderme dans l'analyse de surface.

Au moment d'écrire ces lignes, les données d'un seul canal sont assimilées pour les divers satellites géostationnaires (canal vapeur d'eau). MTSat a été remplacé par HIMAWARI. Depuis l'automne 2016, des essais sont en cours sur l'assimilation des données de plusieurs canaux provenant des capteurs géostationnaires, dont l'adaptation au satellite GOES-R à venir. Le but précis consiste à améliorer l'analyse de l'humidité et à réviser le contrôle de la qualité des données d'humidité provenant de radiosondes.

L'impact des gradients horizontaux pour les observations de trajectoire oblique a été testé et une procédure rentable a été identifiée. Des canaux de température plus élevés (AMSU-A et ATMS) ont été trouvés sensibles à ces gradients, et l'algorithme s'est avéré améliorer l'assimilation et les performances de prévision. La procédure sera regroupée avec d'autres modifications dans une mise à niveau vers les opérations. Les résultats seront publiés début 2017.

En 2016, Météo France a organisé une comparaison internationale de l'incidence de l'assimilation des données de radiance provenant de l'IASI (METOP 1 et METOP 2). Plusieurs centres de prévision numérique du temps (PNT), y compris le Centre météorologique canadien (CMC), y ont participé. Nous avons fourni les résultats de cycles d'assimilation obtenus sur une période de trois mois, à l'aide de la version la plus récente de notre système (décrite à la section 1). Les résultats devraient être publiés d'ici le début de l'année 2017.

- **Correction des biais de radiance**

La méthode couramment utilisée pour estimer les biais des erreurs d'observation de radiance est fondée sur une analyse variationnelle distincte dans laquelle aucune donnée de radiance des satellites n'est assimilée. Cette analyse sert d'état de référence pour l'estimation des coefficients du modèle de biais faisant appel aux données obtenues au cours des 7 jours précédents. La procédure fonctionne bien (Buehner *et al.*, 2015), mais de nombreux autres programmes doivent être exécutés dans la suite opérationnelle pour calculer et appliquer la correction de biais, en plus de l'analyse variationnelle distincte. Dans le but surtout de simplifier les procédures actuelles, l'utilisation de la méthode variationnelle pour la correction des biais, dans laquelle les coefficients de correction des biais sont mis à jour pendant la principale analyse EnVar, est actuellement à l'étude et est comparée à l'approche courante en vue d'un remplacement éventuel.

- **Données des vents d'AMV et d'ADM-Aeolus**

Des progrès significatifs pour une meilleure assimilation des vecteurs de mouvement atmosphérique (AMV) ont été réalisés récemment dans plusieurs centres de PNT. En particulier, UK Met Office a développé un nouvel algorithme pour spécifier les erreurs d'observation dans lesquelles l'erreur est divisée en deux composantes : une composante statique qui représente l'erreur de suivi et un composant dépendant du flux qui estime l'erreur d'affectation de hauteur. Cet algorithme est actuellement testé dans nos systèmes d'analyse pour une mise en œuvre opérationnelle. En attendant, nous allons tester un nouvel algorithme qui prend explicitement en compte l'erreur d'affectation de hauteur. Les résultats seront comparés à ceux de l'algorithme Met Office du Royaume-Uni.

Actuellement, l'amincissement des données de satellites géostationnaires est effectué sur une grille de latitude de 1,5 degré alors qu'il est effectué sur des boîtes de 180 km pour les satellites en orbite polaire. Nous avons développé une nouvelle façon d'affiner les observations en fonction de la qualité des données et de la distance minimale et l'écart d'heure d'observation entre les données afin d'atténuer l'impact négatif des corrélations d'erreurs. Cette approche ne nécessite pas de grille pour sélectionner les observations et permet de varier de façon plus flexible la distance d'amincissement, qui peut dépendre, par exemple, de la latitude, de la région ou d'autres critères pouvant être utilisés pour définir des distances d'amincissement optimales. Enfin, la qualité des nouveaux AMV tels que le composite LEO-GEO et le satellite GOES-16 sera évaluée.

Le lancement d'Aeolus est prévu pour le printemps de 2018. L'incidence de l'extraction des profils de vents à partir d'Aeolus sera évaluée dès que le produit sera accessible. Nous participons aussi à une campagne de validation des produits Aeolus dans l'Arctique canadien.

- **Sensibilité des prévisions aux observations**

L'étude d'une nouvelle approche pour calculer l'incidence de la sensibilité des prévisions aux observations (FSOI pour *Forecast Sensitivity Observation Impact*) est en cours. L'approche réunit les aspects des méthodes FSOI existantes fondées sur le modèle adjoint et sur le modèle d'ensemble. La nouvelle approche convient au calcul de la FSOI en vue d'une analyse EnVar déterministe. Elle fait appel à un ensemble de prévisions pour propager la sensibilité des prévisions depuis la période de validité de la prévision jusqu'à la période de validité de l'analyse, et à une approche variationnelle itérative afin d'obtenir la sensibilité relative aux observations. L'approche fait actuellement l'objet d'une comparaison avec la méthode classique du modèle adjoint dans laquelle la propagation d'une période de prévision à une période d'analyse est effectuée à l'aide du modèle adjoint du modèle de prévision. Comme dans d'autres approches FSOI fondées strictement sur les ensembles, le besoin d'utiliser la localisation de la covariance spatiale peut être une limite et, par conséquent, sera une priorité en matière de recherche.

- **GPS-RO**

Les données de GPS-RO sont assimilées selon des procédures prudentes. Ces données fournissent des renseignements exacts sur la structure verticale de l'atmosphère à l'échelle mondiale et sont particulièrement précieuses dans les régions éloignées, où les radiosondes sont rares. Les données sont très bien étalonnées (Aparicio, 2016) ce qui réduit la correction des biais des données de radiance (Aparicio et Laroche, 2015). Une étude a été réalisée en vue de la remise en œuvre, à l'aide d'opérateurs d'observations plus rigoureux, principalement pour accroître les avantages de l'étalonnage. Il existe deux possibilités de transfert : 1) les signaux GPS se reflètent souvent à la surface de l'océan, et sont captés aussi. Ils sont normalement ignorés, mais se révèlent importants pour l'assimilation. Un opérateur d'observations a été mis au point, dans un contexte de recherche, pour assimiler les angles de réflexion (Aparicio *et al.*, 2016); 2) Même si les données sont bien

étalonnées, il faut prendre en compte les gradients horizontaux pour lier cet étalonnage à l'atmosphère modélisé d'une PNT. Donc, les opérateurs d'observations de GPS-RO ont été adaptés afin de tenir compte de cet effet. Cette approche a fait l'objet d'une évaluation en mode recherche et sera transférée aux opérations. Il est prévu que la réflexion et les gradients seront traités aux opérations à l'avenir (~2017).

- **Données GPS basées à la surface**

L'assimilation du délai total zénithal (DTZ) provenant du réseau E-GVAP comptant plusieurs centaines de stations, surtout en Europe, fait maintenant partie de l'analyse. Des travaux de R et D ont été réalisés pour évaluer, à l'aide du diagnostic de Desroziers, les corrélations temporelles des erreurs de GB-GPSII est prévu d'acquérir des observations de plus de sites GPS au Canada. Nous explorons actuellement la possibilité de traiter nous-mêmes les données brutes des récepteurs GPS provenant des sites nord-américains, car la distribution gratuite de données ZTD traitées du réseau GPS de la a cessé à l'automne 2016.

- **Missions PCW et TICFIRE**

Les activités associées à la mission de télécommunications et de météorologie en orbite polaire (PCW pour *Polar Communications and Weather*) sont actuellement suspendues pour des questions d'ordre financier. Néanmoins, de nouvelles possibilités pour les scénarios orbitaux ont été publiées récemment (Trishchenko *et al.*, 2016). Si le Canada ne peut aller de l'avant avec la mission PCW, il peut collaborer avec l'ESA qui travaille actuellement sur une mission similaire.

La mission TICFIRE vise à observer la Terre dans l'infrarouge lointain (15-50 microns). Le concept prévoit l'utilisation d'un petit satellite. Un prototype a été mis au point et testé à bord d'un avion et à partir du sol à la station Eureka. Le projet est réalisé en collaboration avec l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Un modèle rapide de transfert radiatif qui convient à la fois à l'extraction et à l'assimilation des données a été élaboré.

3.1.2 Modèle

Les activités de recherche se concentreront sur la simulation d'un budget amélioré du cycle de l'eau, visant à des échanges d'énergie plus réalistes entre les différents sous-composants. Cela devrait augmenter le réalisme général du modèle GEM grâce à de meilleures interactions entre les différentes paramétrisations physiques.

Les changements de modèle prévus d'ici 2019 comprennent:

- 84 niveaux au lieu de 80, avec le premier niveau thermodynamique à 10m au-dessus de la surface et le premier niveau pour le momentum à 20m. Le toit du modèle demeure à 0.1 hPa. La résolution verticale diminue de façon monotone avec l'altitude;
- Toutes les tendances physiques seront moyennées le long des trajectoires semi-lagrangiennes, ce qui réduit les biais des précipitations;
- L'humidité ainsi que l'eau en phase solide et liquide seront conservés lors du transport afin de réduire le biais des précipitations;
- Le filtre des champs géophysiques sera réduit;
- En général, on travaillera à réduire la sensibilité des paramétrages physiques envers la distribution des niveaux;
- Une mise à jour du schéma de radiation *correlated-K* sera effectuée avec trajectoires de gaz en 3D;

- Un terme de diffusion de chaleur par les schémas de blocage et de force de trainée orographique sera introduit afin de réduire le biais de température;
- Les schémas de convections (peu profonde et profonde) seront ajustés, notamment en ce qui a trait à la prise en compte du transport vertical du momentum;
- Le schéma de convection peu profonde actuel (CLEF) sera remplacé par celui de Bechtold;
- On offrira des champs de température et d'humidité filtrées à l'entrée du schéma de condensation explicite afin de réduire le biais des précipitations;
- Le schéma de couche limite basé sur l'énergie cinétique turbulente (TKE) sera révisé, notamment en ce qui a trait aux propriétés nuageuses, aux longueurs de mélanges et de dissipations, ainsi que l'introduction d'un terme de diffusion de chaleur;
- En général, le cycle de l'eau sera grandement amélioré avec de meilleures propriétés conservatives, ainsi qu'une réduction du biais des précipitations;

3.2 Système global de prévision d'ensemble (SGPE)

3.2.1 Assimilation des données

L'assimilation des données dans le SGPE est réalisée à l'aide d'un filtre de Kalman d'ensemble (FKEn). Dans le cas du SGPD, l'assimilation des données se fait au moyen d'une procédure variationnelle d'ensemble qui utilise les statistiques d'erreur d'ébauche du FKEn. Le SGPD et le SGPE utilisent sensiblement le même ensemble d'observations. Par conséquent, les activités de recherche et les changements effectués dans le contexte du SGPD seront également mis en œuvre dans le SGPE (voir la section 3.1.1).

La résolution de la grille horizontale sera accrue. La grille globale uniforme de 800 x 400 sera remplacée par une grille Yin-Yang à résolution de 39 km.

Le toit du modèle passera de 2 à 0,1 hPa. En utilisant le même toit de modèle pour les systèmes d'ensemble et les systèmes déterministes, il sera plus facile d'utiliser les statistiques d'ensemble dans les systèmes d'analyses d'ensemble variationnelles à l'échelle mondiale et régionale.

L'algorithme de mise à jour de l'analyse différentielle (MaJAD) sera utilisé plutôt que la procédure de finalisation par filtre numérique.

Actuellement, le FKEn s'appuie sur la vérification des données d'ébauche fournies par le schéma d'ensemble variationnel (En-Var) pour effectuer le contrôle de la qualité des observations. Le critère de Huber sera aussi utilisé comme méthode de contrôle de la qualité supplémentaire dans le contexte du FKEn.

Des observations infrarouges satellitaires seront utilisées par le FKEn;

Le *hybrid-gain* sera utilisé afin d'optimiser la combinaison du FKEn et de l'analyse variationnelle;

Un ensemble de champs de surface sera désormais produit par le Système canadien d'assimilation de données de surface (SCaADS, connu sous l'acronyme CaLDAS), voir section 3.1.1.

La fenêtre du cycle d'assimilation des données passera de 6 h à 3 h afin de mieux suivre les caractéristiques dynamiques à haute résolution et d'appuyer les prévisions à haute résolution ou les applications d'assimilation de données.

Davantage d'observations satellites ainsi que données in-situ seront utilisées dans le système FKEn.

3.2.2 Modèle

- La résolution horizontale sera augmentée. La grille globale actuelle de 800x400 sera remplacée par une grille Yin-yang de résolution 39km;
- Le toit passera de 2 à 0.1 hPa. Cela est équivalent au modèle déterministe, ce qui facilitera l'utilisation des statistiques des ensembles dans l'approche hybride d'analyse variationnelle des systèmes régionaux et globaux;
- L'algorithme de Mise-à-jour d'analyse par Incrément (MAI, connu sous l'acronyme IAU) remplacera le filtre digital dans l'initialisation;
- Un couplage des prévisions du GEPS avec le modèle océanique NEMO (GIOPS voir section 2.8.1 et 3.8.1) sera candidat à l'implémentation opérationnelle en 2017 ou en 2018.

3.3 Système régional de prévision déterministe (SRPD)

3.3.1 Assimilation des données

D'importants changements sont prévus au système d'assimilation des données du SPRD au cours des années à venir, en raison de la transition graduelle vers un système à cycles rapides qui permettra d'améliorer les prévisions à court terme d'ici 2020. En 2018, alors que la taille des mailles de la grille horizontale du modèle sera réduite à 2,5 km, l'assimilation des données dans le SPRD passera d'un cycle intermittent à un cycle perpétuel, ce qui comprendra le remplacement de l'initialisation du filtre numérique par la nouvelle approche de mise à jour de l'analyse différentielle. En 2019, les covariances des erreurs d'ébauche dérivées de l'ensemble 4D-EnVar du SPRD, qui proviennent actuellement du système global FKEN, seront produites par un système d'ensemble à aire limitée de 10 km fondé sur un FKEN ou une approche par FKEN-Var.

Il est aussi prévu de faire l'assimilation de données d'observations plus récentes ou plus denses, à commencer par la présentation horaire de données de surface en 2018, puis la réduction de l'écrémage des observations des radiances satellitaires ainsi que l'ajout de l'assimilation des radiances qui ont des effets sur la température de surface, en 2018. La R et D en matière d'assimilation des observations radars au sol est continue et l'instauration graduelle de ces aboutissements dans le système d'assimilation SRPD devrait commencer en 2018 et se terminer d'ici 2020.

3.3.2 Modèle

- Le SRPD se joindra au Système de prévision d'ensemble régional (SRPE) en tant que membre contrôle; dans ce cadre la résolution horizontale du modèle demeurera à 10km alors que la taille du domaine augmentera pour mieux couvrir l'Atlantique Nord ainsi que les Caraïbes;
- Le RDPS sera basé sur GEM5 et tous les changements liés au modèle viseront l'unification des codes dynamiques et physiques des systèmes (SGPD, SRPD, SGPE, SRPE);
- La résolution verticale augmentera alors que l'on adoptera une nouvelle liste de niveaux (comme pour le GDPS) avec le premier niveau du momentum à 20m et celui de la thermodynamique à 10m au-dessus du sol;
- Un nouvel ensemble de paramétrisation physique sera mis en œuvre utilisant des schèmes équivalents à ceux du SGPD à 15-km, et incluant les ajustements nécessaires pour la résolution de 10 km. La version à 10 km deviendra le membre de contrôle du système régional de prévision d'ensemble (SRPE).
- Le modèle utilisera de nouveaux champs géophysiques plus précis ainsi que des champs améliorés lorsqu'il s'agit des propriétés de la topographie non résolue;.
- Le biais de précipitation élevé sur la côte ouest en hiver sera investigué.

3.4 Système régional de prévision d'ensemble (SRPE)

3.4.1 Assimilation des données et analyse objective

En 2018, l'approche d'assimilation 4D-EnVar utilisée dans le SRPD sera ajoutée au système SRPE aux fins d'analyse de contrôle à 10 km. Pour obtenir un ensemble d'analyse à 10 km, il faut recentrer les perturbations de l'analyse globale FKEn à 50 km autour de la nouvelle analyse de contrôle fondée sur l'EnVar.

3.4.2 Modèle

- Tous les membres adopteront la configuration identique à celle du membre de contrôle. L'espacement horizontal des mailles passera de 15 à 10 km, alors que la résolution verticale sera augmentée en adoptant un nouvel ensemble de 84 niveaux verticaux RDPS avec le premier niveau de dynamique (thermodynamique) à 20 (10) mètres AGL. La taille du domaine sera augmentée pour étendre la couverture sur la région de l'Atlantique Nord et des Caraïbes ;
- Le SRPE sera basé sur GEM5 utilisant un nouvel ensemble de schèmes physiques ainsi que des nouveaux champs géophysiques, suivant le concept de l'unification de la physique;
- Le REPS fera 4 prévisions par jours (au lieu de 2) au temps de départ de 00, 06, 12 et 18 TUC;
- Les prévisions seront disponibles plus tôt, vers T-3h, similairement au SRPD;
- L'échéance sera augmentée à 84h (ou 120h) de façon expérimentale;
- les paramétrages de la convection stochastique profonde et de la couche limite seront développés et leurs impacts sur les prévisions du SRPE seront étudiés;
- Travail sur l'amélioration des relations entre la capacité de prévision-écart et la dispersion pour les champs de la haute atmosphère (trop de dispersion en été, trop peu en hiver).
- Le couplage avec le CaLDAS (champs de surface) sera considéré ainsi que le couplage avec le modèle d'océan.
- On étudiera l'approche de modèles multiples avec les NCEP dans le cadre de travail du SPENA-LAM.

3.5 Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD)

Au cours de l'année à venir, on prévoit mettre en œuvre une version du modèle GEM 2,5 km très semblable à l'actuel SHRPD aux Opérations du SMC; cette version du modèle sera le principal produit déterministe pour les prévisions numériques du temps à courte échéance, de sorte qu'elle sera, en réalité, le nouveau SRPD. Certaines des modifications prévues au système GEM 2,5 km sont énumérées ci-dessous.

3.5.1 Assimilation des données

La méthode de réduction d'échelle sera remplacée par la technique d'assimilation 4D-EnVar actuellement utilisée pour établir les conditions atmosphériques initiales du SRPD à une résolution de 10 km; autrement dit, les champs d'analyse atmosphérique seront produits directement sur la grille de 2,5 km. On planifie que le système à haute résolution deviendra le système régional (SRPD) en 2018. À l'automne 2017, il est prévu que le HRDPS-2.5 km devienne opérationnel, un changement de statut par rapport à expérimental, et avec cette mise à niveau, CaLDAS deviendra opérationnel. Le travail actuel de recherche et de développement avec CaLDAS est axé sur (i) l'assimilation de plus d'informations de télédétection spatiale (ii) le couplage de CaLDAS avec le nouveau schéma SVS (Sol, Végétation et Neige) et (iii) l'expansion de CaLDAS au domaine GDPS avec un couplage plus direct avec le système d'ensemble atmosphérique GEPS. La prochaine mise en œuvre de CaLDAS est prévue pour le HRDPS à l'automne 2018. Dans cette implémentation, l'objectif est de remplacer ISBA par SVS, d'inclure l'assimilation des températures de brillance de l'humidité du SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity) / SMAP (Soil Moisture Active Passive) satellites avec des récupérations de température de peau de GOES. Le couplage de CaLDAS avec le GEPS en altitude commencera au début de 2018. Il est prévu que la version de CaLDAS inclura SVS, SMOS / SMAP et les récupérations de température cutanée des orbiteurs polaires, AIRS / CRIS / IASI.

3.5.2 Modèle

Les principales pistes de développement sont les suivantes :

- Modifications mineures à la convection paramétrée, en ce qui concerne la fonction de déclenchement dans le schéma de Kain et Fritsch.
- Amélioration des prévisions à très court terme en vue de produire de meilleurs champs de référence pour l'assimilation de données en recyclant les variables pronostiques et semi-pronostiques tirées du schéma de turbulence atmosphérique.
- Implémentation du schéma de microphysique Predicted-Particles-Properties (P3; Morrison and Milbrandt, 2015).
- Utilisation d'une nouvelle série de niveaux verticaux où les premiers niveaux de quantité de mouvement/de thermodynamique sont à 10 m/5 m au-dessus du sol (AGL).
- Essai et mise en œuvre de nouveaux schémas de surface terrestre (SVN) et (BEU) pour les surfaces naturelles et urbaines.
- Mise en œuvre d'une version de CaLDAS, avec assimilation des données de SMAP et des données de température de luminance en bande L de SMOS et des incréments d'analyse sur la résistance stomatique de surface fournie par le schéma de surface terrestre SVN.
- À une étape ultérieure, le domaine sera possiblement agrandi de manière à couvrir presque toute la région arctique (fusion avec le système expérimental CAPS voir section 2.5.2). Également le couplage avec un modèle océanique (NEMO) et un modèle de glace de mer (CICE) sera à l'étude.
- Les améliorations aux paramétrisations sous mailles décrites aux sections 3.1.2 et 3.3.2 seront testées au sein du modèle kilométrique.

3.6 Systèmes de prévision de la qualité de l'air

3.6.1 Système régional de prévision déterministe de la qualité de l'air (SRPDQA)

L'orientation générale future du SRPDQA est de créer une série opérationnelle de prévisions de la qualité de l'air avec une assimilation des données chimiques, analogue aux prévisions météorologiques opérationnelles; pour créer des prévisions globales de qualité de l'air. Pour ce faire, la même plateforme de modélisation GEM-MACH sera utilisée, laquelle, à son tour, alimentera les prévisions régionales, puis les prévisions locales et à haute résolution.

Un autre objectif est d'allonger la période de prévision du SRPDQA. Les produits opérationnels actuels fournissent seulement des prévisions de 48 heures aux prévisionnistes. L'utilisation de meilleures conditions initiales et, dans le cas d'une configuration régionale à aire limitée, des conditions frontière étendues sont considérées comme essentielles pour atteindre cet objectif.

Au cours des saisons d'incendies de 2012 et 2013, une installation expérimentale pour recevoir des données sur les émissions dues aux incendies de forêt en temps quasi réel dans GEM-MACH, fondé sur les mesures télédéteectées par satellite, a été mise à l'essai (Pavlovic *et al.*, 2014). Des prévisions quotidiennes de 48 heures ont été préparées pendant l'été et rendues disponibles aux fins d'évaluation interne. Ce système prototype est l'un des résultats de la collaboration entre Environnement et Changement climatique Canada et le Service canadien des forêts. Au cours des saisons d'incendies de 2014 et 2015, ce système, appelé FireWork, était exécuté par les services opérationnels d'Environnement Canada en mode expérimental et ses produits étaient rendus accessibles aux prévisionnistes et aux utilisateurs externes deux fois par jour (Pavlovic *et al.*, 2016). En mai 2015, l'analyse régionale déterministe de la qualité de l'air (ARDQA) a aussi été reliée au système FireWork; ainsi, l'ARDQA-FW a produit des analyses objectives, tributaires de l'effet des incendies de forêt, pour deux polluants, PM_{2,5} et PM₁₀, en surface. Plus récemment, au printemps 2016, le système FireWork a été mis à niveau de sorte qu'il est opérationnel d'avril à octobre; il sera exécuté chaque année avec le SRPDQA durant la saison des incendies (Moran *et al.*, 2016a).

Au printemps 2016, on a élaboré et mis en œuvre de manière opérationnelle une version de GEM-MACH fondée sur GEM-4, qui comprend des améliorations, comme l'advection du traceur et la conservation de la masse du traceur, un schéma actualisé de dépôt sec en phase gazeuse avec mise à l'échelle de l'indice de surface foliaire ainsi que de nombreuses autres modifications importantes au traitement des flux de surface, de nouvelles conditions chimiques aux frontières latérales et un nouveau schéma de diffusion verticale (Moran *et al.*, 2016b).

À court terme, les pistes pour le développement et l'amélioration du SRPDQA sont les suivantes :

- mise à l'essai et évaluation des prévisions du jour 3 du SRPDQA en s'appuyant sur un pilotage météorologique prolongé soit avec le SRPD étendu, soit avec le SGPD;
- mise à l'essai et évaluation d'un nouveau module d'estimation des émissions dues aux incendies de forêt et d'un nouveau mécanisme d'élévation du panache (FireWork);
- mise à jour de l'entrée des fichiers d'émissions par le SRPDQA selon l'utilisation des plus récents inventaires d'émissions nationales et des renseignements complémentaires améliorés (p. ex., substituts spatiaux et temporels et profils de spéciation; voir Moran *et al.*, 2015);
- mise à l'essai de l'utilisation des nouvelles conditions chimiques de l'ozone aux frontières latérales obtenues par interpolation « dynamique » de la climatologie mondiale de l'ozone;
- mise à l'essai de l'utilisation, pour de nombreuses espèces, des conditions chimiques aux frontières latérales provenant d'un système global de prévision déterministe de la qualité de l'air (SGPDQA; voir la section sur le GEM-MACH global);

- mise à l'essai de l'initialisation avec des données chimiques fondée sur de nouveaux champs d'analyse objective tridimensionnels (OA version 2);
- amélioration de la modulation météorologique de certains secteurs d'émissions comme les émissions biogéniques et de poussières diffuses, et le comportement phénologique de certaines variables telles que l'indice foliaire dans le module sur le dépôt sec;
- amélioration de certaines représentations de procédés chimiques (p. ex., dépôt sec, valeurs J, transport des traceurs d'échelle sous-maille, élimination par voie humide des particules fines en fonction de la taille, rétroaction bidirectionnelle);
- examen des améliorations de la représentation des émissions dues aux incendies de forêt, y compris les facteurs d'émission pour différentes espèces modèles et l'algorithme d'élévation du panache;
- amélioration de la représentation de la profondeur optique d'aérosols (POA) dans le modèle.

Un objectif à plus long terme à l'étude est l'évaluation de la faisabilité et des avantages d'une approche de prévision d'ensemble pour la qualité de l'air régionale.

3.6.2 Analyse régionale déterministe de la qualité de l'air (ARDQA)

La recherche et l'élaboration en vue d'améliorer le système régional d'analyse objective existant pour les polluants de surface (p. ex., résolution plus élevée, résolution de 2,5 km, schéma de correction des biais adaptés et statistiques d'erreur) et d'élargir ce système aux autres polluants (NO₂, NO, SO₂, PM₁₀) se poursuivent. Les expériences récentes, qui ont évalué les répercussions de l'assimilation des analyses d'ozone et de dioxyde d'azote à la surface sur les prévisions, montrent une incidence positive jusqu'à 12 à 24 heures. Pour ce qui est des PM_{2,5} (sulfates et matières crustales), l'effet positif de l'assimilation des analyses de surface dépasse les 48 heures.

En 2016, le système RDAQA a été étendu pour inclure les analyses NO₂, NO, SO₂, PM₁₀ et la Cote Air Santé (CAS). L'impact de l'initialisation du modèle de prévision de la qualité de l'air avec des analyses de surface a été examiné et il est positif sur les prévisions jusqu'à 12-24 heures pour les polluants gazeux, et plus long sur les sulfates PM_{2.5} et la matière crustale. Il existe également des activités de recherche et de développement visant à améliorer le système d'analyse des objectifs régionaux existants en utilisant des statistiques d'ensemble pour les covariances d'erreurs, en améliorant l'estimation des paramètres par maximum de vraisemblance, en harmonisant l'assimilation des PM_{2.5} et des PM₁₀. Le nouveau système devrait être opérationnel en 2018.

Voici d'autres pistes de recherche :

- L'application de l'analyse pluriannuelle afin d'appuyer les études épidémiologiques et la collaboration avec le CANUE (Canadian Urban Environment Health Research consortium www.canue.ca) pour la distribution des données.

3.6.3 Assimilation des données chimiques

Une activité prioritaire au cours des récentes et prochaines années est d'incorporer la capacité d'assimilation des données chimiques au système intégré d'assimilation globale et régionale En-var d'Environnement et Changement climatique Canada. L'élément d'assimilation globale doit fournir des conditions latérales au modèle régional ainsi qu'au modèle de prévision des concentrations d'ozone. L'élaboration porte d'abord sur le résolveur d'analyse globale pour l'ozone stratosphérique et sur l'analyse régionale optimale par interpolation pour ce qui est de la qualité de l'air. Dans une phase ultérieure, un système d'assimilation des données troposphériques-stratosphériques global alimentera les

incréments d'analyse pour les versions globale ou régionale de GEM-MACH. Cela prend en considération les caractéristiques du système global de recherche d'assimilation des données chimiques variationnelles pour l'ozone et l'expérience acquise à partir du système d'analyse objective régionale opérationnelle (ARQAD). L'élaboration et la recherche connexe mèneront à des propositions futures pour un système global et régional d'assimilation chimique. À condition d'avoir une incidence positive sur les prévisions, l'assimilation régionale ferait partie du SRPDQA. L'assimilation utilisera les observations de surface et par satellite.

À court terme, les travaux de développement consistent à améliorer la prochaine version de l'analyse opérationnelle objective pour générer des analyses 3D qui seront utilisées pour initialiser le modèle GEM-MACH. Des expériences préliminaires avec un cycle de 6 heures ont été menées, montrant un impact sur la réduction de la variance d'erreur d'un facteur 2 et une diminution significative du biais.

En ce qui concerne la configuration globale, nous incorporerons la capacité de base pour l'assimilation de données chimiques sans ensembles constitutifs dans le système d'assimilation EnVar d'ECCC. Les premières applications seront l'assimilation de l'ozone stratosphérique et des conditions météorologiques plus l'ozone avec le système global. Les additions suivantes incluront l'assimilation des canaux sensibles aux constituants des températures et étudieront l'utilisation des sorties du modèle climatologique pour fournir des informations d'ensemble dans une formulation hybride EnVar, des expériences d'assimilation initiales pour d'autres constituants et l'extension des applications système à l'assimilation régionale.

En préparation à la mise en œuvre d'un EnVar complet avec des ensembles de prévision, des études en EnKF chimique et l'harmonisation du contenu informationnel de différents constituants chimiques ont été réalisées en collaboration avec l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique. Des simplifications informatiques à l'EnKF ont également été explorées. Le schéma conçu pour l'assimilation de données chimiques est appelé le filtre de Kalman paramétré.

Une étude sur l'utilisation des observations satellites et au sol de la profondeur optique d'aérosols (POA) sera entreprise au cours des prochaines années. Cela consistera d'abord en une comparaison des prévisions de POA de GEM-MACH avec les observations, suivie de développements pour l'assimilation des données satellitaires et au sol de POA.

3.6.4 Assimilation de l'ozone et prévision de l'indice UV

La mise en œuvre opérationnelle du Système interactif de prévision déterministe de l'ozone au sein du Système Global de Prévisions Déterministe (SGPD) avec capacité de prévision de l'indice UV devrait avoir lieu dans un proche avenir. Une telle mise en œuvre nécessite l'incorporation de plusieurs modules d'assimilation d'ozone dans le système opérationnel d'assimilation de données de prévision numérique du temps. Une telle mise en œuvre repose sur notre capacité à démontrer que l'inclusion d'un constituant d'ozone pronostique et actif sur le plan radiatif dans le modèle ECCC GEM NWP contribue à l'amélioration des prévisions météorologiques à moyenne échéance.

L'assimilation de l'ozone stratosphérique est effectuée en mode recherche avec le système global d'assimilation des données chimiques variationnelles afin de fournir des cartes prévues des concentrations d'ozone aux fins d'utilisation dans la prévision de l'indice UV. En 2016, l'assimilation variationnelle exécutable de ce système a été remplacée par celle de l'EnVar, cette application sans utilisation d'ensembles de prévision.

Une étude sur l'assimilation de l'ozone par colonnes utilisant des sondes à colonnes multiples et impliquant une correction de biais et une réestimation des variances de l'observation de l'ozone et des erreurs de prévisions a été entreprise et devrait être achevée dans environ un an. Ceci implique l'assimilation des données de colonne d'ozone total des instruments GOME2 des satellites Metop-A et B, OMI sur Aura et OMPS-NM sur Suomi-NPP et l'utilisation de diverses autres sources de validation, y compris les instruments au sol de type Brewer et Dobson. Pour donner suite à des études d'assimilation avec SBUV / 2 et OMPS-NP, des données de profil de colonne partielle satellite et TropOMI devraient être utilisées dans le futur.

Une approche pour le calcul de l'indice UV pour les conditions de ciel clair et de ciel entier reposant sur les irradiances UV à large bande calculées par le modèle de prévisions météorologiques est en cours d'optimisation. Il utilise la configuration d'assimilation et de prévision de l'ozone ci-dessus pour fournir le champ d'ozone fourni au code radiatif au lieu d'une climatologie de l'ozone. Cette optimisation devrait être terminée dans un an. Le produit indice UV dérivé de cette méthode, sinon d'autres, doit être évalué par rapport au produit opérationnel actuel. Le nouveau système de calcul de l'indice UV devrait être mis en œuvre dans le cadre du système mondial de prévision au cours des prochaines années.

3.6.5 Modélisation en qualité de l'air pour l'Arctique

Une capacité basée sur GEM-MACH pour la modélisation de la qualité de l'air dans l'Arctique est en cours de développement. L'amélioration initiale de l'adaptation de GEM-MACH à la modélisation des régions nordiques et de l'Arctique canadien incluait les conditions de couverture de glace de mer (dépôt sec et émission de sel marin), les conditions chimiques latérales et les émissions de biomasse. La version arctique du modèle GEM-MACH a été utilisée pour une évaluation modèle des impacts des émissions de la navigation maritime dans l'Arctique canadien sur la qualité de l'air et les écosystèmes dans le Nord. L'évaluation a porté sur les contributions des émissions de la navigation dans l'Arctique aux niveaux actuels et futurs projetés aux concentrations ambiantes de polluants de référence, aux dépôts atmosphériques de soufre et d'azote et au chargement atmosphérique et aux dépôts de carbone noir. Un manuscrit a été préparé pour publication dans une revue scientifique (ACP).

GEM-MACH-Arctic a également été utilisé pour simuler une récente campagne sur le terrain dans l'Arctique réalisée dans le cadre d'un projet de réseau de recherche NETCARE (Réseau canadien de recherche sur le climat et les aérosols: <http://www.netcare-project.ca>). Les résultats du modèle ont été comparés aux données d'observation provenant de la surveillance au sol et des mesures in situ à bord de plusieurs plateformes mobiles pour: 1) évaluer la capacité du modèle à prédire la qualité de l'air dans l'Arctique et le Nord; 2) comprendre les sources et les processus influencer la composition atmosphérique estivale dans l'Arctique canadien. Les simulations du modèle et les comparaisons avec les observations ont pu démontrer à la fois l'importance des sources biogéniques / océaniques dans des conditions primitives et les principales voies de transport de sources anthropiques et biogéniques dans les basses latitudes pour atteindre l'Arctique pendant l'été. Divers aspects de ce travail ont été présentés lors de plusieurs conférences et ateliers. Les publications sont en préparation.

D'autres développements du modèle comprennent l'incorporation d'une représentation modèle du sulfure de diméthyle atmosphérique (DMS), qui joue un rôle important dans la formation d'aérosols et la croissance dans la couche limite marine de l'Arctique durant l'été. L'ajout de DMS dans GEM-MACH est également pertinent pour GEM-MACH, car l'oxydation atmosphérique du DMS contribue à une fraction significative du SO₂ global. D'autres études sur les sources contribuant aux charges atmosphériques d'ammoniac durant l'été dans l'Arctique et sur son rôle dans la formation d'aérosols sont également prévues, en particulier pour incorporer de nouvelles découvertes sur les émissions d'ammoniac accrues

de la toundra arctique. Grâce à la richesse des nouvelles données collectées lors des récentes campagnes sur le terrain Arctic NETCARE, d'autres comparaisons d'observation de modèles portant sur le nombre et la composition des aérosols résolus en taille seront poursuivies afin d'améliorer la capacité du modèle à prédire la composition atmosphérique dans l'Arctique.

3.6.6 GEM-MACH Global

Les efforts dans les années à venir se concentreront sur les améliorations suivantes à Global GEM-MACH:

- Introduction d'un mécanisme alternatif de chimie en phase gazeuse;
- Introduction du méthane pronostique;
- Introduction d'un module alternatif d'émission biogénique;
- Mise en œuvre des sources de brome et de la chimie;
- Ajout d'algorithmes d'augmentation du panache spécifiques aux émissions de feux de brousse, ainsi que de mécanismes adaptés pour l'injection d'émissions à différentes hauteurs;
- Des paramétrages pour la génération de NO_x par foudre seront ajoutés;
- Introduction du transport convectif profond et superficiel des espèces chimiques;
- Des tests de génération de conditions aux limites par modèle global pour la version limitée de GEM-MACH seront effectués et évalués;
- Post-traitement: les calculs de profondeur optique d'aérosol (AOD) à partir de la masse d'aérosol seront ajoutés et comparés aux observations
- Mise en place d'un nouveau module pour les processus physico-chimiques des aérosols
- Inclusion de la production de SO₂ à partir de sulfure de diméthyle (DMS)
- Couplage du cycle atmosphérique du mercure dans GEM-MACH avec le cycle du mercure océanique dans NEMO

3.6.7 Modélisation de la qualité de l'air à haute résolution

3.6.7.1 Région des sables bitumineux

La modélisation de la qualité de l'air à haute résolution se poursuit à ECCC avec des prévisions et des simulations expérimentales pour les provinces de l'Alberta et de la Saskatchewan (en mettant l'accent sur les sables bitumineux) et pour le sud de l'Ontario (en particulier les Jeux PanAm / Para-PanAm). Les deux jeux de simulations utilisent la version 2 de GEM-MACH. Huit articles issus du travail sur les sables bitumineux sont en cours de publication. Plus de travail lié au processus de ces projets est référencé plus tard dans ce document.

3.6.7.2 Modélisation de la qualité de l'air à l'échelle urbaine

Les résultats de la vitrine scientifique des Jeux panaméricains et para-panaméricains ont été résumés dans un article de recherche (Joe et al., 2017). Les leçons tirées de l'étude ont également été présentées lors d'une session spéciale de l'IWAQFR 2017.

La démonstration du modèle de qualité de l'air a donné lieu à une version modèle et à un domaine haute résolution qui continue d'être utilisé pour de nombreux projets de recherche et applications de scénarios d'émissions. Les résultats sont résumés ci-dessous:

Brises de Lac

Des simulations de sensibilité ont été présentées pour comprendre la source de la surestimation de l'ozone dans le lac Ontario par temps clair et vent léger. On en a déduit que la brise de terre à mer le matin apportait des précurseurs d'ozone à partir de l'heure de pointe du matin sur le lac Ontario. Les précurseurs sont restés dans une couche peu profonde au-dessus du lac et ont été ramenés à terre par la brise du lac en fin de matinée et d'après-midi. La combinaison d'un ciel ensoleillé, de vents légers et d'une couche superficielle de précurseurs a entraîné une production rapide d'ozone dans le modèle. Un mélange plus vertical dans la zone urbaine tôt le matin est un mécanisme du modèle qui abaisserait les prévisions d'ozone et les rapprocherait des observations. La base de données des Jeux panaméricains (à la fois les observations et les résultats du modèle) a été archivée dans le portail des données ouvertes du gouvernement du Canada.

<http://open.canada.ca/data/fr/dataset?q=Pan+Am+Games>

Surfaces urbaines

Un schéma de surface urbain a été incorporé dans GEM-MACH sur la base du paramétrage du bilan énergétique de la ville (TEB). Cela permet une meilleure simulation de l'effet d'îlot de chaleur urbain et de son impact sur les circulations de polluants atmosphériques. Le modèle GEM-MACH-TEB a été utilisé pendant 1 mois en été et 1 mois en hiver et les résultats ont été comparés aux observations effectuées et à la qualité de l'air. Une meilleure prévision de la température à Toronto a été observée en incluant TEB. De meilleurs scores pour les espèces primaires émises (par exemple CO et NOx) ont été observés avec TEB en raison du mélange de surface amélioré. Fait intéressant, la distribution pour Ox (somme de O3 + NO2) a montré peu de changement en incluant TEB suggérant que TEB a une grande incidence sur les échelles spatiales locales et les niveaux verticaux près de la surface. Ceci est encore important, car les humains sont exposés près de la surface et près des sources urbaines de COV et de NOx. Ce travail est en cours de rédaction dans un manuscrit pour publication. La recherche a commencé sur l'amélioration des cartes de flux de chaleur anthropique pour les villes canadiennes en utilisant les cartes d'émissions de CO et de NOx et les corrélations publiées entre la chaleur et les polluants (Lee et al., 2014). Les travaux se poursuivront sur ces systèmes en vue d'améliorer les prévisions de la qualité de l'air dans les environnements urbains.

Modélisation du dioxyde de carbone

Le modèle urbain GEM-MACH a également été utilisé pour simuler l'impact d'un nouvel inventaire des émissions de CO2 pour la région du Grand Toronto. L'hiver, les cartes horaires des émissions de CO2 ont été élaborées à partir du nouvel inventaire (appelé SOCE) et des champs de substitution spatiaux existants pour différentes sources (sur route, hors route mobile, résidentiel, industriel). Du CO2 a été ajouté à GEM-MACH en tant qu'espèce émise et transportée. La production de CO2 du modèle a été comparée aux mesures effectuées sur quatre sites de surface dans le sud de l'Ontario (un site du centre-ville et un site du centre-ville de Toronto, un site rural intérieur et un site rural riverain). Les prévisions étaient meilleures avec les émissions développées (SOCE) qu'avec les émissions de base (FFDAS). Les résultats de la répartition des sources hivernales de GEM-MACH ont montré que le CO2 sur le site du centre-ville était largement affecté par les sources de trafic durant la journée et les sources de chaleur résidentielles la nuit. Ce travail est résumé dans le manuscrit suivant soumis à ACDP:

Modélisation près de la chaussée

Les résultats du modèle urbain GEM-MACH ont été comparés aux observations d'un instrument à laser FTIR à longue voie sur l'autoroute la plus achalandée au Canada (route 401). La comparaison modèle / mesure a été effectuée pour différentes directions du vent et vitesses du vent. Comme prévu, pour les principaux polluants émis (NH₃, CO et NO_x), le modèle a tendance à sous-estimer les observations, car l'empreinte du modèle (espacement de 2,5 km) est beaucoup plus grande que la trajectoire du FTIR. Cependant, les facteurs d'émission calculés à partir des observations étaient semblables aux facteurs d'émission utilisés dans l'inventaire des émissions mobiles du modèle.

Modélisation de la canopée de la forêt urbaine

Dans le cadre du projet Pan Am / Para-Pan Am, la paramétrisation de la canopée forestière d'ECCC (Makar et al., Nature Communications, 2017) a été mise en œuvre à une résolution de 2,5 km couplée au paramétrage de la rétroaction GEM-MACH. Initiative internationale d'évaluation, phase 2 (AQMEII-2). Les résultats de ces comparaisons ont été présentés à l'Atelier international sur la prévision de la qualité de l'air à Toronto et à la réunion annuelle de l'Union européenne des géosciences à Vienne. L'environnement du couvert forestier (ombragé et faible turbulence) a montré une influence secondaire discernable sur le transfert radiatif des particules et les conditions météorologiques dans des simulations courtes, bien que l'environnement de la canopée ait eu un impact beaucoup plus important que les rétroactions. Ce travail vise à améliorer davantage la prévision de la qualité de l'air dans les milieux urbains et à examiner les rétroactions entre la qualité de l'air et les conditions météorologiques.

3.6.8 Investigations des processus

Effets des auvents forestiers sur la formation d'ozone

Le RAQDPS a été reconfiguré pour inclure les paramétrisations et les changements au code du modèle de tronc pour inclure les effets de l'ombrage (réduction des taux de photolyse) et de la turbulence (profils de diffusivité verticale modifiée) dans les régions boisées d'Amérique du Nord. Ces modifications ont eu un impact profond sur les concentrations prévues d'ozone - réduisant essentiellement le biais positif de longue date de l'ozone de surface dans l'est de l'Amérique du Nord à zéro. Les effets de l'environnement forestier se sont étendus à une grande partie de la basse troposphère (au niveau de 600 mb et plus), les concentrations estivales moyennes mensuelles dans la troposphère étant réduites jusqu'à 12% et les valeurs moyennes quotidiennes dans la troposphère étant réduites jusqu'à 40%. Les résultats ont été publiés dans Nature Communications. D'autres travaux sont prévus, avec l'intention d'incorporer cette paramétrisation dans les prévisions opérationnelles avec GEM-MACH.

Formation d'aérosols organiques secondaires

ECCC a mis au point un système de formation d'aérosols organiques secondaires de pointe pour l'application dans la région des sables bitumineux (Liggio et al., 2016). Ce système SOA était basé sur l'approche du set de base de volatilité (VBS). Le modèle de la boîte lagrangienne a d'abord été contraint aux observations, puis utilisé pour estimer les facteurs d'émission de la COV et les taux de vieillissement de la VBS. L'année dernière, le système VBS a été ajouté à GEM-MACH et les émissions IVOC ont été traitées sur la base des facteurs d'émission du modèle en boîte dérivée. Les résultats préliminaires du GEM-MACH montrent une augmentation significative (jusqu'à 10 µg / m³) dans le SOA modélisé sous le vent des sables bitumineux, similaire aux augmentations observées à partir de l'avion.

L'année dernière, ECCC a publié un article sur les taux de formation de SOA améliorés à partir de l'oxydation du α -pinène lorsque l'aérosol inorganique des graines est acide (Han et al., 2016). L'année dernière, les rendements améliorés de SOA ont été incorporés dans GEM-MACH pour tester la sensibilité de la formation de SOA dans la région des sables bitumineux. On a constaté que les panaches modélisés sous le vent des centrales au charbon de l'Alberta étaient les plus sensibles à ce mécanisme catalysé par les acides, bien que les améliorations du modèle SOA étaient encore inférieures à 5% des prévisions SOA du modèle de base. L'effet catalysé par un acide est réduit à des concentrations de masse d'aérosol organique plus élevées parce que la phase organique enrobe la phase inorganique et empêche les produits α -pinène de pénétrer et de réagir dans le noyau de la phase inorganique. Ce mécanisme est clairement observé en laboratoire dans des conditions contrôlées, mais on ne sait pas encore si cet état inorganique de noyau / particule organique existe réellement dans l'atmosphère. Il y avait des preuves provenant des vols d'avions que les aérosols acides dans les panaches de SO₂ amélioraient SOA par rapport à l'air de fond, mais plus de données sont nécessaires pour confirmer cette observation.

Transport et devenir des composés toxiques aéroportés :

Pour le développement du modèle de sables bitumineux, ECCC a continué à développer les capacités de GEM-MACH pour modéliser des composés toxiques en ajoutant de l'acide isocyanique (HCNO). L'HCNO est une espèce hautement toxique pour l'homme lorsqu'il est inhalé et transmis dans la circulation sanguine. Des effets néfastes sur la santé peuvent être ressentis lorsque les rapports ambiants de mélange du HCNO atteignent le niveau de ppbv. La formation rapide de HCNO a été observée par échantillonnage d'aéronefs en aval des sables bitumineux. Les émissions, le transport, la chimie et les dépôts de HCNO ont été ajoutés à GEM-MACH pour simuler la formation de HCNO sous le vent des sables bitumineux. Les observations de l'aéronef ont été utilisées pour contraindre la production secondaire de HCNO. La formation a suggéré que les camions diesel à fort débit étaient la source dominante de COV précurseurs, qui réagissent ensuite dans l'atmosphère pour former du HCNO. Le modèle a prédit des ratios de mélange de HCNO dans la gamme de faible ppbv pour les populations à proximité des émissions (communauté Fort MacKay, camps de travailleurs).

3.6.9 Rétroactions entre la météorologie et la qualité de l'air

La version de GEM-MACH qui rend compte de la qualité de l'air et des conditions météorologiques a été utilisée en conjonction avec le nouveau paramétrage de l'ombrage et de la turbulence du couvert forestier sur le domaine PanAm (voir la description de PanAm ci-dessus). Les rétroactions ont également été examinées dans le cadre d'un accord de subvention et de contribution avec l'Université du Québec à Montréal, mettant à l'essai un nouveau schéma de nucléation de la glace dans la version rétroactive de GEM-MACH pour étudier les effets des aérosols sur les processus de nucléation et l'impact ultérieur sur la microphysique des nuages. Les travaux ont porté sur l'analyse des noyaux de glace observés lors de la campagne Amundsen 2014 (partie de l'étude de terrain NETCARE) pour contraindre une version hors-ligne du modèle à développer un paramétrage de la concentration d'IN basé sur la théorie de nucléation classique. Le nouveau paramétrage est implémenté dans GEM-MACH et testé dans des simulations de la campagne de terrain NETCARE.

3.7 Systèmes spécialisés

3.7.1 Assimilation et analyse des champs de surface

3.7.1.1 SST

Une nouvelle analyse SST a été implémentée aux opérations en mode expérimental. Les données des instruments VIIRS (Suomi-NPP) et AMSR2 (GCOM-W2) sont assimilées aux données utilisées dans l'analyse opérationnelle (4 instruments AVHRR in situ et informations sur les glaces). Parallèlement à l'augmentation de la résolution de la grille d'analyse à 0,1 degré, des changements supplémentaires étaient nécessaires pour bénéficier pleinement de la résolution améliorée, comme une nouvelle matrice de corrélation d'erreurs de fond, tempêtes tropicales et prétraitement d'observations rapprochées. Plus de détails sur ce nouveau produit sont inclus dans Brasnett et Surcel Colan (2016).

3.7.1.2 CaLDAS

L'élaboration de la première version du Système canadien d'assimilation des données au sol (CaLDAS) a été achevée, et le système a été mis en œuvre en mode expérimental en 2014. Comparativement au système qui est opérationnel actuellement, le CaLDAS assimile une plus grande quantité de données à l'aide d'une technique de filtre de Kalman d'ensemble. En ce qui concerne l'humidité du sol, on continue de faire des essais avec les données de télédétection de la mission SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*) de l'ESA (2008) et de la mission SMAP (*Soil Moisture Active and Passive*) de la NASA. Ces données seront assimilées conjointement avec les températures et l'humidité de l'air près de la surface ainsi qu'avec les données sur la température de surface des satellites géostationnaires (GOES, MSG, Himawari).

Les autres modifications comprennent l'utilisation d'un nouveau schéma de surface terrestre (sol, végétation et neige – schéma SVN), qui a été mis à l'essai pour des applications locales, régionales et mondiales. Ce schéma est un prolongement du schéma ISBA actuellement utilisé par SMC-Opérations, et comprend une représentation plus détaillée des bilans hydriques et énergétiques (méthode des bilans multiples), un plus grand nombre de couches de sol, une représentation plus appropriée des processus gel-dégel du sol ainsi que de la photosynthèse. Les essais hors ligne ont démontré que le schéma SVN est supérieur à ISBA, pour la PNT et les applications hydrologiques.

L'objectif pour l'année à venir ou les deux prochaines années est de procéder à une mise en œuvre opérationnelle de CaLDAS pour les systèmes régionaux et globaux, y compris les systèmes déterministes et d'ensemble. Des travaux de recherche et développement sont en cours en vue de combiner les données satellitaires sur l'humidité du sol et les températures de surface dans le contexte d'une modélisation de la surface terrestre plus avancée. À long terme, une version hybride de CaLDAS pourrait être élaborée avec une approche variationnelle simple combinée à un filtre de Kalman d'ensemble.

En ce qui concerne la neige au sol, deux modifications importantes à l'approche actuelle seront élaborées et mises à l'essai au cours des prochaines années. À court terme, des données optiques à haute résolution (p. ex. de MODIS et de VIIRS) seront utilisées pour préciser la couverture fractionnelle de neige dans CaLDAS au moyen d'une technique fondée sur les règles. De plus, on travaille à la mise en place d'une modélisation plus perfectionnée, notamment des modèles de neige multicouche (une partie du schéma SVN) et de transfert radiatif hyperfréquence avec DMRT-ML (*Dense Media Radiative Transfer on Multi-Layers*), dans le but d'améliorer l'assimilation des données hyperfréquences provenant des capteurs AMSR-E ou de capteurs semblables dans CaLDAS.

Deux suites CaLDAS différentes doivent être mises en œuvre dans les prochaines années, une pour la région de l'Amérique du Nord (à une distance de maille de 2,5 km) fournissant les conditions initiales au SRPDHR, au SRPD et au SRPE, et une globale (à une distance de maille de 10 km) pour les systèmes SGPD et SGPE.

3.7.2 Analyse des précipitations

3.7.2.1 Analyse régionale déterministe de précipitations (ARDP)

La ARDP a atteint sa maturité. Il sera finalement inclus dans un système d'analyse combinant une analyse de précipitation déterministe à haute résolution (voir ARDPHR 3.7.2.3) et une analyse régionale de précipitation d'ensemble (AREP). L'analogue du produit d'analyse ARDP actuel deviendra alors le membre de contrôle de l'ensemble régional. En 2018, il est prévu de mettre à jour la ARDP pour inclure plus d'observations provenant des réseaux provinciaux, et pour maintenir la compatibilité de la ARDP avec le modèle régional changeant qui fournit le champ d'essai des précipitations.

3.7.2.2 Analyse régionale d'ensemble de précipitations (AREP)

L'analyse régionale déterministe de précipitations (ARDP, voir la section précédente) est générée par un système d'interpolation optimal appelé CaPA (analyse canadienne des précipitations). Le système CaPA fournit des données importantes au Système canadien d'assimilation des données au sol (CaLDAS), notamment un ensemble stochastique d'analyses de précipitations : les observations sont perturbées proportionnellement aux erreurs de mesure et de représentation qu'elles comportent, et le champ d'ébauche est, pour sa part, perturbé de façon aléatoire (en fonction de l'emplacement et l'intensité) proportionnellement à l'erreur type. Cependant, la version de CaPA utilisée par le CaLDAS a besoin d'être mise à niveau, en particulier pour pouvoir assimiler les données radars, une fonctionnalité qui est opérationnelle dans la configuration ARDP de CaPA depuis novembre 2014. Les travaux sont en cours pour mettre à niveau la version de CaPA utilisée par le CaLDAS, afin qu'elle concorde le plus possible avec la version de l'ARDP. En outre, plutôt que de créer des perturbations stochastiques dans le champ d'ébauche, ce nouveau système utilisera plutôt les champs d'ébauche du Système régional de prévision d'ensemble (SRPE), et il sera, par conséquent, connu sous le nom de configuration AREP de CaPA (analyse régionale d'ensemble de précipitations).

3.7.2.3 Analyse déterministe de précipitations à haute résolution (ADPHR)

L'ADPHR est un produit d'analyse des précipitations en cours d'élaboration qui est très semblable à l'ARDP. La principale différence entre les deux est que le champ d'essai de l'ARDP est le système de PNT du SRPD, tandis que l'ADPHR utilise le système de PNT du SHRPD comme champ d'essai. C'est pourquoi l'ADPHR produit une analyse sur une grille de 2,5 km, tandis que l'ARDP a une résolution de 10 km. Les deux produits ont une résolution temporelle de 6 h. La ADPHR produit également des précipitations moyennes pour toutes les stations hydrométriques exploitées par ECCC. Ce produit sera utilisé pour une meilleure planification de la campagne de mesures visant à la construction ou à la mise à jour de relations empiriques de niveau-flux.

L'ADPHR deviendra pleinement opérationnel au début de 2018. L'utilisation de l'ADPHR comporte quelques difficultés, notamment la fréquence d'échantillonnage des radars, qui crée un effet de « stroboscope », parce que les cellules de pluie peuvent se déplacer sur plus d'une maille de la grille entre deux balayages radars. Les données radars sont donc lissées avec une résolution de 5 km. Malgré ce lissage, les données radars qui sont assimilées par l'ADPHR ont quand même une résolution effective plus élevée que les données d'essai du modèle, étant donné que les champs des précipitations dans le SHRPD sont beaucoup plus lisses que la résolution nominale de 2,5 km.

3.8 Modélisation des océans et modélisation couplée

3.8.1 Système global de prévision glace-océan (SGPGO)

Les plans de développement du SGPGO comprennent l'amélioration du système d'assimilation pour y inclure la correction des biais des champs de température et de salinité sous-marine, des mises à jour de covariance des erreurs de fond en temps réel et un meilleur couplage glace-océan. Dans le contexte d'une extension de SGPGO pour produire des prévisions d'ensemble couplées, un cadre «multi-analyse» est en cours de développement pour SAM2. Un projet est également en cours pour produire des analyses quotidiennes faiblement couplées pour le système de prévision couplé SGPD-SGPGO.

3.8.2 Système régional de prévision de glace-océan(SRPGO)

SRPGO fonctionne depuis le 26 juin 2016 en tant que système de prévision expérimental. Il remplace le système de prévision de glace seulement (SRPG). Le produit fini a été utilisé par le Service canadien des glaces et la NOAA dans ses prévisions de routine, malgré son statut expérimental. Il a trois composantes: SRPGO-A, SRPGO-PA et SRPGO-F. Le premier assimile les données d'observation et produit une analyse de la glace de mer qui est utilisée par les composantes d'analyse et de prévision des océans (SRPGO-PA, SRPGO-F) comme conditions initiales. Le second, SRPGO-PA, produit une analyse océanique en effectuant au cours des dernières 24h une simulation glace-océan spectralement poussée pour contraindre les grandes échelles de la composante océanique vers les analyses du Système global de prévision des glaces océaniques (SGPGO). Une version de SAM2 sur le domaine SRPGO avec une extension pour couvrir l'océan Pacifique nord-est est en cours de développement. Le dernier, SRPGO-F est la composante de prévision 48h.

L'analyse de glace SRPGO-A utilise l'analyse précédente comme état de fond pour le cycle suivant. Il assimile les cartes des glaces régionales et quotidiennes du Canada, l'analyse d'images Radarsat, les instruments de télédétection (ARMS2, SSMI, SSMIS, ASCAT). L'analyse est effectuée 4 fois par jour à 00, 06, 12 et 18Z.

Le SRPGO-PA est basé sur le modèle glace-océan NEMO3.1-CICE4.0, avec l'apport de RIOPS-A, les produits de PNT mondiaux et régionaux et l'analyse SGPGO.

Le SRPGO-F est basé sur le même modèle glace-océan et fournit une prévision de 48 heures quatre fois par jour avec les contributions de SRPGO-A, SRPGO-PA, les produits mondiaux et régionaux NWP et les conditions aux limites ouvertes persistantes venant de l'analyse SGPGO.

Le SRPGO-A est exécuté à une résolution horizontale de 0,045 degré (ou environ 5 km) avec le produit final disponible sur une grille globale ORCA tripolaire à une résolution nominale de 1 / 12ème degré (environ 5 km au-dessus de l'Arctique Côté canadien). Le SRPGO-A et SRPGO-F sont exécutés sur un sous-ensemble de la même grille tripolaire ORCA globale au 1 / 12ème degré.

Le développement et la validation sont en cours sur des techniques automatisées d'utilisation en temps quasi réel de différents types de données satellitaires pour améliorer l'estimation du vent de surface, extraire les caractéristiques des glaces de mer et détecter et estimer la présence de glaces (icebergs).

3.8.3 Système régional de prévision couplée atmosphère-océan-glace

Le système de prévision couplée atmosphère-océan-glace original au CMC est le système du golfe du Saint-Laurent qui est fondé sur les modèles GEM, NEMO et CICE. Des activités de R et D sont actuellement effectuées dans plusieurs systèmes régionaux couplés atmosphère-océan-glace dans le but d'améliorer les prévisions maritimes et météorologiques pour les échéances de un à trois jours :

- Un système semblable au précédent, utilisant une configuration de NEMO-CICE à une résolution de 2 km, est en cours d'élaboration pour les Grands Lacs. Les résultats préliminaires indiquent que le couplage de la configuration atmosphérique du SRPD permet d'obtenir des prévisions météorologiques de surface améliorées pour la plupart des régions aux alentours des Grands Lacs.
- Élaboration et validation d'un système intégré de prévisions maritimes pour l'Arctique. L'objectif est de permettre le prolongement de l'analyse de bout en bout et du système de prévision (avec une échéance de quelques jours) pour la production des produits de renseignements maritimes au-delà de l'Arctique canadien dans les secteurs METNAV XVII et XVIII des eaux internationales.
- Des travaux de développement sont également en cours afin d'inclure d'autres composantes de modélisation (sol, neige, vague) ainsi que l'assimilation de données connexes.

3.8.4 Système global couplé atmosphère-océan-glace

Les résultats ont montré que le couplage de la configuration atmosphérique du SGPD au SGPGO-P permet d'améliorer grandement les prévisions météorologiques pendant la saison des ouragans (effet de sillage froid), mais aussi pendant les saisons intermédiaires, quand le modèle océanique fournit une rétroaction négative à la tendance naturelle du modèle atmosphérique pour intensifier de façon excessive les tempêtes. Le système SGPD couplé a été implémenté aux opérations du CMC en mode expérimental en juillet 2016 et sera pleinement opérationnel en 2017.

3.8.5 Prévision des vagues

La recherche sur la modélisation des vagues est menée principalement sur les sujets suivants:

- Mises à niveau de la physique du modèle de vague avec le remplacement des systèmes de longue date
- Élaboration et mise en œuvre d'un système mondial de prévision des vagues d'ensemble pour les prévisions probabilistes de 0 à 10 jours. L'intégration des 20 membres du Canada dans un ensemble nord-américain se poursuit dans le cadre du NAEFS. La NOAA et la US NAVY contribuent actuellement chacune 20 membres au super ensemble (Alves et al., 2013).
- Étude des impacts du couplage avec d'autres systèmes tels que les modèles atmosphériques et de glace sur les compétences de prévision des vagues et d'autres compétences de prévision des composantes.

Le système global de prévision des vagues deviendra opérationnel en 2017. Il s'agit du premier système canadien de prévision des vagues en exploitation basé sur WAVEWATCHIII® (WW3). Le système global a été conçu pour fournir des conditions aux limites adéquates pour le remplacement futur des réseaux régionaux côtiers. Le remplacement du système régional a commencé avec le remplacement du système

des Grands Lacs par une combinaison de systèmes déterministes et de systèmes de prévision d'ensemble couvrant les cinq lacs. D'autres régions suivront dans l'année à venir.

Un système global de prévision des vagues d'ensemble, basé sur la troisième guerre mondiale, est également en cours de développement. Le système se compose d'un contrôle et de 20 membres perturbés. Les prévisions sont produites deux fois par jour avec un délai de 10 jours. L'ensemble de vagues devrait être transféré aux opérations en 2018. Une fois en opération, EC prévoit de rejoindre le NCEP et la FNMOC, via NAEFS, dans un ensemble de vagues multacentrales de 62 membres.

3.8.6 Prévision des ondes de tempête

Les recherches effectuées sur la modélisation des ondes de tempête ont mené à la mise en œuvre opérationnelle du Système régional de prévision déterministe d'ondes de tempête (SRPDOT). Ce modèle de 1/30 de degré pour la côte Atlantique du Canada est fondé sur le modèle Dalcoast. Un système correspondant de prévision d'ensemble de 1/12 de degré a également été élaboré et récemment installé aux opérations du CMC. Parallèlement, un système global, fondé sur NEMO, est en cours d'élaboration.

3.8.7 Système de prévision hydrodynamique bidimensionnel

Depuis mai 2013, le système hydrodynamique opérationnel SHOP (pour Simulation Hydrodynamique OPérationnelle) produit des analyses numériques bidimensionnelles (2D) et des simulations de prévisions immédiates de divers paramètres physiques pour le fleuve Saint-Laurent et ses tributaires, représentant les conditions hydrologiques actuelles. Dans la version 1.0.0 expérimentale du système SHOP, les analyses sont effectuées pour un tronçon du fleuve Saint-Laurent s'étendant de Montréal jusqu'à Trois-Rivières. Le modèle numérique H2D2 est utilisé pour résoudre les équations stationnaires 2D de Saint-Venant sur un maillage triangulaire d'éléments finis, et il intègre des données sur le frottement à l'échelle locale causé par le substrat et la végétation aquatique. Le système SHOP utilise les observations moyennées du débit et du niveau de l'eau sur une période de 24 heures entre 18 UTC le jour précédant l'analyse et 18 UTC le jour où l'analyse est produite.

Le développement prévu du système comprend un prolongement en amont pour couvrir l'archipel de Montréal, le lac des Deux Montagnes et le lac Saint-Louis, mais aussi en aval pour couvrir l'estuaire fluvial du Saint-Laurent jusqu'à l'île aux Coudres. Une version non stationnaire du modèle H2D2 a été élaborée à cet effet. Les travaux sont en cours afin de mettre en œuvre ce système de prévision hydrodynamique en mode expérimental, en utilisant : 1) les données sur les vents provenant du système de prévision SHRPD; 2) le débit dans les tributaires et aux limites amont provenant du modèle de routage WATROUTE de 1 km et 3) les prévisions des marées à la limite aval provenant du modèle opérationnel unidimensionnel (SPINE). Une version préliminaire du système expérimental fait actuellement l'objet d'essais. Elle est exécutée quatre fois par jour (à 00, 06, 12 et 18 UTC) et produit une prévision déterministe de 48 heures des niveaux d'eau et des vitesses du courant.

Le même type de système sera déployé ailleurs au Canada, probablement en commençant avec le lac Champlain et la rivière Richelieu et les voies interlacustres entre le lac Huron et le lac Érié (y compris le lac Sainte-Claire).

3.8.8 Système de modélisation de l'hydrologie et du cycle d'eau

ECCC a déployé, en juin 2016, un système expérimental de prévision du cycle de l'eau pour le bassin versant des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent. Ce système unique comprend une configuration à domaine limité du modèle GEM à une résolution de 10 km au-dessus du bassin versant (ses limites étant

soumises à un forçage par le SRPD du GEM), avec un couplage bidirectionnel au modèle glace-océan NEMO-CICE exécuté à une résolution de 2 km au-dessus des Grands Lacs. De plus, le débit de tous les tributaires des Grands Lacs et du Saint-Laurent est calculé par le routage du ruissellement en surface prévu par le modèle GEM au moyen du modèle de routage WATROUTE sur une grille de 1 km. Dans la région des Grands Lacs, le débit à l'embouchure de chaque cours d'eau est fourni au modèle NEMO comme une condition frontière, créant ainsi un système entièrement couplé.

Le système d'analyse est exécuté deux fois par jour (à 00 et à 12 UTC), et il assimile les observations des débits des cours d'eau et les données sur la couverture de glace au moyen d'une technique simple de rappel. Le système de prévision est également exécuté deux fois par jour et produit une prévision déterministe de 84 heures des variables météorologiques, des variables de la surface terrestre et des variables de débit et associées aux lacs, tels le courant de surface, les niveaux des lacs et la couverture de glace.

Il a été démontré que ce système est capable de produire des prévisions exactes de toutes ces variables pour une échéance allant jusqu'à 84 heures. Toutefois, pour les besoins de la gestion de l'eau, il ne fait aucun doute que des prévisions hebdomadaires, mensuelles et, à terme, saisonnières sont également nécessaires. Par conséquent, on s'attend à ce que le même système soit exécuté en mode d'ensemble à l'avenir.

On déploiera le même type de système ailleurs au Canada, en commençant probablement par la représentation du routage des débits seulement, au moyen du modèle WATROUTE, étant donné que le couplage bidirectionnel de l'atmosphère et des réseaux de lacs n'est pas aussi essentiel partout au pays.

3.8.9 Modélisation urbaine

Les secteurs urbains ont des répercussions importantes sur la météorologie locale et ont été récemment ajoutés aux modèles atmosphériques. Dans le modèle GEM, le rôle positif du schéma du bilan énergétique urbain (BEU) a été bien établi pour plusieurs situations météorologiques, comme en font état plusieurs publications. Dans les prochaines années, on poursuivra les études en cours portant sur le rôle et les répercussions des milieux bâtis sur les phénomènes météorologiques à petite échelle, comme les brises de mer et de lac, les fronts de convergence et le déclenchement d'activité convective. La version à couche multiple récemment élaborée du BEU sera utilisée de nouveau, et on l'évaluera pour ces situations météorologiques, avec une mise en œuvre possible (conjointement avec l'ajout des niveaux atmosphériques tout près du sol) dans les versions à venir du SRPD (distance de maille de 2,5 km) et du SHRPD (distance de maille de 250 mètres). L'élaboration future du BEU comprendra l'amélioration de sa représentation de la végétation (dans les canyons) et de sa modularisation (c.-à-d. un schéma pour les routes, une autre pour les bâtiments, tous reliés par la couverture fournie par le BEU à couches multiples).

Les travaux actuels de recherche et développement sur le modèle GEM urbain sont maintenant fondés principalement sur l'analyse de cas des Jeux panaméricains de 2015 à Toronto. Dans le cadre de ce projet, des indices de confort, tels que l'indice universel du climat thermique (UTCI) et l'indice de température au thermomètre-globe mouillé (WBGT) ont été codés dans le BEU et évalués par comparaison avec l'ensemble de données des Jeux panaméricains de 2015.

Un objectif important pour ECCC consiste à mettre en œuvre un modèle GEM urbain, avec une distance de maille de 250 m et avec le BEU, en mode expérimental pour les trois plus grands centres urbains au pays, c.-à-d. Toronto, Vancouver et Montréal. Ce modèle sera, en fait, considéré comme la prochaine génération du SHRPD, l'homologue expérimental du système opérationnel de prévision à courte échéance, le SRPD. En vue d'atteindre cet objectif, le modèle GEM urbain avec une résolution de 250 m sera mis à l'essai pour plusieurs villes, au Canada et à l'étranger. Des simulations des conditions à Tokyo

représentaient déjà bien les répercussions du milieu urbain sur l'intensité des précipitations. D'autres simulations, dans le cadre du projet de démonstration de la recherche en aviation (AvRDP) de l'OMM, devraient être utilisées pour l'évaluation et l'étalonnage du modèle GEM urbain.

3.8.10 Système déterministe de prévision de surface à haute résolution (HRDSPS)

Plusieurs nouveaux modèles et nouvelles approches sont actuellement étudiés afin de mieux prévoir les conditions à la surface ou près de la surface terrestre. Un système externe de modélisation de la surface terrestre a été élaboré et est maintenant intégré à des grilles dont la taille est de loin inférieure à celle des modèles atmosphériques. Cette résolution accrue permet une meilleure exploitation de l'information géophysique sur l'orographie, l'utilisation des terres et la couverture terrestre ainsi que la couverture fractionnelle de l'eau. La réduction d'échelle du forçage atmosphérique (précipitations, température, humidité, vents) permet de forcer, de façon plus réaliste, les processus à la surface. Compte tenu de son coût relativement faible en termes de ressources informatiques, le HRDSPS peut produire des simulations de la surface réalistes à une résolution assez élevée (p. ex. avec une distance de maille de 100 à 200 m) et sur des régions plutôt grandes. Comme il a été mentionné dans plusieurs articles préparés par ECCC, cette technique de réduction d'échelle s'est avérée particulièrement efficace pour les régions montagneuses et les régions urbaines (Vancouver, les Rocheuses, Montréal, la ville d'Oklahoma). Elle fournit aussi des conditions à la surface terrestre plus réalistes, surtout en ce qui concerne l'humidité du sol, aux systèmes de prévision hydrologique intégrés d'ECCC.

Les prévisions fondées sur le HRDSPS peuvent être améliorées de trois manières différentes : à l'aide d'un forçage atmosphérique, d'une modélisation de la surface et de conditions initiales de la surface plus réalistes. Les travaux de recherche et de développement actuels portent sur ces trois aspects. Un forçage plus réaliste sera établi à l'aide des versions à échelle de kilomètre du GEM et des améliorations qui pourraient être apportées à la méthode de réduction d'échelle (pour les précipitations par exemple). Une modélisation plus réaliste sera obtenue à l'aide du nouveau schéma SVN (en remplacement du schéma ISBA actuel) et d'une version améliorée du BEU. La possibilité d'un couplage plus étroit entre le système de surface et le modèle de l'atmosphère sera également étudiée, ainsi qu'un couplage bidirectionnel. Enfin, de meilleures conditions initiales pour les variables de surface terrestre pourraient être obtenues en exécutant le système CaLDAS directement à une résolution inférieure au km (probablement trop coûteux), ou à l'aide d'une approche incrémentale (c.-à-d. incréments d'analyse fournis à l'échelle de km), ou par le forçage des champs d'essai à l'échelle subkilométrique du HRDSPS au moyen d'analyses du CaLDAS à une résolution de 2,5 km.

Une approche à « interaction multicouche », semblable à ce qui a déjà été codé et testé avec le BEU, sera évaluée dans le contexte du nouveau schéma SVN de la surface terrestre. L'accent sera mis sur l'explication en détail des interactions complexes entre la canopée de surface et la couche de surface de l'atmosphère, dans un mode unidirectionnel et bidirectionnel. De plus, un modèle de lac unidimensionnel sera également mis en œuvre et à l'essai dans le cadre des applications de modélisation et d'assimilation.

Une première mise en œuvre du HRDSPS aux Opérations du SMC est attendue au cours de l'année à venir ou des deux prochaines années.

3.9 Prévisions à échéance prolongée et à longue échéance

3.9.1 Prévisions à longue échéance (de 30 jours à 2 ans)

Le modèle couplé global Global Environment Multiscale (GEM) - Noyau pour la modélisation européenne de l'océan (NEMO) a été développé pour les prévisions saisonnières. La composante atmosphérique, GEM, a une résolution horizontale de 1,4 x 1,4 et 80 niveaux verticaux, tandis que la composante océanique, NEMO, a une résolution de 1 degré et 50 niveaux. La prévision est initialisée au début de chaque mois et dure 12 mois avec 10 membres de l'ensemble. Une prévision rétrospective de 30 ans de 1981 à 2010 a été produite, qui sert à calibrer la prévision en temps réel et à des fins de vérification. Ce nouveau modèle fera partie du Système de prévision saisonnière et interannuelle canadien (SPISCan).

Prévisions saisonnières de nouvelles variables

Plusieurs nouvelles variables commenceront à être produites sur le plan opérationnel, y compris l'équivalent en eau de la neige, le rayonnement solaire de surface, la fraction des nuages et l'humidité spécifique près de la surface. Ces variables, ainsi que la température près de la surface, les précipitations et la température de la surface de la mer, seront communiquées grâce à de nouvelles cartes interactives pour le Canada et le monde qui fournissent les trois probabilités catégorielles en tercile.

Amélioration de l'initialisation de la glace de mer

Des initialisations améliorées pour la concentration de la glace de mer et l'épaisseur de la glace de mer sont en cours d'élaboration pour les modèles actuels de prévisions saisonnières opérationnelles CanCM3 et CanCM4. Ces changements mènent à des améliorations majeures de la capacité de prédiction de la glace de mer dans des expériences rétrospectives sélectives, et seront démontrés par des contributions au Réseau de prévision des glaces de mer 2017 de Sea Ice Outlook. La mise en œuvre opérationnelle sera considérée après l'achèvement d'un ensemble complet de prévisions en rétrospective.

3.10 Intervention en cas d'urgence environnementale

La trousse d'outils de validation statistique appelée « TheJudge » a été améliorée en 2016 et a servi à valider la mise en œuvre numérique du nouveau modèle de dispersion opérationnel (MLDPn) en comparant les résultats du MLDPn avec celui du modèle MLDP1. Un vaste ensemble de cas utilisés a permis d'identifier et de corriger certains bogues.

Le MLDPn comprendra également une nouvelle capacité appelée « mode mixte », permettant au modèle de commencer comme modèle de dispersion de particules Lagrangien de premier ordre près de la source (mode MLDP1) et de passer automatiquement à un modèle d'ordre zéro à une certaine distance de la source (mode MLDP0). Le mode MLDP1 a été mis en œuvre, et a été validé au moyen de la trousse TheJudge. Toutefois, certains schèmes doivent être examinés davantage afin de bien comprendre leur fonctionnement.

Le CMC participe à l'occasion à des études de comparaison et de vérification des modèles au moyen de mesures de la concentration atmosphérique et du dépôt au sol. Ces études permettent de valider les modèles de dispersion, mais aussi d'identifier et de corriger les problèmes à l'intérieur des modèles. En 2016, le CMC a participé, en étroite collaboration avec d'autres organisations météorologiques dans le monde, à une étude de vérification et de comparaisons de modélisation transport de grande échelle du xénon. Cette étude a permis de corriger un problème mineur dans le modèle associé au terme source d'émission.

Les données météorologiques d'entrée des modèles de dispersion atmosphérique ont aussi été améliorées, notamment en ce qui concerne les paramètres de stabilité atmosphérique. Des travaux sont en cours afin de générer des champs météorologiques améliorés, adaptés spécialement en fonction des applications de modélisation de la dispersion atmosphérique.

De plus, des travaux se poursuivent dans le but d'élaborer des produits de concentration absolue fondés sur des scénarios d'émissions réalistes résultants de rejets atmosphériques accidentels provenant de la combustion de pétrole, de produits pétroliers et de produits chimiques dangereux habituellement utilisés dans des processus industriels. Les produits finaux, plutôt que d'être exprimés sous forme de facteurs de dilution atmosphérique, seront présentés sous forme de critères d'actions protectives (CAP), ce qui améliorera de façon significative l'évaluation des risques pour les intervenants sur place. La SRUE a établi une collaboration avec des experts en toxicologie de Santé Canada afin d'établir de nouveaux seuils toxicologiques pour certains polluants. Le développement de ces nouveaux seuils sera éventuellement intégré à la suite de modélisation de CMC lorsque Santé Canada aura terminé son développement.

- En ce qui concerne la dispersion à l'échelle urbaine, des travaux ont été entrepris afin d'élaborer une capacité opérationnelle de modélisation du transport et de la dispersion. Cet objectif sera atteint en affinant le système canadien de modélisation de la dispersion en milieu urbain (CUDM). Ce système utilise des observations de vents ou des prévisions de vents faites par des modèles de PNT afin de fournir des conditions aux frontières pour un modèle de la dynamique numérique des fluides, appelé urbanSTREAM, exécuté à l'échelle urbaine. En retour, urbanSTREAM fournit les champs de vents et de turbulence à haute résolution (résolution entre 1 et 10 m) pour piloter urbanLS, un modèle lagrangien stochastique de suivi des particules. Ces travaux comprennent :
- Implémentation d'un modèle urbain de la dynamique numérique des fluides amélioré, appelé urbanSTREAM, capable de gérer toutes les situations de débit entrant.
- L'activation de capacités topographiques.
- L'optimisation, la parallélisation et la validation des codes informatiques.

- L'investigation de la transition des modèles urbains à non-urbains.
- L'intégration à une série de configuration de dispersion atmosphérique opérationnelle (anticipé en 2017).

Suite au développement de modèles aquatiques et couplés atmosphère-océan au SMC et à la Direction générale des sciences et de la technologie (SGPGO, SRPGO, etc.), un nouveau domaine est en train de voir le jour : la modélisation de la dispersion en milieu aquatique. Les applications sont nombreuses, comme le calcul de la dérive pour les opérations de recherche et sauvetage, la dérive des contaminants, la productivité biologique (la dispersion des larves), l'eau de ballast, etc.

Un nouvel outil dédié à la modélisation des déversements d'hydrocarbures en milieux aquatiques sera élaboré au cours des prochaines années. Ces déversements sont fréquents et peuvent avoir une incidence négative sur les grandes populations. Ce nouveau système intégré, appelé COSMoS (Canadian Oil Spill Modelling Suite), comprendra :

- le transport : l'étalement et l'advection attribuable au vent;
- la transformation : l'évaporation, la formation d'une émulsion, la dispersion dans la colonne d'eau, la présence sur les rives, la composition chimique, la densité, viscosité et la composition;
- les propriétés physicochimiques : la densité, la viscosité et la composition.

Le module de transport sera fondé sur le cœur du MLDPn, conçu à l'origine pour l'atmosphère, puis adapté aux applications en milieu aquatique. La combinaison du MLDPn, de la modélisation du devenir et du comportement des hydrocarbures dans les milieux aquatiques et côtiers, de prévisions de grande qualité basées sur des données environnementales maritimes et atmosphériques, une capacité d'intervention d'urgence 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 et un accès à des installations informatiques de haute performance permettra au système COSMoS de devenir un système de modélisation des déversements d'hydrocarbures de première classe. Un prototype est prévu pour 2017, et le système devrait être opérationnel en 2018.

4 Bibliographie

- Alves, J.-H.G.M, P. Wittmann, M. Sestak, J. Schauer, S. Stripling, N.B. Bernier, J. McLean, Y. Chao, A. Chawla, H. Tolman, G. Nelson et S. Klotz, 2013. « The NCEP/FNMOC Combined Wave Ensemble Product: Expanding Benefits of Inter-Agency Probabilistic Forecasts to the Oceanic Environment ». *Bulletin of the American Meteorological Society*, doi: 10.1175/BAMS-D-12-00032.1.
- Anselmo, D., M.D. Moran, S. Ménard, V. Bouchet, P. Makar, W. Gong, A. Kallaur, P.-A. Beaulieu, H. Landry, C. Stroud, P. Huang, S. Gong et D. Talbot, 2010. A new Canadian air quality forecast model: GEM-MACH15. *Proc. 12th AMS Conf. on Atmos. Chem.*, Jan. 17-21, Atlanta, GA, American Meteorological Society, Boston, MA, 6 p. [Disponible à l'adresse suivante : <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/165388.pdf>].
- Aparicio, J., et G. Deblonde, 2008. « Impact of the assimilation of CHAMP refractivity profiles on Environment Canada global forecasts ». *Monthly Weather Review*, **136** (1), 257-275.
- Aparicio, J. M., et S. Laroche, 2015. « Estimation of the added value of the absolute calibration of GPS radio occultation data for numerical weather prediction ». *Mon. Wea. Rev.*, **143**(4),1259-1274.
- Aparicio, J. M. 2016. « An update to the expression of atmospheric refractivity for GPS signals », *J. Geophys. Res.-Atm.* [Présenté pour publication].
- Aparicio, J. M., E. Cardellach et H. Rodríguez, 2016. « Information content in reflected signals during GPS radio occultation observations ». *J. Atm. Oc. Tech.* [Présenté pour publication].
- Aparicio, J., et S. Laroche, 2011. « An evaluation of the expression of the atmospheric refractivity for GPS signals ». *J. Geophys. Res.*,doi:10.1029/2010JD015214.
- Baek, S. J., L. Fillion, D. Jacques, T. Milewski et W. Chang, 2016. Environment Canada's Regional Ensemble Kalman Filter. Oral presentation at the *7th EnKF Data Assimilation Workshop*, 23-27 May 2016, Toftrees Golf Resort & Conference Center, State College, PA, 16803, É.-U.
- Bédard, J., S. Laroche, P. Gauthier 2017: Near-surface wind observation impact on forecasts: temporal propagation of the analysis increment. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 1549-1564.
- Bédard, J., S. Laroche, P. Gauthier 2015: A geo-statistical observation operator for the assimilation of near-surface wind data. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, DOI:10.1002/qj2569.
- Bélair, S., J. Mailhot, J.W. Strapp et J.I. MacPherson, 1999. « An examination of local versus nonlocal aspects of a TKE-based boundary layer scheme in clear convective conditions ». *J. Appl. Met.*, **38**, 1499-1518.
- Bélair, S., L.-P. Crevier, J. Mailhot, B. Bilodeau et Y. Delage, 2003a. « Operational implementation of the ISBA land surface scheme in the Canadian regional weather forecast model. Part I: Warm season results ». *J. Hydromet.*, **4**, 352-370.
- Bélair, S., R. Brown, J. Mailhot, B. Bilodeau et L.-P. Crevier, 2003b. « Operational implementation of the ISBA land surface scheme in the Canadian regional weather forecast model. Part II: Cold season results ». *J. Hydromet.*, **4**, 371-386.
- 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 weather system ». *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1938-1960.
- Bélair, S., M. Roch, A-M. Leduc, P.A. Vaillancourt, S. Laroche et J. Mailhot, 2009. « Medium-range quantitative precipitation forecasts from Canada's new 33-km deterministic global operational system ». *Wea. Forecasting*, **24**, 690-708.
- Benoît, R., J. Côté et J. Mailhot, 1989. « Inclusion of a TKE boundary layer parameterization in the Canadian regional finite-element model ». *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1726-1750.
- 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.*, **51**, 1061–1078.
- Blackadar, A. K. 1962. « The Vertical Distribution of Wind and Turbulent Exchange in a Neutral Atmosphere », *Journal of Geophysical Research*, vol. **67**, n° 8, 1962, p. 3095-3102.
- Boniface, K., J. M. Aparicio et E. Cardellach, 2011. « Meteorological information in GPS-RO reflected signals », *Atmos. Meas. Tech.*, **4**, 1199-1231, doi:10.5194/amtd-4-1199-2011.

- Bougeault, P., et P. Lacarrère, 1989. « Parameterization of orography-induced turbulence in a meso-beta-scale model ». *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1872-1890.
- Bourgouin, P., 2000. « A Method to Determine Precipitation Types ». *Wea. Forecasting*, **15**, 583-592.
- Brasnett, B. 1997. « A global analysis of sea surface temperature for numerical weather prediction ». *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **14**, 925-937.
- Brasnett, B. 1999. « A global analysis of Snow Depth for Numerical Weather Prediction ». *J. Appl. Meteor.*, **38**, 726-740.
- Brasnett, B. 2008. « The impact of satellite retrievals in a global sea-surface-temperature analysis ». *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 1745-1760.
- Brasnett B. and D. Surcel Colan, 2016: Assimilating retrievals of Sea Surface Temperature from VIIRS and AMSR2, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33:2, 361-375
- Brunet, N., 1987. Développement d'un système PROG parfait de prévisions ponctuelles de température. Document technique du CMC, n° 30.
- Bobanovic, J. 1997. Barotropic circulation variability on Canadian Atlantic Shelves. Thèse de doctorat. Université Dalhousie.
- Buehner M, P.L. Houtekamer, C. Charette, H.L. Mitchell et B. He, 2010a. « Intercomparison of Variational Data Assimilation and the Ensemble Kalman Filter for Global Deterministic NWP. Part I: Description and Single-Observation Experiments ». *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1550–1566.
- Buehner M, P.L. Houtekamer, C. Charette, H.L. Mitchell et B. He, 2010b. « Intercomparison of Variational Data Assimilation and the Ensemble Kalman Filter for Global Deterministic NWP. Part II: One-Month Experiments with Real Observations ». *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1567–1586.
- Buehner, M., 2011. « Evaluation of a Spatial/Spectral Covariance Localization Approach for Atmospheric Data Assimilation ». *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 617–636.
- Buehner, M., A. Caya, L. Pogson, T. Carrieres et P. Pestieau, 2013. « A New Environment Canada Regional Ice Analysis System ». *Atmosphere-Ocean*, **51**, 18-34.
- Buehner, M., J. Morneau, et C. Charette, 2013a. « Four-dimensional ensemble-variational data assimilation for global deterministic weather prediction ». *Nonlin. Processes Geophys.*, **20**, 669-682, doi:10.5194/npg-20-669-2013.
- Buehner, M., et al., 2014. Modifications apportées au système global de prévision déterministe (SGPD) de la version 3 à la version 4. Note technique du Centre météorologique canadien. [Disponible sur demande auprès d'Environnement et Changement climatique Canada, Centre météorologique canadien, Division du développement, 2121, route Transcanadienne, 4^e étage, Dorval (Québec) H9P 1J3, ou à l'adresse suivante :
- http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/product_guide/docs/lib/technote_gdps-400_20141118_f.pdf.
- Buehner, M., R. McTaggart-Cowan, A. Beaulne, C. Charette, L. Garand, S. Heillette, E. Lapalme, S. Laroche, S.R. Macpherson, J. Morneau et A. Zadra, 2015. « Implementation of Deterministic Weather Forecasting Systems Based on Ensemble–Variational Data Assimilation at Environment Canada. Part I: The Global System ». *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 2532–2559. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-14-00354.1>.
- Burrows, R. B., M. Vallée, D. I. Wardle, J. B. Kerr, L. J. Wilson et D. W. Tarasick, 1994. « The Canadian operational procedure for forecasting total ozone and UV radiation ». *Met. Apps.*, **1**, 247-265.
- Caron, J-F., et al., 2014. Changements au Système régional de prévision déterministe (SRPD) de la version 3.2.1 à la version 4.0.0. Note technique du Centre météorologique canadien. [Disponible sur demande auprès d'Environnement et Changement climatique Canada, Centre météorologique canadien, Division du développement, 2121, route Transcanadienne, 4^e étage, Dorval (Québec) H9P 1J3, ou à l'adresse suivante :
- http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/product_guide/docs/lib/technote_rdps-400_20141118_f.pdf.
- Caron, J-F., et al., 2015. Passage de la version 4.0.0 à la version 4.1.0 du Système régional de prévision déterministe (SRPD). Note technique du Centre météorologique canadien. [Disponible sur demande auprès d'Environnement et Changement climatique Canada, Centre météorologique canadien,

Division du développement, 2121, route Transcanadienne, 4^e étage, Dorval (Québec) H9P 1J3, ou à l'adresse suivante :

http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/product_guide/docs/lib/technote_rdps-410_20151215_f.pdf.

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.*, **11**, 1123–1140.

Charney J.G., et N.A. Phillips, 1953. « Numerical integration of the quasi-geostrophic equations for barotropic and simple baroclinic flows ». *J. Meteorol.* **10**: 71–99.

Charron, M., *et al.*, 2012. « The Stratospheric Extension of the Canadian Global Deterministic Medium-Range Weather Forecasting System and Its Impact on Tropospheric Forecasts ». *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 1924–1944.

Charron, M., G. Pellerin, L. Spacek, P. L. Houtekamer, N. Gagnon, H. L. Mitchell et L. Michelin, 2010. « Toward Random Sampling of Model Error in the Canadian Ensemble Prediction System ». *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1877-1901.

Côté, J., S. Gravel, A. Méthot, A. Patoine, M. Roch et A. Staniforth, 1998a. « The Operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) Model: Part I - Design Considerations and Formulation ». *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1373-1395.

Côté, J., J.-G. Desmarais, S. Gravel, A. Méthot, A. Patoine, M. Roch et A. Staniforth, 1998b. « The Operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) Model: Part II - Results ». *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1397-1418.

Cotton, J., 2012. Understanding AMV Errors through the NWP SAF monitoring and Analysis reports. Proc. 11th Intl. Winds Working Group Conf., Auckland, NZ, 20-24 févr. 2012 [Disponible à l'adresse suivante : www.eumetsat.int].

Crouse, D.L., P.A. Peters, P. Hystad, J.R. Brook, A. van Donkelaar, R.V. Martin, P.J. Villeneuve, M. Jerrett, M.S. Goldberg, C.A. Pope III, M. Brauer, R.D. Brook, A. Robichaud, R. Ménard, R.T. Burnett, 2015: Associations between ambient PM_{2.5}, O₃, and NO₂ and mortality in the Canadian Census Health and Environment Cohort (CanCHEC) over a 16-year follow-up. *Environmental Health Perspective (Open Access)*, 123:1180-1186. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1409276>.

Crouse, D.L., L. Pinault, A. Balram, P. Hystad, P.A. Peters, A. van Donkelaar, R.V. Martin, R. Ménard, A. Robichaud, and P.J. Villeneuve, 2017: Urban greenness and mortality in Canada's largest cities: a national cohort study. *Lancet Planet Earth*, vol. 1, 289-297.

Courtier, P., J.-N. Thépaut et A. Hollingsworth, 1994. « A strategy for operational implementation of 4D-Var using an incremental approach ». *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **120**, 1367–1387.

D'Amours, R., et P. Pagé, 2001. Modèles pour les éco-urgences atmosphériques, rapport interne, Centre météorologique canadien, Réponse aux urgences environnementales, 9 p.

D'Amours, R., et A. Malo, 2004. A Zeroth Order Lagrangian Particle Dispersion Model: MLDP0, rapport interne, Centre météorologique canadien, Réponse aux urgences environnementale, 19 p.

D'Amours, R., A. Malo, R. Servranckx, D. Bensimon, S. Trudel, et J.-P. Gauthier, 2010. « Application of the atmospheric Lagrangian particle dispersion model MLDP0 to the 2008 eruptions of Okmok and Kasatochi volcanoes ». *Journal of Geophysical Research*, **115** (D00L11), 1–11, doi:10.1029/2009JD013602.

Deacu, D., V. Fortin, E. Klyszejko, C. Spence et P.D. Blanken, 2012. « Predicting the Net Basin Supply to the Great Lakes with a Hydrometeorological Model ». *Journal of Hydrometeorology*, **13**, 1739–1759.

Dee, D. P., *et al.*, 2011. « The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system ». *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **137**: 553–597.

Delage, Y., 1988a. « The position of the lowest levels in the boundary layer of atmospheric circulation models ». *Atmos.-Ocean*, **26**, 329-340.

Delage, Y., 1988b: A parameterization of the stable atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, **43**, 365-381.

- Denis, B., et R. Verret. The new CMC medium-range Perfect-Prog temperature forecast system, 40th Congress of the Canadian Meteorological and Oceanographic society, Toronto (Ontario), du 29 mai au 1^{er} juin 2006.
- Desroziers, G., et S. Ivanov, 2001. « Diagnosis and adaptive tuning of observation-error parameters in a variational assimilation ». *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **127**, 1433-1452.
- Desroziers, G., L. Berre, B. Chapnik et P. Poli, 2005. « Diagnosis of observation, background and analysis-error statistics in observation space ». *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**: 3385–3396. doi: 10.1256/qj.05.108.
- Dirkson, A., W. J. Merryfield et A. H. Monahan, 2015. « Real time estimation of Arctic sea ice thickness through maximum covariance analysis ». *Geophysical Research Letters*, **42**, 4868-4877, doi:10.1002/2015GL063930.
- Dutta, S. K., L. Garand, S. Heilliette et S. Macpherson, 2014. « Assimilation of hyperspectral infrared radiances over land and sea ice surfaces ». *94th Amer. Meteorol. Soc. Conf.*, Atlanta, GA, É.-U., du 2 au 6 février 2014.
- Dutta, S. K., L. Garand et S. Heilliette, 2016. « Assimilation of infrared radiance observations with sensitivity to land surfaces in the Canadian ensemble-variational system ». *J. Appl. Meteor. Climatol.* 561-578.
- Ellrod, G. P., 1989. An index for clear air turbulence based on horizontal deformation and vertical wind shear. Preprints of the Third International Conference on the Aviation Weather System, Anaheim, Californie.
- Erfani, A., *et al.*, 2013. Nouveau système régional de prévision d'ensemble (SRPE) ayant une résolution horizontale de 15km (SRPE 2.0.1) Note technique du Centre météorologique canadien. [Disponible sur demande auprès d'Environnement et Changement climatique Canada, Centre météorologique canadien, Division du développement, 2121, route Transcanadienne, 4^e étage, Dorval (Québec) H9P 1J3, ou à l'adresse suivante :
- http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/product_guide/docs/lib/technote_reps201_20131204_f.pdf].
- Errera, Q., S. Ceccherini, Y. Christophe, S. Chabrilat, M.I. Hegglin, A. Lambert, R. Ménard, P. Raspollini, S. Skachko, M. vanWeele, and K.A. Walker, **2016** : Harmonization and diagnostics of MIPAS ESA CH₄ and N₂O profiles using data assimilation. *Atmospheric Measurement Techniques* (Open Access Journal), 9, 5895-5909, doi:105194/amt-9-5895-2016, www.atmos-meas-tech.net/9/5895/2016/
- ESA, 2008. Candidate Earth Explorer Core Missions – Report for Assessment: PREMIER – Process Exploitation through Measurements of Infrared and millimetre-wave Emitted Radiation, SP-20 1313/5, ESA Publications Division, ESTEC, Keplerlaan 1, 2200 AG Noordwijk, Pays-Bas.
- Feng, J., 2007. « A 3-mode parameterization of below-cloud scavenging of aerosols for use in atmospheric dispersion models ». *Atmospheric Environment*, **41** (32), 6808–6822, doi:10.1016/j.atmosenv.2007.04.046.
- Feng, J., 2008. « A size-resolved model and a four-mode parameterization of dry deposition of atmospheric aerosols ». *Journal of Geophysical Research*, **113** (D12201), 1–13, doi:10.1029/2007JD009004.
- Feng, J., 2009. « A size-resolved model for below-cloud scavenging of aerosols by snowfall ». *Journal of Geophysical Research*, **114** (D08203), 1–8, doi:10.1029/2008JD011012.
- Fillion, L., H.L. Mitchell, H. Ritchie et A. Staniforth, 1995. « The impact of a digital filter finalization technique in a global data assimilation system ». *Tellus*, **47A**, 304-323.
- Fillion, L., Tanguay, M., E. Lapalme, B. Denis, M. Desgagne, V. Lee, N. Ek, Z. Liu, M. Lajoie, J.-F. Caron, et C. Page, 2010. « The Canadian Meteorological Center Limited-Area Regional Data Assimilation and Forecasting System ». *Wea. Forecasting*, **25**, 1645–1669. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010WAF2222401.1>.
- Flesch, T.K., J. D. Wilson et B. P. Crenna, 2002. MLCD: A Short-Range Atmospheric Dispersion Model for Emergency Response, Rapport de contrat présenté au Centre météorologique canadien par le département des sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'Université de l'Alberta.

- Flesch, T.K., R. D'Amours, C.J. Mooney et J.D. Wilson, 2004. MLDP: A Long-Range Lagrangian Stochastic Dispersion Model, Rapport interne en collaboration avec le Centre météorologique canadien et le département des sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'Université de l'Alberta.
- Fortuin, P., et H. Kelder, 1998. « An ozone climatology based on ozonesonde and satellite measurements ». *J. Geophys. Res.* **103**:31709-31734.
- Garand, L., J. Feng, S. Heillette, Y. Rochon et A.P. Trishchenko, 2013. « Assimilation of circumpolar wind vectors derived from highly elliptical orbit imagery: impact assessment based on observing system simulation experiments ». *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **52**(8), 1891-1908.
- Gagnon, N., *et al.*, 2013a. Amélioration du système global de prévision d'ensemble (SGPE) de la version 2.0.3 à la version 3.0.0. Note technique du Centre météorologique canadien. [Disponible sur demande auprès d'Environnement et Changement climatique Canada, Centre météorologique canadien, Division du développement, 2121, route Transcanadienne, 4^e étage, Dorval (Québec) H9P 1J3, ou à l'adresse suivante : http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/CMOI/product_guide/docs/changes_f.html#20130213_geps].
- Gagnon, *et al.*, 2013b. Amélioration du système global de prévision d'ensemble (SGPE) de la version 3.0.0 à la version 3.1.0. Note technique du Centre météorologique canadien. [Disponible sur demande auprès d'Environnement et Changement climatique Canada, Centre météorologique canadien, Division du développement, 2121, route Transcanadienne, 4^e étage, Dorval (Québec) H9P 1J3, ou à l'adresse suivante : http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/CMOI/product_guide/docs/changes_f.html#20131127_geps_3.1.0].
- Gagnon, N., *et al.*, 2014. Améliorations apportées au système global de prévision d'ensemble (SGPE) résultant du passage de la version 3.1.0 à la version 4.0.0. Note technique du Centre météorologique canadien. [Disponible sur demande auprès d'Environnement et Changement climatique Canada, Centre météorologique canadien, Division du développement, 2121, route Transcanadienne, 4^e étage, Dorval (Québec) H9P 1J3, ou à l'adresse suivante : http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/CMOI/product_guide/docs/changes_f.html#20141118_geps_4.0.0].
- Gagnon, N., *et al.*, 2015. Améliorations apportées au Système global de prévision d'ensemble (SGPE) de la version 4.0.1 à la version 4.1.1. Note technique du Centre météorologique canadien. [Disponible sur demande auprès d'Environnement et Changement climatique Canada, Centre météorologique canadien, Division du développement, 2121, route Transcanadienne, 4^e étage, Dorval (Québec) H9P 1J3, ou à l'adresse suivante : http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmoi/product_guide/docs/changes_f.html#20151215_geps_4.1.1].
- Geleyn, J.-F., 1985. « On a Simple, Parameter-Free Partition between Moistening and Precipitation in the Kuo Scheme ». *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 405-407.
- Girard, C., A. Plante A., M. Desgagne, R. McTaggart-Cowan, J. Côté, M. Charron, S. Gravel, V. Lee, A. Patoine, A. Qaddouri, M. Roch, L. Spacek, M. Tanguay, P. Vaillancourt et A. Zadra, 2014. « Staggered Vertical Discretization of the Canadian Environmental Multiscale (GEM) Model Using a Coordinate of the Log-Hydrostatic-Pressure Type ». *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 1183–1196, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-13-00255.1>.
- Girard, C., 2015. Histoire d'une inconsistance, séminaire RPN. [Disponible à l'adresse suivante : http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/SEM/dossiers/2015/seminaires/2015-04-10/Seminar_2015-04-10_Claude-Girard.pdf].
- Gong, W., S.R. Beagley, S. Cousineau, M. Sassi, R. Munoz-Alpizar, S. Ménard, J. Zhang, J. Chen, H. Morrison, S. Sharma, L. Huang, P. Bellavance, J. Ly, P. Izdebski, L. Lyons, R. Holt, (2017) "Assessing the impact of shipping emissions on air pollution in the Canadian Arctic and northern regions: current and future modelled scenarios", manuscript to be submitted to ACP/ACPD.
- Gong, W., S.R. Beagley, C.H. Whaley, J. Zhang, G.R. Wentworth, J.G. Murphy (2018) "Modelling Atmospheric Ammonia in Summer Arctic", 20th Conference on Atmospheric Chemistry / 98th AMS Annual Meeting.
- Gong, W., S.R. Beagley, J. Zhang, S. Cousineau, J. Chen, M. Sassi, R. Munoz-Alpizar, H. Morrison, L. Lyons, and P. Bellavance (2016) "Modelling Regional Air Quality in the Canadian Arctic: Impact of North American wildfire and Arctic shipping emissions", 'Air Pollution Modeling and Its Application XXIV', edit. D. Steyn and N. Chaumerliac, Springer, Dordrecht, p301-306.

- Gong, W., S.R. Beagley, J. Zhang, R. Staebler, A. A. Aliabadi, S. Sharma, D. Tarasick, J. Burkart, M. Willis, G. Wentworth, J. Murphy, H. Bozem, F. Koellner, J. Schneider, A. Herber, W. R. Leitch, J. Abbatt (2017) "Modelling Regional Air Quality in the Canadian Arctic: Simulation of an Arctic Summer Field Campaign", 'Air Pollution Modeling and Its Application XXVI', edit. C. Mensink and G. Kallos, Springer, Dordrecht, in press.
- Hagedorn, R., 2008. « Using the ECMWF reforecast dataset to calibrate EPS forecasts ». *ECMWF Newsletter* **117**: 8–13.
- Hamill, T.M., R. Hagedorn et J.S. Whitaker, 2008. « Probabilistic Forecast Calibration Using ECMWF and GFS Ensemble Reforecasts. Part II: Precipitation ». *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2620–2632.
- Han, Y. et al., The effect of particle acidity on SOA formation from a-pinene photooxidation under atmospherically relevant conditions, *ACP*, 2016.
- Heilliette, S., et L. Garand, 2007. « A practical approach for the assimilation of cloudy infrared radiances and its evaluation using AIRS simulated observations ». *Atmosphere-Ocean*, **45** (4), pp 211-225.
- Heilliette, S., Y. Rochon, L. Garand et J. Kaminski, 2013. « Assimilation of infrared radiances in the context of observing system simulation experiments ». *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **52**, 1031-1045.
- Heilliette, P. Du, et L. Garand, 2014. Correlation inter-channel observation error statistics for radiances: estimation and impact in a near operational context at Environment Canada. *94th Amer. Meteorol. Soc. Conf.*, Atlanta, GA, É.-U., du 2 au 6 février 2014.
- Hines, C.O., 1997a. « Doppler-spread parameterization of gravity-wave momentum deposition in the middle atmosphere. Part 1: Basic formulation ». *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **59**, 371–386.
- Hines, C.O., 1997b. « Doppler-spread parameterization of gravity-wave momentum deposition in the middle atmosphere. Part 2: Broad and quasi monochromatic spectra, and implementation ». *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **59**, 387–400.
- Houtekamer, P.L., H.L. Mitchell et X. Deng, 2009. « Model Error Representation in an Operational Ensemble Kalman Filter ». *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2126-2143.
- Houtekamer, P.L., Zhang F., 2016: Review of the Ensemble Kalman Filter for Atmospheric Data Assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, vol. 144, 4489--4532
- Houtekamer, P.L., X. Deng, H.L. Mitchell, S.-J. Baek et N. Gagnon, 2014. « Higher resolution in an operational ensemble Kalman filter ». *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 1143-1162.
- 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.*, **53**, 1760–1774, doi:10.1175/JAMC-D-12-0284.1.
- Jacques, D., W. Chang, S-J. Baek, T. Milewski, K-S Chung, L. Fillion et H. Ritchie, 2016. « Developing a convective-scale EnKF data assimilation system for the Canadian MEOPAR project ». [Présenté pour publication à *Mon. Wea. Rev.* en avril 2016].
- Joe, P. et al., The Environment Canada Pan and ParaPan American Science Showcase Project, Bulletin of the American Meteorological Society, under review, 2017.
- Kageyama et Sato, 2004. « The Yin-Yang grid: An overset grid in spherical geometry ». *Geochem. Geophys. Geosystems*, **5**, Q09005, doi:10.1029/2004GC000734.
- Kain, J.S., et J.M. Fritsch, 1990. « A one-dimensional entraining / detraining plume model and its application in convective parameterization ». *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2784-2802.
- Kain, J.S., et J.M. Fritsch, 1993. « Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models ». *Meteor. Monogr.*, **27**, *Amer. Meteor. Soc.*, 165-170.
- Laroche, S., et R. Sarrazin, 2013. « Impact of radiosonde balloon drift on Numerical Weather Prediction and Verification ». *Wea. and Forecasting*, **28**, 772-782, DOI: 10.1175/WAF-D-12-00114.1.
- Lee et al., A Regression Approach for Estimation of Anthropogenic Heat Flux based on a Bottom-Up Air Pollutant Emission Database, *Atmospheric Environment*, 2014.

- Lellouche J-M, O. Le Galloudec, M. Drévilion, C. Régnier, E. Greiner, G. Garric, N. Ferry, C. Desportes, C.-E. Testut, C. Bricaud, R. Bourdallé-Badie, B. Tranchant, M. Benkiran, Y Drillet, A. Daudin et C. De Nicola, 2013. « Evaluation of global monitoring and forecasting systems at Mercator Ocean ». *Ocean Sci.*, **9**: 57-81, doi:10.5194/os-9-57-2013.
- Li, J., et H. W. Barker, 2005. « A radiation algorithm with correlated k-distribution. Part I: local thermal equilibrium ». *J. Atmos. Sci.*, **62**, 286-309.
- Li, X., M. Charron, L. Spacek et G. Candille, 2008. « A regional ensemble prediction system based on moist targeted singular vectors and stochastic parameter perturbations ». *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 443–462.
- Liggio, J. et al., Oil Sands operations as a large source of secondary organic aerosols, *Nature*, 2016.
- Liggio, J., Stroud, C.A. et al., Quantifying the Primary Emissions and Photochemical Production of Isocyanic Acid Downwind of Oil Sands Operations, accepted. *ES&T*, 2017.
- Lin, H., *et al.*, 2016. GEPS based Monthly Prediction at the Canadian Meteorological Centre. [Publié en ligne le 21 septembre 2016 à l'adresse suivante : DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-16-0138.1>].
- Lott, F., et M. Miller, 1997. « A new sub-grid scale orographic drag parameterization; its testing in the ECMWF model ». *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 101-127.
- Mailhot, J., *et al.*, 1998. Scientific Description of RPN Physics Library - Version 3.6. Recherche en prévision numérique, Service météorologique du Canada, Dorval (Québec), Canada.
- Mailhot, J., et S. Bélair, 2002. An examination of a unified cloudiness-turbulence scheme with various types of cloudy boundary layers. Preprints, *15th Symposium on Boundary Layer and Turbulence*, du 15 au 19 juillet 2002, Wageningen, Pays-Bas, 215-218.
- Makar, P.A., Staebler, R.M., Akingunola, A., Zhang, J., McLinden, C., Kharol, S.K., Pabla, B., Cheung, P., and Zheng, Q., The effects of forest canopy shading and turbulence on boundary layer ozone, *Nature Communications*, DOI:10.1038/ncomms15243, 14 pp, 2017
- Mastin, L. G., M. Guffanti, R. Servranckx, P. Webley, S. Barsotti, K. Dean, A. Durant, J. W. Ewert, A. Neri, W. I. Rose, D. Schneider, L. Siebert, B. Stunder, G. Swanson, A. Tupper, A. Volentik et C. F. Waythomas, 2009. « A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions ». *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **186** (1-2), 10–21, doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008.
- McFarlane, N.A., 1987. « The effect of orographically excited gravity wave drag on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere ». *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1775-1800.
- McFarlane, N.A., C. Girard et D.W. Shantz, 1987. Reduction of systematic errors in NWP and General Circulation models by parameterized gravity wave drag. Short and Medium-Range Numerical Weather Prediction, [collection d'articles présentés au *WMO/IUGG NWP Symposium*, du 4 au 8 août 1986, Tokyo, 713-728].
- McTaggart-Cowan, R., C. Girard, A. Plante, et M. Desgagné, 2011. « The utility of upper-boundary nesting in NWP ». *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 2117–2144.
- McTaggart-Cowan, R. et Ayrton Zadra, 2015. « Representing Richardson Number Hysteresis in the NWP Boundary Layer ». *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1232–1258.
- Ménard R., M. Deshaies-Jacques et N. Gasset, 2016. « A comparison of correlation-length estimation methods for the objective analysis of surface pollutants at Environment and Climate Change Canada ». *Journal of the Air and Waste Management Association*, DOI:10.1080/10962247.2016.117762 [disponible à l'adresse suivante : <http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2016.1177620>].
- Ménard, R., 2016: Error covariance estimation methods based on analysis residuals: theoretical foundation and convergence properties derived from simplified observation networks. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society (Open Access)*. 142:257-273. DOI:10.1002/qj.2650. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.2650/full>
- Ménard, R., and M. Deshaies-Jacques, 2017: Error covariance estimation methods based on analysis

- residuals and its application to air quality surface observation networks. *Air Pollution and Its Application XXV*, Editors C. Mensink and G. Kallos, Springer International AG, DOI 10.1007/978-3-319-57645-9_40.
- Merryfield, W. J., B. Denis, J.-S. Fontecilla, W.-S. Lee, S. Kharin, J. Hodgson et B. Archambault, 2011. The Canadian Seasonal to Interannual Prediction System (CanSIPS) : An overview of its design and operational implementation. Note technique du CMC. Disponible à l'adresse suivante : http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmci/product_guide/docs/lib/op_systems/doc_opchanges/technote_cansips_20111124_e.pdf.
- Merryfield, W. J., B. Denis, J.-S. Fontecilla, W.-S. Lee, S. Kharin, J. Hodgson et B. Archambault, 2011. The Canadian Seasonal to Interannual Prediction System (CanSIPS): An overview of its design and operational implementation. Note technique du CMC. [Disponible à l'adresse suivante : http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmci/product_guide/docs/lib/op_systems/doc_opchanges/technote_cansips_20111124_e.pdf].
- 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, 2013a. « The Canadian Seasonal to Interannual Prediction System. Part I: Models and Initialization ». *Mon. Wea. Rev.*, doi:10.1175/MWR-D-12-00216.1.
- Moran, M.D., S. Ménard, R. Pavlovic, D. Anselmo, S. Antonopoulos, A. Robichaud, S. Gravel, P.A. Makar, W. Gong, C. Stroud, J. Zhang, Q. Zheng, H. Landry, P.-A. Beaulieu, S. Gilbert, J. Chen et A. Kallaur, 2012. Recent Advances in Canada's National Operational Air Quality Forecasting System, 32nd NATO-SPS ITM, du 7 au 11 mai 2012, Utrecht, Pays-Bas.
- Moran, M., S. Ménard, S. Gravel, R. Pavlovic, et D. Anselmo, 2013. Versions 1.5.0 et 1.5.1 du système régional de prévision déterministe de qualité de l'air (SRPDQA) : mises à niveau du système régional opérationnel de prévision déterministe de qualité de l'air du Centre météorologique canadien (CMC) en octobre 2012 et février 2013. Note technique du CMC, Centre météorologique canadien, Dorval (Québec), mars, 34 p. [Disponible à l'adresse suivante : http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmci/product_guide/docs/lib/op_systems/doc_opchanges/technote_raqdps_20130226_f.pdf].
- Moran, M., Q. Zheng, J. Zhang et R. Pavlovic, 2015. RAQDPS Version 013: Upgrades to the CMC Operational Regional Air Quality Deterministic Prediction System Released in June 2015. Note technique du CMC, Centre météorologique canadien, Dorval (Québec), août 2015.
- Moran, M., R. Pavlovic, et J. Chen, 2016a. FireWork 2016 : implémentation de la première version opérationnelle au CMC du système régional de prévision déterministe de la qualité de l'air avec émissions en temps quasi réel des feux de forêts dérivées d'image satellitaires. Note technique, avril, Centre météorologique canadien, Montréal, 5 p. [Disponible à l'adresse suivante : http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/CMOI/product_guide/docs/tech_notes/technote_raqdps015fw_2_0160428_f.pdf].
- Moran, M., S. Gravel, V. Savic-Jovicic, R. Pavlovic et A. Lupu, 2016b. RAQDPS Versions 015 and 016: Migration of the CMC Operational Regional Air Quality Deterministic Prediction System to the Next Generation of the GEM Numerical Weather Prediction Model. Note technique du Centre météorologique, août, Montréal [En préparation].
- Noilhan, J., et S. Planton, 1989. « A simple parameterization of land surface processes for meteorological models ». *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536-549.
- Noilhan, J., et J. F. Mahfouf, 1996. « The ISBA land surface parameterisation scheme ». *Global Planet. Change*, **13**, 145–159.
- Pannekoucke, O., S. Ricci, S. Barthelemy, R. Ménard, and O. Thual, **2016**: Parametric Kalman filter for chemical transport models. *Tellus A*, 68, 31547. <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v68.31547>.
- Pavlovic R., D. Davignon, P.-A. Beaulieu et M. Moran, 2014. FireWork Performance Analysis, 11th Symposium on Fire and Forest Meteorology, American Meteorological Society, Minneapolis, MN, mai 2015 [Disponible à l'adresse suivante : <https://ams.confex.com/ams/11FIRE/webprogram/Paper271923.html>].
- Pavlovic, R., J. Chen, K. Anderson, M.D. Moran, P.-A. Beaulieu, D. Davignon et S. Cousineau, 2016. « The FireWork air quality forecast system with near-real-time biomass burning emissions: Recent

- developments and evaluation of performance for the 2015 North American wildfire season ». *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, DOI:10.1080/10962247.2016.1158214.
- Pudykiewicz, J., R. Benoit et J. Mailhot, 1992. « Inclusion and verification of a predictive cloud water scheme in a regional weather prediction model ». *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 612-626.
- Pugliese et al., High-resolution quantification of atmospheric CO₂ mixing ratios in the Greater Toronto Area, Canada, under review, ACPD, 2017.
- Qaddouri, A., C. Girard et L. Garand, 2015. Changement de la version 4.0.1 à la version 5.0.0 du Système global de prévision déterministe (SGPD) – Grille yin-yang. Note technique du Centre météorologique canadien. [Disponible sur demande auprès d'Environnement et Changement climatique Canada, Centre météorologique canadien, Division du développement, 2121, route Transcanadienne, 4^e étage, Dorval (Québec) H9P 1J3, ou à l'adresse suivante : http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmci/product_guide/docs/tech_notes/technote_gdps-500_20151215_f.pdf].
- Qaddouri, A., et V. Lee, 2011. « The Canadian Global Environmental Multiscale model on the Yin-Yang grid system ». *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 1913-1926.
- Robichaud, A., et R. Ménard, 2014. « Multi-year objective analyses of warm season ground-level ozone and PM_{2.5} over North America using real-time observations and Canadian operational air quality models ». *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 1769–1800, 2014, doi:10.5194/acp-14-1769-2014.
- Robichaud, A., R. Ménard, Y. Zaitseva and D. Anselmo, 2016. Multi-pollutant surface objective analysis and mapping of air quality health index over North America. *Air Quality, Atmosphere & Health (Open Access)*, doi:10.1007/s11869-015-0385-9. <http://link.springer.com/article/10.1007/s11869-015-0385-9>
- Robichaud, A., 2017: Surface data assimilation of chemical compounds over North America and its impact on air quality and Air Quality Health Index (AQHI) forecast. *Air Qual. Atmos. Health*, DOI 10.1007/s11869-017-0485-9.
- Rochon, Y., J. W. Kaminski, S. Heilliette, L. Garand, J. de Grandpré et R. Ménard, 2012. Observation system simulation experiments for the PREMIER mission. *Proc. 5th WMO Workshop on the impact of various observing systems on NWP*, Sedona, AZ, mai 2012.
- 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.*, **119**, 13,651–13,682, doi:10.1002/2014JD022387.
- Shutts, G. 2005. « A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems ». *Q.J.R.Meteorol. Soc.* **131**, 3079-310.
- Skachko, S., R. Ménard, Q. Errera, Y. Christophe, and S. Chabrilat, 2016 : EnKF and 4D-Var data assimilation with chemistry transport model BASCOE (version 05.06). *Geoscience Model Development (Open Access Journal)*, 9:2893-2908. doi:10.5194/gmd-9-2893-2016. www.geosci-model-dev.net/9/2893/2016.
- Skachko, S., R. Menard, Q. Errera, Y. Christophe et S. Chabrilat, 2016. « EnKF and 4D-Var Data Assimilation with a Chemistry Transport Model ». *Geosci. Model Dev.* [Sous presse], doi:10.5194/gmd-2016-95, 2016.
- Smith, G.C., F. Roy et B. Brasnett, 2012. « Evaluation of an Operational Ice-Ocean Analysis and Forecasting System for the Gulf of St. Lawrence ». *QJRM*S, doi: 10.1002/qj.1982.
- 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. Drévilion, G. Garric, C.-E. Testut, J.-M. Lellouche, P. Pellerin, H. Ritchie, Y. Lu, F. Davidson, M. Buehner, A. Caya et M. Lajoie, 2016. « Sea ice forecast verification in the Canadian Global Ice Ocean Prediction System ». *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **142**: 659–671. doi:10.1002/qj.2555.
- Sommers, J., Stroud, C.A. et al., Evaluating models of SOA produced from the Athabasca Oil Sands, AAAR, 2017.

- Sparks, R.S.J., M.I. Bursik, S.N. Carey, J.S. Gilbert, L.S. Glaze, H. Sigurdsson et A.W. Woods, 1997. *Volcanic Plumes*, John Wiley and Sons, New York, 574 p.
- Stroud, C. et al., *Lessons Learned from the High Resolution Air Quality Forecasting Demonstration during the 2015 Pan Am Games*, IWAQFR, 2017.
<https://joss.ucar.edu/sites/default/files/meetings/2017/iwaqfr/presentations>
- Stroud, C.A. et al., *The effect of particle acidity on a-pinene SOA formation: Modelling results for the Athabasca Oil Sands region*, ICNAA conference, 2017.
- Sundqvist, H., E. Berge et J. E. Kristjansson, 1989. « Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale numerical weather prediction model ». *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1641-1657.
- Tanguay, M., L. Fillion, E. Lapalme et M. Lajoie, 2012. « Four-Dimensional Variational Data Assimilation for the Canadian Regional Deterministic Prediction System ». *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 5, 1517-1538.
- Tranchant B., C.-E. Testut, L. Renault, N. Ferry, F. Birol et P. Brasseur, 2008. « Expected impact of the future SMOS and Aquarius Ocean surface salinity missions in the Mercator Océan operational systems: New perspectives to monitor ocean circulation ». *Remote Sens. Environ.*, **112**: 1476–1487.
- Tremblay, A., A. Glazer, W. Szyrmer, G. Isaac et I. Zawadzki, 1995. « Forecasting of supercooled clouds ». *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2098-2113.
- Trishchenko, A. P., et L. Garand, 2011. « Spatial and temporal sampling of polar regions from two-satellite system on Molniya orbit ». *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **28**(8), 977-992.
- Trishchenko, A. P., L. Garand et L. D. Trichtchenko, 2011. « Three apogee 16-h highly elliptical orbit as optimal choice for continuous meteorological imaging of polar regions ». *J. Oceanic Atmos. Tech.*, **28**(11), 1407-1422.
- Trishchenko, A. P., et L. Garand, 2012. « Observing polar regions from space: Advantages of a satellite system on a highly elliptical orbit versus a constellation of low Earth polar orbiters ». À paraître dans *Journal canadien de télédétection*, **38**(1), 12-24.
- Trichchenko, A. P., L. Garand, L. D. Trichtchenko et L. Nikitina, 2016. « Multiple-Apogee highly elliptical orbits for continuous meteorological imaging of polar region ». *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 19-24.
- Vaillancourt P., et al., 2012. *Amélioration du système régional de prévision déterministe (SRPD) de la version 2.0.0 à la version 3.0.0*. Note technique du Centre météorologique canadien. [Disponible à l'adresse suivante :
http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmci/product_guide/docs/lib/op_systems/doc_opchanges/technote_rdfs300_20121003_f.pdf].
- Verret, R., 1987. Développement d'un système de « prévision parfaite » pour prévoir les probabilités de précipitations et l'état du ciel. Document technique du CMC; **29**, 28 p.
- Verret R., 1989. A statistical forecasting system with auto-correction error feedback. Preprints, 11th Conference on Probability and Statistics, octobre 1989, Monterey, Californie, 88-92.
- Verret, R., G. Babin, D. Vigneux, R. Parent et J. Marcoux, 1993. SCRIBE: An Interactive System for Composition of Meteorological Forecasts. *Preprints, 13th AMS Conference on Weather Analysis and Forecasting*, du 2 au 6 août 1993, Vienna, Virginie, 213-216.
- Verret, R., G. Babin, D. Vigneux, J. Marcoux, J. Boulais, R. Parent, S. Payer et F. Petrucci, 1995. SCRIBE an interactive system for composition of meteorological forecasts. *Preprints 11th International Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography and Hydrology*, du 15 au 20 janvier 1995, Dallas, Texas, 56-61.
- Verret, R., D. Vigneux, J. Marcoux, R. Parent, F. Petrucci, C. Landry, L. Pelletier et G. Hardy, 1997. SCRIBE 3.0 a product generator. *Preprints 13th International Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography and Hydrology*, du 2 au 7 février 1997, Long Beach, Californie, 392-395.
- Vosper, S.B., H. Wells et A. R. Brown, 2009. « Accounting for non uniform static stability in orographic drag parametrization ». *J. R. Meteorol. Soc.*, **135**, 815-822.
- Wells, H., S.B. Vosper, A.N. Ross, A.R. Brown et S. Webster, 2008. « Wind direction effects on orographic drag ». *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **134**, 689-701.

- Wilson, L.J., et M. Vallée, 2001. « The Canadian Updateable Model Output Statistics (UMOS) System: Design and Development Tests ». *Wea. Forecasting*, **17**, 206–222.
- Wilson, L.J., et M. Vallée, 2002. « The Canadian Updateable Model Output Statistics (UMOS) System: Validation against Perfect Pro ». *Wea. Forecasting*, **18**, 288–302.
- Wilson, J. D. et T. K. Flesch, 2004. « An Idealized Mean Wind Profile for the Atmospheric Boundary Layer ». *Boundary-Layer Meteorology*, **110** (2), 281–299, doi:10.1023/A:1026044025803.
- You, Y., Staebler, R. M., Moussa, S. G., Su, Y., Munoz, T., Stroud, C., Zhang, J., and Moran, M. D.: Long-path measurements of pollutants and micrometeorology over Highway 401 in Toronto, *Atmos. Chem. Phys.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2017-328>, 2017.
- Zadra, A., M. Roch, S. Laroche et M. Charron, 2003. « The Subgrid scale Orographic Blocking Parameterization of the GEM Model ». *Atmos. Ocean*, **41**, 151-170.
- Zadra, A., R. McTaggart-Cowan, P.A. Vaillancourt, M. Roch, S. Bélair, A.-M. Leduc, 2013. « Evaluation of tropical cyclones in the Canadian global modeling system: sensitivity to moist process parametrization », présenté pour publication dans *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 1197-1220.
- Zawadzki I. et U. Germann, 2002. « Scale-Dependence of the Predictability of Precipitation from Continental Radar Images. Part I: Description of the Methodology ». *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2859–2873.
- Zawadzki I. et U. Germann, 2004. « Scale Dependence of the Predictability of Precipitation from Continental Radar Images. Part II: Probability Forecasts ». *J. Appl. Meteor.*, **43**, 74–89.
- Zawadzki I., B.J. Turner et U. Germann, 2004. « Predictability of Precipitation from Continental Radar Images. Part III: Operational Nowcasting Implementation (MAPLE) ». *J. Appl. Meteor.*, **43**, 231–248.