



# Frontline

*Applications de Recherche en Foresterie*

Service Canadian des Forêts - Sault Ste. Marie

Note Technique N° 106

## **Modèles spatiaux des températures minimales et maximales, des précipitations totales et de paramètres bioclimatiques dérivés pour le Canada et l'Amérique du Nord, pour la période 1971-2000.**

Dan McKenney, Pia Papadopol, Kathy Campbell, Kevin Lawrence, Michael Hutchinson

### **Introduction**

Nous avons élaboré des modèles spatiaux de « normales » climatiques pour l'ensemble du Canada et l'ensemble de l'Amérique du Nord pour la période 1971-2000 au moyen des algorithmes de splines de lissage « plaque mince » du progiciel ANUSPLIN (<http://cres.anu.edu.au/outputs/software.html>). ANUSPLIN est un progiciel mathématiquement très élaboré et efficient permettant de produire des cartes climatiques à différentes échelles spatiales et temporelles. Le Service canadien des forêts a collaboré avec plusieurs membres du Service météorologique du Canada d'Environnement Canada, le Pr Michael Hutchinson (créateur d'ANUSPLIN) de l'Université nationale d'Australie et d'autres personnes pour élaborer divers modèles climatiques couvrant le Canada et l'Amérique du Nord. Une bonne part des résultats de ces travaux est affichée sous forme de cartes interactives à l'adresse [http://www.glfc.cfs.nrcan.gc.ca/landscape/climate\\_models\\_f.html](http://www.glfc.cfs.nrcan.gc.ca/landscape/climate_models_f.html).

C'est pour faciliter l'étude des relations entre le climat et les plantes et animaux que nous avons élaboré ces modèles. Le climat est un important déterminant de la répartition, de l'abondance et de la productivité des végétaux et des animaux. Comme il n'y a pratiquement jamais de station météorologique à proximité des lieux où sont effectuées les recherches biologiques de terrain, il apparaît nécessaire d'établir des estimations climatiques spatialement fiables pour des endroits parfois très éloignés de la station météo la plus proche. De plus, l'utilisation croissante de modèles de processus pour régler les problèmes de modélisation en foresterie et dans d'autres disciplines touchant à l'environnement fait qu'on a besoin de modèles à grille régulière fiables

pour divers paramètres climatiques. Enfin, les incidences possibles de changements climatiques rapides ont aussi fortement motivé l'élaboration des modèles climatiques spatialement explicites présentés ici.

La présente note technique donne un aperçu des modèles spatiaux pour les températures minimales et maximales quotidiennes moyennes mensuelles, les précipitations totales mensuelles moyennes et plusieurs paramètres bioclimatiques dérivés pour le Canada et pour l'Amérique du Nord, pour la période 1971-2000. Nous analysons la qualité des modèles en interprétant les diagnostics des modèles et les figures issues de ces modèles. Nous indiquons aussi comment trouver et examiner ces modèles sur Internet. Parmi les applications canadiennes d'ANUSPLIN qui ont déjà été documentées, on compte celles de Mackey et al. (1996), Price et al. (2000, 2004) et McKenney et al. (2001, 2004, 2005). En outre, des documents portant sur plusieurs autres applications sont en cours de rédaction : modèles mensuels historiques remontant à 1901, modèles des températures minimales extrêmes pour la rusticité des végétaux, modèles hebdomadaires, etc.

### **Méthodes**

Il existe de nombreux articles publiés dans des revues avec comité de lecture concernant le progiciel ANUSPLIN et ses mathématiques sous-jacentes. On trouvera les références bibliographiques de ces articles et d'autres documents pertinents sur les sites Web mentionnés plus haut. ANUSPLIN est un progiciel d'ajustement de surfaces non paramétrique multivarié permettant d'élaborer des modèles climatiques spatialement

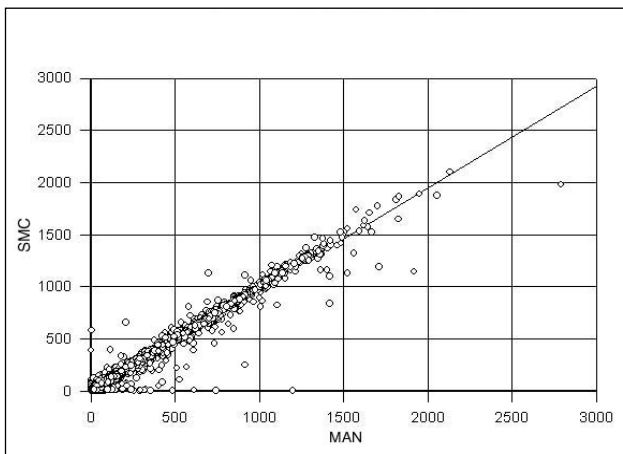


Ressources naturelles  
Canada

Natural Resources  
Canada

Canada

continus. Il utilise les splines de lissage « plaque mince », qui constituent une généralisation multivariée vraie des splines univariées, comme l'explique Wahba (1990), et qu'il ne faut pas voir comme des constructions simples fondées sur des polynômes cubiques. Leurs premières applications ont été décrites par Wahba et Wendelberger (1980), la méthodologie ayant par la suite été développée et adaptée à la cartographie climatique par le Pr Michael Hutchinson de l'Université nationale d'Australie au cours des quelque vingt dernières années. Les évaluations des modèles sont généralement réalisées par examen des diagnostics des modèles produits automatiquement et, dans certains cas, par rétention des données des modèles initiaux et comparaison des valeurs estimées et observées pour les endroits visés. Trois diagnostics produits automatiquement sont utilisés ici. Le SIGNAL correspond aux degrés de liberté de la spline ajustée et varie entre zéro et le nombre de stations utilisées dans l'interpolation. Selon Hutchinson et Gessler (1994), le signal ne devrait généralement pas être supérieur à environ la moitié des points de données quand on utilise SPLINA (moins de ~2000-3000 stations) ou à 80-90 % du nombre de nœuds avec SPLINB (version utilisée quand il y a un grand nombre de stations). Les modèles dont le signal est adéquat offrent un bon équilibre entre le degré de lissage des données et l'exactitude de l'interpolation. Quand le signal est mauvais, les modèles sont généralement plus proches d'une interpolation exacte et dans certains cas donnent des gradients abruptes non réalistes entre les



**Figure 1.** Comparaison entre les altitudes estimées par le modèle altimétrique numérique (MAN) et les altitudes des stations fournies par le SMC (mètres).

stations. De plus, une interpolation exacte suppose l'absence d'erreurs dans les données sources, supposition qui n'est habituellement pas réaliste. La racine carrée du score de validation croisée généralisée (square root of the generalised cross validation, RTGCV) est une mesure de l'erreur de prévision de la surface. Il s'agit

d'une estimation de l'erreur globale de prévision qui est robuste mais plutôt prudente du fait qu'elle inclut les erreurs dans les données. L'erreur quadratique moyenne du modèle (root mean square model error, RTMSE) est une estimation de l'erreur-type après suppression de l'erreur estimative dans les données. L'erreur vraie du modèle ajusté se situe entre la RTGCV et la RTMSE. Ces deux paramètres peuvent donner des estimations moins exactes de l'erreur globale quand la répartition des points de données est très irrégulière. Les tableaux du présent document donnent les résultats des diagnostics des modèles. Par ailleurs, les figures montrent la réduction de la dispersion des données dans les modèles ajustés finaux.

Nous avons éliminé pour ces modèles certaines valeurs aberrantes, quand les erreurs de données étaient particulièrement évidentes, par exemple dans les cas de virgules décimales mal placées ou de valeurs extrêmement aberrantes. Nous menons aussi des efforts additionnels d'évaluation de la qualité des données en collaboration avec le personnel du SMC. Les valeurs aberrantes peuvent originer de problèmes de données, de coordonnées et de valeurs d'altitude incorrectes ou de caractéristiques microclimatiques particulières de la station qui sont difficiles à représenter dans les modèles à mésoéchelle élaborés ici. La figure 1 montre les disparités entre les estimations d'altitude fournies par un modèle altimétrique numérique (MAN) à résolution d'environ 100-150 m (Lawrence et al. 2005) et les altitudes des stations fournies par le SMC. Les différences peuvent être causées par des erreurs dans le MAN lui-même, mais aussi par des localisations erronées ou insuffisamment précises des stations. Quoiqu'il en soit, nous nous efforçons d'examiner comme il se doit les disparités les plus marquées étant donné l'importance de l'altitude dans les modèles climatiques spatiaux. Il demeure remarquable que les altitudes de la grande majorité des stations (>95%) tombent à plus ou moins 0-100 mètres des valeurs générées par le MAN.

Tous les modèles présentés ici utilisent la position (longitude et latitude) et l'altitude. L'expérience nous a permis de conclure que la longitude, la latitude et l'altitude exagérée verticalement sont des paramètres indépendants utiles pour l'interpolation du climat mensuel moyen au Canada (voir Hutchinson et Bischof 1983; Hutchinson 1995; McKenney et al. 2001). Pour les modèles concernant les moyennes mensuelles, ces trois paramètres indépendants donnent souvent des modèles dont les erreurs-types sont de plus ou moins un demi-degré pour la température et 10-20% pour les précipitations. De telles valeurs d'erreur sont généralement considérées comme reflétant bien l'erreur dans les mesures et la variation locale sous le niveau de résolution du réseau de données. Les modèles présentés ici concernent les températures minimales et maximales quotidiennes moyennes mensuelles et les précipitations totales mensuelles moyennes. Les

**Tableau 1.** Paramètres bioclimatiques standard issus des surfaces canadiennes et nord-américaines (voir <http://cres.anu.edu.au/outputs/anuclim.php> pour de l'information sur ANUCLIM).

Paramètres ANUCLIM	Choix d'autres paramètres bioclimatiques
01 Température moyenne annuelle	01 Numéro du jour julien du début de la saison de croissance
02 Amplitude quotidienne moyenne[moyenne (max – min de la période)]	02 Numéro du jour julien de la fin de la saison de croissance
03 Isothermalité (paramètre 2/paramètre 7)	03 Durée en jours de la saison de croissance
04 Saisonnalité de la température (c.v.)	04 Précipitations totales pour la période 1
05 Température maximale de la période la plus chaude	05 Précipitations totales pour la période 2
06 Température minimale de la période la plus froide	06 Précipitations totales pour la période 3
07 Amplitude annuelle de la température (paramètre 5 - paramètre 6)	07 Précipitations totales pour la période 4
08 Température moyenne du trimestre le plus humide	08 DJC au-dessus de la température de référence pour la période 1
09 Température moyenne du trimestre le plus sec	09 DJC au-dessus de la température de référence pour la période 2
10 Température moyenne du trimestre le plus chaud	10 DJC au-dessus de la température de référence pour la période 3
11 Température moyenne du trimestre le plus froid	11 DJC au-dessus de la température de référence pour la période 4
12 Précipitations annuelles	12 Température moyenne annuelle
13 Précipitations de la période la plus humide	13 Température minimale annuelle
14 Précipitations de la période la plus sèche	14 Température maximale annuelle
15 Saisonnalité des précipitations (c.v.)	15 Température moyenne de la période 3
16 Précipitations du trimestre le plus humide	16 Amplitude de la température pour la période 3
17 Précipitations du trimestre le plus sec	
18 Précipitations du trimestre le plus chaud	
19 Précipitations du trimestre le plus froid	

**Remarque :** La saison de croissance varie d'une espèce végétale à l'autre. Elle a été ici déterminée selon des critères de température : nous avons considéré qu'elle commençait quand la température moyenne quotidienne était supérieure ou égale à 5 degrés Celsius sur cinq jours consécutifs après le 1er mars, et qu'elle se terminait quand le minimum moyen était inférieur à -2 degrés Celsius après le 1er août. Comme ils correspondent plutôt à la période sans gel, ces critères de définition de la saison de croissance visent davantage les arbres que les cultures agricoles. D'autres critères peuvent être appliqués assez facilement et peuvent être obtenus sur demande.

Période 1 – les 3 mois précédant le début de la saison de croissance;

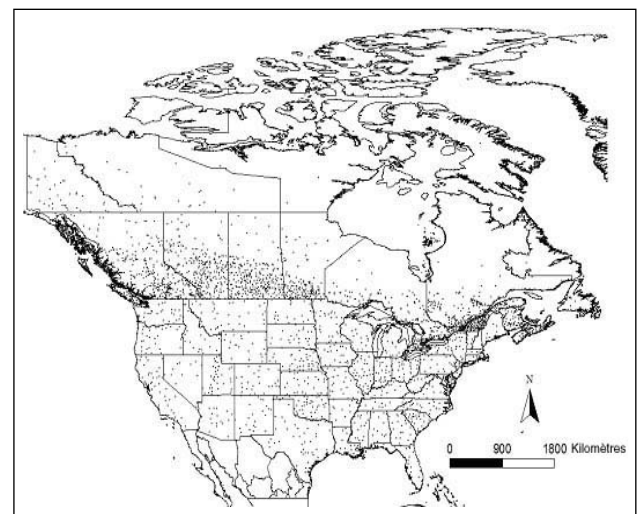
Période 2 – les six premières semaines de la saison de croissance;

Période 3 – la saison de croissance entière;

Période 4 – la différence entre la période 3 et la période 2.

valeurs des paramètres bioclimatiques comme la durée de la saison de croissance et les précipitations durant la saison de croissance ont été obtenues au moyen de ces surfaces primaires et des méthodes décrites par Mackey et al. (1996). Nous avons de cette façon obtenu une séquence quotidienne des températures minimales et maximales et des précipitations, les valeurs étant contraintes de suivre les moyennes mensuelles de façon monotone. Ces valeurs ne représentent que les conditions moyennes, les conditions météorologiques d'une année donnée pouvant ne pas y correspondre. Le tableau 1 dresse la liste des paramètres bioclimatiques dont les valeurs ont été générées par les modèles et sont maintenant disponibles.

Ron Hopkinson (SMC – Regina), avec l'aide d'Anna Deptuch-Staph (SMC - Downsview), ont calculé les moyennes des données des stations canadiennes pour obtenir des estimations des « normales » pour la période 1971-2000 et nous ont communiqué leurs résultats.



**Figure 2.** Répartition spatiale des stations ayant fourni des données pour la période 1971-2000.

Nous soulignons que le SMC travaille encore au contrôle de la qualité de ces données. Nous soulignons aussi que le SMC s'efforce d'étalonner les normales des stations aérologiques de façon à ce qu'elles puissent être utilisées avec celles des stations de surface à des fins d'interpolation. Milewska et al. (2005) ont montré que les seules stations de surface ne peuvent donner une représentation réaliste des inversions de température à haute altitude dans les régions nordiques éloignées.

Les modèles limités au Canada ont été élaborés suivant deux méthodes. La première utilise les stations qui fournissent des données pour tous les mois (Modèle 1), tandis que la deuxième utilise en plus les stations exploitées durant seulement une partie de l'année (Modèle 2). Pour une partie de notre modélisation bioclimatique, nous avons besoin de surfaces ANUSPLIN pour les 12 mois de l'année dans un même modèle, d'où la nécessité d'employer le Modèle 1. Comme le Modèle 1 utilise un nombre un peu inférieur de stations, nous avons réalisé des analyses additionnelles en retenant 100 stations pour évaluer la qualité de ces surfaces. Les résultats de ce dernier exercice, qui feront l'objet d'un article de revue scientifique en cours de rédaction, ne sont pas fournis ici, mais confirment la validité des diagnostics présentés ici. Comme l'utilisation de stations additionnelles peut généralement améliorer les surfaces, nous recommandons aux utilisateurs de recourir au Modèle 2 pour la plupart des applications canadiennes.

Les modèles pour l'Amérique du Nord utilisent des données canadiennes et américaines. Les données américaines – données quotidiennes COOP NDP-070 pour la période 1876-1997 (Easterling et al. 1999) (avec mises à jour jusqu'à 2000 fournies par Tim Owen, comm. pers.) – proviennent du United States Historical Climate Network (Asheville, Caroline du Nord). Ces données ont été utilisées pour l'analyse des tendances des températures minimales et maximales, des extrêmes de température et de l'amplitude quotidienne des températures de même que pour l'évaluation des impacts des changements climatiques (New et al. 1999, 2000; Easterling et al. 1997). Les données canadiennes ont été obtenues du Service météorologique du Canada (SMC) (DLY04 1961-2000). Les données des deux sources ont d'abord été traitées séparément. Les données américaines ont été converties en unités métriques, puis fusionnées avec les données du SMC. Avant de créer les surfaces, toutes les données, dont les altitudes à chaque station climatique, ont été converties en unités métriques. La figure 2 montre les emplacements des stations en Amérique du Nord. Dans les régions nordiques du Canada, la densité de stations est particulièrement faible. Les nombres de stations sont indiqués dans les tableaux des résultats.

## Résultats

Globalement, les surfaces semblent de grande qualité –

**Tableau 2.** Diagnostics des surfaces pour le Modèle 1 – seulement les stations exploitées toute l'année.

Température maximale							
Mois	Points	Signal	Ratio	Moyenne	Écart-type	rtgcv	rtmse
1	2595	853.7	0.33	-6.21	6.50	1.04	0.49
2	2595	676.6	0.26	-3.64	6.12	0.90	0.40
3	2595	782.4	0.30	1.80	5.47	0.77	0.35
4	2595	942.7	0.36	9.07	4.64	0.71	0.34
5	2595	1223.4	0.47	15.93	4.11	0.71	0.35
6	2595	1264	0.49	20.44	3.48	0.73	0.37
7	2595	1366.7	0.53	23.31	3.17	0.72	0.36
8	2595	1186.3	0.46	22.56	3.20	0.71	0.35
9	2595	946.8	0.36	17.33	3.34	0.71	0.34
10	2595	989.9	0.38	10.47	3.74	0.50	0.24
11	2595	1297	0.50	2.12	5.02	0.55	0.28
12	2595	1178.4	0.45	-3.97	5.95	0.77	0.38
Température minimale							
Mois	Points	Signal	Ratio	Moyenne	Écart-type	rtgcv	rtmse
1	2596	1094.7	0.42	-15.59	7.93	1.38	0.68
2	2596	981.0	0.38	-13.67	7.36	1.35	0.65
3	2596	1105.1	0.43	-8.55	6.18	1.06	0.53
4	2596	1048.7	0.40	-1.90	4.45	0.75	0.37
5	2596	1066.8	0.41	3.87	3.27	0.74	0.37
6	2596	1117.0	0.43	8.57	2.76	0.80	0.39
7	2596	1356.4	0.52	11.26	2.71	0.84	0.42
8	2596	1193.6	0.46	10.54	2.82	0.92	0.46
9	2596	1116.5	0.43	6.13	3.13	0.93	0.46
10	2596	1258.8	0.48	0.84	3.77	0.86	0.43
11	2596	1382.9	0.53	-5.62	5.82	0.86	0.43
12	2596	1367.8	0.53	-12.48	7.26	1.16	0.58
Précipitations							
Mois	Points	Signal	Ratio	Moyenne	Écart-type	rtgcv	rtmse
1	3070	1421.3	0.46	78.54	77.24	15.40	7.67
2	3070	1512.5	0.49	61.21	63.83	12.30	6.15
3	3070	1568.2	0.51	64.49	55.74	12.20	6.07
4	3070	1465.4	0.48	60.14	43.18	10.40	5.18
5	3070	1541.5	0.50	70.01	30.15	9.54	4.77
6	3070	268.8	0.41	79.69	25.26	10.60	5.20
7	3070	1221.9	0.40	76.62	26.75	10.50	5.13
8	3070	981.8	0.32	74.44	28.39	10.30	4.82
9	3070	1286.9	0.42	73.93	38.28	11.50	5.65
10	3070	1775.9	0.58	78.38	68.87	12.50	6.14
11	3070	1661.8	0.54	87.18	88.70	15.40	7.68
12	3070	1565.5	0.51	85.91	84.08	16.10	8.03

les signaux tombent dans les limites recommandées dans la plupart des cas, et les RTGCV et RTMSE sont tels qu'attendus et souhaités. Les tableaux 2 et 3 dressent le bilan des diagnostics pour les modèles canadiens, tandis que les figures 3, 4 et 5 montrent la réduction de la dispersion des données dans les modèles finaux ajustés pour le Modèle 1. Les diagnostics pour les modèles 1 et 2 sont très similaires, ce qui témoigne de la robustesse des modèles et donc de la redondance potentielle de toute station donnée (particulièrement dans les régions à plus forte densité de stations). Il n'en reste pas moins que l'ajout de stations mesurant les précipitations peut améliorer de façon générale les estimations dans la plupart des régions. Les figures montrent la différence entre les valeurs observées et estimées à chaque station selon le Modèle 1 final (toutes les données recueillies à longueur d'année incluses). On doit se rappeler que nous ne visons pas une interpolation exacte, mais plutôt l'obtention

**Tableau 3.** Diagnostics des surfaces pour le Modèle 2 – stations pouvant n'être exploitées qu'une partie de l'année comprises.

Température maximale							
Mois	Points	Signal	Ratio	Moyenne	Écart-type	rtgcv	Rtmse
1	2836	935.2	0.33	-6.244	6.51	1.11	0.52
2	2852	680.9	0.24	-3.670	6.14	0.97	0.41
3	2861	751.3	0.26	1.757	5.42	0.82	0.36
4	2857	956.7	0.33	9.059	4.60	0.77	0.36
5	3016	1352.7	0.45	15.756	4.12	0.77	0.38
6	3067	1492.0	0.49	20.193	3.54	0.78	0.39
7	3052	1611.5	0.53	23.044	3.26	0.73	0.36
8	3042	1301.6	0.43	22.283	3.32	0.75	0.37
9	3010	1004.7	0.33	17.133	3.39	0.75	0.36
10	2872	993.5	0.35	10.386	3.79	0.54	0.26
11	2839	1276.1	0.45	2.012	5.08	0.61	0.30
12	2813	1252.1	0.45	-4.011	5.95	0.81	0.40
Température minimale							
Mois	Points	Signal	Ratio	Moyenne	Écart-type	rtgcv	Rtmse
1	2837	1175.2	0.41	-15.640	7.96	1.45	0.71
2	2853	978.5	0.34	-13.729	7.40	1.40	0.67
3	2862	1163.2	0.41	-8.638	6.18	1.09	0.54
4	2860	1096.7	0.38	-1.966	4.44	0.79	0.38
5	3017	1310.9	0.43	3.712	3.26	0.79	0.39
6	3068	1388.3	0.45	8.373	2.79	0.82	0.41
7	3053	1695.9	0.56	11.039	2.76	0.86	0.43
8	3043	1651.9	0.54	10.314	2.88	0.96	0.48
9	3010	1612.2	0.54	5.935	3.16	0.99	0.49
10	2872	1373.1	0.48	0.742	3.80	0.89	0.44
11	2840	1418.8	0.50	-5.737	5.88	0.94	0.47
12	2814	1449.9	0.52	-12.531	7.27	1.21	0.60
Précipitations							
Mois	Points	Signal	Ratio	Moyenne	Écart-type	rtgcv	Rtmse
1	3287	1465.1	0.45	78.120	76.35	15.50	7.67
3	3289	1487.0	0.45	64.140	55.29	12.60	6.26
4	3335	1544.7	0.46	59.480	43.29	11.10	5.52
5	3544	1578.5	0.45	68.900	29.90	10.40	5.16
6	3612	1432.2	0.40	80.270	25.27	11.30	5.53
7	3610	1222.0	0.34	77.230	27.16	11.40	5.38
8	3594	956.3	0.27	74.070	27.90	11.40	5.03
9	3520	1398.2	0.40	72.230	37.84	12.20	5.96
10	3362	1909.5	0.57	77.450	68.93	13.20	6.51
11	3283	1777.0	0.54	86.930	89.80	16.30	8.09
12	3256	1581.2	0.49	85.230	83.08	16.20	8.11

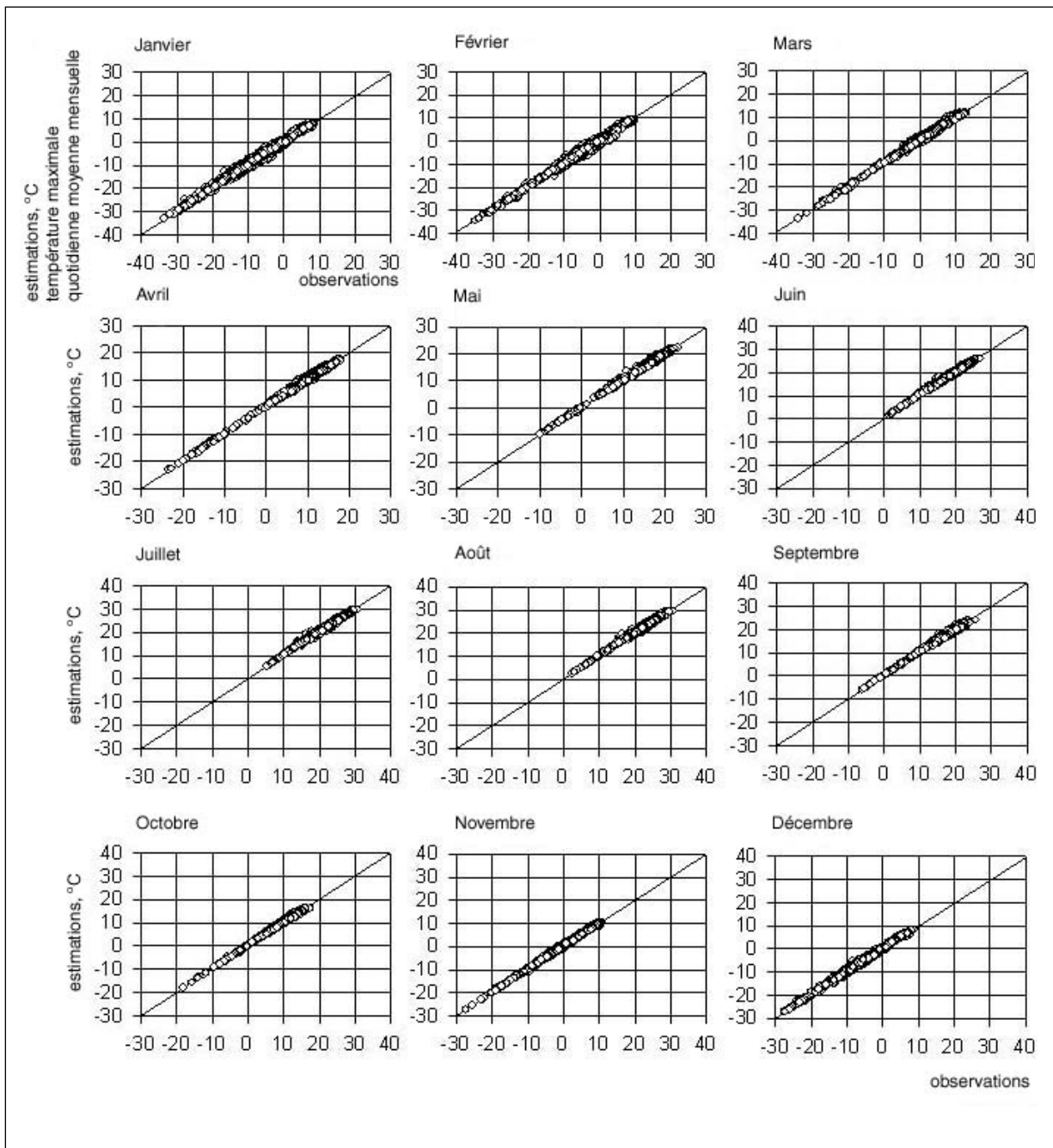
**Tableau 4.** Diagnostics des surfaces pour les modèles nord-américains

Température maximale							
Mois	Points	Signal	Ratio	Moyenne	Écart-type	rtgcv	rtmse
1	8034	1783.7	0.69	1.20	8.83	0.83	0.34
2	8034	1559.2	0.60	3.92	8.65	0.79	0.31
3	8034	1503.8	0.58	8.90	7.88	0.75	0.29
4	8034	1645.8	0.63	14.94	6.56	0.76	0.31
5	8034	1864.1	0.72	20.67	5.46	0.77	0.32
6	8034	1973.4	0.76	25.23	5.19	0.77	0.33
7	8034	2076.1	0.80	27.94	4.89	0.77	0.34
8	8034	2070.7	0.80	27.23	4.94	0.74	0.32
9	8034	1972.2	0.76	22.82	5.61	0.71	0.31
10	8034	1884.1	0.72	16.49	6.35	0.61	0.26
11	8034	1918.6	0.74	8.57	7.49	0.59	0.25
12	8034	1959.4	0.75	2.95	8.26	0.69	0.30
Température minimale							
Mois	Points	Signal	Ratio	Moyenne	Écart-type	rtgcv	rtmse
1	8035	1925.3	0.74	-9.72	8.48	1.23	0.52
2	8035	1825.8	0.70	-7.76	8.08	1.22	0.51
3	8035	1760.6	0.68	-3.28	7.04	1.04	0.43
4	8035	1849.5	0.71	1.91	5.58	0.92	0.39
5	8035	1916.5	0.74	7.27	5.02	0.91	0.39
6	8035	2077.1	0.80	11.82	4.86	0.93	0.41
7	8035	2072.8	0.80	14.40	4.66	0.97	0.43
8	8035	2032.0	0.78	13.64	4.69	1.03	0.45
9	8035	2000.0	0.77	9.45	5.19	1.08	0.47
10	8035	1953.1	0.75	3.73	5.19	1.11	0.48
11	8035	1980.3	0.76	-2.09	6.29	1.03	0.44
12	8035	2012.5	0.77	-7.52	7.63	1.12	0.49
Précipitations							
Mois	Points	Signal	Ratio	Moyenne	Écart-type	rtgcv	rtmse
1	10646	2670	0.86	70.54	64.41	10.20	4.41
2	10646	2682	0.87	60.54	54.12	8.69	3.77
3	10646	2665	0.86	73.07	51.22	9.37	4.06
4	10646	2589	0.84	68.51	39.40	8.07	3.46
5	10646	2448	0.79	81.58	37.85	8.37	3.52
6	10646	2129	0.69	81.91	36.94	8.69	3.47
7	10646	1932	0.62	77.83	38.07	8.83	3.40
8	10646	1977	0.64	74.30	36.63	8.54	3.32
9	10646	2373	0.77	74.15	40.07	8.51	3.54
10	10646	2646	0.85	70.18	a49.66	8.18	3.53
11	10646	2750	0.89	77.13	65.58	9.60	4.20
12	10646	2670	0.86	72.86	66.19	10.20	4.42

**Remarque :** Vu le grand nombre de stations, nous avons dû utiliser la version SPLINB d'ANUSPLIN pour les modèles nord-américains. On doit alors choisir des « nœuds ». En pareils cas, on peut généralement s'attendre à des ratios signal:erreur plus élevés, comme ceux observés ici, lesquels demeurent cependant sous les limites recommandées (voir Hutchinson et Gessler 1994)

d'un modèle qui fournit des estimations fiables entre les stations. La RTGCV constitue une estimation de l'erreur-type moyennée dans l'espace. L'intervalle de confiance à 95 % pour les estimations correspond ainsi à plus et moins environ 2 fois la RTGCV. Le tableau 4 présente les diagnostics des modèles pour l'Amérique du Nord. (Nous ne présentons pas de figures du type des figures 3, 4 et 5 pour le Modèle 2 ou pour les modèles nord-américains parce que l'ajustement est essentiellement le même pour ces modèles et que ces figures seraient donc redondantes.)

Presque toutes les RTMSE sont de moins de un degré pour la température, celles des températures minimales étant légèrement supérieures à celles des températures maximales, ce qui est conforme aux résultats antérieurs et, pour les températures minimales, reflète la nature plus complexe des régimes de drainage de l'air froid et les effets de la microtopographie, qui ne sont pas pris en compte dans la modélisation. Les RTGCV sont légèrement supérieures aux RTMSE dans tous les cas. Les précipitations sont intrinsèquement plus complexes sur le plan spatial, particulièrement en hiver où la plus grande partie des précipitations tombent sous forme



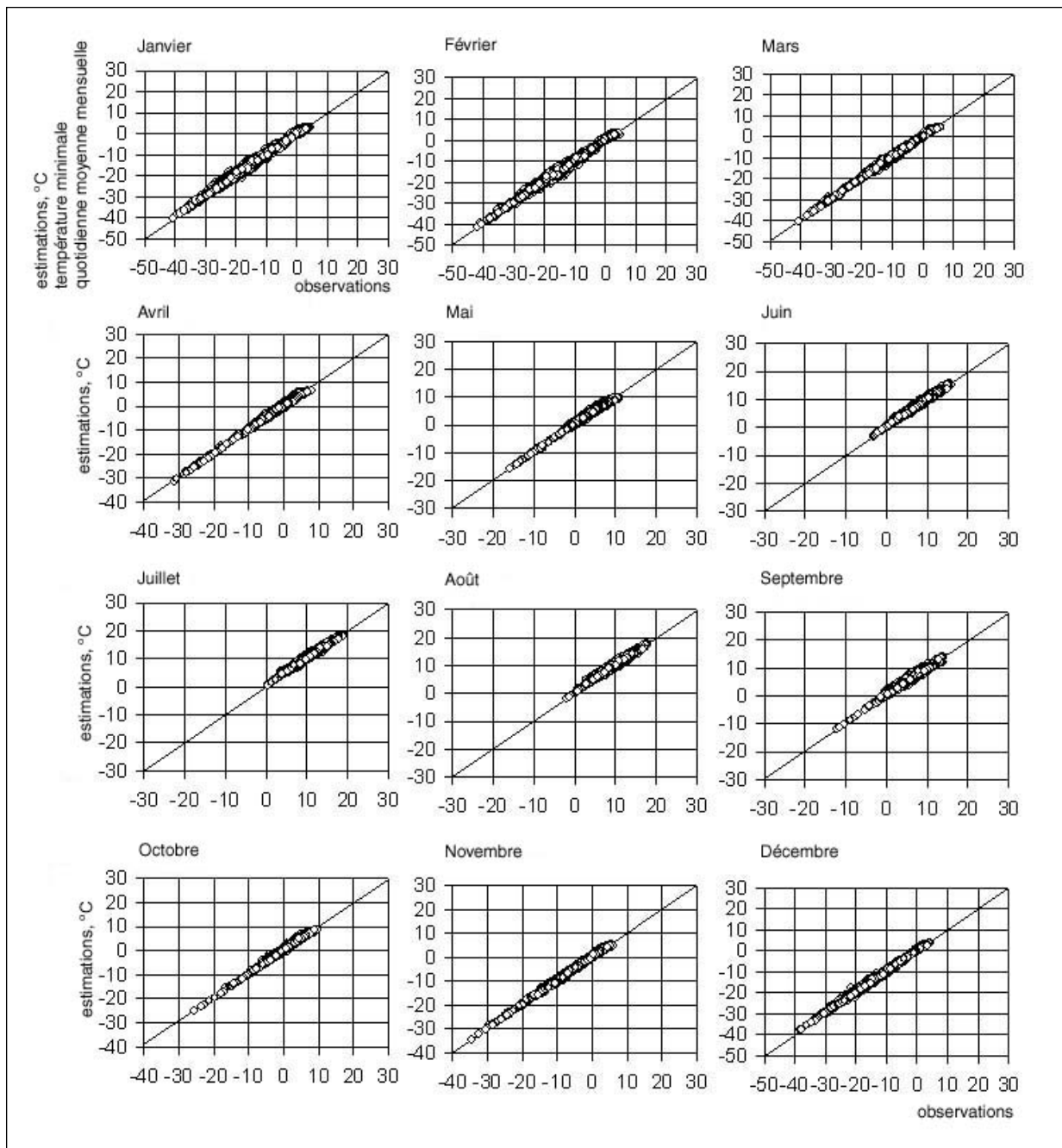
**Figure 3.** Comparaison entre les températures maximales estimées et observées - Modèle 1, toutes les stations.

de neige au Canada, ce qui rend les mesures beaucoup plus difficiles. Les RTGCV et RTMSE pour les précipitations sont plus élevées pour les mois d'hiver, comme on pouvait s'y attendre tant avec les modèles canadiens qu'avec les modèles nord-américains.

Pour la plupart des utilisateurs, la façon la plus facile d'évaluer les modèles est en fait probablement d'examiner les cartes issues des modèles finaux. L'adresse URL ci-dessous présente des liens vers un cartographeur qui fournit les résultats des modèles canadiens 1 et 2 associés à un MAN à résolution de 300 secondes d'arc (maille d'environ 10 km) (aller aux modèles canadiens pour 1971-2000).

[http://www.gllfc.cfs.nrcan.gc.ca/landscape/climate\\_models\\_f.html](http://www.gllfc.cfs.nrcan.gc.ca/landscape/climate_models_f.html)

Bien que le cartographeur ne soit pas un système d'information géographique (SIG), il présente certaines fonctions propres aux SIG. Quand l'utilisateur accède aux quadrillages pour 1971-2000, il voit d'abord les précipitations de janvier pour les deux modèles. Les utilisateurs peuvent afficher d'autres grilles ou les données des stations au moyen du bouton « ajout de couches ». Ils peuvent aussi modifier la taille de la carte et viser une province ou une région particulière en utilisant la fonction zoom. Les quadrillages mensuels individuels peuvent être affichés ou enlevés, empilés, visualisés en zoom et



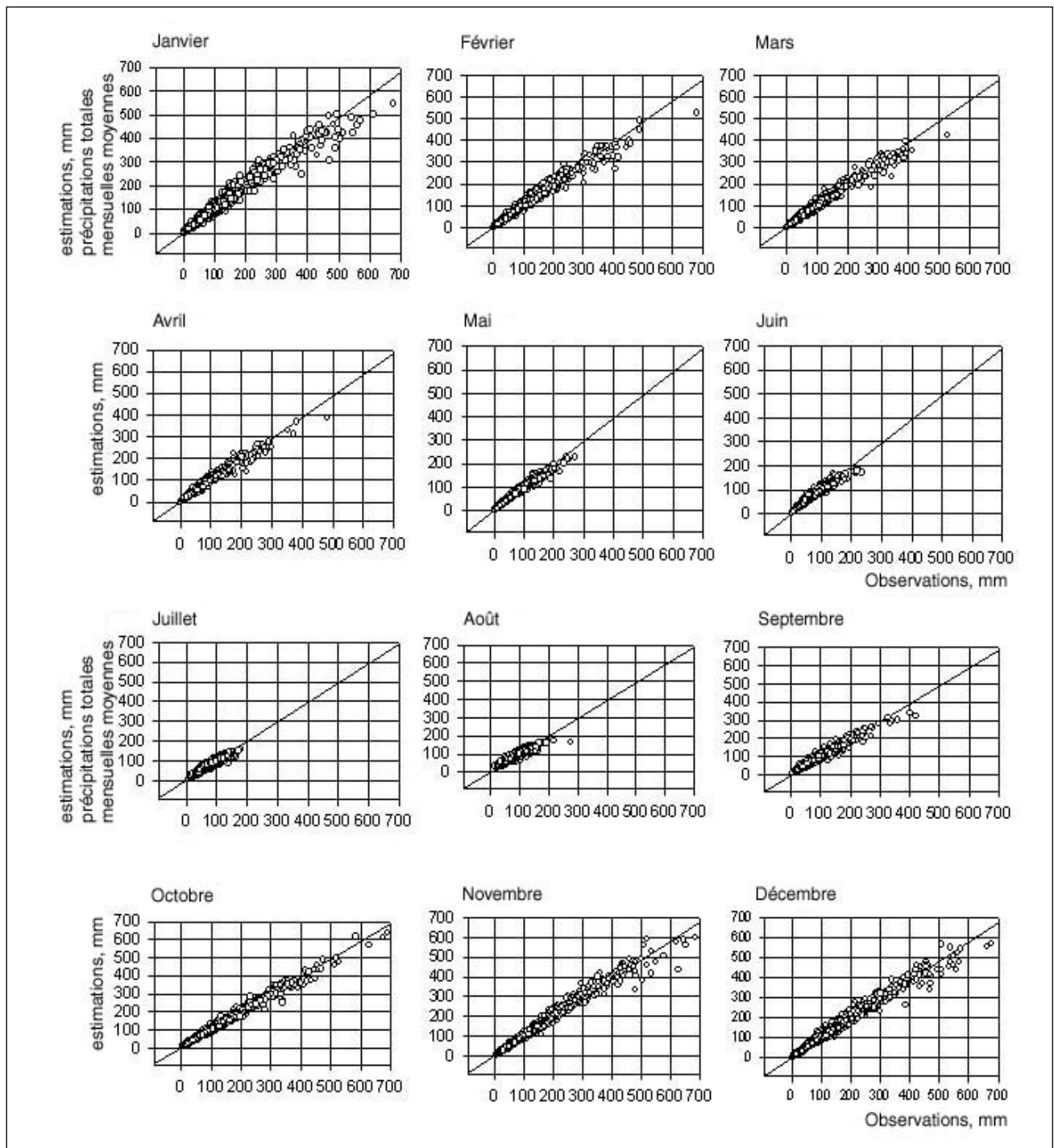
**Figure 4.** Comparaison entre les températures minimales estimées et observées - Modèle 1, toutes les stations.

interrogés. La possibilité de superposer les données des stations est une fonction particulièrement utile de ce site Web. La valeur observée et la valeur estimée à un endroit donné de même que la différence entre ces deux valeurs, ainsi que l'estimation bayésienne de l'erreur-type, peuvent être obtenues, tout comme l'estimation pour le point de grille le plus proche. Les cas où les résidus paraissent élevés peuvent souvent s'expliquer par des valeurs apparemment contradictoires aux stations voisines. En outre, on sait que certaines régions présentent intrinsèquement des conditions moyennes plus variables. On peut accéder aux résultats des modèles mensuels et bioclimatiques nord-américains à l'adresse URL mentionnée ci-dessus.

Les modèles nord-américains se sont révélés utiles dans divers travaux de modélisation d'espèces réalisés dans le cadre de collaborations internationales (voir par exemple <http://www.planthardiness.gc.ca/index.pl?&lang=fr>).

## Conclusions

On assiste à un accroissement de la demande de modèles climatiques spatialement fiables à diverses résolutions temporelles et spatiales dans de nombreux secteurs économiques. La présente note technique donne des renseignements sur des modèles pour le Canada et l'Amérique du Nord pour la période 1971-2000. Les résultats montrent qu'il s'agit de modèles robustes et



**Figure 5** Comparaison entre les précipitations estimées et observées - Modèle 1, toutes les stations.

fiables. Nous soulignons que l'évaluation de la qualité des modèles est une tâche difficile. Avec les diagnostics des modèles fournis dans le présent document et les cartes et données sources accessibles sur Internet, les utilisateurs pourront mieux évaluer la qualité et l'utilité des modèles pour leurs propres applications. Tous les modèles présentés ici peuvent être utilisés pour produire des estimations ponctuelles pour divers lieux ainsi que des grilles régulières des paramètres climatiques d'intérêt.

L'auteur principal pourra fournir sur demande des renseignements supplémentaires quant à la manière d'obtenir des estimations ponctuelles ou des grilles pour votre région.



## Références

- Easterling, D.R., B. Horton, P.D. Jones, T.C. Peterson, T.R. Karl, D.E. Parker, M.J. Salinger, R. Razuvayev, N. Plummer, P. Jamason et C.K. Folland. 1997. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science* 277: 364-367.
- Easterling, D.R., T.R. Karl, J.H. Lawrimore et S.A. Del Greco. 1999. United States Historical Climatology Network Daily Temperature, Precipitation, and Snow Data for 1871-1997.
- Hutchinson, M.F. 1995. Interpolation of mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographic Information Systems* 9: 385-403.
- Hutchinson, M.F., et R.J. Bichof. 1983. A new method for estimating the spatial distribution of mean seasonal and annual rainfall applied to the Hunter Valley, New South Wales. *Australian Meteorological Magazine* 31: 179-184.
- Hutchinson, M.F., et P.E. Gessler. 1994. Splines—more than just a smooth interpolator. *Geoderma* 62: 45-67.
- Mackey, B.G., D.W. McKenney, Y.-Q. Yang, J.P. McMahon et M.F. Hutchinson. 1996. Site regions revisited: a climatic analysis of Hills' site regions for the Province of Ontario using a parametric method. *Canadian Journal of Forest Research* 26: 333-354.
- McKenney, D.W., M.F. Hutchinson, J.L. Kesteven et L.A. Venier. 2001. Canada's plant hardiness zones revisited using modern climate interpolation techniques. *Canadian Journal of Plant Science* 81 (1): 129-143.
- McKenney, D.W., M.F. Hutchinson, P. Papadopol et D. Price. 2004. Evaluation of alternative spatial models of vapour pressure in Canada. Communication présentée à l'American Meteorological Society Annual Meeting, Vancouver, août 2004.
- McKenney, D.W., D.T. Price, P. Papadopol, M. Siltanen et K. Lawrence. 2005 (sous presse). Scénarios de changement climatique haute résolution pour l'Amérique du Nord. Centre de foresterie des Grands Lacs. Frontline – Note technique no 107.
- Milewska, E., R.F. Hopkinson et A. Niitsoo. 2005. Evaluation of Geo-Referenced Grids of 1961 – 1990 Canadian Temperature and Precipitation Normals. *Atmosphere-Ocean* 43: 49-75.
- New, M., M. Hulme et P. Jones. 1999. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate* 12 (3):829-856.
- New, M., M. Hulme et P. Jones. 2000. Representing twentieth century space-time climate variability. Part II: Development of a 1901-1996 monthly terrestrial climate field. *Journal of Climate* 13:2217-2238.
- ORNL/CDIAC-118, NDP-070. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. 82 pp.
- Price, D.T., D.W. McKenney, I.A. Nalder, M.F. Hutchinson et J.L. Kesteven. 2000. A comparison of statistical and thin-plate spline methods for spatial interpolation of Canadian monthly climate data. *Agricultural and Forest Meteorology* 101:81-94.
- Price, D., D.W. McKenney, P. Papadopol, T. Logan et M.F. Hutchinson, 2004. High resolution future scenario climate data for North America. Communication présentée à l'American Meteorological Society Annual Meeting, Vancouver, août 2004.
- Wahba, G. 1990. Spline Models for Observational Data. CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphie, Pennsylvanie, 169 pp.
- Wahba, G., et J. Wendelberger. 1980. Some new mathematical methods for variational objective analysis using SPLINs and cross validation, *Monthly Weather Review* 108: 1122-1143.

### **Dan McKenney**

Groupe de surveillance de la santé des forêts Service  
canadien des forêts,  
Centre de foresterie des Grands Lacs  
dan.mckenney@nrcan.gc.ca

### **Pia Papadopol**

Analyse du paysage et applications  
Centre de foresterie des Grands Lacs  
pia.papadopol@nrcan.gc.ca

### **Kathy Campbell**

Analyse du paysage et applications  
Centre de foresterie des Grands Lacs  
kathy.campbell@nrcan.gc.ca

### **Kevin Lawrence**

Analyse du paysage et applications  
Centre de foresterie des Grands Lacs  
kevin.lawrence@nrcan.gc.ca

### **Michael Hutchinson**

Centre for Resource and Environmental Studies,  
The Australian National University;  
Canberra ACT 0200 Australia.  
hutch@cres.anu.edu.au

Service canadien des forêts - Centre de foresterie des  
Grands Lacs

1219 rue Queen Est  
Sault Ste. Marie (Ontario) P6A 2E5  
(705) 949-9461

©Ministre des Approvisionnements et  
Services Canada 2005  
Catalogue No. Fo123-1/106E-PDF  
ISBN 0-662-40480-7  
ISSN 1717-7006