



Frontline

Applications de Recherche en Foresterie

Service Canadien des Forêts - Sault Ste. Marie

Note Technique N° 107

Scénarios de changement climatique haute résolution pour l'Amérique du Nord

Dan McKenney, David Price, Pia Papadapol, Martin Siltanen, Kevin Lawrence

Contexte

Les projections du climat produites par les modèles de circulation générale (MCG) ont une résolution spatiale grossière. Elles doivent donc souvent être traitées plus avant pour utilisation dans les études sur les incidences des changements climatiques.

Il existe plusieurs façons d'obtenir des modèles haute résolution (à échelle plus fine), comme la réduction d'échelle dynamique (permettant d'obtenir, par exemple, des modèles des climats régionaux – MCR), la réduction d'échelle statistique et l'interpolation statistique. Les MCR sont des modèles des changements climatiques à plus haute résolution régis par les conditions imposées par un MCG « hôte » (voir p. ex. Laprise et al. 2003). Les méthodes de réduction d'échelle statistique établissent des corrélations entre les processus atmosphériques à grande échelle et les conditions météorologiques locales, et appliquent ensuite les résultats aux projections des régimes météorologiques issues de MCG pour caractériser le climat local futur (Wilby et al. 1998). Ces deux approches s'efforcent de maintenir pour les réalités physiques une cohérence avec les représentations des processus atmosphériques dérivées des MCG et peuvent donner des valeurs statistiques (p. ex. moyennes et extrêmes) des données météorologiques simulées, habituellement pour des endroits précis. Toutefois, tant les MCR que la réduction d'échelle statistique demandent beaucoup de temps de calcul.

L'interpolation statistique des résultats des MCG est une façon plus simple d'obtenir des estimations haute résolution à partir de ces modèles. Bien que ne caractérisant pas les réalités physiques de façon aussi détaillée que la réduction d'échelle dynamique, cette approche donne des résultats qui couvrent de vastes régions et peuvent refléter les signaux de changement climatique simulés par

le MCG. Elle peut fournir des résultats spatialement et temporellement cohérents utilisables dans les études des changements climatiques à l'échelle du paysage (voir aussi l'analyse présentée par Houser et al. 2004). Avec cette approche, les données des MCG sont normalisées (c.-à-d. qu'il y a mise à l'échelle des changements relativement aux valeurs des MCG pour une période de référence, par exemple 1961-1990). Cette opération supprime les biais possibles, rendant le scénario largement cohérent avec les observations historiques réelles. L'interpolation statistique est globalement transparente et rapide.

Nous avons élaboré une méthode d'interpolation statistique permettant de produire des modèles (grilles) haute résolution à partir de MCG. Nous avons appliqué cette méthode à plusieurs MCG, nos résultats s'étendant à l'ensemble de l'Amérique du Nord. Notre objectif est de faciliter les études sur les incidences des changements climatiques à l'échelle du paysage. La présente note technique décrit la méthode et ses produits maintenant disponibles.

Méthodologie générale

Nous avons d'abord téléchargé les données de scénarios issus de MCG soit du Centre de distribution de données du GIEC (à l'adresse <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>), dans le cas des modèles de circulation générale Hadley, CSIRO et ECHAM, soit du Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat (CCMaC, à l'adresse : <http://cres.anu.edu.au/outputs/software.php>), dans le cas du MCG2. Ces données ont été « prétraitées » au Centre de foresterie du Nord (CFN). Le prétraitement a consisté en l'extraction d'un sous-ensemble de données couvrant l'Amérique du Nord, suivie de certaines vérifications quant à la validité des données et de traitements spéciaux des paramètres d'humidité (qui diffèrent selon les MCG).



Le nombre exact de points de grille dont nous disposions pour chaque interpolation mensuelle se situait autour de 300, la variation étant attribuable au fait que chaque MCG utilise un quadrillage planétaire différent. Le formatage des données en vue de la procédure d'interpolation a constitué l'étape finale. Les données ont ensuite été transférées (via l'Internet au moyen du protocole FTP) au Centre de foresterie des Grands Lacs (CFGL), où ont été créées les versions haute résolution des grilles des MCG. Nous avons utilisé le progiciel ANUSPLIN, outil spécialement conçu pour interpoler les données climatiques fondé sur les mathématiques du lissage de surface par fonction spline « plaque mince » (splines de lissage laplaciennes, selon l'ancienne terminologie) (Wahba 1990; Hutchinson 1995).

La méthode d'interpolation peut globalement être résumée comme suit. Les différences mensuelles moyennes de température entre les simulations du MCG et la période de référence choisie (1961-1990) ont été calculées pour chaque cellule de grille. Chaque cellule de grille est essentiellement traitée comme le lieu d'une « station ». L'interpolation a été réalisée suivant un maillage de 300 secondes d'arc (5 minutes d'arc, soit environ 10 km). La grille couvre toute l'Amérique du Nord et présente la même résolution que d'autres produits climatiques pour le Canada ou le continent issus d'ANUSPLIN (voir http://www.glf.cfs.nrcan.gc.ca/landscape/climate_models_f.html). Pour les autres paramètres, dont les précipitations, les ratios entre les valeurs des simulations du MCG et les valeurs simulées de la période de référence ont été interpolés. Ces différences et ratios interpolés peuvent ensuite être traités comme des anomalies climatiques relativement aux moyennes de la période de référence 1961-1990.

Après plusieurs essais avec ANUSPLIN, des modèles à « signal fixe » fondés sur une interpolation latitudinale et longitudinale ont été utilisés. Les modèles à signal fixe sont appropriés en cas de relation statistique faible entre les paramètres dépendants et indépendants (ici, entre la position géographique et le domaine de changement du MCG). Le signal dans les modèles à fonction spline « plaque mince » s'apparente aux degrés de liberté dans les modèles de régression standard. Les premiers passages des modèles correspondent à des modèles à $SIGNAL = 1$, soit à une interpolation exacte entre les points de données (c.-à-d. lieux des cellules de grille du MCG). Les gradients abrupts obtenus pour les différences de température et les ratios de précipitation font apparaître des « pics » et des « creux » qui, selon nous, ne sont pas réalistes ni appropriés pour le type de modèle à l'échelle du paysage (couvrant un pays ou un continent) désiré par certains utilisateurs (dont nous-mêmes). Les sorties des MCG ne doivent pas être considérées comme des prévisions précises du climat mais plutôt comme des scénarios plausibles associés à une évolution donnée des gaz à effet de serre (GIEC 2000). En outre, ce sont les différences de température et les ratios de précipitation avec les sorties du MCG pour la période de référence simulée 1961-1990 qui ont servi

à l'interpolation et non pas les valeurs absolues de ces paramètres. Cette approche devrait supprimer tout biais pouvant être présent dans la représentation du climat actuel issue du MCG.

Nous avons aussi élaboré des modèles ANUSPLIN trivariés (dans lesquels l'interpolation se fait suivant la longitude, la latitude et l'altitude), la représentation de l'altitude incluse dans les MCG étant généralement pauvre à cause de leur résolution horizontale très grossière. Des essais séparés ont confirmé le manque d'incidence de l'altitude dans les domaines de changement des MCG. En résumé, les modèles à signal fixe, où le $SIGNAL = 0,6$, étaient les modèles des domaines de changement les plus spatialement cohérents et montrant les variations les plus lisses. On trouvera davantage de renseignements sur les mathématiques sous-jacentes aux splines « plaque mince » dans Hutchinson et Gessler (1994), Hutchinson (1995) ou Wahba (1990). Par ailleurs, McKenney et al. (2001) et Price et al. (2000) ont appliqué les splines de lissage « plaque mince » à des données climatiques réelles pour le Canada.

Nous avons aussi élaboré avec ces scénarios un autre ensemble de produits, soit des modèles de changement moyen sur des périodes de 30 ans. Pour ce faire, plusieurs opérations supplémentaires ont été requises. D'abord, nous avons créé avec ANUSPLIN des surfaces de domaine de changement moyen sur 30 ans. Ces surfaces ont été utilisées pour projeter les changements moyens aux stations météorologiques nord-américaines exploitées dans la période 1961-1990. Les changements moyens pour trois périodes futures (2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100) ont ensuite été ajoutés aux valeurs réelles pour 1961-1990. Nous avons pu ainsi produire de nouvelles surfaces ANUSPLIN des valeurs moyennes « réelles » pour ces périodes futures. Pour ces modèles, nous avons utilisé les splines trivariées (prenant en compte l'altitude) parce qu'il y a de fortes dépendances statistiques à l'égard de l'altitude dans les modèles pour 1961-1990, et ces dépendances ont persisté (comme on pouvait s'y attendre).

Avec ces surfaces, on peut estimer plusieurs paramètres bioclimatiques (comme la durée de la saison de croissance, les précipitations durant cette dernière, etc.) qui sont souvent utilisés dans la modélisation des incidences agricoles ou écologiques et qui présentent donc un plus grand intérêt pour les éventuels utilisateurs des modèles. Il est possible de dériver ces paramètres parce qu'on peut produire une séquence des températures et des précipitations quotidiennes à partir des surfaces mensuelles primaires. On y arrive au moyen d'une interpolation bessélienne dans laquelle on contraint la séquence quotidienne à suivre les moyennes mensuelles de façon monotone (voir Mackey et al. 1996 pour les détails). Il est important d'avoir à l'esprit que les valeurs obtenues représentent des conditions moyennes et que le bruit présent dans une année donnée influera sur la séquence quotidienne réelle des paramètres bioclimatiques.

Certains utilisateurs de modèles souhaitent cependant que les valeurs des paramètres climatiques soient obtenues suivant un pas de temps annuel, et non pas suivant des moyennes sur 30 ans. Cette exigence constitue un défi important non seulement à cause du problème (mentionné ci-dessus) que constitue la stochasticité beaucoup plus grande à l'échelle de l'année, mais aussi à cause de l'espace disque requis pour le stockage informatique des données. Néanmoins, nous avons décidé de produire des modèles à nouvelle résolution comprenant certains des modèles bioclimatiques à pas de temps annuel, parce que nous pensons pouvoir obtenir des approximations raisonnables. Les utilisateurs doivent avoir à l'esprit que le bruit inhérent à une année donnée n'est pas pris en compte dans les modèles bioclimatiques. Les modèles ont été élaborés avec une résolution plus grossière, soit 900 secondes d'arc (environ 30 km), en raison des problèmes de stockage des données.

Les interpolations des scénarios de MCG réalisées au CFGL ont été retournées au CFN pour mise en forme, distribution et utilisation. Le CFN a préparé des grilles agrégées à maille de un demi-degré pour les domaines de changement des modèles de circulation générale MCG2, HadCM3 et CSIRO et a reporté la grille sur une projection conique conforme de Lambert à maille de 10 km pour le Canada.

Résultats

Huit scénarios de MCG ont été établis et mis en forme et peuvent maintenant être obtenus à l'aide du protocole FTP, des formats additionnels (incluant notamment des sous-ensembles pour dix régions d'Amérique du Nord; voir la figure 1) étant prévus dans un avenir rapproché. Ces huit scénarios comprennent les scénarios d'émissions SRES A2 et B2 du GIEC, utilisés pour le forçage des simulations issues de chacun des modèles de circulation générale MCG2, HadleyCM3, CSIRO Mk2 et ECHAM4. (Les données sources de température du modèle ECHAM4 présentent encore certains problèmes.) Les modèles à l'échelle du mois couvrent la période 1900-2100 pour les températures minimale et maximale, les précipitations, la tension de vapeur, la vitesse du vent à 10 m et le rayonnement solaire global; le tableau 1 présente le sommaire de l'ensemble des produits obtenus.

On peut se procurer ces ensembles de données en format NetCDF en contactant David Price ou Dan McKenney. À ce jour, le CFN et le CFGL ont trouvé que c'est le protocole FTP ou leur équipement DVD qui sont le plus efficaces pour transférer les données demandées. Les utilisateurs ou clients qui ont déjà profité de nos produits sont l'Université de Sheffield (Royaume-Uni), le service des forêts du département de l'Agriculture des États-Unis (USDA Forest Service) en Oregon et en Ohio, l'Université de Toronto, l'Université Lakehead, le Centre de recherche de Woods Hole et le Centre canadien de télédétection. Des données ont également été fournies à des chercheurs de Fluxnet-Canada.

Le tableau 2 donne le sommaire des paramètres bioclimatiques pour les modèles annuels et les modèles pour les moyennes

Tableau 1. Paramètres et périodes de simulation

Scénarios d'émissions des modèles A2, B2	Paramètres	Années
MCCG2 (canadien)	Températures minimale et maximale, tension de vapeur, précipitations, rayonnement solaire, vitesse du vent	1900-2100 modèles pour les moyennes sur 30 ans et modèles annuels
HADCM3 (Hadley, R.-U.)	Idem	1950-2099 modèles pour les moyennes sur 30 ans et modèles annuels
CSIRO Mk2 (australien)	Idem	1961-2100 modèles pour les moyennes sur 30 ans et modèles annuels
ECHAM4* (Communauté européenne)	Idem	1900-2100

Remarques :

Les modèles annuels n'ont donné que les paramètres SEEDGROW (voir le tableau 2); les modèles pour les moyennes sur 30 ans ont donné les paramètres ANUCLIM et SEEDGROW (tableau 2). Les modèles pour les moyennes sur 30 ans ont été produits pour les périodes 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100 (ou 2099 dans le cas du modèle Hadley).

*Les données de ce modèle sont en cours de révision (voir le texte).

sur 30 ans, paramètres issus des données des scénarios des MCG. À des fins de cohérence, nous avons choisi pour ces paramètres la même résolution que celle des grilles des scénarios à l'échelle du mois, soit 300 secondes d'arc.

Plusieurs rapports et articles scientifiques ont été produits à partir des travaux présentés ici. Notre application et notre automatisation d'ANUSPLIN pour les données des MCG sont décrites plus en détail par Price et al. (2004). En outre, Bootsma et al. (2005a, 2005b) font état d'un effort similaire effectué avec les données du MCG1 en vue d'une application agricole.

Résumé et conclusions

Nous avons élaboré une méthode transparente et rapide permettant de fournir des données de MCG haute résolution pour les études sur les incidences des changements climatiques. Le processus est fortement automatisé, mais l'automatisation complète n'est clairement ni réalisable ni souhaitable. À l'une ou l'autre étape du processus, il est inévitable que certains problèmes ou certaines questions concernant la qualité des données surgiront et nécessiteront des interventions ou un jugement professionnel, qu'on pense aux problèmes relatifs aux données sources ou aux nouvelles interprétations requises par certains utilisateurs (Price et al. 2004). Il semble exister certaines erreurs dans les données de température du modèle ECHAM, problème non encore entièrement résolu. Dans le cas du modèle de circulation générale CSIRO Mk2, les

Tableau 2. Paramètres bioclimatiques issus des produits de MCG haute résolution (Les modèles pour les moyennes sur 30 ans ont donné les paramètres bioclimatiques ANUCLIM et SEEDGROW; les modèles annuels n'ont donné que les paramètres SEEDGROW*)

PARAMÈTRES ANUCLIM	PARAMÈTRES SEEDGROW
Température moyenne annuelle	Numéro du jour julien du début de la saison de croissance
Amplitude quotidienne moyenne [moyenne (max – min de la période)]	Numéro du jour julien de la fin de la saison de croissance
Isothermalité (paramètre 2/paramètre 7)	Durée en jours de la saison de croissance
Saisonnalité de la température (c.v.)	Précipitations totales pour la période 1
Température maximale de la période la plus chaude	Précipitations totales pour la période 3
Température minimale de la période la plus froide	DJC au-dessus de la température de référence pour la période 3
Amplitude annuelle de la température* (paramètre 5 – paramètre 6)	Température moyenne annuelle
Température moyenne du trimestre le plus humide	Température minimale annuelle
Température moyenne du trimestre le plus sec	Température maximale annuelle
Température moyenne du trimestre le plus chaud	Température moyenne de la période 3
Température moyenne du trimestre le plus froid	Amplitude de la température pour la période 3
Précipitations annuelles	
Précipitations de la période la plus humide	
Précipitations de la période la plus sèche	
Saisonnalité des précipitations (c.v.)	
Précipitations du trimestre le plus humide	
Précipitations du trimestre le plus sec	
Précipitations du trimestre le plus chaud	
Précipitations du trimestre le plus froid	

Remarques:

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 4.

*Pour estimer les paramètres ANUCLIM, on a besoin de surfaces ANUSPLIN pour les valeurs « réelles », non pas pour des différences ou des ratios. Des surfaces pour les valeurs « réelles » n'ont été générées que pour les périodes des moyennes sur 30 ans.

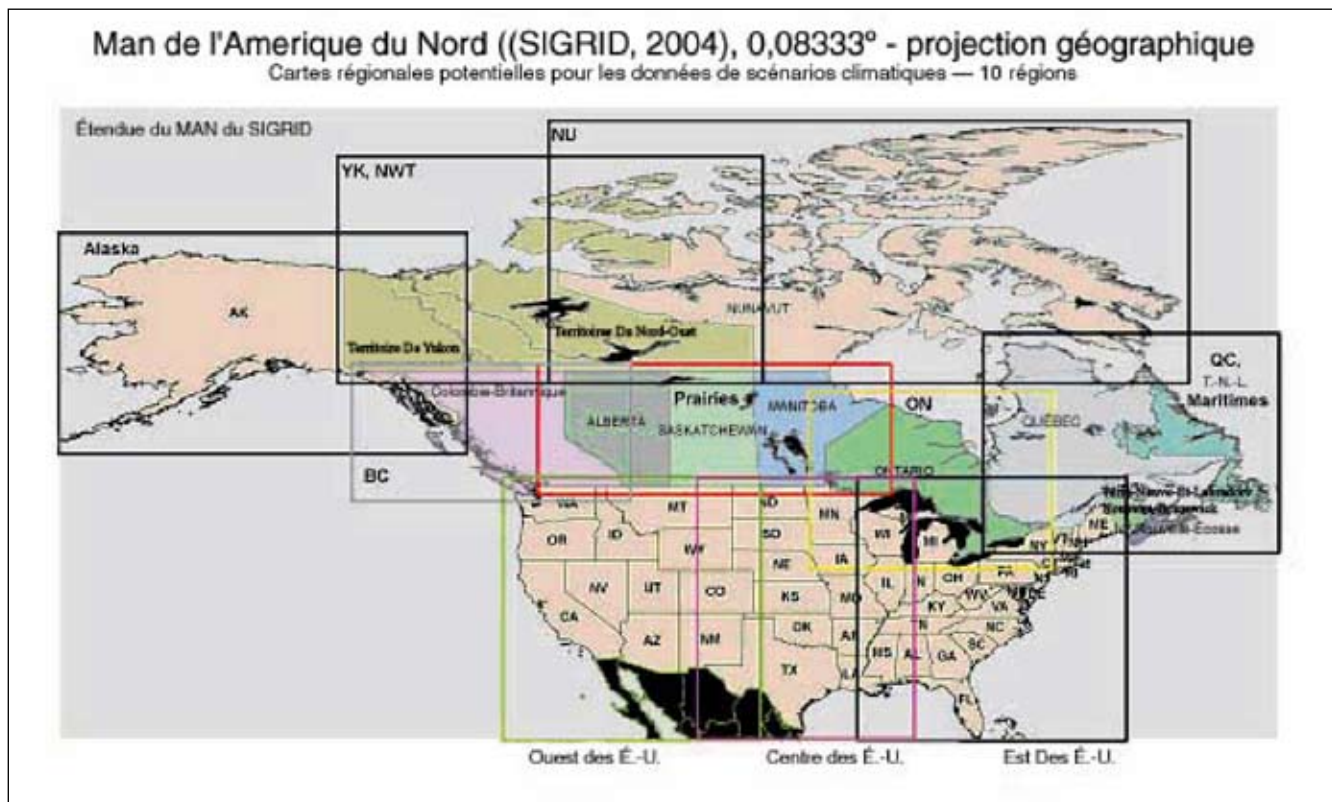


Figure 1. Régions pour les données des scénarios climatiques

projections pour les précipitations de certains mois en régions sèches prévoient un accroissement par des facteurs 500 à 1000 par rapport aux normales courantes sur 30 ans. Cela est dû au fait que le MCG sous-estime le degré de sécheresse actuel (p. ex. en prévoyant une moyenne de précipitation sur 30 ans de, disons, 1 mm par mois alors que les données réelles indiquent 10 mm) tout en projetant une augmentation importante des précipitations futures, avec une forte variabilité interannuelle. Intuitivement, on peut penser qu'un accroissement d'un facteur de 500 est très improbable mais, vu l'incertitude entachant la prévision des changements possibles dans les extrêmes, un tel accroissement demeure possible. Il faut exercer son jugement pour évaluer les limites plausibles de l'ampleur des changements. Dans l'établissement de limites acceptables, on peut s'aider des données réelles historiques (qui montrent, dans le cas qui nous occupe, que les précipitations mensuelles peuvent varier par des facteurs de 20 ou plus par rapport aux normales sur 30 ans pour certaines régions de l'Amérique du Nord).

Nous pensons que ces produits susciteront de plus en plus d'intérêt et seront de mieux en mieux connus à mesure que les gens prendront connaissance de leur existence et de leurs applications possibles. En plus de pouvoir actuellement se procurer ces produits en s'adressant aux auteurs principaux, on pourra bientôt visionner, avec zoom, et interroger certains des modèles bioclimatiques à la page Web interactive en cours d'élaboration.

Références

- Bootsma, A., S. Gameda et D.W. McKenney, D.W. 2005. Impacts of potential climate change on selected agroclimatic indices in Atlantic Canada. *Revue canadienne de la science du sol* 85:329-343.
- Bootsma, A., S. Gameda et D.W. McKenney. 2005. Potential impacts of climate change on corn, soybeans and barley yields in Atlantic Canada. *Revue canadienne de la science du sol* 85:345-375.
- GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat). 2000. Scénarios d'émissions - Résumé à l'intention des décideurs. Rapport spécial du Groupe de travail III du GIEC. 27 pp. <http://www.grida.no/climate/ipcc/spmpdf/sres-f.pdf>
- Houser, P., M.F. Hutchinson, P. Viterbo, H. Douville et S.W. Running. 2004. Terrestrial data assimilation. In P. Kabat et al. (dir.), *Vegetation, Water, Humans and the Climate*. IGBP Global Change Series, Springer, <http://www.grida.no/climate/ipcc/spmpdf/sres-f.pdf>. Berlin, pp 273-287.
- Hutchinson, M.F. 1995. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *Int. J. GIS* 9(4), 385-403.
- Hutchinson, M.F., et P.E. Gessler. 1994. Splines-more than just a smooth interpolator. *Geoderma* 62: 45-67.
- Laprise, R., D. Caya, A. Frigon et D. Paquin. 2003. Current and perturbed climate as simulated by the second-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM-II) over northwestern North America. *Climate Dynamics*, 21, 405-421.
- Mackey, B.G., D.W. McKenney, Y.-Q. Yang, J.P. McMahon et M.F. Hutchinson. 1996. Site regions revisited: a climatic analysis of Hill's site regions for the province of Ontario. *Can. J. For. Res.* 26:333-354.
- McKenney, D.W., Hutchinson, M.F., Kesteven, J.L. and Venier, L.A. 2001. Canada's plant hardiness zones revisited using modern climate interpolation techniques. *Can. J. Plant Sci.* 81: 129-143.
- 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, 1990. Spline models for observational data. CBMS-NSF Regional Conference Series in applied Mathematics, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphie, Pennsylvanie. 169 pp.
- Wilby, R.L., H. Hassan et K. Hanaki. 1998. Statistical downscaling of hydrometeorological variables using general circulation model output. *J. Hydrol.* 205, 1-19.

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

Martin Siltanen

Technicien en classification des terrains
Centre de foresterie du Nord
msiltane@nrcan.gc.ca

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 2006
Catalogue No. Fo123-1/107E-PDF
ISBN 0-662-40480-7
ISSN 1717-7006