

## Note de recherche forestière n° 124

### Prédiction du carbone organique dans les sols forestiers du Québec

Sylvie TREMBLAY, Rock OUMET et Daniel HOULE

F.D.C. 114.2(047)(714)  
L.C. SD 390

#### Résumé

Les sols forestiers constituent un important réservoir de carbone organique qui, advenant un réchauffement climatique ou à la suite du déboisement, peut devenir une source importante de CO<sub>2</sub>, ce qui entraînerait une augmentation de l'effet de serre et, par conséquent, du réchauffement de la planète. Il est donc essentiel de mesurer le carbone organique de ce réservoir, afin d'en suivre l'évolution face aux perturbations anthropiques. Toutefois, il n'existe pas de méthode rapide et économique pour mesurer le contenu en carbone organique des sols forestiers sur de vastes superficies.

Nous avons donc mis au point des modèles de prédiction de la quantité de carbone organique dans les sols forestiers minéraux du Québec, à partir de variables de l'inventaire pédologique, parce qu'elles sont des variables facilement disponibles et souvent déjà mesurées sur un grand territoire. Le modèle de prédiction du carbone organique dans la couverture morte comprenait les variables suivantes : épaisseur de la couverture morte, ainsi que latitude et longitude. Le modèle de prédiction des horizons minéraux, quant à lui, comprenait principalement des variables qui décrivaient la couleur du sol. Ces modèles nous ont permis de prédire la quantité de carbone organique dans 5 547 pédons répartis à travers la forêt commerciale du Québec, puis de construire des cartes du carbone organique dans les sols forestiers minéraux à l'échelle de la province.

Cette étude démontre qu'il est possible, sur un territoire aussi vaste que 750 300 km<sup>2</sup>, de quantifier approximativement et à peu de frais le carbone organique dans les sols forestiers minéraux, afin d'en faire le suivi face au réchauffement climatique ou au déboisement.

Mots clés : carbone organique du sol, couleur des sols, sols forestiers, humus, indicateur d'aménagement forestier durable.

#### Abstract

*Forest soils are important reservoirs of organic carbon, and in the event of global warming or deforestation, this reservoir could become an important source of CO<sub>2</sub>, resulting in an increase in the greenhouse effect and, consequently, global warming. Faced with anthropomorphic disturbances and to monitor its evolution, it is therefore essential to measure the organic carbon in this reservoir. However, no rapid and economical method exists to measure the organic carbon content in forest soils over vast areas.*

*We therefore developed models to predict the organic carbon of forest soils in Québec, using soil-inventory variables, because they are readily available and often have already been measured over large areas. The prediction model for organic carbon contained on the forest floor includes the following variables: depth of the litter, latitude and longitude. The prediction model for soil mineral horizons mainly includes variables that describe soil colour. These models allow us to predict the quantity of organic carbon in 5,547 soil pits, distributed throughout Québec's commercial forests, then to construct maps of the organic carbon in forest mineral soils for the province.*

*This study shows that it is possible, in a territory as vast as 750,300 km<sup>2</sup>, to approximate at low cost the quantity of organic carbon in forest mineral soils, in order to monitor it when faced with climatic warming or deforestation.*

*Keywords : Soil organic carbon, soil colour, forest soils, humus, indicators of sustainable forest management.*

Ce texte est la version intégrale du mémoire présenté par les auteurs au XII<sup>e</sup> Congrès forestier mondial de septembre 2003 à Québec, Canada.

Les versions française et anglaise du mémoire original sont aussi disponibles en format PDF à l'adresse suivante :

*Original text in english is also available in PDF form on web site :*

<http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/alias/cfm2003.html>

## Introduction

Le sol constitue un réservoir important de carbone organique ( $C_{org}$ ) dans les écosystèmes terrestres, puisqu'il contient de deux à trois fois plus de  $C_{org}$  que la végétation (SCHLESINGER 1986). Toutefois, advenant un réchauffement climatique (MAKIPAA *et al.* 1999) ou à la suite du déboisement (ST-LAURENT *et al.* 2000), le sol peut devenir une source importante de  $CO_2$  et contribuer à son tour au réchauffement climatique, à cause d'une décomposition accrue de la matière organique du sol. Même de petites pertes de  $C_{org}$  du sol pourraient augmenter significativement la concentration de  $CO_2$  de l'atmosphère, car le sol contient deux fois plus de carbone que l'atmosphère (WATSON *et al.* 1990). Il en résulterait une menace certaine pour la santé des populations et l'équilibre de la planète. Le sol est donc une source potentielle de  $CO_2$  à surveiller. Étant donné que le Québec renferme à lui seul environ 3 % du carbone mondial des sols, dont le tiers en forêt commerciale, et que les experts appréhendent une perte de carbone plus importante en zone boréale en raison d'un réchauffement maximal prévu sous ces latitudes (MITCHELL *et al.* 1990), il devient primordial que le Québec fasse un suivi du contenu en  $C_{org}$  de ses sols forestiers. D'ailleurs, le Conseil canadien des ministres des Forêts a déjà identifié le  $C_{org}$  dans les sols forestiers comme un indicateur de la contribution de la forêt au bilan planétaire du carbone, un des six critères de l'aménagement forestier durable (CCFM 1997).

Les pertes de  $C_{org}$  du sol occasionnées par le réchauffement climatique ou le déboisement s'effectueraient principalement par la couverture morte (horizons L, F et H), car c'est la couche du sol la plus vulnérable aux perturbations. Par exemple, ST-LAURENT *et al.* (2000) ont observé une diminution de 52 % de la quantité de  $C_{org}$  dans la couverture morte, de 7 à 22 ans après la coupe, dans l'Est du Québec, mais n'ont rapporté aucun changement significatif de la quantité de  $C_{org}$  dans les horizons minéraux. De plus, la couverture morte renferme une proportion importante du  $C_{org}$  du sol. PAQUIN *et al.* (2000) ont estimé cette proportion à 18 % dans les peuplements feuillus et à 43 % dans les peuplements résineux du Réseau d'étude et de surveillance des écosystèmes forestiers (RESEF), établi par le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN). Par conséquent, des pertes de  $C_{org}$  par la couverture morte causées par un réchauffement climatique ou le déboisement risquent non seulement d'augmenter de façon significative le  $CO_2$  de l'atmosphère, mais aussi d'avoir un impact à long terme sur l'hydrologie, la qualité du sol et la nutrition des plantes (GARTEN *et al.* 1999).

Quantifier le contenu en  $C_{org}$  des sols forestiers est toutefois dispendieux et cette mesure ne fait pas partie de l'inventaire écologique standard au Québec. De plus, il n'existe que quelques modèles de prédiction du contenu en  $C_{org}$  dans la couverture morte (GRIGAL et OHMANN 1992, LISKI et WESTMAN 1997, KURZ *et al.* 1993) ou dans le sol minéral (KLOOSTERMAN *et al.* 1974, EVANS *et al.* 1985, FRANZMEIER 1988) et ce, pour une utilisation régionale seulement. Étant donné que la principale source d'information disponible sur

les sols forestiers à l'échelle du Québec sont des descriptions au champ dans des relevés pédologiques, nous avons mis au point des modèles de prédiction de la quantité de  $C_{org}$  ( $Mg \cdot ha^{-1}$ )<sup>2</sup> dans la couverture morte ( $Q_f$ ) et dans le sol minéral ( $Q_m$ ) à partir de variables du relevé pédologique pour les sols forestiers minéraux du Québec. Il nous a alors été possible de prédire la quantité de  $C_{org}$  dans plusieurs milliers de profils de sol, dont nous possédions le relevé pédologique, puis de construire des cartes de l'accumulation du  $C_{org}$  dans la couverture morte et le sol minéral à l'échelle de la forêt commerciale du Québec.

## Matériel et méthodes

Les données du sol utilisées pour construire les modèles de prédiction provenaient de deux banques : celle du RESEF (153 pédons provenant de 16 stations feuillues et de 15 stations résineuses) établi par le MRN (GAGNON *et al.* 1994), et celle de la portion québécoise de la Compilation des sols minéraux de la forêt et de la toundra canadienne (130 pédons provenant de 26 stations feuillues et de 104 stations résineuses) (SILTANEN *et al.* 1997). De par la nature des données disponibles, notre étude s'est limitée aux sols forestiers minéraux du Québec, c'est-à-dire ceux dont l'épaisseur de la couverture morte était inférieure à 30 cm. Les données étaient réparties dans les trois provinces écoclimatiques canadiennes suivantes : subarctique, boréale de l'Est et tempérée froide.

La méthode de calcul de  $Q_f$  et de  $Q_m$  a été décrite par TREMBLAY *et al.* (2002). Les variables testées pour construire les modèles de prédiction de  $Q_f$  et de  $Q_m$  étaient principalement des variables du relevé pédologique, mais aussi des variables descriptives du peuplement et du site, géographiques et climatiques. De plus, cinq indices de couleur, exprimant l'intensité de la pédogenèse, ont été testés.

## Résultats et discussion

### Modèles de prédiction de $Q_f$ et de $Q_m$

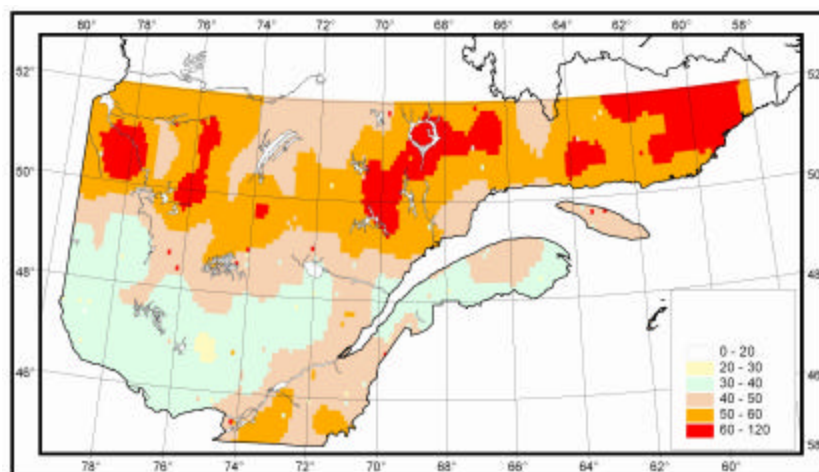
Le meilleur modèle de prédiction de  $Q_f$  ( $R^2 = 0,76$ , C.V. = 28,3 %) était composé de deux variables explicatives, chacune étant l'interaction de deux variables indépendantes : épaisseur de la couverture morte x longitude et latitude x longitude. Le pouvoir de prédiction de ce modèle semble acceptable, puisqu'il est supérieur à celui d'autres modèles déjà publiés ( $R^2 = 0,40$ , GRIGAL et OHMANN 1992;  $R^2 = 0,36$ , LISKI et WESTMAN 1997).

Le meilleur modèle de prédiction de  $Q_m$  ( $R^2 = 0,57$ , C.V. = 28,9 %) était composé des variables explicatives couleur, profondeur, texture et pH de chaque horizon minéral. Le pouvoir de prédiction de ce modèle est toutefois plus faible que celui obtenu par LISKI et WESTMAN (1997) ( $R^2 = 0,80$ ), qui était composé des variables explicatives suivantes : type forestier et sommation de la température effective. Le pouvoir de prédiction limité de notre modèle s'explique probablement par l'erreur d'évaluation de la densité des horizons et celle du pourcentage de fragments grossiers dans le sol.

<sup>1</sup> Depuis le 29 avril 2003, le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) est désigné sous la nouvelle appellation de ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec (MRNFP)

<sup>2</sup>  $Mg = 1\ 000\ 000$  grammes.

**A) Couverture morte**



**B) Sol minéral**

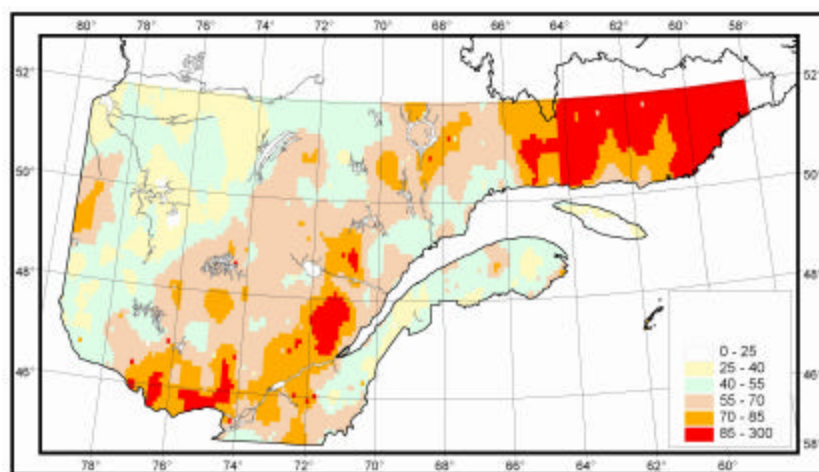


Figure 1. Cartes du contenu en  $C_{org}$  ( $Mg \cdot ha^{-1}$ ) des sols forestiers minéraux (épaisseur de la couverture morte inférieure à 30 cm) dans la forêt commerciale du Québec : **A) couverture morte** et **B) sol minéral**. Les valeurs moyennes des classes les plus élevées sont 65 et 95  $Mg \ C \cdot ha^{-1}$  pour la couverture morte et le sol minéral respectivement.

Prédiction de  $Q_{ff}$  et de  $Q_m$  pour les 5 547 pédons

Les valeurs moyennes de  $Q_{ff}$  par type de peuplement variaient de 38 à 58 Mg C.ha<sup>-1</sup>, avec la plus faible valeur pour les peuplements feuillus et la plus haute valeur pour les peuplements d'épinettes. Ce résultat s'explique probablement par une plus grande résistance de la litière à la décomposition pour les résineux que pour les feuillus (PRESTON *et al.* 2000, KURZ *et al.* 1993). OUIMET *et al.* (1996) ont obtenu le même résultat ( $57 \pm 7$  Mg C.ha<sup>-1</sup> vs  $30 \pm 3$  Mg C.ha<sup>-1</sup> pour des peuplements résineux et des peuplements de feuillus tolérants respectivement), ce qui reflète un taux de circulation du carbone différent dans ces deux types d'écosystème.

Les valeurs moyennes de  $Q_m$  par type de peuplement variaient de 44 à 70 Mg C.ha<sup>-1</sup>. La plus faible valeur moyenne de  $Q_m$  a été obtenue pour les peuplements de pins, probablement à cause de la faible qualité de la litière, de la texture généralement sableuse et de la faible teneur en argile de ces sites, qui ne favorisent pas l'accumulation de matière organique dans le sol minéral (GRIGAL et OHMANN 1992). La plus haute valeur moyenne de  $Q_m$  a été obtenue pour les peuplements de feuillus tolérants, probablement à cause d'un enracinement plus profond et d'un pH de la litière plus élevé (FINZI *et al.* 1998), qui ont augmenté l'activité microbienne et, ainsi, l'incorporation de la matière organique entre la couverture morte et le sol minéral (LEE 1985). Enfin,  $Q_{tot}$  moyen ( $Q_{ff} + Q_m$ ) variait de 85 à 118 Mg C.ha<sup>-1</sup>, avec la plus faible valeur pour les peuplements de pins et la plus haute valeur pour les peuplements d'épinettes.

Ces contenus moyens en  $C_{org}$  du sol par type de peuplement peuvent constituer un premier guide pour aménager les forêts du Québec lorsqu'un des objectifs est de préserver, voire de maximiser, le  $C_{org}$  des sols forestiers d'un territoire donné.

Construction de cartes de  $Q_{ff}$  et de  $Q_m$

La modélisation d'une organisation spatiale entre les valeurs prédites de  $Q_{ff}$  ou de  $Q_m$  ont permis de construire des cartes de  $Q_{ff}$  et de  $Q_m$  à l'échelle du Québec (Figure 1).  $Q_{ff}$  augmentait du sud vers le nord, atteignant des valeurs maximales dans la région écologique de la pessière à épinettes noires et mousses (Figure 1A). Des valeurs élevées de  $Q_{ff}$  ont aussi été observées dans la partie sud des basses-terres du Saint-Laurent et des Appalaches.  $Q_m$  était maximal le long de la vallée de la rivière Outaouais ainsi que dans la chaîne de montagnes des Laurentides, la Réserve faunique des Laurentides (nord de la ville de Québec) et le nord-est de la région Côte-Nord (Figure 1B). D'après ces cartes, les réservoirs de  $C_{org}$  les plus vulnérables au réchauffement climatique seraient les zones au nord, où  $Q_{ff}$  est maximal, c'est-à-dire la pessière à épinettes noires et mousses.

Les cartes obtenues dans cette étude peuvent difficilement être comparées à celles de LACELLE (1997), parce qu'elles sont différentes dans la méthode (interpolation vs polygones), le territoire étudié (seulement les sols forestiers minéraux vs tous les types de sol du territoire) et l'étendue des catégories. Nos cartes doivent aussi être interprétées avec précaution, car elles ne représentent que les sols forestiers minéraux. Elles sous-estiment

donc l'accumulation de  $C_{org}$  du territoire pris dans son entier. Toutefois, ces cartes représentent le  $C_{org}$  du sol modifiable par l'aménagement forestier, puisque les travaux d'aménagement effectués sont principalement dans les peuplements sur sol minéral et que ce type de sol occupe presque la totalité du territoire forestier commercial du Québec (LAMONTAGNE et DROLET 1990). Par conséquent, ces premières cartes fournissent une image de référence qui permet de faire le suivi du  $C_{org}$  des sols susceptibles d'être modifiés par l'aménagement forestier.

## Conclusion

Notre étude démontre qu'il est possible d'estimer, sur un territoire aussi vaste que la forêt commerciale du Québec (750 300 km<sup>2</sup>), la quantité de  $C_{org}$  emmagasinée dans les sols forestiers minéraux à partir de variables pédologiques mesurées sur le terrain. Ces variables sont : l'épaisseur de la couverture morte, les latitude et longitude du pédon ainsi que la couleur mesurée avec la Charte Munsell, la profondeur, la texture et le pH des horizons minéraux du profil de sol. Ces variables peuvent donc être considérées comme des indicateurs de la contribution de la forêt au bilan planétaire du carbone, qui est un des six critères de l'aménagement forestier durable. Aussi, la compilation du contenu en  $C_{org}$  des 5 547 pédons par type de peuplement peut constituer un premier guide pour aménager les forêts du Québec en tenant compte du  $C_{org}$  des sols.

Enfin, les cartes de cette étude sont les premières de ce genre au Québec. Elles permettent de localiser les réservoirs de  $C_{org}$  les plus importants dans les sols forestiers minéraux et peuvent servir d'images de référence pour en faire le suivi face aux perturbations anthropiques, telles que le réchauffement climatique ou le déboisement.

## Ouvrages cités

- CANADIAN COUNCIL OF FOREST MINISTERS, 1997. *Critères et indicateurs de l'aménagement forestier durable des forêts au Canada : rapport technique*. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Headquarters, Ottawa, Ont. 36 p.
- EVANS, L.J. et B.H. CAMERON, 1985. *Color as a criterion for the recognition of podzolic B horizons*. Canadian Journal of Soil Science 65 : 363-370.
- FINZI, A.C., N. VAN BREEMEN et C.D. CANHAM, 1998. *Canopy tree-soil interactions within temperate forests : species effects on soil carbon and nitrogen*. Ecological Applications 8(2) : 440-446.
- FRANZMEIER, D.P., 1988. *Relation of organic matter content to texture and color of Indiana soils*. Proceedings of the Indiana Academy of Science 98 : 463-471.
- GAGNON, G., C. GRAVEL, R. OUIMET, N. DIGNARD, R. PAQUIN, et G. ROY, 1994. *Le réseau de surveillance des écosystèmes forestiers (RESEF) – I - Définitions et méthodes*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 115. XIV + 40 p.

- GARTEN, C.T., W.M. POST, P.J. HANSON et L.W. COOPER, 1999. *Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains*. Biogeochemistry 45(2) : 115-145.
- GRIGAL, D.F. et L.F. OHMANN, 1992. *Carbon storage in upland forests of the Lake States*. Soil Science of the Society of American Journal 56 : 935-943.
- KLOOSTERMAN, B., L.M. LAVKULICH et M.K. JOHN, 1974. *Use of soil data file for pedological research*. Canadian Journal of Soil Science 54 : 195-204. Kurz, W.A., M.J. Apps, T.M. Webb et P.J. McNamee, 1993. Le bilan du carbone du secteur des forêts du Canada : Phase 1. For. Can., Rég. Nord-Ouest, Cent. For. Nord, Edmonton (Alberta). Rapp. Inf. NOR-X-326F.
- LACELLE, B. 1997. *Canada's soil organic carbon database*. In R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart (ed.) Soil processes and the carbon cycle. Advances in soil science. CRC Press. Boca Raton, Florida : 93-101.
- LAMONTAGNE, L. et J.-Y. DROLET, 1990. *Soil landscapes of Canada, Quebec-Southeast*. Agric. Can. Publ. N° 5288/B.
- LEE, K.E., 1985. *Earthworms, their ecology and relationships with soils and land use*. Academic Press, Sydney, Australia.
- LISKI, J. et C.J. WESTMAN, 1997. *Carbon storage in forest soil of Finland. 1. Effect of thermoclimate*. Biogeochemistry 36 : 239-260.
- MAKIPAA, R., T. KARJALAINEN, A. PUSSINEN et S. KELLOMAKI, 1999. *Effects of climate change and nitrogen deposition on the carbon sequestration of a forest ecosystem in the boreal zone*. Canadian Journal of Forest Research 29(10) : 1490-1501.
- MITCHELL, J.F.B., S. MANABE, V. MELESHKO et T. TOKIOKA, 1990. *Equilibrium climate change and its implications for the future*. In Houghton, J.T., G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (Ed.). Climate Change, The IPCC scientific assesment (p. 131-172). University press, Cambridge.
- OUMET, R., S. ST-LAURENT, C. CAMIRÉ et G. GAGNON, 1996. *Carbon storage in forest ecosystems of the RESEF (Réseau d'Étude et de Surveillance des Écosystèmes forestiers) Québec long-term monitoring stations*. Canadian Journal of Soil Science 76 : 217-218.
- PAQUIN, R., L. DUCHESNE, D. HOULE, J.D. MOORE, R. OUMET, S. ST-LAURENT et S. TREMBLAY, 2000. *Effets des stress environnementaux et des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers du Québec*. Bilan de dix ans de recherche à la Direction de la recherche forestière. Ministère des Ressources naturelles du Québec. Rapport interne n° 451, 92 p.
- PRESTON, C.M., J.A.T. TROFYMOW et THE CANADIAN INTERSITE DECOMPOSITION EXPERIMENT WORKING GROUP, 2000. *Variability in litter quality and its relationship to litter decay in Canadian forests*. Canadian Journal of Botany 78 : 1269-1287.
- SCHLESINGER, W.H., 1986. *Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery*. Chapter 11, p. 194-220. Dans : J.R. Trabalka and D.E. Reichle (eds.) The changing carbon cycle – A global analysis. Springer-Verlag, New York, NY.
- SILTANEN, R.M., M.J. APPS, S.C. ZOLTAI, R.M. MAIR et W.L. STRONG, 1997. *A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra mineral soils*. Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, Alberta. 50 p.
- ST-LAURENT, S., R. OUMET, S. TREMBLAY et L. ARCHAMBAULT, 2000. *Évolution des stocks de carbone organique dans le sol après coupe dans la sapinière à bouleau jaune de l'Est du Québec*. Canadian Journal of Forest Research 80 : 507-514.
- TREMBLAY, S., R. OUMET et D. HOULE, 2002. *Prediction of organic carbon content in upland forest soils of Québec, Canada*. Canadian Journal of Forest Research 32 : 1-12.
- WATSON, R.T., H. RHODHE, H. OESCHGER et U. SIEGENTHALER, 1990. *Greenhouse gases and aerosols*. Dans : Houghton J.T., G.J. Jenkins et J.J. Ephraums (Ed.). Climate Change, The IPCC Scientific Assessment (p. 1-40). University Press, Cambridge.

2003-3118

ISBN 2-550-41802-6

Dépôt légal 2003

Bibliothèque nationale du Québec

Bibliothèque nationale du Canada

© 2003 Gouvernement du Québec