A. TREMBLAY · L. VARFALVY
C. ROEHM · M. GARNEAU
Editors

Greenhouse Gas Emissions – Fluxes and Processes

Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments

Springer

Environmental Science

Series Editors: R Allan • U. Förstner • W. Salomons

Alain Tremblay, Louis Varfalvy,
Charlotte Roehm and Michelle Garneau
(Eds.)

Greenhouse Gas Emissions - Fluxes and Processes

Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments

With 200 Figures

Springer

Dr. Alain Tremblay
Hydro-Québec Production
Direction Barrages et
Environnement
10nd floor
75 Boul. René-Lévasque
Montréal, Québec H2Z 1A4
Canada

Dr. Louis Varfalvy
Hydro-Québec
Direction Environnement
2nd floor
75 Boul. René-Lévasque
Montréal, Québec H2Z 1A4
Canada

Dr. Charlotte Roehm
Université du Québec à
Montréal
Département des sciences
biologiques
Case Postal 8888, Succursale
Centre-ville
Montréal, Québec H3C 3P8
Canada

Dr. Michelle Garneau
Université du Québec à
Montréal
Centre de Modélisation
Régionale du Climat-Ouranos
Département de Géographie
Case Postal 8888, Succursale
Centre-ville
Montréal, Québec H3C 3P8
Canada

Library of Congress Control Number: 2004114231

ISBN 3-540-23455-1 **Springer Berlin Heidelberg New York**

Springer is a part of Springer Science+Business Media
springeronline.com

Printed in Germany

Cover design: E. Kirchner, Heidelberg
Production: A. Oelschläger
Typesetting: Camera-ready by the Editors
Printing: Mercedes-Druck, Berlin
Binding: Stein + Lehmann, Berlin

Printed on acid-free paper 30/2132/AO 5 4 3 2 1 0

Foreword

In a time when an unquestionable link between anthropogenic emissions of greenhouse gases and climatic changes has finally been acknowledged and widely documented through IPCC* reports, the need for precise estimates of greenhouse gas (GHG) production rates and emissions from natural as well as managed ecosystems has risen to a critical level. Future agreements between nations concerning the reduction of their GHG emissions will depend upon precise estimates of the present level of these emissions in both natural and managed terrestrial and aquatic environments.

From this viewpoint, the present volume should prove to a benchmark contribution because it provides very carefully assessed values for GHG emissions or exchanges between critical climatic zones in aquatic environments and the atmosphere. It also provides unique information on the biases of different measurement methods that may account for some of the contradictory results that have been published recently in the literature on this subject. Not only has a large array of current measurement methods been tested concurrently here, but a few new approaches have also been developed, notably laser measurements of atmospheric CO_2 concentration gradients. Another highly useful feature of this book is the addition of monitoring and process studies as well as modeling.

Indeed, the prospect of mitigation measures and of better management practices of aquatic environments requires an in-depth knowledge of processes governing GHG production and an exhaustive knowledge of those involved in the global carbon cycle. Here again, the present volume provides new information and highly original research projects on the carbon fate in aquatic systems. Most compartments of the carbon cycle in such systems have been investigated using state-of-the-art methodologies. The roles of primary production and of the bacterial and photochemical degradation of organic matter are carefully addressed as well as the fate of soil-derived dissolved organic carbon (DOC) in the aquatic environments. The degradation site and rates of DOC seem to be key elements in this respect.

---

* International Panel on Climate Change (see http:// www.ipcc.ch)

As illustrated in the volume, the present state of knowledge does not permit the unequivocal conversion of "gross GHG emissions" of impounded basins into "net GHG emissions," mainly due to uncertainties concerning the fate of terrestrially derived DOC and of soil-atmosphere budgets. In other words, GHG emissions resulting strictly from the impoundment of terrestrial and aquatic ecosystems, particularly in high latitude environments, are certainly lower than the measured emissions, but are still difficult to assess.

As a matter of fact, the focus on the boreal forest and equatorial systems described here is interesting in the way that it provides information on the two end-members of large aquatic bodies with respect to their GHG emissions into the atmosphere, from primarily CO_2-emitters in the Boreal domain to primarily CH_4-emitters in the equatorial forest domain. More concern, indeed, arises from the role of the latter in the capture of atmospheric CO_2 through primary production and its replacement by the much longer residence time of CH_4.

Nevertheless, despite the contributions of nearly 60 co-authors, this volume has well-balanced content and a coherent view of GHG production and emissions in terrestrial water bodies. The efforts of the editorial committee have been instrumental in this respect. However, one specific advantage of the involvement of such a large group of scientists in such a hotly debated topic cannot be ignored: a consensus among so many specialists is likely to provide ground for policy decisions.

It is very much to the credit of Hydro-Québec and its partners that supported most of the studies illustrated in the present volume that they have devoted so much time and effort to studying GHG emissions from hydroelectric reservoirs. Indeed, from the strict viewpoint of Hydro-Québec, this problem is relatively less serious than for many other energy producers, since hydropower from boreal forest reservoirs remains one of the most cost-effective processes with respect to GHG emissions.

Claude Hillaire-Marcel, D. ès Sci,, F.R.S.C.
UNESCO Chair for Global Change Study
Université du Québec à Montréal

Contents

Gross Emissions

Processes Leading to GHG Production

Modelling

Editorial Committee

External Reviewers

The editorial committee would like to thank the external reviewers for their highly relevant comments and useful suggestions to improve the monograph.

Eric Duchemin, Ph.D.
DREX Environnement
2669 Knox
Montréal, Québec, H3K 1R3
Canada

George W. Kling, Ph.D.
Department of Ecology
and Evolutionary Biology
University of Michigan
Ann Arbor, Michigan, 48109-1048
USA

Peter Kuhry, Ph.D.
Department of Physical Geography
and Quaternary Geology
Stockholm University,
SE-106 91 Stockholm,
Sweden

List of contributors

Gwenaël Abril, Ph.D.
Université Bordeaux 1
Département de Géologie et Océanographie
CNRS-UMR EPOC 5805
Avenue des Facultés, F 33405 Talence
France

Donald Adams, Ph.D.
Center for Earth and Environmental Science
State University of New York
Plattsburgh, New York 12901
U.S.A.

Nathalie Barrette, Ph.D.
Université Laval
Département de Géographie
Sainte-Foy, Québec, G1K 7P4
Canada

Julie Bastien, M.Sc.
Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau, Terre et Environnement
2800, rue Einstein
C.P. 7500
Ste-Foy, Québec, G1V 4C7
Canada

Kenneth G. Beaty
Fisheries and Oceans Canada,
Freshwater Institute,
501 University Crescent,
Winnipeg, MB R3T 2N6
Canada

Anne-Marie Blais, M.Sc.
Environnement Illimité inc.
1453 Saint-Timothée
Montréal, Québec, H2L 3N7
Canada

Philippe Chrétien, B.Sc.
Université Laval
Département de physique
Laboratoire de Physique Atomique et Moléculaire
Cité universitaire, Québec, G1K 7P4
Canada

François Courchesne, Ph.D.
Département de Géographie,
Université de Montréal,
C.P. 6128, Succursale Centre-Ville,
Montréal, Québec, H3C 3J7
Canada

Claire Delon, Ph.D.
Laboratoire d'Aérologie,
UMR CNRS 5560, OMP,
14 Avenue E. Belin 31 400,
Toulouse, France

Robert Delmas, Ph.D.
Laboratoire d'Aérologie,
UMR CNRS 5560, OMP,
14 Avenue E. Belin 31 400,
Toulouse, France

Claude Demers, M.Sc.
Hydro-Québec
Direction Environnement
2nd floor
75 Boul. René-Lévesque
Montréal, Québec, H2Z 1A4
Canada

Marco Aurelio dos Santos, D.Sc.
IVIG/COPPE/UFRJ - Centro de Tecnologia,
Bloco I, Sala 129, Cidade Universitária
Zip Code: 21945-970
Rio de Janeiro, Brazil

Ednaldo Oliveira dos Santos, M.Sc.
IVIG/COPPE/UFRJ - Centro de Tecnologia,
Bloco I, Sala 129, Cidade Universitária
Zip Code: 21945-970
Rio de Janeiro , Brazil

Rachel A. Dwilow, B.Sc.
Fisheries and Oceans Canada,
Freshwater Institute,
501 University Crescent,
Winnipeg, MB R3T 2N6
Canada

Jean-Louis Fréchette
Groupe Conseil Génivar
5355 Boul. des Gradins
Québec, Québec, G2J 1C8
Canada

Corinne Galy-Lacaux, Ph.D.
Laboratoire d'Aérologie,
UMR CNRS 5560, OMP,
14 Avenue E. Belin 31 400,
Toulouse, France

Philippe Gosse, Senior Eng.
EDF-R&D,
6 Quai Watier,
78 401 Chatou Cedex,
France

Charles W. Greer, Ph.D.
Biotechnology Research Institute,
National Research Council Canada,
6100 Royalmount Ave.,
Montreal Quebec, H4P 2R2
Canada

Alain Grégoire, Ph.D.
EDF-CIH,
Savoie Technolac,
73 373 le Bourget du Lac Cedex,
France

Frédéric Guérin
(Ph.D. Student)
Laboratoire d'Aérologie,
UMR CNRS 5560, OMP,
14 Avenue E. Belin 31 400,
Toulouse, France

Bill Hamlin, P. Eng.
Resource Planning & Market Analysis Department
Manitoba Hydro
820 Taylor Avenue
P.O. Box 815
Winnipeg, Manitoba, R3C 2P4
Canada

Jean-François Hélie, Ph.D.
Université du Québec à Montréal
GEOTOP
C.P. 8888, Succursale Centre-ville
Montréal, Québec, H3C 3P8
Canada

Claude Hillaire-Marcel, Ph.D.
Université du Québec à Montréal
GEOTOP
C.P. 8888, Succursale Centre-ville
Montréal, Québec, H3C 3P8
Canada

Raymond H. Hesslein, Ph.D.
Fisheries and Oceans Canada,
Freshwater Institute,
501 University Crescent,
Winnipeg, MB R3T 2N6
Canada

Robert B. Jacques, M.Sc., P. Eng.
E Cubed Inc.
2603 Toulouse Drive
Austin, Texas, 78748-6015
USA

Louis B. Jugnia, Ph.D.
Université du Québec à Montréal
Biotechnology Research Institute
GEOTOP
C.P. 8888, Succursale Centre-ville
Montréal, Québec, H3C 3P8
Canada

Maryse Lambert, M.Sc.
Hydro-Québec
Direction Environnement
2nd floor
75 Boul. René-Lévesque
Montréal, Québec,H2Z 1A4
Canada

René Laprise, Ph.D.
Université du Québec à Montréal
Centre de Modélisation Régionale du Climat - Ouranos
Département des sciences de la Terre et de l'Atmosphère
C.P. 8888, Succursale Centre-ville
Montréal, Québec, H3C 3P8
Canada

Michel Larzillière Ph.D.
Université Laval
Département de physique
Laboratoire de Physique Atomique et Moléculaire
Cité universitaire, Québec, G1K 7P4
Canada

Lawrence J. LeDrew, M.Sc.
Newfoundland and Labrador Hydro
P.O. Box 12,400
500 Columbus Drive
St.John's, NewFoundland, A1B 4K7
Canada

Mark E. Lyng
Fisheries and Oceans Canada,
Freshwater Institute,
501 University Crescent,
Winnipeg, MB R3T 2N6
Canada

Stéphane Lorrain, M.Sc.
Environnement Illimité inc.
1453 Saint-Timothée
Montréal, Québec, H2L 3N7
Canada

Jérôme Marty, M.Sc.
(Ph.D. Student)
Université du Québec à Montréal
GEOTOP
C.P. 8888, Succursale Centre-ville
Montréal, Québec, H3C 3P8
Canada

Bohdan Matvienko, D.Sc.
Hydraulics Department,
University of São Paulo – São Carlos
SP 13560-970, Brazil

Cory Matthews, M.Sc.
Department of Biological Sciences,
University of Alberta,
Edmonton, Alberta, T6H 4R3
Canada

Ginette Méthot, M.Sc.
Département des sciences biologiques
Faculté des arts et des sciences
Université de Montréal
90 rue Vincent d'Indy
C.P. 6128, Succursale Centre-ville
Montréal Québec, H3C 3J7
Canada

Carlos B. Miguez, Ph.D.
Biotechnology Research Institute,
National Research Council Canada,
6100 Royalmount Ave.,
Montreal Quebec, H4P 2R2
Canada

Ken Morrison, Ph.D.
Faculté de génie
Université de Sherbrooke
2500 Boul de l'Université
Sherbrooke, Québec, J1K 2R1
Canada

Maria C. Pacheco-Oliver, B.Sc.
Biotechnology Research Institute,
National Research Council Canada,
6100 Royalmount Ave.,
Montreal Quebec, H4P 2R2
Canada

Serge Paquet, M.Sc.
Université du Québec à Montréal
GEOTOP
C.P. 8888, Succursale Centre-ville
Montréal, Québec, H3C 3P8
Canada

Bernadette Pinel-Alloul, Ph.D.
Département des sciences biologiques
Faculté des arts et des sciences
Université de Montréal
90 rue Vincent d'Indy
C.P. 6128, Succursale Centre-ville
Montréal Québec, H3C 3J7
Canada

Dolors Planas, Ph.D.
Université du Québec à Montréal
GEOTOP
C.P. 8888, Succursale Centre-ville
Montréal, Québec, H3C 3P8
Canada

Yanick Plourde, M.Sc.
Groupe Conseil Génivar
5355 Boul. des Gradins
Québec, Québec, G2J 1C8
Canada

Sandrine Richard, Ph.D.
Laboratoire Environnement,
Hydreco,
BP 823, 97 388 Kourou Cedex,
France

Tommy Ringuette, M.Sc.
Université Laval
Département de physique
Laboratoire de Physique Atomique et Moléculaire
Cité universitaire, Québec, G1K 7P4
Canada

Luiz Pinguelli Rosa, D.Sc.
IVIG/COPPE/UFRJ - Centro de Tecnologia,
Bloco I, Sala 129, Cidade Universitária
Zip Code: 21945-970
Rio de Janeiro, Brazil

Réal Roy, Ph.D.
University of Victoria
Department of Biology
P.O. Box 3020 Stn CSC
Victoria, British Columbia, V8W 3N5
Canada

Denis Roy, Ph.D.
Université Laval
Département de physique
Laboratoire de Physique Atomique et Moléculaire
Cité universitaire, Québec, G1K 7P4
Canada

Sherry Schiff, Ph.D.:
Department of Earth Sciences
University of Waterloo
200 University Ave W
Waterloo, Omtario, N2L 3G1
Canada

Elizabeth Sikar, B.Sc.
Construmaq
C.P. 717 – São Carlos
SP – 13560-970, Brazil

Vincent St. Louis, Ph.D.
Department of Biological Sciences,
University of Alberta,
Edmonton, Alberta, T6H 4R3
Canada

Annick St-Pierre, B.Sc.
(M.Sc. Student)
Université du Québec à Montréal
GEOTOP
C.P. 8888, Succursale Centre-ville
Montréal, Québec, H3C 3P8
Canada

Rémy D. Tadonléké, Ph.D.
Université du Québec à Montréal
GEOTOP
C.P. 8888, Succursale Centre-ville
Montréal, Québec, H3C 3P8
Canada

Normand Thérien, Ph.D.
Département de génie chimique
Faculté de génie
Université de Sherbrooke
2500 Boul de l'Université
Sherbrooke, Québec, J1K 2R1
Canada

Jean Therrien, B.Sc.
Groupe Conseil Génivar
5355 Boul. des Gradins
Québec, Québec, G2J 1C8
Canada

Marie-Claude Turmel, M.Sc.
Département de Géographie,
Université de Montréal,
C.P. 6128, Succursale Centre-Ville,
Montréal, Québec, H3C 3J7
Canada

Jason Venkiteswaran, M.Sc.
Department of Earth Sciences
University of Waterloo
200 University Ave W
Waterloo, Ontario, N2L 3G1
Canada

Alberto Vieira Borges, Ph.D.
Université de Liège
Unité d'Océanographie Chimique,
MARE, Institut de Physique (B5),
B 4000, Liège, Belgium.

Eva Wichmann, BSc., R.P.Bio
BC Hydro
Generation Sustainability
6911 Southpoint Drive, E 16
Burnaby, British Columbia, V3N 4X8
Canada

The editorial committee would like to thank the following contributors for their help in editing this monograph.

Lise Blais
En Toutes Lettres
1453, Saint-Timothée
Montréal, Québec, H2L 3N7
Canada

Daniel Cloutier
Carto-Média
1453, Saint-Timothée
Montréal, Québec, H2L 3N7
Canada

Nicole Paré
Hydro-Québec
Centre de documentation
2nd floor
75 Boul. René-Lévesque
Montréal, Québec, H2Z 1A4
Canada

Glossary

nm:	nanometer
UV:	Ultra-violet light
DOM:	Dissolved organic matter
DOC:	Dissolved organic carbon
DIC:	Dissolved inorganic carbon
Gross emission:	The gross emissions are those measured at the water-air interface or soil-air interface or soil-water interface.
Net emission:	The net reservoir emissions are gross emissions minus pre-impoundment natural emission (both terrestrial and aquatic ecosystems) at the whole watershed level, including downstream and estuary.
NDIR:	None-dispersive Infrared
FTIR:	Fourier Transform Infrared
CO_2:	Carbon dioxide (44 g per mole, 1 mmole of CO_2 = 44 mg of CO_2)
CH_4:	Methane (16 g per mole, 1 mmole of CH_4 = 16 mg of CH_4)
N_2O:	Nitrous oxide
$mg{\cdot}m^{-2}{\cdot}d^{-1}$:	milligram per square meter per day ($mg/m^2/d$)

Résumé-Synthèse

Alain Tremblay, Louis Varfalvy, Charlotte Roehm et Michelle Garneau

Ce chapitre a pour but de faire le point sur l'état des connaissances et d'identifier les lacunes relatives à la problématique de l'émission de gaz à effet de serre (GES) par les réservoirs hydroélectriques et les écosystèmes naturels. Il est devenu essentiel d'intégrer nos connaissances du cycle du carbone à des échelles temporelles et spatiales plus vastes de façon à mieux définir l'ampleur des flux de GES associés aux réservoirs[1] et aux écosystèmes naturels. Les données disponibles proviennent d'études à petite échelle et de courte durée (1 à 10 ans), effectuées surtout en région boréale, mais aussi en régions semi-aride et tropicale. La variabilité naturelle des flux de GES due à des variations climatiques régionales et leurs impacts sur la production biologique globale est plus importante que celle des méthodes de mesures. Il faut donc garder à l'esprit que les incertitudes concernant les flux de GES sont avant tout le résultat de variations spatiales et temporelles naturelles des flux, et non pas des techniques de mesure disponibles. La présente synthèse se base sur les résultats de plus de dix ans de suivis obtenus par différentes équipes de recherche de plusieurs universités, institutions gouvernementales et compagnies d'électricité.

[1] Pour évaluer l'ampleur des flux de GES, nous avons calculé les émissions brutes et les émissions nettes. Les émissions brutes sont celles mesurées à l'interface eau-air. Les émissions nettes des réservoirs correspondent à la différence entre les émissions brutes et les émissions naturelles des écosystèmes terrestres et aquatiques avant la mise en eau, pour l'ensemble du bassin versant, incluant la portion avale et l'estuaire. Ces définitions sont celles de WCD (2000).

Les gaz à effet de serre dans les milieux naturels

Écosystèmes terrestres

Les forêts et les milieux humides constituent des écosystèmes dynamiques notamment par leur contribution au cycle global du carbone. La teneur en carbone des forêts des différentes régions climatiques est similaire ; toutefois, la répartition du carbone entre les sols et la végétation varie selon la latitude. Les plus hautes latitudes sont caractérisées par des taux de décomposition plus lents et des saisons de croissance plus courtes (chapitre 6, Malhi et al. 1999). Les sols typiques des forêts boréales ont une teneur plus élevée en carbone organique (24 ± 94 %) que les sols des forêts tempérées (10 ± 77 %) ou tropicales (11 ± 63 %). Cependant, les estimés de carbone organique retenu dans la végétation de la forêt tropicale sont de deux à cinq fois plus élevés (15-23 kg C m^{-2}) que ceux des forêts boréale et tempérée (4-6 kg C m^{-2}) (chapitre 6, Goodale et al. 2002, FAO 2001, Malhi and Grace 2000).

Les estimations courantes des bilans de GES des forêts indiquent que ces écosystèmes sont des puits de carbone, peu importe la région climatique du globe. La rétention de GES par les forêts est le résultat de la différence entre une absorption substantielle de dioxide de carbone (CO_2) par la biomasse et le dégagement de CO_2 par la respiration du sol, l'oxydation du méthane (CH_4) par des bactéries méthanotrophiques, et une émission plus ou moins importante de d'oxyde nitreux (N_2O) par le sol, un sous-produit des réactions de nitrification et de dénitrification. Selon les bilans estimés de GES, le puits de carbone de la forêt boréale (-873 mg CO_2-éq. m^{-2} j^{-1}) est plus faible que celui de la forêt tempérée et et de la forêt tropicale (-1 288 et -1 673 mg CO_2-éq m^{-2} j^{-1}, respectivement). Durant les années particulièrement chaudes et sèches, les forêts boréales peuvent devenir des sources nettes de CO_2 (chapitre 4, Goulden et al. 1998 ; Lindroth et al. 1998 ; Carrara et al. 2003). La durée de la saison de croissance, qui augmente des hautes vers les basses latitudes, contribue à ce patron général. Au contraire des forêts boréale et tempérée, la forêt tropicale a un flux de N_2O qui semble jouer un rôle important dans le bilan de GES, représentant une perte moyenne de 30 % (en CO_2-éq.) de l'échange net de l'écosysteme (ENE, Net Ecosystem Exchange). Ceci est dû à un taux relativement élevé d'émission de N_2O par les sols de la forêt tropicale, ainsi qu'au potentiel de réchauffement global de N_2O, lequel est environ 300 fois plus élevé que celui du CO_2 (IPCC 2001, Livingston et al. 1988, Clein et al. 2002). De plus, comme le suggère la plage estimée des flux de GES pour la forêt tropicale, la production de GES sous forme de N_2O pourrait dépasser, à cer-