

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Activité potentielle de méthanogenèse dans les sols, tourbières, sédiments lacustres et du réservoir hydroélectrique Robert-Bourassa dans le moyen Nord-Canadien

Jugnia, Louis-B.; Roy, Réal; Planas, Dolors; Lucotte, Marc; Greer, Charles W.

This publication could be one of several versions: author's original, accepted manuscript or the publisher's version. / La version de cette publication peut être l'une des suivantes : la version prépublication de l'auteur, la version acceptée du manuscrit ou la version de l'éditeur.

For the publisher's version, please access the DOI link below. / Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

Publisher's version / Version de l'éditeur:

<https://doi.org/10.1139/w04-112>

Revue canadienne de microbiologie, 51, 1, pp. 79-84, 2005-01

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=37698f6a-c542-40a0-bcd2-26b834094fc5>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=37698f6a-c542-40a0-bcd2-26b834094fc5>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at

PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.

Activité potentielle de méthanogenèse dans les sols, tourbières, sédiments lacustres et du réservoir hydroélectrique Robert-Bourassa dans le moyen Nord-Canadien

Louis-B. Jugnia, Réal Roy, Dolors Planas, Marc Lucotte et Charles W. Greer

Résumé : L'immersion des sols lors de la création d'un réservoir hydroélectrique pourrait augmenter, au moins à court terme, le flux de méthane vers l'atmosphère. Afin d'évaluer la contribution potentielle de tels aménagements à la production de méthane, nous avons étudié l'activité potentielle des bactéries méthanogènes dans les sols de la forêt boréale non immergés et immergés lors de la mise en eau d'un réservoir, ainsi que des sédiments lacustres. De cette étude comparative, il ressort que les tourbières inondées périodiquement (zone de marnage) ou en permanence, peuvent contribuer d'avantage à la production de méthane que les tourbières non inondées, les sols ou les sédiments de lacs naturels. Toutefois, l'intensité et l'évolution temporelle de l'activité potentielle des bactéries méthanogènes dans les différents milieux pris en compte ont été sous la dépendance d'une combinaison de plusieurs facteurs environnementaux, notamment, la quantité de la matière organique, le niveau d'eau et la présence de certains ions oxydants (SO_4^{2-} , Fe^{3+}).

Mots clés : méthanogenèse, réservoir, sédiments, sols, tourbières.

Abstract: Flooding of land associated with the creation of reservoirs may increase, at least in the short term, methane flux to the atmosphere. To evaluate the potential contribution of such land use on methane production, field samples were studied in vitro for the potential activity of methanogenic bacteria in unflooded or flooded boreal forest soils, together with lacustrine sediments. From this comparative study, periodically flooded or flooded peats contribute more to methane production than do unflooded peats, soils, and natural lake sediment. The intensity and temporal changes in the activity of methanogenic archaea in the different systems depended on a combination of environmental factors, such as the amount and quality of organic carbon, the water level, and the concentration of oxidizing ions (SO_4^{2-} , Fe^{3+}).

Key words: methane production, reservoir, sediment, soils, peats.

Parmi les gaz présents dans l'atmosphère et responsables du réchauffement climatique, figure le méthane (CH_4) dont la contribution à cet effet serait d'environ 15 % (Houghton et al. 1992). Outre les terrains marécageux généralement considérés comme les plus grandes sources naturelles de CH_4 atmosphérique (Tyler 1991), il existe d'autres sources liées entre autre aux activités anthropiques telles que la rizi-

culture, l'exploitation des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et vraisemblablement la création des réservoirs dans le cadre des plans d'approvisionnement en eau et (ou) en énergie. Duchemin et al. (1995), Kelly et al. (1997) et St. Louis et al. (2000) ont tous ainsi pu mettre en évidence dans les réservoirs, des émissions de CH_4 résultant de la dégradation anaérobie de la matière organique enfouie sous l'eau

Reçu le 1^{er} octobre 2004. Révision reçue le 1^{er} octobre 2004. Accepté le 20 octobre 2004. Publié au site Web des Presses scientifiques du CNRC à <http://rcm.cnr.ca> le 17 mars 2005.

L.-B. Jugnia. GEOTOP, Université du Québec à Montréal, C.P. 8888 succursale Centre-Ville, Montréal, QC H3C 3P8, et Institut de recherches en biotechnologie, Conseil national de recherches du Canada, 6100, avenue Royalmount, Montréal, QC H4P 2R2, Canada.

R. Roy,^{1,2} D. Planas et M. Lucotte. GEOTOP, Université du Québec à Montréal, C.P. 8888 succursale Centre-Ville, Montréal, QC H3C 3P8, Canada.

C.W. Greer. Institut de recherches en biotechnologie, Conseil national de recherches du Canada, 6100, avenue Royalmount, Montréal, QC H4P 2R2, Canada.

¹Auteur correspondant (courriel : realroy@uvic.ca).

²Adresse actuelle : Department of Biology, University of Victoria, P.O. Box 3020, Stn. CSC, Victoria, BC V8W 3N5.

avec les sols lors de la mise en eau des réservoirs. La production de CH_4 issue de cette dégradation représente en réalité l'étape finale d'une réduction séquentielle de différents accepteurs d'électrons présents dans le sol, parmi lesquels le fer ferrique (Fe^{3+}) et les sulfates (SO_4^{2-}) (Patrick et Jugsujinda 1992). En effet, les bactéries ferro-réductrices, sulfato-réductrices et méthanogènes ont des degrés de compétitivité différents pour l'acétate, l'hydrogène (H_2) et le gaz carbonique (CO_2) qui sont les précurseurs immédiats de la méthanogénèse (Peters et Conrad 1996).

Avec la production d'énergie hydroélectrique dans la région boréale du Nord-Est du Canada, d'immenses superficies de terres qui sont une mosaïque de tourbières, lacs et forêts ont été inondés. Cependant, l'impact de tels aménagements sur l'activité des bactéries méthanogènes n'est pas assez connu, et les études, jusqu'ici conduites sur la méthanogénèse, ont rarement pris en compte à la fois les milieux non inondés, inondés périodiquement ou inondés en permanence. Pourtant, de telles comparaisons peuvent être utiles pour des recommandations éclairées sur le choix du site d'implantation de futures infrastructures hydroélectriques. Le but de la présente étude a été d'évaluer l'activité potentielle des bactéries méthanogènes, en relation avec les mécanismes susceptibles de la contrôler dans les sols forestiers et de tourbières inondées périodiquement ou en permanence suite à la mise en eau d'un réservoir, en comparaison avec des milieux en périphérie (sols forestiers et tourbières) ainsi que des sédiments lacustres.

L'échantillonnage a eu lieu dans la zone du complexe hydroélectrique de La Grande 2 (Réservoir Robert-Bourassa) (53°N , 77°W), située dans la région de la taïga du bouclier canadien où les tourbières, les sols podzoliques et le sol organique forestier représentent respectivement 10 %, 60 % et 30 % des terres (Lucotte et al. 1999). Le réservoir Robert Bourassa a été mis en eau en 1978 pour un besoin de production d'énergie hydraulique. Ainsi, le niveau d'eau dans le réservoir, et par conséquent l'importance de la zone de marnage où nous avons fait les prélèvements de sol périodiquement inondé, varie globalement en fonction de la demande en énergie. Les sites d'échantillonnage choisis visaient à représenter les principaux types d'écosystèmes terrestres rencontrés dans cette zone autour du réservoir : sol forestier et tourbières inondées en permanence, périodiquement ou alors non inondés. Afin de comparer l'activité méthanogénique dans ces milieux terrestres avec les milieux lacustres avoisinants, trois lacs situés dans la même région que le Réservoir Robert-Bourassa ont été échantillonnés : le lac Vion ($53^\circ39'\text{N}$, $77^\circ48'\text{W}$), le lac Patukami ($54^\circ14'\text{N}$, $75^\circ54'\text{W}$) et le lac Yasinski ($53^\circ17'\text{N}$, $77^\circ29'\text{W}$). Seule la couche superficielle des sols émergés ou des sols situés dans la zone de marnage a été échantillonnée manuellement. Les sols immergés ont été échantillonnés à l'aide d'une benne de type Ekman. Les échantillons prélevés ont été conservés à l'abri de l'air dans des sacs en plastique (Ziploc®) et conservés à basse température (4°C) afin de minimiser l'activité biologique jusqu'au moment des expérimentations et analyses.

La quantité de matière organique a été déterminée par combustion des échantillons au four à 600°C pendant 2 h (Page et al. 1982). La concentration en Fe^{3+} a été déterminée par soustraction de la quantité de fer totale à la quantité de fer ferreux (Fe^{2+}) après dosage à la ferrozine (Achnich et al.

1995). Le dosage des SO_4^{2-} a été fait par colorimétrie automatisée (Traccs Auto Analyser, méthode industrielle n° 847-87T; Bran and Luebbe Analysing Technologies Inc.).

Les incubations ont été faites en laboratoire dans des flacons sérologiques de 120 mL contenant 20 g d'échantillon de sol, de tourbe ou de sédiment et 60 mL d'eau distillée stérile, fermés hermétiquement avec un bouchon en caoutchouc et scellé. Ensuite, le gaz du volume libre dans le flacon a été remplacé par de l'azote afin de simuler l'anoxie. Tous les traitements ont été faits en triplicat, soit trois flacons échantillons et trois flacons témoins contenant de l'acétylène (C_2H_2) qui est un inhibiteur métabolique des bactéries méthanogènes (Roy et al. 1997). L'analyse des échantillons de gaz, prélevés à différents intervalles de temps dans nos microcosmes, a été faite par chromatographie en phase gazeuse tel que décrit dans Roy et Greer (2000). Des expériences de production de CH_4 en présence de précurseurs de méthanogénèse (acétate et mélange $\text{CO}_2\text{-H}_2$) ou de compétiteurs de méthanogénèse (Fe^{3+} et SO_4^{2-}) ont été menées en utilisant respectivement les échantillons en provenance du lac Yasinski et de la tourbière inondée. Au cours de ces expériences, les échantillons (avec ajout) et témoins (sans ajout) ont été préparés en triplicats. Les ions compétiteurs Fe^{3+} et SO_4^{2-} , ajoutés séparément à raison de 5 mmol/L par microcosme, étaient respectivement sous forme de solution aqueuse de FeCl_3 et MgSO_4 . Pour l'expérience en présence des précurseurs, l'ajout d'acétate à concentration finale de 10 mmol/L par flacon a été fait à partir d'une solution d'acide acétique tamponnée à pH neutre (7.0). L'utilisation du mélange gazeux comme précurseur, a consisté à remplacer l'azote dans nos flacons d'incubation par le mélange 20,5 % (v/v) de $\text{CO}_2\text{-H}_2$. L'activité potentielle des bactéries méthanogènes a été mesurée tel que décrit plus haut.

Les taux de production de CH_4 pour chaque milieu ont été calculés par régression linéaire (Sokal et Rohlf 1981) de la concentration du CH_4 sur le temps d'incubation. Les taux de méthanogénèse ont été par la suite comparés statistiquement à l'aide d'une analyse de covariance (Sokal et Rohlf 1981) en utilisant le logiciel de statistique JMP (Sall et al. 2001).

Les teneurs en matière organique des sols et sédiments étudiés sont résumées dans le tableau 1. La teneur en matière organique des milieux terrestres a été relativement plus élevée (18,3 à 99,2 mg/g poids sec) que celle des sédiments lacustres (2,05 à 12,3 mg/g poids sec). Les concentrations en SO_4^{2-} ont varié entre 88,4 et 299 $\mu\text{mol/L}$, avec une très forte concentration dans les sédiments du lac Patukami (1687 $\mu\text{mol/L}$). Les concentrations en Fe^{3+} sont apparues faibles dans les tourbières non inondées, relativement peu élevées dans les sols forestiers non inondés et tourbières inondées périodiquement ou en permanence, et, plus élevées dans les sédiments lacustres et sols forestiers inondés périodiquement ou en permanence.

L'absence de production de CH_4 en présence de C_2H_2 indique que l'accumulation significative ($0,05 < p < 0,001$) du CH_4 dans les microcosmes a été le reflet de l'activité des bactéries méthanogènes (fig. 1). Les échantillons issus des tourbières inondées et périodiquement inondées ont tous présenté de fortes activités méthanogéniques sans phase de latence (fig. 1D, 1E). Par contre avec les prélèvements dans le lac Vion, la tourbière non inondée, les sols forestiers inondés et périodiquement inondés, ainsi que les sédiments du lac

Tableau 1. Valeur moyenne (écart type) de la quantité de matière organique (MO) (mg/g de poids sec) ainsi que des concentrations ($\mu\text{mol/L}$) des ions Fe^{2+} et SO_4^{2-} dosés dans l'eau interstitielle des échantillons étudiés.

Sites	MO	SO_4^{2-}	Fe^{3+}
Lacs			
Vion	11,4(0,0)	185,4(2,16)	1570(37,9)
Yasinski	2,05(0,0)	299,2(31,3)	2440(43,4)
Patukami	12,3(0,0)	1687(19,3)	2540(36,6)
Tourbières			
Inondée	73,5(0,0)	114(2,16)	389(15,6)
Périodiquement inondée = tourbière en bordure du réservoir	84,7(0,01)	88,4(6,91)	275(10,1)
Non inondée	99,2(0,02)	165,8(12,6)	53,3(21,9)
Sols			
Inondé (sol du réservoir)	18,3(0,00)	160,5(1,60)	1681(54,1)
Périodiquement inondé = sol en bordure du réservoir	62,7(0,01)	174,0(5,47)	2062(56,5)
Non inondé	89,1(0,00)	270,8(5,67)	149(15,6)

Patukami, l'activité méthanogénique, n'a été observée qu'après des phases de latence de 5 (lac Vion) à 15 jours (tourbières), 30 à 45 jours (sols forestiers) ou plus de 60 jours (lac Patukami) (fig. 1A, 1C, 1F, 1G et 1H). Enfin, c'est avec les échantillons de sédiment du lac Yasinski ainsi que le sol forestier non inondé, que nous avons enregistré les plus faibles activités méthanogéniques (fig. 1B et 1I).

Sur une échelle de temps variable en fonction des échantillons, nous avons observé une réduction des ions Fe^{3+} et (ou) SO_4^{2-} . La réduction complète des ions SO_4^{2-} sur la durée de l'expérience a été très brève dans les tourbières (<20 jours; fig. 1D, 1E, 1F), inachevée dans le sol forestier non inondé (fig. 1I) et d'environ 70 jours dans les autres cas (fig. 1A, 1B, 1C, 1G, 1H). Cette réduction des SO_4^{2-} a été plus corrélée à la production de CH_4 (fig. 1) que celle des Fe^{3+} . La réduction des Fe^{3+} , nulle dans certains cas, est apparue plus ou moins faible au départ suivie d'une phase exponentielle dans d'autres (fig. 1). Toutefois, cette réduction des Fe^{3+} est restée insignifiante par rapport aux concentrations initiales (tableau 1; fig. 1). Au cours de l'expérience de méthanogénèse en présence des compétiteurs (Fe^{3+} et SO_4^{2-}), la production de CH_4 pendant les 60 premiers jours d'incubation, a diminué de 20 % et 90 % respectivement en présence des ions Fe^{3+} et SO_4^{2-} . Associé à cette diminution, le temps de latence a été de 5 jours avec le Fe^{3+} et plutôt de 45 jours avec SO_4^{2-} (fig. 2A). En présence des précurseurs, la production de CH_4 , initialement faible avec le sédiment du lac Yasinski pauvre en matière organique, a augmenté considérablement avec l'apport dans nos microcosmes des précurseurs de la méthanogénèse sous forme d'acétate ou de mélange gazeux $\text{CO}_2\text{-H}_2$. En effet, après une phase de latence d'environ 20 jours, la production de CH_4 par rapport au témoin (700 ppmv) a augmenté sur la durée totale de nos incubations, jusqu'à 4000 et 9000 ppmv, suite à l'ajout respectivement d'acétate ou du mélange gazeux $\text{CO}_2\text{-H}_2$ (fig. 2B).

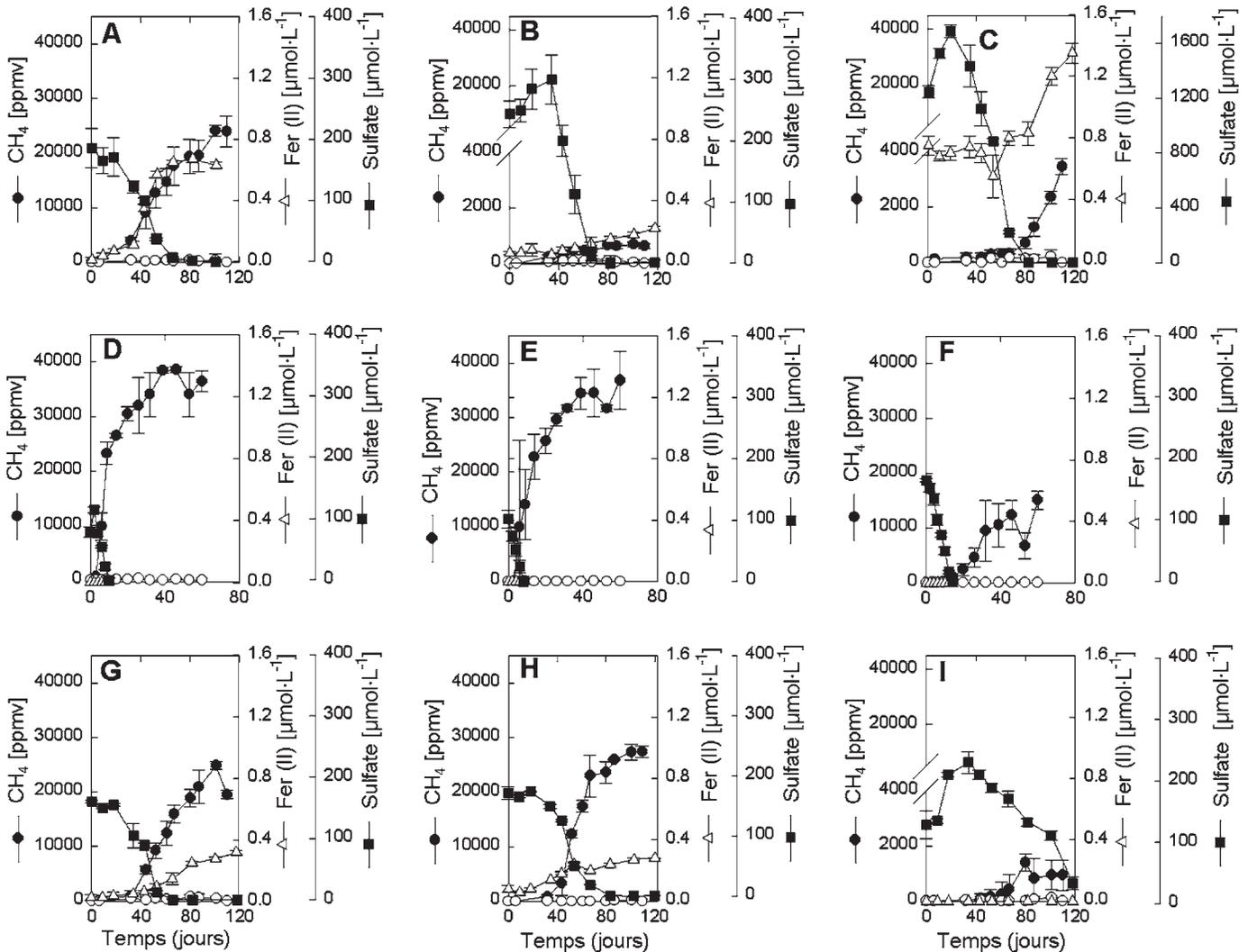
Les taux de production de CH_4 mesurés sur les échantillons de tourbières inondées ont été significativement plus élevés que ceux mesurés avec les échantillons tourbière non inondée (fig. 3). Les taux de production de CH_4 mesurés avec les sols forestiers inondés de manière permanente ou périodique ont été similaires à ceux mesurés dans la tourbière non inondée ou dans les sédiments du lac Vion. Les

taux de production de CH_4 mesurés avec les échantillons du sol non inondé ainsi que des sédiments des lacs Yasinski et Patukami n'ont pas été significativement différents entre eux, par contre ils ont été les plus faibles de l'ensemble des habitats considérés en périphérie du Réservoir Robert-Bourassa (fig. 3).

De manière générale, les plus fortes activités méthanogéniques ont été observées avec les échantillons des systèmes inondés de façon périodique ou permanente, et contenant de fortes teneurs en matière organique. Avec l'échantillon du lac Yasinski moins riche en matière organique que les autres échantillons testés, l'apport de précurseurs de méthanogénèse sous forme d'acétate ou du mélange gazeux $\text{CO}_2\text{-H}_2$ a contribué à une production de CH_4 5 à 10 fois plus importante par rapport au témoin, d'où l'importance de la matière organique souvent à l'origine de ces précurseurs (Yagi et Minami 1990; Parashar et al. 1991). Toutefois, le contrôle de la méthanogénèse par la matière organique, ne semble pas l'unique facteur. En effet, malgré les grandes quantités de matière organique enregistrées dans les sols forestiers et tourbières non inondées (tableau 1), l'activité méthanogène a été moins importante dans ces systèmes que lorsqu'ils sont inondés périodiquement ou en permanence. De plus, avec certains de nos échantillons riches en matière organique, l'activité des bactéries méthanogènes a été retardée. Ces différents aspects suggèrent que d'autres facteurs comme la réduction séquentielle des ions compétiteurs (Peters et Conrad 1996; Yao et al. 1999) ont influencé la méthanogénèse dans certains de nos échantillons.

Avec les échantillons issus du lac Vion, de la tourbière non inondée, des sols forestiers inondés et périodiquement inondés, ainsi que les sédiments du lac Patukami, l'activité méthanogénique n'a été observée qu'après des phases de latence de durées variables principalement comprises entre 15 et 60 jours. Cette plage de temps est inférieure au temps moyen d'environ 70 jours (hormis les tourbières) nécessaire à la réduction complète des SO_4^{2-} dans nos microcosmes. Particulièrement dans le lac Patukami, où nous avons enregistré les plus fortes concentrations de SO_4^{2-} , le début de la méthanogénèse au bout de 60 jours a coïncidé avec la réduction complète des SO_4^{2-} dans le milieu (fig. 1C). De plus, au cours de l'expérience d'incubation de l'échantillon de tourbière inondée en présence de Fe^{3+} et SO_4^{2-} , la production de

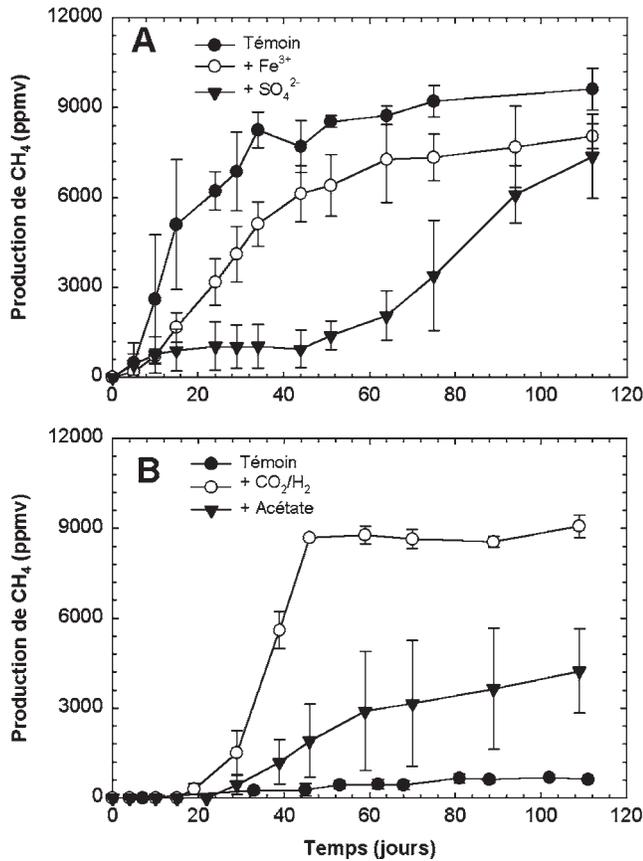
Fig. 1. Réduction des sulfates et production du fer (II) au cours de la méthanogénèse en absence (●) ou présence (○) d'inhibiteur (C_2H_2) avec des échantillons de sol forestier, de tourbière, de sédiments lacustres et du réservoir. Chaque point est la moyenne d'un triplicat analytique, et la barre d'erreur représente l'écart type : A, lac Vion; B, lac Yasinski; C, lac Patukami; D, tourbière inondée; E, tourbière périodiquement inondée; F, tourbière non inondée; G, sol forestier inondé; H, sol forestier périodiquement inondé; I, sol forestier non inondé.



CH_4 a été beaucoup moins importante en présence des SO_4^{2-} , et nous avons observé une phase de latence d'environ 45 jours. Ces observations indiquent que ces ions compétiteurs et particulièrement les SO_4^{2-} , ont été entre autres responsables de la phase de latence observée avec certains de nos échantillons. Les bactéries sulfato-réductrices sont plus compétitives que les bactéries méthanogènes pour les précurseurs de la méthanogénèse (Lovley et Phillips 1987), et la réduction des SO_4^{2-} occupe le dernier maillon de la réduction séquentielle des ions précédant la méthanogénèse. Au cours de cette série de réductions suivant un ordre de potentiel redox décroissant (dicté par la thermodynamique), un type d'accepteur d'électron est utilisé préférentiellement par rapport à un autre. Ainsi, la faible réduction des Fe^{3+} observée, malgré leur fortes concentrations dans nos échantillons, serait davantage une conséquence de la non disponibilité de cet élément sous forme utilisable par les bactéries ferro-réductrices.

Quel que soit l'échantillon considéré, nous avons relevé au bout de 116 jours d'incubation en laboratoire, une production de CH_4 significativement plus élevée dans les milieux inondés de façon permanente ou périodique, que dans les mêmes milieux non inondés (fig. 2). Ce qui est une indication des variations de la production de CH_4 au niveau des sols soumis à des fréquences d'immersion variables. De tels résultats de production de CH_4 , mais plutôt en relation avec les variations du niveau d'eau, ont été rapportés ailleurs (Juutinen et al. 2001; Blodeau et Moore 2003). Il est donc probable que la mise en eau des réservoirs contribue à une augmentation de la production du méthane au niveau des sols immergés. Généralement avec les sols immergés en permanence, la majeure partie du CH_4 produit est oxydée à travers la colonne d'eau par les bactéries méthanotrophes. Ce qui n'est pas toujours le cas avec les sols périodiquement inondés. Nous avons relevé une production de CH_4 significativement plus élevée avec le sol forestier périodiquement

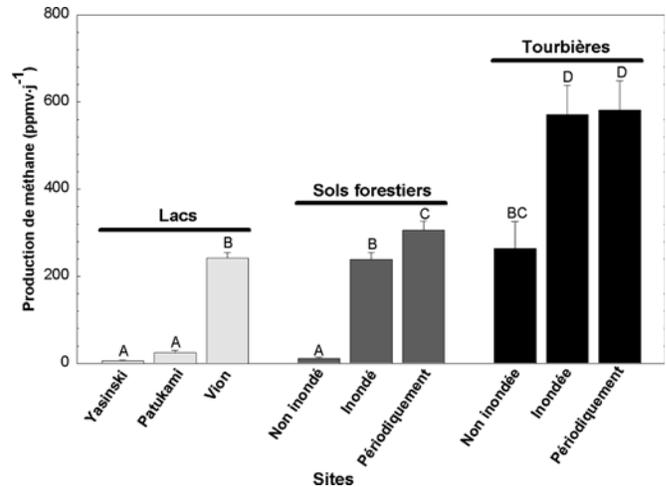
Fig. 2. Production de méthane à partir d'échantillon de tourbière inondée en présence des compétiteurs de la méthanogénèse (A) et à partir d'échantillons du lac Yasinski en présence de précurseurs de méthanogénèse (B). Chaque point est la moyenne d'un triplicat analytique et la barre d'erreur représente l'écart type.



inondé, qu'avec le sol forestier inondé de façon permanente. Cette observation comparable à celle rapportée par Boom et al. (1997) met ainsi en évidence le rôle que peuvent jouer les sols périodiquement inondés en termes de foyers potentiels d'émission de CH_4 vers l'atmosphère. Ce qui peut être non négligeable avec les réservoirs destinés à la production de l'hydroélectricité, compte tenu de leur immensité et des variations du niveau d'eau en relation avec la demande en énergie.

En résumé, il ressort de notre étude que l'activité potentielle de méthanogénèse peut varier grandement d'un système à l'autre, vraisemblablement en relation avec les facteurs édaphiques. Le potentiel de méthanogénèse des sols et tourbières, quoique significatif la première année (expériences avec les échantillons des lieux non inondés), demeure élevé plus de 20 ans après la mise en eau (autant chez les échantillons inondés périodiquement qu'en permanence). Toutefois, cette activité potentielle apparemment contrôlée par la concentration en SO_4^{2-} du milieu est apparue plus importante dans les milieux immergés en permanence ou de façon périodique, notamment avec les tourbières. Ce qui indique entre autres l'impact que peut avoir la mise en eau d'un réservoir sur l'indice du potentiel d'activité de méthanogénèse des systèmes terrestres immergés. Les sols périodiquement immergés sont apparus comme des foyers

Fig. 3. Production comparée de méthane entre les lacs, sols et tourbières non inondés, périodiquement inondés et inondés en permanence. Les différences significatives de production entre les différents types d'échantillon sont symbolisées par des lettres majuscules (ainsi par exemple $A \neq B$). Pour chaque échantillon, la barre d'erreur représente l'écart type.



potentiels d'émission de CH_4 vers l'atmosphère, mais l'importance de leur étendue peut être réduite à travers le choix d'un relief présentant des vallées fortement encastrées. Il s'agit là des considérations à prendre en compte lors du choix du site d'implantation de nouveaux réservoirs, si on veut minimiser l'impact de leur création sur l'environnement, du moins en termes de production de CH_4 .

Remerciements

Nous remercions l'Agence universitaire de la francophonie (AUPEF-UREF) pour la Bourse d'Excellence Postdoctorale octroyée à L.B.J. et le Conseil de recherches en sciences naturelles et génie du Canada (CRSNG) pour son support financier à travers la subvention individuelle accordée à R.R. et la subvention stratégique CRSNG – Hydro-Québec à D.P. et M.L.

Bibliographie

- Achtlich, C., Bak, F., et Conrad, R. 1995. Competition for electron donors among nitrate reducers, ferric iron reducers, sulfate reducers, and methanogens in anoxic paddy soil. *Biol. Fertil. Soils*, **19** : 65–72.
- Blodeau, C., et Moore, T.R. 2003. Experimental response of peatland carbon dynamics to a water table fluctuation. *Aquat. Sci.* **65** : 47–62.
- Boom, P.I., Mitchell, A., et Lee, K. 1997. Effect of wetting and drying on methane emissions from ephemeral floodplain wetlands in south-eastern Australian. *Hydrobiologia*, **357** : 73–87.
- Duchemin, E., Lucotte, M., Camuel, R., et Chamberland, A. 1995. Production of greenhouse gases CH_4 and CO_2 by hydroelectric reservoirs of the boreal region. *Global Biogeochem. Cycles*, **9** : 529–540.
- Houghton, J.T., Callender, B.A., et Varney, S.K. 1992. Climate change 1992. The supplement report of the IPCC Scientific assessment. Dans *Intergovernmental panel of climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, R.-U.

- Juutinen, S.A.J., Martikainen, P., et Nykänen, H. 2001. Effect of spring flooded and water level draw-down on methane dynamics in littoral zone of boreal lakes. *Freshwater Biol.* **46** : 855–869.
- Kelly, C.A., Rudd, J.W.M., Bodaly, R.A., Roulet, N.P., St. Louis, V.L., Heyes, A., Moore, T.R., Schiff, S., Aravena, R., Scott, K.J., Dyck, B., Harris, R., Warner, B., et Edwards, C. 1997. Increases in fluxes of greenhouse gases and methyl mercury following flooding of an experimental Reservoir. *Environ. Sci. Technol.* **31** : 1334–1344.
- Lovley, D.R., et Phillips, E.J.P. 1987. Competitive mechanisms for inhibition of sulfate reduction and methane production in the zone of ferric iron reduction sediments. *Appl. Environ. Microbiol.* **53** : 2636–2641.
- Lucotte, M., Montgomery, S., et Bégin, M. 1999. Mercury dynamics at the flooded soil-water interface in reservoir of northern Québec: in situ observations. *Dans Mercury in the biogeochemical cycle: natural environments and hydroelectric reservoir of northern Québec (Canada). Sous la direction de M. Lucotte, R. Schetagne, N. Therien, C. Langlois et A. Tremblay.* Springer-Verlag, Berlin. p. 165–189.
- Page, A.L., Miller, R.H., et Keeney, D.R. 1982. Methods of soil analysis, 2^e éd. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Parashar, D.C., Rai, J., et Gupta, P.K. 1991. Parameters affecting methane emission from paddy fields. *Ind. J. Radio Space Phys.* **20** : 12–17.
- Patrick, W.H.J., et Jugsujinda, A. 1992. Sequential reduction and oxidation of inorganic nitrogen, manganese, and iron in flooded soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **56** : 1071–1073.
- Peters, V., et Conrad, R. 1996. Sequential reduction process and initiation of CH₄ production upon flooding of oxic upland soils. *Soil Biol. Biochem.* **15** : 151–174.
- Roy, R., et Greer, C.W. 2000. Hexadecane mineralization and denitrification in two diesel fuel-contaminated soils. *FEMS Microbiol. Ecol.* **32** : 17–23.
- Roy, R., Kluber, H.D., et Conrad, R. 1997. Early initiation of methane production in anoxic rice soil despite the presence of oxidants. *FEMS Microbiol. Ecol.* **24** : 311–320.
- Sall, J., Lehman, A., et Creighton, L. 2001. JMP start statistics A guide to statistics and data analysis using JMP and JMP IN software, 2^e éd. SAS Institute Inc., Cary, N.C.
- Sokal, R.R., et Rohlf, F.J. 1981. *Biometry*. 2^e éd. Freeman W.H., New York.
- St. Louis, V.L., Kelly, C.A., Duchemin, E., Rudd, J.W.M., et Rosenberg, D.M. 2000. Reservoir surface as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate. *Bioscience*, **50** : 766–775.
- Tyler, S.C. 1991. The global methane budget. *Dans Microbial production and consumption of greenhouse gases: methane, nitrogen oxides and halomethanes. Sous la direction de J.E. Rogers et W.B. Whitman.* American Society for Microbiology, Washington, D.C. p. 7–38.
- Yagi, K., et Minami, K. 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some japanesse paddy fields. *Soil Sci. Plant Nutr.* **36** : 599–610.
- Yao, H., Conrad, R., Wassmann, R., et Neue, H.U. 1999. Effect of soil characteristics on sequential reduction and methane production in sixteen rice paddy soils from China, the Philippines, and Italy. *Biogeochemistry*, **47** : 269–295.