

**ESTIMATION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE PAR LES MILIEUX
AQUATIQUES À L'ÉCHELLE D'UNE VALLÉE GLACIAIRE AU NUNAVUT À L'AIDE
DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE**

Par
Paschale Noël Bégin

Sous la direction de
Isabelle Laurion
Centre Eau Terre Environnement
Institut National de la Recherche Scientifique

Documents scientifiques et techniques; 409

© PN Bégin, Mai 2012

Table des matières

Liste des figures	ii
Liste des tableaux	iii
Introduction	1
Matériel et méthodes	5
<i>Région d'étude</i>	5
<i>Superficie des différents types de mares</i>	6
<i>Planimétrie des surfaces au moyen d'ArcGIS</i>	9
<i>Détermination automatisée des surfaces en eau au moyen du logiciel Geomatica</i>	10
<i>Mesures de terrain</i>	11
<i>Caractéristiques limnologiques des mares</i>	12
Résultats	14
<i>Répartition des surfaces en eau</i>	14
<i>Planimétrie des surfaces au moyen d'ArcGIS</i>	14
<i>Détermination automatisée des surfaces en eau au moyen du logiciel Geomatica</i>	18
<i>Écart entre les mesures prises sur le terrain et l'analyse logicielle</i>	24
<i>Surfaces en eau selon une détermination logicielle à l'échelle de la vallée</i>	26
<i>Flux de gaz à effet de serre mesurés</i>	27
<i>Application des flux à l'échelle de la vallée</i>	27
Discussion	30
Conclusion	36
Références	39

Liste des figures

Figure 1. Site d'étude..	6
Figure 2. Unités morphosédimentologiques..	8
Figure 3. Disposition des différentes unités morphosédimentologiques à l'échelle de la vallée.	9
Figure 4. Disposition des quadrats.	10
Figure 5. Histogramme généré par le logiciel <i>Geomatica</i> présentant la fréquence des pixels selon leur valeur de réflectance.	11
Figure 6. Prise de mesures linéaires des plans d'eau sur le terrain.	12
Figure 7. Planimétrie des surfaces recouvertes d'eau à l'aide du logiciel <i>ArcGIS</i>..	16
Figure 8. Moyenne des pourcentages de recouvrement d'eau par rapport à la terre pour chaque unité morphosédimentologique selon la planimétrie à l'aide d'<i>ArcGIS</i>.	17
Figure 9. Surfaces en eau déterminée automatiquement par le logiciel <i>Geomatica</i> sur la base de la délimitation du spectre de réflectance.....	19
Figure 10. Pourcentage de recouvrement d'eau par rapport à la terre pour chaque unité morphosédimentologique selon la détermination par le logiciel <i>Geomatica</i>..	20
Figure 11. Recouvrement des quadrats par l'eau obtenu à l'aide de l'analyse logicielle à l'intérieur des quadrats par rapport à celui obtenu à l'aide de la planimétrie manuelle.	21
Figure 12. Comparaison des pourcentages de surface recouverte par l'eau obtenues à l'aide de la détermination logicielle.	22
Figure 13. Surfaces en eau selon une détermination logicielle à l'échelle d'une unité morphosédimentologique entière.	23
Figure 14. Comparaison des mesures linéaires prises sur le terrain et les mêmes mesures prises sur l'image satellitaire analysée à l'aide du logiciel <i>Geomatica</i>...	25

Liste des tableaux

Tableau 1. Moyennes des valeurs seuils des histogrammes de réflectance servant à distinguer l'eau des surfaces émergées dans l'analyse logicielle automatisée.....	23
Tableau 2. Coefficient de détermination entre les mesures prises sur le terrain et les mesures prises sur l'image satellitaire analysée.	24
Tableau 3. Proportions des différents types de mares par rapport à la quantité d'eau obtenue par la planimétrie manuelle et aire totale de ces types de mares à l'échelle de la vallée en appliquant ces proportions aux aires totales obtenues par l'analyse logicielle automatisée.	26
Tableau 4. Flux de gaz à effet de serre en mmol par mètre carré par jour mesurés entre 2007 et 2011 pour les mares de polygones à centre déprimé, les mares de fentes de coin de glace et les lacs	27
Tableau 5. Émissions de CO₂ et de CH₄ à l'échelle de la vallée par l'application des flux aux aires des unités morphosédimentologiques.	29
Tableau 6. Total des émissions de dioxyde de carbone et de méthane à l'échelle de la vallée.	29

Résumé

La fonte accélérée du pergélisol en Arctique est à l'origine de la formation de mares de fonte dans lesquelles se décompose la matière organique qui a été piégée dans le pergélisol au cours de l'Holocène. Celle-ci est dégradée par les microorganismes, ce qui produit du CO₂ et du CH₄, deux gaz à effet de serre (GES). L'objectif de l'étude est d'évaluer la superficie occupée par les mares de fonte à l'échelle de la vallée au pied du glacier C-79, à l'Île Bylot au Nunavut, à l'aide d'une image satellitaire afin d'estimer les émissions de GES par l'ensemble des plans d'eau. Les flux de GES diffèrent selon les types de mares : les mares de polygones à centre déprimé (-8,53 mmol CO₂ m⁻² j⁻¹ et 0,88 mmol CH₄ m⁻² j⁻¹) et les mares de fentes de coin de glace (50,20 mmol CO₂ m⁻² j⁻¹ et 2,55 mmol CH₄ m⁻² j⁻¹), bien que d'autres facteurs peuvent influencer les émissions (ex. : assemblages microbiens, caractéristiques physiques et chimiques, cycles diurnes et saisonniers). Les mares de polygones à centre déprimé occupent 734 094 m² et captent le CO₂ (-6260 mol j⁻¹), tandis qu'elles émettent du CH₄ (647 mol j⁻¹). Les mares de fentes de coin de glace occupent 1 166 787 m² et émettent du CO₂ et du CH₄ (58 569 mol CO₂ j⁻¹ et 2971 mol CH₄ j⁻¹). La surface totale occupée par les mares est de 1 900 879 m² et leurs émissions totales sont de 1716 kg de carbone par jour en équivalent CO₂.

Abstract

The accelerated thawing of permafrost in the Arctic causes the formation of thaw ponds in which decomposes organic matter, which was previously trapped in permafrost during the Holocene. Microorganisms consume this organic matter, process that releases CO₂ and CH₄, two potent green house gases (GHG). This study aimed at estimating the area covered by these thaw ponds at the scale of the valley adjacent to C-79 glacier at Bylot Island in Nunavut, with satellite imagery, in order to estimate global GHG fluxes from aquatic ecosystems. GHG fluxes vary for the different types of thaw ponds: ponds in low-centered polygons (-8.53 mmol CO₂ m⁻² d⁻¹ and 0.88 mmol CH₄ m⁻² d⁻¹) and ponds in ice wedges (50.20 mmol CO₂ m⁻² d⁻¹ and 2.55 mmol CH₄ m⁻² d⁻¹). Other factors may influence GHG fluxes such as microbial assemblages, physical and chemical properties of ponds, and diurnal and seasonal cycles. Low-centered polygon ponds cover 734 094 m² and are a CO₂ sink (-6260 mol d⁻¹), but they are a CH₄ source (647 mol d⁻¹). Ice-wedge ponds cover 1 166 787 m² and are a CO₂ and CH₄ source (58 569 mol CO₂ d⁻¹ and 2971 mol CH₄ d⁻¹). The total area covered by thaw ponds is of 1 900 879 m² and their global GHG emissions are of 1716 kg of carbon per day in CO₂ equivalent.

Introduction

L'augmentation des températures de l'air observée à l'échelle du globe stimule l'activité microbienne et la libération consécutive de carbone sous forme gazeuse (dioxyde de carbone CO₂ et méthane CH₄) qui ont le potentiel de contribuer à l'effet de serre terrestre. L'Arctique est particulièrement sensible à ce réchauffement; la hausse de la température atmosphérique annuelle équivaut à environ deux fois l'augmentation moyenne planétaire (IPCC 2007). La dégradation accélérée du pergélisol riche en glace a comme conséquence d'accélérer la formation des mares de fonte (ou mares thermokarstiques), transformant ainsi des habitats terrestres en habitats aquatiques (Payette et al. 2004). D'autres effets climatiques liés à l'accélération du cycle hydrologique et à la croissance accrue des plantes terrestres peuvent aussi libérer plus de carbone et de nutriments vers les systèmes aquatiques. Une quantité considérable de gaz à effets de serre (GES) serait relâchée annuellement en régions arctiques et subarctiques étant donnée l'abondance des mares et l'immense réserve de carbone organique entreposée à ces latitudes (Downing et al. 2006; Kortelainen et al. 2006; Schuur et al. 2008). L'activité microbienne dans les mares formées par la dégradation du pergélisol jouerait ainsi un rôle important dans le cycle global du carbone. Cette dégradation remet en circulation du carbone organique jusqu'alors séquestré par le gel depuis des millénaires, ce qui alimente la chaîne détritique dont l'activité est elle-même stimulée par la hausse des températures. Quelques études ont été menées dans l'Arctique dans le but de quantifier les émissions de GES, de caractériser les milieux producteurs et de comprendre les processus physiques et biologiques en cause. L'objet

principal de la présente étude est de contribuer à cette évaluation de la production de GES dans une région de l'Arctique où la dégradation du pergélisol semble très active.

Dans l'Arctique, les zones d'invasion marine postglaciaire sont des lieux où la formation du pergélisol et des formes périglaciaires sont favorisées. La vallée au pied du glacier C-79 sur l'Île Bylot au Nunavut, le site de cette étude, en est un exemple. Dans cette vallée, des sédiments limoneux ont été mis en place et les dépôts glaciaires ont été remodelés par l'invasion marine suivant la dernière glaciation. Un climat favorable au développement de tourbières a ensuite fait place à une forte accumulation de matière organique (environ 2 m de tourbe; Fortier & Allard 2004). Ces dépôts sont aujourd'hui émergés suite au relèvement isostatique. La topographie peu accentuée de la vallée, les dépôts mal drainés et la forte exposition au vent qui balaie la neige au sol laissant de vastes espaces dégagés, en font un milieu propice à la formation du pergélisol. Une forte activité périglaciaire se déroule dans cette vallée et donne lieu à une morphologie variée. Par exemple, on trouve des pingos, des hummocks, ainsi qu'une multitude de polygones délimités par des fentes occupées par des coins de glace.

La fonte de la glace du pergélisol forme des plans d'eau dont les contours suivent la morphologie périglaciaire. Le dégel et le regel saisonniers du sol forment un réseau de fentes où s'accumule l'eau de fonte de la neige. Au gel suivant, l'eau ainsi accumulée prend de l'expansion et forme un coin de glace (Allard 1996; Fortier & Allard 2004). Au fil des ans, cette action répétée du gel et du dégel élargit la fente contenant le coin de glace qui délimite le polygone. L'eau qui s'y accumule en été forme une mare où l'érosion de la tourbe est prononcée. De plus, selon la quantité de glace contenue dans le sol sous-jacent au polygone,

un affaissement peut être causé par la fonte, créant une dépression au centre où peut s'accumuler l'eau, formant ainsi une mare. Les mares perchées sur les coins de glace et celles se logeant dans les dépressions au centre des polygones sont les deux types de mares examinées dans la présente étude. Leurs propriétés limnologiques et leurs émissions de GES sont étudiées depuis 2005 (Breton et al. 2009; Laurion et al. 2010).

La fonte accélérée de la partie superficielle du pergélisol implique que le mollisol (*active layer*) est de plus en plus épais en été; la matière organique qui s'y trouve devient alors disponible pour être dégradée par les organismes microbiens. La disponibilité de l'oxygène, dépendant de la production primaire, de la consommation par la respiration et de la vitesse des échanges gazeux à la surface du plan d'eau (Kalff 2002), détermine la façon dont la matière organique est dégradée. En présence d'oxygène, la dégradation de la matière organique mène à la production de CO₂ pouvant être libéré par diffusion à l'interface eau-air. En milieu anoxique, la dégradation de la matière organique mène aussi à la production de CH₄, pouvant être relâché vers l'atmosphère par diffusion ainsi que par ébullition. De plus, partie du CH₄ peut être oxydé à nouveau en CO₂ dans la colonne d'eau avant d'être relâchée sous cette forme (Roehm 2005). Une étude réalisée par Breton et al. (2009) souligne le fait que les mares dans cette région arctique sont toutes supersaturées en CH₄ au mois de juillet, alors que seules certaines mares sont supersaturées en CO₂, phénomène lié à l'intensité variable de l'activité photosynthétique qui puise le CO₂. D'autres études ont démontré l'importance des émissions de GES par les mares formées par la fonte du pergélisol (Hamilton et al. 1994; Walter et al. 2006; Ström & Christensen 2007; Blodau et al. 2008). Ces observations renforcent l'intérêt de considérer ces milieux dans une estimation globale des émissions de GES. Les émissions de GES, en particulier le CH₄, par les mares

thermokarstiques auraient un effet de rétroaction positive sur le réchauffement climatique (Schuur et al. 2008; Walter et al. 2006), puisque le réchauffement de l'atmosphère et la hausse des précipitations favorisent leur formation. Certains suggèrent même que ce phénomène aurait contribué à l'augmentation de la concentration de méthane dans l'atmosphère lors de la dernière déglaciation (Walter et al. 2007). Toutefois, une récente étude présente l'augmentation des températures annuelles comme un facteur favorisant l'activité enzymatique permettant un plus grand stockage de carbone sous forme organique, donc un effet de rétroaction négative (Yu et al. 2011). Par ailleurs, la modélisation de l'évolution temporelle des mares thermokarstiques sur plusieurs milliers d'années, faisant état du déclin de leur abondance suite à leur drainage, suggère que l'effet de rétroaction positive sur le climat serait impossible (van Huissteden et al. 2011). Il semble toutefois que ce patron ne se produise pas partout, puisque dans certaines régions, le drainage des mares ne survient pas même lorsque tout le pergélisol a disparu (Bouchard et al. 2011). Néanmoins, ces écosystèmes sous-étudiés jouent un rôle important dans le paysage nordique et méritent certainement une attention particulière.

De manière générale, les milieux terrestres sont considérés comme un puits de carbone, alors que les milieux aquatiques sont considérés comme une source de carbone (Cole et al. 2007). Par ailleurs, des études montrent que les petits plans d'eau jouent un rôle majeur dans le transfert du carbone vers l'atmosphère sous forme gazeuse (Kortelainen et al. 2006), rôle qui a longtemps été ignoré puisque la surface de ces plans d'eau est sous-estimée (Downing et al. 2006). Les mares couvrent une grande superficie de la vallée examinée dans la présente étude et constituent donc une source potentielle non négligeable de GES. L'objectif ultime de l'étude est d'estimer les émissions de GES à l'échelle de la vallée entière. Les objectifs

spécifiques de l'étude sont (1) d'obtenir une estimation de la superficie occupée par chaque type de mares dans la vallée, (2) de colliger les données relatives aux flux de GES pour ces types de mares récoltées de 2007 à 2011, et (3) de mettre en relation ces deux informations afin d'obtenir une estimation globale des émissions de GES par ces mares à l'échelle de la vallée. Dans la vallée étudiée, les flux de CO₂ et de CH₄ diffèrent entre les mares de polygones à centre bas par rapport aux mares de fentes coins de glace (Laurion et al. 2010), alors que peu de données concernant les grandes mares résultant de la fusion de plusieurs mares ont été récoltées jusqu'à présent. Plusieurs facteurs physicochimiques et biologiques peuvent influencer la production de GES et la vitesse à laquelle les GES sont émis à la surface de l'eau, à l'échelle spatiale, saisonnière et diurne. Malgré cette variabilité, nous émettons l'hypothèse que leur contribution globale aux émissions de GES dans l'ensemble de la vallée est proportionnelle à leur superficie totale.

Matériel et méthodes

Région d'étude

Le site d'étude se trouve dans la vallée Qarlikturvik, au pied du glacier C-79 à l'île Bylot (73°08'N, 80°00'O; Figure 1). L'île Bylot, dont la majeure partie compose le Parc National Sirmilik, se trouve au Nord de l'île de Baffin, et est recouverte des montagnes Byam Martin en son centre et de terrasses marines post-glaciaires en sa périphérie. La vallée à l'étude, d'environ 15 km de longueur et 5 km de largeur, est principalement un milieu humide dominé par la toundra herbacée. Le pergélisol en cet endroit pourrait atteindre plus de 400m de profondeur (Maxwell 1980) alors que le mollisol atteint environ 40 cm de profondeur dans les milieux tourbeux (Fortier & Allard 2004). Cette région est soumise à un climat polaire et

la température moyenne annuelle enregistrée de 1971 à 2000 est de $-15,1^{\circ}\text{C}$ pour le village de Pond Inlet, situé à 85 km au sud-est de la vallée (Environnement Canada 2011).



glacier C-79.

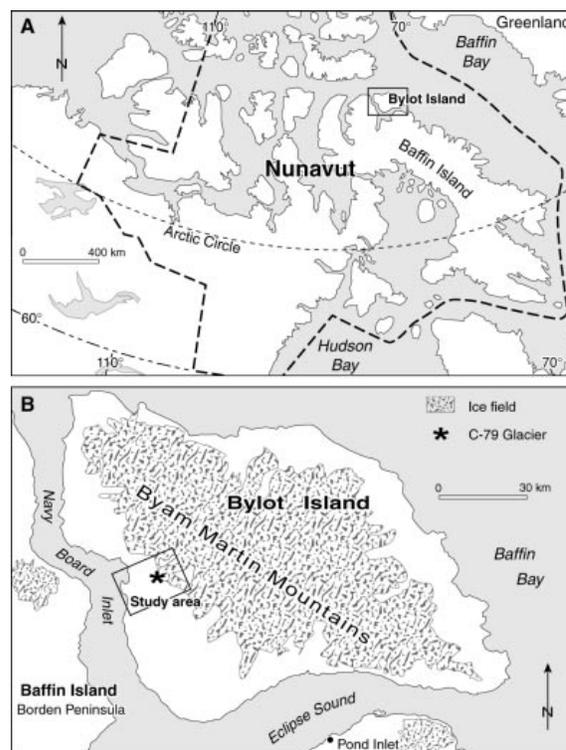


Figure 1. Site d'étude. Vallée Qarlikturvik au pied du glacier C-79, Île Bylot, Parc Sirmilik, Nunavut ($73^{\circ}08'N$, $80^{\circ}00'W$). Carte de droite : Fortier et Allard (2004).

Superficie des différents types de mares

L'évaluation de la superficie occupée par les différents types de mares a été réalisée à partir d'une image provenant du satellite WorldView-1. L'image utilisée est panchromatique et a été acquise le 18 juillet 2010. Cette image a une résolution de 0,50 m par côté (pixel). L'image panchromatique est construite à partir d'une captation de la réflexion de la lumière par le sol

dans un spectre allant de 397 à 905 nm. L'image est en 256 tons de gris passant du blanc (0) au noir (255).

La région d'étude a été divisée en unités morphosédimentologiques. Seules les surfaces recouvertes par plus de 5% d'eau ont été analysées, en excluant les rivières et les ruisseaux. Ces unités ont été définies selon l'assemblage des deux types de mares retrouvés dans la vallée : les mares de polygones à centre déprimé et les mares de fentes de coin de glace. Cinq de ces unités ont été analysées en profondeur (Figures 2 et 3):

- 1) Zones dominées par des mares de petits polygones à centre déprimé (environ 20 mètres de diamètre)
- 2) Zones dominées par des mares de grands polygones à centre déprimé (environ 60 mètres de diamètre)
- 3) Zones dominées par un réseau de mares de fentes de coin de glace
- 4) Zones dominées par de larges mares discontinues de fentes de coin de glace
- 5) Zones mixtes où se trouvent à la fois des mares de polygones et des mares de fentes de coin de glace

Chaque unité morphosédimentologique compte plusieurs zones qui sont réparties dans la vallée. Aussi, quelques lacs se trouvent dans la vallée et constituent une sixième unité. Pour éviter de confondre les mares et les lacs, étant donné que la coalescence des premières peut être à l'origine des seconds, nous considérons comme un lac une étendue d'eau dont les contours ne permettent plus d'y reconnaître les polygones d'origine. Il s'agit de plans d'eau ayant en général plus de 1000 m², les mares occupant une moins grande superficie. Ce critère a une indication morphologique, dans la mesure où le comportement dynamique des eaux

des lacs diffère d'avec celui des mares, influençant les conditions biologiques. La présente étude se concentre principalement sur les mares.

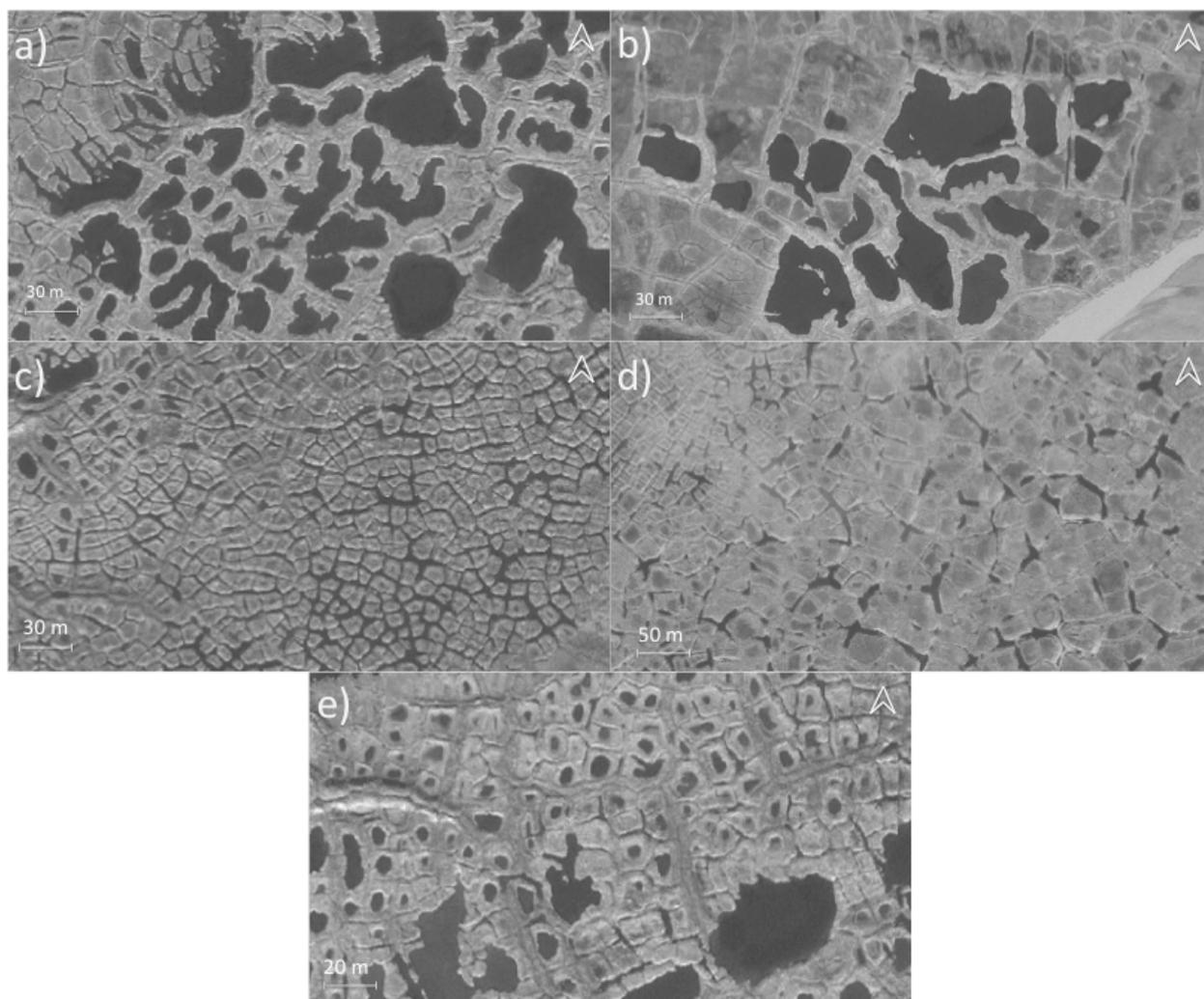


Figure 2. Unités morphosédimentologiques. a) mares de petits polygones (diamètre d'environ 20 m) à centre déprimé, b) mares de grands polygones (diamètre d'environ 60 m) à centre déprimé, c) réseau de mares de fentes de coin de glace, d) mares discontinues de fentes de coin de glace et e) zones mixtes, comprenant à la fois des mares de polygones à centre déprimé et des mares de fentes de coin de glace.

- Lacs
- Mares de petits polygones à centre déprimé
- Mares de grands polygones à centre déprimé
- Réseau de mares de fentes à coin de glace
- Grandes mares discontinues de fentes de coin de glace
- Mixtes

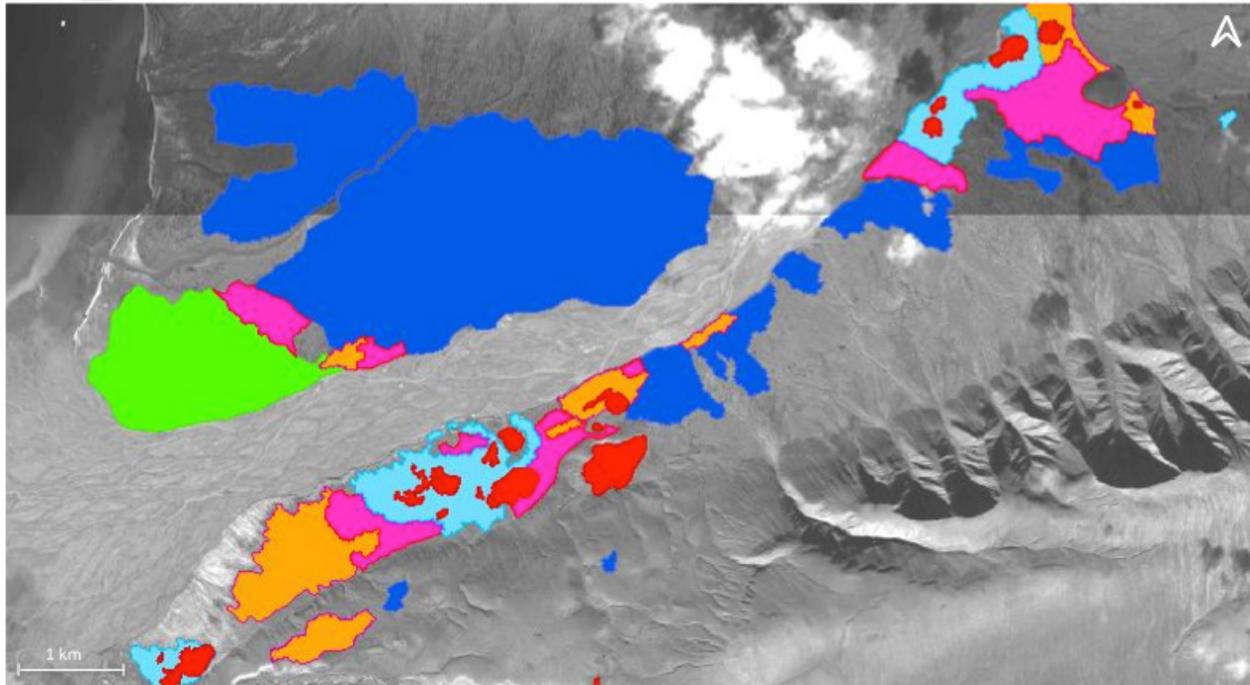


Figure 3. Disposition des différentes unités morphosédimentologiques dans la vallée.

Planimétrie des surfaces au moyen d'ArcGIS

Un échantillonnage numérique a été effectué à l'intérieur des cinq unités morphosédimentologiques décrites plus haut (Figure 4). Dix quadrats de 75 mètres de côté (5625 m²) ont été disposés aléatoirement dans chacune des unités pour un total de 50. Dans chaque quadrat, une planimétrie manuelle a été effectuée à l'aide du logiciel *ArcGIS*. Les contours des mares de polygones à centre déprimé et des mares de fentes de coin de glace ont été tracés par photointerprétation. La surface occupée par ces plans d'eau a ensuite été extraite pour déterminer le pourcentage de la surface du quadrat occupé par chaque type de

mare. Les lacs n'ont pas fait l'objet d'échantillonnage numérique puisque leur taille suggère un faible taux d'erreur par rapport à la résolution de l'image satellitaire.

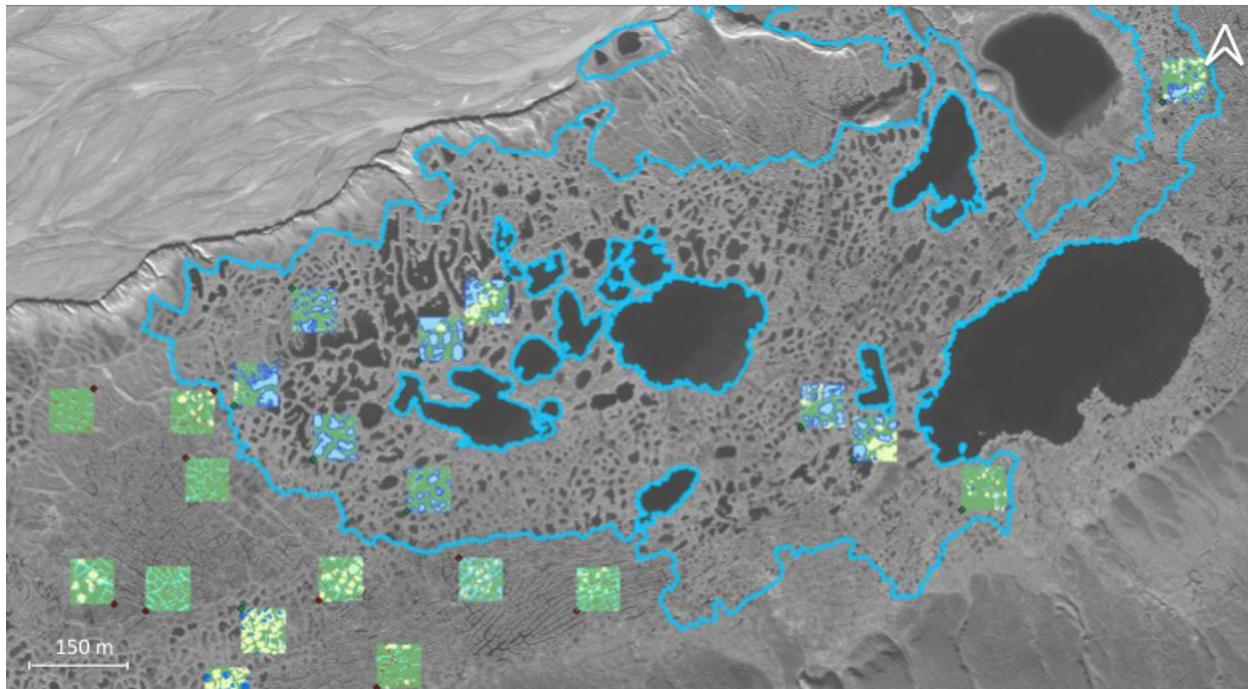


Figure 4. Disposition des quadrats (5625 m²), au nombre de 10 par unité morphosédimentologique pour un total de 50 quadrats. (Unité 1 : Mares de petits polygones à centre déprimé.)

Détermination automatisée des surfaces en eau au moyen du logiciel *Geomatica*

À l'aide du logiciel *Geomatica* développé par *PCI Geomatics*, le visionnement d'un histogramme mettant en relation la fréquence des pixels et leur valeur de réflectance permet de déterminer une valeur «seuil» classant les pixels en deux catégories : ceux représentant le sol et ceux représentant l'eau (Figure 5). La matière organique dissoute contenue dans les mares absorbe les rayons lumineux bleus du spectre solaire, alors que les molécules d'eau absorbent très fortement les rayons lumineux rouges (Kalff 2002). Ainsi, une très faible quantité d'énergie lumineuse est réfléchiée vers les capteurs du satellite. Sur une échelle de

valeur de réflectance allant de 0 à 255, les surfaces d'eau sur l'image ont une faible valeur de réflectance, contrairement au sol qui réfléchit davantage les ondes dans le spectre mesuré. L'outil «Raster Calculator» permet de calculer le nombre de pixels ayant une valeur en-dessous d'un certain seuil grâce à une formule mathématique simple. Il est ainsi possible de déterminer le nombre de pixels correspondant à l'eau libre et d'en déduire la superficie, sachant que les côtés de chaque pixel sont de 0,50 m. Afin de séparer les différents types de mares, des polygones tracés manuellement dans le logiciel permettent de découper l'image en différentes parties et d'appliquer le traitement décrit ci-haut à ces régions spécifiques.

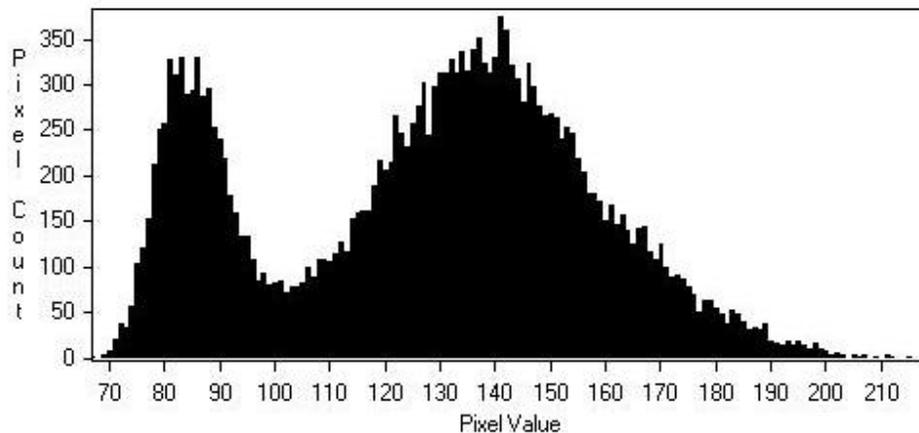


Figure 5. Histogramme généré par le logiciel *Geomatica* présentant la fréquence des pixels (*pixel count*) selon leur valeur de réflectance de 0 à 255 (*pixel value*). Les deux pics sont séparés par un creux qui sert à déterminer la valeur utilisée pour départager les pixels appartenant à une surface aquatique (valeurs de réflectance les plus faibles) et ceux appartenant à une surface émergée (valeurs de réflectance les plus élevées).

Mesures de terrain

Une mission de terrain a été effectuée en juillet 2011 afin de caractériser la morphologie et de mesurer les mares selon leur type et leur localisation et de déterminer une marge d'erreur

associée à l'utilisation de l'image satellitaire (Figure 6). Les mesures ont été prises dans huit sites qui représentent les principaux patrons de mares observables dans la vallée. Pour chaque site, un minimum de quinze mares de polygone à centre bas ont été caractérisées, ainsi que les mares de coins de glace les entourant (une vingtaine par site en moyenne au total). La longueur, la largeur et la profondeur maximales ont été mesurées à l'aide de rubans à mesurer et d'un mètre suspendu à une perche. Pour les mares de coins de glace, la longueur n'a pas été prise en compte, puisque la plupart de ces mares sont reliées entre elles et cumulent donc des distances difficiles à mesurer.

Figure 6. Prise de mesures linéaires des plans d'eau sur le terrain.

Caractéristiques limnologiques des mares

La mesure des flux de CO₂ et de CH₄ se fait de façon indirecte. À chaque site visité, trois échantillons ont été pris dans les mares. La technique d'échantillonnage permettant de

quantifier le CO₂ et le CH₄ dissous dans l'eau, telle que décrite par Laurion et al. (2010), consiste à faire l'équilibre gazeux entre deux litres d'eau provenant de la mare et 20 mL d'air et à transférer l'échantillon de gaz qui en résulte dans des fioles hermétiques dans lesquelles on a fait préalablement le vide (Exetainer®, Labco, UK). Les échantillons ainsi récoltés sont ensuite analysés par chromatographie gazeuse en laboratoire. La quantité de gaz dissouts dans les échantillons a été calculée à l'aide de la loi de Henry :

$$G_{\text{Gazaq}} = K_H \times p_{\text{Gaz}} \quad (1)$$

où K_H correspond à la constante de Henry qui prend en compte la température de l'eau et p_{Gaz} correspond à la pression partielle du CO₂ ou du CH₄. Le flux de CO₂ et de CH₄ à l'interface eau-atmosphère est ensuite calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Flux} = k (C_{\text{sur}} - C_{\text{eq}}) \quad (2)$$

où k est la constante de transfert des gaz, C_{sur} est la concentration du gaz mesurée dans l'eau (équation 1) et C_{eq} est la concentration de ce même gaz lorsqu'en équilibre avec l'atmosphère à température ambiante. Le modèle de Cole & Caraco (1998) a été utilisé pour estimer k à l'aide de la vitesse du vent (pour plus de détail, voir Laurion et al. 2010), telle que mesurée par une station météorologique située dans la vallée. La vitesse des vents utilisée pour le calcul est la moyenne des deux heures précédant chaque mesure. À ces mesures s'ajoutent celles récoltées entre 2007 et 2011 par l'équipe d'Isabelle Laurion de l'INRS.

Pour atteindre l'objectif 1, à savoir l'estimation de la surface occupée par les mares, une analyse informatique a servi à séparer les différents types de mares et de faire ressortir l'eau libre afin de calculer leur superficie respective. En ce qui concerne l'objectif 2, une analyse

des données collectées depuis 2007 permet de faire une estimation des flux de CO₂ et de CH₄ pour chaque type de mare en tenant compte de leur variabilité spatiotemporelle. Enfin, une combinaison des flux estimés à la superficie calculée permet d'obtenir une estimation des flux à l'échelle de la vallée, ce qui correspond à l'objectif 3.

Résultats

Répartition des surfaces en eau

Planimétrie des surfaces au moyen d'*ArcGIS*

La planimétrie des surfaces recouvertes par de l'eau à l'aide du logiciel *ArcGIS* a permis, pour chacun des quadrats d'échantillonnage, de distinguer les mares de polygones à centre déprimé et les mares de fentes de coin de glace (Figure 7). La proportion (%) de la surface recouverte par de l'eau par rapport à la superficie totale du quadrat varie considérablement selon les unités morphosédimentologiques (Figure 8). Il y a davantage d'eau dans les secteurs dominés par les mares de petits polygones à centre déprimé (en moyenne 32,2% d'eau) alors que les milieux les plus secs (en moyenne 6,7% d'eau) sont ceux dominés par les larges mares discontinues de fentes de coin de glace (Figure 8a). Toutefois, il y a une grande variabilité d'un milieu à l'autre (écart-type atteignant 20% dans les milieux dominés par les mares de grands polygones à centre déprimé). À l'exclusion des lacs proprement définis, certains quadrats comprenaient plus de 50% d'eau. Ces quadrats se retrouvent dans les milieux où les mares de polygones dominant. Enfin, dans chaque zone morphosédimentologique, certains secteurs sont particulièrement secs (moins de 7% d'eau). Les zones dominées par les mares de fentes de coin de glace ne comportent qu'une très faible proportion (voire nulle) de mares de polygones (Figure 8b). Là où les mares de polygones dominant, une petite

proportion de mares de fentes de coin est observée (de 0,5% à 4,1% en moyenne) (Figure 8c). Les zones mixtes contiennent une plus grande proportion de mares de polygones (14,4%) que de mares de fentes de coin de glace (3,4%).

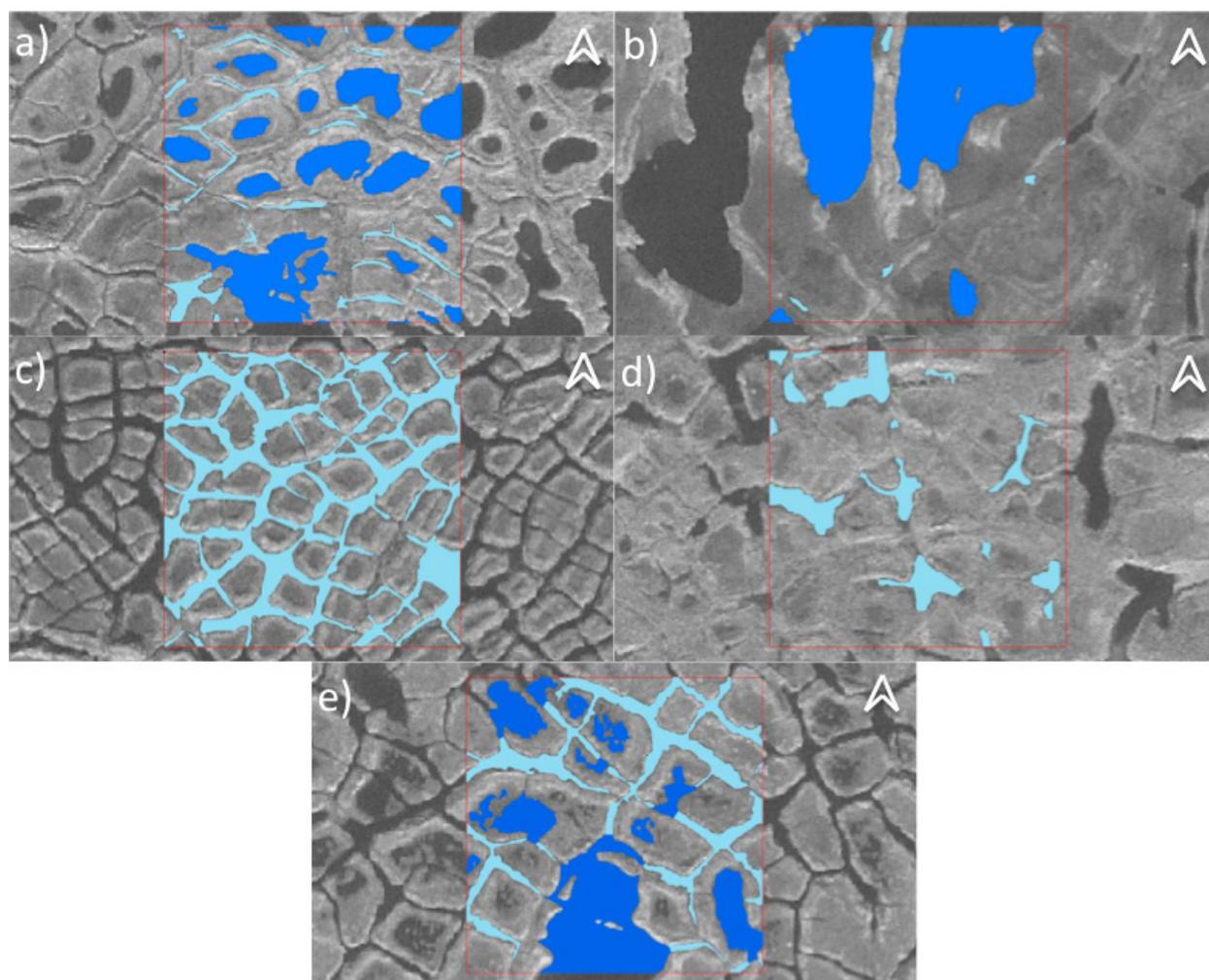


Figure 7. Planimétrie des surfaces recouvertes d'eau à l'aide du logiciel *ArcGIS*. Exemples de quadrats de 75 m de côté (5625 m²) réalisés dans chaque unité morphosédimentologique : a) mares de petits polygones à centre déprimé, b) mares de grands polygones à centre déprimé, c) réseau de mares de fentes de coin de glace, d) larges mares discontinues de fentes de coin de glace et e) surfaces mixtes composées à la fois de mares de polygones à centre déprimé et de mares de fentes de coin de glace. Les surfaces recouvertes par des mares de polygones à centre déprimé sont en bleu foncé et les mares de fentes de coins de glace sont en bleu pâle.

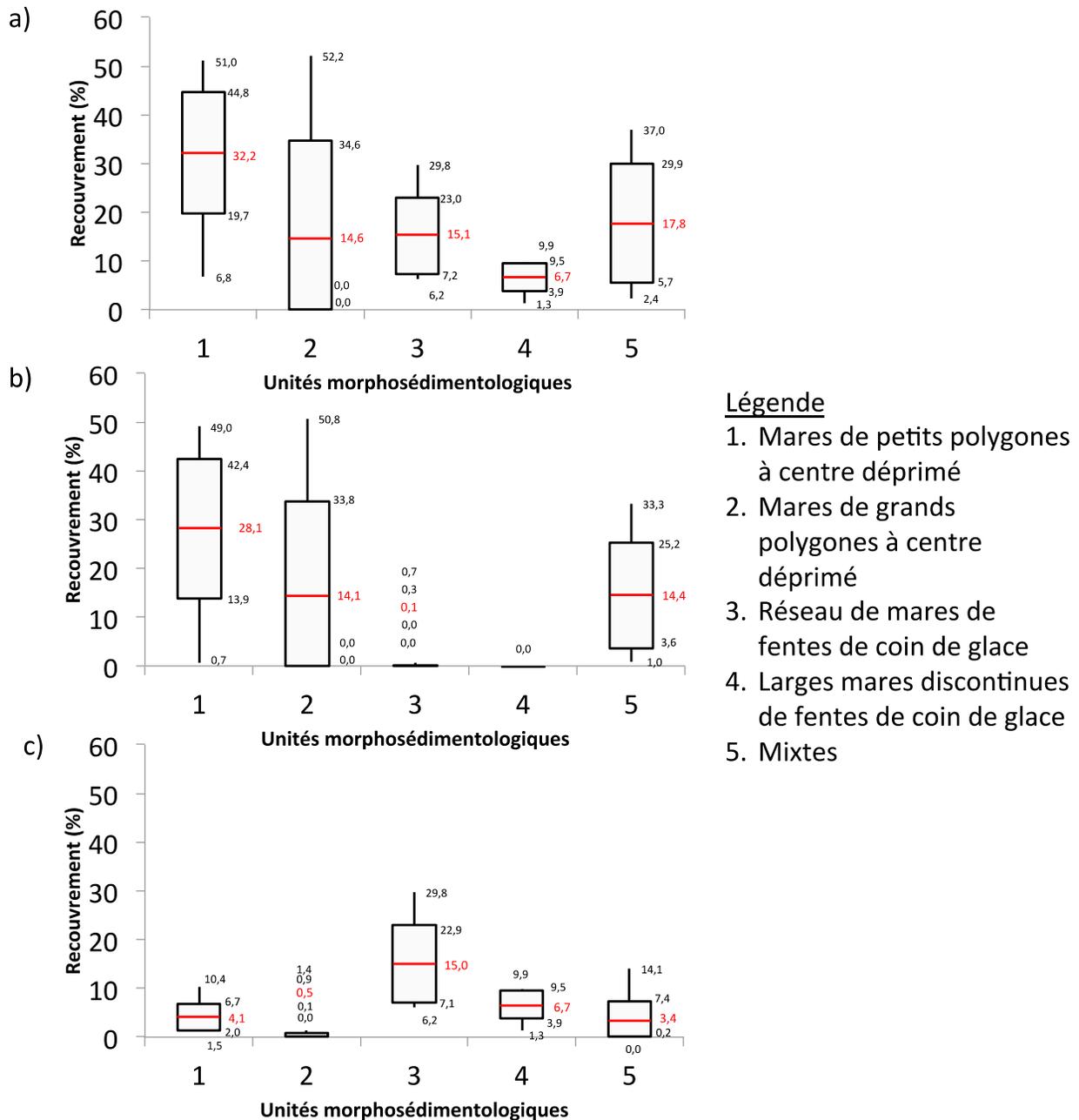


Figure 8. Moyenne des pourcentages de recouvrement d'eau par rapport à la terre pour chaque unité morphosédimentologique selon la planimétrie à l'aide d'ArcGIS. a) Surfaces recouvertes par de l'eau (par les deux types de mares, somme des surfaces considérées en b et c), b) surfaces couvertes par des mares de polygones à centre déprimé et c) surfaces recouvertes par des mares de fentes de coin de glace. Les valeurs numériques de haut en bas sont : le maximum, l'écart-type supérieur, la moyenne (en rouge), l'écart-type inférieur et le minimum.

Détermination automatisée des surfaces en eau au moyen du logiciel *Geomatica*

Sur la base des mêmes quadrats ($n = 50$), l'analyse logicielle automatisée a permis de déterminer les surfaces recouvertes d'eau, sans toutefois distinguer les types de surface (polygones versus fentes) (Figure 9). Pour comparer les deux types d'analyse, les proportions obtenues par l'analyse logicielle automatisée sont rapportées aux limites préalablement établies par la planimétrie manuelle. Les proportions obtenues par l'analyse automatique ne diffèrent pas significativement des proportions obtenues par l'analyse manuelle ($R^2 = 0,907$; $p < 0,001$) (Figure 10 et 11). Le nombre de pixels aquatiques obtenu par détermination logicielle est légèrement supérieur là où l'examen visuel des pixels n'en comptait pas. En effet, la surface totale recouverte d'eau dans un quadrat ne correspond pas simplement à la somme de la surface des pixels inclus dans les zones déterminées manuellement, comme étant des mares de polygones ou de fentes de coin de glace. Les pixels excédentaires peuvent se retrouver en marge des mares ou à l'extérieur dans des zones humides. Par contre, les proportions de pixels recouverts d'eau déterminées par l'analyse automatique et qui se retrouvent dans les surfaces préalablement établies par la planimétrie manuelle présentent une corrélation très forte avec les proportions obtenues par la planimétrie manuelle ($R^2 = 0,973$, $p < 0,001$) (Figure 12).

Comme la fréquence des pixels selon leur réflectance varie d'un endroit à l'autre, la valeur qui sert à délimiter l'eau et les surfaces émergées est toute aussi variable. La moyenne des valeurs utilisées dans les quadrats sert à faire une analyse logicielle automatisée sur l'unité entière (Tableau 1 et Figure 13).

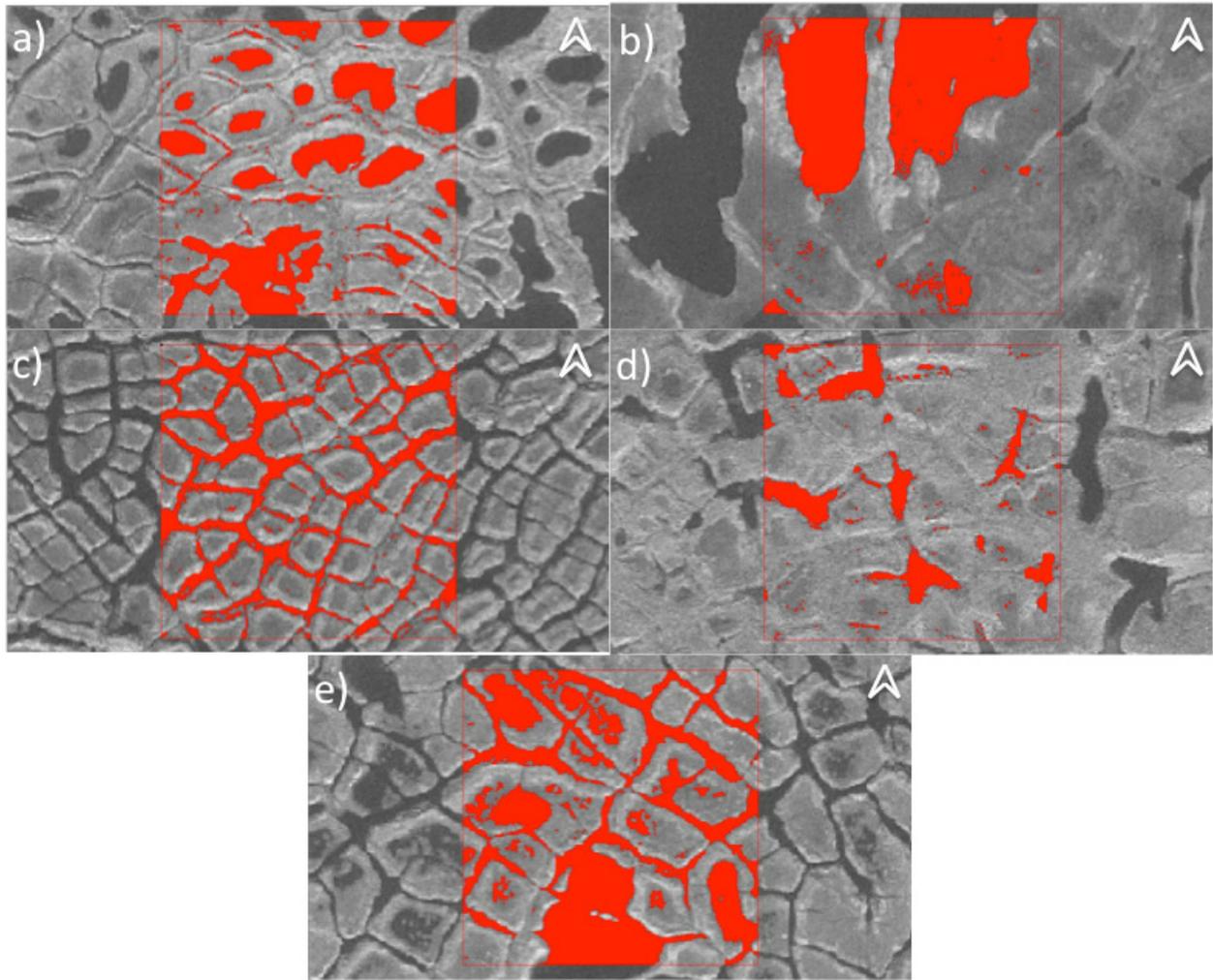


Figure 9. Surfaces en eau déterminées automatiquement par le logiciel *Geomatica* sur la base de la délimitation du spectre de réflectance (tons de gris correspondant aux milieux immergés versus les milieux émergés). Des exemples de quadrats (5625 m²) réalisés dans chaque unité morphosédimentologique sont ici présentés : a) mares de petits polygones à centre déprimé, b) mares de grands polygones à centre déprimé, c) réseau de mares de fentes de coin de glace, d) larges mares discontinues de fentes de coin de glace et e) surfaces mixtes composées à la fois de mares de polygones à centre déprimé et de mares de fentes de coin de glace. Les surfaces recouvertes par de l'eau (en rouge) sont déterminées par le logiciel, mais celui-ci ne peut discriminer les types de mares.

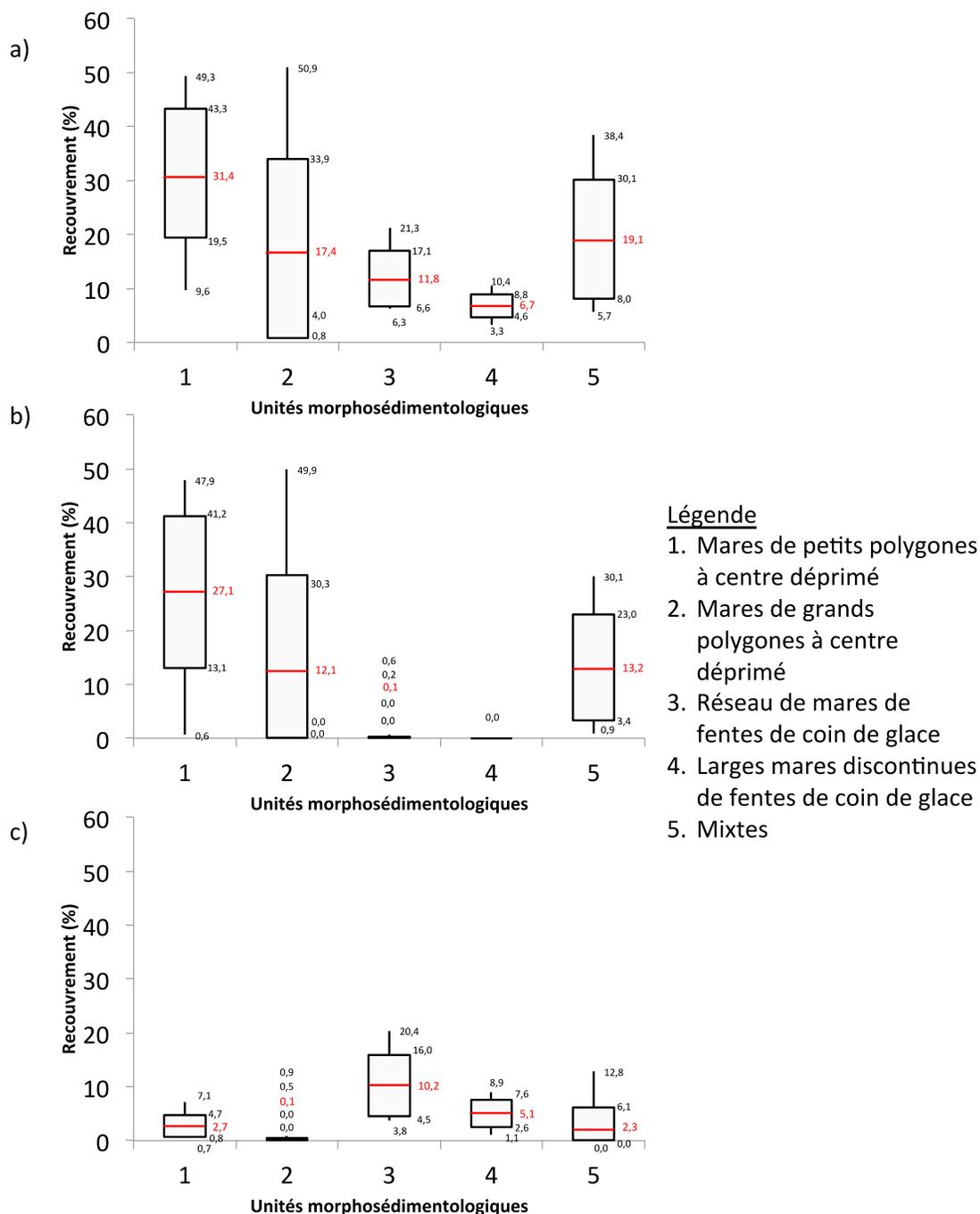


Figure 10. Pourcentage de recouvrement d'eau par rapport à la terre pour chaque unité morphosédimentologique selon la détermination par le logiciel *Geomatica* (Figure 1). a) surfaces recouvertes par de l'eau et, dans les limites préalablement établies par la planimétrie manuelle : b) surfaces couvertes par des mares de polygones à centre déprimé et c) surfaces recouvertes par des mares de fentes de coin de glace. Les valeurs numériques de haut en bas sont : le maximum, l'écart-type supérieur, la moyenne (en rouge), l'écart-type inférieur et le minimum.

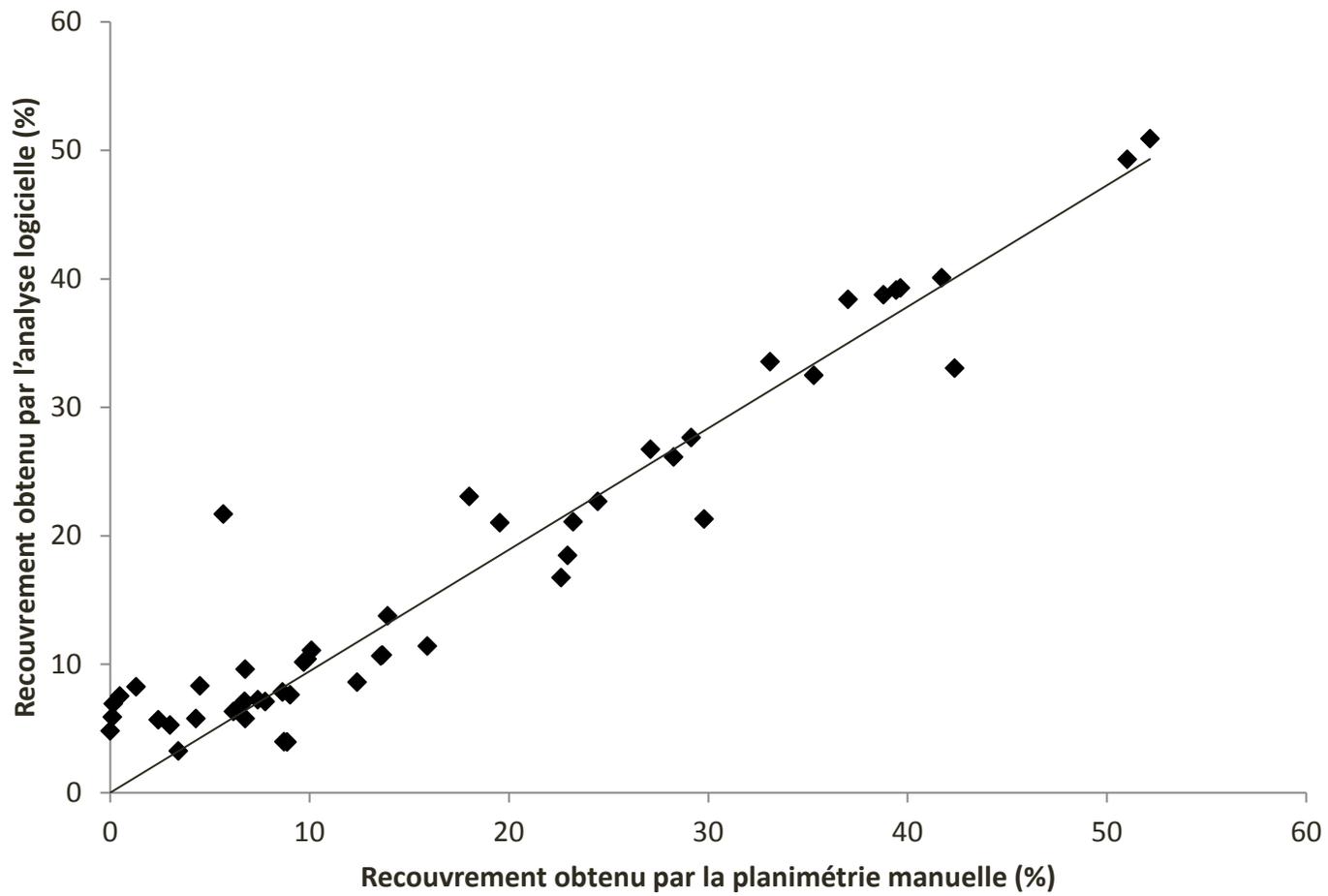


Figure 11. Recouvrement des quadrats par l'eau (en %) obtenu à l'aide de l'analyse logicielle à l'intérieur des quadrats par rapport à celui obtenu à l'aide de la planimétrie manuelle. $R^2= 0,90662$, $p < 0,001$, $n = 50$

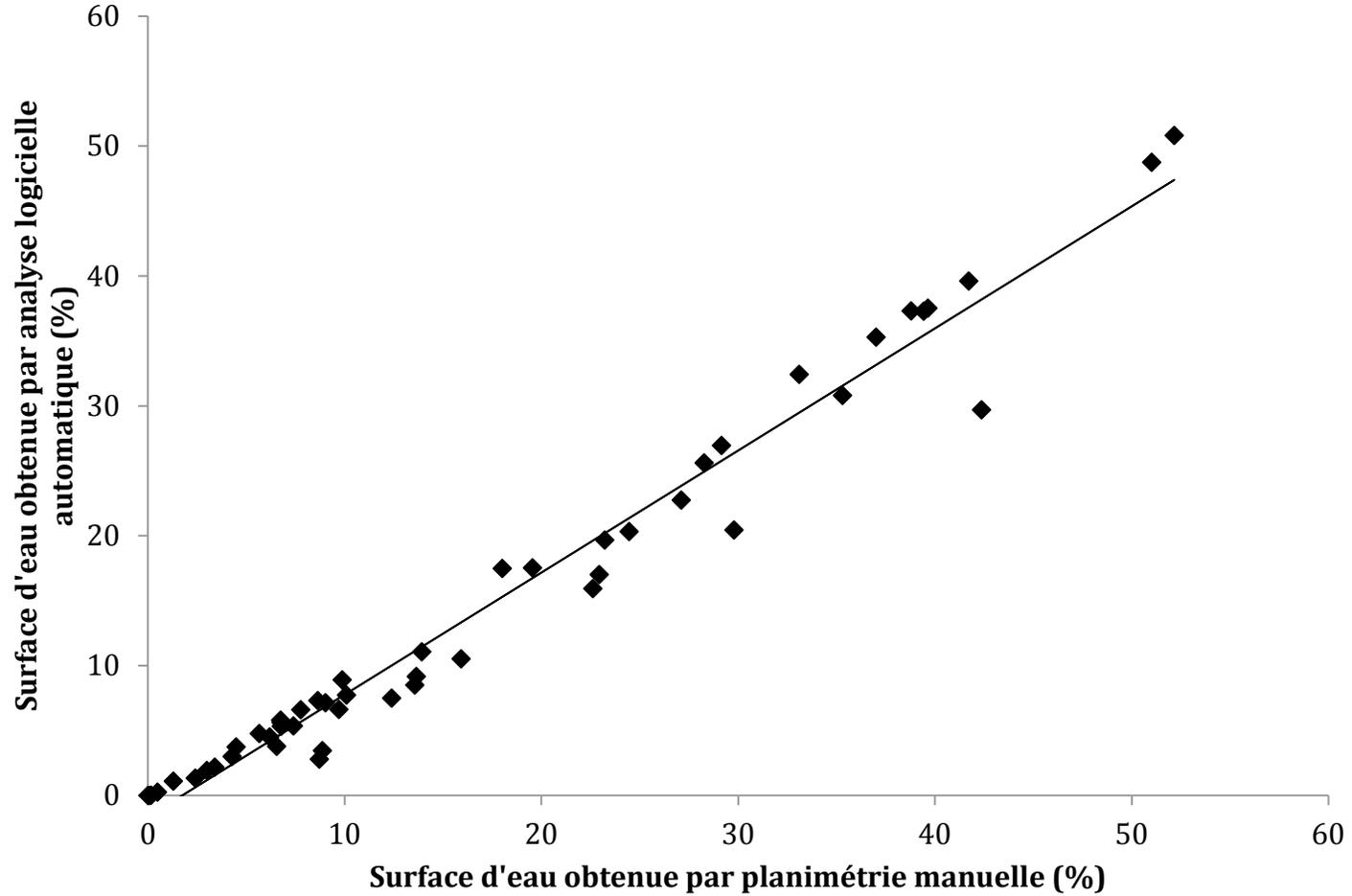


Figure 12. Comparaison des pourcentages de surface recouverte par l'eau obtenus à l'aide de la détermination logicielle à l'intérieur des limites préalablement établies par la planimétrie manuelle par rapport aux pourcentages de surfaces recouvertes par l'eau obtenus à l'aide de la planimétrie manuelle. $R^2= 0,973$, $p < 0,001$, $n = 50$.

Tableau 1. Moyennes des valeurs seuils des histogrammes de réflectance servant à distinguer l'eau des surfaces émergées dans l'analyse logicielle automatisée. Les réflectances se situent entre 0 (réflectance nulle : noir) et 255 (albédo de 100% : blanc).

Unités morphosédimentologiques	Moyenne des valeurs seuil de l'histogramme
1	102
2	94
3	92
4	103
5	99

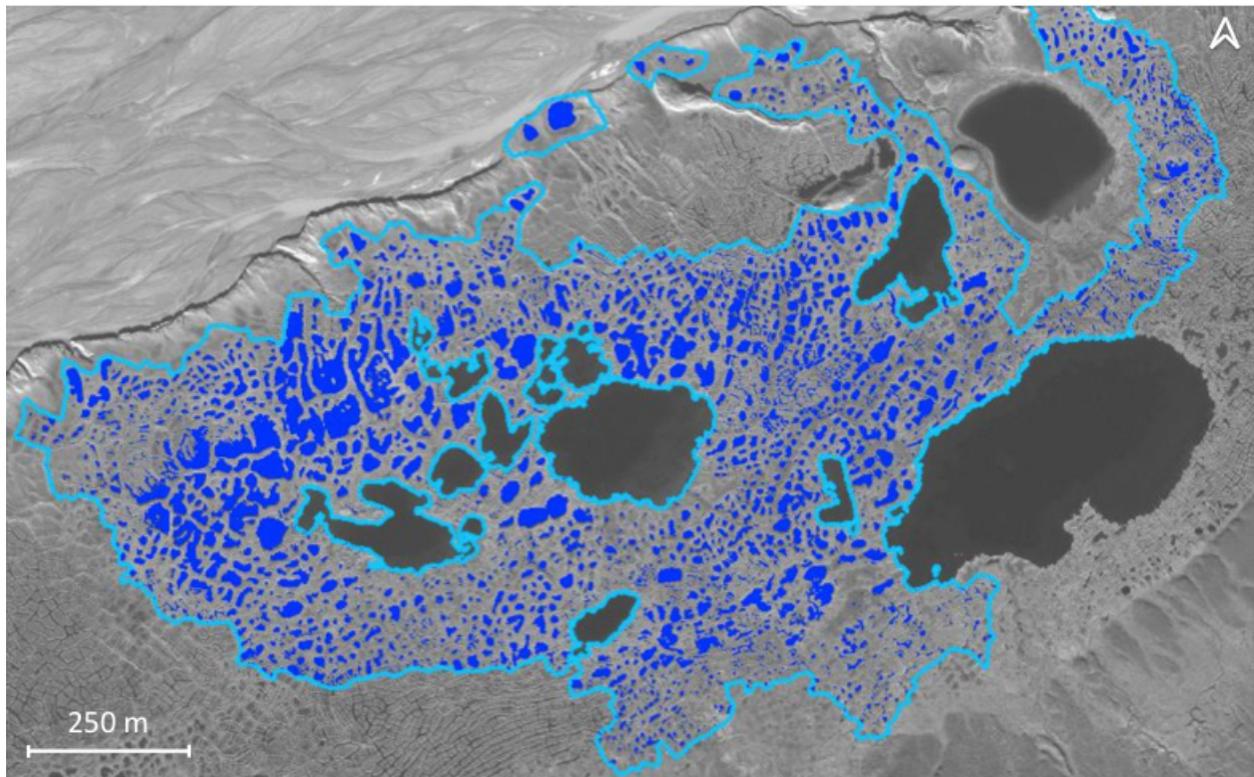


Figure 13. Surfaces en eau selon une détermination logicielle à l'échelle d'une unité morphosédimentologique entière (Unité 1 : Mares de petits polygones à centre déprimé.)

Écart entre les mesures prises sur le terrain et l'analyse logicielle

Bien que les mesures linéaires des surfaces d'eau prises sur le terrain sont passablement rapprochées des distances évaluées au moyen des pixels sur l'image satellitaire ($R^2 = 0,924$, $p < 0,001$, $n = 415$; Figure 14), dans quelques cas, les mesures sur le terrain dépassent les mesures prises sur l'image. De plus, l'image de 2010 diffère quelque peu des conditions observées sur le terrain en juillet 2011. Ainsi, certains points qui apparaissaient en eau en 2010 étaient secs en 2011 lors des observations de terrain. Le degré de concordance entre les mesures prises sur le terrain et sur l'image varie selon le site de prise de mesure (R^2 entre 0,500 et 0,980) (Tableau 2).

Tableau 2. Coefficient de détermination (R^2) entre les mesures prises sur le terrain et les mesures prises sur l'image satellitaire analysée.

Site	Coefficient de détermination (R^2)
1	0,947
2	0,872
3	0,543
4	0,500
5	0,922
6	0,957
7	0,623
8	0,980
Tous	0,924

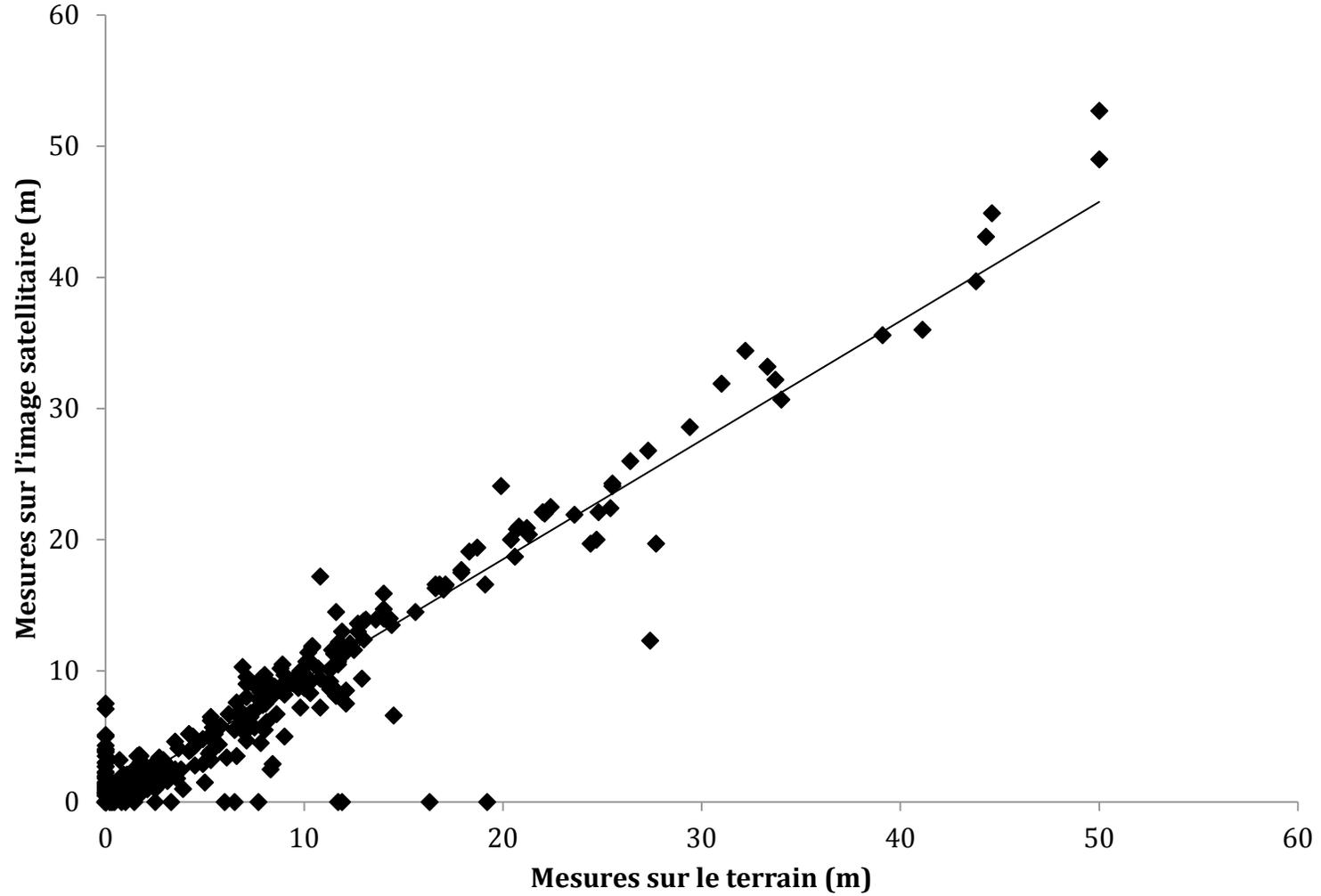


Figure 14. Comparaison des mesures linéaires prises sur le terrain et les mêmes mesures prises sur l'image satellitaire analysée à l'aide du logiciel *Geomatica*. $R^2 = 0,924$, $p < 0,001$, $n = 415$.

Surfaces en eau selon une détermination logicielle à l'échelle de la vallée

Les proportions des deux types de mares ont été rapportées par rapport à la quantité d'eau retrouvée dans les quadrats. Ainsi, la surface totale de l'eau des unités morphosédimentologiques obtenue par l'analyse logicielle a été séparée selon ces proportions (Tableau 3). Ainsi, pour une surface totale d'eau de 1 900 978 m² (eau associée à des mares de fonte du pergélisol à l'échelle de la vallée C-79), une surface 734 093 m² correspond à des mares de polygones à centre déprimé, et une surface de 1 166 786 m² correspond à des mares de fentes de coin de glace. La superficie occupée par les mares de fentes de coin de glace correspond donc à presque deux fois celle occupée par les mares de polygones à centre déprimé. La superficie totale des lacs, évaluée par planimétrie manuelle, est de 779 201 m², c'est-à-dire légèrement supérieure mais similaire à la surface occupée par les mares de polygones à centre déprimé.

Tableau 3. Proportions des différents types de mares par rapport à la quantité d'eau obtenue par la planimétrie manuelle et aire totale de ces types de mares à l'échelle de la vallée en appliquant ces proportions aux aires totales obtenues par l'analyse logicielle automatisée.

Unité	Proportions mares de polygones (%)	Proportions mares de fentes (%)	Aire totale d'eau par <i>Geomatica</i> (m ²)	Aire totale mares de polygones (m ²)	Aire totale mares de fentes (m ²)
1	79,2	20,8	367372	290986	76386
2	62,9	37,1	221016	208266	122750
3	0,5	99,5	162985	860	162125
4	0	100	728468	0	728468
5	75,2	24,8	311040	233982	77058
Total			1900879	734094	1166787

Flux de gaz à effet de serre mesurés

Les moyennes de flux de gaz à effets de serre mesurées de 2007 à 2011 varient d'un type de mare à l'autre (Tableau 4). Les mares de polygones à centre déprimé sont en majorité des capteurs de dioxyde de carbone ($-8,53 \text{ mmol m}^{-2} \text{ j}^{-1}$), alors qu'elles émettent du méthane ($50,20 \text{ mmol m}^{-2} \text{ j}^{-1}$). Les mares de fentes de coin de glace sont généralement des sources pour les deux gaz à effet de serre ($50,20 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ et $2,55 \text{ mmol CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$). Les lacs sont aussi des milieux émetteurs mais de beaucoup plus faible envergure (moyenne de $1,93 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ et $0,14 \text{ mmol CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$).

Tableau 4. Flux de gaz à effet de serre en mmol par mètre carré par jour mesurés entre 2007 et 2011 pour les mares de polygones à centre déprimé, les mares de fentes de coin de glace et les lacs

	Mares de polygones à centre déprimé ($\text{mmol m}^{-2} \text{ j}^{-1}$) n = 55	Mares de fentes de coin de glace ($\text{mmol m}^{-2} \text{ j}^{-1}$) n = 90	Lacs ($\text{mmol m}^{-2} \text{ j}^{-1}$) n = 19
Dioxyde de carbone (CO₂)			
Minimum	-32,86	-20,50	-9,70
Maximum	14,56	312,80	39,11
Moyenne	-8,53	50,20	1,93
Écart-type	8,47	73,40	10,90
Méthane (CH₄)			
Minimum	0,05	0,01	0,01
Maximum	5,57	25,63	0,59
Moyenne	0,88	2,55	0,14
Écart-type	1,07	3,53	0,17

Application des flux à l'échelle de la vallée

Les puits de CO₂ les plus grands sont les unités 1, 3 et 5 (Tableau 5). La plus grande source de CO₂ est l'unité dominée par les mares discontinues de fentes de coin de glace (unité 4, 36

567 mol CO₂ m⁻² j⁻¹). Les polygones de l'unité dominée par les mares de grands polygones (unité 2) sont un puits négligeable de CO₂ (-7 mol CO₂ m⁻² j⁻¹), alors que les mares fentes de coin de glace de cette unité en sont une source importante (8138 mol CO₂ m⁻² j⁻¹). En dépit du fait que les mares de polygones semblent être des puits de CO₂, l'émission par les mares de fentes de coin de glace est telle qu'en moyenne, la vallée est une source de CO₂ (52 308 mol CO₂ j⁻¹) (Tableau 6).

Les mares de polygones des unités dominées par les mares de grandes mares de polygones (unité 2) et par les mares discontinues de fentes (unité 4) sont des émetteurs négligeables de CH₄ (<1 mol CH₄ m⁻² j⁻¹), alors que celles des unités dominées par des mares de petits polygones, par un réseau de mares de fentes et les zones mixtes (unités 1, 3 et 5) sont des émetteurs modérés (entre 195 et 313 mol CH₄ m⁻² j⁻¹). Les mares de fentes de coin de glace de l'unité 4 sont des émetteurs importants de CH₄ (1855 mol CH₄ m⁻² j⁻¹) et celles des autres unités sont moindres (Tableau 5). En moyenne, les mares de fonte du pergélisol émettent 3618 mol CH₄ j⁻¹ à l'échelle de la vallée (Tableau 6).

Tableau 5. Émissions de CO₂ et de CH₄ à l'échelle de la vallée par l'application des flux (Tableau 4) aux aires des unités morphosédimentologiques (Tableau 3).

Unités	Émissions CO ₂ (mol j ⁻¹)						Émissions CH ₄ (mol j ⁻¹)					
	Mares de polygones à centre déprimé			Mares de fentes de coin de glace			Mares de polygones à centre déprimé			Mares de fentes de coin de glace		
	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy
1	-9561,4	4235,6	- 2481,4	-1566,2	23893,8	3834,3	15,6	1620,1	256,5	0,7	1957,7	194,5
2	-28,3	12,5	-7,3	-3324,3	50713,3	8138,1	0,0	4,8	0,8	1,5	4155,2	412,9
3	-7688,3	3405,8	- 1995,3	-1580,0	24103,9	3868,0	12,6	1302,7	206,3	0,7	1974,9	196,2
4	0,0	0,0	0,0	- 14936,8	227867,3	36566,5	0,0	0,0	0,0	6,7	18670,1	1855,1
5	-6843,3	3031,5	- 1776,0	-2516,9	38396,6	6161,6	11,2	1159,5	183,6	1,1	3146,0	312,6
Total	- 24121,3	10685,4	- 6260,0	- 23924,2	364974,9	58568,5	39,4	4087,0	647,2	10,7	29903,9	2971,3

Tableau 6. Total des émissions de dioxyde de carbone et de méthane à l'échelle de la vallée.

	Minimum (mol j ⁻¹)	Max (mol j ⁻¹)	Moyenne (mol j ⁻¹)	Moyenne (kg j ⁻¹)
Dioxyde de carbone	-48045	375660	52308	2302
Méthane	50	33991	3618	58

Discussion

L'utilisation de l'imagerie satellitaire était nécessaire pour plusieurs raisons. Le site de l'étude se trouvant en région éloignée, plusieurs secteurs de la vallée sont difficiles d'accès de par leur distance ou les obstacles à franchir. Ainsi, la rive nord de la rivière glaciaire n'a pu faire l'objet que d'un seul relevé de terrain. De façon plus générale, l'approche développée dans ce travail permettrait d'évaluer les émissions de GES pour des surfaces beaucoup plus grandes (à l'échelle d'un parc ou d'un territoire) et sans avoir à déboursier des budgets faramineux. La photointerprétation (planimétrie manuelle) a permis de distinguer les deux types principaux de mares et d'en évaluer les proportions respectives. Cette étape est d'un grand intérêt puisque l'analyse logicielle automatisée ne permet pas de faire cette distinction.

En effet, les mares de polygones à centre déprimé et les mares de fentes de coin de glace ont des propriétés limnologiques distinctes, incluant leurs émissions de GES (Laurion et al. 2010). Les mares de fentes de coin de glace sont des plans d'eau qui émettent d'avantage de dioxyde de carbone et de méthane que les mares de polygones à centre déprimé (Tableau 5). Par contre, il est impossible d'effectuer une planimétrie manuelle sur l'ensemble de la vallée vu la petite taille et le grand nombre de ces plans d'eau. C'est pourquoi l'analyse logicielle automatisée a été utilisée dans le cadre de cette étude. En appliquant les proportions de surface occupées par les deux types de mares obtenues par la planimétrie manuelle aux superficies totales d'eau calculées par l'analyse logicielle automatisée, une estimation des superficies totales de chaque type de mare peut être obtenue. Comme les mares de polygones et les mares de fentes de coin de glace ne se retrouvent pas de façon homogène dans la vallée, il est primordial de subdiviser la vallée en unités morphosédimentologiques, permettant de

regrouper les surfaces qui ont un patron similaire et permettant ainsi d'obtenir une estimation plus précise de leur contribution à la surface totale d'eau libre.

L'analyse logicielle permet d'obtenir une estimation de la surface occupée par l'eau libre dans la vallée comparable à celle obtenue par la planimétrie manuelle. Par contre, l'application des proportions des deux types de mares obtenues par planimétrie manuelle aux surfaces totales obtenues par l'analyse automatique implique une certaine extrapolation, limitée par le petit nombre d'échantillons (50 quadrats au total). Les écarts-types obtenus par l'analyse de ces quadrats suggèrent une grande variabilité intrazonale. De plus, les pixels représentent des surfaces de 50 centimètre de côté et la précision des appareils de positionnement géographiques (GPS) est limitée à quelques mètres. Ainsi, positionner l'endroit exact où a été prise la mesure de terrain par rapport aux bons pixels sur l'image satellitaire comporte une certaine marge d'erreur.

L'analyse logicielle automatisée peut aussi générer des erreurs d'interprétation. Les milieux humides de la vallée, qui sont notamment abondants dans l'unité morphosédimentologique dominée par des mares de grands polygones à centre déprimé (Unité 2), peuvent contenir suffisamment d'eau pour que la valeur des pixels qui les représente soit assez basse pour être considérée comme de l'eau libre par le logiciel. Par contre, ces milieux ne sont pas considérés dans les calculs présentés dans cette étude puisqu'il s'agit d'une classe à part (comme les tourbières), dont on ne connaît pas encore les propriétés physicochimiques (aucune mesure effectuée par l'équipe) et qui sont échantillonnés de manière différente. Il serait toutefois intéressant de les inclure puisqu'il y a fort à parier qu'ils soient des sources de CH₄ étant donné l'anoxie probable qu'ils représentent. À quelques endroits dans la vallée, notamment

où les mares de fentes de coin de glace dominant et que les polygones sont élevés, l'ombre générée par les polygones peut augmenter la surface apparente des fentes de coin de glace sur l'image satellitaire. Les reliefs sont généralement très peu prononcés sur le parterre de cette vallée, cette erreur est donc considérée comme étant minime.

Les propriétés physiques et biologiques des mares de fonte du pergélisol font que les émissions de gaz à effets de serre ne se fait pas nécessairement de façon homogène d'un plan d'eau à l'autre. Des variations d'émissions ont été observées pour un type de mare donné (variations spatiales) ainsi que pour une mare donnée (variations temporelles diurnes et saisonnières). D'une part, les caractéristiques limnologiques des mares varient d'un endroit à l'autre dans la vallée, ce qui influence les processus impliqués dans la production et la consommation des GES produits (température de l'eau, oxygène disponible, quantité et qualité de la matière organique disponible pour la dégradation microbienne, activités des archées méthanogènes et des bactéries méthanotrophes, activité photosynthétique, etc.). D'autre part, bien que peu accentués, les reliefs peuvent influencer la vitesse du vent au-dessus des mares et donc faire varier la vitesse à laquelle le CO₂ ou le CH₄ sont relâchés dans l'atmosphère (flux). En effet, de plus forts vents auront pour effet d'augmenter les émissions en renouvelant constamment l'air au-dessus des mares et en mélangeant l'eau des mares. La taille des mares étant variable selon leur disposition dans la vallée, celles qui ont une plus grande superficie, et donc une plus grande surface d'emprise du vent (*fetch*), libèrent davantage de carbone inorganique sous forme gazeuse, en autant que la production de gaz suffise à maintenir les flux. En fait, la quantité de GES émis dépendra de l'activité

microbienne, et la vitesse à laquelle ils seront émis dépendra de la structure physique des mares.

Il est à noter que la détermination des flux de CO₂ et de CH₄ se fait de façon indirecte et implique l'utilisation du modèle de Cole et Caraco se basant sur la vitesse du vent qui génère une turbulence à la surface du plan d'eau responsable des échanges gazeux. Or, ce modèle empirique a été développé sur des lacs de beaucoup plus grande taille. Il semble que la turbulence à la surface des petits plans d'eau soit davantage contrôlée par les échanges thermiques entre l'eau et l'atmosphère; la vitesse du vent devient ainsi un mauvais indicateur de la turbulence. Les mesures directes de flux obtenues à l'aide d'une chambre flottante (N=57 entre 2007 et 2010) indiquent que les valeurs étaient en moyenne 3,6 fois plus faibles (médiane) qu'indiqué par les estimations basées sur le modèle de Cole et Caraco, probablement dû à la plus grande stabilité de la colonne d'eau que la vitesse du vent (mesurée à 10 mètres au-dessus du sol) ne le laisse croire. En fait, la microtopographie du paysage et le très faible *fetch* des mares génèrent des profils thermiques très stratifiés; les échanges gazeux sont ainsi ralentis. De plus, une récente étude compare le modèle de Cole et Caraco avec un modèle plus récent, le modèle «small-eddy» de MacIntyre et al. (2010). Cette étude préliminaire conclut qu'il est difficile de déterminer lequel des deux modèles est le plus approprié pour estimer les flux pour le type de mares retrouvé à l'Île Bylot (Nahavandian, 2011). Il sera donc nécessaire d'appliquer un modèle plus représentatif des conditions

physiques qui régissent les échanges gazeux dans les mares de fonte, afin de mieux estimer leur importance comme source de GES.

Une stratification de courte durée a été observée dans certaines mares (Breton et al. 2009) isolant une partie de l'eau de l'atmosphère. La couche anoxique ainsi formée permet l'accumulation de CH₄ qui est libéré au brassage suivant. La profondeur des mares n'étant pas uniforme dans la vallée, ces patrons de stratification sont irréguliers et le brassage peut survenir plus ou moins souvent d'une mare à l'autre dépendant de la stabilité de la colonne d'eau. La formation d'un biofilm à la surface de certaines mares pourrait aussi diminuer les échanges entre la surface d'eau et l'atmosphère, limitant ainsi les émissions de CO₂ et de CH₄ (Laurion et al. 2010). La quantité de matière organique dissoute ou particulaire peut aussi avoir un impact sur les émissions des mares car elle est accessible pour la dégradation par les microorganismes (Breton et al. 2009).

Les flux de GES les plus élevés ont été observés dans les mares de fentes de coin de glace apparemment formées récemment, qui en sont au début des processus d'érosion où une grande quantité de matière organique y est déversée. Les émissions pourraient diminuer lorsque ces mares atteignent un certain âge alors qu'une moins grande quantité de carbone organique y serait acheminée, ou que le carbone organique y restant serait moins labile.

L'émission de CO₂ et de CH₄ par les écosystèmes aquatiques est un phénomène qui varie dans le temps. En effet, les mares sont complètement gelées une bonne partie de l'année, ce qui limite l'activité métabolique microbienne à la saison estivale (l'eau est sous forme liquide dans les mares de juin à la mi-septembre). De plus, des cycles diurnes sont observés dans les émissions de CO₂ et de CH₄ (Laurion et al. 2010). Comme les mesures de flux n'ont pas toutes

été prises au même moment dans la journée, elles ne correspondent pas nécessairement au même stade dans le cycle diurne.

Une accumulation de méthane peut aussi se produire sous la glace lors de la reprise des activités métaboliques microbiennes au printemps. Il a été observé que lorsque la surface de certaines mares est libérée de la glace, l'eau supersaturée en CH₄ en libère de grandes quantités sous formes de bulles. Bien que ce phénomène n'ait pas encore été quantifié dans cette vallée, il constituerait une source d'émission considérable qui n'est pas prise en compte dans le cadre de cette étude (Walter et al. 2006).

De plus, l'image satellitaire a été captée à la saison estivale 2010, alors que les mesures de terrain ont été prises en 2011. Comme les mares de polygones à centre déprimé sont généralement peu profondes, elles peuvent s'assécher d'une année à l'autre selon les conditions climatiques. De nouvelles mares peuvent aussi apparaître. Ainsi, la surface occupée par l'eau libre peut varier légèrement d'une année à l'autre. Les mares assez profondes ou les mares de fentes de coin de glace risquent moins de voir leur surface varier d'une année à l'autre à moins qu'elles soient drainées. Les bordures des mares de fentes de coin de glace sont généralement abruptes, ce qui implique une moins grande variation de surface si le niveau d'eau varie.

Ainsi, plusieurs facteurs affectant les propriétés physiques et biologiques des mares peuvent interférer avec l'estimation des émissions totales de GES générées par les mares de fontes du pergélisol dans la vallée à l'étude. Par contre, les résultats montrent clairement que les mares

de fentes de coin de glace occupent un rôle clé dans les émissions globales de GES par la vallée.

Conclusion

Les mares de fentes de coin de glace occupent une plus grande superficie de la vallée (1 166 786 m²) que les mares à centre déprimé (734 093 m²), et ce sont elles qui contribuent le plus aux émissions de dioxyde de carbone et de méthane. À l'échelle de la vallée (et en utilisant les valeurs moyennes d'émissions pour chaque type de mare), les mares de fentes de coin de glace émettent en moyenne 58 569 mol j⁻¹ de CO₂ et 2971 mol j⁻¹ de CH₄ alors que les mares de polygones captent 6260 mol j⁻¹ de CO₂ et émettent 647 mol j⁻¹ de CH₄. Ainsi, de façon globale, les mares de fonte du pergélisol émettent 52 308 mol j⁻¹ de CO₂ et 3618 mol j⁻¹ de CH₄, correspondant à 628 kg de carbone par jour sous forme de CO₂ et 44 kg de carbone par jour sous forme de CH₄. Puisque le CH₄ est un GES 25 fois plus puissant que le CO₂, on peut estimer que la vallée émet 1716 kg de carbone par jour en équivalent CO₂. Il est possible qu'une partie du carbone émis par les mares de fentes de coin de glace provienne du vieux carbone stocké dans le pergélisol au cours de l'Holocène, puisque l'érosion de la tourbe est omniprésente dans ces mares. Il reste à déterminer si le carbone organique érodé alimente les microorganismes responsables de la production de GES.

La dégradation accélérée du pergélisol par le réchauffement climatique appelle de nouvelles mares de fontes à se former. Ainsi, il est d'un grand intérêt d'étudier davantage ces écosystèmes qui ont le potentiel de contribuer considérablement aux émissions globales de

GES. L'utilisation d'images satellitaire est un moyen utile de déterminer la surface couverte par ces plans d'eau. Toutefois, cet outil implique une certaine marge d'erreur en plus de celle reliée à la précision même de l'image (50 cm par côté). En effet, les émissions de GES des écosystèmes aquatiques observés dans cette vallée varient spatialement et temporellement. Le nombre élevé de mesures cumulées jusqu'à présent pour ce site permet de tenir compte en quelque sorte d'une partie de la variabilité, mais la majorité de ces mesures ont été effectuées l'été. Il est possible que les flux de GES soient beaucoup plus élevés au printemps lors de la fonte des glaces, et passablement plus faibles lorsque la température s'abaisse à l'automne. Il importe de considérer cette variabilité lors de l'analyse des émissions à grande échelle. Ainsi, les flux de GES obtenus dans la présente étude ne sont valides que pour la période estivale. Par ailleurs, ils peuvent être surestimés dû à l'utilisation d'un modèle d'échange gazeux inapproprié pour les petits milieux aquatiques. Par contre, des études montrent que les émissions de CH₄ par ébullition pourraient être beaucoup plus importantes que par simple diffusion, nos mesures étant ainsi sous-estimées. Une poursuite de la collecte des données de flux des mares de fonte du pergélisol dans cette région ainsi qu'une analyse d'autres images produites avant ou après 2010 pourraient permettre d'évaluer de façon plus précise les émissions totales de GES et l'évolution de la dégradation du pergélisol dans ce secteur. La présente étude s'est consacrée aux écosystèmes aquatiques de la vallée. Une

estimation du rôle de la végétation terrestre de ce milieu dans le cycle du carbone pourrait apporter plus de précision sur la contribution globale de la vallée aux émissions de GES.

Remerciements

Je tiens à remercier la directrice de ce projet, Madame Isabelle Laurion, pour son soutien et ses conseils. Je tiens également à remercier Monsieur Warwick F. Vincent d'avoir accepté d'agir à titre d'observateur. Merci aux membres du Géocryolab de l'Université de Montréal pour leurs conseils concernant l'image satellite et la prise de données sur le terrain, tout spécialement à Stéphanie Coulombe qui a été d'une aide extraordinaire sur le terrain. Merci également à Karita Negandhi, Gabrièle Deslongchamps ainsi que Catherine Girard pour leurs conseils et leur soutien. Nous souhaitons également remercier le Programme de Formation Scientifique dans le Nord du Ministère des Affaires Indiennes et du Nord Canadien, le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada, l'Étude du Plateau Continental Polaire du Ministère des Ressources Naturelles du Canada, le réseau ArcticNet, Parcs Canada ainsi que le Centre d'Études Nordiques pour leur appui et l'accès au site d'étude.

Références

- Allard, M. 1996. Geomorphological changes and permafrost dynamics: key factors in changing Arctic ecosystems. An example from Bylot Island, Nunavut, Canada. *Geoscience Canada*, 23(4): 205-212.
- Blodau, C., R. Rees, H. Flessa, A. Rodionov, G. Guggenberger, K.-H. Knorr, O. Shibistova, G. Zrazhevskaya, N. Mikheeva & O. A. Kasansky. 2008. A snapshot of CO₂ and CH₄ evolution in a thermokarst pond near Igarka, northern Siberia. *Journal of Geophysical Research*, 113: G03023, doi:10.1029/2007/JG000652.
- Bouchard, F., P. Francus, R. Pienitz & I. Laurion. 2011. Sedimentology and geochemistry of thermokarst ponds in discontinuous permafrost, subarctic Quebec, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 116:G00M04, doi:10.1029/2011JG001675.
- Breton, J., C. Vallières & I. Laurion. 2009. Limnological properties of permafrost thaw ponds in northeastern Canada. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 66(10): 1635-1648.
- Cole, J. J. & N. F. Caraco. 1998. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆. *Limnology and Oceanography*, 43(4): 647-656.
- Cole, J. J., Y. T. Prairie, N. F. Caraco, W. H. McDowell, L. J. Tranvik, R. G. Striegl, C. M. Duarte, P. Kortelainen, J. A. Downing, J. J. Middelburg & J. Melack. 2007. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 10(1): 171-184.
- Downing, J. A., Y. T. Prairie, J. J. Cole, C. M. Duarte, L. J. Tranvik, R. G. Striegl, W. H. McDowell, P. Kortelainen, N. F. Caraco, J. M. Melack & J. J. Middelburg. 2006. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography*, 51(5): 2388-2397
- Environnement Canada. 2011. Normales climatiques au Canada 1971-2000. Températures et précipitations, Nunavut, Pond Inlet. Archives nationales d'information et de données climatologiques, Environnement Canada. Disponible à : http://climate.weatheroffice.gc.ca/climate_normals/ [Consulté le 5 août 2011].
- Fortier, D. & M. Allard. 2004. Late Holocene syngenetic ice-wedge polygons development, Bylot Island, Canadian Arctic archipelago. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 41(8): 997-1012.
- Hamilton, J. D., C. A. Kelly, J. W. M. Rudd, R. H. Hesslein & N. T. Roulet. 1994. Flux to the atmosphere of CH₄ and CO₂ from wetland ponds on the Hudson Bay Lowlands (HBLs). *Journal of Geophysical Research*, 99(D1): 1495-1510.
- International Panel on Climate Change (IPCC). 2007. The physical science basis: summary for policymakers. Fourth Assessment Report, Cambridge University Press, New York.
- Kalff, J. (ed.). 2002. *Limnology: Inland water ecosystems*, Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
- Kortelainen, P., M. Rantakari, J. T. Huttunen, T. Mattsson, J. Alm, S. Juutinen, T. Larmola, J. Silvola & P. J. Martikainen. 2006. Sediment respiration and lake trophic state are

- important predictors of large CO₂ evasion from small boreal lakes. *Global Change Biology*, 12(8): 1554-1567.
- Laurion, I., W. F. Vincent, S. MacIntyre, L. Retamal, C. Dupont, P. Francus & R. Pienitz. 2010. Variability in greenhouse gas emissions from permafrost thaw ponds. *Limnology and Oceanography*, 55(1): 115–133.
- MacIntyre, S., Jonsson, A., Jansson, M., Aberg, J., Turney, D. E. & S. D. Miller. 2010. Buoyancy flux, turbulence, and the gas transfer coefficient in a stratified lake. *Geophysical Research Letters*, 37(4): L24604.
- Maxwell, J. B. (ed). 1980. The climate of the Canadian Arctic Islands and adjacent waters. Atmospheric Environment Service, Environment Canada, Ottawa, Ont.
- Nahavandian, S. 2011. Effects of meteorological parameters and turbulence on gas flux estimations from thaw ponds on Bylot Island, Nunavut. *Travail dirigé, INRS-ETE*.
- Payette, S, A. Delwaide, M. Caccianiga & M. Beauchemin. 2004. Accelerated thawing of subarctic peatland permafrost over the last 50 years. *Geophysical Research Letters*, 31(18): L8208, doi:10.1029/2004GL020358.
- Roehm, C., 2005. Respiration in wetland ecosystems. Pages 83-102 *in* del Giorgio, P. A. & P. J. le B. Williams (eds.). *Respiration in Aquatic Ecosystems*. Oxford University Press, Oxford.
- Schuur, E. A. G., J. Bockheim, J. G. Canadell, E. Euskirchen, C. B. Field, S. V. Goryachkin, S. Hagemann, P. Kuhry, P. M. Lafleur, H. Lee, G. Mazhitova, F. E. Nelson, A. Rinke, V. E. Romanovsky, N. Shiklomanov, C. Tarnocai, S. Venevsky, J. G. Vogel & S. A. Zimov. 2008. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle. *BioScience*, 58(8): 701-714.
- Ström, L. & T. R. Christensen. 2007. Below ground carbon turnover and greenhouse gas exchanges in a sub-arctic wetland. *Soil Biology and Biochemistry*, 39: 1689-1698.
- van Huissteden, J., C. Berrittella, F. J. W. Parmentier, Y. Mi, T. C. Maximov & A. J. Dolman. 2011. Methane emissions from permafrost thaw lakes limited by lake drainage. *Nature Climate Change*, 1: 119-123.
- Walter, K. M., S. A. Zimov, J. P. Chanton, D. Verbyla & F. S. Chapin III. 2006. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming. *Nature*, 443(7107): 71-75.
- Walter, K. M., M. E. Edwards, G. Grosse, S. A. Zimov & F. S. Chapin III. 2007. Thermokarst lakes as a source of atmospheric CH₄ during the last deglaciation. *Science*, 318(5850): 633-636.
- Yu, B.Z., D. W. Beilman, S. Frohking, G. M. MacDonald, N. T. Roulet, P. Camill & D. J. Charman. 2011. Peatlands and their role in the global carbon cycle. *EOS*, 92(12): 97-108.