

ÉCHANGE NET D'ÉCOSYSTÈME DANS LE PERGÉLISOL DE CAMBRIDGE BAY, AU NUNAVUT, CANADA

J. Yun^{1,2*}, M.J. Kwon¹, J.Y. Jung¹, N. Chae³, B.Y. Lee¹, J. Yoo¹, J. Wanger⁴, et T. Choi^{1*}

¹ Institut de recherche polaire de la Corée, Incheon, Corée du Sud

² Programme interdisciplinaire en météorologie agricole et forestière, Université nationale de Séoul, Séoul, Corée du Sud

³ Institut des sciences de la vie et des ressources naturelles, Université de Corée, Séoul, Corée du Sud

⁴ Savoir polaire Canada, Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique, Cambridge Bay, Nunavut, Canada

* juyeol@kopri.re.kr

Résumé

Il existe de grandes incertitudes quant à la compréhension du moment et de la magnitude de la rétroaction entre le carbone et le climat sur le pergélisol, notamment en raison du manque de mesures sur le terrain. Afin de mieux comprendre les mécanismes des processus d'échange et améliorer les modèles climatiques, il est important de surveiller en permanence les échanges de carbone à différents endroits du pergélisol dans l'Arctique. En 2012, un site d'étude a été créé à Cambridge Bay, au Nunavut (Canada), dans le cadre d'un projet de l'Institut coréen de recherche polaire (KOPRI) intitulé [Traduction] « Surveillance des changements environnementaux du pergélisol circum-Arctique, prévisions et futurs développements et techniques relatives aux biomatériaux utiles » (Circum-Arctic Permafrost Environment Change Monitoring, Future Prediction and development Techniques of useful biomaterials ou CAPEC). Le site d'étude est un emplacement de toundra sèche situé au-dessus du pergélisol. En 2012, un système de covariance de vents tourbillonnants a été mis en place sur ce site pour surveiller les échanges de carbone et d'énergie entre l'atmosphère et l'écosystème de la toundra.

Cet article présente les résultats préliminaires obtenus sur le site de l'étude en 2017. Le taux d'acquisition des données sur le flux de dioxyde de carbone (CO₂) était de 44 % et celui des données météorologiques complémentaires (telles que le rayonnement, la température de l'air, etc.) était de 89 %. La plupart des données manquantes (ou de mauvaise qualité) ont été recueillies pendant l'hiver. Une méthode d'échantillonnage à distribution marginale a été utilisée pour combler les lacunes des données manquantes sur les flux de O₂. À la mi-juin, le site a été totalement exposé à l'atmosphère et l'échange net des écosystèmes (ENE) est devenu négatif (c'est-à-dire qu'il s'agissait d'un piège à CO₂ atmosphérique). En juillet, l'ENE a augmenté jusqu'à un maximum de -2,8 grammes de carbone par mètre carré par jour (-2,8 gC/m²/jour). À la fin du mois de septembre, le site était partiellement recouvert de neige et l'ENE a diminué et fluctué autour de zéro. Les résultats préliminaires couvrent une période de cinq mois, de mai à septembre 2017. Au cours de cette période, l'ENE était de -100,2 gC/m², la productivité primaire brute (la quantité de CO₂ absorbée par la végétation) était de 235,4 gC/m², et la respiration de l'écosystème (la quantité de CO₂ respirée

Référence suggérée :

Yun, J., Kwon, M.J., Jung, J.Y., Chae, N., Lee, B.Y., Yoo, J., et Choi, T. 2019 : Échange net d'écosystème dans le pergélisol de Cambridge Bay, au Nunavut, Canada. *Aqhaliat* 2019, *Savoir polaire Canada*, p. 22-30. DOI: 10.35298/psc.2019.03

par la végétation et les micro-organismes dans les sols) était de 135,2 gC/m². La respiration de l'écosystème, estimée en fonction des mesures recueillies en chambre en dehors de la saison de culture, était de 9,1 gC/m² et l'accumulation annuelle d'ENE était de -91,1 gC/m². Ces résultats préliminaires indiquent qu'en 2017, le site de la toundra sèche a agi comme un piège à CO₂ atmosphérique. Toutefois, en raison de l'incertitude causée par le manque de données comblé sur l'ENE, en particulier pour les données de la saison hivernale 2017, il est prématuré de tirer une telle conclusion pour le moment.

Introduction

La toundra arctique a accumulé une grande quantité de carbone (C) en raison des basses températures et de la disponibilité de l'eau (Schuur et al., 2015). En raison du réchauffement climatique et de sa rétroaction potentielle sur le climat, il y a un intérêt de plus en plus grand pour les variations des taux d'échange de carbone entre le pergélisol et l'atmosphère (McGuire et al., 2012). Il existe toutefois de grandes incertitudes quant à la compréhension du moment et de la magnitude de la rétroaction entre le carbone et le climat sur le pergélisol, en partie en raison d'un manque de mesures sur le terrain. Il est donc à la fois nécessaire et important de surveiller en permanence les échanges de carbone. La dynamique du carbone dans l'Arctique ne peut être comprise qu'en effectuant une surveillance à long terme et à différents endroits sur le pergélisol. Toutefois, les conditions environnementales difficiles comme les températures extrêmement basses ainsi que l'accessibilité et la disponibilité limitées de l'énergie rendent les observations continues difficiles dans les régions pergélisolées éloignées de l'Arctique (Goodrich et al., 2016). L'Institut coréen de recherche polaire (KOPRI) a établi des sites d'observation à long terme dans les régions circum-Arctiques afin de surveiller en permanence les changements environnementaux de l'Arctique et leurs répercussions sur le changement climatique. Ces sites comprennent divers types de toundra à travers l'Arctique, tels que la toundra humide et la toundra sèche ainsi que le désert polaire. Le projet de recherche KOPRI [Traduction] « Surveillance des changements environnementaux du pergélisol circum-Arctique, prévisions et futurs développements et techniques relatives aux biomatériaux utiles » (CAPEC) utilise un système de flux à covariance de vents tourbillonnants pour mesurer les flux turbulents de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone (CO₂) entre

ces sites d'étude et l'atmosphère. Un site d'étude a été établi sur la toundra sèche de Cambridge Bay, au Nunavut, Canada en 2012. La toundra sèche est particulièrement fréquente dans l'Extrême-Arctique, y compris dans de vastes zones de l'Arctique canadien (CAVM Team, 2003). Le présent article présente les résultats préliminaires de la variation et de la magnitude des composantes du budget de CO₂ de 2017 du site d'étude de la toundra sèche à Cambridge Bay.

Matériels et méthodes

Description du site et mesures

Le site d'étude est situé dans la toundra sèche avec pergélisol près de Cambridge Bay, Nunavut, Canada (69°7'47,7"N, 105°3'35,3"O). Les espèces végétales dominantes sur le site sont les espèces de *laïche* (*Carex* *faux-scirpe*, *Carex* *rupestris*, *Carex* *fuliginosa*, etc.) et *dedryade à feuilles entières*. Le sol du site est de type crysol turbique eutrique orthique (Groupe de travail sur la classification des sols, 1998). L'horizon organique du sol est de 0,05 à 0,2 mètre (m) de profondeur et l'horizon minéral est constitué d'un sous-sol. La couche active (c'est-à-dire la couche supérieure de sol dégelée sur le site) atteignait jusqu'à 1,4 m à la mi-août 2017. Pour la surveillance à long terme du CO₂ et de l'échange énergétique entre l'atmosphère et l'écosystème, un système de flux de covariance des vents tourbillonnants et un radiomètre net ont été mis en place en 2012. Ces dispositifs de surveillance ont été installés sur une tour météorologique appartenant à Environnement et Changement climatique Canada, située à environ 1 kilomètre (km) du centre de Cambridge Bay (Figure 1).

Un analyseur à infrarouge (EC150, Campbell Scientific, É.-U.) à réponse rapide à circuit ouvert de CO₂/eau (H₂O) et un anémomètre sonique (CSAT3, Campbell Scientific, É.-U.) ont été installés sur la tour à une hauteur de 5 m, à une distance de 0,5 m l'un de l'autre. Pour mesurer les composantes du bilan énergétique de surface, un radiomètre différentiel (CNR4, Kipp & Zonen, Pays-Bas) a été installé à une hauteur de 4 m sur la même tour et deux capteurs de flux de sol (HFP01, Campbell Scientific, É.-U.) ont été installés à une profondeur de 0,1 m près de la tour. En outre, trois sondes de température du sol (TCAV-L, Campbell Scientific, É.-U.) ont été installées à une profondeur de 0,1 m et deux capteurs d'humidité du sol (CS650, Campbell Scientific, É.-U.) ont été placés à 0,1 m de profondeur. Les vecteurs-vent tridimensionnels, les températures et les densités



Figure 1 : Le site d'étude se trouve à Cambridge Bay, au Nunavut, Canada.

de $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$) ont été échantillonnés à un taux de 10 hertz (Hz). Trois composantes de la vélocité du vent, de la température et des concentrations de CO_2 et H_2O ont été mesurées et stockées sur une carte Compact Flash (CF) dans l'enregistreur de données (CR3000, Campbell Sci., É-U.) pour le post-traitement. Une moyenne sur une demie-heure des statistiques sur les turbulences moyennes et des données météorologiques ont également été calculées en temps réel et stockées sur une carte CF dans le même enregistreur de données. Le personnel local récupérait ces données tous les deux mois. En outre, en juin et septembre 2017, l'analyseur à infrarouge a été étalonné sur le site d'étude en utilisant du gaz étalon CO_2 et un générateur de point de rosée (LI610, LI-COR Biosciences, É-U.). Des chambres à diffusion forcée (chambre DF EOSENSE) ont également été installées sur le site d'étude et les données d'émission de CO_2 du sol de l'une des chambres ont été utilisées pour quantifier l'ENE de l'hiver 2017.

Traitement des données et correction des lacunes

Le flux de données acquis par la méthode de covariance des vents tourbillonnants peut s'écarter de ceux mesurés dans des conditions idéales en fonction de la topographie du site d'observation, des conditions météorologiques et de la configuration de l'instrument, notamment la hauteur d'installation, la distance de

séparation entre les deux instruments à réponse rapide et le positionnement de l'instrument (Baldocchi et al., 2001). Dans le cadre de cette étude, les données de covariance ont été traitées par le logiciel EddyPro version 6.0 (LI-COR Biogeosciences, É-U.). Plusieurs mesures correctives ont été appliquées pour obtenir un flux précis. Tout d'abord, la rotation des coordonnées a été effectuée à l'aide d'une méthode de double rotation pour s'assurer que la moyenne aux demies-heure des vents verticaux et latéraux était nulle (Kaimal and Finnigan, 1994). Après avoir appliqué ces corrections aux données de vent, nous avons calculé la moyenne des données de covariance sur une demi-heure en utilisant les données de vent à 10 Hz avec rotation des coordonnées et les concentrations de CO_2 et H_2O . La « correction de la réponse en fréquence » (Moore, 1986) et la « correction de la densité de l'air » ont été appliquées aux données de covariance moyennes sur une demi-heure calculées pour le CO_2 et la vapeur d'eau (Webb et al., 1980).

Pour assurer la qualité des données post-traitées, un processus de contrôle de la qualité (CQ) et d'assurance de la qualité (AQ) a été effectué conformément aux règles de qualité des données météorologiques établies par l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Une variable mesurée est retirée si :

1. elle ne s'inscrit pas dans la limite de valeur minimale et maximale de la valeur mesurée indiquée dans le tableau 1 ; et
2. l'écart par rapport à la moyenne est supérieur à trois fois l'écart-type mobile pour la période d'une semaine.

Pour les données relatives au flux, les valeurs anormales sont éliminées en utilisant l'écart absolu médian sur une base mensuelle. En ce qui a trait aux données de flux de turbulence de CO₂ de nuit, le développement de la turbulence a été pris en compte pour le contrôle de la qualité (Papale et al., 2006). La méthode bootstrap, basée sur la relation entre la vitesse de friction et les données de flux de CO₂ de nuit avec une valeur seuil (c'est-à-dire 0,16 mètre par seconde (m/s)), a été utilisée pour réduire l'incertitude des données de CO₂ résultant d'un faible transport par turbulence. Pendant la période de mesure, le rendement des données de flux et des données météorologiques complémentaires a été en moyenne de 44 % et 89 %, respectivement. Le tableau 2 résume le taux de rendement de chaque variable. Pendant la période hivernale (de novembre à avril 2017), il n'y a pas eu de données de covariance de vents tourbillonnants pendant une période considérable en raison de problèmes techniques (par exemple,

Tableau 1 : Seuil des variables pour le contrôle de la qualité (CQ) et l'assurance de la qualité (AQ).

Variables	Unités	minimum	maximum
Température de l'air	°C	-80	60
Humidité relative	%	0	100
La pression de la vapeur	Pa	0	100
Vitesse de frottement	m s ⁻¹	0	2
Pression de l'air	hPa	600	1100
Vitesse du vent	m s ⁻¹	0	25
Concentration en CO ₂	ppm	300	500
Concentration en H ₂ O	mmol mol ⁻¹	0	20
Flux de CO ₂	μmol m ⁻² s ⁻¹	-50	50

Tableau 2 : Taux d'acquisition des variables de mesure en 2017 à Cambridge Bay, Nunavut, Canada.

Variables	Rendement avant CQ/AQ	Rendement après CQ/AQ
Vitesse du vent	89	89
Température de l'air	89	89
Température du sol	78	78
Eau du sol Contenu	78	78
Rayonnement solaire	78	78
Chaleur sensible Flux	89	62
Flux de chaleur latente Concentration en CO	45	32
Flux de CO ₂	70	38
		* Unités(%)

une panne d'équipement) ou environnementaux (par exemple, les précipitations, la neige, la glace, etc.). Pour remédier aux données manquantes, une méthode normalisée de correction des lacunes proposée par Reichstein et al., (2005) a été utilisée. La valeur de flux manquante a été comblée par la valeur moyenne, dans des conditions météorologiques similaires consistant en un rayonnement d'ondes courtes descendant, une température de l'air et un déficit de pression de vapeur dans une fenêtre temporelle. Si aucune condition météorologique semblable n'est retrouvée dans une fenêtre de sept jours, la fenêtre de calcul de la moyenne est prolongée de 14 jours. La méthode de correction des lacunes a uniquement été appliquée pendant la période de croissance, de mars à septembre.

Pour répartir l'ENE entre la production primaire brute (PPB) et la respiration de l'écosystème (R_{eco}), la R_{eco} a été calculée à l'aide de l'équation de Lloyd et Taylor (1994),

$$R_{eco}(T) = R_{ref} e^{E_0 \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T - T_0} \right)}$$

où R_{ref} représente la respiration de référence spécifique au site. E_0 représente une thermosensibilité qui n'a plus l'importance théorique d'une énergie d'activation. T_{ref} représente la température de référence. E_0 a été établie à 308,56 kelvin (K), T_{ref} à 283,15 K et T_0 à 227,13 K, selon l'équation de Lloyd et Taylor (1994). L'évolution saisonnière de la température de référence (R_{ref}) tout au long de l'année est estimée à partir de l'ENE nocturne avec une fenêtre glissante de sept jours par bond de quatre jours. Si aucune R_{ref} n'est trouvée, les valeurs sont interpolées de façon linéaire.

Résultats

Conditions météorologiques

La rose des vents est utilisée pour montrer comment la vitesse et la direction du vent sont généralement réparties à un endroit particulier (Figure 2). Pendant la période d'observation, le vent dominant était d'ouest. Toutefois, de juin à août, le vent soufflait du nord-est. La vitesse moyenne annuelle du vent était de 4,9 m/s et une vitesse maximale instantanée de 17,8 m/s a été observée en mars (Figure 2). La température moyenne annuelle était de -10,7 °C. La température la plus élevée a été de 22,1 °C en août et la plus basse de -37,6 °C en février (Figure 2). La température moyenne annuelle du sol était de -4,8 °C, la plus élevée étant de 13,7 °C

en juillet et la plus basse de -22,3 °C en mars (Figure 2). Alors que la température de l'air et la température du sol présentaient des variations semblables, l'ampleur des variations de la température du sol était plus faible que celle de la température de l'air, en particulier en hiver. Cette situation est attribuable à l'effet isolant de la couverture neigeuse en hiver.

L'empreinte du flux décrit un secteur vent « observé » par le système de covariance de vents tourbillonnants mesurant les flux turbulents (par exemple, flux de CO_2) sur le site (Figure 2). L'empreinte du flux pour l'ensemble de la période de mesure est calculée à l'aide du traitement en ligne des données sur l'empreinte du flux (Kljun et al., 2015). En fonction de l'empreinte, l'étude a démontré que le secteur est (0 à 180 °) contribuait de manière significative aux flux mesurés. Comme on retrouve une route à l'est de la tour de flux où des véhicules passent parfois, un secteur de 90 à 135 ° a été écarté de l'analyse des données.

La figure 4 montre les variations de quatre composantes radiatives de surface avec l'albédo. Le rayonnement descendant d'ondes courtes a augmenté jusqu'à environ 650 watts par mètre carré (W/m^2) en juin (Figure 4). L'albédo était d'environ 0,8 juste avant la fonte des neiges début mai, et d'environ 0,2 jusqu'à

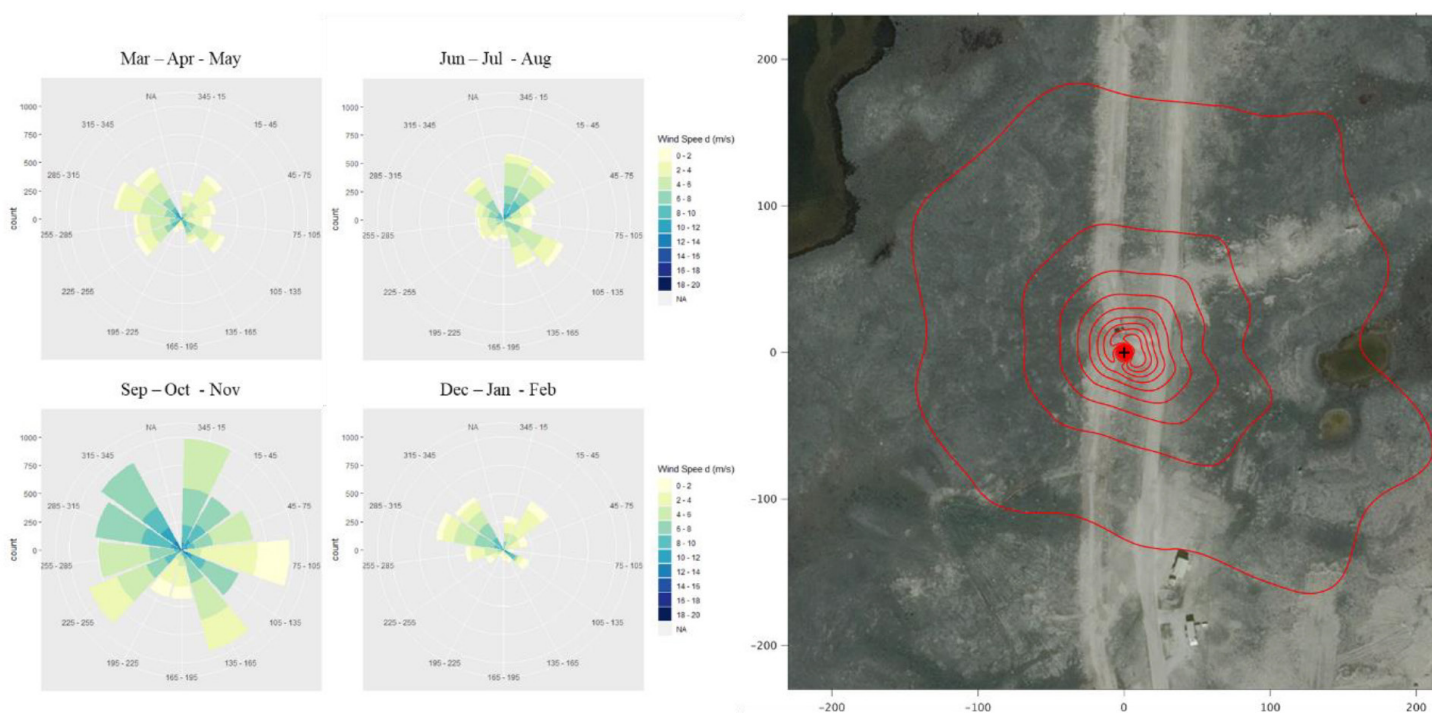


Figure 2 : Rose des vents et empreinte du flux de la direction et de la vitesse du vent, cumulés annuellement à Cambridge Bay, Nunavut, Canada, en 2017.

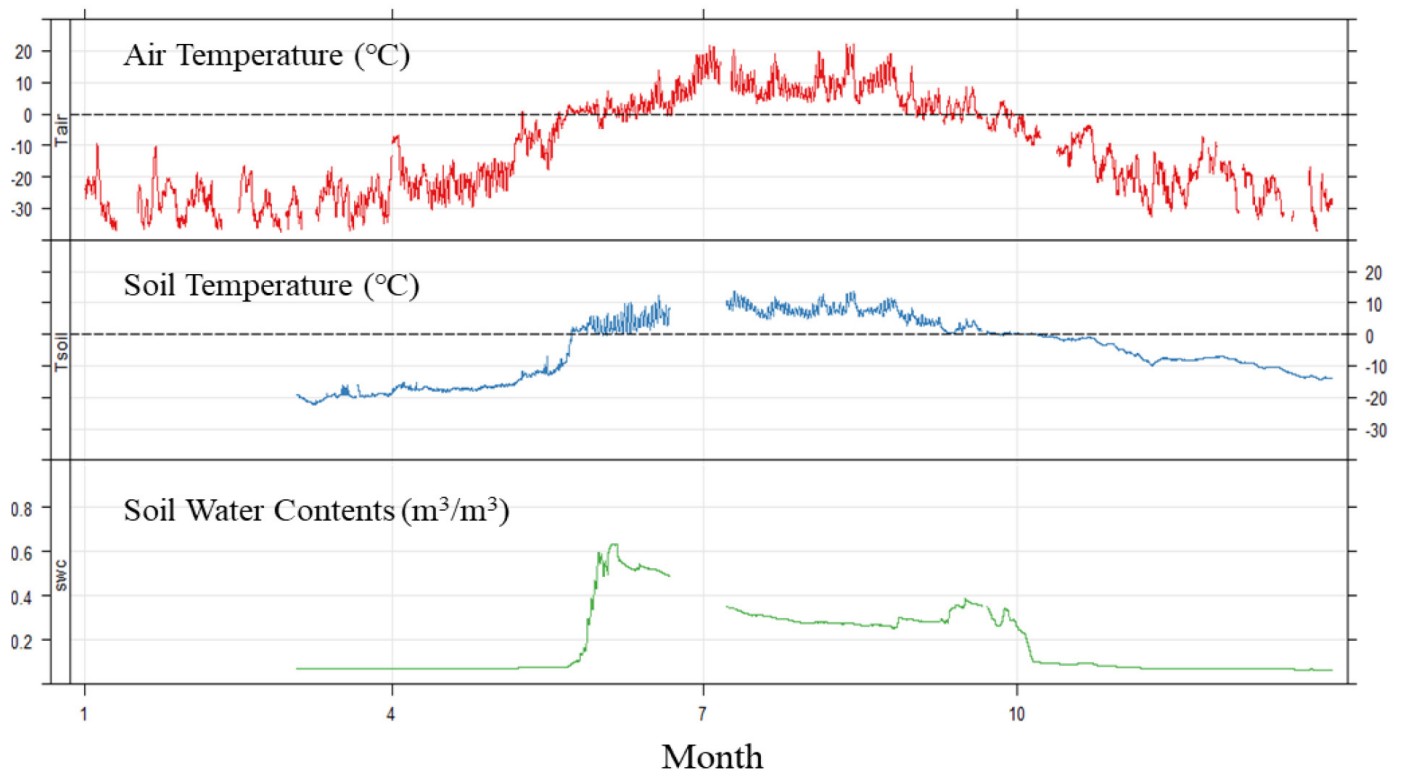


Figure 3 : Série chronologique de la température de l'air, de la température du sol et de la teneur en eau du sol à Cambridge Bay, Nunavut, Canada, en 2017.

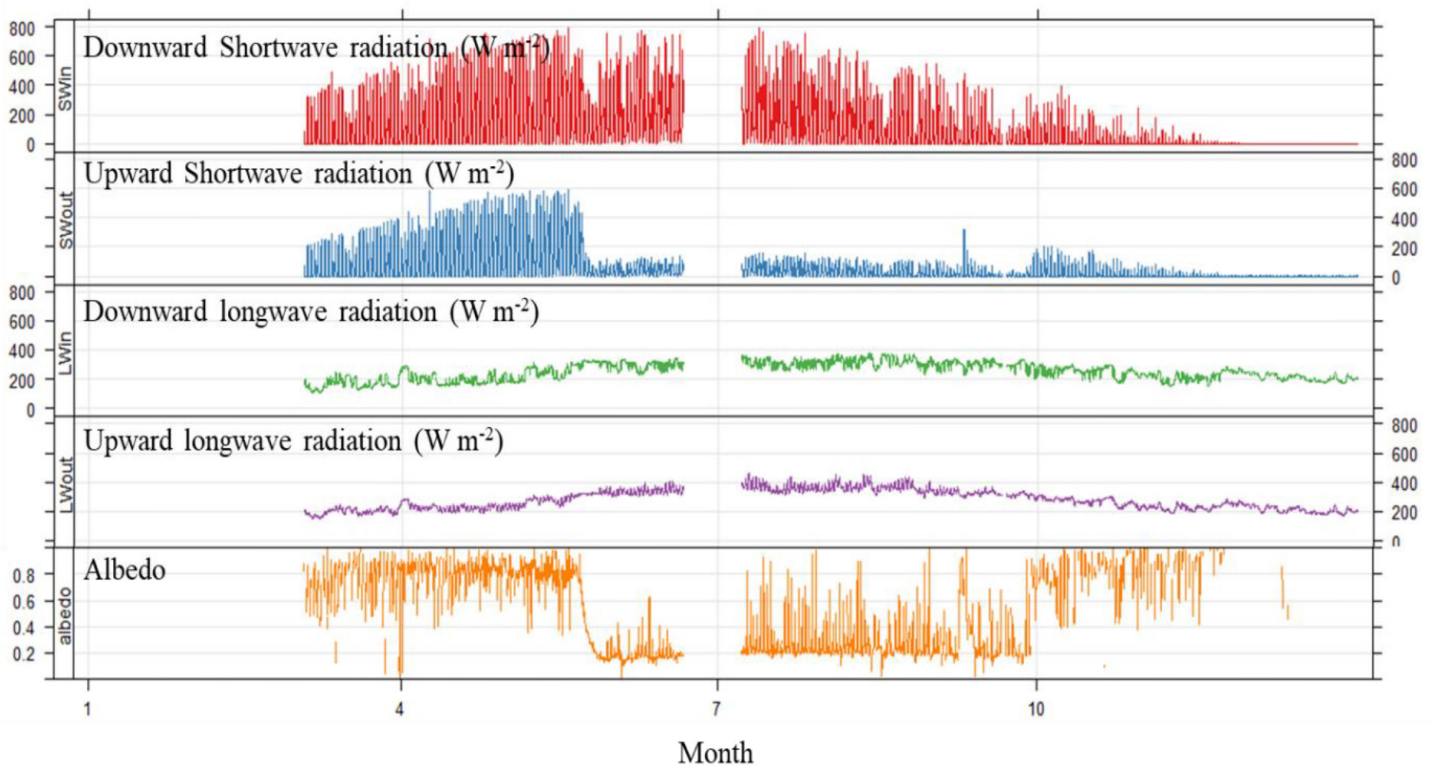


Figure 4 : Série chronologique des composantes radiatives de surface à Cambridge Bay, Nunavut, Canada, en 2017.

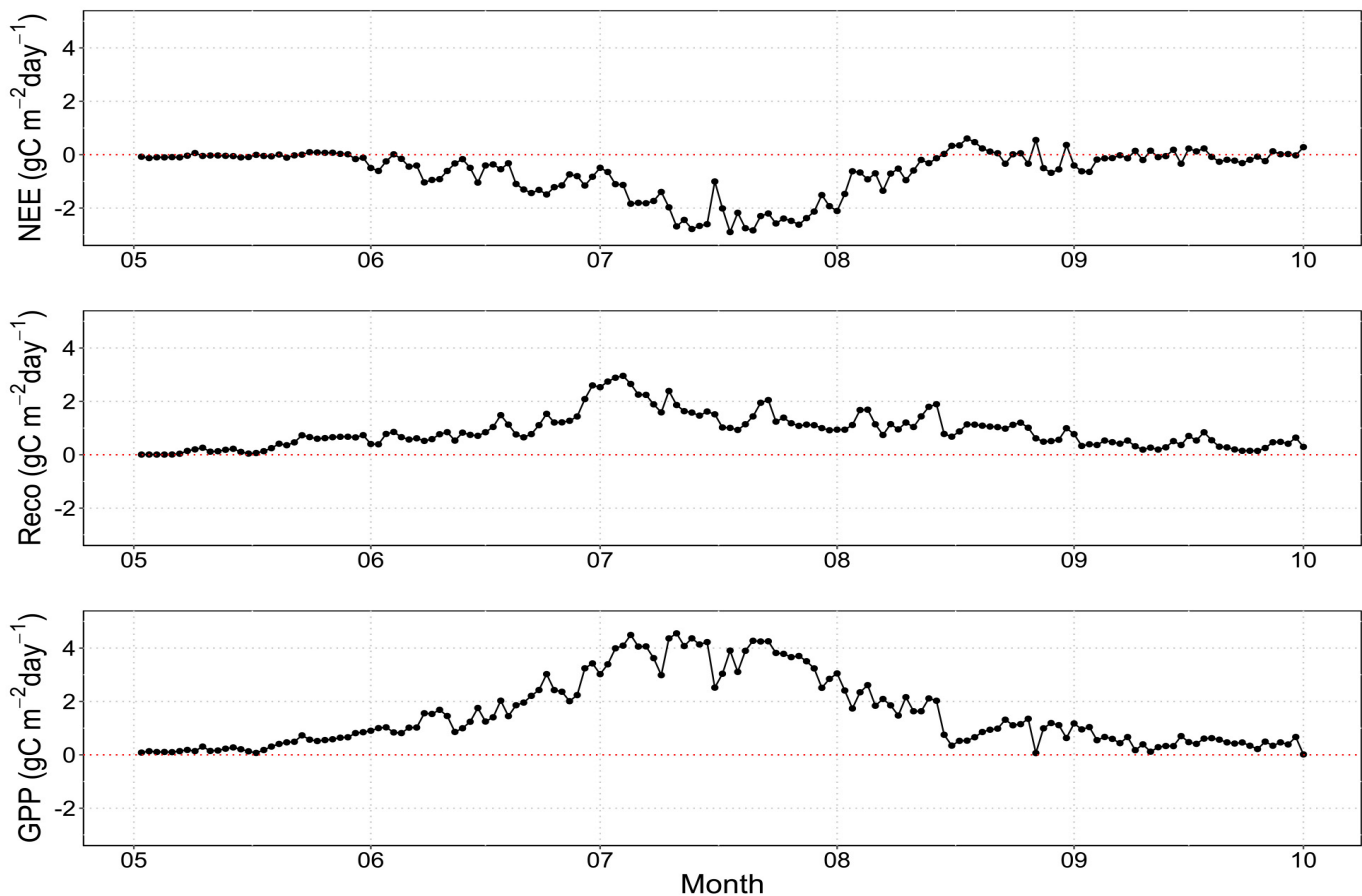


Figure 5 : Séries chronologiques de l'échange net entre écosystèmes (ENE), de la respiration des écosystèmes (R_{eco}) et de la productivité primaire brute (PPB) à Cambridge Bay, Nunavut, Canada, en 2017.

la fin septembre (Figure 4). Le site d'étude a été totalement exposé à l'atmosphère vers la mi-juin et était partiellement recouvert de neige vers la fin septembre. Le rayonnement à ondes longues ascendantes était plus important en été et moins important en hiver que le rayonnement à ondes longues descendantes. Par conséquent, la variation du bilan radiation se trouvait entre $-138,9 \text{ W/m}^2$ et $541,1 \text{ W/m}^2$, la moyenne annuelle étant de $60,8 \text{ W/m}^2$.

Bilan carbone

La figure 5 montre la variation moyenne quotidienne de l'ENE, de la R_{eco} et de la PPB entre mai et septembre 2017. La PPB a été calculée en soustrayant l'ENE par la R_{eco} . En fonction des données mesurées et des données dont les lacunes ont été comblées, l'ENE journalier se situait entre $-2,8$ et $0,6$ gramme de carbone (gC) par mètre carré (m^2) par jour avec un ENE accumulé de $-100,2 \text{ gC/m}^2$. En juin, l'ENE est devenu négatif (c'est-à-dire qu'il est devenu un piège à CO_2). En juillet, l'ENE a atteint son maximum ($-2,8 \text{ gC/m}^2/\text{jour}$), après quoi il a commencé à diminuer. En septembre, l'ENE fluctuait

autour de zéro. Alors que la R_{eco} quotidienne se situait entre 0 et $3,0 \text{ gC/m}^2/\text{jour}$, la PPB quotidienne se situait entre 0 et $4,6 \text{ gC/m}^2/\text{jour}$. La R_{eco} a atteint sa valeur maximale au début juillet, alors que la PPB a atteint son sommet à la mi-juillet. Cela peut s'expliquer par la croissance continue de la végétation en été, qui atteint sa couverture foliaire maximale en juillet. La R_2 et la PPB accumulées étaient respectivement de $135,2 \text{ gC/m}^2$ et de $235,4 \text{ gC/m}^2$ pour la période de cinq mois s'étendant de mai à septembre.

Les calculs pour la R_{eco} pendant la saison d'hiver n'ont pas pu être dérivés des données de covariation de vents tourbillonnants en raison de l'absence de données pendant une période considérable (novembre à avril 2017). La R_{eco} hivernale a été estimée à l'aide des données de la chambre DF. Malheureusement, les données de la chambre n'étaient pas disponibles au cours de l'hiver 2016. La R_{eco} a été calculé en utilisant uniquement les données d'octobre à décembre 2017. Il a été supposé que la R_{eco} ne varie pas beaucoup pendant l'hiver et que les données de la chambre étaient représentatives de la R_{eco} . La moyenne mensuelle

cumulée de la R_{eco} d'octobre à décembre a été utilisée pour représenter la valeur mensuelle cumulée pour toute la période hivernale (de janvier à avril et d'octobre à décembre). D'octobre à décembre, la R_{eco} mensuelle de la chambre DF était de $1,3 \text{ gC/m}^2$. En fonction de cette hypothèse, la R_{eco} était de $9,1 \text{ gC/m}^2$ pendant la saison hivernale. Cette magnitude représente environ 7 % de la quantité de R_{eco} pendant la saison de croissance. Enfin, en 2017, l'ENE annuel a été estimé à $-91,1 \text{ gC/m}^2$.

Sommaire et conclusions

À partir du flux de covariance de vents tourbillonnants et de mesures complémentaires, l'étude a rapporté des résultats préliminaires sur l'échange de CO_2 dans une toundra sèche à Cambridge Bay, au Nunavut, Canada, en 2017. Dans l'ensemble, les données obtenues sont fiables. Cependant, un grand nombre de données étaient manquantes (ou de mauvaise qualité) pendant la saison hivernale, ce qui a causé une grande incertitude dans la quantification de l'ENE annuel calculé en fonction des données de flux de covariance de vents tourbillonnants. Par conséquent, la R_{eco} hivernale a été quantifiée en utilisant les données de la chambre DF, en tenant pour acquis que les données de la chambre représentent la R_{eco} hivernale. La R_{eco} a atteint sa valeur maximale au début juillet, alors que la PPB a atteint son sommet à la mi-juillet. Par conséquent, l'ENE a atteint son maximum à la mi-juillet. La PPB, la R_{eco} et l'ENE annuels sont évalués à $235,4 \text{ gC/m}^2$, $144,3 \text{ gC/m}^2$ et $-91,1 \text{ gC/m}^2$ respectivement. Les résultats préliminaires indiquent qu'en 2017, le site d'étude de la toundra sèche a agi comme un piège à CO_2 atmosphérique. Toutefois, en raison de l'incertitude causée par les lacunes de données sur l'ENE qui ont été comblées, en particulier pour les données de la saison hivernale 2017, il est prématuré de tirer une telle conclusion.

Un environnement spécifique à l'Arctique, comprenant des éléments comme une très faible magnitude d'échange de carbone, des nuits blanches et des conditions météorologiques rigoureuses, rendent difficiles les mesures de flux de covariance de vents tourbillonnants et l'application des méthodes traditionnelles de correction. Pour réduire l'incertitude dans la quantification du bilan des émissions annuelles de CO_2 , d'autres méthodes sont nécessaires pour permettre une analyse plus approfondie. Ces méthodes comprennent une méthode de réseau neural pour

comblar les lacunes et une courbe de réponse à la lumière pour répartir l'ENE (Dengel et al., 2013 ; Runkle et al., 2013). De plus, les mesures de la R_{eco} doivent être améliorées pendant la saison hivernale pour évaluer l'ENE annuel sur cette longue période. Une analyse plus approfondie sera menée pour mieux comprendre les facteurs de variations saisonnières et interannuelles du bilan carbone dans cet écosystème. Des analyses supplémentaires des ensembles de données à long terme (depuis 2012) permettront également de mieux comprendre la réaction des écosystèmes de toundra sèche à différentes conditions environnementales.

Considérations d'ordre communautaire

La coopération avec la communauté locale est un facteur clé pour les études de terrain dans la toundra arctique. À cet égard, le KOPRI a communiqué étroitement avec le personnel local de Cambridge Bay, au Nunavut, dans le cadre du projet CAPEC. La formation sur place et la communication continue avec les chercheurs du KOPRI en Corée du Sud ont permis au personnel local d'accomplir diverses tâches, notamment le diagnostic de l'état des instruments et l'entretien du site de recherche. On s'attend de plus à ce que les activités de surveillance à long terme du KOPRI à Cambridge Bay, au Nunavut, contribuent directement et indirectement à la communauté locale. Les membres des communautés locales pourront acquérir une meilleure compréhension des changements de l'environnement local dus au changement climatique et considérer les changements actuels en regard du savoir traditionnel.

Remerciements

Cette recherche a été soutenue par une bourse de la Fondation nationale de recherche de Corée, accordée par le gouvernement coréen (MSIT, le ministère des Sciences et ICT) NRF-2016M1A5A1901769) (KOPRI-PN19081). Ce projet s'intitule [Traduction] « Surveillance des changements environnementaux du pergélisol circum-Arctique, prévisions et futurs développements et techniques relatives aux biomatériaux utiles » (projet CAPEC). Nous remercions tout particulièrement le Dr Donald McLennan pour son aide dans la classification des sols sur le terrain.

Références

- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw, K., Pilegaard, K., Schmid, H., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S. 2001. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(11):2415–2434. doi: 10.1175/1520-0477(2001)082<2415:fantts>2.3.co;2.
- CAVM Team. 2003. Circumpolar Arctic Vegetation Map. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Map No. 1. U.S. Fish and Wildlife Service: Anchorage, Alaska. ISBN: 0-9767525-0-6, ISBN-13: 978-0-9767525-0-9.
- Dengel, S., Zona, D., Sachs, T., Aurela, M., Jammert, M., Parmentier, F., Oechel, W., Vesala, T. 2013. Testing the applicability of neural networks as a gap-filling method using CH₄ flux data from high latitude wetlands. *Biogeosciences*, 10(12):8185–8200. doi: 10.5194/bg-10-8185-2013.
- Goodrich, J.P., Oechel, W.C., Gioli, B., Moreaux, V., Murphy, P.C., Burba, G., Zona, D. 2016. Impact of different eddy covariance sensors, site set-up, and maintenance on the annual balance of CO₂ and CH₄ in the harsh Arctic environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228:239–251. doi: 10.1016/j.agrformet.2016.07.008.
- Kaimal, J., Finnigan, J. 1994. Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. doi: 10.1002/qj.49712152512.
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M.W., Schmid, H.P. 2015. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, 8(11):3695–3713. doi:10.5194/gmd-8-3695-2015.
- Lloyd, J., Taylor, J. 1994. On the Temperature Dependence of Soil Respiration. *Functional Ecology*, 8(3):315–323.
- McGuire, A., Christensen, T., Hayes, D., Heroult, A., Euskirchen, E., Kimball, J., Koven, C., Lafleur, P., Miller, P., Oechel, W., Peylin, P., Williams, M., Yi, Y. 2012. An assessment of the carbon balance of Arctic tundra: comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions. *Biogeosciences*, 9(8):3185–3204. doi: 10.5194/bg-9-3185-2012.
- Moore, A. 1986. Frequency Response Corrections for Eddy Correlation Systems. *Boundary-Layer Meteorology*, 37(1):17–35 doi:10.1007/BF00122754.
- Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., Longdoz, B., Rambal, S., Valentini, R., Vesala, T., Yakir, D. 2006. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 3(4):571–583. doi: 10.5194/bg-3-571-2006.
- Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Gilmanov, T., Granier, A., Grunwald, T., Havrankova, K., Ilvesniemi, H., Janous, D., Knohl, A., Laurila, T., Lohila, A., Loustau, D., Matteucci, G., Meyers, T., Miglietta, F., Ourcival, J.-M., Pumpanen, J., Rambal, S., Rotenberg, E., Sanz, M., Tenhunen, J., Seufert, G., Vaccari, F., Vesala, T., Yakir, D., Valentini, R. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11:1424–1439. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x.
- Runkle, B.R.K., Sachs, T., Wille, C., Pfeiffer, E.-M., Kutzbach, L. 2013. Bulk partitioning the growing season net ecosystem exchange of CO₂ in Siberian tundra reveals the seasonality of its carbon sequestration strength. *Biogeosciences*, 10(3):1337–1349. doi: 10.5194/bg-10-1337-2013.
- Schuur, E., McGuire, A., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J., Hayes, D., Hugelius, G., Koven, C., Kuhry, P., Lawrence, D., Natali, S., Olefeldt, D., Romanovsky, V., Schaefer, K., Turetsky, M., Treat, C., Vonk, J. 2015. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520(7546):171–179. doi: 10.1038/nature14338.
- Soil Classification Working Group. 1998: The Canadian System of Soil Classification – 3rd edition. Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa, Ontario. ISBN 0-660-17404-9.