

# Le carbone du pergélisol en dégel augmentera le réchauffement climatique

Le dégel du sol jusqu'ici gelé en permanence, le pergélisol, va provoquer la décomposition d'une partie de la matière organique riche en carbone qu'il contient. Cela augmentera son relâchement dans l'atmosphère, sous forme de méthane ou de CO<sub>2</sub>, accroissant ainsi le réchauffement climatique.

## La libération progressive du carbone contenu dans le pergélisol

### Le pergélisol, un réservoir de carbone

Depuis plusieurs années, le dégel du pergélisol (permafrost en anglais) inquiète scientifiques et grand public. Ce sous-sol qui reste gelé toute l'année contient beaucoup de matière organique à forte teneur en carbone. Ce dernier est en partie relâché dans l'atmosphère lorsque le sol dégèle. Phénomène inquiétant, puisque le pergélisol contient plus de deux fois plus de carbone que l'atmosphère [1, p. 359].

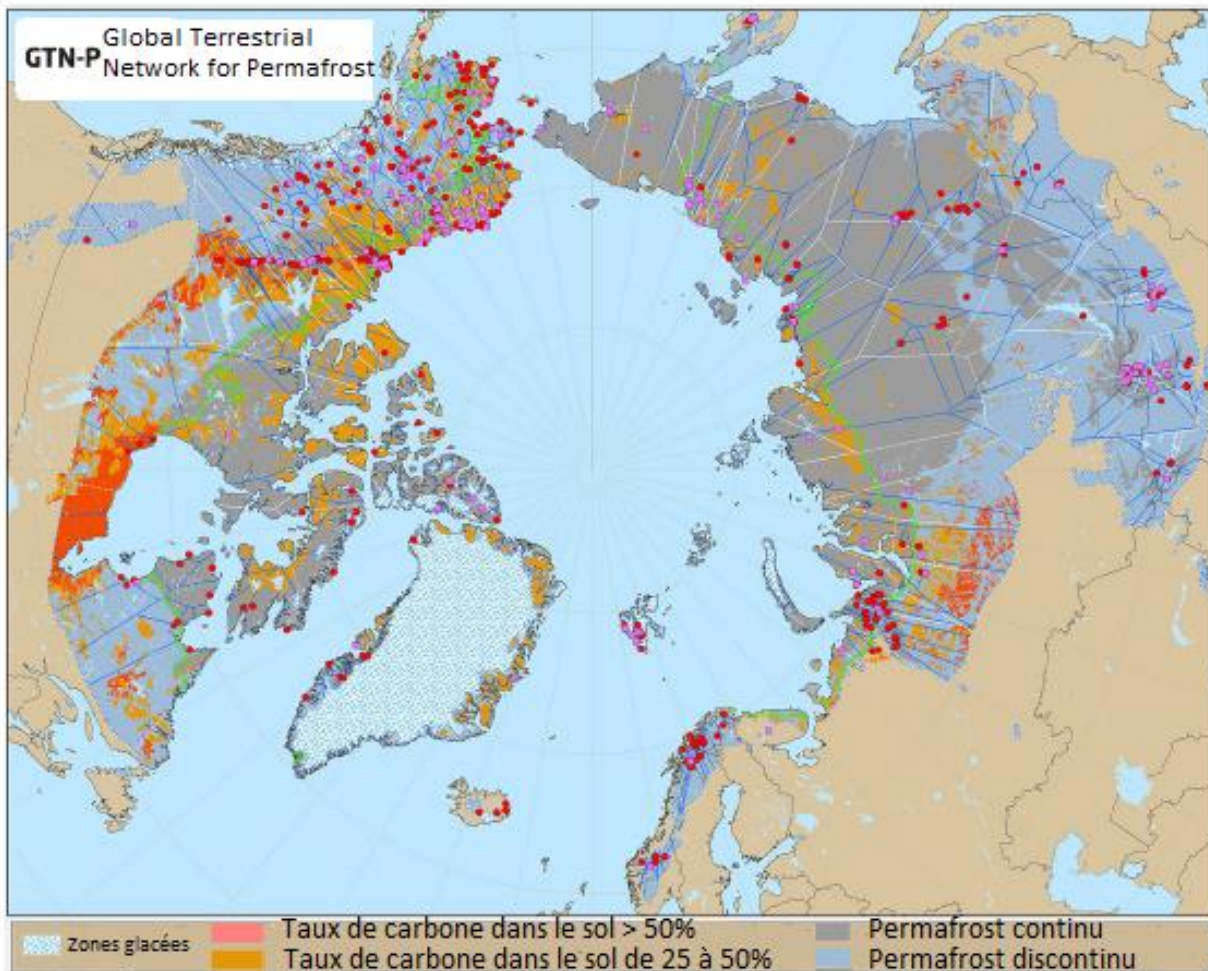
### L'Arctique au centre des enjeux

De nombreux chercheurs tentent d'estimer le fonctionnement et la vitesse de ce dégazage.

On trouve du pergélisol en majorité dans toutes les régions de l'Arctique (Groenland, Sibérie, Canada, Alaska et archipels arctiques), ainsi qu'au Tibet et de toutes petites zones des hautes montagnes des latitudes moyennes [2] [3]. Et en Antarctique ? *“Quasiment pas, il n'y a que de la roche”*, précise Gerhard Krinner, directeur de recherche CNRS à l'Institut des géosciences de l'environnement (IGE). Pas de présence de sol avec des végétaux qui constitueraient de la matière organique en décomposition. C'est donc principalement en Arctique que sont les enjeux.

### Le dégel de l'Arctique eurasien, de l'Amérique du Nord et du Groenland

*“Le dégel du pergélisol est lié au réchauffement de ces dernières années, qui est plus important en Arctique que dans les autres régions du globe”*, reprend Gerhard Krinner. *“La fonte des glaces de l'Arctique se poursuit et augmente, excepté au Svalbard (un archipel de la Norvège situé dans l'océan Arctique). La superficie de la calotte glaciaire du Groenland touchée par la fonte a augmenté ces 15 dernières années”*, indique Hubert Gallée, directeur de recherche lui aussi à l'IGE et spécialisé sur la fonte de l'Arctique. Pour le Svalbard, Charlotte Lang a montré, dans un article paru en 2015, qu'il n'y avait pas eu d'accélération de la fonte en surface des glaces le recouvrant entre 1973 et 2013. Ce phénomène serait dû à un changement de circulation atmosphérique qui entraîne une augmentation des vents venus du Nord. En 2013, la circulation atmosphérique a de nouveau changé et le Svalbard a connu une fonte record [4].



## Pergélisol et contenu en carbone du sol du pourtour de l'Arctique

Sources : Biskaborn et al., 2015 [2]

Selon un rapport issu du Programme de surveillance et d'évaluation de l'Arctique du Conseil de l'Arctique paru en 2017, le réchauffement en Arctique est plus du double de l'augmentation de la température mondiale. Depuis cinquante ans, la glace de mer a diminué de 65 % entre 1975 et 2012 tandis que la neige continentale dure 2 à 4 jours de moins tous les 10 ans. De plus, sur ces dernières années, la neige de juin en Amérique du Nord et dans l'Arctique eurasien était de 50% en dessous des valeurs observées avant les années 2000.

La surface du sol recouvrant le pergélisol s'est réchauffée de 0,5°C dans les hautes latitudes de l'Arctique depuis 2007-2009 et de 0,5 à 2° depuis une trentaine d'années dans toutes les régions concernées [[3], p. 256 et figure 1 p. 257] et la profondeur de son dégel l'été a augmenté dans la plupart d'entre elles [A].

*“Bon an, mal an, en été, la ligne de fonte de la neige remonte plus haut au Groenland. Elle a atteint un record en 2012 avec une remontée jusqu'au sommet de la calotte (3 200 m), suite à un épisode de transport d'air très chaud depuis les grandes plaines des Etats-Unis”, raconte Hubert Gallée.*

### Un sol plus exposé à la chaleur dès le printemps et mieux isolé du froid en hiver

Les températures d'été plus élevées induisent une accentuation du retrait de la banquise en Mer de Barents et de Kara et ce jusqu'en automne. Or il y a plus d'évaporation au-dessus des zones d'eau libres de glace. En conséquence, les chutes de neige d'automne augmentent, ainsi que la hauteur de neige sur la Sibérie en hiver. Par contre, au printemps, la neige fond de plus en plus tôt. Cependant, ces deux phénomènes très différents ont paradoxalement les mêmes effets sur le pergélisol. *“Au printemps, l'absence de neige entraîne le réchauffement du sol plus en profondeur”,* explique Hubert

Gallée. *Mais en hiver, une couche plus épaisse de neige s'avère plus isolante et rend le sol moins sujet au froid extérieur. Cette variabilité est très difficile à reproduire dans les modèles*”.

Or le réchauffement en Arctique sera plus élevé qu'ailleurs, pouvant atteindre jusqu'à 7-8° en 2100 [1], alors que l'océan arctique pourrait être pratiquement libre de banquise l'été dès la fin de la décennie 2030 [A].

### **Environ 1 700 milliards de tonne de carbone contenus dans le pergélisol**

Avant tout, les chercheurs ont travaillé à l'estimation du carbone présent dans le pergélisol. *“On a fait des progrès sur la quantification des stocks de carbone. On est plus précis tout en restant dans les mêmes ordres de grandeur”*, indique Gerhard Krinner. Les difficultés pour estimer cette quantité de carbone viennent des mesures. S'il est possible d'observer le recul des glaces par satellites, pour le pergélisol, il faut aller sur place et faire des carottages, ce qui demande un travail important. Or les sites ne sont pas faciles d'accès et la réalisation de tels profils coûte cher.

Une étude parue en 2014 tente cependant de faire le point sur les stocks de carbone des régions de pergélisol. Les chercheurs estiment des quantités de 1 035 gigatonnes (Gt, soit un milliard de tonnes,  $10^9$  tonnes,  $10^{12}$  kg ou un pétagramme (Pg)), entre 0 et 3 mètres de profondeur, la fourchette allant de 885 à 1 185 Gt [5] et 648 Gt à plus de 3 m, soit près de 1 700 Gt en tout, avec une marge d'incertitude de quelques centaines de Gt [[1], p. 361]. Ces estimations doivent être améliorées par l'apport de données complémentaires [I] mais permettent d'estimer la quantité de carbone qui pourrait être émise dans l'atmosphère.

### **Devenir du carbone contenu dans le pergélisol en dégel**

Les mécanismes de dégel du pergélisol, mal connus, restent l'objet de grandes incertitudes. Quand il survient, la biomasse (c'est à dire sa matière organique d'origine végétale ou animale) qu'il contient est soumise à décomposition. A la surface, en présence d'oxygène, des bactéries, dites alors aérobies, vont assimiler le carbone et rejeter du CO<sub>2</sub> (dioxyde de carbone) dans l'air, de la même manière que lors de la respiration d'un être humain. Mais tout le carbone contenu dans la matière organique ne part pas ainsi dans l'atmosphère. Une partie n'est pas digérée par elles et reste sur place. Dans certaines zones, la fonte de la glace contenue dans le pergélisol entraîne des affaissements de terrains. Cela forme des mares dites de thermokarst [6]. Le carbone se retrouve ainsi dans l'eau avec la possibilité d'être digéré, plus en profondeur et plus lentement, en absence d'oxygène, par d'autres types de bactéries, dites anaérobies, qui vont le transformer en méthane (CH<sub>4</sub>), comme lors de la digestion des ruminants polygastriques. Il peut également se déposer au fond des mares ou être transporté par les rivières, où il se retrouve sous forme dissoute ou particulaire, ou être libéré au niveau des littoraux par érosion.

Mesurer les quantités de carbone pour chacune de ces étapes est difficile, alors qu'il met en général plusieurs dizaines d'années avant de s'échapper [1, p. 362]. *« Il faut donc représenter les processus de gel et dégel du sol, ses effets sur le carbone ainsi que la taille de ce réservoir. Des simulations sont en cours. Cependant, il faut encore en réaliser de grandes quantités”*, indique Gerhard Krinner.

## **Quel réchauffement peut rajouter le carbone provenant du pergélisol en dégel ?**

### **Les données du GIEC et des modèles simples**

*“Dans le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) de 2013, on estimait, selon le scénario RCP8.5 (scénario pessimiste, d'émissions continues de gaz à effet de serre sans mise en œuvre d'un accord climat), que le pergélisol pouvait ajouter entre 50 et 250 Gt de carbone supplémentaire dans l'atmosphère d'ici 2100 [B]. Mais les modèles de climat analysés pour celui-ci ne prenaient en compte*

aucun des grands réservoirs de carbone », précise-t-il.

Scénario d'émissions de gaz à effet de serre (GES)		Emissions cumulées 2012-2100, moyenne [2] [B1]		Réchauffement projeté (1986-2005) à (2081-2100) [B2]		Total réchauffement projeté (1850-1900) à (2081-2100) [I]	
Type	Nom	GtC	Gt CO2	Moyenne	Plage	Moyenne	Plage
Accord climat : réduction des émissions	RCP 2,6	270	990	1	0,3 à 1,7	1,6	0,9 à 2,3
Stabilisation des concentrations des GES	RCP 4,5	780	2860	1,8	1,1 à 2,6	2,4	1,7 à 3,2
	RCP 6,0	1060	3885	2,2	1,4 à 3,1	2,8	2 à 3,7
Fortes émissions	RCP 8,5	1685	6180	3,7	2,6 à 4,8	4,3	3,2 à 5,4

**Réchauffement projeté entre 1850 et 2100 (en °C) suivant les scénarios d'émissions de GES**

Notes :

[I] Réchauffement observé de 1850-1900 à 1986-2005 : 0,6° [A]

[2] 1 Gt C = 3,667 Gt CO<sub>2</sub>

Sources :

[A] GIEC, 5<sup>e</sup> rapport GT2, 2014, figure RID.4

[B1] GIEC, 5<sup>e</sup> rapport GT1, 2013, tableau RID 3

[B2] GIEC, 5<sup>e</sup> rapport GT1, 2013, tableau RID 2

Une équipe de 28 chercheurs a estimé en 2015, par un modèle simplifié, que ces pertes de carbone, sous forme de CO<sub>2</sub>, seraient d'ici 2100 de 27,9 à 112,6 Gt avec le scénario RCP 8.5, le CH<sub>4</sub> rajoutant alors 18% au pouvoir de réchauffement du dioxyde de carbone [7]. Celui-ci intégrait une part importante de fertilisation par le CO<sub>2</sub>, selon l'hypothèse optimiste que le réchauffement et l'augmentation du CO<sub>2</sub> accroîtraient la biomasse (les sols actuellement nus se couvrant de végétation, les toundras se transformant en forêts boréales,... par accroissement de la photosynthèse), captant jusqu'à 88 Gt du carbone provenant du pergélisol dégelé [[8], p. 10].

En 2015, à partir d'un modèle de surface continentale n'intégrant pas des simulations de colonnes de sol profond, JULES, une équipe de chercheurs a également évalué que la prise en compte des mousses et des types de sols réduisait la perte du pergélisol [9] .

### **Le dégel du pergélisol pourrait provoquer 16% de l'augmentation de température en 2300**

Plus récemment, un groupe de chercheurs, dont Gerhard Krinner, a utilisé deux modèles révisés (JULES et ORCHIDEE), de complexité intermédiaire. L'article concluant les travaux, paru en juin 2017, indique que le carbone provenant du pergélisol pourrait provoquer une augmentation supplémentaire de température pouvant atteindre 0.2° d'ici 2100 et 0.34° d'ici 2300.

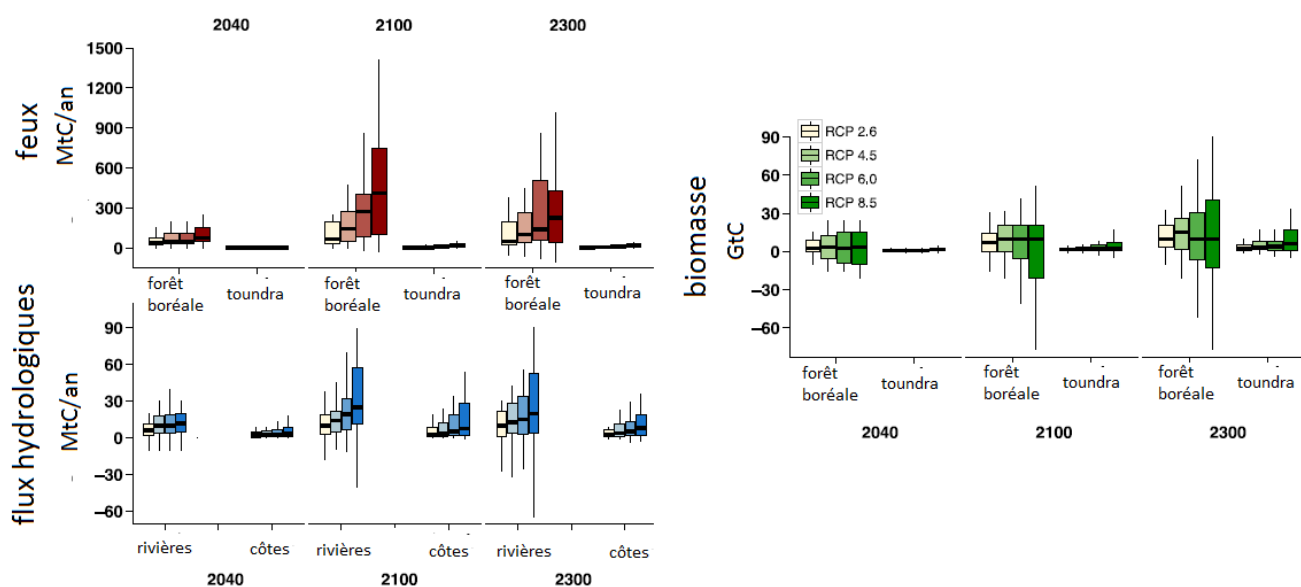
Dans le scénario de réduction des émissions, le RCP 2.6 (celui, optimiste, de la mise en œuvre d'un accord climat ambitieux), étant donné que celles provenant des énergies fossiles diminueraient, la part liée au pergélisol serait plus importante que dans le cas du RCP 8.5 (scénario pessimiste d'absence de mise en œuvre d'un accord climat ambitieux), pouvant causer alors 9% de l'augmentation de température en 2100 et 16% en 2300 [10].

Il faut donc en tenir compte dans tout scénario ayant pour objectif de limiter la hausse de la température à 1,5-2°.

## Feux, flux hydrologiques, contraintes des sols et croissance arbustive

Pour affiner ces bilans d'émission de carbone des régions de pergélisol, plusieurs chercheurs ont essayé de faire un point complet sur les connaissances actuelles dans un article paru en 2015.

Ils ont recensé d'autres facteurs à prendre en compte, qui ne figuraient pas jusqu'alors dans les modèles, agissant sur la vitesse de relargage du carbone du pergélisol ou sur la biomasse. Ils estiment que d'ici 2100 le relargage du carbone provenant du permafrost des rivières arctiques et de l'érosion des côtes (flux hydrologique) pourrait augmenter de 75% tandis que celui issu des feux pourrait quadrupler.



## Augmentation des feux et des flux hydrologiques émettant le carbone du pergélisol et quasi stagnation de la biomasse pouvant le capter

Sources : Abbott et al., 2016 [8]

Ils envisagent aussi d'autres contraintes agissant sur les sols ou la biomasse, comme les prélèvements effectués sur elle par l'homme, les stress hydriques et de nutriments des sols, la décomposition du bois et du couvert végétal mort, les dommages causés par les insectes, les effondrements du pergélisol et la transformation des forêts de conifères en celles d'arbres à feuilles caduques, pouvant réchauffer le pergélisol jusqu'à 7 ° par perte de ses mousses isolantes [[8], p. 10 et 11].

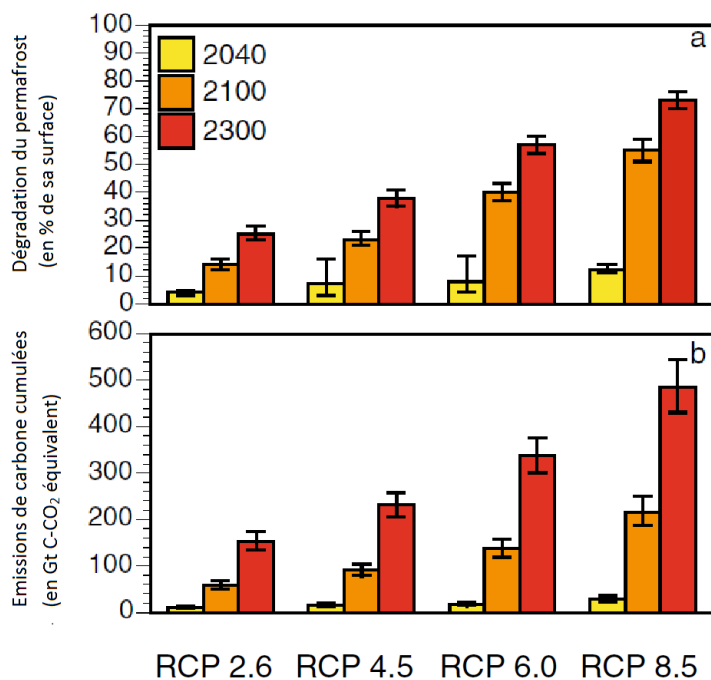
« De plus, insiste Florent Domine, directeur de recherche CNRS à l'université Laval au Canada, la croissance arbustive, favorisée par le réchauffement [11], a un impact sur la température du pergélisol qui a fait l'objet de nombreuses études. Les arbustes, en piégeant la neige soufflée par le vent, augmentent l'épaisseur de la neige et son pouvoir isolant [12] [13]. Ceci limite considérablement le refroidissement hivernal du pergélisol. En été, plusieurs processus entrent en compétition. La diminution de l'albédo [11] due au remplacement de la toundra herbacée par la toundra arbustive a tendance à réchauffer la surface [14] [15]. Par contre, les effets d'ombrage des arbustes ont tendance à refroidir le sol [15] ».

« Quoi qu'il en soit, reprend le chercheur, globalement la croissance arbustive produit un réchauffement du pergélisol [14], dont l'ampleur reste à quantifier précisément, qui va accentuer les émissions de gaz à effet de serre ».

Tous ces facteurs, non pris en compte par les modèles simples ou de complexité intermédiaires, augmenteraient fortement la libération du carbone du pergélisol dans l'atmosphère tout en limitant pratiquement totalement la possibilité qu'il soit ensuite recapté par la biomasse [8].

## Un réchauffement qui pourrait atteindre 6,15° en 2100

Des modèles commencent à intégrer l'ensemble de ces facteurs liés au pergélisol. Ils estiment des émissions provenant du pergélisol bien supérieures : entre 162 et 288 Gt C- CO<sub>2</sub> équivalent (Gt eq CO<sub>2</sub>) de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> émis en 2100 et 381 et 616 Gt eq CO<sub>2</sub> en 2300 en cas de scénario RCP 8.5 et, pour le RCP 2.6, entre 41 et 80 Gt eq CO<sub>2</sub> d'ici 2100 et 119-200 Gt eq CO<sub>2</sub> d'ici 2300, soit environ deux tiers des émissions évitées [1, p. 365]. Ils intègrent également le CH<sub>4</sub>, qui ne représenterait que 2,3% des émissions de carbone en se libérant plus lentement des zones humides profondes sans oxygène. Mais son pouvoir de réchauffement de 33 fois supérieur sur 100 ans à celui du CO<sub>2</sub> fait qu'il représenterait alors un tiers du réchauffement provoqué par ce dernier.



Dégradation du permafrost et émissions cumulées de carbone (CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>) en provenant

Sources : Schuur et al., 2013 [1]

Ces estimations pourraient entraîner un réchauffement supplémentaire de 0.09 à 0.75° d'ici 2100 et 0.13 à 1.69 °C d'ici 2300 [16].

Dans le pire des cas (voir tableau ci-dessus « Réchauffement projeté entre 1850 et 2100 », dernière ligne, colonne de droite) du scénario RCP 8.5, l'augmentation de la température moyenne globale pourrait atteindre 5,4 + 0,75 = 6,15° en 2100 par rapport à 1850.

## Ne pas dépasser 1,5-2° sera plus contraignant qu'initialement estimé

Au vu de l'ensemble de ces résultats, et malgré le besoin d'étudier plus en avant ces questions, il apparaît important de prendre en compte la réponse du pergélisol au changement climatique et du carbone qui s'y trouve dans les scénarii de stabilisation et d'atténuation des émissions.

Pour éviter l'émission dans l'atmosphère d'environ deux tiers du carbone du pergélisol et un réchauffement supplémentaire pouvant être important, il est urgent de mettre en œuvre un scénario de réduction des émissions, comme le RCP 2.6 [1, p. 365], ayant pour objectif de limiter l'augmentation de température à 1,5-2° d'ici 2100, qui devra être plus contraignant que précédemment estimé, pour tenir compte de l'amplification provoquée par le dégel du pergélisol.

## Références (revues scientifiques à comité de lecture) :

- [1] Schuur E AG et al, Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change *Clim. Change* 119 359–74, 2013  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-013-0730-7>
- Schuur E AG et al, Climate change and the permafrost carbon feedback *Nature* 520 171–9, 2015  
<https://www.nature.com/articles/nature14338>
- [2] B. K. Biskaborn et al., The new database of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P), *Earth Syst. Sci. Data*, 7, 245–259, 2015  
<https://www.earth-syst-sci-data.net/7/245/2015/essd-7-245-2015.html>
- [3] J. Brown and V. E. Romanovsky, Report from the International Permafrost Association: State of Permafrost in the First Decade of the 21st Century Permafrost and Periglac. Process. 19: 255–260 (2008) Wiley InterScience  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppp.618/abstract>
- [4] Lang C., Fettweis X. and Ericum M.. Stable climate and surface mass balance in Svalbard over 1979–2013 despite the Arctic warming. *The Cryosphere*, 9, 83–101, 2015. doi:10.5194/tc-9-83-2015  
<https://www.the-cryosphere.net/9/83/2015/>
- [5] G. Hugelius et al., Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*, 11, 6573–6593, 2014  
<https://www.biogeosciences.net/11/6573/2014/bg-11-6573-2014-discussion.html>
- [6] D. Olefeldt et al., Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes *NATURE COMMUNICATIONS* 11 Oct 2016  
<https://www.nature.com/articles/ncomms13043>
- [7] Koven CD *et al.*, A simplified, data-constrained approach to estimate the permafrost carbon–climate feedback. *Phil. Trans. R. Soc. A* 373: 20140423, 2015  
<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0423>
- [8] Abbott et al., Biomass offsets little or none of permafrost carbon release from soils, streams, and wildfire: an expert assessment *Environmental Research Letters*, Volume 11, Number 3, 2016  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/3/034014>
- [9] Chadburn S., Burke E., Essery R., Boike J., Langer M., Cox P., and Friedlingstein P. Future simulations of permafrost by the JULES land surface model. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 17, EGU2015-11927, 2015  
<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-01205181>
- [10] Burke E. J., Ekic A., Huang Y., Chadburn S.E., Huntingford C., Ciais P., Friedlingstein P, Peng S., and Krinner G.. Quantifying uncertainties of permafrost carbon–climate feedbacks. *Biogeosciences*, 14, 3051–3066, 2017  
<https://doi.org/10.5194/bg-14-3051-2017>
- [11] H. E. Epstein et al. Tundra Greenness Arctic Program NOAA November 17, 2015  
<http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2015/ArtMID/5037/ArticleID/221/Tundra-Greenness>
- [12] Sturm M, McFadden J P, Liston GE, Chapin F S, Racine Chand Holmgren J 2001 Snow-shrub interactions in Arctic tundra: a hypothesis with climatic implications *J. Clim.* 14 336–44  
<https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442%282001%29014%3C0336%3ASSIAT%3E2.0.CO%3B2>

[13] F. Domine, M. Barrere, S. Morin (2016) The growth of shrubs on high Arctic tundra at Bylot Island: impact on snow physical properties and permafrost thermal regime, *Biogeosciences*, 13, 6471-6486 doi : 10.5194/bg-13-6471-2016

<https://www.biogeosciences.net/13/6471/2016/>

[14] Lantz, T. C., P. Marsh, and S. V. Kokelj (2013), Recent shrub proliferation in the Mackenzie Delta uplands and microclimatic implications, *Ecosystems*, 16(1), 47–59.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10021-012-9595-2>

[15] Myers-Smith IH, Hik DS Shrub canopies influence soil temperatures but not nutrient dynamics: An experimental test of tundra snow-shrub interactions.. *Ecol Evol.* 2013 Oct;3(11):3683-700. doi: 10.1002/ece3.710. Epub 2013 Sep 7.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24198933>

[16] MacDougall AH, Avis CA and Weaver A J, Significant contribution to climate warming from the permafrost carbon feedback *Nat. Geoscience* 5 719–21, 2012

<https://www.nature.com/articles/ngeo1573>

#### **Rapports d'organismes internationaux :**

[A] Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic Summary for Policy-makers, 2017

<https://www.amap.no/documents/doc/Snow-Water-Ice-and-Permafrost.-Summary-for-Policy-makers/1532>

[B] GIEC, 5è rapport, GT1, 2013, Résumé à l'intention des décideurs, page 27

[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_FRENCH.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf)

#### **Notes :**

[I] Pour illustrer la carence de données, on peut préciser que les estimations du stock de C dans l'Est de l'Arctique canadien reposent sur 4 profils de sols pour environ 2 millions de km<sup>2</sup> de territoire. [Hugelius et al. 2013, 10.5194/essd-5-393-2013]

[II] Le pouvoir réfléchissant (l'albédo) de la surface de la Terre : un conifère, par rapport à de l'herbe, fait baisser la réflectivité de la surface d'environ 16% à 8% et ainsi augmente la part du rayonnement solaire absorbée par la surface de la Terre, qui réchauffe davantage son environnement.