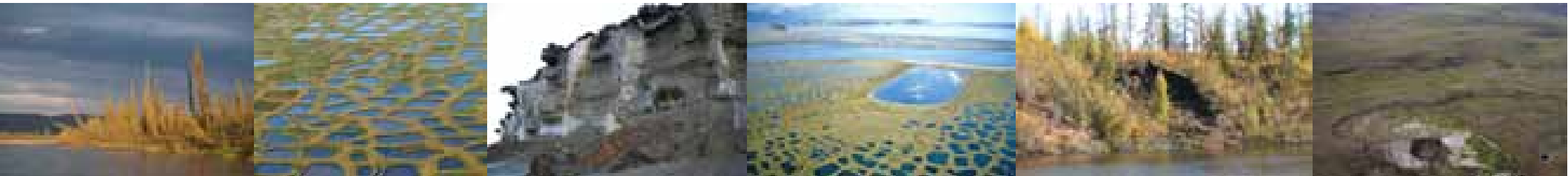


Les pergélisols et leur rôle dans le climat global

Gerhard Krinner, LGGE Grenoble



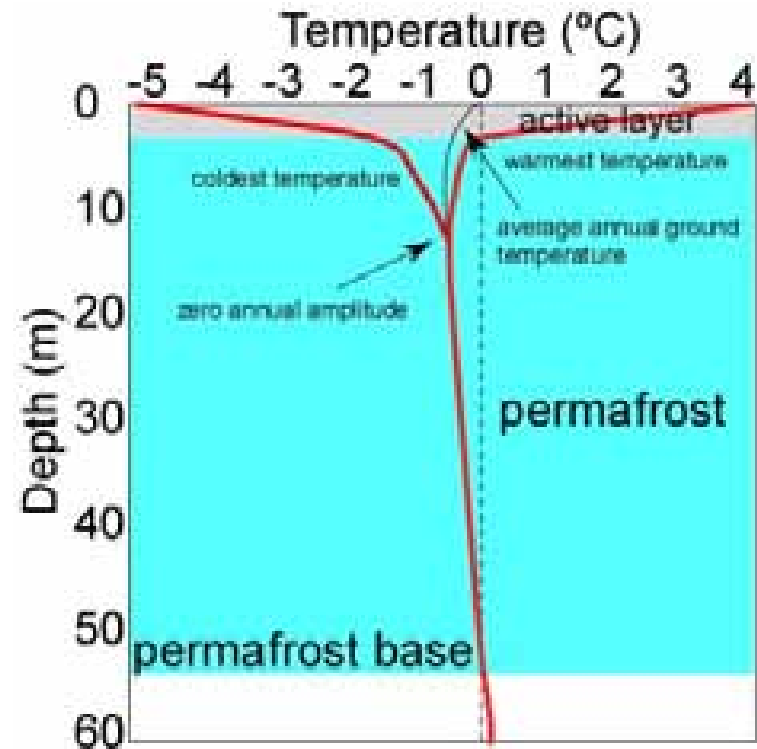
De quoi parle-t-on ?

Permafrost : Sol (ou roche) qui reste à une température inférieure à 0°C pendant au moins deux ans.

Cryosol (Gélisol) : Sol contenant du permafrost (à moins de 1 m de profondeur) et généralement une couche active

Couche active : Couche de surface au-dessus du pergélisol qui subit un cycle annuel de gel et dégel

Thermokarst : Affaissement de terrain dû au tassement du sol consécutif de la fonte de la glace du permafrost

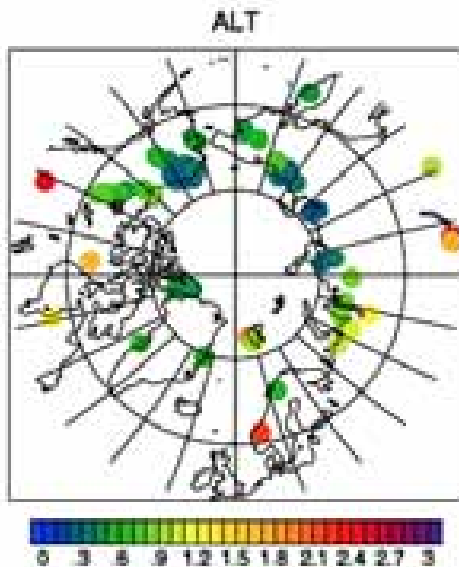


(Source : UAF)



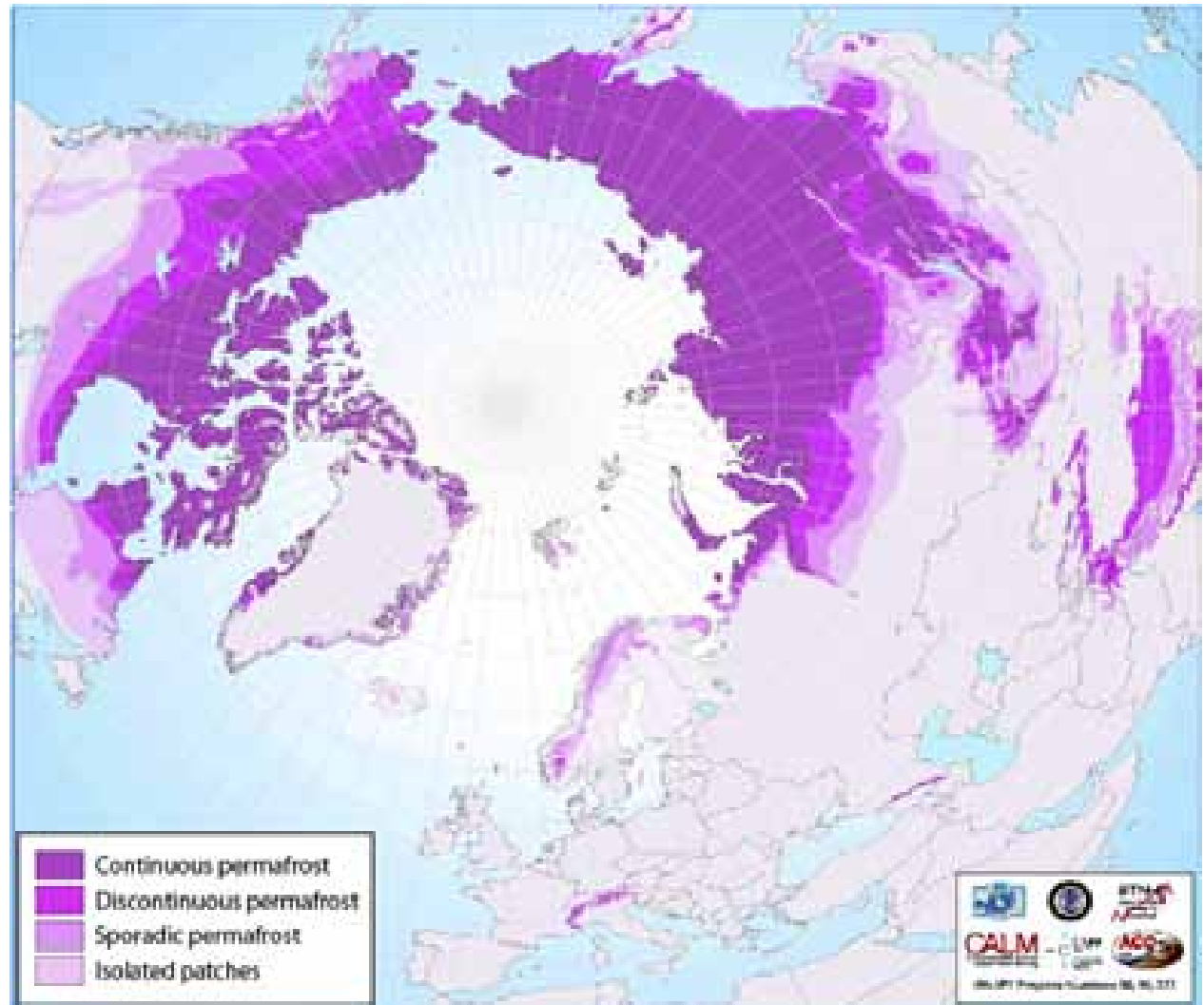
Extension du permafrost

- Environ 16.10^6 km²
- Epaisseur du permafrost et de la couche active très variable
- Permafrost « fossile » à grande profondeur



(g) CALM active layer thickness

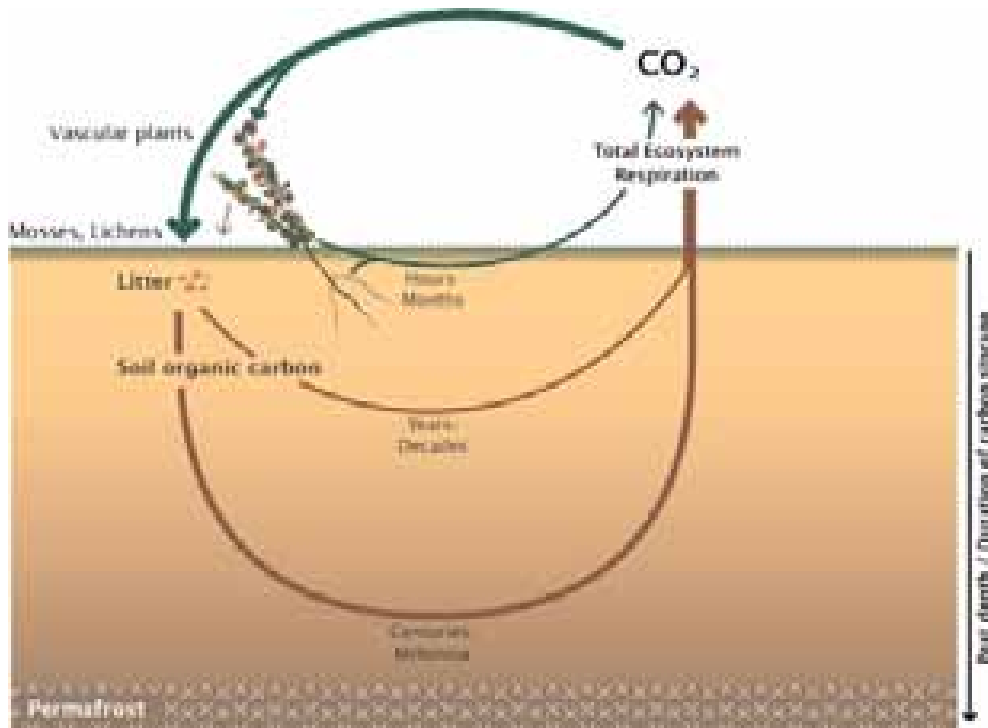
(Koven et al., 2009)



(IPA, 2010)

Pourquoi s'y intéresser ?

- Rétroaction climat - carbone du pergélisol
- Effet du gel du sol sur les échanges d'eau/d'énergie à la surface



(Kuhry et al., PPP, 2010)

Le carbone dans le permafrost

- Ralentissement / arrêt de l'activité microbienne dans le sol
- « Enfermement » de matière organique dans le pergélisol par
 - ajout de matière en surface
 - cryoturbation
 - refroidissement du climat
- Carbone en partie très ancien



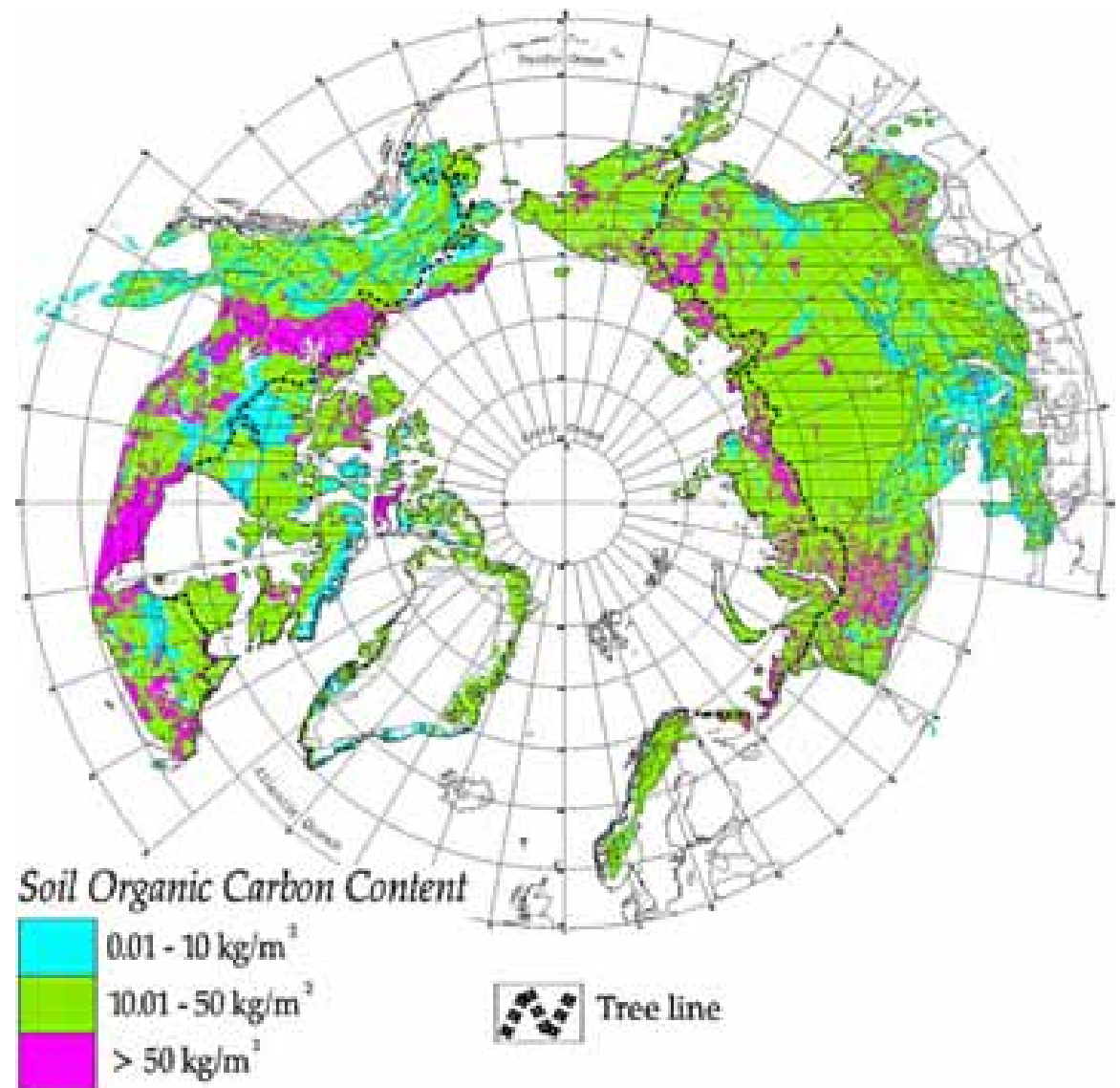
*(Zimov et al., Science, 2006;
Ground Truth Trekking)*

Sols → 3m: 1024 Pg

Yedoma: 407 Pg

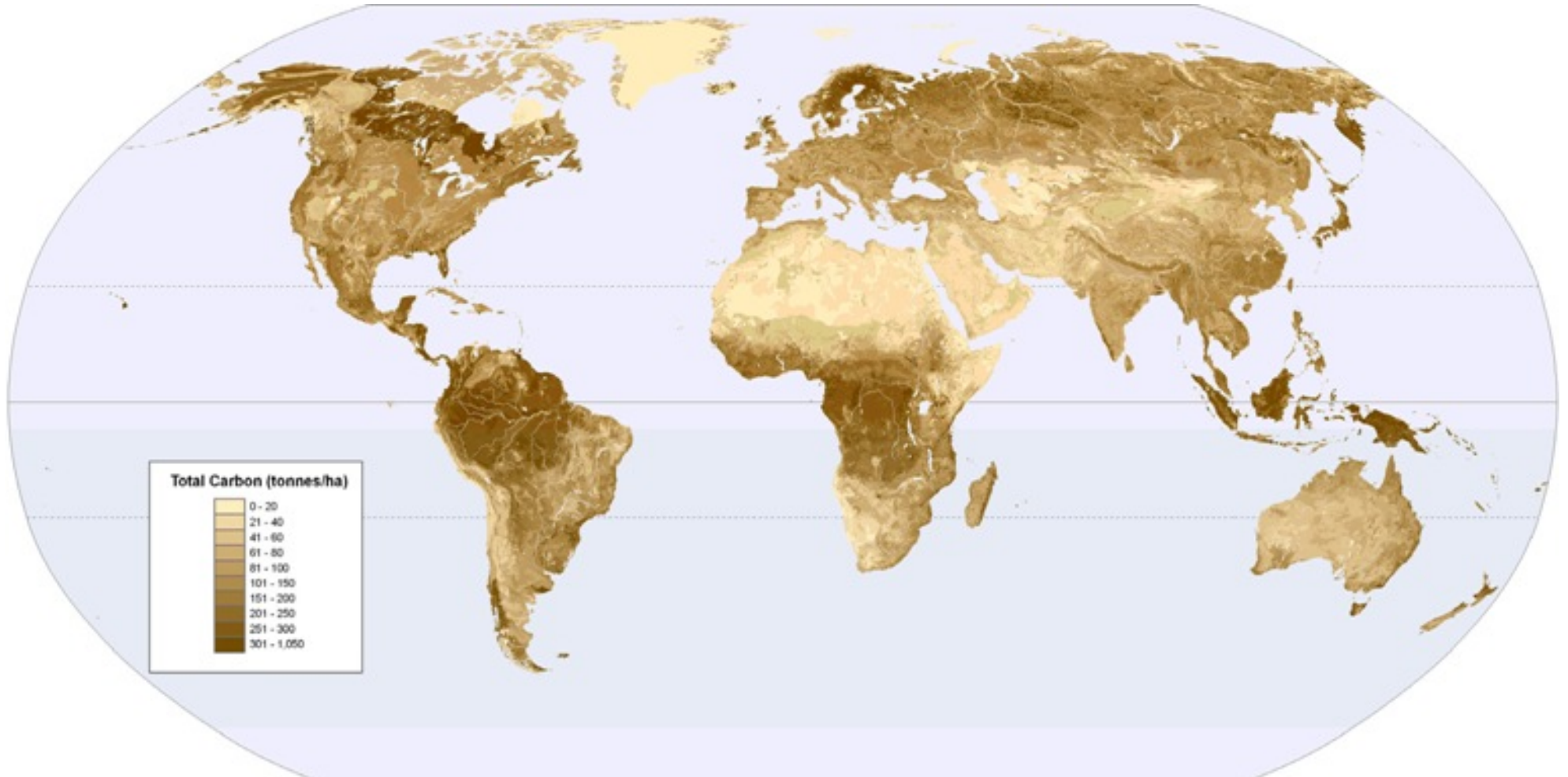
Deltas: 241 Pg

Total: 1672 Pg (2 x le
carbone atmosphérique)



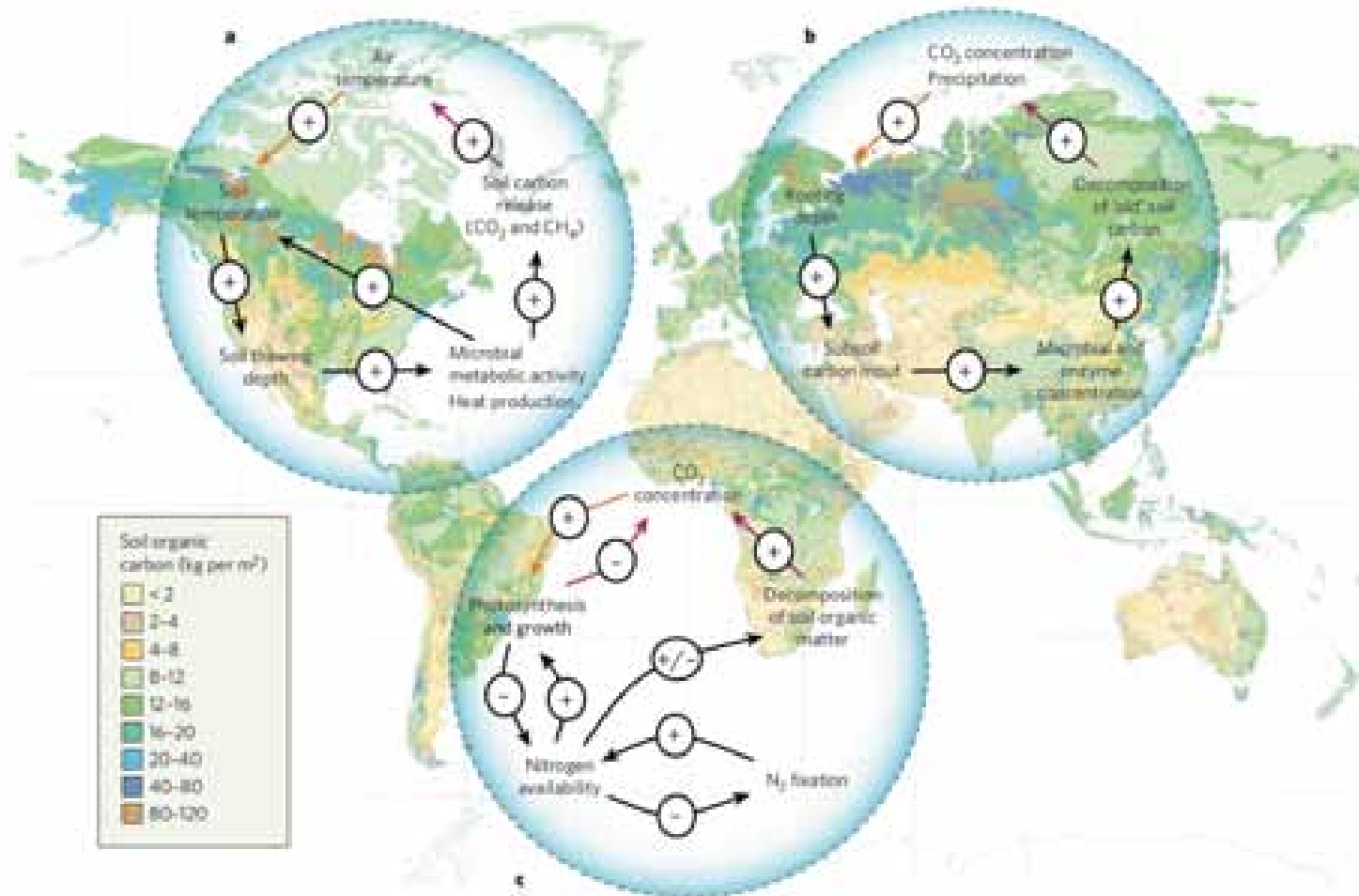
(Tarnocai et al., GBC, 2009)

Carbone des pergélisols : fraction substantielle du carbone organique global



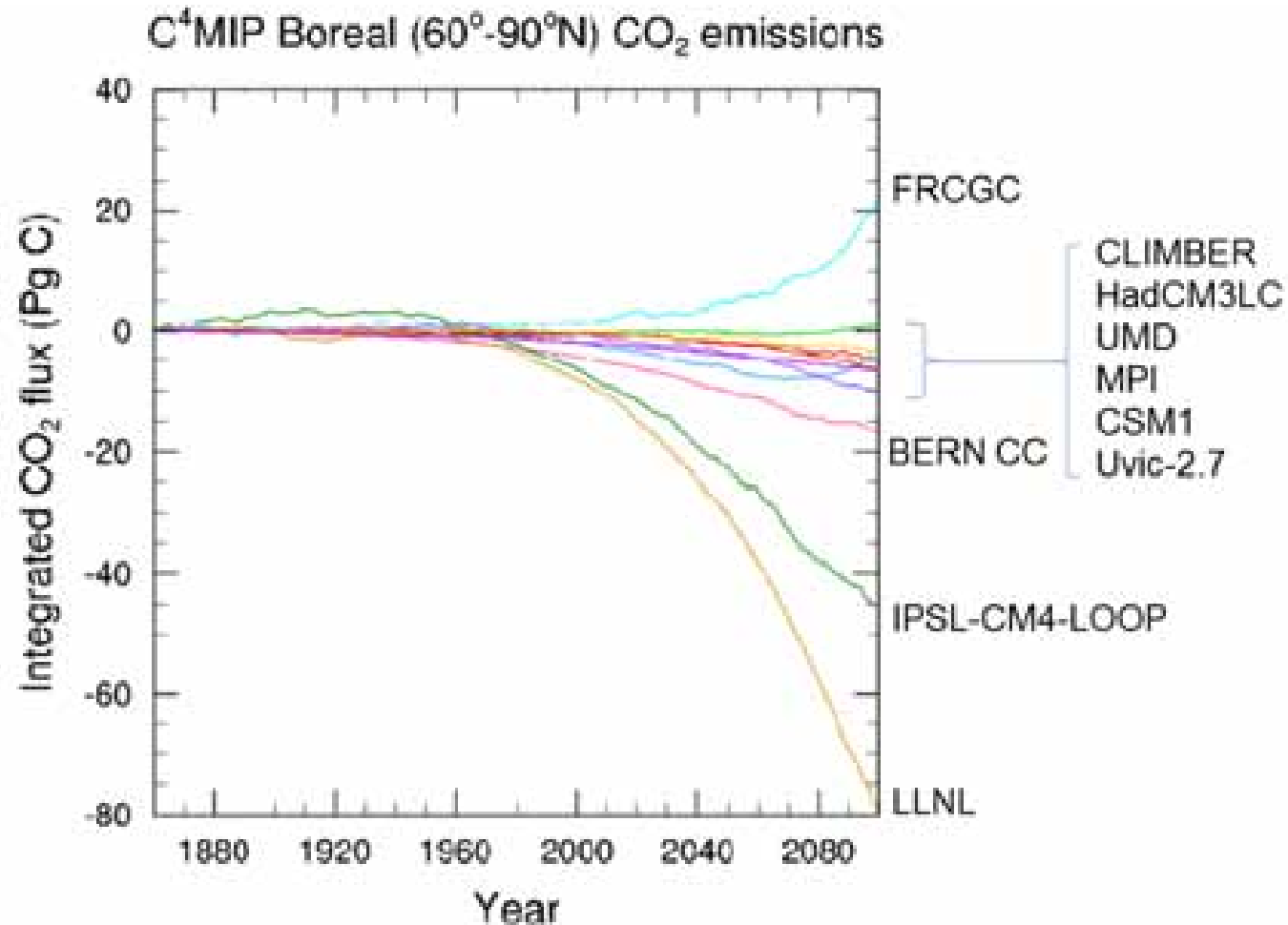
(Scharlemann et al., UNEP-WCMC, 2009)

« Dégazage » des pergélisols : une des principales rétroactions potentielles positives entre le bilan de carbone du sol et changement climatique



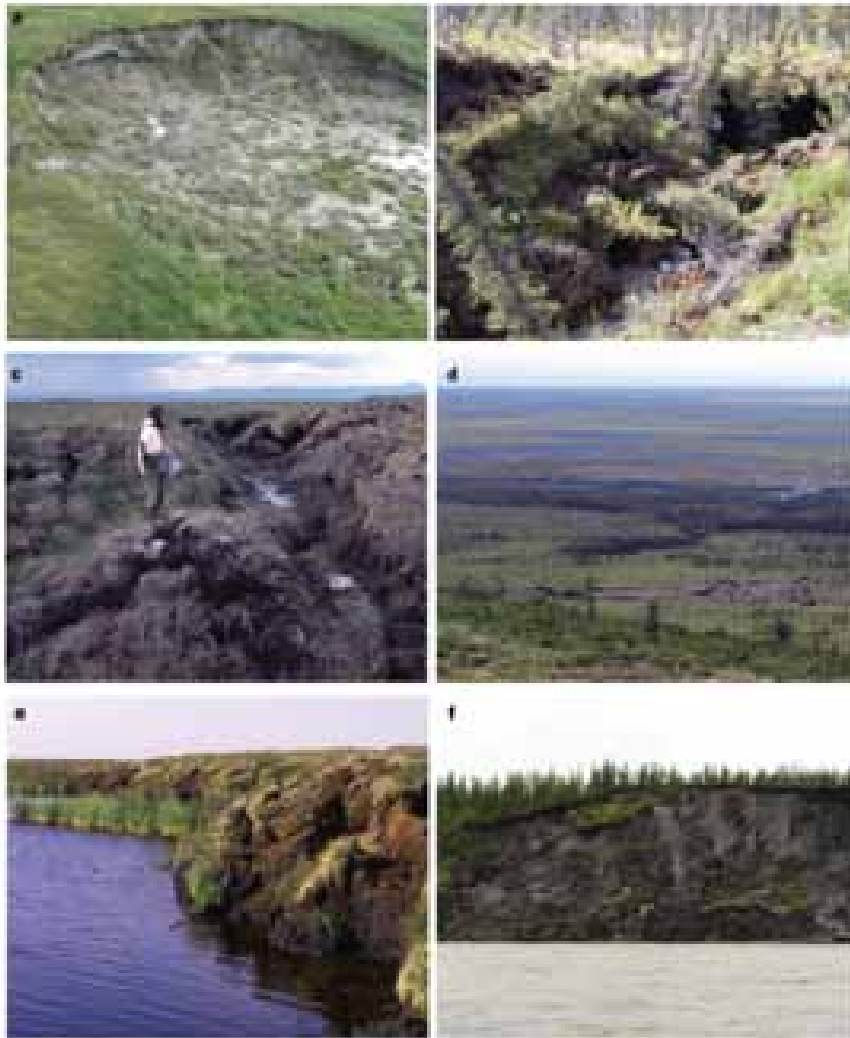
(Heimann et Reichstein, Nature, 2008)

« Dégazage » des pergélisols : généralement pas pris en compte dans les modèles de climat couplés climat-carbone

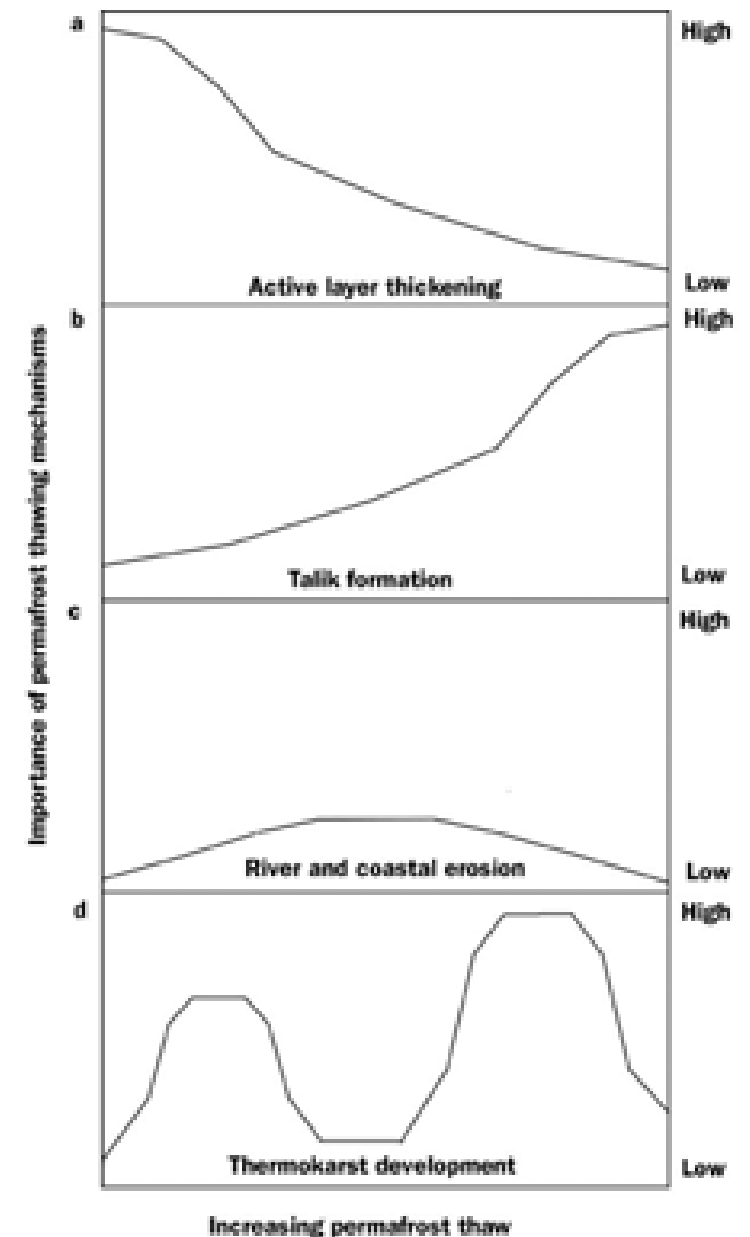


(Friedlingstein et al., J. Climate, 2006)

Processus de dégradation des pergélisols



Talik : Couche dégelée en permanence au-dessus du permafrost et en-dessous d'une couche de surface qui gèle en hiver



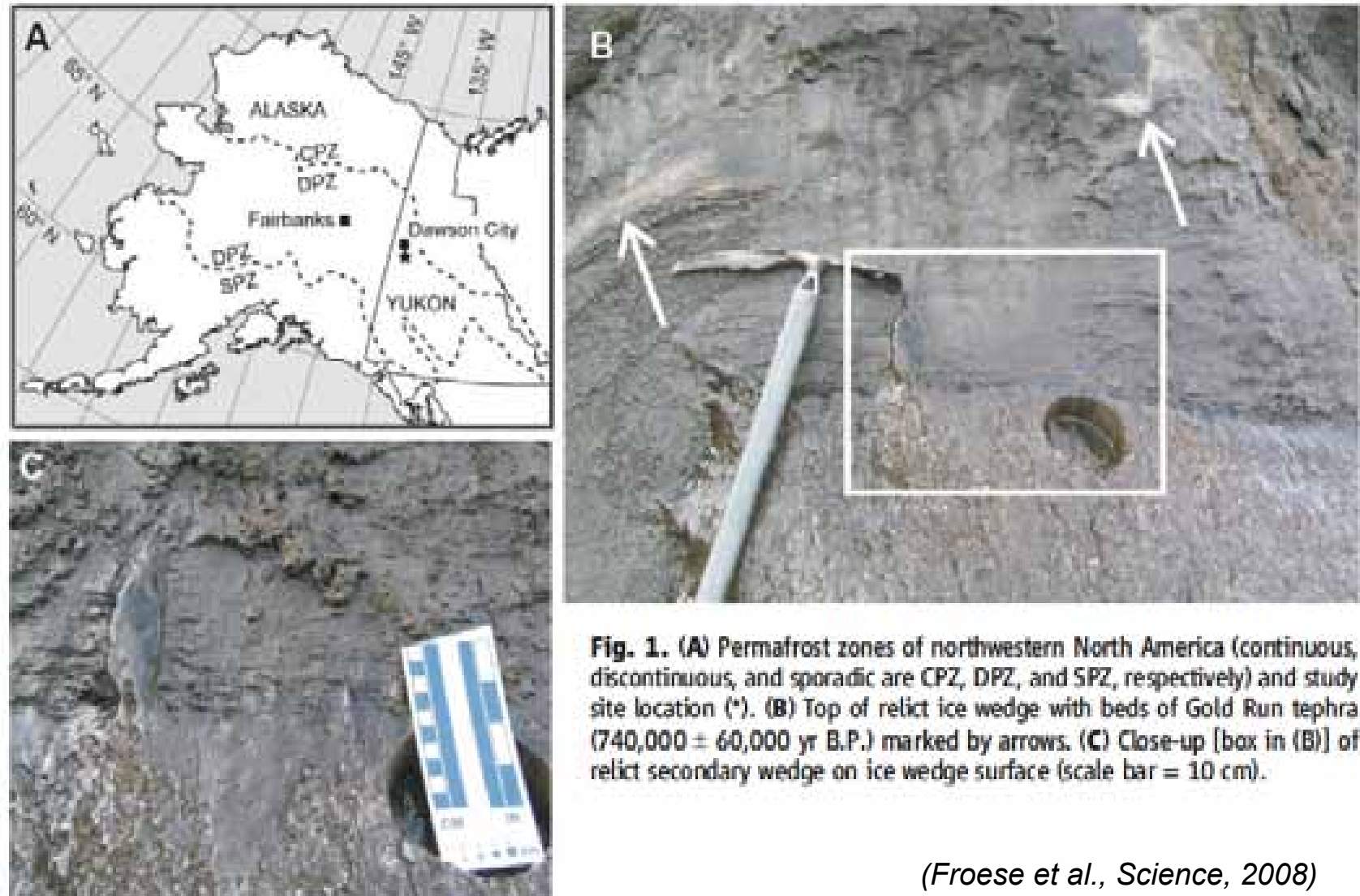
(Schuur et al., Biogeoscience, 2008)

Voir présentation P. Antoine

Dégel des pergélisols : Que nous dit la paléo ?

« Pas de panique »

Glace « récalcitrante » : Vieille de 740000 ans ?



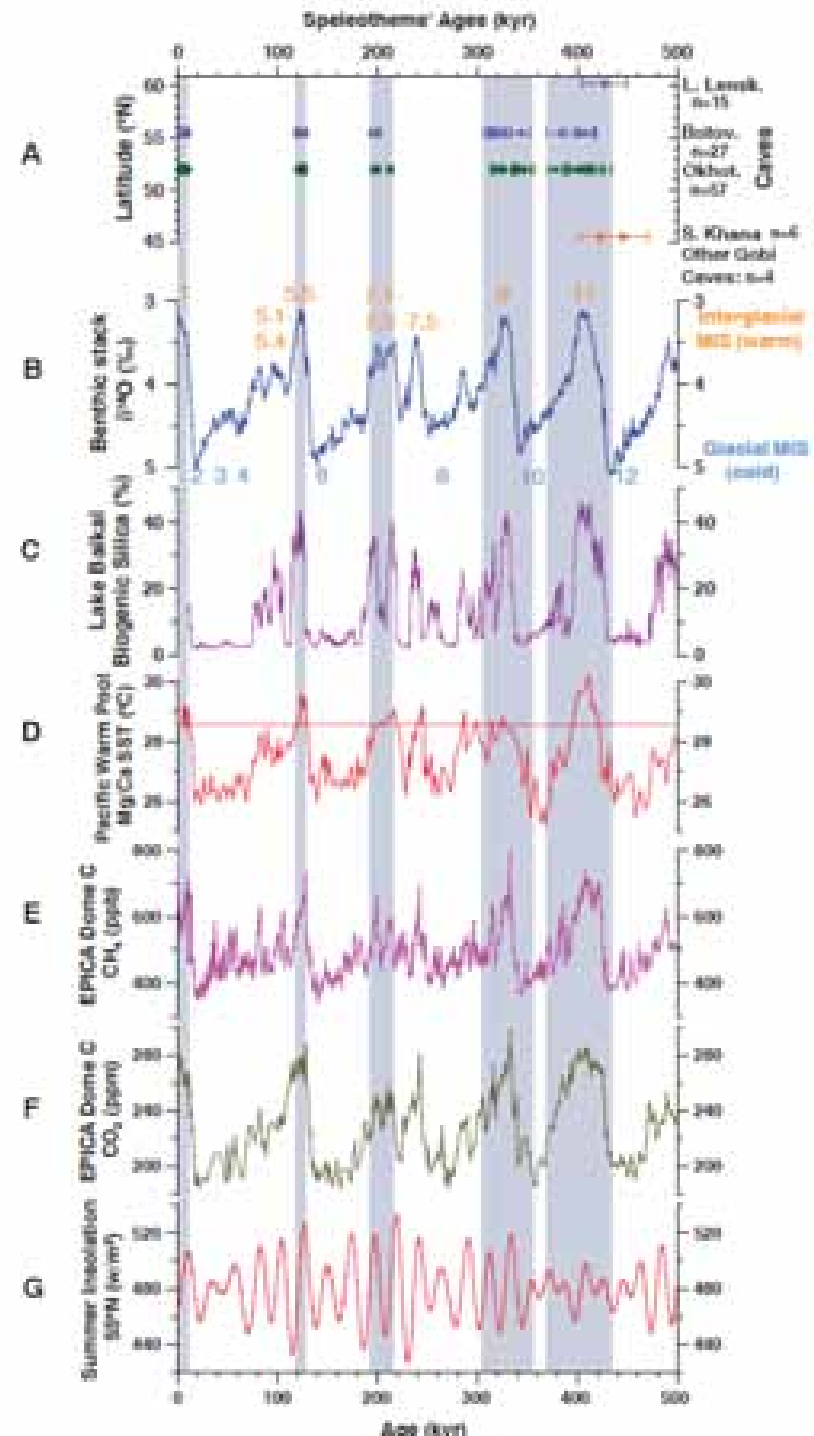
(Froese et al., Science, 2008)

« Faites attention »

Massively increased speleothem growth in Siberia in climatic conditions not very much (?) warmer than today

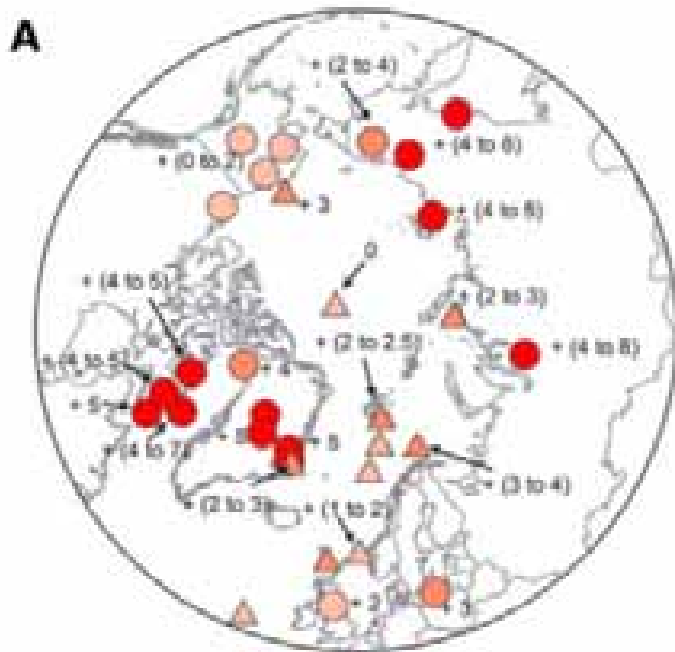


(Vaks et al., Science, 2013)

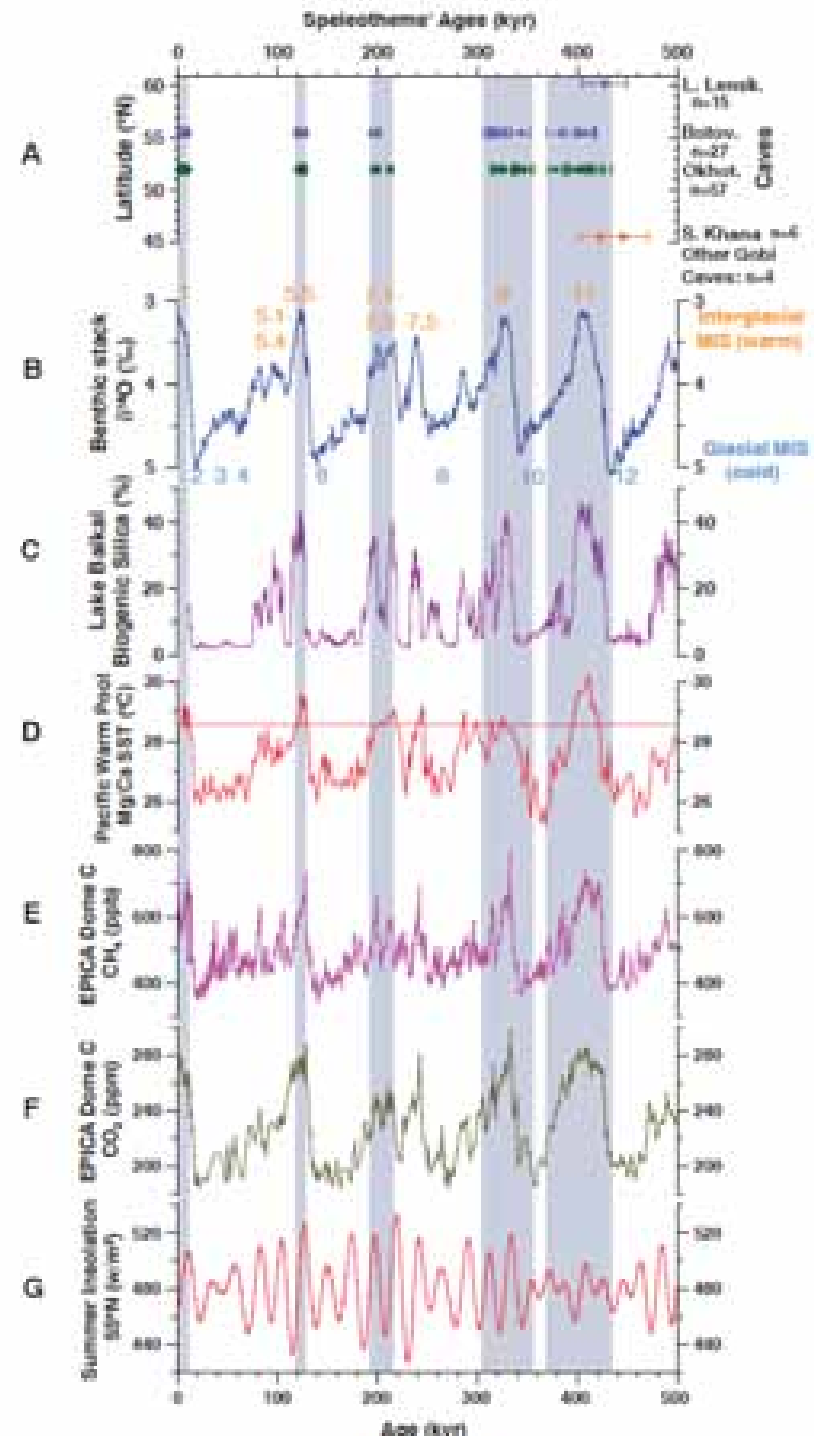


« Pas de panique »

Pas d'augmentation massive de CO₂ à l'Eemien malgré des étés plus chauds, réservoirs de carbone anciens toujours présents

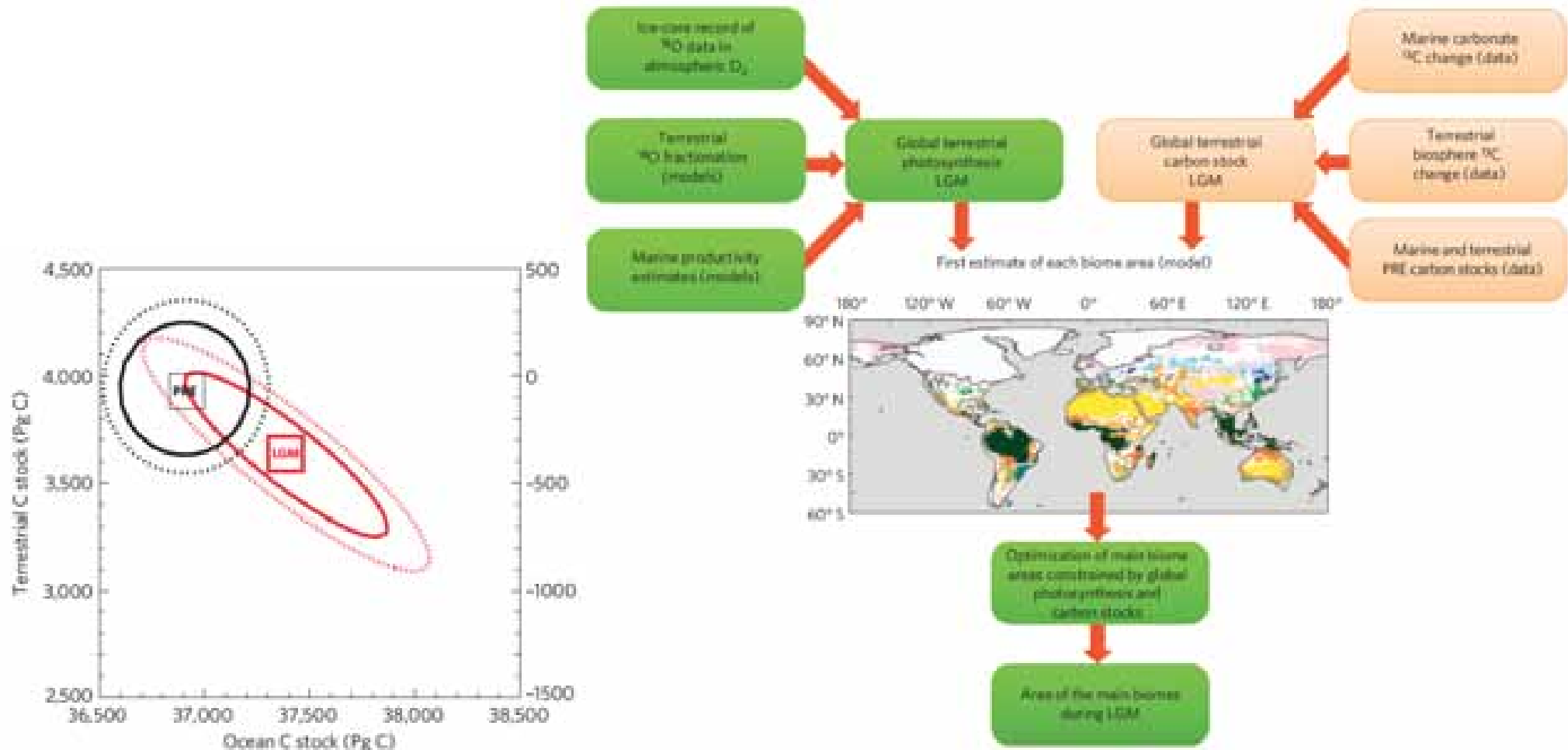


(Otto-Bliesner et al., Science, 2006)



Forte rétroaction climat-carbone des pergélisols pas incompatible avec les données paléoclimatiques du Dernier Maximum Glaciaire

Un grand réservoir de carbone dans les pergélisols au Dernier Maximum Glaciaire (2300 PgC)?



(Ciais et al., Nature Geoscience, 2011)

Carbone-pergélisols : Que nous disent les observations ?

« Pas de panique »

Expériences de réchauffement artificiel : Pas de signe de perte de carbone au bout de 20 ans

Voir présentation J. Fouché



(Sistla et al., Nature, 2013)

(b). Effects of 14 years of greenhouse warming (2002 harvest) on tundra plant biomass

Plant biomass (g dry weight per m ²)	Treatment	Control	Greenhouse
Total aboveground (including mosses and lichens)	**	474.9 ± 32.6	748.7 ± 75.9
Vascular aboveground	***	369.5 ± 26.0	720.7 ± 85.9
Vascular belowground	*	438.3 ± 88.7	712.4 ± 70.6
Total aboveground and vascular belowground	**	913.1 ± 118.9	1,524.0 ± 112.6
Deciduous shrub	*	218.7 ± 51.8	551.2 ± 119.1
Evergreen shrub	*	324.5 ± 20.5	532.2 ± 80.8
Graminoid	NS	227.0 ± 57.5	179.0 ± 92.9
Forb	***	37.6 ± 12.3	170.7 ± 44.4
Litter and standing dead	*	569.3 ± 134	758.4 ± 171.4
Moss	**	75.5 ± 10.8	16.3 ± 4.4
Lichen	*	29.9 ± 6.4	11.8 ± 6.7

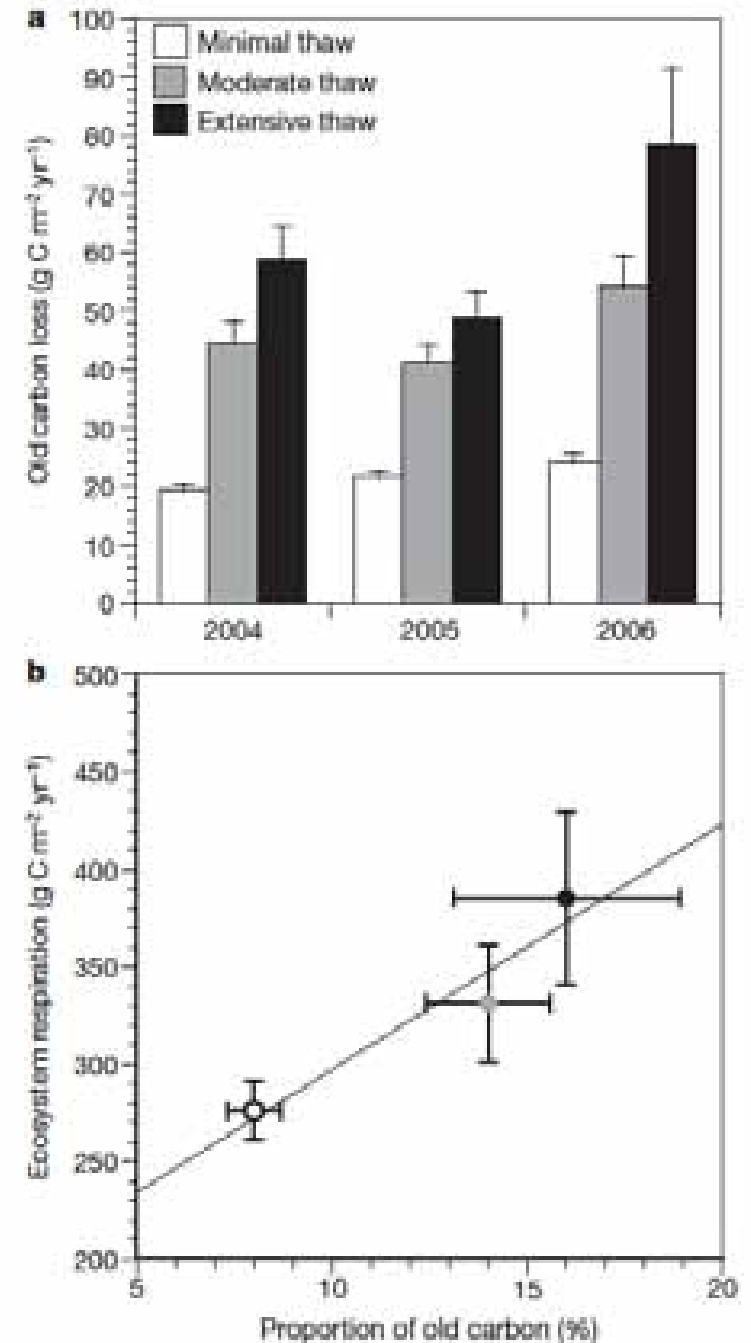
Numbers represent the mean ± 1 s.e. of plant percentage cover (sampled in 1998 and 2008), and plant biomass (sampled in 2002). **P* < 0.1, ***P* < 0.01, ****P* < 0.001 and *****P* < 0.0001 for means that differ from each other significantly at $\alpha = 0.1$ (*n* = 4).

« Faites attention »

Lors d'un réchauffement prolongé, la perte de carbone « ancien » surcompense l'augmentation de séquestration de carbone après une période transitoire

Figure 3 | Old carbon loss and its relationship to total ecosystem respiration for three sites that differ in the extent of permafrost thaw. **a**, Growing-season loss of old C from deeper in the soil profile, based on statistical partitioning estimates of mean proportional old C loss multiplied by R_{eco} flux measurements. Error bars represent the spatial variability of R_{eco} fluxes. **b**, The relationship between total R_{eco} and proportional old C loss for the growing season across sites. Error bars represent the interannual variability in C loss estimates; the regression line is shown for $n = 3$ sites.

(Schuur et al., Nature, 2009)

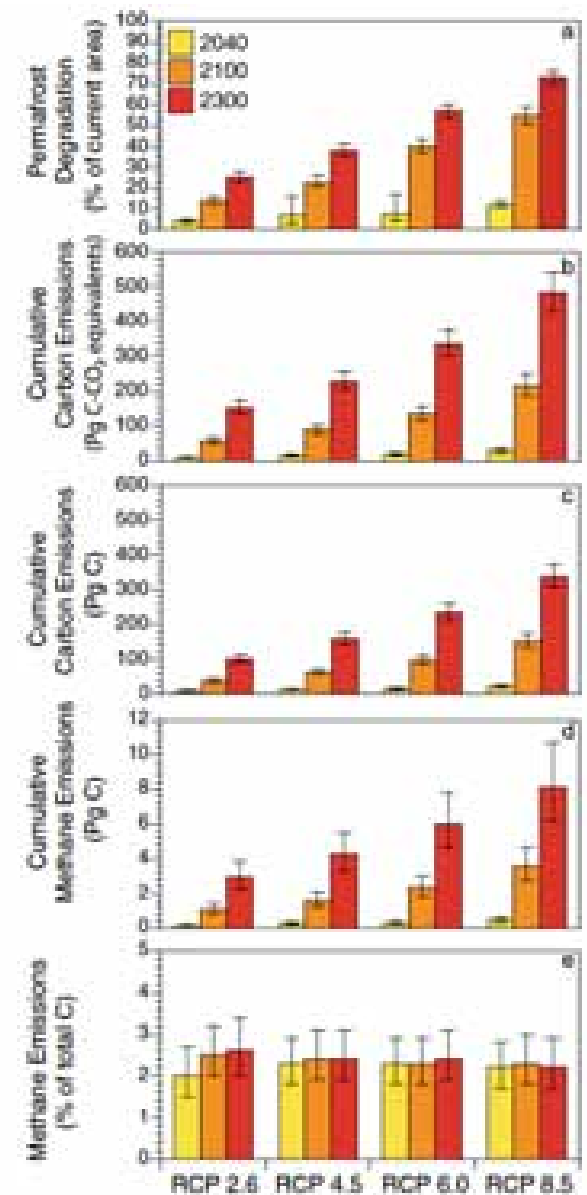


En gros, on n'en sait rien....

« Expert assessment » fait apparaître de larges incertitudes

Fig. 1 Expert survey responses for cumulative a surface permafrost degradation, b carbon emissions (CO₂-equivalents using 100-year GWP), c carbon emissions (by mass), d methane emissions (by mass), and e relative methane emissions (%), over three time frame (2040, 2100, 2300) in response to four IPCC global warming scenarios. Values are means and standard error

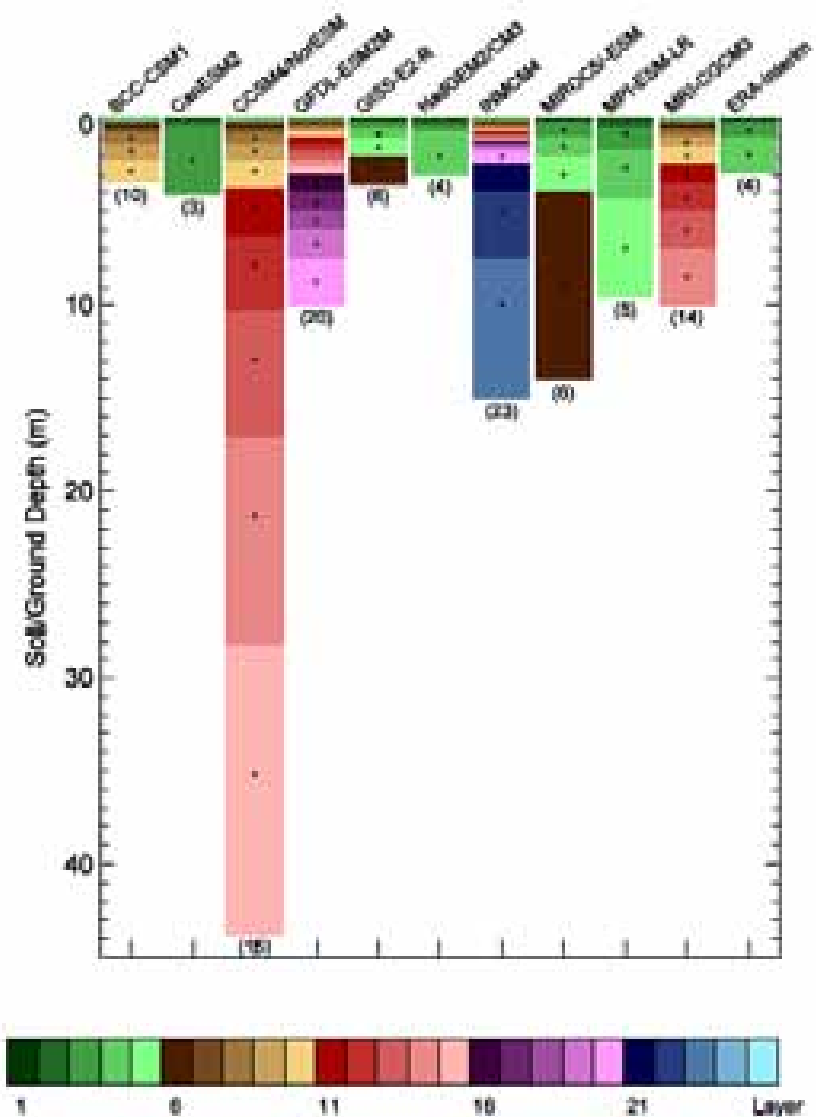
(Schuur et al., Climatic Change, 2013)



Les pergélisols dans les modèles globaux

- Typical horizontal resolution : 200 km
- Time step : $\approx 15'$
- Energy balance at the surface :
 - Visible & infrared, up & down
 - Latent & sensible surface heat flux
 - Ground heat flux
- Conserving water & energy
- Soil processes strongly simplified

Global climate models usually only simulate « near-surface permafrost »



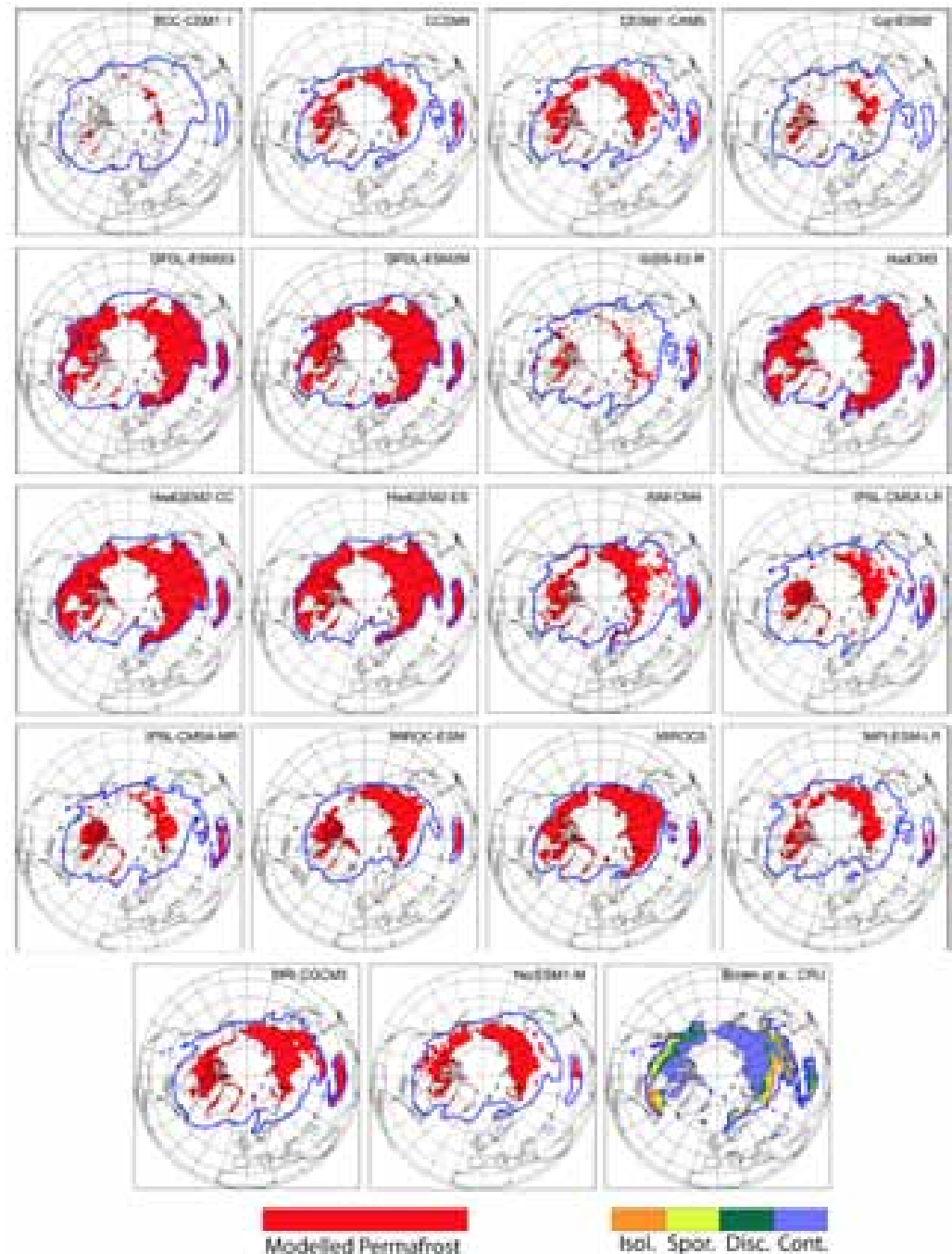
(Slater and Lawrence, *J. Climate*, in press)

Model simulations of present « near-surface permafrost » extent

Large dispersion

Main reasons :

- Snow not well represented
 - Physical properties
 - Mass
- Insulation by surface organic layer



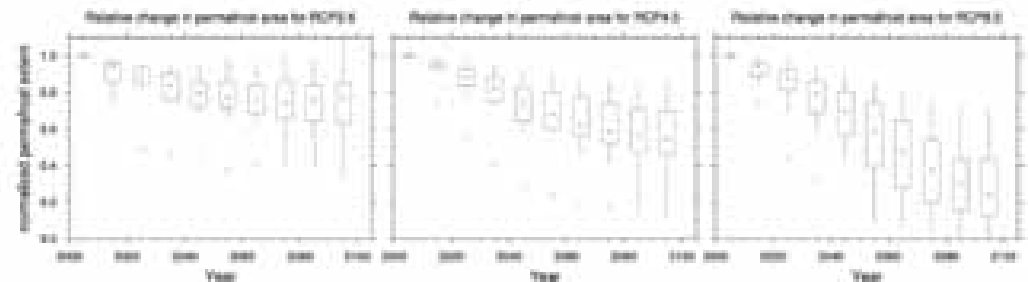
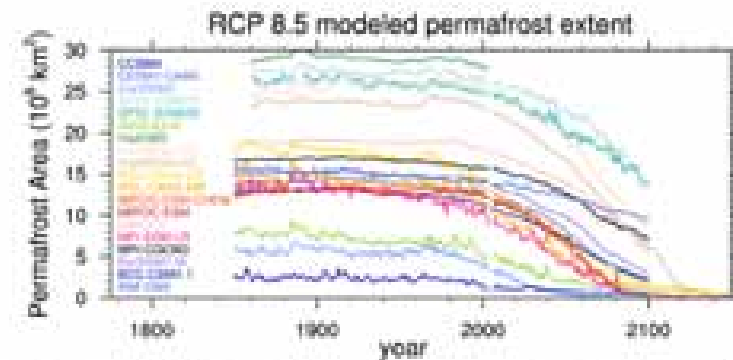
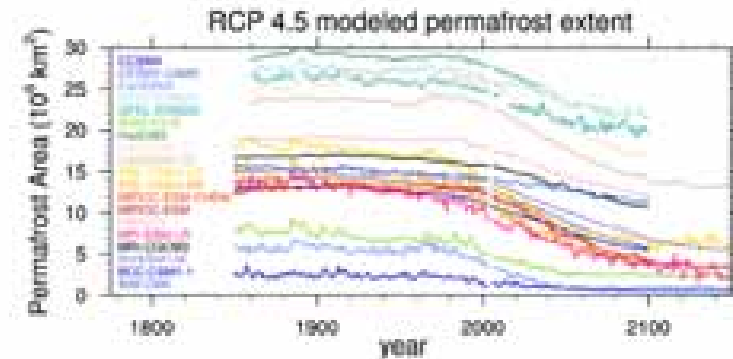
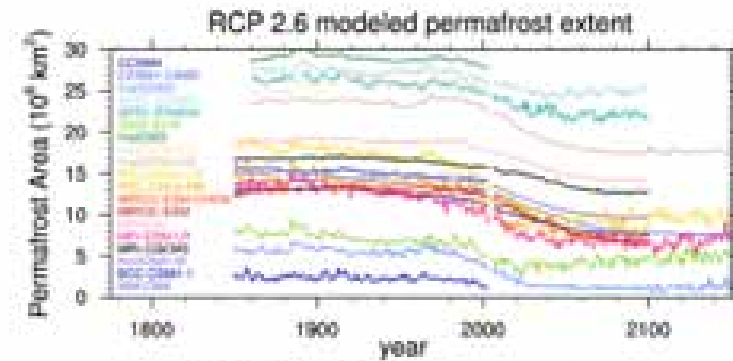
(Koven and Ridley, *J. Climate*, in press)

Model projections of « near-surface permafrost » extent changes

Large dispersion

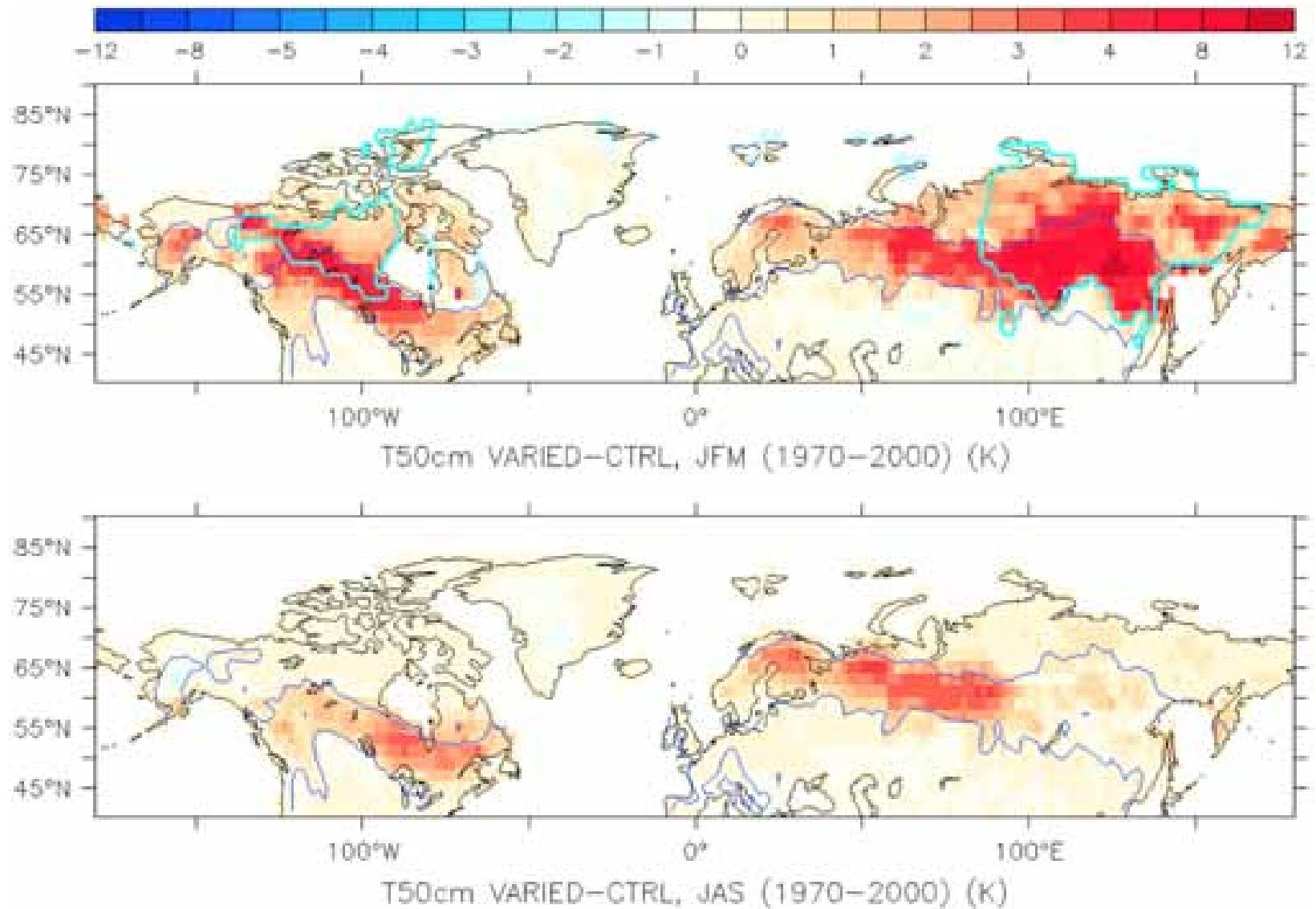
Reasons:

- Snow not well represented
 - Physical properties
 - Mass
- Insulation by surface organic layer



(Koven and Ridley, *J. Climate*, in press)

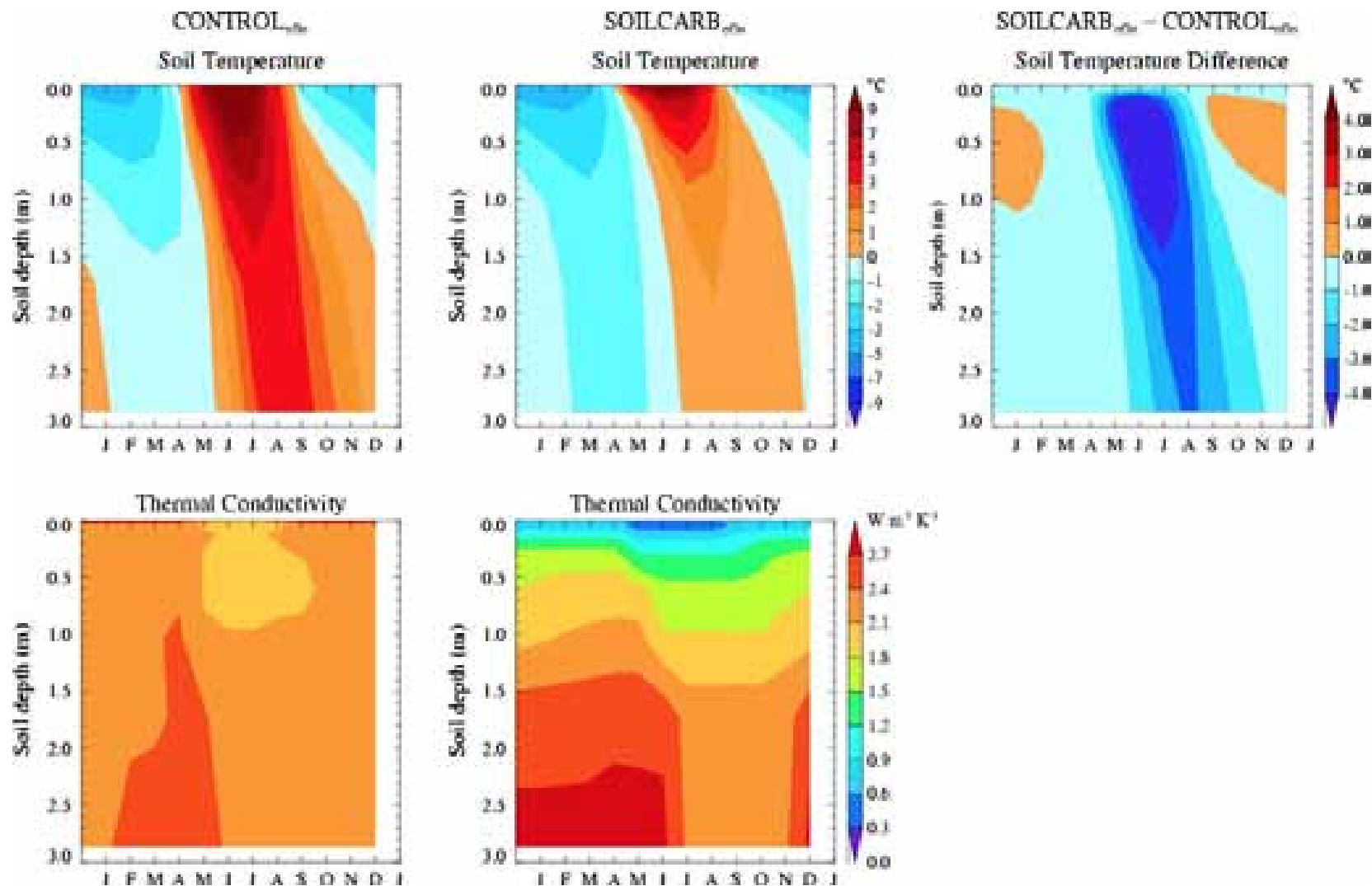
Neige : Conductivité thermique très variable



Isolation réchauffe le sol en hiver

(Gouttevin et al., JGR, 2012)

Insolation du sol par la couche organique en surface



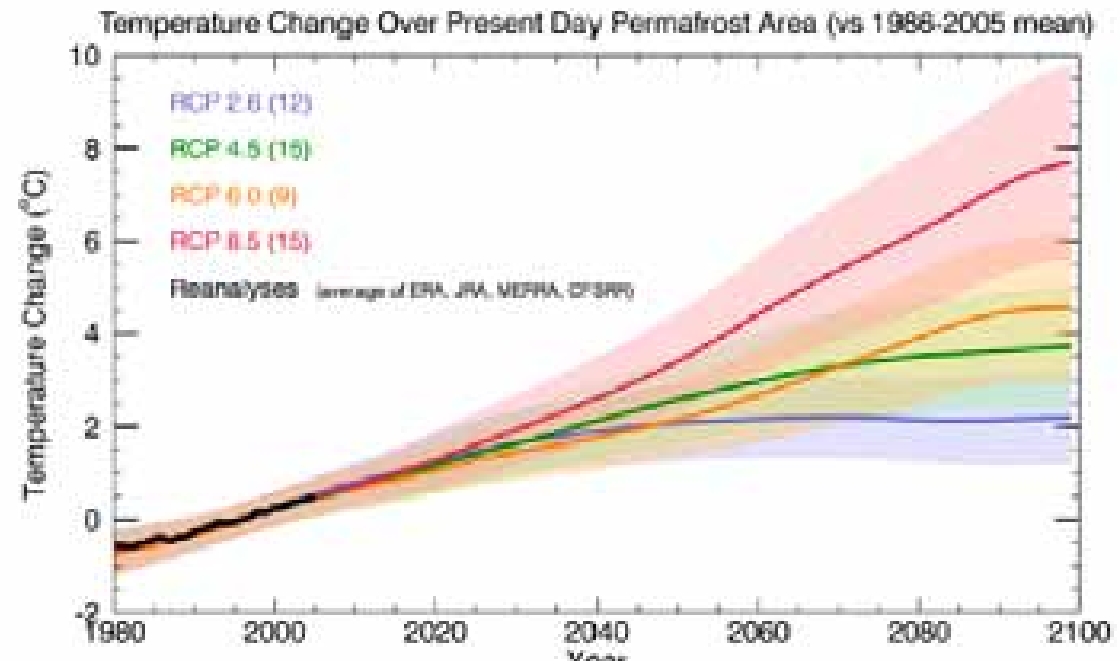
Isolation refroidit le sol en été

(Lawrence et Slater, *Clim. Dyn.*, 2008)

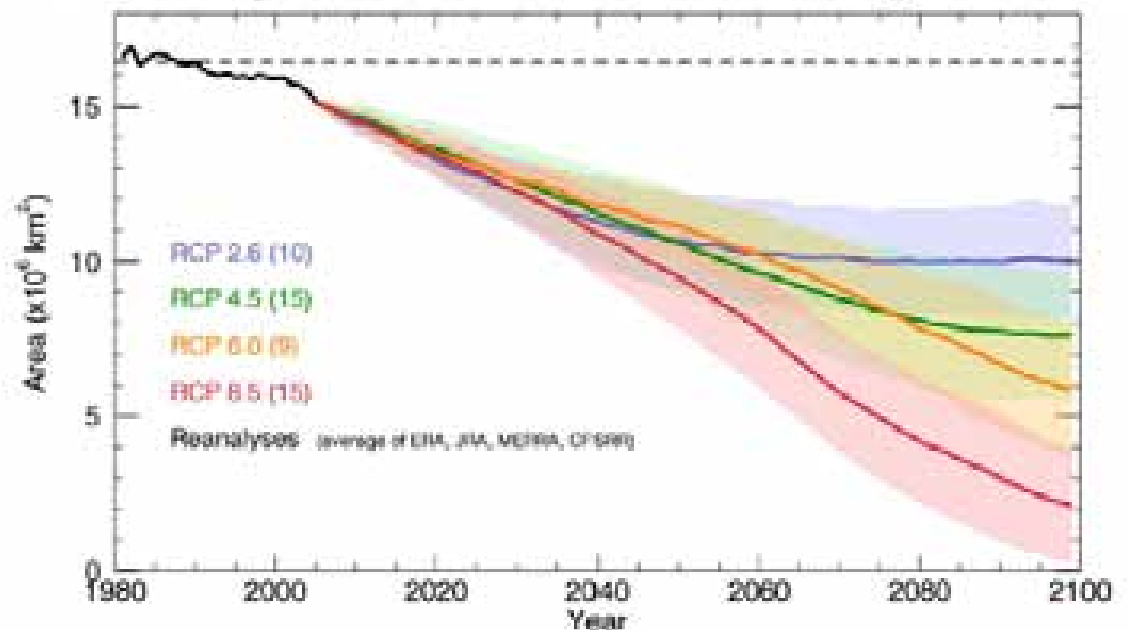
Workaround:

Diagnostic methods (e.g., surface frost index based on monthly snow height and surface temperature)

This only represents active layer thickening and talik formation

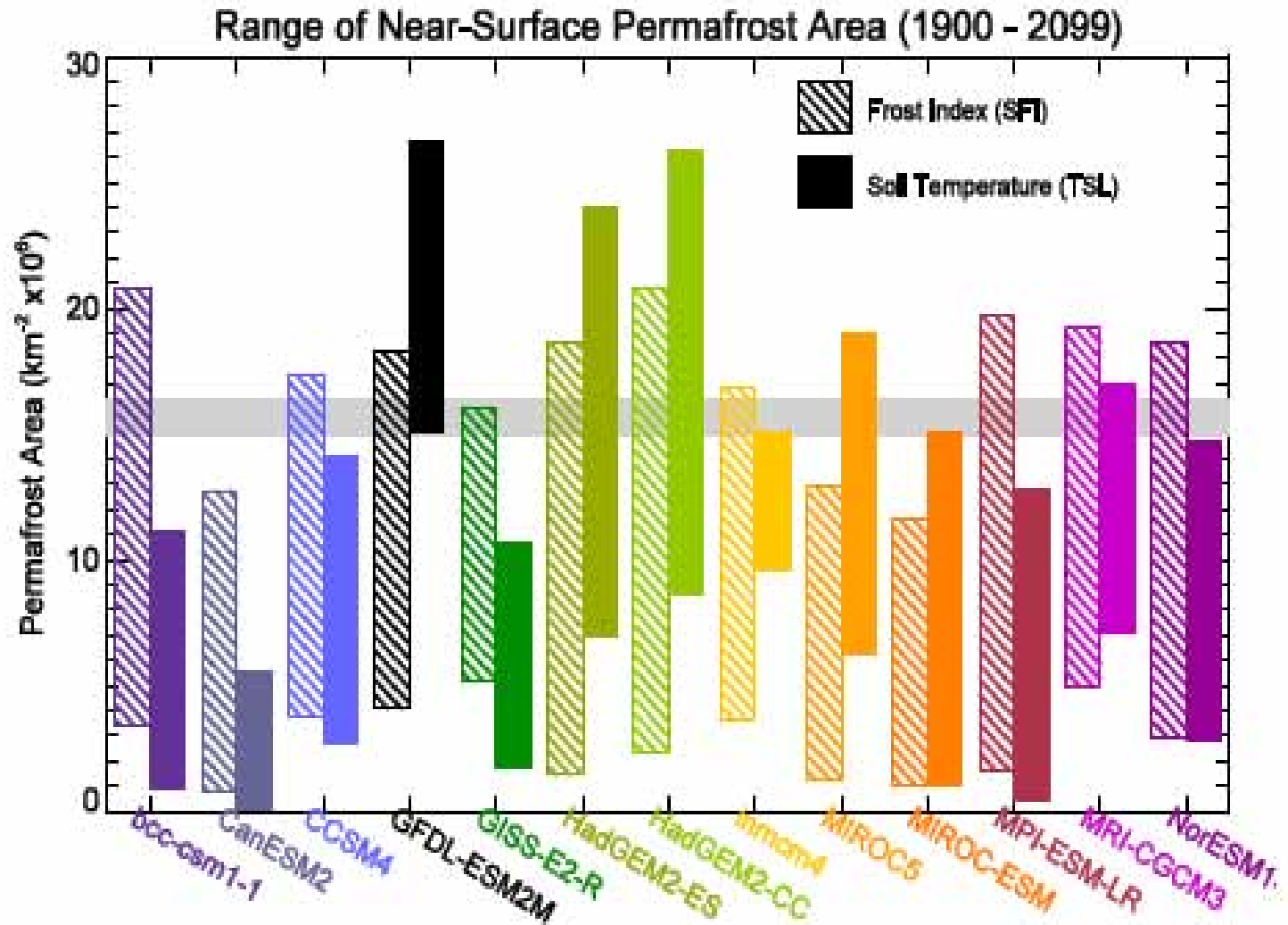


Permafrost Area (via Surface Frost Index with CMIP5 Climate Change from Present Day)



(Slater and Lawrence, *J. Climate*, in press)

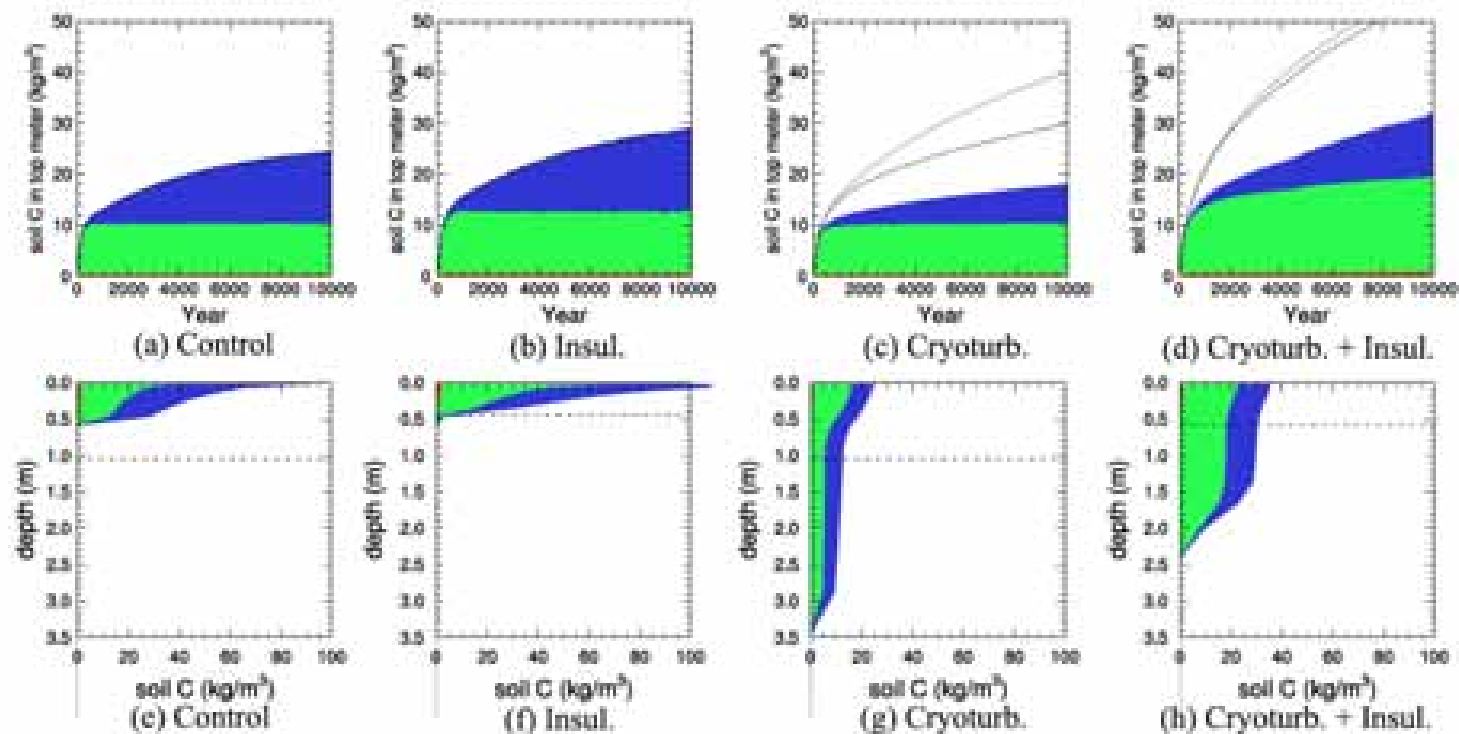
Méthodes diagnostiques : Diminution substantielle de la dispersion inter-modèles



(Koven and Ridley, *J. Climate*, in press)

Modèles de surface permafrost + carbone

Quelques modèles existent, malgré les simplifications et incertitudes



(Koven et al., GRL, 2009)

Projections des rétroactions climatiques permafrost-carbone

Résultats des modèles très variables, dépendant des processus pris en compte

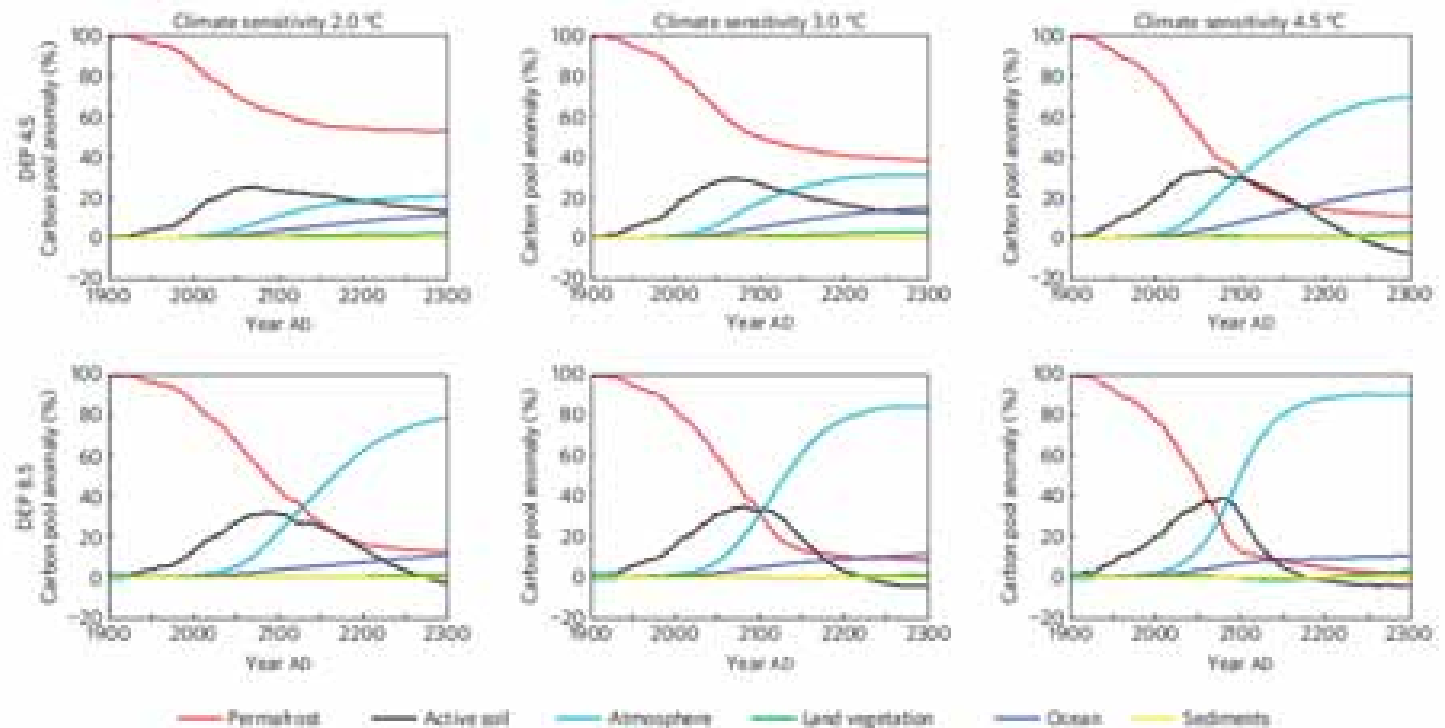


Figure 2 | Changes in the size of each Earth system carbon pool in response to the addition of permafrost carbon to the UVic ESCM. That is, the difference in the size of each carbon pool between simulations with and without permafrost carbon (and a summation of all of the pools adds up to 100% for each year). Results are given for two emissions pathways (DEPs 4.5 and 8.5) and for three climate sensitivities to a doubling of CO₂ (2.0, 3.0, and 4.5 °C). Soil layers that thaw but are subsequently returned to a permafrost state continue to be administered by the active soil carbon pool, leading to the apparent high rate of transfer of carbon to the active soil carbon pool in the twentieth century.

(McDougall et al., Nature Geosciences, 2012)

Amplification du changement climatique

.. avec de larges incertitudes :
entre 0 et 25% de réchauffement global supplémentaire, en fonction du modèle et du scénario

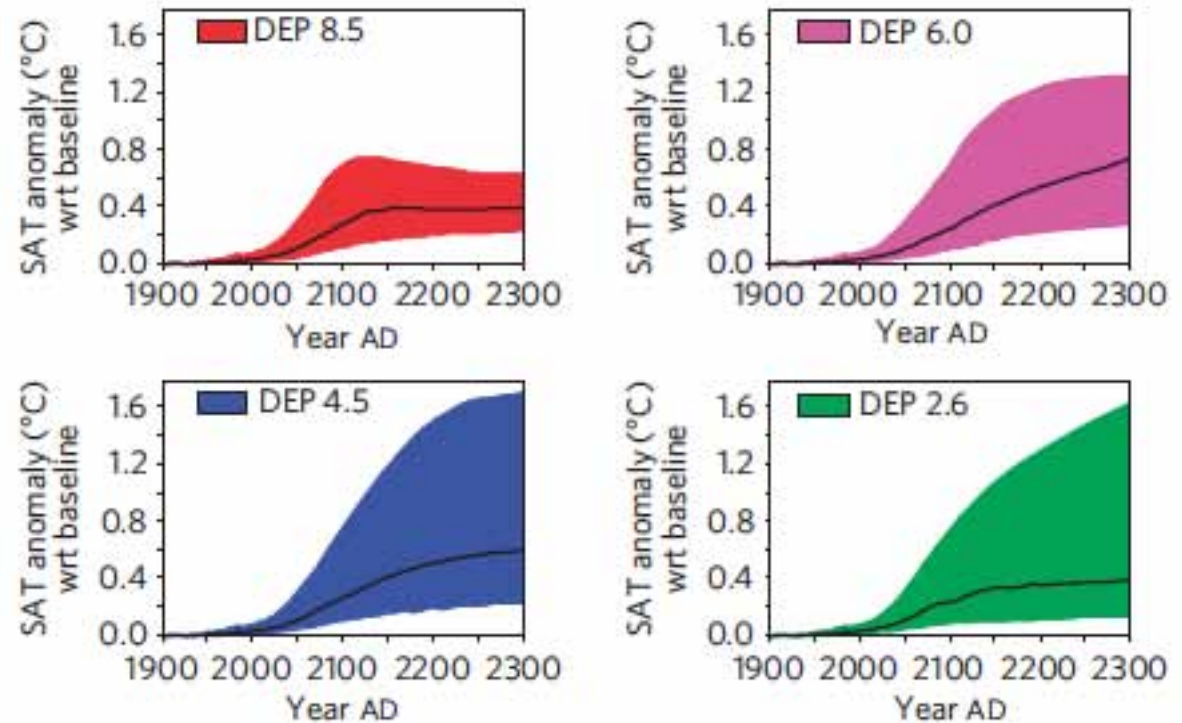


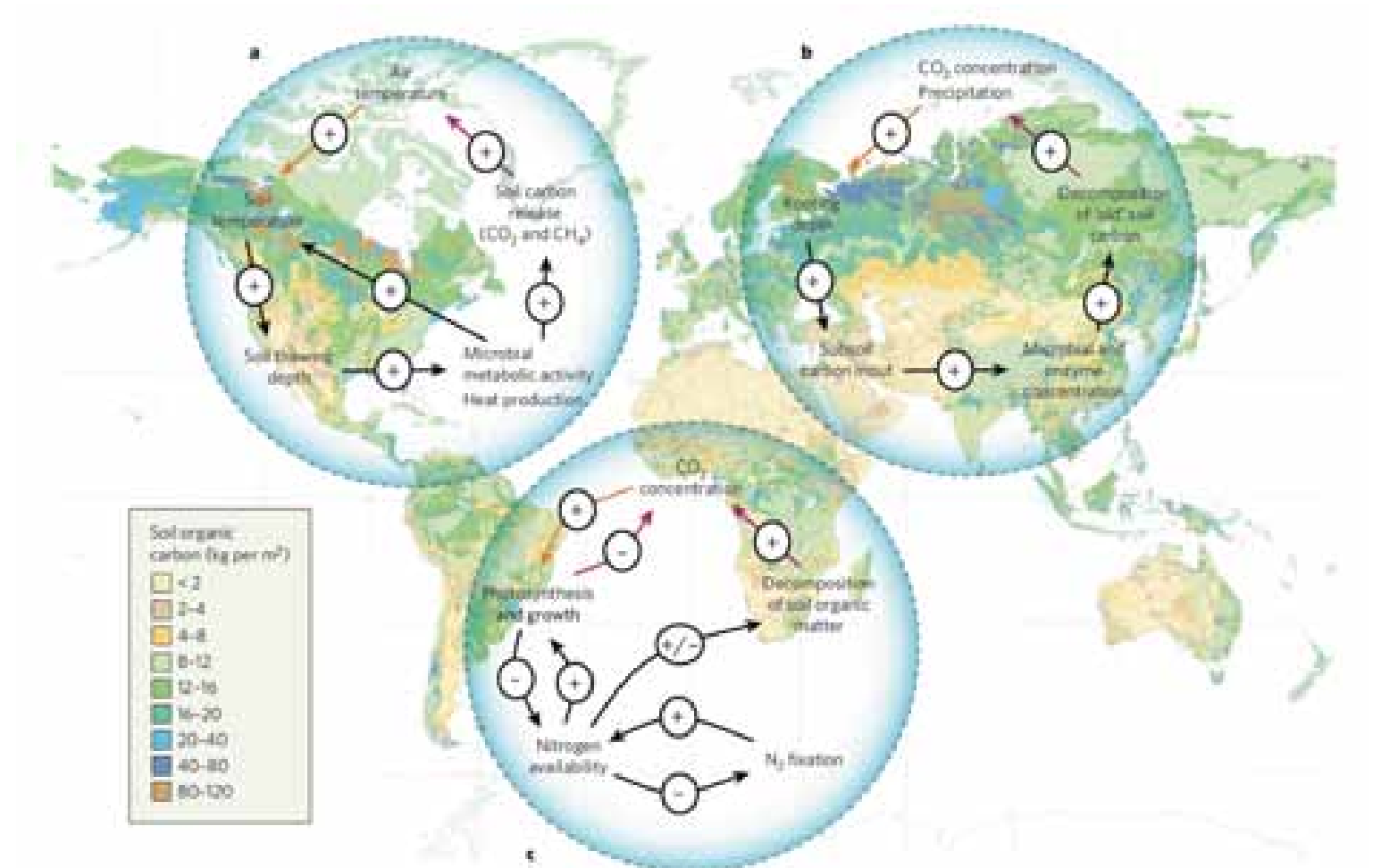
Figure 1 | Global average surface air temperature anomaly with respect to baseline runs with no carbon sequestered in permafrost soil layers. Coloured areas are the likely surface air temperature (SAT) anomaly ranges for each DEP. The median for each DEP is superimposed as a black line. Note that the upper bounds for the two low-emission pathways (DEP 2.6 and 4.5) have the greatest surface air temperature anomaly (but not the greatest total warming).

(McDougall et al., *Nature Geosciences*, 2012)

Processus pas (ou pas toujours, ou mal) pris en compte

« Compost bomb »

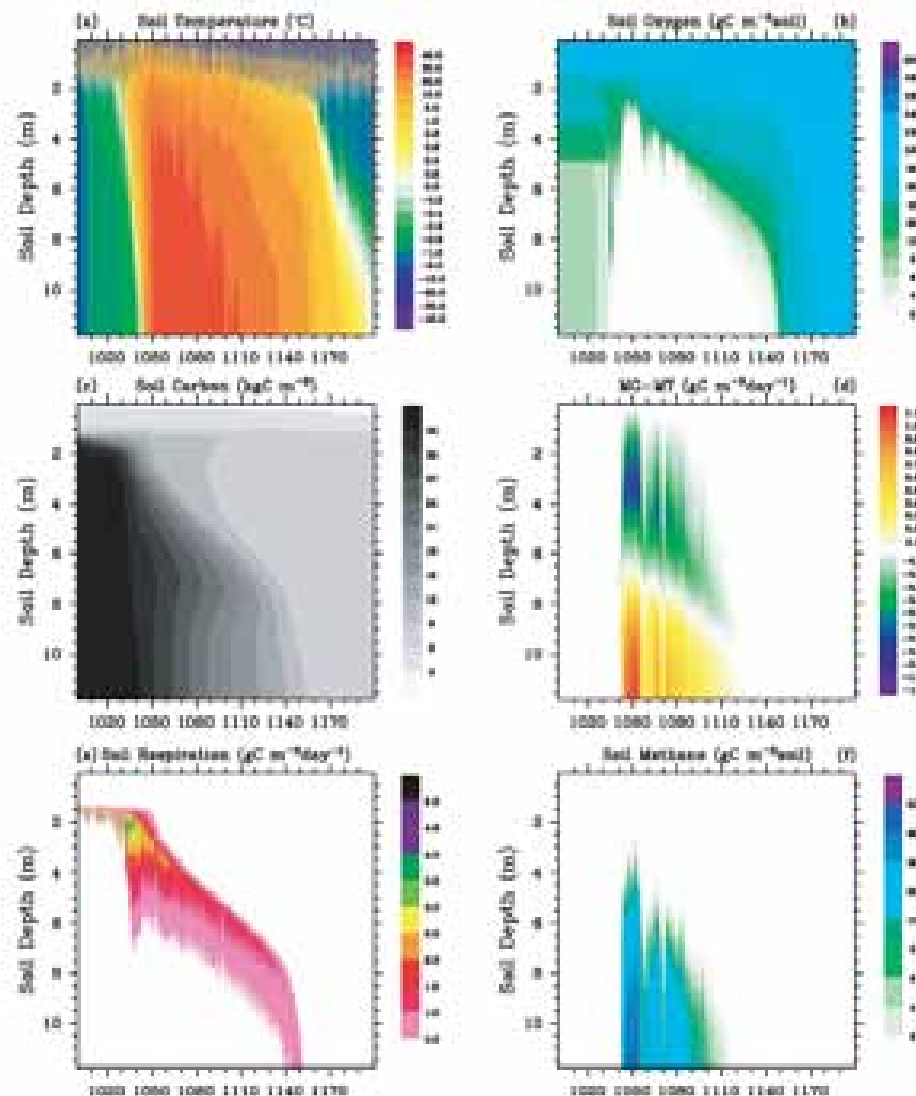
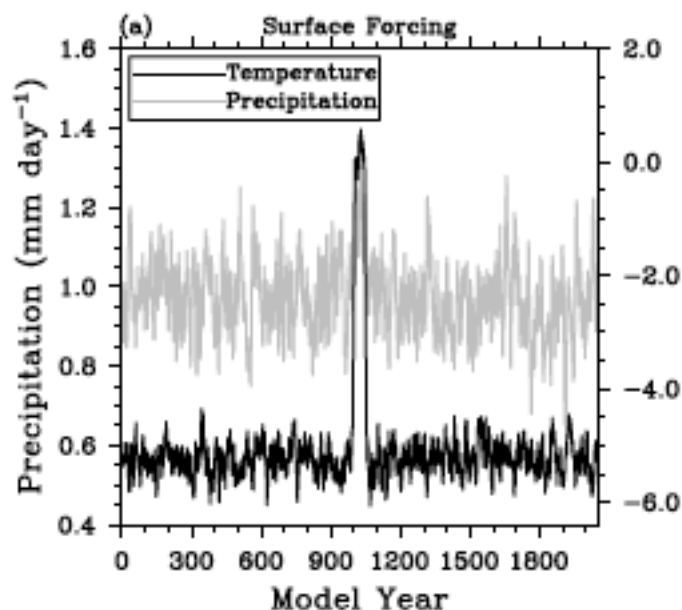
Réchauffement du sol par l'activité microbienne



(Heimann et Reichstein, Nature, 2008)

La « Compost bomb » fonctionne en théorie au moins... dans des conditions particulières :

- Fort réchauffement rapide en surface
- Très haute concentration de carbone organique dans le sol



(Khvorostyanov et al., Tellus, 2009)

« Compost bomb »: Renforcement de la boucle de rétroaction positive climat-carbone du permafrost

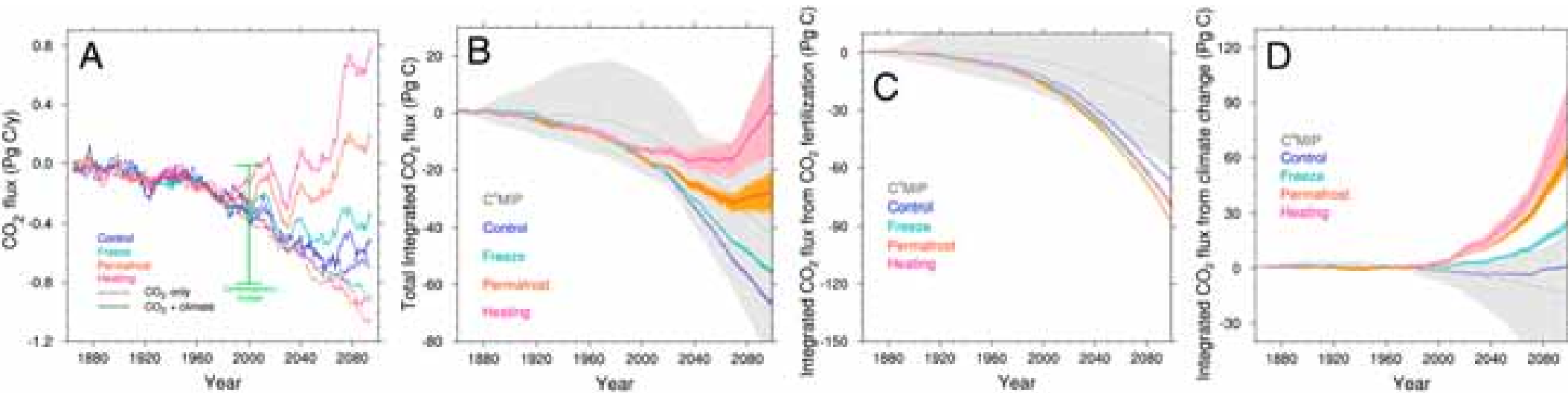


Fig. 2. Change in carbon fluxes over the model run. (A) Mean fluxes over modeled period. Contemporary budget estimate from McGuire et al. (1) (B) integrated changes. (C) Integrated changes in carbon balance due to rising CO₂ concentration alone. (D) Integrated change in carbon balance due to climate change alone (difference between CO₂-only and CO₂+climate change).

(Koven et al., PNAS, 2011)

De manière plus générale :

- Progrès à faire dans la compréhension de l'activité microbienne (sensibilité à la température, humidité ; modifications de la composition)
- Représentation dans les modèles

Zones humides, lacs, lacs de thermokarst

Observations indiquent des variations de l'étendue :

- Meilleur drainage là où le permafrost disparaît en profondeur
- Formation de lacs de thermokarst où le pergélisol commence à se dégrader
- Important pour échanges d'énergie et eau, réservoirs de carbone et émissions de CH₄

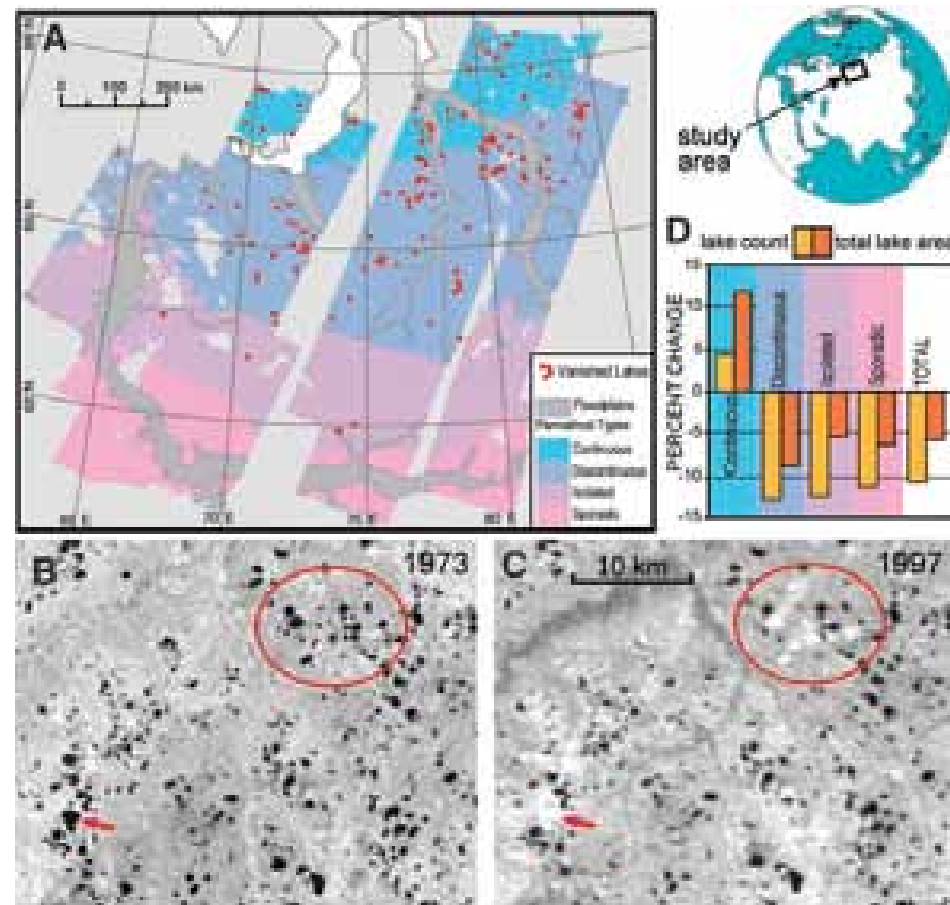


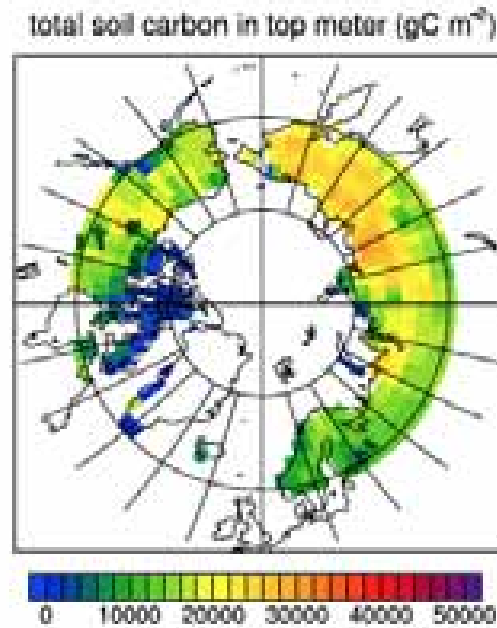
Fig. 1. (A) Locations of Siberian lake inventories, permafrost distribution, and vanished lakes. Total lake abundance and inundation area have declined since 1973 (B), including (C) permanent drainage and revegetation of former lakebeds (the arrow and oval show representative areas). (D) Net increases in lake abundance and area have occurred in continuous permafrost, suggesting an initial but transitory increase in surface ponding.

Voir présentation E. Zakharova

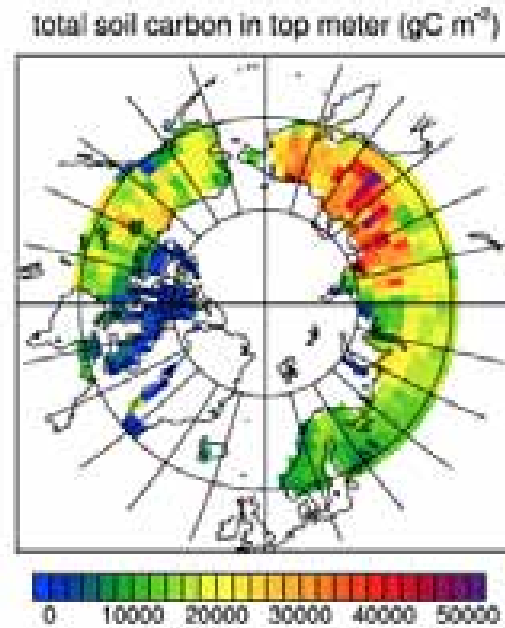
(Smith et al., Science, 2005)

Tourbières

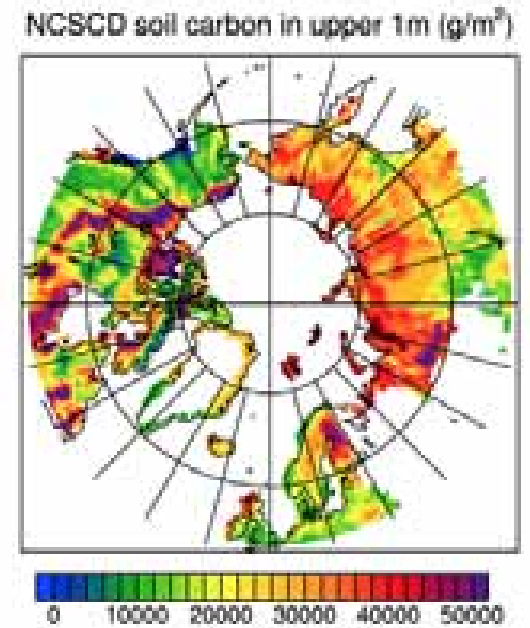
« Hot spots » en termes de carbone dans le sol



(a) ORCHIDEE
control SOM



(b) ORCHIDEE
exp. SOM



(c) NCSCD SOM

(Koven et al., GRL, 2009)

Cycle de vie du thermokarst : Processus lent

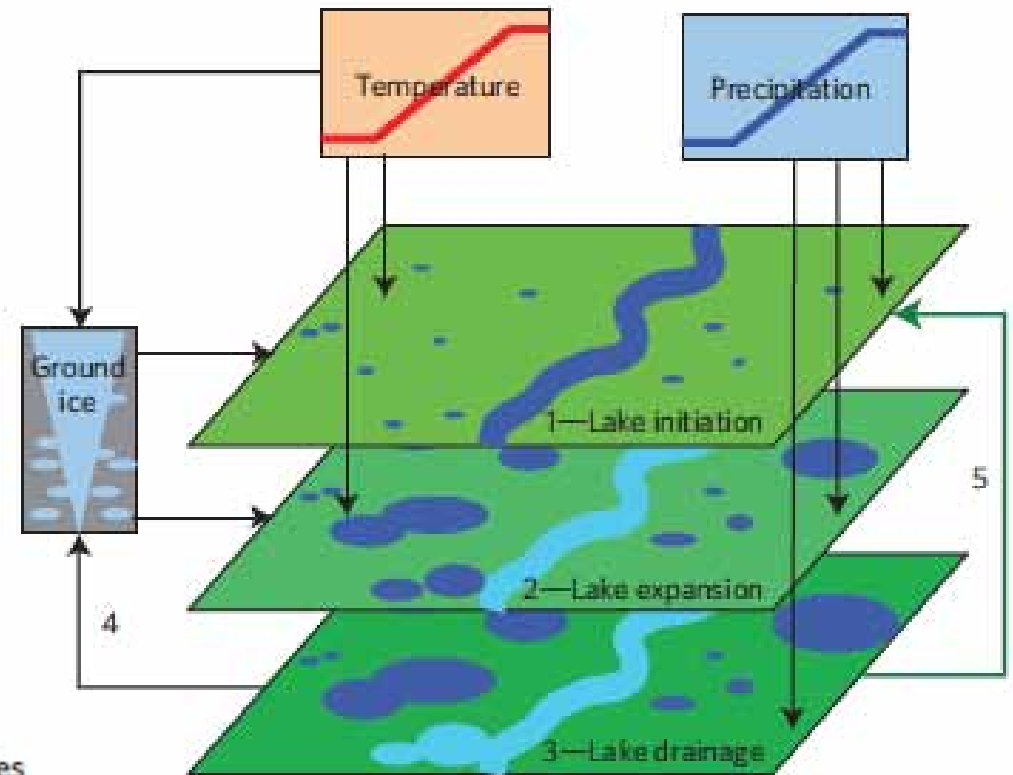


Figure 1 | Schematic of the thaw-lake cycle model. The rate of lake initiation (1) and subsequent expansion (2) is determined by air temperature, precipitation and ground ice content. Lake formation creates thawed permafrost underneath the lake. Subsequent drainage of lakes by river erosion (3) is determined by precipitation. After lake drainage, new ice-rich permafrost may be established (4), after which new lakes may form in the same area (5).

(van Huissteden et al., Nature Geosciences, 2011)

Lacs de thermokarst : réponse transitoire à un changement climatique

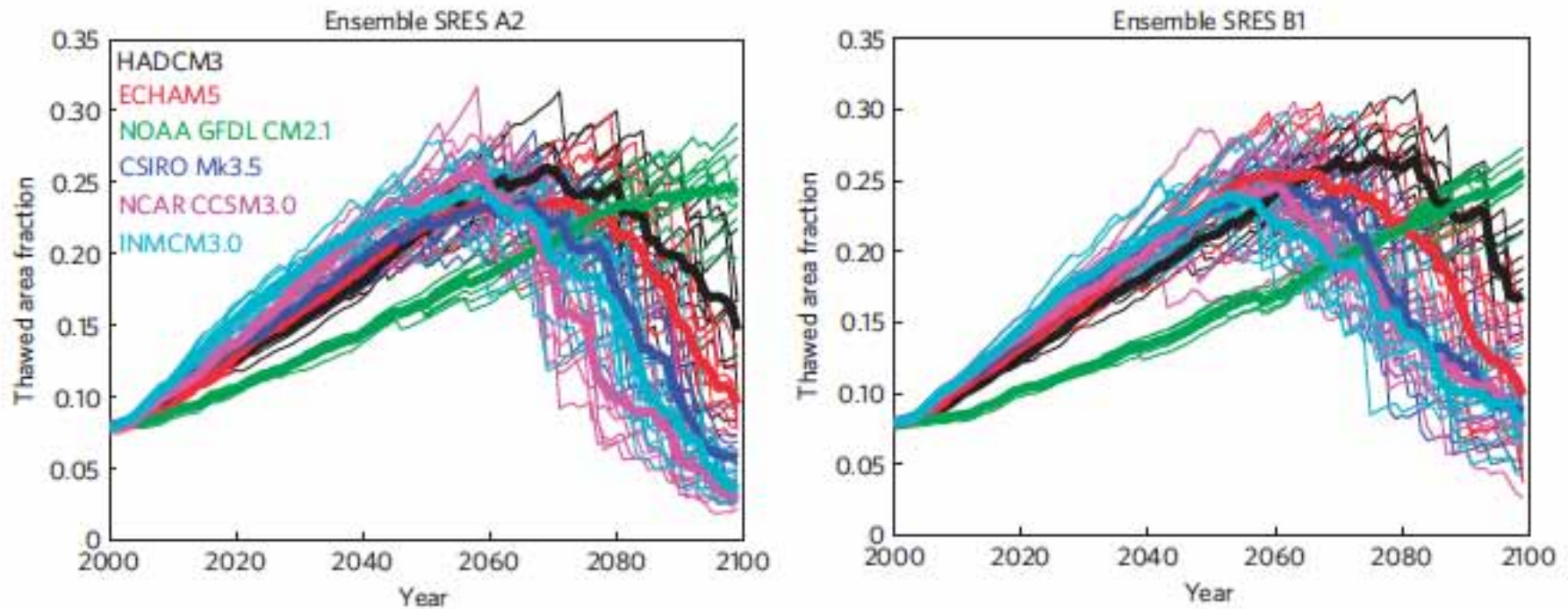
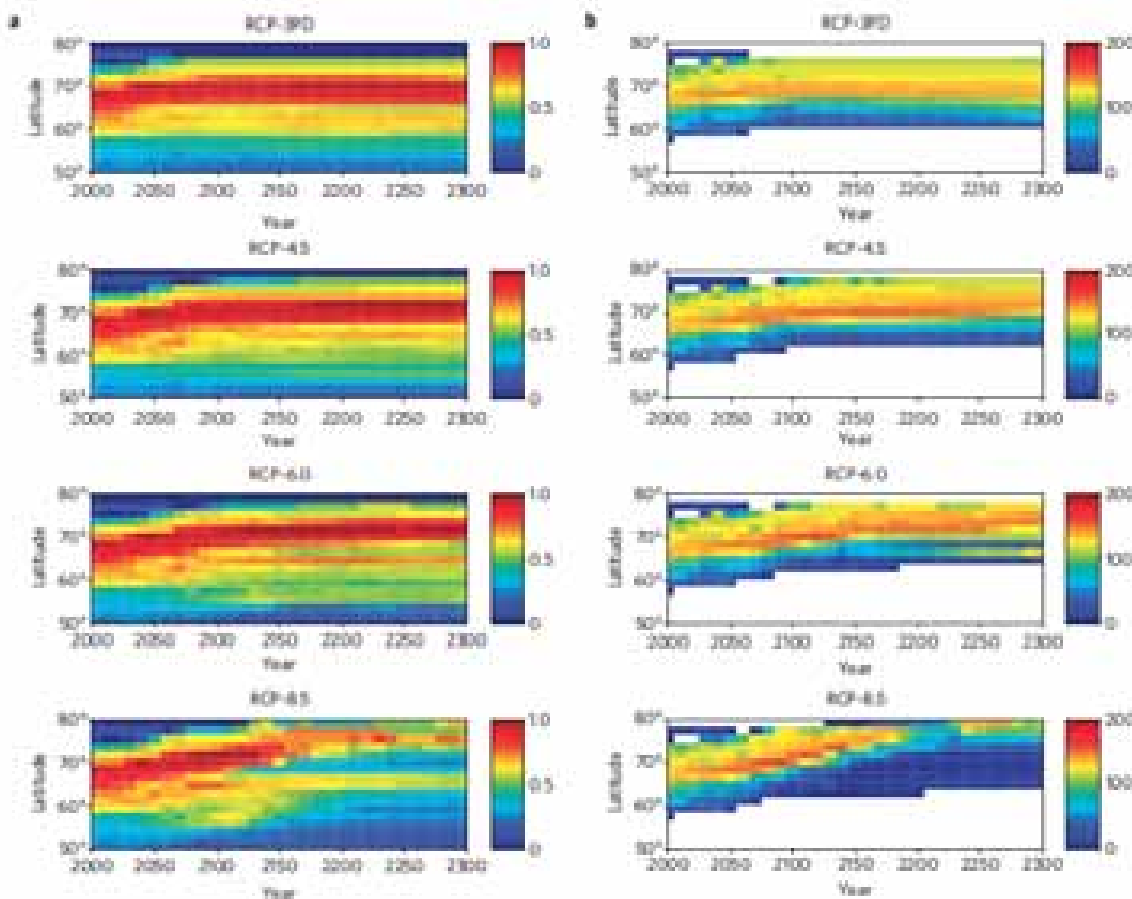


Figure 3 | Ensemble of thaw-lake model runs for climate change expected in the twenty first century. The climate input is derived from six climate models for SRES A2 and B1 climate scenarios from the IPCC fourth assessment report. For every climate model, ten runs of the thaw-lake model have been carried out. The coloured lines indicate the development of the thawed area; colours indicate climate models: UK Met Office HadCM3 (HADCM3), Max Planck Institute for Meteorology ECHAM5 (ECHAM5), NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory CM2.1 (NOAA GFDL CM2.1), CSIRO Atmospheric Research Mk3.5 (CSIRO Mk3.5), National Center for Atmospheric Research CCSM3.0 (NCAR CCSM3.0) and Russian Institute for Numerical Mathematics INMCM3.0 (INMCM3.0). The thick lines represent the average thaw-lake area for each climate model.

(van Huissteden et al., Nature Geosciences, 2011)

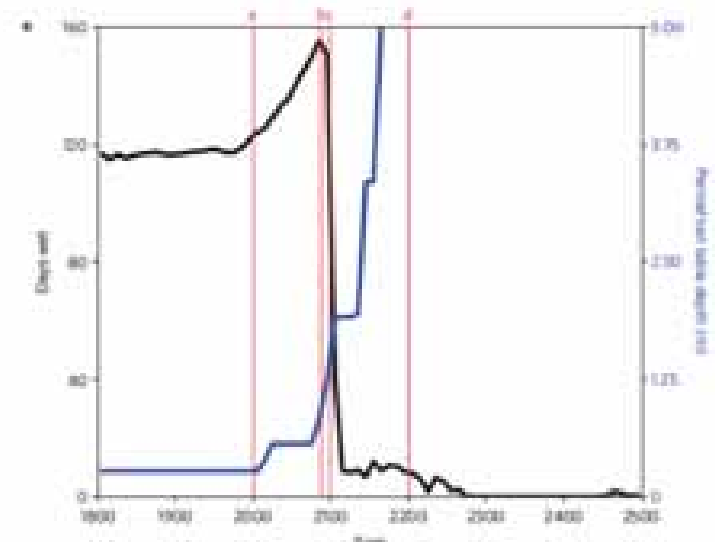
Réponse transitoire des zones humides à un changement climatique : similaire

- Augmentation transitoire (durée de dégel plus longue)
- Diminution ensuite (meilleur drainage suite à la disparition du permafrost proche de la surface)



De manière plus générale :
Hydrologie froide mal représentée.

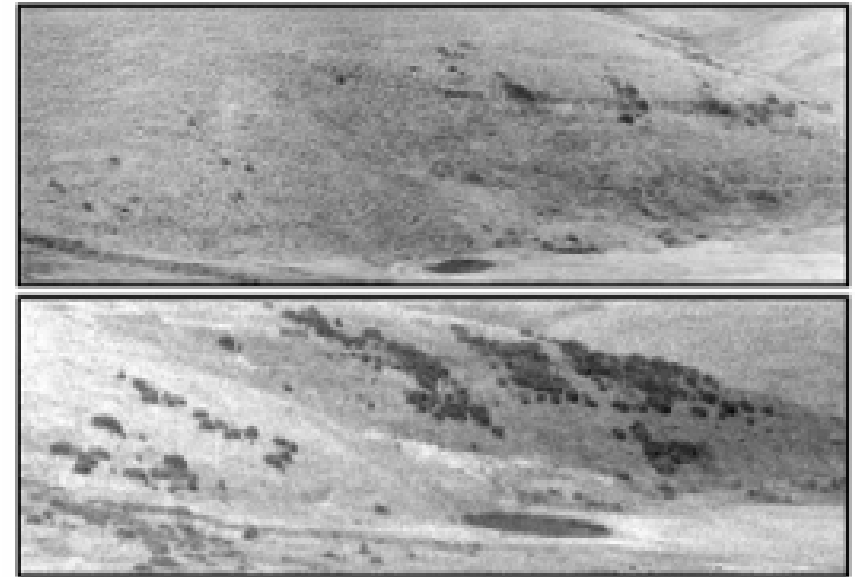
Changements futurs antagonistes :
Plus de précipitation, mais aussi
plus d'évapotranspiration, meilleur
drainage



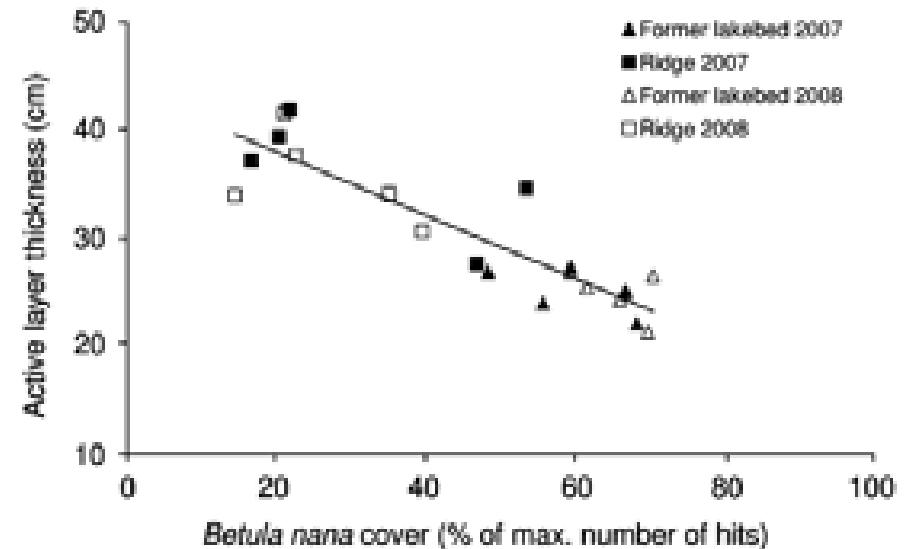
(Avis et al., Nature Geosciences, 2011)

Interactions végétation-permafrost, dynamique de la végétation

- Embuissonnement observé
- Dynamique de la végétation (arctique) souvent pas prise en compte dans les modèles
- Effet des buissons sur le sol :
 - Redistribution de la neige
 - Conductivité de la neige
 - « Protection » de la surface : diminution de l'épaisseur de la couche active
- Mais aussi : albédo plus faible

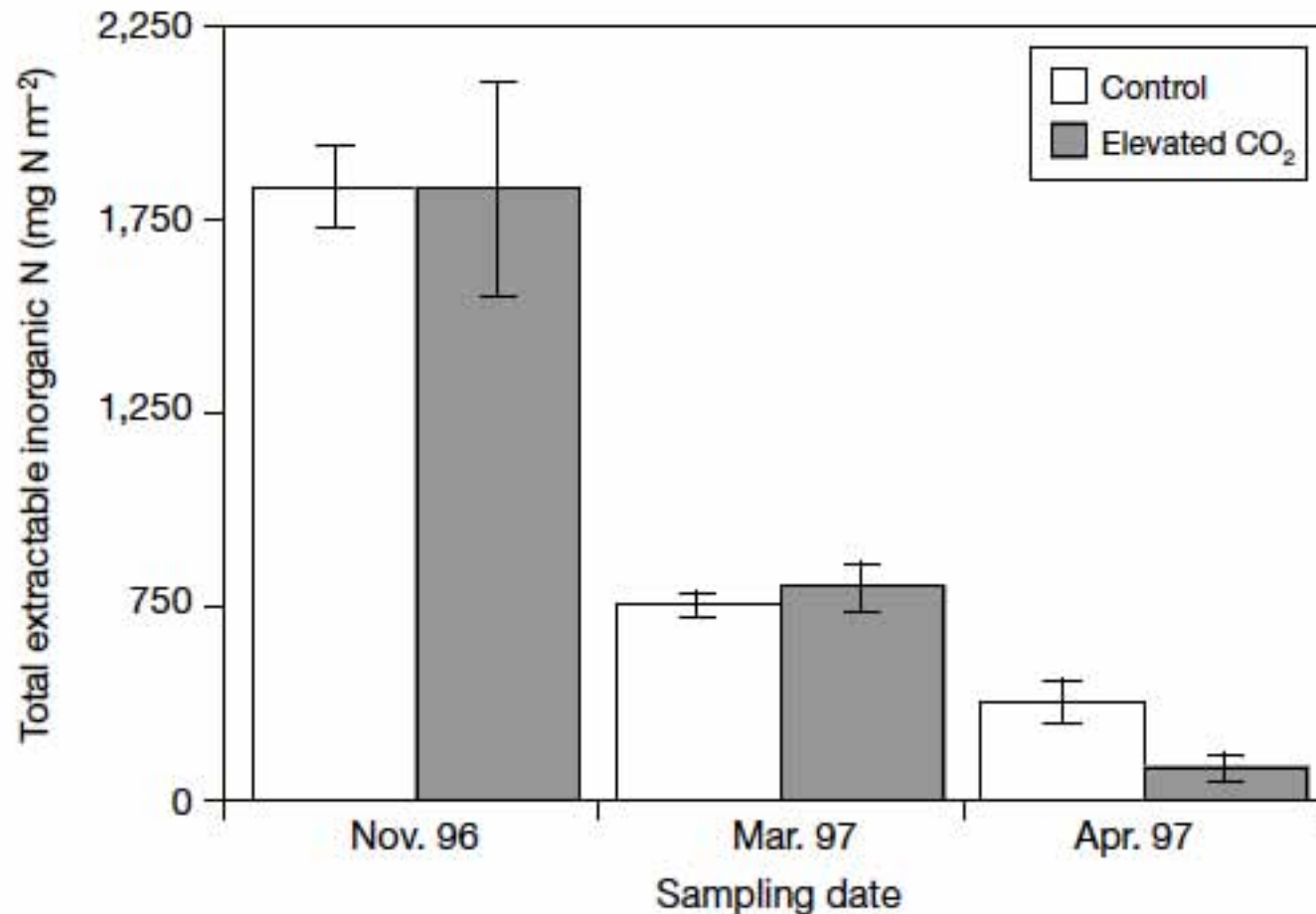


(Sturm et al., Nature, 2001)



(Blok et al., GBC, 2010)

Limitation d'azote



(Hu et al., Nature, 2001)

Limitation de l'activité microbienne dans le sol par l'azote →
Stabilisation du réservoir de carbone ?

Peut fortement ralentir la décomposition

- Rétroaction potentiellement importante, dynamique complexe
- Réchauffement global supplémentaire simulé de 0 à 25%
- (Rétro-)observations ne permettent pas de trancher
- Incertitudes sur les processus :
 - Hydrologie
 - Activité microbienne
 - Quantité, qualité et localisation de la matière organique
 - Limitation d'azote
- Touche à plusieurs disciplines : microbiologie, écologie, hydrologie, géomorphologie, climatologie
- Processus souvent mal représentés dans les modèles de grande échelle