



Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement



Doctoral Thesis

**The role of permafrost soils in the global carbon cycle on the timescales of centuries to multi-millennia. A modelling study.**

*Le rôle du pergélisol dans le cycle du carbone mondial sur les échelles de temps des siècles à plusieurs millénaires. Une étude de modélisation*

**Katherine Crichton**

Supervised by Jerome Chappellaz

Presented on

**17 October 2014, 10 a.m.**  
Salle Lliboutry, LGGE

## Abstract

This study aimed to develop a permafrost-carbon dynamic model to incorporate into the CLIMBER-2 Earth system model and to carry out simulations with a view to contributing to the knowledge of the carbon cycle. The work would, for the first time, allow a fully coupled modelling study with an earth system model which included dynamic atmosphere, ocean, vegetation and cryosphere components including frozen land to study paleoclimates. The availability of recent ice core data for CO<sub>2</sub> and δ<sup>13</sup>C of atmospheric CO<sub>2</sub> was to provide a means of validating model findings to identify whether a permafrost-carbon dynamic could have played a significant role in past changing climates.

The deep Southern Ocean is an area of particular interest for glacial-interglacial CO<sub>2</sub> variability, and current modelling efforts aim to recreate the observed CO<sub>2</sub> changes using ocean mechanisms. These are often related to deep southern ocean carbon storage and release. So far the terrestrial biosphere has not been well-considered in transient simulations of the carbon cycle in Earth system models.

A simplified permafrost-carbon mechanism was developed and validated and tuned using data from termination 1. It was found that in order to reproduce atmospheric CO<sub>2</sub> and δ<sup>13</sup>C data (for atmosphere and ocean) during the termination, a combination of glacial ocean mechanisms and the permafrost-carbon mechanism was required. Following this finding, several glacial cycles were modelled to study the sensitivity of the permafrost-carbon mechanisms to CO<sub>2</sub>, ice sheets and insolation. Ice sheet extent was found to be particularly important in controlling the land area available for permafrost and therefore the carbon dynamics of permafrost-carbon. The permafrost-carbon mechanism, via carbon release from thawing soils responding to increasing summer insolation in higher northern latitudes, was found to very likely be the source of initial rises in CO<sub>2</sub> on glacial terminations.

Termination 1 CO<sub>2</sub> data could be well reproduced, including the B-A/YD CO<sub>2</sub> plateau, when fresh water forcing was applied to the north Atlantic. Fresh water forcing experiments pointed to the importance of the permafrost-carbon mechanism in fast changing climates. Very fast increases in atmospheric CO<sub>2</sub> levels may be explained by fast soil-carbon release responding to increased heat transport to the northern hemisphere on AMOC resumption following an AMOC switch-off/reduction event, such as D/O events seen in the Greenland δ<sup>18</sup>O record. Future climate change projections represent fast warming events. Driving the model by emissions projections (RCP database) predicted increased peak CO<sub>2</sub> and much longer term elevated CO<sub>2</sub> levels relative to model outputs which did not include the permafrost carbon feedback.

Analysis of ocean δ<sup>13</sup>C must take into account the dynamics of permafrost and land carbon in general and its effect on atmospheric δ<sup>13</sup>C levels. If this is not taken into account then ocean circulation may be over-invoked in attempting to explain changes in ocean δ<sup>13</sup>C and atmospheric CO<sub>2</sub>. The findings in this work highlight that it is essential to consider land carbon dynamics when interpreting paleo-indicators for the carbon cycle.

The permafrost-carbon mechanism reacts to temperature changes and amplifies the carbon cycle's response. It is strongly dependent not only on energy input (that determines soil temperature and permafrost location), but also on the area of land available globally on which it can exist. In order to properly model and understand the Earth system response to forcing in both future and past climates, the permafrost-carbon feedback mechanism is an important system component. This work has been a first step to address the role that the land cryosphere plays in the carbon cycle and climate system on long timescales, and further studies are essential.

## Résumé

Cette étude visait à développer un modèle dynamique du pergélisol-carbone à intégrer dans le modèle CLIMBER-2 et d'effectuer des simulations en vue de contribuer à la connaissance du cycle du carbone. Ce travail pourrait, pour la première fois, permettre une étude de modélisation avec un modèle de système terrestre qui comprendrait l'atmosphère dynamique, l'océan dynamique, la végétation dynamique et les composantes de la cryosphère, y compris les terres gelées, afin d'étudier le paléoclimat. La disponibilité des données récentes du CO<sub>2</sub> et de δ<sup>13</sup>C de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère fournit un moyen de valider les résultats du modèle pour déterminer si une dynamique pergélisol-carbone pourrait avoir joué un rôle important au cours des climats changeants.

Un mécanisme pergélisol-carbone simplifié a été développé et validé et a été réglé en utilisant les données de la terminaison 1 (T1). Il a été constaté que, pour reproduire des données de CO<sub>2</sub> et δ<sup>13</sup>C atmosphériques (pour l'atmosphère et l'océan) au cours de T1, une combinaison des mécanismes océaniques-glaciaires et pergélisol-carbone ont été nécessaires. Suite à cette constatation, plusieurs cycles glaciaires ont été modélisés pour étudier la sensibilité du mécanisme pergélisol-carbone aux forçages de CO<sub>2</sub>, les calottes glaciaires et l'insolation. L'étendue des calottes glaciaires a été jugée particulièrement importante pour le contrôle de la superficie des terres disponibles pour le pergélisol, et donc aussi pour la dynamique du carbone du pergélisol-carbone. La libération du carbone dans les sols de dégel en réponse à l'augmentation de l'insolation d'été dans les hautes latitudes, a été jugée très probable comme la source des hausses initiales de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère au cours des terminaisons glaciaires.

Les données CO<sub>2</sub> de terminaison 1 peuvent être bien reproduites, y compris le plateau de CO<sub>2</sub> BA / YD, quand le forçage de l'eau douce est appliqué à l'Atlantique nord. Expériences avec forçage de l'eau douce ont souligné l'importance du mécanisme du pergélisol-carbone dans l'évolution rapide des climats. Les augmentations très rapides des niveaux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère peuvent être expliqués par la libération rapide des sols en carbone en réponse à l'augmentation du transport de chaleur vers l'hémisphère nord. C'est en réponse à la reprise de l'AMOC suite d'un événement AMOC arrêt/réduction, tels que des événements D/O vu dans les données du δ<sup>18</sup>O Groenland. Les projections de changement climatique représentent des événements de réchauffement rapide. La conduite du modèle par des projections d'émissions (base de données RCP) a prédit l'augmentation du CO<sub>2</sub> de pic et une plus longue période à des niveaux élevés de CO<sub>2</sub> par rapport aux sorties du modèle qui ne comprennent pas les évaluations du pergélisol-carbone.

L'analyse de δ<sup>13</sup>C de l'océan doit tenir compte de la dynamique du pergélisol et du carbone de la terre en général et de son effet sur les niveaux de δ<sup>13</sup>C atmosphériques. Si ce n'est pas pris en compte alors la circulation océanique peut être trop invoquée pour tenter d'expliquer les changements de δ<sup>13</sup>C de l'océan et du CO<sub>2</sub> atmosphérique.

Le mécanisme pergélisol-carbone réagit aux changements de température et amplifie la réponse du cycle du carbone. Il est fortement dépendant non seulement de l'apport d'énergie (qui détermine la température du sol et de l'emplacement du pergélisol), mais également de la surface de terres disponible à l'échelle mondiale sur laquelle le pergélisol peut exister. Afin de modéliser et de comprendre correctement la réponse du système terrestre dans les climats futurs et passés, le mécanisme de rétroaction pergélisol-carbone est un élément important du système. Ce travail a été une première étape pour aborder le rôle que la cryosphère terrestre joue dans le cycle du carbone et du système climatique sur de longues échelles de temps, et que d'autres études sont essentielles.