

**ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT  
D'ILE DE France N° 129**

**Proposition de sujet de thèse pour la rentrée 2020**

Nom du Laboratoire d'accueil : LSCE

N° UMR : 8212

Nom du Directeur du laboratoire : Philippe Bousquet

Adresse complète du laboratoire : Bat 714 - 703, Orme des Merisiers, 91190 Gif sur Yvette

Nom de l'Equipe d'accueil et adresse si différente de celle du laboratoire :

GLACCIOS

Nom du Directeur de thèse **HDR** : A. Landais

Nom du co-directeur de thèse **HDR** : M. Dumont

Téléphone : 0169084672

Téléphone : **04 76 63 79 07**

Mail : amaelle.landais@lsce.ipsl.fr

Mail : marie.dumont@meteo.fr

• **Titre de la thèse en Français :**

**Influence du métamorphisme sur la densification du névé et le processus de fermeture des bulles d'air dans la glace**

• **Titre de la thèse en Anglais :**

**Influence of metamorphism on firn densification and bubble close-off processes**

• **Résumé Sujet en Français (1 page maximum) :**

Les carottes de glace constituent des archives exceptionnelles du climat et de la composition atmosphérique du passé, grâce à la richesse des indicateurs indirects enregistrés dans les phases glace et gaz. Aujourd'hui, ils présentent des enregistrements continus et à haute résolution au cours des 800 000 dernières années, mais leur datation est compliquée pour les périodes plus vieilles que les derniers 100 000 ans.

Les observations expérimentales montrent que l'insolation estivale reçue à la surface de la calotte glaciaire antarctique influe sur la composition de l'air emprisonné dans des bulles de glace. Des bulles de glace se forment à environ 60 - 110 m de profondeur sous la surface de la neige lorsque celle-ci est suffisamment densifiée sous son propre poids. La relation empirique entre l'insolation estivale et la composition des bulles d'air emprisonnées dans les carottes de glace est à la base de la datation des carottes profondes via la correspondance effectuée classiquement entre d'une part les variations de contenu en air ou de rapport O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> dans les bulles de carottes de glace et d'autre part les courbes d'insolation calculées à partir de paramètres orbitaux. Cependant, le mécanisme liant l'insolation reçue à la surface de la calotte glaciaire au processus de piégeage des bulles d'air qui se produit plusieurs siècles plus tard, à environ 100 m de profondeur, n'est pas compris. Bien que l'on sache que l'insolation estivale influe fortement sur le métamorphisme de la neige et donc sur la microstructure de la neige de surface, l'évolution de la microstructure superficielle de la neige au cours du processus de densification de la neige n'est pas connue. Dans ce projet, nous proposons d'améliorer notre compréhension de l'évolution de la microstructure de la neige avec la profondeur et de son incidence sur les processus de fermeture des bulles à l'aide du modèle détaillé du manteau neigeux Crocus. Crocus est un modèle physique de pointe de l'évolution des propriétés physiques de la neige de surface. Il prend déjà en compte l'évolution de la microstructure de la neige de surface due à l'ensoleillement de la surface. Le modèle a toutefois été principalement mis au point pour l'évolution du manteau neigeux saisonnier et les processus de densification sont très simplifiés et doivent être encore affinés. En utilisant le modèle de manteau neigeux, nous proposons d'étudier d'abord l'impact des changements d'insolation sur la microstructure de la neige en surface. Le modèle de neige amélioré sera ensuite utilisé pour relier l'évolution de la microstructure de la neige de surface aux propriétés du névé et aux taux de densification. La dernière étape consistera à coupler un modèle de fractionnement à ce modèle de physique de la neige afin de mieux comprendre l'évolution de l'O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> dans les porosités ouvertes et fermées.

Pour soutenir l'effort de modélisation, des observations seront obtenues lors d'échantillonnages pendant deux campagnes en Antarctique. Les propriétés du gaz pendant la fermeture des bulles seront documentées par l'analyse de la teneur en air et du rapport O<sub>2</sub> / N<sub>2</sub>, à la fois dans la porosité fermée et ouverte de la zone de fermeture de la bulle. Les propriétés physiques seront aussi documentées sur la même carotte de glace, grâce à des mesures de densité, de taille de grain, de volume de pores fermés et d'autres paramètres de microstructure (à l'aide de la tomographie à rayons X). Les deux campagnes se dérouleront sur des sites présentant des conditions climatiques de surface différentes en termes de température et de taux d'accumulation, de sorte que les taux de densification de la neige et des névés sont différents sur ces deux sites. Ces analyses porteront notamment sur l'existence éventuelle de couches dans la zone de fermeture des pores (c'est-à-dire les couches voisines présentant des différences significatives en termes de densité ou de propriétés physiques).

Ce projet fait partie du projet européen ERC ICORDA (déc. 2019 - déc 2024) visant à améliorer les contraintes de datation sur les carottes de glace profonde. Il est également essentiel dans le cadre du nouveau projet européen H2020 «Beyond EPICA», qui a pour objectif de forer puis de dater une carotte de glace de 1,5 million d'années.

### • **Résumé Sujet en Anglais (1 page maximum) :**

Ice cores are exceptional archives of the past climate and atmospheric composition through the wealth of proxies recorded in the ice and gas phases. Today, they present continuous and high resolution records over the last 800 000 years but their dating is complicated for periods older than 100 000 years.

Experimental observations show that the summer insolation received at the surface of the Antarctic ice sheet has an influence on the composition of the air trapped in ice bubbles. Ice bubbles are formed at about 60 - 110 m deep under the snow surface when the snow has been sufficiently densified under its own weight. The empirical relationship between summer insolation and composition of air bubbles trapped in ice core is the basis of the dating of deep ice core through the tuning of air content and O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> ratios measured in ice core bubbles to insolation curves calculated from orbital parameters. However, the mechanism linking insolation received at the surface of the ice sheet to air bubble trapping process occurring several centuries later about 100 m deeper is not understood. While it is known that summer insolation strongly influences snow metamorphism and thus snow microstructure at the ice sheet surface, too little is known about the evolution of the initial surface snow microstructure during the firn densification process.

In this project, we propose to improve our understanding on how snow microstructure evolves with depth, and how it affects the densification and bubble closure processes using the detailed snowpack model Crocus. Crocus is a state of the art physical model of snow evolution, and already account for the evolution of the surface snow microstructure due to surface insolation. The model was however mainly developed for seasonal snowpack evolution and the densification processes for firn are oversimplified and will need to be further refined. Using the snowpack model, we will first investigate the impact of insolation changes on surface snow microstructure. The improved snow model will then be used to link the surface snow microstructure with the firn properties and the densification rates. The last step would be to couple a gas fractionation model to this snow physics model to be able to better link the evolution of O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> in the open and close porosity to physical properties.

To support the modeling effort, observational constraints will be obtained from 2 firn air campaigns in Antarctica. Gas properties during the bubble closure will be documented by the analysis of air content and O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> ratio, both in the closed and open porosity of the bubble close-off zone. Physical properties will be documented on the same core, through measurements of density, grain size, volume of closed pores, and other microstructural parameters (using X-ray tomography). The two firn campaigns will take place on sites with different surface climatic conditions in terms of temperature and accumulation rate so that the snow and firn densification rates are different at these two sites. These analyses will include a dedicated focus on the possible existence of layering in the bubble formation zone (i.e. neighbouring layers with significant differences in term of density or physical properties).

This project is part of the european project ERC ICORDA (Dec 2019 – Dec 2024) whose aim is to improve the dating constraints on deep ice cores. It is also key in the frame of the new European H2020 project "Beyond EPICA – Oldest Ice Core" whose aim is to drill and then date an ice core of 1.5 million years.

**• Type de financement autre que ED 129, précisez si envisageable ou acquis (CNES, CEA, ADEME etc...) :**

Financement sur ERC ICORDA (CNRS)

**• Encadrement :**

**. Liste des autres doctorants que vous encadrez ou co-encadrez au 1<sup>er</sup> janvier 2020**

(Nom, Université d'inscription, type de financement, date de soutenance envisagée)

Leroy Dos Santos Christophe (co-encadrement avec Elise Fourré), UVSQ, soutenance 31 Décembre 2020

Grisart Antoine (co-encadrement Frédéric Parrenin), UVSQ, soutenance 31 Aout 2022