



université PARIS-SACLAY

«LA COMPOSITION DES ISOTOPES STABLES DE L'EAU SUR LE PLATEAU EST ANTARCTIQUE: MESURE À BASSE TEMPÉRATURE DE LA COMPOSITION DE LA VAPEUR, UTILISATION COMME UN TRACEUR ATMOSPHERIQUE ET IMPLICATION POUR LES ÉTUDES PALÉOCLIMATIQUES» PAR MATHIEU CASADO

Présentée par : Mathieu Casado Discipline : Océan, atmosphère, climat et observations spatiales Laboratoire : LSCE

Résumé :

Les carottes de glace permettent de reconstruire le climat du passé, à partir entre autre de la composition isotopique de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$). Sur le plateau Est Antarctique, les températures très froides et les faibles accumulations permettent de remonter le plus loin dans le passé (jusqu'à 800 000 ans) mais compliquent l'interprétation du signal isotopique. Premièrement, les reconstructions des variations de température dans les

carottes de glace à partir des isotopes de l'eau se basent sur des modèles pour décrire l'évolution de la composition isotopique de la vapeur et de la phase condensée le long du cycle de l'eau. Ces modèles, qui ont été développés au cours des dernières décennies, reposent sur la connaissance de coefficients du fractionnement isotopique associé à chaque transition de phase et sur des hypothèses pour représenter la micro-physique des nuages.

Lors de la formation de flocons de neige à basse température, 2 types de fractionnements isotopiques doivent être pris en compte : le fractionnement isotopique à l'équilibre, associé à la transition de phase vapeur-glace et le fractionnement isotopique cinétique lié aux différentes diffusivités des différents isotopes. A basse température, les déterminations des coefficients du fractionnement du fractionnement à l'équilibre présentent d'importantes différences et n'ont jamais pu être mesurées à des températures inférieures à -40°C . Or la température moyenne annuelle à Dome C est de -54°C atteignant jusqu'à -85°C l'hiver. Les diffusivités des différents isotopes quant à elles n'ont jamais été mesurées à des températures inférieures à 10°C . Toutes ces lacunes résultent dans des incertitudes importantes sur le lien entre la composition isotopique et la température dans des conditions comme celles du Plateau Est Antarctique.

De plus, dans ces conditions froides et arides, les processus physiques qui affectent la composition isotopique de la neige après la déposition des flocons deviennent importants compte tenu du faible apport annuel de précipitation. Pour estimer l'impact de ces processus de post-déposition sur la composition isotopique, il est nécessaire de bien caractériser le fractionnement isotopique à l'interface neige/atmosphère pour des températures allant jusqu'à -90°C .

Afin d'améliorer les reconstructions quantitatives de température l'étude des processus affectant la composition isotopique de la glace à très basse température est donc primordiale. Dans cette optique, ma thèse a été à l'interface entre les études de processus au laboratoire et en Antarctique et le développement instrumental afin de pouvoir réaliser des mesures isotopiques encore inédites, en particulier à très basse humidité. D'un côté, j'ai développé d'un nouveau spectromètre infrarouge aux performances bien au-delà des instruments commerciaux. En effet, la fréquence du laser est stabilisée par rétroaction optique par une cavité ultra-stable jusqu'à un niveau de stabilité de l'ordre du hertz. La lumière est ensuite injectée dans une cavité CRDS hautes performances avec une sensibilité de $10^{-13} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. Ceci permet de mesurer la composition isotopique avec une précision inférieure au ppm.

En parallèle, des expériences au laboratoire ont permis de renforcer les connaissances sur les processus affectant les isotopes de l'eau, en particulier le fractionnement lié à la transition de phase vapeur - glace et le fractionnement cinétique lié aux différentes

diffusivités des différents isotopes en modélisant le fractionnement lié à la diffusion près d'un point froid. Enfin, durant une campagne en Antarctique, j'ai pu réaliser parmi les premières mesures de la composition isotopique de la vapeur et de la glace en Antarctique et appliquer les modèles physiques des processus à des données de terrain. Ces mesures montrent que le cycle de sublimation/condensation contribue de manière importante à la composition isotopique de la neige sur le plateau Est Antarctique.

Abstract :

Ice cores enable reconstruction of past climates, from among others water stable isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$ et δD). On the East Antarctic Plateau, very cold temperature and low accumulation provide the longest ice core records (up to 800 000 years) but embrace the interpretation of isotopic composition. First, reconstructions of temperature variations from ice core water isotopic composition are based on models used to describe the evolution of the isotopic composition of the vapor and of the condensed phase over the entire water cycle. These models have been developed during the last decades and depend upon precise determinations of isotopic fractionation coefficients associated to each phase transition and upon hypotheses to describe cloud microphysics.

During the formation of snowflakes at low temperature, two types of isotopic fractionations need to be taken into account: equilibrium fractionation, associated to the vapor to ice phase transition and kinetic fractionation associated to the difference of diffusivity of the different isotopes. At low temperature, determinations of equilibrium fractionation coefficients present important discrepancies and have never been realized for temperature below -40°C . However, mean annual temperature at Dome C is around -54°C reaching -85°C in winter. For the diffusivities of the different isotopes, they have never been measured at temperature below 10°C . All these gaps result in important uncertainties on the link between isotopic composition and temperature, especially for cold and dry conditions such as encountered on the East Antarctic Plateau.

Furthermore, because of the very low amount of precipitation, physical processes affecting the isotopic composition of the snow after the deposition of snowflakes can result in an important contribution to the isotopic budget. In order to estimate the impact of the post-deposition processes on the water vapor isotopic composition, it is necessary to characterize the isotopic fractionation at the snow/atmosphere interface for temperature down to -90°C .

In order to improve isotopic paleothermometer performances, it is primordial to study processes affecting snow isotopic composition. Toward this goal, my Ph-D has been at the interface between monitoring of processes affecting isotopes, both in laboratory experiments and field studies, and instrumental development to push the limits of water vapor isotopic composition trace detection. On one hand, new developments in optical

feedback frequency stabilization applied for the first time to water isotopic composition monitoring provide performances beyond any commercial instrument and can be used for thorough processes studies. The laser frequency is stabilized by optical feedback from an ultra-stable cavity to the hertz level. Then, the light is injected in high performances cavity with a sensibility of 10-13 cm⁻¹.Hz^{-1/2}. This enables measuring isotopic composition with a precision below the ppm level.

On the other hand, laboratory experiments have supported theories about isotopic fractionation associated to the vapour to ice phase transition and to kinetic fractionation linked to the difference of diffusivities of the different isotopes. Finally, these physical models have been collated to field measurements realised at Dome C in Antarctica, which are among the first water vapour and snow isotopic composition measurements realized inland Antarctica. These measurements show how important is the contribution of the sublimation condensation cycles to the snow isotopic composition budget on the East Antarctic Plateau.

INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

Gerhard KRINNER, Directeur de Recherche, au Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement (LGGE) - Grenoble - Rapporteur

Philippe RICAUD, Directeur de Recherche, à Météo France/Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) - UMR 3589 - Toulouse - Rapporteur

Amaelle LANDAIS, Chargée de Recherche, Habilitée à Diriger des Recherches, à l'Université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines/Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) - Gif/Yvette - Directeur de thèse

Samir KASSI, Ingénieur de Recherche, Habilité à Diriger des Recherches, à l'Université de Grenoble - Laboratoire Interdisciplinaire de Physique (LIPhy) - Saint-Martin-d'Hères - Co-Directeur de thèse

Erik KERSTEL, Professeur des Universités, à l'Université de Grenoble - Laboratoire Interdisciplinaire de Physique (LIPhy) - Saint-Martin-d'Hères - Co-Encadrant de thèse

Patrice CACCIANI, Chargé de Recherche, à l'Université des Sciences et Technologies de Lille - Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molécules (PhLAM) - UMR 8523 - Villeneuve d'Ascq - Examineur

Christophe COLIN, Professeur des Universités, à l'Université Paris Sud 11/Laboratoire Géosciences - Orsay - Examineur

Liliane MERLIVAT, Directrice de Recherche Emérite, à l'Université Pierre et Marie Curie /Laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentations et approches numériques - UMR 7159 - Paris - Examineur

Contact : DREDVal Service FED : theses@uvsq.fr

