

C'est l'occasion de me plonger dans la logistique des missions de terrain. Je peux aussi reproduire mes mesures de température et montrer aux sceptiques que l'air froid de l'hiver n'a aucune incidence sur mes résultats : les nouvelles mesures ont lieu en janvier 2009, pendant l'été austral, un an après ma première campagne. Si l'air froid de l'hiver austral (juillet 2008) s'est entre-temps engouffré dans le trou de forage, la température au fond du trou devrait être plus faible que celle de 2008, ce qui n'est pas le cas. Je prouve ainsi que mes mesures sont fiables et très précises, de l'ordre de 3 millièmes de degré à 300 mètres de profondeur. J'ai tous les éléments pour une première publication.

Mes mesures et le calcul numérique qui les accompagnent m'ont permis de démontrer deux choses. D'une part, il y a eu un épisode froid en Antarctique correspondant au petit âge glaciaire, ce qui est compatible avec l'hypothèse que le petit âge glaciaire est la conséquence d'un forçage externe, probablement d'origine solaire et volcanique, et non d'une redistribution de l'énergie entre l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud.

D'autre part, l'Antarctique Ouest s'est fortement réchauffé au cours des 50 dernières années – de 1,5°C environ –, ce qui est surprenant. On pensait auparavant que le réchauffement climatique renforcerait les

vents d'ouest qui tournent autour de l'Antarctique, ce qui aurait eu pour conséquence de refroidir le continent blanc en l'isolant des masses d'air chaud en provenance des basses latitudes. Cette hypothèse est probablement valide pour l'Antarctique Est, mais nos mesures montrent que l'Antarctique Ouest est sensible au changement climatique ressenti par le reste de la planète. On pense que ce réchauffement est lié à des changements des centres de convection dans l'océan Pacifique tropical, qui modulent la position de la basse pression sur la mer d'Amundsen, à l'ouest du continent.

Ce que disent les bulles

L'Antarctique se réchauffe, certes, mais nous ne connaissons presque rien du climat de cette région du globe. Peut-être est-ce normal, peut-être est-ce apparu par le passé, peut-être cela n'a-t-il pas de conséquences pour la stabilité de la calotte glaciaire. Il est utile de remonter dans le temps pour voir si ce type d'événement s'est déjà produit et, ainsi, mieux appréhender l'importance du réchauffement actuel. La température dans le trou de forage ne permet pas de répondre à cette question, du fait de la diffusion, qui lisse les variations climatiques anciennes, mais nous pouvons utiliser un autre indicateur : les bulles d'air piégées

dans la glace et la composition isotopique des gaz qu'elles contiennent.

La surface de la calotte glaciaire est couverte de neige qui, sous son propre poids, devient progressivement plus dense, jusqu'à devenir de la glace solide à environ 70 mètres de profondeur. La neige ancienne, appelée névé, est poreuse, et l'air contenu dans les pores peut se déplacer par diffusion moléculaire, jusqu'au moment où les bulles se referment, à environ 66 mètres de profondeur, scellant pour toujours l'air dans la glace. Tant que la porosité est ouverte vers l'extérieur, l'air peut bouger par diffusion entre la surface et la profondeur de piégeage. Or chaque atome ou molécule a une vitesse de diffusion différente, qui dépend en grande partie de sa masse. C'est en particulier le cas des isotopes – des atomes d'un même élément, avec le même nombre de protons et d'électrons, mais un nombre différent de neutrons et donc une masse différente.

Ainsi, les molécules constituées d'isotopes différents diffusent dans le névé à des vitesses différentes, d'où un écart entre la composition de l'air de surface et celle de l'air piégé dans la glace. En particulier, quand la température augmente, le fond du névé, plus froid que la surface, concentre les isotopes lourds.

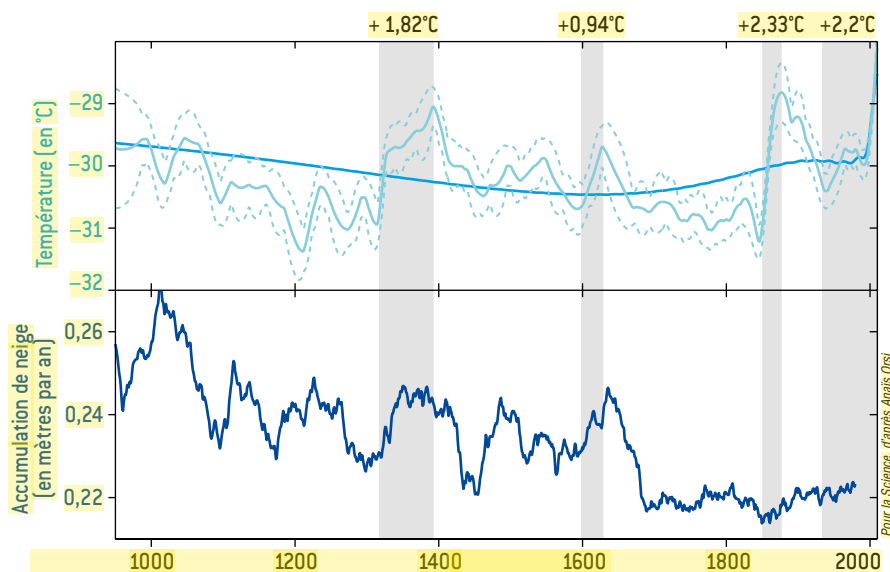
Ce mécanisme permet de reconstituer les changements de température en



© Anais Oisi



LES COUCHES DE NEIGE se distinguent facilement dans un puits recouvert de planches de bois. Un autre puits a été creusé derrière en laissant entre eux un mur de neige de 50 centimètres, de sorte que la lumière ne pénètre qu'à travers ce mur (à gauche). On décèle ainsi combien de neige tombe par an, en combien d'événements, si les chutes sont plus fréquentes en été qu'en hiver. La neige d'hiver, faite de petits grains, est plus dense que celle d'été et apparaît plus foncée. En faisant fondre la glace forée, on distingue les bulles d'air qui y sont piégées et qui, elles aussi, contiennent des informations précieuses sur le climat passé (à droite).



TOUS LES 200 ANS ENVIRON, WAIS Divide a subi des périodes de fort réchauffement (en gris). C'est ce qu'a montré la reconstruction de la température sur le dernier millénaire à partir de l'analyse des gaz piégés dans la glace (en haut). Toutefois, la reconstruction du taux d'accumulation de neige à WAIS Divide à partir de l'épaisseur des couches annuelles montre que, contrairement aux réchauffements antérieurs, le dernier n'est pas associé à un changement de la quantité des précipitations, ce qui suggère qu'il est d'une nature différente (en bas).

étudiant la composition isotopique des gaz inertes tels que l'argon et le krypton dans la glace. On utilise ces gaz inertes car leur composition isotopique ne change pas (de manière mesurable) avec le temps dans l'atmosphère. Leur composition dans l'atmosphère étant constante, tout changement observé dans la glace par rapport à l'atmosphère est imputable à leur seule diffusion dans le névé.

En pratique, il s'agit de faire fondre des échantillons de glace sous vide, puis de récupérer l'air libéré par les bulles et d'analyser la composition isotopique de l'azote et de l'argon qu'il contient. Cette analyse indique quels ont été les changements de température à la surface de la calotte au cours de l'histoire, selon la profondeur des bulles analysées dans la carotte de glace.

Cette méthode avait déjà été utilisée auparavant, mais pour repérer un signal de bien plus grande amplitude, lors des changements climatiques abrupts de la dernière ère glaciaire. Pour déceler les changements du climat récent, il faut améliorer la précision des mesures. Avant de toucher aux précieux échantillons de glace, il m'a donc fallu perfectionner la méthode en faisant des essais sur de l'air extérieur. Chaque étape, chaque outil a été méticuleusement testé pour trouver les points d'amélioration possible. Cette étape de ma thèse a testé ma persévérance !

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Orsi, *Le climat du dernier millénaire en Antarctique*, dans *Cinq jeunes chercheurs d'avenir*, collectif, préface de Valérie Masson-Delmotte et Cédric Villani, Le Pommier, 2015.

G. Ramstein, *Voyage à travers les climats de la Terre*, Odile Jacob, 2015.

L. Jacquet et Cl. Laurius, *La Glace et le ciel*, Paulsen, 2015.

J. F. Berger et al., *Des climats et des hommes*, La Découverte, 2012.

J. Jouzel et al., *Planète blanche, les glaces, le climat et l'environnement*, Odile Jacob, 2008.

E. Le Roy Ladurie, *Histoire du climat depuis l'an mil*, Flammarion, 1967 et 2009.

Au départ, je progresse vite, puis un problème étrange apparaît : la mesure du premier échantillon du matin donne un résultat anormal. J'effectue une centaine de tests, sans parvenir à trouver la solution. De longs mois passent, sans progrès, avant que je trouve enfin la réponse : il faut laisser reposer les échantillons une nuit avant d'effectuer les mesures, qui ne donnent alors plus de résultats aberrants. Il faut savoir être patient !

La course contre la montre commence : je dois mesurer 300 échantillons de glace à raison de quatre par jour, faire l'analyse des données et rédiger ma thèse avant que mon visa n'arrive à expiration : je dispose de neuf mois, en tout et pour tout. Ross, notre technicien, vient me prêter main-forte. Il s'occupe des mesures les quatre premiers jours de la semaine pour que je puisse rédiger ma thèse, et je prends le relais les trois autres jours. À nous deux, nous terminons juste avant Noël. Il me reste trois mois pour faire l'analyse des données et écrire le dernier chapitre.

Un réchauffement de nature différente

Tout est prêt. Les trois pièces du puzzle s'emboîtent : la température de trou de forage, les mesures de gaz et le modèle qui permet de faire le lien entre les deux, écrit et testé sur un autre jeu de données en attendant que les nôtres soient disponibles. Je peux enfin produire une série temporelle complète (voir la figure ci-dessus). Là, une surprise m'attend : des périodes de fort réchauffement, dont la vitesse est similaire à celle du réchauffement actuel, se retrouvent environ tous les 200 ans. En comparant la température avec d'autres indicateurs du climat, telles l'épaisseur des couches annuelles de neige, qui nous renseigne sur le taux des précipitations, ou la concentration des poussières, qui nous renseigne sur la force du vent (plus le vent est fort, plus la concentration de poussières dans l'air augmente), je me rends compte que, contrairement à ces événements antérieurs similaires, le réchauffement récent n'est pas associé à des changements concernant les précipitations. Cette observation suggère que le réchauffement actuel est d'une nature différente de celle des réchauffements du passé et qu'il est probablement lié à des changements climatiques globaux plutôt qu'à des variations régionales du climat.

Ces résultats fournissent des informations sur la réaction du système climatique au forçage externe. Ils donnent aussi des pistes pour tester et améliorer les modèles qui nous permettront de mieux prédire le climat futur. Par exemple, on a montré qu'il y a eu une période froide en Antarctique durant le petit âge glaciaire. Les modèles la simulent-ils ? Le font-ils avec la bonne amplitude, ou au moins avec une amplitude comparable à celle de l'hémisphère Nord ? Sinon, quels sont les mécanismes manquants ?

D'autres projets

Mars 2013, nouveau coup de fil : « Anaïs, j'ai fait du gryère dans Dronning Maud Land, il y a cinq trous à mesurer. Est-ce que tu veux m'accompagner ? Ce sera une toute petite expédition. » L'aventure continue !

Aujourd'hui, je poursuis mes travaux sur la température en Antarctique non seulement sur d'autres sites de forage, mais aussi en utilisant de nouveaux outils. À l'issue de ma thèse, j'ai reçu une bourse de l'Union européenne pour poursuivre ce

type de travaux dans une autre région de l'Antarctique, à Talos Dome, une carotte forée par les Français et les Italiens. Les résultats sont encore préliminaires, mais ils vont dans le même sens.

Et à Dronning Maud Land, sur la zone « atlantique » de l'Antarctique, j'ai aussi un projet de mesurer le réchauffement climatique. Les réanalyses (des interpolations entre un modèle et les données existantes) prédisent un très faible réchauffement, mais le peu de données existantes, issues des températures de trou de forage, indiquent un réchauffement significatif. Qui a raison ?

Malgré les difficultés, je suis toujours autant passionnée par mon sujet d'étude. Chaque réponse trouvée apporte son lot de nouvelles questions : ces changements tous les 200 ans sont-ils visibles dans d'autres régions, en Patagonie par exemple ? Qu'est-ce qui peut causer une telle périodicité ? Les modèles climatiques sont-ils capables de reproduire ces événements ? C'est une des questions clés qu'il nous faudra résoudre pour mieux comprendre le réchauffement climatique en cours. ■

■ SUR LE WEB

Le site du campement de WAIS Divide : <http://www.waisdivide.unh.edu/>

GIEC, Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs, Contribution du groupe de travail I : <http://bit.ly/1k5sGpi>



Partagez
les savoirs

**LES
RENDEZ-
VOUS DU
MUSÉUM**

Entrée
gratuite

COURS PUBLICS

Cycle Les plus anciens peuplements de l'Europe

Par *M.-H. Moncel*, préhistorienne, directeur de recherche CNRS, Muséum

Jeudi 3 décembre - 18h : Que se passe-t-il en Europe après 700 000 ans ?

L'arrivée (ou émergence) des bifaces et de l'Acheuléen

Jeudi 10 décembre - 18h : Le site acheuléen de la Noira : un atelier de taille datant de 700 000 ans

Grand Amphithéâtre du Muséum - 57 rue Cuvier, Paris 5^e

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

POUR LA SCIENCE

UN CHERCHEUR / UN LIVRE

Lundi 7 décembre - 18h : *Robert Doisneau*, un photographe au Muséum, Éditions Flammarion/MNHN, 2015

Avec *J.-P. Gasc*, spécialiste de la locomotion des vertébrés, Muséum ; *É. Joly*, directeur du département des Jardins Botaniques et Zoologiques, Muséum ; *A. Lemaire*, conservatrice à la bibliothèque centrale du Muséum ; *G. Rouhan*, botaniste, Muséum ; *A. Doisneau* et *F. Deroudille*, responsables de l'Atelier Doisneau

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution - 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

CONFÉRENCES

Cycle Rôle des galeries d'Anatomie comparée et de Paléontologie dans l'histoire des sciences et des arts

Jeudi 17 décembre - 17h : Fremiet et les grands singes

Par *L. Vivès*, chargé de projet, Muséum et *C. Argot*, chargée de conservation des collections, Muséum

Amphithéâtre des Galeries d'Anatomie comparée et Paléontologie - 2 rue Buffon, Paris 5^e

