

qu'une coïncidence et que le petit âge glaciaire était en fait plutôt lié à une réduction de la circulation thermohaline qui amène, en surface, de l'eau chaude de l'hémisphère Sud vers l'hémisphère Nord et, en profondeur, de l'eau froide de l'hémisphère Nord vers l'hémisphère Sud. Si cette circulation se réduit, l'hémisphère Nord se refroidit tandis que l'hémisphère Sud se réchauffe. Il est donc possible de tester cette hypothèse en étudiant l'évolution de la température dans l'hémisphère Sud durant le petit âge glaciaire. S'il s'est réchauffé durant cette période, il est possible que la circulation thermohaline ait été responsable du petit âge glaciaire en Europe; et s'il s'est refroidi autant que l'hémisphère Nord, il est possible

susceptibles de changer le climat et, notamment, de comprendre si le petit âge glaciaire résultait d'oscillations internes du climat ou d'une diminution du rayonnement solaire et d'une intensification du volcanisme à cette période.

Première expédition en Antarctique

Me voilà donc lancée dans la préparation d'une mission en Antarctique. Forer une carotte de glace nécessite un certain nombre de petites mains et il est de notoriété publique qu'un thésard dont les travaux dépendent de la qualité de la glace en prendra le plus grand soin. « Puisque tu

Puis vient le moment de partir pour une mission de 65 jours, entre décembre 2007 et janvier 2008. Elle commence par un long voyage en avion, jusqu'à Christchurch, en Nouvelle-Zélande. Nous atteignons la base antarctique de McMurdo, sur l'île de Ross, et enfin notre camp de WAIS Divide (*West Antarctic Ice Sheet Divide*, pour Sommet de l'inlandsis Ouest-Antarctique), au centre de l'Antarctique Ouest, après avoir attendu plusieurs jours une fenêtre météorologique suffisamment clémente. Le site est plat et blanc à perte de vue. Chacun monte sa tente. Le soir, le vent se lève, balayant la neige. On ne voit presque rien :

– *Pardon, je viens d'arriver, les tentes sont de quel côté ?*



AU CAMPMENT DE WAIS DIVIDE, dans l'Antarctique Ouest, chacun dort dans une tente individuelle avec, pour décor, l'étendue plate et blanche à perte de vue de l'inlandsis [à gauche]. La cantine est l'une des rares tentes chauffées. Les carottes forées dans la glace sont conservées dans un entrepôt creusé dans la glace et analysées dans une longue structure en forme d'arche [au centre]. Le personnel, le matériel et le ravitaillement sont acheminés par avion [à droite].

que le rayonnement solaire ait été responsable du petit âge glaciaire.

Une façon de tester l'hypothèse du volcanisme et de l'albédo est de déterminer si le petit âge glaciaire était plus intense dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud : la surface continentale étant plus importante dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud aux moyennes latitudes, l'effet de l'enneigement prédit par cette hypothèse devrait être plus fort au Nord qu'au Sud.

D'où l'intérêt particulier pour l'Antarctique. Mon projet de thèse s'est focalisé sur la reconstruction de la température pendant le dernier millénaire en Antarctique Ouest, afin de mieux caractériser les mécanismes

pars, tu devrais en profiter pour mesurer la température dans le trou d'une carotte courte», me suggère Jeff. « Tu as deux mois pour te préparer avant qu'on envoie le cargo. » Deux mois pour comprendre de quoi il s'agit, dessiner, commander, fabriquer, tester, expédier. Les fiches techniques du matériel ne disent pas toujours si leur produit fonctionne correctement à -20°C . Heureusement, je ne suis pas seule. Je peux faire appel à ceux qui ont déjà effectué ce type de mesures : « C'est bon, j'ai déjà testé le PVC, ça marche encore à -20°C , tu peux sûrement te passer des câbles en silicone, bien plus chers. » Faire de la recherche, c'est aussi savoir profiter de l'expérience des gens qui nous précèdent.

– *Suis les fanions rouges.*

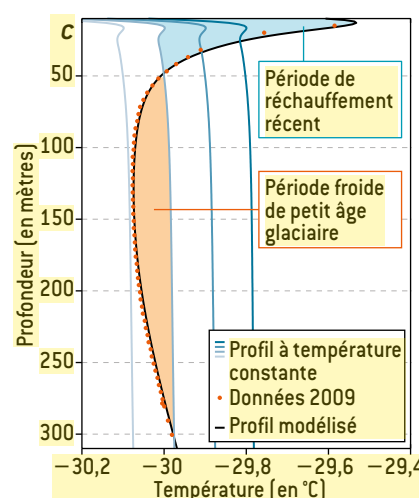
– *Je ne vois aucun fanion.*

– *Ah...*

J'ai fini par trouver mon logis après une éclaircie, mais, le lendemain soir, tout le monde a dormi dans la tente de cuisine, parce que le vent était trop fort et la visibilité inférieure à deux mètres. Finalement, cette première expérience m'a vaccinée contre la peur des tempêtes : je n'en ai jamais connu d'aussi forte au cours des cinq autres expéditions auxquelles j'ai participé.

Au retour de cette première expédition, j'apprends la modélisation inverse non linéaire, qui me permettra de transformer ma courbe des températures en fonction de la profondeur en une histoire

MESURER LA TEMPÉRATURE DANS UN TROU DE FORAGE



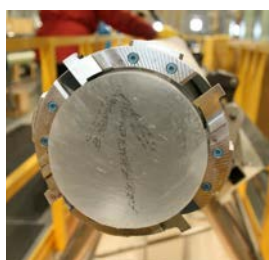
À cause de sa faible conductivité thermique, la neige garde en mémoire la température qu'il faisait lorsqu'elle était à la surface : la température met des centaines d'années à s'y homogénéiser. Ainsi, en mesurant la température de la neige dans un trou de forage avec un thermomètre précis – un thermistor, c'est-à-dire une résistance sensible à la température (b) –, l'auteure (a, ici ajustant la hauteur de la

sonde thermique) a établi l'évolution de la température en fonction de la profondeur dans le trou (c), qu'elle a ensuite traduite en évolution de la température entre le présent (c, partie bleutée) et le petit âge glaciaire (c, partie orangée). Les données mesurées en 2009 (points orange) étaient similaires à celles de 2008 (non montrées). Le réchauffement de WAIS Divide depuis le petit âge glaciaire est ici bien visible.

© Dave Ferris, SDSU (a); Anaïs Orsi (b); Pour la Science d'après Anaïs Orsi (c)

Carotte de glace à WAIS Divide

Le forage d'une carotte de glace s'effectue à l'aide d'un carottier. Quatre couteaux, aiguisés comme des lames de rasoir, enlèvent la glace autour de la carotte. Puis un système agrippe la carotte à sa base. On la tire alors fort vers le haut pour la casser et la libérer. Le forage de WAIS Divide a permis d'obtenir une carotte de 3 405 mètres de longueur, couvrant les 68 000 dernières années avec une très haute précision.



Anaïs Orsi

de la température au cours du temps. En effet, la mesure de la température dans les trous de forage repose sur un principe simple : la glace, et plus encore la neige, sont de bons isolants thermiques. Comme la laine de verre dans nos maisons, la neige contient de l'air, qui conduit mal la chaleur. Cent ans après qu'elle a été enfouie, elle garde une mémoire de la température au moment où elle était à la surface. Ainsi, rien qu'en mesurant la température dans un trou laissé par le forage d'une carotte de glace, on peut voir la différence de température entre le présent et le dernier âge glaciaire. Dès lors, on remonte dans le temps lorsqu'on s'enfonce dans le trou. Un modèle numérique permet, à partir de l'observation (les variations de la température dans le trou de forage en fonction de la profondeur), de retrouver la cause (l'histoire de la température).

Lorsque je présente mes premiers résultats à la rencontre annuelle du groupe WAIS Divide, qui rassemble la vingtaine de laboratoires travaillant sur la carotte de glace, je suis confrontée au scepticisme naturel des experts : « Es-tu vraiment sûre d'obtenir une telle précision ? As-tu pensé au "bruit" causé par l'électricité statique ? Sans fluide dans ton trou, n'est-il pas possible

que de l'air froid soit tombé au fond (l'air froid est plus dense que l'air chaud) et ait faussé tes mesures ? » Je prends note, je réponds de mon mieux, je planifie des tests supplémentaires. Toutes ces questions devront être résolues avant la rédaction d'une publication. Les congrès sont très utiles pour cela : ils nous offrent un regard extérieur sur notre travail, ce qui nous permet d'identifier les points d'amélioration.

Un coup de fil

En juillet, je reçois un appel téléphonique de Ken Taylor, le directeur du projet WAIS Divide : « Anaïs, j'ai besoin de toi. Joe devait prendre la direction scientifique du camp, mais sa femme est enceinte et il ne peut plus partir. Accepterais-tu de prendre sa place ? On partira mi-novembre pour trois mois. Je serai là les trois premières semaines pour t'aider, puis tu auras le champ libre. » Je repars, mais cette fois-ci, il me faudra diriger l'équipe scientifique : dix personnes, réparties en trois équipes travaillant à elles trois 24 heures sur 24, avec pour mission de réceptionner les carottes de glace, de faire les premières mesures scientifiques, puis d'emballer les carottes pour les rapporter aux États-Unis.

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



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].