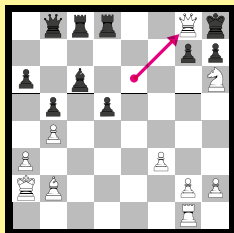
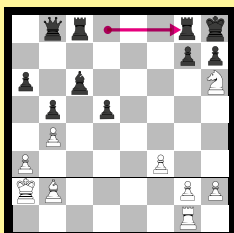
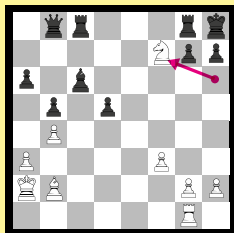


Coup 4



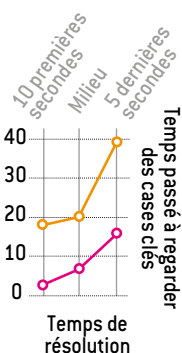
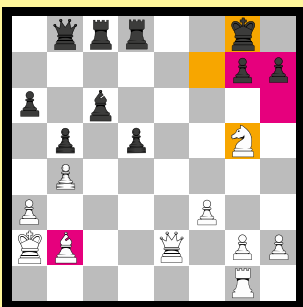
Coup 5



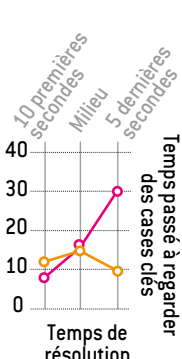
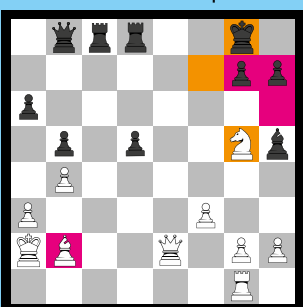
EXPLICATION DE L'EFFET : LA VISION TUNNEL

L'analyse des mouvements oculaires a révélé que dès que les joueurs savent qu'un mat à l'étouffée est possible, ils passent plus de temps à regarder les cases en rapport avec cette séquence connue (orange) que les cases en rapport avec une séquence gagnante de trois coups, plus efficace (magenta). Or ils se disent à la recherche d'une solution alternative... Inversement, s'ils réalisent le mat à l'étouffée impossible, leur regard se portera plus sur les zones cruciales pour mettre en œuvre la séquence gagnante efficace.

Problème à deux solutions



Problème à solution unique



pourrions penser, Broca et ses confrères n'étaient pas malhonnêtes intellectuellement: «Nous pouvons être à peu près certains que les biais évoqués dans ce livre [...] n'ont joué de rôle important qu'inconsciemment tant les chercheurs qui les avaient étaient persuadés d'être en train d'établir une vérité sans tache». Tout comme nous l'avons observé dans nos expériences à base de problèmes d'échecs, le confort des idées familières a empêché Broca et ses contemporains de percevoir les erreurs qu'ils commettaient dans leurs raisonnements.

On voit bien là le danger de l'effet d'attitude: nous croyons avoir un esprit ouvert et dénué d'idées préconçues, mais ne réalisons pas que notre cerveau sélectionne pour les éloigner de notre attention tous les détails de notre environnement qui pourraient nous porter vers de nouvelles idées. Toutes les informations qui n'entrent pas dans la solution ou la théorie auxquelles nous sommes accrochés sont ignorées ou éliminées.

La discrétion du biais de confirmation a des conséquences regrettables dans la vie sociale, comme le montre l'étude de la prise de décision médicale ou judiciaire. Dans un article sur les erreurs médicales, le médecin américain Jerome Groopman note que dans la plupart des cas, «les médecins n'avaient pas commis d'erreur de diagnostic en raison de leur ignorance des faits cliniques, mais parce qu'ils étaient tombés dans des pièges cognitifs».

Ainsi, quand un médecin reçoit un patient adressé par un confrère, le diagnostic déjà posé par le premier clinicien peut l'empêcher d'apercevoir des détails importants le contredisant. Il lui est plus facile d'accepter le diagnostic de son confrère – la «solution» déjà devant lui – que de réexaminer de près toute la situation.

De même, face à une radiographie du thorax, les radiologues, une fois qu'ils ont noté une première anomalie, se concentrent dessus et ne perçoivent plus d'éventuels autres symptômes, comme par exemple une grosseur pouvant indiquer la présence d'une tumeur. Si, en revanche, ces symptômes se présentent en premier sur la radio, les radiologues les voient d'emblée.

De même, des recherches ont révélé que les jurés décident de l'innocence ou de la culpabilité de quelqu'un bien avant que l'ensemble de l'affaire leur ait été présenté. Leur impression initiale de l'accusé

change non seulement leur évaluation des indices de culpabilité, mais aussi la mémoire qu'ils en ont. On a aussi mis en évidence que si un recruteur trouve un candidat physiquement attrayant, il tendra à percevoir bien plus positivement sa personnalité et son intelligence; l'inverse étant aussi vrai. Tous ces biais sont des conséquences de l'effet d'attitude. Pour juger quelqu'un, il est plus facile de coller à une vision cohérente préétablie que de trier une foule d'indices contradictoires.

Peut-on résister à l'effet d'attitude? Peut-être. Selon nos expériences sur les joueurs d'échecs et selon celles de Heather Sheridan et d'Eyal Reingold qui les ont suivies, certaines personnes exceptionnellement expertes parviennent à déceler une solution optimale peu évidente, même quand une séquence de coups plus longue mais familière est aussi possible. Cela suggère que plus une personne est experte dans son domaine – qu'il s'agisse d'échecs, de science ou de médecine – plus elle sera apte à résister aux biais cognitifs.

Personne n'est épargné

Toutefois, personne n'est épargné. Même les grands maîtres d'échecs échouent à déceler la solution cachée si nous parvenons à en rendre la perception assez difficile. Se souvenir que l'on est soumis à l'effet d'attitude aide à y résister. Supposez, par exemple, que vous soyez en train d'examiner la contribution au réchauffement climatique des gaz à effet de serre d'origine humaine pour vous forger une opinion sur cette menace. Lors d'un tel examen, il est essentiel de se souvenir que si vous pensez connaître la réponse d'avance, vous ne pourrez juger de façon objective. Sans cette prise de conscience, vous aurez tendance à renforcer votre opinion.

Nous devons essayer de prendre conscience de nos faiblesses cognitives et de les accepter. Charles Darwin avait trouvé une technique remarquablement simple et efficace à cet égard, qu'il décrit ainsi dans son *Autobiographie*: «J'ai pendant des années suivi une règle d'or: si je croisais un fait publié, une nouvelle observation ou une idée allant à l'encontre de mes résultats, j'en dressais sans faute et immédiatement un mémorandum. Car je savais d'expérience que ces faits et pensées-là, bien plus que les faits favorables, ont tendance à être oubliés.» ■

Mille ans de variations climatiques en ● Antarcti

SI DE SOMPTUEUX ICEBERGS brillant au soleil vous accueillent sur les rivages de l'Antarctique, c'est sur les vastes étendues blanches de la calotte polaire que les climatologues effectuent leurs mesures, parfois sous la tempête.

que

Anaïs Orsi

En lisant dans la neige ancienne l'histoire du climat en Antarctique sur le dernier millénaire, les climatologues ont montré qu'il a subi plusieurs réchauffements, et que le dernier est de nature différente des précédents.

L'ESSENTIEL

- Pour saisir l'importance d'un événement climatique, il faut le replacer dans une histoire plus longue.
- Le réchauffement actuel n'échappe pas à cette remise en contexte.
- Comprendre les causes du petit âge glaciaire, période froide entre 1400 et 1850, est ainsi une étape indispensable.
- L'étude de l'évolution du climat sur le dernier millénaire en Antarctique a apporté des réponses.
- Elle suggère aussi que, en Antarctique, le réchauffement actuel est différent des précédents.

© Jeff Vanuga/Corbis

Juillet 2011. Ma mission au NEEM (*North Greenland Eemian Ice Drilling*), un forage profond dans la glace au nord du Groenland, touche à sa fin. Nous chargeons l'avion, un LC-130 de la Garde nationale des États-Unis équipé de skis pour atterrir sur la neige, et nous tentons de décoller pour Kangerlussuaq, l'aéroport international du Groenland. Décollage impossible : il fait trop doux, la neige est molle et l'avion n'arrive pas à accélérer. Du jamais vu à cette latitude. L'année suivante, il y aura même de la pluie au NEEM, au cours d'une vague de chaleur sans précédent dans la mémoire collective.

Est-ce notre mémoire qui est trop courte ou le climat qui se transforme ? Un événement climatique, même récurrent sur plusieurs années, ne suffit pas pour répondre. Ce n'est pas parce que, deux années de suite, une vague de chaleur envahit le Groenland en été que le phénomène est une manifestation du changement climatique actuel. Pour comprendre l'importance d'un événement, il est indispensable de le replacer dans une histoire plus longue du climat, c'est-à-dire dans l'échelle de temps qui lui correspond – dix ans, un siècle, un millénaire... Seulement alors peut-on distinguer les variations habituelles du climat, auxquelles les écosystèmes sont adaptés, et les variations exceptionnelles, qui peuvent causer des changements profonds.

Le réchauffement climatique actuel n'échappe pas à cette remise en contexte. Aussi, tandis que la COP21 – la Conférence

des Nations unies sur les changements climatiques – s'apprête à se réunir à Paris fin novembre pour définir le nouvel accord international en vue de limiter ce réchauffement, les recherches se poursuivent sur le terrain dans le monde entier afin de suivre l'évolution du climat actuel, mais aussi et surtout de se donner les moyens de replacer les événements climatiques dans des échelles de temps pertinentes. C'est ainsi que je me suis retrouvée, pendant ma thèse de doctorat, à mesurer des températures dans des trous de forage par -20°C ... en Antarctique. Ces mesures ont fourni des informations précieuses non seulement sur l'évolution passée du climat dans la région, mais aussi sur les causes des divers réchauffements qui s'y sont produits ce dernier millénaire.

Une thèse sur une carotte

« Quoi ? Une thèse ? Mais la recherche, c'est pour les asociaux, et toi tu aimes parler aux gens... » Premier défi : combattre les idées reçues, convaincre mes proches que faire une thèse est une bonne idée. Non, la recherche n'est pas réservée aux asociaux, elle concerne les personnes curieuses, celles qui veulent comprendre le monde, qui ne peuvent pas éteindre la petite voix qui sans cesse interroge : « Pourquoi ? Comment ? »

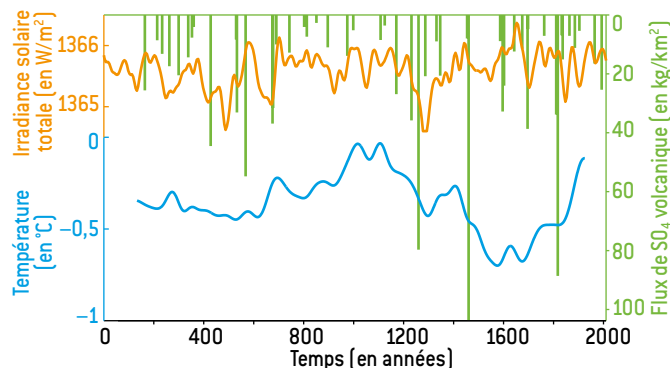
Second défi : partir à l'étranger. La recherche se faisant en anglais, je choisis de faire ma thèse dans un pays anglophone,

pour assurer ma maîtrise de la langue. Je pars donc en septembre 2005 à San Diego, en Californie, dans un programme d'océanographie.

Le système américain est différent du système français. Le programme de doctorat dure de cinq à sept ans. La première année est une année de cours et de découverte : les étudiants, qui viennent principalement des matières fondamentales (mathématiques, physique, chimie), s'initient alors à l'océanographie ou à la climatologie. Puis vient le choix de l'équipe de recherche et du sujet. Le choix d'un sujet de thèse est toujours le résultat d'un mélange d'envies et d'occasions. Jeff Severinghaus, qui deviendra mon directeur de thèse, me propose un sujet large, sur une nouvelle carotte de glace dont le forage débute à peine en Antarctique. Il y aura des missions de terrain, de la géochimie isotopique en laboratoire, de la modélisation numérique. À moi d'orienter le sujet dans le détail, quand je me serai familiarisée avec les bases, et de le présenter devant un jury en troisième année, lors du *qualifying exam*.

Le contexte de la thèse, lui, est en revanche bien défini : il s'agit de quantifier la variabilité du climat à différentes échelles de temps, de la dizaine d'années au millénaire. Les climatologues observent que la température moyenne de la Terre augmente depuis environ 150 ans et que ce réchauffement s'est accéléré au cours des 50 dernières années. Mais pour comprendre l'importance de cette tendance, il

LA SIGNATURE DU PETIT ÂGE GLACIAIRE



Entre 1400 et 1850, l'hémisphère Nord a subi une période froide – nommée aujourd'hui le petit âge glaciaire – relatée dans nombre de peintures et écrits de l'époque, tels que les peintures des Brueghel. Ainsi, une illustration du conte *Les Patins d'argent*, écrit par Mary Mapes Dodge au milieu du XIX^e siècle, montre la vie en Hollande au début du siècle, quand les canaux gelaient en hiver, ce qui n'arrive plus de nos jours (à gauche). La reconstruction de l'évolution du climat de l'hémisphère Nord pendant les 2 000 dernières années confirme cette période froide (à droite). Elle est associée à une baisse de la température moyenne (en bleu), à des périodes de faible intensité solaire (en orange) et à un volcanisme explosif fréquent (en vert).

© A gauche : Wikimedia Commons, Hétzel et Cie, 1877 ; à droite : Pour la Science d'après Anais Orsi

faut prendre du recul et la comparer avec les variations du climat sur un intervalle de temps bien plus long que 150 ans. Concrètement, cela signifie évaluer la température de la planète sur au moins 1 000 ans, quantifier l'amplitude des variations du climat sur cette échelle de temps, puis replacer le réchauffement récent dans ce contexte. Par exemple, si je mesure la température à Paris entre août et décembre, je peux en conclure que Paris se refroidit, mais si je continue ma mesure sur une ou deux années, je comprendrai que cette tendance, d'une amplitude d'environ 20 °C, fait partie d'un cycle plus long et que la décroissance de la température entre août et décembre s'inscrit dans ce cycle naturel et n'a donc rien d'anormal. En revanche, seulement 5 °C nous séparent du dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans, mais cet écart est significatif sur les 100 000 dernières années.

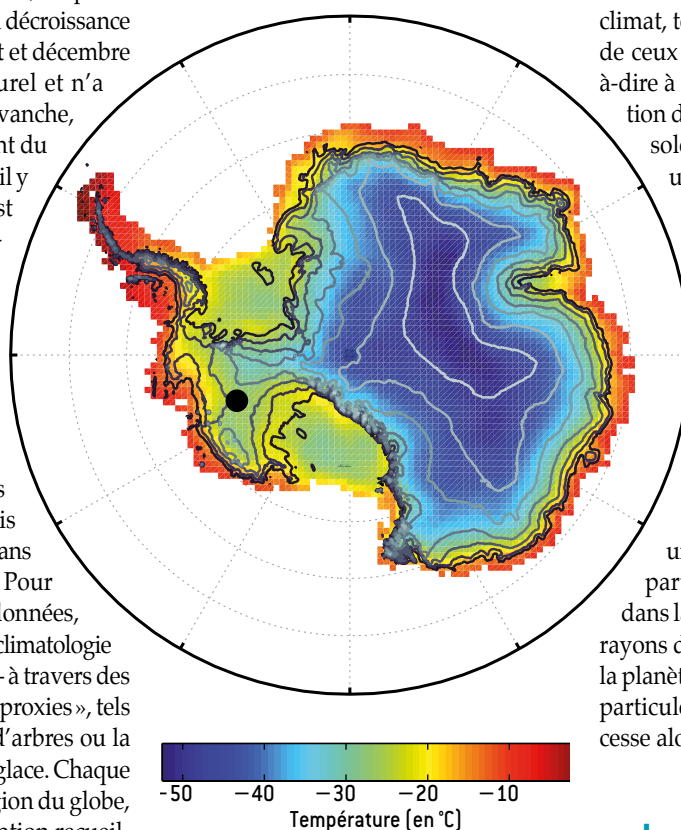
Malheureusement, nos ancêtres n'ont pas toujours mesuré la température à l'endroit où ils habitaient ou, s'ils l'ont fait, ils ont négligé de nous en informer. Nous n'avons de relevés fiables des températures que depuis environ 1850, et seulement dans certaines régions du globe. Pour remédier à ce manque de données, nous avons recours à la paléoclimatologie – l'étude des climats passés – à travers des indices que nous appelons « proxies », tels que l'épaisseur des cernes d'arbres ou la composition des carottes de glace. Chaque proxy étant propre à une région du globe, c'est en combinant l'information recueillie en différents endroits que l'on perçoit l'importance d'un changement climatique.

En effet, le climat varie non seulement dans le temps, mais aussi dans l'espace. Certaines différences spatiales sont constantes dans le temps : il fait en général plus chaud à Marrakech qu'à Brest. Parfois aussi, une anomalie de température se manifeste de façon inversée dans deux endroits du globe. C'est le cas, par exemple, avec l'oscillation nord-atlantique, qui connaît deux phases : la phase positive, durant laquelle les tempêtes sont déviées vers le nord de l'Europe, et la phase négative, durant laquelle elles sont déviées vers le sud. Durant sa phase positive, le sud de l'Europe est sec tandis que la Scandinavie est anormalement chaude

■ L'AUTEURE



Anaïs ORSI effectue un postdoctorat au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (UMR8212 CNRS/CEA/UVSQ), à l'institut Pierre Simon Laplace, à Gif-sur-Yvette. En 2014, elle a été lauréate du prix *Le Monde* de la recherche universitaire.



ACTUELLEMENT, EN ANTARCTIQUE, la température annuelle à la surface varie entre -50 °C (en bleu, au centre) et 0 °C (en rouge, sur la côte). À WAIS Divide (point noir) où l'auteur a effectué ses missions, la température varie de -12 °C en été (austral) à -50 °C en hiver.

et humide, et inversement. Dans ce cas, un changement de climat local est compensé par un changement opposé ailleurs, sans qu'il y ait d'incidence sur le climat planétaire. En pratique, on ne peut mesurer que le climat local. Il est donc indispensable de mesurer la température en de nombreux endroits du globe pour détecter les tendances significatives.

De plus, la distribution spatiale d'une anomalie climatique nous renseigne aussi sur le mécanisme qui en est la cause. En particulier, elle aide à distinguer les événements dus à la variabilité interne du climat, telle l'oscillation nord-atlantique, de ceux dus à un forçage externe, c'est-à-dire à un phénomène tel qu'une variation de l'insolation (l'énergie reçue du soleil), une éruption volcanique ou une variation de la teneur en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. La variabilité interne s'apparente à des remous dans la baignoire et ne change pas la moyenne globale du climat. Le forçage externe, en revanche, a une incidence sur le climat moyen mondial : il s'apparente à un changement du niveau de l'eau dans la baignoire. Par exemple, nous savons maintenant qu'après une forte éruption volcanique, des particules de sulfate sont déposées dans la stratosphère, ce qui réfléchit les rayons du Soleil et refroidit notablement la planète pendant environ deux ans. Les particules finissent par tomber et l'effet cesse alors.

L'énigme du petit âge glaciaire

Pourquoi s'intéresser en particulier à l'Antarctique ? À cause... du « petit âge glaciaire », une période qui s'étend de la fin du Moyen-Âge au début de l'ère industrielle et durant laquelle les hivers ont été particulièrement rigoureux.

Le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a montré que notre climat se réchauffe et que ce réchauffement touche toutes les régions du globe. Ce n'est donc pas juste un remous dans la baignoire, mais une tendance significative. Le rapport du GIEC de 2013 précise : « Chacune des trois dernières décennies a été successivement plus chaude à la surface de la Terre que toutes

les décennies précédentes depuis 1850. Les années 1983 à 2012 constituent probablement la période de 30 ans la plus chaude qu'ait connue l'hémisphère Nord depuis 1400 ans. » En d'autres termes, le réchauffement des 30 dernières années est significatif par rapport à la période qui correspond à l'avancée industrielle de l'homme : de 1850 à aujourd'hui. Cependant, 1850 marque aussi la fin du petit âge glaciaire, une période de plus de 400 ans de climat froid qui n'est pas représentative du climat moyen sur les derniers millénaires et qui ne peut servir de référence. Le petit âge glaciaire est aussi le changement climatique le plus récent dans l'histoire du climat, et son étude nous permet de com-

climatique notable, et donc la période pour laquelle nous avons la capacité d'obtenir la plus grande couverture spatiale de données paléoclimatiques, les causes du petit âge glaciaire ne sont pas entièrement élucidées. Cette période est associée à une diminution du rayonnement solaire, mais cette diminution est bien trop faible pour expliquer un refroidissement de 1 °C. Il doit donc exister des mécanismes amplificateurs du forçage solaire, mais ils ne sont pas clairement identifiés.

Le petit âge glaciaire est aussi associé à un volcanisme plus intense que celui des siècles précédents. Or le volcanisme explosif contribue au refroidissement du climat en voilant le ciel avec les particules relâchées



Synrise Scheenmann



prendre comment notre planète répond au changement.

Le petit âge glaciaire fait référence à la période 1400-1850 durant laquelle les hivers furent très rudes en Europe. Les peintures flamandes du XVII^e siècle témoignent de canaux gelés en hiver aux Pays-Bas, ce qui n'arrive plus aujourd'hui. Des études compilant un grand nombre d'archives climatiques réparties sur l'hémisphère Nord montrent que plusieurs périodes froides se sont succédé pendant le petit âge glaciaire, la température étant alors de 1 °C inférieure en moyenne à celle de la période de référence 1960-1990 (voir l'encadré page 44).

Bien que le petit âge glaciaire soit la période la plus récente de changement

dans l'atmosphère lors des éruptions. Cependant, cet effet ne dure qu'un ou deux ans. Il est donc difficile d'attribuer une période froide de 400 ans au forçage volcanique sans invoquer, là aussi, des mécanismes amplificateurs qui font durer la période froide jusqu'à l'éruption suivante. L'un de ces mécanismes est l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la neige : pendant une année froide, la neige fond moins que les autres années en été, aussi le sol reste-t-il blanc au lieu d'être brun. Le blanc absorbant peu de rayonnement solaire, le sol se refroidit, ce qui permet à la neige de s'étendre encore davantage l'année suivante.

On a aussi suggéré que la diminution du rayonnement solaire n'était peut-être

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.*

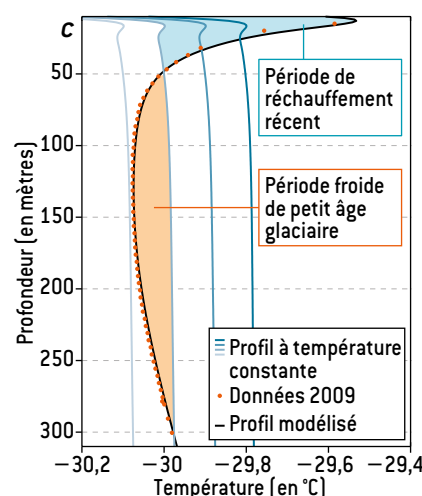
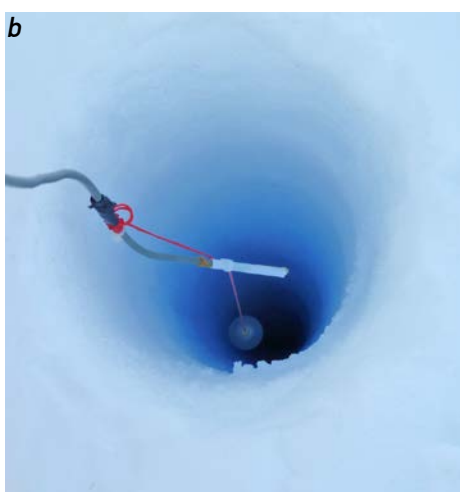
– *Je ne vois aucun fanion.*

– *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



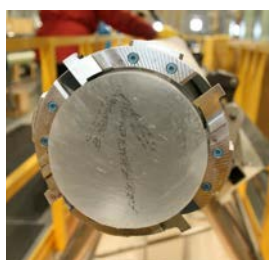
À cause de sa faible conductivité thermique, la neige garde en mémoire la température qu'il faisait lorsqu'elle était à la surface : la température met des centaines d'années à s'y homogénéiser. Ainsi, en mesurant la température de la neige dans un trou de forage avec un thermomètre précis – un thermistor,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

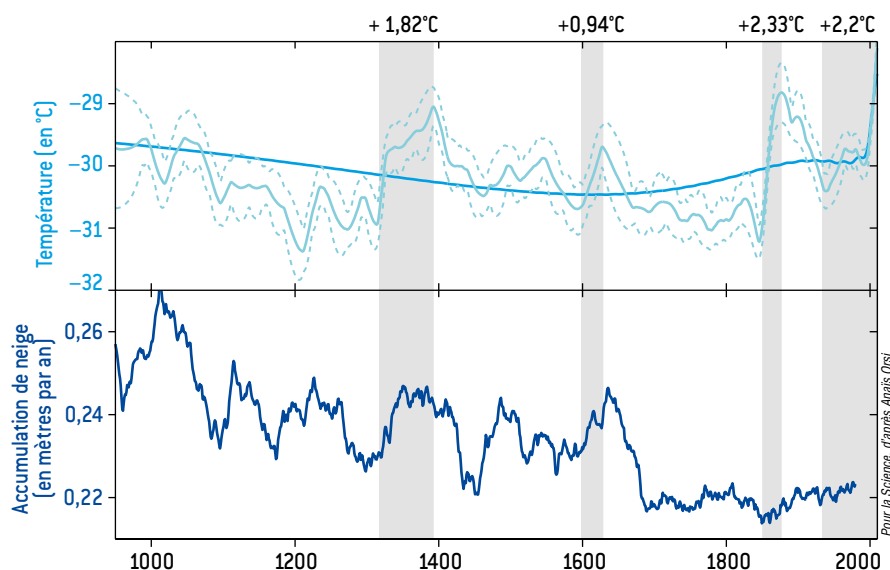
Ainsi, les molécules constituées d'isotopes différents diffusent dans le névé à des vitesses différentes, d'où un écart entre la composition de l'air de surface et celle de l'air piégé dans la glace. En particulier, quand la température augmente, le fond du névé, plus froid que la surface, concentre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

© Anaïs Osi



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 gruyère 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

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

Au Jardin des Plantes

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

POUR LA SCIENCE



La solidité de la mousse liquide

Ibrahim Cheddadi, Pierre Saramito et François Graner

À la fois liquides et solides, les mousses s'écoulent de façon bien mystérieuse pour les physiciens. Récemment, la compréhension de leur comportement a ouvert des horizons dans divers autres domaines.