

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.

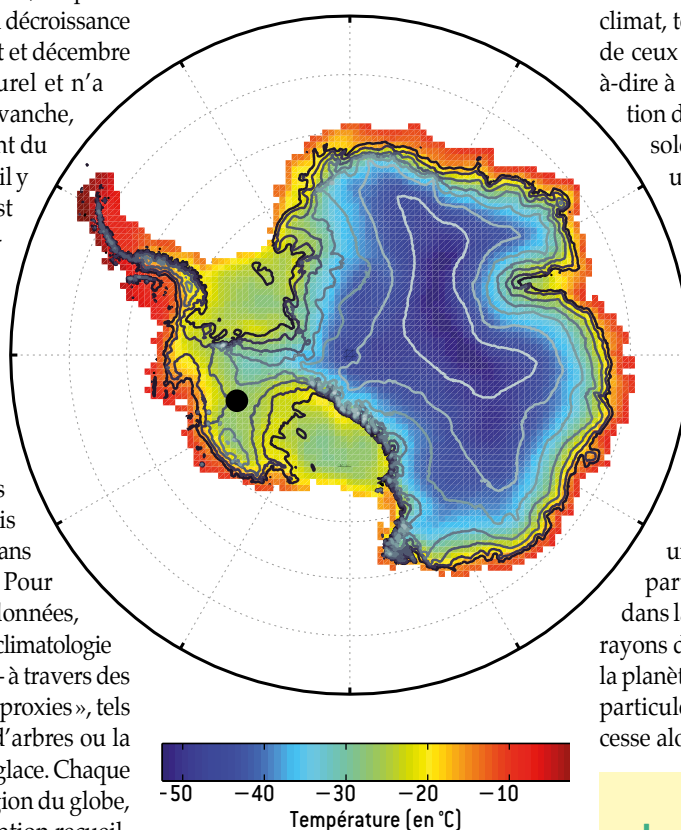
Malheureusement, nos ancêtres n'ont pas toujours mesuré la température à l'endroit où ils habitaient ou, s'ils l'ont fait, ils ont négligé de nous en informer. Nous n'avons de relevés fiables des températures que depuis environ 1850, et seulement dans certaines régions du globe. Pour remédier à ce manque 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'auteure 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



Sprintz 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