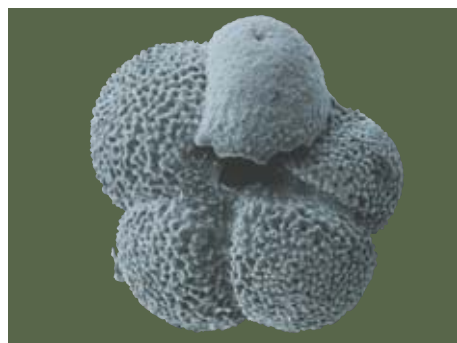
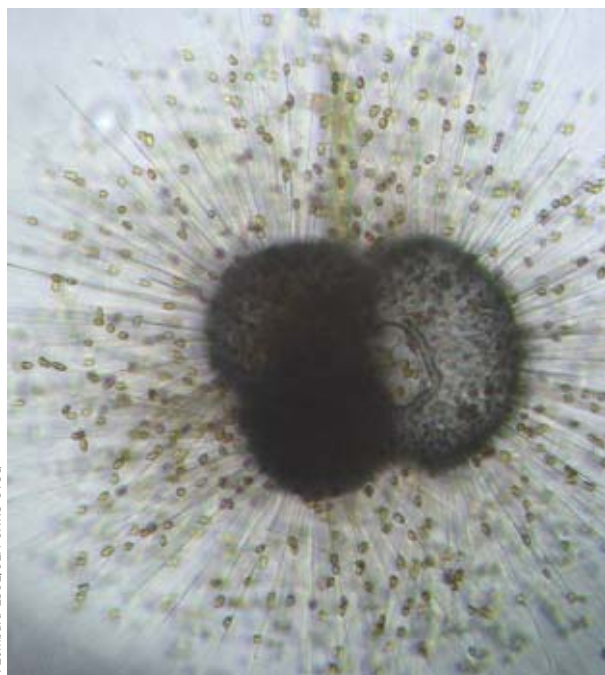


La géochimie isotopique, le thermomètre des climats du passé

Pour reconstruire les changements climatiques passés, l'analyse de la composition isotopique des glaces polaires et des sédiments marins, véritables archives naturelles, permet de recueillir des informations précieuses sur les variations de température et sur la circulation des océans au cours des temps géologiques. Outil incontournable, la géochimie isotopique joue un rôle majeur dans la compréhension des mécanismes climatiques.



L. Frogget et H. Leclaire - LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Foraminifère vivant (à gauche) et coquilles de foraminifères (à droite). Lorsque le foraminifère meurt, seule la coquille carbonatée, ou test, sédimente et est préservée dans les sédiments marins. Ce sont ces tests de foraminifères qui sont triés et analysés en spectrométrie de masse pour reconstruire les variations de la composition isotopique de l'oxygène.

F. Lombard - LSCE/CEA-CNRS-UVSQ

Les changements **climatiques** sont un sujet d'actualité depuis quelques années, les hivers sans neige succédant aux étés caniculaires, et les nombreux dérèglements climatiques suscitant des polémiques médiatiques. Pour comprendre quels sont les mécanismes gouvernant le climat de la **Terre** et replacer dans le temps les événements climatiques que nous vivons, les scientifiques analysent les enregistrements **météorologiques** obtenus par satellites ou par des mesures de terrain. Cependant, la période de temps couverte, de l'ordre de 150 ans pour les réseaux météorologiques, n'autorise pas l'étude des mécanismes dont les constantes de temps sont plus longues.

Dans ce contexte, la **paléoclimatologie** offre la possibilité de remonter sur plusieurs dizaines, centaines, milliers, voire millions, d'années. Ce sont ces études qui ont permis de mettre en évidence la forte variabilité temporelle du climat avec, en quelques milliers d'années, l'alternance entre des périodes chaudes, comparables à celle dans laquelle l'agriculture **néolithique** s'est développée, et des **périodes glaciaires**, au cours desquelles les hautes latitudes de l'hémisphère Nord étaient recouvertes d'épaisses **calottes de glace**. Mais comment reconstitue-t-on les climats du passé? La

géochimie des **isotopes stables** de l'oxygène et du carbone joue un rôle de tout premier plan. Les isotopes de l'oxygène seront ici plus spécifiquement examinés.

Les isotopes de l'oxygène, indicateurs climatiques

L'oxygène est présent dans l'air que nous respirons ou dans l'eau qui nous entoure sous la forme de plusieurs **isotopes** de masses respectives 16, 17 ou 18, selon le nombre de **neutrons** compris dans le **noyau**. Ces isotopes partagent les mêmes propriétés chimiques mais diffèrent par les propriétés physiques liées à leurs masses. Le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ sur Terre de n'importe quel corps renfermant de l'oxygène va être proche de 0,2 %, mais il n'est pas rigoureusement constant. Par exemple, le rapport isotopique d'une masse d'eau donnée va dépendre des phénomènes d'**évaporation-précipitation**. En effet, l'isotope le plus léger s'évapore plus facilement que l'isotope le plus lourd qui, lui, se condense plus aisément dans les pluies. La composition isotopique de la glace dans les forages polaires ou tropicaux va permettre de suivre au cours du temps l'évolution des processus



C. Morel/Our Polar Heritage

Quand l'eau de l'océan s'évapore aux basses latitudes, un nuage peut se former. Les isotopes légers (molécule d'eau contenant ^{16}O) s'évaporent plus facilement que les isotopes lourds. Lorsque le nuage se déplace de l'équateur vers les pôles, il va pleuvoir à plusieurs reprises (précipitations). Les isotopes lourds ^{18}O se condensent plus aisément dans les pluies. Le nuage va donc s'appauvrir en isotopes lourds tout au long de son trajet. La neige qui tombera sur les pôles sera par conséquent très "légère" car appauvrie en ^{18}O . Cet isotope lourd se retrouvera en revanche dans les océans, particulièrement en période glaciaire. Ici, paysage du Groenland.

physiques qui ont affecté le cycle de l'eau. Autre exemple, un organisme avec une coquille en **carbonate de calcium** (CaCO_3) va puiser dans l'eau de mer les **ions bicarbonate** et les **ions calcium** nécessaires à la fabrication de sa coquille. Or, les **ions carbonate** contenant les **isotopes lourds** de l'oxygène (^{18}O) ne **précipitent** pas à la même vitesse que ceux comportant les isotopes légers (^{16}O), et la différence de vitesse de précipitation entre les isotopes lourds et légers est d'autant plus grande que la température de l'eau est basse. La composition isotopique d'un carbonate de calcium d'origine biologique

constitue donc un thermomètre pour l'eau dans laquelle il s'est développé. Il faut toutefois souligner que cette composition isotopique dépend également de celle de l'eau dans laquelle le carbonate a précipité. La mesure physique consiste donc à transformer le carbonate de calcium en dioxyde de carbone (CO_2) sur lequel la composition isotopique de l'oxygène sera mesurée.

C'est grâce aux travaux pionniers du chimiste américain Harold Clayton Urey en 1947 que la paléoclimatologie isotopique a pu se développer. Cela a sans conteste joué un rôle majeur dans la compréhension des mécanismes climatiques naturels qui impliquent l'océan, l'**atmosphère**, la **cryosphère** et la **biosphère**. Deux exemples de résultats acquis au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (**LSCE**) sont détaillés ci-dessous.

Comprendre l'impact de débâcles d'icebergs sur la circulation océanique

Les études effectuées à partir de **sédiments** marins et de glaces polaires ont montré que le climat de la dernière période glaciaire, il y a entre 60 000 ans et 10 000 ans, était ponctué d'épisodes très froids, extrêmement rapides à l'échelle des temps géologiques, et d'impact au moins hémisphérique. De tels événements, appelés **événements de Heinrich**, sont dus à des débâcles massives d'**icebergs** dans l'océan Atlantique Nord, entre 40 et 60° N environ (figure 1). Leur enregistrement dans les sédiments marins se traduit par la présence de niveaux riches en cailloux de toutes tailles et de toutes natures **péetrographiques**, au milieu d'un sédiment généralement riche en micro-organismes carbonatés. Ces débâcles d'icebergs ont provoqué en fondant un énorme apport d'eau douce, un ralentissement du transport des eaux chaudes et salées des basses latitudes vers les hautes latitudes par la **dérive Nord Atlantique** et un refroidissement des eaux de surface de l'Atlantique Nord. Les carottes de sédiments marins ont permis de dresser une cartographie de l'impact isotopique d'un événement de Heinrich sur les eaux de surface et d'en quantifier l'influence en termes de température et de salinité. Les températures des eaux de surface ont diminué en moyenne de 2 à 4 °C pendant ces débâcles et leur salinité d'environ 0,5 ‰. Cette diminution conjuguée de la température et de la salinité a modifié la densité des eaux de surface, affectant ainsi la circulation océanique à une échelle bien plus large que le seul océan Atlantique Nord.

Si la géochimie isotopique a renseigné sur l'amplitude de la chute de salinité, la durée de ces événements et leur intensité en termes de volume de glace impliqué étaient toujours très mal estimées (de 0,1 à 10 millions de km^3 , en 10 ans ou en plus de 1 000 ans). La **simulation numérique** du transport des isotopes de l'eau dans des expériences de débâcles d'icebergs a permis d'apporter des éléments de réponse aux questions relatives à la durée et à l'intensité de la débâcle. Or, ces deux paramètres sont fondamentaux pour quantifier les seuils de réponse de la circulation **thermohaline** dans une décharge d'eau douce. Pour cela, les chercheurs du LSCE ont utilisé un modèle de complexité intermédiaire

Spectromètres de masse à source gazeuse pour la mesure de la composition isotopique de l'oxygène des foraminifères. Les coquilles des foraminifères en carbonate de calcium sont transformées en dioxyde de carbone sur lequel l'analyse isotopique est réalisée. Ici, gros plan sur les verreries dans lesquelles se produit la réaction entre le carbonate de calcium et l'acide.



P. Bazoge/CEA



L'analyse de carottes de glaces polaires et de sédiments marins a mis en évidence des événements climatiques froids et extrêmement rapides survenus au cours de la dernière période glaciaire. Ils sont dus à des débâcles massives d'icebergs qui ont amené d'énormes quantités d'eau douce dans l'Atlantique Nord, perturbant fortement la circulation océanique.

(EMIC) pour reproduire une débâcle d'icebergs survenue il y a 40 000 ans, en modifiant sa durée et son intensité, et ont déterminé les simulations ressemblant le plus aux données mesurées dans les sédiments marins⁽¹⁾. La meilleure analogie entre expériences numériques et données isotopiques est obtenue pour des durées de débâcle d'icebergs de 200 ± 100 ans et un flux d'eau douce de l'ordre de $0,25 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un total de 1,5 million de km^3 de glace dont la fonte aura fait monter le niveau de la mer d'environ 3 m. L'extrême brièveté de cet événement était inattendue en raison de son énorme impact sur le climat global.

Appréhender les mécanismes possibles de déstabilisation des calottes glaciaires

Plus proche du climat que nous connaissons actuellement, la dernière **période interglaciaire** précédant la nôtre, survenue il y a environ entre 129 000 ans et 118 000 ans, a été riche d'enseignement. Les archives géologiques, qu'elles soient marines, glaciaires ou continentales, ont permis de montrer que les températures de l'air et de l'océan de surface durant cette période étaient en moyenne de 2 à 5 °C plus chaudes que celles de notre interglaciaire, appelé **Holocène**. Le niveau marin était de l'ordre de 4 à 6 m plus haut que l'actuel, à cause en particulier de la fonte partielle des calottes de glace continentales présentes au Groenland et en Antarctique de l'Ouest. Les calottes de glace n'ont pas toutes la même sensibilité aux changements de température : en Arctique, la dernière période interglaciaire était assez chaude pour réduire d'environ 50 % la taille de la calotte groenlandaise. En revanche, en Antarctique, la température de l'air est très basse et la calotte Antarctique de l'Ouest, dont la

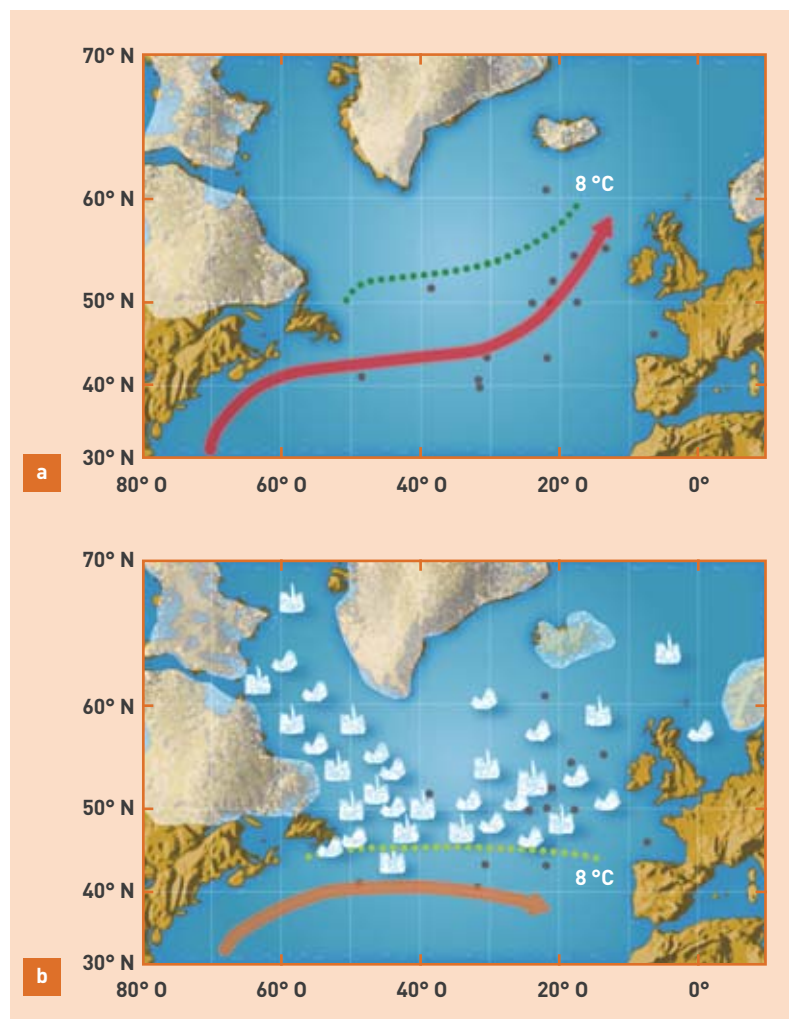
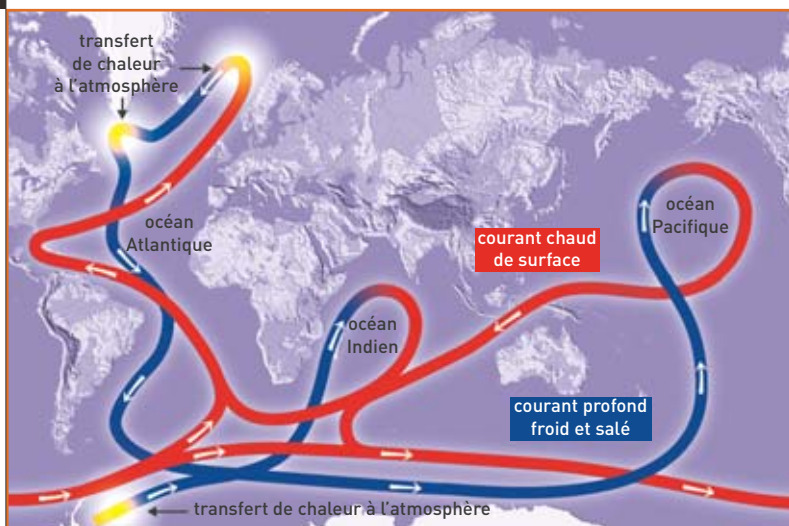


Figure 1. Les mécanismes des événements de Heinrich. En a, température en période glaciaire, avant l'événement de débâcle. En b, impact d'une débâcle d'icebergs sur les températures des eaux de surface. Le retour à la normale est observé après la disparition des eaux de fonte d'icebergs. Les flèches correspondent à la dérive Nord Atlantique en mode non perturbé (en rouge) et en mode perturbé (en orange) et les lignes en pointillés à l'isotherme 8 °C.

(1) D. ROCHE, D. PAILLARD and E. CORTIJO, "Constraints on the duration and freshwater release of Heinrich event 4 through isotope modelling", *Nature*, 432, p. 379-382, 2004.



Circulation profonde, appelée thermohaline, engendrée par les différences de densité entre les masses d'eau. Dans la mer de Norvège, mais aussi autour de l'Antarctique, les eaux deviennent très froides. Une partie de l'eau gèle (vers $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) pour donner la glace de mer (banquise) et expulse son sel, augmentant ainsi la salinité de l'eau liquide. Il en résulte une eau très salée et très froide, donc très dense, qui va plonger vers le fond de l'océan. Cette eau va ensuite parcourir un grand périple au fond de l'ensemble de l'océan mondial. À la faveur des remontées d'eau froide profonde, produites par la diffusion vers les masses plus chaudes ou causées par le vent sur certains bords de côtes ou dans la zone équatoriale, ces eaux vont remonter vers la surface où elles se réchaufferont. Elles seront prises par la circulation de surface et finalement ramenées dans les zones de formation d'eau profonde, après un périple pouvant durer 1 000 ans. (Rapport 2001 du GIEC).

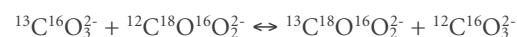
base repose à 600 m sous le niveau de la mer, est bien plus sensible à la température de l'eau de mer qui vient la baigner qu'à la température de l'air. Connaître l'évolution de la température des eaux profondes au cours de la dernière période interglaciaire est donc une clé pour comprendre les mécanismes possibles de déstabilisation de la calotte Antarctique de l'Ouest⁽²⁾. Là encore, l'outil isotopique est de première importance. L'étude très pré-

(2) J.-C. DUPLESSY, D. ROCHE and M. KAGEYAMA, "The deep ocean during the last interglacial period", *Science*, 316(5821), p. 89-91, 2007.

cise des carottes de sédiments marins disponibles dans la totalité des océans du monde a permis de mettre en évidence une différence isotopique entre les coquilles d'animaux formées dans les eaux profondes modernes et celles de la dernière période interglaciaire. Cette différence est très faible puisque convertie en température, elle est de l'ordre de 0,3 à 0,5 $^{\circ}\text{C}$ selon les bassins océaniques. À nouveau, l'utilisation couplée de modèles de complexité intermédiaire et des données isotopiques a permis d'expliquer le réchauffement des eaux profondes atlantiques lors de la dernière période interglaciaire. En effet, les paramètres orbitaux qui régissent la quantité et la distribution d'énergie que la Terre reçoit du Soleil ne sont pas restés constants au cours du temps. Il y a 125 000 ans, les étés étaient plus chauds que les étés actuels, alors que la concentration en **gaz à effet de serre** était comparable aux valeurs pré-industrielles de l'Holocène. Le modèle simule bien un océan globalement plus chaud, il y a 125 000 ans, qu'aujourd'hui. Les changements de température des eaux à 500 m de profondeur dans l'océan Austral simulés par le modèle indiquent un réchauffement de l'ordre de 0,1 à 0,5 $^{\circ}\text{C}$. Celui-ci peut paraître modeste mais il ne faut pas en négliger les conséquences. En effet, les observations satellitaires indiquent que la vitesse de recul des glaciers émanant de la calotte Antarctique s'accroît de 1 m/an pour chaque augmentation de 0,1 $^{\circ}\text{C}$ de la température de l'eau de mer qui la baigne. La calotte Antarctique de l'Ouest est donc particulièrement vulnérable à de faibles changements de température.

Un outil de plus en plus pointu

Grâce aux précisions accrues des appareils de mesure, il devient réalisable de mesurer de très faibles effets isotopiques qui affectent l'isotope ^{17}O de l'oxygène des bulles d'air piégées dans les carottes de glace et d'en déduire l'évolution de la biosphère dans le passé. Dans les carbonates, il est maintenant possible de mesurer des combinaisons isotopiques plus complexes : ainsi, la mesure des concentrations d'équilibre des espèces intervenant dans la réaction



devrait permettre d'accéder directement à la température des eaux dans lesquelles ces carbonates ont précipité, alors que le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dépend aussi de la teneur en ^{18}O de l'eau. Tous ces développements en cours au LSCE ouvrent de nouvelles perspectives pour la compréhension des phénomènes climatiques. Au cours des cinquante dernières années, la géochimie isotopique a montré son potentiel pour identifier et quantifier les changements environnementaux, notamment pour l'étude des climats du passé. La géochimie isotopique n'a pas dit son dernier mot.

> Elsa Cortijo

Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement/Institut Pierre-Simon Laplace
Unité mixte de recherche CEA-CNRS-UVSQ
Direction des sciences de la matière
CNRS (Gif-sur-Yvette)



La cave-carothèque, située à Gif-sur-Yvette, qui renferme la collection d'échantillons de sédiments marins prélevés dans tous les océans du monde. Ces sédiments contiennent de nombreux organismes qui ont enregistré les conditions régnant dans leur milieu pendant leur croissance. La composition isotopique des coquilles de foraminifères qui s'y trouvent renseigne sur le climat qui prévalait du vivant du foraminifère. En bas à gauche, carotte de sédiments marins extraits de l'Atlantique Nord. Elle a été découpée en tronçons de 1,50 m de long, dont l'empilement permet de remonter l'échelle des temps géologiques.