

Les sédiments marins, témoins du climat

Entretien avec **Catherine Kissel**, chercheuse au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE, CEA-CNRS-UVSQ), Gif-sur-Yvette)



Franck Delbart - IPEV

▲ Le Marion Dufresne au mouillage à Kerguelen.

Catherine Kissel, chercheuse au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), ne tarit pas d'éloges sur le Marion Dufresne¹. « C'est un très beau bateau océanographique, confortable et convivial. Mais surtout, il est équipé d'un carottier remarquable, unique au monde. Il peut prélever en une seule opération des « séquences sédimentaires » de plusieurs dizaines de mètres de long – son record : 64 m –, sur environ dix centimètres de diamètre. Le seul autre navire océanographique pouvant réaliser des carottages longs est le bateau américain Joides Resolution. Mais, utilisant une technique toute différente, les carottes qu'il remonte ont un diamètre beaucoup plus petit (environ six centimètres), ce qui perturbe plus le sédiment par simple effet de friction sur les bords et offre moins de matière aux scientifiques pour travailler.

À bord du Marion Dufresne, aussi bien l'équipage en charge du carottage que celui responsable de la navigation mettent vraiment toute leur énergie à satisfaire les objectifs des scientifiques. C'est très impressionnant notamment de les voir réaliser un carottage par 5 ou 6 m de creux. Lors de notre dernière campagne, dans les fjords chiliens, le commandant a été d'une patience infinie. Il faut dire que nous avons été amenés plusieurs fois à bouleverser le programme de navigation. »

Géologue de formation, Catherine Kissel a rejoint en 1982 le laboratoire devenu par la suite le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement. Depuis 1995, elle étudie les carottes de sédiments marins pour reconstituer les climats du passé et, plus particulièrement, la circulation océanique profonde associée à ces climats.

À bord, un travail physique

Lors de la campagne Pachiderme, en février 2007 sur la côte sud du Chili, Catherine Kissel était chef de mission. « Chef de mission, c'est beaucoup de travail, avant, pendant et après. Avant, il faut penser à tout : monter le projet en collaboration avec les collègues, sélectionner les équipes de scientifiques – 41 scientifiques lors de la dernière campagne –, demander les autorisations pour travailler dans les zones économiques et/ou territoriales, établir le planning... qui n'est jamais définitif. En embarquant sur le Marion Dufresne à Punta Arenas, j'ai appris que la navigation dans les chenaux chiliens nécessitait la



Michel Honoré

▲ Catherine Kissel, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE, CEA-CNRS-UVSQ), mène des recherches en paléoclimatologie au travers des sédiments marins.

1. Armé par la CMA-CGM, le Marion-Dufresne est un navire polyvalent à deux fonctions principales. Il est affrété à tiers-temps par l'administration des terres Australes et Antarctiques françaises (TAAF) pour desservir les îles australes françaises de Crozet, Kerguelen et Amsterdam, au départ de la Réunion. Le reste du temps, il est affrété par l'Institut Paul-Émile Victor (IPEV) pour la réalisation de campagnes océanographiques. Sa taille – 120 m de long, un des plus grands navires de la flotte scientifique mondiale –, ses possibilités de logement, de transport de fret, de manutention et d'autonomie, lui permettent les campagnes à la mer les plus lourdes.



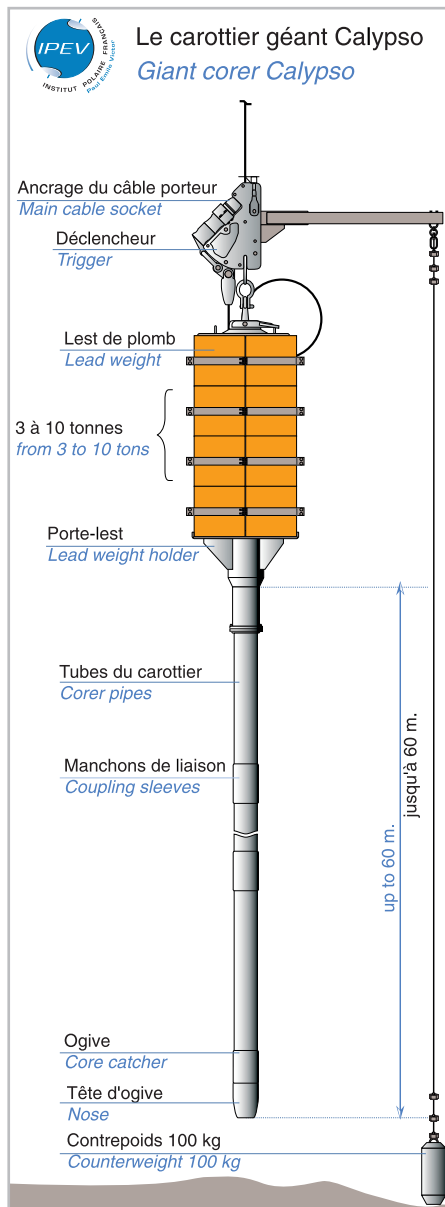
A. Cathala - IPEV

présence à bord de deux pilotes, avec une relève tous les sept jours qui ne pouvait se faire que dans certains ports. D'où la nécessité de revoir tout mon planning afin de minimiser les transits entre les points de carottage au large et les ports. Évidemment, tout cela est constamment remis en question à bord en fonction de la météo, du déroulement des opérations de carottages... Le planning est toujours ajusté en temps réel.

Pendant la campagne, nous travaillons par quarts, car les carottages ont lieu à toute heure. On manipule des dizaines de tronçons de carottes pesant chacun 25 kg. C'est très physique.

L'équipe scientifique responsable du déroulement de la mission (chef de mission et collègues) étudions sur la carte le prochain point de forage et décidons, sur la base notamment des relevés acoustiques faits en continu sur le bateau, quel sera le prochain site de carottage. C'est un travail à plein temps, surtout dans les régions relativement inexplorées avec les méthodes modernes de prospection car la recherche de site peut y être assez longue. Autant dire que durant les semaines de mission, le chef de mission ne dort en général pas beaucoup ! »

Avant de mettre en œuvre les carottiers, il faut donc trouver le site. Tout un art ! Le site dépend de ce que l'on veut étudier. Une sédimentation rapide, de l'ordre de 20 à 30 cm en 1 000 ans, permet d'étudier des changements presque à échelle humaine. Trois mètres de carotte suffiront pour remonter 10 000 ans en arrière avec



▲ Le carottier Calypso embarqué à bord du Marion Dufresne.

Quand le contre-poids touche le fond, il déclenche le largage du lest en plomb d'environ 7 tonnes qui enfonce, par son seul poids, le tube dans le sédiment. Il n'y a plus alors qu'à remonter l'ensemble. Descendant à la vitesse de 1 m/s, le carottier met près d'une heure pour atteindre un fond de 3 000 m et autant pour être remonté.

une résolution fine, de l'ordre de 50 ans (l'analyse de la carotte se fait centimètre par centimètre, voire plus). Une sédimentation lente (1 cm en 1 000 ans), sur une épaisseur de 60 m, permettra de remonter aux temps géologiques plus anciens. Selon que l'on cherche à étudier telle ou telle masse d'eau, on procèdera à des carottages à différentes profondeurs (le Marion Dufresne peut procéder à des carottages jusqu'à 6 000 m de fond). Mais dans tous les cas, on choisira une zone pas trop pentue, plutôt une bosse qu'un creux, éloignée de tout tombant, un lieu bien protégé des avalanches sous-marines qui, en brassant le sédiment, le rendraient inutilisable. Pour cette recherche, les échosondeurs

Le programme Images

Les campagnes de carottage du Marion Dufresne sont menées, pour beaucoup d'entre elles, dans le cadre d'Images (*International marine past global changes study*), programme scientifique international visant à comprendre le rôle de l'océan dans le système climatique de la Terre depuis un million d'années. Circulation océanique, cycle biogéochimique, impact de l'océan sur l'environnement continental et le développement de l'humanité sont les principaux thèmes d'études.

Comme tout programme de recherche, Images favorise les collaborations entre scientifiques de disciplines diverses en favorisant entre autres l'action de groupes de travail, l'organisation de conférences spécialisées. Mais surtout, Images est le cadre dans lequel la plus grande partie des campagnes de carottage qui fourniront le matériau de base des études se déroule. Le but scientifique d'Images étant la haute résolution, ces campagnes se font principalement à bord du Marion Dufresne qui dispose d'un carottier exceptionnel permettant d'atteindre des périodes anciennes avec une très bonne résolution temporelle. Le carottier Calypso se compose d'un énorme poids (7 tonnes) et d'un tube de 10 centimètres de diamètre interne, plus ou moins long (record 64 m) selon l'épaisseur du sédiment auquel on a accès et que l'on souhaite remonter. L'ensemble est descendu par un câble de kevlar jusqu'au fond de la mer. En touchant le fond, un dispositif commande le largage du poids qui, par sa seule masse, enfonce le tube dans le sédiment. Cette technique de carottier piston perturbe parfois les premiers mètres de sédiment, un second carottier, le Casq, plus court (12 m) mais plus gros (section carrée de 25 cm), vient compléter le travail du Calypso.

Selon ses besoins, le programme Images peut faire appel à d'autres navires, mais le Marion Dufresne reste la référence en la matière.

Depuis sa création il y a douze ans, le programme Images a monté une quinzaine d'expéditions internationales de par le monde, constituant une remarquable archive de sédiments stockés, par tronçons d'un mètre cinquante, dans les sous-sols frais et humides (parfait pour la conservation du sédiment qui ne doit pas sécher) des locaux du LSCE à Gif-sur-Yvette, en région parisienne, ou dans d'autres « carothèques » du monde. Ces sédiments, témoins de l'histoire des océans et du climat, sont abondamment étudiés par les chercheurs impliqués dans les campagnes de prélèvement et sont également mis à disposition de l'ensemble de la communauté.

Plus d'info sur www.images-pages.org

multifaisceaux du *Marion Dufresne* – les uns permettent de dresser la topographie du fond, d'autres donnent une indication sur l'épaisseur de la couche de sédiment –, sont des instruments précieux.

« *La campagne Pachiderme² avait pour but d'étudier, entre autres, l'histoire de la thermocline et de la ventilation des eaux intermédiaires dans le Pacifique du sud-est, les changements en latitude de l'intensité des vents d'ouest, les synchronismes inter hémisphériques des variations climatiques reconnues, la chronologie du retrait des glaciers principaux Patagonie-Cordillère de Darwin depuis le dernier maximum glaciaire et notamment pendant la dernière déglaciation. Nous avons donc procédé à des carottages du large vers la côte, jusque dans les fjords. La côte sud chilienne est intéressante à plus d'un titre. D'abord c'est la seule terre à ces latitudes qui s'oppose aux vents d'ouest et ainsi au courant océanique d'ouest subantarctique qui leur est associé. La barrière que constitue la cordillère des Andes vis à vis de ces vents génère également des précipitations diluviennes, lessivant les sols et entraînant une sédimentation énorme dans les fjords : moins de 10 000 ans d'archive sur une carotte de 46 m, cela correspond à une résolution de deux ans. De quoi distinguer l'alternance de périodes sèches et humides.* »

Au cours de cette campagne, du 6 au 28 février 2007, le *Marion Dufresne* a procédé à des carottages en 38 stations différentes, entre

40° S et 54° S, retirant ainsi un peu plus de 800 mètres de sédiments au total.

À bord, les équipes de scientifiques, organisées en quart, s'occupent des carottes prélevées. Dès que le tube du carottier est remonté, celui-ci est couché sur le pont. Le tube en plastique très dur et résistant contenant le sédiment est extrait du tube en acier. Cette enveloppe plastique est découpée en tronçons de 1,5 m. Chaque tronçon, dûment référencé, est ensuite coupé en deux sur la longueur. Une moitié est immédiatement emballée et mise en chambre froide pour éviter qu'elle ne sèche. C'est la moitié archive que l'on garde intacte le plus longtemps possible. La seconde moitié est la partie de travail sur laquelle les scientifiques du bord se livrent à leurs premières expériences. Tout d'abord, un examen visuel, à l'œil nu ou à l'aide d'un microscope, sur la longueur complète du carottage, est opéré. Il est complété par une première série de mesures sur le sédiment lui-même. Ces premiers examens, réalisés dans des conditions évidemment plus difficiles que dans un laboratoire à terre, sont non destructives. Ils remplissent deux objectifs : s'assurer que le lieu de carottage tient bien ses promesses quant aux objectifs scientifiques fixés et établir un état initial du sédiment qui permettra de vérifier, lors des études ultérieures à terre, que la carotte n'a pas subi d'altération.

2. *Pachiderme* : acronyme de *Pacifique-Chili, dynamique des eaux intermédiaires*.

À terre, des analyses variées

À l'issue de la mission, chacun rentre dans son laboratoire en attendant le retour des précieuses carottes de sédiment afin de reprendre les investigations au calme et avec des moyens spécialisés plus précis. Celles-ci sont nombreuses et variées. Le sédiment est composé en grande majorité d'éléments détritiques venus de la terre avec une contribution mineure en volume d'éléments d'origine biologique, essentiellement des diatomées et des foraminifères, organismes unicellulaires, principaux constituants du plancton. Le simple fait de déterminer les espèces en présence renseigne directement sur la température de l'eau, en surface ou en profondeur selon le style de vie de l'organisme à l'époque où il a vécu. L'analyse isotopique des atomes d'oxygène et de carbone contenus dans les squelettes de ces micro-organismes vient compléter les premières informations.

Les sédiments contiennent aussi des couches de cendres volcaniques qui renseignent sur les éruptions passées, les spécialistes sachant reconnaître de quel volcan elles proviennent. Près des côtes, la nature et la densité des particules terrigènes (argile, quartz, etc.) permettent de remonter avec une bonne précision au régime pluviométrique à terre.

▼ Manœuvre du carottier géant *Calypso*.



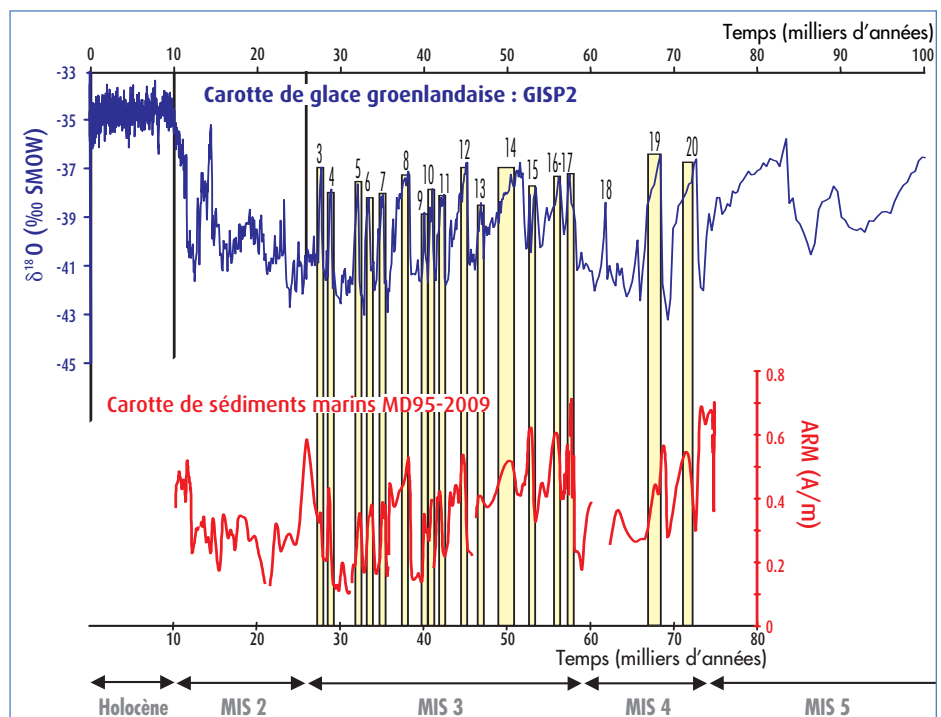
► Extraction d'une carotte sédimentaire. Le tube du carottier, posé sur le pont, est démonté. Le tube de plastique blanc, qui contient le sédiment, est extrait et sectionné en tronçons de 1,50 m de longueur, dûment numérotés et référencés.



Yvon Balut - IPEV

Chaque laboratoire a sa spécialité. Celui de Catherine Kissel, c'est l'étude des « propriétés magnétiques ».

« Ces études consistent à caractériser la fraction magnétique contenue dans le sédiment en déterminant la nature, la taille et la concentration des particules magnétiques. Ceci permet d'identifier la source de ces minéraux et leurs conditions de transport. La région du sud Chili est un nouveau terrain d'investigation pour nous mais nous avons déjà mené ce type d'étude avec succès dans d'autres régions du globe caractérisées par des régimes océaniques et climatiques différents. En Atlantique nord par exemple, nous avons obtenu des résultats tout à fait intéressants pour la compréhension des variations rapides de la circulation océanique profonde dans le passé. Nous y avons montré que la quantité de particules magnétiques des sédiments distribués le long du parcours de l'eau profonde, depuis le nord de l'Islande jusqu'aux Bermudes, a varié très rapidement au cours du temps et ceci en très bonne corrélation avec les périodes chaudes et froides déterminées par les carottages de la calotte glaciaire du Groenland. Nous retrouvons dans nos sédiments marins les fameuses oscillations de Dansgaard-Oeschger, ces changements climatiques rapides en pleine période glaciaire (entre -100 000 ans et -18 000 ans), au cours desquels la température remonte de 10 à 15 °C en quelques dizaines d'années. La quantité des particules magnétiques observée est directement liée à l'intensité des courants de fond qui les transportent depuis leur source islandaise jusqu'au site d'étude. Nos résultats indiquent ainsi une association étroite entre période froide et circulation profonde réduite et période chaude et circulation profonde active. Le même type d'étude sur les sédiments chiliens nous permettra, entre autres, d'identifier les variations de la charge sédimen-



▲ Le climat selon les glaces du Groenland et les sédiments marins.

- En haut : courbe reconstituant les changements de température de l'atmosphère en Arctique, établie à partir de la teneur en oxygène 18 des glaces du Groenland. On constate des oscillations rapides du climat pendant la dernière période glaciaire (oscillations de "Dansgaard-Oeschger") et, à l'inverse, une faible amplitude des variations climatiques pendant l'Holocène (les derniers 10 000 ans).
- En bas : courbe obtenue à partir des sédiments marins prélevés grâce au Marion Dufresne représentant les mêmes variations rapides mais, cette fois, de la circulation profonde dans l'Atlantique nord. Le paramètre reporté (ARM) illustre la variation au cours du temps de la quantité des particules magnétiques fines transportées par les courants profonds selon leur intensité. Comme l'indiquent les surlignages jaunes, à chaque variation de la température de l'atmosphère coïncide une variation de l'intensité du courant profond océanique. MIS1, MIS2, etc., indiquent les différents stades isotopiques marins. Le dernier maximum glaciaire (grande couverture de glace aux pôles, niveaux des mers plus bas) fait partie du MIS2.

taire des fjords, elles-mêmes liées au taux de pluviosité sur le continent (les particules magnétiques transportées dans les fjords sont d'origine continentale proche). Beaucoup reste à faire pour comprendre la dynamique et les mécanismes régissant le système

climatique et son histoire passée. Bien entendu, les programmes d'études scientifiques ne s'arrêtent pas aux dernières campagnes ; d'autres sont déjà en cours d'organisation, dans d'autres océans du monde... »