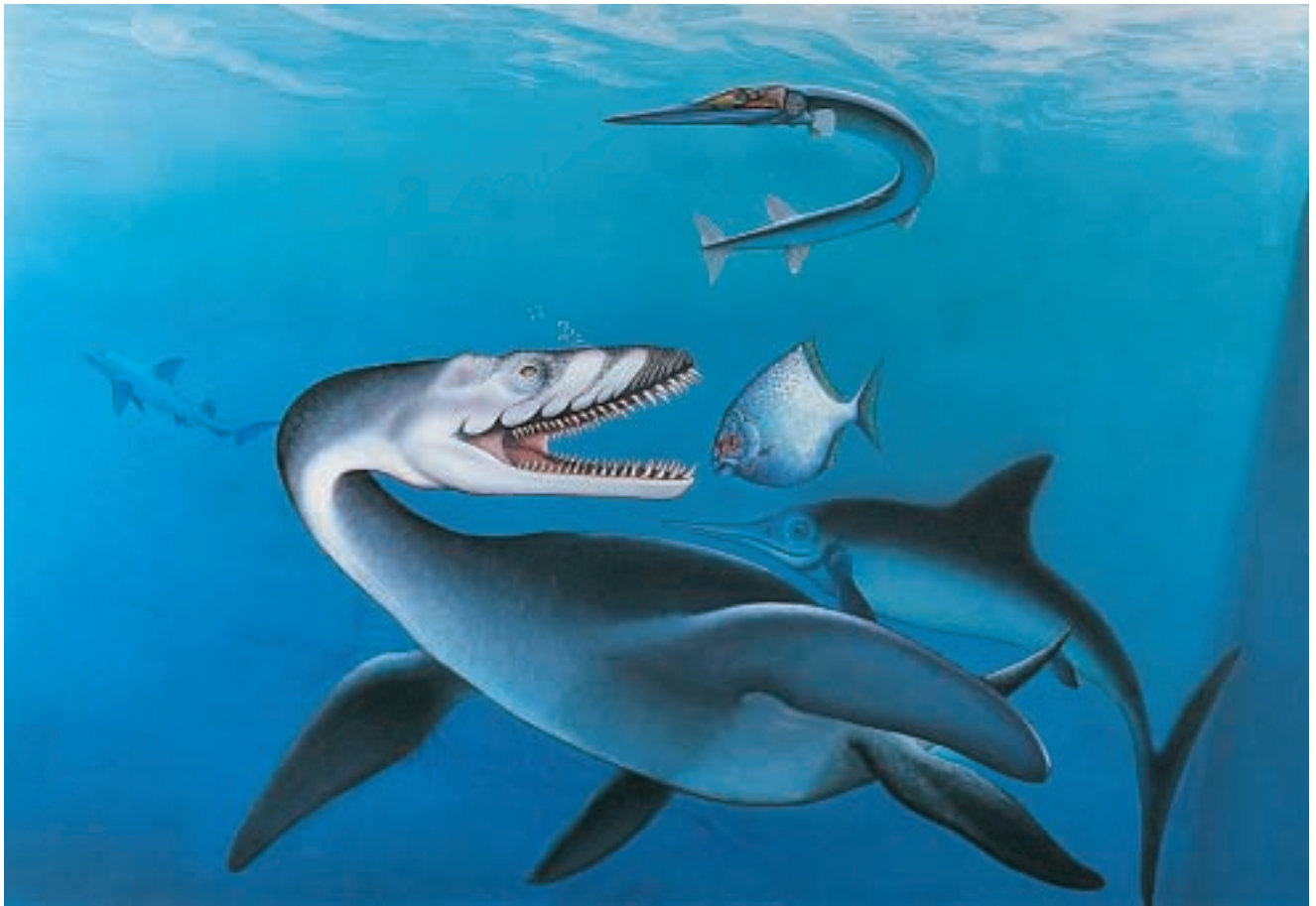




7. À L'EXTRÊME FIN DU TRIAS, selon les fossiles découverts à Provençhères-sur-Meuse, la transgression rhétienne favorise le développement de reptiles marins tels les plésiosaures (au premier plan) et les ichthyosaures (à l'arrière-plan) qui ressemblent au dauphin.

Des poissons au corps très élevé et possédant des dents broyeuses, nommés *Sargodon*, apparaissent aussi à cette époque. *Saurichthys*, un poisson filiforme, et *Hybodus* (à l'arrière-plan à gauche), un requin primitif, existaient quant à eux dès le début du Trias.

sique sont les prosauropodes, les tritylodontes et les ornithischiens. Prosauropodes et tritylodontes sont des lignées en pleine expansion depuis le Norien, et les ornithischiens existaient déjà à la fin du Trias. Les seuls herbivores à s'éteindre dans cette période sont les aëtosaures et les trilophosaures, lignées déjà anciennes, ayant survécu à la crise Carnien-Norien et probablement affaiblies. L'attribution de cette crise à la chute d'une météorite est donc sans fondement.

La transition du Trias au Jurassique est marquée par une crise brutale en Europe à la limite Carnien-Norien et par un simple réaménagement des faunes à la fin du Trias ; en Amérique du Nord, on observe l'inverse. À une échelle globale, on observe l'extinction de lignées majeures à la limite Carnien-Norien, mais aussi à l'extrême fin du Trias. Toutefois dans la première partie du Jurassique, l'Hettangien, le niveau des mers était élevé : nous trouvons surtout des sédiments marins pour cette période. L'Hettangien est

en outre difficile à distinguer des autres périodes dans les environnements terrestres, comme en Amérique du Nord ou en Chine. Comment en ce cas être assuré de l'extinction de certaines lignées à la limite entre le Trias et le Jurassique ? On a ainsi retrouvé dans les carrières d'Hettange, en Lorraine, des dents de phytosaure. Ce site est pourtant la référence internationale qui définit l'Hettangien : les phytosaures, contrairement à ce que l'on croyait jusqu'à présent, ne se seraient-ils pas éteints à la fin du Trias ? Peut-être ces fossiles ont-ils été déposés durant le Trias, arrachés à la roche par un cours d'eau au début du Jurassique et redéposés secondairement dans une mer peu profonde.

La corrélation exacte des formations géologiques situées sur des continents différents est aussi difficile. Ce que l'on nomme Rhétien en Amérique du Nord représente-t-il la même période que ce que l'on nomme Rhétien en Europe ? De telles incertitudes peuvent-elles modifier notre vision globale des événements

de la fin du Trias ? Seule la découverte de nouveaux sites fossilifères à travers le monde nous permettra de répondre à ces questions, car la paléontologie est avant tout une science de terrain.

Gilles CUNY est paléontologue au Département de géologie de l'Université de Bristol.

Les dinosaures, Dossier Pour la Science, septembre-novembre 1993.

The Beginning of the Age of Dinosaurs : Faunal Change across the Triassic-Jurassic Boundary, sous la direction de Kevin Padian, Cambridge University Press, 1986.

Louis de BONIS, *Évolution et extinction dans le règne animal*, Masson, 1991.

Eric BUFFETAUT, *Grandes extinctions et crises biologiques*, Mentha, 1992.

Jean-Michel MAZIN et Gilles CUNY, *Plateosaurus et l'histoire des dinosaures*, Cercle Girardot, Lons-le-Saunier, 1992.

In the Shadow of the Dinosaurs : Early Mesozoic Tetrapods, sous la direction de Nicholas C. Fraser et Hans-Dieter Sues, Cambridge University Press, 1994.

L'origine des glaciations

WALLACE BROECKER

Dans le passé, les températures sur Terre ont varié de plus de dix degrés en quelques dizaines d'années seulement. De tels sauts climatiques auront-ils encore lieu ?

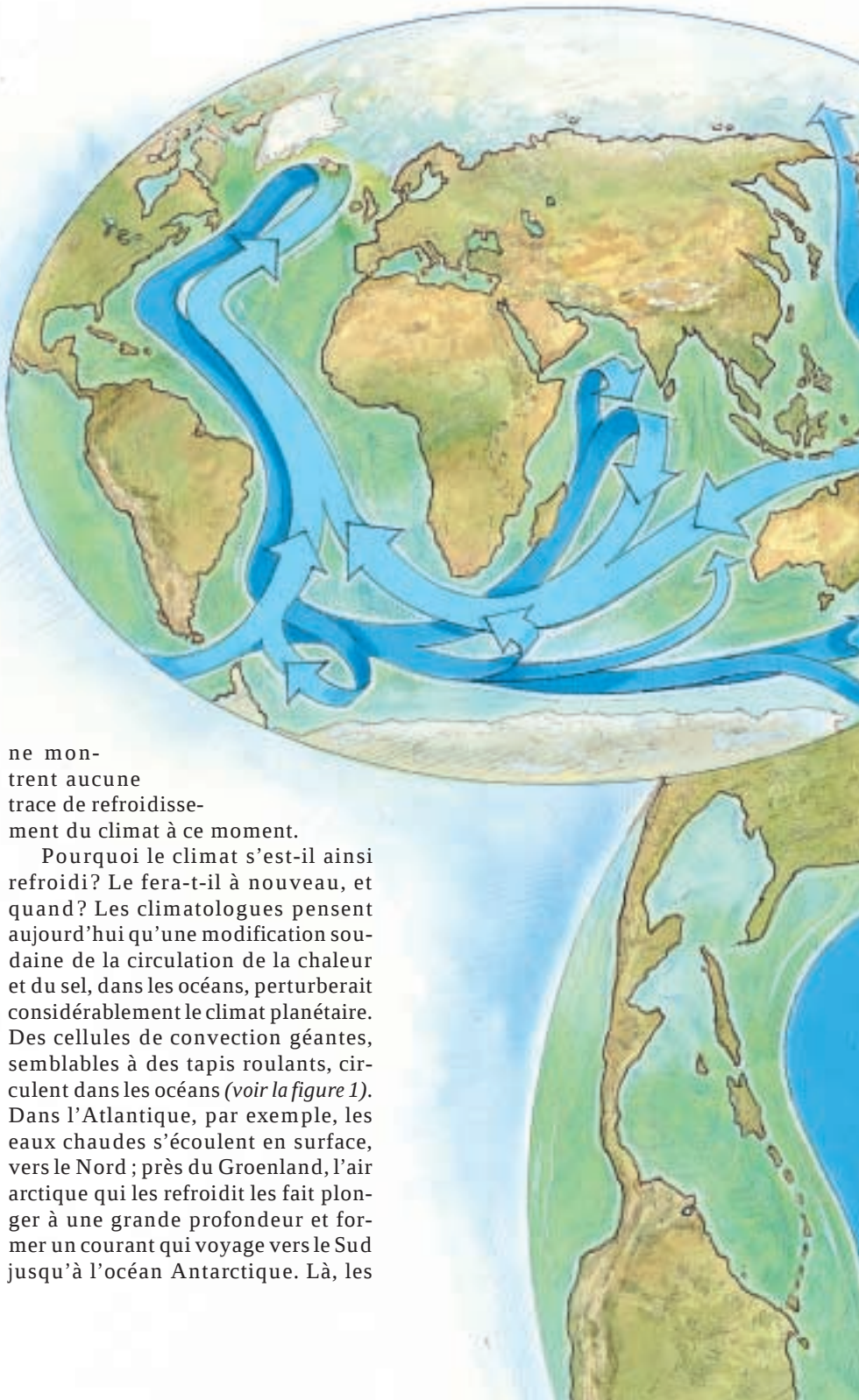
Les 10 000 dernières années ont été exceptionnelles dans l'histoire de notre planète : jamais, depuis 100 000 ans, le climat n'avait été si régulier ni si stable. Des carottages dans la glace du Groenland ont révélé, pendant la dernière glaciation, une série de vagues de froids et de réchauffements d'au moins 1 000 ans chacune, qui ont élevé ou abaissé la température hivernale moyenne, en Europe du Nord, d'environ dix degrés en seulement dix ans. Ces brusques changements sont indiqués par les poussières atmosphériques, et les quantités de méthane et de précipitations conservées dans les couches de glace.

La dernière véritable période froide, longue d'un millier d'années et nommée Dryas récent (le dryas est une fleur de toundra dont l'habitat s'est considérablement étendu à cette époque), s'est terminée il y a environ 11 000 ans. On en trouve des traces dans les sédiments marins de l'Atlantique Nord, dans les glaciers morainiques de Scandinavie et d'Islande, et dans les lacs et les marécages maritimes du Canada et d'Europe du Nord. Le Nord-Ouest des États-Unis a aussi connu un refroidissement important.

De nombreuses observations indiquent que le refroidissement du Dryas récent touchait toute la planète. Le réchauffement du plateau polaire de l'Antarctique s'est interrompu pendant cette période, les glaciers de Nouvelle-Zélande ont avancé et, dans le Sud de la mer de Chine, les proportions des diverses espèces de plancton ont changé radicalement. La concentration en méthane dans l'atmosphère a diminué de 30 pour cent. Seuls les relevés de pollens effectués dans certaines parties des États-Unis

ne montrent aucune trace de refroidissement du climat à ce moment.

Pourquoi le climat s'est-il ainsi refroidi ? Le fera-t-il à nouveau, et quand ? Les climatologues pensent aujourd'hui qu'une modification soudaine de la circulation de la chaleur et du sel, dans les océans, perturberait considérablement le climat planétaire. Des cellules de convection géantes, semblables à des tapis roulants, circulent dans les océans (voir la figure 1). Dans l'Atlantique, par exemple, les eaux chaudes s'écoulent en surface, vers le Nord ; près du Groenland, l'air arctique qui les refroidit les fait plonger à une grande profondeur et former un courant qui voyage vers le Sud jusqu'à l'océan Antarctique. Là, les



eaux profondes, plus chaudes et moins denses que les eaux glacées de la surface, remontent, mais, comme elles sont alors refroidies jusqu'à presque geler, elles replongent dans les abysses. Les courants profonds de l'océan Antarctique, les plus denses du monde, s'écoulent vers le Nord, dans les océans Atlantique, Pacifique et Indien, puis finissent par remonter en surface, et le cycle se répète. Dans les océans Pacifique et Indien, le courant de fond dirigé vers le Nord est contrebalancé par un mouvement vers le Sud des

eaux de surface. Dans l'Atlantique, ce courant est rapidement

arrêté par le puissant tapis roulant qui, au fond, se dirige vers le Sud.

L'Atlantique Nord plus salé que le Pacifique

Dans l'Atlantique Nord, les eaux qui arrivent du Sud s'enfoncent dans les abysses. Dans le Pacifique, cet enfoncement n'a pas lieu, parce que les eaux de surface de l'Atlantique sont plus salées de quelques pour cent que celles du Pacifique : en raison de la disposition des grandes chaînes de montagne des Amériques, de l'Europe et de l'Afrique, l'air s'humidifie lorsqu'il traverse le bassin Atlantique ; l'humidité provient de l'océan, dont les eaux de surface se concentrent en sel, ce qui les densifie. Elles plongent alors dans l'Atlantique Nord et amorcent une circulation globale qui redistribue le sel.

La circulation atlantique, dont le débit est environ 100 fois supérieur à celui de l'Amazone, transporte de la chaleur : l'eau qui

s'écoule vers le Nord est, en moyenne, plus chaude de huit degrés que celle qui se dirige vers le Sud. Le transfert de cette chaleur aux masses d'air de l'Arctique, au-dessus de l'Atlantique Nord, explique le climat anormalement chaud de l'Europe.

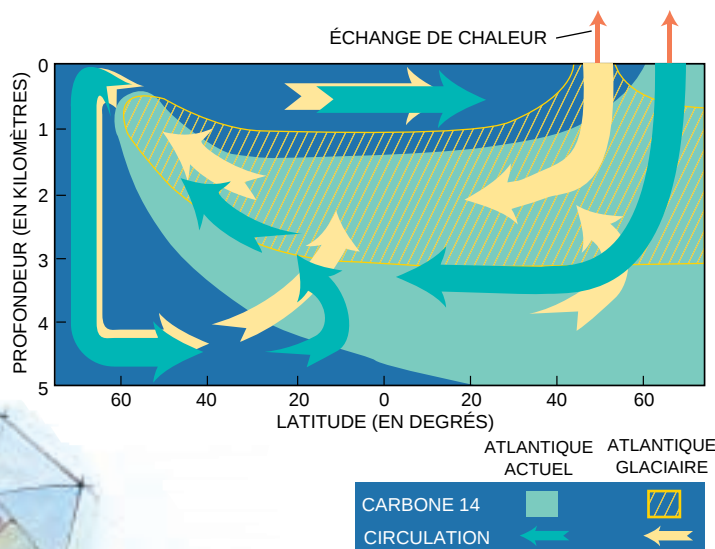
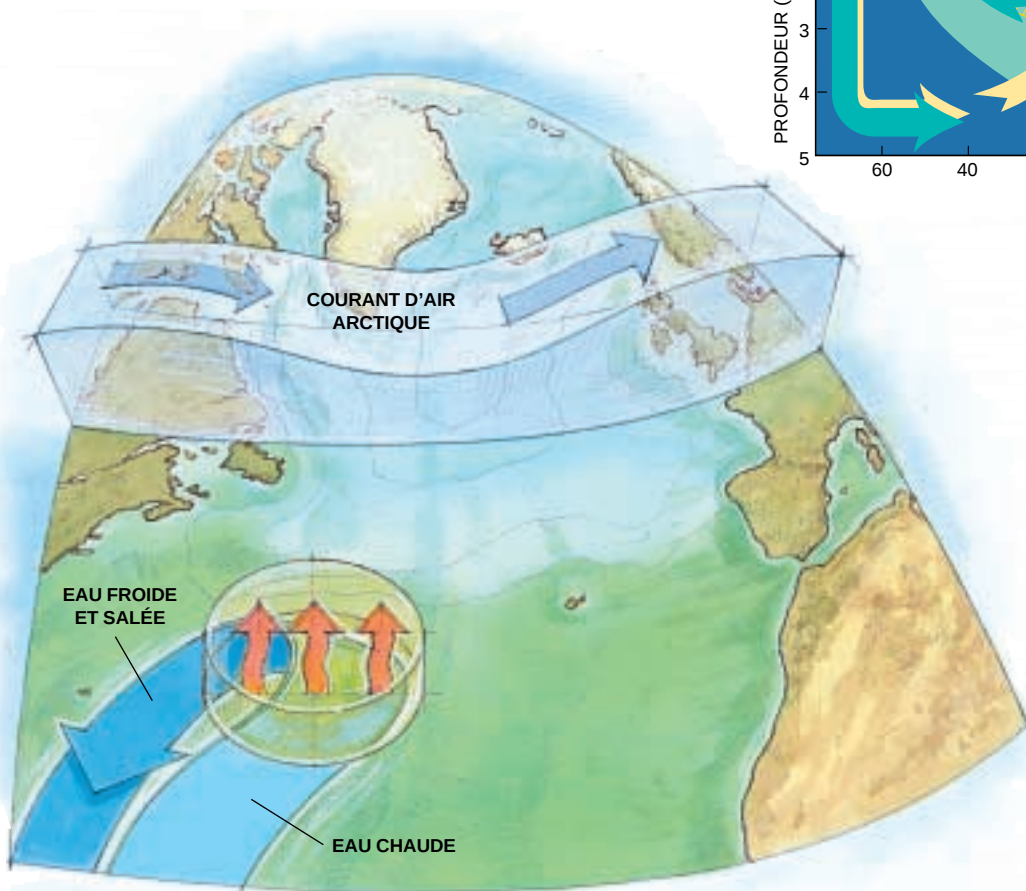
Des apports excessifs d'eau douce dans l'Atlantique Nord perturberaient cette circulation. Aux latitudes élevées, les précipitations et l'écoulement continental sont plus importants que l'évaporation : la salinité des eaux de la surface de l'Atlantique Nord dépend donc de la rapidité avec laquelle le courant global évacue les eaux douces excédentaires de la pluie et des rivières.

De surcroît, tout arrêt de la circulation océanique tendrait à se perpétuer : les températures hivernales, dans l'Atlantique Nord et dans les terres avoisinantes, chuteraient brusquement d'au moins cinq degrés, selon ce que les glaces polaires ont enregistré lors des anciennes vagues de froid. Dublin aurait un climat équivalent à celui du Spitzberg, à 1 500

1. LA CIRCULATION OCÉANIQUE GLOBALE (flèches bleues) correspond à un mouvement de l'eau froide et salée, initialement formée dans l'Atlantique Nord, vers tous les océans de la planète (à gauche). Des eaux plus chaudes s'écoulent en direction du Nord pour les remplacer : elles échangent de la chaleur avec l'atmosphère (flèches orange), ce qui réchauffe le climat de l'Europe du Nord (à droite).



2. UNE CIRCULATION SECONDAIRE, à la latitude de l'Europe méridionale, ne transférerait pas de chaleur aux vents de l'Atlantique Nord. Les températures en Europe, lors des périodes froides, où ce courant existait, étaient, en moyenne, inférieures de dix degrés aux températures actuelles. Cette circulation secondaire est moins profonde que la circulation principale (à droite).



atomes contiennent des nombres différents de neutrons) dans les coquilles des foraminifères benthiques, animaux minuscules qui vivent dans les profondeurs. Les eaux profondes de la circulation de l'Atlantique Nord sont pauvres en cadmium et riches en carbone 13 ; dans les autres eaux profondes de l'océan, c'est l'inverse. Les différences d'abondances sont dues à la respiration des organismes aquatiques, qui réduit la concentration en carbone 13 et augmente la concentration en cadmium. Pendant les périodes de grand froid sur l'Atlantique, la concentration en cadmium a chuté dans les eaux de profondeur moyenne et a augmenté fortement dans les eaux de fond ; la proportion relative de carbone 13 et de carbone 12 a varié à l'opposé. Ces variations sont bien expliquées par le modèle de S. Rahmstorf, qui stipule que la circulation était alors à une profondeur inférieure : les eaux les plus profondes stagnaient.

Ensuite l'existence d'une circulation secondaire expliquerait la poursuite du transfert du carbone 14 vers les eaux profondes, pendant les périodes froides. Si ce transfert avait cessé, les datations obtenues par dosage du carbone 14 montreraient d'énormes distorsions, ce qui n'est pas le cas. Un quart seulement du carbone mondial est aujourd'hui dans les couches supérieures des océans et dans l'atmosphère ; le reste est dans les abysses. La répartition du carbone 14, qui est formé dans l'atmosphère par les rayons cosmiques, dépend de la circulation océanique. Aujourd'hui, dans les océans, le carbone 14

kilomètres du pôle Nord. En outre, une telle variation surviendrait en dix ans au plus.

Puis, après des centaines ou des milliers d'années, la circulation reprendrait parce que la diffusion de la chaleur, des parties les plus chaudes de l'océan, et la diffusion du sel, du fond vers la surface, réduiraient la densité de l'eau abyssale stagnante jusqu'à ce que les eaux de surface de l'une ou l'autre des régions polaires s'y mélangent à nouveau, rétablissant le brassage de la chaleur et du sel. Toutefois cette circulation ne serait pas nécessairement identique à celle d'aujourd'hui : elle dépendrait de l'écoulement d'eau douce dans chaque région polaire.

Selon les simulations de Stefan Rahmstorf, de l'Université de Kiel, l'arrêt de la circulation globale serait suivi de la formation d'un autre courant, moins profond, dont les eaux

froides plongeraient au Nord des Bermudes et non près du Groenland : l'Europe du Nord recevrait moins de chaleur. Cette circulation secondaire serait aussi arrêtée par un afflux d'eau douce, mais elle reprendrait spontanément après quelques dizaines d'années seulement. S. Rahmstorf n'explique toutefois pas comment la circulation principale se rétablirait ensuite.

Le cadmium et le carbone 13

Deux caractéristiques du modèle de S. Rahmstorf intéressent particulièrement les paléoclimatologues. Tout d'abord, il explique les variations, au cours des périodes de refroidissement, des concentrations en cadmium et en isotopes du carbone (les différentes formes de cet élément, dont les

atteint les eaux profondes grâce à la circulation globale des océans : pendant qu'elles vont du Sud au Nord, les eaux chaudes de surface dissolvent de l'air qui contient du carbone 14. Elles entraînent cet élément lorsqu'elles plongent dans les abysses. Bien que les eaux profondes remontent brièvement à la surface près de l'Antarctique, peu de carbone 14 se dissout à cet endroit.

Un ralentissement de la circulation globale ferait notablement varier l'abondance du carbone 14 dans l'atmosphère et dans l'océan. La proportion de carbone 14 par rapport au carbone 12 (isotope stable, contrairement au premier qui est radioactif), est, au fond des océans, environ 12 pour cent inférieure à celle des couches supérieures de l'océan et de l'atmosphère : le carbone 14 se désintègre lors de son transport et de son séjour au fond. Simultanément, les rayons cosmiques régénèrent le carbone 14, à raison de un pour cent du total présent sur Terre tous les 82 ans. Si les échanges entre les couches supérieures et inférieures des océans s'interrompaient, la proportion de carbone 14 dans les couches supérieures de l'océan et dans l'atmosphère augmenterait de cinq pour cent par siècle, parce que le carbone 14 ne serait pas entraîné dans les eaux profondes. Dans ces conditions, après un millénaire, la proportion de carbone 14 dans l'atmosphère aurait augmenté d'un tiers.

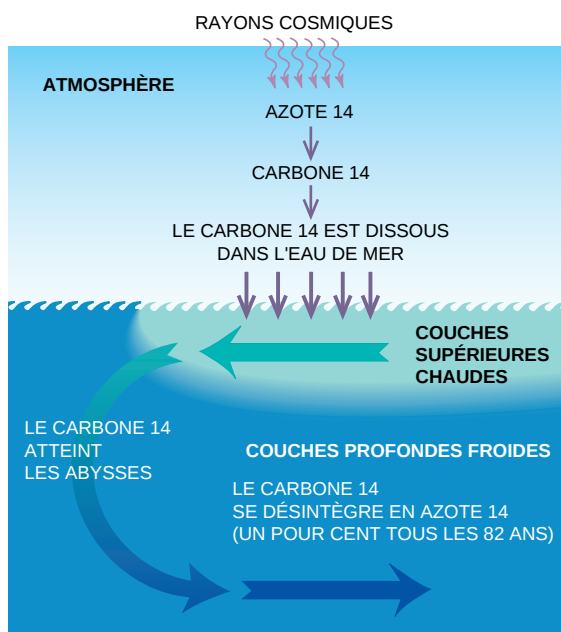
Un tel phénomène perturberait fortement les résultats des datations au carbone 14. Les paléontologues déterminent l'âge des fossiles en mesurant leur contenu résiduel en carbone 14 : plus il est faible, plus le spécimen est ancien. La quantité de carbone 14 présente dans une plante vivante dépend de la proportion de cet isotope dans l'atmosphère ou dans les océans à l'époque où cette plante vit. Les plantes qui auraient poussé pendant un arrêt des échanges entre l'atmosphère et les eaux profondes contiendraient plus de carbone 14 et sembleraient plus jeunes qu'elles ne le seraient en réalité. Selon la datation au carbone 14, les plantes des périodes froides marquées par un arrêt de la circulation globale sembleraient contemporaines de celles qui

ont vécu 1 000 ans plus tard, au cours d'une période chaude.

La circulation permanente du carbone 14

Bien que la quantité de carbone 14 dans l'atmosphère ait un peu fluctué au cours du temps, la datation au carbone 14 des sédiments marins qui se sont accumulés de manière uniforme ne montre aucune variation brusque au cours des 20 000 dernières années. De surcroît, des datations absolues de coraux par mesure de l'abondance de l'uranium et du thorium, indiquent même que, à la fin du Dryas récent, à l'époque où la circulation globale aurait repris, la concentration atmosphérique en carbone 14 a augmenté.

Cette observation semble révéler que les arrêts de la circulation globale n'auraient pas duré plus d'un siècle et qu'ils auraient été suivis par des périodes d'intense brassage des eaux. En particulier, au Dryas récent, la circulation des océans a plutôt augmenté que diminué, comme on aurait pu le prévoir si un arrêt complet de la circulation était responsable du froid. Toutefois si la circulation s'était arrêtée, nous devrions envisager d'autres modes de transport du carbone 14 vers les eaux profondes.



3. LE CARBONE 14 est formé dans l'atmosphère par les rayons cosmiques. Il est entraîné au fond de l'océan par les eaux qui plongent dans les abysses. La datation au carbone 14 indique indirectement l'état de la circulation océanique : tout arrêt prolongé de ce courant provoquerait une accumulation de carbone 14 dans l'atmosphère, ce qui perturberait les datations.

Si les afflux d'eau douce expliquent les arrêts de la circulation globale et la survenue des glaciations, d'où vient cette eau douce ? Sans doute des calottes glaciaires polaires : ces brusques variations du climat semblent limitées à des périodes où d'épaisses couches de glace recouvriraient le Canada et la Scandinavie.

Nous connaissons les traces d'au moins huit afflux d'eau douce dans l'Atlantique Nord : sept résultent de la libération d'une armada d'icebergs par la partie orientale de la calotte glaciaire de la baie d'Hudson ; la huitième provient de l'écoulement d'un énorme lac. Au début des années 1980, Hartmut Heinrich, de l'Université de Göttingen, a découvert une série de couches sédimentaires à structure particulière dans l'Atlantique Nord. Ces couches, qui s'étendent de la mer du Labrador aux îles Britanniques, résultent probablement de la fonte d'un nombre considérable d'icebergs venus du Canada.

Les débris entraînés et déposés par cette armada s'amincissent vers l'Est, de 50 centimètres d'épaisseur dans la mer du Labrador à quelques centimètres dans l'Atlantique Est. Les plus grosses particules contenues dans les sédiments sont surtout issues des roches calcaires sédimentaires et du lit de roches éruptives de la baie d'Hudson et de la zone avoisinante. Les coquilles de foraminifères sont rares dans ces couches, ce qui évoque un océan encombré de glaces (qui réduisent la prolifération du plancton), et la proportion réduite d'oxygène 18 par rapport à l'oxygène 16 dans les coquilles retrouvées prouve que les animaux vivaient dans de l'eau moins salée que la normale : la pluie et la neige contiennent peu d'oxygène 18, à ces hautes latitudes, parce que les molécules d'eau qui contiennent cet élément se condensent en premier, avant d'arriver dans ces régions.

Le huitième afflux d'eau douce est dû au lac Agassiz, qui était créé par le poids de la calotte glaciaire en recul. Jadis, l'eau du lac se déversait, par dessus un rebord rocheux, dans le bassin du Mississippi, jusque dans le golfe du Mexique, mais le recul du front glaciaire, il y a environ 12 000 ans, a ouvert une seconde voie d'écoulement, à

l'Est : le niveau du lac a considérablement diminué. L'eau ainsi libérée s'est déversée au Sud du Canada, dans la vallée aujourd'hui occupée par le Saint-Laurent, et a abouti dans la région de l'océan où se forment aujourd'hui les eaux profondes.

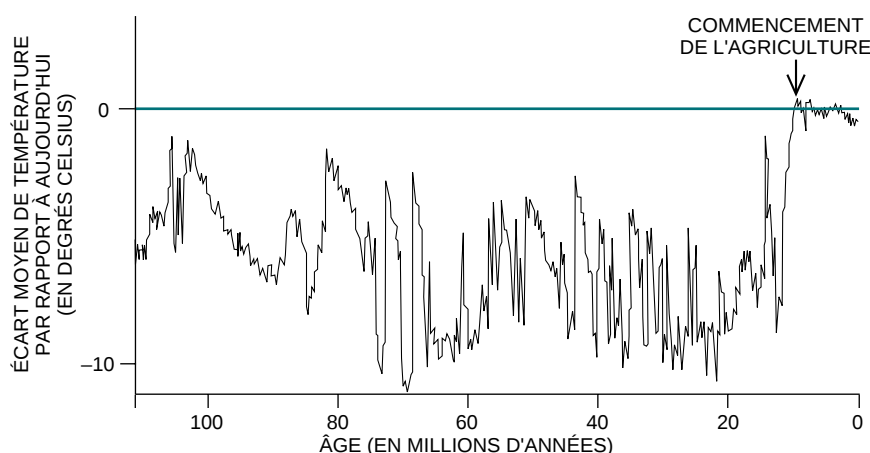
Des vagues de froid de plus en plus accentuées

La relation entre ces événements et les variations climatiques locales est claire. Quatre d'entre eux correspondent à des changements importants du climat du bassin Nord-Atlantique. L'une des couches de S. Heinrich marque la fin de l'avant-dernier cycle

glaciaire principal, et une autre indique le plus récent. Une troisième couche correspondrait au début du Dryas récent. Chacune des quatre autres couches correspond à un sous-cycle climatique. La corrélation de ces couches et des relevés des carottes glaciaires du Groenland a révélé que les refroidissements millénaires forment une série, caractérisée par des vagues de froid de plus en plus sévères, dont la plus forte correspond à une couche de S. Heinrich. Le climat se réchauffait ensuite : un nouveau cycle démarrait.

Les variations climatiques du Dryas récent ont été ressenties dans le monde entier. En est-il de même pour les 15 événements similaires,

antérieurs, indiqués par les carottes glaciaires ? À ce jour, deux éléments seulement confirment cette hypothèse, mais ils sont convaincants. D'une part, Jérôme Chappellaz, du Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement du CNRS, a analysé l'air emprisonné dans les carottes glaciaires prélevées au Groenland et observé que les périodes glaciaires sont accompagnées d'une diminution de la concentration atmosphérique en méthane. Le méthane est produit surtout dans les marais et dans les marécages. Comme ceux des régions tempérées de l'hémisphère Nord étaient gelés ou ensevelis sous la glace, le méthane devait provenir



4. LES CAROTTES DE GLACE (à droite) révèlent la variabilité du climat de la Terre au cours des 100 000 dernières années (en haut, à gauche). Les climatologues qui ont foré jusqu'au socle rocheux, près du centre de la calotte glaciaire du Groenland (ci-dessus), ont mesuré les concentrations relatives en oxygène 18 et en oxygène 16 dans les échantillons. L'abondance de l'oxygène 18 dans la vapeur d'eau atmosphérique dépend de la température de l'air : plus le climat est froid, moins l'eau qui contient cet isotope de l'oxygène est présente. Des photographies d'une section de carotte, prises au microscope en lumière polarisée, révèlent les cristaux de glace (en haut, à droite) et montrent les bulles d'air emprisonnées dont l'analyse nous permet de connaître la composition de l'atmosphère préhistorique (au milieu, à droite). Les couches inférieures (en bas, à droite) ont été déformées par le glissement de la calotte glaciaire sur le sol rocheux du Groenland, rendant les relevés précis difficiles, voire impossibles.



des tropiques. Les fluctuations dans les relevés de méthane indiquent que les tropiques ont connu une période de sécheresse pendant chaque période de refroidissement de l'hémisphère Nord.

D'autre part, une carotte sédimentaire prélevée à 500 mètres au-dessous du niveau de la mer, dans le bassin de Santa Barbara, a révélé que des bandes de sédiments intacts, avec des couches annuelles bien marquées, alternaient avec des sections perturbées par des vers fousisseurs. La présence de vers indique que les eaux profondes de la région contenaient suffisamment d'oxygène pour permettre la vie. Ces périodes sont étrange-

ment corrélées avec les refroidissements du Groenland : les variations de la circulation océanique ont atteint toute la planète.

Un changement mondial du climat

Les conséquences sur tout le Globe des événements découverts par S. Heinrich sont encore plus surprenantes. Selon les analyses du pollen extrait des sédiments du lac Tulane, en Floride, le rapport entre les abondances de pin et de chêne a brusquement augmenté lors de chacun de ces événements. Les pins prospèrent dans des climats relativement humides, tandis

que les chênes préfèrent les climats secs. Bien que la relation exacte entre l'abondance des pins et les événements de S. Heinrich doive être datée plus précisément, ces relevés indiqueraient une période humide par cycle. Dans l'hémisphère Sud, on trouve aussi des corrélations : chacun des quatre événements de S. Heinrich qui peut être daté par la méthode au carbone 14 correspond à une extension maximale des glaciers montagneux des Andes.

Que la fonte massive des glaciers canadiens ait eu des conséquences sur tout le Globe est paradoxal car, selon les modèles de circulation atmosphérique, les changements dans les



Le méthane dans les glaces

L'analyse du méthane dans les bulles de glace polaire permet de reconstituer l'évolution de sa concentration dans l'atmosphère terrestre. Grâce au forage européen GRIP, réalisé au sommet du glacier qui couvre le Groenland, nous avons mesuré la concentration en méthane des 40 000 dernières années, avec une résolution temporelle comprise entre quelques dizaines et quelques centaines d'années. Ces mesures détaillent un précédent enregistrement des variations de la concentration en méthane de l'atmosphère qui couvre plus de 200 000 ans, obtenu grâce au forage VOSTOK en Antarctique.

Au cours de la dernière glaciation, il y a 110 000 à 15 000 ans environ, le climat s'est réchauffé par épisodes (qui n'ont pas fait fondre les calottes glaciaires) de 500 à 12 000 ans chacun. Lors de chacun de ces épisodes, la concentration en méthane a fortement augmenté dans l'atmosphère, passant de 400 à 550 parties par milliard en volume environ. Une telle augmentation résulte d'un dégagement anormal supplémentaire de 30 à 40 millions de tonnes de méthane. Le méthane naturel provient à 75 pour cent des sols saturés en eau, marécages et tourbières, qui sont aujourd'hui répartis en deux bandes de latitude, l'une boréale, entre 50 et 70 degrés de latitude Nord, l'autre subtropicale, entre 20 degrés de latitude Nord et 30 degrés de latitude Sud. Comme les zones boréales étaient couvertes de glace pendant la dernière glaciation, les variations rapides de la concentration en méthane indiquent de brusques changements de l'étendue des zones marécageuses sous les tropiques. Ainsi faut-il voir dans ces fluctuations rapides de la composition de l'atmosphère groenlandaise les traces d'un réarrangement bien plus global du climat terrestre, à l'échelle de quelques décennies.

L'enregistrement de la concentration en méthane sur ces échelles de temps nous apporte d'autres enseignements importants : durant les 10 000 dernières années, alors que

le contenu en oxygène 18 des précipitations sur le Groenland indique un climat exceptionnellement stable, le méthane, à caractère plus global, montre l'existence d'événements climatiques notables. Il y a 8 200 ans, la concentration de l'atmosphère en méthane a diminué d'environ 70 parties par milliard en volume, pendant moins de 200 ans. Sur les derniers 10 000 ans, cette concentration a diminué de plus de 20 pour cent, puis elle a réaugmenté. Même si ces fluctuations apparaissent bien faibles par rapport à l'apport humain des derniers 200 ans, qui a fait augmenter de 150 pour cent la concentration de l'atmosphère en méthane, elles indiquent une variabilité climatique importante, notamment sous les tropiques.

Le dioxyde de carbone et l'oxygène 18 contenu dans l'oxygène atmosphérique apportent aussi des informations sur les brusques changements du climat pendant la dernière glaciation. Des mesures détaillées, à partir de forages dans la calotte Antarctique, montrent que la concentration en dioxyde de carbone a peu varié il y a entre 20 000 et 50 000 ans : ce gaz à effet de serre n'a donc pas été responsable de l'extension globale de ces brusques variations du climat.

L'oxygène 18 contenu dans l'oxygène atmosphérique est un signal global, qui a été utilisé comme marqueur pour corréler les couches de glace des carottes extraites au Groenland et en Antarctique. On a ainsi constaté que seuls les événements groenlandais qui ont duré plus de 2 000 ans ont laissé une trace dans le climat de l'Antarctique : les conséquences des réarrangements de la circulation dans l'Atlantique sur le climat du pôle Sud semblent donc atténuées. De futurs efforts de calage temporel utilisant le méthane comme marqueur permettront d'élucider la relation entre les deux pôles au cours de ces fluctuations climatiques rapides.

Jérôme CHAPPELLAZ,
Laboratoire de glaciologie
et géophysique de l'environnement
du CNRS, Grenoble.

échanges de chaleur entre l'atmosphère et l'Atlantique Nord ne modifient les climats que localement. Quel mécanisme aurait étendu ces variations aux tropiques et aux régions méridionales tempérées, voire à l'Antarctique ?

La répartition symétrique de ces variations climatiques autour de l'équateur souligne l'importance de ce qui se passe aux tropiques, et l'on comprend que des modifications dans la dynamique de l'atmosphère tropicale auraient facilement des conséquences globales : les cellules de convection en colonnes, qui se forment dans l'atmosphère tropicale aux points de rencontre des alizés, fournissent à l'atmosphère le principal gaz responsable de l'effet de serre, la vapeur d'eau. Bien que le lien entre la circulation océanique et la convection tropicale soit ténu, une modification de la circulation semble modifier la quantité d'eau froide qui remonte à la surface le long de l'équateur, dans le Pacifique. Cette remontée des eaux modifie notablement les échanges de chaleur de la région, donc son climat. La réduction de cette remontée, comme on le constate lors des épisodes «El Niño», provoque des sécheresses dans certaines zones et des inondations dans d'autres.

«El Niño» pendant 1 000 ans

L'assèchement des tropiques, mis en évidence par J. Chappellaz, n'est pas le seul argument en faveur de ce scénario. L'autre preuve spectaculaire provient du grand bassin de l'Ouest des États-Unis : immédiatement après le dernier événement de S. Heinrich il y a 12 000 ans, le lac Lahontan, dans le Nevada, a atteint sa taille maximale, dix fois supérieure à sa taille actuelle. Un tel lac ne subsiste que si les précipitations sont considérables, d'un niveau comparable à celui qu'a connu la région lors de la période «El Niño» de l'hiver 1982-1983. Les périodes de refroidissement passées seraient-elles dues à des changements dans la circulation océanique qui auraient fait durer «El Niño» pendant 1 000 ans ?

Des découvertes plus récentes contribuent à confirmer que le climat tropical était très différent pendant les refroidissements. Des carottes de glace ancienne, prélevées à 6 000



5. LE CLIMAT DE L'EUROPE changerait considérablement si la circulation océanique était perturbée. Dublin (en haut à gauche) aurait en été le climat que connaît aujourd'hui le Spitzberg (en

haut à droite), et les hivers londoniens (en bas à gauche) seraient aussi froids que les hivers actuels à Irkoutsk, en Sibérie (en bas à droite).

mètres d'altitude dans les Andes tropicales, contiennent 200 fois plus de poussière fine que les échantillons les plus récents : il s'agit probablement de poussière transportée par les vents qui soufflaient sur une Amazonie aride. La glace la plus ancienne contient aussi moins d'oxygène 18 que celle qui s'est formée depuis 10 000 ans ; la température était inférieure d'environ dix degrés à celle d'aujourd'hui. En outre, la limite des glaces éternelles dans les Andes était 1 000 mètres plus bas qu'aujourd'hui : pendant les périodes de refroidissement, les tropiques étaient à la fois plus froides et plus sèches.

Notre compréhension partielle du passé ne nous permet guère de tirer des conclusions définitives en ce qui concerne l'avenir du climat. L'accumulation actuelle de gaz à effet de serre modifiera-t-elle la circulation océanique globale et le climat ? Selon les relevés paléographes, les brusques variations des climats passés ont été limitées à des périodes où l'Atlantique Nord était entouré d'immenses

couches de glace, pendant la dernière glaciation ou juste à la fin : nous sommes loin de cette situation. Toutefois l'ampleur de l'effet de serre provoqué par les activités humaines risque d'être bien plus grande qu'aucun autre événement au cours d'un intervalle interglaciaire, et l'on n'a pas de certitude que le système climatique global reste figé dans son mode actuel de fonctionnement.

Un arrêt de la circulation océanique ou une autre perturbation comparable sont improbables, mais si cela

se produisait, les conséquences seraient catastrophiques. La probabilité d'un tel événement atteindra son maximum dans 50 ou 150 ans, alors que la population mondiale sera trop nombreuse, menacée par la famine et par les maladies et qu'il faudra lutter pour préserver la vie sauvage de la pression toujours croissante sur l'environnement. Nous devons prendre cette éventualité au sérieux et faire tous les efforts possibles pour mieux comprendre le système climatique de notre planète.

Wallace BROECKER est professeur de géologie à l'Observatoire terrestre Lamont-Doherty de l'Université Columbia.

Wallace S. BROECKER et George H. DENTON, *Les cycles glaciaires*, in *Pour la Science*, n° 149, mars 1990.

W. DANSGAARD et al., *Evidence for General Instability of Past Climate from a 250-KYR Ice-Core Record*, in *Nature*, vol. 364, pp. 218-220, 15 juillet 1993.

D.R. MACAYEAL, *A Low-Order Model*

of the Heinrich Event Cycle, in *Paleoceanography*, vol. 8, n° 6, pp. 767-773, décembre 1993.

J. CHAPPELLAZ, T. BLUNIER, D. RAYNAUD, J.M. BARNOLA, J. SCHWANDER et B. STAUFFER, *Synchronous Changes in Atmospheric CH₄ and Greenland Climate between 40 and 8 KYR BP*, in *Nature*, vol. 366, pp. 443-445, 2 décembre 1993.

Jean-François MINSTER, *Les océans*, Éditions Flammarion, 1994.

Les mémoires holographiques

DEMETRI PSALTIS • FAI MOK

Après plus de 30 ans de recherches, les physiciens parviennent à utiliser l'holographie pour le stockage massif de données dans des mémoires très rapides.

Le stockage optique des données est une des grandes réussites techniques des 15 dernières années : les disques compacts (CD) dominent aujourd'hui le marché de l'audiovisuel, enregistrant des textes, des images et des sons ; les utilisateurs d'ordinateurs personnels acquièrent des jeux vidéo, des journaux et des encyclopédies multimédia sous la forme de disques compacts.

Le stockage optique des données est indiscutablement aisé, peu coûteux et fiable. Les disques compacts contiennent environ 640 méga-octets, soit l'équivalent d'une heure et quart de musique haute fidélité ou de 300 000 pages dactylographiées en double interligne. Néanmoins les utilisateurs apprécieraient des mémoires encore plus vastes et encore moins coûteuses : l'industrie du spectacle aimerait enregistrer un ou plusieurs films sur un seul disque optique de la taille d'un disque compact ; les hôpitaux, les cabinets juridiques, les administrations et les bibliothèques ont besoin de mémoriser tant de données qu'ils ont recours à des «juke-box», dont le bras robotisé pioche parmi des centaines de disques.

Les ingénieurs de l'industrie informatique ont répondu à ces demandes en essayant de tirer le maximum des systèmes à disques compacts. Certains étudient des lasers à semi-conducteurs, qui émettent des longueurs d'onde plus courtes que celles des lecteurs de disques actuels, afin d'augmenter la densité d'informations écrites sur les disques compacts ;

d'autres explorent les techniques de compression de données et de «super-résolution», qui permettent aussi une densité supérieure (au prix d'une augmentation du bruit de fond) ; d'autres encore étudient des disques multicouches, où plusieurs couches de stockage des données sont superposées et lues par un système optique que l'on focalise sur une couche particulière. D'ici cinq ans, ces perfectionnements devraient porter la capacité de stockage des disques compacts jusqu'à quelques dizaines de milliards d'octets (giga-octets).

Toutefois, pour enregistrer beaucoup plus de données – quelques centaines de milliards d'octets, par exemple, dans un disque –, on devra changer complètement de technique. Quelques équipes étudient une méthode prometteuse : l'holographie. L'idée remonte à 1964, lorsque Pieter van Heerden, de la Société *Polaroid*, proposa pour la première fois l'utilisation de cette méthode pour le stockage tridimensionnel des données. On pense aujourd'hui qu'une mémoire holographique pourrait stocker des centaines de milliards d'octets ; elle les transférerait à une vitesse supérieure à un milliard de bits par seconde et sélectionnerait une donnée élémentaire, choisie au hasard, en moins de 100 microsecondes. Ces atouts ont incité de grandes compagnies comme *Rockwell*, *IBM*, *Thomson*, *Sony* ou *GTE* à s'intéresser de près à la mise au point des mémoires holographiques.

Quand les premières de ces mémoires seront commercialisées, leur



1. LES MÉMOIRES HOLOGRAPHIQUES sont des systèmes où l'information est stockée dans des cristaux de niobate de lithium à peine plus grand qu'un morceau de sucre (*en avant-plan*). Les hologrammes sont formés dans le cristal, par la rencontre d'un faisceau laser de référence, large et lumineux (*à gauche*), avec un faisceau qui contient les données, plus fin et plus faible (*à droite*).