

supercontinent dont sont issus les continents actuels, subissait les dernières étapes de son fractionnement ; la croûte terrestre se déchirait, formant le Nord-Est de l'océan Atlantique. En conséquence, d'énormes quantités de roche fondue et de chaleur intense sont remontées à travers la masse terrestre qui reliait le Groenland et l'Europe, cuisant des sédiments riches en carbone et brûlant peut-être même du charbon et du pétrole près de la surface. Lors de leur cuisson, les sédiments ont libéré à leur tour de grandes quantités de deux puissants gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone et le méthane. D'après le volume énorme de ces éruptions, estimé par les laves et dépôts de cendres datés dans l'Atlantique et à proximité, on pense que les volcans furent probablement responsables d'une accumulation initiale de carbone de l'ordre de quelques centaines de gigatonnes. Cette quantité est suffisante pour faire augmenter les températures globales de quelques degrés. Mais la plupart des analyses, dont la nôtre, suggèrent qu'il a fallu un facteur supplémentaire pour atteindre le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène.

Des réactions en cascade

Une seconde phase de réchauffement plus intense aurait commencé quand la chaleur issue des volcans a déclenché d'autres types de dégagements gazeux. Le brassage naturel des océans a transporté la chaleur jusqu'aux fonds marins froids, où elle semble avoir déstabilisé de vastes réserves d'hydrates de méthane gelé qui y étaient enfouies. Quand les hydrates ont fondu, un bouillonnement de méthane gazeux est remonté à la surface, ajoutant encore du carbone dans l'atmosphère. Dans l'atmosphère, le méthane piège la chaleur beaucoup plus efficacement que le principal gaz à effet de serre actuel, le dioxyde de carbone. Il se convertit vite en dioxyde de carbone, mais aussi longtemps que le dégagement de méthane s'est poursuivi, des concentrations élevées de ce gaz ont pu se maintenir dans l'atmosphère, amplifiant l'effet de serre et la hausse des températures associée.

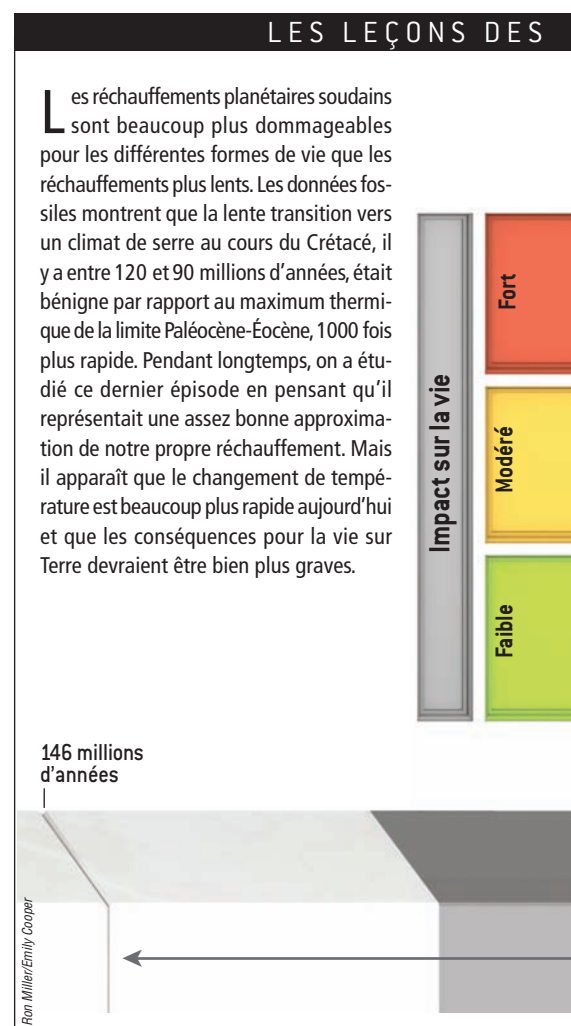
D'autres réactions en cascade ont sans doute participé au pic de réchauffement, libérant encore davantage de carbone des réservoirs de la terre ferme. Les sécheresses provoquées par le réchauffement dans de nombreuses régions, dont l'Ouest des

États-Unis et l'Europe de l'Ouest, ont vraisemblablement exposé les forêts et les tourbières au dessèchement et, dans certains cas, à des incendies généralisés. Le dessèchement, la cuisson ou la combustion de tout matériau vivant ou riche en matière organique émet des gaz à effet de serre. Les feux couvant dans les tourbières et les veines de charbon, que l'on a parfois vu durer des siècles à l'époque moderne, ont pu entretenir un dégagement soutenu.

Le dégel du pergélisol dans les régions polaires a probablement lui aussi exacerbé la situation. Ce sol gelé en permanence emprisonne les plantes mortes pendant des millions d'années. Quand il fond, les microbes consomment les restes organiques libérés et rejettent beaucoup de méthane. Aujourd'hui, les scientifiques s'inquiètent des répercussions, sur le réchauffement actuel, des rejets de méthane dus à la fonte de l'Arctique. Mais la contribution du pergélisol au maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène a peut-être été bien plus importante encore. La planète était plus chaude, si bien que même avant le maximum thermique, il n'existait pas, comme aujourd'hui en Antarctique, de calotte polaire recouvrant le sol gelé. Sans protection, le pergélisol y était à la merci du réchauffement.

Au début des émissions de gaz, les océans ont absorbé une bonne partie du dioxyde de carbone (et du méthane qui s'était transformé en dioxyde de carbone). Dans un premier temps, cette séquestration naturelle du carbone a contribué à atténuer le réchauffement. Néanmoins, une quantité de gaz telle s'est infiltrée dans les profondeurs de l'océan que cela a produit un excédent d'acide carbonique – un processus connu sous le nom d'acidification des océans. De plus, à mesure que l'océan profond se réchauffait, son contenu en oxygène diminuait (l'eau chaude ne dissout pas aussi bien ce gaz que l'eau froide). Ces changements ont été catastrophiques pour les foraminifères, organismes microscopiques qui vivaient sur le fond marin, dans les sédiments : selon les données fossiles, 30 à 50 pour cent des espèces de foraminifères des profondeurs ont disparu.

Les grandes lignes de ce scénario font consensus depuis 1990. Il ne fait plus aucun doute que le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène a été déclenché par un dégagement spectaculaire de gaz à effet de serre depuis que deux chercheurs



californiens ont identifié l'événement dans une carotte de sédiments extraite du fond marin près de l'Antarctique. Cette carotte constituait un enregistrement de plusieurs millions d'années de climat. Si nous avons décidé d'affronter le froid du Spitzberg en 2007, c'est que certains détails de ce rejet gazeux restaient à éclaircir : quelle quantité de gaz avait été libérée, quel gaz dominait, combien de temps les rejets avaient duré, et ce qui les avait provoqués.

À la suite de la découverte californienne, nombre de scientifiques avaient analysé des centaines d'autres carottes de sédiments des grands fonds en espérant y découvrir des réponses. À mesure que les sédiments se déposent, lentement, couche par couche, ils piègent des minéraux (y compris les restes des squelettes fossiles de la faune marine) qui conservent des signatures de la composition des océans environnants ou de l'atmosphère, ainsi que des formes de vie présentes à l'époque du dépôt. Par exemple, les proportions des

PRÉCÉDENTS RÉCHAUFFEMENTS

LA SERRE DU CRÉTACÉ

- **Rythme du réchauffement** : Lent ; 0,000 025 °C par siècle.
- **Durée** : Des millions d'années.
- **Réchauffement total** : 5 °C.
- **Principale cause sous-jacente** : Les éruptions volcaniques.
- **Modification environnementale** : Les océans ont lentement absorbé le dioxyde de carbone et ne se sont pas acidifiés.
- **Impact sur le vivant** : Presque tous les organismes vivants ont eu le temps de s'adapter ou de migrer.



65 millions d'années

56 millions d'années

LE MAXIMUM THERMIQUE DE LA LIMITE PALÉOCÈNE-ÉOCÈNE

- **Rythme du réchauffement** : Modéré ; 0,025 °C par siècle.
- **Durée** : Des milliers d'années.
- **Réchauffement total** : 5 °C.
- **Principale cause sous-jacente** : Les volcans ; le bouillonnement de méthane du fond de l'océan ; les feux de tourbe et de charbon ; le dégel du pergélisol.
- **Modification environnementale** : Acidification des profondeurs océaniques ; climat plus extrême.
- **Impact sur le vivant** : Certaines espèces du fond des océans et des continents ont disparu, mais la plupart des plantes terrestres et des animaux se sont adaptés ou ont migré.



34 millions d'années

LE RÉCHAUFFEMENT MODERNE

- **Rythme du réchauffement** : Rapide ; 1 à 4 °C de 2000 à 2100.
- **Durée** : Quelques dizaines à quelques centaines d'années.
- **Réchauffement total** : Au-delà de 100 ans, prévisions trop incertaines pour être chiffrées.
- **Principale cause sous-jacente** : La combustion des combustibles fossiles.
- **Modification environnementale** : Acidification des océans ; climat plus extrême ; fonte des glaciers ; élévation du niveau de la mer.
- **Impact sur le vivant** : Mouvement vers les pôles de nombre d'espèces ; disparition des habitats ; blanchiment des coraux ; extinction d'espèces.



CRÉTACÉ

PALÉOCÈNE

ÉOCÈNE

AUJOURD'HUI

différents isotopes de l'atome d'oxygène dans les restes squelettiques révèlent la température de l'eau au moment de leur sédimentation.

Où trouver une carotte bien conservée ?

Lorsqu'elles sont bien préservées, ces carottes offrent un excellent enregistrement de l'histoire climatique. Ce n'était cependant pas le cas de la plupart des carottes qui correspondaient au maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène. Des morceaux manquaient et le temps avait dégradé ceux qui restaient. Les sédiments du fond marin sont riches en carbonate de calcium, un composé chimique que l'on utilise aujourd'hui couramment comme anti-acide. Au cours du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène, l'acidification de l'océan a dissous ce carbonate de calcium en quantité, faisant disparaître une importante fraction des

sédiments dans les couches qui auraient dû porter les signatures les plus nettes du maximum thermique.

Pour pallier cette difficulté, nous avons pris rendez-vous au Spitzberg avec un groupe de chercheurs venus d'Angleterre, de Norvège et des Pays-Bas, sous les auspices du Réseau mondial des universités (*Worldwide Universities Network*). Les roches de cette partie de l'Arctique, composées presque entièrement de boues et d'argile, étaient susceptibles de fournir un enregistrement plus complet et accessible. Nous entendions extraire nos échantillons non pas du fond marin, mais d'un plateau érodé, sur l'île. Les sédiments que nous cherchions s'étaient déposés dans un ancien bassin océanique, et les forces tectoniques en jeu depuis le maximum thermique avaient fait remonter cette région au-dessus du niveau de la mer, où les glaciers l'avaient sculptée pour en faire la spectaculaire chaîne de montagnes escarpées et de larges vallées du Spitzberg.