

s'étaient modifiées de telle sorte que la forme activée par la lumière était devenue plus stable et donc plus efficace. J'ai émis l'hypothèse que ce changement a également bloqué la voie biochimique par laquelle la rhodopsine activée revient à sa forme inactive, voie qui pour les rhodopsines rhabdomériques requiert l'absorption d'un second photon. Il fallait donc une autre réaction biochimique pour que la molécule redevenue activable. Je pense que les photorécepteurs ciliés auraient présenté un autre avantage par rapport aux photorécepteurs rhabdomériques dans des environnements tels que l'océan profond, où l'intensité lumineuse est très faible.

Dès lors, certains chordés primitifs (ancêtres des vertébrés) ont pu coloniser des niches écologiques inaccessibles aux animaux qui n'avaient que des pho-

va devenir l'œil forme un renflement donnant naissance à deux vésicules. Chacune d'elles se replie sur elle-même pour donner une rétine en forme de croissant, qui tapisse l'intérieur de l'œil. L'évolution a probablement suivi la même stratégie. Nous avons postulé qu'un proto-œil de ce type (avec une rétine en forme de croissant, à deux feuillets, composée de photorécepteurs ciliés à l'extérieur et de neurones de sortie issus des photorécepteurs rhabdomériques à l'intérieur) aurait évolué chez un ancêtre des vertébrés entre 550 et 500 millions d'années. Il aurait assuré le réglage de l'horloge interne et peut-être aidé l'animal à détecter les ombres et à s'orienter.

Au stade suivant du développement embryonnaire, la rétine se replie sur elle-même vers l'intérieur, le cristallin se forme à partir d'un épaississement de l'ectoderme

bipolaires de la rétine ressemblent tant aux cônes et aux bâtonnets, même si elles sont dépourvues de rhodopsine et qu'elles reçoivent des informations non pas de la lumière, mais d'une substance chimique – un neurotransmetteur – libérée par les photorécepteurs.

Quelques erreurs...

Bien que les yeux de type caméra fournissent un vaste champ de vision (de l'ordre de 180 degrés), notre cerveau ne peut analyser qu'une fraction des informations disponibles à un instant donné, en raison du nombre limité de fibres nerveuses reliant l'œil au cerveau. Les premiers yeux de type caméra comprenaient vraisemblablement encore moins de fibres nerveuses. Ainsi, une pression de sélection considérable a probablement favorisé l'apparition de muscles permettant aux yeux de bouger. Ces muscles devaient sans doute exister il y a 500 millions d'années, car ils sont présents chez la lamproie, dont la lignée a divergé à cette époque, et arrangés à peu près comme chez les vertébrés à mâchoires, dont nous faisons partie.

À côté des caractéristiques qui rendent l'œil des vertébrés si performant, certaines sont moins adaptées. Par exemple, l'agencement des couches de cellules constituant la rétine : il faut que les rayons lumineux traversent toute l'épaisseur de la rétine, si bien que les prolongements et les corps cellulaires des neurones de sortie dispersent la lumière et dégradent la qualité de l'image. C'est seulement après avoir traversé cet amas de neurones que la lumière atteint les photorécepteurs. De surcroît, les vaisseaux sanguins recouvrant la surface interne de la rétine projettent des ombres parasites sur la couche des photorécepteurs. Enfin, la rétine présente un point aveugle, l'endroit où les fibres nerveuses se rassemblent pour former le nerf optique, traversent la rétine et ressortent à l'arrière (voir l'encadré page 37).

Ces défauts ne sont pourtant pas inévitables. En effet, l'œil de type caméra des poulpes et des calmars, apparu indépendamment, ne les présente pas. En considérant l'œil des vertébrés dans le contexte de l'évolution, ces défauts apparaissent comme des conséquences d'une séquence d'étapes évolutives, chacune ayant conféré un bénéfice à nos ancêtres vertébrés, avant même qu'ils aient pu voir. ■

L'ŒIL DES VERTÉBRÉS, si performant soit-il, présente des défauts : l'évolution ne conduit pas forcément à la perfection.

torécepteurs rhabdomériques. Non pas parce que la rhodopsine des photorécepteurs ciliés leur conférait une meilleure vision (les autres composants essentiels de l'œil de type caméra n'étaient pas encore apparus), mais parce qu'elle permettait de mieux capter la lumière et de synchroniser les horloges circadiennes et saisonnières.

Pour ces anciens chordés des grandes profondeurs, les photorécepteurs rhabdomériques peu sensibles, qui coexistaient avec les photorécepteurs ciliés, étaient quasi inutiles et, par conséquent, libres de remplir un nouveau rôle, celui de neurones transmettant des signaux au cerveau. La rhodopsine n'était plus nécessaire et aurait été éliminée par sélection naturelle de ces cellules.

Un œil est né

Ayant formulé une hypothèse plausible sur la façon dont les composants de la rétine des vertébrés étaient apparus, nous avons voulu comprendre comment, il y a environ 500 millions d'années, l'œil a évolué d'un organe captant la lumière, mais non destiné à la vision, en un organe formant des images. Là encore, nous avons trouvé des indices chez des embryons en cours de développement. À un stade précoce du développement, la structure neuronale qui

(les cellules de la surface externe de l'embryon), qui bourgeonne dans le creux du croissant rétinien. Ce bourgeon se sépare ensuite du reste de l'ectoderme pour devenir un élément flottant librement. Une séquence similaire de modifications se serait produite au cours de l'évolution. Nous ignorons quand cette modification a eu lieu, mais dans les années 1990, Dan-Eric Nilsson, de l'Université de Lund en Suède, a montré que les composants optiques de l'œil ont pu évoluer en un million d'années seulement. Si tel est le cas, l'œil formant des images serait apparu à partir du proto-œil en... un clin d'œil à l'échelle des temps géologiques.

Avec l'apparition du cristallin focalisant la lumière, la capacité de l'œil à collecter des informations a notablement augmenté. Des pressions de sélection auraient alors favorisé l'émergence d'un meilleur traitement des signaux dans la rétine, au-delà de ce que permettait la simple connexion des photorécepteurs à des neurones de sortie. Le processus de maturation des cellules de la rétine se serait alors modifié, de sorte que certaines cellules en cours de développement, au lieu de former des photorécepteurs ciliés, seraient devenues des cellules rétinienues bipolaires s'insérant entre le feuillet de photorécepteurs et le feuillet de neurones de sortie. C'est pourquoi les cellules



MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE



FÊTE[^] DE LA SCIENCE

du 12 au 16 octobre 2011

www.fetedelascience.fr



L'ESSENTIEL

✓ La température globale de la Terre s'est élevée de cinq degrés il y a 56 millions d'années en réaction à une augmentation notable des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

✓ Ce réchauffement ancien est souvent étudié pour comprendre le réchauffement actuel.

✓ Mais à l'époque, le dégagement de gaz était dix fois plus lent que celui qui se produit aujourd'hui.

✓ Or plus un changement climatique est rapide, plus les différentes formes de vie s'y adaptent difficilement.

Ron Miller



Le dernier grand réchauffement

Lee Kump

De nouveaux indices suggèrent que le plus brutal des réchauffements climatiques préhistoriques s'est fait à un rythme modéré comparé à celui que nous connaissons aujourd'hui. Cet épisode est riche d'enseignements pour notre futur.

La plupart des visiteurs du Spitzberg, la plus grande île de l'archipel norvégien du Svalbard, sont attirés par les ours polaires. Nous l'étions par ses roches. Durant l'été 2007, avec mes collègues, tous géologues et climatologues, nous avons débarqué sur cette île arctique avec l'espoir d'y trouver des preuves de ce que l'on considérait alors comme l'épisode de réchauffement global le plus brutal de tous les temps. Deux heures de marche en terrain accidenté nous séparaient encore des affleurements rocheux susceptibles de renfermer ces indices. Tandis que nous avançons sur des poches de neige glissante et des plantes rabougries, j'imaginai l'époque où des palmiers, des fougères et des alligators peuplaient probablement cette région.

En ce temps-là, il y a quelque 56 millions d'années, j'aurais été ruisselant de sueur. Les recherches ont montré qu'à cette époque, en l'espace de quelques milliers d'années (un bref instant à l'échelle des temps géologiques), les températures glo-

bales ont augmenté de 5 °C – une fièvre planétaire que les scientifiques nomment le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène. Les zones climatiques se sont décalées vers les pôles, sur terre et en mer, obligeant plantes et animaux à migrer, à s'adapter ou à mourir. Certaines des régions les plus profondes de l'océan se sont acidifiées et ont été privées d'oxygène, tuant nombre des organismes qui y vivaient. Il a ensuite fallu près de 200 000 ans pour que les mécanismes tampons naturels de la Terre fassent baisser la fièvre.

Le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène présente quelques ressemblances avec le réchauffement climatique d'origine humaine qui se déroule aujourd'hui. En particulier, le coupable était une libération massive, dans l'atmosphère et les océans, de gaz à effet de serre piégeant la chaleur, comparable en volume à ce que libérerait notre combustion des ressources énergétiques fossiles si elle se poursuivait pendant plusieurs siècles au rythme actuel. La connaissance de ce qui

s'est exactement passé durant le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène pourrait nous aider à anticiper notre avenir. Mais jusque récemment, plusieurs interrogations demeuraient. Aujourd'hui, des réponses apportent une vision peu réjouissante : elles suggèrent que les conséquences du dernier grand réchauffement global de la planète n'étaient rien comparées à ce qui pourrait nous attendre, et elles confortent les prédictions selon lesquelles l'humanité souffrira si nous ne modifions pas notre comportement.

Le point de départ : des gaz à effet de serre

Les paléoclimatologues pensent aujourd'hui que le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène s'est déroulé selon le scénario suivant. Il aurait commencé, en quelque sorte, par la combustion de ressources fossiles. À l'époque, la Pangée, le

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.

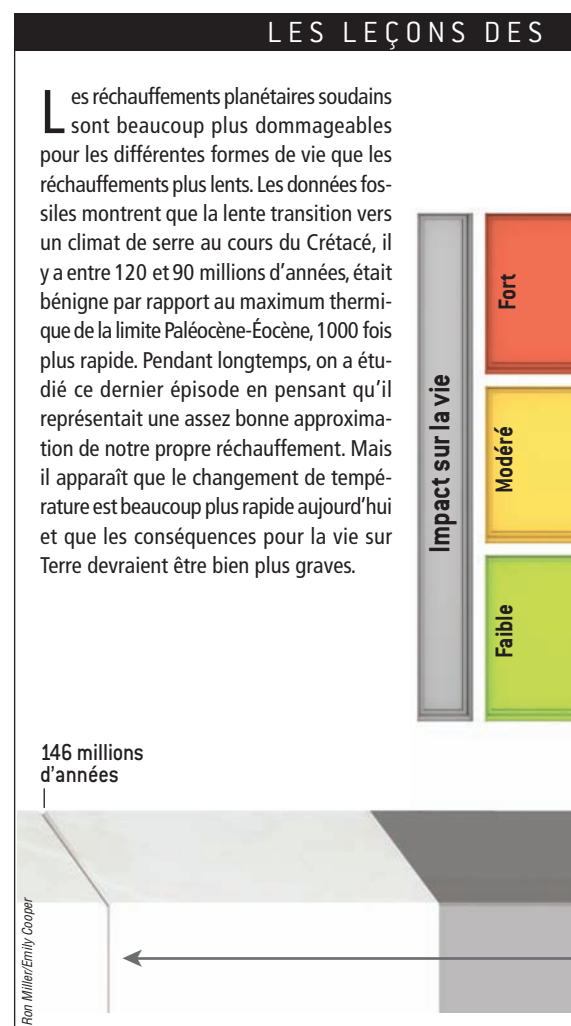
D'autres réactions en cascade ont sans doute participé au pic de réchauffement, libérant encore davantage de carbone des réservoirs de la terre ferme. Les sécheresses provoquées par le réchauffement dans de nombreuses régions, dont l'Ouest des

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.

Après une première expédition de repérage, nous avons fait une découverte qui nous a simplifié la tâche. Un géologue local nous a appris que la compagnie minière norvégienne qui l'employait avait prélevé, des années plus tôt, une carotte de sédiments couvrant l'intervalle du maximum thermique. Le géologue avait pris l'initiative de préserver cette carotte de plusieurs kilomètres, débitée en tronçons cylindriques d'un mètre et demi de long, dans un vaste hangar en périphérie du village de Longyearbyen. Le reste de l'expédition et notre seconde visite, en 2008, ont été consacrés au prélèvement d'échantillons sur des portions choisies de cette longue carotte.

De retour au laboratoire, pendant plusieurs années, nous avons extrait de ces échantillons les signatures chimiques spécifiques susceptibles de nous renseigner sur l'état de la Terre pendant et après le maximum thermique. Notamment, pour suivre l'évolution de la quantité de gaz à effet de serre dans l'air, nous avons étudié l'évolution du mélange d'isotopes du carbone issu de la matière organique préservée dans l'argile. En analysant plus de 200 couches de la carotte, nous avons reconstitué ces signatures chimiques au cours du temps. Comme nous le soupçonnions, la signature isotopique du carbone changeait considérablement dans les couches qui correspondaient au maximum thermique.

En analysant plus de 200 couches de la carotte, nous avons reconstitué ces signatures chimiques au cours du temps. Comme nous le soupçonnions, la signature isotopique du carbone changeait considérablement dans les couches qui correspondaient au maximum thermique.

Un dégagement gazeux plus lent que prévu

Couvrant toute la durée du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène, nos carottes arctiques fournissaient un excellent enregistrement de la période où les gaz à effet de serre avaient été libérés dans l'atmosphère. Apporteraient-elles enfin des réponses concluantes sur la quantité, la source et la durée de ce dégagement gazeux ? Il fallait pour cela faire plus que de simples extrapolations sur la composition ou la concentration des matériaux dans les carottes. Nous avons demandé à Ying Cui, mon étudiant en thèse à l'Université d'État

de Pennsylvanie, de mettre au point un modèle informatique complexe simulant le réchauffement. Ce modèle est fondé, d'une part, sur les variations des signatures isotopiques du carbone relevées dans les carottes arctiques et, d'autre part, sur le degré de dissolution du carbonate des fonds océaniques fourni par les carottes des profondeurs océaniques, lequel constitue un bon indicateur de l'acidification des océans.

Y. Cui a testé différents scénarios, chacun nécessitant un mois de calculs informatiques. Certains supposaient une contribution plus importante des hydrates de méthane ; dans d'autres, les sources de dioxyde de carbone libéraient plus de gaz. Finalement, le scénario qui correspond le mieux aux données récoltées sur le terrain suppose que, durant le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène, 3000 à 10000 gigatonnes de carbone se sont répandues dans l'atmosphère et l'océan, soit beaucoup plus que ce qu'ont pu fournir les volcans et les hydrates de méthane ; le pergélisol ou la tourbe et le charbon ont donc dû aussi jouer un rôle dans cette libération de carbone.

Et tout s'éclaire

france culture

La marche des sciences
14h/15h jeudi

avec Aurélie Luneau

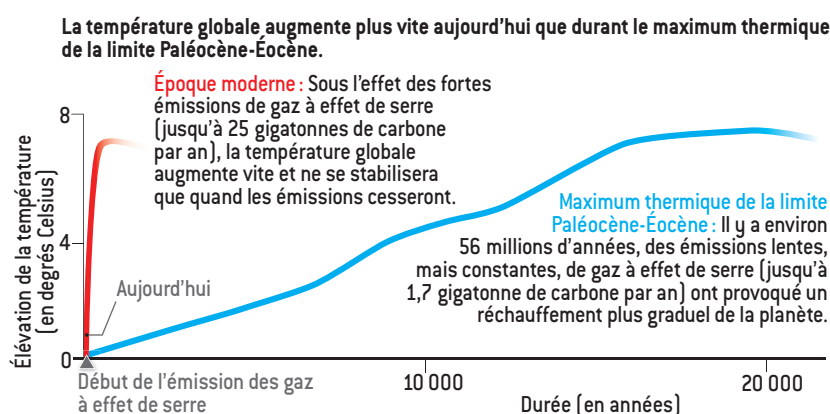
en partenariat avec le magazine Pour la Science

franceculture.com

DREAM ON - Radio France / Christophe Abramowitz

DEUX RÉCHAUFFEMENTS, DEUX SCÉNARIOS

La vitesse à laquelle la planète se réchauffe dépend de la vitesse d'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les modèles anticipent un réchauffement d'environ huit degrés Celsius d'ici 2400 si l'utilisation des combustibles fossiles et la séquestration du carbone restent inchangées. Le dégagement de carbone prédit, environ 5 000 gigatonnes, est comparable en volume à celui qui a conduit au maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène. En revanche, contrairement à ce que l'on pensait, son rythme est bien plus rapide que celui du maximum thermique.



Jen Christiansen

Cette estimation de la quantité de carbone dans l'atmosphère et les océans est parmi les plus élevées. Mais l'évaluation de la durée du dégagement de gaz est encore plus surprenante : d'après notre modèle, il se serait étalé sur environ 20 000 ans, une durée entre 2 et 20 fois plus longue que toutes les estimations précédentes. Cet étalement signifie que le dégagement gazeux s'est produit à une vitesse inférieure à deux gigatonnes de carbone par an, soit bien plus faible que la vitesse de dégagement des gaz à effet de serre dans l'atmosphère observée aujourd'hui : les concentrations de dioxyde de carbone augmentent probablement dix fois plus vite actuellement.

Réchauffement plus rapide : danger

Les implications de cette découverte pour le futur sont importantes. Les données fossiles indiquent que la vitesse du changement climatique contrôle bien plus le sort des êtres vivants et des écosystèmes que l'étendue du changement : la vie répond plus favorablement aux changements lents qu'aux changements abrupts. Ce fut le cas il y a 120 millions d'années, durant le Crétacé, lors d'une lente transition vers un climat de serre (voir l'encadré page 43). L'amplitude du réchauffement climatique du Crétacé était comparable à celle du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène, mais le premier épisode s'est étalé sur des millions d'années, et non des milliers. Aucune extinction notable ne s'est produite alors ; la planète et ses habitants ont eu tout le temps nécessaire pour s'adapter.

Pendant des années, les scientifiques ont considéré le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène comme l'extrême opposé : le changement climatique le plus rapide jamais connu, rivalisant avec les prévisions les plus sombres pour notre avenir. Les résultats que l'on obtenait sur cette période n'étaient alors pas trop alarmistes pour notre situation. À part les foraminifères au fond de l'océan et quelques groupes animaux archaïques, la plupart des animaux et des plantes semblaient avoir survécu à la vague de chaleur, même si cela s'était fait au prix de sérieuses adaptations. Certains organismes avaient rapetissé. En particulier, les mammifères du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène sont plus petits que leurs prédécesseurs et leurs descendants. Ils ont probablement évolué dans ce sens parce que les corps de petite taille dissipent mieux la chaleur que ceux de grande taille. Les insectes fousseurs et les vers, eux aussi, sont devenus plus petits.

Une grande migration vers les pôles a sauvé d'autres créatures. Certaines ont même prospéré dans leurs nouveaux territoires étendus. En mer, le dinoflagellé *Apectodinium*, un micro-organisme qui réside habituellement sous les tropiques, a investi l'océan Arctique. Sur terre, de nombreux animaux qui avaient été confinés aux tropiques se sont dirigés vers l'Amérique du Nord et l'Europe pour la première fois, y compris des tortues et des ongulés (mammifères à sabots). Chez les mammifères, cette expansion a ouvert une multitude d'occasions d'évoluer et de remplir de nouvelles niches, avec des implications profondes pour les êtres humains : de cette grande diversification est né le groupe des primates.

L'AUTEUR



Lee Kump est professeur de géosciences à l'Université d'État de Pennsylvanie, aux États-Unis.

✓ BIBLIOGRAPHIE

Y. Cui et al., Slow release of fossil carbon during the Palaeocene-Eocene thermal maximum, *Nature Geoscience*, vol. 4, pp. 481-485, 2011.

F. A. McInerney et S. L. Wing, The Paleocene-Eocene thermal maximum : a perturbation of carbon cycle, climate and biosphere with implications for the future, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 39, pp. 489-516, 2011.

L. Kump et M. Mann, *Understanding Global Warming*, DK Adult, 2008.

Ce que nous apprend l'étude géologique des continents

Dès sa découverte en 1990, on s'est aperçu que l'anomalie climatique du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène présentait de nombreuses similitudes avec le réchauffement climatique actuel : émission de gaz à effet de serre, réchauffement des eaux marines, extinctions ou modifications transitoires de certaines microfaunes marines, cycle du carbone concerné à l'échelle globale. Depuis, de nombreux chercheurs, surtout anglosaxons, l'étudient comme analogue au réchauffement actuel. Toutefois, les modélisations visant à reconstituer la vitesse de libération des gaz à effet de serre sont encore trop peu nombreuses, leurs résultats parfois contradictoires, et les sources possibles d'une libération massive du carbone sont multiples et encore débattues. Les travaux mentionnés ici sont loin de clore le sujet.

De fait, l'étude des carottes en milieux marins est insuffisante. Pour améliorer leurs outils et valider leurs modèles, les modélisateurs des changements climatiques réclament plus de données, si possible régionales, sur l'enregistrement du maximum thermique en milieu continental. L'étude en milieu continental devrait aussi aider à mieux connaître les effets d'une telle crise sur le milieu de vie des humains.

L'impact sur la faune est connu depuis longtemps : des groupes archaïques ont disparu et des groupes modernes sont apparus (périssodactyles, artiodactyles et primates chez les mammifères), se sont diversifiés et répandus très vite dans l'hémisphère Nord, empruntant des passages aux hautes latitudes (à l'époque havres subtropicaux) via le détroit de Béring et le Groenland, à la faveur de reliefs entourant l'Atlantique Nord

naissant. L'impact sur la végétation est en revanche mal cerné, les données étant contradictoires selon qu'on examine les macrofossiles ou les pollens et spores, et ils dépendent des milieux de dépôt. Quelques travaux ont montré des modifications des régimes hydriques et de l'évolution des sols, mais ils ne concernent que de rares sites isolés (Wyoming, Arctique, Colombie, Tanzanie, Nouvelle-Zélande, Angleterre).

Une équipe de chercheurs européens (majoritairement franco-belges) et russe coordonnée par le Bureau de recherche géologique minière (BRGM) étudie les effets du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène dans les milieux continentaux et littoraux du bassin de Paris et de ses bordures. Les premiers résultats indiquent une sédimentation dans des milieux très variables (rivière, lac, marécage, plage

et lagune), une alternance d'épisodes de crues drastiques et d'aridité marquée, et la formation de sols particuliers sur les secteurs émergés, bien différents de ce qui était supposé ou admis auparavant. Peu à peu, les paysages sont reconstitués. La matière organique, souvent abondante, est étudiée en détail, de même que les vestiges animaux et végétaux. Une telle étude intégrée devra être reproduite à d'autres latitudes, sur tous les continents, et à diverses paléoaltitudes (afin de vérifier par exemple la présence de pergélisol sur des hauts plateaux) pour affiner les simulations des paléoclimatologues, et mieux envisager ce qui nous attend si la crise actuelle se poursuit, d'autant plus si le rythme en est plus rapide.

Florence Quesnel

BRGM, Service Géologie, Unité Régolithe et Réservoirs, Orléans

Maintenant que l'on sait que le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène s'est imposé plus lentement qu'on ne le pensait, il n'est plus question d'invoquer son innocuité pour justifier le maintien de l'utilisation des combustibles fossiles et des rejets liés. Le changement climatique actuel se produit à une vitesse folle. En quelques décennies, la déforestation, les automobiles et les centrales à charbon de la révolution industrielle ont augmenté de plus de 30 pour cent la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère : aujourd'hui, chaque année, nous injectons neuf gigatonnes de carbone dans l'atmosphère. Selon les projections, qui prennent en compte l'accroissement de la population et l'industrialisation des pays en développement, cette quantité pourrait atteindre 25 gigatonnes par an avant l'épuisement de toutes les réserves de combustibles fossiles.

Les scientifiques et les décideurs aux prises avec les effets potentiels du changement climatique se concentrent généralement sur les bilans finaux : quelle quantité de glace va fondre ? De combien le niveau de la mer va-t-il s'élever ? L'étude du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène montre que d'autres questions sont tout aussi cruciales : à quelle vitesse ces changements auront-ils lieu ? Les habitants de la Terre auront-ils le temps de

s'ajuster ? Si le changement se produit trop vite, ou si les barrières à la migration et à l'adaptation sont importantes, la vie est perdante : des espèces animales et végétales disparaîtront, et la face du monde sera changée pour des millénaires.

Les premiers signes du réchauffement actuel déjà visibles

Nous n'en sommes qu'aux premiers stades du réchauffement actuel, et il est difficile de prédire ce qui nous attend. Néanmoins, nous avons déjà quelques éléments de réponse. Comme l'ont résumé des rapports récents du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (le GIEC), les écosystèmes ont montré, par leur réaction, qu'ils sont sensibles au réchauffement. Des signes clairs indiquent que les eaux de surface s'acidifient, perturbant la vie marine. Les extinctions d'espèces sont en augmentation, et le déplacement des zones climatiques a déjà poussé des plantes et des animaux à migrer. Contrairement aux organismes vivants du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène, les plantes et les animaux modernes sont bloqués dans leur migration vers des climats mieux adaptés : routes, voies ferrées, barrages, villes,

grandes et petites, sont autant d'obstacles qui mettent en danger leurs espèces. De nos jours, la plupart des grands animaux sont déjà *de facto* parqués dans de minuscules zones à cause de la disparition de leurs habitats ; dans de nombreux cas, leurs chances de rejoindre de nouvelles latitudes pour survivre seront nulles.

En outre, les glaciers et les banquises fondent et entraînent une élévation du niveau des mers ; les récifs coralliens sont de plus en plus victimes de maladies et de stress liés à la chaleur ; et les épisodes de sécheresse et d'inondations sont de plus en plus fréquents. Les changements des régimes de précipitations et le recul des côtes à mesure que la glace polaire fond pourraient entraîner des migrations humaines à des échelles sans précédent, dont certaines ont déjà commencé.

Le réchauffement climatique actuel est sur une trajectoire bien plus dangereuse que le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène, mais il n'est peut-être pas trop tard pour éviter une catastrophe. Si toutes les nations prennent immédiatement des mesures pour réduire l'accumulation de dioxyde de carbone atmosphérique, le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène pourrait bien rester le dernier grand réchauffement global de l'histoire. ■

Entrée libre
→ www.cnrs.fr/entree-matiere

ENTRÉE EN MATIÈRE

Jardins du Trocadéro, du 19 au 30 octobre 2011

Exposition, conférences, animations
Une invitation à explorer la matière



Année internationale de la
CHIMIE
2011



www.cnrs.fr



énergie atomique • énergies alternatives



THALES



MAIRIE DE PARIS



Le Point

SCIENCE

Direct Matin

