

Des éruptions volcaniques ravageuses

[Pour la Science](#) | ANNE-LISE CHENET | 30 novembre 1999 | [DOSSIER POUR LA SCIENCE N° 51](#)

Plusieurs périodes de volcanisme intense ont marqué durablement la planète. Au cours d'éruptions dites fissurales, la lave jaillissait de fractures de l'écorce terrestre. Des centaines de coulées de lave basaltique se sont empilées sur plusieurs kilomètres d'épaisseur, formant d'immenses plateaux en escalier : les « traps ». Nous comprenons mieux l'impact de ces événements volcaniques sur l'environnement et le climat en les rapportant aux grandes extinctions et en les comparant aux éruptions majeures de l'histoire humaine.

Des cataclysmes récurrents

L'histoire de la vie est intimement liée à l'histoire de la planète. Ainsi l'échelle des temps géologiques, fondée au XIX^e siècle, repose sur la succession des grandes faunes et flores caractérisées par les fossiles. Cette échelle est marquée de grandes extinctions « en masse » d'espèces biologiques. On dénombre six principales extinctions depuis l'aube des temps fossilifères, c'est-à-dire le début du Cambrien il y a environ 540 millions d'années. Les trois dernières sont les mieux connues. La plus importante, la limite Permo-Trias, marque la fin de l'ère primaire : en moins d'un million d'années, un temps bref à l'échelle géologique, plus de 90 pour cent de toutes les espèces alors présentes sur Terre disparaissent. La dernière, la limite Crétacé-Tertiaire, marque la fin du Secondaire. Au cours de celle-ci disparaissent non seulement les dinosaures, mais 65 pour cent des espèces terrestres et marines.

Quelles catastrophes ont causé ces extinctions ? Des changements climatiques globaux ? Une diminution de l'oxygène dans les océans (anoxie océanique) ? Depuis les années 1980, deux théories s'opposent sur les causes de l'extinction de la limite Crétacé-Tertiaire : l'hypothèse de l'impact d'une météorite et celle d'une gigantesque éruption volcanique. En une vingtaine d'années, des dizaines d'équipes de géologues ont accumulé des observations nouvelles. La réalité de l'impact de la limite Crétacé-Tertiaire a d'abord été confirmée (voir Les astéroïdes, une épée de Damoclès, par Robert Rocchia et Éric Robin, dans ce dossier). Un cratère de 150 kilomètres de diamètre a été découvert au Mexique, près du village de Chicxulub, enfoui sous des centaines de mètres de sédiments plus récents. Ce cratère correspond bien à l'âge de la limite Crétacé-Tertiaire.

Cependant on n'a retrouvé aucun autre impact susceptible d'avoir causé l'une des autres extinctions en masse. En revanche, des traps se sont formés au moment de chacune des quatre dernières grandes extinctions, témoignant d'éruptions volcaniques exceptionnelles. Ces roches ont souffert des outrages du temps, sous l'effet de l'érosion et de la tectonique : leurs surfaces d'origine s'étendaient sur plusieurs millions de kilomètres carrés et leur volume atteignait la dizaine de millions de kilomètres cubes. Ces chiffres font saisir l'immensité de ces objets. Ces deux dernières décennies, plusieurs équipes de géologues en ont précisé la localisation, l'étendue, l'âge et la durée de formation (voir les figures 1 et 2).

À la limite Crétacé-Tertiaire correspondent les traps du Deccan en Inde. Le volcanisme y date de 65 millions d'années, et l'essentiel du volume s'est mis en place en moins de 700 000 ans. Les traces de l'impact de la météorite ont été retrouvées dans des sédiments pris « en sandwich » entre les coulées. Cette observation est capitale. Elle démontre que les deux événements (impact et éruption) se sont bien produits « en même temps », quoique sur des échelles de temps différentes : instantanée ou presque pour le premier, sur des centaines de milliers d'années pour le second. On ne connaît aucun autre cas d'une telle coïncidence entre impact et éruption. En revanche, il existe d'autres traces de grands impacts, qui ne sont associés à aucune extinction. Cela signifie qu'un grand impact comme celui de Chicxulub, même s'il cause des dégâts majeurs à l'environnement et à la biosphère, ne serait pas suffisant pour provoquer une extinction en masse, catastrophe écologique d'un tout autre ordre de grandeur.

À la limite Trias-Jurassique correspond la province magmatique Centre-Atlantique (CAMP). Les laves de cette province affleurent le long de la vallée encaissée de l'Hudson dont elles forment les falaises à Palisades, en face de Manhattan. On a retrouvé des laves de même âge au fond de bassins sédimentaires, répartis le long des côtes orientales des États-Unis, puis sous forme de conduits d'alimentation (les « dykes ») en Afrique occidentale, puis au nord et au nord-est de l'Amérique du Sud, enfin au sud-ouest de l'Europe, en Espagne et au Portugal. Toutes ces laves datent de 200 millions d'années, et sont antérieures à l'ouverture de l'océan Atlantique. Il faut donc, pour en comprendre la géographie originelle, reconstruire la Pangée, le supercontinent d'alors regroupant les cinq continents actuels. Les affleurements découverts à ce jour étaient alors contigus et répartis sur une surface de plus de sept millions de kilomètres carrés.

À la grande crise Permo-Trias correspondent les traps de Sibérie, une immense étendue située à l'est de l'Oural et du bassin du Kazakhstan. On a récemment découvert qu'ils se prolongent à la base du bassin du Kazakhstan, enfouis sous des milliers de mètres de sédiments plus récents, ce qui double leur surface connue jusqu'à maintenant. Selon plusieurs méthodes géochronologiques, l'éruption fut brève, et coïncide parfaitement avec les séries stratigraphiques types qui définissent la limite biologique de l'extinction en Chine.

Juste avant la crise Permo-Trias est survenue celle de la limite entre le Guadalupien et le Tatarien, vers – 250 millions d'années. Jusqu'aux années 1990, la plupart des paléontologues pensaient que l'extinction de la fin du Permien avait duré près d'une dizaine de millions d'années. En 1994, deux paléobiologistes ont montré qu'en réalité il s'était produit deux extinctions majeures et brèves (de l'ordre du million d'années) : celle, bien connue, de la fin du Permien à 250 millions d'années, et une autre, majeure également, huit millions d'années plus tôt à la fin du Guadalupien. Nous avons proposé que cette extinction correspondait à une éruption de traps non encore identifiée. Par la suite, on a découvert, au sud de la Chine, les traps d'Emeishan, déformés et érodés à la suite de la collision bien plus récente de l'Inde et de l'Asie, et datés effectivement à 258 millions d'années.

La crise précédente s'est produite au Frasnien-Famennien, il y a 360 millions d'années. On pense avoir retrouvé les traces d'un trap de cet âge, sous la forme de « pipes kimberlitiques », c'est-à-dire d'embouchures de volcans diamantifères, situés à l'est des traps de Sibérie. La datation de ces laves est en cours.

Des équipes australiennes viennent d'identifier au centre-nord de l'Australie les restes d'un très grand trap, dont la surface d'origine devait dépasser le million de kilomètres carrés, au nord du continent. Ce trap a été daté à 507 millions d'années, ce qui correspond à l'âge d'une extinction en masse importante, à la limite entre Cambrien inférieur et moyen. Cette nouvelle découverte étend à plus d'un demi-milliard d'années la corrélation proposée entre volcanisme des traps et extinctions (voir la figure 3).

De surcroît, nombre de traps sont associés à des extinctions significatives, distinctes des six plus grandes. Les traps d'Éthiopie (30 millions d'années) sont associés au principal événement climatique du milieu de l'Oligocène. Les traps de la province magmatique dite « brito-arctique » qui affleure au nord-ouest des îles britanniques et le long des côtes ouest et est du Groenland correspondent à deux crises : la première à 60 millions d'années, coïncidant avec la fin du Paléocène, et la seconde à 55 millions d'années, avec un réchauffement climatique majeur et assez bref, le Late Paleocene Thermal Maximum (LPTM). Les traps de Madagascar correspondent à la fin du Cénomaniens, les traps de Rajmahal à la fin de l'Aptien, les traps du Parana (ceux sur lesquels coulent les célèbres chutes de l'Iguaçu) à la fin du Valanginien (trois étages du Crétacé), et ceux du Karoo en Afrique du Sud à la fin du Pliensbachien (étage du Jurassique).

Proposée à la fin des années 1980, la corrélation entre l'âge des traps et les principales limites géologiques n'a cessé de s'améliorer avec les nouvelles observations sur le terrain. Elle établit statistiquement, avec un seuil de confiance supérieur à 99 pour cent, la relation causale entre volcanisme et extinctions. Comment l'expliquer ? L'hypothèse la plus plausible est un changement climatique associé au volcanisme. On a longtemps cru que seules les éruptions volcaniques explosives, comme les volcans du Chili, éjectaient dans la haute atmosphère les poussières susceptibles de modifier durablement le climat à l'échelle globale ; c'était un argument de poids contre l'hypothèse volcanique. Cependant l'éruption du mont St Helens (1980) et celle du Chichon (1982) ont montré que les émissions de soufre, et non les poussières, provoquent des changements climatiques significatifs. Une éruption basaltique fissurale, à l'origine des traps, est-elle capable d'éjecter poussières et gaz jusqu'à la stratosphère pour polluer la planète entière ?

L'éruption du Laki : une pollution semi-planétaire

En Europe, l'année 1783 est connue sous le nom d'annus mirabilis (« année prodigieuse ») : nombre d'événements « extrêmes » se produisirent alors. L'été fut exceptionnellement chaud dans toute l'Europe occidentale. L'hiver qui suivit fut l'un des plus rudes qu'ait connus cette région. Un brouillard épais et sec, comme on n'en a jamais revu depuis, s'étendit sur presque tout l'hémisphère nord. Cette même année l'Etna, le Stromboli et le Vésuve en Italie, l'Asama au Japon entrèrent en éruption. Des tremblements de terre secouèrent la Calabre. Mais aucun de ces événements n'est comparable à l'éruption du Laki en Islande, qui se produisit de juin 1783 à février 1784 (voir la figure 4). Ce fut l'une des plus grandes éruptions basaltiques fissurales de l'histoire.

En août 1783, le naturaliste français Mourgue de Montredon présentait à l'Académie royale de Montpellier ses observations, précises et soigneuses, sur la direction et la force des vents, sur la température et sur l'état du ciel. Il a

décrit en particulier des vapeurs épaisses, à la fois sèches et riches en soufre et a proposé, le premier, de relier ces phénomènes atmosphériques à l'éruption du Laki.

En Islande, les trois quarts du cheptel et le quart de la population de l'île succombèrent. Ce sont là des effets locaux, dus à des émanations de l'éruption restées dans les basses couches de l'atmosphère. Mais l'impact de l'éruption s'étendit à l'Europe. Le géographe John Grattan, de l'Université du pays de Galles, a montré que le taux de mortalité de l'année 1783 en Angleterre excède de plus de 30 pour cent la moyenne à long terme. Pour de nombreuses paroisses de France, entre janvier 1782 et décembre 1784, la mortalité augmente de juillet à septembre (voir la figure 5). En septembre et en octobre, des pics de mortalité anormaux dépassent de 40 pour cent la moyenne à long terme. J. Grattan évalue à plus de 10 000 l'excès « anormal » du nombre de décès en Angleterre, et estime que la crise fut plus intense encore en France et aux Pays-Bas. En extrapolant ces résultats au reste de la France et à une partie de l'Europe occidentale, on peut attribuer à cette crise volcanique 160 000 morts excédentaires, soit 10 fois plus que les décès provoqués par la vague de chaleur de 2003. L'éruption du Laki libéra dans l'atmosphère des produits acides à des concentrations supérieures au niveau critique pour la santé humaine, et ce à l'échelle du continent européen. Les variations de température amplifièrent les effets mortels de cette pollution, cause de difficultés respiratoires, de maladies cardio-vasculaires et d'autres formes de stress sévères.

Ces effets dépassèrent les limites de l'Europe, comme le montrèrent Thor Thordarson, de l'Université d'Hawaii, et Steve Self, de l'Open University à Milton Keynes, en Grande-Bretagne. L'été 1783 fut aussi celui de la « grande famine du riz » au Japon. En Alaska, la température d'été fut de cinq degrés inférieure à la normale. De la mi-juin au début de juillet, des observateurs rapportent l'apparition de l'étrange brouillard sulfureux en Asie centrale, au sud de l'Alaska, à Terre-Neuve... Une large part de l'hémisphère nord fut affectée (voir la figure 6).

T. Thordarson et S. Self ont reconstitué en détail la série de dix éruptions, avec leurs phases explosives suivies d'écoulements de lave plus paisibles (voir la figure 7). En neuf mois, 15 kilomètres cubes de lave basaltique se sont épanchés sur 565 kilomètres carrés (les traces en sont encore visibles). Plus de 120 mégatonnes de dioxyde de soufre (SO₂) et 1 100 mégatonnes de fragments de lave solides ont été rejetées dans l'atmosphère. D'après des observations faites à l'époque, les panaches éruptifs atteignaient 13 kilomètres d'altitude au moins, c'est-à-dire les couches inférieures de la stratosphère.

Pour mieux comprendre quantitativement les éruptions de ce type, nous avons utilisé un modèle de circulation générale de l'atmosphère, conçu et réalisé par le laboratoire de météorologie dynamique de l'Institut Pierre Simon Laplace, à Paris. Lors d'une éruption fissurale comme celle du Laki, le volcan projette dans l'atmosphère des gaz et des poussières, à diverses altitudes. Les produits rejetés dans la troposphère ont un effet local ou régional ; ceux qui sont injectés dans la stratosphère sont entraînés dans la circulation atmosphérique à l'échelle globale. Les composés soufrés forment, par oxydation, puis par condensation au contact de la vapeur d'eau, des aérosols d'acide sulfurique qui détruisent notamment l'ozone. Ils refroidissent la surface terrestre et la basse atmosphère et réchauffent la stratosphère.

Le modèle numérique divise l'atmosphère en parcelles d'environ 300 kilomètres de côté et en 19 couches entre le sol et 40 kilomètres d'altitude. Dans ces 130 000 cellules, on résout l'ensemble des équations qui gouvernent la circulation atmosphérique générale et l'évolution des composés atmosphériques. En injectant à la position de l'Islande les produits volcaniques selon la séquence déterminée par T. Thordarson et S. Self, on a reconstitué la répartition et l'évolution des aérosols sulfuriques. Des bouffées toxiques de produits sulfuriques sont parfois poussées par les vents vers le Groenland, mais plus souvent dirigées vers l'Europe, et lessivées par la pluie vers la basse atmosphère et le sol (voir la figure 8). La répartition des produits toxiques suit bien la forme de l'extension maximale du nuage de brouillard. Au sol, nous avons calculé avec notre modèle une concentration des produits soufrés de 1 000 parties par million en Islande et de 50 parties par million en Europe occidentale. On considère en général qu'on ne peut se tenir plus d'un quart d'heure à proximité d'un volcan actif quand la concentration y dépasse 300 parties par million : c'est le seuil d'évacuation des abords du volcan à Hawaii.

L'éruption de 1783-1784 au Laki a modifié de façon durable le climat dans une grande partie de l'hémisphère nord et causé des dégâts considérables à la biosphère et aux populations humaines. Les aérosols sulfatés y jouèrent un rôle essentiel. D'après le modèle, le Laki en a éjecté jusqu'à six mégatonnes par jour. À titre de comparaison, les volcans apportaient l'essentiel du flux atmosphérique de fond, soit 0,04 mégatonne par jour en moyenne, jusqu'à ce que les activités humaines le noient sous 0,3 mégatonne par jour.

Les éruptions fissurales du type du Laki ne sont pas rares en Islande, au moins à l'échelle des temps géologiques. L'éruption la plus importante s'est produite entre 934 et 940 à Eldgjá. Leur périodicité atteint peut-être des siècles. Sans aucun doute, une éruption de ce type se reproduira un jour. On peut en estimer les conséquences : interruption du trafic aérien sur tout l'Atlantique nord pendant des mois, et conséquences sur la santé, sans doute amplifiées, en comparaison à celles du XVIII^e siècle, par les niveaux de pollution et les allergies aujourd'hui observés en Europe.

Traps aux conséquences apocalyptiques

Cette étude fournit un exemple à petite échelle des conséquences d'une éruption fissurale basaltique : si l'éruption du Laki, modeste en regard des traps, a pollué un hémisphère entier, les éruptions responsables des traps observés à la surface du globe ont nettement altéré le climat.

S. Self et son équipe ont étudié le plus petit des traps, les basaltes de la rivière Columbia, situé dans l'ouest des États-Unis et âgé de 15 millions d'années. Malgré sa petite taille (il ne fait « que » 100 000 kilomètres cubes en volume), il contient des coulées imposantes. L'une d'entre elles, le « Roza flow », a plus d'une centaine de mètres d'épaisseur et se poursuit sur des dizaines de kilomètres. Elle recouvre 40 000 kilomètres carrés, occupe un volume total de 1 300 kilomètres cubes, et s'est mise en place en moins de 15 ans. Vingt mille mégatonnes d'aérosols sulfatés ont alors été émises. Tandis que l'éruption du Laki aurait réduit l'intensité des rayons lumineux atteignant le sol à 75 pour cent de sa valeur normale, ce chiffre serait tombé à dix pour cent pendant la décennie d'éruption de la coulée de Roza.

On observe de telles coulées géantes dans la plupart des traps. Nombreuses sont les coulées de traps dont le volume doit être compté en milliers de kilomètres cubes, voire en dizaines de milliers ! Ces coulées sont de 100 à 1 000 fois plus volumineuses que celle du Laki. Comme elles se sont mises en place en quelques années, au plus en quelques dizaines d'années, le flux instantané était plus de dix fois supérieur à celui du Laki, et maintenu sur des dizaines d'années. Même si un calcul précis reste à faire, la mise à l'échelle des résultats obtenus pour le Laki pour une unique coulée de trap révèle une catastrophe écologique majeure. Or ce sont des centaines de coulées, d'épaisseur variable, qui sont empilées dans chaque trap.

Nous avons appliqué ces idées au plus récent des grands traps, en Éthiopie. Ce grand plateau, sur lequel est construite Addis-Abeba, ressemble aux traps du Deccan. L'essentiel de son million de kilomètres cubes de laves basaltiques (et aussi acides) s'est mis en place en moins de 800 000 ans, il y a 30 millions d'années. Nous avons analysé le magnétisme de plus de 2 000 mètres d'empilement de coulées pour déterminer précisément l'âge et la durée du volcanisme.

Les téphras, c'est-à-dire les poussières éjectées lors des phases les plus explosives de l'éruption, ont été retrouvés au sein de carottes de sédiments forées dans l'océan Indien, la mer d'Arabie et l'Atlantique Sud, dans le cadre du programme international IODP (International Ocean Drilling Program). Au CEREGE (Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement), Yannick Touchard et Pierre Rochette ont constaté que des sédiments d'âge voisin de 30 millions d'années provenant de carottes forées dans l'océan Indien recelaient de nombreux niveaux de cendres volcaniques, ceux de carottes de l'Atlantique Sud moins, et ceux de carottes provenant d'Europe (Italie) ou du Sud de l'Australie aucune. Les cendres extraites des carottes de l'océan Indien ont la signature géochimique caractéristique des basaltes éthiopiens. Ces niveaux de cendres, bien datés, confirment la simultanéité des traps et d'un important événement climatique : avancée majeure des glaciers dans l'Antarctique, baisse du niveau des mers, période de sécheresse et minimum dans la biodiversité.

Deux d'entre nous (F. Fluteau et A.-L. Chenet) ont modélisé les effets de l'éruption des traps, ce qui a permis de vérifier l'extension globale des émissions d'aérosols entre les latitudes de 60 degrés Nord et 40 degrés Sud, et de déduire la répartition globale des retombées de poussière. La distribution géographique particulière des téphras ne peut être comprise que si ceux-ci ont atteint l'altitude de la stratosphère. Les vents dominants, dirigés vers le sud-est à basse altitude et vers le sud-ouest à haute altitude, conduisent à prédire que les téphras les plus fins sont retombés dans l'océan Atlantique Sud et les plus grossiers dans le sud-est de l'océan Indien : ceci est en accord avec les observations.

L'hypothèse volcanique explique désormais toutes les extinctions en masse. Les panaches convectifs du manteau, dont la fusion partielle s'exprime sous la forme des laves des traps, peuvent conduire à des variations de l'altitude des continents sur quelques millions d'années, dont les variations du niveau des mers sont une des conséquences. Les événements d'anoxie océanique se produisent quand un trap se met en place sous la mer, dont la masse absorbe les éléments émis et dont la chimie peut être fortement altérée : ce fut le cas il y a 120 millions d'années lors de la

mise en place du grand plateau d'Ontong-Java au fond du sud-ouest du Pacifique. Enfin, les hydrates de méthane (qui seraient par exemple responsables du réchauffement du LPTM il y a 55 millions d'années) peuvent être relâchés dans l'atmosphère sous l'effet direct ou indirect des traps. On voit par là le pouvoir unificateur de l'hypothèse volcanique. Au contraire, l'hypothèse de l'impact de météorite n'explique en partie qu'un cas particulier (la limite Crétacé-Tertiaire), même si ce cas est important et même si les météorites jouèrent un rôle essentiel pendant le premier milliard d'histoire de la Terre.

Un test encore plus exigeant de l'hypothèse volcanique résiderait dans une prédiction plus fine des conséquences climatiques d'un grand trap connu pour ses effets sur les extinctions. Nous avons entrepris de faire ce test pour les traps du Deccan. Le but est de reconstituer la séquence des centaines d'éruptions volcaniques qui s'y sont produites. Pour cela, nous avons multiplié les approches complémentaires. La géochimie des coulées permet de détecter des changements majeurs dans l'alimentation des chambres magmatiques. La morphologie révèle les grandes séquences du volcanisme qui se traduisent par des roches de propriétés semblables, attaquées de la même façon par l'altération et l'érosion et produisant les grandes falaises qui forment les traps. La présence de sols entre les coulées indique une interruption dans l'émission, qu'on estime à l'aide de la cinétique chimique de cette altération.

Enfin l'étude de la variation séculaire du champ magnétique, enregistrée dans les laves, fournit un indice important de la brièveté de certaines éruptions. En effet, la direction du champ magnétique propre de la Terre varie sans cesse, à l'échelle de la dizaine à quelques centaines d'années : c'est ce qu'on appelle la variation séculaire. En refroidissant, les laves enregistrent la direction de ce champ. Si les directions magnétiques enregistrées par une série de coulées sont identiques ou voisines, cela signifie qu'un ou deux siècles tout au plus ont été suffisants pour leur mise en place.

Ces diverses techniques sont en cours d'application, de manière coordonnée, entre notre équipe (avec Martine Gérard et Jean Besse) et celle que forment Steve Self, Mike Widdowson et Anne Jay à l'Open University. En Inde, K.V. Subbarao, de l'Université d'Hyderabad, Sunil Bajpai, de l'Institut de technologie de Roorkee, et Syed Khadri, de l'Université d'Amravati, collaborent à ce programme. Les premiers résultats sont prometteurs. La pile de laves qui forme la célèbre falaise de Mahabaleshwar et dont l'épaisseur cumulée atteint 1 200 mètres se serait pour l'essentiel mise en place au cours de quelques paroxysmes, peut-être une dizaine, durant chacun de quelques siècles à quelques milliers d'années.

Une hiérarchie des catastrophes

Peut-on comparer les impacts relatifs sur le climat de l'éruption d'un trap dans son ensemble, de l'éruption d'une unique coulée de trap, de la chute d'une météorite de la taille de celle qui a produit le cratère du Mexique, et de l'industrie humaine ? La quantité totale de dioxyde de soufre (SO₂) émise par une unique coulée d'un grand trap varie de 1 à 100 gigatonnes. L'impact de Chicxulub aurait provoqué une émission de 50 à 200 gigatonnes. L'impact d'un astéroïde est donc l'équivalent d'une seule (mais très grosse) coulée de trap. Cependant un trap représente des centaines de coulées. Nulle raison de les sous-estimer ! Vivre sur Terre au moment d'un impact ou de l'éruption du Roza flow ne doit pas être plaisant. Mais pour terribles qu'ils soient, ces événements ne sont pas suffisants pour causer à eux seuls la catastrophe énorme que représente une extinction en masse.

Les traps de Columbia n'ont apparemment conduit à aucune extinction en masse sur Terre. Il faut pour cela des centaines de coulées, un volume total supérieur au million de kilomètres cubes de lave et une séquence d'éruptions avec des bouffées rapprochées dans le temps. Pour ce qui est de l'impact du Yucatan, c'est parce qu'il s'est produit dans un monde déjà soumis aux éruptions du Deccan depuis quelques centaines de milliers d'années, dans un monde en plein début d'extinction en masse, qu'il a eu des conséquences si drastiques, basculant par-dessus bord la moitié des espèces déjà fragilisées. Un impact de Chicxulub dans un monde sans éruption de trap n'aurait probablement provoqué aucune extinction en masse.

Quant à l'industrie humaine, elle relâche dans l'atmosphère 120 mégatonnes de SO₂ par an (voir la figure 9). Il faudrait à ce rythme 800 ans pour émettre les 100 gigatonnes d'une grosse coulée ou d'un gros impact. L'homme équivaut pour l'instant à un dixième d'impact ou de coulée et à un millième de trap (pris dans son ensemble). Cela signifie qu'il n'est pas (encore ?) de taille à engendrer une extinction en masse sur Terre. Toutefois « un millième d'extinction » est déjà fort désagréable.

Le petit Laki en 1783 et le grand Roza flow, il y a 15 millions d'années, prouvent que la Terre engendre des phénomènes terribles, dont la durée se chiffre, non pas en millions d'années, mais en décennies, et dont l'intensité excède celle des phénomènes anthropiques. Les géologues détiennent peut-être certaines clefs qui permettront d'étalonner les modèles de prévision des spécialistes engagés dans l'étude du climat : les contrôles de ces calculs complexes sont sans doute inscrits dans les roches terrestres.