

VINCENT COURTILLOT

NOUVEAU VOYAGE AU CENTRE DE LA TERRE

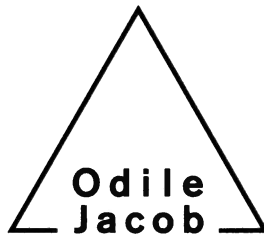


Odile
Jacob
sciences

Nouveau Voyage au centre de la Terre

VINCENT COURTILLOT

Nouveau Voyage au centre de la Terre



© ÉDITIONS ODILE JACOB, SEPTEMBRE 2009
15, RUE SOUFFLOT, 75005 PARIS

www.odilejacob.fr

ISBN : 978-2-7381-1939-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3°a, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Ce livre est dédié aux membres de l'équipe qui a bien voulu se constituer autour de moi depuis 1980 : certains, comme José Achache, ont poursuivi ailleurs leur brillante carrière. La plupart sont restés dans notre petite, fidèle et chaleureuse équipe de paléomagnétisme de l'Institut de physique du globe de Paris : Jean Besse, complice depuis la première heure, Jean-Pierre Valet, Yves Gallet, Jean-Pascal Cogné, Marie-Gabrielle Moreau, Stuart Gilder, Frédéric Fluteau qui nous a apporté la fibre climatologique, Sylvie Larousse, pilier indispensable et fidèle amie, Hélène Bouquerel, et, depuis que notre laboratoire s'est uni au laboratoire historique créé par Émile Thellier, le magicien des instruments qu'est Maxime Legoff, Bernard Henri et non loin Jean-Claude Tanguy, amoureux des volcans italiens. Je pense aussi à l'équipe de géochronologie d'Orsay, laboratoire dont j'ai eu la chance de soutenir la création puis le maintien et que dirige avec flamme et compétence Pierre-Yves Gillot, assisté solidement de Xavier Quidelleur et de plus jeunes collègues récemment arrivés. Enfin, je tiens à associer les jeunes (et désormais moins jeunes) chercheurs qui m'ont fait confiance et m'ont demandé de diriger ou de codiriger leurs travaux de thèse (au-delà de ceux déjà nommés, et qui sont souvent devenus mes collègues) : je pense notamment à Dominique Gibert, Randy Enkin, Didier Vandamme, Claire Mary, Yan Chen, Zhenyu Yang, Sylvie Gruszow, Isabelle Manighetti, Corinne Hofmann, Julie Carlut, Laurence Audin, Tesfaye Kidane et, pour une partie importante et récente des travaux rapportés dans ce livre, Anne-Lise Chenet. L'ensemble de ces recherches s'est accompli au sein d'une équipe universitaire associée au CNRS, dans deux établissements d'enseignement supérieur étroitement liés pour ce qui est des sciences de la Terre, de l'environnement et des planètes : l'Institut de physique du globe de Paris et l'université Paris-Diderot.

INTRODUCTION

« Le professeur Lidenbrock était aussi un bibliomane à ses moments perdus ; mais un bouquin n'avait de prix à ses yeux qu'à la condition d'être introuvable, ou tout au moins illisible. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*¹.

Dans leur voyage au centre de notre globe, le professeur Lidenbrock, son neveu Axel et leur fidèle « chasseur » islandais, partis de la bouche du volcan Sneffels sur les traces du grand savant islandais du XVI^e siècle, Arne Saknussemm, n'atteindront « que » 35 lieues de profondeur, la profondeur estimée de la « mer Lidenbrock », sur les 1 583 lieues et un tiers qui les séparaient de leur but, avant d'être involontairement précipités pendant plusieurs heures dans un gouffre à la vitesse de 30 lieues à l'heure (sans presque rien voir), puis d'être ramenés vers la surface par une éruption du Stromboli... Nous dirions aujourd'hui que la mer Lidenbrock est donc située à la base des plaques tectoniques et que leur « voyage extraordinaire » a brièvement mené nos héros au sein du manteau supérieur, avant d'être sauvés par un volcan de la zone de subduction du sud de l'Italie. Vous pouvez désormais entreprendre ce voyage dans le parc de loisirs de Vulcania près de Clermont-Ferrand. J'en ai fait l'expérience saisissante au début de l'été 2007 : très impressionnant... et très réussi. Vous pouvez aussi l'entreprendre, dans une version moins romancée que l'original de Jules Verne, mais qui tente de résumer les extraordinaires acquis de la recherche en géosciences depuis quatre décennies, en acceptant de vous embarquer avec moi pour ce nouveau voyage au cen-

1. Parce qu'un de mes relecteurs m'a signalé qu'elles pouvaient être prises au pied de la lettre, je signale dès à présent que ces citations du roman de Jules Verne ne sont souvent qu'une allusion ou un sourire. Mais certaines sont peut-être prémonitoires... Au lecteur de faire le tri.

tre de la Terre. J'espère vous y faire découvrir l'image nouvelle, dynamique que les géosciences fournissent des enveloppes de notre planète. Les chercheurs de disciplines qui s'ignoraient sont désormais contraints de se parler. Et cela parce que les enveloppes de notre globe interagissent entre elles, de façon complexe et sur des échelles de temps qui vont de celle de notre vie au plus profond des temps géologiques. Ce nouveau mariage est l'indispensable clef d'une véritable compréhension du « système Terre », le seul moyen d'en comprendre le fonctionnement, de tenter d'en prédire l'évolution, en tâchant d'éviter le catastrophisme ambiant qui tient plus d'une peur millénariste que du sain exercice de la raison. Terre vivante, dynamique et complexe, dangereuse et bienfaisante.

Jetant un regard rétrospectif sur les avancées des sciences de la Terre depuis que j'étais étudiant, constatant avec plaisir quelle a été la contribution à cet édifice des scientifiques français², j'ai l'occasion d'un regard rétrospectif sur mon cheminement scientifique. Formé comme ingénieur des Mines, initié en Californie au paléomagnétisme (géologique), puis à Paris au magnétisme (mathématique et physique), poussé par mon maître, Jean-Louis Le Mouél, à comprendre l'intérêt des longues séries de mesures dans les observatoires, revenant au paléomagnétisme pour mesurer les déformations du Tibet, faisant un saut en Afar pour comprendre la déchirure des continents, tombant sur le problème des traps³ et des extinctions à l'occasion d'un travail en Inde dont ce n'était pas le but, reconstituant avec mon ami Jean Besse la dérive des pôles et des continents depuis 200 millions d'années, m'interrogeant sur l'existence des pana-

2. J'ai eu l'occasion, lorsque j'étais directeur de la recherche au ministère chargé de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de la Technologie vers l'an 2000, de faire analyser la production scientifique française et son impact à l'aide des données du *Science Citation Index*. Dix-sept années de production scientifique mondiale ont ainsi été analysées (des millions d'articles). Dans chaque grande discipline (chimie, biologie, mathématiques, sciences de la Terre, physique, etc.), nous avons mesuré la part des chercheurs français ou travaillant dans des laboratoires français qui étaient dans le peloton de tête des 10 % de scientifiques les plus cités. Les deux domaines dans lesquels, et de très loin, la présence française était la plus marquante étaient les mathématiques (tout le monde le sait) et les sciences de la Terre (qui le sait ?)...

3. Les traps sont l'un des personnages centraux de notre voyage à venir. Nous les retrouverons à de très nombreuses reprises. Contentons-nous pour l'instant de dire qu'il s'agit d'énormes empilements de laves basaltiques, en général disposés à plat, dont une douzaine a été identifiée à la surface de la Terre.

ches dans le manteau profond⁴, j'ai passé une bonne partie de ces dernières années avec Frédéric Fluteau à tenter de mieux comprendre l'impact climatique des grands traps ; c'était la dernière preuve que je voulais apporter à mon ami Walter Alvarez, père de l'explication de la disparition des dinosaures par l'impact d'une météorite, pour le convaincre⁵. Ce parcours n'a rien d'un long fleuve tranquille. Il est fait de nombreux chemins de traverse, poursuivis indépendamment, souvent sans que j'aie su immédiatement distinguer de lien entre eux. Je ne pensais certes pas pouvoir un jour relier les études paléomagnétiques du Tibet et de l'Inde, qui m'ont conduit à mettre en évidence la brutalité des éruptions du Deccan, avec la découverte de la propagation du rift d'Aden en Afar. Un trap est impliqué, et pour des raisons causales, dans les deux cas.

C'est pour moi un émerveillement et un plaisir de voir comment la plupart de ces quêtes ont fini par se rejoindre et s'emboîter en une vision de la Terre un peu différente de celle que j'avais apprise comme étudiant. Le grand tournant a été celui de la tectonique des plaques, que j'ai eu la chance de découvrir dès la fin des années 1960 grâce à l'abonnement de mon père au *Scientific American*, puis de me former au milieu de quelques-uns de ses découvreurs à Stanford au début des années 1970. Je suis très reconnaissant aux établissements très divers que j'ai fréquentés de ce qu'ils m'ont apporté. Mais c'est à l'Institut de physique du globe de Paris, aux collègues remarquables qu'on y côtoie, à la liberté de pensée et d'action qui y règne que je dois les plus importantes opportunités de ce parcours. La discipline des géosciences est désormais mûre. Elle n'est plus dans cette phase révolutionnaire que ceux de ma génération ont eu la chance de connaître et de vivre. Mais les géosciences modernes restent un immense et merveilleux réservoir

4. Ce travail a été amorcé lors d'une invitation au Caltech à la suite de discussions avec mon ami, le grand géophysicien Don Anderson. Il ne croyait pas (et ne croit toujours pas) un mot à l'existence de panaches profonds. J'ai tenté de fabriquer une série de critères, exposés au chapitre 6, pour montrer qu'il avait raison. J'ai trouvé qu'il avait raison... dans 80 % des cas, mais que les quelques occasions où il avait tort étaient essentielles. Je ne pense pas qu'il ait changé d'avis et le lecteur intéressé par ces thèses pourra lire le gros pavé de plus de 800 pages intitulé *Plates, Plumes and Paradigms*, assemblé par G. F. Foulger, J. H. Natland, D. C. Presnall et D. A. Anderson, *Geological Society of America*, Special paper 388, 2005.

5. Il y a quelques années, lors d'un congrès à Los Angeles où l'assistance était dominée de façon écrasante par les partisans de l'impact, Walter Alvarez a eu l'amitié et l'élégance de dire qu'il était prêt à retenir notre hypothèse du volcanisme pour la plupart des extinctions... mais pas pour la limite Crétacé-Tertiaire.

de belles questions à poser, de belles méthodes à apprendre, de beaux problèmes à résoudre. C'est la géologie sans doute qui apportera les réponses à une bonne partie des grandes questions qui se posent aujourd'hui à nos sociétés : accès aux ressources minérales, au pétrole, à l'eau, gestion des déchets urbains, des risques naturels, séquestration du gaz carbonique... Le voyage au centre de la Terre que je veux esquisser est au plus près de ce que je crois comprendre aujourd'hui de notre Planète.

J'aborderai ce voyage « par le haut », avec une illustration des derniers travaux que nous avons entrepris, avec Jean-Louis Le Mouél, et qui nous ont fait découvrir un pan de la climatologie, celui du « changement climatique ». J'en incorpore les premiers résultats et les premières interrogations dans le fil de ce voyage de la surface vers le noyau. Partis d'une étude de la grande éruption de 1783 au Laki en Islande et de résultats surprenants sur les variations du champ magnétique terrestre, nous avons abouti, de manière au début très indirecte, au fameux problème du réchauffement climatique. Sans remettre en cause la réalité d'un réchauffement global au cours des 150 dernières années, nous pensons que le rôle du Soleil a été largement sous-estimé. Cela nous a menés à nous interroger sur la validité de certaines approches conduisant à prédire les évolutions climatiques du siècle qui commence. Mais nous n'étions pas climatologues ! J'ai encore très présentes à l'esprit les réactions vives de deux confrères de l'Académie des sciences scandalisés par cette incursion de géophysiciens *a priori* incompetents dans leur domaine. Mais qui peut aujourd'hui dénier tout rôle significatif au Soleil ? Qui peut dire que l'effet des rayons cosmiques ou la microphysique des nuages sont aujourd'hui suffisamment bien compris ? Qui nous dit que les modèles numériques actuels, qui bien naturellement ne prennent pas en compte certains processus encore mal connus, permettent de faire avec suffisamment d'assurance la part des diverses causes possibles de l'évolution du climat, récente et à venir ?

Dans ce livre nous parlerons souvent de tectonique des plaques, et on peut rappeler avec quelle agressivité les géologues (et certains géophysiciens) des années 1920 à 1950 ont accueilli les « élucubrations » d'un Alfred Wegener, un « météorologue » qui n'était « même pas géologue ». Cela dit, très récemment, le discours de certains climatologues a évolué

et le rôle du Soleil apparaît de plus en plus plausible, de même qu'est reconnu le fait qu'il a précédemment été trop négligé. Nous embarquerons donc pour ce voyage en partant de la surface et nous poserons la question des principaux moteurs du changement climatique. Nous évoquerons le rôle du Soleil et des planètes, avec les grandes ères glaciaires et les cycles de Milankovic, puis de manière plus spéculative les liens possibles avec le champ magnétique interne, nous offrant ainsi une première incursion dans les profondeurs de la Terre.

Pourquoi avoir entamé ce projet sur le système Terre par le climat ? Eh bien, parce que le géologue a peut-être plus à apporter au climatologue que celui-ci n'en a pour l'instant conscience. Il est considéré comme acquis que les échelles de temps des climatologues sont brèves, de la décennie au siècle, alors que celles du géologue se comptent en millions d'années. Les phénomènes observés n'auraient donc rien à voir, et les deux communautés rien à se dire. C'est sans doute déjà un problème d'échelle de temps qui a longtemps fait préférer l'hypothèse de l'impact d'un astéroïde à celle du volcanisme pour expliquer la fin des dinosaures. Un impact est, en tout état de cause, bref à l'échelle d'une vie humaine, cette aune à laquelle nous mesurons consciemment ou inconsciemment le temps. Une éruption volcanique distribuée sur une centaine de milliers d'années ne paraît en revanche pas très catastrophique. Mais les travaux récents que nous rapporterons permettent de montrer qu'au cours des éruptions de traps d'immenses coulées de lave se sont épanchées en seulement quelques dizaines d'années. Les flux de polluants injectés, et notamment le soufre, ont ainsi dû être très supérieurs à ceux causés par l'homme au cours de l'ère industrielle. Les échelles de temps des géologues peuvent donc parfois être aussi courtes que celles des climatologues et les intensités rencontrées par le passé beaucoup plus intenses encore qu'aujourd'hui.

Pour comprendre comment peuvent être couplées les évolutions capricieuses de l'atmosphère, des océans et de la terre solide, nous entreprendrons alors notre descente aux enfers (en fait, un paradis pour les « géoscientifiques⁶ »). Nous y ver-

6. Ce terme anglais, dont la version française n'est guère usitée, recouvre l'ensemble des géologues, géochimistes et géophysiciens qui se retrouvent dans cette quête, où les appellations disciplinaires anciennes ne sont pas de bons outils. Les

rons que séismes et volcans, si bien expliqués par le ballet des plaques tectoniques, ne le sont cependant pas tous et qu'il nous faut reconnaître en surface un autre objet important, le volcan de point chaud, dont le Mauna Loa et le Piton de la Fournaise nous fournissent les plus beaux exemples. Nous tenterons de dresser le catalogue de ces points chauds, et montrerons leurs liens avec la déchirure des grands continents chère à Wegener. Nous verrons ensuite quelles belles images des profondeurs nous donne la nouvelle tomographie sismique. Nous évoquerons les pistes que nous fournissent les expériences en laboratoire, qui permettent de mieux comprendre la structure et la dynamique du manteau terrestre et des plaques sus-jacentes, mais aussi la production d'instabilités, de « panaches », dont l'expression de surface se retrouve aux points chauds. Puis nous reprendrons notre voyage vers les profondeurs pour atteindre le noyau de fer liquide où se fabrique le champ magnétique de la Terre, et enfin dans ce noyau liquide la graine solide au sein de laquelle est caché le centre de la Terre.

Nous donnerons alors un coup de talon sur la graine, au « fond de la piscine », pour remonter avec les panaches et ressortir, tel l'explorateur de Jules Verne, par la bouche du volcan d'un point chaud. Nous verrons comment la naissance des points chauds aboutit à un volcanisme exceptionnel, tel qu'il ne s'en est plus produit sur Terre depuis 15 millions d'années. Nous montrerons comment les exhalaisons venues des tréfonds du globe peuvent affecter notre atmosphère et nos océans, combien plus encore dans le passé géologique, faisant de la vie actuelle sur Terre et de sa diversité un produit de sa dynamique interne. J'en profiterai pour faire le point sur les énormes progrès

spécialistes de toutes ces disciplines et de leurs sous-disciplines forment, ou plutôt doivent former, un ensemble cohérent, partageant une approche (et un langage) toujours plus proche, fondée à part égale sur l'observation de terrain, l'analyse et l'expérience au laboratoire, la théorie et la modélisation, bref une approche quantitative et non plus seulement de naturaliste collectionneur de timbres-poste (qui à tort leur colle encore trop souvent à la peau). On pourra aussi utiliser le terme de « géologue » au sens le plus large, englobant alors les géophysiciens et les géochimistes qui ont tant apporté aux visions modernes de la Terre. Quand, sous l'inspiration de Claude Allègre, nous avons fondé il y a 20 ans une union européenne, ce ne pouvait être que l'union européenne des géosciences. Elle a grandi et prospère sous le nom d'European Geosciences Union.

accomplis dans notre compréhension des relations entre ces colères de la Terre qui se manifestent par un volcanisme géant et les drames de l'évolution que sont les extinctions en masse d'espèces biologiques. Un très récent congrès à San Francisco a vu la reconnaissance par la communauté des sciences de la Terre de la validité d'idées que nous avons émises il y a près d'un quart de siècle : le volcanisme est sans doute bien le principal facteur de la disparition massive des espèces. C'est le temps qu'il aura fallu semble-t-il pour convaincre « à grande échelle ». Si nous ne nous trompons pas, est-ce le temps qui sera nécessaire pour voir reconnus nos plus récents travaux sur le climat ? On peut toujours espérer⁷...

Au seuil de ce voyage, je souhaite me placer sous le double patronage d'Alexis de Tocqueville et de Bernard de Fontenelle. En 1848, le premier écrit à la fin de l'introduction de la *Démocratie en Amérique* : « Je sais que, malgré mes soins, rien ne sera plus facile que de critiquer ce livre, si personne songe jamais à le critiquer. Ceux qui voudront y regarder de près retrouveront, je pense, dans l'ouvrage entier, une pensée mère qui enchaîne, pour ainsi dire, toutes ses parties. Mais la diversité des objets que j'ai eu à traiter est très grande, et celui qui entreprendra d'opposer un fait isolé à l'ensemble des faits que je cite, une idée détachée à l'ensemble des idées, y réussira sans peine. Je voudrais donc qu'on me fît la grâce de me lire dans le même esprit qui a présidé à mon travail, et qu'on jugeât le livre par l'impression générale qu'il laisse, comme je me suis décidé moi-même, non par telle raison, mais par la

7. Avant d'entreprendre notre voyage, il me reste à conseiller au lecteur qui l'aura apprécié de lire un autre *Voyage au centre de la Terre* publié en 2000 par Vincent Deparis et Hilaire Legros. Cet ouvrage remarquable, dense, très complet et très documenté, expose l'histoire des idées qui ont conduit de ce que les auteurs appellent la « géographie antique » à la « géographie moderne ». Si mon propre livre conduit certains à lire cet ouvrage, nettement plus spécialisé, j'en serai heureux. V. Deparis et H. Legros, *Voyage au centre de la Terre. De la géographie antique à la géographie moderne. Une histoire des idées*, Paris, Éditions du CNRS, 2000. J'ai par ailleurs souhaité donner aux lecteurs les plus motivés, sous forme d'annexes, quelques compléments, particulièrement sur les équations et les nombres sans dimension qui sous-tendent notre compréhension de la mécanique des fluides géophysiques que sont le manteau et le noyau terrestres, ainsi qu'un bref aperçu de ce qui se passe sur les autres planètes, la Terre ne constituant bien sûr qu'une expérience parmi d'autres dans le système solaire.

masse des raisons. » Et le second, en 1686, dans ses *Entretiens sur la pluralité des mondes* : « Assurons-nous bien du fait, avant de nous inquiéter de la cause. Il est vrai que cette méthode est bien lente pour la plupart des gens, qui courent naturellement à la cause et passent par-dessus la vérité du fait ; mais enfin, nous éviterons le ridicule d'avoir trouvé la cause de ce qui n'est point⁸. »

8. Cette citation, pleine d'humour et de profondeur, m'a été pour la première fois signalée, il y a bien des années, par mon ami et collègue Pierre-Yves Gillot. On la retrouve récemment dans la biographie de l'abbé Bertholon, publiée par Jean-Paul Poirier chez Hermann (2008). Il en donne une référence, *Histoire des oracles*, Paris, E. Cornély, 1908.

PREMIÈRE PARTIE

Qui contrôle le climat ?

Chapitre premier

DU SOLEIL ET DE MILANKOVIC À LA TECTONIQUE DES PLAQUES

« Ne pouvons-nous compter sur des phénomènes électriques pour nous éclairer, et même sur l'atmosphère, que sa pression peut rendre lumineuse en s'approchant du centre ? »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Le climat est souvent défini par les spécialistes comme la moyenne, sur (au moins) trente ans, des conditions d'une région donnée, reconstituées à partir des enregistrements de la température et des précipitations. C'est plutôt un système qui comprend l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et la biosphère, en interactions permanentes par le biais de processus physiques, chimiques et biologiques. La végétation, l'humidité du sol ou les glaces sont donc des composantes du « système climat » aussi importantes que la température ou les précipitations¹. Bien qu'on les confonde un peu trop souvent, le climat ne se réduit pas au « temps qu'il fait ». Et il ne suffit pas de comparer la température de l'été dernier ou les précipitations du printemps précédent à leurs équivalents des deux ou trois années précédentes pour savoir si « le climat change ». Quand on compare le temps de l'année à ses propres souvenirs de jeunesse, on a tendance à le trouver changé dans le mauvais sens (quel qu'il soit), à regretter ce changement, à souhaiter un retour à un âge d'or censé avoir régné pendant l'enfance. En plus du fait que le climat ne peut être défini sur moins d'une génération, force est de constater que l'histoire nous indique qu'il n'a jamais été stable sur de longues périodes². Nous

1. R. A. Pielke Sr., « A broader view of the role of humans in the climate system », *Physics Today*, 54-55, novembre 2008.

2. Nous utiliserons le terme « période » parfois dans le sens usuel d'intervalle de temps, mais souvent dans le sens utilisé par les physiciens, qui signifie le temps de retour d'une variation « périodique ». La période de rotation de la Terre sur elle-même est d'un jour, celle de sa rotation autour du Soleil d'un an, etc.

savons, avec les travaux d'Emmanuel Le Roy-Ladurie, qu'un petit âge glaciaire a affecté l'Europe du ^{xiv}^e siècle au milieu du ^{xix}^e. Qui n'a vu les photos de l'extension des glaciers des Alpes vers 1850, beaucoup plus importante qu'aujourd'hui ? Ils ne furent pas les seuls affectés : on en connaît des témoignages du nord de l'Amérique à la Nouvelle-Zélande... Ce petit âge glaciaire avait été précédé par quelques siècles plus chauds, connus sous le nom d'« optimum climatique médiéval ». C'est alors que les Vikings ont colonisé un Groenland qui était vraiment vert, comme l'indique le nom qui lui a été donné. Les variations de la température moyenne de la basse atmosphère, qui correspondent à ces périodes climatiques récentes bien distinctes, sont très faibles, de l'ordre du degré Celsius, comparées aux différences que nous constatons d'une heure à l'autre, d'un jour à l'autre, d'une saison à l'autre. Ces différences, dont il faut se rappeler qu'elles correspondent à des moyennes prises sur au moins trois décennies, parlent peu à l'esprit.

Nos civilisations se sont développées de manière accélérée depuis le grand réchauffement qui a suivi la dernière très grande avancée des glaces, c'est-à-dire depuis environ 20 000 ans. Les glaciers arrivaient alors jusqu'à Lyon, où ils ont laissé les moraines de la Croix-Rousse, et recouvraient le lac Léman de plus d'un kilomètre de glace. Quatre âges glaciaires, nommés autrefois « Günz », « Mindel », « Riss » et « Würm », se sont succédé depuis 400 000 ans. Les variations correspondantes de la température moyenne étaient de l'ordre de 10 °C à l'échelle régionale. Encore plus loin de nous, au Crétacé, le climat de la Terre, tel qu'on peut le reconstituer à l'aide des paléobotanistes et des paléontologues, était celui d'une serre chaude. Le Carbonifère, il y a 300 millions d'années, a connu de grandes glaciations, qui recouvrirent alors une bonne partie du continent unique de la Pangée, mais aussi des forêts tropicales humides. Les modifications de la géographie, de la répartition des continents et des océans, de leurs dérives en latitude engendrent des variations régionales de température (que nous appellerons « tectoniques ») de l'ordre de la dizaine de degrés également.

Le système climatique dans son ensemble est « forcé » (pour utiliser un anglicisme assez expressif) par trois causes, trois facteurs principaux, chacun d'eux plus variable qu'on ne le réalise parfois. Le Soleil d'abord, une évidence immédiate pour nous, une étoile qui varie plus qu'on ne le croit, avec des fluctuations allant de la décennie au milliard d'années. On s'est aperçu récemment

que le cycle de onze ans des taches solaires, qui trahit un rythme majeur de convection de la photosphère solaire³, pouvait affecter bien davantage divers phénomènes terrestres qu'on ne le pensait auparavant. Quant au jeune Soleil du premier milliard d'années, il brillait sensiblement plus faiblement qu'aujourd'hui, de 30 % environ. Deuxième « facteur forçant », modulant les effets du Soleil : les changements légers de l'orbite de la Terre dus aux effets perturbateurs des autres planètes, principalement de Jupiter. Ce sont les fameux cycles dont Milutin Milankovic (1879-1958) a proposé la théorie mathématique au début des années 1920. Auparavant, après la découverte des glaciations anciennes par Louis Agassiz (1807-1873), James Croll (1821-1890), Wladimir Köppen (1846-1940) et son gendre Alfred Wegener (1880-1930) avaient, à des titres divers, contribué à associer ces glaciations anciennes aux variations de l'orbite terrestre autour du Soleil. On sait depuis Johannes Kepler (1571-1630) et Isaac Newton (1642-1727) que cette orbite est en première (et excellente) approximation de forme elliptique. À son périhélie (point le plus proche du Soleil), elle est à 153 millions de kilomètres de notre étoile, et à son aphélie à 158 millions de kilomètres. Sous les effets des autres planètes, les paramètres de l'ellipse évoluent, dérivent lentement au cours du temps, et avec eux l'ensoleillement moyen et le climat. L'obliquité de l'axe de rotation (aujourd'hui 23,5°) par rapport au plan de l'orbite varie entre 21,5° et 24,5° avec une périodicité de 41 000 ans (Urbain Leverrier en 1840) : il en résulte une modulation de l'ensoleillement dans les régions polaires. L'excentricité de l'orbite, c'est-à-dire le degré d'élongation de l'ellipse, varie, elle, de 0 à 6 %. Ces variations ont plusieurs périodicités, autour de 400 000 ans et de 100 000 ans. C'est cette dernière qui a dominé les phases de glaciation de Günz, Mindel, Riss et Würm. Il s'agit de la combinaison de quatre périodes proches, entre 95 000 et 131 000 ans, qui « battent » entre elles, comme deux (ou mieux quatre) cordes d'une guitare accordées, mais pas exactement, sur la même note. Enfin, l'axe de rotation est soumis à une lente précession, tout comme

3. Il s'agit de la surface visible du Soleil, située entre la « zone de convection » et la « chromosphère ». C'est une couche d'environ 300 km d'épaisseur, dont la température est de l'ordre de 5 500 °C, animée d'un mouvement de rotation complexe et qui émet la plus grande partie du rayonnement solaire. La chromosphère, située au-dessus et visible seulement lors des éclipses, a environ 10 000 km d'épaisseur ; sa température peut atteindre 500 000 °C.

l'ellipse elle-même : les deux effets se combinent pour donner la précession des équinoxes (connue d'Hipparque, un siècle et demi avant Jésus-Christ), avec une période majeure à 23 000 ans (et une mineure à 19 000). Cette précession produit un changement sensible de la distance entre Terre et Soleil, et donc de l'ensoleillement, à une saison donnée. C'est l'obliquité qui engendre les saisons ; l'excentricité crée une asymétrie entre elles, entre été austral et été boréal. Il se trouve qu'actuellement nous sommes en été boréal (de l'hémisphère Nord) plus loin du Soleil qu'en hiver. En été austral, la Terre est plus proche du Soleil. Le contraste entre l'ensoleillement d'été et d'hiver est plus fort dans l'hémisphère Sud que dans l'hémisphère Nord, bien que le pourcentage plus grand de surface océanique en réduise un peu les effets. Il y a 11 500 ans, vers 9500 av. J.-C., la situation était inverse à cause de la précession. Les effets combinés de toutes ces variations, que l'on sait aujourd'hui très bien calculer, montrent des battements dominés par les périodes de 23 000, 100 000 et 413 000 ans. Jacques Laskar, de l'Observatoire de Paris, a ainsi réussi à reconstituer la position de la Terre jusqu'à près de 30 millions d'années dans le passé. Mais il s'agit d'un système d'équations non linéaires, extrêmement sensibles aux conditions initiales, de telle sorte qu'il est impossible de reculer sans erreur en deçà d'une certaine époque (c'est le fameux « problème à N corps », dont les solutions sont chaotiques pour certaines valeurs des paramètres).

Milankovic avait identifié ces variations et prévu leurs effets climatiques, Jacques Laskar en a soigneusement raffiné le calcul. Le paléoclimatologue danois Willi Dansgaard a le premier montré comment les traces d'isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène⁴ emprisonnées dans les glaces pouvaient permettre de reconstituer les

4. Il existe deux isotopes stables de l'oxygène, ^{16}O et ^{18}O , dans l'eau de mer (H_2O) comme dans la calcite qui y est dissoute (CaCO_3) et qui sert à former les squelettes de certains organismes marins : ^{16}O forme environ 99,8 % du total, ^{18}O le reste, soit 0,2 %. Le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ vaut environ 1/400. Ce rapport varie avec la température : il augmente de 1 pour 1 000 quand la température chute de 4°, parce que l'isotope lourd, le plus rare, « préfère » l'eau froide. Le rapport isotopique des squelettes calcaires d'animaux vivant au fond de la mer (2 à 4 °C) est de 4 pour mille plus élevé que celui d'animaux de surface vivant dans des eaux tropicales à 20 °C. Quand l'eau de mer s'évapore pour former de la vapeur d'eau, puis des nuages, la vapeur s'enrichit en isotope léger. Le rapport isotopique de la glace polaire peut être abaissé de 40 pour mille par rapport à celui des eaux équatoriales d'où les molécules d'eau sont parties. Le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ est donc un « paléo-thermomètre » et aussi un indicateur de la composition isotopique du milieu d'où provient l'oxygène.

climats anciens. Le paléontologue italo-américain Cesare Emiliani avait, quant à lui, établi la nature cyclique des âges glaciaires depuis un demi-million d'années, à partir d'études isotopiques sur des microfossiles provenant de carottes forées au fond des océans. Claude Lorius, Jean Jouzel et leurs collègues russes et français les ont retrouvées dans les archives conservées dans la glace des calottes arctique et antarctique. Dans ces carottes, datées à l'aide des couches successives de neige transformée en glace accumulées chaque année, l'analyse des isotopes de l'oxygène a permis de reconstituer l'évolution de la température, tandis que l'analyse chimique des bulles d'atmosphère emprisonnée dans la glace permettait de retrouver la teneur en gaz carbonique, en méthane, en composés soufrés, etc. On ne peut manquer de citer les contributions essentielles de Nicholas Shackleton (1937-2006) travaillant à Cambridge et Jean-Claude Duplessy à Gif-sur-Yvette à ce long et patient travail de reconstitution des climats anciens à l'aide des méthodes isotopiques appliquées aux archives sédimentaires.

Les variations observées suivent de manière remarquable les courbes de Milankovic (Figure 1-1) : température et teneur en CO_2 varient de conserve, avec une périodicité majeure de 100 000 ans depuis 400 000 ans. Ces découvertes ont déclenché une vague sans

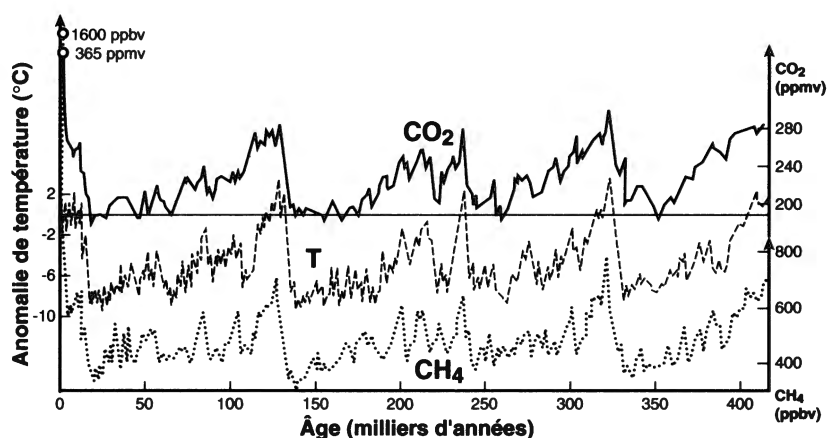


Fig 1-1 : Les variations des teneurs en gaz (carbonique et méthane) et des températures (mesurées grâce aux isotopes de l'oxygène) enregistrées par les bulles emprisonnées dans la glace d'une carotte forée dans l'Antarctique. Ces enregistrements révèlent la succession des « âges » (ou ères) glaciaires d'environ 100 000 ans de durée survenus depuis 400 000 ans. Ces âges correspondent aux cycles d'insolation identifiés par Milutin Milankovic.

précédent d'études des climats du passé, tentant d'exploiter tous les « enregistrements » sédimentaires (ou autres) possibles. De nombreux ouvrages récents y ont été consacrés⁵. Ces cycles sont magnifiquement exposés dans des couches de marno-calcaires près de Punta di Maiata et du cap Rossello, sur la côte sud de la Sicile (Figure 1-2). Dans ces roches, datées de 2,5 à 5,5 millions d'années, se succèdent des dizaines de couples de fines couches sédimentaires, dont les teintes varient de manière cyclique du blanc au rose, en passant par le gris et le marron. Chacun de ces cycles est témoin de 23 000 ans de précession et des changements du climat et de la sédimentation qu'elle induit. Tantôt les apports sédimentaires viennent du nord, d'un climat plus froid et humide, chargés de matière organique, plutôt réduite et donc sombre. Tantôt ils viennent du sud, du Sahara, portés par les vents de climats plus chauds et plus secs. Les particules sont plus oxydées, plus roses. En comptant ces cycles, on peut reconstituer une stratigraphie extraordinairement fine de tous les événements géologiques. C'est ainsi que Cor Langereis et ses collègues ont daté à mieux d'un cycle de précession (c'est-à-dire à quelques milliers d'années près seulement) treize inversions du champ magnétique terrestre⁶.

Tous ces travaux ont confirmé que les cycles de Milankovic avaient exercé un effet essentiel sur les modifications du climat de la Terre depuis quelques dizaines de millions d'années, et que le Soleil est bien l'agent principal des équilibres thermodynamiques dans l'atmosphère (avec les quelque 342 watts par mètre carré dont il en inonde le sommet). L'accord n'est en revanche pas général sur le détail des relations causales entre variations, par exemple, de température et de composition de l'atmosphère. Leur similitude ne permettait pas de préciser quelle variable précédait l'autre. Des études plus récentes⁷, sur la base d'un degré plus fin de résolution stratigraphique, montrent qu'à l'échelle des dernières glaciations ce sont les variations de température qui précèdent, d'un millénaire environ, celles de teneur en CO₂. Ce n'est donc pas le gaz carbonique qui module en premier ressort les variations de la température, mais plutôt le Soleil qui entraîne des variations de température de

5. Voir par exemple Jean-Claude Duplessy et Pierre Morel, *Gros Temps sur la planète*, Paris, Odile Jacob, 2000.

6. Voir chapitre 13.

7. Par exemple Nicolas Caillon, Jeffrey Severinghaus, Jean Jouzel et collègues, *Science*, 299, 1728, 2003.

l'atmosphère, et avec un certain décalage, de l'océan : quand ce dernier est réchauffé, il dégaze du CO_2 (comme une bouteille d'eau gazeuse) ; quand il se refroidit, il dissout une quantité plus grande de gaz et appauvrit l'atmosphère. C'est donc bien le Soleil qui, directement et indirectement, parce qu'il est une étoile variable et que l'orbite de la Terre elle-même est variable, se fait l'agent essentiel des variations climatiques, et notamment des dernières glaciations. La composition chimique de l'atmosphère « suit » – même si la teneur en CO_2 peut à son tour modifier la température par un effet de « contre-réaction », elle n'en est pas l'agent causal initial. Au moins à l'échelle du millier au million d'années. À l'échelle des temps géologiques, c'est-à-dire des dizaines de millions d'années ou plus, la teneur de l'atmosphère en CO_2 semble en revanche bien être l'un des déterminants du climat moyen. N'oublions pas que c'est au CO_2 naturel, qui a considérablement varié à l'échelle des temps géologiques, que nous devons notre température clémente, la présence d'eau liquide et ainsi l'apparition de la vie sur Terre.

À une échelle beaucoup plus brève ont été découverts des événements climatiques brutaux, auxquels sont associés les noms de Heinrich et de Dansgaard-Oeschger. Les événements « DO » sont des fluctuations climatiques rapides qui se produisent à intervalles de 1 500 ans environ au cours de la dernière glaciation. Les événements « H » correspondent à des arrivées soudaines et massives de sédiments d'origine glaciaire dans des eaux océaniques situées à des latitudes plus basses. L'épisode dit du « Dryas jeune » correspond à la dernière brève période froide (d'une durée à peine supérieure à 100 ans) qui s'est produite il y a 12 000 ans, avant le tout dernier réchauffement climatique menant à la période actuelle. L'origine de ces brusques événements froids est débattue, mais elle peut être une indication sur l'aspect chaotique de certaines variations climatiques.

Si l'on s'intéresse aux variations de beaucoup plus long terme, un troisième facteur déterminant se dégage, la tectonique des plaques (et la tectonique de manière plus générale). Un processus interne prendrait le relais d'un processus externe pour contrôler le climat. L'un peut d'ailleurs influencer l'autre, mais les données deviennent de plus en plus incertaines. L'ensemble des indicateurs récoltés par les paléontologues et les géologues (nature des milieux de vie, présence de sel, de charbon, de récifs tropicaux, sols désertiques, mais aussi forme des contours et nature des nervures de

feuilles fossiles, isotopes de l'oxygène dans les fossiles d'habitats divers, etc.) permettent de reconstituer la température de la basse atmosphère au cours du Phanérozoïque, et même avant (Figure 1-3). Les épisodes de glaciation aux pôles (G) ou de terre complètement englacée (S pour « snowball Earth », concept détaillé un peu plus loin) sont indiqués. On constate une alternance très irrégulière de périodes chaudes et froides, les températures moyennes variant de 12 à 22 °C environ. L'échelle exacte des températures n'est pas bien connue, mais le sens des variations est clair. L'ère Tertiaire, depuis 60 millions d'années environ, c'est la « marche vers le froid ». Dans l'hémisphère Nord, à 80° de latitude Nord, crocodiles et palmiers prospèrent il y a 56 millions d'années. Entre 40 et 30 millions d'années s'installent les arbres à feuillage persistant. À partir de 25-20 millions d'années, la forêt boréale, dominée par les sapins, s'étend. Depuis quelques millions d'années, c'est le domaine de la toundra et du permafrost ; l'inlandsis d'Amérique du Nord s'établit il y a 7 millions d'années, celui d'Europe du Nord il y a 2 millions d'années. Dans l'Antarctique, les premières glaces apparaissent vers 40 millions d'années, les derniers bouleaux disparaissent vers 25 millions d'années et la glaciation se généralise depuis 20 millions d'années. La séparation de l'Antarctique successivement de l'Amérique du Sud, de l'Afrique, de l'Inde et enfin de l'Australie entre 160 et 40 millions d'années, a permis d'isoler ce continent, centré sur le pôle Sud, et d'établir autour de lui une puissante circulation océanique qui l'isole en partie de ses voisins de plus basse latitude et qui y a permis l'installation d'une calotte glaciaire imposante et durable.

Une période froide, moins marquée et moins globale, se situe vers 135 millions d'années, vers la limite entre Jurassique et Crétacé. Une autre période de glaciation intense s'est produite entre le Carbonifère et le Permien, de 350 à 280 millions d'années. L'ensemble des continents est alors rassemblé dans la Pangée : la zone des glaces s'étend autour du pôle Sud. Ce sont les sédiments très reconnaissables (des « tillites » ou « diamictites », Figure 1-4) laissés par la fonte des glaces de mer et retrouvés aujourd'hui en Afrique du Sud, en Inde, en Amérique du Sud et en Australie qui fourniront à Wegener l'un de ses plus forts arguments paléoclimatiques en faveur du « continent primordial ».

La précédente période glaciaire se situe à la fin de l'Ordovicien, vers 435 millions d'années. Pour en trouver une plus ancienne, il

faut s'enfoncer dans le temps avant le début de l'ère Primaire, jusqu'à 550 millions d'années. Au cours des 500 derniers millions d'années de l'histoire de la Terre, il n'y a donc eu que trois véritables périodes glaciaires, rares et épisodiques (et deux seulement de longue durée), totalisant moins de 100 millions d'années, soit moins de 20 % du temps. Pendant cette longue période, la Terre aura le plus souvent été une planète chaude, sans glaces, assez différente de celle pendant laquelle s'est développée l'humanité (nous sommes actuellement dans une phase relativement chaude de cette période à dominante froide).

Quels sont, pendant ce temps, les déterminants principaux de ces changements climatiques ? Une hypothèse en est que le rassemblement d'une masse continentale importante au pôle est suffisant pour déclencher une glaciation. Cependant, de 425 à 325 millions d'années, les continents sont bien rassemblés près du pôle et pourtant il n'y a pas de calotte. La condition apparaît donc nécessaire, mais pas suffisante. Certains invoquent le rôle des gaz à effet de serre, principalement du gaz carbonique. L'idée semble en revenir à Jean-Jacques Ebelman, ingénieur des Mines, qui en 1845 interprète les sols du Massif Central français comme le résultat de la neutralisation du gaz carbonique de l'air par les « bases » des roches.

Ce modèle est placé sur des bases plus solides par Robert Berner qui tente, depuis les années 1980, de reconstruire les cycles géologiques du carbone et de reconstituer l'évolution de la teneur en CO_2 de l'atmosphère au cours des temps géologiques (Figure 1-5). Celle-ci n'est hélas connue qu'avec une énorme marge d'incertitude, qui peut atteindre (voire dépasser) un ordre de grandeur (un facteur 10) ! Les périodes des deux grandes glaciations du Carbonifère-Permien et du Néogène correspondent bien à des périodes à faible taux de CO_2 , mais dans quel sens s'exerce le lien ? Pour Berner, c'est le sens traditionnel de l'effet de serre, les faibles températures seraient dues à de faibles taux de CO_2 . Celui-ci est consommé par l'altération et la précipitation qui forme les calcaires. Berner, associé à Lasaga et Garrels, fait jouer un rôle primordial à la vitesse d'expansion des fonds océaniques (hypothèse dite « BLAG »). Quand cette vitesse croît, l'activité volcanique dans les dorsales et les zones de subduction augmente, de même que la quantité de CO_2 dégagé par les volcans. Ce mécanisme comporte une rétroaction négative qui peut en tempérer les conséquences : en effet, un climat plus chaud (dû à l'accroissement de CO_2)

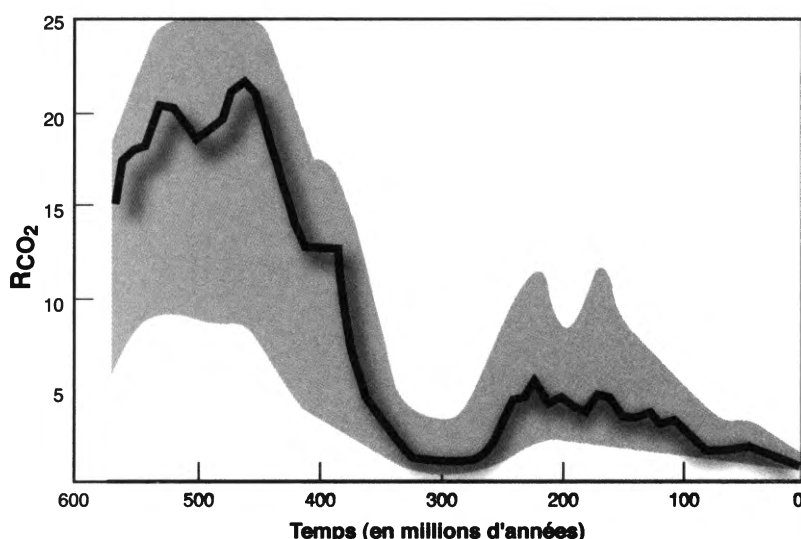


Fig 1-5 : Évolution du rapport entre la teneur de l'atmosphère en CO_2 depuis 600 millions d'années et la teneur actuelle. La marge d'incertitude, sans doute sous-estimée, est indiquée en grisé (d'après R. Berner et coll.).

entraîne un accroissement de la vitesse d'altération, et donc de la consommation de CO_2 , conduisant alors à une limitation du réchauffement. Des analyses anciennes portaient à penser que la vitesse moyenne des plaques avait décliné au Cénozoïque, parallèlement au refroidissement, ce qui était jugé comme un argument clef en faveur de l'hypothèse BLAG. Mais Jean-Pascal Cogné et Éric Humler viennent de reprendre soigneusement la base de données des âges de tous les fonds océaniques du monde pour constater que (au moins depuis 100 millions d'années) la (demi-)vitesse moyenne d'expansion des fonds océaniques est restée constante, ne s'écartant guère de la valeur de 27 millimètres par an.

Un modèle différent, proposé par Chamberlain dès la fin du XIX^e siècle et développé par Maureen Raymo, imagine que la température réagit à son tour (c'est la contre-réaction) sur l'altération des roches et fournit donc un mécanisme de régulation. Ce modèle suggère que le contrôle du climat est bien d'origine tectonique, mais par le biais des collisions continentales et de la surrection des chaînes de montagne. La mise à l'affleurement de roches « fraîches » par des failles qui les ont passablement broyées entraîne une accélération de l'altération et donc de la consommation de CO_2 (la fragmentation mécanique favorise l'altération chi-

mique). La chute de ce dernier entraîne un refroidissement. Dans ce cas, le mécanisme de contre-réaction est positif : le soulèvement dû à la collision accroît l'altération chimique, qui consomme du CO_2 , abaisse la température et augmente l'altération mécanique et la fragmentation par les glaciers, accélérant de plus belle l'altération chimique... Testons l'hypothèse de Raymo : de 325 à 240 millions d'années (glaciation Carbonifère-Permien), il y a bien collision majeure entre les continents qui s'assemblent encore pour finir de structurer la Pangée et la concentration de CO_2 est faible. Pendant la longue période qui s'étend de 240 à 35 millions d'années, il n'y a ni calotte glaciaire ni collision majeure, et la teneur en CO_2 est élevée. Enfin, depuis 35 millions d'années, en pleine collision entre Inde et Eurasie, les calottes ont réapparu et le CO_2 a diminué. La collision de l'Inde et la surrection de l'Himalaya (et du Tibet) seraient-elles les agents (tectoniques) principaux des glaciations récentes ? Si l'on entre plus dans le détail, l'Himalaya se soulève depuis 20 à 30 millions d'années, la concentration de CO_2 dans l'atmosphère est faible depuis 20 millions d'années et le refroidissement est très marqué depuis 10 millions d'années.

On essaie aujourd'hui de préciser ces raisonnements, simples mais essentiels. À l'aide de modèles cinématiques et climatiques globaux, il est possible de replacer les continents dans leur position de l'époque, d'inclure les reliefs, notamment les chaînes de montagnes, tels qu'ils étaient, de régler le niveau des mers et le taux de CO_2 de manière appropriée, et de simuler le climat de la Terre dans ces conditions. Des modèles généraux de la circulation atmosphérique (en anglais AGCM, pour Atmospheric Global Circulation Model) ont été construits par les chercheurs, par exemple au Laboratoire de météorologie dynamique (LMD) de l'Institut Pierre-Simon-Laplace. Un AGCM est un modèle numérique de l'atmosphère : celle-ci est divisée en petits « cubes » (adaptés à la géométrie de la sphère) d'environ 300 km de côté (au niveau du sol), et en 19 couches entre le sol et 40 km d'altitude. Dans ces quelque 130 000 « cellules⁸ », le programme résout l'ensemble des équations qui gouvernent la circulation atmosphérique générale⁹.

8. Exactement $96 \times 72 \times 19$.

9. Conservation de la masse, de la quantité de mouvement, équations de Navier-Stokes (cf. chapitre 8), conservation – ou équations de transformation – des espèces chimiques...

Le degré de détail qu'on peut espérer atteindre est évidemment limité par la taille des cellules. Il est possible de faire varier n'importe quel paramètre du modèle pour tester sa sensibilité à ce paramètre. Comme le remarque Isaac Held¹⁰, il y a toutefois encore un fossé trop large entre simulation numérique et compréhension réelle des problèmes du climat ; certains (comme nous le verrons plus loin) finissent par prendre les résultats de leurs calculs complexes pour la réalité, alors que le retour permanent aux données d'observation et à la réflexion physique est évidemment indispensable...

À l'aide de ces AGCM, le climat de la Pangée il y a 220 à 200 millions d'années a pu être simulé (grossièrement). Les chercheurs ont tenté de reconstituer précipitations, humidité, températures et vents. Les contrastes climatiques qui en résultent apparaissent considérables : une moyenne de 25 °C et plus sur toute la partie continentale de l'hémisphère d'été, et au contraire des températures inférieures à - 25 °C sur une large part de l'hémisphère d'hiver (sauf sur les côtes). L'été aurait été si chaud que le froid de l'hiver n'aurait pas permis à la glace de s'accumuler : donc pas de calottes, conformément aux observations. Ces climats simulés (et la forme de la Pangée) sont en accord raisonnable avec la distribution géographique des grès rouges et des évaporites (sel), très abondants à cette époque, et que les géologues connaissent bien depuis le XIX^e siècle.

Frédéric Fluteau, pendant son doctorat avec Gilles Ramstein et Jean Besse, puis d'autres élèves de Gilles Ramstein, Yves Godderis et Yannick Donnadiou notamment, ont ainsi simulé l'évolution du climat en fonction de la tectonique pour diverses régions et diverses périodes. Ils en ont conclu que le climat de l'Asie centrale au Cénozoïque et la naissance de la mousson étaient étroitement liés aux détails de la collision entre Inde et Asie, et que la persistance d'un bras de mer hérité de l'ancien océan Téthys, au nord du Tibet, aurait été responsable d'une bonne part des structures climatiques qui devaient alors y régner. Remontant à 250 millions d'années, ils ont pu préciser l'altitude ancienne de la chaîne des Appalaches en Amérique, résultant de la collision des continents qui bordaient un proto-Atlantique, l'océan Iapetus. Cette altitude contrôle en partie les précipitations, partant la végétation dans ce

10. I. M. Held, *Bull. American Meteorological Society*, 2005, 1609-1614.

qui est aujourd'hui l'Europe. Ce sont les observations des paléontologues qui permettent ainsi de connaître le relief ancien de la chaîne américaine.

Il ne fait donc guère de doute qu'à l'échelle des dizaines de millions d'années, la distribution des continents, des reliefs et du niveau des mers, tous éléments résultant de la dynamique interne du globe et de la convection du manteau, bref la tectonique des plaques, contrôlent le climat et modulent les effets du Soleil. Cela dit, les cycles de Milankovic doivent toujours exister. On a bien retrouvé des alternances, des périodicités, des laminations dans des sédiments anciens qui doivent les traduire. Le problème est d'en reconnaître la périodicité dominante. C'est possible, si plusieurs périodicités s'expriment et qu'on peut en évaluer le rapport. Il y a là un domaine frontière de la recherche pour la stratigraphie fine des sédiments anciens et la datation relative des processus observés.

Il reste à expliquer des phénomènes climatiques encore plus anciens et plus extrêmes, ces moments où l'on pense que la Terre a peut-être été transformée en une véritable « boule de neige », une planète blanche, la « snowball Earth ». En 1987, mon grand ami Joe Kirschvink donnait à une étudiante de licence du Caltech, Dawn Sumner, un échantillon de roche rougeâtre présentant des niveaux de lamination réguliers et provenant de la formation d'Elatina dans le sud de l'Australie. Cette formation néoproterozoïque, vieille de 780 millions d'années, était bien connue pour ses dépôts typiques d'une origine glaciaire. Et pourtant, des paléomagnéticiens australiens, Brian Embleton et Wyn Williams, lui avaient trouvé une inclinaison magnétique compatible avec une latitude équatoriale¹¹. Une calotte glaciaire à l'équateur ! Cela paraissait impossible à Kirschvink, qui demanda à son étudiante de soumettre l'échantillon à des tests classiques destinés à s'assurer que l'aimantation de la roche était bien primaire et non le résultat d'une réaimantation postérieure, tout à fait plausible dans des roches si anciennes. Au grand étonnement de Kirschvink, les tests s'avérèrent positifs ; ils furent confirmés par plusieurs équipes. La glaciation d'Elatina (aujourd'hui connue sous le nom de « glaciation sturtienne ») s'était bien étendue pendant quelques centaines de milliers à quelques millions d'années jusqu'à l'équateur de l'époque ! Une synthèse des paléolatitudes de dépôt des

11. Nous verrons un peu plus loin comment procèdent les paléomagnéticiens.

roches glaciaires néoprotérozoïques par David Evans confirme que nombre d'entre elles (ce nombre n'est pas si élevé que ça, car les échantillons sont encore plutôt rares) se sont déposées à moins de 10° de l'équateur et aucune à plus de 60°. De manière étonnante, ces couches glaciaires sont entourées par des couches carbonatées témoins de climats beaucoup plus agréables, indiquant un saut soudain entre conditions glaciaires et retour à un climat plus doux. Dès 1949, Douglas Mawson, suivi à la fin des années 1950 par Brian Harland, avait suggéré que les glaciations du Néoprotérozoïque avaient pu être globales. Mais on craignait à cette époque que les échantillons paléomagnétiques indiquant des latitudes faibles ne soient réaimantés. Le test de Sumner et Kirschvink devait être le premier assurant qu'on avait bien affaire à un signal magnétique originel. Pour expliquer cette étrange observation, George William avait invoqué une période de très grande obliquité de l'axe de rotation de la Terre, mais Jacques Laskar et son étudiant Benjamin Levrard ont montré que l'effet stabilisateur de la Lune (en interaction gravitationnelle avec le renflement équatorial de la Terre) interdisait un tel effet. En 1992, Joe Kirschvink proposa que la glaciation résultât d'une disposition particulière des continents aux latitudes faibles et moyennes, une disposition qui ne devait pas se reproduire par la suite. Il aurait eu pour effet un albédo¹² accru en domaine subtropical, là où le rôle des nuages est minimal. D'où une plus grande réflexion de l'énergie incidente du Soleil et un refroidissement de l'atmosphère. Une glaciation aurait pu en résulter, aussitôt amplifiée par la baisse du niveau des mers (exposant encore plus de surface continentale à ces latitudes). Une altération accélérée (comme dans le « monde de Raymo ») aurait consommé du CO₂ et encore abaissé la température. Les calottes glaciaires augmentant de taille, l'albédo de la planète aurait continué à croître et avec lui le refroidissement. Or les spécialistes du climat ont montré que la Terre possède de ce point de vue une instabilité climatique fondamentale, que reproduisent les modèles AGCM. Dès que plus de la moitié de sa surface est couverte de glace, l'effet de contre-réaction de l'albédo ne peut plus être arrêté,

12. L'albédo est le rapport de la quantité de lumière réfléchie par une portion de la surface terrestre à la quantité de lumière reçue par cette surface. Il s'exprime par un nombre compris entre 0 et 1. Pour le système Terre-atmosphère, c'est la fraction d'énergie solaire réfléchie vers l'espace.

les températures chutent dramatiquement, la glace envahit les parties tropicales des océans. La Terre entière en serait alors couverte, la planète bleue remplacée par une planète blanche. Joe Kirschvink pensait que la zone de plus fort ensoleillement, basculant d'un hémisphère à l'autre de chaque côté de l'équateur au gré des saisons, resterait libre de glaces. Mais comment sortir la Terre de cet état, apparemment stable, une fois qu'il se serait produit ? Là encore, Joe Kirschvink propose la solution. La Terre englacée n'arrête pas la tectonique des plaques, son volcanisme accumule du CO_2 dans l'atmosphère. Le cycle de l'eau, donc l'altération, donc les puits de CO_2 , ont été pratiquement supprimés ; ainsi le CO_2 n'est plus consommé... Vient un moment où la teneur en CO_2 est telle qu'une puissante augmentation de l'effet de serre se produit et la fonte des glaces commence. Elle est achevée en quelques millions d'années. Kirschvink faisait même l'hypothèse que la Terre pouvait avoir fluctué de manière instable entre ces deux états, serre (« greenhouse ») et glacière (« ice-house »). Bien que, dans le détail, le débat sur la « snowball Earth » fasse rage depuis quinze ans, les idées de Kirschvink ont pour beaucoup été plutôt confirmées. Paul Hoffman, géologue à Harvard, a parcouru le monde à la recherche des preuves de terrain de l'hypothèse de la « snowball Earth », il en a fait une synthèse acceptée aujourd'hui de manière assez générale¹³. Le modèle explique bien en effet la distribution globale des dépôts glaciaires sur tous les continents, le fait que les glaces se sont étendues jusqu'à l'équateur, le début et la fin brusque des épisodes glaciaires, et la réapparition de formations ferrugineuses (les « Banded Iron Formations » ou BIF) qui avaient disparu depuis plus d'un milliard d'années¹⁴.

Ces épisodes de Terre englacée ne sont connus qu'à deux époques, longues chacune de 100 à 200 millions d'années, au début

13. Voir l'article de revue de Paul Hoffman et Daniel Schrag, « The snowball Earth hypothesis : testing the limits of global change », *Terra Nova*, 14, 129-155, 2002.

14. Les BIF, accumulations de sédiments riches en fer réduit, se forment au début du Protérozoïque dans une atmosphère où l'oxygène n'est pas encore présent. Ils disparaissent il y a 1,85 milliard d'année, quand l'oxygène envahit cette atmosphère, à la suite de la multiplication explosive des algues bleues. Ils réapparaissent avec les épisodes de « snowball Earth » de la fin du Protérozoïque. La formation de BIF nécessite plusieurs conditions : un état d'anoxie océanique (comme lors de la formation des trapps sous-marins ; ici dû à la stagnation des eaux sous la calotte globale de glace) ; un rapport entre teneur en H_2S et Fe(II) faible de façon que ce Fe(II) ne soit pas consommé par la sédimentation de sulfure FeS_2 ; la présence locale d'un oxydant permettant la formation d'un précurseur de la précipitation du fer.

(2,45 à 2,22 milliards d'années) et à la fin (0,73 à 0,58 milliard d'années) de l'ère protérozoïque, sans doute en relation avec des réorganisations particulières des mouvements des plaques. Les événements paroxysmaux de la fin du Néoprotérozoïque sont datés d'environ 780 et 740 (glaciations sturtiennes), 600 (glaciation marinoenne) et 560 (glaciation Varanger) millions d'années (ces âges, et même le nombre des épisodes, font il est vrai encore l'objet de débats entre les spécialistes). Yves Godderis et Yannick Donnadiou (avec toute une équipe dont nous retrouverons par la suite de nombreux membres, Céline Dessert, Bernard Dupré, Frédéric Fluteau, Gilles Ramstein, etc.) ont proposé un lien entre « snowball Earth », réorganisation des plaques, déchirure des continents et éruption de traps, lien qui rend moins mystérieuse l'entrée de la Terre dans un tel état climatique exceptionnel. Voyons la nature de ce lien.

Si presque tout le monde connaît aujourd'hui l'existence d'un continent unique, la Pangée, qui rassemblait, il y a quelques centaines de millions d'années, les fragments continentaux aujourd'hui épars autour du globe, beaucoup pensent qu'il s'agissait là de l'état originel de notre géographie. La Pangée n'est en réalité que le plus récent des super-continentaux qui se sont rassemblés puis désagregés épisodiquement depuis deux milliards d'années au moins. Nous savons que la Terre s'est agglomérée de manière chaotique ; elle a sans doute porté à ses débuts un océan magmatique fondu, puis les premiers noyaux continentaux, d'abord fragiles puis de plus en plus stables et importants, marque de l'écume de la Terre laissée par les subductions. Mais, depuis au moins deux milliards d'années, la situation est assez voisine de celle qui a régné depuis le début du Mésozoïque. La Pangée n'est en fait qu'un moment de cette histoire ; elle résulte elle-même de la collision, de l'agglomération de continents plus anciens qui avaient dérivé au sein d'une précédente génération d'océans. Des fragments continuaient de la rejoindre quand certains commençaient déjà à la quitter. Il n'y a pas eu un moment précis où toutes les masses continentales étaient rassemblées en une seule, de manière rigoureuse. Mais, de 300 à 200 millions d'années, du Carbonifère au Trias, il a bien existé une Pangée qui en regroupait l'essentiel. Un tel état avait déjà prévalu vers 500 millions d'années, un autre encore plus ancien il y a 700 millions d'années. À ces super-continentaux plus anciens, ancêtres de la Pangée, ont été donnés les noms de

« Nuna » et de « Rodinia ». Et à ce cycle de destruction et de reconstitution des super-continents, qui est aussi celui d'ouverture et de fermeture des très grands bassins océaniques, et dont la durée est de l'ordre de 200 à 400 millions d'années, on a donné le nom de « cycle de Wilson ». Il y a 600 millions d'années, le super-continent de Rodinia a commencé de se briser, comme devait le faire la Pangée avec l'ouverture de l'Atlantique central puis de l'océan Indien entre 200 et 180 millions d'années. Un vaste système de rifts a pu s'ouvrir, en position tropicale et équatoriale, précédé par l'émission de grandes étendues de basaltes résultant de l'éruption d'un ou plusieurs points chauds¹⁵. Si la concentration de CO₂ dans l'atmosphère avant les éruptions était suffisamment faible, la quantité de gaz consommé (« pompé ») par l'altération des basaltes en région tropicale a pu être suffisante, comme l'ont proposé Céline Dessert et ses collègues, pour laisser, à l'issue de la phase volcanique, la Terre avec une concentration en CO₂ très inférieure à celle de départ, conduisant à un effet de serre réduit, au point de déclencher une glaciation mondiale. Même si ce scénario est plein de « si », une modélisation numérique montre que, pour des valeurs plausibles des principaux paramètres, une « snowball Earth » aurait en effet pu résulter de cet éclatement de Rodinia. Le volcanisme aurait été responsable à la fois de l'entrée dans la crise et de sa sortie. Très récemment, Dennis Kent et Giovanni Muttoni ont suggéré que les carbonates déposés dans la Téthys, au nord de l'Inde, alors que celle-ci traversait une zone équatoriale de haute productivité, puis la subduction de ces carbonates au début de la collision Inde-Asie auraient relâché des quantités considérables de gaz carbonique dans l'atmosphère. La dérive de l'Inde dans la zone tropicale plus humide et le mécanisme d'altération des basaltes des traps du Deccan (proposé par Dessert) auraient amorcé le refroidissement conduisant à notre période glaciaire.

Nous découvrons pour les traps, et donc pour les panaches du manteau, un rôle potentiel majeur dans l'évolution de l'environnement terrestre et, par conséquent, de la biosphère. Nous y consacrerons l'essentiel de la troisième partie de ce livre. Les organismes procaryotes et eucaryotes (organismes monocellulaires sans et avec noyau) habitaient l'océan mondial (mais pas les continents,

15. Nous reverrons beaucoup plus en détail ces divers acteurs et ces différents processus dans la deuxième partie du livre.

« conquis » seulement au Paléozoïque) bien avant les crises glaciaires du Néoprotérozoïque. Si certains paléontologues ne voient pas trop de difficultés à la survie des procaryotes au cours d'un événement de Terre englacée, les choses sont moins simples pour les eucaryotes¹⁶. Leur diversité chute considérablement à cette période, alors que des phases d'accroissement rapide de la taille, de la complexité morphologique, de la diversité et de l'abondance sont connues après les glaciations sturtienne et marinoenne. C'est ainsi que la mystérieuse faune d'Ediacara apparaît vers 575-555 millions d'années pour envahir l'océan mondial, peu après la fin de la glaciation marinoenne et l'éclatement de Rodinia. Elle annonce l'explosion cambrienne et l'aube du Phanérozoïque. Mais comment les ancêtres eucaryotes de ces faunes ont-ils pu traverser les épisodes de « snowball Earth » ? Divers spécialistes invoquent des chenaux salés au milieu de la banquise de mer, des isolats dans la glace tropicale, des mares fondues de manière saisonnière au sein des glaces de mer, des fentes dues aux effets de marée le long des contacts entre continents et base des inlandsis, et bien sûr les zones de sources chaudes au voisinage des îles volcaniques. Les eaux étaient chargées d'éléments nutritifs produits dans les zones océaniques hydrothermales, peu consommés en raison de la diminution de la « demande », c'est-à-dire de la biomasse. Joe Kirschvink pense qu'au moment où le dioxyde de carbone accumulé par les volcans dans l'atmosphère a permis de sortir de l'état englacé, de manière sans doute assez rapide (voire « catastrophique »), la productivité organique des algues a dû « exploser », l'enfouissement de la matière organique s'accélérer, relâchant ainsi des quantités importantes d'oxygène dans l'atmosphère. Témoins de la fin de ces épisodes, ces chapeaux massifs de carbonates (calcaires et dolomies, nommés « cap-carbonates ») qui recouvrent de manière surprenante les sédiments témoins des périodes glaciaires et marquent la sortie de ces épisodes exceptionnels. Les phases de Terre englacée auraient ainsi été non seulement des « filtres environnementaux », mais aussi de véritables pompes géochimiques, altérant de manière irréversible l'environnement et la biosphère.

La convection du manteau, la tectonique des plaques, l'éruption de traps, toutes ces manifestations tangibles de la dynamique

16. Voir par exemple Hoffman et Schrag, *op. cit.*

interne du globe seraient des facteurs essentiels du contrôle de ces événements climatiques extrêmes. Au cours des derniers 580 millions d'années, la configuration des plaques (tailles, latitudes, région des éruptions de traps et des ouvertures océaniques) et la concentration en CO₂ de l'atmosphère (elle-même en grande partie contrôlée par le volcanisme) n'ont plus jamais retrouvé la géographie et les valeurs conduisant à une Terre englacée. Nous serions entrés dans une « ère chaude », interrompue seulement deux ou trois fois par des glaciations, sans commune mesure avec celles de la « snowball Earth ».

Chapitre 2

DU SOLEIL AU NOYAU

« Peut-être même l'astre du jour n'était-il pas prêt à jouer son rôle éclatant. Les "climats" n'existaient pas encore, et une chaleur torride se répandait à la surface entière du globe, égale à l'équateur et aux pôles. D'où venait-elle ? De l'intérieur du globe. En dépit des théories du professeur Lidenbrock, un feu violent couvait dans les entrailles du sphéroïde. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Si le passé géologique nous révèle autant d'interactions puissantes entre l'intérieur de la Terre et ses enveloppes fluides au sein desquelles s'est développée la vie, pouvons-nous en retrouver d'autres indices plus près de nous ? Comme nous venons de le rappeler, le Soleil est le premier moteur évident du climat. Vient ensuite l'ensemble des systèmes qui le régulent (ou ne le régulent pas – ou plus assez ?), au premier rang desquels l'effet de serre, et, parmi les gaz qui le provoquent, le CO₂. N'oublions cependant pas que le gaz qui domine de façon écrasante est en fait la vapeur d'eau. Concentrons-nous un moment sur les variations du climat, et notamment celles de la température moyenne de la basse atmosphère¹ depuis un peu plus d'un siècle (Figure 2-1). Depuis la fin du « petit âge glaciaire », c'est-à-dire la période 1850-1880, la température a monté, de manière irrégulière, pour atteindre un premier maximum vers les années 1940. L'augmentation de tem-

1. Cette notion semble simple. Elle ne l'est pas. Il faut d'abord définir cette température : dans quelle gamme d'altitudes ? Corrige-t-on les effets de l'altitude ? Où la mesure-t-on ? Dispose-t-on d'assez de stations pour calculer une mesure qui soit significative au niveau global ? Les séries reconstituées, portant sur un siècle ou plus, dont on dispose sont en fait construites de manière un peu différente et reflètent des évolutions qui peuvent différer dans le détail. On ne connaît pas si bien que cela l'évolution de cette température globale depuis cent cinquante ans... Ces interrogations, récentes et dont les réponses ne sont pas encore toutes connues ou acceptées par tous, font l'objet du prochain chapitre.

pérature est de l'ordre de 0,5 °C, les fluctuations autour de la tendance moyenne atteignant presque la même valeur et rendant la tendance malaisée à distinguer, quoique indiscutable. Des années 1940 à la fin des années 1970, la température décroît d'environ 0,2 °C. Elle a repris sa montée depuis, laquelle semble s'accélérer en fin de siècle. L'augmentation par rapport aux années 1970 est d'un demi-degré environ et, depuis le début des années 1980, les valeurs sont supérieures à celles observées depuis un siècle, notamment dans les années 1940. De 1830 à aujourd'hui, la tendance à long terme de l'évolution de la température est donc bien représentée, en première et très grossière approximation (en partie masquée par d'importantes fluctuations traduisant la variabilité naturelle d'une année sur l'autre), par la succession de 4 segments de droite² : pas d'évolution (période de froid maximum) de 1830 à 1900, un réchauffement de 1900 à 1945, un léger refroidissement de 1945 à 1975, un réchauffement depuis. Cette évolution est manifestement irrégulière, elle n'est pas du tout monotone.

La teneur en CO₂ de l'atmosphère est mesurée avec précision depuis la fin des années 1950 au sommet du volcan de Mauna Kea, à Hawaï (Figure 2-2). Elle a crû, avec des fluctuations annuelles, de 320 à 390 parties par million (ppm) en volume sur cinquante ans, soit une variation de plus de 20 % ! On peut reconstituer indirectement cette même concentration sur des périodes

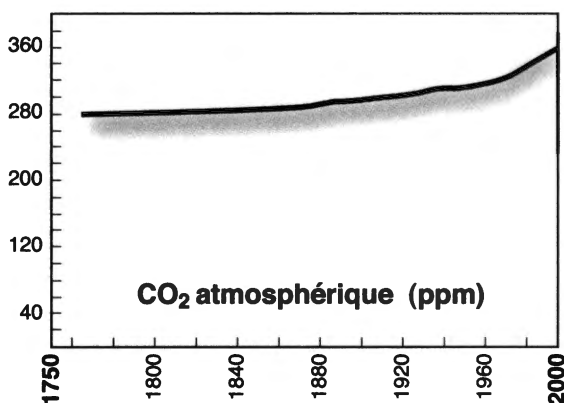


Fig 2-2 : Évolution de la teneur en CO₂ mesurée depuis la période pré-industrielle, exprimée en ppm (parties par million).

2. Il suffit de regarder les figures pour voir que ces dates sont approximatives et données avec une précision moins bonne que la décennie...

plus anciennes. La valeur « pré-industrielle », qui devait prévaloir jusqu'au début du XIX^e siècle, était d'environ 280 ppm. L'augmentation, de près de 40 % en tout, est principalement due à la combustion du carbone fossile qui avait été stocké au cours des temps géologiques dans le charbon, le gaz et le pétrole, et qui nous fournit depuis deux cents ans une bonne partie de notre énergie. L'augmentation d'allure exponentielle de cette concentration, qui décolle au XX^e siècle et notamment dans sa seconde moitié, est un avertisseur que tout un chacun connaît bien désormais. En regard, la courbe des températures est beaucoup moins parlante... et paradoxalement beaucoup moins bien connue. On superpose cependant souvent les deux, et l'on en tire la conclusion que, depuis deux siècles, c'est cette augmentation de la concentration en dioxyde de carbone qui cause l'élévation de température³. Les écarts à la corrélation, notamment le fait que la température décroît entre les années 1940 et 1970, alors que la croissance de la concentration en CO₂ ne cesse de s'accélérer, sont en général considérés comme dus à des fluctuations sans signification importante. Le refroidissement relatif des années 1940 à 1970 est attribué par certains à la pollution résultant de la reprise de l'activité industrielle après la Seconde Guerre mondiale.

Que vaut en réalité cette corrélation et que permet-elle de dire sur l'évolution à venir du climat ? Le Soleil a-t-il un rôle quelconque ? Quel est-il ? Peut-il être négligé ? Ou bien n'est-il qu'un agent permanent, constant dans le temps ? Nous avons commencé à voir au chapitre précédent qu'on pouvait en douter. Nous mesurons désormais l'énergie totale qu'il nous envoie, l'irradiance solaire, dans toutes les gammes de longueur d'onde (et pas seulement dans la partie visible du spectre) à l'aide d'instruments portés par des satellites, et ce depuis 1978. Pour les périodes antérieures, il est possible d'utiliser des mesures réalisées à l'aide de spectro-héliographes ou de s'appuyer sur des mesures magnétiques. Les variations rapides et irrégulières du champ magnétique terrestre, dues à des courants circulant dans l'ionosphère et au-delà dans la magnétosphère⁴, sont en grande partie le reflet des fluctuations de l'activité solaire. Avec Jean-Louis Le Mouél et Volodya Kossobokov,

3. Et des modèles numériques élaborés viennent apparemment étayer cette conclusion.

4. Nous verrons cela plus en détail au chapitre 13.

nous avons évalué les variations à long terme des fluctuations magnétiques dans les quelques observatoires disposant de près d'un siècle d'observations régulières et rapprochées, au moins toutes les heures⁵. L'activité magnétique est évaluée de manière assez simple (mais, pour les spécialistes, « non linéaire ») à partir de l'amplitude des variations des valeurs horaires au cours d'une journée. Cette série de plus de 30 000 points pour chacune des trois composantes est alors filtrée pour faire petit à petit apparaître les fluctuations de période de plus en plus longue. On y distingue nettement les oscillations irrégulières de périodes bien connues, de onze et vingt-deux ans, du Soleil. Mais quand on filtre à leur tour ces variations, on voit apparaître une tendance très caractéristique, faite de quatre segments assez nets (Figure 2-3), qu'on retrouve dans toutes les composantes de tous les observatoires du monde étudiés. Cette « tendance magnétique globale » croît entre 1910 et 1955, décroît entre 1955 et 1968, croît à nouveau

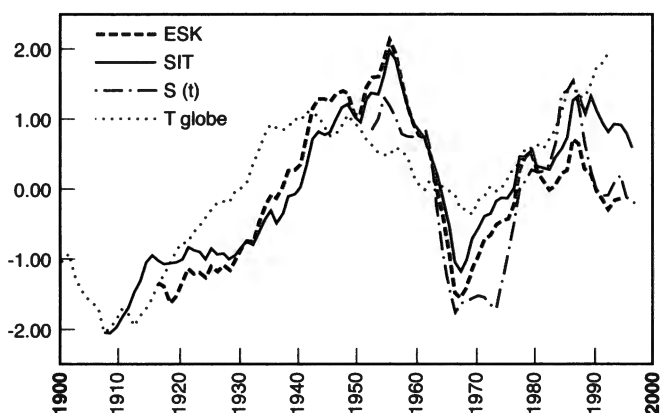


Fig 2-3 : Évolution au cours du xx^e siècle de l'activité magnétique, de l'irradiance solaire et de la température moyenne. Les courbes notées ESK et SIT correspondent aux variations de longue période (supérieure à 11 ans) de l'amplitude journalière du champ magnétique aux observatoires d'Eskdalemuir en Écosse et de Sitka en Alaska. La forme de ces courbes, ascendante jusque vers 1950, descendante jusque vers 1970, ascendante jusque vers 1990 et semble-t-il descendante depuis, est mondiale. Elle suit l'évolution des indices d'activité du Soleil, comme l'irradiance S ou les indices aa (non représentés ici), que l'on prenne les données depuis 1950 ou 1900. Enfin, l'évolution de l'anomalie de température du globe T suit des tendances voisines, qui semblent s'écarter à partir de 1990. Cette figure qui date de 2004, due à J.-L. Le Mouél, V. Kossobokov et l'auteur, a été l'objet de débats. Comme on le verra plus loin, dix années de données supplémentaires la confortent encore.

5. On ne dispose pratiquement d'aucune série utilisable pour cet exercice remontant avant 1900.

jusqu'en 1988 et décroît depuis. Cette tendance est semblable à celle de l'irradiance solaire, comme l'ont noté également Sami Solanki (de l'ETH à Zürich) et Peter Foukal (qui travaille à Helio-physics Inc.). Elle est aussi remarquablement corrélée aux indices magnétiques et au nombre de taches solaires.

Tout le système de courants, si complexe, qui parcourt l'ionosphère et la magnétosphère, dans la très haute atmosphère, au-dessus de 100 km, et qui varie sans cesse, pris en moyenne sur un temps assez long, « respire » ainsi à l'unisson, au gré des variations à long terme de l'activité du Soleil. On ne peut manquer de noter que ces variations rappellent celles de la température, au moins jusqu'aux années 1980. Ainsi, plusieurs auteurs, dont Jean-Louis Le Mouél et moi-même, ont été conduits à suggérer que, jusqu'au milieu des années 1980, le Soleil a pu rester le moteur principal des variations climatiques. Cela permettrait d'expliquer la stabilisation, voire la baisse des températures des années 1940-1950 aux années 1960-1970. Et pour ce qui est de l'augmentation au cours du siècle dernier, la montée du CO₂ n'est pas le seul facteur qui évolue : Usoskin et Solanki ont montré que les derniers soixante ans étaient une période d'activité intense du Soleil, la plus intense des huit derniers millénaires. Plus près de nous (pour la période allant de 1960 à 1998), G. Stanhill a montré qu'à une phase d'assombrissement légère et régulière du Soleil avait assez brusquement succédé vers 1985 une phase plus brillante.

Quelle est donc la part de chaque « facteur forçant⁶ » ? À l'aide d'un petit modèle simple, Scafetta et West ont calculé que les trois quarts du réchauffement observé entre 1900 et 1980 étaient d'origine solaire, tandis que ce chiffre chute à 30 % pour les deux dernières décennies. Nous avons ainsi suggéré en 2005 qu'un réchauffement anormal⁷ était sans doute en train d'apparaître, mais n'était perceptible que depuis les années 1980 (et non avant, comme on l'avait souvent prétendu) et jusqu'en 2000. Depuis le milieu de la décennie 1980, l'activité du Soleil décroît, mais la température de l'atmosphère ne suivrait plus ; elle « décollerait » au

6. Cette expression, qui est celle généralement acceptée et utilisée dans les articles scientifiques en langue anglaise, peut à juste titre apparaître un peu pléonastique...

7. On entend par réchauffement *anormal* la part du réchauffement qui ne peut être attribuée aux variations *naturelles* des « facteurs forçants » comme le Soleil, ou la teneur en gaz à effets de serre, mais à l'injection par l'Homme d'un *supplément* de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

contraire de manière inquiétante... Il faudrait, pour confirmer cette phase récente, accélérée, du réchauffement climatique et y voir un phénomène climatique réel, une moyenne sur trente ans au moins – soit une décennie de mesures supplémentaire. Cette décennie, nous l'avons presque maintenant. Et c'est une décennie de décroissance moyenne de la température globale... Nous y reviendrons au chapitre suivant.

Pour tenter de démêler les effets respectifs du Soleil et de la composition de l'atmosphère sur le climat, nous devons, la plupart du temps, nous contenter de moins de deux siècles (parfois moins d'un) de données d'observation (sauf pour les taches solaires et les températures dans certaines stations météorologiques européennes où nous pouvons remonter un peu plus loin). Il est heureusement possible de reconstituer, approximativement, les variations plus anciennes à l'aide d'indicateurs secondaires ou indirects (appelés dans la littérature scientifique anglo-saxonne, et souvent en français, « proxies »). Pour la température, ce sont les observations de l'avancée et du recul des glaciers, les dates de prise dans les glaces ou de débâcle de certaines rivières, celles des vendanges, de certaines récoltes, voire même les prix des denrées agricoles (fonction des quantités récoltées). Un autre indicateur, qui permet de remonter beaucoup plus loin dans le passé, est la composition isotopique de l'oxygène dans la glace, les fossiles ou les roches⁸. Pour ce qui est de l'irradiance solaire, les variations magnétiques, les observations de taches solaires et, pour les périodes plus anciennes, la teneur en isotopes 10 du béryllium et 14 du carbone tiennent lieu de proxies. Ces isotopes se forment dans la haute atmosphère sous l'effet du rayonnement cosmique solaire et galactique. Quant à la teneur en CO₂ de l'atmosphère, nous avons vu qu'on pouvait la mesurer dans les bulles d'air prisonnières de la glace carottée au Groenland ou dans l'Antarctique (où l'on peut désormais remonter jusqu'à 800 000 ans environ, grâce aux 3 000 mètres atteints par le forage Vostok). La figure 2-4 reconstitue les variations de ces trois quantités au cours des deux derniers millénaires. La corrélation est assez bonne entre variations solaires et température, elle rend bien compte de la succession de l'optimum climatique médiéval (OCM) et du petit âge glaciaire (PAG). Pendant ce temps, le CO₂ a un « électroencéphalogramme

8. Voir chapitre précédent.

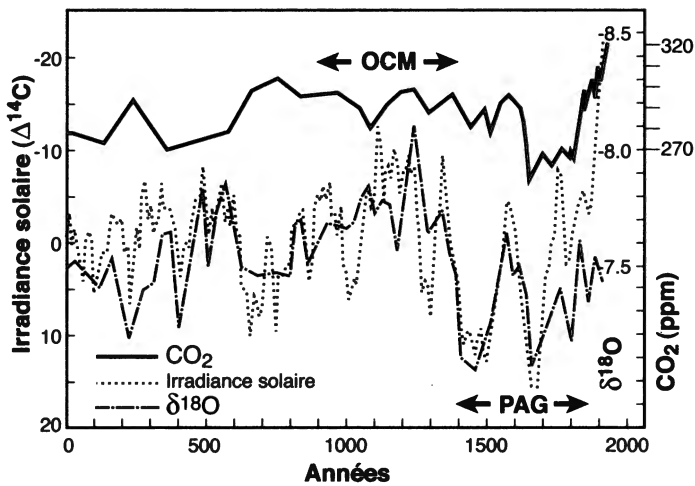


Fig 2-4 : Variations depuis 2 000 ans de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère (échelle de droite en parties par million), de l'irradiance solaire (mesurée à partir du carbone 14 (échelle de gauche) et de la température (estimée à partir des isotopes de l'oxygène, échelle de droite interne au cadre). L'optimum climatique du Moyen Âge (OCM) et le petit âge glaciaire (PAG) sont indiqués (d'après J. Veizer).

plat ». Jan Veizer a analysé ce type de corrélation dans le passé géologique sur des centaines de millions d'années : bien que la confiance qu'on peut accorder aux données indirectes des proxies aille naturellement en diminuant quand on recule dans un passé de plus en plus lointain, Veizer pense qu'à toutes les périodes le Soleil apparaît bien comme le moteur principal des changements climatiques. Le rôle lors de ces très longues périodes des gaz à effet de serre, principalement H_2O mais aussi CO_2 , peut cependant être significatif dans ces modulations à long terme.

Thomas Crowley a récemment évalué à l'aide d'un modèle numérique⁹ les effets respectifs des différents facteurs du changement climatique depuis mille ans. Il a ainsi évalué la réponse de l'atmosphère à trois « facteurs forçants » (Figure 2-5) : l'histoire des éruptions volcaniques déterminée à partir des concentrations anormales en cendres et en acide sulfurique dans les carottes de glace, l'irradiance solaire reconstituée à partir des isotopes ^{10}Be et

9. Un modèle purement radiatif dans lequel les mouvements verticaux et la diffusion sont traités de manière linéaire, dit « Energy Balance Model » ou EBM. Un tel modèle ne peut cependant capturer le couplage dynamique entre atmosphère et océan, et il y manque un certain nombre de rétroactions et le cycle hydrologique...

^{14}C et le CO_2 des bulles dans la glace. Le forçage volcanique est le plus violent, atteignant des pics de 20 watts par mètre carré, mais ces crises sont de très courte durée, en général moins d'un an, et assez vite résorbées. L'amplitude des effets solaires est de l'ordre de $0,25 \text{ W/m}^2$ pour des durées décennales, et peut être supérieure à 1 W/m^2 pour des fréquences plus élevées¹⁰. L'amplitude du forçage dû au CO_2 atteint 2 W/m^2 . Crowley conclut que plus de la moitié de l'amplitude des variations de température observées avant 1850 est d'origine solaire, mais que le volcanisme et le CO_2 sont responsables des variations observées après 1850. On note cependant un écart considérable entre données et prédictions du modèle entre 1850 et 1950 ! Encore une fois, si le rôle du dioxyde de carbone apparaît peut-être après les années 1980, c'est l'irradiance solaire qui pourrait gouverner une bonne partie du climat avant cette date, y compris pendant les trois premiers quarts du xx^{e} siècle (où l'effet du CO_2 n'aurait pas encore émergé du reste du signal de température).

Nous devons donc nous poser la question des mécanismes, des liens physiques susceptibles de relier variabilité solaire et climat. Ils sont au moins au nombre de trois. Tout d'abord, le plus évident : les changements de flux d'énergie thermique en provenance du Soleil modifient la quantité ainsi injectée dans la basse

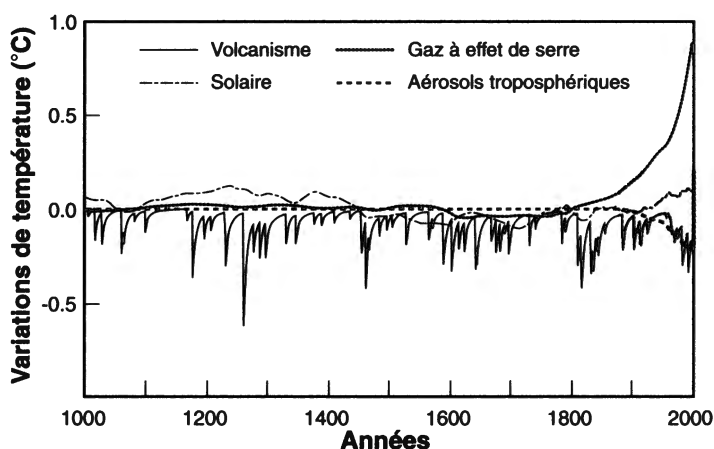


Fig 2-5 : Estimation des contributions de diverses sources aux variations de la température depuis 1 000 ans : part due aux éruptions volcaniques, aux changements de l'activité solaire, aux gaz à effet de serre et aux aérosols atmosphériques (d'après T. Crowley).

10. Voir figure 3-8.

atmosphère. Ensuite, les rayons ultraviolets peuvent modifier la concentration d'ozone et par là chauffer la stratosphère. Enfin viennent les rayons cosmiques galactiques. Il s'agit de particules chargées ou neutres de haute énergie émises par des étoiles, hors du système solaire, ou par le Soleil lui-même. Ces particules peuvent être influencées, et leur flux modulé, par les champs magnétiques du Soleil ou de la Terre. Le rôle de ces rayons cosmiques dans les modifications du climat, longtemps contesté (et encore aujourd'hui de manière générale), fait l'objet de nombreuses études récentes. Ces rayons pourraient contribuer à la formation de la glace dans les cyclones, influencer le régime électrique des orages et surtout modifier la concentration des microparticules qui servent de noyaux de condensation à certains types de nuages (poussières et noyaux de glace). Dans un travail très vivement débattu, Henrik Svensmark et Eigil Friis-Christensen ont été les premiers à remarquer une corrélation entre les variations du flux de rayons cosmiques galactiques et celles de la couverture nuageuse à basse altitude (elle-même influençant très fortement l'albédo de la Terre, donc la quantité d'énergie renvoyée vers l'espace et, par conséquent, la température...). À un flux plus élevé de rayons cosmiques correspondraient des températures plus basses. La modulation du flux d'énergie apporté à l'atmosphère en résultant serait de l'ordre de 1 W/m^2 , donc pas du tout négligeable par rapport au forçage dû à l'apport de CO_2 par l'Homme (environ $1,4 \text{ W/m}^2$). Et l'intensité du rayonnement cosmique a varié beaucoup plus (environ 4 fois) par le passé que durant un cycle solaire... Des progrès dans la compréhension de cette « microphysique » des nuages sont nécessaires pour avancer ; nous sommes là à la frontière de la recherche atmosphérique. Une expérience récente en chambre à bulles vient plutôt renforcer ce modèle, sans encore en apporter une preuve définitive. Mais il reste à comprendre pourquoi les nuages bas sont plus touchés que ceux de haute altitude, et la controverse fait rage. Dans les congrès récents, partisans et adversaires de ces effets échangent des diagrammes contradictoires dont chacun pense qu'il étaye son point de vue...

Le champ magnétique terrestre (d'origine interne) peut-il jouer un rôle dans ces processus ? Il contrôle sans aucun doute la position de l'ovale auroral, cette zone de haute latitude et de haute altitude où se forment les aurores boréales, émissions lumineuses dues à l'interaction des particules chargées d'origine solaire gui-

dées le long des lignes de force du champ magnétique avec l'oxygène de la haute atmosphère (il y a naturellement un ovale dans chaque hémisphère). C'est aussi là que les rayons cosmiques atteignent la troposphère, aux altitudes où ils peuvent influencer la production de nuages. Les ovales auroraux sont grossièrement centrés sur les pôles magnétiques, leur taille dépend de l'intensité de l'activité externe (d'origine solaire) et du champ magnétique terrestre (d'origine interne). Elle suit aussi la « tendance magnétique globale » rencontrée plus haut.

Nous venons de suggérer qu'une partie des changements climatiques des derniers siècles pourrait être modulée par le champ magnétique, d'origine externe. La source primaire en est le Soleil et non pas un phénomène à proprement parler interne à la Terre. Voyons ce qu'il en est quand on recule dans le temps à l'échelle des derniers millénaires.

Avant le ^{xvi}e siècle, nous ne disposons d'aucune mesure magnétique directe. Il nous faut donc faire appel à d'autres formes de mémoire du champ. Nous savons, grâce à Melloni, Folgheraiter et Thellier (que nous retrouverons au chapitre 13), fondateurs de l'archéomagnétisme, que les briques, les poteries et les roches volcaniques sont susceptibles de conserver avec précision et presque indéfiniment cette mémoire. L'archéomagnéticien fournit la mesure magnétique et l'archéologue sa date, aussi exacte que possible. Émile Thellier, son épouse Odette, et nombre de leurs collaborateurs français et étrangers ont ainsi consacré plusieurs décennies, à partir des années 1930 à 1940, à accumuler des mesures de la direction du vecteur magnétique en Europe depuis deux millénaires. Ce travail a été repris et considérablement étendu dans le passé par Yves Gallet et ses collaborateurs et élèves. Un ancien et fidèle de l'équipe Thellier, qui a rejoint notre équipe de l'IPGP, Maxime Le Goff, participe très activement à ce programme. D'autres équipes, en France (Philippe Lanos à Rennes), en Grande-Bretagne (John Shaw), en Bulgarie (Meri Kovacheva), en Arizona (Bob Butler) participent à cet effort mondial. Regardons un instant la version la plus récente de la courbe de variation de la direction du champ magnétique terrestre en Europe obtenue pour les trois derniers millénaires (Figure 2-6). Vue depuis Paris, la déclinaison a varié de 20° Ouest à 30° Est, soit un écart de 50°. L'inclinaison a varié de 55° à près de 75°. Et ces variations ont été très

amples et irrégulières : une vaste boucle de 900 av. J.-C. à 200 ap. J.-C. ; une épingle à cheveux et un trajet rectiligne de 200 à 800 ; un changement de direction et une boucle de 800 à 1400 ; une nouvelle épingle à cheveux et très ample boucle de 1400 à nos jours. On devine comment des allers-retours entre archéologues et paléomagnéticiens permettent d'affiner sans cesse connaissances magnétiques et historiques. Dans son état actuel, la courbe permet de dater un objet archéologique ayant subi une cuisson au moment de sa fabrication ou de son utilisation, parfois à moins de cinquante ans près. Et toute nouvelle découverte archéologique très bien datée va aider à préciser la courbe de variation séculaire.

On remarquera d'emblée qu'existent des ambiguïtés, là où les courbes se recoupent et où le couple déclinaison/inclinaison prend la même valeur pour deux dates différentes. Outre qu'en général l'archéologue a une idée approchée de l'âge de sa fouille et peut exclure l'une des solutions archéomagnétiques proposées, l'archéomagnéticien dispose encore d'une corde à son arc. Le champ magnétique est un vecteur et nous n'en avons pas encore utilisé l'intensité. La mesure de cette dernière est beaucoup plus délicate que celle de la direction et le nombre de données en est longtemps resté faible. La méthode de mesure encore aujourd'hui le plus souvent utilisée est celle qu'ont inventée Émile et Odette Thellier dans les années 1950. On réchauffe en champ nul un échantillon en lui faisant petit à petit perdre son aimantation (thermorémanente) d'origine. Puis on le réaimante lors du refroidissement dans un champ faible d'intensité et de direction parfaitement connues. Quand les circonstances sont favorables (c'est l'art de l'archéomagnéticien que de s'en assurer ou d'en corriger les écarts), le rapport des intensités d'aimantation acquises sous l'effet du champ ambiant dans chaque étape de refroidissement aux intensités perdues lors de la chauffe aux mêmes étapes est égal au rapport des intensités du champ imposé du laboratoire (connu) au champ ancien (inconnu¹¹). Une simple règle de trois donne donc la réponse. La procédure est longue, délicate et fastidieuse. Maxime

11. Thellier avait noté que les vecteurs aimantation acquis dans des intervalles de température ne se recouvrant pas étaient en général additifs. La somme des aimantations acquises dans un certain champ entre T_1 et T_2 d'une part, T_2 et T_3 d'autre part, est égale à l'aimantation acquise directement entre T_1 et T_3 . Cette « loi d'additivité des aimantations thermorémanentes partielles » devait contribuer à conduire Louis Néel à sa théorie du ferromagnétisme et à son prix Nobel de physique.

Le Goff et Yves Gallet viennent de concevoir un appareil très ingénieux, le Triaxe, qui permet des mesures d'archéo-intensité très précises et rapides. La base mondiale de données de paléo-intensité devrait ainsi s'enrichir de manière significative prochainement.

Avec son étudiante Agnès Genevey, aujourd'hui chercheur au laboratoire des Musées de France, Yves Gallet a ainsi pu déterminer des intensités remontant jusqu'au VI^e millénaire av. J.-C., à partir d'échantillons provenant de France et du Proche-Orient¹². Cette courbe est illustrée sur la figure 2-7. Pour ce qui est des deux derniers millénaires, les variations sont loin d'être régulières. À une décroissance de 25 % de l'intensité du champ se superposent des fluctuations importantes, et notamment des maxima assez prononcés et assez étroits en 200, 800, 1400 et 1600. Ceux de 200 et 1400 coïncident avec les deux épingles à cheveux de l'évolution séculaire des directions (avec des inclinaisons plus faibles correspondant à un pôle magnétique plus distant). Celui de 800 correspond au contraire à un changement de direction lors d'un maximum d'inclinaison (pôle proche). Celui de 1600 n'a pas de traduction particulière sur cette courbe. Gallet et ses collègues ont eu l'idée de comparer ces variations magnétiques intenses (surnommées « jerks » archéomagnétiques) à divers indicateurs climatiques, par exemple les avancées et les reculs du glacier d'Aletsch dans les Alpes, reconstituées par Holzhauser. On y retrouve l'expression du petit âge glaciaire et de l'optimum climatique médiéval, mais aussi d'importantes fluctuations de second ordre, de plus courte durée. Les « pics de froid » de 800, 1350-1400 et 1600 correspondent remarquablement aux « jerks archéomagnétiques ». Mais on note en 1100 et en 1850 des avancées sans expression magnétique particulière qui soit encore attestée.

Forts de cette observation, Yves Gallet, Agnès Genevey, Maxime Le Goff et Frédéric Fluteau sont remontés jusque vers - 3000. Ils observent des jerks archéomagnétiques plus anciens, assez bien corrélés à des variations climatiques (extrema de froid ou d'aridité suivant les régions) vers 200, - 800, - 1600, - 2200 et - 2700. Un événement climatique vers 600 aurait également une signature magnétique. Le suivi des modifications climatiques est ici

12. Y. Gallet, A. Genevey et V. Courtillot, « On the possible occurrences of "archeo-magnetic jerks" in the geomagnetic field over the past three millenia », *Earth Planet. Sci. Lett.*, 214, 237-242, 2003.

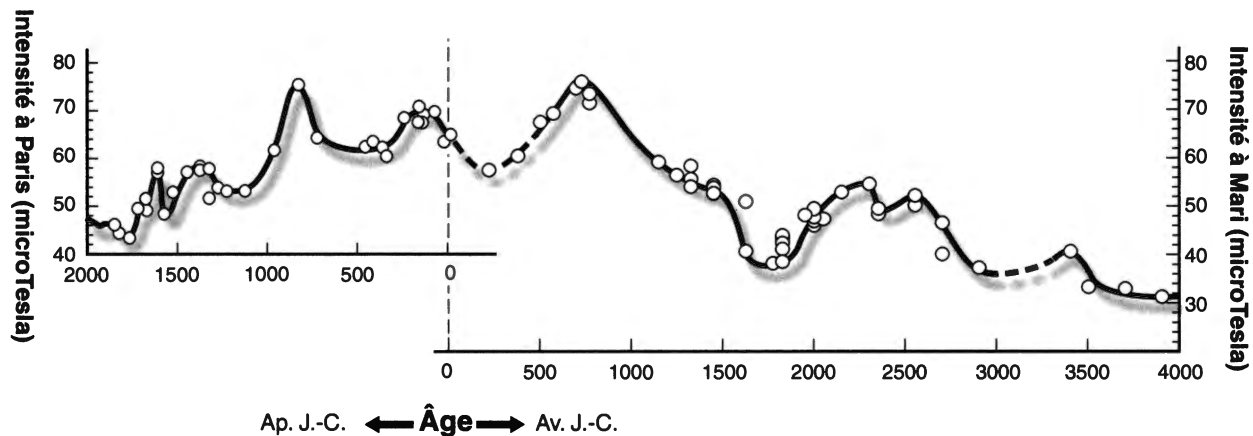


Fig 2-7 : Variations de l'intensité du champ magnétique (en microTesla) depuis 6 000 ans. Pour les deux derniers millénaires, la plupart des mesures viennent de France et sont réduites à Paris. Pour les quatre premiers millénaires, elles viennent plutôt du Moyen-Orient et sont réduites à Mari (d'après Y. Gallet et coll.).

rendu possible, non par les mouvements des glaciers, mais par l'analyse de sédiments apportés par des icebergs et prélevés par carottage dans l'Atlantique Nord. Les principaux événements magnétiques pourraient coïncider avec certaines crises sociétales majeures au Proche-Orient (chute de l'Empire akkadien, transitions entre les empires d'Égypte) et en Amérique centrale (chez les Mayas vers le 1^{er} millénaire ap. J.-C.). Il ne s'agit évidemment pas de dire que c'est le champ magnétique lui-même qui a provoqué ces crises historiques, mais de suggérer que les « jerks » sont peut-être au moins en partie responsables des changements climatiques (froid, sécheresse), eux-mêmes responsables de crises de l'environnement, de récoltes désastreuses, de mouvements de population... Si cette hypothèse, hardie on en conviendra, devait être confirmée par des travaux ultérieurs, elle indiquerait que le champ magnétique interne de la Terre est capable d'effets climatiques régionaux ou globaux qui auraient laissé des traces dans l'histoire de l'humanité. Les « jerks archéomagnétiques » ne peuvent en effet qu'avoir une origine interne, due à la convection dans le noyau. Un nouveau lien climat-noyau¹³ ? Cette piste de recherche mérite d'être approfondie...

Nous avons commencé à rechercher quels mécanismes physiques plausibles pouvaient être à l'origine d'une corrélation si inattendue. Tant que la nature mondiale (ou simplement régionale) et la géométrie des « jerks archéomagnétiques » ne sont pas connues de manière plus précise, il est difficile de s'assurer de leurs sources. Les changements d'intensité magnétique peuvent en effet refléter des changements d'intensité du dipôle (la partie principale, la plus régulière, du champ magnétique terrestre). Mais ils peuvent aussi refléter des changements de son inclinaison sur l'axe de rotation de la Terre (sans que son intensité ne change), ou des changements de ce qu'on appelle des « termes d'ordre supérieur » (quadrupôle ou octupôle, responsable des écarts entre le simple champ d'un barreau aimanté placé au centre de la Terre et le champ réel observé, formé par effet dynamo dans le noyau). Il nous semble que les

13. Voir par exemple Y. Gallet, A. Genevey, et F. Fluteau, « Does Earth's magnetic field secular variation control centennial climate change ? », *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236, 339-347, 2005 ; Y. Gallet, A. Genevey, M. Le Goff, F. Fluteau et A. Eshragi, « Possible impact of the Earth's magnetic field on the history of ancient civilizations », *Earth Planet. Sci. Lett.*, 246, 17-26, 2006 ; V. Courtillot, Y. Gallet, J.-L. Le Mouél, F. Fluteau, A. Genevey, « Are there connections between the Earth's magnetic field and climate ? » *Earth Planet. Sci. Lett.*, 253, 328-339, 2007.

variations observées de l'Europe occidentale au Proche-Orient sont suffisamment vastes pour plaider en faveur d'un phénomène de grande échelle, que viennent appuyer des résultats canadiens récents (mais infirmés par d'autres observateurs).

Si les maxima d'intensité magnétique avaient pour conséquence un effet d'écran maximum sur les rayons cosmiques, la couverture nuageuse basse « ensemencée » par les rayons cosmiques devrait alors être minimale et les températures maximales, à l'opposé de ce qui est observé. En revanche, un basculement anormalement fort de l'axe du dipôle vers les basses latitudes aurait pour effet d'apporter des flux importants de rayons cosmiques dans des régions beaucoup plus humides que les régions polaires, où ils auraient la possibilité de « nucléer » plus intensément des embryons de nuages et, partant, d'accroître l'albédo et d'entraîner un refroidissement. Dans ce cas, le mécanisme « marche dans le bon sens ». Un argument inattendu est proposé pour le jerk archéomagnétique de - 800 par George Siscoe, qui rappelle les visions bibliques (réelles ?) d'Ezechiel : les lumières exceptionnelles observées dans le ciel vers le IX^e siècle avant notre ère à Babylone pourraient avoir été causées par des aurores boréales se produisant à des latitudes anormalement basses¹⁴.

Pour des périodes encore plus anciennes, « géologiques », que nous disent les enregistrements magnétiques et climatiques, principalement issus des carottes forées dans les sédiments des bassins océaniques autour du monde ? Mike Fuller pense pouvoir observer des minima d'intensité au moment des minima d'obliquité de Milankovic au cours des derniers 800 000 ans. Mais Dennis Kent et Julie Carlut ne voient pas trace d'une telle modulation, et ce depuis 5 millions d'années. Julien Carcaillet et une équipe d'Aix dirigée par Nicolas Thouveny et Didier Bourlès observent une corrélation entre variations de l'intensité magnétique et anomalies du rapport des isotopes de l'oxygène dans des foraminifères vivant près du fond : les excursions du champ magnétique (ces inversions avortées, au cours desquelles, après avoir beaucoup faibli et divagué, le champ magnétique terrestre retrouve la même polarité) se produiraient de préférence durant les périodes chaudes, inter-

14. Jean-Paul Poirier me signale l'observation d'une belle aurore boréale le 3 décembre 1777 à Béziers, soit à 1 100 km seulement au nord de Babylone.

glaciaires, ou juste à la transition et à l'entrée dans une nouvelle période glaciaire. Ce lien supplémentaire entre phénomènes provenant du noyau terrestre et changements climatiques est (s'il s'avère bien réel) particulièrement intrigant et encore très discuté. Il faudrait imaginer que les très faibles changements gravitationnels liés à ceux de l'orbite sont suffisants pour induire des instabilités de la convection dans le noyau (voir le chapitre 14). Il y a près de quarante ans, W. Malkus avait proposé que la précession pouvait entretenir un phénomène dynamo. Ce mécanisme avait été abandonné, mais des travaux récents d'Andreas Tilgner semblent confirmer la possibilité d'une dynamo gouvernée par la précession dans des domaines de valeur des paramètres plausibles pour la Terre. Une autre suggestion en est que des calottes glaciaires, croissant sous l'influence des variations orbitales, puissent modifier les moments d'inertie de la planète, suffisamment pour changer les vitesses au noyau et y déclencher des instabilités magnétiques. Ces deux mécanismes restent pour l'instant hypothétiques.

En bref, nous pouvons proposer un schéma simplifié des principaux mécanismes qui agissent sur le climat, avec des effets de rétroaction possibles. L'irradiance solaire, modulée par les variations de l'orbite de la Terre, est le principal facteur d'évolution à long terme du climat. Le champ magnétique du Soleil (qui varie de conserve avec l'irradiance) et le champ magnétique interne de la Terre sont des modulateurs du flux incident de rayons cosmiques et, comme tels, ils pourraient agir sur le climat. Ces rayons cosmiques sont un autre facteur qui a ses propres variations temporelles (indépendantes pour ce qui est des sources extrasolaires). Les gaz à effet de serre sont naturellement un des éléments des équilibres climatiques. La question est de savoir si, et à partir de quand, les modifications de concentration de CO_2 dues à l'Homme deviennent un facteur déterminant du climat. Bien que le rapport « signal sur bruit » soit très faible et que quelques décennies restent sans doute encore nécessaires pour s'en assurer sans hésitation, il semblait au moment où j'ai entamé la rédaction de ce livre que le rôle de l'Homme émergeait au milieu des années 1980. C'est au moment où se perd l'antique connexion entre Soleil et Climat qu'il y aurait lieu de s'inquiéter... Le rôle du noyau terrestre dans ces variations est encore hypothétique à ces courtes échelles de temps, mais il est possible. Dans ces réflexions, la « température moyenne du globe » (en réalité de la basse atmosphère) joue un rôle important. Regardons-y de plus près.

Chapitre 3

QUELLE EST LA TEMPÉRATURE MOYENNE DE LA SURFACE DU GLOBE ?

« En général, un savant en reçoit assez mal un autre. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Alors qu'il présidait l'Académie des sciences, Édouard Brézin a institué une série de conférences destinées à l'ensemble des membres de l'Académie et au grand public pour faire le point sur les sujets scientifiques « chauds » ou tout simplement actuels. Le but de ces « défis du ^{xxi}^e siècle » était de présenter dans un langage clair et accessible à tous des sujets très différents. J'ai eu la chance de présenter dans ce cadre, en janvier 2006, les derniers résultats de notre équipe sur les traps du Deccan, qui font l'objet de la troisième partie de ce livre. Partant des conséquences biologiques et climatiques du volcanisme il y a 65 millions d'années, le débat qui suivit la conférence sauta allègrement au fameux « réchauffement climatique » du ^{xx}^e siècle que nous venions, avec Jean-Louis Le Mouél, d'aborder de manière inattendue par le biais des variations magnétiques, comme je l'ai expliqué au chapitre précédent. J'évoquai nos doutes naissants sur l'apparition dès 1850, et même dès 1950, d'un signal climatique lié au gaz carbonique, et nos idées sur le rôle moteur du Soleil et de ses variations, qui avait peut-être été sous-estimé... Yves Gallet venait de découvrir les jerks archéomagnétiques et de suggérer leurs liens avec de grands changements climatiques survenus au cours des derniers millénaires. Je tentai de répondre à quelques questions sur ces sujets avec des arguments sans doute encore insuffisamment étayés : il s'agissait d'un travail en cours dans un domaine tout à fait nouveau pour ceux d'entre nous qui nous y lançons. Certaines de mes réponses heurtèrent sans doute quelques confrères qui se considéraient, à tort ou à raison, comme dépositaires et défenseurs des sciences climatiques et de la version « autorisée » du

réchauffement climatique : comment un géologue-géophysicien spécialiste de l'intérieur de la Terre pouvait-il prétendre contester les vues acceptées par la plupart des spécialistes du climat ? Ces confrères demandèrent une « contre-conférence » destinée à rétablir « la » (leur) vérité. Ce débat, qui avait le mérite d'être vivant, conduisit l'Académie à organiser un petit colloque sur ces thèmes. L'organisation nous en fut confiée, à mon confrère Bernard Tissot, géochimiste du pétrole et spécialiste des problèmes d'énergie, et à moi-même. Il eut finalement lieu en mars 2007 : une journée de présentations scientifiques entre collègues le 5 mars (destinée à permettre des échanges libres que la présence de journalistes aurait sans doute freinés), et une demi-journée publique le 13. Ces deux journées furent intéressantes, bien que le temps consacré à la discussion ait été de l'avis de tous insuffisant : une présidence trop laxiste avait laissé la plupart des orateurs dépasser largement le temps de parole initialement prévu. Pour certains journalistes présents à la séance publique, ce fut l'occasion de rire de nos prétentions... Ce chapitre m'offre l'occasion d'exposer l'état actuel de nos interrogations et ce que nous pensons commencer à comprendre, sans rester « scientifiquement corrects ». Aborder ce sujet nous a fait toucher du doigt la difficulté de discuter sans passion excessive de « sujets de société ». Évidemment, nos concitoyens (et certains de nos confrères) se sentent moins concernés par l'extinction des espèces il y a 65 millions d'années (qui pourtant a permis à nos ancêtres d'émerger et nous donne peut-être un modèle utile de catastrophes écologiques à venir) que par les changements du climat du siècle qui commence et notre éventuelle capacité à modifier l'état des choses, en bien ou en mal. Il s'agit de réflexions et de travaux en cours, donc par essence inachevés : ils peuvent parfaitement être critiquables et critiqués, à condition de rester dans le domaine rationnel et humainement correct. Ils me paraissent suffisamment importants pour que je tiens à les exposer. Et naturellement, à l'heure où j'écris, je ne pense pas qu'ils soient faux.

Peut-être y a-t-il là une illustration de la différence entre scientifiques qui tiennent « à se limiter aux faits d'observation » et ceux qui imaginent des hypothèses plus générales, quand les observations destinées à les valider (ou à les infirmer) restent à faire. Évoquons ce jugement de Karl Friedrich von Kiemeyer sur son proche et brillant ami et collègue Georges Cuvier : « Aussi favorable que puisse être l'effet de la juste expression ou de la limitation d'une

imagination productive, au cours d'une observation valable ou d'une observation possible, il peut aussi empêcher, au-delà de ce qui est accessible à l'œil, des enrichissements provoqués par analogie ou par l'imagination, qui comme le montrent plusieurs exemples dans l'histoire des sciences, furent confirmés non seulement plus tard par l'observation, mais aussi devinrent des sources fécondes pour la poursuite des découvertes dans le monde des apparitions¹. »

Bien qu'on ne puisse attendre de l'étude de la seule température une description et une compréhension complètes des changements climatiques, leurs mesures et leur évolution séculaire sont un des indicateurs les plus parlants et les plus fréquemment employés. Un modèle plus complet nécessite naturellement la connaissance de la pression, des précipitations, du champ des vents, de la couverture nuageuse... Mais c'est l'évolution de la température que mettent en avant la plupart des articles et des rapports sur le réchauffement climatique, comme par exemple le tout dernier (4^e) *Rapport du groupe de travail n° 1 du Groupe intergouvernemental sur l'étude du climat* (GIEC ; en anglais *Contribution of Working Group 1 to IPCC Fourth Assesment Report*) ou un récent article de revue d'Hervé Le Treut dans *Pour la science* (janvier 2007). Cette courbe, présentée pour le dernier millénaire, est la fameuse « courbe en crosse de hockey », popularisée par Michael Mann et ses collaborateurs sous diverses formes depuis vingt ans (Figure 3-1a). Elle semble se passer de commentaires. Et pourtant, nous allons y revenir. Mais d'abord, livrons quelques réflexions sur la notion de température globale moyenne de la basse atmosphère.

Nous allons bientôt voir plus en détail comment cette courbe est déterminée. Elle vient d'un calcul de moyenne dans le temps et dans l'espace. L'amplitude annuelle des variations journalières de la température dans certaines stations météorologiques dépasse 50°. Celle des variations analysées au compte du réchauffement climatique est en général inférieure au degré Celsius et se mesure en dixièmes de degrés. Extraire l'une à partir des autres n'est pas trivial. La répartition dans le temps des mesures, la répartition dans l'espace des stations, les méthodes de mesure, les corrections appliquées (altitude, températures de l'eau et de l'air supposées

1. Cité par Philippe Taquet dans *Georges Cuvier. Naissance d'un génie*, Paris, Odile Jacob, 2006, p. 152.

égales pour les mesures océaniques, etc.) sont autant de paramètres à prendre en compte pour tenter d'estimer l'incertitude des mesures moyennes finales. Il n'y a que peu de temps qu'une telle analyse a été menée de manière approfondie (en 2006 par Philip Brohan et collaborateurs²). Trois physiciens conduits par C. Essex³ ont fait remarquer que, pour un système hors d'équilibre comme l'atmosphère ou l'océan terrestres, il n'était pas évident de déterminer de manière unique une température moyenne. Ces auteurs rappellent qu'on peut ajouter des volumes et obtenir un volume, mais que la somme de deux températures n'est pas (physiquement) une température et ne peut représenter l'évolution de l'énergie interne du système⁴. C'est donc le cas de la moyenne globale. Ce sont les différences de température et non les températures elles-mêmes qui provoquent la dynamique du système climatique. De plus, celui-ci est en partie chaotique, des changements importants pouvant intervenir sans modification des facteurs qui « forcent » le système. C'est, comme les climatologues le savent bien, une question d'échelle. Les variations de pression et de température sont en général bien corrélées dans des régions de quelques centaines à quelques milliers de kilomètres, si bien qu'on peut raisonnablement définir un climat et une température moyenne pour chacune de ces zones. À la fin des années 1910 et au début des années 1920, Köppen et son gendre Wegener ont proposé de classer les climats en cinq grands ensembles, principalement fondés sur la végétation, évidemment liée à la température et aux précipitations. La question est de savoir si les moyennes gardent un sens à l'échelle du globe entier.

Qui donc effectue ces mesures globales ? Il est un peu étonnant de constater que, si des groupes assez nombreux se préoccupent d'étudier les processus physiques et chimiques qui affectent le climat, ou établissent et utilisent les modèles numériques dont nous avons déjà parlé à plusieurs reprises, le nombre de groupes qui se consacrent au recueil, à la critique et à la synthèse des don-

2. P. Brohan, J. J. Kennedy, I. Harris, S. F. B. Tett, et P. D. Jones, « Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes : A new dataset from 1850 », *J. Geophys. Res.*, 111, D12106, doi : 10.1029/2005JD006548, 2006.

3. C. Essex, R. McKittrick, et B. Andresen, « Does a global temperature exist ? », *J. Non-Equilibrium Thermodynamics*, 32, 1-27, 2007.

4. On parle de quantité (ou variable) extensive pour le volume et de quantités intensives pour la pression et la température.

nées d'observation de la température à l'échelle planétaire est beaucoup plus limité. Deux groupes principaux y travaillent, aux États-Unis et au Royaume-Uni. Celui de Phil Jones au Hadley Research Center en Grande-Bretagne est sans doute le plus cité et celui dont les compilations sont les plus utilisées. Il a rassemblé patiemment trois millions et demi d'observations météorologiques sur les océans et les continents du monde entier de 1850 à nos jours. Les données « de base » sont des températures moyennes mensuelles de zones d'environ 500 km de côté (la Terre est ainsi recouverte de « tuiles » de 5° d'arc de côté). C'est la version de la courbe publiée en 2006 par ce groupe (P. Brohan et collaborateurs) qui figure dans le rapport 2007 du GIEC. Elle est reproduite (lissée sur environ cinq ans) sur la figure 2-1. Il en existe des versions annuelle ou mensuelle, restreintes aux continents ou aux océans... La figure 3-2 représente séparément ces deux dernières. L'incertitude des évaluations pour la courbe terrestre est dans la période récente de 0,15°, et 0,10° pour les données océaniques. Vers 1850, ces incertitudes sont respectivement de 0,40° et 0,15°. Comme la surface des océans occupe les deux tiers du globe et que leur incertitude est plus faible, les températures océaniques dominent la moyenne finale. Il est remarquable à mes yeux que les incertitudes soient aussi petites au XIX^e siècle ! Avant 1890, les mesures en mer étaient effectuées en prenant la température d'un seau d'eau en bois (sous l'hypothèse que la température de l'air immédiatement au-dessus de l'eau était la même que celle de l'eau). En 1890, le seau de bois a été remplacé par un seau de toile, puis après la Première Guerre mondiale la mesure a été faite à partir de l'eau aspirée pour refroidir le moteur. Richard Lindzen, éminent climatologue du MIT, m'a raconté que, dans les années 1980, le professeur Reginald Newell de son université et l'Office météorologique du Royaume-Uni avaient tenté d'intercalibrer les mesures faites avant la Première Guerre mondiale avec des seaux de toile et après avec l'eau de refroidissement des moteurs. Une différence de 0,2 °C aurait été constatée, puis aurait disparu de la version finale de l'article publié. Pour Lindzen, cet événement reste inexpliqué, mais pourrait avoir entraîné une erreur de 0,14 °C dans la tendance séculaire au réchauffement. Pour ce qui est de la couverture globale, le nombre de « tuiles » couvertes avant 1900 est de moins de 15 % du nombre après 1950 et de 5 % après 2000 (où la couverture est totale). Donc, avant 1900, deux

tiers de l'océan mondial sont vides de données d'observation ! Comment l'incertitude peut-elle rester aussi faible ? La seule solution en est une température océanique extraordinairement constante à l'échelle du globe. Phil Jones pense que c'est le cas. Il affirme qu'en utilisant les données acquises après 1950 et en leur appliquant la mauvaise distribution géographique des points de mesure vers 1900, on obtient presque le même résultat. C'est à mes yeux étonnant. À notre demande de pouvoir réexaminer l'ensemble des données pour procéder à une vérification indépendante, Phil Jones nous répond que : « Le but des grilles de température globale et des séries temporelles est de rendre les données aisées à utiliser par les scientifiques », mais que « les données mensuelles des stations ne sont pas disponibles. Elles ont été obtenues en routine à partir du système de télécommunications global entre les services météorologiques nationaux. Elles ont été complétées au fil des ans en utilisant les données reçues des stations autour du monde et des scientifiques travaillant sur le climat. Pour en obtenir beaucoup, le centre a signé des accords avec les stations disant qu'il ne transmettrait pas les données brutes à des tiers⁵ ».

Un autre aspect important, sur lequel nous reviendrons, est le fait que ces courbes globales reposent sur des moyennes mensuelles⁶. Elles ont donc perdu l'information sur les variations de plus haute fréquence, notamment diurnes. Si le système physique du climat est linéaire, ce n'est peut-être pas une limitation sérieuse ; mais s'il est non linéaire, comme la plupart des chercheurs le pensent, cela peut se révéler essentiel. Nous avons donc entrepris, Jean-Louis Le Mouél et moi-même, avec la collaboration de collègues russes spécialisés dans le traitement (non linéaire) du signal et associés à l'Institut de physique du globe depuis des années, Elena Blanter et Mikhail Schnirman, de commencer à reconstruire la base de données en partant de données journalières (minimum,

5. Traduction d'un courrier électronique en anglais de Phil Jones à l'auteur daté de 2007.

6. Le site du Fraser Institute, un groupe de scientifiques qui est en désaccord avec la vision dominante de la nature et de la signification du réchauffement climatique, fait une liste plus exhaustive des sources d'incertitude dans la courbe du Hadley Research Center, parmi lesquelles le fait que dans chaque zone de 5° de côté une moyenne est calculée et ensuite retirée aux données, qui ne sont donc plus des températures, mais des « anomalies de température ». Qu'en est-il de la répartition des valeurs moyennes elles-mêmes ? Sont également cités les ajustements aux données destinés à compenser la répartition inhomogène des sites, le fait que les données de la moitié des stations à Terre au début des années 1990 a été perdue...

moyenne et maximum) des températures, et en recherchant les stations météorologiques où nous pourrions disposer d'au moins cent ans avec le moins de lacunes possible. Nous avons ainsi commencé par l'Europe : 44 stations réparties de la Grande-Bretagne à l'Oural et de la Méditerranée à l'océan Arctique. L'observation de ces belles séries montre une bonne corrélation des variations de période allant de deux à quinze ans entre toutes les stations. Cependant, des différences importantes existent dans le détail. Par exemple, les deux stations de Saint-Petersbourg et d'Archangelsk en Russie sont bien corrélées pour ce qui est des détails (hautes fréquences), mais ont des tendances séculaires opposées : $1,5^{\circ}\text{C}$ de réchauffement pour la première, tandis que la seconde enregistre $0,5^{\circ}\text{C}$ de refroidissement. La moyenne globale pour l'Europe (Figure 3-3) ressemble suffisamment aux enregistrements individuels pour qu'on lui fasse confiance. Cette courbe moyenne montre bien un réchauffement entre le début et la fin du siècle, mais il n'a pas du tout la forme « classique » de la courbe mondiale. Si l'on se limite à la période allant de 1900 à 1987, on constate que la tendance est pratiquement « plate⁷ » : il n'y a aucune indication de réchauffement (ni de refroidissement). En revanche, la courbe effectue un saut en

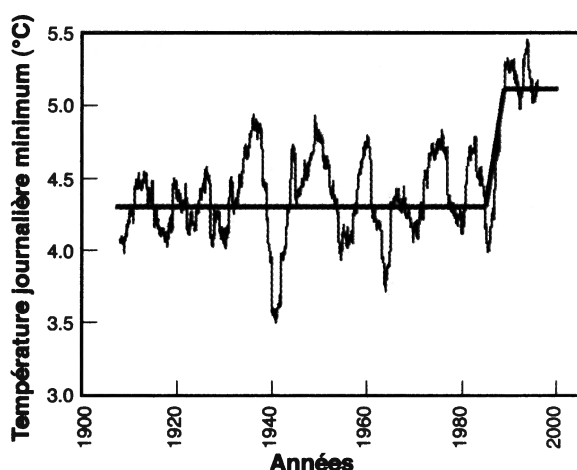


Fig 3-3 : Évolution de la température minimum journalière en Europe au xx^{e} siècle (en degrés Celsius ; moyenne pour 44 stations météorologiques ; fenêtre glissante sur trois ans). Une interprétation possible de la tendance sous-jacente à la forte variabilité observée est indiquée (d'après J.-L. Le Mouél et coll.).

7. En fait une légère hausse jusque vers les années 1940, suivie et compensée par une baisse analogue.

1987, et la tendance est à nouveau plate depuis vingt ans (c'est confirmé par des données plus récentes, non disponibles au moment de la construction de la figure 3-3). Des variations de plus forte amplitude, mais de durée plus courte sont superposées à cette tendance à long terme « en escalier ». On comprend que la plupart des records de température aient été observés au cours des vingt dernières années : les fluctuations de même amplitude avant et après 1987 y sont superposées à un « étiage » plus élevé. Signalons que Lindzen avait déjà remarqué, dans son analyse de la courbe mondiale, qu'il n'y avait aucune tendance depuis 1995 et qu'on assistait en réalité à un changement de régime entre deux périodes plutôt stationnaires. Une autre observation intéressante sur la courbe moyenne est le minimum intense et rapide de 1940, qu'on retrouve dans la plupart des stations européennes. Les caractéristiques de cette courbe européenne sont donc deux événements rapides (pic de froid en 1940, changement de régime en 1987) séparant des périodes sans tendance notable. Ce n'est pas l'image qu'on en donne en général. Notons tout de suite que le CO_2 ne peut rendre compte du pic de froid ni de la brièveté des changements, sauf si un seuil critique a été franchi brutalement vers 1987.

Dans un livre destiné au public francophone, il peut être amusant de regarder plus en détail la courbe française, que propose Météo France sur son site web. Son allure dépend fort de la présentation qui en est donnée : ainsi, Moisselin et Dubuisson, dans *Pour la science* en 2007, prennent la période 1961-1990 comme niveau de référence, coloriant les valeurs négatives en bleu et les valeurs positives en rouge. L'œil voit alors une courbe bruitée mais plutôt plate qui « décolle » brutalement à partir de 1985. La courbe de Météo France utilise comme ligne de base une valeur de 10 °C située en dessous de toutes les moyennes annuelles. La série des données peut alors être interprétée comme croissant régulièrement depuis 1985. Mais elle peut tout aussi bien être interprétée à partir du modèle établi pour l'Europe, c'est-à-dire une marche d'escalier en 1987 et des variations amples autour de tendances « plates » avant et après. Évidemment, si on lisse les données sur cinq ou dix ans, on obtient une courbe qui ressemble à la courbe mondiale du réchauffement climatique, mais qui en réalité masque des informations essentielles. C'est ce que fait le rapport aux décideurs du GIEC dans une figure qui sert de support à la démonstration de la qualité des modèles numériques impliquant le CO_2 . Il est amusant

de noter que les données sur les dates de floraison des poiriers en Anjou reproduisent fidèlement la marche d'escalier de 1987⁸. Par ailleurs, B. Hartmann et G. Wendler⁹ ont récemment montré que les variations de température de 1951 à 2001 dans 17 stations d'Alaska avaient préalablement été mal interprétées : le calcul d'une tendance sur cinquante ans montre un léger réchauffement, mais dans le détail les données montrent deux périodes de refroidissement lent, séparées par un saut positif bref en 1976, qui rappelle le saut européen de 1987, bien qu'il le précède d'une décennie.

Quel est donc le mécanisme capable de déclencher des changements à l'échelle de l'Europe (et de l'Alaska) aussi rapides ? Et ces changements se retrouvent-ils à l'échelle de toute la planète ? Afin de tenter de répondre à la première question, nous avons fait subir aux données un traitement un peu particulier, destiné à révéler les variations à long terme de l'amplitude des variations de haute fréquence (en gros leur lente modulation). En effet, si le système est non linéaire, des cascades d'énergie peuvent se produire des hautes vers les basses fréquences. Mais cette opération numérique est assez délicate. Elle permet de déterminer à partir des données de température un indicateur que nous nommons « durée de vie ». C'est un peu la durée pendant laquelle la série temporelle se ressemble, ou si l'on préfère une image plus parlante, la persistance temporelle, la durée pendant laquelle la « météo » peut être prédite. C'est aussi la durée moyenne des séquences ininterrompues de types de circulation atmosphérique de grande échelle. On sait que cette durée à l'échelle régionale est en général de quelques jours seulement, à cause justement de la nature chaotique du système atmosphérique. La méthode permet de calculer la durée de vie de la température dans chaque station, la moyenne pour chaque pays, puis la moyenne pour l'Europe (Figure 3-4). Le résultat est remarquable. Si l'on compare la courbe résultante avec n'importe quel indicateur de l'activité du Soleil, par exemple le nombre de taches solaires (mesuré depuis l'époque de Galilée), la correspondance est étonnante. À chaque maximum des taches solaires de 1905 à 1960 correspond très précisément un étroit maximum de la durée de vie de la température européenne. Puis

8. In B. Seguin, *Pour la science*, dossier 54, 52-55, 2007.

9. B. Hartmann et G. Wendler, « The significance of the 1976 Pacific climate shift in the climatology of Alaska », *J. Climate*, 18, 4824-4839, 2005.

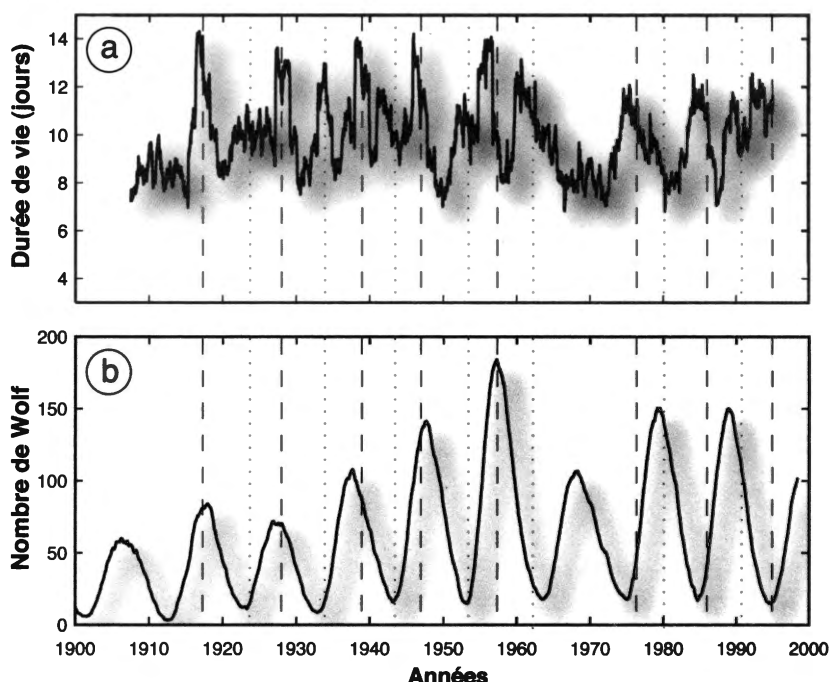


Fig 3-4 : Évolution de la « durée de vie » de la température moyenne journalière en Europe (voir figure 3-3) (en haut) et du nombre de taches solaires (ou nombre de Wolf) en bas. Les extrema se correspondent de manière remarquable, avec une observation étonnante : avant 1970 les maxima des taches solaires correspondent (un pour un) aux maxima de la durée de vie ; après 1970 cette relation s'inverse et ce sont les minima solaires qui correspondent aux maxima de la durée de vie de la température les plus marqués. La raison de cette inversion doit-elle être recherchée dans le Soleil ou dans l'atmosphère ? (pour la courbe des durées de vie, fenêtre glissante sur trois ans ; d'après J.-L. Le Mouél et coll.).

cette corrélation est perdue pendant dix ans, et elle ré-émerge avec un changement important : de 1970 à 2000, les maxima de la courbe de durée de vie correspondent aux minima du nombre de taches solaires. Nous ne comprenons pas encore les raisons de cette corrélation ni celles de son changement drastique dans les années 1960-1970, mais cette observation a au moins deux conséquences immédiates : 1) le fait que les variations d'activité du Soleil pilotent en partie les variations de l'amplitude et de la durée de vie de la température de la basse atmosphère (au moins en Europe et pour la période considérée) est établi ; 2) un changement majeur se produit entre 1960 et 1970 soit dans le fonctionnement du Soleil lui-même, soit dans la réponse du système atmosphérique à ces variations. Cet échange entre minima et maxima,

qui correspond à un « déphasage de 180° », rappelle les changements d'état d'un système non linéaire, chaotique.

On peut maintenant lisser les courbes de durée de vie de la température en Europe, par exemple sur vingt-deux ans, pour se débarrasser de l'effet des cycles bien connus de onze et vingt-deux ans du Soleil. Ce lissage fait apparaître dans les courbes de toutes les stations, et donc dans la moyenne européenne (Figure 3-5), une courbe qui monte de 1910 à 1945 (avec un maximum assez plat), descend jusqu'à un minimum marqué vers 1975, remonte jusque vers 1985 et descend depuis. La même analyse appliquée à n'importe quel indicateur solaire ou magnétique global donne le même résultat. Et nous retrouvons la « tendance magnétique globale » introduite au chapitre précédent. De nombreux autres indicateurs révèlent la même allure générale, de l'intensité de la raie spectrale de six mois dans les observatoires magnétiques au contenu énergétique du spectre de températures, en passant par la pression : toujours la même courbe en S, avec certes des fluctuations, mais une signature étonnamment ubiquiste qui rappelle les liens entre Soleil et température globale que nous esquissions plus haut.

Disons brièvement, et pour être exhaustifs, que nous avons repris la même analyse pour les mesures de pression (une autre variable météorologique essentielle) dans les stations européennes. Nous retrouvons à l'échelle du continent des variations corrélées d'une station à l'autre et à l'échelle de l'Europe, d'allure aléatoire et de durée comprise entre deux et quinze ans, qui rappellent énormément les variations de température (mais sans leur être corrélées). Il n'y a cependant aucune tendance séculaire dans la pression, pas d'extremum comme celui de la température en 1940, pas de saut de niveau de référence comme en 1987. Les durées de vie de la pression ont les mêmes caractéristiques que celles de la température et les variations à long terme révèlent une fois de plus la désormais fameuse courbe en S, confirmant que les variations des deux variables thermodynamiques que sont température et pression sont influencées par le Soleil, au moins pour ce qui concerne les variations à court et long terme de leurs hautes fréquences.

Il nous resterait à poursuivre ces analyses en complétant notre tour du monde, d'abord des stations continentales, ensuite des stations marines. *A priori*, le système climatique pourrait répondre de manière très hétérogène dans les différentes zones climatiques. Nous

avons abouti pour ce qui est des États-Unis (et nous avons obtenu des premiers résultats pour l'Australie). Six zones climatiques distinctes à l'intérieur desquelles les données des stations météorologiques individuelles sont bien corrélées peuvent être distinguées. Pour chacune, zone Nord-Atlantique, côte Atlantique, sud-est des États-Unis, zone des Grands Lacs, ouest et nord-ouest des États-Unis, nous avons obtenu des courbes moyennes. Les variations de courte période (deux à quinze ans) se ressemblent, mais les tendances séculaires diffèrent. Dans tous les cas, ces tendances peuvent être assez bien approchées par une succession de trois ou quatre segments de droite. Seule la Californie et l'ouest des États-Unis donnent une courbe monotone croissante qui accélère, comme la courbe mondiale des divers rapports. Les Grands Lacs et la partie centre-nord des États-Unis se réchauffent jusqu'en 1935, puis refroidissent jusqu'en 1970 et se réchauffent depuis ; les températures actuelles y rejoignent, sans les dépasser, les températures observées dans les années 1930. La zone Nord-Atlantique montre les mêmes tendances, avec un refroidissement plus rapide et plus marqué entre 1950 et 1965 ; les températures actuelles y rejoignent, sans les dépasser, les températures observées dans les années 1950. En revanche, le réchauffement récent est interrompu par un plateau (semblable à celui de l'Europe) à partir de 1980 sur la côte Atlantique (centre) et 1990 en Floride. Dans ces deux zones, les températures étaient plus élevées plus tôt dans le siècle qu'aujourd'hui : les décennies récentes ne semblent pas connaître des extrema de température ou même des températures inconnues au xx^e siècle : parmi les régions que nous avons étudiées, seules la Californie et l'Europe ont à la fin du siècle des températures sensiblement plus hautes qu'au début. La moyenne de 150 stations nord-américaines (Figure 3-6) est très différente de celle de l'Europe occidentale ; elle montre un réchauffement de près de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ des années 1910 à 1930, un refroidissement de même amplitude jusqu'aux années 1970, enfin un réchauffement jusqu'à l'actuel, qui fait retrouver les hautes valeurs des années 1930. Pour ce qui est des durées de vie, leur comportement en Amérique du Nord est très semblable à l'Europe et confirme l'importance du rôle du Soleil. Et la « courbe en S », elle, se retrouve partout, parfois déformée, y compris dans nos premiers résultats pour l'Australie. Sa validité globale semble donc de plus en plus probable.

Si les variations de plus courte période des durées de vie des températures semblent assez bien corrélées, les tendances des

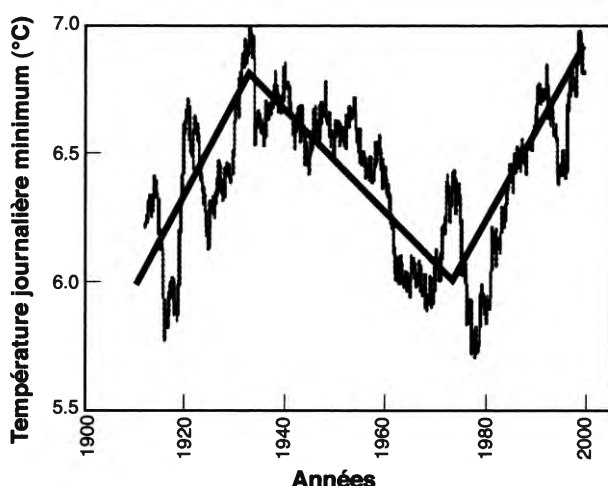


Fig 3-6 : Évolution de la température minimum journalière en Amérique du Nord au xx^e siècle (en degrés Celsius ; moyenne pour 153 stations météorologiques aux États-Unis ; fenêtre glissante sur 3 ans). Une interprétation possible de la tendance sous-jacente à la forte variabilité observée est indiquée (d'après J.-L. Le Mouél et coll.).

températures elles-mêmes sont si différentes qu'il semble difficile d'en établir la moyenne. Que signifierait cette dernière ? Et quel poids donner à chaque série dans la moyenne (nombre de stations, surface couverte, etc.) ? L'hémisphère Nord est beaucoup mieux connu que le Sud, où nous n'avons encore que très peu de longues séries. Notons que la tendance est plate depuis 1960 pour les stations de la zone du pôle Sud et que tous les océans semblent révéler une période plus chaude au début des années 1940. La question de la valeur des données océaniques et de la confiance qu'on peut leur accorder avant la Première Guerre mondiale reste en suspens. Une synthèse plus récente des températures de la basse troposphère (entre 0 et 8 000 mètres), mesurées par deux satellites, indique une décroissance régulière de la température depuis janvier 2002 jusqu'en juin 2008. L'accélération qui se dessinait à partir des années 1980 ne se retrouve pas ces six dernières années. La tendance se rapproche encore plus de celle établie pour le Soleil... Un retour aux données du Hadley Research Center au moment d'achever l'écriture de ce livre¹⁰ s'avère intéressant (Figure 3-7). La courbe du précédent rapport s'arrêtait vers 2000. Le réchauffement depuis

10. Visite du site le 10 janvier 2009 à l'adresse <http://metoffice.gov.uk/climate-change/science/monitoring/hadcrut3.html>

1970 y paraissait une évidence (comme d'ailleurs le refroidissement des années 1940 aux années 1970). Mais depuis 1998 (année d'un événement El Nino), la valeur maximale atteinte n'a à aucun moment été retrouvée, et la tendance sur la dernière décennie est clairement celle d'un refroidissement, dont on ne sait évidemment pas combien de temps il durera. Même si le réchauffement reprenait bientôt, les projections des derniers modèles du GIEC sont déjà mises en défaut et doivent être révisées. Dans une conférence récente, Jean Jouzel, l'un des leaders français du rapport du GIEC, reconnaissait que les dernières données commençaient à leur poser de sérieux problèmes. Et dans un article du mois d'août 2008 dans *Le Monde*, Stéphane Foucart, qui avait contribué huit mois plus tôt à jeter l'opprobre sur nos travaux, évoquait un retour des hypothèses sur l'influence du Soleil, au moins pour quelques années, en omettant naturellement de nous citer.

Pourquoi le Soleil est-il de manière si fréquente contesté par certains spécialistes comme cause significative des variations climatiques ? Hervé Le Treut me dit qu'une grande partie des climatologues pensaient avoir combattu avec succès des propositions jugées erronées sur l'influence du Soleil dans les années 1980 et ne voient ressortir cette hypothèse qu'avec la plus grande méfiance, pour utiliser un euphémisme. Nous faisons face en effet, pour publier nos résultats dans les revues scientifiques internationales, à des difficultés que nous n'avions jamais rencontrées auparavant. Certes, la plupart des travaux qui nous ont valu un peu de reconnaissance internationale (secousses magnétiques dans la variation séculaire, propagation des déchirures continentales, volcanisme et extinction des dinosaures) ont été critiqués et combattus avant d'être, au bout de quelques années, assez généralement acceptés... Mais jamais un tel front du refus ne s'était jusqu'à présent constitué. Trois critiques principales sont opposées à ceux de nos articles qui, depuis parfois plus d'un an, attendent la publication¹¹. La première est simple (et sans

11. Nous avons heureusement quand même réussi quelques fois à franchir cette étape, par exemple avec les articles de J.-L. Le Mouél, V. Courtillot, E. Blanter et M. Shnirman, « Evidence for a solar signature in 20th Century temperature data from the USA and Europe », *Comptes rendus geosciences*, v. 340, p. 421-430, 2008, et J.-L. Le Mouél, E. Blanter, M. Shnirman et V. Courtillot, « Evidence for solar forcing in variability of temperatures and pressures in Europe », *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, doi : 10.1016/J. Jastp. 2009.05.006, 2009, qui exposent plus en détail une partie des observations résumées ci-dessus.

appel ?) : nous contredisons les conclusions du dernier rapport du GIEC, donc c'est faux... La deuxième, reconnaissant l'intérêt de nos observations, nous refuse le droit de publier tant que nous n'avons pas trouvé un mécanisme physique viable. La troisième nous demande si nos résultats ne peuvent pas être des artefacts de nos méthodes de calcul. Ces critiques, qui n'auraient pas été faites par des géophysiciens internes, reflètent sans doute de vraies différences culturelles entre communautés scientifiques. Comme telles, elles sont certainement source de réflexions utiles. La première critique est un pur argument d'autorité, comme tel irrecevable et qui ne devrait pas appeler de réponse... À la deuxième, nous répondons que notre découverte en 1978 des secousses magnétiques (« jerks »), refusée d'abord pendant quelques années et désormais reconnue comme une avancée observationnelle importante concernant la variation séculaire du champ magnétique terrestre, n'a toujours pas reçu, trente ans après, d'explication complètement satisfaisante dans le cadre de la théorie dynamo. Et qui dit que celui qui en trouvera le mécanisme sera celui qui en a fait la première observation ? Ce serait bien immodeste. Nous ne pensons pas être les mieux placés pour décortiquer le mécanisme physique responsable de nos corrélations entre climat et Soleil. Pour ce qui est de la troisième critique, la réponse complète est un peu technique, mais comment penser qu'une corrélation exacte sur un siècle avec une dizaine de maximums solaires, qui plus est inégalement répartis dans le temps (Figure 3-4), puisse résulter d'un accident de filtrage numérique ? C'est quasiment impossible. Une autre critique, peut-être la plus inquiétante, est qu'on semble faire moins confiance au message de données, certes entachées d'incertitudes, qu'à tous les modèles informatiques qui vont dans le même sens et prédisent un réchauffement climatique intense et assez régulier pour le siècle qui vient. Je pense à la réflexion de T. H. Huxley, datant de 1869, à propos des critiques acerbes de Lord Kelvin sur les estimations de l'âge de la Terre proposées par Darwin, qui peut aisément être transposée de certains excès en mathématiques et en physique théorique à l'informatique : « Cela semble être l'un de ces plusieurs cas où l'on permet à la précision admise des processus mathématiques de jeter une apparence d'autorité tout à fait inadmissible sur les résultats obtenus avec ces processus. On peut comparer les mathématiques à un moulin très bien fabriqué, qui

broie des matières selon les besoins ; toutefois ce qui en sort dépend de ce qui y entre, et le plus beau moulin du monde ne pourra obtenir de la farine de blé à partir de cosses de pois ; de même, les pages de formules ne peuvent produire un résultat clair si les données sont imprécises¹². » On peut en outre douter que le moulin soit suffisamment bien fabriqué...

Tentons une synthèse des idées sur les mécanismes envisageables pour les relations entre variations solaires et climatiques. Il semble que le doute de nombreux climatologues soit basé sur la mesure des variations de l'irradiance solaire qu'ont permise depuis trente ans environ des satellites d'observation nouveaux. Ces variations sont illustrées sur la figure 3-8. Trois cycles solaires de onze ans sont désormais connus. L'irradiance moyenne vaut environ $1\,366\text{ W/m}^2$. C'est la puissance totale reçue à la distance de la Terre, dans un plan perpendiculaire à la ligne Soleil-Terre. Le Soleil « voit » la Terre en section droite, dont la surface est πR^2 (R étant le rayon terrestre de $6\,371\text{ km}$), mais l'énergie est répartie en 24 heures sur toute la surface de la Terre, soit $4\pi R^2$. On retrouve le flux moyen de 342 W/m^2 environ au haut de l'atmosphère. Entre deux cycles solaires (on calcule la différence entre les trois minima actuellement observés, relativement stables, séparés de onze ans), la variation est de moins de $0,1\text{ W/m}^2$, soit $0,02\text{ W/m}^2$ en onze ans en flux efficace au niveau terrestre ; une étude comparative récente de trois des principaux ensembles de données désormais disponibles sur trente ans montre des tendances à long terme faibles et dont le signe n'est même pas avéré : négatif dans un cas, positif dans les deux autres ! Ces chiffres paraissent ridicules au regard des $1,4\text{ W/m}^2$ attribués par le GIEC au CO_2 relâché dans l'atmosphère depuis le début de la révolution industrielle. Mais si jamais le mécanisme n'est pas linéaire, il nous faut une fois de plus regarder l'amplitude des plus hautes fréquences : 1 W/m^2 pour l'amplitude des fluctuations sur onze ans, près de 3 W/m^2 pour des périodes plus courtes. En divisant ces chiffres par 4, on obtient $0,2$ à $0,7\text{ W/m}^2$ pour les variations de plus haute fréquence (dont le magnétisme nous a révélé l'importance). Ce chiffre n'est plus si ridicule au regard du CO_2 , même si d'autres facteurs (« forçants ») que le Soleil doivent également sans doute être pris en compte.

12. Cité par Deparis et Legros, *op. cit.*, p. 328.

Nicola Scafetta et Bruce West¹³ viennent d'établir que les variations faibles du Soleil avaient un effet significatif sur le climat et qu'un mécanisme physique (encore inconnu) devait être à l'œuvre, bien qu'absent des modèles actuels. Ces deux chercheurs estiment à plus de 50 % la contribution au réchauffement observé depuis 1900. De plus, les physiciens du Soleil notent que la part ultraviolette (UV) de l'irradiance solaire varie au cours d'un cycle de 10 % (et non 0,1 % comme l'irradiance totale), et la part des ultraviolets extrêmes (EUV) de 100 % ! Il faut ajouter à cela le rayonnement corpusculaire. Comment négliger *a priori* de telles variations de l'activité solaire et du vent solaire qu'il nous envoie en permanence ? La communauté des physiciens du Soleil travaille actuellement de manière très active à la mise au point de modèles permettant de mieux comprendre les « jeux » des champs magnétiques dans les zones radiatives et convectives de notre astre, de manière à mieux saisir comment sont produits les cycles solaires les plus longs et les grands extrema de l'activité solaire.

Par ailleurs, un changement de 1 % dans la couverture nuageuse (ces changements sont encore mal connus à l'échelle globale, surtout pour la période antérieure aux satellites spécialisés, c'est-à-dire antérieure aux années 1980) entraînerait une variation de quelques dixièmes de watt par mètre carré absorbés ou au contraire réfléchis vers l'espace (selon que la couverture diminue ou augmente). Et nous avons déjà remarqué que la physique des nuages et leur rôle dans les changements climatiques étaient encore très mal connus. H. Svensmark, un spécialiste reconnu, a récemment passé en revue les observations en faveur d'un éventuel lien entre flux de rayons cosmiques galactiques et couverture nuageuse globale, lien qu'il avait suggéré avec E. Friis-Christensen il y a un peu plus de dix ans, et qui fut très contesté par la suite. Il faut bien dire que la courbe qui recense l'intensité des rayons cosmiques à Huancayo au Pérou entre 1983 et 2006 ressemble furieusement à celle qui mesure la couverture des nuages de basse altitude (moins de 3 km) pendant la même période. Pour Svensmark, ce sont les électrons produits par l'impact des rayons cosmiques sur les molécules de l'atmosphère qui agissent ensuite comme cataly-

13. N. Scafetta et B. J. West, « Phenomenological reconstructions of the solar signature in the Northern Hemisphere surface temperature records since 1600 », *J. Geophys. Res.*, 112, D24S03, doi : 10.1029/2007JD008437, 2007.

seurs de noyaux de condensation à l'origine des nuages (plus précisément des « micro-clusters » de molécules d'eau et d'acide sulfurique). Pour la période qui précède l'ère des mesures satellitaires, on peut utiliser le « flux coronal ouvert » du Soleil¹⁴ ou le taux de ¹⁰Be comme « proxy » des changements du taux de rayons cosmiques. C'est ainsi que Svensmark propose qu'une grande partie du réchauffement du xx^e siècle pourrait être due à une réduction du rayonnement cosmique et des nuages de basse altitude, qu'il pense pouvoir établir jusqu'au début des années 1700. D'autres auteurs, comme Gerard Bond, avaient également noté la bonne correspondance entre périodes chaudes (respectivement froides) et faible (respectivement fort) rayonnement cosmique. Ilya Usoskin et ses collègues ont récemment constaté que le taux d'ionisation dû au rayonnement cosmique, vers 3 km d'altitude, là où il joue le rôle le plus fort dans la nucléation des nuages, dépend aussi fortement du lieu géographique. Il a pu varier de près de 30 % au cours des derniers siècles et de 10 % au cours du tout dernier : ces fortes valeurs conduiraient à des variations d'énergie de l'atmosphère considérables, qui ne sont actuellement pas prises en compte par les modèles numériques. Les incertitudes existent, mais le débat est passionnant. Les résultats d'une expérience entreprise au CERN (CLOUD qui signifie bien sûr « nuage » et est l'acronyme de Cosmics Leaving Outdoor Droplets) devraient apporter vers 2010 des éléments de réponse sur la capacité des rayons cosmiques à amorcer et à moduler la formation de nuages.

Dans un article paru en décembre 2008 dans *La Recherche*, le physicien Thierry Dudok de Wit souligne l'importance du flux solaire ultraviolet à long terme et confirme que trois indices indirects de l'irradiance solaire permettent d'espérer y accéder : variations des taches solaires, du champ magnétique terrestre et des radio-isotopes cosmogéniques. Il insiste sur le fait que les modèles actuels n'intègrent pas directement le flux ultraviolet et que l'utilisation dans ces modèles d'un indice¹⁵ crée une approximation préjudiciable à leur réalisme et ne permet pas une prise en compte

14. Il s'agit des tubes que forment les lignes de force du champ magnétique du Soleil, par où le vent solaire s'échappe plus facilement. Ce flux magnétique ouvert est concentré dans des trous de la couronne solaire où la densité du plasma est faible. On peut le mesurer à l'aide de la polarisation d'une raie du spectre solaire correspondant au fer.

15. Un peu technique : l'indice décimétrique f10.7.

correcte des interactions entre les différentes couches de l'atmosphère : la concordance entre résultats des modèles et observations reste insatisfaisante. Dudok de Wit note que les derniers modèles ont cependant clairement révélé un impact du Soleil sur le climat et que la grande variabilité du rayonnement solaire ultraviolet reste un bon candidat à l'action de notre étoile sur le climat. Il observe qu'au sein du GIEC, le traitement de cette composante ultraviolette est partagé entre deux groupes différents, ce qui constitue l'une des nombreuses barrières qui entravent le dialogue et explique en partie la place trop discrète occupée par le Soleil dans leurs rapports. Toutes conclusions que les travaux de notre petite équipe nous ont amenés à partager.

Il est un peu rageant de ne disposer de données de température que pour les derniers cent cinquante ans. Qu'indiqueraient des données de même qualité portant sur les siècles précédents ? On ne peut remonter plus loin dans le passé avec des observations de température fiables qu'en Europe et ce sur environ trois cents ans. J.-C. Flageollet, de l'université de Strasbourg, a pu ainsi recueillir et synthétiser les données de 27 observatoires européens. Il a comparé ce résultat à celui obtenu par Lüterbacher et ses collègues à l'aide d'une combinaison de données de stations météorologiques et d'observations des anneaux d'accroissement des arbres. On note certes des ressemblances entre les deux courbes, mais aussi des différences importantes. Pour ce qui est des grandes tendances, Flageollet voit la température moyenne décroître de 1,2 °C entre 1760 et 1870, puis croître de 1,5 °C de 1870 à nos jours. Le réchauffement climatique, de 1,5 °C sur cent cinquante ans, se réduirait à 0,3 °C sur trois cents ans... Quant au réchauffement significatif et subit vers 1987, il semblerait presque avoir une image « miroir » sous la forme d'un refroidissement rapide vers 1760.

Tentons maintenant de remonter aux deux derniers millénaires. Nous avons vu que la courbe de référence est en général celle de Mann, la fameuse courbe en crosse de hockey (Figure 3-1a). La dernière version de cette courbe (2004) repose sur la mesure des anneaux d'accroissement des arbres avant l'époque où l'on dispose de mesures de température directes faites avec des thermomètres. Ces deux séries de données d'origine si distinctes ne sont d'ailleurs pas si faciles à étalonner et à raccorder entre elles. Mais surtout,

en 2005, Anders Moberg et ses collègues en ont fait une critique intéressante et ont proposé une courbe alternative (Figure 3-1b), qui ne semble pas avoir reçu toute l'attention qu'elle mérite. L'argument en est le suivant : les anneaux d'accroissement des arbres permettent une bonne mesure relative des températures (et surtout des précipitations) à l'échelle des décennies, mais ce ne sont pas des enregistreurs fidèles pour des durées plus longues au cours desquelles le climat varie, et cela parce que les arbres s'adaptent aux changements à long terme de leur environnement. En termes techniques de traitement du signal, on parle de « filtre passe-haut ». En revanche, les enregistrements dans les sédiments des lacs ou de l'océan fourniraient des proxies (par exemple des rapports isotopiques dans des microfossiles) bien plus fidèles à long terme. Mais ces sédiments, dont le taux de dépôt est très variable, ne permettent en général pas d'accéder à des détails fins : ce sont des « filtres passe-bas ». Moberg et ses collègues ont d'abord montré la bonne cohérence des variations à long terme (du siècle au millénaire) enregistrées par des carottes sédimentaires provenant de sites bien répartis sur le globe, puis ils ont combiné (mathématiquement) les variations de basse et de haute fréquence provenant des deux types de données, arrivant ainsi à une courbe de températures assez différente de celle de Mann (comparer les Figures 3-1a et 3-1b), bien que l'amplitude des variations en mille ans soit sensiblement la même (0,8 °C).

La courbe de Moberg est en accord avec des mesures de températures passées reconstituées à partir de forages et généralement négligées jusque-là. Enfin, cette courbe retrouve des observations faites depuis longtemps par les historiens du climat : optimum climatique du Moyen Âge et petit âge glaciaire du XIV^e au XIX^e siècle. Ces périodes de quelques siècles sont elles-mêmes sujettes à des variations importantes, avec des retours de « chaud dans le froid » et de « froid dans le chaud ». De nombreux scientifiques s'accordent à voir dans ces grandes variations de quelques siècles à quelques millénaires la réponse du climat à des changements d'activité du Soleil¹⁶, bien marqués par exemple par le « minimum de Maunder », c'est-à-dire l'affaiblissement, et à un moment la disparition

16. Yves Gallet pense y voir de plus un rôle non négligeable du champ magnétique d'origine interne.

des taches solaires pendant le petit âge glaciaire¹⁷. Ces résultats de Moberg sont évidemment en désaccord avec une autre conclusion du GIEC : « Les températures moyennes de l'hémisphère Nord durant la seconde moitié du xx^e siècle ont été [...] de manière vraisemblable (avec une probabilité de plus de 66 %) les plus chaudes des derniers mille trois cents ans », c'est-à-dire depuis l'an 700.

Si la courbe de Moberg est plus proche de la réalité que celle de Mann, alors le signal lié au Soleil y est beaucoup mieux mis en évidence, et les décennies récentes rappellent assez le climat de l'an 1000. Amusez-vous à cacher la seconde partie de la figure 3-1b à partir de l'an 1000. Vous vivez en l'an 1000, et vous disposez de la courbe des mille ans précédents. N'êtes-vous pas un peu effrayés par la montée des températures au cours du siècle qui vient de s'achever (le x^e), au regard des températures en général plus fraîches des siècles précédents ? Et ne seriez-vous pas tentés d'extrapoler la courbe et d'annoncer que des réchauffements anormaux ont commencé et qu'on ne sait pas où cela va s'arrêter ? Un élément qui manquait à nos ancêtres au moment des grandes peurs de l'an 1000... Mais il est vrai qu'à cette époque, la concentration en gaz carbonique n'avait pas augmenté de 20 % en cinquante ans...

Il n'est pas question de discuter ici en détail les résultats récents de disciplines qui me sont trop étrangères. Je suis cependant étonné que ceux qui proposent telle ou telle source presque unique des variations climatiques rejettent la plupart des autres. Il est certes raisonnable dans un premier temps, comme application du « rasoir d'Occam » (c'est le nom anglais du principe de parcimonie, ou d'économie des hypothèses), de tenter de voir si un seul facteur « forçant » permet d'expliquer l'essentiel des observations. Actuellement, l'écrasante majorité des experts, et désormais du grand public, pense que le réchauffement climatique de la planète, depuis disons un siècle ou un siècle et demi, est démontré (c'est en effet très probable) et que sa source est bien l'accroissement dans l'atmosphère de la concentration des gaz à effet de serre dus aux activités humaines. Cette dernière position est exposée de manière éclatante dans les conclusions du quatrième rapport du GIEC en 2007. La phrase majeure de la conclusion du document à l'atten-

17. Le minimum de Maunder proprement dit a cependant duré nettement moins longtemps que le petit âge glaciaire.

tion des décideurs, publiée par le groupe de travail n° 1 dont nous avons déjà parlé, est en effet la suivante : « Il est très probable (seuil de vraisemblance supérieur à 90 %) que l'accroissement des gaz anthropogéniques ait causé la plus grande partie de l'accroissement observé dans les températures moyennes globales depuis le milieu du xx^e siècle¹⁸. »

Or les travaux que nous venons de présenter montrent à l'évidence que l'accroissement de température globale est moins bien connu et sa signification moins bien comprise que ces lignes ne le laissent penser. À ce stade, je ne suis pas sûr que nous puissions nous permettre d'affirmer qu'il y a un réchauffement global d'origine clairement anthropique dans les dernières décennies, au regard de ce que nous avons appris (tant bien que mal) au sujet des climats des deux derniers millénaires par exemple. Nous avons vu la différence de comportement entre zones climatiques situées en Europe et aux États-Unis ; nous avons vu que plusieurs zones majeures ne montrent pas de réchauffement anormal à l'échelle du xx^e siècle, que la température moyenne de l'atmosphère au-dessus de l'océan mondial est très mal documentée, notamment avant 1900, et que son incertitude est probablement sous-estimée. Nous avons vu avec Moberg qu'il n'existe pas de consensus sur la courbe moyenne de température depuis mille ans et que certaines montrent un xx^e siècle pas si différent de la situation mille ans auparavant, en bon accord avec de nombreuses observations d'historiens du climat au cours de l'optimum climatique du Moyen Âge. Les caractéristiques des courbes de température moyennes des zones climatiques que nous avons pu reconstituer ne montrent pas en général (sauf la Californie) cette forme exponentielle régulière de croissance prédite par les modèles. À l'échelle de mille ans, ceux-ci sont en désaccord ou en déphasage de plus de cinquante ans avec les observations. Comment expliquer ces tendances séculaires faites de segments de droite parfois interrompus par des sauts qui se produisent en seulement quelques années ? Comme nous l'avons vu, plusieurs spécialistes, comme S. Solanki, pensent que le Soleil est entré au xx^e siècle dans une phase d'activité qu'il n'avait pas connue depuis plusieurs millénaires. T. Dudok de Wit et I. Usoskin

18. Remarquer qu'il est écrit « milieu du xx^e siècle » et non « milieu des années 1980 », une différence de trente-cinq ans environ. S'agirait-il d'une rémanence des précédents rapports où l'accroissement était censé commencer vers 1850 ?

soulignent l'un l'importance des effets du rayonnement UV extrême dans la haute atmosphère, l'autre celle des rayons cosmiques et de leur capacité à modifier la couverture nuageuse. Les flux d'énergie impliqués par les variations de haute fréquence de l'irradiance solaire ou par les variations de la couverture nuageuse ont peut-être été sous-estimés par rapport à ceux dus aux variations du CO_2 ; leur mécanisme physique n'est pas encore suffisamment compris. Cela ne nie pas le rôle de ce CO_2 , mais jette le doute sur la conclusion du GIEC citée plus haut et son taux de confiance de plus de 90 % (interprété par le grand public, par les politiques et même par certains scientifiques comme l'expression d'une certitude).

Cette certitude est injustifiée, bloque sans doute des jeunes chercheurs et des pistes de recherche, ainsi que, naturellement, l'attribution de crédits de recherche aux dissidents. Alors que, jusqu'il y a quelques années, j'enseignais à nos étudiants de première année d'université le modèle dominant du réchauffement climatique dû aux gaz à effet de serre (auquel je n'avais alors aucune raison de ne pas « croire »), et que j'expliquais ce que j'avais entendu si souvent répéter, à savoir que pas un spécialiste sérieux du climat ne doutait du modèle dominant, j'ai découvert avec étonnement que cette dernière affirmation ne tenait pas. Des spécialistes renommés du climat, qui se sentent encore isolés et marginalisés par les médias, défendent depuis des années sans être vraiment entendus des idées divergentes : je citerai par exemple Richard Lindzen, professeur de climatologie au MIT, Jan Veizer, géochimiste de l'Université d'Ottawa, mais aussi des spécialistes du magnétisme externe et du climat comme H. Svensmark ou E. Friis-Christensen, des spécialistes du Soleil comme P. Foukal ou S. Solanki, un spécialiste des rayons cosmiques, I. Usoskin, etc. Plusieurs de ces collègues (qui ne sont d'ailleurs pas toujours d'accord entre eux) m'ont témoigné directement des difficultés qu'ils rencontraient à voir financer certaines de leurs recherches, à voir publier certains de leurs travaux, à exprimer certaines de leurs idées. Les plus extrémistes des défenseurs de la position « politiquement correcte » sur le réchauffement climatique en vont jusqu'à accuser toute personne qui n'y souscrit pas pleinement d'être un bouffon stipendié par les grands trusts pétroliers (*sic*). On considère également qu'il s'agit d'une position réactionnaire. Or des scientifiques de plus en plus nombreux dont les sympathies

affichées vont à gauche s'élèvent contre la vision dominante. De Claude Allègre, en France, à Richard Courtney, climatologue britannique, Jarl Ahlbeck, chimiste de l'environnement finnois et ancien de Greenpeace, Martin Hertzberg, physicien et météorologue américain, Robert Giegengack, géologue américain et soutien politique d'Al Gore, Denis Rancourt, physicien et environnementaliste canadien, David Noble, également professeur au Canada, David Bellamy, botaniste anglais et militant de l'environnement, Peter Sciaky, géologue qui se décrit lui-même comme « *liberal and a leftist* », Patrick Moore, écologiste et membre fondateur de Greenpeace, tous sont, d'une façon ou d'une autre, en train de grossir les rangs des scientifiques dits « sceptiques » qui pensent que l'accès à l'eau potable ou le problème de l'acidification des océans sont, hélas !, des problèmes bien plus convaincants et urgents que le réchauffement climatique dit « anormal »...

Le lecteur, comme nombre de climatologues, ne manquera pas de me rappeler que la description du climat ne se limite pas à la température, mais nécessite aussi la connaissance de la pression, des précipitations, de l'englacement, du niveau des mers, des vents, etc. J'ai déjà justifié le choix pédagogique de la température, souvent mise en avant dans les articles de vulgarisation comme dans les rapports. Pour la plupart des autres indicateurs, la communauté est encore en état de flux et de reflux, d'arguments et de contre-arguments, de discussions qui montrent bien qu'un accord est loin d'être acquis et que le fait que nous avons suffisamment compris les bases du fonctionnement de la machine climatique n'est pas avéré. Tenter de suivre complètement la littérature et les colloques sur ce sujet est tout simplement impossible, la tête vous tourne... Pour ce qui est du Groenland, les photographies satellitaires ont d'abord permis de constater une réduction de la banquise de mer, certes considérable en été à l'échelle des dernières décennies. Puis avec des mesures d'altimétrie (radar), on a constaté qu'une partie de la glace perdue se redéposait en fait au centre de l'inlandsis. Évaluer l'évolution de son volume n'en est pas rendu plus aisé. La surface de glace pérenne dans l'océan Arctique a chuté de manière spectaculaire en septembre 2007. Une analyse soigneuse des tendances à long terme révèle qu'il s'agit d'un événement extrême et isolé au sein d'une décroissance plus lente et régulière qui pourrait avoir commencé dès les années 1910, avec

une pause entre 1950 et 1970, correspondant bien à la phase globale de refroidissement déjà signalée.

Pour ce qui est de l'Antarctique, aux pertes de glace de la petite péninsule de l'Ouest s'opposent les gains et les températures en cours de refroidissement de la plupart du grand continent glacé. Pour quel équilibre final ? On a cité plusieurs fois lors de débats, parfois acrimonieux, la disparition inexorable des neiges du Kilimandjaro comme une preuve du réchauffement climatique anormal. Mais des travaux récents de Lonnie Thompson à l'Université d'Ohio, puis d'une équipe autrichienne d'Innsbruck autour de Thomas Moelg, montrent que le volume de glaces stocké au sommet du volcan est minuscule, que sa diminution a commencé il y a longtemps (plusieurs siècles, sans doute plusieurs millénaires) et qu'elle est due plus à un long épisode d'assèchement de cette partie de l'Afrique qu'à la température, enfin que les mesures les plus récentes contredisent la prochaine disparition du glacier.

Anny Cazenave est une experte mondialement reconnue de l'évolution du niveau des mers. Il s'agit là sans doute du meilleur intégrateur global des variations climatiques et sa mesure est désormais très précise ; mais les satellites ne la donnent que depuis... 1993 (c'est-à-dire bien après le début de la phase de réchauffement observée en Europe et en Amérique depuis les années 1970). La hausse du niveau des mers s'est interrompue depuis quelques années (Figure 3-9). Ce niveau avait monté assez régulièrement de 30 mm de 1993 à 2003 (soit, en extrapolant, 30 cm en un siècle). Anny Cazenave et ses collègues ont récemment réévalué les données spatiales d'altimétrie et constaté que, depuis 2002 ou 2003, le taux a baissé. Qui plus est, l'essentiel de la montée restante est dû à la fonte des glaces polaires et de montagne (effet retardé) et non à la dilatation qu'on aurait attendue d'une augmentation de température (effet rapide). De son côté, dans un article de novembre 2008 de *Physics Today*, Roger Pielke montre que le contenu thermique de l'océan mondial, une quantité plus précise que la température pour mesurer l'évolution du climat mondial, n'a pas changé ou même a légèrement décru entre 2003 et 2008. Il est tentant de proposer que la part de la montée du niveau des mers due à la fonte des glaces refléterait avec retard le réchauffement des années 1970 à 1990, et la part due au simple gonflement de l'océan par dilatation thermique, nulle au cours des

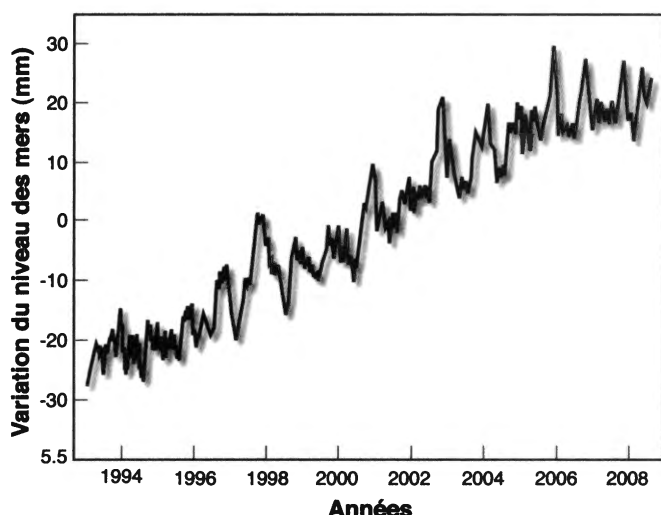


Fig 3-9 : Variation du niveau moyen de la mer (en mm) mesurée par les satellites Topex-Poseidon et Jason depuis 1993. Les données sont lissées sur une période de 60 jours (d'après le site de l'Université du Colorado). La tendance semble s'aplatir depuis trois ans mais cette durée est beaucoup trop courte pour parler de variation climatique à long terme. Plusieurs analyses indiquent cependant un ralentissement sensible de la montée des mers (voir texte).

cing dernières années, l'absence de réchauffement des dix dernières années (Figure 3-7).

On voit avec quelle prudence il faut considérer ces observations sur une durée totale qui atteint à peine la moitié des trente ans sur lesquels on est censé définir une moyenne climatique. Se pose donc la question du décalage entre réchauffement de l'atmosphère et dilatation des eaux océaniques. Anny Cazenave pense que ce déphasage n'excède pas un an et que la réponse de l'océan est donc pratiquement immédiate. Mais combien de temps faut-il au signal climatique pour atteindre des eaux plus profondes ? Et combien de temps mettent les glaciers à répondre eux-mêmes ? Ces questions restent ouvertes. Un autre grand spécialiste, Carl Wunsch, met en avant les insuffisances considérables des modèles actuels et note que la courbe de montée du niveau des mers ne présente aucune accélération. Il réduit par ailleurs l'estimation de sa pente d'un facteur proche de 2 (1,5 mm/an, soit 15 cm par siècle). De son côté, Stephen Schwartz estime à cinq ans le délai de réponse de l'océan aux changements atmosphériques. En tout état de cause, et comme pour la température, le signal moyen de mon-

tée des eaux recouvre une distribution géographique extraordinairement complexe et hétérogène, où des zones de montée en côtoient d'autres où le niveau des mers est descendu. Tout cela est bien complexe, les observations encore bien courtes, les modèles encore bien incertains... Il n'y a pas de honte à cela, qui fait de la recherche en climatologie un formidable domaine... émergent...

À l'occasion de la remise de la médaille Albert I^{er} de l'Institut océanographique, Wunsch a récemment choisi d'aborder une question très médiatisée : le risque prédit par certains d'un arrêt assez brutal du Gulf Stream, qui entraînerait une période de froid intense en Europe occidentale. Rappelant que le Soleil et la rotation de la Terre sont les moteurs principaux des vents, qui eux-mêmes entraînent les courants océaniques, et que c'est l'atmosphère, non l'océan, qui domine le bilan du transfert de chaleur de l'équateur vers les pôles, Wunsch montre que la machine océanique ne peut être arrêtée, que stopper le Gulf Stream est tout simplement impossible. Il s'étonne alors que les spécialistes de l'étude du changement climatique – la plus complexe des sciences de la Terre, plus complexe encore que la théorie des cordes des astrophysiciens et des cosmologistes, et dans laquelle sont couplées physique, chimie, géosciences et biosciences avec des interactions complexes à toutes les échelles de temps –, puissent d'ores et déjà se penser capables de résoudre de tels problèmes. Il s'inquiète de ce que « la société exige des réponses définitives d'une science qui n'est pas assez mûre pour les fournir. Le vide est alors rempli par des conteurs d'histoires qui se plient aux exigences de journaux non spécialisés, comme *Nature* et *Science*, à la recherche de gros titres et de solutions excitantes ». Pour Wunsch, la discipline doit apprendre à se modérer au risque de perdre toute crédibilité. Il conclut que le vrai grand problème, c'est l'accroissement de la population humaine...

Notre position de doute, fondée sur la compréhension actuelle de notre petite équipe (qui naturellement pourrait changer au vu de nouveaux éléments) nous a valu au cours des deux dernières années des critiques acerbes, y compris venant de collègues scientifiques. Leur sentiment est en général que cette attitude de doute « politiquement incorrecte » est de nature à miner le combat difficile que mènent les climatologues en direction des pouvoirs publics et du grand public pour obtenir des crédits de recherche et convaincre de lutter contre l'effet de serre, et fait de nous et de

ceux qui partagent aujourd'hui ces vues des « valets des grands trusts pétroliers », des « incompetents scientifiques » ou, pour reprendre les termes d'un article extraordinairement agressif et passablement insultant paru sur la Toile, des « chevaliers de la Terre plate¹⁹ ». Le blog RealClimate a été créé en partie pour défendre et illustrer la fameuse courbe de température en crosse de hockey. Lui a répondu un blog « sceptique », ClimateAudit. Je découvre avec une inquiétude certaine ce monde des blogs et contre-blogs, que ne tempèrent souvent pas assez le recul et une analyse critique mais tolérante. Le blog francophone Climat Sceptique de Charles Muller me semble nettement plus posé ; on trouve dans une de ses dernières livraisons un encouragement bienvenu à suivre une devise d'Emmanuel Kant, *sapere audere*, et un résumé très raisonnable de l'état de nos connaissances.

Plutôt que tenter moi-même un résumé de cette affaire dans laquelle je serais juge et partie, je préfère citer le point de vue extérieur du grand spécialiste de climatologie du MIT, Richard Lindzen, qui l'a ainsi résumée : « Vincent Courtillot et ses collègues (2007) ont rencontré un problème semblable [...]. Ils ont trouvé que des séries temporelles des variations du champ magnétique semblaient être bien corrélées avec des mesures de température – suggérant une source possible non anthropogénique de forçage. Ce fut immédiatement critiqué par Bard et Delaygue (2008) et Courtillot et ses collègues se sont vu donner le droit normal de répondre, ce qu'ils ont fait de manière raisonnablement convaincante. Ce qui a suivi, cependant, est hautement inhabituel. Raymond Pierrehumbert (un professeur de météorologie à l'Université de Chicago et un environnementaliste fanatique [*sic*]) a publié un blog soutenant Bard et Delaygue et accusant Courtillot et ses collègues de fraude, et pire encore. Alan Robock²⁰ [...] a perpétué la calomnie dans une lettre envoyée à tous les présidents de section de l'American Geo-

19. Je n'aurais sans doute pas pu résister à l'envie de développer les aspects sociologiques et non plus scientifiques du grand débat de société actuel et de tenter de déterminer les raisons de la passion qui anime certains défenseurs intégristes de la vision aujourd'hui politiquement correcte du réchauffement climatique si ce travail ne venait d'être accompli de manière très fouillée par Serge Galam (*Les Scientifiques on perdu le nord*, Paris, Plon, 2008). Je ne puis que recommander au lecteur ce petit livre lucide d'un physicien pris, de manière pour lui totalement inattendue, dans la tourmente...

20. Alors président de la section « sciences atmosphériques » alors que j'étais moi-même président de la section « géomagnétisme et paléomagnétisme ».

physical Union. Ce sujet a été repris (en décembre 2007) par les principaux quotidiens français (*Le Monde*, *Libération*, et *Le Figaro*) qui ont traité les diffamations de Pierrehumbert comme si c'était des faits. [...] toutes les références au travail de Courtillot et de ses collègues en parlent comme s'il était "discrédité" et aucune mention n'est faite de leur réponse. De plus, l'argument majeur contre la position de Courtillot et de ses collègues est qu'elle contredisait les affirmations du GIEC²¹. »

Qu'allions-nous faire dans cette galère ? Pourquoi une poignée de géophysiciens s'aventurerait-elle dans les terres incertaines de la climatologie ? Eh bien ! parce que beaucoup de travaux récents, et pas seulement les nôtres, montrent combien est artificielle et contre-productive la frontière, ou plutôt la barrière élevée entre sciences de la terre solide et de ses enveloppes fluides. Nous avons vu quels liens peuvent exister entre tectonique des plaques et climat, entre volcanisme et évolution de la vie, peut-être même entre champ magnétique et climat. Les « géoscientifiques » ont sans doute beaucoup à apporter aux climatologues (et inversement). Mais il faut pour cela des connaissances et une expérience suffisantes, bref un langage commun. Il est donc temps de pénétrer les secrets des entrailles de la Terre et d'entamer notre voyage vers son centre.

21. In *Climate Science : Is it currently designed to answer questions ?*, doit être publié en 2009 et consultable sur le site : <http://arxiv.org/pdf/0809.3762>

DEUXIÈME PARTIE

La descente aux Enfers
(ou le paradis du géophysicien)

Chapitre 4

LE BALLET DES PLAQUES

« L'aiguille sautait d'un pôle à l'autre avec de brusques secousses, parcourait tous les points du cadran, et tournait, comme si elle eût été prise de vertige. Je savais bien que, d'après les théories les plus acceptées, l'écorce minérale du globe n'est jamais dans un état de repos absolu ; les modifications apportées par la décomposition des matières internes, l'agitation provenant des grands courants liquides, l'action du magnétisme, tendent à l'ébranler incessamment [...].

— Observez ces murailles qui s'agitent, ce massif qui se disloque, cette chaleur torride, cette eau qui bouillonne, ces vapeurs qui s'épaississent, cette aiguille folle, tous les indices d'un tremblement de terre ! [...]

— Mon garçon, je crois que tu te trompes ! [...] Une éruption, Axel. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

La Terre vit. Pas seulement de cette vie biologique de surface dont nous sommes l'une des manifestations, de plus en plus perçue comme perturbatrice. Mais aussi d'une « vie géologique », marquée à l'échelle du temps profond des géologues¹ par l'ouverture des océans, la dérive des continents, la surrection des montagnes et, à l'échelle de nos vies d'êtres humains, par les tremblements de terre et les éruptions volcaniques, tantôt destructeurs, tantôt sources de vie nouvelle. Le terrible séisme de Sumatra le 26 décembre 2004, suivi d'un tsunami mortifère, hante encore nos mémoires vives.

Jusqu'aux années 1960, la logique interne de ces catastrophes telluriques nous échappait largement. Après quelques intuitions

1. Sur l'histoire de la découverte de l'immensité du temps, notamment géologique, voir Pascal Richet, *L'Âge du monde*, Paris, Seuil, 1999.

géniales mais sans lendemain, comme celles de Pellegrini ou de Mallet, Alfred Wegener proposait le premier en 1912, dans un exposé oral², sa vision de la dérive des continents. Complétée ou soutenue par de grands géologues, comme Alex du Toit (1878-1948), Émile Argand (1879-1940) et Arthur Holmes (1890-1965) dans les années 1920 et 1930, cette vision, cette théorie, ce « modèle » comme diraient plus volontiers les scientifiques d'aujourd'hui, devait être violemment combattu par la plupart des géologues américains, et par un géophysicien théoricien britannique de grand talent, Harold Jeffreys (1891-1989). Pourtant, Wegener avait patiemment rassemblé un nombre considérable d'observations géologiques (type et âge des roches), paléontologiques (concordances de fossiles) et paléoclimatologiques (roches associées à des climats particuliers, glaciations) qui convergeaient toutes vers l'idée d'un continent unique, la Pangée, qui aurait rassemblé tous les continents actuels il y a environ 200 millions d'années. Il voyait nos continents séparés comme des radeaux rigides à la dérive sur un soubassement océanique plus fluide. Il tenait la rotation de la Terre pour l'un des moteurs de la dérive crustale. Jeffreys montra alors que des radeaux de croûte continentale granitique ne pouvaient « glisser » sur un soubassement de croûte océanique basaltique, parce que la température de fusion de cette dernière était plus élevée. De plus, il avait des arguments mathématiques pour dire que le mécanisme invoqué de la rotation terrestre était physiquement impossible.

Dans les années 1930, impressionnés par ce physicien théoricien, la plupart des scientifiques du monde jetèrent le bébé avec l'eau du bain et, parce que le modèle « ne fonctionnait pas », oublièrent la moisson d'évidences rassemblées par Wegener ; seuls quelques géologues visionnaires, comme Holmes en Grande-Bretagne ou du Toit en Afrique du Sud, continuèrent à défendre des versions améliorées de la théorie de la dérive des continents. Du Toit comprit ainsi que la Pangée s'était séparée en deux supercontinents, la Laurasie et le Gondwana, séparés par un grand océan aujourd'hui disparu, la Téthys.

Survint la Seconde Guerre mondiale et avec elle des découvertes ou des avancées technologiques majeures conduisant à de nouvelles générations d'instruments sismologiques et magnétiques, et

2. Voir Deparis et Legros, *op. cit.*, p. 485.

de radars... Ces instruments étaient destinés à la détection des engins ennemis, sous-marins notamment, et à la cartographie des grands fonds marins au-dessus desquels ils se faufileaient. Cette quête devait avoir des retombées civiles inattendues et inespérées. En un peu plus d'une décennie allaient être révélés aux yeux de tous les détails des fonds marins, les deux tiers de la surface du globe, auparavant représentés sur les mappemondes par de vastes étendues bleu pâle indifférenciées. Des yeux sous la mer...

C'est ainsi qu'apparurent aux hommes (Figure 4-1) les immenses chaînes de montagne sous-marines qui courent sur plus de 50 000 km comme une cicatrice tout autour de la Terre, au milieu de l'océan Atlantique, en étoile à trois branches sous l'océan Indien, en position décalée vers l'est au bord du Pacifique : les dorsales. À leur axe se forme la nouvelle croûte du plancher des océans. Puis les profondes fosses qui, surtout autour du Pacifique, bordent le Japon, les Philippines, l'Amérique du Sud, l'archipel des îles Aléoutiennes... Rapidement, on s'aperçut que ces cicatrices correspondent assez bien aux grands alignements de séismes et de volcans dont la géographie n'avait jusqu'alors aucun sens apparent. Mieux, on découvrit de grandes failles linéaires qui relient dorsales et fosses entre elles. Certaines sont entièrement sous-marines, les plus longues zébrant le fond du Pacifique et de l'Atlantique équatorial, d'autres émergent et sont bien connues pour leurs colères épisodiques et destructrices : faille de San

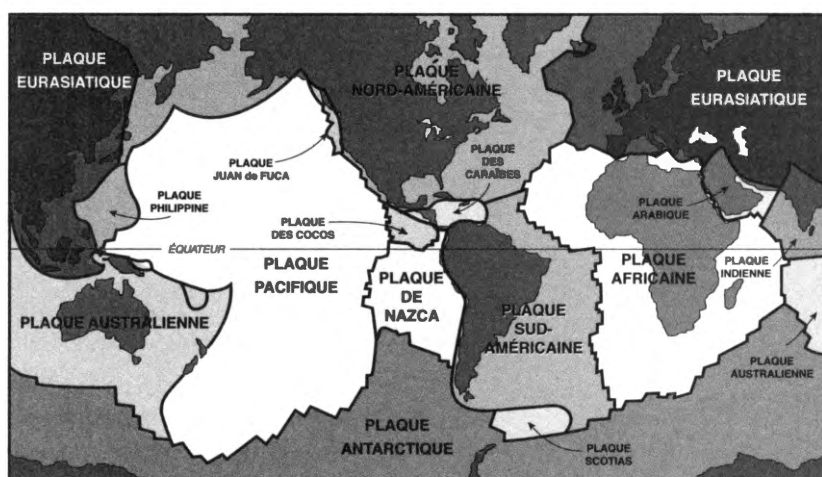


Fig 4-1 : Les 12 plaques tectoniques (lithosphériques) principales qui pavent la surface de la Terre.

Andreas en Californie, faille nord-anatolienne en Turquie, faille du Jourdain, faille du fleuve Rouge en Asie, etc. Le Canadien Tuzo Wilson et le Britannique Fred Vine ont compris les premiers, au milieu des années 1960, la signification exacte de ces failles, dites « transformantes », qui servent de relais entre les divers types de cicatrices.

La plupart des personnes âgées de plus de 50 ans (dont l'auteur fait partie) n'ont jamais appris cette histoire au cours de leurs études secondaires. Les plus jeunes l'ont en revanche tous apprise sur les bancs de l'école. La révolution de la « tectonique des plaques » était passée par là. De nombreux ouvrages en décrivent minutieusement les détails et en racontent la saga, comme par exemple *L'Écume de la Terre*³ de Claude Allègre. On sait désormais que les enveloppes externes de la Terre (sa croûte et la partie supérieure de son manteau, sur une centaine de kilomètres d'épaisseur) sont rigides et constituent une mosaïque de plaques en mouvement perpétuel les unes par rapport aux autres (Figure 4-1). On a donné à cette enveloppe le nom de « lithosphère », ou « sphère de roches ». Le mouvement des plaques lithosphériques s'effectue au-dessus d'une « asthénosphère » ductile⁴, étymologiquement une « sphère faible », faite des roches du manteau plus profond que leur température autorise à fluer lentement. Si le mouvement est d'écartement, de déchirure, on a une dorsale où se forme par solidification d'un magma basaltique la nouvelle croûte océanique. Si ce mouvement est de rapprochement, de convergence, on a une fosse océanique et une « zone de subduction » dans laquelle une plaque océanique coulisse sous une autre plaque (océanique ou continentale) pour retourner dans le manteau terrestre. Le matériel enfoui, enrichi de sédiments et d'eau, libère des fluides qui favorisent la fusion partielle du manteau sus-jacent ; il fond ainsi en profondeur pour donner naissance aux volcans des arcs insulaires, notamment de la ceinture de feu du Pacifique. Si c'est un continent qui est porté par la plaque « subductante » (certains puristes francophones préfèrent le terme « subduite »), la légèreté de sa croûte granitique lui permet de flotter, de refuser de s'enfoncer plus avant et le système se bloque. Les

3. Paris, Fayard, 1999.

4. Le terme a été introduit par J. Barrell en 1914, pour la zone profonde de compensation isostatique (cf. Deparis et Legros, *op. cit.*, p. 453).

continents qui s'affrontent se déforment alors pour donner naissance par collision à une chaîne de montagnes. C'est ainsi que l'Himalaya et le Tibet sont nés de la collision de l'Inde avec l'Asie, et plus près de nous (Français métropolitains) les Alpes, issues de la collision d'un promontoire Adriatique de l'Afrique avec l'Europe. Enfin, les grandes failles transformantes, qui sont pour les tectoniciens des failles de décrochement, voient une portion de croûte coulisser latéralement le long d'une autre, parallèlement à leur frontière commune.

Les plaques tectoniques, qui portent indifféremment des portions de continents et d'océans, se déplacent incessamment les unes par rapport aux autres à la vitesse de quelques millimètres à quelques dizaines de centimètres par an. Ces mouvements ont pu être déterminés avec précision (dans les années 1960 et 1970) grâce à la direction des failles transformantes et à la signature caractéristique des anomalies de l'aimantation des basaltes des fonds océaniques (due à la conjonction de l'expansion des fonds océaniques aux dorsales et d'un phénomène fascinant, sur lequel nous reviendrons plus loin, les inversions du champ magnétique terrestre). La découverte des anomalies magnétiques est due à deux Canadiens, L. W. Morley et A. Larochelle, et à deux Britanniques, Fred Vine (encore lui) et Drummond Matthews. La reconnaissance des failles transformantes et des anomalies magnétiques permet de déterminer des mouvements relatifs moyens des plaques sur des durées de quelques centaines de milliers à quelques millions d'années. L'arrivée des systèmes de positionnement précis par satellite (le Global Positioning System par exemple, que tout le monde connaît désormais sous le sigle de GPS) a révolutionné ce domaine de la « cinématique des plaques », en permettant désormais de déterminer leurs mouvements en temps réel (en quelques années seulement, parfois même quelques mois). Dans la plupart des cas, les valeurs obtenues par la cinématique des plaques ont été confirmées : la coïncidence entre ces mouvements, déterminés à des échelles de temps aussi dissemblables que l'année et la dizaine de millions d'années, a été un très grand succès de la théorie de la tectonique des plaques rigides.

On pouvait penser que tout de la dynamique de notre globe avait été compris, décortiqué, catalogué, au moins pour ce qui est de sa surface, à défaut de son manteau profond et de son noyau, toujours très mystérieux. Compris les accidents tectoniques, les

failles de coulissement, de chevauchement ou d'écartement, comprise la localisation précise des tremblements de terre, des éruptions volcaniques (Figure 4-1). Compris l'ouverture des océans et les changements incessants de la géographie. Il restait peut-être à passer de la simple description des mouvements (la cinématique) à la compréhension des forces responsables de ces mouvements (la dynamique). Il restait à déchiffrer la machine thermique qui règne dans les profondeurs et nourrit cette « vie géologique » de notre Terre. Mais pour la surface, on avait tout compris.

Tout ? Presque... Dans les années 1970, il restait un irréductible petit village gaulois, des volcans situés « à mille miles » des frontières actives des plaques. Volcans ou séismes loin des frontières de plaque ? Où donc ? Et quel mécanisme pouvait expliquer leur existence ? La quête de l'origine de ces volcans sera l'un des premiers buts de notre voyage. Partant de notre biosphère, nous allons maintenant pénétrer dans les enveloppes solides, opaques à nos yeux (mais pas aux ondes sismiques que l'ingéniosité de l'esprit humain a permis de déchiffrer), nous enfoncer dans le manteau terrestre à des pressions et des températures « extrêmes », croiser de vieilles connaissances et découvrir quelques agents nouveaux dans cette véritable marmite bouillonnante, au moins à la vaste échelle du temps des géologues. Nous y suivrons les grands courants du manteau qui émergent aux dorsales océaniques et amorcent la dérive des continents, mais aussi les panaches instables qui pourraient ne pas être étrangers à la fracturation de ces grands continents et même à l'extinction en masse des espèces biologiques.

Chapitre 5

LE POINT CHAUD DE HAWAÏ

« Descends dans le cratère du Yocul de Sneffels que l'ombre du Scartaris vient caresser avec les calendes de juillet, voyageur audacieux, et tu parviendras au centre de la Terre. Ce que j'ai fait. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

La distribution des séismes ou des principaux volcans confirme le modèle des plaques : l'écrasante majorité est bien située le long de ces lignes frontières qui séparent les principales (Eurasie, Afrique, Amérique du Nord, Amérique du Sud, Pacifique, Inde-Australie, Antarctique) et leurs six petites sœurs (Nazca, Coco, Juan de Fuca, Caraïbe, Arabie, Philippine). Mais, au milieu de la plaque Pacifique, surgit l'archipel volcanique des îles Hawaï. Dans la grande île, les deux sommets imposants du Mauna Loa et du Mauna Kea, et la bouche du Kilauea témoignent de l'histoire récente du volcan. Une éruption s'y déroule depuis quelques années sur le flanc sud : les laves du Pu'u Oo s'écoulent jusqu'à l'océan et rougeoient dans la nuit. Sur le flanc sud-est de l'île, grondements, bulles et eaux chaudes ont révélé la naissance du « petit dernier », encore sous-marin, le Loihi. De là émergera sans doute le troisième sommet de la grande île.

Plus à l'ouest, l'archipel s'étire de volcans en volcans, aujourd'hui éteints. Ce sont des îles dont les noms font rêver : Maui, Lanai, Molokai, Oahu, Kauai, Niihau, Nihoa... Leurs laves ont été datées par diverses méthodes géochronologiques qui toutes confirment un passé géologique « récent » de quelques centaines de milliers à quelques millions d'années : le Kilauea actuellement actif est donc d'âge « zéro » ; Niihau a 5 millions d'années et Nihoa 7 millions d'années. L'archipel s'étire toujours plus vers l'ouest-nord-ouest (Figure 5-1), et s'affaisse. Il n'y a plus guère d'île

majeure. Mais les nombreux levés bathymétriques¹ accumulés par les sous-marins et les navires océanographiques depuis la Seconde Guerre mondiale révèlent un alignement, une chaîne de monts sous-marins, dont certains sommets émergent parfois : Necker, La Pérouse, Midway, Colahan, Abbott... Vers 173 °E et 32 °N, près des monts sous-marins de Kanmu, Yuryaku et Daikakuji, cet alignement semble s'interrompre, mais il reprend en fait au nord-nord-ouest. Et c'est un enchaînement d'autres monts sous-marins aux noms donnés par leurs découvreurs au gré de leur fantaisie, Koko, Ojin, Nintoku, Suiko, Jimmu, Detroit, Tenchi... jusqu'à la fosse des Aléoutiennes, où la chaîne s'engouffre sous la plaque eurasiatique, vers 165 °E et 55 °N, au nord du dernier mont sous-marin, Meiji. La longueur totale de cette chaîne de plus de cent boucliers volcaniques basaltiques majeurs atteint 4 000 km. C'est l'un des plus grands objets géologiques à la surface de notre planète.

L'alignement qui va de Hawaï à Daikakuji a reçu le nom de « chaîne des monts sous-marins hawaïenne » ; à celui qui le poursuit de Daikakuji à Meiji le nom de « monts de l'Empereur ». La chaîne des monts Hawaï-Empereur forme donc une étonnante cicatrice en forme de chevron sur le fond du Pacifique Nord-Ouest. L'explication de son origine est vite apparue comme un défi géologique qui devait cacher un message important de la dynamique de notre planète. On a d'abord compris que chacun de ces monts sous-marins était un ancien volcan. Chacun a en effet la forme d'un cône arasé, au sommet coiffé d'une vaste plateforme corallienne.

Dès les années 1830, lors de son voyage sur le *Beagle*, Charles Darwin comprend que récifs coralliens et atolls se forment en conséquence du vieillissement et de la subsidence des îles. Il écrit : « En fin de compte, quand on reporte sur une carte les deux grands types de structures que sont les récifs barrières et les atolls d'un côté, les récifs frangeants de l'autre, ils offrent un tableau grandiose et harmonieux des mouvements que la croûte de la Terre a subis dans une période tardive. Nous voyons de vastes zones se soulever, avec du matériau volcanique qui y surgit de temps en temps. Nous voyons d'autres grands espaces s'enfoncer sans éruption volcanique ; et nous pouvons nous sentir sûrs que le

1. Ce sont les profils et les cartes de la profondeur de l'eau sous la surface de l'océan.

mouvement a été assez lent pour permettre aux coraux de croître jusqu'à la surface, et de si grande étendue qu'il ait englouti sous la vaste surface de l'océan chacune des montagnes au-dessus desquelles les atolls s'élèvent aujourd'hui comme des monuments qui marquent le lieu de leur enterrement². »

Mais on n'a pu déterminer le mécanisme précis de leur formation qu'avec la tectonique des plaques. Un volcan nouveau se forme au fond de l'océan (nous devons encore attendre un peu pour comprendre exactement pourquoi il se forme précisément à tel ou tel endroit). Il s'épanche sur une plaque océanique (lithosphère) formée depuis quelque temps à l'axe d'une dorsale. Au moment où cette lithosphère nouvelle se forme (on lui donne alors l'âge « zéro »), elle est d'épaisseur très réduite (quelques kilomètres) et très chaude. Elle s'écarte de la dorsale, refroidit, s'épaissit. La loi physique de l'épaississement de la plaque océanique est aujourd'hui assez bien connue. La température est à peu près uniforme, de l'ordre de 1 000 °C, à la base de la lithosphère ; la chaleur se propage par conduction et la dissipation en surface (au fond de l'océan) épaissit la plaque en raison de la racine carrée du temps écoulé³. Au bout de 10 millions d'années, elle fait environ 35 km d'épaisseur, au bout de 20 millions d'années 50 km (soit 1,4 fois plus, la racine carrée de 2), au bout de 40 millions d'années 70 km (soit 2 fois plus, la racine carrée de 4) et ainsi de suite. L'épaississement ralentit et même stoppe au bout de 80 millions d'années environ, quand la lithosphère a atteint à peu près 100 km d'épaisseur. Une source de chaleur secondaire, plus profonde, vient alors compenser la déperdition en surface.

Le volcan nouveau formé constitue une charge sous laquelle la lithosphère fléchit un peu (c'est le principe de l'isostasie⁴). Puis la plaque se refroidit et s'approfondit en vieillissant, entraînant

2. In C. Darwin, *The Geology of the Voyage of HMS Beagle, Part I : Structure and Distribution of Coral Reefs*, Londres, 1842.

3. Les lois de la diffusion de la chaleur permettent d'établir que cet épaississement de la plaque de lithosphère océanique solide se fait aux dépens de l'asthénosphère (la partie du manteau immédiatement sous-jacente) proportionnellement à la racine carrée du temps écoulé depuis la première formation de la plaque à l'axe de la dorsale. Les constituants chimiques et minéralogiques de la plaque (croûte basaltique, réseau de dykes, partie inférieure de chambres magmatiques cristallisée et faite de roches ultrabasiques) sont acquis aux dépens du manteau ultrabasique par fusion partielle et solidification.

4. Expliqué plus en détail plus loin (page 106).

avec elle le volcan vers le fond. Si ce dernier cesse de croître, la source de son activité s'étant tarie, il a atteint sa taille maximale. L'action des vagues va éroder sa partie émergée, tant et si bien qu'au bout d'un certain temps, il prendra la forme d'un cône tronqué. Profitant de la surface ainsi créée, un récif corallien s'arrime à ses côtés et prospère⁵. La surface de l'île s'accroît d'autant. Mais la plaque continue à refroidir et le volcan à sombrer. Le récif de corail tente de s'accrocher par la base au volcan condamné et forme alors un atoll, un anneau corallien émergé entourant une lagune sous laquelle s'enfonce le sommet arasé du volcan. Au bout de quelques millions d'années, le récif ne peut plus suivre le mouvement ; le volcan tronqué couronné de son récif s'engloutit définitivement sous les flots. Quatre-vingts ans avant Wegener, cent trente ans avant la tectonique des plaques, Darwin avait donc élucidé le mécanisme de ces constructions si particulières, auxquelles on a donné le nom de « guyot⁶ ».

La chaîne des monts Hawaï-Empereur est donc un long alignement de volcans émergés et de volcans anciens, éteints aujourd'hui et pour la plupart submergés. Mais depuis combien de temps ? C'est encore une fois Tuzo Wilson (le « père » des failles transformantes) qui, en 1963, proposa une réponse : il eut l'idée que la plaque Pacifique avait pu dériver au-dessus d'une source ponctuelle, stationnaire, de matériel exceptionnellement chaud dans le manteau. L'analogie souvent utilisée est celle d'un chalumeau au-dessus duquel défile une plaque mince. Si la chaleur est suffisante, la flamme perce la plaque et y laisse sa trace⁷. Ainsi est née l'idée qu'un « panache » thermique du manteau pourrait être la cause du « point chaud » d'Hawaï, et que le mouvement de la plaque Pacifique au-dessus de ce point chaud pourrait expliquer la longue séquence des monts sous-marins Hawaï-Empereur. Cette proposi-

5. Il faut cependant que la latitude le permette : moins de 35° en général pour que les eaux soient suffisamment chaudes.

6. Du nom d'Arnold Guyot (1807-1884), géologue suisse émigré aux États-Unis et devenu le premier professeur de géologie à l'Université de Princeton, promoteur d'une vision très dynamique de la Terre.

7. En fait, le « chalumeau » ne forme pas une fente continue mais une séquence discrète de volcans séparés. C'est un phénomène de « relaxation ». Une fois un volcan formé, la dérive de la plaque éloigne la zone de production du magma (la tête du chalumeau) du volcan actif, mais le conduit se « débrouille » pour alimenter encore le volcan, jusqu'à ce que, la distance devenue trop grande, le chalumeau « perce un nouveau trou » et crée un nouveau volcan, séparé du précédent.

tion avait l'avantage, essentiel pour toute hypothèse scientifique, d'entraîner des conséquences qu'on pouvait tester. En effet, à moins que le mouvement de la plaque Pacifique ait été d'une extrême complexité, l'âge des volcans actifs ou éteints du fameux alignement devait croître de façon régulière, uniforme quand on s'éloignait vers l'ouest, puis vers le nord. Daikakuji devait être plus vieux que Maui, et Suiko plus vieux que Daikakuji...

Très vite, les spécialistes de la géochronologie ont recueilli des échantillons des îles de l'archipel, échantillons glanés sur les terrains émergés, ou repêchés sous la mer là où les guyots s'étaient enfoncés. De nombreuses campagnes océanographiques ont ainsi enrichi la collection d'observations. Très vite, la conjecture de Wilson a semblé vérifiée ; les résultats les plus récents confirment avec une étonnante précision la progression régulière des âges des volcans. Clague et Jarrard au début des années 1970 et, depuis, nombre de leurs collègues ont ainsi pu dater les volcans sous-marins de Necker à 10 millions d'années, Midway à 28 millions d'années, Daikakuji (là où la chaîne forme un coude) à 42 millions d'années, Koko à 48, Nintoku à 56, Suiko à 65 millions d'années. Le mouvement de la plaque Pacifique au-dessus du chalumeau du point chaud d'Hawaï s'est effectué depuis 40 millions d'années (l'âge approximatif du coude de Daikakuji) à la vitesse assez régulière de 9 cm par an (soit 9 mètres en un siècle, l'ordre de grandeur d'une vie humaine, ou 90 km en un million d'années, l'ordre de grandeur de la présence de notre espèce sur Terre). Les derniers volcans dans la zone de subduction au Nord (temporellement les premiers formés) dateraient d'environ 75 millions d'années. L'histoire antérieure de la chaîne a été engloutie à jamais et résorbée dans les profondeurs du manteau.

Le coude (on dit aussi le « V ») du point chaud hawaïen est devenu l'emblème d'un nouveau paradigme, celui des points chauds, qui est un peu le graal de notre voyage au centre de la Terre. Très vite, on lui a découvert de nombreux frères et sœurs. D'abord au sein même du Pacifique. Les monts sous-marins de la chaîne Hawaï-Empereur n'y sont en effet pas seuls. Avec l'avancement de la cartographie des fonds par les navires océanographiques, puis de façon accélérée à partir des années 1980 grâce aux satellites altimétriques, on y a découvert des milliers de volcans éteints⁸. Les cartes

8. Voir annexe 1.

à très grande dimension (on parle de « grande longueur d'onde ») dressées par les satellites ont ainsi révélé avec un détail inespéré les fonds océaniques eux-mêmes (Figure 5-2). Et notamment les milliers de monts sous-marins qui parsèment le fond du Pacifique. Au sud du grand V de la chaîne Hawaï-Empereur, au moins deux autres grands V sommairement parallèles : l'alignement des chaînes en partie émergées, en partie sous-marines des îles Touamotou et des îles de la Ligne, qui semble « partir » du système volcanique de l'île de Pâques, et celui des îles Australes, des Gilbert et des Marshall, qui « émane » d'un volcan actif mais sous-marin, le mont MacDonald.

Le fait que ces trois grands V sont à peu près parallèles et les progressions des âges les mêmes (au vu des âges encore imprécis alors disponibles) conduisit Jason Morgan à proposer dès 1971 que les trois points chauds en question, les trois volcans actuels de Hawaï, MacDonald et l'île de Pâques, étaient en fait immobiles les uns par rapport aux autres et émanaient du manteau profond. Si cela se confirmait, ils formeraient alors un véritable système de référence permettant de décrire les mouvements des plaques de manière « absolue ». On a donné ce nom trompeur de « mouvements absolus » aux mouvements des plaques estimés par rapport aux points chauds. Tordons dès à présent le cou à ce terme « absolu ». Tout mouvement ne peut être décrit que par rapport à un repère donné. Et l'on peut toujours décrire le mouvement de ce repère par rapport à un autre repère arbitraire. Le mouvement de la Terre par rapport au Soleil n'a rien d'absolu (pas plus naturellement que celui du Soleil par rapport à la Terre, si c'est lui qu'on choisit de mettre en avant) : chacun est le mouvement de quelque chose par rapport à autre chose. On peut aussi décrire le mouvement du Soleil dans notre galaxie, de notre galaxie par rapport à l'amas local de galaxies et ainsi de suite. Les mouvements relatifs s'additionnent (vectoriellement), aucun n'a le privilège (supposé) de l'absolu. Les mouvements des plaques peuvent être (et sont) décrits par rapport à plusieurs référentiels, celui d'une autre plaque (l'Eurasie par rapport à l'Afrique), par rapport aux points chauds du Pacifique, par rapport à d'autres référentiels encore plus abstraits...

Pour Jason Morgan, des points chauds d'origine profonde, immobiles entre eux et par rapport au manteau depuis des dizaines de millions d'années, percent bien la plaque Pacifique qui

défile au-dessus du manteau. Son mouvement actuel vers l'ouest-nord-ouest dure depuis 42 millions d'années, à peu près dans la même direction et à la même vitesse. Il a créé la chaîne des monts hawaïens depuis Daikakuji. Auparavant, et au moins depuis 75 millions d'années, la plaque se déplaçait à taux constant dans la direction nord-nord-ouest, créant ainsi la chaîne des monts de l'Empereur. La raison du changement de direction reste inconnue. Plusieurs géophysiciens ont constaté que cette date coïncidait (grossièrement) avec la collision frontale de l'Inde et de l'Asie, dont c'était peut-être une lointaine répercussion.

La grande idée de Wilson et de Morgan posait deux questions immédiates. Quelle était la source de ces points chauds, de quelle profondeur pouvaient-ils donc venir, avaient-ils un quelconque rapport avec le grand ballet de la dérive des continents et de la tectonique des plaques ? En trouvait-on d'autres sous les autres océans, et si oui combien, de quelle taille ? Étaient-ils également immobiles par rapport au manteau, confirmant alors l'existence d'un grand référentiel mantellique pour la cinématique du globe ?

Morgan ne s'intéressait pas qu'à la cinématique des points chauds. Il se posait aussi la question de leur origine. Dès 1971, il proposait que ces points chauds puissent résulter de « panaches » convectifs, d'instabilités de la matière chaude du manteau nées à sa base, à 2 900 km de profondeur, à la limite du noyau de fer en fusion. Les points chauds, émergence en surface des fournaises de la frontière du noyau ? Il y avait de quoi exciter les imaginations. Cette excitation persiste aujourd'hui et, si beaucoup de questions ont reçu des débuts de réponse, la quête n'est certainement pas achevée. Avant d'entamer notre voyage, en partant comme le professeur Lidenbrock de l'Islande (un autre point chaud majeur, comme nous le verrons bientôt) ou de la bouche du Kilauea à Hawaï, il nous reste un peu de travail de reconnaissance à effectuer en surface.

Chapitre 6

LA COURSE AUX POINTS CHAUDS

« [...] j'estime à seize lieues la profondeur atteinte.
[...]

— Mais c'est l'extrême limite assignée par la science à l'épaisseur de l'écorce terrestre. [...] une chaleur de quinze cents degrés devrait exister. [...]

— Tu vois qu'il n'en est rien et que les faits, suivant leur habitude, viennent démentir les théories. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Hawaï, l'île de Pâques et le mont sous-marin de MacDonald. Trois points chauds dans l'océan Pacifique. Trois points chauds connectés à des panaches venus des profondeurs du manteau. Trois points chauds placés chacun en tête d'une cohorte de monts sous-marins, volcans éteints et affaissés témoins de l'activité ancienne de ces panaches. Trois points chauds ayant laissé à la surface de la plaque Pacifique des traces parallèles, qui suggèrent que les trois panaches seraient approximativement immobiles les uns par rapport aux autres dans le manteau. Des panaches que ne prévoyait pas la tectonique des plaques, mais que de nombreuses expériences de laboratoire mettent en évidence dans un fluide que l'on chauffe et qu'illustrent bien les « blobs » colorés d'une *lava lamp*¹...

Ces panaches seraient-ils uniques, propres à la plaque Pacifique qui se distinguerait ainsi des autres ? Il n'en est rien. On trouve des points chauds un peu partout à la surface de la Terre, notamment au fond des océans. Celui qui ressemble le plus à Hawaï et se trouve faire partie du territoire français est le volcan actif du Piton de la Fournaise sur l'île de la Réunion.

1. Il s'agit de ces récipients en verre transparent, chauffés par en dessous, de la base desquels s'élèvent des panaches de matière visqueuse colorée qui retombe ensuite en se refroidissant dans la partie supérieure. C'était très à la mode dans la période « hippie » et semble de nouveau l'être...

Ce magnifique volcan bouclier (Figure 6-1) est surveillé en permanence par les équipes de l'observatoire de la plaine des Cafres, placé sous la responsabilité de l'Institut de physique du globe de Paris. Ses flancs sont équipés de nombreux capteurs, de stations sismiques qui détectent les moindres vibrations (écroulements de falaises, secousses superficielles ou plus profondes annonciatrices d'une remontée du magma), capteurs de déformation qui suivent en permanence les étirements ou les contractions du volcan, inclinomètres qui repèrent ses changements de pente dès qu'ils dépassent quelques millièmes de radian², détecteurs de gaz comme le radon, magnétomètres et électrodes qui détectent de minuscules variations des champs électrique et magnétique... L'équipe que dirige Thomas Staudacher n'est pas tous les jours à la fête (bien que cela dépende du point de vue duquel on se place, nombreux étant ceux qui rêvent de voir une éruption dans le cratère Dolomieu ou dans l'Enclos) : après une période de relative quiétude, le volcan a repris une activité régulière et entre en éruption entre une et deux fois par an. Il s'agit de laves basaltiques, très fluides, qui s'écoulent en général vers l'est du cratère en direction de l'océan. Elles peuvent bien sûr couper la route côtière ou détruire une maison, mais il s'agit toujours de phénomènes assez lents, de sorte que les occupants ont le temps de quitter les lieux quand cela s'avère nécessaire. De plus, de grands progrès ont été faits depuis près de trente ans dans la compréhension du langage du volcan, de nombreux signes avant-coureurs ont permis à l'équipe de l'observatoire de prévoir quelques jours à l'avance les vingt dernières éruptions, sans une seule erreur. Bouclage de la zone pour protéger d'eux-mêmes les touristes inconscients, information du public, des autorités, de la gendarmerie et de la sécurité civile, tout cela est désormais bien rodé et le Piton de la Fournaise n'est pas un volcan meurtrier.

Il vient cependant de connaître, en février 2007, l'un des phénomènes les plus impressionnants qu'on ait pu y observer : un effondrement de la caldeira³ sommitale créant un cratère d'éboulis de 300 mètres de profondeur. Le Piton de la Fournaise n'est pas

2. Soit quelque dix millièmes de degrés, une variation de quelques millimètres d'altitude pour une base horizontale de 1 km.

3. Ce terme portugais qui signifie « chaudière » est utilisé par les géologues pour désigner un grand cratère formé par l'explosion ou l'effondrement de la cheminée d'un volcan.

un volcan sans risque. Quand on regarde de manière attentive la morphologie du volcan actif, on constate qu'il est bordé par une zone en arc dite « rift zone », que souligne une falaise par endroits très abrupte. Toute la partie du volcan située à l'est de cette zone est relativement lisse et jeune ; la lave y recouvre une profonde cicatrice, celle d'un gigantesque écroulement de tout le flanc est dans l'océan, dont on ignore la date exacte mais qui a pu se produire il y a environ 4 000 ans. Une cartographie précise des fonds marins a permis de reconnaître des terrains sous-marins à la surface rugueuse, restes du grand écroulement dans la mer qui a répandu de grandes épaisseurs de débris jusqu'à 150 km de distance ! Georges Boudon et ses collaborateurs ont reconnu ce type de structure dans un très grand nombre d'îles volcaniques tropicales et plusieurs équipes internationales en ont confirmé le danger potentiel. Il semble bien qu'épisodiquement un flanc de volcan gorgé d'eau et en perte d'équilibre se décroche, s'écroule vers la mer et déclenche un grand tsunami. Il ne s'est heureusement pas produit de tel « méga »-glissement de terrain dans l'histoire humaine récente, mais il s'agit d'un risque potentiel que les spécialistes des sciences de la Terre étudient et dont ils tentent de reconstituer l'histoire afin d'en évaluer la probabilité et le délai, et ce pour chaque île volcanique habitée. Les équipes de l'observatoire sont vigilantes...

L'île de la Réunion, avec sa forme de 8 un peu écrasé, résulte de la coalescence de deux structures volcaniques successives. Le volcan du nord de l'île, le Piton des Neiges, est aujourd'hui éteint ; il a commencé à émerger de l'océan Indien il y a environ deux millions d'années. Le Piton de la Fournaise a en quelque sorte pris le relais depuis un demi-million d'années (les deux volcans ayant eu une période commune d'activité). L'île de la Réunion est donc comme Hawaï une île très jeune (qui n'existait pas du temps où Lucy, notre lointaine grand-tante, courait les bordures de la dépression Afar), trop jeune pour que des récifs de corail importants aient eu le temps de s'y développer. C'est la raison pour laquelle cette île si belle a si peu de plages blanches et peut décevoir celui qui veut y assouvir sa soif d'observation de la vie abondante des récifs. À 200 km vers le nord-est, une autre île témoigne de la présence plus ancienne encore du point chaud de la Réunion : c'est l'île Maurice, autre grand ensemble de volcans basalti-

ques, âgé lui de 2 à 7 millions d'années. Plus ancien, il a eu le temps de s'éroder, les sommets y sont plus arrondis et beaucoup plus bas, l'île a commencé à s'enfoncer dans l'océan, un vaste récif corallien a pu s'y développer et des plages accueillantes se former. Plus au nord-est encore, pratiquement rien en surface... Mais les sondeurs des navires océanographiques ont révélé une chaîne sous-marine de volcans éteints : elle s'étend jusqu'au plateau des Mascareignes, semble interrompue par le passage de la grande branche nord-ouest de la dorsale de l'océan Indien (qui sépare les plaques africaine et indo-australienne), mais reprend plus au Nord avec les archipels (atolls) en partie émergés des Chagos, des Laquedives et des Maldives (Figure 6-2). Ce grand alignement, interrompu en un endroit, a été daté. La séquence est régulière et vieillit vers le nord. Après la Réunion (0 à 2 millions d'années), puis Maurice (2 à 7 millions d'années), les âges observés sont de 31, 32, 45, 48, 55 et 58 millions d'années. La chaîne vient buter sur la côte indienne, au sud de Bombay, en face de la région de Mahabaleshwar (nous y retournerons bientôt). Le point chaud de la Réunion, très actif, présente donc pratiquement toutes les caractéristiques de celui d'Hawaï. Ce sont deux chaînes continues, formées depuis environ 60 millions d'années. Mais le panache de la Réunion a une particularité supplémentaire. La dorsale qui forme la frontière entre les plaques indo-australienne et africaine est passée, il y a 30 ou 40 millions d'années, au-dessus du panache : celui-ci a traversé, apparemment sans encombre, cette frontière superficielle à travers laquelle se construit la lithosphère océanique de ces deux plaques. C'est d'ailleurs un argument important pour dire que la convection responsable de ce panache doit être ancrée dans le manteau de manière profonde, sans quoi elle aurait été sans doute captée par la dorsale.

Les premiers panaches identifiés étaient situés loin des frontières entre les plaques. C'est comme ça qu'on les a repérés, objets isolés que n'expliquait pas la nouvelle tectonique. Mais rien n'interdit à un panache de se former à l'aplomb d'une dorsale, comme l'a montré Jean-Guy Schilling. Les deux effets magmatiques se trouvent alors combinés et peuvent être plus difficiles à déchiffrer. C'est le cas de deux points exceptionnels de la surface du globe, l'Islande et l'Afar. Exceptionnels, car ce sont les deux seuls lieux où une dorsale océanique affleure au-dessus du niveau des eaux, s'offrant à l'exploration du géologue de terrain de la

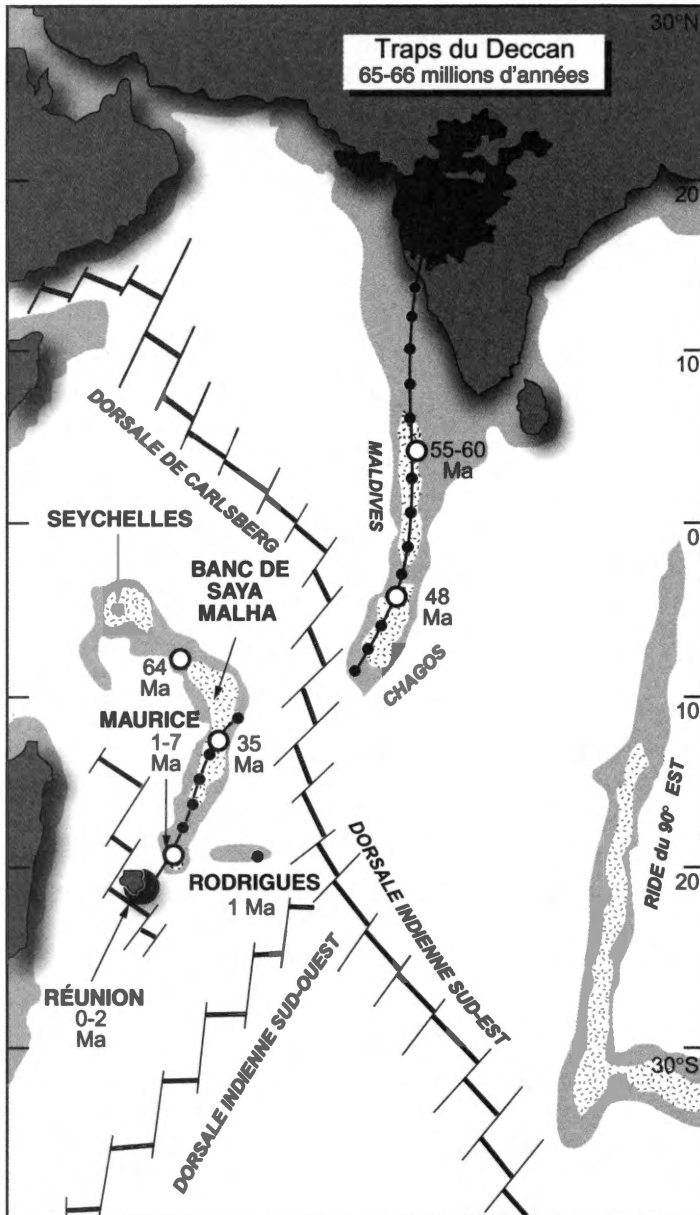


Fig 6-2 : Chaîne des monts sous-marins qui marquent la trace du point chaud de la Réunion dans l'océan Indien jusqu'aux traps du Deccan. Les âges sont indiqués en millions d'années, de la Réunion et de l'île Maurice aux Chagos, Maldives et Lacquedives.

manière la plus classique qui soit. Le reste du temps, les dorsales sont situées sous plus de 2 000 mètres d'eau. Pourquoi ? Parce que la croûte basaltique nouvellement créée est très dense et son niveau d'équilibre sous l'eau. Un calcul (qu'on appelle « isostatique ») permet aisément de le vérifier. Qu'est-ce donc que l'isostasie⁴ ? C'est le principe d'Archimède appliqué à la Terre : tout excès de masse en surface doit être compensé en profondeur par un défaut de masse, de manière que la pression qu'exerce une colonne de roches soit partout égale à la plus grande profondeur. L'image la plus parlante sans doute en est donnée par l'iceberg : il se trouve que la glace est moins dense que l'eau liquide et flotte à sa surface. Pour que l'équilibre soit atteint, il faut que la masse de glace qui dépasse, plus dense que l'air qui l'entoure, soit compensée sous l'eau par un défaut de masse équivalent : celui-ci est fourni par la partie immergée de l'iceberg qui, elle, est moins dense que l'eau liquide dont elle occupe la place. La connaissance des densités de la glace et de l'eau permet de calculer l'épaisseur de la partie immergée à partir de la hauteur de l'iceberg qui dépasse de l'eau.

L'un des premiers savants qui participèrent aux extraordinaires expéditions décidées en 1735 par le gouvernement de Louis XV⁵ pour déterminer la forme de notre globe, Pierre Bouguer (1698-1758), constata que l'attraction des montagnes de la région de Quito était très inférieure à ce qu'on aurait pu attendre d'un tel excès de masse apparent. L'astronome et mathématicien italien R. G. Boscovich (1711-1787) suggéra en 1755 que ces montagnes étaient dues à l'expansion thermique de la croûte et que le soulèvement de surface était compensé par une perte de masse en profondeur. Cette vision n'est plus d'actualité, mais elle devait conduire à l'idée que la croûte terrestre repose sur un substratum capable de fluer. Un demi-siècle plus tard, entre 1840 et 1849, George Everest (1790-1866) menait en Inde une campagne cartographique : il constata dans la plaine du Gange des « erreurs de fermeture » de ses triangles géodésiques. Tout se passait comme si la verticale y était défléchie par la présence de l'Himalaya, mais moins que si toute la masse de la montagne située au-dessus du

4. Le terme a été introduit en 1889 par C. E. Dutton (*in* Deparis et Legros, *op. cit.*, p. 360).

5. Cette histoire est magistralement contée par Florence Trystram dans *Le Procès des étoiles* (Paris, Payot, 1993).

niveau de la mer avait exercé son effet sur la pesanteur dans la plaine du Gange. L'astronome royal britannique, G. B. Airy (1801-1892), devait proposer dans un lumineux article de trois pages publié en 1855 une solution proche de celle qui est aujourd'hui acceptée : l'idée qu'en profondeur, sous la montagne, comme pour un iceberg, une racine de croûte légère remplaçait la « lourde lave » (le manteau plus dense⁶).

En Afar comme en Islande, la dorsale émerge et la croûte basaltique atteint des épaisseurs exceptionnelles. Un apport de chaleur considérable permet de former cette croûte, dont la chimie est un peu différente de la croûte océanique normale. Islande comme Afar sont des sites volcaniques très actifs, encore actuellement. Ce sont deux points chauds. Un panache provenant du manteau maintient ces deux régions « la tête hors de l'eau ». Ont-ils, comme Hawaï et la Réunion, « brûlé leur trace » au fond de l'océan voisin ? Pour l'Islande, la réponse est positive : à l'est comme à l'ouest de l'île, une chaîne de volcans sous-marins éteints forme un seuil topographique profond⁷. Ces volcans sous-marins sont de plus en plus âgés quand on s'éloigne de l'Islande. À proximité des côtes du Groenland à l'Ouest, des côtes de la Norvège et des îles du nord de la Grande-Bretagne à l'Est, l'imagerie sismique marine par réfraction et réflexion des ondes a mis en évidence de grandes épaisseurs (plusieurs kilomètres) de lave, enfouies sous les sédiments ; elles ont été forées et leur âge est voisin de 55 millions d'années. Le point chaud de l'Islande a brûlé sa trace sur les deux plaques du Groenland (Amérique du Nord) et de l'Europe (Eurasie) depuis au moins ce temps-là, et ce de manière symétrique : les deux alignements de monts sous-marins qu'il laisse prouvent que le point chaud est resté focalisé sous la dorsale depuis son origine.

Le point chaud de l'Afar a fait l'objet de nombreuses études par des équipes françaises et italiennes depuis plus d'un quart de siècle. Il n'avait pas fallu longtemps à Teilhard de Chardin⁸ pour compren-

6. Pour les mêmes raisons, la croûte continentale granitique, moins dense que la croûte océanique basaltique, est en équilibre « isostatique » avec elle et se stabilise donc plus haut (à l'altitude de + 100 mètres environ en moyenne) que celle des océans (profondeur de - 3 000 mètres environ en moyenne).

7. Ce seuil ralentit, voire empêche le mélange des eaux profondes des bassins nord et central de l'océan Atlantique (circulation thermohaline), et joue un rôle important dans l'histoire des glaciations et des évolutions du climat.

8. P. Teilhard de Chardin, « Observations géologiques en Somalie française et au Harrar », *Mém. Soc. Géol. France*, 6, 1930, p. 5-12.

dre (dès les années 1930) que le parallélisme des côtes de la mer Rouge en faisait un test de choix de la théorie de Wegener. L'Afar est un site magnifique et passionnant, proche de la jonction de la mer Rouge et du golfe d'Aden (Figure 6-3). On y suit les prolongements émergés des dorsales actives qui forment la nouvelle croûte océanique au fond de ces deux mers. Avec principalement Paul Tapponnier et Isabelle Manighetti, nous en avons compris un peu mieux le mécanisme intime : les deux extrémités des dorsales de la mer Rouge et du golfe d'Aden se propagent par à-coups à travers la croûte de la grande dépression Afar en direction l'une de l'autre (à des vitesses qui vont de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres par an) et tentent de se rejoindre. Mais pour l'instant, elles se sont « ratées », cette jonction tectonique ne s'est pas encore établie : ce sera sans doute chose faite dans quelques millions d'années de sorte qu'un grand océan, continu, pourra s'ouvrir entre Afrique et Arabie, futur océan Atlantique de ces contrées.

Pourquoi donc cette région est-elle située au-dessus de l'eau (ou à peine en dessous, comme le lac salé d'Asal) et non par plus de 2 000 mètres de fond ? Parce qu'un point chaud lui tient la tête hors de l'eau. Ce point chaud est encore pratiquement situé à l'aplomb du coude de la future dorsale mer Rouge-Aden, là où un troisième rift, le grand rift africain, rejoint les deux précédents. Il s'agit donc d'une zone de grande complexité, où sont mélangés des signaux tectoniques et chimiques qu'il n'est pas simple de démêler. De plus, ce point chaud est relativement récent. Nous verrons plus loin qu'il est sans doute né il y a 30 millions d'années, ce qui en fait le plus jeune de tous. Et depuis ce temps, la plaque africaine est restée relativement immobile au-dessus de sa source, qui n'a donc pas encore pu créer de chaîne linéaire de volcans.

Un autre point chaud, le volcan actif de Tristan da Cunha dans l'Atlantique Sud, a connu une histoire semblable, quoique son expression actuelle soit moins spectaculaire. Il a donné naissance à la longue chaîne des monts sous-marins de Rio Grande sous la plaque Amérique du Sud, et à la chaîne de Walvis sous la plaque Afrique. Les âges mesurés sur des roches draguées et forées sur les volcans de la chaîne de Walvis s'échelonnent entre 30 et 115 millions d'années. Ceux obtenus de l'autre côté, sur la chaîne de Rio Grande, sont moins nombreux mais compatibles (de l'ordre de 90 à 110 millions d'années). Le point chaud de Walvis est longtemps resté situé sous la dorsale, comme dans le cas de l'Islande,

traçant ainsi deux chaînes approximativement symétriques, mais il s'est fixé sous l'Afrique depuis quelques dizaines de millions d'années et la trace américaine est donc interrompue.

Arrêtons là pour l'instant notre tour des grands points chauds. On en a reconnu une quinzaine à la surface du globe : on peut ajouter les noms des Galapagos, de Kerguelen, des Açores, des îles Canaries et des îles du Cap Vert, de Sainte-Hélène, Bouvet (dans l'Atlantique Sud), Prince Edward, etc. Dans un article de 1972, Morgan en compte 19. Mais rapidement, les « géoscientifiques » se passionnent pour ces intrus de la tectonique des plaques et chacun veut déceler, dans son volcan ou même sa zone géothermique favorite, la signature d'un point chaud et d'un panache profond. En 1973, le « père fondateur » Tuzo Wilson en dénombre 66 ; en 1980, Crough et Jurdy en dénombrent 42 et en 1981 Vogt croit en trouver 117. Le record sera sans doute atteint par Kevin Burke avec près de 400 points chauds, nombre d'entre eux étant situés sous l'Afrique.

La plupart des listes édifiées au cours de la dernière décennie en proposent 30 à 40. Tous ces points chauds ne semblent pas être de la même espèce ; Jason Morgan propose d'y voir les représentants d'au moins deux familles, d'origine (en profondeur) et de dynamique sans doute distinctes. Tous n'ont pas le même volume, ni la même activité, ni la même histoire. Certains ne sont reliés à aucun alignement de volcans sous-marins éteints, et certaines chaînes sont peu ou mal datées. Excédés par cette « course aux points chauds », des géophysiciens, en tête desquels un grand sismologue américain, mon ami Don Anderson, en viennent à moquer ce qui ne serait qu'un effet de mode et à rejeter en bloc l'existence même de points chauds profonds, estimant que la tectonique des plaques permet d'expliquer toutes les formes que revêt le volcanisme sur Terre. Nous verrons plus loin que beaucoup de ces trop nombreux candidats sont bien d'origine plus superficielle, voire même inexistants, comme le pense Don Anderson. Mais pas tous...

Chapitre 7

POINTS CHAUDS, « TRAPS » ET DÉCHIRURE DES CONTINENTS

« Cette île [l'Islande], si curieuse, est évidemment sortie du fond des eaux à une époque relativement moderne. Peut-être même s'élève-t-elle encore par un mouvement insensible. [...] Avant l'existence des volcans, elle était faite d'un massif trappéen, lentement soulevé au-dessus des flots par la poussée des forces centrales. [...] Mais, plus tard, une large fente se creusa diagonalement du sud-ouest au nord-est de l'île, par laquelle s'épancha peu à peu toute la pâte trachytique. [...] grâce à cet épanchement, l'épaisseur de l'île s'accrut considérablement, et par suite sa force de résistance. [...] Il arriva donc un moment où la puissance mécanique [des] gaz fut telle qu'ils soulevèrent la lourde écorce et se creusèrent de hautes cheminées. [...] Alors aux phénomènes éruptifs succédèrent les phénomènes volcaniques. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Nous avons vu qu'un certain nombre de points chauds, parmi les plus puissants et les plus continus, forment de longues chaînes de volcans, parfois sur plusieurs milliers de kilomètres, dont la formation s'est poursuivie sur des dizaines de millions d'années. Nous avons ainsi remonté la trace du point chaud d'Hawaï jusqu'à 70 millions d'années, celle du point chaud de la Réunion jusqu'à 60 millions d'années, celle du point chaud de Tristan da Cunha jusqu'à 115 millions d'années, celle du point chaud d'Islande jusqu'à 55 millions d'années... Nous sommes pour l'instant restés au fond des océans. Que trouve-t-on « en amont » des plus anciens volcans sous-marins cartographiés ?

Commençons par les archipels allongés des îles Chagos, Laquedives et Maldives que nous avons laissées à proximité des

côtes occidentales de l'Inde, au sud de Bombay. En accostant sur l'étroite plaine côtière, nous faisons face à une falaise massive, parallèle à la côte et qui culmine à plus de 1 700 mètres d'altitude dans les Western Ghats. Elle est constituée d'un empilement de couches massives, brunâtres à rougeâtres, plus ou moins altérées (Figure 7-1). Au premier coup de marteau, le géologue identifie là des basaltes (de composition légèrement variable, mais principalement tholéitique, proche de celle de la croûte océanique) ; il ne peut que s'étonner de l'épaisseur de cette succession de gigantesques coulées volcaniques le long de la route en lacets vers la station climatique de Mahabaleshwar. Située en haut de la falaise, sur le plateau, cette ravissante petite ville était un lieu de repos des colons britanniques. L'altitude y garantit une fraîcheur bienvenue quand l'atmosphère devient irrespirable en bas, sur la côte et dans la grande ville de Bombay. Si l'on poursuit la route vers l'est, l'altitude décroît plus doucement et l'on retrouve la plaine basse, après des centaines de kilomètres. Partout, si l'on creuse sous les sols accumulés par l'érosion tropicale, on retrouve le basalte, qui affleure encore çà et là sur des buttes témoins. Le même paysage, la même géologie se retrouvent à des centaines de kilomètres au Nord et au Sud. À cette immense étendue de basalte, on a donné le nom de « trapps du Deccan ». Les premiers explorateurs occidentaux ont tous été frappés par la façon dont l'érosion découpait en « marches d'escalier » la succession des puissantes coulées. Pour Faujas de Saint-Fond¹, c'est en Suède que « les premiers trapps ont été connus et décrits ; [...] souvent cette pierre est divisée en table ou en feuillet plus ou moins épais, qui offrant dans quelques circonstances, des espèces de marches ou de gradins, ont donné lieu aux Suédois de la nommer *trapp* ou *trapas*, "escaliers" ». Les Indiens eux-mêmes avaient évidemment été frappés par cette ressemblance : ils ont donné le nom de « Ghâts » à la grande falaise qui court parallèlement à la côte sur des centaines de kilomètres et culmine vers Mahabaleshwar. Le terme « Ghâts » est utilisé pour les longs quais faits de degrés superposés qui bordent de nombreux fleuves du sous-continent. Le plus majestueux des Ghâts est bien celui qui fait face à la mer d'Arabie.

1. M. Faujas de Saint-Fond, *Essai sur l'histoire naturelle des roches de trapp*, Paris, rue et hôtel Serpente, 1788, 160 p.

Quel est donc le volume total de laves épanché dans le Deccan ? Les falaises ne révèlent pas instantanément leur épaisseur. La cartographie géologique, notamment la mesure des pentes des coulées, le permet. Ces pentes (que les géologues appellent « pendage ») sont très faibles, pratiquement invisibles à l'œil nu, presque partout inférieures à une petite fraction de degré. Mais, cumulées sur de très grandes distances, elles représentent des dénivelés importants pour une couche donnée. C'est ainsi qu'on peut estimer à plus de 3 000 mètres l'épaisseur de la pile volcanique, à plus de 500 000 kilomètres carrés sa surface actuelle et à un demi-million de kilomètres cubes au moins son volume restant. Pourquoi « restant » ? Parce que 65 millions d'années d'érosion tropicale, très intense, ont dissous et arraché une grande partie du matériau d'origine, l'ont transporté par le réseau des rivières et des fleuves et l'ont déchargé dans l'océan où il s'est redéposé. On a pu estimer que le volume d'origine des laves pouvait dépasser 2 millions de kilomètres cubes. Imaginez la France recouverte de 4 000 mètres de basalte et vous commencerez à prendre conscience de l'énormité de cet objet géologique.

Pour mesurer son rôle dynamique, il est nécessaire de savoir combien de temps ce magma a mis pour s'épancher à la surface du Deccan. Cette quête est en soi une aventure. Elle mène de proche en proche à l'énigme que constitue l'extinction des dinosaures, il y a 65 millions d'années². Jusqu'au début des années 1980, cette durée avait été estimée à partir de restes fossiles retrouvés dans les sédiments situés soit au-dessous, soit au-dessus des laves, soit parfois pris « en sandwich » entre deux coulées. Des datations avaient aussi été obtenues, mais les incertitudes étaient grandes sur ces roches trop souvent altérées. Les estimations allaient de 20 à 80 millions d'années, en tout cas une durée longue (même aux yeux du géologue). Nous nous sommes attaqués au problème vers 1985, rassemblant une équipe où se côtoyaient géophysiciens, géochimistes et paléontologues. En 1985, nous³ avons multiplié les observations paléomagnétiques, paléontologiques et géochronologiques et conclu, à notre grand étonnement, que l'âge des traps du Deccan était de

2. Je l'ai racontée dans *La Vie en catastrophes* et je ne ferai qu'en résumer certains aspects ici, et dans la suite de ce livre.

3. Jean Besse, Didier Vandamme, Raymond Montigny, Jean-Jacques Jaeger, Henri Cappetta et moi-même.

65 millions d'années, l'âge de la fameuse « crise Crétacé-Tertiaire », au cours de laquelle ont disparu de très nombreuses espèces (environ 65 % de celles qui vivaient alors) dont les dinosaures, et que la durée de l'éruption n'avait pas dû excéder un million d'années. Nous avons même imaginé qu'elle pouvait s'être concentrée en quelques épisodes beaucoup plus courts et encore plus violents⁴.

Cela signifiait que les traps du Deccan avaient pu émettre plusieurs millions de kilomètres cubes de lave en moins d'un million d'années, donc à un taux moyen de plusieurs kilomètres cubes par an. Pour comparaison, le volume total de croûte basaltique créé chaque année le long des 50 000 km de dorsales qui courent au fond de l'océan mondial est de l'ordre d'une vingtaine de kilomètres cubes. Un seul site volcanique avait donc pu atteindre 10 % de la production de toutes les dorsales du monde réunies !

Bien que ce soit encore discuté, il ne semble pas y avoir de trace de volcanisme important plus vieille que les traps du Deccan, notamment plus au nord⁵. Le long épisode volcanique qu'est l'existence du point chaud de la Réunion a donc commencé par une éruption gigantesque, plusieurs ordres de grandeur⁶ au-dessus de tout volcanisme observé de mémoire humaine, il y a 65 millions d'années. Le panache qui a produit ensuite les îles Maldives, Laquedives, Chagos, une partie des Mascareignes, l'île Maurice, puis enfin la Réunion était de beaucoup plus petit débit et le volume total des îles volcaniques qu'il a engendrées très inférieur à celui produit sous la forme des traps lors de sa naissance. On peut replacer l'Inde dans la position géographique qu'elle occupait au moment de l'éruption des traps. L'outil principal qui permet de reconstruire ces géographies du passé (et donc de vérifier la théorie de la dérive des continents) est le paléomagnétisme. Comme il s'agit de ma discipline favorite en géophysique et de mon « métier » principal, on me pardonnera de m'y attarder un peu. Et ce d'autant que cette discipline est loin d'avoir reçu la pleine reconnaissance de sa contribution à la démonstration de la tectonique des plaques et de la dérive des continents.

4. Nous avons précisé et confirmé ces résultats dans la revue *Nature* en 1988 avec Gilbert Féraud, Henri Maluski et Marie-Gabrielle Moreau.

5. Mais certains géologues ont identifié quelques restes de laves de plus de 70 millions d'années qu'ils pensent pouvoir raccorder au Deccan...

6. Rappelons que nous utilisons ici le terme d'ordre de grandeur dans son sens mathématique de puissance de 10.

Le paléomagnétisme déchiffre la « mémoire magnétique » que conservent les roches de leur position au moment où elles ont été formées. Ce sont de véritables boussoles, et même mieux que cela. Elles permettent de retrouver la direction complète et parfois même l'intensité des champs magnétiques du passé. Quand de la lave sort de la bouche d'un volcan, sa température est de l'ordre de 1 000 °C. À cette température, la roche est totalement désaimantée. Mais elle renferme presque toujours une petite quantité (quelques pour cent) d'un oxyde de fer bien particulier, la magnétite. Et cette dernière a la propriété de s'aimanter dans un champ magnétique, en l'occurrence dans le champ magnétique propre de la Terre, quand sa température descend en dessous d'une certaine valeur, de l'ordre de 600 °C. Pierre Curie a étudié ce phénomène à la fin du XIX^e siècle : cette température critique a donc été baptisée en son honneur « température de Curie ». Parvenu à la température ambiante, le fragment de lave est devenu un aimant permanent, capable (si on ne le dérange pas trop, c'est-à-dire si on ne le réchauffe ou ne l'altère pas trop) de garder en lui cette information pendant des centaines de millions, voire des milliards d'années.

Pour que le fragment de lave aimantée nous livre un message compréhensible, il faut que le champ magnétique dans lequel il a été aimanté ait une organisation géométrique simple et connue. C'est bien le cas de la Terre, dotée d'un champ magnétique qui trouve son origine dans les chaudrons en fusion du noyau. Nous poursuivrons plus tard notre descente vers son royaume. Il nous suffit pour le moment de savoir que ce champ existe et que, comme l'ont imaginé William Gilbert et Guillaume le Nautonier à la fin du XVI^e siècle, ce champ ressemble fort à celui d'un barreau aimanté qui aurait été placé au centre de la Terre et qui serait approximativement aligné avec son axe de rotation. Les lignes de force de ce champ magnétique (celles qu'on peut visualiser avec de la limaille de fer dans une expérience que beaucoup de collégiens et de lycéens ont pu pratiquer) s'organisent de façon assez simple : elles sont verticales près des pôles, horizontales à l'équateur, et présentent aux autres latitudes toutes les valeurs intermédiaires de l'inclinaison, c'est-à-dire de l'angle que fait la direction du champ magnétique avec l'horizontale. Une formule mathématique assez simple relie latitude et inclinaison, et permet de calculer l'une quand on connaît l'autre. Ainsi, à Paris, à une latitude de l'ordre de 45° Nord, l'inclinaison magnétique est proche de 65°. Si un volcan

surgissait aujourd'hui sous Paris, ses laves s'aimanteraient avec cette inclinaison. La France dérivant dans le futur pendant des dizaines de millions d'années, on pourrait retrouver la latitude à laquelle s'était formée notre lave en mesurant l'inclinaison, fidèlement préservée en elle. Les sédiments conservent également la direction du champ au moment où les particules qui les composent se consolident après avoir été enfouies (c'est ce que les géologues appellent la « diagenèse »). Et les paléomagnéticiens sont dotés d'instruments, les magnétomètres, sans cesse en cours de perfectionnement, qui leur permettent de détecter et de mesurer précisément les aimantations fossiles, rémanentes, même très faibles. Cette opération paraît à beaucoup si miraculeuse que nos collègues géophysiciens, géologues et géochimistes nous surnomment parfois « paléomagiciens ». C'est en appliquant cette méthode, avec des instruments beaucoup moins sensibles et précis qu'aujourd'hui et sur des échantillons peu nombreux et datés de manière encore assez fruste, que les « pères fondateurs », Keith Runcorn, Ken Creer et Ted Irving (deux Britanniques et un Canadien) ont démontré la réalité de la dérive des continents au milieu des années 1950, près de dix ans avant que les observations des géophysiciens marins n'en convainquent la communauté.

Des dizaines d'années plus tard, les données sont devenues très nombreuses et les compilations qui en sont faites permettent de reconstituer le ballet des continents. Jean Besse et moi-même en avons proposé plusieurs, et Jean en a tiré dès la fin des années 1980 un dessin animé qu'on peut trouver sur le site Internet de l'Institut de physique du globe de Paris⁷. Nous voici en état de revenir à l'Inde, au Deccan et aux Seychelles. Il y a 65 millions d'années (Figure 7-2), Inde et Seychelles étaient encore collées, soudées en un continent unique séparé de Madagascar quelque 20 millions d'années auparavant et dérivant rapidement vers le nord à travers l'ancêtre de l'océan Indien. Au moment où le Deccan « passe » vers 30° de latitude Sud se produit la gigantesque éruption des traps. L'épaisse et ancienne croûte et même la totalité de la lithosphère indienne s'en trouvent affaiblies, échauffées, amincies, fondues par endroits. Sous les contraintes qu'exercent les plaques voisines, que leurs zones de subduction tirent vers le manteau plus profond, elle se casse en deux morceaux. Le princi-

7. <http://www.ipgp.jussieu.fr/>

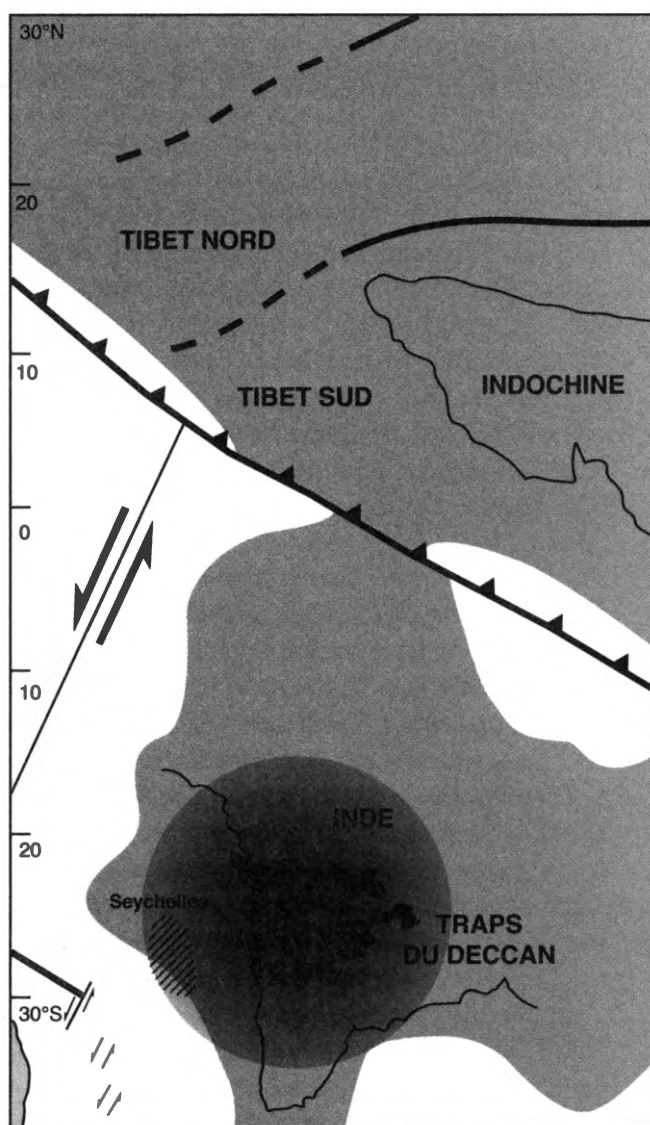


Fig 7-2 : Position de l'Inde, des Seychelles et de l'Asie au moment de l'éruption des traps, il y a 65 millions d'années environ. L'étendue de l'Inde continentale vers le nord est encore mal connue. Pour certains (Jean-Jacques Jaeger et coll.), le contact de l'Inde et de l'Asie s'amorce dès cette période. Il n'est frontal et généralisé qu'à 50 millions d'années.

pal, l'Inde, poursuit son chemin vers le nord. La cassure est aujourd'hui reflétée par la longue côte linéaire de l'Inde qui fait face à la mer d'Arabie. Le grand escarpement des Western Ghats, la longue falaise qui borde les traps dans la province de Mahabaleshwar, lui est parallèle et en est aussi le témoin. De l'autre côté, vers le sud-ouest, s'est formé un petit continent qui a dérivé et est passé sous le niveau des eaux, presque partout. Ce radeau continental, c'est le plateau des Seychelles (et le banc de Sala y Gomez) qui n'émerge plus que dans les quelques îles granitiques⁸ de cet archipel. Entre Inde et Seychelles s'est ouvert depuis 60 millions d'années un bras d'océan nouveau, la mer d'Arabie. Nous voyons là un premier exemple d'association entre éruption des traps et déchirure des continents.

Combien existe-t-il à la surface terrestre de ces objets géologiques monstrueux (par la taille) et étranges dont nous venons de rencontrer le premier exemple avec les traps du Deccan ? Sont-ils aussi associés à la trace des points chauds ? Et à la rupture des continents ? En descendant d'Addis Abbaba vers la grande dépression de l'Afar, vers la république de Djibouti et la Somalie, on ne peut qu'être frappé par la ressemblance avec les paysages géologiques des traps du Deccan le long de la route en lacets de Mahabaleshwar. Même épaisse succession de coulées basaltiques, mêmes teintes, mêmes splendides paysages escarpés. La capitale de l'Éthiopie est située à 2 000 mètres d'altitude, sur un haut plateau au climat relativement clément comparé à celui, torride, qui règne dans la dépression à plus de 2 km en contrebas. Ce plateau n'est rien d'autre qu'un grand trap. Il était tentant d'y poser les mêmes questions qu'en Inde, et d'appliquer nos méthodes sur de nouvelles collections d'échantillons. Des équipes franco-éthiopiennes n'y ont pas résisté ; parmi les Français, un de mes brillants anciens étudiants, aujourd'hui professeur à l'université d'Aix-Marseille, Pierre Rochette, et une étudiante dont c'était en partie le sujet de thèse, Corinne Hofmann. À nouveau, paléomagnétisme et géochronologie nous apportent la réponse étonnante : les traps d'Éthiopie se sont formés en quelques centaines de milliers d'années seulement, il y a 30 millions d'années. Leur composition est plus variée qu'en Inde. Notamment, vers leur partie supérieure, ils comprennent des

8. Des îles granitiques et non basaltiques au milieu d'un grand océan, c'est rare... et c'est justement la signature d'un fragment de croûte continentale.

laves acides, très explosives et donc plus susceptibles *a priori* que les basaltes de destructions importantes et capables d'expédier au loin leurs fragments.

La carte topographique des environs de la jonction entre mer Rouge et golfe d'Aden (Figure 6-3) met en évidence, peut-être plus clairement encore que les formes grossièrement parallèles des côtes, l'existence et la congruence de trois plateaux basaltiques élevés. À l'est du plateau éthiopien, le plateau somalien, de l'autre côté du grand rift africain qui les sépare. Et au nord du détroit de Bab-el-Mandeb, le petit plateau du Yémen. On a retrouvé les mêmes roches dans les trois, les mêmes successions de laves, les mêmes âges. Et, si l'on referme par la pensée les bras de mer et l'ensemble de la dépression Afar, les trois plateaux s'ajustent parfaitement pour n'en former plus qu'un aux contours beaucoup plus réguliers. De nombreuses équipes, françaises, italiennes et britanniques en particulier, ont multiplié les missions sur le terrain, depuis les golfes de Suez et d'Aqaba au Nord jusqu'au sud du grand rift africain. Certes, tous les problèmes ne sont pas encore élucidés et tous les spécialistes pas toujours d'accord. Mais, il y a une vingtaine d'années, avec Paul Tapponnier et Rolando Armijo, puis plus récemment avec le travail de thèse considérable d'Isabelle Manighetti, aidés par les résultats de nombreuses campagnes océanographiques, nous avons précisé l'âge et les modalités de formation des trois grandes branches de rift qui se rejoignent en Afar. La relation entre traps, point chaud, panache et ouverture des continents paraît indiscutable. Peu après l'éruption des traps, il y a 30 millions d'années, comme dans le cas de l'Inde et des Seychelles, mais à une échelle beaucoup plus imposante, l'Afrique a commencé à se déchirer. D'abord le long de l'actuel rift est-africain, qui se poursuivait tout le long de ce qui est aujourd'hui la mer Rouge.

Cette première phase d'ouverture n'a pas été couronnée de succès (le succès étant ici l'ouverture d'un océan nouveau). Mais le flambeau a été repris par la dorsale de l'océan Indien, précisément celle qui s'était créée lors de la rupture de l'Inde et des Seychelles. Cette dorsale était auparavant reliée vers le nord par une grande faille transformante, la faille d'Owen, à la zone de subduction et de collision entre l'Inde et l'Asie. La compréhension de cette grande collision est l'œuvre majeure de Paul Tapponnier qui a parcouru les hauts territoires sans relâche depuis un quart de siècle et qui

en a magistralement déchiffré les étapes. Dans un premier temps (entre 50 et 20 millions d'années), l'Inde a d'abord écrasé puis chassé devant elle et éjecté vers l'est puis le sud-est l'ensemble de la péninsule indochinoise. Le coulisement se produisait le long de la grande faille du fleuve Rouge (aujourd'hui vers la frontière de la Chine et du Vietnam), jusqu'à ce que celle-ci se déforme au point de ne plus permettre le mouvement et de se bloquer, il y a une vingtaine de millions d'années. Principal résultat de ce blocage, la propagation vers le nord du haut plateau tibétain. Conséquence secondaire, le blocage de la faille d'Owen en mer d'Arabie. C'est alors que l'extrémité de la dorsale indienne a commencé à se propager et à pénétrer dans le golfe d'Aden (à le créer, tout simplement). La déchirure de la mer Rouge a été réactivée, et la faille du Levant s'est mise en place, connectant la nouvelle frontière de plaque avec les grandes failles de la Turquie. La plaque Arabie venait de naître et de se détacher de sa « mère » africaine. Cette seconde phase d'ouverture a été couronnée de succès. Mer Rouge et golfe d'Aden s'ouvrent à la vitesse de un à deux centimètres par an depuis une quinzaine de millions d'années. Nous avons déjà vu que les deux déchirures ne se sont pas encore rencontrées en Afar, où elles se propagent en jouant à cache-cache. Mais la déchirure devrait bientôt être effective, l'Afar plonger sous le niveau des mers et un nouveau grand océan éloigner toujours plus Arabie et Afrique.

Il se trouve que la plaque africaine bouge assez peu par rapport au manteau. Les traces de la naissance du point chaud de l'Afar (les plateaux-traps d'Éthiopie, de Somalie et du Yémen), sa position actuelle (sous la dépression, qu'il permet de maintenir pour l'essentiel hors de l'eau) et le point de rencontre des trois grands rifts, africain, Aden et mer Rouge, sont donc tous situés dans un voisinage étroit. Plus encore que dans le cas du Deccan, cela met en pleine lumière l'étroite association entre la naissance d'un trap et la déchirure d'un continent.

Quand on s'approche par l'est de la côte du Groenland, on est impressionné par les imposantes falaises rocheuses que dresse le continent glacé face à la mer. Si le climat ne rappelle bien sûr en rien les chaleurs de l'Inde ou de l'Éthiopie, le géologue lui ne peut qu'être frappé par la ressemblance entre les roches de ces trois régions. Les falaises du Groenland sont un empilement de basaltes, sur plus de 3 000 mètres d'épaisseur. Ces basaltes affleurent de

manière beaucoup plus réduite sur la côte occidentale et l'on est tenté de connecter les affleurements de l'est et de l'ouest du Groenland « par en dessous ». Notre connaissance de la géologie de ses soubassements est cependant limitée, pour des raisons évidentes. Mais il est possible qu'une grande partie du sol qui porte la glace soit un grand trap basaltique. Des équipes britanniques, islandaises et américaines ont daté ces roches. Le même scénario émerge à nouveau – un volcanisme massif, brutal à l'échelle des temps géologiques, c'est-à-dire durant moins d'un million d'années, il y a 60 millions d'années. C'est précisément l'âge de l'ouverture de cette partie nord de l'océan Atlantique. Si l'on referme cet océan, on trouve en face du Groenland (c'est-à-dire de la plaque Amérique du Nord) les rebords continentaux des îles britanniques et de la Norvège (c'est-à-dire la plaque eurasiatique). Et le volcanisme du nord de l'Irlande, de l'Angleterre et de l'Écosse est bien connu ; il a même été l'un des objets d'étude des fondateurs de la géologie aux XVIII^e et XIX^e siècles. Qui ne connaît la « chaussée des géants » en Irlande du Nord, ou les îles volcaniques de Rhum et de Skye au large de l'Écosse ? Ce volcanisme a été daté : il a le même âge qu'au Groenland (on a distingué deux épisodes volcaniques, l'un vers 60 et le second vers 55 millions d'années). Et ces deux restes de traps, celui de l'Est très imposant, celui de l'Ouest plus réduit, sont situés aux extrémités des chaînes volcaniques construites par le point chaud d'Islande. Celui-ci est donc né il y a 60 millions d'années et le continent sur lequel il venait d'épancher ses laves s'est fracturé, pour donner naissance au bassin de l'Atlantique Nord.

Nous avons maintenant un fil conducteur. Tournons nos yeux vers le sud de l'Atlantique, par exemple vers l'extrémité de la chaîne de volcans sous-marins tracée par le point chaud de Tristan da Cunha sur la plaque sud-américaine, la chaîne du Rio Grande (à ne pas confondre avec le fleuve nord-américain du même nom). Masqué en partie, non pas par la glace, mais cette fois par la végétation tropicale, nous trouvons un vaste plateau basaltique, comme on aurait désormais presque pu l'attendre. C'est le plateau du Parana, situé pour l'essentiel au sud du Brésil. Le plateau est entamé par les célèbres chutes de l'Iguaçu, à la triple rencontre des frontières du Brésil, du Paraguay et de l'Uruguay, qui exposent une haute falaise entaillée par les eaux dans les coulées basaltiques. Le climat tropical et sa végétation ont fortement altéré ces

traps qui ont été difficiles à dater. Quelques années après nos premiers travaux sur le Deccan, des équipes brésilienne, américaine et française (avec notamment mes collègues et amis « paléomagiciens » Marcia Ernesto, Robert Coe et Michel Prévot), s'y sont attaquées. Leurs résultats, difficiles à interpréter, semblaient confirmer un épisode volcanique assez brutal. Et de l'autre côté de l'Atlantique ? La chaîne « miroir » de Rio Grande, celle à laquelle a été donné le nom de Walvis, pointe vers l'Afrique, vers la Namibie où affleure un petit plateau basaltique, épais, dans lequel on a également pu reconnaître les restes d'un trap. Ces « traps d'Etendeka » ont été étudiés par Jonathan Glen⁹, et datés par Paul Renne, à l'aide de l'argon. Ces traps ont l'avantage de n'avoir connu qu'un climat sec depuis leur formation : ils sont merveilleusement conservés et très peu affectés par l'altération. Leur âge est de 133 millions d'années et la durée du volcanisme y est, une fois encore, de l'ordre du million d'années. Les travaux d'équipes britanniques ont donné une fourchette d'âges pour les traps du Parana allant de 145 à 130 millions d'années ; ceux de Paul Renne ont donné un intervalle beaucoup plus réduit de 1 ou 2 millions d'années autour de 133-134 millions d'années. La controverse à ce sujet n'est pas totalement close, mais tout converge pour indiquer que le plus gros du volume des traps (de l'ordre du million de kilomètres cubes) a été émis en guère plus d'un million d'années, et que l'âge des traps du Parana et d'Etendeka est le même. Ce sont tout simplement deux fragments, le premier de taille considérable, le second plus modeste, du même trap, à travers lequel s'est ouvert l'océan Atlantique Sud qui l'a coupé en deux morceaux inégaux.

Quand notre équipe a commencé ses travaux, qui ont mis en évidence la brièveté du volcanisme des grands traps, leur liste se bornait à une petite dizaine de cas. Et l'on ne décrivait aucun trap de part et d'autre de l'océan Atlantique central, notamment le long des côtes orientales de l'Amérique du Nord et occidentale de l'Afrique. Pourtant, des points chauds importants avaient été mis en évidence au large de l'Afrique : îles Canaries et îles du Cap Vert. Certains voulaient donner le même statut du côté américain à l'archipel/plateau des Bermudes, dont la profondeur anormalement faible au vu de son âge laissait soupçonner la présence d'une

9. Étudiant de Rob Coe, puis post-doctorant dans notre laboratoire, aujourd'hui chercheur à l'US Geological Survey et à Berkeley.

force dirigée vers le haut, typique d'un panache. La côte est des États-Unis est en fait formée d'une série de bassins effondrés, analogues par exemple au graben¹⁰ dans lequel coule le Rhin entre Vosges et Forêt Noire, et remplis de sédiments. Le remplissage de ces rifts, comme celui de Newark situé immédiatement à l'ouest de New York, a été étudié en surface, foré, daté depuis plus d'une décennie. Quand, sortant par le nord-ouest de l'île de Manhattan, vous vous engagez sur le pont suspendu qui relie l'île au continent (le Washington Bridge), vous dominez la vallée encaissée de l'Hudson et faites face à une falaise sombre où l'on distingue nettement par endroits des orgues basaltiques, ces longs prismes verticaux formés lors du refroidissement de la lave. Cet aspect a fait nommer la falaise « *palisades* » (en anglais) : c'est la tranche exposée par le fleuve d'un vaste ensemble volcanique contemporain de l'ouverture de l'océan Atlantique... Ces rifts (qui ne sont rien d'autre que des déchirures de la croûte) se sont formés il y a environ 200 millions d'années, près de la limite temporelle entre le Trias et le Jurassique. Près de la base de la pile de sédiments qui les remplissent, des basaltes. Ces séquences de roches ont été analysées par Paul Olsen et Dennis Kent, et elles ont précisément 200 millions d'années. L'observation de pollens fossiles a conduit le premier à annoncer en 1997 que ce volcanisme n'avait débuté que quelques dizaines de milliers d'années¹¹ après la grande coupure géologique entre Trias et Jurassique et n'avait duré que 600 000 ans. Dans les années qui ont suivi son travail, des restes d'affleurements basaltiques, parfois des coulées, d'autres fois seulement les filons (*dykes*) d'alimentation de coulées aujourd'hui disparues, rabotées par l'érosion, ont été découverts de plus en plus loin de Newark, vers le nord et le sud de la côte est américaine, puis de l'autre côté de l'Atlantique, dans de vastes régions d'Afrique de l'Ouest, notamment au Maroc, puis même au sud du Portugal et en Amérique du Sud, au Venezuela et en Guyane... Gilbert Féraud et Paul Renne, tous deux grands spécialistes de la méthode de datation par les isotopes de l'argon, ont partout retrouvé les mêmes âges voisins de 200 millions d'années. Or, il y a 200 millions d'années, l'Atlantique n'était pas encore ouvert. Quand on

10. Ou rift, ou fossé en français, mais ce sont les termes anglais et allemand qu'ont adoptés assez universellement les géographes.

11. Trente mètres seulement au-dessus, pour ce qui est des couches géologiques.

reconstitue la géographie de ce temps, les régions dans lesquelles ont été retrouvées les traces de ce volcanisme sont contiguës, la surface qu'elles délimitent est véritablement gigantesque. Ces traces sont cependant discrètes parce que l'essentiel du volcanisme a été effacé par l'altération et l'érosion. Au cours des dernières années, de nouvelles découvertes ont sans cesse accru la surface d'origine estimée pour ce trap, encore ignoré il y a seulement dix ans, pour atteindre aux dernières nouvelles 7 millions de kilomètres carrés ! Ce qui en fait le plus vaste trap du monde, ce qui ne veut pas forcément dire le plus gros dans la mesure où son épaisseur d'origine nous est inconnue et de vastes zones périphériques ont pu n'être recouvertes que d'épaisseurs modestes. À ce trap a été donné le nom peu original de « Province magmatique de l'Atlantique central » (Central Atlantic Magmatic Province, en abrégé CAMP).

De la description de ces trois derniers traps émerge une image aussi intéressante qu'élégante : la géographie actuelle de l'océan Atlantique garde la mémoire de l'émergence des trois grands points chauds qui ont entraîné la brisure de la Pangée de Wegener. Il y a 200 millions d'années, ce sont d'abord les traps de la CAMP qui entrent en éruption sur une surface énorme au cœur du vieux méga-continent. Celui-ci se déchire alors et le bassin de l'Atlantique central s'ouvre, formant la grande dorsale et les nombreuses failles transformantes dont nous pouvons encore aujourd'hui retrouver les « descendants » au cœur de l'océan sous des milliers de mètres d'eau. Soixante-dix millions d'années plus tard, c'est au tour de l'ensemble des traps Parana-Etendeka de surgir et de couvrir de vastes zones du continent Sud, qui se déchire à son tour pour donner naissance au grand bassin de l'Atlantique Sud, éloignant pour des dizaines, voire des centaines de millions d'années l'Amérique du Sud de l'Afrique. Encore 70 millions d'années, et c'est le point chaud d'Islande qui émerge avec les traps du Groenland et des côtes anglo-norvégiennes (les anglophones l'appellent aussi North Atlantic Tertiary Volcanic Province ou NATVP). Peu de temps après s'ouvre le bassin de l'Atlantique Nord. Trois traps, trois déchirures de continent, naissance de trois bassins océaniques nouveaux, brûlure des chaînes volcaniques qui rapidement s'enfoncent sous les flots (moins visibles dans l'Atlantique central que dans les bassins nord et sud) : trois séquences d'événements parallèles, semblables, trois événements brusques qui chacun, en

un million d'années environ, a changé pour longtemps la géographie du monde. L'Atlantique et sa forme actuelle, mémoire et produit de ces trois événements...

Nous avons l'œil de plus en plus aiguisé : retournons en Afrique du Sud, plus précisément dans la province du Karoo. Trois plateaux, en partie altérés et déchiquetés, exposent de grandes épaisseurs de laves basaltiques en Afrique du Sud, au Lesotho et en Namibie : les restes d'un trap daté de 183 millions d'années par Bob Duncan et plus récemment par Frédéric Jourdan, juste avant la rupture du continent Sud du Gondwana. Le petit royaume escarpé du Lesotho, totalement enclavé au sein de l'Afrique du Sud, dessine l'un des principaux affleurements de ces traps. Le refuge fourni par ses montagnes, qui culminent à plus de 3 300 mètres d'altitude, est la raison de la naissance et de la survie de ce royaume autonome. La lave s'y empile sur des sédiments vieux d'environ 200 millions d'années (fin du Trias et début du Jurassique), à partir d'une altitude de l'ordre de 1 500 mètres. Les coulées sombres s'étagent sur plus de 1 500 mètres d'épaisseur. Mais la surface recouverte par les laves, en gros celle du Lesotho, ne dépasse pas 30 000 kilomètres carrés, beaucoup moins que les traps géants que nous avons jusqu'ici visités.

Redescendons des hauteurs, passant, sous la conduite de Goonie Marsh, professeur à l'Université Rhodes de Grahamstown et grand connaisseur de la contrée, par le village de Rhodes (c'est le même Cecil Rhodes dont on a donné le nom à ces deux lieux distants) en direction du sud, de l'océan Indien. Des milliers de mètres de couches sédimentaires ont enregistré le passé de la Terre, depuis les grès et les quartzites ordoviciennes qui forment la célèbre montagne de la Table à laquelle s'adosse la ville du Cap, aux grès rouges du Trias, en passant par les roches noirâtres déposées lors des glaciations permo-carbonifères, vieilles de 300 millions d'années, de la formation Dwyka, qui avaient fourni à Wegener et à du Toit l'un de leurs arguments forts pour reconstruire la Pangée. Sur des dizaines de kilomètres, ces couches sédimentaires – mémoire de plus de 200 millions d'années – sont calmes, presque horizontales. Mais des reliefs étranges viennent les interrompre et modeler le paysage. Le plateau du Karoo laisse la place à un escarpement que la route traverse par une cluse ; on se retrouve alors dans une petite plaine circulaire entièrement ceinte d'une muraille volcanique qui l'isole de tous côtés. Un survol en

altitude révèle que la région est « pavée » de telles dépressions circulaires entourées d'un anneau volcanique plus escarpé. Ces anneaux sont des *sills*, de véritables soucoupes de lave injectées au sein des sédiments qui, refroidies et plus dures que les terrains qu'elles ont jadis traversés, ont été dévoilées par l'érosion. Le long de la route, de loin en loin, on découvre d'autres formations volcaniques : des discontinuités verticales, qu'on suit parfois dans le paysage sous forme de « murets » ou au contraire de dépressions linéaires sur des dizaines de kilomètres, interrompent les couches sédimentaires horizontales. Ce sont des filons, ou *dykes* qui remplissent d'immenses fissures au sein desquelles la lave s'est injectée. Une vaste partie du plateau du Karoo est sillonnée par ces dykes et ces sills, dont l'âge est précisément celui des monts du Lesotho. Partout, avant de s'épancher à la surface en puissantes coulées, la lave s'est injectée dans le soubassement qu'elle a « cuit » en partie. Mais presque partout, l'Afrique du Sud a été soulevée à des hauteurs insolites par un processus en provenance du manteau (nous verrons que c'est peut-être encore un panache !), les laves ont été portées à des hauteurs importantes et l'érosion a accompli son œuvre. On retrouve les mêmes laves loin du Lesotho, dans les collines de Lebombo qui marquent la frontière orientale de la célèbre réserve animalière de Kruger (c'est également la frontière entre Afrique du Sud et Mozambique), et dans la région de l'Okavango au Zimbabwe, gigantesque complexe de dykes qui s'étend sur plus de 1 000 km de long. Les prospecteurs de diamant de la compagnie minière de Beers les retrouvent encore sous les sables du désert du Kalahari, au Botswana et en Namibie.

On comprend alors que les laves du Karoo ont jadis recouvert plusieurs millions de kilomètres carrés, pour ne laisser comme trace la plupart du temps que dykes et sills qui trahissent la montée des laves. Leur volume devait se compter en millions de kilomètres cubes, sills et dykes « doublant la mise » littéralement. Et ce n'est pas tout... « En face », au sud, l'Antarctique, couvert de glace et encore (géologiquement) assez mal connu pour cette raison. Il est sillonné par une chaîne montagneuse, volcanique, de près de 4 000 km de long, la chaîne transantarctique, ou chaîne de Ferrar. La province de Ferrar a été datée avec précision : à 183 millions d'années, le même âge que les laves du Karoo. Dans cette province Karoo-Ferrar, une nouvelle fois, le volcanisme a été

massif (plus de 2 millions et demi de kilomètres cubes), brutal, sur un million d'années, et a précédé la rupture entre Afrique et Antarctique. Il est peut-être associé à la naissance des points chauds de Bouvet et de Prince Edward, aujourd'hui encore actifs sur la branche sud-ouest de la dorsale de l'océan Indien.

D'autres traps, de plus petite taille, ont été reconnus : ceux de Rajmahal, au nord-est de l'Inde, vieux de 115 millions d'années et sans doute liés à la naissance du point chaud de Kerguelen, qui a laissé comme trace dans l'océan Indien la « dorsale du 90° Est » (Figure 6-2) ; ceux de Madagascar, vieux de 88 millions d'années et associés à la rupture entre le continent qui allait comprendre l'Inde et les Seychelles d'une part, Madagascar d'autre part. Ceux de la rivière de Columbia, dans l'ouest des États-Unis, vieux de 16 millions d'années (le plus jeune et de loin le plus petit des traps, avec « seulement » 100 000 kilomètres cubes de volume), associé au point chaud responsable des manifestations géothermiques du parc de Yellowstone (dont le célèbre geyser « Vieux fidèle »).

Tous ces énormes objets volcaniques se sont épanchés sur des terres continentales, en général émergées. En rencontre-t-on également au fond des océans ? La réponse est venue de l'immense programme international de cartographie précise des fonds sous-marins IODP (International Ocean Drilling Program) entrepris depuis la Seconde Guerre mondiale et qui a fourni à la nouvelle tectonique des plaques certains de ses arguments clefs. Les fonds du Pacifique, nous l'avons vu, sont constellés de monts sous-marins. Dans le quart sud-ouest de l'océan domine un immense plateau, qui n'émerge pas et dont le toit culmine à une profondeur d'environ 2 000 mètres. Cette profondeur est anormalement faible en regard de son âge : 120 millions d'années. Ce plateau d'Ontong-Java est bien une énorme pile de basaltes et ressemble en de nombreux points à un trap (si ce n'est qu'il est immergé). Sa surface atteint 2 millions de kilomètres carrés et l'épaisseur de la croûte y dépasse 30 km. Il a été foré à plusieurs reprises par le *Joides Resolution*, le vaisseau spécialisé du programme IODP. Non seulement sa couverture sédimentaire, mais plus de 200 mètres de basaltes ont ainsi pu être échantillonnés. Ceux-ci sont relativement homogènes à l'échelle de tout le plateau. Mais Ontong-Java ne semble relié à aucun point chaud actif, par aucune chaîne de monts sous-marins, bien que certains mentionnent le point chaud de Louisville

comme une possibilité sérieuse. Les îles volcaniques des Antilles, dont la Guadeloupe et la Martinique, sont l'expression de surface de la subduction de la plaque nord-américaine sous la petite plaque Caraïbe. Une grande partie de cette petite plaque est située à une profondeur anormalement faible ; elle correspond à un grand plateau basaltique sous-marin daté de 90 millions d'années. Ontong-Java dans le Pacifique, Caraïbes dans l'Atlantique et Kerguelen dans l'océan Indien forment ainsi les trois plateaux basaltiques sous-marins majeurs. On réserve en général le nom de « traps » aux formations continentales ; on les regroupe avec les plateaux sous-marins sous l'expression « grandes provinces ignées » (en anglais Large Igneous Provinces, ou LIP). Je garderai par commodité le nom de « trap » pour les désigner tous.

Comment se fait-il que nous ayons pu identifier une dizaine de traps continentaux mais seulement trois océaniques, alors que les océans recouvrent près des deux tiers de la surface terrestre, soit deux fois plus que les continents ? S'ils marquent la naissance de points chauds, si ces points chauds sont associés à des panaches profonds, si ces panaches profonds sont bien des instabilités de la convection du manteau qui se produisent de manière aléatoire mais *a priori* uniforme, on pourrait donc penser en rencontrer deux fois plus sous les océans que sous les continents. Ce serait une erreur : il ne faut pas oublier que les océans sont jeunes, alors que certains continents sont très vieux. Le plus vieux fond océanique n'a pas plus de 180 millions d'années et l'âge moyen de la lithosphère océanique est de 60 millions d'années. Les surfaces jeunes sont beaucoup plus étendues que les vieilles, dont une partie importante a été résorbée dans les zones de subduction. Nous vérifierons bientôt qu'il s'est formé en tout et pour tout une dizaine de traps dans les derniers 300 millions d'années, soit environ un tous les 30 millions d'années. L'âge moyen de l'océan nous conduit donc à en attendre seulement deux ou trois, ce qui est bien l'ordre de grandeur observé. Les continents, en revanche, ne replongent pas dans le manteau et conservent la mémoire des éruptions massives qui les ont affectés depuis des milliards d'années, même si l'érosion finit parfois par en effacer les parties les plus superficielles.

Nous avons reculé jusqu'à 200 millions d'années ; tentons de remonter encore plus loin dans le passé. Il nous reste un trap majeur à découvrir, celui qui recouvre une grande partie de la

Sibérie (Figure 7-3). À l'est de la grande chaîne des monts de l'Oural s'étend la Sibérie ; cette chaîne court grossièrement le long du méridien 60° Est et a achevé de se former il y a environ 250 millions d'années. Au-delà du vaste bassin du Kazakhstan, une immense étendue volcanique bordée de riches ressources minières, du lac Baikal au Sud vers 50° de latitude à la péninsule de Taymir au Nord vers 70 °N, de Noril'sk à l'Ouest jusqu'à l'est de Yakutsk sur plus de 30° de longitude. À perte de vue, sur des centaines de milliers de kilomètres carrés, s'étendent les traps de Sibérie, épaisses séries basaltiques posées sur un ensemble sous-jacent de roches acides, pyroclastiques, restes d'anciennes et puissantes éruptions explosives. Si le noyau central ne couvre « que » 400 000 kilomètres carrés, des réseaux de filons d'alimentation de coulées volcaniques aujourd'hui disparues, effacées par l'érosion, couvrent une surface encore plus grande. De plus, sous la plaine du Kazakhstan à l'Ouest, des forages profonds ont rencontré des laves sous des milliers de mètres de sédiments. Cette découverte relativement récente double la surface estimée de la province volcanique. Le volume originel des laves dépasse largement les trois millions de kilomètres cubes et pourrait en avoir atteint cinq. Les traps de Sibérie ont été datés à partir de 1991 avec des méthodes diverses, complémentaires. Tant les isotopes de l'argon (Paul Renne et, dans notre laboratoire et celui de Gilbert Féraud, Corinne Hofmann) que ceux de l'uranium et du plomb (Ian Campbell) convergent vers un âge de 250 millions d'années et une durée totale de moins d'un million d'années. Comme les traps du Karoo ou d'Éthiopie, ceux de Sibérie ont une importante composante de laves acides, dont l'éruption a dû se faire de manière très explosive, à côté des épanchements basaltiques beaucoup plus calmes. À ce volcanisme sont associés de nombreux gisements minéraux d'intérêt économique majeur, déposés par les fluides volcaniques enrichis d'éléments dissous dans les roches encaissantes traversées ou provenant du magma lui-même. C'est la raison de la richesse de la région de Noril'sk en Sibérie. À l'est des traps de Sibérie (mais aussi au Karoo), on trouve même des diamants, associés à un volcanisme ultra-explosif très particulier qui forme des laves nommées « kimberlites » – qui doivent leur nom à la ville de Kimberley en Afrique du Sud, site de gisements majeurs de diamants arrachés aux conduits d'alimentation, ou « pipes » volcaniques. Ce volcanisme très particulier des kimberlites semble associé aux pre-

mières phases de la mise en place d'un trap, quand le magma d'origine profonde se fraye un premier chemin à travers la croûte continentale plus froide et de composition plus acide. Cette association, repérée très tôt par Jason Morgan, m'a conduit il y a des années à suggérer que tous les traps étaient potentiellement assis sur des mines de diamants et que les plus jeunes, donc les moins érodés, n'avaient sans doute pas encore révélé leurs richesses. Avis à ceux qui voudraient investir dans le forage des traps du Deccan, du Groenland ou d'Éthiopie...

La découverte par notre équipe en 1986 de la brièveté, insoupçonnée jusqu'alors, des traps du Deccan, puis l'observation, par notre équipe rejointe par de nombreuses autres aux quatre coins du monde, qu'il en était de même de tous les principaux traps rencontrés à la surface de la Terre, ont conduit à en dresser le catalogue et à en rechercher des manifestations plus anciennes. Ce catalogue, pour les traps émis depuis le début de l'ère secondaire il y a 250 millions d'années, commence avec ceux de Sibérie et est sans doute à peu près complet. La grande découverte de la dernière décennie est l'importance des grands traps, aujourd'hui très effacés, de la province de l'Atlantique central. L'ensemble de ce travail a constitué les traps en objet d'étude pour de nombreuses équipes et de nombreuses disciplines qui s'attachent à en révéler toujours plus d'aspects, auparavant inconnus. C'est ainsi que des équipes chinoise (notamment Sun-Lin Chung et Mei-Fu Zhou) et australienne ont repéré, dans le sud-ouest de la Chine, des blocs basculés et disjoints composés pour l'essentiel de coulées basaltiques superposées. Une cartographie soigneuse et des analyses géochimiques et géochronologiques ont montré qu'il s'agissait là des restes déchiquetés d'un grand trap vieux de 258 millions d'années (8 millions d'années « seulement » avant celui de Sibérie, nous verrons plus loin que cela a son importance) : on lui a donné le nom de « Emeishan ». Ces traps ont été pris dans la mâchoire de la collision entre l'Inde et l'Asie, chevauchés par les monts du Long Men Shan qui forment la bordure orientale du Tibet et cisailés le long de la grande faille de l'Ailao Shan et du fleuve Rouge qui a guidé, nous l'avons vu plus haut, l'extrusion de l'Indochine, décalée de plus de 500 kilomètres par rapport à la Chine du Sud. Les chercheurs chinois estiment la superficie originelle des traps entre 2 et 5 millions de kilomètres carrés et leur volume à plus d'un million de kilomètres cubes.

Aucun reste de volcanisme massif n'est signalé (pour l'instant) dans la période qui précède les traps d'Emeishan, de 258 à plus de 350 millions d'années, soulignant le fait que les traps forment une succession temporelle très irrégulière, d'apparence aléatoire. Alors qu'il menait dans notre laboratoire une étude paléomagnétique de roches volcaniques rapportées de Sibérie, à l'est des traps, dans une région très riche en mines de diamants (qui avaient financé cette étude), Vadim Kravchinsky a détecté parmi ses échantillons deux populations distinctes. L'une indiquait bien le pôle magnétique connu pour l'époque de la mise en place des traps de Sibérie et confirmait l'association entre kimberlites, diamants et traps. Mais l'autre indiquait une direction très différente, encore inconnue pour la Sibérie depuis la fin du Paléozoïque. Les premières datations, par la géologie de terrain, la stratigraphie et quelques mesures géochronologiques au rubidium-strontium, indiquent un âge de 350 à 370 millions d'années. Xavier Quidelleur à Orsay et Paul Renne à Berkeley tentent de préciser cet âge avec la méthode argon-argon, et ce travail est en cours. Ces filons diamantifères semblent bien être les restes d'un trap, auquel aurait été associée l'ouverture d'un rift, dit de « Viluy » ou « Yakutsk¹² ». Qui plus est, on connaît d'autres ensembles volcaniques à peu près du même âge dans la péninsule de Kola, dans la région de Vyatka et dans le bassin du Pripyat-Dniepr-Donets. Tout cela témoigne d'une intense activité volcanique sur une étendue gigantesque à la fin du Dévonien, mais dont on n'est pas sûr qu'elle ait été continue. La chasse aux traps plus anciens continue, un groupe de travail s'est formé qui publie chaque mois sur Internet la « province volcanique du mois¹³ ». Signalons par exemple le trap de Natkusiak sur l'île de Victoria à la jonction tectonique ancienne entre Laurasie et Sibérie, qui est daté de 723 millions d'années, les basaltes d'Antrim vieux de 800 millions d'années en Australie centrale et occidentale, les basaltes de Keewinawan (1,1 milliard d'années), de Coppermine River (1,2 milliard d'années) ou d'Eskimo sur l'île de Belcher (1,8 milliard d'années). Nick Arndt estime que les basaltes de Fortescue en Australie et de Ventersdorp en Afrique du Sud sont,

12. Dans notre premier article écrit en 2000, Vadim Kravchinski et nous l'avons nommé Viluy, mais notre collègue Richard Ernst nous a fait remarquer qu'il l'avait déjà répertorié en 1997 sous le nom de Yakutsk.

13. L'adresse du site Internet est www.largeigneousprovinces.org

parmi les représentants les plus anciens (2,7 milliards d'années ; la Terre n'avait pas encore atteint la moitié de son âge actuel...), les mieux conservés de l'espèce. Dans une récapitulation récente, Ernst et Buchan recensent 31 événements ignés massifs de type traps et six périodes d'arrivée groupée de points chauds à la surface depuis 3,8 milliards d'années. Ils estiment qu'un nouvel événement se produit en moyenne tous les 20 millions d'années, quoique la séquence soit très irrégulière, nous l'avons vu.

Chapitre 8

ÉCOULEMENT DE LA CHALEUR, CONVECTION, PANACHES ET INSTABILITÉS¹

« Il est parfaitement reconnu que la chaleur augmente environ d'un degré par soixante-dix pieds de profondeur au-dessous de la surface du globe ; or, en admettant cette proportionnalité constante, le rayon terrestre étant de quinze cents lieues, il existe au centre une température qui dépasse deux cent mille degrés. Les matières de l'intérieur de la Terre se trouvent donc à l'état incandescent. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

À l'orée de notre « descente aux enfers », on peut retenir quelques idées simples. Une source de chaleur et de matière en provenance des profondeurs du globe, ponctuelle mais majeure, émerge à Hawaï, sans lien apparent avec la géologie « normale » (au sens de la tectonique des plaques) des fonds océaniques environnants. La tectonique des plaques a permis de lever l'objection de Jeffreys à Wegener. Comme le pensait déjà le grand Arthur Holmes, la Terre n'est rien d'autre qu'une gigantesque machine thermique qui se refroidit lentement. Pour évacuer sa chaleur, la simple conduction thermique ne suffit pas. Un mode beaucoup plus efficace en est la convection thermique, où la matière en mouvement transporte avec elle cette chaleur. Encore faut-il que cette matière soit apte au mouvement. Les premiers théoriciens de la tectonique des plaques ont compris que le manteau terrestre, formé de silicates minéraux, est en effet capable de mouvement, à l'échelle lente de la vitesse des plaques.

1. Ce chapitre doit beaucoup à *Mantle Convection in the Earth and Planets*, de Gerald Schubert, Don Turcotte et Peter Olson (Cambridge, Cambridge University Press, 2001), où le lecteur intéressé trouvera des développements plus complets.

Les plaques qui dérivent ne sont donc que l'expression de surface de gigantesques cellules de convection qui brassent tant le manteau supérieur (jusqu'à la zone de transition) que le manteau inférieur. Comme la viscosité de ce matériau est très sensible à la température, la partie supérieure des cellules forme des plaques, certes rigides, mais qui sont bien partie prenante du flux d'ensemble en provenance des profondeurs. Celui-ci émerge aux dorsales et retourne dans le manteau au niveau des zones de subduction. Les points chauds seraient-ils alors l'expression d'une autre forme de convection, indépendante de la première ? Il nous faut maintenant faire un détour par l'expérience et la théorie, dans un domaine dont les spécialistes de la Terre ont compris l'importance majeure depuis quelques décennies : la mécanique des fluides. L'un des leaders de son application à la Terre interne est sans conteste Claude Jaupart.

Paradoxalement, l'idée que l'intérieur de la Terre ait pu fluer, s'écouler, est très ancienne. Leibniz (1646-1716) imagine que la Terre se serait refroidie en partant d'un état de fusion dans lequel ses profondeurs se trouveraient toujours. Newton (1643-1727) et Laplace (1749-1827) considèrent que le bombement équatorial de la planète² est la réponse d'un matériau fluide à sa rotation. James Hutton (1726-1797) considère que l'intérieur doit s'écouler pour exercer sur la croûte solide les forces qui conduisent, par exemple, à la formation des montagnes. Pendant tout le XIX^e et la première moitié du XX^e siècle, les géologues sont impressionnés par l'amplitude des mouvements verticaux de la croûte plus que par ses mouvements horizontaux. Ils ne songent d'ailleurs guère à la possibilité d'un brassage profond. Ce sont donc les physiciens qui s'interrogent sur l'importance d'un phénomène sur lequel ils expérimentent dans les vingt dernières années du XIX^e siècle, la convection thermique. Joseph Thomson (1856-1940) en 1882, puis surtout Henri Bénard (1874-1939) en 1900 observent les mouvements d'une couche de fluide chauffée par le bas et refroidie par sa surface supérieure. Ils y observent des courants ascendants et descendants, et une organisation du fluide en cellules grossièrement hexagonales.

2. On sait depuis les expéditions de La Condamine et de Maupertuis que la Terre, comme l'avait prédit Newton, a la forme d'un ellipsoïde aplati aux pôles et présentant donc un « bombement » à l'équateur. Ce bombement est invisible à l'œil nu depuis l'espace : il correspond à une différence de seulement 30 km entre les rayons polaire et équatorial de la Terre (d'environ 6 370 km).

Ils comprennent que le fluide chauffé à sa base voit sa densité diminuer et tend alors à monter sous l'effet de la force gravitationnelle (force d'Archimède), tandis que les parcelles de fluide proches de la surface supérieure se refroidissent, voient leur densité augmenter et retombent alors au sein du fluide³. Une théorie de l'instabilité amorçant la convection est proposée en 1916 par Lord Rayleigh (1842-1919).

C'est Arthur Holmes qui a montré (en 1927) que la convection thermique est un mécanisme physiquement plausible pour l'ensemble du manteau terrestre. Certes le manteau est rigide à l'échelle des courtes périodes de temps et laisse ainsi passer les ondes sismiques : la Terre résonne comme une cloche quand elle est ébranlée par un grand séisme (elle répond de manière élastique au passage des ondes). Mais à une échelle de temps plus longue, elle est visqueuse et peut s'écouler. Cette viscosité a été évaluée au milieu des années 1930 à partir de l'analyse du « rebond post-glaciaire » du bouclier scandinave. La glace qui s'était accumulée sur le nord de l'Europe entre – 100 000 et – 20 000 ans pesait sur la croûte qui s'est lentement mais sûrement enfoncée dans le manteau. Depuis la fonte de ces glaces, il y a environ 18 000 ans, la charge a été supprimée et la croûte remonte (on dit qu'elle « rebondit »). Cette remontée, de l'ordre du centimètre par an, est visible à l'échelle humaine : c'est ainsi qu'une marque gravée en 1731 au niveau de la mer par Anders Celsius (1701-1744) s'élève aujourd'hui à plus de deux mètres au-dessus. Les lignes successives de rivages sont bien marquées dans la morphologie des côtes et peuvent être datées. De nouvelles îles émergent dans la Baltique.

Je tente, dans deux annexes⁴, de faire saisir autant que possible « avec les mains » la démarche du (géo)physicien qui transcrit en équations un discours plus qualitatif, interprète de manière rigoureuse les observations et les expériences, et construit ainsi un modèle efficace qui lui permet calculs, vérifications et prédictions. Le langage mathématique des équations et des règles qu'on peut leur appliquer permet d'exprimer ces raisonnements et ces observations de manière rapide, souvent élégante et surtout maniable

3. On sait en fait que dans les expériences de Bénard la tension superficielle jouait un rôle important, mais l'idée de convection due à des différences de température y reste associée.

4. Voir annexes 2 et 3.

quantitativement, ce à quoi l'enchaînement du langage commun ne permettrait d'arriver que lourdement et difficilement. Cela étant, il n'y a pas de magie derrière ces équations, en apprendre le maniement ressemble à l'apprentissage d'une nouvelle langue, certes un peu particulière...

La première annexe traite du comportement des matériaux fluides et de leurs déformations élastiques et visqueuses. On y montre comment, de manière peu intuitive, un même corps peut se comporter de façon élastique et cassante quand il est sollicité fortement et brièvement, alors qu'il peut s'écouler (on dit qu'il « flue ») si la sollicitation se poursuit sur une grande durée. C'est ainsi que les matériaux terrestres peuvent à la fois être le siège de séismes brutaux et permettre la lente dérive des continents. La seconde annexe tente de montrer comment on construit les équations qui gouvernent l'écoulement de ce fluide un peu spécial qu'est le manteau terrestre. Y sont rappelés les principes de conservation de la masse et de l'énergie, le rôle des forces, notamment la gravité, et des contraintes qui s'exercent entre différentes parties d'un même ensemble, pour arriver à la célèbre équation de Navier-Stokes qui combine ces lois en tenant compte du comportement du matériau. De proche en proche, nous parvenons à identifier les paramètres qui permettent d'évaluer les contributions respectives des différentes forces au mouvement et à la déformation. Le plus important de ces paramètres « sans dimension » est le nombre de Rayleigh. Il permet de comparer l'influence de la force d'Archimède, qui tend à faire remonter le matériau du manteau à cause de l'expansion thermique, aux effets dissipateurs qui s'y opposent, frottements visqueux et diffusion thermique. Quand on s'intéresse par exemple à la convection dans le manteau supérieur, on observe que son épaisseur de 700 km intervient au cube, c'est-à-dire à la puissance 3, dans l'expression du nombre de Rayleigh, qui vaut alors 5 millions. Voyons ce que cela implique.

C'est en 1916 que Lord Rayleigh publie sa solution des équations de Navier-Stokes dans le cas d'une couche horizontale infinie de fluide d'épaisseur constante chauffée par en dessous. Il s'agissait d'expliquer les belles expériences de Bénard et de comprendre à partir de quand un fluide stratifié chauffé par en dessous devenait instable et se mettait en mouvement. Rayleigh s'intéresse au moment où se déclenche l'instabilité, où la chaleur accumulée par une parcelle de fluide l'a rendu si léger que viscosité et dissipation

thermique ne peuvent la maintenir à sa place originelle. Le moment où un tout petit déplacement vers le haut se trouve non pas annulé (stabilité oblige) mais au contraire amplifié exponentiellement (instabilité). Faisant l'hypothèse d'une petite instabilité sinusoïdale, de longueur d'onde λ (la distance entre deux crêtes de la sinusoïde), Rayleigh démontre qu'il existe une valeur critique de cette longueur d'onde (de l'ordre de 3 fois l'épaisseur de la couche) qui sera amplifiée dès que le nombre qui porte aujourd'hui son nom dépasse une valeur critique de l'ordre de 1 000. Le nombre de Rayleigh du manteau supérieur de la Terre est plusieurs milliers de fois supérieur à ce nombre critique ! Le manteau de la Terre doit donc être le siège d'une convection active, voire turbulente ! Holmes applique dès 1931 cette théorie des instabilités convectives à la Terre et à son manteau. On peut exprimer le nombre de Rayleigh critique sous forme d'un gradient de température critique au-delà duquel le corps devient instable et le mouvement s'amorce. Holmes trouve un gradient minimum de 3 degrés par kilomètre alors qu'il sait que le gradient thermique près de la surface de la Terre (déterminé bien avant son époque dans les puits de mine⁵) est dix fois supérieur. C'est ainsi qu'il conclut que le manteau doit bien se comporter comme un fluide à l'échelle des temps géologiques et convecter vigoureusement, entraînant la dérive des continents imaginée par Wegener. C'était plus de trente ans avant l'acceptation générale de la tectonique des plaques.

Cette théorie permettra à Don Turcotte et Ron Oxburgh de comprendre, à la fin des années 1960, que les plaques tectoniques, à l'échelle des milliers de kilomètres, sont l'expression en surface de très grandes cellules de convection dans le manteau supérieur. Mais qu'en est-il des instabilités très différentes que seraient les panaches ?

Les développements de la mécanique des fluides au xx^e siècle ont été considérables, au point d'en faire une discipline incontournable dans bien des domaines scientifiques, et certainement dans les sciences de la Terre. Par le biais des analyses théoriques, des expériences de laboratoire et de plus en plus des simulations numériques (fort à la mode et qui ne sont pas sans danger, on aura l'occasion d'y revenir), on sait aujourd'hui que des instabilités

5. On voit que la valeur donnée par Jules Verne et placée en exergue de ce chapitre est très exagérée...

naissent de manière répétée dans un fluide dont le nombre de Rayleigh est aussi fort (par rapport au nombre critique) que dans le cas de la Terre. La convection peut être très turbulente, non stationnaire et dépendre du temps, avec des phases intermittentes et souvent l'apparition d'une circulation chaotique. Les instabilités naissent de couches limites de matériau chaud. Elles peuvent être emportées par le mouvement de convection de grande échelle associé aux plaques, atteindre ou ne pas atteindre la surface, se diffuser et disparaître... Quelles sont donc les conditions de leur apparition et de leur survie ? Existe-t-il des couches limites susceptibles de les engendrer dans la Terre ? Où seraient-elles situées ? Répondre à cette question va nous fournir l'occasion d'un retour sur ce que géophysiciens et géochimistes du xx^e siècle nous ont appris de la structure interne à grande échelle de la Terre.

Ce sont les sismologues qui ont révélé, au cours du siècle dernier, la structure en couches de la Terre (Figure 8-1), la superposition d'une croûte (épaisse d'une dizaine de kilomètres sous les océans, de 30 à 70 km environ dans les continents), d'un manteau et d'un noyau, la division du manteau en deux parties, supérieure et inférieure (la base du manteau inférieur étant appelée « zone de transition »), celle du noyau en une graine interne solide entourée par un noyau externe fluide. Ces informations sont déduites de la propagation, de la réflexion et de la réfraction des ondes produites par les séismes (brusques relâchements de contraintes accumulées de part et d'autre des lèvres d'une faille qui vient de jouer), ondes enregistrées par les sismographes. Les temps d'arrivée aux sismographes des divers types d'ondes permettent de déduire le moment du déclenchement du séisme et la vitesse de leur propagation à toute profondeur. Partant de là, on peut se faire une bonne idée de la composition chimique et minéralogique et de l'état, solide, fluide ou en fusion partielle, du milieu traversé. L'augmentation du nombre, de la sensibilité et l'amélioration de la répartition des stations autour de la Terre, et le nombre élevé des séismes enregistrés ont permis de former une image en continuel progrès, d'abord assez grossière dans les années 1920 et 1930, pour en arriver à la tomographie de plus en plus fine de la dernière décennie. Que nous disent donc les sismologues sur les principales divisions des entrailles de la Terre et sur l'éventuelle présence de couches limites ?

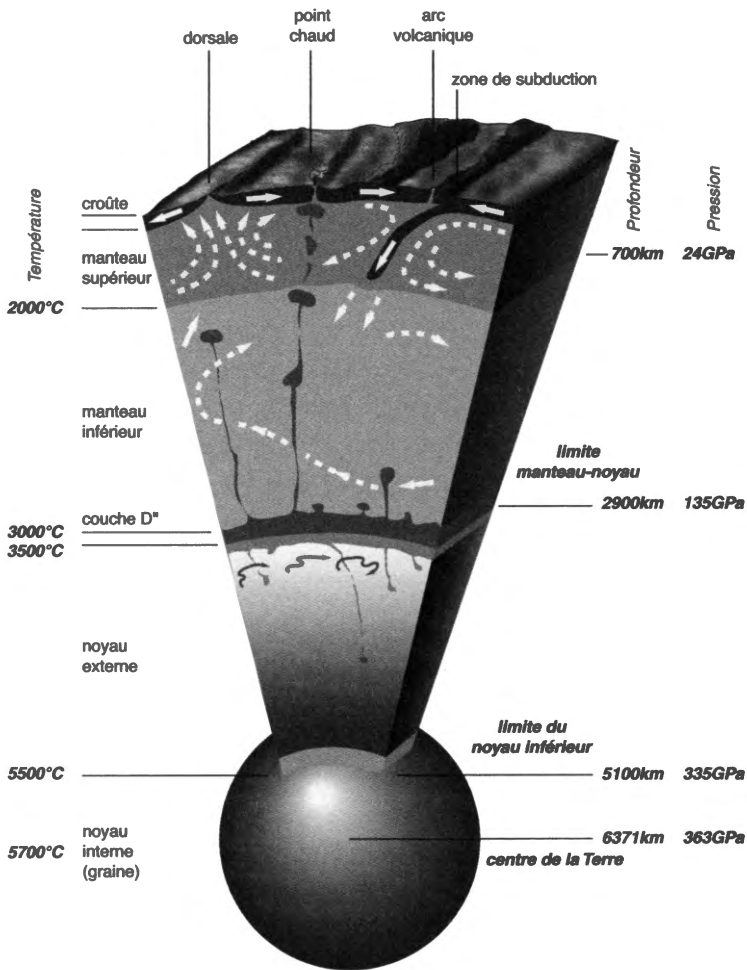


Fig 8-1 : Coupe schématique de la Terre montrant ses principales enveloppes, de la croûte à la graine en passant par le manteau. Les profondeurs, les températures et les pressions estimées sont indiquées sur les côtés.

Pour former une instabilité, il faut en effet qu'existe une couche limite. La sismologie et la minéralogie conjointes nous apprennent qu'il y en a sans doute trois entre le sommet du noyau fluide et la surface de la Terre. Du haut vers le bas, ce sont tout d'abord les plaques, qui constituent la couche limite supérieure, froide, du système convectif du manteau supérieur. Entre sommet et base de la plaque, le saut de température est d'environ 1 000 °C. Mais les plaques, très visqueuses et, on l'a vu, rigides, ne sont guère susceptibles de former des panaches instables...

À la base du manteau supérieur, entre 410 et 660 km de profondeur (à une dizaine de kilomètres près, variable d'un point à l'autre) se trouve une zone de transition, dans laquelle les minéraux subissent des transformations « de phase », la structure cristalline devenant plus compacte et le minéral plus dense avec la pression. Le manteau supérieur est principalement constitué des minéraux olivine, pyroxène et grenat, qu'on rencontre à la surface dans certaines roches ignées. C'est ce qu'a imaginé dès 1952 Francis Birch (1903-1992), avant d'être vérifié dans les années 1960 à partir des informations fournies par les sismologues sur les temps de parcours des ondes sismiques et par les minéralogistes sur les propriétés des principaux minéraux échantillonnés dans la croûte et soumis au laboratoire à de très fortes pressions. L'olivine est le constituant le plus important : c'est ce joli minéral vert (comme son nom l'indique) qu'on rencontre par exemple en agrégats dans certaines bombes volcaniques ramassées sur les flancs des volcans du Massif Central ou du Piton de la Fournaise ; ces agrégats sont des témoins de la composition de la croûte et du manteau sous-jacents, « ramonés » lors de l'éruption volcanique qui a éjecté la bombe. À une pression qui correspond approximativement à la profondeur de 410 km, l'olivine⁶ se transforme en *spinel* (MgAl_2O_4). Cette phase plus dense laisse passer les vibrations sismiques plus rapidement et c'est comme cela que les sismologues ont identifié la « discontinuité des 410 km ». La « discontinuité des 660 km » est encore plus nette⁷. C'est à cette profondeur que cessent les tremblements de terre : il n'y en a pas de plus profond. L'hypothèse la plus fréquemment admise est que les plaques en subduction rencontrent à cette profondeur le manteau inférieur, plus dense et plus visqueux, contre lequel elles « butent » (nous verrons plus loin que certaines semblent cependant traverser cette frontière intérieure). Une autre transformation minéralogique est à l'origine de cette discontinuité. À la pression correspondante (de l'ordre de 25 GPa [gigaPascal], c'est-à-dire 250 000 fois la pression atmosphérique), la phase de haute pression (spinel) de l'olivine Mg_2SiO_4 se transforme en deux autres minéraux plus com-

6. Pour les « fanas » de la chimie et de la minéralogie, il s'agit de silicates de magnésium, de composition Mg_2SiO_4 ; la plupart du temps ils contiennent en fait 10 % de fer, d'où la formule $(\text{Mg}_{0,9}\text{Fe}_{0,1})_2\text{SiO}_4$.

7. Il nous arrivera plusieurs fois par la suite d'évoquer cette limite des 660 km en parlant de discontinuité des 700 km, par souci d'arrondi et de simplification... Ce sera bien le même objet.

pacts encore, MgSiO_3 , la *ringwoodite* (dont la structure est celle du minéral plus commun CaTiO_3 , appelé *pérovskite*) et le simple oxyde de magnésium ou *périclase*, MgO ⁸. En dessous, de 660 à 2 900 km de profondeur, c'est le règne de ces deux minéraux, dans un volume gigantesque qui contient près de la moitié de la masse de la Terre. Dans ce sens, on peut dire que ceux et sans doute surtout celles d'entre vous qui portent un petit cristal vert d'olivine au cou ou en broche arborent l'un des minéraux les plus abondants de la Terre (le plus abondant étant la phase de structure pérovskite). Entre les deux discontinuités, 410 et 660 km, c'est la « zone de transition », à travers laquelle le saut de température est sans doute un peu inférieur à 1 000 °C. Cette couche fait l'objet d'une grande attention de la part des spécialistes de sciences de la Terre, dont beaucoup ont longtemps pensé et pensent encore qu'elle forme une barrière impénétrable entre deux domaines convectifs distincts, le manteau supérieur et le vaste manteau inférieur. Tous s'accordent à y voir une zone où les minéraux du manteau changent de phase les uns après les autres, mais tous ne s'accordent pas sur le fait qu'il s'agirait d'une véritable couche limite thermique.

Donc, au sommet du manteau supérieur, les plaques, à sa base la zone de transition. Mais que se passe-t-il dans le manteau inférieur ? S'il reste très mystérieux, on commence à en percer quelques secrets. À la base du manteau inférieur, environ 200 à 300 km avant d'arriver au noyau de fer liquide, la vitesse des ondes sismiques augmente brusquement, puis elle décroît et devient très faible à l'approche de la frontière du noyau. L'atténuation y est forte, ce qui indique la présence probable de matériau en fusion (partielle). Cette couche profonde a été reconnue très tôt par les sismologues et baptisée D'' ⁹. Elle aussi fait l'objet depuis plus d'une décennie de recherches intenses qui font émerger l'image d'une couche très dynamique, en mouvement, où la température atteint environ 4 300 K et la pression 130 Gpa (1,3 million

8. Il y a en fait une certaine proportion de fer Fe aux côtés du magnésium Mg, mais on parle encore de « structure *pérovskite* » (c'est la structure cristalline et non la composition chimique qui importe alors) pour, par exemple avec 10 % de fer, $(\text{Mg}_{0,9}\text{Fe}_{0,1})\text{SiO}_3$, et de *magnésiowüstite* ou encore de *ferropericlase* pour $(\text{Mg}_{0,9}\text{Fe}_{0,1})\text{O}$. J'espère que vous vous y retrouverez...

9. À l'époque des premiers modèles sismologiques de Terre, les couches avaient été nommées dans l'ordre alphabétique par Jeffreys, Bullen (1906-1976) et Gutenberg (1889-1960). De cet alphabet aujourd'hui disparu seule subsiste la nomenclature « fossile » de D'' .

d'atmosphères). Stéphane Labrosse y voit les traces d'un véritable océan de magma très profond. À travers cette couche, le saut de température entre noyau et manteau inférieur doit être de l'ordre de 1 000 °C. On vient de comprendre, grâce à des expériences à très haute pression au laboratoire, que devait se produire à la base du manteau inférieur, vers 2 800 km de profondeur, une nouvelle transition de phase vers un minéral « post-pérovskite » qui pourrait jeter une lumière nouvelle sur cette couche D''¹⁰.

La structure des températures du manteau fait donc apparaître deux, voire trois couches limites (la couche D'', peut-être aussi la zone de transition, et certainement les plaques lithosphériques) qui concentrent l'essentiel des sauts de température, chacun étant de l'ordre de 1 000 °C. Entre D'' et zone de transition, le manteau inférieur. À la base et au sommet du manteau supérieur, respectivement zone de transition et plaques : le cœur du manteau supérieur comme celui du manteau inférieur sont en état de convection et, comme ils sont bien brassés, le gradient de température y est assez faible (de l'ordre de 0,3 °C/km, soit une différence de seulement 150 °C à travers le manteau supérieur et 600 °C à travers l'épais manteau inférieur). Dan MacKenzie a comparé cette structure à celle d'un triple vitrage. Chaque couche limite où se produit l'essentiel du saut de température est une vitre, et les parties convectives du manteau correspondent aux deux couches d'air emprisonnées entre les trois vitres. Le noyau de la Terre tente de se refroidir le plus efficacement possible depuis sa formation, il y a près de 4,5 milliards d'années. Mais le « triple vitrage » efficace contrôle le taux de ce refroidissement...

La zone de transition et la couche D'' sont deux excellents candidats à la formation de panaches instables d'origine profonde dans les deux parties du manteau. Les observations sismologiques suggèrent que D'' est sans doute très chaude, peu visqueuse et très dynamique. Chacune des deux couches limites est chauffée par en dessous, en partie intérieurement par la désintégration des éléments radioactifs, et refroidie par en dessus. La partie inférieure s'échauffe lentement par conduction ; l'épaisseur de cette partie

10. Cette phase a été découverte indépendamment en 2004 par deux équipes dirigées par M. Murakami et A. R. Oganov. Des contributions importantes ont été apportées par l'équipe de minéralogie de l'IPG de Paris et de l'IMPMC (Paris-VI), James Badro, Guillaume Fiquet et François Guyot.

chaude croît avec le temps comme sa racine carrée. Au bout d'un certain temps, cette épaisseur est telle que le nombre de Rayleigh de la couche limite (qui, rappelons-le, contient l'épaisseur de la couche à la puissance 3 !) atteint la valeur minimum critique de la convection et peut produire des instabilités. Les calculs évoqués plus haut permettent d'évaluer le temps au bout duquel ce seuil est atteint : pour la Terre, quelques dizaines de millions d'années, c'est-à-dire un temps court devant le temps caractéristique, majestueux, de la convection à grande échelle du manteau qui est de l'ordre de quelques centaines de millions d'années.

De belles expériences et leur modélisation théorique par Whitehead et Luther en 1975, maintes fois répétées depuis, fournirent les premières images de ces panaches qui devaient frapper les imaginations (Figure 8-2). Partant soit de 2 700 km de profondeur

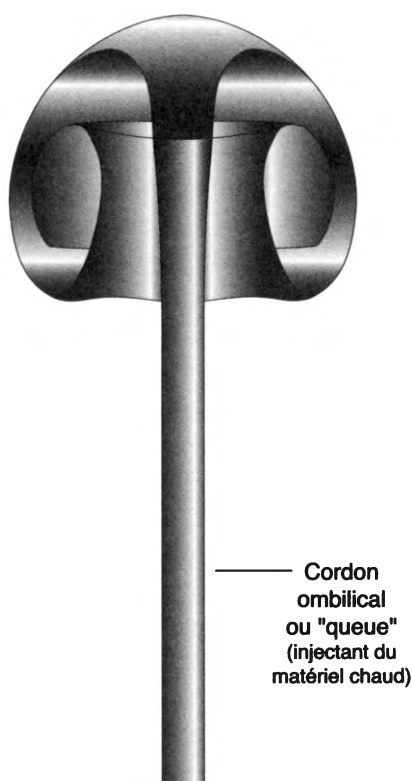


Fig 8-2 : Structure d'une instabilité (ou panache) dans les premières expériences de Whitehead et Luther. Le conduit plus fin (« queue ») nourrit une tête qui s'enroule sur elle-même et peut grossir considérablement.

(sommets de la couche D''), soit du sommet de la zone de transition à 440 km de profondeur, théorie, calcul et expérience « autorisent » la Terre à produire des panaches, second mode de convection venant s'ajouter au grand mode de la dérive des continents... Mais s'ils sont « permis », ces panaches ne sont pas « obligatoires ». Les géophysiciens devaient poursuivre leur quête pour les traquer et les mettre en évidence. Cette quête n'est pas encore achevée...

Vous avez sans doute tous déjà vu se former des panaches : au-dessus d'une bouilloire ou, à plus grande échelle, d'un volcan. Et pour la génération « hippie », dans les *lava lamps* qui faisaient fureur au début des années 1970 et sont redevenues à la mode. Ce sont ces lampes dans lesquelles un fluide coloré visqueux échauffé par l'ampoule devient plus fluide, plus chaud et donc moins dense, et finit par s'élever vers la surface du fluide situé au-dessus, qui est d'une couleur différente. Arrivé à la surface, le panache, parfois encore attaché à sa base (les géologues parleront d'un « diapir »), ou détaché sous forme d'un « blob », se refroidit, devient plus dense et replonge au fond pour rejoindre le réservoir de liquide coloré. Ce réservoir agit comme une couche limite d'où se détachent des instabilités. Les formes de ces panaches peuvent énormément varier en fonction des propriétés des deux fluides (viscosité, densité, coefficient de dilatation thermique) ; elles fournissent un spectacle dont les amateurs ne se lassent pas, en même temps qu'une source d'inspiration pour tenter de concevoir ce qui se passe dans les tréfonds du globe.

Plaques et panaches sont donc tous deux des conséquences attendues de la convection des roches du manteau. Mais les panaches sont absents de la théorie des plaques (surtout dans sa version cinématique qui ne s'intéresse guère qu'à la surface) et n'en sont pas un élément requis. Si la théorie (la mécanique des fluides) et l'expérience de laboratoire en montrent l'existence possible, celle-ci n'est pas démontrée dans le cas de la Terre. Certains géophysiciens éminents ne croient pas à leur existence. Nous tenterons de voir quelles observations indirectes militent ou non en leur faveur, et devons peut-être attendre de nouveaux progrès de l'imagerie sismique par tomographie pour disposer d'images convaincantes...

Chapitre 9

IMAGER LES PROFONDEURS

« Les instruments comprenaient :

1° Un thermomètre centigrade de Eigel [...];

2° Un manomètre à air comprimé [...]. En effet, le baromètre ordinaire n'eût pas suffi, la pression atmosphérique devant augmenter proportionnellement à notre descente au-dessous de la surface de la terre ;

3° Un chronomètre de Boissonas jeune de Genève [...];

4° Deux boussoles d'inclinaison et de déclinaison ;

5° Une lunette de nuit ;

6° Deux appareils de Ruhmkorff [...]

[...]

Mon oncle ne cessait de consulter avec le plus grand soin sa boussole, pour se rendre compte du chemin parcouru. [...] au lieu de glisser le long du rayon terrestre, suivant son expression, il s'en allait par l'hypoténuse. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Des images. Support essentiel de la compréhension, de l'imagination. Les géophysiciens envient parfois les astronomes... Les phénomènes qui se produisent au cœur de notre planète ne sont pas moins fascinants que ceux qui se produisent dans les profondeurs de l'espace et du temps. Nous disposons depuis longtemps d'images de la Lune, de Mars et de Vénus, nos voisines les plus proches, des planètes géantes et de leurs satellites, des galaxies plus lointaines. Avec les nouvelles générations de télescopes terrestres et spatiaux qui explorent des gammes toujours plus riches de longueurs d'onde, ce sont toujours plus de détails, plus de couleurs¹. Nous connaissons les volcans de Vénus, pourtant cachés

1. Voir annexe 4.

par une épaisse atmosphère de gaz carbonique et de pluies sulfuriques, nous pouvons décrire de façon minutieuse les volcans boucliers géants de Mars (Olympus Mons, Tharsis Regio) ou son grand rift (Valles Marineris) affectés de puissants glissements de terrain. Nous avons vu les éruptions sulfurées d'Io, la chute des fragments de la comète Shoemaker-Levy sur Jupiter, l'atterrissage d'une sonde interplanétaire sur Titan et les évolutions de robots télécommandés sur Mars... Les astronomes établissent leur florilège de galaxies et de nuages de poussières interstellaires, ils nous font entrevoir ces objets étranges que sont supernovae, naines blanches ou trous noirs². Toujours plus loin dans l'espace, donc dans le temps, ils dressent à loisir des cartes du premier rayonnement visible émis par notre univers, il y a 13 milliards d'années, seulement 300 000 ans après le fameux Big Bang. Et tout cela parce que l'espace entre les corps célestes est transparent, qu'il permet la circulation des photons qui véhiculent ces images. La fascination des origines et la multiplicité de ces belles images, toujours plus nombreuses et facilement accessibles, expliquent sans doute en partie la popularité, en réalité très ancienne, de l'astronomie. Les géophysiciens, les géologues et les géochimistes ont plus de difficultés à produire de telles images. Pour nous, l'intérieur de la Terre est sombre, opaque à la lumière et, qui plus est, associé à l'enfer, à Hadès, à la mort... Nous devons déployer notre ingéniosité pour donner de l'intérieur de notre astre, pourtant si vivant, des images, pour nous d'abord mentales, et qui ne manquent ni de beauté ni de poésie.

Ceux qui nous donnent les images les plus « accessibles » de l'intérieur de notre globe sont les sismologues, même si bien d'autres disciplines viennent les compléter et les enrichir. Ce sont les « rais sismiques », les vibrations qui se propagent à l'intérieur des couches profondes, qui jouent le rôle des rayons de lumière. Mais pour engendrer une image qui soit accessible, il y faut un peu de cuisine mathématique, assaisonnant distance et temps de parcours des ondes, réfraction et réflexion. La première génération de ces modèles est celle que nous avons évoquée plus haut, dans laquelle on reconnaît croûte, manteau et noyau. C'est la génération des modèles « à symétrie sphérique », où la Terre, à l'image d'un oignon, apparaît comme une série de couches emboîtées : les paramètres physiques (élasticité, rigidité, densité) n'y dépendent que de

2. Ce sont leurs effets gravitationnels qu'on détecte.

la profondeur et non de la position sur la sphère. On rencontre la même structure sous Paris ou Sydney. Il y manque la géographie. Or la géologie de surface, avec ses plaques, ses frontières actives, ses séismes et ses volcans, est l'évidence même de l'importance d'une telle géographie. Il doit bien exister, à chaque profondeur, une géographie des matériaux du globe, ce que nous appelons dans notre jargon des « hétérogénéités latérales » (par rapport à la valeur moyenne du modèle sphérique). Les progrès de la sismologie ont permis au cours des dernières décennies des progrès extraordinaires de visualisation des complexités de l'intérieur de la Terre.

Cette nouvelle façon de créer des images tridimensionnelles a reçu le nom de « tomographie ». Le principe en est très voisin de celui des techniques du même nom employées en médecine pour donner à voir l'intérieur du corps humain ; tomographes médicaux et sismologues ont d'ailleurs dans une large mesure un langage et des algorithmes communs. Le principe de la tomographie sismique est assez simple (Figure 9-1). Expliquons-le d'abord sur un modèle réduit de Terre cubique (nous quitterons vite ce cubisme abusif pour revenir à la Terre sphérique). Imaginons que ce cube est formé de huit petits cubes³ ayant tous une vitesse caractéristique de propagation des ondes sismiques⁴ différente, et que nous souhaitions retrouver les propriétés de chacun de ces cubes (donc huit inconnues). Imaginons que nous assénions à un moment donné un petit choc (un séisme) sur l'une des faces et que nous enregistrons le temps d'arrivée de cette perturbation sur d'autres faces, quatre par exemple. Nous aurons quatre « rais sismiques » passant à l'intérieur de deux petits cubes, au plus de trois. Pour chaque rai, nous pouvons écrire le temps de parcours de la vibration (entre l'instant du choc et le moment où l'on enregistre l'arrivée de l'onde sur chaque face) comme une somme des temps de parcours dans chaque cube élémentaire. Chacun de ces temps de parcours est égal à la distance traversée dans le petit cube divisée

3. La figure 9-1 représente en fait un carré fait de 9 petits carrés. Le cube correspondant contiendrait 27 petits cubes. La discussion qui suit est décrite pour un cube plus petit de $2 \times 2 \times 2 = 8$ petits cubes seulement.

4. Dans tout solide élastique peuvent circuler deux types d'ondes ; des ondes de compression, les plus rapides, qui arrivent en premier et qu'on surnomme ondes P, et des ondes de cisaillement, un peu plus lentes, qui arrivent en second et qu'on nomme ondes S. Les ondes P correspondent à des vibrations le long du trajet parcouru (le « rai » sismique par analogie aux rayons lumineux), les ondes S à des vibrations perpendiculaires à ce trajet.

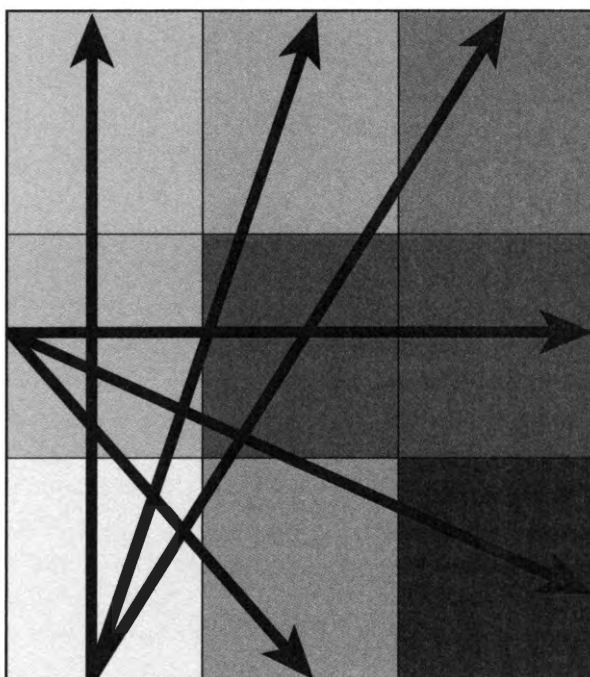


Fig 9-1 : Principe de la tomographie sismologique. Le domaine considéré est divisé en plus petits volumes unitaires (ici des cubes) dans lesquels les propriétés physiques (et notamment la vitesse de propagation des ondes sismiques) sont supposées constantes et uniformes. Deux séismes (à gauche et en bas) émettent des rais (ici rectilignes par souci de simplification) ; les temps d'arrivée sont enregistrés par des sismographes aux points de sortie en haut et à droite. Avec de nombreux séismes et de nombreux sismographes, les rais « illuminent » l'ensemble de l'intérieur du domaine et l'on peut en déduire les propriétés de chaque cube. La méthode se généralise à la géométrie sphérique et au volume de la Terre (et aussi, avec des rais différents, à la médecine et à l'exploration du corps humain).

par la vitesse de propagation dans ce cube. Nous avons donc pour chaque rai une équation à deux (ou trois = le nombre de petits cubes traversés) inconnues. Si nous multiplions le nombre de petits séismes et d'enregistrements de ces petits séismes, nous avons une foule de rais qui traversent tous les cubes (qui en « illuminent » l'intérieur) et mathématiquement nous pouvons avoir beaucoup plus d'équations (de contraintes) que les huit inconnues qui caractérisent chaque petit cube. Une méthode due à Gauss et datant de la première moitié du XIX^e siècle permet de résoudre le problème. C'est la méthode des « moindres carrés » : on écrit que la somme des carrés des différences entre valeurs théoriques des temps de parcours prédites pour les huit vitesses dans les huit petits cubes et valeurs observées est la plus petite possible. Gauss

a montré que cette formulation donnait une solution unique pour les huit vitesses et permettait de calculer l'incertitude (« l'erreur ») sur les valeurs obtenues. C'est en appliquant cette méthode (avec de nombreux raffinements rendus aisés par l'augmentation de la puissance et de la vitesse des ordinateurs) à des « rais » de nature différente que les médecins forment des images tridimensionnelles ou des coupes de n'importe quel organe du corps (l'étymologie de « tomographie » vient de « couper », « τομειν » en grec). En remplaçant le cube par une sphère et en la découpant en un nombre aussi grand que possible de petits éléments, en enregistrant le plus grand nombre possible de séismes dans le plus grand nombre possible de stations sismiques, en utilisant les ondes de compression (P) et, plus récemment, les ondes de cisaillement (S)⁵, le « tomographe sismologue » est capable de reconstituer une image à trois dimensions des propriétés mécaniques de l'intérieur de la Terre, avec une résolution (une précision spatiale ultime) égale à la taille des éléments (cellules) utilisés. Géochimistes et minéralogistes viennent alors à la rescousse pour transformer densités, valeurs des vitesses sismiques et autres rigidités en composition minéralogique ou chimique dépendant des conditions de température et de pression. Ces propriétés sont traduites selon un code de couleur (utilisant en général les teintes chaudes pour les zones supposées chaudes ou peu denses et les teintes froides pour les zones supposées froides et denses) : voilà enfin l'image tant attendue ! Mais, comme toute image, celle-ci doit être lue avec prudence, en connaissance de ses limites : résolution, précision, qualité des données, qualité de l'algorithme d'inversion, nature exacte du code de couleur, etc. Celui-ci est d'ailleurs très variable, et souvent donné sur une échelle multiplicative (logarithmique). Bien des sismologues ont fait remarquer qu'un léger changement du code pouvait mettre en valeur des structures très différentes et suggérer une lecture différente de l'image. Les « images de tous les jours » doivent, elles aussi, être lues avec précaution car elles sont susceptibles d'évoquer des messages très différents. Les belles images des astronomes elles-mêmes ont subi des transformations profondes destinées à les rendre plus lisibles ; de ces transformations il faut être averti.

Voyons maintenant quelles images la tomographie sismique nous donne de l'intérieur de notre planète. Depuis l'invention de la

5. Les « inversions conjointes » utilisant de manière concomitante les deux types d'onde commencent à peine : c'est l'avenir...

méthode par les grands sismologues que sont Kei Aki, Don Anderson et Adam Dziewonski⁶, de nombreux laboratoires à travers le monde en ont publié de plus en plus précises, qui nous permettent de « voir » de plus en plus profond. Les noms de Steve Grand, Rob van der Hilst, Barbara Romanowicz ou Jeroen Ritsema sont attachés à quelques-uns de ces modèles, dont une illustration est donnée (Figure 9-2). On y voit trois coupes proches, d'orientation nord-sud, à travers la zone de subduction qui voit l'Afrique s'enfoncer sous la Crète et la plaque eurasiatique, engendrant les volcans de la mer Égée. On distingue très bien une zone bleu foncé, de vitesse sismique plus rapide, où le matériau est donc supposé plus froid, et qui correspond à la plaque en train de s'enfoncer. Cette plaque bute contre la zone de transition, entre 440 et 700 km de profondeur, là où cessent les séismes. Elle s'aplatit parfois sur la limite des 700 km. Plus à l'ouest, une coupe d'orientation est-ouest montre la plaque africaine en train de s'enfoncer sous l'arc italien, formant les volcans des îles éoliennes et déclenchant de nombreux séismes dont on voit sur la figure qu'ils suivent très précisément la partie haute de la plaque.

Le fait que les séismes cessent en dessous de la discontinuité des 700 km est considéré, depuis la première formulation de la tectonique des plaques dans les années 1960, comme la preuve que les plaques ne pénètrent pas plus profondément et que la zone de transition forme une barrière infranchissable à la convection du manteau, séparant manteau inférieur et manteau supérieur, si distincts pour les géochimistes. Cependant, le sismologue américain Tom Jordan avait noté depuis les années 1970 que les ondes de certains séismes semblaient guidées par une partie du manteau plus dense et plus froide dans le prolongement de la plaque plongeante. Jordan avait proposé que certaines plaques en subduction franchiraient la barrière de la zone de transition et s'enfonceraient dans le manteau plus profondément. La tomographie sismique est venue conforter ces vues. On voit par exemple distinctement dans les coupes de la figure 9-2 effectuées à travers la Crète du matériau plus froid ou plus dense s'enfoncer sous la zone de transition dans le prolongement de la plaque en subduction, et ce jusqu'à plus de 1 000 km de profondeur. Dans une série de coupes effectuées par van der Hilst et Karason, on voit distinctement un prolongement

6. Elle a valu à ces deux derniers l'attribution du prix Craaford.

de la zone de subduction jusqu'à 1 000, voire 1 500 km de profondeur sous les îles Tonga, Java ou l'Amérique centrale, alors que la plaque pacifique s'aplatit complètement sous le Japon.

De nombreux indices montrent que les minéraux du manteau inférieur sont des silicates plus compacts, plus denses que ceux du manteau supérieur, avec une viscosité au moins 30 fois supérieure. Nous avons vu que le minéral olivine y possède une phase de haute pression de structure « pérovskite ». Il ne fait donc pas de doute que le manteau inférieur est une barrière à la convection. Mais il se peut qu'au bout d'un certain temps, la masse de plaque « subduite » s'accumule sans se résorber complètement : elle forme alors un « paquet » de matériau froid et dense, qui peut devenir instable et « coule » dans le manteau inférieur. On parle d'avalanche. Philippe Machetel est l'un des avocats de ces avalanches, qu'il a représentées par le biais de modélisations numériques animées. D'autres, comme Dan McKenzie, pensent que la continuité entre plaques et zones froides et denses révélées par la tomographie n'est pas établie, qu'il existe des arguments physiques contre cette pénétration. Certains enfin, Claude Allègre notamment, pensent, sur la base d'arguments de nature géochimique, que seule une petite fraction des plaques plongeantes passe dans le manteau inférieur.

Jean-Paul Montagner, à l'Institut de physique du globe de Paris, se propose un exercice encore plus difficile : il tente de tirer de la forme complète des divers types d'ondes sismiques non seulement les propriétés « scalaires » des matériaux (celles que nous avons rencontrées jusqu'à présent), mais aussi leur anisotropie, interprétée comme le sens d'allongement des cristaux dans le manteau sous l'effet de la convection. Jean Besse, Eléonore Stutzmann et Rob van der Hilst, quant à eux, ont eu l'idée de rapprocher la forme des plaques en subduction de l'histoire ancienne de la cinématique des plaques : ils considèrent que la forme d'une plaque à une certaine profondeur représente celle de la zone de subduction un certain temps (des millions d'années) auparavant. Connaissant la vitesse de subduction et les propriétés du manteau, principalement sa viscosité, ils « remontent à la surface » les formes des plaques de plus en plus profondes, ils font tourner le film « à l'envers » et reconstituent la géographie de la ceinture de feu du Pacifique depuis plus de 100 millions d'années. On peut aussi comprendre l'origine de certaines des plus grosses « anomalies

froides et denses » du manteau, notamment sous les zones de collision entre continents. C'est ainsi que Rob van der Hilst, Jean Besse et Paul Tapponnier ont retrouvé les traces de la plaque indienne en profondeur, des dizaines de millions d'années avant sa collision avec l'Eurasie. Rob van der Voo a, lui, retrouvé les traces d'une subduction depuis longtemps éteinte entre Chine du Nord et Mongolie, le long de ce que les géologues appellent la « suture Mongol-Okhotsk ». Cette suture est la cicatrice d'un océan gigantesque, détruit dans une collision qui s'est produite entre 300 et 150 millions d'années (et que les paléomagnéticiens avaient retrouvée dans la mémoire des roches, mais c'est une autre histoire...).

La tomographie sismique a récemment fait de nouveaux progrès. À Princeton, Tony Dahlen, un remarquable et très discret géophysicien théoricien qui vient hélas de disparaître prématurément, et Guust Nolet, aujourd'hui professeur à Nice, ont rappelé que la théorie des rais sismiques n'était qu'une approximation, dans l'hypothèse d'une vibration de fréquence infinie. Pour les fréquences réelles des ondes sismiques dans la Terre, il se forme autour du trajet du rai une zone de diffraction en forme de banane qui se terminerait au point d'émission du séisme d'un côté et au point de réception par le sismographe de l'autre. Vue en coupe, en tranche par le milieu, la banane n'est pas pleine : l'intensité des ondes est maximale dans une région circulaire tracée autour du rai et non sur le rai lui-même. La combinaison de la forme en long (banane) et en coupe (pneu, tore ou *doughnut* pour les auteurs anglo-saxons) a donné son nom à la méthode qui s'en inspire : « *banana-doughnut tomography* ». La méthode tomographique renvoie donc une information qui vient de ce cylindre allongé déformé en banane et non du rai lui-même. Rafaella Montelli a mis en œuvre la méthode de Nolet et Dahlen et repris les inversions pour voir si la prise en compte de cet effet changeait notre vision du manteau. La plupart du temps, quand les anomalies sont très larges (comme dans le cas des zones de subduction), la nouvelle méthode ne fait que confirmer les résultats antérieurs. Mais elle semble avoir un meilleur pouvoir de séparation quand les anomalies sont de faibles dimensions.

Tel est le cas des panaches et des points chauds. Rafaella Montelli a réussi à « voir » un certain nombre de panaches profonds dans le manteau, certains semblant aller jusqu'à plus de 1 500 km de profondeur, et parfois jusqu'à la couche D'' au-dessus

de la limite du noyau. Quelques belles illustrations sont données par la figure 9-3. Quand les ondes de cisaillement (S) sont ajoutées aux ondes P, l'image se précise (rappelons que ces ondes S sont particulièrement sensibles à une température élevée, d'autant plus qu'elle est proche de la fusion commençante). Des panaches profonds sont détectés sous les îles de l'Ascension, sous les Açores, les Canaries, les îles du Cap Vert, les îles Cook et Crozet, l'île de Pâques, Kerguelen, Hawaï, Samoa et Tahiti. Sous l'Afar, l'île de Bouvet, les îles Cocos, Louisville et la Réunion, les panaches partent en dessous de la zone de transition (et peut-être nettement plus profondément), mais la résolution des images ne permet pas encore de conclure. En revanche, sous Bowie, Hainan, l'Australie de l'Est ou l'île de Juan Fernandez, les panaches s'arrêtent dans le manteau moyen (ils n'y sont pas présents ou alors leur diamètre est trop faible pour qu'ils soient détectés). Les points chauds de l'Eifel et des Seychelles sont confinés au manteau supérieur. Des panaches naissants, qui n'ont pas encore atteint la surface, sont suggérés au sud de Java, à l'est des îles Salomon et dans la mer de Corail. Quand Rafaella Montelli utilise les ondes de cisaillement S, elle pense pouvoir affirmer que quelques-uns de ces panaches s'enracinent jusqu'à la limite entre manteau et noyau. Le cas de l'Islande est peu clair : jusqu'à la zone de transition pour certains (Ritsema et Montagner), jusqu'au manteau inférieur pour d'autres (Montelli).

Donner à voir les panaches, ou comme nous le disons familièrement les « imager », est l'une des tâches les plus difficiles pour les sismologues. La raison en est qu'il s'agit de structures verticales fines et très allongées et que, de plus, la propagation des ondes y étant plus lente, les ondes sismiques « guérissent » après leur passage à travers le panache : l'anomalie due à ce passage s'estompe puis disparaît (comme deux fronts d'ondes dans l'eau passés sous les arches voisines d'un pont perdent rapidement la signature de la pile située entre elles). Henri-Claude Nataf avait été l'un des premiers à penser pouvoir distinguer la partie profonde d'un panache vers 700 km de profondeur sous le point chaud de Bowie. Les résultats spectaculaires de Montelli ont relancé vigoureusement la discussion, mais certains en nient tout ou partie : ces résultats ne feraient que confirmer ceux des tomographies traditionnelles et l'effet « banana-doughnut » serait en réalité négligeable. L'usage de codes de couleur plus contrastés serait responsable de la production de ces images, que certains considèrent même comme des

artefacts. La controverse n'est pas close, mais la réponse viendra bientôt : d'autres équipes reprennent les codes de calcul, les données continuent à s'accumuler, la puissance des ordinateurs à s'accroître, la résolution des inversions tomographiques à s'améliorer. Les premiers résultats moissonnés avec cette tomographie sont déjà suffisamment riches et prometteurs. L'auteur de ces lignes pense qu'une partie au moins des panaches profonds de Montelli ne résulte pas d'un artefact de calcul et qu'ils ont de bonnes raisons d'être là où ils sont. Nous y reviendrons.

Signalons, pour clore ce chapitre dont nos amis sismologues sont les héros, une toute nouvelle, élégante et puissante méthode de tomographie inventée en 1999 par Michel Campillo, de l'université de Grenoble, et Richard Weaver, de l'Université d'Illinois. Il s'agit de la tomographie qui utilise le « bruit ambiant » : même quand il n'y a pas de séisme, la Terre est agitée, traversée d'un bourdonnement persistant qui résulte des échos et des « queues » des grands séismes ou du fracas des vagues océaniques. En comparant ce bruit reçu par deux stations et en en dégageant la partie corrélée, Campillo et Weaver ont montré que tout se passait comme si l'on disposait d'un véritable sismogramme ! On peut donc ausculter la Terre même dans des régions calmes, même quand il n'y a pas de séisme proche, et ce avec une résolution sans précédent. En s'appuyant sur ces méthodes, nos sismologues viennent de produire des images tridimensionnelles étonnantes du sous-sol de la Californie (groupe animé par Nicolas Shapiro) ou du haut plateau tibétain (groupe animé par Rob van der Hilst). Un résultat remarquable vient d'être obtenu par Michel Campillo et ses collègues Nicolas Shapiro et Florent Brenguier, aujourd'hui à l'IPGP. Appliquant la méthode à une nappe de sismographes répartis autour du Piton de la Fournaise à la Réunion, ils ont réussi non seulement à produire une belle image des profondeurs du volcan (jusqu'à quelques kilomètres), mais ont constaté que les indicateurs sismiques changeaient au cours du temps et leur permettaient d'annoncer une éruption au moins cinq jours (et peut-être plus) avant qu'elle ne survienne. On voit la lave monter et les fissures craquer et s'ouvrir... Florent Brenguier aura bientôt installé à la Réunion un réseau de surveillance continue du volcan. Notre point chaud national est sous bonne surveillance...

Chapitre 10

MOUVEMENT DES POINTS CHAUDS ET DÉRIVE DES PÔLES

« Bien qu'il cassât parfois ses échantillons à les essayer trop brusquement, il joignait au génie du géologue l'œil du minéralogiste. Avec son marteau, sa pointe d'acier, son aiguille aimantée, son chalumeau et son flacon d'acide nitrique, c'était un homme très fort. À la cassure, à l'aspect, à la dureté, à la fusibilité, au son, à l'odeur d'un minéral quelconque, il le classait sans hésiter parmi les six cents espèces que la science compte aujourd'hui. [...] Aussi le nom de Lidenbrock retentissait avec honneur dans les gymnases et les associations nationales. MM. Humphry Davy, de Humboldt, les capitaines Franklin et Sabine, ne manquèrent pas de lui rendre visite à leur passage à Hambourg. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

L'une des observations déterminantes de Morgan était la congruence des traces des points chauds entre elles. Une construction géométrique simple permet de tester si les traces laissées par les trois points chauds de Hawaï, de l'île de Pâques et du mont MacDonald sont compatibles avec le fait qu'ils ont formé depuis des dizaines de millions d'années un triangle (sphérique) de forme fixe à la surface de la Terre. Pour cela, il faut bien connaître la position géographique (latitude et longitude) et l'âge de chaque volcan constitutif des trois chaînes sous-marines : la qualité et le nombre de ces données ont bien sûr considérablement augmenté depuis une trentaine d'années. Le premier test effectué par Morgan lui-même semblait en faveur de la fixité des trois points chauds. L'analyse a été reprise depuis par de nombreux auteurs, avec des allers-retours entre des conclusions un peu distinctes. Dès 1973, Peter Molnar et Tanya Atwater, alors jeunes géophysiciens témoins de la période exaltante de la naissance de la théorie des plaques à laquelle

ils ont eu la chance et le talent de participer, détectent des mouvements de quelques millimètres par an des points chauds entre eux. Vers 1985, Peter Molnar et son étudiante Joanna Stock mettent au point une méthode d'estimation de la propagation des erreurs au cours de tels calculs : leur conclusion est que les points chauds du Pacifique forment des figures qui ne se déforment que très lentement par rapport aux vitesses typiques des plaques, en général moins d'un centimètre par an. En revanche, en 2001, à la suite d'une analyse exhaustive de tous les monts sous-marins du fond du Pacifique qu'on pourrait associer avec des points chauds, Anthony Koppers conclut en faveur de mouvements beaucoup plus importants, pouvant atteindre 6 centimètres par an, ruinant l'hypothèse originelle de Morgan. Alain Bonneville et Valérie Clouard ont, depuis, montré qu'il existe plusieurs sortes de chaînes volcaniques, de nature sans doute différente, et qu'on ne doit pas mélanger « les torchons et les serviettes » ; leurs travaux permettent notamment d'ajouter la chaîne des Marquises au petit groupe « fondateur¹ ». Les mouvements entre ces points chauds n'ont en général pas excédé 5 millimètres par an, soit un ordre de grandeur de moins que le mouvement relatif moyen des plaques. Les grands points chauds du Pacifique, mis en exergue par Morgan, forment bien des traces congruentes et une bonne partie de ses premières conclusions reste valable. Reste à voir ce qu'il en est dans les autres océans.

C'est Bob Duncan qui a, l'un des premiers, systématiquement évalué les mouvements entre les points chauds de l'océan Indien et ceux de l'océan Atlantique. Le travail a été repris et mis à jour plus récemment par Dietmar Müller et ses collaborateurs (Figure 10-1). Le résultat est le même : ces points chauds n'ont pas bougé l'un par rapport à l'autre de plus d'un demi-centimètre par an depuis leur formation et forment donc en première approximation un système de référence pour l'océan Indien.

Mais, pour achever le raisonnement, il faut relier entre eux les deux hémisphères (pacifique et indo-atlantique), afin d'évaluer le mouvement entre points chauds indo-atlantiques et points chauds pacifiques. Quand Molnar et Stock se sont livrés à cet exercice en 1987, ils ont estimé que les vitesses moyennes avaient pu atteindre 1 à 2 centimètres par an, lentes certes mais pas forcément négli-

1. Les trois chaînes de monts sous-marins issues des trois points chauds de Hawaï, de l'île de Pâques et du mont sous-marin de MacDonald (*cf. supra*).

geables par rapport au mouvement de certaines plaques. L'exercice a depuis été repris par Richard Gordon, par Dietmar Müller et par notre groupe. Mais il n'est pas facile d'établir un « circuit cinématique » sûr entre les deux hémisphères.

Qu'est-ce qu'un circuit cinématique ? Pour estimer la vitesse relative de deux points situés sur deux plaques tectoniques différentes, il faut les relier par un circuit qui franchisse des frontières entre paires de plaques entre lesquelles le mouvement soit connu et l'information sur les mouvements passés n'ait pas été détruite par collision ou subduction. Seules les frontières formées de segments de dorsales et de failles transformantes répondent à cette condition. Ainsi, le mouvement entre Afrique et Amérique du Nord est bien connu depuis l'ouverture de l'Atlantique central il y a 200 millions d'années parce que toute l'information nécessaire est préservée sur les fonds de l'océan sous forme d'anomalies magnétiques enregistrées par la croûte océanique ou de grandes traces laissées le long des failles transformantes. En revanche, le même exercice n'est pas possible pour déterminer le mouvement entre Europe et Afrique : c'est une zone de rapprochement, de séquences de subduction et de collisions qui ont donné naissance aux chaînes alpines de part et d'autre de la Méditerranée, dernière vieille relique de l'ancien océan Téthys. Pour estimer ce mouvement, on établit un « circuit » : on passe de l'Afrique à l'Amérique du Nord comme on vient de le voir, puis on revient d'Amérique du Nord en Europe en traversant la dorsale de l'Atlantique Nord, de part et d'autre de laquelle a été conservée l'information sur les mouvements entre ces deux plaques. Il suffit alors de faire l'addition vectorielle de ces deux mouvements pour trouver celui de l'Afrique par rapport à l'Europe.

Comment alors relier entre eux (pour estimer leur mouvement relatif) les points chauds de la Réunion et d'Hawaï ? On peut par exemple « sauter » de la plaque africaine (sur laquelle est actuellement située la Réunion) à la plaque Antarctique en traversant la branche sud-est de la dorsale de l'océan Indien. Tout va bien, rien que des segments de dorsale et de failles transformantes, l'information cinématique est donc bien conservée au fond de l'océan (c'est principalement l'équipe de Roland Schlich, avec Philippe Patriat et Jacques Ségoufin, puis plus récemment Jérôme Dymant, qui ont patiemment et minutieusement reconstitué toute l'histoire

cinématique du fond de l'océan Indien). De l'Antarctique, on saute joyeusement sur la plaque Pacifique en traversant la branche sud de la dorsale du Pacifique. Là encore l'information est conservée et l'on arrive ainsi sans encombre à Hawaï. Il suffit donc d'ajouter (toujours vectoriellement) les mouvements de la Réunion par rapport à la plaque Afrique, de la plaque Afrique par rapport à la plaque Antarctique, de la plaque Antarctique par rapport à la plaque Pacifique et enfin de la plaque Pacifique par rapport à Hawaï pour connaître le mouvement de la Réunion par rapport à Hawaï depuis 65 millions d'années qu'existe le point chaud de l'océan Indien. Mais ce circuit cinématique souffre d'une importante restriction : la géologie et la tectonique du continent Antarctique, masquées par la glace, nous restent très mal connues. Il n'est pas impossible qu'une ancienne frontière de plaques y soit masquée : certes pas actuelle, car il n'y a pas de ligne volcanique et sismique continue active qui sépare actuellement le continent glacé en deux parties. Mais il existe une chaîne de montagnes trans-Antarctique (le long de laquelle nous avons rencontré les basaltes de Ferrar) et par conséquent la trace de ruptures et de collisions anciennes. L'actuel continent Antarctique résulte de la soudure d'au moins deux plaques séparées et ne peut donc être considéré comme un objet indéformable pendant l'histoire que nous cherchons à reconstituer. Qu'à cela ne tienne : cherchons un autre circuit qui n'ait pas ce défaut. Eh bien, il semble qu'il n'y en ait guère ! Faites l'exercice sur une mappemonde qui indique bien toutes les frontières de plaques. De cette impossibilité résulte une controverse qui n'est pas encore éteinte entre ceux qui pensent savoir estimer complètement les déformations internes du continent Antarctique, ceux qui pensent qu'il n'y en a pas eu, et ceux qui pensent qu'il y en a eu beaucoup plus que ce que nous savons actuellement estimer...

L'une des versions les plus récentes de cet exercice de cinématique des plaques est due à Steve Cande, Carol Raymond et leurs collègues. Les dernières retouches viennent de l'identification de structures anciennes complexes au fond du Pacifique Sud entre Tasmanie, Nouvelle-Zélande et péninsule Est Antarctique ; notamment celle de la petite fosse d'Adare entre île de Mary Bird et monts trans-Antarctiques, dans la baie de Ross, aujourd'hui éteinte, mais qui a fonctionné entre 43 et 26 millions d'années. Le mouvement relatif entre les parties est et ouest de la plaque

Antarctique déduit de cette découverte est de faible amplitude, mais il entraîne une rotation entre les deux anciennes plaques aujourd'hui soudées. Et quand on joue au jeu des circuits cinématiques, de faibles rotations peuvent entraîner de grands mouvements à grande distance, par effet de levier. L'oubli de ce petit morceau du puzzle entraînait des erreurs de reconstruction de quelques centaines de kilomètres quand on tentait de relier le point chaud de la Réunion à celui d'Hawaï. Avec ces toutes dernières informations, le mouvement prédit de ce dernier, dans l'hypothèse où il serait resté fixe par rapport à la Réunion, et celui observé diffèrent peu pour les parties récentes du tracé, mais de plus en plus quand on recule dans le passé (Figure 10-2). L'écart entre positions prédites et observées est de 500 km pour les volcans âgés de 40 millions d'années, mais atteint 1 700 km pour ceux de 65 millions d'années.

Pris au pied de la lettre (et c'est pour le moment ce qui me semble le plus raisonnable), ces travaux de Carol Raymond impliquent un mouvement régulier, lent, de l'ordre du centimètre par an entre la Réunion et Hawaï depuis 40 millions d'années. Mais ils mettent en évidence un mouvement beaucoup plus rapide, à une vitesse de l'ordre de 4 à 5 centimètres par an, pendant les 25 à 30 millions d'années précédents.

Le paléomagnétisme permet de vérifier en partie ce résultat. En mesurant l'inclinaison de l'aimantation de laves échantillonnées sur certains volcans des deux chaînes (Hawaï-Empereur d'un côté, Maurice-Mascareigne-Chagos-Laquedives-Maldives de l'autre), il est possible de suivre leur évolution respective en latitude. C'est ce qu'ont fait de nombreux chercheurs japonais et américains (de Masaru Kono à John Tarduno) pour la première, et mon ancien élève et aujourd'hui collègue Didier Vandamme et David Schneider pour l'autre. Dans les deux cas, aucun changement significatif de latitude n'est constaté depuis 40 millions d'années, mais auparavant le point chaud d'Hawaï dérivait à la vitesse de 4 à 5 centimètres par an vers le sud et celui de la Réunion de 2 à 3 centimètres par an vers le nord. Les deux ne se compensant pas, les points chauds étaient bien alors en mouvement l'un par rapport à l'autre.

Si nous nous souvenons que les principaux points chauds de l'hémisphère Pacifique sont restés pendant ce temps sensiblement immobiles les uns par rapport aux autres, et qu'il en va de même

pour les points chauds de l'hémisphère indo-atlantique, nous sommes conduits à penser que ces deux ensembles de points chauds, associés chacun à un hémisphère, sont en mouvement relatif. Ce mouvement est, il est vrai, lent depuis 40 millions d'années, c'est-à-dire depuis la période du coude de la chaîne des monts sous-marins Hawaï-Empereur (est-ce un hasard ?), et permet donc de conserver au premier ordre la vision de Jason Morgan d'un référentiel peu déformable ancré dans le manteau. Cette vision ne peut pas être conservée pour les périodes antérieures. On ne peut pour autant considérer que ce problème posé aux géophysiciens soit clos. Tandis que certains de mes collègues, comme John Tarduno, ne doutent pas de l'importance des mouvements entre points chauds et pensent même qu'ils sont sous-estimés, certains, comme Richard Gordon, pensent qu'il nous reste des frontières de plaques éteintes à découvrir, surtout sous l'Antarctique, et que ces mouvements aujourd'hui ignorés suffiront à clore l'écart entre positions observées et prédites des points chauds dont l'immobilité lui paraît acquise. Ces désaccords se sont exprimés fortement lors de congrès de l'American Geophysical Union au cours des dernières années. À suivre !

La quête d'un référentiel du manteau, lancée par Jason Morgan, avait des fondements mécaniques. Qu'elle soit couronnée de succès ou non, ses conséquences pour notre compréhension de la mécanique du manteau terrestre sont importantes. Si les points chauds étaient bien issus de panaches fixes dans le manteau profond, ceux-ci nous fourniraient un référentiel « absolu » pour le mouvement des plaques (ce terme « absolu » est, comme nous l'avons rappelé, naturellement impropre : tout mouvement s'estime par rapport à un système de référence). Si le réseau des panaches avait été réellement indéformable et ancré au manteau, leur trace à la surface des plaques aurait permis d'en déterminer aisément le mouvement : la chaîne créée par le point chaud de la Réunion aurait fourni le mouvement successif des plaques africaine et indienne par rapport au manteau, celle créée par le point chaud d'Hawaï le mouvement de la plaque Pacifique par rapport à ce même manteau. Donc, en combinant les deux (c'est-à-dire en créant un circuit cinématique passant en profondeur par le manteau), le mouvement relatif de la plaque Pacifique par rapport à l'Inde et l'Afrique, alors qu'elles sont pour l'essentiel séparées par des zones de subduction qui ne permettent pas de faire directement l'exercice

Fig 1-2 : Affleurements de marno-calcaires à Punta Maiata en Sicile.
Chaque alternance de couleur (ensemble rose-blanc-gris-blanc) correspond à un cycle de précession des équinoxes (environ 23 000 ans) (photo de l'auteur).

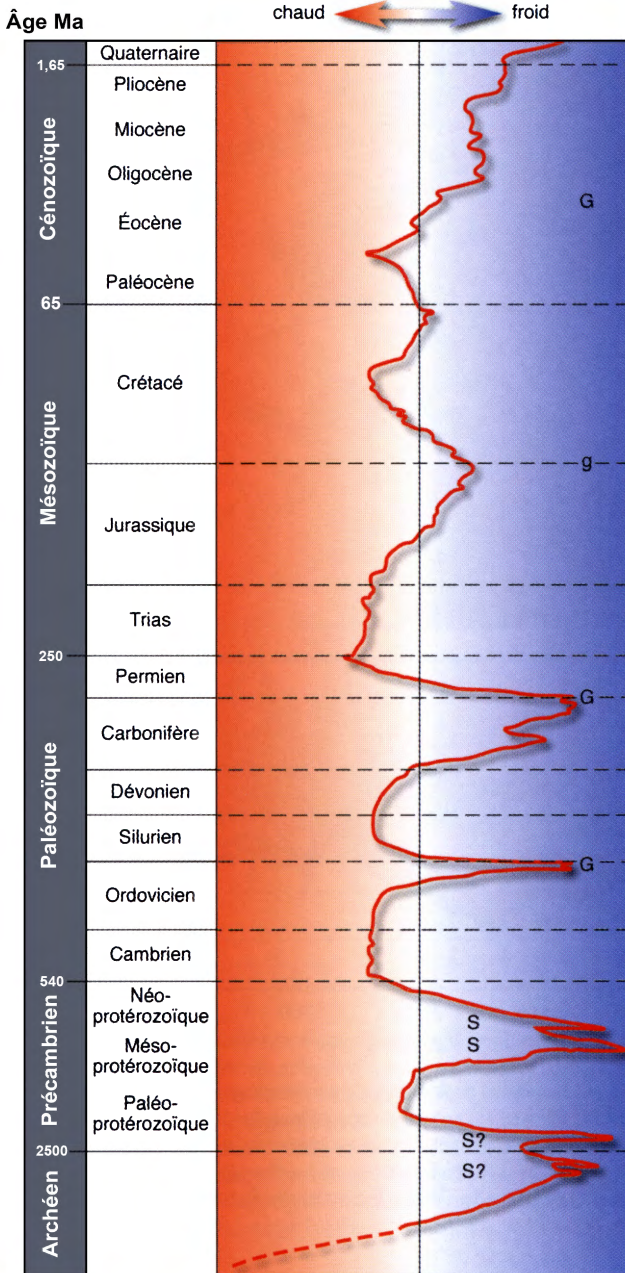
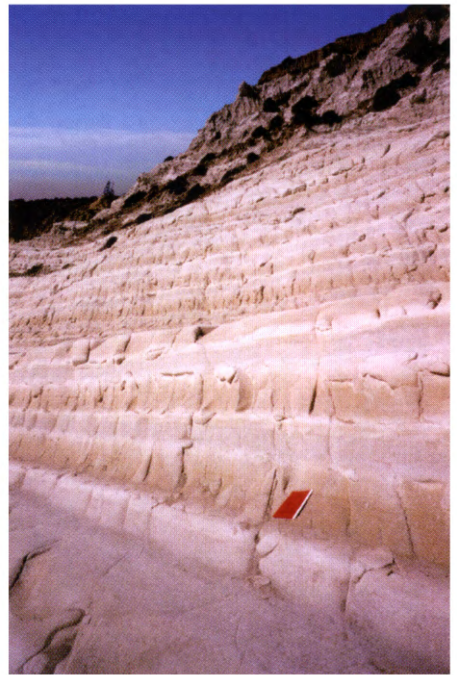


Fig 1-3 : Évolution de la température moyenne de la basse atmosphère de la Terre depuis l'Archéen (4,5 milliards d'années). La détermination est qualitative et repose sur de nombreux indices indirects. L'échelle des temps, en millions d'années, n'est pas linéaire. Les épisodes marqués de la lettre G correspondent aux principales glaciations (la lettre g à la limite entre Jurassique et Crétacé correspond à une glaciation moins importante). Les épisodes marqués par la lettre S correspondent à des épisodes où la Terre entière était peut-être englacée (« Snowball Earth »).

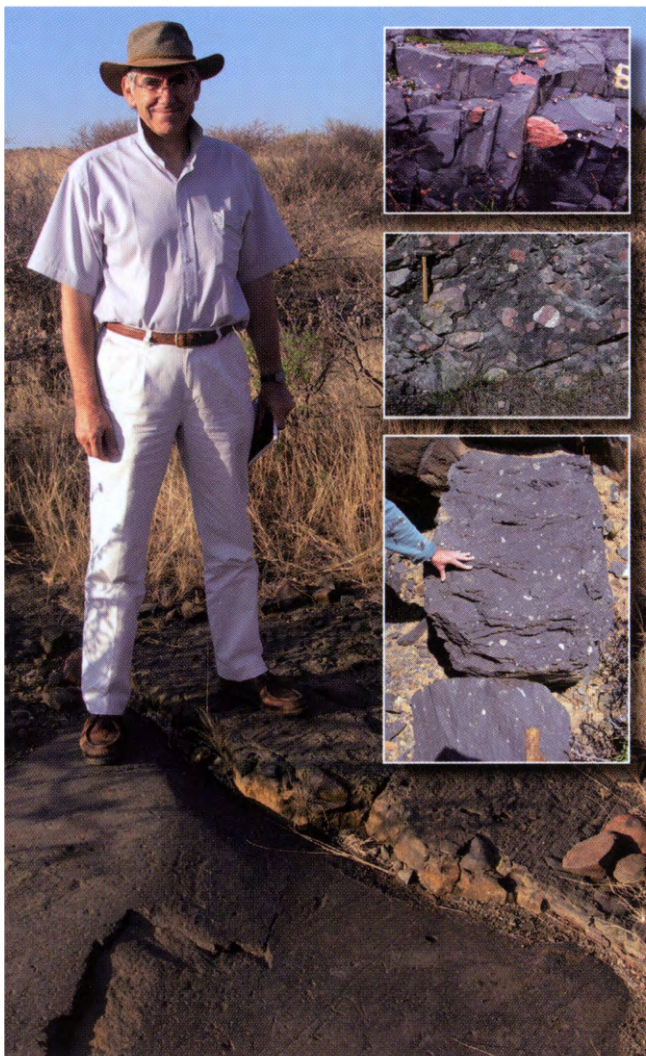


Fig 1-4 : Encart : quelques exemples de tillites, roches d'origine glaciaire (les éléments plus gros ont été « lâchés » par des icebergs lors de leur fonte en pleine mer et la matrice grise correspond aux particules plus fines. Photo : l'auteur a d'un côté le pied sur des sédiments glaciaires (on voit de plus les stries laissées par des galets trainés par les glaciers) vieux de 300 millions d'années et de l'autre côté le pied sur le socle ancien vieux de 2 600 millions d'années. Près de la moitié de l'âge de la Terre entre les deux pieds... (près de Kimberley, Afrique du Sud ; photo Jock Robey).

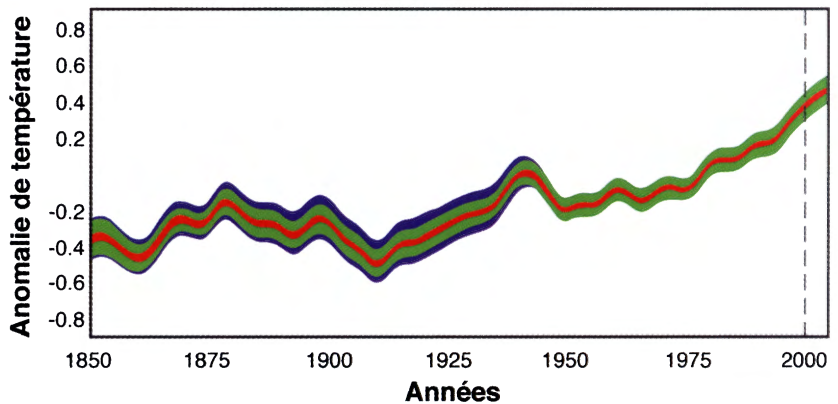


Fig 2-1 : Évolution depuis 150 ans de l'écart de la température moyenne globale de la basse atmosphère à une valeur (zéro) arbitrairement choisie sur une période de référence ; la courbe fait la moyenne globale de toutes les observations, tant sur les continents que sur les océans, présentées séparément sur la figure 3-2. Les couleurs indiquent les diverses sources d'incertitude (d'après P. Brohan et coll. du Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Meteorological Office, Exeter, Grande-Bretagne).

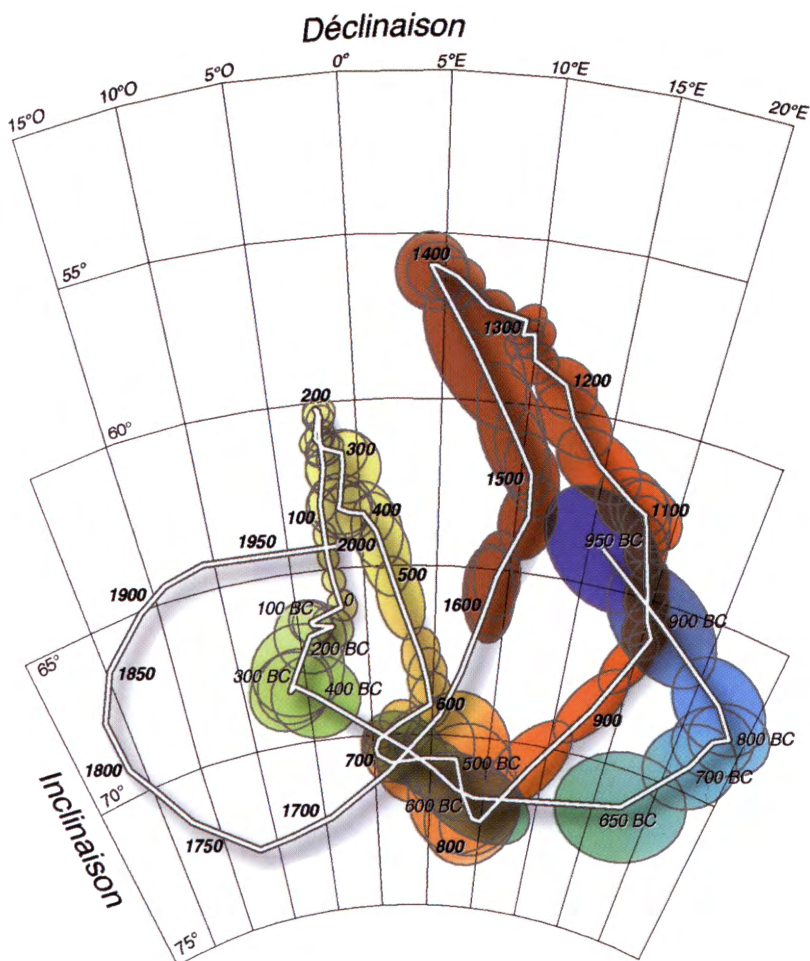


Fig 2-6 : Variations de la direction du champ magnétique (estimée à Paris) depuis 3 000 ans. Les années sont indiquées. On lit en haut la déclinaison (écart au nord géographique) et sur le côté l'inclinaison (plongement sous l'horizontale) en degrés. De 1700 à 2000 les valeurs sont données par des observations directes, très précises. Avant 1700 elles sont estimées (avec une incertitude indiquée par une ellipse) à partir de la mesure de l'aimantation d'objets archéologiques datés (c'est l'objet de l'archéomagnétisme) (d'après Y. Gallet et coll.).

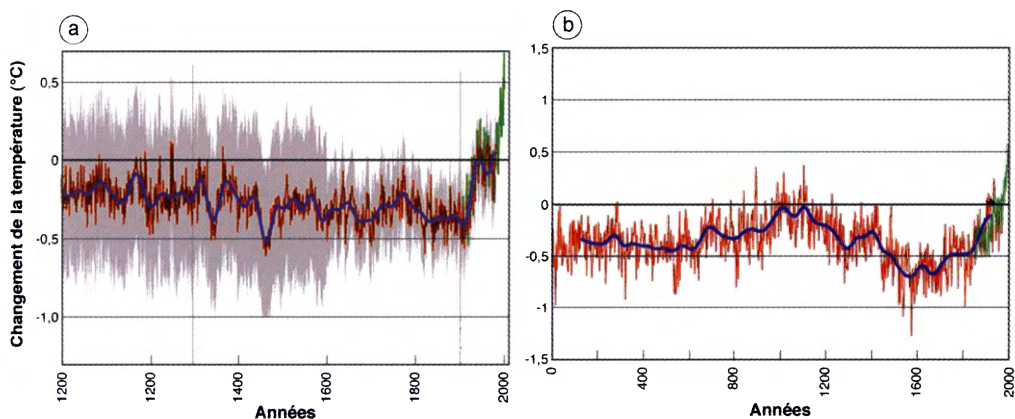


Fig 3-1 : Deux estimations des changements de la température moyenne globale (en degré Celsius). Celle du haut correspond au dernier millénaire et est due à Mann et collaborateurs. C'est la célèbre courbe « en crosse de hockey ». La partie en vert est instrumentale. La partie en orange résulte de la compilation d'un certain nombre de données indirectes, comme les anneaux d'accroissement des arbres. Celle de droite, plus récente, est due à Moberg et ses collaborateurs et porte sur les deux derniers millénaires. Le code de couleurs est le même. Moberg critique l'usage des anneaux d'accroissements des arbres pour déterminer les variations de longue période et leur substitue des variations des isotopes de l'oxygène dans des carottes sédimentaires réparties sur les océans du globe. On y retrouve bien l'optimum climatique du Moyen Âge et le petit âge glaciaire (voir figure 2-4).

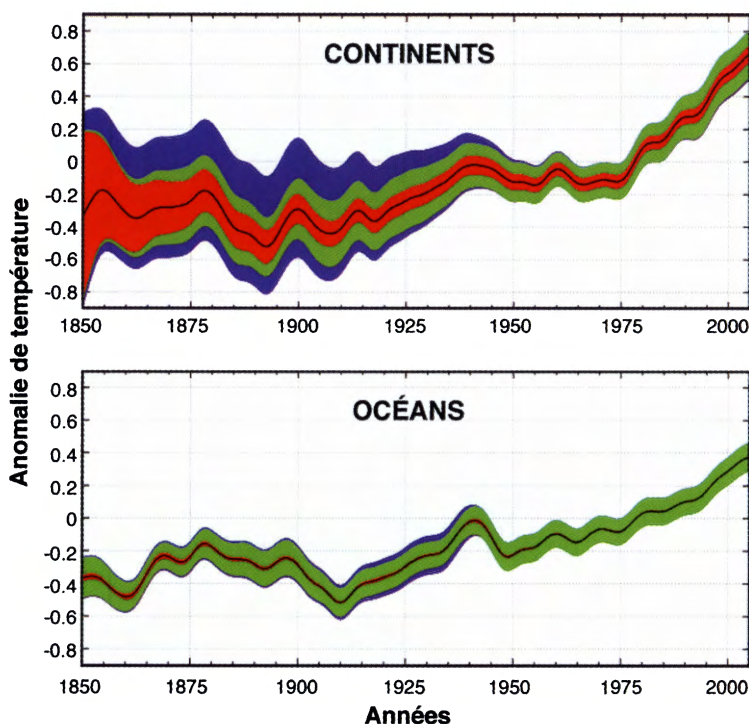
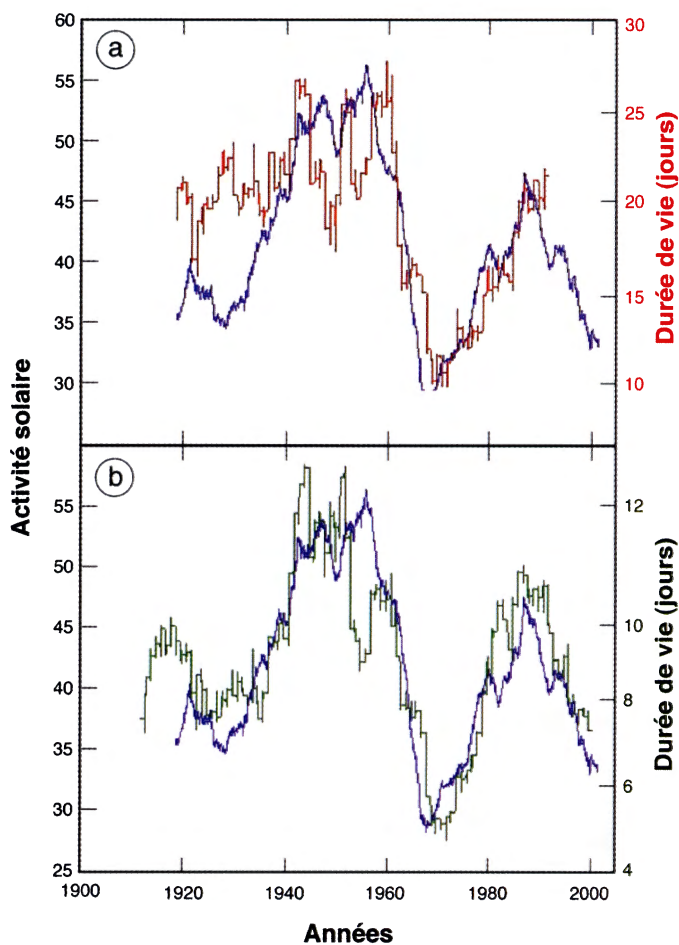


Fig 3-2 : Évolution depuis 150 ans de l'écart de la température moyenne globale à une valeur (zéro) arbitrairement choisie sur une période de référence ; la courbe du haut correspond aux continents, la courbe du bas aux océans (toutes deux en degrés Celsius). La courbe moyenne globale est reproduite sur la figure 2-1. Les couleurs indiquent les diverses sources d'incertitude (d'après P. Brohan).

Fig 3-5 : Comparaison entre les évolutions à long terme de la durée de vie de la température moyenne journalière en Europe et de l'activité solaire. Une fenêtre glissante de 11 ans permet de mettre en évidence les variations de plus longue période. L'activité solaire (courbes en bleu, échelle de gauche) est estimée à l'aide d'un indicateur magnétique (voir figure 2-3). La durée de vie (échelle de droite, en jours) est indiquée par les courbes rouge pour les stations météorologiques d'Europe du Nord-Ouest (en haut), et verte pour la Hollande (en bas). Les données en Hollande sont en effet disponibles jusqu'en 2006 (mais pas toutes les données des autres stations européennes) et permettent de vérifier que l'indicateur climatique suit bien tout le temps l'indicateur solaire, y compris dans sa redescente depuis les années 1990 (d'après Le Mouél et coll.).



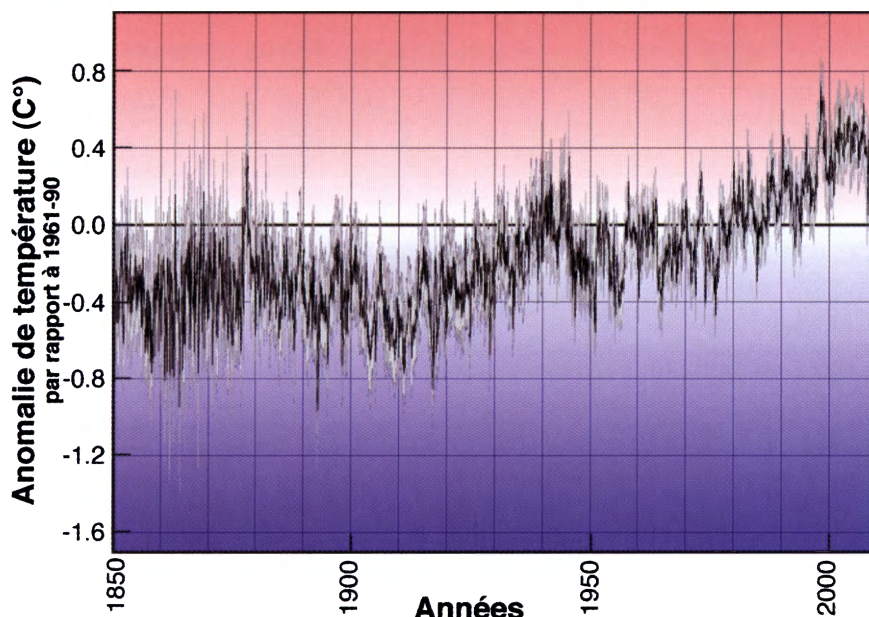


Fig 3-7 : Version la plus récente au moment de la rédaction de ce livre de l'anomalie de température globale moyenne mensuelle depuis 1850. Les tendances décennales sont à un réchauffement de 1910 à 1940 environ, un refroidissement de 1940 à 1950, une température moyenne plutôt stable de 1950 au milieu des années 1970, un réchauffement jusqu'au maximum marqué de 1998 et un refroidissement depuis 10 ans. Cette interprétation de la tendance d'un phénomène de très grande variabilité n'est sans doute pas unique et le lecteur pourra se faire sa propre idée. Il pourra aussi comparer aux figures 2-1 et 3-2 dont les sources, mais pas le lissage ni la date de parution, sont les mêmes (données mensuelles du modèle HadCrut3 du Hadley Research Center, Meteorological Office, Grande-Bretagne).

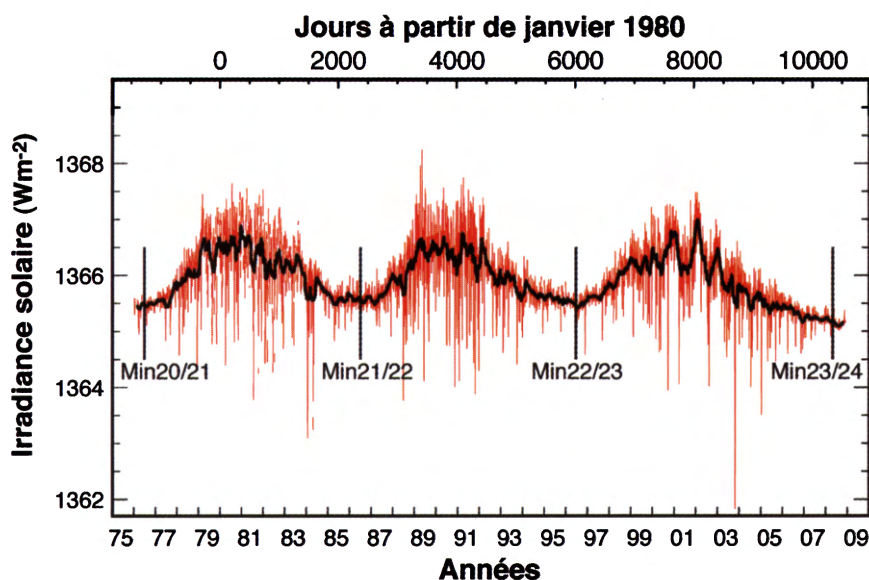


Fig 3-8 : Variations de l'irradiance solaire (puissance émise par le Soleil à toutes les longueurs d'onde à la distance de l'orbite de la Terre, en Watt par mètre carré) mesurée par divers satellites depuis 1978 (d'après C. Fröhlich et coll.). La période correspond à trois cycles solaires dont les minima sont indiqués avec les numéros des cycles. Il existe au moins trois compilations de ces données, qui ne donnent pas toutes la même évolution à très long terme (une augmentation légère pour les uns, une diminution pour les autres !). Rappelons que la puissance moyenne reçue par l'atmosphère doit être divisée par 4 en raison de la rotation de la Terre.

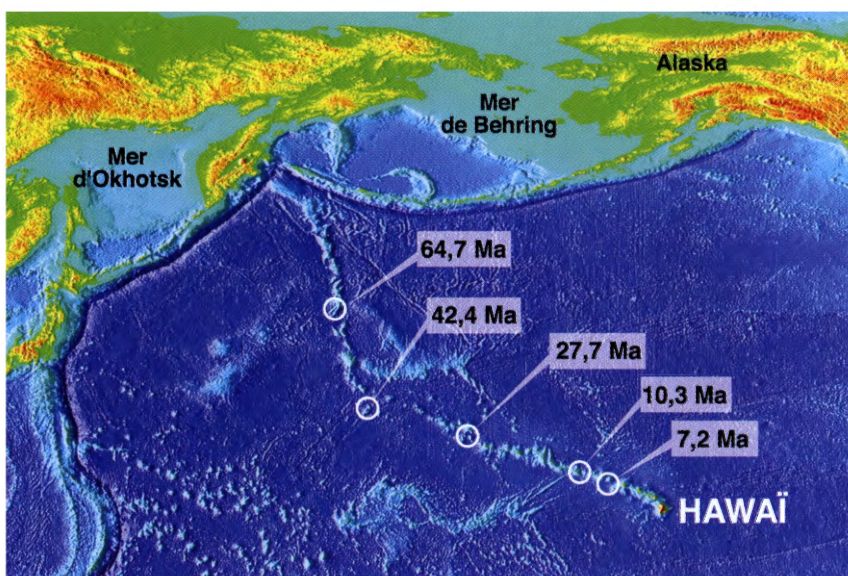


Fig 5-1 : Topographie du fond des océans, obtenue par les mesures satellitaires des déformations de leur surface (altimétrie ; voir annexe 1), révèle la chaîne de monts sous-marins qui, partant de Hawaï, s'étend vers l'ONO (chaîne des monts hawaïens) puis vers le NNO (chaîne des monts de l'Empereur), pour s'engloutir sous la fosse des Kuriles au large du Kamtchatka. Certains de ces monts sous-marins, tous volcaniques, ont été dragués puis datés ; quelques âges (en millions d'années) sont indiqués (d'après Carol Raymond et coll.).

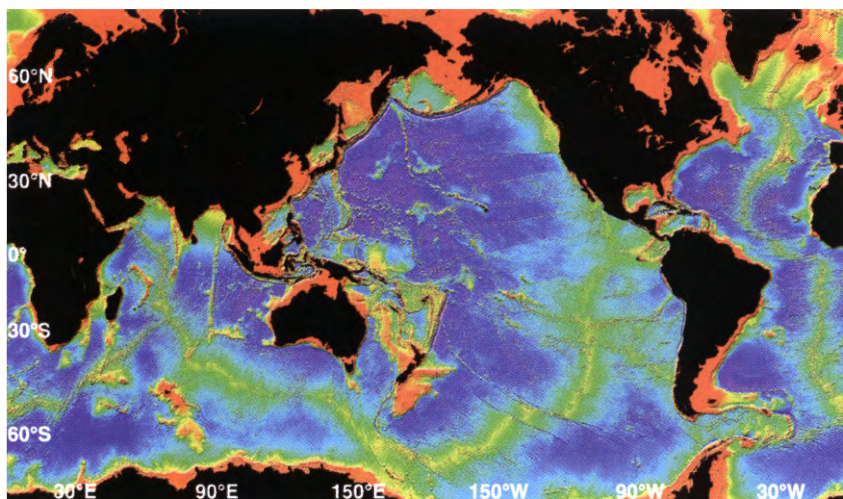


Fig 5-2 : Topographie du fond des océans, obtenue par les mesures satellitaires des déformations de leur surface (altimétrie à partir du satellite Topex-Poseidon ; voir annexe 1), à l'échelle du globe entier. On y distingue bien les dorsales, les fosses et les grandes zones de fracture transformante qui forment les limites des plaques (comparer avec la figure 4-1), et aussi les milliers de monts sous-marins isolés.



Fig 6-1 : Volcan du Piton de la Fournaise à la Réunion après l'épisode d'effondrement de sa caldeira sommitale en février 2007. On aperçoit au loin le sommet découpé du volcan plus ancien du Piton des Neiges (photo Nicolas Villeneuve).

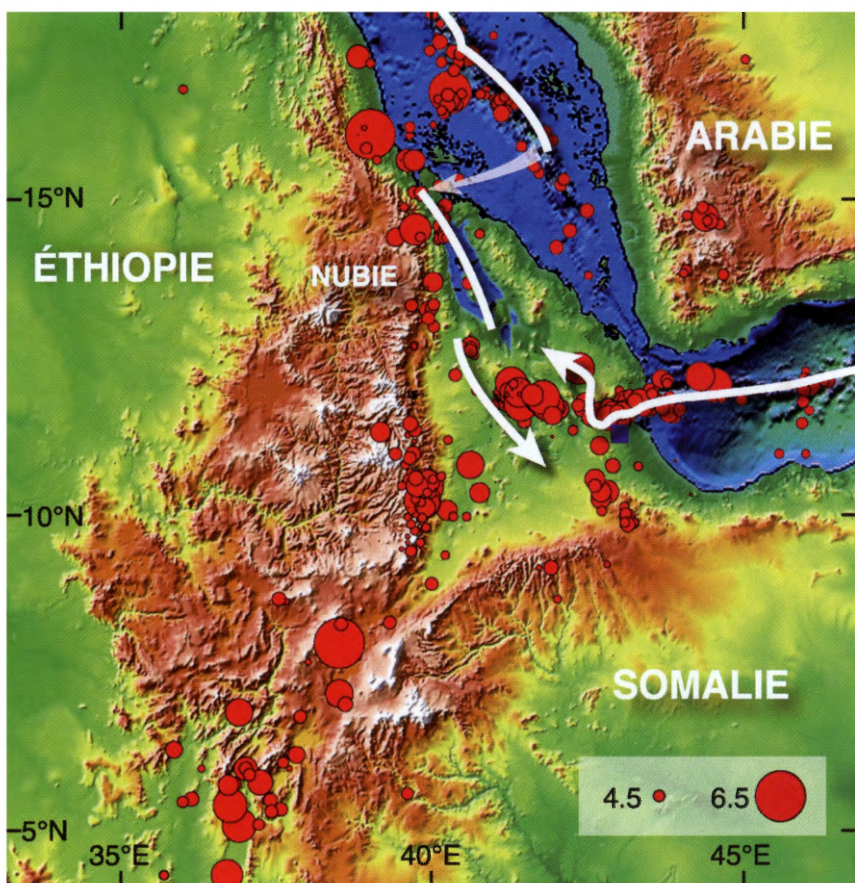
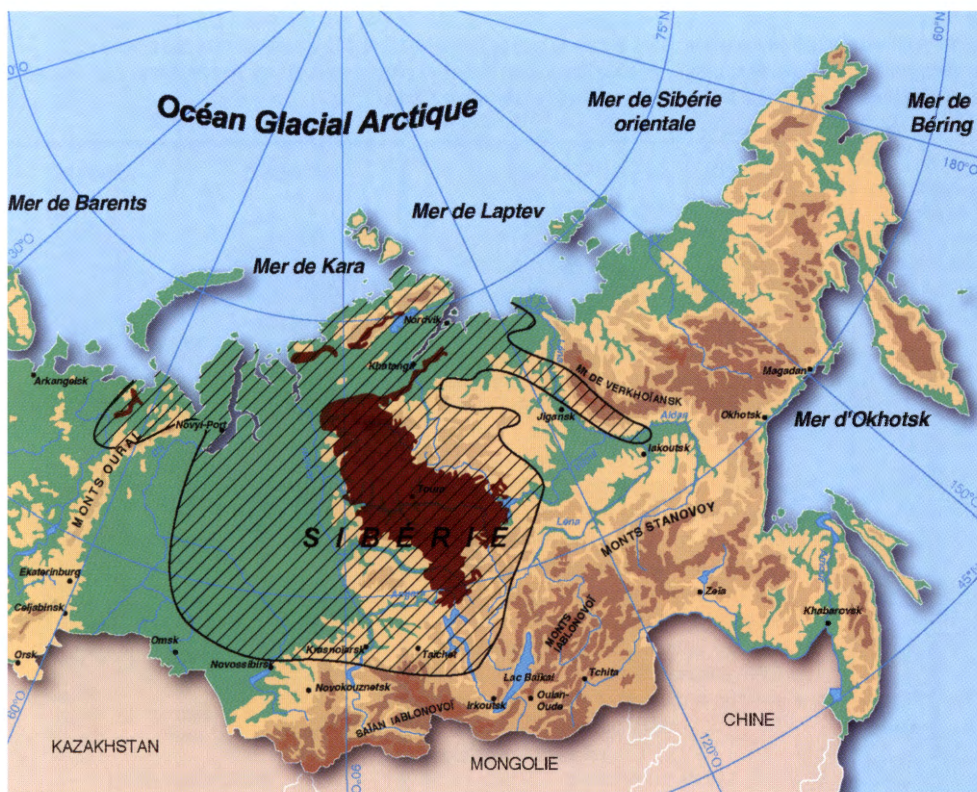


Fig 6-3 : Topographie des environs du point triple et de la dépression de l'Afar (modèle numérique de terrain). Les principaux séismes récents sont indiqués. Ils marquent l'activité des rifts et des bordures de la dépression. Les hauts plateaux correspondent aux traps d'Éthiopie, de Somalie et du Yemen. La propagation vers l'Ouest du rift d'Aden et la propagation vers le Sud-Est du rift de la mer Rouge, et leur parcours dans la dépression Afar sont indiqués par des flèches blanches (d'après Isabelle Manighetti et coll.).

Fig 7-3 : Grands traps de Sibérie. Leurs affleurements basaltiques actuels sont indiqués en brun foncé. Mais leur extension originelle, il y a 250 millions d'années, correspond sans doute à la zone hachurée, bien plus vaste. On a notamment retrouvé les laves dans des forages sous des kilomètres de sédiments dans le bassin du Kazakhstan.



Fig 7-1 : Grande falaise des trapps du Deccan en Inde dans la région dite des Ghats de Mahabaleshwar (photo Anne-Lise Chenet).



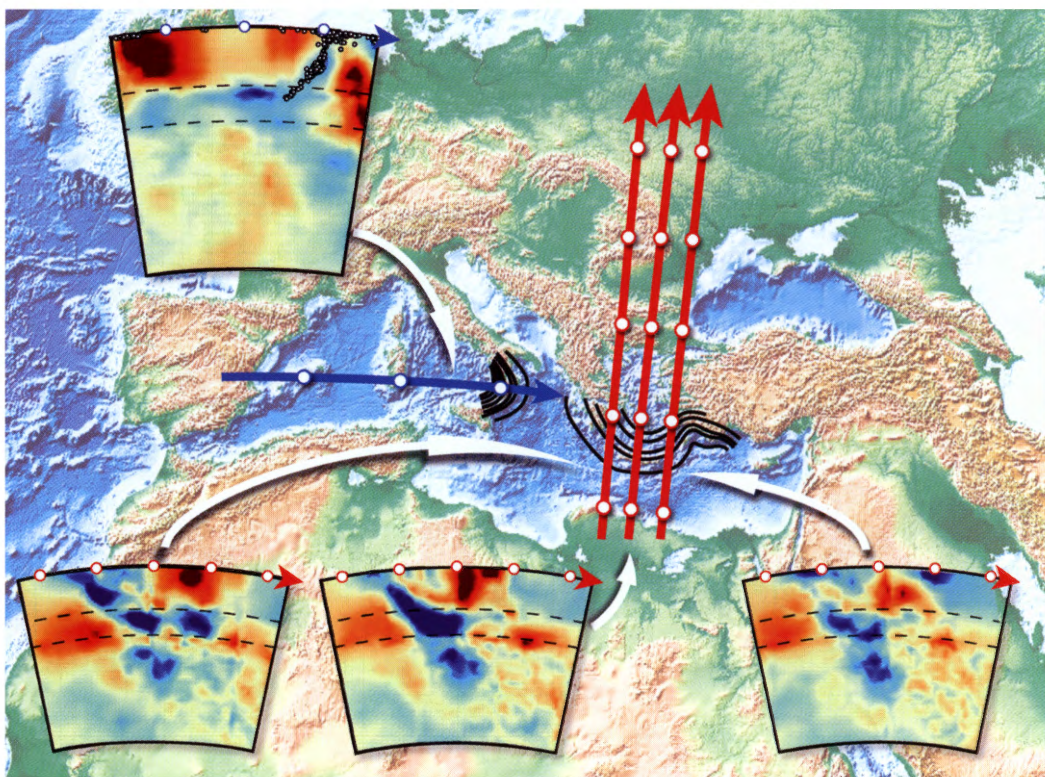
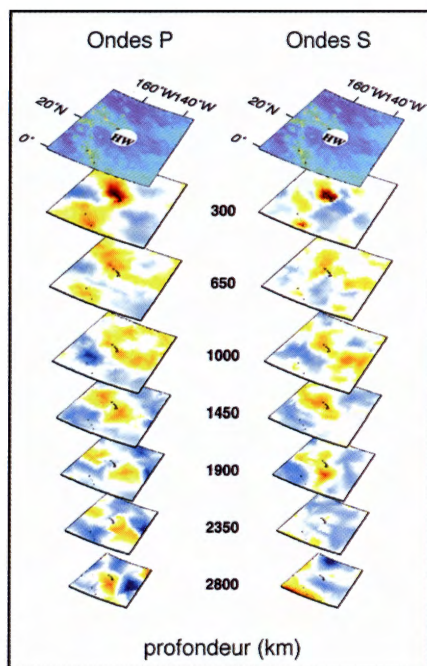


Fig 9-2 : Coupes sismologiques tomographiques sous la Méditerranée (documents de H. Karason et R. van der Hilst). Leur localisation est indiquée par les traits épais rouges et bleu, les trois premières dans la zone de subduction de l'Afrique sous la Crête et la mer Égée, la dernière dans la zone de subduction de l'Afrique sous la Sicile et le sud de l'Italie. Les couleurs bleues indiquent les vitesses sismiques plus rapides, correspondant aux zones plus froides qui forment les plaques plongeantes. Dans le cas du sud de l'Italie, les foyers des séismes sont aussi indiqués : ils marquent la géométrie de la plaque en subduction (plan incliné plongeant sous la mer Tyrrhénienne). Les courbes en tireté délimitent la zone de transition du manteau, entre 440 et 700 km.

Fig 9-3 : Cartes tomographiques à diverses profondeurs, jusqu'à la base du manteau, sous trois points chauds : Hawaï, l'Islande et la Réunion (documents dus à Raffaella Montelli et coll.). Les ondes de compression (P) et les ondes de cisaillement (S) sont toutes deux estimées. Les couleurs rouges correspondent aux anomalies de vitesse plus lentes et sont interprétées comme plus chaudes. On peut ainsi suivre le panache de Hawaï jusqu'à 2 800 km de profondeur. L'interprétation de ces résultats, qui y voit souvent un enracinement profond des points chauds principaux (primaires), est encore débattue.



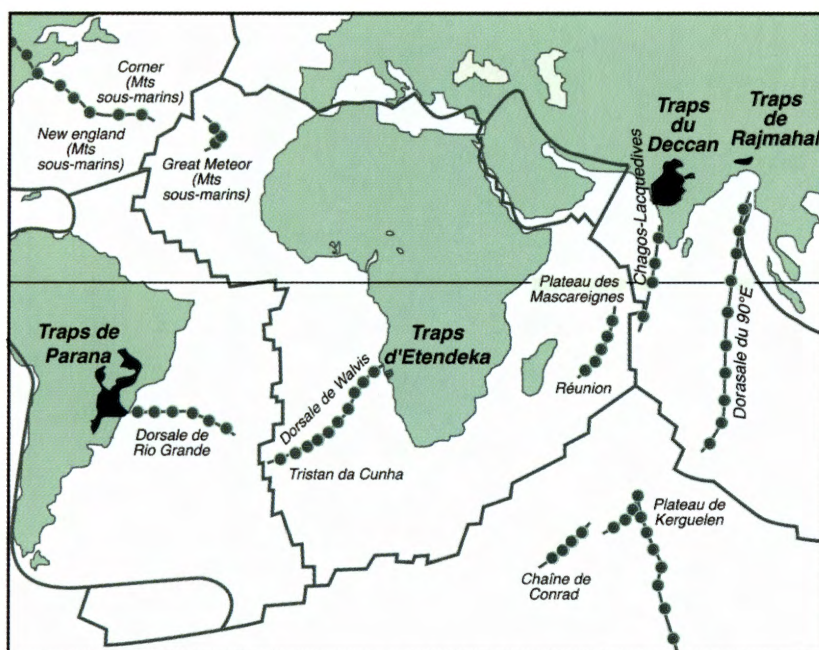
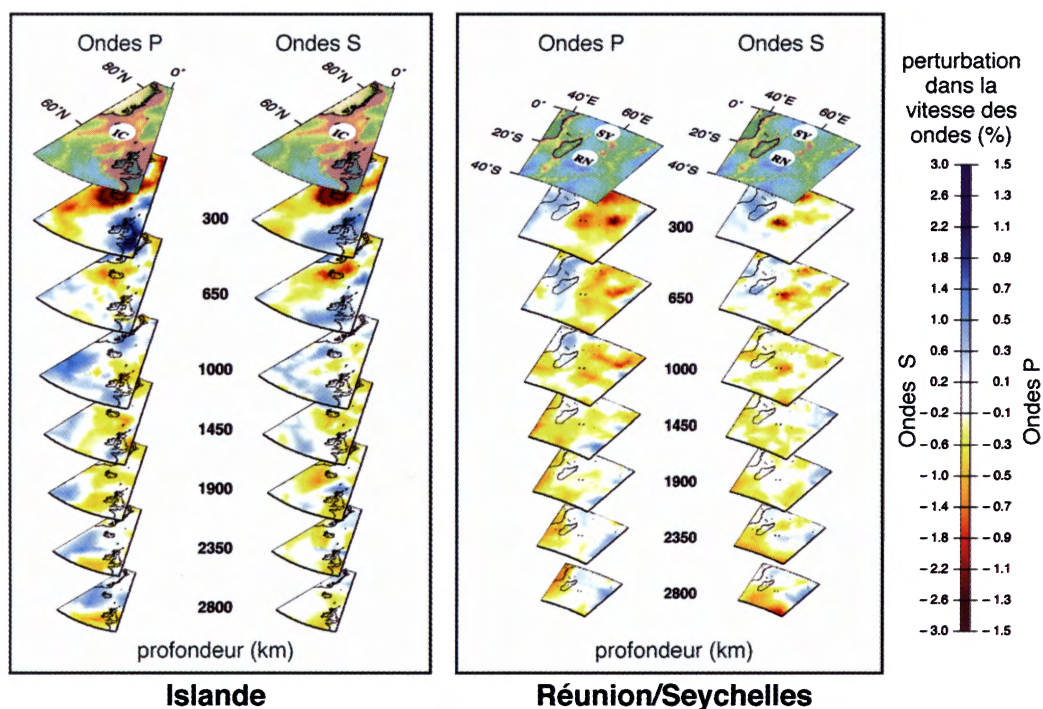


Fig 10-1 : Traces des principaux points chauds dans les océans Indien et Atlantique (d'après Müller et coll.). Le point chaud de Kerguelen conduit ainsi aux petits traps de Rajmahal, celui de Tristan da Cunha aux traps du Parana et d'Etendeka, celui de la Réunion au Deccan, celui du Grand Meteor (moins clair) vers les volcans des White Mountains dans l'est des États-Unis.



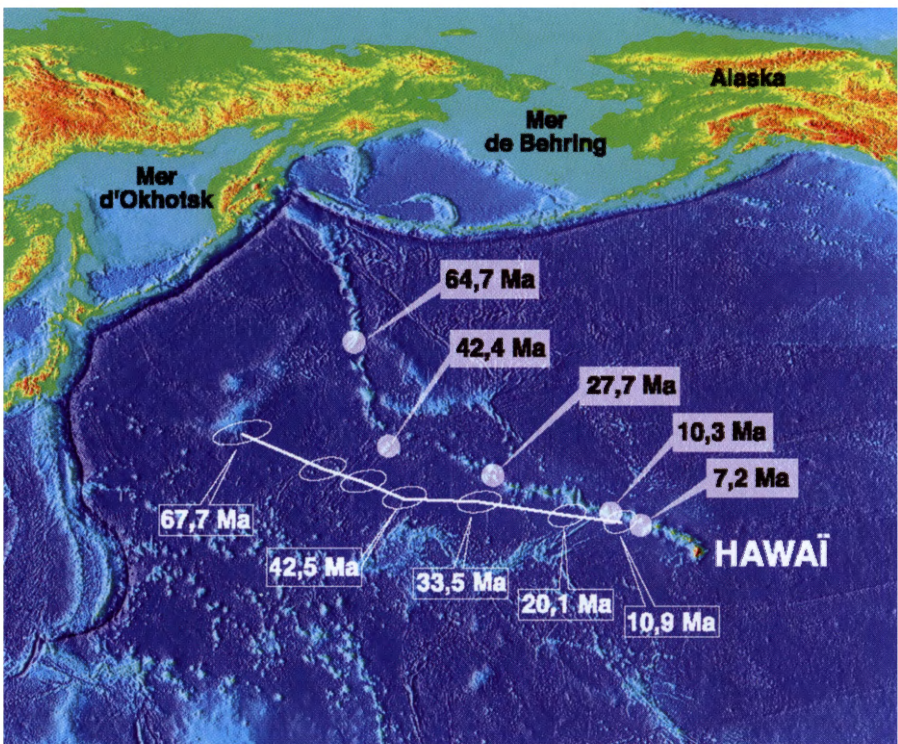
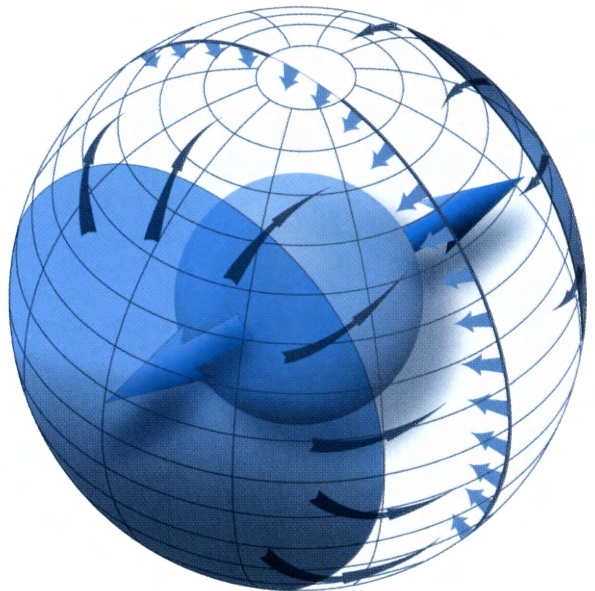


Fig 10-2 : La courbe en blanc indique les positions prédites pour le point chaud de Hawaï, aux âges indiqués en millions d'années (avec des ellipses d'incertitude), dans l'hypothèse où les points chauds de la Réunion et d'Hawaï seraient restés fixes l'un par rapport à l'autre, et où le « circuit cinématique » à travers les frontières de plaque qui permet de les relier est exact. On voit que l'accord est raisonnable jusqu'à 40 millions d'années, mais de plus en plus grand avant : les points chauds des hémisphères Atlantique et Pacifique étaient alors en mouvement relatif, de quelque 5 cm/an (d'après Carol Raymond et coll. ; voir figure 5-1).

Fig 10-4 : Dans la « convection quadrupolaire » imaginée par F. Busse, le matériau du manteau flue et s'élève au-dessus de deux points opposés (antipodaux) à la surface du noyau. Le courant de retour, qui ferme l'ensemble de cette circulation, se fait tout au long d'un grand cercle perpendiculaire aux deux courants ascendants. Sur Terre, les courants ascendants correspondent aux deux super-panaches situés sous l'Afrique et sous le Pacifique équatoriaux, les redescentes aux subductions de la ceinture de feu du Pacifique.



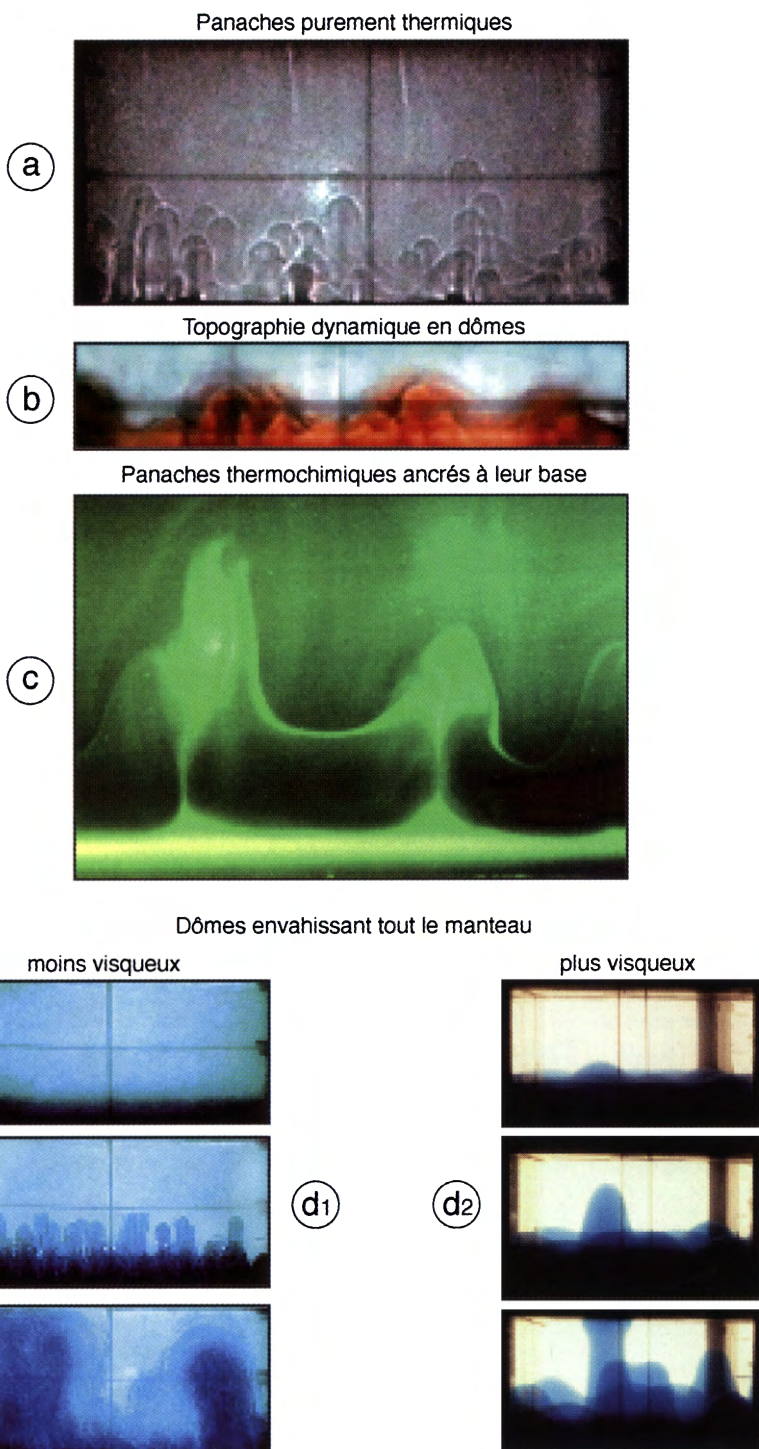


Fig 11-1 : Extraits de la classification « zoologique » des panaches thermo-chimiques expérimentaux réalisée par Anne Davaille, en fonction des diffusivités thermique et chimique et du nombre de Rayleigh (voir texte).

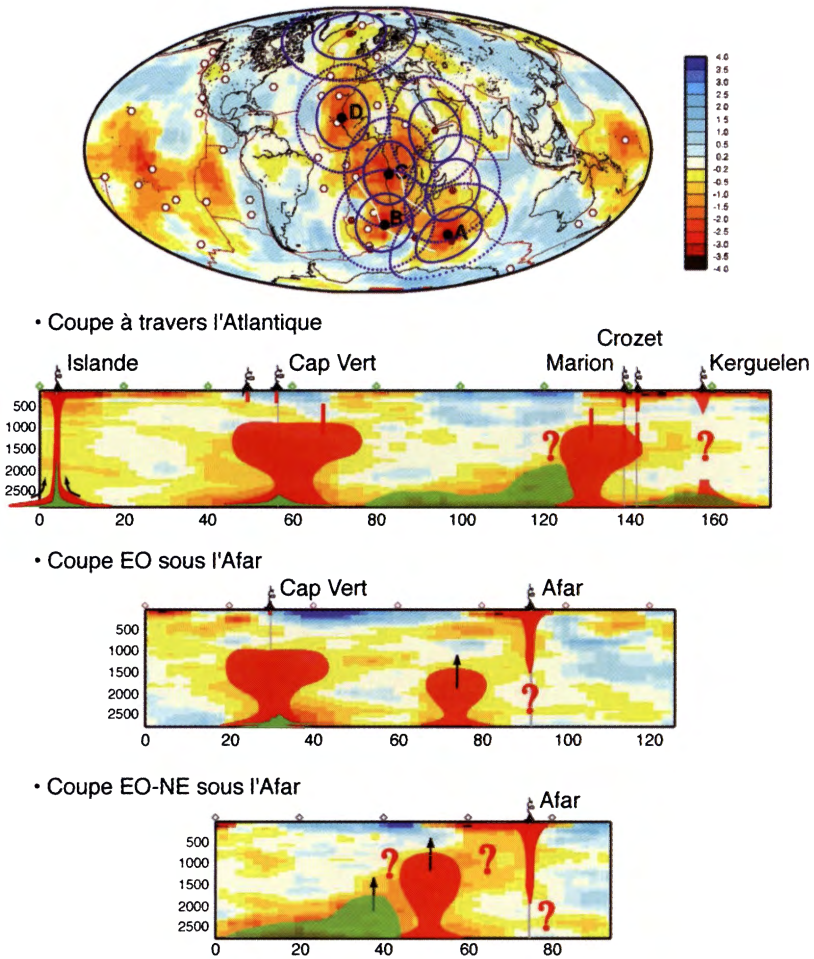


Fig 11-2 : Le super-panache africain peut être divisé en plusieurs très grands panaches, indiqués par les lettres A à D sur cette carte et ces coupes tomographiques dues à Éléonore Stutzmann et coll. (échelles horizontales en degrés d'arc ; $1^\circ = 111 \text{ km}$).

On y distingue des panaches de grande taille sous certains points chauds (Cap Vert, Marion) et des panaches fins en provenance du manteau inférieur (les échelles de profondeur sont en km) sous l'Islande et peut-être sous l'Afar et Kerguelen.

On distingue également des structures obliques et des panaches profonds qui n'ont pas (encore ?) d'expression de surface. Les couleurs chaudes correspondent à des vitesses faibles, interprétées comme la trace de matériau plus chaud ou plus léger. L'échelle de ces anomalies de vitesse est en %.

Fig 14-1 : Détermination du champ des vitesses du fer liquide à la surface du noyau (d'après C. Eymin et G. Hulot). Ces vitesses sont déduites de l'observation du champ magnétique et de sa variation séculaire à la surface de la Terre. La composante horizontale de la vitesse est représentée par des flèches, la pression par un code de couleur (rouge pour les hautes pressions, bleu pour les basses pressions). On distingue dans cette « atmosphère » des cyclones et des anticyclones et des points d'émergence ou de plongée aux hautes latitudes, en partie symétriques par rapport à l'équateur.

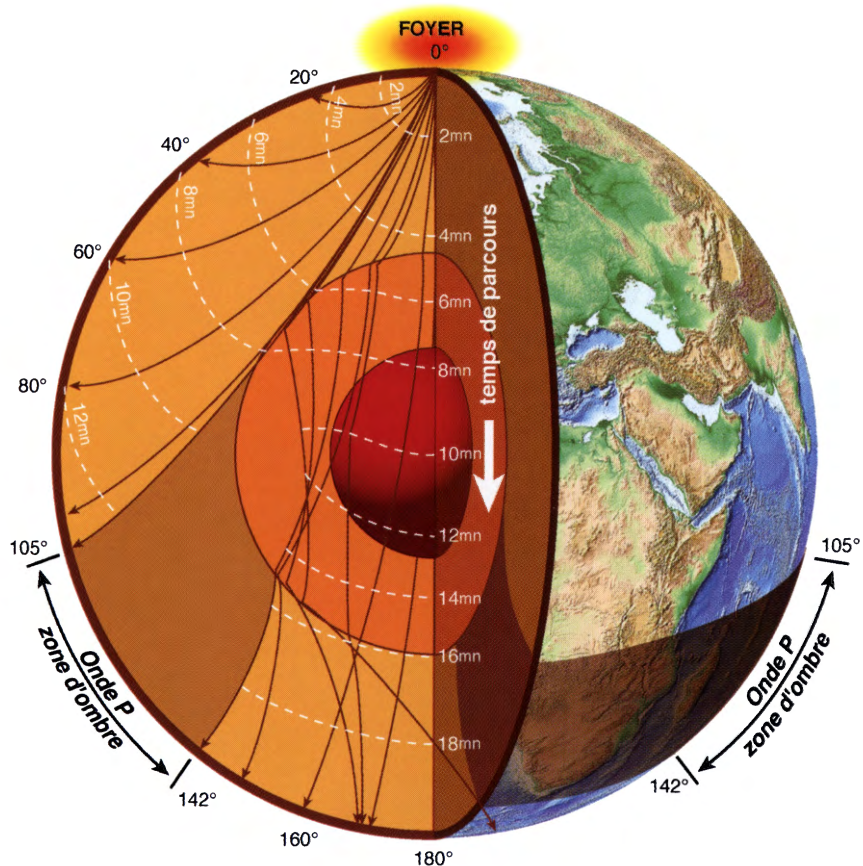
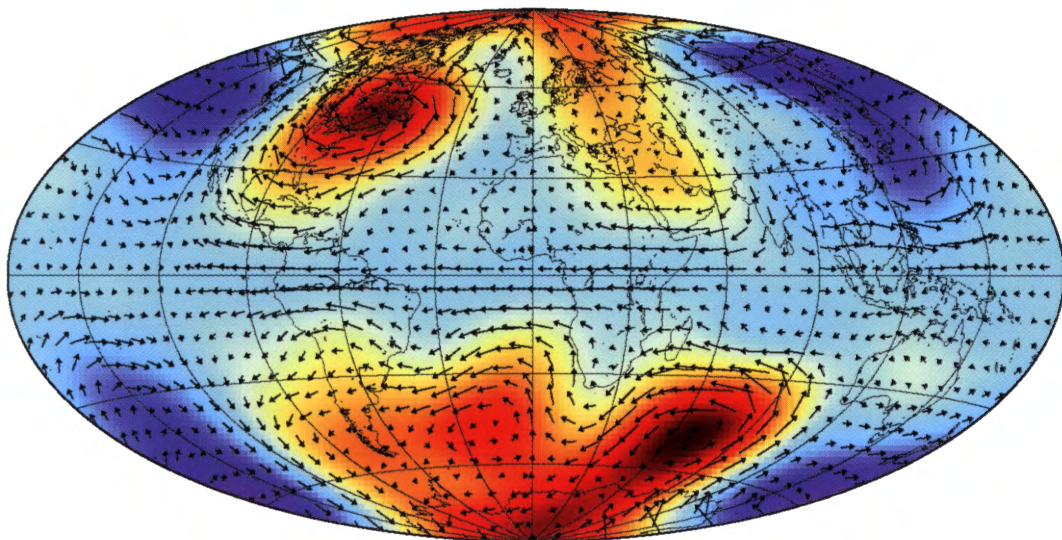


Fig 12-1 : Illustration du tracé des rais sismiques (ondes de compression, ou ondes P) depuis le foyer d'un séisme vers des sismographes disposés sur un méridien (en brun). Les lignes d'égal temps d'arrivée des ondes sont indiquées en tireté blanc. On voit que le rai qui émerge à une distance angulaire de 104° du foyer du séisme met un peu plus de 12 mn à y arriver. Mais pour une valeur de 105°, le rai « sent » la surface du noyau à son point le plus bas et se réfracte dans ce noyau, puis se réfracte encore à la sortie du noyau, pour émerge à plus de 180° ! Aucun rai ne peut sortir entre 105 et 142° : c'est la « zone d'ombre » qui a permis de déceler l'existence même de ce noyau.



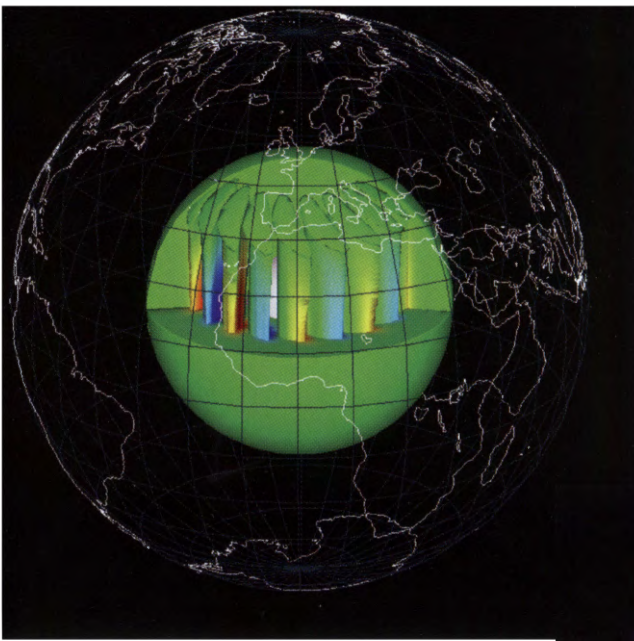


Fig 14-3 : Dans un noyau sphérique fluide et conducteur en rotation rapide peuvent se former des colonnes de convection et de champ magnétique parallèles à l'axe de rotation et s'appuyant sur la graine solide. Ces colonnes ont été reproduites expérimentalement par F. Busse et C. Carrigan (en bas) et numériquement, par exemple par E. Dormy (en haut).

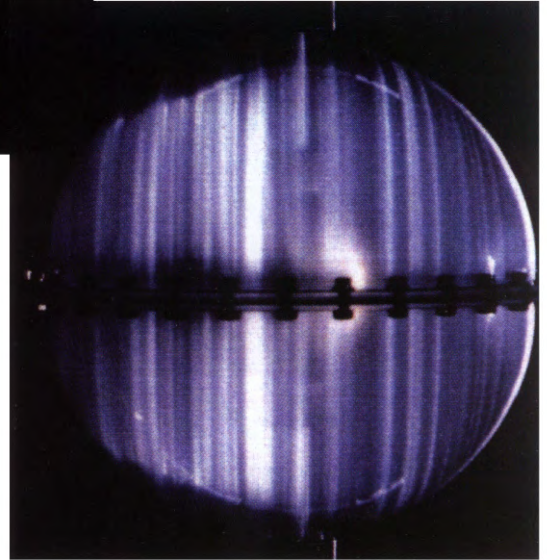
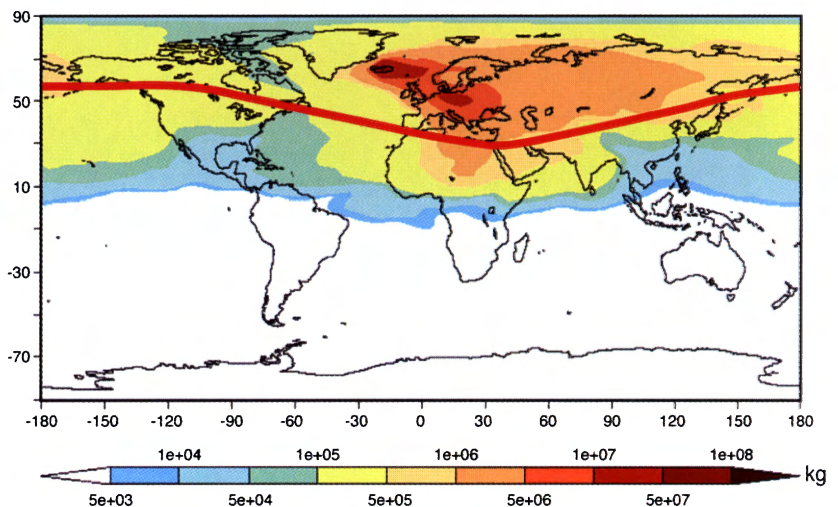


Fig 16-5 : Carte des concentrations en aérosols sulfatés pendant l'éruption du Laki. Il s'agit des résultats d'une simulation à l'aide d'un modèle numérique. Ce modèle permet de déterminer les concentrations à tout moment et à toute altitude. On voit un panache plus concentré partant d'Islande en direction de l'Europe. L'hémisphère Sud n'est pas affecté dans ce cas. La ligne rouge reproduit la limite sud des phénomènes climatiques anormaux observés à l'époque et reproduite sur la figure 16-2. L'accord entre les observations et les calculs est satisfaisant. Noter que les concentrations sont représentées sur une échelle multiplicative (logarithmique), dans laquelle un saut de deux couleurs représente une multiplication par 10 de la concentration. Les couleurs à partir de l'orange indiquent des concentrations toxiques pour une exposition longue (d'après A.-L. Chenet et coll.).



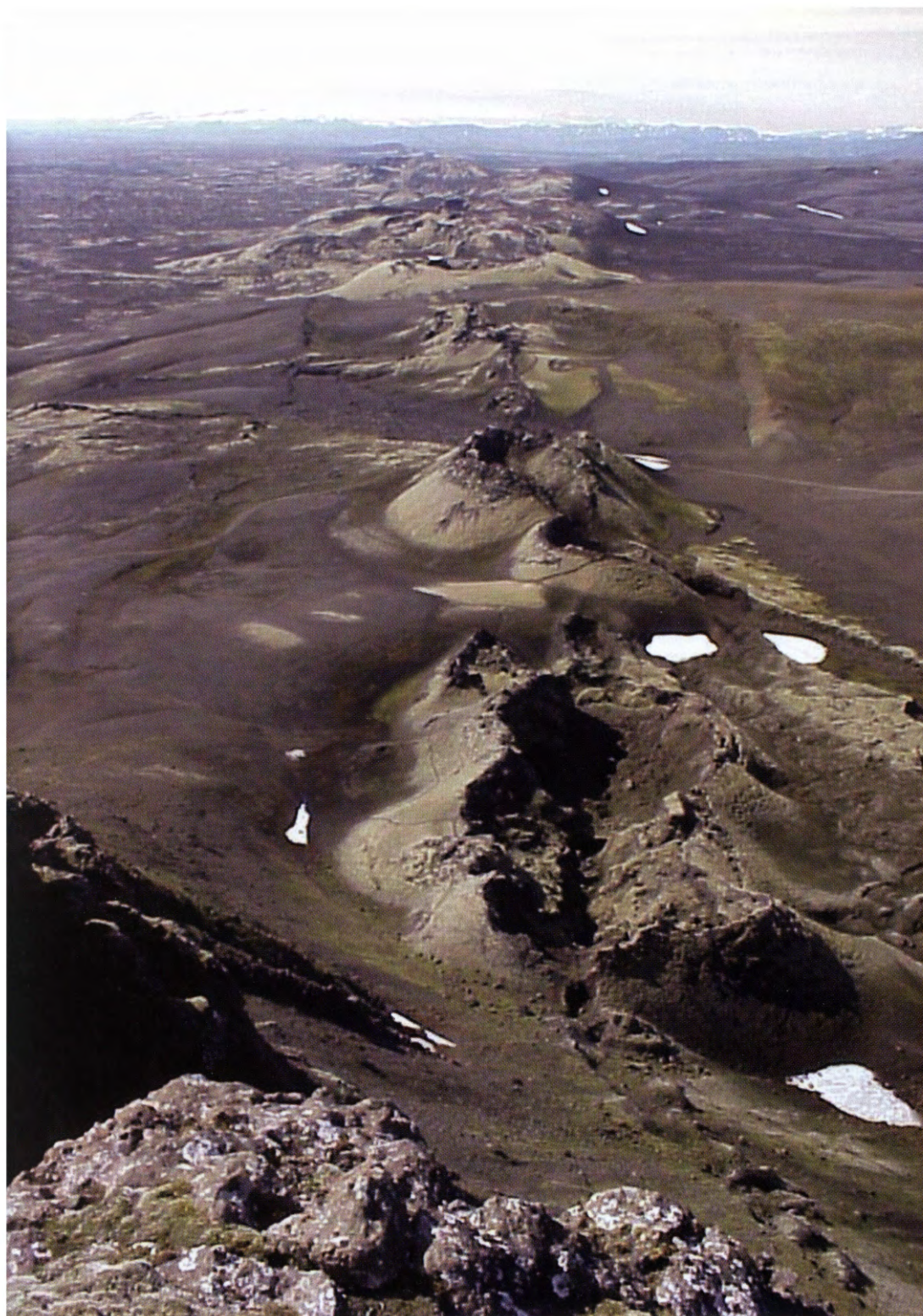


Fig 16-3 : Vue de l'alignement de cônes éruptifs sur la fissure de 1783-1784 dite « du Laki ». La fissure fait environ 15 km de long, les cônes 10 m de hauteur (photo Laszlo Keszthelyi).

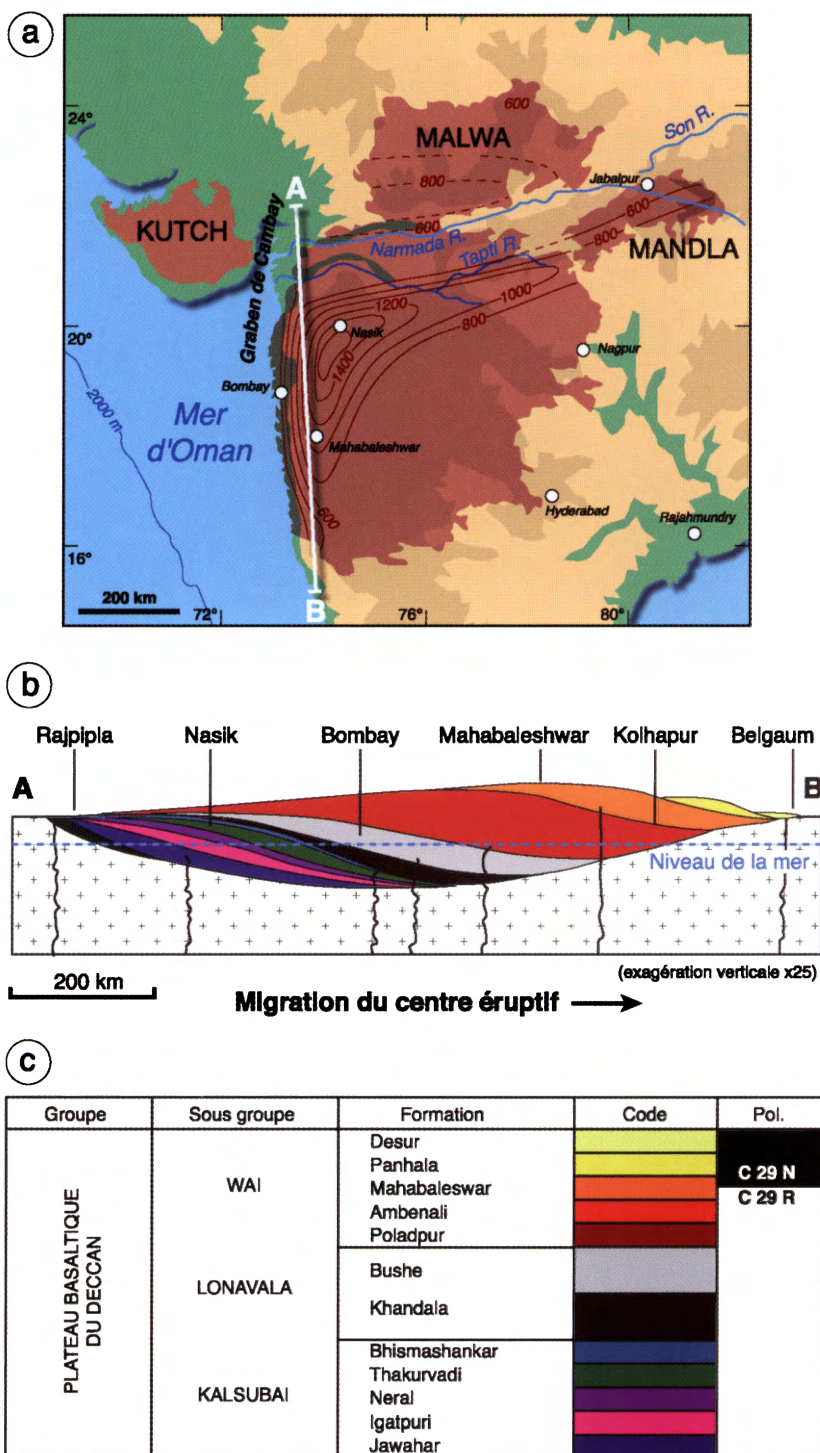


Fig 17-1 : (a) Affleurements des trapps du Deccan en Inde (en brun). La structure générale de la partie principale des trapps au Sud a pu être déterminée grâce au paléomagnétisme et à la géochimie : les lignes d'égale altitude en mètres d'un niveau temporel particulier (l'inversion magnétique entre les chrons C29R et C29N) donne une image de la structure « en boomerang » de la pile de laves basaltiques (d'après D. Vandamme et l'auteur). La coupe AB est montrée sur la partie (b) de la figure et illustre la structure en lentilles superposées des trapps avec un mouvement vers le sud au fur et à mesure qu'on monte dans la série stratigraphique (d'après D. Jerram et M. Widdowson), tandis que la partie (c) donne la nomenclature des formations géologiques successives et leur code de couleur (la polarité magnétique est à droite).

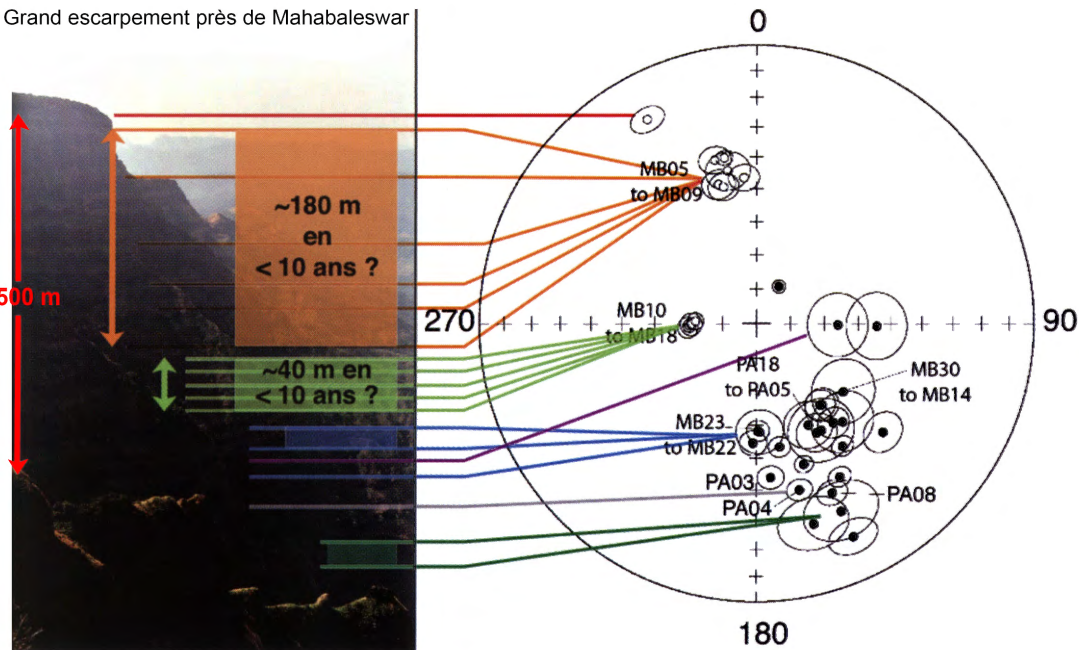


Fig 17-2 : Identification paléomagnétique des « pulses » volcaniques massifs. Sur le schéma de droite sont représentées en projection sur la moitié inférieure de la sphère les directions magnétiques mesurées dans les diverses coulées avec leur ellipse d'incertitude. La correspondance entre ces directions et les coulées observées sur le terrain dans la falaise de Mahabaleswar est indiquée. On voit ainsi qu'un paquet de directions pratiquement identiques correspond à un empilement de coulées de lave de 180 m d'épaisseur (MB05 à MB09) et un autre à un empilement de 40 m juste en dessous (MB10 à MB18). Notre hypothèse est que ces deux ensembles se sont mis en place en une dizaine d'années (en tout cas moins de 100), période trop brève pour enregistrer des variations du champ magnétique (d'après A.-L. Chenet et coll.).

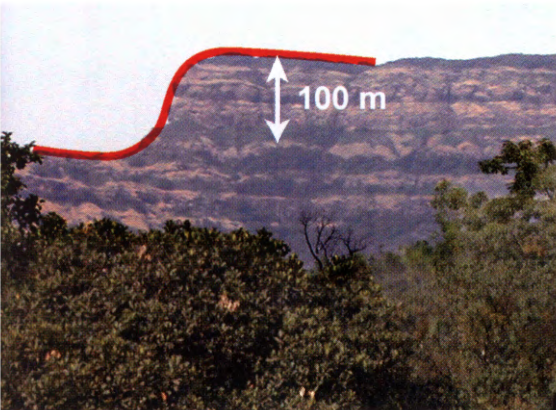
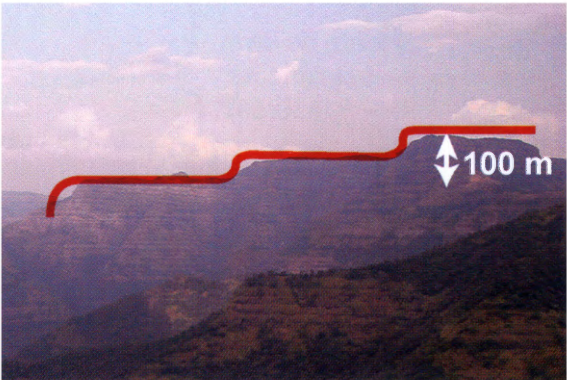


Fig 17-3 : Photos des traps du Deccan mettant en évidence la structure en marches d'escalier qui leur a valu leur nom. Ces marches, ici d'une centaine de mètres d'épaisseur, pourraient correspondre aux « pulses » massifs et brefs déterminés à l'aide du paléomagnétisme (photos de l'auteur).

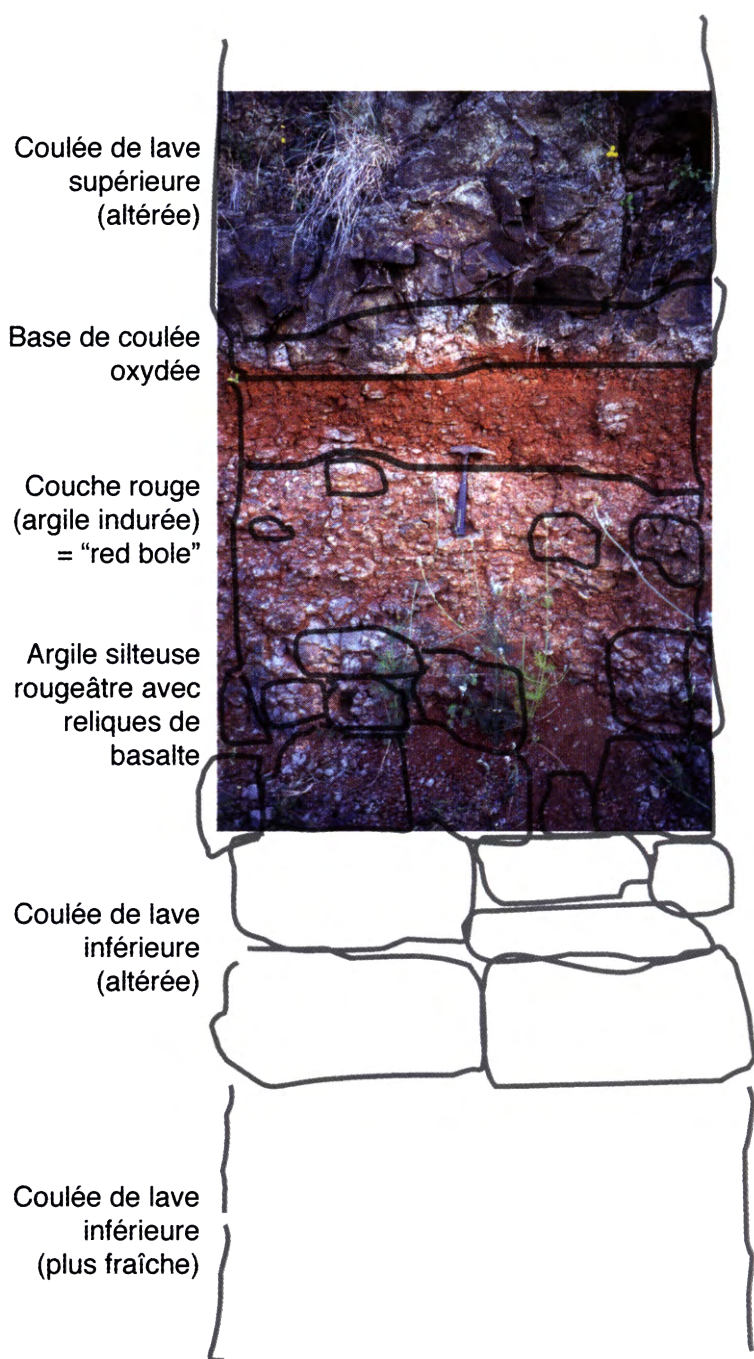


Fig 17-4 : Niveau d'altération rouge (« red bole ») entre deux coulées basaltiques dans la falaise de Mahabaleshwar au Deccan. L'interprétation de cette photo est superposée. Un marteau donne l'échelle (cliché et interprétation de M. Gérard).

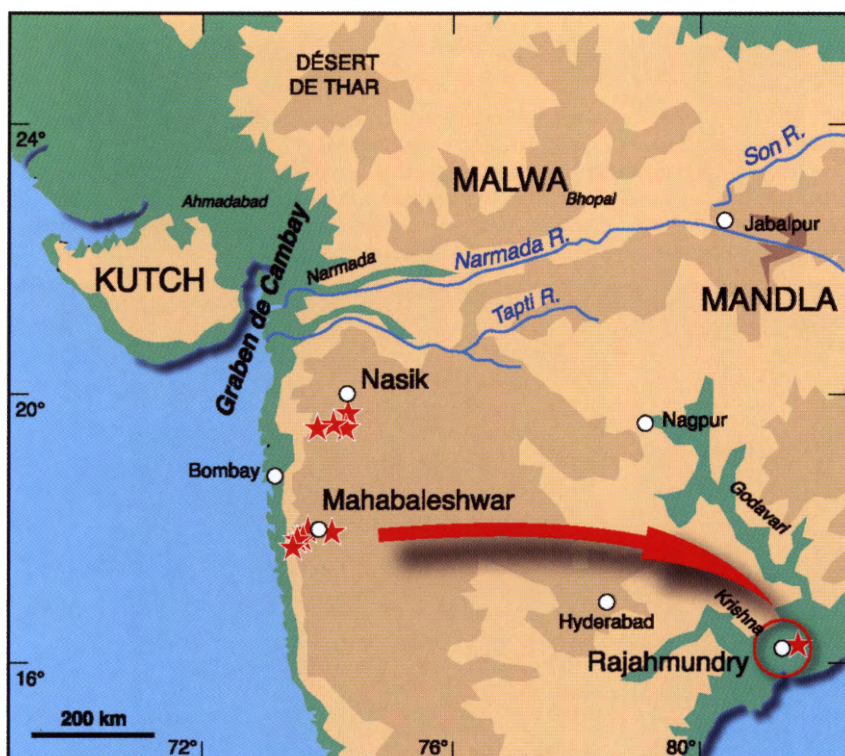


Fig 17-5 : Localisation des affleurements de basalte de Rajahmundry, à 800 km de la zone principale des trapps à Mahabaleshwar (d'après S. Self et coll.) : la plus longue coulée volcanique du monde ?

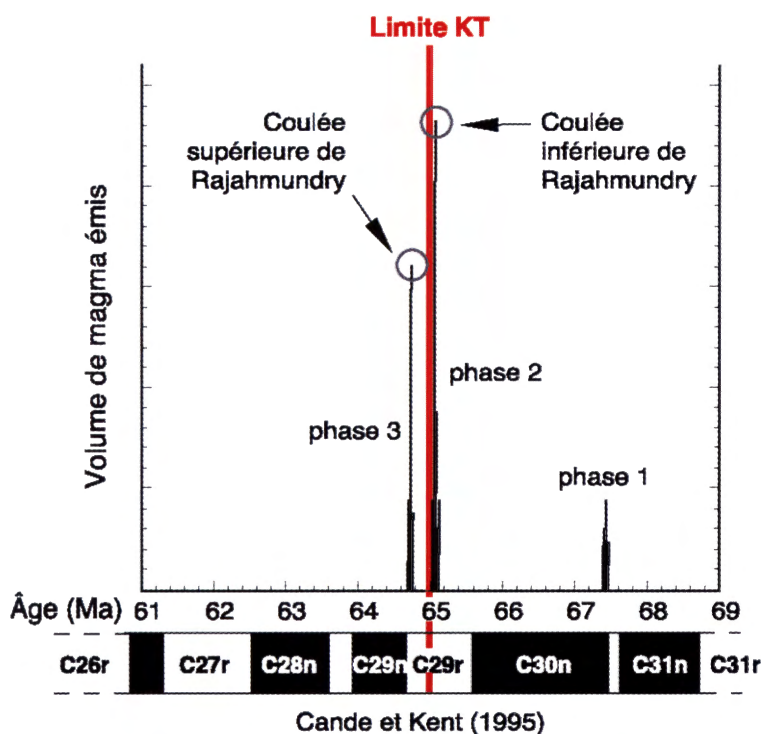
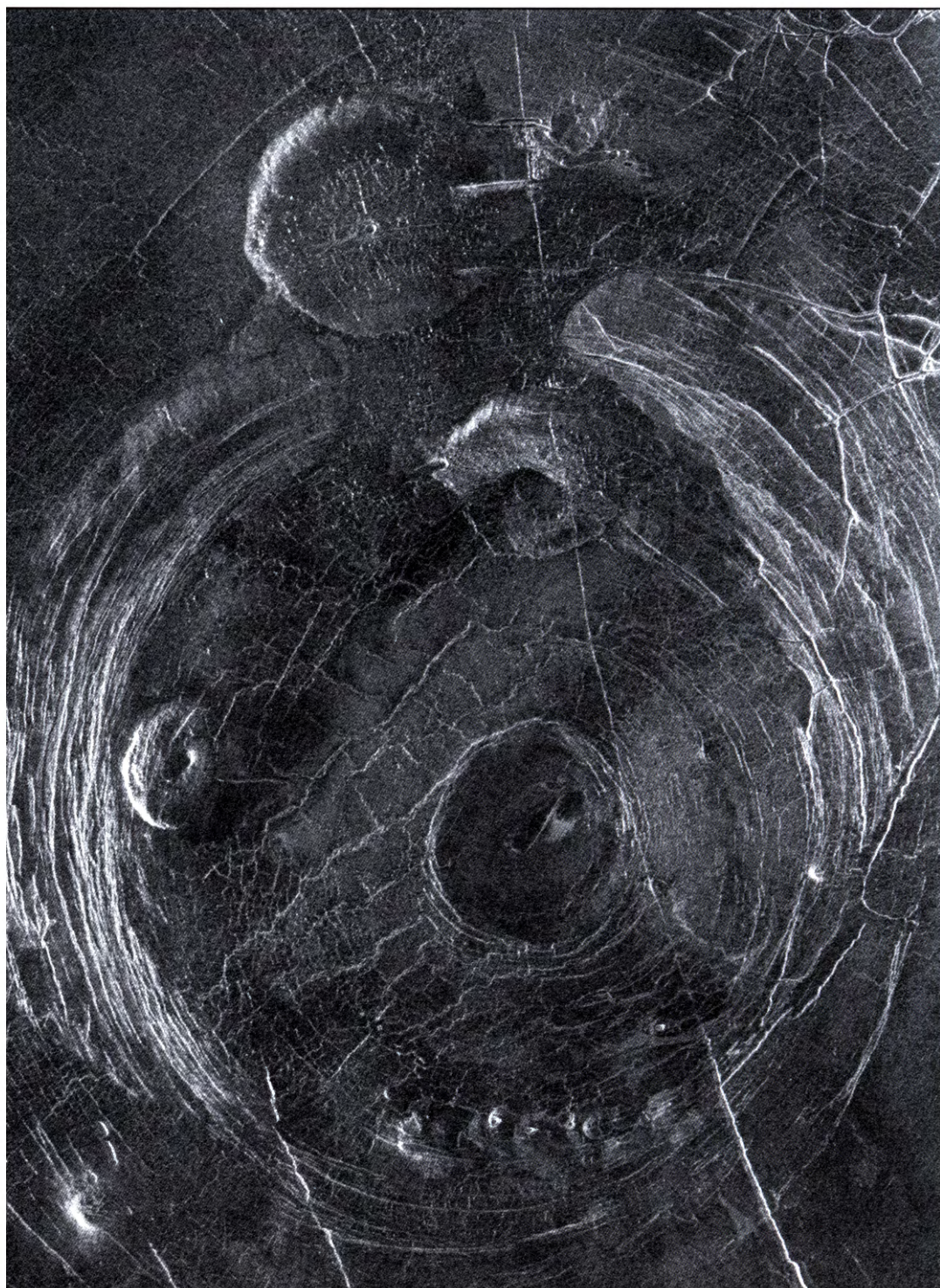


Fig 18-1 : Scénario temporel des éruptions du Deccan. Il comprend trois phases paroxystiques, l'une vers 67,5 millions d'années, les deux suivantes, nettement plus importantes, vers 65 millions d'années. Chaque phase est composée d'un certain nombre de coulées, dont des « pulses » gigantesques, d'abord identifiés grâce au paléomagnétisme. Les plus grands seraient à l'origine des deux ensembles de coulées qui ont pu atteindre Rajahmundry. La limite paléontologique entre Crétacé et Tertiaire est située juste à la fin de la seconde phase. L'échelle des inversions du champ magnétique est représentée en dessous (d'après A.-L. Chenet et coll. et G. Keller et coll.).

Fig A4-2 : Photo du radar de la mission Magellan de la surface de Vénus. Celle-ci permet de « voir » à travers l'épaisse atmosphère de la planète des réseaux de fractures et des structures circulaires (dimensions de la photo : environ 300 km). La grande structure circulaire près du centre de l'image est une corona de 200 km de diamètre. Au nord, la structure plate « en crêpe » est un volcan de lave très visqueuse de 35 km de diamètre. L'ensemble des structures observées confère aux coronae elles-mêmes une origine volcanique (source JPL/NASA, image PIA00202, note F-MIDR 59S164).



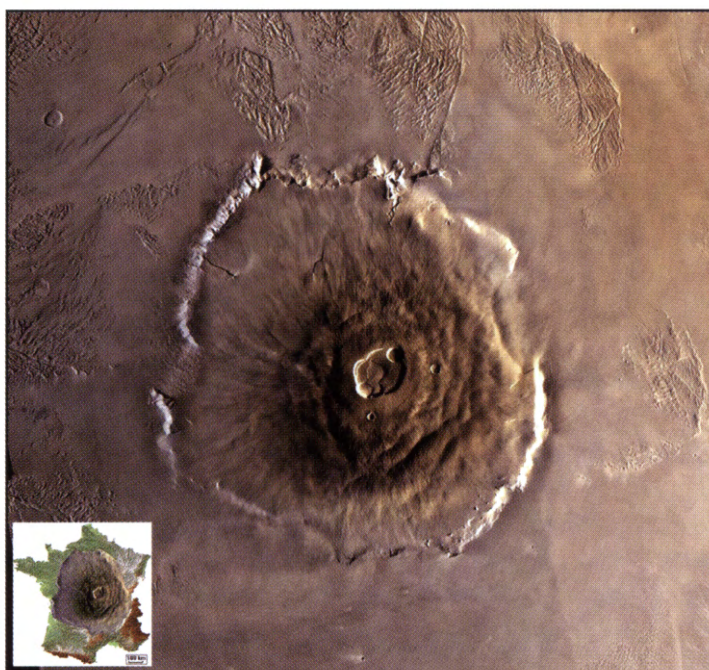
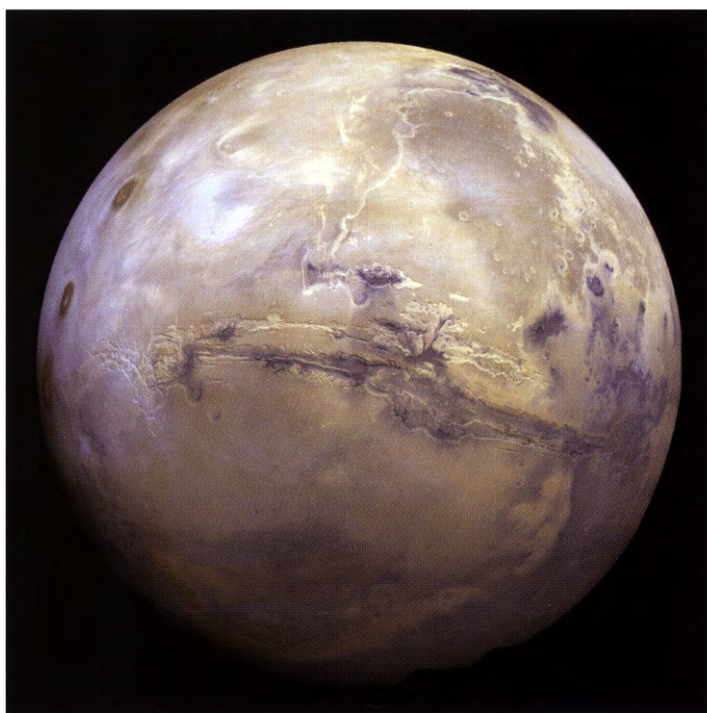


Fig A4-3 : De très loin on distingue nettement le gigantesque système de canyons et de rifts de Valles Marineris, sur Mars (photo NASA/USGS). On aperçoit également de grands édifices volcaniques, en brun sur la partie gauche de la vue du haut, dans la région de Tharsis. Une vue plus proche du plus grand volcan du système solaire, Olympus Mons, est montrée en dessous, ainsi qu'un encart qui compare sa taille à celle, voisine, de la France entière (sources NASA/USGS mars.rover.nasa.gov et Gilles Dawidowicz).

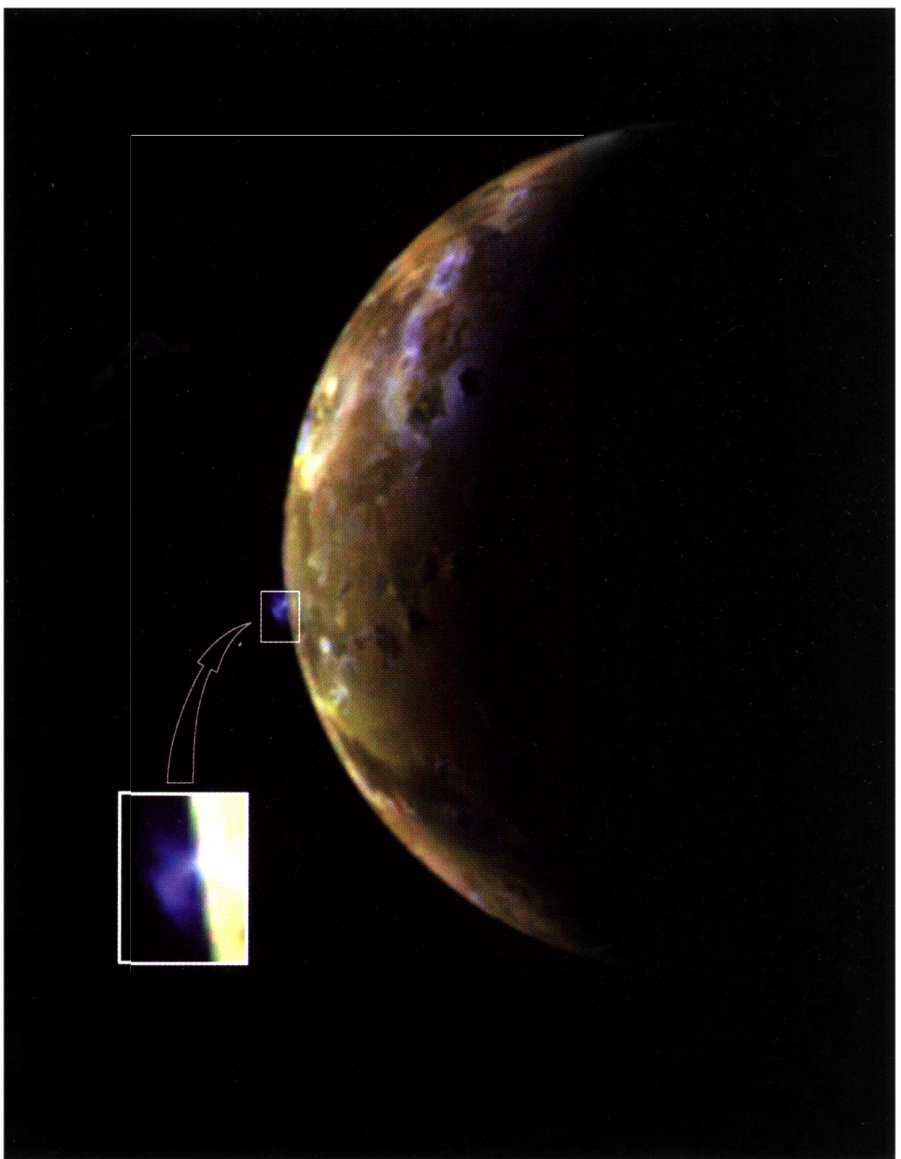


Fig A4-4 : En passant au voisinage du satellite Io de Jupiter, la caméra a saisi une éruption en cours (panache bleuté ; source The Galileo Project, JPL/NASA).

(sauf, nous l'avons vu, et avec quelles incertitudes, à passer par l'Antarctique). Chaque plaque munie de traces laissées par des points chauds aurait ainsi pu être raccordée au schéma cinématique global de la Terre. Nous venons de voir que cela n'est qu'approximativement valide, et seulement pour les 40 derniers millions d'années. Le manteau semble se stabiliser mais auparavant il se déformait en profondeur, sur le long terme. Y a-t-il d'autres moyens de suivre et le cas échéant de préciser ces mouvements² ? Et y a-t-il un mouvement d'ensemble des diverses parties de la Terre ?

Bien avant que les paléomagnéticiens ne démontrent la réalité des dérives en latitude des continents autrefois, géologues, paléontologues et paléoclimatologues avaient suggéré que l'équateur terrestre n'était pas toujours resté à la même place. Cette idée était fondée sur l'observation que certains assemblages de roches et certains types de fossiles ne semblaient pas compatibles avec la position géographique actuelle du site où l'on pouvait les observer. George Darwin (le fils de Charles) est sans doute le premier à avoir tenté de construire un modèle quantitatif de « l'influence des changements géologiques sur l'axe de rotation de la Terre » (c'est la traduction du titre de son article). Axe de rotation et équateur se déduisent en effet immédiatement l'un de l'autre. Quand les paléomagnéticiens eurent démontré, dans les années 1950, la réalité des dérives relatives des continents entre eux et par rapport au pôle, il restait à savoir si, à côté de cette « dérive apparente des pôles » (vue de chaque continent) subsistait une dérive en bloc de la croûte de la planète, une « dérive vraie des pôles » comme on devait la nommer.

Cette « dérive vraie » (en anglais True Polar Wander ou TPW) n'est pas si aisée que cela à définir ni à saisir. Elle veut décrire (s'ils existent bien) les mouvements de l'axe instantané de rotation de la Terre (que nous savons être fixe dans un référentiel « galiléen » lié aux étoiles) par rapport à l'ensemble solide formé par sa croûte et son manteau faits de silicates. Nous savons que la plus grande partie du noyau, constituée d'un océan de fer liquide, se déforme sans cesse, de manière turbulente et à des échelles de temps brèves, du même ordre de grandeur que la vie humaine³. Nous savons que les

2. Nous verrons un peu plus loin que le fait qu'en moyenne l'axe du dipôle magnétique terrestre et l'axe de rotation sont confondus est ce qui permet au paléomagnéticien de déterminer les positions anciennes de l'axe de rotation et partant la dérive des pôles (voir le chapitre 13).

3. Nous en reparlerons aux chapitres 13 et 14.

plaques se meuvent à l'échelle des temps géologiques et que des cellules de convection animent le manteau supérieur à des vitesses de quelques centimètres par an. Tout cela n'est guère stable et ne peut servir de base à l'évaluation d'un mouvement en bloc du manteau terrestre. Reste cependant le manteau inférieur, pour lequel le cas n'est pas tranché, et qui pourrait être le réservoir d'origine de certains de nos panaches. Nous considérerons pour l'instant que ses déformations sont suffisamment lentes pour qu'on puisse y attacher par la pensée un système de référence.

Imaginons que nous plaquions soudainement une lourde masse sur la Terre à haute latitude. La rotation tendrait aussitôt à la faire basculer vers l'équateur. Ce faisant, l'axe de rotation balayerait la Terre, pour y prendre une nouvelle position d'équilibre. On peut donc imaginer que les modifications de la répartition des masses, sur et dans la Terre, puissent modifier continuellement la position de son axe de rotation. Alfred Wegener, encore lui, est sans doute l'un des tout premiers (dès 1928) à avoir compris le rôle de la viscosité du manteau terrestre dans les perturbations de la rotation de la Terre et il a proposé une explication mécanique cohérente de la dérive des pôles de rotation⁴.

Pour aller plus loin, il nous faut introduire les notions de moment d'inertie et de conservation du moment cinétique (ou moment angulaire) d'un corps déformable. L'exemple qu'on en donne en général est celui de la patineuse qui tourne sur ses pointes et écarte puis rapproche ses bras de son corps. Le « moment d'inertie » de la danseuse est lié à la répartition des masses dans son corps et à leur distance par rapport à l'axe autour duquel elle tourne. Si ces masses (les bras) sont lointaines, le moment d'inertie est élevé et la vitesse de rotation est faible. Si les bras sont proches du corps, le moment d'inertie est faible et la vitesse augmente. C'est le produit du moment d'inertie par la vitesse de rotation qui est constant. Une sphère homogène a le même moment d'inertie quelle que soit l'orientation par rapport à laquelle on la considère. Un ballon de rugby, en revanche, a un moment d'inertie plus faible par rapport à son axe allongé que par rapport à tout axe passant par son « équateur ». On peut encore imaginer un ellipsoïde qui aurait trois axes de longueur différente, et trois moments d'inertie différents.

4. Voir Deparis et Legros, *op. cit.*, p. 543-544.

Un ballon de rugby (comme la patineuse en première approximation) est un ellipsoïde dont deux des axes se comportent de la même façon (il n'y a que deux moments d'inertie caractéristiques différents). Une sphère homogène est un ellipsoïde dont tous les axes se comportent de la même façon⁵. La Terre est très proche d'une sphère homogène. Comme elle est (lentement) déformable, elle s'aplatit à l'équateur pour devenir « le contraire » d'un ballon de rugby, c'est-à-dire un ellipsoïde aplati et non allongé. Cette forme est celle qu'aurait à l'équilibre une sphère fluide de la taille et de la masse de la Terre soumise simplement à la rotation et à la gravité. Cet aplatissement vaut en gros un trois centième de son rayon, ce qui revient à dire que le rayon au pôle est environ 20 km plus court qu'à l'équateur. La controverse sur la forme de la Terre est contée dans maints excellents livres⁶ : elle opposait au début du XVIII^e siècle Cassini, l'astronome de la cour de France qui pensait (comme Huygens) la Terre allongée, et Newton qui avait déduit de sa théorie de la gravitation et du fait qu'elle tournait qu'elle ne pouvait qu'être aplatie. Les expéditions de Laponie⁷ et d'Amérique du Sud⁸ de 1735 (parmi les premières expéditions scientifiques internationales majeures décidées par un gouvernement) devaient, après d'extraordinaires aventures, permettre de conclure en faveur de Newton. Parce que cet aplatissement est celui d'un fluide, on le nomme « hydrostatique ». Des mesures très précises, considérablement affinées depuis l'ère des satellites, permettent de constater que la répartition des masses au sein de la Terre n'est pas tout à fait homogène, qu'elle doit être décrite comme un ellipsoïde « à trois axes ». C'est l'écart entre ellipsoïde réel, non hydrostatique, et ellipsoïde hydrostatique, écart extrêmement ténu, qui nous intéresse dans notre quête de la dérive des pôles.

On doit à Tommy Gold, puis à Peter Goldreich et Alar Toomre (en 1969), une image qui illustre bien ces notions : des coccinelles se promenant lentement sur une boule de pétanque (Figure 10-3).

5. Elle n'a qu'un moment d'inertie caractéristique, qui vaut 0,4 fois le produit de sa masse par le carré de son rayon.

6. Voir la note 5 du chapitre 6.

7. À laquelle participèrent Maupertuis, Clairaut, Camus, Le Monnier, l'abbé Outhier et le scientifique suédois Celsius.

8. Avec La Condamine, Bouguer, Jussieu, Godin et les militaires espagnols Juan y Santacilia et de Ulloa y de Torres-Aviral.

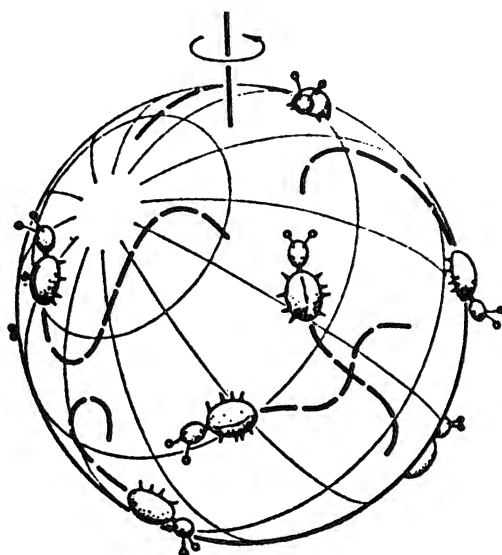


Fig 10-3 : Des coccinelles représentent les continents qui se déplacent à la surface de la Terre dans cette image due à T. Gold. Leurs évolutions modifient les « moments d'inertie » de la sphère et des déplacements de l'axe de rotation peuvent en résulter : c'est la « dérive des pôles ».

Une fois lancée en rotation rapide autour de son axe de plus grand moment d'inertie, la boule (qui est un objet lentement déformable quand on y associe les coccinelles) continuera à tourner autour de cet axe qui se déplace lentement par rapport à sa surface, au gré de l'évolution des coccinelles. C'est ce mouvement que nous nommons « dérive vraie des pôles ». L'hypothèse que nous tenterons de tester est que l'ensemble des principaux points chauds forme un référentiel qui peut s'appliquer au manteau dans son ensemble, et surtout au manteau profond.

La petite partie qui change au gré des mouvements de convection des plaques et du manteau est celle qui, comme l'ont montré Goldreich et Toomre, fixe la direction exacte de l'axe de rotation de la Terre. Quand cet axe se déplace, sous l'effet d'une réorganisation des masses (des plaques, des zones de subduction, des panaches, etc.), le « bourrelet équatorial » de la Terre (ellipsoïde aplati) doit se déplacer et la vitesse de ce déplacement est limitée par la viscosité des silicates du manteau. On peut donc considérer que la dérive vraie des pôles peut être suivie grâce au déplacement du bourrelet équatorial à la surface de la planète.

Les satellites permettent de décrire très précisément la position de très nombreuses étoiles (plus de 100 000 pour le satellite Hipparcos) et la forme de la Terre, ainsi que la valeur de ses moments d'inertie et la position de leurs (trois) axes. C'est ainsi qu'on a pu observer qu'au courant du xx^e siècle, le pôle Nord géographique s'était déplacé dans la direction du Canada (le long du méridien 79° Ouest) à la vitesse de 11 centimètres par an (soit 11 mètres en un siècle). On pense que cette dérive actuelle est la conséquence directe de la fonte des calottes de glace qui s'étaient formées pendant la dernière période glaciaire. En effet, cette fonte au nord de l'Amérique du Nord et dans la région de la Baltique a entraîné un allègement de la charge qui pesait sur les continents. Ceux-ci remontent alors vers la surface et la matière du manteau sous-jacent avec eux. Ce « rebond post-glaciaire », qui (comme nous l'avons déjà vu) abaisse le niveau de la Baltique⁹ par rapport aux terres émergées, a permis d'estimer la valeur de la viscosité du manteau. Il entraîne une redistribution des masses en profondeur et partant un réajustement de la position du bourrelet et des pôles. Le calcul montre que la dérive actuelle est bien compatible avec la taille et la position des grandes calottes glaciaires qui ont disparu au cours du dernier cycle de réchauffement climatique.

Depuis combien de temps persiste cette dérive ? Existait-elle auparavant, à l'échelle cette fois des temps géologiques ? Si l'on accepte l'idée d'une relative fixité des points chauds, si l'on connaît les mouvements des plaques entre elles (c'est le cas au moins pour les derniers 200 millions d'années), et si l'on connaît le mouvement des points chauds par rapport aux plaques (c'est le cas grâce aux chaînes linéaires datées de monts sous-marins), il est alors assez simple de calculer le mouvement des points chauds par rapport à l'axe actuel de rotation de la Terre (encore une addition de vecteurs sur la sphère). Nous reviendrons plus loin sur ces trop nombreux « si ». Et puisque les points chauds sont supposés fixes par rapport au manteau, nous venons de déterminer le mouvement du manteau par rapport à l'axe de rotation, c'est-à-dire la dérive vraie du pôle. C'est ce qu'ont tenté de faire depuis 1984 trois équipes : Roy Livermore et ses collègues, Jean Andrews et Dennis Kent, enfin Jean Besse et moi-

9. Et ce en dépit de la remontée de 120 mètres du niveau des mers (à l'échelle globale), due à la fonte des calottes entre - 20 000 et - 10 000 ans.

même. Nous avons fondé notre construction la plus récente (2002) de la courbe de dérive vraie des pôles (la dérive du référentiel des points chauds) sur une compilation de 242 études paléomagnétiques provenant d'Afrique, d'Europe, du Groenland, d'Inde, d'Amérique du Nord et du Sud. Nous faisons l'hypothèse capitale que le champ magnétique de la Terre est toujours resté celui d'un simple barreau aimanté, un dipôle, confondu avec son axe de rotation. Sans cela, nous ne pourrions traduire l'inclinaison de l'aimantation fossile mesurée dans les roches par une simple latitude.

La courbe résultante est certes entachée d'incertitude, mais elle indique une dérive du pôle de 500 km environ depuis une dizaine de millions d'années, précédée par une longue période de quasi-immobilité de 20 à 60 millions d'années. Une période de dérive l'avait précédée entre 130 et 70 millions d'années, à la vitesse moyenne de 3 centimètres par an, quatre fois plus faible que la vitesse actuelle due au rebond glaciaire. Une période stable de 30 millions d'années avait semble-t-il précédé cette phase de dérive plus rapide. Mais les incertitudes croissent avec le recul dans le temps, si bien que ces données anciennes ne doivent pas être prises trop au pied de la lettre. Au cours des 200 derniers millions d'années, la dérive vraie des pôles nous apparaît donc épisodique, des périodes stables alternant avec des phases plus rapides (sans l'être beaucoup, toujours moins qu'actuellement). L'honnêteté demande de bien souligner que ces résultats ne sont pas encore universellement acceptés. Certains croient voir dans les données des phases d'accélération beaucoup plus intenses (nommées en anglais « *super fast TPW* »). Nous pensons que la plupart de ces événements sont des artefacts, mais il existe quelques périodes, notamment autour de 200 millions d'années, où les données ne sont pas toutes compatibles, où il semble donc qu'il se passe quelque chose qui n'est pas encore bien compris. D'autres croient encore à la version « dure » de l'hypothèse de Morgan et pensent que le chemin de dérive que nous obtenons est en grande partie dû à certaines données paléomagnétiques incorrectes ou insuffisantes, et à l'ignorance de mouvements anciens entre certaines plaques (comme pour le problème de l'Antarctique). Recherches en cours, elles aussi à suivre...

Il nous reste à faire justice d'un certain nombre des hypothèses que nous avons dû faire. Pour ce qui est des observations sur la cinématique des plaques, la base de données ne cesse de croître au gré des campagnes océanographiques. On découvrira encore sans

doute des pièces manquantes du puzzle. Il est difficile de croire que de très grosses aient encore échappé à notre observation, mais qui sait ? L'histoire abonde d'exemples où l'on pensait une théorie et son support d'observations inébranlables alors qu'ils réservaient bien des surprises. L'Antarctique en est un exemple possible dont nous aimerions mieux connaître la géologie. Le réchauffement climatique le permettra peut-être dans quelques milliers d'années, mais pas pour longtemps car nous devrions ensuite entrer inexorablement dans la prochaine ère glaciaire... Pour ce qui est de la base des données paléomagnétiques, malgré maintenant près d'un demi-siècle de recherches par un petit nombre de groupes actifs à travers le monde, elle reste encore étonnamment insuffisante : il faudrait un programme international pour en doubler la taille dans la décennie qui vient. Il reste encore trop de régions des plaques et trop d'intervalles du passé géologique pour lesquels nous n'avons presque aucune contrainte qui vienne restreindre le champ des reconstitutions possibles et en sommes réduits à des hypothèses. Mais ce n'est pas là que je vois les principales limites de notre thème central, les points chauds et leurs mouvements. Des limitations dues à notre hypothèse d'un champ toujours dipolaire ? Je ne le pense pas, mais nous reviendrons à ce sujet capital dans les chapitres 13 et 14 en poursuivant notre périple vers les entrailles de la Terre et son noyau. Notre principale inquiétude vient de ce que la courbe de dérive vraie du pôle a été construite à partir d'observations recueillies sur presque toutes les plaques à l'exception notable de celles qui forment le fond du Pacifique. Et cela parce que les circuits cinématiques ne nous ont pas permis de relier sans ambiguïté ces plaques aux autres. Entre ces deux ensembles, la frontière « cinématiquement infranchissable » de la ceinture de feu, cet immense ensemble de fosses et de zones de subduction qui isole d'un point de vue tectonique le Pacifique du reste du monde.

La question qui continue de nous poursuivre est celle de la fixité des points chauds, et même pour certains de la réalité et du nombre de ces points chauds. Nous avons vu que certains auteurs en dénombraient des dizaines, voire des centaines, et que des mouvements relatifs entre certains étaient avérés. Cela m'a conduit, avec Jean Besse et Anne Davaille, à reprendre l'analyse d'une cinquantaine de points chauds présents dans les catalogues de tous les auteurs des quinze dernières années. Il me paraissait évident qu'on avait mélangé « torchons et serviettes » et qu'il y avait « point

chaud » et « point chaud », des objets géologiques de nature parfois très distincte. Notre approche, assez qualitative je le reconnais volontiers, a consisté à faire l'hypothèse qu'il devait exister plusieurs populations de points chauds, liés à des panaches dont l'origine serait située à des profondeurs différentes. En effet, la mécanique des fluides nous a appris que des instabilités comme les panaches ne pouvaient naître que d'une couche limite thermique. Et nous avons rencontré trois couches limites au cours de notre descente vers le centre de la Terre : d'abord la lithosphère, peut-être la zone de transition et enfin la couche D'' à la limite du noyau. Pourquoi chacune de ces couches ne serait-elle pas à la source d'un type distinct de panache ? Les plus profonds étant les plus critiqués (par Don Anderson du Caltech par exemple, qui n'y croit pas une seconde), nous avons tenté de leur mener la vie dure, de nous faire l'avocat du diable et de construire une série aussi « sévère » que possible de critères nécessaires mais non suffisants pour « être candidat » au statut de panache profond provenant de la couche D''.

Nous avons utilisé des critères géophysiques, géochimiques et géologiques :

- 1) la présence d'une chaîne de volcans sous-marine, si possible datée, avec à l'origine un trap (et en général l'ouverture d'un nouveau bassin océanique) ;
- 2) une déformation verticale à grande échelle des fonds sous-marins adjacents permettant de calculer l'anomalie de densité et la « force » du panache (la force d'Archimède due au matériel chaud et plus léger du panache – on parle de « flottabilité ») ;
- 3) les résultats alors disponibles de la tomographie sismique indiquant la présence de matériel plus chaud ou de composition chimique distincte en profondeur, notamment au niveau de la zone de transition ;
- 4) les analyses géochimiques des laves prélevées sur les volcans de points chauds supposés : les laves des îles océaniques se sont révélées plus riches en certains gaz rares, et leur composition isotopique, comme celle de l'hélium, distincte de celles des dorsales océaniques et provenant d'un manteau plus profond, plus primitif¹⁰.

10. Claude Allègre et son équipe, et quelques autres équipes de géochimistes de par le monde, ont montré les subtiles différences chimiques, notamment isotopiques, entre les basaltes des dorsales médio-océaniques (« mid-ocean ridge basalts » ou MORB) et les basaltes des îles océaniques que nous associons aux points chauds (« ocean island basalts » ou OIB).

Nous avons (arbitrairement) décidé d'éliminer de la catégorie des points chauds profonds tous ceux qui ne répondaient pas positivement à au moins trois des quatre critères énoncés ci-dessus. Des cinquante candidats, seuls sept ont « survécu » comme panaches profonds possibles : Hawaï, l'île de Pâques, Louisville, l'Islande, l'Afar, la Réunion et Tristan da Cunha. Cette liste ne devrait plus nous surprendre. C'est bien celle des « grands points chauds ».

Nous avons donc suggéré que ces points chauds, que nous avons appelés « primaires », provenaient bien de la couche D'', au plus profond du manteau, entre 2 700 et 2 900 km de profondeur, tandis que les autres se répartissaient en panaches « secondaires », issus de la base de la zone de transition vers 700 km de profondeur, et « tertiaires » associés à des manifestations beaucoup plus superficielles de la tectonique des plaques lithosphériques. Nous pouvons alors reprendre avec plus de solidité notre étude cinématique. Hawaï, qui est bien dans la liste des « primaires », est assez grossièrement fixe par rapport aux autres points chauds primaires de l'hémisphère Pacifique (île de Pâques, Louisville). La Réunion est un bon représentant du groupe des points chauds primaires indo-atlantiques (Islande, Afar, et Tristan da Cunha). Notre système fruste de critères, construit avec un *a priori* « conservateur », a sans doute éliminé à tort quelques autres points chauds qui pourraient aussi être primaires comme MacDonald, Samoa ou Kerguelen...

Le mouvement avéré de la Réunion par rapport à Hawaï implique bien un mouvement relatif des deux groupes de points chauds primaires, correspondant aux deux hémisphères. S'ils proviennent bien de la base du manteau, ils « tracent » alors les mouvements relatifs de deux moitiés opposées de ce manteau inférieur : mouvement faible depuis 40 millions d'années (induisant des vitesses relatives en surface de l'ordre du centimètre par an), plus intense auparavant.

Ces mouvements sont susceptibles de modifier la répartition des masses dans le manteau et donc de déclencher une dérive vraie des pôles. Celle-ci se trouve avoir été faible (en dehors de la part récente due au rebond post-glaciaire) depuis 40 ou 50 millions d'années et plus forte (de l'ordre de 4 centimètres par an) avant, de 110 à 50 millions d'années. Cette corrélation entre dérive des pôles et mouvement des deux grands ensembles de points chauds était trop frappante pour que nous ne propositions pas d'y voir, sinon une relation de cause à effet, au moins deux conséquences d'un même

phénomène. La dérive des pôles aurait donc été uniforme pendant plus de 60 millions d'années, au cours desquelles le manteau inférieur aurait vu ses deux « moitiés » (sous le Pacifique et sous la zone indo-atlantique) dériver lentement l'une par rapport à l'autre. Un événement majeur, qui reste à découvrir, aurait modifié ce mouvement il y a 40 à 50 millions d'années : collision généralisée de l'Inde et de l'Asie, fermeture des zones de subduction de l'ancienne Téthys, effondrement de pans de lithosphère au sein du manteau à travers la zone de transition, mouvements de panaches profonds, etc. ? Nul ne le sait encore avec certitude. Toujours est-il que, depuis cette période, les deux hémisphères du manteau ont ralenti et presque cessé leur mouvement, et que la dérive vraie des pôles s'est considérablement ralentie. Elle n'aurait repris que très récemment, avec les grandes glaciations du quaternaire.

Nous avons vu apparaître à plusieurs reprises un découpage de la Terre en deux hémisphères tectoniques, qui ont peu à voir avec les découpages généralement utilisés par les géographes. Cette subtile mais profonde division de la Terre en deux parties d'histoire sensiblement distinctes et de structure différente est apparue incontournable aux géophysiciens et aux géochimistes depuis plus d'une décennie. Bernard Dupré et Claude Allègre avaient établi dès 1983 que de subtils détails dans la composition des basaltes des îles de l'océan Indien, de l'Atlantique Sud et du Pacifique Sud (surnommée par la suite « anomalie DUPAL » par les géochimistes du monde entier, à partir des premières lettres des noms des deux chercheurs) permettaient de distinguer deux populations, et sans doute deux réservoirs profonds distincts isolés depuis très longtemps l'un de l'autre. La sismologie¹¹ avait également révélé des anomalies de propagation des ondes dans le manteau profond, avec deux énormes zones de vitesse lente, correspondant à une température plus élevée ou à une composition chimique distincte (ou les deux), sous la partie centrale de l'océan Pacifique et sous l'Afrique. Ces deux anomalies sont opposées (antipodales) et situées au voisinage de l'équateur. Elles se traduisent aussi dans la pesanteur (gravité) et la forme (géoïde) de la Terre, toujours précisées par de nouvelles générations de satellites.

Quand on exprime mathématiquement le champ de pesanteur, on trouve un terme principal correspondant à la Terre

11. Guy Masters et son équipe dès 1982, Adam Dziewonski et ses collaborateurs de manière plus détaillée en 1984.

entière avec toute sa masse rapportée au centre (on parle de « mono-pôle » ou de terme « de degré zéro »), puis des termes de plus en plus faibles, correspondant à des irrégularités de dimensions plus faibles¹². Le premier terme qu'on rencontre peut être réduit à deux masses opposées et de signe contraire. C'est plus facile à envisager pour des charges électriques, qui ont un signe, que pour des masses, toujours positives ; il suffit de songer à des écarts, des anomalies de masse par rapport à une valeur moyenne : du « moins » vient bien alors compenser du « plus ». On parle de « dipôle » ou de terme « de degré un » (nous avons déjà rencontré le dipôle magnétique terrestre). La dimension correspondant aux deux anomalies équatoriales opposées que nous venons de décrire est un « quadrupôle » ou terme « de degré deux ».

Le « degré deux » de la Terre était donc de plus en plus clairement mis en évidence par des disciplines différentes et complémentaires. Notre division des ensembles de points chauds primaires en deux hémisphères reflétant ce même degré deux ne devait donc pas surprendre, surtout si l'on acceptait d'y voir des sources communes situées à la base du manteau. Friedrich Busse, un remarquable spécialiste de la mécanique des fluides, avait compris dès 1983 l'importance de ce « quadrupôle ». Il avait montré que, dans une coquille sphérique chauffée à la base, la convection prend la forme de deux panaches en position opposée. Les courants divergent en surface à l'aplomb de ces deux panaches et se rencontrent le long d'un cercle, perpendiculaire à la direction commune de ces derniers, pour replonger vers le bas (Figure 10-4). À l'échelle de la Terre, la coquille sphérique représente le manteau (soit le manteau supérieur, soit tout le manteau), le chauffage provient du noyau, et les deux panaches pourraient correspondre aux anomalies observées à la base du manteau sous les deux régions équatoriales antipodales. La zone de redescente du matériel refroidi depuis la surface pourrait bien correspondre à la grande ceinture de zones de subduction qui entoure le Pacifique et dont on sait qu'elle existe depuis plus de 100 millions d'années. Une question a longtemps

12. Le terme principal correspond à des longueurs de l'ordre de la circonférence de la Terre, 40 000 km. Les termes suivants correspondent à des « harmoniques », avec des longueurs de $40\,000/2$, $40\,000/3$, $40\,000/4$, etc., donc des dimensions de plus en plus faibles. Le terme harmonique vient de la musique où l'équivalent correspond aux octaves de plus en plus élevées, aux fréquences de plus en plus hautes et donc aux longueurs d'onde de plus en plus faibles d'une note fondamentale.

été, nous l'avons vu, de savoir si les plaques butent sur la zone de transition et s'y maintiennent, avant d'être reprises par la convection ascendante au niveau des dorsales, ou s'il est possible qu'elles sombrent plus bas et s'enfoncent dans le manteau inférieur. Nous avons vu que cette seconde hypothèse est sans doute, au moins épistémologiquement, vérifiée. Le degré deux résume sans doute assez bien la structure profonde du manteau. Mais en surface, la géographie des plaques vient en brouiller l'image.

Deux ensembles de résultats récents montrent dans quelles voies s'engagent aujourd'hui les chercheurs. La première est celle de la modélisation. Le développement des ordinateurs, de plus en plus puissants et rapides, aux mémoires de plus en plus colossales, permet de résoudre des problèmes qui ne sont pas accessibles à l'observation ou à l'expérience, de mimer des phénomènes à l'échelle des dimensions de la Terre et de son temps géologique. Il faut pour cela bien sûr que la physique fondamentale du problème ait été bien comprise et que les équations qui la décrivent soient bien posées. Il faut d'abord rechercher s'il n'existe pas d'« astuce » théorique permettant de simplifier le problème, de le résoudre avec élégance et en le contrôlant bien. Claude Jaupart est devenu l'un des maîtres de cette belle mécanique des fluides appliquée à la Terre, dans laquelle l'observation est analysée, un modèle réduit construit au laboratoire, et un calcul physique et théorique mis en œuvre pour contrôler l'adéquation entre résultats de l'expérience et du calcul. C'est alors seulement qu'on peut avec quelque confiance appliquer le modèle à la Terre et lui arracher quelques secrets supplémentaires. Dans certains cas, le recours au calcul massif aujourd'hui disponible est précieux. Si trop nombreux sont ceux qui se jettent sans réfléchir assez dans de tels calculs, et s'y réfugient, sans faire beaucoup avancer la science, il en est heureusement qui savent utiliser ce bel outil, en n'oubliant pas que ce n'est qu'un outil et qu'il réserve parfois de sévères déconvenues¹³.

13. Je souhaite citer ici une partie du résumé du remarquable article de Richard Lindzen déjà cité plus haut : « Je fais référence au changement de paradigme scientifique d'une opposition dialectique entre théorie et observation vers une emphase de la simulation (numérique) et des programmes d'observation. Ces derniers servent à éliminer presque le foyer dialectique des précédentes. Alors que les précédentes avaient le pouvoir d'assurer une convergence, les derniers sont beaucoup moins efficaces ». S'il y s'agit de climatologie, les remarques sur la simulation numérique sont en fait d'une portée très générale...

Richard O'Connell et Bernhardt Steinberger sont de ceux-là. Après plusieurs essais, dus notamment à Yannick Ricard et Mark Richards, ces deux géophysiciens théoriciens ont construit un modèle qui incorpore les lois de la mécanique des fluides (la fameuse équation de Navier-Stokes notamment), la distribution des hétérogénéités de densité dans le manteau révélées par les derniers modèles tomographiques et la structure de viscosité du manteau, dont on sait désormais qu'elle augmente pratiquement d'un facteur cent quand on passe du manteau supérieur au manteau inférieur (ce dernier est donc très visqueux et les mouvements y sont très lents). Steinberger et O'Connell ont ensuite injecté à la base du manteau des instabilités, destinées à modéliser les panaches primaires profonds, dont ils ont suivi l'évolution à trois dimensions. Le calcul respecte les mouvements observés des plaques en surface (il n'a été effectué « que » pour les 65 derniers millions d'années), dont la géométrie, dominée par la coupure en deux hémisphères limités par la ceinture de feu du Pacifique, masque en partie la grande convection quadrupolaire profonde. Ce faisant, ils ont réussi à rendre compte, au moins en première approximation, des observations. Ils rendent en particulier très bien compte de l'amplitude et de la vitesse de la dérive vraie des pôles, et des faibles mouvements relatifs des deux ensembles de points chauds. Le travail de Steinberger utilise un circuit cinématique original, distinct de celui des autres auteurs, qui passe par l'Est Antarctique, l'Australie et le plateau de Lord Howe et implique des déformations internes assez importantes entre Est et Ouest Antarctique et au sein de la Nouvelle-Zélande. L'avenir (le travail de terrain des géologues) nous dira si ces hypothèses sont fondées, mais le résultat est convaincant.

Il existe une « vitesse limite » (maximum) de la dérive du pôle qui est de l'ordre de 10 centimètres par an, en très bon accord avec nos observations paléomagnétiques. L'aspect un peu brutal des changements de mode de la dérive¹⁴ n'est cependant pas encore totalement expliqué par le modèle. La rapidité des mouvements avant 50 millions d'années pourrait être due au fait qu'à cette époque la répartition géographique particulière des plaques, des subductions et des panaches aurait pu conduire à des valeurs proches, mais variables, des deux moments d'inertie (maximum et intermé-

14. Ce que Jean Besse et moi-même avons appelé un mouvement « go-stop-go ».

diaire), donc à une situation mécaniquement instable. L'analyse de Steinberger et O'Connell relativise un certain nombre de points de vue un peu trop dogmatiques. Elle implique évidemment qu'il n'existe pas de référentiel global des points chauds. Même la subdivision en deux hémisphères est tempérée : le mouvement des points chauds (des panaches) entre eux traduit simplement le mouvement puissant, lent, à très grande échelle du manteau (inférieur et supérieur). Mais, comme ce mouvement est faible à cause de la très forte viscosité du manteau inférieur qui « ancre » les points chauds primaires dans une certaine mesure, on peut toujours définir un référentiel « moyen » des points chauds et calculer une « dérive vraie du pôle », mouvement global de ce référentiel moyen par rapport aux étoiles.

Je vous propose une expérience que j'ai trouvée étonnante quand je l'ai découverte, il y a assez peu de temps. Prenez une boîte de chaussures (dont le couvercle soit bien assujéti au reste de la boîte), ou tout parallélépipède rectangle ayant trois côtés de longueur différente (par exemple une boîte d'allumettes). Faites tourner la boîte aussi rapidement que vous le pouvez autour de la direction de son plus grand côté ; la rotation est stable et continue autour du même axe, pour peu que vous l'ayez bien lancée et évidemment tant qu'elle n'a pas touché le sol... Si vous refaites l'expérience autour du plus petit côté, vous obtenez le même résultat. La rotation est stable, elle continue. En revanche, si vous tentez de faire tourner la boîte autour de son côté moyen, elle refuse et culbute de façon chaotique... On sait bien aujourd'hui rendre compte mathématiquement de ce comportement inattendu.

Cette expérience simple illustre bien les instabilités considérables que peut subir dans certains cas l'axe de rotation. Si les directions des trois moments d'inertie de la Terre restent constantes, mais que les valeurs de ces moments, qui sont très proches, rappelons-le, pour la partie « non hydrostatique », changent un peu, et que l'axe qui correspondait à la valeur la plus grande et autour duquel se produisait donc la rotation soit désormais associé à la valeur intermédiaire, l'axe de rotation va tenter de sauter de 90° vers le nouvel axe qui correspond à la valeur maximale. Un tel événement est nommé « dérive du pôle par échange inertiel » (Inertial Interchange True Polar Wander ou IITPW en anglais). Un tel mouvement semble théoriquement possible pour la Terre ; il pourrait se produire en quelques millions d'années. Il ferait passer

les régions polaires sur le nouvel équateur et certaines des régions équatoriales au pôle, donc un cataclysme climatique majeur. Il ne semble pas que de tels basculements, imaginés par Milton dans son *Paradis perdu* puis, plus près de nous, par Jules Verne dans *Sans dessus dessous*, se soient produits depuis au moins 300 millions d'années et même plus. Mais certains modèles numériques, comme celui qu'a construit Mark Richards avec ses collègues en 1999, « fabriquent » des IITPW. Des données paléomagnétiques étonnantes obtenues en Russie et en Australie ont conduit Joe Kirschvink et son étudiant Dave Evans à proposer qu'un bref événement d'échange inertiel s'était bien produit en 15 millions d'années ou même moins au début du Cambrien, avec des vitesses de dérive de plus de 60 centimètres par an ! Le fait que cette période coïncide avec le grand développement de la vie sur Terre qu'on a dénommé « explosion cambrienne » est évidemment fascinant. Evans pense même que cinq grands événements de basculement partiel se sont produits entre la fin du Protérozoïque et la fin du Paléozoïque, en liaison avec les cycles de Wilson d'aggrégation puis de rupture et de dispersion des méga-continentes dont la Pangée a été le représentant le plus récent¹⁵. Cette vision originale est encore très controversée...

15. L'idée de Wilson est que se déroule en 300 ou 400 millions d'années un cycle répétitif qui va de l'aggrégation d'un unique super-continent à sa désaggrégation, à la dispersion des plaques puis à leur collage en un nouvel assemblage unique. Nous serions actuellement en phase de dispersion, au milieu d'un tel cycle, dont la Pangée fut le dernier avatar super-continental.

Chapitre 11

LES PANACHES THERMOCHIMIQUES : DOUBLE DIFFUSION, GROSSES TÊTES ET PETITES QUEUEES...

« [...] ni toi ni personne ne sait d'une façon certaine ce qui se passe à l'intérieur du globe, attendu qu'on connaît à peine la douze millième partie de son rayon ; [...] Pourquoi, à une certaine profondeur, [la température] n'atteindrait-elle pas une limite infranchissable [...] ? »

« Aller au centre de la terre ! Quelle folie ! [...] il lui échappait de ces plaisanteries de savant qui ne sont jamais bien dangereuses. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Qu'il s'agisse de *lava lamps*, d'expériences analogiques ou numériques, la possibilité de former panaches et points chauds dans de multiples fluides ne fait pas de doute. La question est de savoir si le manteau de la Terre est susceptible d'en former. Dans de nombreuses expériences, l'ascension à travers un liquide visqueux d'un autre moins visqueux et moins dense – en général parce que plus chaud, ou comme nous le verrons plus loin de composition chimique différente – conduit à la formation d'une structure très caractéristique, dans laquelle l'instabilité prend la forme d'un panache avec une « grosse tête » et une « petite queue » (Figure 8-2). La tête est parfois appelée « diapir » par les géologues. Dès leurs premières expériences, en 1975, la mécanique des fluides permettait à Whitehead et Luther de déterminer le flux de matière transporté par le panache, sa vitesse ascensionnelle et l'évolution de sa taille (volume de la tête et diamètre du conduit). Avec les valeurs appropriées des paramètres, les calculs s'appliquent aussi bien à l'expérience de laboratoire qu'au cas de la Terre. Ross Griffiths et Ian Campbell ont beaucoup contribué à ce domaine de recherche.

Mais quelles preuves avait-on de l'existence de gigantesques diapirs dans le manteau ? On a vu, au chapitre 9, que les preuves sismologiques de l'existence de panaches profonds sont encore débattues, et que seules des « queues de panaches » sont éventuellement observées. Pas de « tête » ! Mais cela n'est pas surprenant. Suivant en cela une suggestion de Jason Morgan en 1981, j'avais proposé avec Jean Besse et quelques autres collègues en 1985 que les traps du Deccan en Inde étaient le résultat de l'éruption de liquides formés par l'intrusion d'une tête de panache dans la lithosphère. Cette suggestion avait été généralisée en 1989 par Mark Richards, Bob Duncan et moi-même, et dans un article parallèle par Bob White et Dan McKenzie. Les traces (ordonnées dans le temps) des volcans sous-marins reliant la Réunion au Deccan, Tristan da Cunha au Parana et à Etendeka ou l'Islande au Groenland et à la province volcanique du nord des îles britanniques étaient à mes yeux (et restent) la meilleure preuve d'un lien génétique entre traps et tête de point chaud d'une part, chaîne volcanique asismique et queue du panache d'autre part. La quantité de laves associée à un trap se situe entre 1 et 10 millions de kilomètres cubes. Avec un volume moyen de 2 millions de kilomètres cubes, les calculs de Whitehead et Luther conduisaient à un diamètre de queue de panache de l'ordre de 100 km, suffisant pour expliquer la distribution en surface des traps et suffisamment faible pour expliquer qu'ils aient si longtemps échappé à la tomographie sismique ; et à un diamètre de la tête de l'ordre de 700 km, c'est-à-dire remplissant entièrement le manteau supérieur et la zone de transition. Je ne vois pas bien comment produire un pareil volume à partir de la zone de transition elle-même, alors qu'il est beaucoup plus aisé (et facile à reproduire expérimentalement) de le faire à partir de la zone D'', 2 000 km plus bas... La vitesse d'un tel panache serait de 25 cm/an environ, soit un temps d'ascension de 10 millions d'années à partir de la couche D'', avec une incertitude d'un facteur au moins égal à deux au vu des incertitudes sur les valeurs retenues pour les autres paramètres. Griffiths et Campbell montrent que ce sont les panaches qui ont les plus gros flux et les plus importantes anomalies de température qui montent le plus rapidement, forment les plus grosses têtes et sont le moins perturbés par la circulation convective environnante due aux courants de retour des plaques. Le diamètre de la tête doit atteindre au moins 400 km pour qu'elle se détache de la couche limite où

elle prend naissance. Si cette couche est D'', la tête aura augmenté de volume en atteignant la lithosphère, sous laquelle elle va s'étaler. Son diamètre peut alors doubler tandis qu'elle prend une forme de « crêpe » épaisse et aplatie : l'anomalie thermique ainsi engendrée peut atteindre 2 000 km de diamètre et rendre compte de la taille d'origine des grands traps. Un panache qui aurait son origine dans la zone de transition ne pourrait guère atteindre un pareil volume.

Si les panaches à « grosse tête » sont bien ceux qui ont donné des traps à leur arrivée à la surface de la Terre, il n'est pas étonnant qu'aucune « tête » n'ait été détectée par les sismologues. Les derniers traps émis, et les plus petits, ceux du fleuve Columbia, qui marqueraient la naissance du point chaud de Yellowstone, sont vieux de 15 millions d'années. La plupart des géophysiciens, dont moi-même, doutent de leur appartenance à la grande famille des points chauds profonds. Les traps précédents, les derniers de taille majeure, sont ceux d'Éthiopie, vieux de 30 millions d'années et responsables de la naissance du point chaud de l'Afar. Il est clair qu'il n'y a pas de trap actif sur Terre en ce moment ! Sans quoi nous serions peut-être en train d'assister à une phase d'extinction majeure des espèces, ce que nous pourrions trouver déplaisant, mais cela ne semble heureusement pas être le cas. Les sismologues verront arriver la tête du prochain panache quelques millions d'années avant qu'il n'émerge à la surface. Cela donne un « temps d'alerte » raisonnable...

Si les principaux panaches proviennent bien du manteau inférieur, les simulations numériques des mécaniciens des fluides, comme Cinzia Farnetani, prédisent un entraînement de matériau du manteau inférieur par le panache. Or les géochimistes ne voient pas la trace de cet entraînement dans les laves de surface. L'utilisation des isotopes des gaz rares permet même à Claude Allègre et Manuel Moreira de penser qu'il ne passe aucune quantité significative de matériau du manteau inférieur dans le manteau supérieur, et que ces deux couches sont séparées « la plupart du temps » de manière étanche.

Maintenant, que signifie « la plupart du temps » ? S'il ne passe qu'un panache majeur dont la tête atteint 100 millions de kilomètres cubes tous les 30 millions d'années à travers la zone de transition, le bilan global pris sur une longue moyenne de temps est très faible...

Pendant des décennies, les géophysiciens n'ont guère considéré que des instabilités dans lesquelles la température était le moteur de l'ascension du panache. On parle alors d'« instabilités thermiques ». Mais comme c'est la force d'Archimède qui joue le rôle principal, une autre source de poussée est naturellement un changement de composition chimique : un fluide peut devenir instable parce qu'il est plus chaud ou parce qu'il est intrinsèquement moins dense. On parle alors de « convection chimique ». Dans la nature, les minéraux (et les roches du manteau profond) seront toujours sujettes aux deux facteurs : le matériau de la couche D'' est susceptible de former des panaches quand il est chauffé suffisamment, mais aussi peut-être parce qu'il est chimiquement différent¹. La convection est alors thermochimique et les forces d'Archimède dues à chacun des deux effets s'ajoutent (ou se retranchent si les deux forces d'Archimède sont de signe contraire). Les contributions relatives de la convection chimique et de la convection thermique se mesurent à l'aide d'un nombre sans dimension, à savoir le rapport entre l'anomalie de densité due à la différence de composition chimique ou minéralogique avec le milieu environnant et celle due à la différence de température. Il s'agit du rapport de flottabilité (*buoyancy ratio*, B, en anglais ; « nombre d'Archimède » propose Claude Jaupart). Anne Davaille a entrepris une série d'expériences au cours desquelles elle a exploré le comportement de mélanges de fluides couvrant deux ordres de grandeur en B et six en Ra (le nombre de Rayleigh). Elle a obtenu des résultats très variés, une véritable zoologie de comportements instables (Figure 11-1).

C'est ainsi que, suivant les valeurs des deux paramètres, il est possible de voir se former des anomalies ou panaches purement thermiques ou, au contraire, se former dans la couche inférieure des sortes de chaînes de montagnes, analogues à des dorsales, qui restent passives sans se détacher de la couche inférieure, ou qui forment des dômes bi- ou tridimensionnels. Dans certains cas, les panaches thermochimiques semblent ancrés, fixés par la « queue »

1. Les spécialistes de l'étude des minéraux à très haute pression viennent de découvrir que la couche D'' correspondrait peut-être à la transformation de la structure pérovskite du manteau inférieur en une nouvelle phase plus dense dite « post-pérovskite » (cf. chapitre 8, note 10).

à la couche inférieure. Parfois, c'est toute la couche qui convecte. Suivant les cas, c'est la couche la plus visqueuse ou la moins visqueuse qui envahit l'autre : la « lutte » ou la « coopération » entre les effets de densité (thermique ou chimique) et les effets de viscosité conduisent à des comportements parfois inattendus. Pour des valeurs « terrestres » des paramètres, Davaille obtient d'énormes dômes pulsant lentement, ou au contraire des panaches fins avec de grosses têtes, identiques à ceux observés par Whitehead ou Campbell. Les résultats expérimentaux suggèrent que certains panaches s'arrêtent à la zone de transition, mais que d'autres la franchissent. Dans certaines expériences, la « tête » bloquée sous la zone de transition refroidit et retombe dans le manteau inférieur. Elle peut aussi passer dans le manteau supérieur sans que se forme de queue. La coexistence possible de ces divers types de panaches en fonction des valeurs des paramètres que sont le nombre de flottabilité et le nombre de Rayleigh – c'est-à-dire les principales caractéristiques des deux « fluides », variation de la densité en fonction de la composition et de la température, saut de température, coefficient de dilatation thermique, viscosité, diffusivité thermique et bien sûr épaisseur des couches concernées – est l'un des résultats principaux du travail d'Anne Davaille, en accord avec la classification des points chauds en (au moins) trois types présentés au chapitre précédent. On reconnaît en particulier les panaches primaires responsables des traps et sans doute originaires de la couche D'' et les dômes pulsants à l'origine des « super-panaches » (superplumes) équatoriaux et antipodaux responsables de la géographie de la couche D'' révélée par la tomographie. Les calculs d'Anne Davaille conduisent à proposer que les oscillations de ces super-panaches ont une quasi-périodicité de l'ordre de 200 millions d'années, une valeur qui rappelle le cycle de Wilson (de la rupture des continents jusqu'à leur collision). L'accord sur ce point n'est pas réalisé. Le cycle de Wilson fait en réalité plutôt 400 millions d'années et pourrait alors résulter du comportement même des plaques continentales chauffées par le manteau et l'isolant de la surface, comme l'ont proposé Laurent Guillou et Claude Jaupart.

Kent Condie voit dans les super-panaches des assemblages de panaches primaires qui s'élèvent depuis la frontière entre noyau et manteau en nombre anormalement élevé dans un espace de temps relativement bref par rapport à celui de la convection normale du

manteau (quelques dizaines à 100 millions d'années). Ces événements seraient eux-mêmes déclenchés par des avalanches massives de matériau plus froid depuis la zone de transition et épisodiques : Condie pense en retrouver des traces très anciennes vers 2,7 et 1,9 milliards d'années, épisodes de volcanisme massif ou de formation de croûte continentale. Les supercontinents s'assembleraient à l'aplomb des sites d'avalanche et se fragmenteraient au-dessus des super-panaches, autre explication du « degré deux » et du cycle de Wilson.

Anne Davaille, Eléonore Stutzmann, Jean Besse et moi-même avons tenté d'appliquer ces idées à l'interprétation de la tomographie sismique découverte sous le grand bouclier africain et la plaque tectonique qui le porte (Figure 11-2). La carte des anomalies de propagation des ondes de cisaillement à 2 700 km de profondeur (sommet de D'') met bien en évidence une immense anomalie « lente » (et donc sans doute chaude ou chimiquement distincte) centrée sous la côte occidentale de l'Afrique et rassemblée autour de latitudes équatoriales. Pourrait-elle correspondre à l'une des deux anomalies globales antipodales qui forment le « degré deux de la Terre » ? Les coupes font apparaître cette anomalie comme la conjugaison de quatre ou cinq grandes instabilités en panache de dimensions caractéristiques voisines, avec des têtes de 2 000 km de diamètre culminant vers 1 000 km de profondeur. On en distingue une qui est associée, par exemple, au volcanisme des îles du Cap Vert, une autre avec les îles de Marion et Crozet (bien qu'il y ait un décalage sensible en surface). Un panache sans expression de surface et culminant vers 1 500 km de profondeur est visible sur la coupe passant par l'Afar et le panache du Cap Vert. Il pourrait s'agir de la tête d'un nouveau point chaud en cours de montée, mais tout aussi bien d'un point chaud ayant arrêté là sa course. Il est en effet probable que nombre d'instabilités provenant de la couche D'' n'atteignent jamais la surface, voire même la zone de transition. En revanche, les panaches de la Réunion ou de Kerguelen n'ont pas de traces en profondeur visible avec cette résolution, et celui d'Afar est visible dans le manteau inférieur, mais pas tout à fait jusqu'à la couche D''. De nombreux arguments conduisent à voir dans les trapps associés à ces points chauds la signature de la tête de grands panaches provenant de D''. Mais il est possible que la résolution des tomographies actuelles ne permette pas encore de distinguer leurs queues trop fines,

ou que celles-ci soient en train de « mourir » et les instabilités de s'épuiser, et donc de s'arrêter à une certaine profondeur. En effet, la plupart des points chauds primaires ont une durée de vie limitée, en gros à 150 millions d'années, parfois peut-être moins. Tous les points chauds actuellement encore en activité (Afar, Islande, Réunion, Tristan da Cunha) sont reliés à un trap de moins de 150 millions d'années. Les traps de plus de 150 millions d'années (Karoo, province de l'Atlantique central, traps de Sibérie et d'Emeishan, etc.) ne sont plus reliés à un point chaud actif.

La tectonique des plaques nous indique l'importance des zones de subduction : les plaques plongeantes, très visqueuses, forment des courants froids qui imposent au manteau une convection « à deux dimensions » (les plaques sont des feuillets). Points chauds et panaches indiquent quant à eux des courants ascendants, chauds, de matériel moins visqueux, correspondant donc à une convection « à trois dimensions » (les panaches eux-mêmes étant cylindriques). Même s'il existe encore des arguments, notamment géochimiques, s'opposant à l'existence de panaches d'origine profonde, il me semble difficile aujourd'hui d'échapper à l'existence de tels panaches ayant leur origine juste au-dessus du noyau de la Terre. La raison en semble simple. La Terre est une machine thermique qui se refroidit de manière irrégulière, aussi efficacement que sa structure en couches complexes et hétérogènes le lui permet. Pour accélérer le refroidissement assuré par la tectonique des plaques et la convection du manteau supérieur qui leur est associée, la Terre a parfois la ressource d'émettre des instabilités thermochimiques depuis ses couches limites, à savoir D'', la zone de transition et la lithosphère². Il semble bien qu'elle utilise épisodiquement ces ressources, et notamment la couche D''. L'évolution de cette couche est caractérisée par l'ample mouvement pulsé, à la période de 200 millions d'années, des super-panaches antipodaux, et sont ponctuées par les émanations de panaches épisodiques, séparés par quelque 30 millions d'années en moyenne, qui aboutissent en surface à l'éruption des traps. Nous avons vu que traps et ouvertures océaniques étaient très souvent associés. Il resterait à

2. Le chauffage du manteau par sa base favorise la formation de panaches localisés. Cependant, le manteau est aussi chauffé « de l'intérieur » par la décroissance de son contenu en éléments radioactifs et ce chauffage interne a plutôt tendance à délocaliser les hétérogénéités.

élucider les rapports entre ces ascensions instables de matière d'origine primaire profonde et ces déchirures continentales d'une part, et l'histoire des subductions, elles-mêmes peut-être épisodiques et ponctuées d'hypothétiques avalanches. Tout cela, avec des constantes de temps remarquablement voisines, ce fameux cycle de Wilson, qui font penser que c'est peut-être là que s'exprime le poulx fondamental de la convection des manteaux supérieur et inférieur. Nous tenterons d'en esquisser un scénario quand nous aurons regagné la surface.

Pour le moment, restons encore un peu dans les profondeurs. Si la couche D'' est si importante dans l'évolution du globe, si active dans ses échanges thermiques, c'est que la chaleur conservée ou produite sous elle, au sein du noyau, doit bien être évacuée par ce milieu si dense et si visqueux. Il est temps de poursuivre notre voyage vers le centre et de pénétrer dans le cœur de la Terre, dans son noyau de fer, siège de phénomènes complexes et vitaux pour nous.

Chapitre 12

DES MÉTÉORITES AU NOYAU

« Eh bien, Humphry Davy vint me voir à son passage à Hambourg. Nous discutâmes longtemps, entre autres questions, l'hypothèse de la liquidité du noyau intérieur de la terre. »

« Il est vrai que l'intensité de la pesanteur diminuera à mesure que nous descendrons. Tu sais que c'est à la surface même de la Terre que son action se fait le plus vivement sentir, et qu'au centre du globe les objets ne pèsent plus. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Contrairement à la légende, encore trop souvent transmise, qui veut que Christophe Colomb ait vécu dans un monde où l'on croyait notre Terre plate, il y avait alors plus de mille sept cents ans que les hommes savaient que notre gîte était une planète ronde et en connaissaient à peu près les dimensions. Deux cent cinquante ans avant l'ère chrétienne, Ératosthène en donne l'une des premières mesures, très proche de la réalité. Il avait compris que le Soleil était suffisamment loin pour que ses rayons fussent parallèles. Il choisit un jour de l'année où, à midi, le Soleil passait à la verticale de Syène, au sud de l'Égypte (en s'assurant que la lumière atteignait le fond d'un puits vertical profond), et le même jour mesurait l'angle que faisaient les rayons avec la verticale à environ 750 km plus au nord, à Alexandrie. Si la Terre était plate, l'incidence des rayons du Soleil serait également verticale. Il observa un angle de 7°. Si la Terre était sphérique, cet angle était aussi celui sous lequel on voyait la distance d'Alexandrie à Syène depuis le centre de la Terre. Si l'on ne se trompe pas trop sur les mesures employées à l'époque, Ératosthène a obtenu comme valeur du rayon de la Terre environ 6 550 km, remarquablement

proche de la valeur « exacte » (6 371 km en moyenne, puisque la Terre n'est pas rigoureusement sphérique¹).

Savoir ce qui se passait à l'intérieur de cette boule était une autre affaire. Nombre de civilisations anciennes y plaçaient le royaume des morts et les divinités qui présidaient à cet état. Celles de ces civilisations qui avaient élu domicile dans un territoire volcanique y plaçaient assez naturellement un feu intérieur, source de magma en fusion et de gaz explosifs. Dans une série étonnante d'illustrations, Athanasius Kircher (1602-1680) proposa plusieurs représentations des profondeurs telluriques, animées de feu ou de vents circulant dans des réseaux de cavernes. Pour certains, la Terre était même creuse et des êtres y vivaient, la tête dirigée vers le centre vide, un « anti-Ciel² ». Nous verrons aux deux prochains chapitres que c'est par le biais du magnétisme terrestre qu'apparaît l'idée d'un noyau. Mais c'est avec l'étude de la pesanteur, de Newton au XIX^e siècle, puis avec la sismologie au XX^e, que ce noyau va « prendre forme et substance ».

Première étape : peser la Terre. Depuis Newton, nous savons que la force de gravitation qui s'exerce entre deux corps est proportionnelle à leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance de leurs centres de masse. La constante de proportionnalité a reçu le nom de constante gravitationnelle. En ce qui nous concerne, la force de gravitation n'est autre que notre poids, qui nous « tire vers le bas » (vers le centre de la Terre). De cette égalité on tire une relation simple entre la masse M de la Terre, son rayon R , l'accélération de la pesanteur g et la constante gravitationnelle G^3 . Mais, depuis Ératosthène, nous connaissons R (6 371 km) et depuis Galilée g (10 m/s²). Il ne nous manque donc que la mesure de la constante gravitationnelle pour « peser » la Terre.

1. Ératosthène a été précédé de cent cinquante ans environ par Eudoxe, qui avait proposé une valeur sensiblement double (cf. Deparis et Legros, *op. cit.*, p. 26).

2. Plus ou moins sérieusement, de l'« Icosameron » de Casanova au roman *At the Earth's Core* d'Edgar Rice Burroughs.

3. Soit m notre masse et M celle de la Terre et R la distance qui sépare nos deux centres de masse (c'est le rayon de la Terre augmenté de la moitié de notre hauteur environ – permettons-nous de la négliger...). Si G est la constante gravitationnelle, la force de gravitation peut s'écrire $G.m.M/R^2$. Notre poids est $m.g$, où g est l'accélération de la pesanteur (qui vaut environ 9,8 mètres par seconde au carré ; nous pourrions nous contenter d'une valeur approchée de 10 m/s²). Rapprochant les deux expressions, on voit que notre masse m « s'élimine » (donc, pour l'instant, pas besoin de la connaître) et que $g = G.M/R^2$.

En 1735, lors de leur expédition dans les Andes pour mesurer la longueur de l'arc de méridien terrestre et en déduire une forme plus exacte de la Terre⁴, Bouguer et La Condamine ont l'idée de mesurer la déflexion de la verticale due à la masse d'une haute montagne. Après une première expérience due à Maskeline (1772) et fondée sur cette idée, c'est à Henry Cavendish qu'il revient de réaliser en 1798 une expérience « en chambre » très soigneuse qui lui donnera la réponse. Pour cette célèbre expérience, une des dates marquantes de la physique, Cavendish construit une balance de torsion : deux petites sphères de plomb de masse égale sont fixées aux extrémités d'une tige suspendue en son milieu par un fil de torsion. À ce dispositif est attaché un petit miroir. Les deux petites sphères sont approchées de deux grosses en plomb qui les attirent, exerçant ainsi un couple sur le dispositif. Une torsion du fil équilibre les deux forces opposées (le couple) des deux grosses sphères sur les deux petites. La lecture des positions des petites sphères est effectuée en envoyant un rayon lumineux sur le miroir et en observant sur une réglette distante le rayon réfléchi. Le « bras de levier » lumineux assure une grande précision. Cavendish obtient ainsi une valeur assez précise de G ⁵. Nous avons désormais tous les ingrédients pour peser la Terre (6.10^{24} kg), et ce faisant en déduire la densité ($5,5$)⁶. Or la densité moyenne des roches en surface est de l'ordre de $2,7$ ⁷. Dès 1800, on sait donc que doivent exister dans les profondeurs de la Terre des matériaux (beaucoup) plus denses que les roches de surface.

Les spécialistes de la pesanteur (gravimétrie) et de la forme de la Terre (géodésie) ont encore beaucoup de choses à nous apprendre. Sans nous attarder sur les détails de sa forme, parlons de son moment d'inertie (rencontré au chapitre 10). Celui d'une sphère homogène est égal à 40 % du produit de sa masse par le carré de son rayon. Celui de la Terre, déterminé à partir du mouvement des satellites, n'est que d'environ 80 % de ce produit. Cela signifie tout simplement que la « patineuse » a concentré une part importante

4. Voir chapitre 6 note 5 et chapitre 10 note 6.

5. $6,67 \cdot 10^{11}$ newton par kilogramme au carré par mètre carré.

6. En 1749, Buffon « sait que, volume pour volume, la terre pèse quatre fois plus que le soleil » (in *Théorie de la Terre* – cf. Deparis et Legros, *op. cit.*) et d'Alembert et Euler concluent « qu'elle a un noyau beaucoup plus dense autour de son centre » (in *Recherches sur la précession des équinoxes* – cf. Deparis et Legros, *op. cit.*).

7. ... pour les granites de la croûte continentale ; un peu plus pour les basaltes de la croûte océanique.

de sa masse vers son centre ; la valeur du moment d'inertie permet de préciser la répartition des densités vers l'intérieur et d'estimer la densité d'un noyau central.

C'est la sismologie qui va nous donner, dans la première moitié du ^{xx}^e siècle, les grands traits de la vision que nous conservons encore aujourd'hui. Les premières compilations des observations des temps d'arrivée des ondes sismiques par Beno Gutenberg dans les années 1920 révèlent un comportement étrange des ondes qui arrivent les premières, les ondes P (de compression) (Figure 12-1). Si l'on observe une progression régulière des temps d'arrivée quand on s'éloigne de l'épicentre d'un séisme, à 105° (soit environ 11 650 km de distance) le signal disparaît, pour ne réapparaître qu'à 142° (environ 15 750 km) : dans une couronne sphérique de plus de 4 000 km de largeur s'étend la « zone d'ombre » des ondes P. Dès 1906, Richard Dixon Oldham (1858-1936) avait compris que c'était dû au fait qu'à une certaine profondeur le matériau change de propriétés de façon si drastique qu'une intense réfraction se produit, envoyant le « rayon suivant » au-delà de 105° et même à plus de 180° ! La discontinuité ainsi découverte par Beno Gutenberg vers 1912 est située à 2 900 km de profondeur. En 1923, il suggérera que cette discontinuité sépare une enveloppe pierreuse d'un noyau de fer⁸. Seconde observation essentielle, les ondes secondes (ou S) de cisaillement ne se propagent pas dans ce milieu inférieur : or ce sont les liquides qui sont incapables de résister à un cisaillement sans fluer ou s'écouler. Jeffreys montre ainsi en 1924 que le noyau de la Terre, très dense (densité supérieure à 10), est de plus liquide ! Enfin, en 1936, la sismologue danoise Inge Lehmann (1888-1993) constate que certaines ondes ne sont pas compatibles avec un noyau entièrement liquide : certaines ondes P semblent avoir traversé le noyau trop lentement. Ce sont des ondes qui ont bien commencé comme des ondes de compression, qui ont traversé la totalité du manteau et une partie du noyau liquide, mais qui ont ensuite rencontré un milieu solide dans lequel une partie de l'énergie a pu se convertir en ondes de cisaillement S, plus lentes. À la sortie de ce milieu solide, ces ondes S se sont à nouveau converties en ondes P pour achever la traversée du noyau liquide, puis du manteau, et parvenir au sismographe qui les a enregistrées. Inge Lehmann vient de faire la « der-

8. Voir Deparis et Legros, *op. cit.*, p. 415, 418.

nière » découverte majeure sur la structure de l'intérieur de la Terre : au sein du noyau liquide existe une « graine » solide de 1 220 km de rayon.

Au cœur de la Terre, un noyau complexe et très dense, avec une partie externe liquide et une partie interne solide. Mais de quoi donc est-il fait ? Ce sont les astrophysiciens et les cosmochimistes qui nous en donnent la première idée. Ou plus simplement les premiers collectionneurs de météorites. Très tôt, ceux-ci y distinguent des familles caractéristiques⁹ : les chondrites, faites de silicates et d'oxydes très primitifs et comportant une structure en grains ou « chondres ». Puis les achondrites (dépourvues de ces chondres), constituées de silicates proches de ceux du manteau terrestre, les achondrites basaltiques (qui, comme leur nom l'indique, sont essentiellement faites de laves basaltiques), et enfin les météorites « de fer » (qui renferment de nombreux autres éléments et notamment du nickel)¹⁰. Rapidement se fait jour l'idée que certaines de ces météorites, dont la plupart proviennent de la ceinture d'astéroïdes entre les orbites de Mars et de Jupiter, sont issues de petites planètes que l'impact d'un autre astéroïde a fait voler en éclats ; ces éclats, après avoir dérivé dans le milieu interplanétaire, ont été capturés par le champ de pesanteur de la Terre. C'est ainsi que s'impose l'idée que le noyau de la Terre est à l'image des météorites métalliques essentiellement composé de fer, allié à un peu de nickel. D'où le premier nom de NiFe donné au noyau par les sismologues des années 1920.

Astrophysiciens et cosmochimistes vont donner à ce raisonnement des bases physiques et chimiques plus solides. La composition chimique de l'atmosphère du Soleil et celle des chondrites se révèlent être presque identiques. Ces objets ont donc peu évolué depuis 4,5 milliards d'années et leur composition est simplement celle du matériau assemblé pour former le système solaire, les proto-planètes (les derniers témoins du matériau non transformé de base, vieux de plus de 4,5 milliards d'années, étant justement fournis par

9. Voir J.-P. Poirier, *Ces pierres qui tombent du Ciel*, Paris, Le Pommier, 1999 ; et C. Allègre, *De la pierre à l'étoile*, Paris, Fayard, 1985, 1996.

10. Très récemment, des mesures ultraprécises à l'aide des isotopes du tungstène (W) ont permis de montrer qu'en fait les premières achondrites sont un peu plus vieilles (à l'échelle du million d'années) que les premières chondrites. La quantité d'isotopes radioactifs à vie courte, comme l'aluminium 26, contenue dans les premiers corps parents, les a en effet rapidement fondus. C'était il y a environ 4 567 millions d'années...

les météorites chondritiques) puis les planètes. Devenues assez grosses, chauffées par les impacts et par la désintégration radioactive de certains de leurs constituants, certaines protoplanètes se sont transformées : on dit qu'elles se sont « différenciées ». Une grande partie de leurs constituants étant alors fondus, ou en tout cas chauds et plastiques, les parties les plus légères (l'écume de Claude Allègre¹¹) sont remontées vers la surface (éruption de basaltes à la surface de ces protoplanètes, dont les morceaux recueillis sur Terre ont reçu le nom d'« achondrites basaltiques »), et les plus denses sont allées vers le centre, constituant ainsi un noyau riche en fer et en nickel. Si l'on compare maintenant la composition chimique de l'atmosphère du Soleil à celle de la croûte terrestre, on constate une énorme dispersion, sur plus de cinq ordres de grandeur. Certains éléments sont au moins cent fois plus abondants dans la croûte que dans le Soleil (par exemple le baryum ou le lithium), d'autres moins de cent fois moins (par exemple le nickel ou l'or) : la Terre elle-même s'est différenciée et les éléments métalliques, manquant en surface, se trouvent tout simplement dans le noyau. La composition du Soleil permet d'en évaluer la quantité : c'est à coup sûr le fer qui domine dans le noyau terrestre.

Une image de plus en plus précise nous a été donnée par les chimistes et les minéralogistes spécialistes des très hautes pressions. On sait aujourd'hui reproduire au laboratoire, à l'aide de toutes petites presses à enclumes de diamant ou de grosses presses « multi-enclumes », les pressions régnant au sein du noyau terrestre¹² ! Dès 1961, Francis Birch mesurait sous pression la vitesse de propagation du son dans plus de 250 échantillons de roches et de minéraux naturels, et montrait que celle-ci ne dépendait pour l'essentiel que de la densité et de la masse atomique moyenne. La plupart des silicates et des oxydes plausibles comme constituants du manteau ont une masse atomique voisine (proche de 21 g). Ce résultat permettait à Birch de transformer les vitesses d'onde peu parlantes des sismologues en densités, puis, à partir d'expériences de laboratoire de plus en plus raffinées, en compositions minéra-

11. C. Allègre, *op. cit.*

12. Plus d'un million d'atmosphères, ou 1 000 kilobars ou encore 100 gigaPascal ; les 360 GPa du centre de la Terre ne sont pas encore tout à fait atteints, mais il n'y a pas de doute que ce sera bientôt fait.

logiques. Jean-Paul Poirier (pour ce qui est de la nature physique des phases minérales) et Claude Allègre (pour ce qui est de la composition chimique) ont beaucoup contribué à préciser notre image de ces tréfonds de la Terre. On sait aujourd'hui que le noyau, où domine le fer avec du nickel, contient aussi environ 10 % d'éléments plus légers. Le silicium, l'oxygène, le soufre, l'hydrogène et le carbone ont tour à tour été envisagés, seuls ou à plusieurs. Une synthèse récente de James Badro et de ses collègues conclut à la présence de 3 % de silicium et 5 % d'oxygène dans le noyau liquide, et 2 % de silicium (et des traces d'oxygène) dans la graine. Les éléments légers sont en effet rejetés en grande partie dans le liquide quand celui-ci cristallise et fait croître la graine.

Chapitre 13

MAGNUS MAGNES IPSE EST GLOBUS TERRESTRIS

« Et la boussole indique toujours le sud-est ?

— Oui, avec une déclinaison occidentale de dix-neuf degrés et quarante-deux minutes, comme sur terre, absolument. Pour son inclinaison, il se passe un fait curieux que j'ai observé avec le plus grand soin. [...] C'est que l'aiguille, au lieu de s'incliner vers le pôle, comme elle le fait dans l'hémisphère boréal, se relève au contraire.

— Il faut donc en conclure que le point d'attraction magnétique se trouve compris entre la surface du globe et l'endroit où nous sommes parvenus ?

— Précisément. [...] Donc, ce mystérieux centre d'attraction ne se trouve pas situé à une grande profondeur.

— En effet, et voilà un fait que la science n'a pas soupçonné.

— La science, mon garçon, est faite d'erreurs, mais d'erreurs qu'il est bon de commettre, car elles mènent peu à peu à la vérité. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Dans son *Histoire naturelle*, Pline l'Ancien nous expose la manière dont, au VI^e siècle avant Jésus-Christ, Thalès de Milet avait tenté d'expliquer en termes de philosophie animiste la capacité des aimants naturels à exercer des forces supérieures à la pesanteur. Au I^{er} siècle, Lucrèce décrit déjà, en termes poétiques, des concepts que nous appellerions aujourd'hui « attraction à distance », « aimantation permanente » et « stabilité magnétique ». La boussole flottante, une aiguille aimantée placée dans une paille creuse flottant à la surface de l'eau, est inventée par les Chinois, sans doute pour des utilisations divinatoires, entre les I^{er} et VI^e siècles. Elle arrive en Europe vers le XII^e siècle. La boussole sèche, proche de celle que nous utili-

sons, avec une aiguille aimantée placée cette fois sur un pivot, est également inventée en Chine entre les ^{viii}e et ^{ix}e siècles ; elle est mentionnée pour la première fois dans une chronique de Shen Gua (1031-1095) datée de 1088 et pénètre en Europe au ^{xiii}e siècle. Certains pensent que des caravanes ont assuré le transport de cet instrument merveilleux, d'autres qu'il a été inventé indépendamment aux deux bouts du continent eurasiatique. De nombreux écrits, faisant pour la plupart référence à la boussole flottante, paraissent en Europe à partir de 1200 : c'est ainsi qu'Alexander Neckam (1157-1217) décrit soigneusement attraction et répulsion magnétiques et en propose une théorie. Le *Speculum Naturale* de Vincent de Beauvais (~1190-1264), une encyclopédie écrite entre 1220 et 1244 et qui restera populaire jusqu'au ^{xviii}e siècle, contient des articles sur l'« adamant » (aimant) dans lequel il identifie des coins ou pôles magnétiques qu'il nomme *anguli*.

Mais la première grande figure à laquelle on peut être tenté de faire remonter les débuts du magnétisme en tant qu'objet d'analyse scientifique est celle de Pierre Pélerin de Maricourt, connu aussi sous le nom de Petrus Peregrinus. Certes, plusieurs contributions intéressantes précèdent son *Epistola de Magnete* : celles d'Albert le Grand, de Thomas d'Aquin ou de son contemporain, qu'il rencontra sans doute à la Sorbonne, Roger Bacon. Mais Peregrinus est le premier à décrire soigneusement la boussole sèche (à pivot) et à discuter longuement la notion de pôle. On ne connaît de traces de ce chevalier picard qu'entre 1261 et 1269, année au cours de laquelle il participe au siège de la petite ville italienne de Lucera dans les troupes de Charles d'Anjou. Sans doute pour déjouer l'ennui du siège (qui se terminera par la victoire d'Anjou et un sort assez affreux pour les défenseurs de Lucera et ses habitants), il écrit le 8 août une lettre à son ami Syger de Foucaucourt. Il y insiste d'abord sur la nécessité de connaître la nature des choses, les mouvements célestes, mais aussi (et cela mérite d'être souligné plus que jamais aujourd'hui) de savoir construire de ses propres mains les instruments et les expériences qui rendent les « effets merveilleux » manifestes à l'œil. Il décrit la pierre d'aimant naturelle, y taille une sphère, utilise une fine aiguille aimantée pour tracer ce que nous appellerions aujourd'hui les « méridiens magnétiques » de la sphère, et constate que tous ces méridiens se recoupent en deux points opposés, « comme le font les cercles méridiens [géographiques] aux deux pôles opposés du monde ». Il propose de trouver rapidement

ces pôles en cherchant les endroits où l'aiguille aimantée est perpendiculaire à la sphère ; Peregrinus pense (comme Roger Bacon à la même époque) que son *magnes rotundus* représente en fait non pas la Terre, mais le Ciel. Il nomme les pôles magnétiques Nord et Sud, et constate qu'un pôle Nord attire un pôle Sud. Dans cette étonnante lettre, le magnéticien moderne trouve une foule d'autres indications remarquables qu'il serait trop long de citer toutes ici¹. Dans la seconde partie de sa lettre, Peregrinus établit les plans de deux boussoles flottantes, munies de dispositifs permettant de les utiliser même de nuit ou quand il y a du vent. Pour finir, et cela coûtera cher à sa réputation de nombreux siècles après sa disparition, il propose la construction d'une machine à mouvement perpétuel : on ne dispose à son époque d'aucun outil permettant de montrer l'impossibilité de ce mouvement.

Si j'insiste tant sur Pierre Pélerin², c'est que son rôle a été petit à petit oublié, effacé au profit de William Gilbert, auquel on attribue souvent le rôle de fondateur du magnétisme moderne, qui publiera ses travaux 331 ans après l'*Epistola*. Les découvertes s'accélérent entre les XIII^e et XVI^e siècles. La déclinaison magnétique est découverte dès le milieu du XV^e siècle³ : le fait que l'aiguille magnétique ne pointe pas exactement vers le pôle Nord géographique, mais en diffère en général de quelques degrés, est attesté par des marques gravées sur une boussole fabriquée à Nüremberg en 1451. On découvre rapidement que cette déclinaison varie selon le lieu géographique. En 1558, João de Castro emporte une « *brujula de variacion* » dans un voyage du Portugal aux Indes orientales. Il découvre des perturbations de la déclinaison dans la baie de Bombay et les attribue (à juste titre !) aux effets perturbateurs des roches situées au fond de l'eau⁴. En 1544, Georg Hartmann constate que, si on laisse l'aiguille aimantée libre de pivoter autour d'un axe

1. Que le fer touché par l'aimant naturel s'aimante à son tour, qu'on peut le désaimanter puis le réaimanter avec la polarité opposée, qu'un aimant peut être brisé en autant de petits aimants et que l'aimant d'origine peut être reconstitué de différentes manières...

2. Jean-Louis Le Mouél et moi avons consacré dans un article sur l'histoire du géomagnétisme et du paléomagnétisme un long développement à Pierre Pélerin de Maricourt : V. Courtillot et Jean-Louis Le Mouél, *Reviews of Geophysics*, 45, 31 p., RG3008, 2007.

3. Il semble que Shen Gua en fasse mention dès le XI^e siècle !

4. Je ne résiste pas dans ce livre à signaler que ces roches au fond de l'eau n'étaient autres que les basaltes du Deccan, laves marquant l'éruption du point chaud de la Réunion dont nous n'avons pas fini de parler...

horizontal, celle-ci « pique du nez » et s'incline : il vient de découvrir l'inclinaison magnétique. Elle est redécouverte et mesurée de manière plus exacte par Robert Norman en 1576 à Londres. Il faudra attendre 1660 pour qu'une mesure similaire soit faite à Paris... Giambattista della Porta semble avoir été le premier à décrire, en 1589, ce que nous appelons aujourd'hui les « lignes de force » d'un barreau aimanté en les rendant visibles avec de la limaille de fer, une expérience qu'on accomplit encore sans doute dans la plupart des collèges et lycées de la planète.

Au cours du XVI^e siècle, les observations (surtout de déclinaison) se multiplient avec l'exploration du monde. Il apparaît de plus en plus fréquemment des « anomalies », qui conduisent progressivement à abandonner l'idée que le magnétisme vient du Ciel, pour placer son siège dans la Terre. Deux écoles vont bientôt s'affronter : les tenants de sources locales et ceux de sources globales, que certains situeront bientôt dans les grandes profondeurs, dans un « noyau ».

Président du collège royal des médecins de la reine Elizabeth d'Angleterre, William Gilbert (1544-1603) est l'un des ardents défenseurs de la première façon de voir. Il entreprend en 1581 de résumer toutes les connaissances de son temps sur le magnétisme, et publie en 1600 son célèbre *De Magnete*. Il affirme, et cela le rendra célèbre, que c'est la Terre et non le Ciel qui attire l'aiguille aimantée de la boussole, parce que « la Terre elle-même est un grand aimant ». Et Gilbert de constater que l'inclinaison d'une petite aiguille aimantée suspendue à proximité de la surface d'une sphère taillée dans de la pierre d'aimant (*terella*) varie avec la position géographique de l'aiguille, perpendiculaire aux pôles et horizontale à l'équateur (ce que Peregrinus avait déjà noté). Gilbert voit dans sa *terella* (Figure 13-1) une image de la Terre et une preuve de l'origine interne du champ ; se fondant sur l'observation de ce modèle réduit, il ose prédire que l'inclinaison magnétique sur Terre devrait croître vers les latitudes boréales et décroître vers l'équateur, pour s'inverser aux latitudes australes. Cette prédiction fut rapidement vérifiée par les navigateurs et servira au XX^e siècle de base aux paléomagnéticiens pour reconstruire les positions anciennes des continents. Gilbert propose également qu'un échange cosmique entre forces magnétiques est responsable de l'organisation du système planétaire, avec le Soleil à son centre, ce qui lui vaudra d'être accusé d'hérésie (Galilée avait un exemplaire du traité de Gilbert).

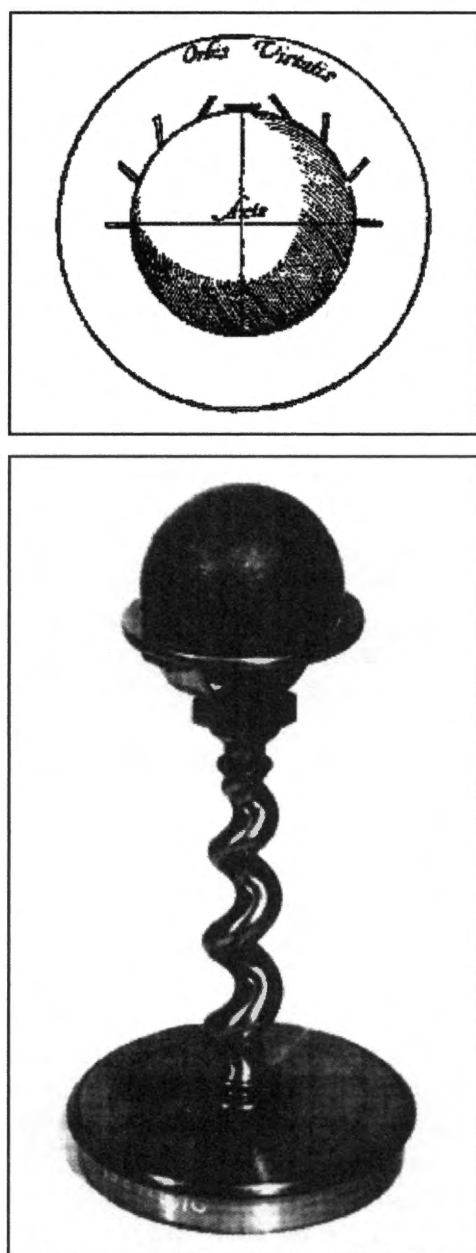


Fig 13-1 : La *terrella* (ou sphère taillée dans de la magnétite Fe_3O_4) de Gilbert représentée dans son ouvrage datant de 1600, avec l'indication de la position de petites aiguilles aimantées à sa surface : les aiguilles sont perpendiculaires (« verticales ») aux pôles et tangentes (« horizontales ») à l'équateur. Leur inclinaison prend toutes les valeurs intermédiaires aux latitudes intermédiaires. En bas une *terrella* du xviii^{e} siècle (d'après D. Stern).

Il restait à Gilbert à expliquer l'écart entre nord magnétique et nord géographique, la déclinaison et ses nombreuses variations géographiques. Il y voit des anomalies dues à des sources locales, crustales, et pour cela fait construire une *terella* avec des bosses et des creux, des « océans » et des « continents » : il observe alors des variations d'orientation de ses petites aiguilles aimantées qui le convainquent d'avoir trouvé la solution. Comme les reliefs de la sphère ne peuvent évoluer au cours du temps, Gilbert conclut que la déclinaison doit être immuable en tout point.

C'est ici qu'intervient un autre grand oublié de l'histoire du magnétisme, Guillaume le Nautonier (1557-1620). Né en Aquitaine, le Nautonier s'intéresse très jeune à « ce petit morceau de fer qui semble vivre et avoir du jugement ». Mathématicien, géographe, docteur en théologie, le Nautonier publie sa *Mecometrie de l'eymant* (manière de mesurer la longitude à l'aide de l'aimant) à l'issue de vingt ans de travaux, en 1601. Le livre, publié en français et non en latin (ce qui explique en partie qu'il fut peu diffusé), s'achève sur 196 pages de tables numériques de déclinaison et d'inclinaison, le but premier de le Nautonier étant de fournir des outils aux navigateurs. Il insiste sur les nombreuses observations disponibles pour conclure que la déclinaison varie plus ou moins doucement avec le lieu ; suivant Mercator, il ne place pas les pôles de l'aimant terrestre aux pôles géographiques, mais les décale. S'il fait bien référence au « grand aimant » de Gilbert, auquel il rend pleinement hommage (bien qu'apparemment son livre n'ait été connu de lui qu'après avoir achevé l'essentiel de ses propres travaux), son aimant est incliné sur l'axe de rotation. Avec une remarquable construction géométrique, il représente un ensemble de parallèles et de méridiens « décalés », l'axe magnétique étant incliné de $22,5^\circ$ le long du méridien « zéro » des îles Canaries, où le Nautonier constate que la déclinaison est nulle. Il représente alors le premier l'équateur magnétique incliné par rapport à l'équateur géographique. Nous savons aujourd'hui que, faute d'observations en nombre suffisant et bien réparties géographiquement, l'axe de le Nautonier est assez loin de l'axe réel (inclinaison de $10,5^\circ$ sur le méridien $71,5^\circ$ Ouest), mais ses conceptions étaient plus proches de la réalité que celles de Gilbert. La valeur proposée par le Nautonier, proche de l'inclinaison de l'axe de la Terre sur son orbite, traduisait peut-être des relents de magnétisme céleste... À l'aide de ses constructions sur la sphère, il était capable de prédire déclinaison et inclinaison en tout

lieu ; le navigateur pouvait alors en principe retrouver sa longitude en mesurant sa latitude et sa déclinaison magnétique et en regardant les tables de le Nautonier. Nous verrons bientôt pourquoi dans la pratique cette méthode ne pouvait fonctionner. À partir de 1610, son travail fut violemment attaqué tant en Angleterre qu'en France, avec des arguments qu'on sait aujourd'hui faux. Bien qu'il ait été le premier à introduire le concept d'aimant incliné, rejetant à juste titre l'hypothèse de Gilbert d'une coïncidence forcée entre axes magnétique et géographique, le Nautonier fut rapidement oublié pour ne connaître de « résurrection » que grâce à un article de Pierre-Noël Mayaud et Mioara Manda⁵.

La découverte majeure qui va suivre est celle de la variation séculaire de la déclinaison, qui infirme l'une des hypothèses fondamentales de Gilbert. En 1580, William Borough avait établi une valeur de 11° 25' E pour la déclinaison à Londres. En 1622, Edmund Gunter trouve une valeur de 5° 56' E au même endroit ; incertain des valeurs de Borough, Gunter ne publie pas ses résultats. Henri Gellibrand reprend les mesures en 1634 et trouve 4° 05' E. Le doute n'est plus permis : quelle qu'en soit la cause, le magnétisme terrestre varie de manière significative au cours du temps ! Cette découverte allait poser des problèmes aux navigateurs comme aux scientifiques : elle invalidait une partie des conclusions de Gilbert comme de le Nautonier. Elle conduisit à la première suggestion de mesurer régulièrement le magnétisme terrestre dans des observatoires fixes, de manière répétée et régulière. Le XVII^e siècle vit ainsi une véritable « explosion » des mesures magnétiques. Stuart Malin et Edward Bullard ont pu en reconstituer une série presque ininterrompue à Londres et Mioara Manda, Jean-Louis Le Mouél et moi-même à Paris (la première mesure de la déclinaison y date de 1541). Ces deux séries sont remarquablement similaires et permettent de reconstituer l'évolution dans le temps du champ magnétique terrestre en Europe occidentale au cours de plus de quatre siècles (Figure 13-2).

En ce XVII^e siècle, les idées se heurtent : aux tourbillons de Descartes (1586-1650) s'opposent les vues atomistes de Gassendi (1592-1655). Descartes est le premier à décrire et illustrer une structure interne de la Terre, précise mais bien compliquée, reposant sur

5. M. Manda, et P.-N. Mayaud, « Guillaume le Nautonier, un précurseur dans l'histoire du géomagnétisme », *Revue d'histoire des sciences*, 57, 2004, p. 161-174.

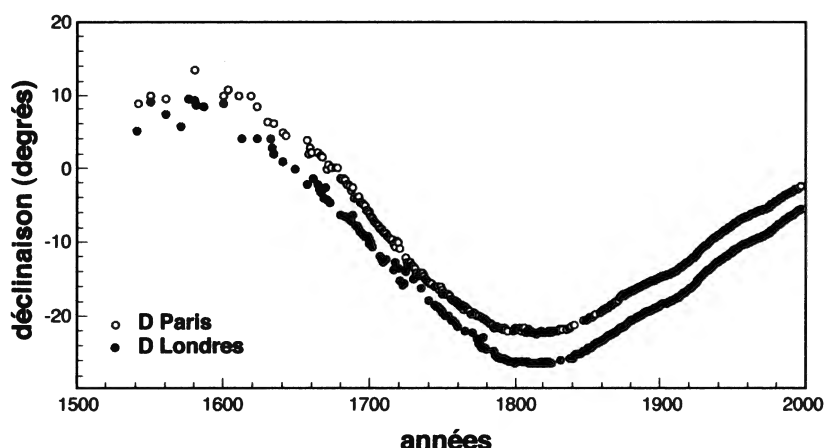


Fig 13-2 : Évolution de la déclinaison à Paris et à Londres depuis les premières mesures au xvi^e siècle. L'amplitude totale dépasse 30°. Les deux courbes sont quasiment parallèles, avec cependant des périodes où les observations sont dispersées pour de multiples raisons. On peut y lire une partie de l'histoire des deux pays et de leurs vicissitudes... Les données de l'une permettent de corriger celles de l'autre (la compilation parisienne est due à M. Mandeau, J.-L. Le Mouél et l'auteur, la compilation londonienne à S. Malin et E. Bullard).

une physique étrange pour nous aujourd'hui ; il est aussi le premier à proposer un modèle de Terre magnétique assez complet⁶. Disciple de Descartes, dont il diffuse les vues « mécanistes », Jacques Rohault (1620-1675) résume et illustre remarquablement dans des cours publics, riches de belles expériences, l'ensemble des connaissances de son temps (aimant brisé, lignes de force et pôles, aimantation du fer et de l'acier, désaimantation par chauffage). De son côté, Robert Boyle (1627-1691), tenant de vues atomistes, montre que l'action magnétique persiste dans le vide, et qu'une brique chauffée puis refroidie peut acquérir un magnétisme permanent (cette observation sera dans la seconde moitié du xix^e siècle à l'origine d'une discipline, l'archéomagnétisme) ; il pousse à la création par la Royal Society d'un « Magnetism Committee » qui rejette la théorie de Gilbert. Le xvii^e siècle voit une floraison de modèles magnétiques de la Terre : c'est ainsi qu'Edmond Halley (1656-1742) constate que certains traits du champ magnétique dérivent vers l'ouest au cours du temps et conçoit l'idée que l'intérieur de la Terre pourrait être fluide. Il propose en 1692 que la Terre est faite de deux coquilles magnétiques concentriques, l'une en surface (attachée à la

6. Cf. Deparis et Legros, *op. cit.*, p. 105 et p. 108.

croûte) et l'autre en profondeur (l'idée d'un noyau solide apparaît ainsi), séparée de la première par une couche fluide. Il propose donc (selon ses propres termes) qu'un « manteau » magnétique renferme un « noyau » également magnétique. Chaque sphère serait porteuse d'un aimant, mais les pôles n'en seraient pas opposés : quatre pôles magnétiques dériveraient donc avec une périodicité de 700 ans. Quantité de modèles de ce type continueront à fleurir au début du XVIII^e siècle. Cette quête conduit Halley à publier ses célèbres et remarquables cartes de la déclinaison, d'abord pour l'Atlantique en 1701 puis pour le reste du monde l'année suivante.

Avec la découverte de la variation séculaire, on était entré dans un monde d'« instabilité magnétique ». En 1716, Halley a l'idée de rapprocher l'observation d'une aurore boréale au-dessus de Londres avec le champ magnétique, et en 1741 Graham (à Londres) et Celsius (à Uppsala) observent simultanément des perturbations magnétiques liées à une aurore polaire. En 1722, George Graham (1675-1751) découvre la variation journalière (ou diurne) de la déclinaison. En 1773, l'Académie des sciences de Paris met au concours l'invention d'une aiguille montrant le vrai méridien magnétique et permettant de suivre la variation diurne. C'est Charles Coulomb qui le remporte en 1777 avec son extraordinaire balance de torsion qui sera à la base de la plupart des instruments pendant deux siècles. Il montre que la répulsion entre deux pôles magnétiques de même polarité varie comme l'inverse du carré de la distance (dix-neuf ans avant la détermination de la constante universelle de la gravitation par Henri Cavendish).

Le personnage qui marque le tournant du XVIII^e au XIX^e siècle est Alexandre de Humboldt (1769-1848). Voyageur curieux, observateur infatigable, Humboldt mène une expédition magnétique dans le Palatinat, au cours de laquelle il reconnaît que les roches du sommet sont sources de champ magnétique parce qu'elles ont été frappées par la foudre. Au cours de son célèbre voyage en Amérique du Sud, accompagné d'Aimé Bonpland, il entreprend de nombreuses mesures magnétiques, d'inclinaison mais aussi, chose alors assez nouvelle, d'intensité relative à l'aide d'un pendule. Le champ magnétique est en effet un vecteur caractérisé par trois composantes : deux angles, la déclinaison et l'inclinaison, que l'on savait alors mesurer depuis longtemps, et une longueur ou intensité du champ, beaucoup plus difficile à déterminer. Humboldt constate que l'intensité magnétique décroît quand on s'approche

de l'équateur : « J'ai regardé la loi du décroissement des forces magnétiques, du pôle à l'équateur, comme le résultat le plus important de mon voyage américain. » Humboldt avait en fait deux prédécesseurs : l'un qu'il reconnut lui-même, Robert Paul de Lamanon (1752-1787), qui avait observé cet effet en 1785 au cours de l'expédition de La Pérouse, mais avait été tué peu après aux îles Samoa ; l'autre, Élisabeth Paul Édouard de Rossel (1765-1829), membre de l'expédition d'Entrecasteaux envoyée à la recherche de La Pérouse, qui avait effectué six mesures entre 1791 et 1794.

Mais Humboldt est surtout cher aux magnéticiens comme instigateur de mesures et promoteur de la mise en réseau d'observatoires autour du monde. Son très proche ami, François Arago (1786-1853), est l'auteur direct de plus de 150 000 mesures d'excellente qualité faites principalement à Paris. Après avoir mis sur pied son propre observatoire à Berlin, Humboldt organise des réunions internationales dans lesquelles il codifie les protocoles de mesures qu'il recommande dans les observatoires. L'un de ses buts était de déterminer l'origine, terrestre ou solaire, de certaines variations magnétiques. En 1829, il entreprend une expédition en Oural et en Sibérie. Il recommande aux autorités russes de multiplier les stations de mesure à travers la Russie d'Europe et d'Asie. En partie à son incitation, le grand mathématicien Carl Friedrich Gauss (1777-1855) oriente ses recherches vers le magnétisme et met sur pied un réseau d'observatoires allant d'Irlande en Allemagne (la France n'installera son premier observatoire magnétique, au parc Saint-Maur, où certains bâtiments sont toujours visibles, qu'en 1883). Les États-Unis mettent également sur pied un réseau. Humboldt comprend que, pour achever une couverture globale, il lui suffit de demander au gouvernement britannique de placer des stations dans l'ensemble de son territoire outre-mer. Le réseau mondial des observatoires magnétiques est né.

C'est en 1831 que John Ross (1777-1856) localise le pôle magnétique « nord⁷ » au cours d'une expédition destinée à découvrir le passage du nord-ouest au nord du Canada. Trois expéditions tentent de localiser le pôle magnétique sud entre 1839 et

7. Nous conservons ici l'appellation d'usage, qui est en fait incorrecte. On sait que les pôles de signe contraire s'attirent. Le pôle nord (en général bleu) de l'aiguille d'une boussole, qui pointe en gros vers le pôle Nord géographique, indique en fait la direction du pôle sud magnétique, et *vice versa*.

1843⁸ ; il faudra attendre en 1909 l'expédition dirigée par Ernest Shackleton pour que Edgeworth David, Douglas Mawson et Alistaire Mackey l'atteignent enfin. Les Australiens viennent d'en célébrer le centenaire en le survolant en avion.

Édouard Sabine poursuit le programme de Humboldt, séparant avec soin les composantes permanentes et leurs variations : c'est ainsi qu'il découvre que les perturbations magnétiques sont modulées par l'activité du Soleil (le fameux « cycle de onze ans »). Les deux premiers tiers du ^{xx}^e siècle sont ceux de la multiplication des observatoires magnétiques autour du globe et de l'intégration de leurs observations dans des cartes, puis des modèles mathématiques (dont l'origine remonte à Gauss) qui portent le nom de « Champ géomagnétique international de référence » (en anglais IGRF⁹). Ces modèles ainsi que leurs variations temporelles sont évalués et mis à jour tous les cinq ans. En reprenant les livres de bord des navires et les données archivées de par le monde, David Gubbins (de l'Université de Leeds) et plusieurs de ses étudiants ont entrepris une immense tâche de compilation et reconstitué l'évolution globale du champ depuis environ quatre siècles.

Le ^{xix}^e siècle est, comme chacun sait, un siècle d'énormes progrès dans notre compréhension du magnétisme et de l'électromagnétisme, avec Arago, Hansteen, Oerstedt, Ampère, Poisson, Gauss ou Faraday. Cette histoire est connue ; il est sans doute inutile de la rappeler ici. Contentons-nous de souligner à nouveau le rôle exceptionnel de Gauss : c'est lui qui met au point l'étude mathématique des champs de potentiel et démontre que le champ magnétique terrestre est bien à 99 % d'origine interne. Mais il pense que la variation séculaire est due au lent épaississement de la croûte par refroidissement et que les pôles sont situés dans les régions froides là où la croûte est la plus épaisse, des idées aujourd'hui totalement abandonnées. Après Denis Poisson (1781-1840), il montre que, quand on s'éloigne des sources, le champ de l'aimant (dipôle) décroît comme l'inverse du cube de la distance. Poisson et Gauss

8. L'une française, conduite par Dumont d'Urville, une autre américaine, par Charles Wilkes, et la troisième anglaise, par James Ross.

9. Notons qu'il existe dans l'Atlantique Sud une vaste zone où le champ magnétique d'origine profonde est plus faible et protège moins des effets perturbateurs externes la zone dans laquelle transitent les satellites : la majeure partie des accidents et des pannes de satellites s'y concentre dans un moderne « triangle des Bermudes ».

inventent également deux méthodes de mesure absolue d'un champ magnétique. Celle de Poisson ne sera jamais employée ; celle de Gauss est encore pratiquée dans certains observatoires ou pour certaines démonstrations de physique. Quant au nom de Michael Faraday (1791-1867), il reste attaché à la définition du concept de « lignes de force », à l'introduction de celui de « champ » (plus fort là où les lignes sont plus resserrées), et à la découverte de l'induction électromagnétique, résultat d'un mouvement relatif entre source magnétique et conducteur électrique. Il inventa la « dynamo à disque » qui sera au cours de la seconde moitié du ^{xx}e siècle un modèle puissant de l'origine du champ magnétique terrestre.

Il aura donc fallu des siècles pour commencer à comprendre le magnétisme terrestre, puis constater son dynamisme. Le « spectre des variations » du champ, comme nous l'appelons, recouvre une étendue extraordinaire. Nous avons entrevu des variations « rapides » liées aux aurores boréales par exemple, et dont on sait désormais que l'origine est dans le Soleil. Notre étoile est une puissante usine nucléaire, qui transforme l'hydrogène en hélium et dégage ce faisant une énergie considérable. Les parties supérieures du Soleil sont animées en permanence de courants de convection, preuve d'une grande turbulence. Nous avons évoqué le cycle de onze ans des taches qui s'y forment, dérivent et disparaissent. Elles en ont également un magnétique de vingt-deux ans au cours duquel leur polarité se renverse. Le Soleil connaît aussi parfois des colères, des éruptions brusques qui engendrent des orages magnétiques sur Terre : les courants électriques qui circulent dans les hautes parties de l'atmosphère peuvent à leur tour induire des perturbations dans les réseaux électriques de surface et causer des pannes massives, comme celle qui a plongé la belle province du Québec dans le noir le 13 mars 1989. D'autres systèmes de courants, en général plus calmes, sont fixes par rapport au Soleil qui les induit : la Terre défile chaque jour sous ces nappes, ce qui cause les variations journalières. Un courant se faufile par ailleurs le long de l'équateur magnétique (celui de le Nautonier, correspondant au dipôle incliné) et engendre des effets sensibles dans les stations équatoriales. L'intensité de ces effets magnétiques externes à la Terre décroît quand leur fréquence décroît ou, ce qui revient au même, quand leur période augmente. On a longtemps pensé qu'il n'y avait pas d'effet au-delà de la période de vingt-deux ans. Certains ont cependant suggéré qu'il restait encore de petites

variations liées à des « périodes » du Soleil peu précises, mal comprises, de l'ordre de soixante ans, voire de quatre-vingt-dix¹⁰.

Le Soleil est en effet une étoile qui varie sur de vastes échelles de temps. Jean-Louis Le Mouél, Volodya Kossobokov et moi-même avons récemment mis en évidence, dans les observatoires magnétiques disposant de séries longues (un siècle) de mesures, un signal faible mais clair que nous avons nommé « tendance magnétique globale ». Il reflète sans doute une variation de l'activité du Soleil, avec des alternances d'activité croissante et décroissante, durant chacune quelques dizaines d'années et dont la tendance s'inverse de manière irrégulière vers 1955, 1970 et 1985. Ces variations semblent, en première approximation, corrélées à celles de la température moyenne de la basse atmosphère au cours du ^{xx}e siècle : nous retrouvons le thème des changements climatiques récents, évoqué au début de ce livre.

Mais cette tendance est très faible par rapport à la variation séculaire, dont Gauss avait démontré l'origine interne. On a longtemps cru qu'il n'existait pas de variations d'origine interne rapides, plus courtes que les variations solaires : il n'en est rien. Nous avons découvert en 1976, avec Joël Ducruix et Jean-Louis Le Mouél, que la vitesse de variation du champ magnétique terrestre, la variation séculaire, subissait de temps en temps de brusques changements. Il s'en est produit vers 1910, 1925, 1970, 1980, et 1990. Où donc peuvent prendre naissance de tels « orages magnétiques internes », qui ont reçu le nom gracieux de *jerk* en anglais ? Où naît dans son ensemble la variation séculaire ? Quelle est donc sa vitesse ? La mesure régulière des composantes du champ dans les observatoires permet de répondre à cette question. Si l'on compare, par exemple, la carte des lignes d'égale déclinaison au-dessus de la France en 1948 et en 1997, on voit que les formes d'ensemble ont peu changé, mais que la déclinaison a perdu 6° en valeur absolue et que l'ensemble des lignes a dérivé de près de 1 000 kilomètres vers l'ouest (Figure 13-3¹¹). La vitesse moyenne est donc de 20 km/an, 500 000 fois plus rapide que la dérive des plaques tectoniques. Quel milieu physique dans les profondeurs de la Terre est capable de soutenir de pareilles vitesses ?

10. On parle de cycles de Gleissberg.

11. Stuart Gilder, quand il était dans notre institut, en a reconstitué l'évolution dans une animation que le lecteur trouvera à l'adresse internet <http://www.ipgp.jussieu.fr/~gilder/VF/index.html>.

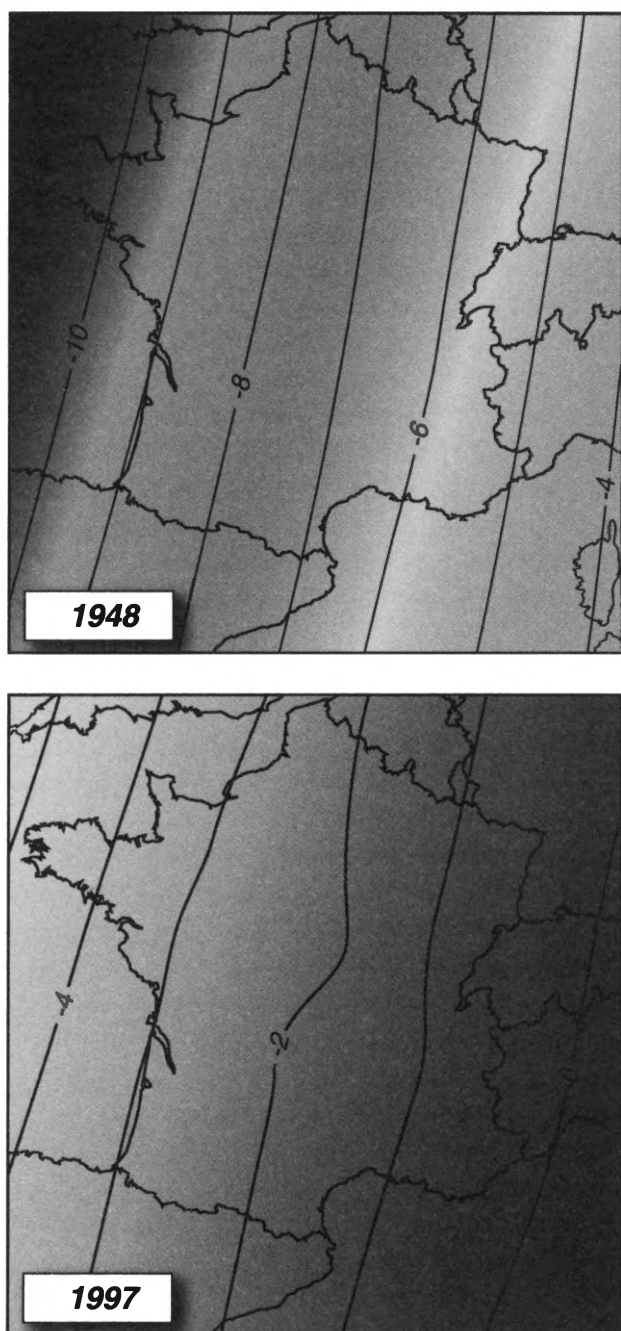


Fig 13-3 : Variation séculaire de la déclinaison en France sur 50 ans. Les lignes d'égale valeur de la déclinaison (en degrés) dérivent vers l'ouest de près de 1 000 km (d'après S. Gilder).

Ce n'est pas tout... Nous sommes désormais capables, grâce à la mémoire magnétique enregistrée dans la plupart des roches naturelles (laves et sédiments) de reculer beaucoup plus loin dans le temps. Les racines de ce paléomagnétisme remontent au XIX^e siècle, moins loin dans le temps que celles du géomagnétisme. Joseph Fournet (1801-1869), premier titulaire de la chaire de géologie à Lyon, publie en 1848 un long essai intitulé *Aperçus sur le magnétisme des minerais et des roches, et sur les causes de quelques anomalies du magnétisme terrestre*. Il y distingue soigneusement ce que nous appellerions « aimantation induite » (réversible) de l'aimantation rémanente, permanente, qui forme la mémoire magnétique de la roche. Il étudie l'influence de l'air, de la lumière, du temps, du frottement, des étincelles électriques ou de l'action des corps magnétiques distants sur l'aimantation de nombre de corps. Il passe en revue les propriétés magnétiques de minéraux fréquents (magnétite, hématite) ou rares ; il s'attarde sur les effets « magnétopolaires » des basaltes. Fournet rapproche magnétisme des observatoires et magnétisme des roches quand il constate que « les physiciens prennent de grandes précautions pour éliminer le fer de ces observatoires qu'ils appellent maison, pavillon, tente magnétique. Il semble [...] que les expérimentateurs [...] auraient dû d'abord étudier l'influence que diverses roches peuvent exercer sur leurs instruments, puisque les expériences sont en général menées non loin au-dessus du sol. [...] J'ai longtemps pensé à une association dans laquelle un géologue serait inclus ». Cette recommandation n'a pas tout perdu de sa pertinence, dans la mesure où, trop souvent encore, géophysicien et géologue oublient ce que chacun peut apporter à l'autre... Et Fournet de conclure lyriquement : « Je laisse maintenant aux physiciens à décider si mes conclusions ne sont pas intempestives. En publiant cette notice, je n'ai eu d'autre dessein que celui de leur épargner de fausses et pénibles tentatives, et si mon but n'a pas été atteint, ils me pardonneront du moins d'avoir lancé des éclaireurs, véritables enfants perdus, dans un domaine que la géologie n'en aura pas moins à revendiquer un jour comme l'un des plus beaux fleurons de sa noble couronne. »

S'appuyant sur la monographie fondatrice de Fournet, Delesse (1817-1881) définit les notions de champ coercitif (le champ inverse qu'il faut appliquer à un corps aimanté pour annuler son aimantation), constate que souvent la direction d'aimantation suit

celle du champ appliqué plutôt que des axes cristallographiques remarquables de l'échantillon, et, dans une phrase qu'on peut considérer comme fondatrice du paléomagnétisme, énonce que toutes les coulées de lave récentes sont aimantées dans une direction parallèle au champ magnétique local : cela en 1849, plus de cinquante ans avant que cette propriété ne soit utilisée par Brunhes pour découvrir les inversions du champ, plus de cent ans avant qu'elle ne serve de base à la mesure de la dérive des continents ! Nous nous devons de citer aussi Macedonio Melloni (1798-1854), constructeur d'un magnétomètre « astatique » très sensible à l'aide duquel il détermine les aimantations de nombreux types de roches, surtout volcaniques, et de minéraux. Melloni analyse avec beaucoup de finesse la façon dont l'aimantation d'une lave est acquise ou perdue en fonction de la température. Étudiant des laves du Vésuve et de l'Etna, il comprend parfaitement, comme Delesse, que les laves acquièrent en refroidissant une aimantation naturelle très stable au cours du temps dans la direction du champ terrestre local du moment.

En 1894 et 1895, Giuseppe Folgheraiter confirme et étend les résultats de Melloni. Puis il s'intéresse aux briques et aux terres cuites, dont il constate l'étonnante ténacité magnétique. Il mesure l'aimantation d'un mur romain vieux de 2 000 ans, puis de poteries grecques et étrusques du VIII^e siècle avant Jésus-Christ, pour lesquelles il trouve une inclinaison négative. Ce résultat longtemps contesté et incompris, a récemment été ramené au jour par Yves Gallet. Folgheraiter est le père fondateur de la discipline de l'archéomagnétisme, magnétisme des roches appliqué aux objets archéologiques.

Bernard Brunhes (1867-1910) est le brillant fils d'un professeur de physique, major de l'agrégation en 1889. À la suite d'une thèse en optique, il est nommé à Lille, à Dijon, enfin à Clermont-Ferrand, où on lui donne la responsabilité de l'observatoire du Puy-de-Dôme. Associé au jeune Pierre David, avec lequel il signera ses publications ultérieures, il étudie les phénomènes atmosphériques, les courants telluriques, les tremblements de terre, et... l'aimantation des roches. Son attention est attirée par son collègue géologue Philippe Glangeaud sur des porcelanites, argiles naturelles cuites comme de la brique par les laves qui se sont écoulées sur elles. Se rappelant les travaux de Melloni et de Folgheraiter, Brunhes échantillonne ces briques naturelles et leur trouve une direction d'aimantation différente de celle du champ actuel. Il suggère que c'est bien

là la direction du champ ancien, qui a donc considérablement changé. Poursuivant ce travail sur des laves, il démontre que les dalles volcaniques du temple de Mercure au sommet du Puy-de-Dôme ont conservé leur aimantation intacte depuis vingt siècles. La découverte capitale est faite en 1905 à Pontfavein dans le Cantal sur l'ensemble d'une coulée de lave et d'une couche d'argile cuite, toutes deux aimantées dans une direction grossièrement opposée à celle du champ actuel. Brunhes comprend que la direction du champ à un certain moment du Miocène (entre 5 et 20 millions d'années) était inverse de la direction récente : il vient de découvrir la propriété qu'a le champ magnétique terrestre de s'inverser.

Entre 1920 et 1940, les noms de Paul-Louis Mercanton (1876-1963), Raymond Chevallier (1891-1965) et Motonori Matuyama (1884-1956) méritent d'être cités. En 1926, Mercanton constate qu'une inversion trouvée dans l'hémisphère Nord se retrouve dans l'hémisphère Sud et constitue bien un phénomène global. Il conclut : « J'observe finalement que, si un lien existe entre l'axe de rotation de notre globe et son axe magnétique, les déplacements considérables de l'axe magnétique que nos recherches pourraient découvrir corroboreraient de manière inattendue les grands déplacements de l'axe de rotation défendus par A. Wegener. » Chevallier quant à lui affine considérablement notre connaissance des variations du champ magnétique pendant le dernier millénaire en étudiant des laves de l'Etna. La contribution sans doute la plus significative de cette période est celle du Japonais Matuyama qui, en 1929, montre que la moitié des laves tertiaires qu'il a échantillonnées est aimantée en polarité inverse de l'actuelle et respecte un ordre stratigraphique invariable dans les couches. Il fournit ainsi la première ébauche de l'échelle géologique des inversions¹².

Il faudra plus de cinquante ans pour que les observations de ces pionniers soient acceptées de manière unanime. S'appuyant sur les observations d'Émile Thellier (1904-1987) sur l'aimantation des briques, Louis Néel (1904-2000) propose en 1949 sa théorie de la mémoire des minéraux ferromagnétiques. Il prédit l'existence de minéraux susceptibles de s'aimanter non seulement dans la direction

12. De manière justifiée, on a donné à la période de polarité magnétique normale la plus récente, dans laquelle nous sommes encore, le nom de Brunhes et à la période précédente, inverse, le nom de Matuyama. Pour les deux précédentes, on a retenu les noms de Gauss et Gilbert, et on s'est arrêté là (voir Figure 13-4).

du champ appliqué, mais également en sens inverse (phénomène d'« auto-inversion »). Quelques années plus tard, le jeune géophysicien japonais Seiya Uyeda (qui devait devenir l'un des principaux promoteurs de la tectonique des plaques dans ce pays une dizaine d'années plus tard) découvre qu'une lave du volcan Haruna présente indubitablement cette propriété. Du coup, nombre de scientifiques pensent que les roches aimantées de manière inverse ont toute chance d'être la conséquence de cette propriété. C'est ce qui conduira Sir Edward Bullard (1907-1980), pourtant l'un des « grands » de la révolution de la tectonique des plaques, à émettre encore des doutes sur les inversions magnétiques en 1967 !

Pourtant, dès la fin des années 1940, Jan Hospers (1925-2006) et Alexandre Roche avaient entrepris un programme de recherche résolument moderne sur les inversions. Au milieu de la décennie suivante, Hospers avait clairement établi la nature axiale dipolaire du champ et l'existence d'une succession stratigraphique ordonnée des inversions sur les laves d'Islande, vite rejoint pour les sédiments (des grès rouges) par Ted Irving¹³. Un nombre croissant de paléomagnéticiens avait multiplié les observations sur des roches datées de plus en plus précisément, notamment grâce à la méthode alors récente dite « du potassium-argon ». Cette histoire a été maintes fois contée¹⁴ : les équipes menées par Allan Cox, Brent Dalrymple et Dick Doell en Californie et par Ian MacDougall en Tasmanie établissent la réalité des inversions et leur échelle au cours des quatre derniers millions d'années. C'est l'une des clefs de la compréhension, indépendamment par Vine et Morley, de la « peau de zèbre » des fonds océaniques qui permettra pour la première fois de mesurer avec exactitude les taux d'expansion du fond des océans. Au cours des décennies qui suivent, l'échelle des inversions est sans cesse prolongée dans le passé. Parmi les noms qui sont associés à ce travail de bénédictin, fondé sur l'analyse de profils magnétiques en mer, mais aussi et de plus en plus à terre, sur des séries géologiques bien datées par les stratigraphes (on parle de « magnétostratigraphie »), on peut citer ceux de Dennis Kent, Steve Cande, Walter Alvarez et Bill Lowrie. L'échelle des inversions du champ géomagnétique est aujourd'hui bien connue jusqu'au Jurassique, il y a 170 millions d'années (Figure 13-4).

13. E. Irving, *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, vol. 89, 46, 2008, p. 457-458.

14. Par exemple par Bill Glen, *The Road to Jaramillo*, Palo Alto, Stanford University Press, 1982.

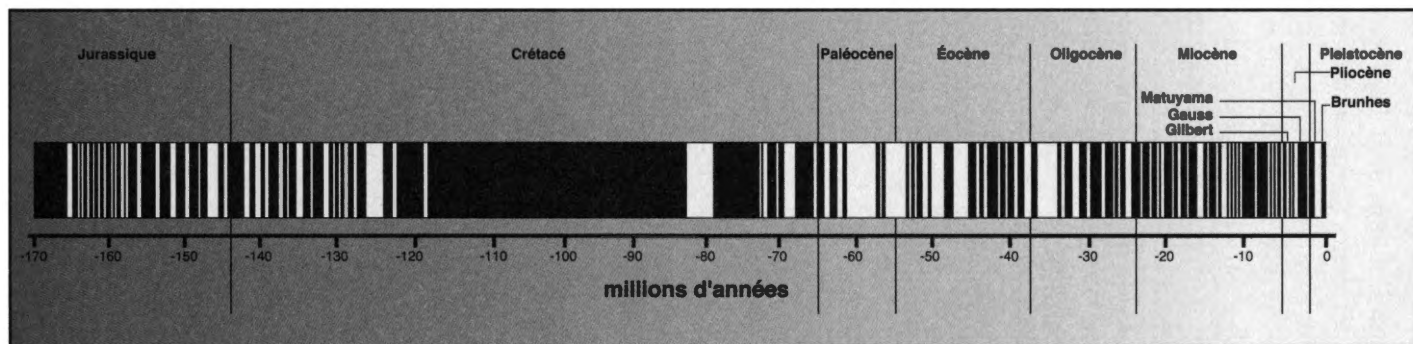


Fig 13-4 : Échelle des inversions du champ magnétique depuis 170 millions d'années. Les périodes de polarité analogue à l'actuelle, dites « normales », sont en noir, les polarités inverses en blanc. Les noms des principales périodes géologiques sont indiqués. Les noms des quatre périodes de polarité les plus récentes (en allant de l'actuel vers le passé – Brunhes, Matuyama, Gauss et Gilbert) sont également indiqués. On voit que la durée des périodes de polarité constante est très variable et que la fréquence des inversions est assez élevée dans la période actuelle (environ quatre inversions par million d'années) mais que cette polarité est restée constante pendant plus de 35 millions d'années lors du « superchron normal du Crétacé ».

Récemment, elle a été repoussée, bien qu'encore de manière fragmentaire, par plusieurs équipes, notamment Jean Besse, Yves Gallet, Jean Marcoux et leurs collaborateurs (jusqu'au début du Phanérozoïque, il y a environ 550 millions d'années).

Le champ magnétique terrestre est donc bien un champ turbulent, éminemment instable, susceptible de sauts magnétiques à l'échelle de l'année comme d'inversions irrégulières durant quelques milliers d'années et séparées de quelques dizaines de milliers d'années à plusieurs dizaines de millions d'années ! Émile Thellier avait bien raison de dire que le champ magnétique terrestre « reste mystérieux, même pour ses intimes ». Où se situe donc sa cause première ? Et celle de ses inversions ? Pour nous en faire une idée, il nous faut achever notre visite du noyau.

Chapitre 14

LA CLEF DU CHAMP

« Mais silence, entends-tu ? Silence sur tout ceci, et que personne n'ait l'idée de découvrir avant nous le centre de la Terre. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Nous sommes maintenant armés pour tenter d'élucider l'origine du champ magnétique de la Terre. La partie la plus rapidement variable de ce champ, nous l'avons vu, provient de courants électriques circulant dans la haute atmosphère, l'ionosphère et la magnétosphère, soumis aux incessantes modulations du Soleil. Une partie quasi statique trouve son origine dans l'aimantation des roches de la croûte, essentiellement les magnétites des basaltes et des granites. C'est à elles qu'on doit la structure en peau de zèbre des fonds océaniques. Mais la température augmente régulièrement quand on s'enfonce, d'environ 30 degrés par kilomètre¹, et les minéraux magnétiques perdent cette propriété au-dessus de la température critique (de Curie), qui est de l'ordre de 600 °C pour la magnétite. En dessous de la croûte, le manteau est donc en général trop chaud pour être le siège d'aimantations stables². Il est en même temps beaucoup trop visqueux pour autoriser les vitesses de la variation séculaire : ses mouvements, attestés par la dérive des plaques tectoniques, sont 500 000 fois trop lents ! Le champ magnétique terrestre, dont Gauss nous a montré la nature interne, ne peut donc prendre naissance que dans le noyau fluide. Et en

1. Les premières mesures de température dans les mines remontent à 1740. Elles donnent la grandeur de ce « gradient thermique » et conduisent de Mairan en 1765 à conclure que la Terre possède une chaleur propre, interne, et qu'il existe sans doute un feu central (*in* Deparis et Legros, *op. cit.*, p. 216).

2. Mon ami Rick Blakely de l'US Geological Survey vient de découvrir des anomalies dont l'origine serait plus profonde : il s'agirait de serpentines hydratées coincées sous la croûte, dans un coin situé à l'arrière des zones de subduction.

effet, ce noyau est constitué d'un liquide excellent conducteur de l'électricité.

À partir des observations de la variation séculaire du champ magnétique mesuré dans les observatoires répartis à la surface de la Terre, aidés aujourd'hui des observations beaucoup plus denses mais un peu trop récentes des satellites, nous sommes désormais en mesure de reconstituer, avec encore beaucoup d'incertitudes, la circulation du fer liquide à la surface du noyau, immédiatement en dessous de la couche D''. On sait, depuis la découverte de la variation séculaire et les cartes de Halley, que la dérive vers l'ouest peut atteindre deux dixièmes de degrés de longitude par an, soit plus de 10 km par an. Poirier a montré que la viscosité du fer liquide du noyau externe ne devait guère excéder celle de l'eau à la surface de la Terre, et ce malgré les pressions énormes qui y règnent. On comprend ainsi les vitesses étonnantes de la variation séculaire du champ magnétique : ce sont des « traceurs » des mouvements de la surface du noyau. On peut assez facilement déterminer le champ magnétique et sa variation séculaire à la surface du noyau à partir de leurs valeurs en surface : ce « prolongement vers le bas » est possible parce que le manteau est en première approximation un isolant électrique qui ne complique pas trop les choses.

Le comportement du champ magnétique est régi par une série de lois magnifiquement combinées par Maxwell et qui sont l'un des triomphes de la physique du XIX^e siècle. La *loi d'Ampère* lie courants électriques et champs magnétiques. La *loi de Faraday* indique comment les variations dans le temps d'un champ magnétique créent un champ électrique. La *loi d'Ohm* dans un conducteur en mouvement lie courant et champ électriques et terme d'induction (produit du mouvement et du champ magnétique) ; elle fait intervenir la conductivité électrique. Enfin, une loi due à Gauss stipule qu'il n'existe pas de sources « monopolaires » de champ magnétique³. De ces quatre lois, on tire l'équation de l'induction, qui indique si le champ magnétique va croître ou diminuer. L'équation met en évidence la compétition entre création de champ (induction) et destruction (ou dissipation). Si l'on se contente d'une

3. Il n'existe en effet pas de « charge magnétique » isolée, comme il existe des charges électriques ou des masses ponctuelles en électricité et en gravité. À toute charge magnétique positive est associée une charge magnétique négative d'intensité égale et le résultat est justement ce fameux dipôle dont nous parlons depuis un moment...

échelle de temps brève, de l'ordre de la décennie, on peut négliger le terme de diffusion. Cela veut dire que le fluide conducteur du noyau entraîne dans son flot le champ magnétique qui y est figé (on parle de « flux gelé »). Ce n'est hélas pas suffisant pour en tirer une unique carte des mouvements du fluide du noyau. Il faut faire des hypothèses supplémentaires sur la géométrie du flot ou sur sa stabilité dans le temps. C'est ainsi qu'au début des années 1980, Kathy Whaler à Édimbourg a proposé d'imaginer des mouvements toroïdaux (c'est-à-dire des lignes de courants qui se referment sur elles-mêmes dans le noyau avec la géométrie d'un tore), tandis que Jean-Louis Le Mouél à Paris proposait des mouvements dans lesquels l'équilibre des forces en présence se réduit à une compétition entre force d'Archimède (« gradient de pression ») et force de Coriolis. Cet équilibre est aussi utilisé par ceux qui modélisent la circulation atmosphérique et porte le nom barbare d'équilibre « géostrophique ». Quelle que soit l'hypothèse retenue, la carte des mouvements (dont on doit se souvenir qu'elle implique de nombreuses hypothèses, et partant renferme de nombreuses incertitudes) révèle les mêmes grandes structures. La figure 14-1, produit des travaux récents de Gauthier Hulot et Céline Eymin, montre une forte circulation vers l'ouest dans l'hémisphère centré sur le méridien de Greenwich (connue depuis Halley), une très faible circulation dans l'hémisphère opposé, pacifique, et un tourbillon anti-horaire dans le sud-ouest de l'océan Indien. On retrouve avec intérêt un nouveau signe de la dichotomie de notre planète, avec ces hémisphères Atlantique et Pacifique si distincts.

S'il est déjà difficile d'estimer les flots à la surface du noyau, les calculer à l'intérieur l'est encore plus. Il faut dire que la forte conductivité électrique du fer liquide masque les effets profonds. Il existe de plus certainement des courants et des champs de géométrie toroïdale au sein du noyau, que (presque) rien ne permet de percevoir depuis l'extérieur. Et pourtant, depuis le début du ^{xx}e siècle, des chercheurs tentent de percer le mystère de l'origine première du champ magnétique terrestre et de son fonctionnement, dont tout indique qu'il est dû à une dynamo qui fonctionne en son sein. Retraçons brièvement cette histoire.

Dès 1919, Joseph Larmor (1857-1942) a l'idée que le champ magnétique est continuellement créé et détruit par des mouvements fluides au sein du globe. Il est bien connu à cette époque qu'on peut créer des courants électriques en faisant se mouvoir un

matériau conducteur dans un champ magnétique. C'est le principe des dynamos, comme celles qui alimentent l'éclairage de la plupart des bicyclettes. Mais en 1933, Thomas George Cowling (1906-1990) assène un coup terrible à l'hypothèse d'une telle « géodynamo » : il démontre qu'un champ magnétique ayant la symétrie de révolution (comme le dipôle terrestre autour de l'axe de rotation) ne peut être entretenu par induction électromagnétique au sein du noyau.

Il faut attendre 1947 pour que Walter Elsasser (1904-1991) montre pourquoi les conditions limitatives du théorème de Cowling sont annulées par des mouvements de rotation différentielle dans le noyau liquide. Quelques années plus tard, Edward Bullard⁴ (1907-1980) précise comment un couplage entre des champs magnétiques et des courants de matière poloïdaux et toroïdaux rompt la symétrie de révolution et permet le fonctionnement de la géodynamo. Derrière ces termes barbares se cachent des concepts finalement assez simples. Un champ poloïdal est un champ dont les lignes de force forment une gerbe ouverte comme dans le cas de l'aimant (ou du dipôle terrestre). Dans le cas d'un champ toroïdal, ces lignes de force sont astreintes à rester dans le conducteur et se ferment sur elles-mêmes (Figure 14-2). Une floraison de travaux se concentre sur des dynamos simplifiées, dans lesquelles on se donne le champ des vitesses qui engendrent courants et champs magnétiques par induction : en 1958, George Backus et Arvid Herzenberg apportent des éléments théoriques importants qui montrent que le concept de géodynamo « marche » bien. Il faut aussi mentionner les publications de David Gubbins et Paul Roberts au début des années 1970.

Le principe d'une dynamo est la création d'une force électromotrice (et, par suite, d'un courant électrique et d'un champ magnétique associé) par induction électromagnétique due au mouvement d'un corps conducteur de l'électricité à travers les lignes de force d'un champ magnétique. Le champ magnétique réagit en retour sur l'écoulement et dans certains cas le système peut fonctionner de manière auto-entretenu (sans qu'il soit nécessaire de continuer à appliquer un champ magnétique extérieur). On peut montrer que si cet entretien n'existait pas, le champ magnétique se

4. Un an avant, en 1953, H. Takeuchi et Y. Shimazu publient au Japon une étude pionnière similaire.

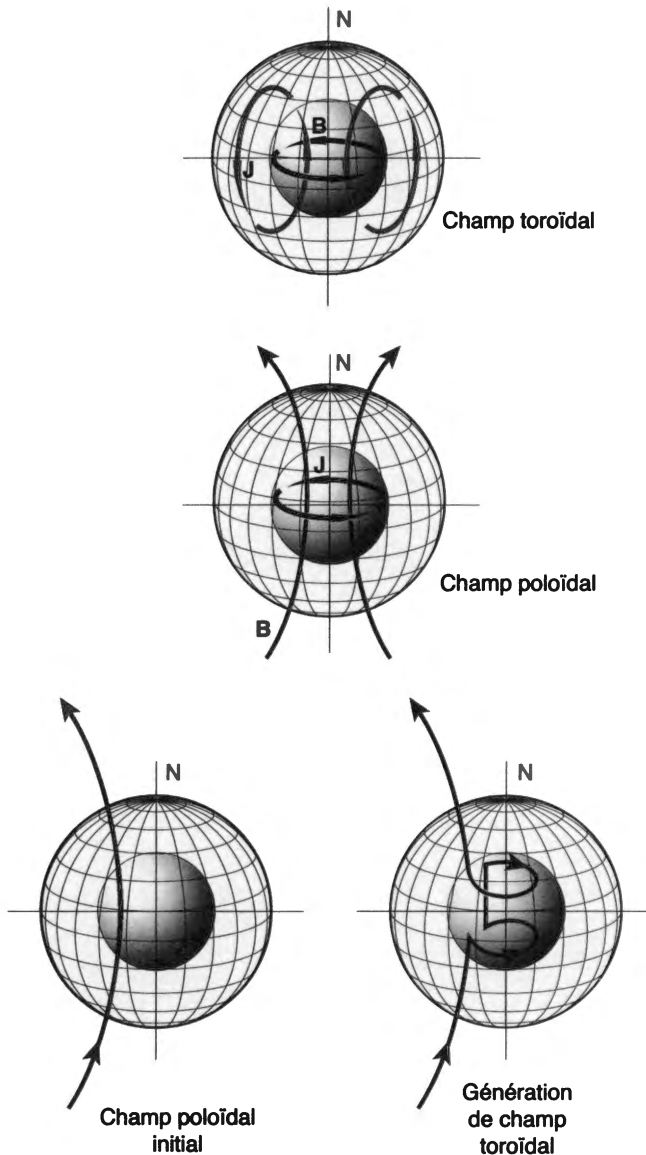


Fig 14-2 : Champs poloïdal et toroïdal. Les lignes de force du champ toroïdal B (en haut) s'enroulent et se ferment comme des tores en restant confinées dans le conducteur (le noyau de fer). Les lignes de force du champ poloïdal B (au milieu) pénètrent et sortent comme dans le cas bien connu de l'expérience de la limaille de fer et de l'aimant. Le champ poloïdal est le seul qui puisse être observé à l'extérieur du conducteur (notamment à la surface de la Terre). À ces champs sont associés des courants électriques J : le courant est poloïdal quand le champ est toroïdal et *vice versa*. En bas : une ligne de champ poloïdale peut être entraînée par le mouvement dans le noyau fluide et se déformer pour engendrer une ligne de champ toroïdale. C'est une des étapes essentielles de la fabrication du champ magnétique par la dynamo du noyau.

dissiperait (avec perte de chaleur par effet Joule) en 20 000 ans environ. Or les paléomagnéticiens peuvent affirmer que la Terre possède un champ magnétique interne propre depuis plusieurs milliards d'années.

Dans le cas de la Terre, le fluide conducteur est le fer du noyau liquide, pour lequel une évaluation du nombre de Rayleigh montre que la circulation convective doit être extrêmement turbulente. La mise en équations de ce problème de la dynamo est particulièrement ardue (et difficile à exposer simplement). Nous avons déjà entraperçu les quatre lois dont on tire l'équation de l'induction, et que cette équation révèle la compétition entre un terme de création de champ (d'induction) et un terme de destruction (ou de dissipation). Le rapport entre ces deux termes antagonistes est un nouveau nombre sans dimension, le nombre de Reynolds. Il fait intervenir la vitesse de déplacement du corps conducteur (environ 10 km/an dans le cas du noyau terrestre), sa taille caractéristique (de l'ordre de 1 000 km), la perméabilité magnétique du vide et la conductivité électrique du fer liquide⁵.

On montre que la fabrication de champ magnétique par effet dynamo requiert un nombre de Reynolds supérieur à quelques dizaines. Celui de la Terre est sans doute supérieur à plusieurs centaines, donc pas de problème. La dynamo n'est cependant pas une machine à mouvement perpétuel ! Elle consomme de l'énergie qui produit les mouvements convectifs nécessaires à son entretien. Le fait que le dipôle magnétique terrestre suive de si près l'axe de rotation laisse soupçonner le rôle important de la force de Coriolis. Comme dans le cas des panaches du manteau que nous avons rencontrés au cours de notre descente, la convection dans le noyau peut être de nature thermique (liée au refroidissement inexorable de la planète ou à la présence d'éléments radioactifs dans le noyau) ou chimique (liée à la libération d'éléments légers au cours de la cristallisation de la graine, éléments qui remontent ensuite dans le noyau liquide et entretiennent la convection). La précession et les marées sont aussi parfois évoquées, mais n'ont pas beaucoup de défenseurs. Nous n'en parlerons pas plus ici. Le flux

5. Le nombre de Reynolds R est le produit de ces quatre quantités. La perméabilité magnétique, μ vaut $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ (H est le Henry, unité d'inductance). La conductivité électrique du noyau est estimée à $3 \cdot 10^5 \text{ Sm}^{-1}$ (S est le Siemens, unité de conductance, inverse de l'unité de résistance plus connue, l'Ohm).

de chaleur qui traverse la limite extérieure du noyau est encore mal connu, de l'ordre de quelques milliards de milliards de watts (5 à 7 térawatts ou TW), ce qui correspond à 40 milliwatts à travers chaque mètre carré, la moitié du flux de chaleur moyen de surface. La puissance nécessaire pour faire fonctionner la dynamo n'est que de 0,1 TW, soit 2 % de ce flux de chaleur⁶.

Jusqu'à présent, nous nous sommes peu préoccupés de la dynamique du problème, c'est-à-dire de l'équilibre des forces en présence. Il faut pour cela coupler les équations de l'électromagnétisme avec l'équation de Navier-Stokes. Cela fait beaucoup d'équations et beaucoup d'inconnues... Pas étonnant que les spécialistes du problème forment un club assez fermé ! Sans rentrer dans le détail de ces équations, disons simplement qu'elles font apparaître une pléiade de nouveaux nombres sans dimension, qui permettent de se faire rapidement une idée de l'importance des forces en présence. Le nombre de Prandtl compare les forces visqueuses à la diffusion thermique, le nombre de Prandtl magnétique compare les forces visqueuses à la diffusion magnétique, le nombre d'Ekman compare les forces visqueuses à la force de Coriolis due à la rotation rapide de la Terre sur elle-même. Expériences au laboratoire et calculs numériques sur des ordinateurs puissants montrent que cette rotation rapide entraîne la formation de colonnes convectives dans le noyau, parallèles à l'axe de rotation (Figure 14-3). Ces colonnes s'appuient sur la graine solide qu'elles ne peuvent pénétrer. Le mouvement dans le noyau liquide peut aussi s'organiser en cylindres centrés sur l'axe de rotation, le plus petit étant celui qui s'appuie sur la graine (on parle du « cylindre tangent »). Ces cylindres, qu'on observe depuis les travaux de Friedrich Busse dans les expériences de laboratoire, jouent un rôle très important dans les travaux actuels sur la dynamo terrestre. On est conduit à penser que le champ magnétique terrestre pouvait être assez différent quand la graine n'était pas encore cristallisée. La date du début de cette cristallisation et sa vitesse, très incertaines, font l'objet de controverses ; nous ne nous y attarderons pas ici.

L'un des traits les plus saillants de la dynamo terrestre est sans conteste sa capacité à s'inverser, connue depuis Brunhes. Une

6. Pour vous faire une idée de ces valeurs, rappelez-vous que vos ampoules électriques dégagent quelques dizaines de watts, tout comme vous...

première dynamo « jouet » avait été imaginée par Edward Bullard en 1955 (Figure 14-4). Cette dynamo était faite d'un disque conducteur en rotation. Un fil conducteur reliait l'axe de rotation à la périphérie du disque, en faisant une boucle parallèle au disque. Si l'on imposait au disque une vitesse de rotation suffisante, en le plongeant dans un champ magnétique parallèle à l'axe de rotation, un courant électrique était induit dans le fil et créait (par la boucle) un champ magnétique additionnel venant influencer le mouvement du disque. Pour une vitesse suffisante, le champ magnétique d'origine n'était plus nécessaire : on avait fabriqué une dynamo. Mais le champ magnétique de cette dynamo ne s'inversait jamais. Tsuneji Rikitake (1921-2004) proposa en 1958 de coupler deux dynamos à disque de ce type, la boucle de l'une influençant le disque de l'autre (Figure 14-4). Cette fois, la dynamo s'inversait, mais très irrégulièrement. Plusieurs auteurs ont depuis mis cette dynamo en équations : les équations différentielles non linéaires couplées peuvent conduire à un comportement chaotique (au sens moderne de la théorie du chaos). Clément Narteau et Jean-Louis Le Mouél ont proposé une autre approche très simple qui permet de contrôler facilement de manière numérique le comportement de leur « dynamo ». Les éléments de base de leur modèle sont de petits tourbillons magnétiques couplés avec leurs voisins de manière à la fois mécanique et magnétique. Ces couplages induisent des cascades ascendantes et descendantes par lesquelles se détruisent ou se construisent des tourbillons à de nombreuses échelles emboîtées. À la plus grande échelle se trouve le champ global qui veut imiter celui de la Terre. Cette dynamo numérique simplifiée reproduit de façon remarquable de nombreuses observations des paléomagnéticiens sur la durée et l'asymétrie des inversions⁷, leurs grands changements de fréquence, la présence d'« excursions » (inversions avortées) et de « superchrons » (longues périodes sans aucune inversion), etc. C'est un outil léger et astucieux pour explorer le monde chaotique de ces inversions, même si le modèle ne prétend pas (pas plus que la dynamo à disque) capturer la réalité physique du noyau terrestre.

La puissance des ordinateurs permet aujourd'hui de modéliser des dynamos qui tentent de ressembler à la Terre. La première, due à Gary Glatzmeier et Paul Roberts, a fait la couverture de

7. Étudiées en grand détail par Jean-Pierre Valet.

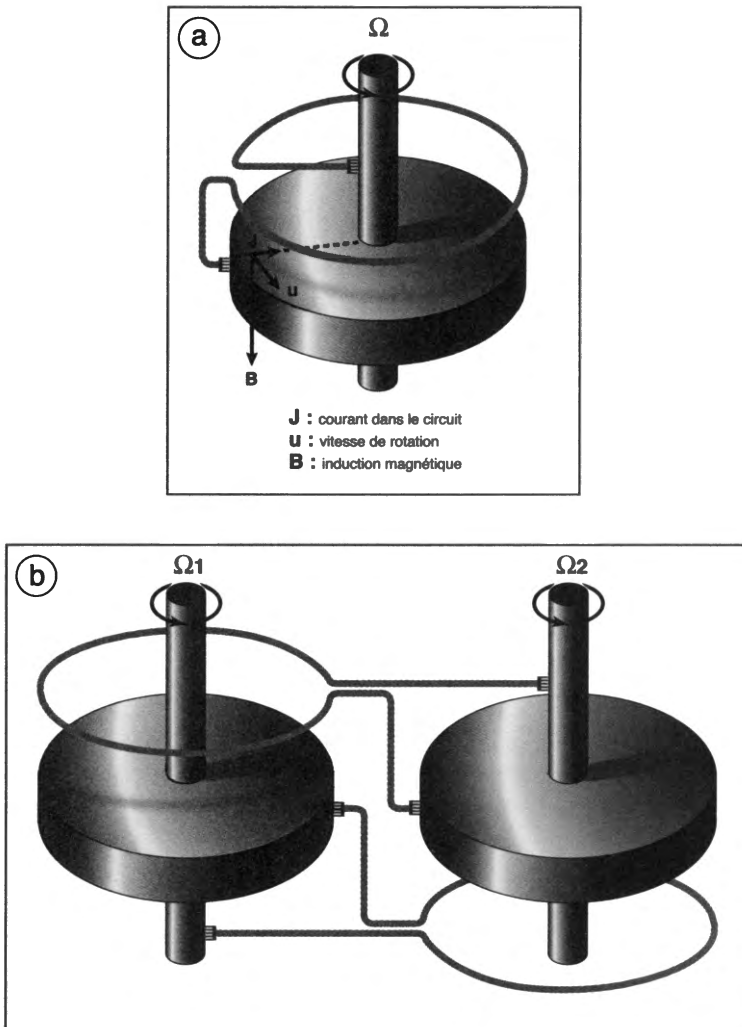


Fig 14-4 : En haut : la dynamo disque de E. Bullard. Un disque conducteur tourne à la vitesse Ω . Un fil conducteur terminé par deux balais permet de connecter la périphérie du disque à l'axe. On donne au fil la forme d'une boucle. On plonge ainsi le système dans un champ magnétique parallèle à l'axe de rotation. Dans ce champ B , la périphérie du disque tourne à la vitesse u , ce qui engendre un courant électrique radial J par induction. Ce courant circule dans la boucle, qui à son tour engendre un champ (ou une induction) magnétique dans lequel baigne le disque. Si l'on tourne assez vite, le champ magnétique extérieur n'est plus nécessaire et l'on a fabriqué une dynamo. Mais le champ de cette dynamo garde toujours la même direction. En bas : T. Rikitake a eu l'idée de coupler deux dynamos de Bullard en soumettant le disque de l'une à la boucle de courant de l'autre. Ce système non linéaire est instable et le champ s'y inverse de manière irrégulière, comme dans le cas de la Terre. Mais cette géométrie est bien loin de celle de la simple sphère de fer liquide du noyau...

Nature en 1995. Elles reproduisent de manière étonnante de nombreuses observations terrestres : le champ y est dipolaire de manière dominante, il évolue de façon très proche de la variation séculaire observée, il subit des phases de dérive vers l'ouest à des vitesses proches des vitesses observées, et surtout il s'inverse de manière spontanée et irrégulière. Pourquoi donc dis-je « étonnante » ? Parce que la puissance de calcul actuelle des ordinateurs ne permet pas d'utiliser les valeurs terrestres. Le nombre d'Ekman de la Terre est minuscule, parce que la viscosité du fer liquide est si faible : il est de l'ordre de 10^{-15} (0,000000000000001 !). Cette valeur n'est jamais atteinte dans les calculs, il s'en faut d'un facteur supérieur à un million ! On estime que l'augmentation de puissance et de vitesse des calculateurs géants permettra d'atteindre des valeurs réalistes dans dix à vingt ans pour les optimistes, dans plusieurs siècles pour les plus pessimistes... Il y a donc de la place pour le raisonnement physique et les astuces avant d'être sûr que la force brutale donnera la réponse. Il reste étonnant et certainement plein d'enseignements (pas tous encore compris) que ces dynamos numériques ressemblent tant à la vraie Terre... En tout état de cause, ces travaux numériques montrent que l'existence d'une dynamo qui présente l'essentiel des caractéristiques de la Terre est désormais assurée.

Les développements les plus récents et les plus excitants viennent cependant des expériences en laboratoire. Deux équipes, l'une à Riga en Lettonie et l'autre à Karlsruhe en Allemagne avaient réussi en 1999 à produire un champ magnétique de type dynamo dans des récipients compliqués et fort loin de la géométrie terrestre, avec pour fluide conducteur du sodium liquide. En 2007, une équipe rassemblant des chercheurs des écoles normales supérieures de Paris et de Lyon, et le Commissariat à l'énergie atomique, a franchi une étape décisive. Dans un cylindre de 50 cm de long rempli de 150 litres de sodium fondu, ce groupe a réussi à produire un champ magnétique en forçant le liquide à entrer en mouvements turbulents à l'aide de deux pales de fer tournant en sens inverse à environ 25 tours par minute. La géométrie de cette expérience est beaucoup moins contrainte et la turbulence beaucoup plus forte que dans les expériences précédentes. Elle nous rapproche donc significativement (sans l'atteindre bien sûr) d'une simulation terrestre. Mais surtout, et c'est une première mondiale, l'expérience a spontanément produit une inversion du champ ! À

Grenoble, un groupe conduit par Henri-Claude Nataf, Philippe Cardin et Dominique Jault tente de se rapprocher d'un modèle réduit de Terre. Leur récipient est sphérique, il a une graine solide et il contient du gallium liquide. S'il a déjà permis d'obtenir des résultats très intéressants, il ne produit pas d'inversion (en fait, le champ magnétique y est imposé de l'intérieur).

Parvenus à 5 150 km de profondeur, nous atteignons la surface de la graine solide. Il nous resterait 1 220 km à parcourir dans ce noyau interne fait pour l'essentiel de fer solide, cristallisé, pour atteindre le centre de la Terre. Nous en avons appris beaucoup au cours des dernières années sur cette frontière interne ultime de notre planète. La densité y dépasse 13, à peu près celle du mercure à la surface. La pression qui règne au centre doit être de l'ordre de 360 GPa (3,6 millions de fois la pression atmosphérique qui pèse sur nos épaules). La température devrait y dépasser les 5 500 °K (5 200 °C en arrondissant), à quelques centaines de degrés près. Les sismologues sont pratiquement les seuls à commencer à entrevoir ce qui se passe dans ce gros morceau de fer. Ils ont ainsi découvert que les ondes sismiques s'y propageaient plus vite quand elles circulent le long de l'axe de rotation que perpendiculairement à cet axe. À quoi donc est due cette anisotropie ? Certains, peu nombreux il est vrai, en sont venus à penser que le fer de la graine pourrait ne former qu'un seul cristal, orienté et par conséquent anisotrope. Cette anisotropie pourrait influencer les couplages entre graine, noyau liquide et manteau et par là se traduire par de petites variations à l'échelle décennale de la longueur du jour⁸ ! D'autres pensent que la graine est en fait en état de fluage convectif qui oriente les cristaux. D'autres sismologues enfin, en étudiant les signatures de paires de tremblements de terre presque identiques survenus au même lieu à des années d'écart, notent des différences qu'ils croient significatives et pensent ainsi avoir mis en évidence une rotation plus rapide de la graine par rapport au reste du noyau et de la Terre pris dans leur ensemble. Cette rotation est âprement contestée, par exemple en France par Annie Souriau, qui la pense illusoire. Cette graine renferme sans doute des messages importants sur les origines de notre planète et l'histoire dynamique qu'elle a connue. La solution

8. Minuscules il est vrai ; il s'agit de fractions de milliseconde dans une journée qui dure 86 400 secondes. Pas besoin d'ajuster vos montres...

de ces mystères nous sera peut-être révélée par la génération des jeunes géoscientifiques qui entament aujourd'hui leurs carrières. Nous ne franchirons donc pas cette ultime frontière et, donnant par la pensée un coup de talon sur la graine, entamons notre remontée vers l'air libre.

TROISIÈME PARTIE

Colères de la Terre
et extinctions en masse

Chapitre 15

UNE BELLE CORRÉLATION

« Je ne t'expliquerai rien car c'est inexplicable ; mais tu verras et tu comprendras que la science géologique n'a pas encore dit son dernier mot. »

« Je fus donc conduit à faire cette remarque, que la mer devait autrefois occuper cet espace. Sur les rocs épars et maintenant hors de ses atteintes, les flots avaient laissé des traces évidentes de leur passage. [...] Cette théorie des phénomènes dont nous avons été témoins me paraissait satisfaisante, car, pour grandes que soient les merveilles de la nature, elles sont toujours explicables par des raisons physiques. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Notre voyage vers le centre de la Terre s'achève. Celle-ci nous apparaît comme une énorme machine thermique, accrétée il y a 4,57 milliards d'années. Les sources de chaleur de cette machine sont multiples et, pour certaines, très anciennes.

Elle avait emmagasiné la chaleur provenant des impacts des « planétésimes », qui l'avaient successivement et progressivement construite, détruite, reformée, façonnée... Un dernier très grand impact, celui d'un objet planétaire de la taille de la planète Mars, l'avait profondément transformée et avait donné naissance à la Lune, formée à partir de l'anneau de débris résultant de cette collision. Une autre source de chaleur provenait de la formation même du noyau. En s'enfonçant pour se rapprocher du centre, le fer, dense, libère en effet de l'énergie gravitationnelle, qui se transforme en chaleur. À ces sources de chaleur originelles s'ajoute la désintégration des éléments radioactifs que la Terre renferme en son sein, principalement des isotopes de l'uranium, du thorium et du potassium.

Chauffée et en partie fondue, avec à sa surface un profond océan magmatique, la Terre primitive commençait à se refroidir.

Le fer et d'autres éléments lourds, ou chimiquement en « sympathie » avec le fer (on dit « sidérophiles »), continuaient à plonger vers le centre pour former le noyau. Une première atmosphère, dominée par la vapeur d'eau, le méthane, le gaz carbonique, l'ammoniac et l'azote, s'exhale de l'océan magmatique. Avec la poursuite du refroidissement, les eaux des océans se condensent. Des morceaux de croûte se forment, composant des plaques, sans doute beaucoup plus minces et plus mouvantes encore qu'aujourd'hui. Dans les premières zones de subduction se forment les premiers granites, les premières amorces de continents. Ceux-ci sont au début recyclés dans le manteau bouillonnant, puis certains surnagent et s'étendent : les premiers cratons stables (noyaux continentaux) sont nés, il y a environ 4 milliards d'années. La Terre poursuit son refroidissement et les premiers cristaux de fer solide se forment au sein du noyau, là où la courbe de fusion du fer recoupe le géotherme¹. La graine est née². Elle ne va cesser de croître, quoique très lentement, libérant une importante chaleur latente de cristallisation. Les éléments légers (silicium, oxygène, etc.) qui s'élèvent et les éléments plus lourds qui plongent continuent de libérer de l'énergie potentielle, qui se convertit toujours en partie en chaleur. Les continents continuent de se former et de croître, insubmersibles désormais, au-dessus des zones de subduction. Ils ont atteint une surface proche de l'actuelle il y a environ 1 milliard d'années. Ils se rassemblent puis se déchirent, occupant progressivement un tiers de la surface de la planète. De nouvelles dorsales apparaissent ici, tandis que là des continents entrent en collision, formant de gigantesques et anciens équivalents de la chaîne de l'Himalaya et du plateau tibétain.

La tectonique des plaques « moderne » est née. C'est elle qui va « réguler » la machine et évacuer l'essentiel de la chaleur. Notre globe comme le reste de l'Univers va en effet vers le grand refroidissement, le grand calme (mais pas de manière uniforme). Un jour, la graine occupera tout le noyau : plus de liquide, plus de convection, plus de dynamo, plus de champ magnétique terrestre (qui nous protège entre autres des rayons cosmiques). Un jour, les

1. La courbe qui décrit l'évolution de la température avec la profondeur.

2. La date de naissance de la graine fait l'objet de débats et de modèles assez conflictuels : certains la situent peu après la formation du noyau avant 4 milliards d'années, d'autres 3 milliards d'années plus tard... La marge est encore grande.

plaques cesseront de bouger : plus de volcans, plus de séismes. La Terre sera devenue, comme l'est depuis longtemps la Lune, un astre mort. Mais la tectonique des plaques n'est pas, nous l'avons vu, le seul mode dont dispose la Terre pour se refroidir. Une autre forme, plus localisée, plus épisodique de convection est accessible au manteau. Tantôt se forment les « super-panaches » qui oscillent de haut en bas en deux régions antipodales de l'équateur. Tantôt se forment ces panaches à la fine queue et à l'énorme tête dont certains réussissent à passer la barrière de la zone de transition, à traverser le manteau supérieur et à « attaquer » la base de la lithosphère. Ils peuvent encore être bloqués à ce niveau, mais certains réussissent à pénétrer, puis à traverser de part en part la lithosphère et c'est alors l'éruption d'un trap.

C'est le flux de chaleur originaire du noyau, la part qui n'est pas consommée pour faire fonctionner la dynamo, qui doit s'échapper à travers la limite entre manteau et noyau. Nous faisons l'hypothèse que ce flux chauffe le matériau très hétérogène de la base du manteau, la couche D'', et produit environ tous les 30 millions d'années ces instabilités que nous avons nommées « panaches primaires ». Donnons un nouveau « coup de pied au fond de la piscine » et laissons-nous porter vers le haut par un panache, à la vitesse remarquable de quelques dizaines de centimètres (jusqu'à peut-être quelques mètres) par an, à travers les 2 900 km du manteau.

La Terre se refroidit parce que du matériel froid, les plaques plongeantes, redescend dans le manteau tandis que du matériel chaud remonte, notamment au niveau des panaches. Le premier mécanisme, celui de la tectonique des plaques, semble régulier, même si des avalanches épisodiques et des accélérations peuvent se produire de temps à autre. Le flux des « queues » de panache est lui aussi sans doute assez régulier, mais il n'en va pas de même de l'éruption des têtes, essentiellement épisodique, avec une (pseudo-) périodicité de l'ordre de 30 millions d'années.

Nous avons fait l'inventaire au chapitre 7 des grands traps mésozoïques et cénozoïques à la surface du globe. Nous en avons trouvé une douzaine. Rappelons-en la séquence du plus jeune au plus vieux : les traps de la rivière Columbia (les plus petits et de loin) qui auraient donné naissance au point chaud de Yellowstone, il y a 15 millions d'années ; les traps d'Éthiopie, à celui de l'Afar, il y a 30 millions d'années ; la province volcanique « brito-arctique »

au point chaud d'Islande il y a 60 millions d'années ; les traps du Deccan à celui de la Réunion il y a 65 millions d'années ; les traps de Madagascar et ceux des Caraïbes, nés il y a 88 millions d'années ; ceux de Rajmahal et le plateau d'Ontong-Java, il y a 115 millions d'années. Ceux de Parana-Etendeka ont donné naissance au point chaud de Tristan da Cunha, il y a 133 millions d'années ; ceux de Karoo-Ferrar sont apparus il y a 183 millions d'années ; la grande province magmatique centre-Atlantique, il y a 200 millions d'années ; les traps de Sibérie, il y a 250 millions d'années et ceux d'Emeishan, il y a 258 millions d'années ; enfin, les traps de Viluy-Yakutsk ont un âge encore incertain, autour de 360 millions d'années.

Nous voyons que cette série de dates (cette « série temporelle » comme nous disons en termes de traitement du signal) semble aléatoire : aucune régularité, aucune périodicité. Même si la valeur moyenne de la durée entre deux traps est de l'ordre de 25 millions d'années, cet écart varie de 5 à 50 millions d'années. Certains points chauds semblent arriver à la surface par paires séparées de moins de 10 millions d'années (province « brito-arctique » et Deccan, Madagascar et Caraïbes, Rajmahal et Ontong-Java, Sibérie et Emeishan). Rien ne s'oppose à ce que des instabilités majeures de la couche D'' soient multiples, et que plusieurs arrivent à la surface à peu près en même temps en des lieux différents. Ces divers aspects (panaches multiples, séquence aléatoire) sont caractéristiques des instabilités de type panache, tant dans les expériences de laboratoire que dans les simulations numériques, et les constantes de temps que nous trouvons sont compatibles avec les résultats de ces expériences.

Cette série de dates ne nous dit-elle pas quelque chose de plus ? Eh bien ! elle reflète quelques-unes des dates principales du calendrier des géologues, l'échelle des temps (et des ères) géologiques patiemment construite depuis le XIX^e siècle sur la base de la succession des faunes d'organismes retrouvés à l'état fossile dans les roches. J'ai esquissé les premiers actes de cette histoire dans *La Vie en catastrophes*. Nous sommes désormais à même d'amplifier et de compléter cette histoire.

Elle commence, pour moi et mes collègues, vers 1984, par l'étude des laves du Deccan. Avec Jean Besse, Didier Vandamme, Jean-Jacques Jaeger, Raymond Montigny, et Henri Cappetta, nous aboutissons en 1986 à la conclusion, rappelée

au chapitre 7, que des millions de kilomètres cubes de laves basaltiques se sont épanchés à la surface de l'Inde il y a 65 millions d'années, au moment où se produisait l'une des plus grandes extinctions en masse d'espèces de l'histoire de la Terre, en moins d'un million d'années (un temps géologiquement bref) et avec une précision de l'ordre du demi-million d'années – le plus précis que permettent les méthodes géochronologiques (potassium-argon et argon-argon).

L'évolution de la diversité de la vie³ sur Terre au cours des temps Phanérozoïques, depuis environ 550 millions d'années, nous est relativement bien connue grâce aux patients travaux des paléontologues depuis deux siècles. Elle a fait l'objet d'une compilation désormais classique de Raup et Sepkoski (Figure 15-1). Sur cette figure, on voit que l'évolution de la diversité est tout sauf régulière ou monotone croissante. À l'explosion cambrienne du début de l'ère primaire, par exemple, succède une phase de stase, un plateau, soudain interrompu par une chute brutale vers 440 millions d'années, à la fin de l'Ordovicien. Puis la courbe reprend, atteint un nouveau plateau, voisin, et décroche à nouveau il y a 360 millions d'années, marquant la limite entre le Frasnien et le Famennien (deux étages du Dévonien séparés par une extinction majeure). Nouveau démarrage, nouveau plateau, et vers 250 millions d'années, chute catastrophique. C'est la fin du Permien, la fin de l'ère primaire (ou Paléozoïque), avec la disparition de près de 95 % de toutes les espèces vivant alors sur Terre. Si l'on tient compte (et il existe des modèles statistiques raisonnables pour le faire) des individus qui ont dû disparaître au même moment sans que leur espèce disparaisse, c'est sans doute 99 % de la vie sur Terre qui a été « soufflée » à la fin du Permien. Un pour cent de plus et la vie disparaissait de la surface de la Terre ! De telles disparitions totales ont pu se produire au cours du premier demi-milliard d'années de l'histoire de la Terre, sous l'effet de grands bombardements d'astéroïdes et de planétésimes, puis la vie serait réapparue... Mais cela ne s'est jamais reproduit depuis près de quatre milliards d'années.

3. Celle-ci est souvent mesurée à partir du nombre total d'espèces distinctes présentes à un moment donné sur Terre, mais le nombre actuel est encore très mal connu, peut-être à un facteur dix près (!) et le nombre des espèces disparues l'est encore moins bien...

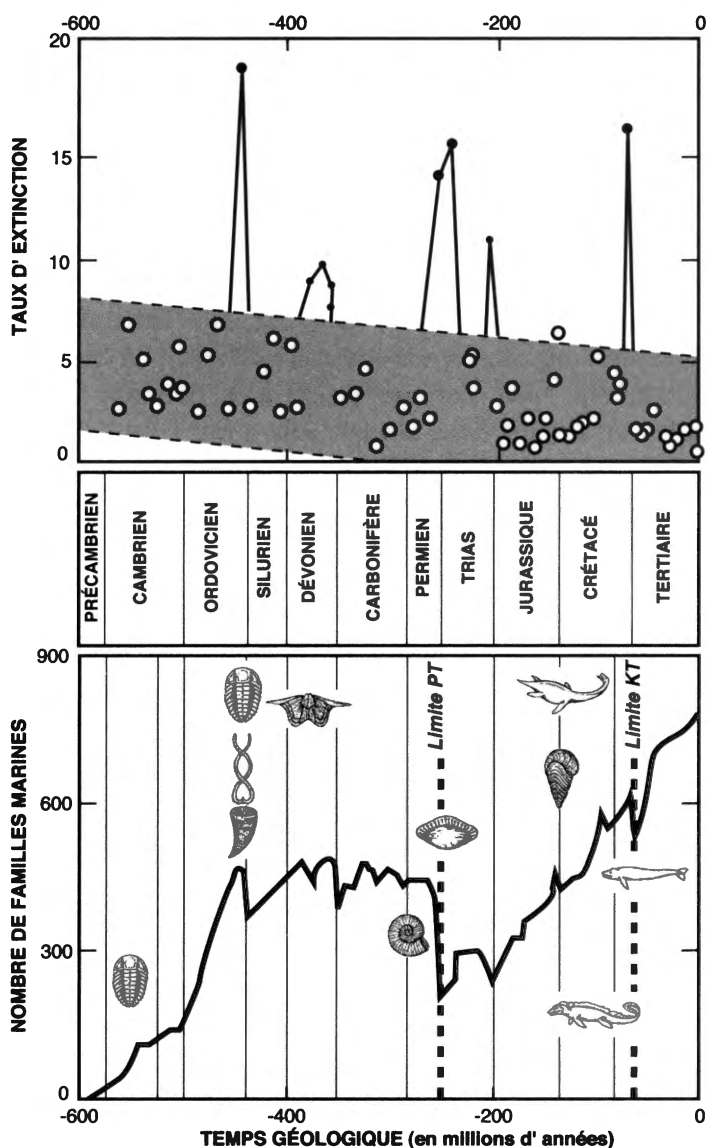


Fig 15-1 : Taux d'extinction des espèces et variations de la diversité au cours des temps géologiques (d'après D. Raup et J. Sepkoski, et J.-J. Jaeger). En bas : évolution du nombre des familles d'organismes marins fossiles au cours du temps. On distingue un petit nombre de chutes brutales, les événements d'extinction en masse. Les limites les mieux connues, Permo-Trias (PT) il y a 250 millions d'années et Crétacé-Tertiaire (KT) il y a 65 millions d'années, sont particulièrement importantes, mais ce ne sont pas les seules. En haut : le taux d'extinction permet de distinguer un « bruit de fond » marqué par la zone en grisé (il y a tout le temps des extinctions qui font partie du processus normal de l'évolution) et des périodes de taux extrême (les pics) qui correspondent aux extinctions en masse. Aux deux déjà notées s'ajoutent les extinctions massives de la fin de l'Ordovicien, de la fin du Dévonien et de la fin du Trias.

Deux paléontologues américains, Steve Stanley de l'Université Johns Hopkins et Yang Xingling de Nanjing, ont repris en détail les données de disparition et d'apparition il y a 250 millions d'années. Divisant en six parties la fin du Permien, ils ont réussi à montrer que la catastrophe était double : une première phase d'extinction très importante à la fin du Guadalupien (258 millions d'années) et une seconde plus importante encore à la fin exacte du Permien (250 millions d'années), soit deux catastrophes séparées « seulement » par huit millions d'années.

La vie reprend ensuite assez rapidement (en quelques millions d'années), mais elle est affectée par une nouvelle crise majeure, 50 millions d'années plus tard, qui marque la fin du Trias et le début du Jurassique. Nouveau départ, nouveaux records de biodiversité, nouvelle crise, il y a 65 millions d'années. Depuis, la biodiversité a repris de plus belle et, même si sa vitesse de croissance a décliné au Tertiaire (ou Cénozoïque), elle atteint aujourd'hui sa valeur la plus élevée de tous les temps. Mais comme nous venons de le voir, ce maximum n'a pas été atteint de manière régulière : l'évolution de la vie n'a pas été un long fleuve tranquille... On dit parfois que nous sommes entrés dans une nouvelle grande phase d'extinction, mais celle-ci ne peut se voir à l'échelle de temps à laquelle nous travaillons pour l'instant. Et notre capacité à décompter les espèces, à évaluer la biodiversité, est très différente pour les espèces actuelles, vivantes et observables, et les espèces fossilisées il y a des millions ou des dizaines, voire des centaines de millions d'années. Être fossilisé (et retrouvé) est un événement extrêmement rare pour un individu. La plupart ne sont pas préservés et, s'ils le sont, la majorité des fossiles ne sont pas retrouvés. La réalité de cette nouvelle extinction en masse et surtout notre capacité à en comparer l'amplitude à celle des grandes crises du passé géologique sont donc encore sujettes à caution.

Il existe d'autres crises de moindre importance. Toutes sont à la base de la définition des étages géologiques, qu'elles servent à identifier. Si l'on représente le taux d'extinction en fonction du temps (Figure 15-1), on constate que cinq extinctions ont une intensité vraiment exceptionnelle, au-dessus de toutes les autres : la fin de l'Ordovicien il y a 440 millions d'années, la limite Frasnien-Famennien il y a 360 millions d'années, la fin du Guadalupien, 258 millions d'années, celle du Permien, 250 millions d'années et du Crétacé, 65 millions d'années. Or, à l'exception de la première,

ces dates ne nous sont pas inconnues : ce sont celles des traps respectivement de Viluy-Yakutsk, d'Emeishan, de Sibérie et du Deccan. Pour les trois derniers, la coïncidence temporelle est au million d'années près. Pour les traps de Sibérie, elle est aussi bonne qu'il est aujourd'hui possible de l'établir. Paul Renne a en effet daté au cours de la même série d'expériences à l'aide de la technique argon-argon des laves des traps de Sibérie et des cendres volcaniques prélevées dans des niveaux placés un peu en dessous et un peu au-dessus de la limite paléontologique Permo-Trias dans la coupe type de Meishan en Chine : la différence est de quelques centaines de milliers d'années, avec une incertitude un peu supérieure au million d'années, donc statistiquement impossible à distinguer de zéro⁴. Les quatre dernières plus grandes extinctions en masse sont donc toutes associées temporellement à un trap. De plus, les traps d'Éthiopie correspondent à un des événements climatiques majeurs du Tertiaire (la fin de l'Oligocène inférieur, avec un épisode marquant de refroidissement, d'aridité, un minimum de diversité des mammifères, une avancée majeure des glaces Antarctiques), les traps du Groenland (province brito-arctique) à la fin du Paléocène, au cours de laquelle se produit un événement climatique étrange, un réchauffement intense et court sur lequel nous reviendrons, les traps de Madagascar à l'extinction de la fin du Cénomanién, ceux de Rajmahal à la fin de l'Aptien, ceux de Parana-Etendeka à la fin du Valanginién, ceux de Karoo-Ferrar à la fin du Pliensbachien, ceux de la gigantesque province magmatique centre-Atlantique à la fin du Trias (qui pourrait prétendre intégrer le peloton de tête des « cinq géantes »).

Sur le très long terme, la biodiversité dépend de nombreux facteurs dont la répartition des continents et des océans (et donc la tectonique des plaques), le niveau des mers et le degré d'exposition des plateformes continentales, la composition de l'atmosphère (donc le climat). Nous nous intéresserons ici à ces moments, apparemment rares et brefs, où tout semble basculer : les extinctions en masse d'espèces biologiques. L'idée d'une relation avec l'éruption de traps a été pour la première fois émise par Peter Vogt en

4. En 2004, Roland Mundil et l'équipe de Paul Renne ont redaté la limite Permo-Trias avec une méthode argon-argon améliorée et trouvent un âge de 252,6 millions d'années ; mais l'incertitude de la valeur absolue demeure de l'ordre du million d'années au mieux...

1972, et placée sur des bases quantitatives plus solides par nous-mêmes en 1986. De nombreux auteurs (notamment M. Rampino et R. Stothers) ont complété et vérifié la validité de cette corrélation. Nous l'avons nous-mêmes reprise en gros tous les cinq ans depuis sa première présentation. La dernière analyse critique, faite avec Paul Renne en 2003, montre une corrélation sans cesse améliorée (Figure 15-2). On peut même dire qu'elle a permis des prédictions (plutôt des « post-dictions ») : c'est ainsi que, lors de la découverte par Stanley et Yang de la double extinction de la fin de l'ère primaire, alors que seule était connue la corrélation entre traps de Sibérie et fin du Permien, nous avons suggéré que devait exister quelque part des traps non encore identifiés, âgés de 258 millions d'années et associés à la fin du Guadalupien. Ces traps ont été trouvés près d'Emeishan en Chine du Sud par des

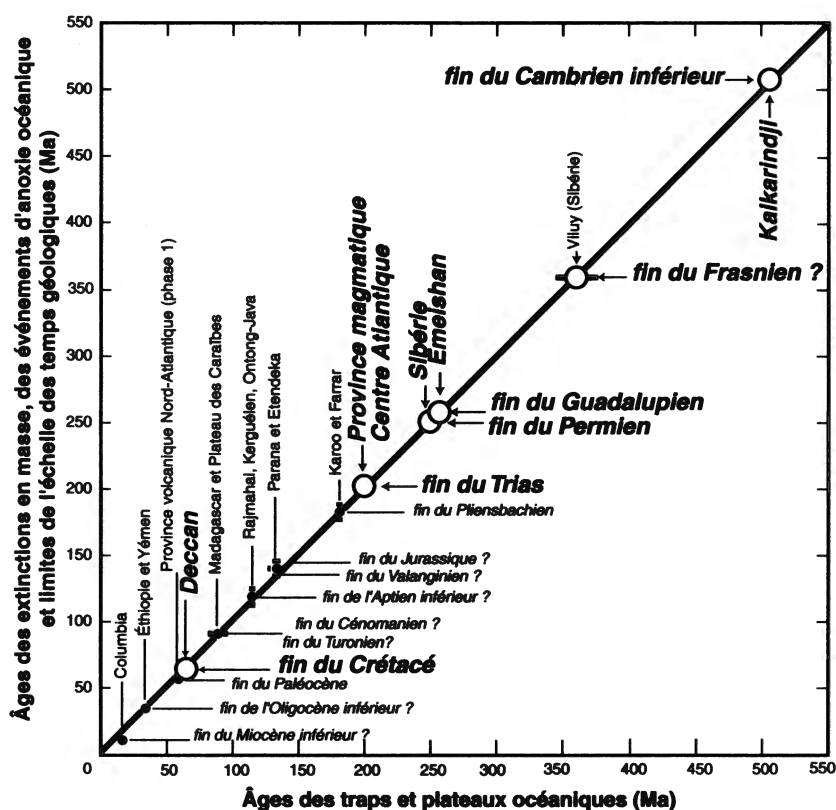


Fig 15-2 : Corrélation entre les âges des principaux trapps et des extinctions en masse (en millions d'années).

équipes sino-australiennes et datés quelques années plus tard : ils avaient le « bon âge ». Les traps de Viluy-Yakutsk, les plus anciens candidats identifiés, ne sont pas encore suffisamment précisément datés (entre 350 et 370 millions d'années) ; une première tentative de datation, parallèlement par les laboratoires de Pierre-Yves Gillot et Xavier Quidelleur à Orsay, et de Paul Renne à Berkeley, est en cours. Les traps de la fin de l'Ordovicien, il y a 440 millions d'années, n'ont pas encore été découverts. Je ne doute plus qu'ils aient existé, même s'ils ont très bien pu disparaître par subduction ou collision depuis tout ce temps.

Cette remarquable corrélation ne peut que suggérer fortement un rapport de cause à effet, ou au moins une cause commune aux deux séries d'événements. L'hypothèse de modifications environnementales majeures liées aux exhalaisons des énormes volumes de lave émis en peu de temps, que je défends depuis une vingtaine d'années, en sort manifestement renforcée. Qu'en est-il donc de l'autre hypothèse, presque la seule discutée sur le continent nord-américain, celle de l'impact d'astéroïdes ? Pour la limite Crétacé-Tertiaire, nous l'avons vu, les preuves de l'impact semblent très solides et celui-ci s'est produit alors que l'éruption avait déjà commencé. Pour rare que soit l'impact d'un objet de 10 km de diamètre, la probabilité qu'il en tombe un pendant l'éruption d'un des traps des 450 derniers millions d'années n'est pas négligeable. La probabilité qu'il en soit tombé deux qui soient en coïncidence avec un trap est en revanche très faible. Depuis près de trente ans qu'a été proposée la chute de l'astéroïde de Chixculub, les tenants de l'hypothèse météoritique ont cherché sans relâche des preuves d'un second impact. Si certains indices ont été avancés, principalement (et séparément) par Michael Rampino et par Lou-Ann Becker, aucun n'a été confirmé ni n'est accepté de manière indiscutable par les spécialistes. Lou-Ann Becker pense avoir observé des traces géochimiques exceptionnelles dans des sédiments de la limite Permo-Trias au Japon. Il s'agirait d'atomes de fullérènes (ces assemblages de 60 atomes de carbone organisés selon une structure sphérique, déjà imaginée par l'architecte Buckminster Fuller en l'honneur duquel ils ont été nommés), renfermant des atomes d'argon dont les rapports isotopiques seraient caractéristiques de matière extraterrestre. Ces résultats n'ont jamais pu être dupliqués. L'équipe de Ken Farley au Caltech, après bien des difficultés pour obtenir des échantillons, n'a pu retrouver aucune de

ces étranges traces géochimiques et a conclu à une contamination accidentelle des échantillons de Becker. Joe Kirschvink, également du Caltech et grand connaisseur du Japon, pense pouvoir même affirmer que les échantillons analysés ne proviennent pas d'une coupe stratigraphique de la limite Permo-Trias. Quant aux divers sites d'impact, en général sous-marins, aucun n'a pu être corrélé à une extinction de manière convaincante. Enfin, Mike Coffin, grand spécialiste du plateau sous-marin d'Ontong-Java, a formulé l'hypothèse que ce dernier aurait pu résulter de l'impact d'une météorite ; des analyses géochimiques récentes, notamment des éléments de la série du platine, viennent de l'infirmier.

On oublie par ailleurs souvent de rappeler qu'il existe un certain nombre d'assez grands cratères, bien datés, qui ne correspondent à aucune extinction : c'est le cas de Kara en Sibérie (70 km de diamètre) qui, âgé de 70 ± 2 millions d'années, « rate » de 5 millions d'années la limite Crétacé-Tertiaire, de Manicouagan au Canada (100 km de diamètre), âgé de 214 ± 1 millions d'années et qui rate de 14 millions d'années la grande extinction de la fin du Trias⁵, de Popigai (100 km, $35,7 \pm 0,2$ Ma) et Chesapeake Bay (90 km, $35,5 \pm 0,3$ Ma) qui ratent de plus d'un million d'années (bien en dehors des marges d'incertitude) la limite Eocène-Oligocène, datée de $33,9 \pm 0,1$ Ma.

Il n'y a donc pas de comparaison possible entre la qualité de la corrélation extinctions-traps et celle qui lierait les extinctions à des impacts. Norm MacLeod a déterminé la qualité de ces corrélations et la probabilité qu'elles résultent d'un hasard. Il trouve que seule la corrélation entre âges des traps et âges des extinctions est acceptable, et qu'il y a moins de 5 chances sur 100 pour qu'elle résulte du hasard. Ce qui était pour moi une hypothèse forte en 1986 est désormais une quasi-certitude. Je ne vois pas comment échapper à l'hypothèse que ce sont bien les traps qui, de manière générale, causent les extinctions en masse. Cela dit, un « petit » trap comme celui de Columbia ne semble pas causer d'extinction et certains traps sont associés à des extinctions d'intensités très différentes, parfois très fortes, parfois assez modérées (pour autant qu'un phé-

5. Notons que cet âge pourrait en revanche, au vu des marges d'incertitude, correspondre à la fin d'un étage du Trias, le Carnien, daté de $216,5 \pm 2$ Ma. Le caractère global de cette extinction est cependant contesté et le changement climatique qui l'accompagne localement est assez long et ne semble pas pouvoir correspondre au scénario bref d'un impact.

nomène d'extinction puisse être considéré comme modéré à notre aune). Il doit donc y avoir des conditions particulières pour qu'un trap engendre une extinction majeure. Par ailleurs, un impact seul ne semble pas en général capable de provoquer une extinction. Le seul qui soit démontré est celui de Chicxulub, et il s'est produit dans un monde déjà affecté par les traps du Deccan. Aurait-il eu le même effet s'il était tombé sur Terre à une période de calme volcanique ? Nous serons en mesure de mieux répondre à cette question après les deux prochains chapitres.

La démonstration de la belle corrélation ne suffit donc pas en elle-même à démontrer la causalité et surtout comprendre son mécanisme. Comme on le dit parfois, qui veut proposer une nouvelle théorie « extraordinaire » (c'est-à-dire en rupture majeure, au moins apparente, avec la théorie dominante du moment) doit en apporter des preuves « extraordinaires ». Eh bien, soit ! Après avoir un peu délaissé le sujet pendant quelques années, j'ai décidé de le reprendre en 2002, avec un collègue spécialiste des relations entre observations géologiques et géophysiques d'une part et climat d'autre part, Frédéric Fluteau, et nous avons ensemble construit un programme de recherche qui a fait l'objet de la thèse d'Anne-Lise Chenet, récemment soutenue à Paris. Pour traiter du grand problème des extinctions en masse, il avait fallu apprendre à parler le langage de dizaines de spécialités de la géologie, de la géophysique et de la géochimie. Il allait désormais être nécessaire, pour comprendre les relations entre volcanisme et disparition des dinosaures, de parler celui des climatologues.

Chapitre 16

VOLCANISME ET CLIMAT : L'ÉRUPTION DU LAKI

« Il y a six cents ans que le Sneffels est muet, mais il peut parler. Or les éruptions sont toujours précédées de phénomènes parfaitement connus. [...] aux approches d'une éruption, ces fumerolles redoublent d'activité pour disparaître complètement pendant la durée du phénomène, car les fluides élastiques, n'ayant plus la tension nécessaire, prennent le chemin des cratères au lieu de s'échapper à travers les fissures du globe. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Quand j'étais étudiant, on m'a appris que les éruptions volcaniques étaient susceptibles d'avoir un impact sur le climat. Les responsables présumés étaient les cendres et les fragments de lave du volcan, en fonction de l'altitude à laquelle il avait la force de les propulser. Si l'éruption injectait ses produits dans la basse atmosphère, la troposphère (à moins de 10 km d'altitude environ), alors ses effets restaient locaux. Mais si l'injection atteignait la stratosphère, alors les vents de très haute altitude avaient la capacité de répartir les poussières les plus fines sur une bande de latitudes plus ou moins large, centrée sur celle du volcan. Les poussières étaient la cause de la couleur exceptionnelle des couchers de soleil à ces latitudes pendant les semaines, les mois ou même l'année suivant l'éruption principale. Dans certains cas, les cendres et les poussières étaient même susceptibles de se répandre sur tout un hémisphère et, pourquoi pas, dans le cas d'éruptions exceptionnelles, sur la Terre tout entière. Ces cendres avaient aussi pour effet d'absorber une partie significative de la lumière du Soleil et, partant, de refroidir l'atmosphère, allant jusqu'à déclencher de véritables hivers volcaniques. Puisque c'était la quantité de matière solide injectée en altitude qui importait, seuls

les volcans explosifs¹, c'est-à-dire ceux des zones de subduction, et principalement de la ceinture de feu du Pacifique, étaient pris en considération pour leur effet sur le climat. Plus près de nous (mais toujours dans le cadre de « petites » subductions-collisions), l'éruption du Vésuve au sud de l'Italie en 79 ou de la montagne Pelée en Martinique en 1902 étaient là pour nous montrer la véracité de cet édifice théorique des géologues et des vulcanologues. Si tout dans cet édifice n'est pas faux, nous allons voir que les vingt dernières années ont considérablement modifié et enrichi notre vision des relations entre volcanisme et climat.

Ont-elles pour autant une base solide ou sont-elles des contes à dormir debout ou des mythes ? Et qui donc en a le premier formulé l'hypothèse ? On en retrouve la trace au premier étage de la bibliothèque de l'Académie des sciences à Paris, dans les mémoires de l'Académie royale des sciences de 1788. Dans un remarquable article de vingt pages, présenté oralement dès le 7 août 1783 puis publié dans les mémoires de la Société royale des sciences de Montpellier² dont il était membre, Mourgue de Montredon (1734-1818), seigneur de Montredon, non loin de la capitale du Languedoc, et y possédant un château, décrit ses *Recherches sur l'origine et la nature des vapeurs qui ont régné dans l'atmosphère pendant l'été de 1783*. Mourgue de Montredon était doué d'un sens remarquable de l'observation et d'un esprit critique exercé. Passionné de météorologie, il notait méticuleusement chaque jour la température, l'état du ciel, la direction et la force des vents (pour cela il avait mis au point sa propre échelle) et la pluviométrie. Il remarque des modifications inhabituelles du temps à partir de la mi-juin 1783 ; son tableau du mois de juillet note des vapeurs épaisses les 1^{er} et 2 juillet, un retour de ces vapeurs les 4 et 5, même par beau temps, et à nouveau pendant quatre jours, du 16 au 19. De juin à septembre, Mourgue de Montredon constate des températures anormales, et la répétition de ces épisodes d'épaisses vapeurs, dont il observe qu'elles sont sèches et parfois associées à une odeur de soufre. Comparée aux décennies qui précèdent et qui

1. L'intensité d'une éruption volcanique, et on l'imaginait celle de ses conséquences, y compris climatiques, étant supposée être fonction de la quantité de roches solides broyées et éjectées sous forme de cendres et de poussières, était (et est toujours) mesurée à l'aide d'un indice d'explosivité volcanique (VEI pour Volcanic Explosivity Index). Ceci implique une hypothèse implicite : qu'une éruption effusive, et non explosive, n'ait aucune conséquence...

2. La Société royale le sélectionna plus tard au vu de son importance pour l'envoyer à Paris, d'où les écarts de dates.

vont suivre, l'année 1783 est exceptionnelle d'un point de vue climatique. Elle recevra le surnom d'*Annus mirabilis* en raison du nombre impressionnant d'événements extrêmes (climatiques, volcaniques et tectoniques) qui l'accompagnent. L'été 1783 est anormalement chaud dans une grande partie de l'Europe occidentale ; les annales de la météorologie anglaise donnent pour le mois d'août une moyenne de 3 °C supérieure à celle de tous les mois d'août depuis 1659 (seul l'été de la canicule, l'été 2003 a été plus chaud) ! L'hiver qui suit est lui exceptionnellement froid. La végétation est affectée non seulement par la température, mais aussi par ces fameuses vapeurs (acides) qu'on interpréterait aujourd'hui comme la preuve d'une pollution massive par des composés soufrés. La même année plusieurs volcans entrent en éruption : l'Etna, le Stromboli et le Vésuve en Italie du Sud, l'Asama au Japon. Des tremblements de terre ébranlent la Calabre. Mais surtout, Mourgue de Montredon a eu vent (si l'on ose écrire) du récit de voyageurs ayant assisté en juin 1783 aux premières phases d'un grand épisode volcanique en Islande. Il songe à lier pêle-mêle ces divers phénomènes et donc à voir une relation de cause à effet entre les colères de la Terre et les changements tout à fait inhabituels du climat. Il peut à ce titre être considéré comme l'un des pères de l'étude scientifique des relations entre volcanisme et climat.

Ce titre de gloire est en général attribué à Benjamin Franklin (1706-1790 ; c'est ce que j'ai fait moi-même dans *La Vie en catastrophes* ; j'ignorais alors, comme presque tout le monde, l'existence du travail de Montredon qui dormait dans les archives de l'Académie). Si l'avance de Montredon est de plus d'un an, cela ne retire rien à la qualité et à l'originalité du travail que Franklin conçut en grande partie dans sa villa de Passy, alors qu'il représentait auprès de Louis XVI les intérêts des « *insurgents* » américains, travail qu'il communiqua en 1784 à la Société littéraire et philosophique de Manchester. Lui aussi voulait associer les exceptionnels brouillards observés cette année-là sur une grande partie de l'Europe à des condensats directement liés à l'éruption d'Islande. Jean-Paul Poirier a reconstitué dans le détail l'histoire de cette découverte dans sa biographie de l'abbé Bertholon³. Plusieurs savants européens ont très rapidement recherché, alors que l'éruption du Laki avait moins d'un mois, les causes du fameux brouillard. Parmi eux, des Italiens, dont l'abbé Spallanzani, qui

3. *L'Abbé Bertholon, un électricien des Lumières en province*, Paris, Hermann, 2008.

pensent surtout, comme cela peut sembler naturel, aux tremblements de terre et aux éruptions volcaniques de Calabre et de Sicile. Dom Robert Hickmann, bénédictin ardennais (1720-1787), adresse le 29 juillet 1783 (donc une semaine avant Montredon !) une note au *Journal encyclopédique* (tome VI, p. 505-512) avec ses « observations [...] sur la cause du brouillard extraordinaire qui a régné cette année ». Hickmann note que le brouillard était sec et sulfureux. Défendant par ailleurs l'idée d'un feu permanent au centre du globe, citant les éruptions de Sicile et de Calabre, mais aussi « de nouvelles terres enveloppées de brouillard, d'où [...] vit s'élever d'épaisses fumées » à 10 lieues de l'Islande, Hickmann attribue l'éruption d'Islande à un contrecoup de celles d'Italie pour conclure de manière remarquable : « Enfin, c'est à ces bouleversements de l'Islande et des pays voisins, probablement plus considérables que ceux de la Calabre, et qui ne sont pas encore terminés, que j'attribue ce fameux brouillard sec et sulfureux qui a régné ici depuis le 25 juin jusqu'au 4 juillet. » C'est donc Hickmann qui semble à la fois le premier et le plus clair dans l'attribution de l'origine des brouillards. Il n'avait pas perdu de temps !

Cette année fut réellement exceptionnelle, comme l'attestent la plupart des historiens du climat, au premier rang desquels Emmanuel Le Roy-Ladurie. Pareils brouillards polluants et irritants n'ont plus jamais été rencontrés en Europe depuis 1783 ; du moins pareils brouillards de sources naturelles, car nombreux sont ceux qui en ont hélas fait l'expérience à la suite de pollutions d'origine humaine (la plupart du temps quand on brûle massivement du charbon de mauvaise qualité, riche en soufre). Et ces brouillards ne furent pas sans conséquences sérieuses sur la santé humaine. Nous reviendrons bientôt sur l'éruption islandaise elle-même, qui causa la mort (par empoisonnement dû aux gaz volcaniques, non seulement soufrés, mais aussi riches en chlore et en fluor) des trois quarts du cheptel islandais et (par maladies respiratoires sans doute, mais aussi par la famine qui s'ensuivit) du quart de la population. Les effets mortels de l'éruption s'étendirent bien au-delà de l'île. John Grattan, de l'Université du pays de Galles à Aberystwyth, et ses collaborateurs ont eu l'idée d'interroger les registres des inhumations en Grande-Bretagne : sur une période de trente ans, entre 1770 et 1800, leur nombre pendant l'été en Angleterre a culminé de manière flagrante en 1783, se situant à plus de 30 % au-dessus de la moyenne à long terme (Figure 16-1). Ces statisti-

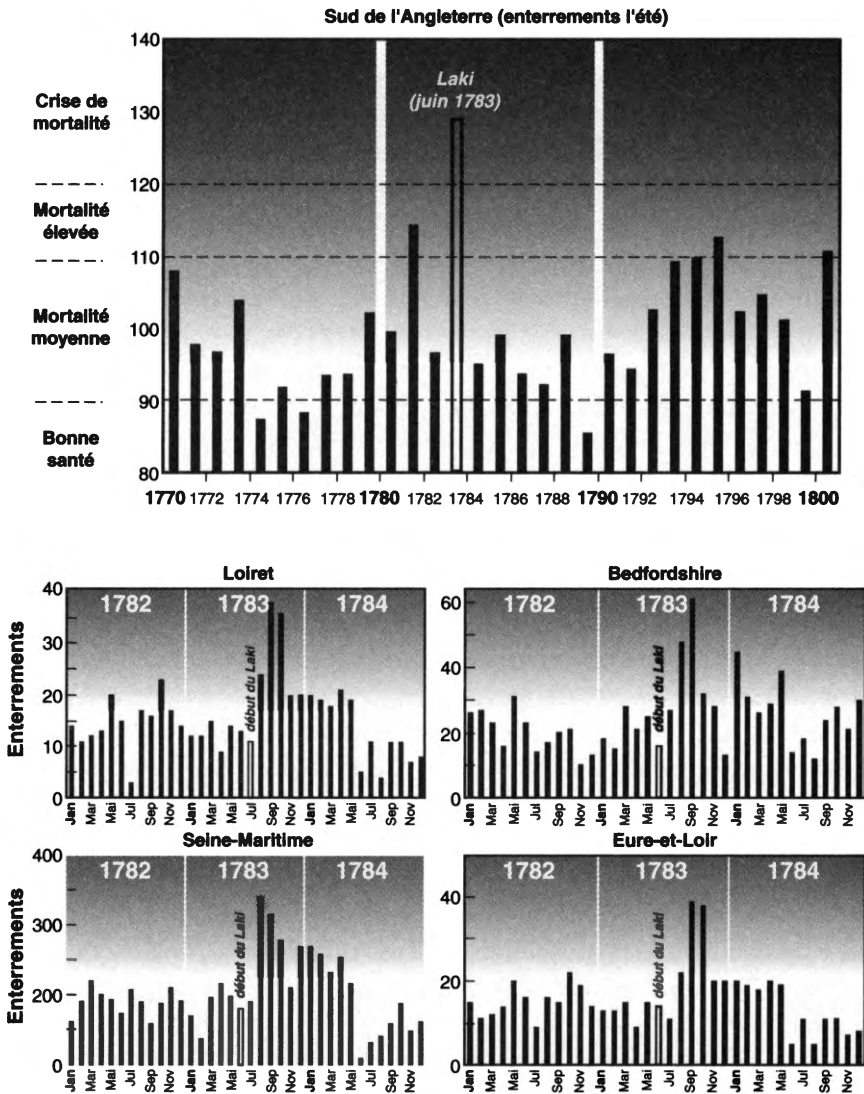


Fig 16-1 : En haut : nombre annuel d'enterrements pendant l'été dans le sud de l'Angleterre entre 1770 et 1800. Ce nombre culmine de façon totalement anormale en 1783, année de l'éruption islandaise du Laki. En bas : nombre mensuel des enterrements dans une province anglaise et trois départements français entre janvier 1782 et décembre 1784. Ces nombres culminent là encore de manière anormale d'août à septembre 1783, l'éruption ayant débuté en juin (d'après J. Grattan et coll.).

ques ne permettant pas une résolution dans le temps suffisamment fine, John Grattan a repris le même exercice en France, avec l'aide de R. Rabartin et des étudiants d'une université du Temps libre (dont je n'avais jamais entendu parler auparavant), en s'appuyant sur les registres des paroisses permettant une analyse mensuelle. Le doute n'est plus permis : sur une période allant de janvier 1782 à décembre 1784, l'analyse dans des dizaines de paroisses révèle presque partout la même signature : une mortalité élevée en août, et exceptionnellement élevée pendant les deux mois de septembre et d'octobre 1783, soit deux mois après le début de l'éruption. Bien qu'une analyse à l'échelle de l'Europe entière reste à faire, Grattan estime à plus de 10 000 l'excès « anormal » du nombre de décès en Angleterre, et pense que la crise fut plus intense encore en France et aux Pays-Bas. Si ces résultats peuvent être extrapolés au reste de la France et à une partie de l'Europe occidentale⁴, l'excès du nombre de morts que l'on peut attribuer à cette crise volcanique pourrait dépasser d'un ordre de grandeur les 16 000 morts de la vague de chaleur de 2003. L'éruption islandaise s'est traduite par une pollution de vaste échelle en Europe, sans doute due à des concentrations de produits acides (soufrés) supérieures au niveau critique pour la santé humaine, à une amplification des variations de température (chaleur excessive en été, froid excessif en hiver) ayant à leur tour amplifié les effets mortels par le biais de difficultés respiratoires, de maladies cardio-vasculaires et d'autres formes de stress sévères.

Deux volcanologues, le Britannique Steve Self et l'Islandais Thorvaldur Thordarson, se sont attachés à reconstruire dans le détail l'histoire de ce phénomène, si important dans l'histoire des Européens qu'on lui attribue parfois en partie le déclenchement des troubles qui devaient conduire à la Révolution française... Travaillant tant sur le terrain, en géologues, reconnaissant la trace du volcan et l'étendue de ses dépôts, qu'en historiens, recherchant les témoignages écrits de l'époque, Self et Thordarson ont reconstitué

4. Ce qui semble bien être le cas pour l'est de la France d'après Emmanuel Le Roy-Ladurie ; je suis en contact avec Éric Brian, chercheur à l'Institut national d'études démographiques et auteur d'un *Nouvel Essai pour connaître la population du royaume* (histoire des sciences, calcul des probabilités et population de la France vers 1780), paru en 2001 aux Annales de démographie historique, pour tenter de préciser le travail de Grattan. Une mise au point récente vient d'être publiée par Emmanuel Garnier, élève de Le Roy-Ladurie, « Laki : une catastrophe européenne », *L'Histoire*, 343, 72-77, juin 2009.

la chronologie de la grande éruption volcanique du Laki avec un degré de détail remarquable. Ils ont aussi retrouvé la description de ses effets tant en Islande que sur le reste de l'hémisphère Nord. L'été 1783 est ainsi celui de la « grande famine du riz » au Japon. En Alaska, la température d'été est de 5 °C inférieure à la normale et nombre d'Eskimos n'y survivent pas. De la mi-juin au début de juillet, des observateurs rapportent l'apparition de l'étrange brouillard sulfureux observé par Mourgue de Montredon, en Afrique du Nord, en Asie centrale, au sud de l'Alaska, à Terre-Neuve... Les manifestations de l'événement climatique ont occupé une large calotte circulaire, couvrant une grande partie de l'hémisphère Nord et centrée quelque part au nord de la Scandinavie (Figure 16-2).

La « fissure du Laki », comme elle est généralement appelée, est une « petite » déchirure d'une dizaine de kilomètres de long située au sud de l'île (Figure 16-3). La fissure montre aujourd'hui un alignement de cônes de scories fendus et de départs de coulées mangés par les lichens. C'est un des « éléments de base » de la

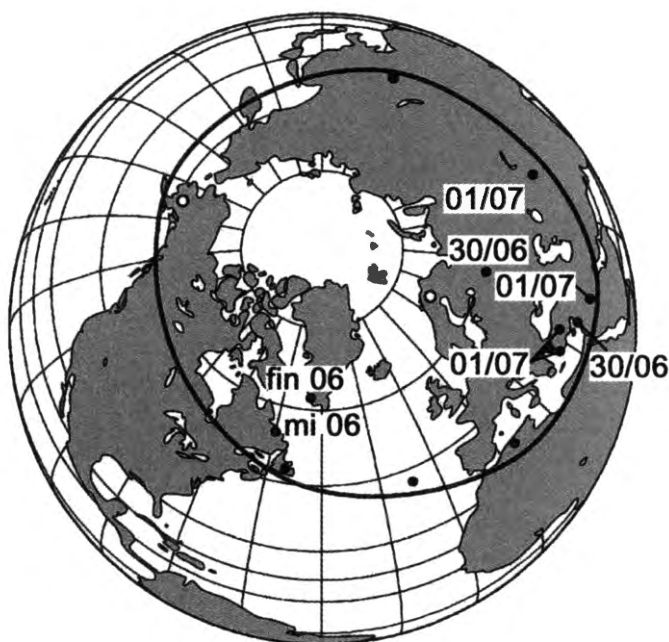


Fig 16-2 : Lieux et date d'apparition de manifestations climatiques anormales (brume sèche notamment) à la suite du début de l'éruption du Laki en Islande. Ces anomalies dessinent une calotte centrée au nord de la Scandinavie et qui s'étend jusqu'au nord de l'Afrique (d'après S. Self et T. Thordarson).

structure de l'Islande, île entièrement volcanique, située sur la dorsale médio-atlantique qui la traverse de part en part du sud au nord, et à l'aplomb du point chaud qui a donné naissance il y a 60 millions d'années aux traps du Groenland et à la province volcanique britannique qui comprend les îles de Rhum et de Skye. L'île est déchirée par des réseaux de failles en extension (ou failles « normales ») et de fissures verticales qui traduisent l'écartement continuels entre Groenland et Europe et l'ouverture de l'océan Atlantique Nord. Par ces grandes fissures s'échappe épisodiquement la lave basaltique qui construit l'île. La grande fissure du Laki en a fourni l'illustration la plus récente⁵ : elle a émis entre juin 1783 et février 1784 15 kilomètres cubes de lave sur 565 kilomètres carrés (ainsi que 250 mégatonnes de gaz sulfureux, converties dans l'atmosphère en acide sulfurique, et 1 100 mégatonnes de cendres et de téphras, fragments de lave solide émis au cours de l'éruption). C'est l'une des deux plus importantes éruptions basaltiques des deux derniers millénaires (une plus importante encore s'étant produite à Eldgjá, toujours en Islande, entre 934 et 940). Il s'en produit, sans doute de manière irrégulière, une tous les quelques siècles. Il s'en reproduira dans les siècles qui viennent. Notons dès à présent que la prochaine éruption (car elle se produira forcément) stoppera tout trafic aérien et maritime sur l'océan Atlantique Nord, avec des conséquences économiques considérables, sans parler des effets sur la santé humaine pour des continents plus peuplés et plus sensibles aux pollutions et sujets aux maladies respiratoires qu'en 1783...

Self et Thordarson ont pu montrer que l'éruption du Laki s'était produite sous forme d'une série de dix événements très explosifs (ce qu'on n'attendait pas forcément de laves basaltiques réputées très fluides), les trois premiers entre les 9 et 15 juin, un vers le 27 juin, trois en juillet, trois en septembre et un dernier vers le 25 octobre. Entre ces paroxysmes explosifs, une lave basaltique fluide s'écoulait jusqu'à quelques dizaines de kilomètres des bouches éruptives. Des cendres ont recouvert une grande partie du sud de l'Islande ; elles sont sans doute, avec les exhalaisons gazeuses, à l'origine du dépérissement de la végétation et de la mort du cheptel. Mais le plus important sans doute pour notre quête, c'est

5. Les éruptions encore plus récentes, comme celles des îles Vestmann, ont en comparaison un volume négligeable.

la preuve apportée par Thordarson et Self (fondée sur des observations géologiques et des témoignages visuels de l'époque) que, lors des épisodes explosifs, un panache a atteint une altitude estimée à 13 km, c'est-à-dire à la base de la stratosphère à cette latitude. La hauteur de ce panache était en grande partie due à la puissance de chaque éruption, nécessaire pour déboucher la fissure. Claude Jaupart a suggéré de plus un effet d'entraînement dû à la colonne d'air chauffée par les produits de l'éruption et aux coulées de lave elles-mêmes. Cette observation est pour nous essentielle : elle démontre en effet qu'une (grande) éruption basaltique fissurale peut entraîner ses produits jusqu'à la stratosphère, qu'elle est donc capable de les distribuer, et d'avoir un effet climatique, à l'échelle globale.

Depuis le début des années 1980, une séquence d'éruptions bien étudiées a introduit le doute dans l'esprit des chercheurs sur la validité du lien exclusif entre éruptions à dominante explosive, non basaltiques, des zones de subduction et changement climatique. L'éruption de 1984 du mont Saint-Helens, qui projeta plus de 3 kilomètres cubes de cendres dans la haute atmosphère n'eut pratiquement aucun effet sur le climat. Celle du El Chichon en 1982 et plus récemment du Pinatubo dans les Philippines en 1991 ont en revanche eu un effet sensible : non seulement couchers de soleil « couleur de sang », mais surtout baisse moyenne globale de la température de la basse atmosphère dans les mois suivants. Or ce qui distinguait ces trois éruptions les unes des autres, c'était leur teneur en soufre : presque rien pour le Saint-Helens, significative pour le Chichon et le Pinatubo. Et l'on sait désormais que, même si les cendres émises à très haute altitude jouent bien un rôle significatif, le paramètre déterminant qui fait jouer à une éruption un rôle climatique (ou non) est la teneur en soufre de la lave et des gaz qu'elle exhale. Et la quantité de soufre émise en 1783 par le Laki était très supérieure à celle émise tout récemment par le Pinatubo...

Quel est donc le mécanisme qui fait jouer au soufre un rôle si important ? Le schéma de la figure 16-4 permet de s'en faire une idée. Lors de leur dégazage, les laves rejettent dans l'atmosphère de nombreux gaz : vapeur d'eau, gaz carbonique, azote, mais aussi gaz sulfureux avec divers degrés d'oxydation (H_2S , SO_2). Au cours de leur ascension puis de leur séjour dans la haute atmosphère, ces gaz s'oxydent et se combinent à la vapeur d'eau pour former

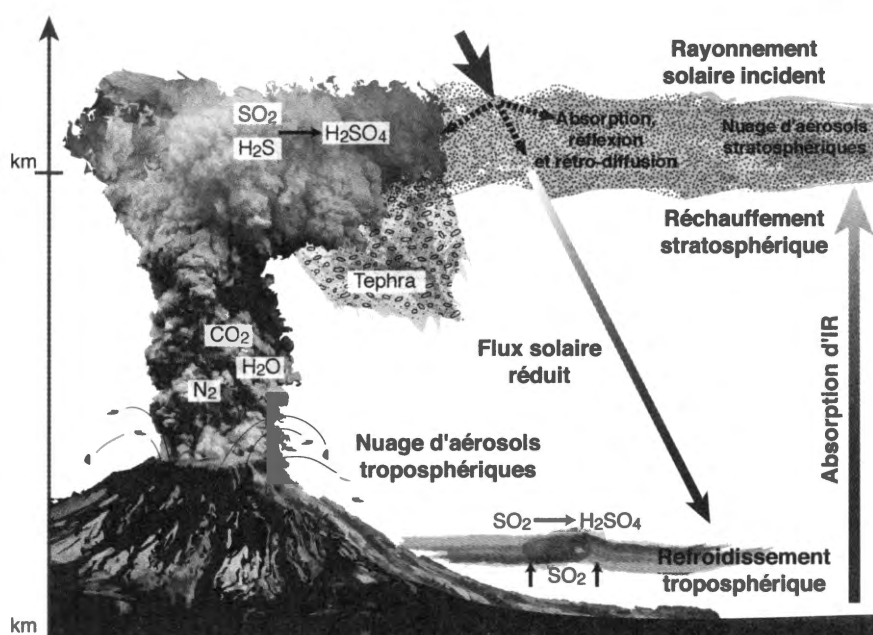


Fig 16-4 : Mécanisme d'injection d'aérosols sulfatés dans l'atmosphère et jusqu'à la stratosphère. Parmi les gaz émis par l'éruption, où dominent vapeur d'eau et gaz carbonique, les gaz sulfurés se combinent avec l'eau pour donner des gouttelettes d'acide sulfurique de quelques microns de diamètre qui absorbent et réfléchissent une partie du rayonnement solaire incident. En conséquence, la stratosphère se réchauffe, tandis que la troposphère (la basse atmosphère), privée d'une partie du rayonnement solaire incident normal, se refroidit.

un aérosol de gouttelettes (de taille « micronique ») d'acide sulfurique (H_2SO_4 , $2\text{H}_2\text{O}$). Cet aérosol est alors réparti plus ou moins largement sur le globe (autour des latitudes de l'éruption, puis dans les deux hémisphères dans le cas des éruptions à basse latitude), avec un « temps de résidence » de quelques semaines à quelques années. Les gouttelettes vont coalescer, puis rejoindre les nuages et enfin être « lessivées » par la pluie pour atteindre, sous forme de pluies acides, la surface du sol. Dans la stratosphère, l'aérosol sulfurique a la propriété d'absorber une partie importante de l'énergie solaire incidente, de la réfléchir ou de la rétrodiffuser (on dit que l'épaisseur optique de la stratosphère croît). La stratosphère va donc accumuler de la chaleur et se réchauffer. En revanche, le flux solaire qui traverse la troposphère est réduit et la surface du sol reçoit moins d'énergie : la basse atmosphère (et la surface du sol) sont donc refroidies. L'effet d'une telle éruption est donc de former dans l'atmosphère un « sandwich » thermique, et

pour ce qui concerne les habitants de la surface de provoquer une chute, qui peut être sévère, de température. Les aérosols sont par ailleurs impliqués dans des réactions chimiques avec le chlore, lui-même issu de l'éruption volcanique, et avec les radicaux libres hydroxyles OH, attaquant la couche d'ozone et déshydratant la stratosphère. À proximité du lieu de l'éruption, les phénomènes volcaniques de basse altitude, troposphériques, viennent se conjuguer et peuvent déclencher des séquences d'événements climatiques plus complexes.

Les climatologues sont désormais capables de modéliser un tel scénario⁶. C'est ce que nous avons fait avec Anne-Lise Chenet et Frédéric Fluteau pour tenter de reconstituer *a posteriori* les évolutions climatiques de l'extraordinaire année 1783. En injectant à la position de l'Islande les produits volcaniques selon l'histoire, l'altitude et le taux trouvés par Thordarson et Self, nous avons reconstitué, pour chaque cellule atmosphérique et pour chaque niveau d'altitude, la concentration des aérosols sulfuriques (responsables au sol du brouillard et des maladies) et leur évolution quotidienne.

Quelques-uns des résultats obtenus sont illustrés par la figure 16-5. L'animation conçue par Chenet et Fluteau, et visible sur le site d'Anne-Lise Chenet⁷, est encore plus parlante. Les couleurs représentent la concentration en soufre sur une échelle multiplicative (logarithmique). Il y a plus de trois ordres de grandeur (un facteur 1 000) entre les couleurs les plus froides et les plus chaudes. La concentration atteint en Islande 1 000 ppm (parties par million ou millième de millième) et 50 ppm en Europe de manière soutenue. 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 ppm : c'est le seuil d'évacuation des abords du volcan à Hawaï. Disons que sur la figure (et le film), les concentrations représentées par la couleur jaune et au-delà sont considérées comme toxiques (et au niveau rouge létales). Notre modèle prédit pour le début de juin 1783, comme on pouvait s'y attendre, des vents dominants principalement orientés vers l'est et le sud-est, en direction de l'Europe, mais aussi parfois vers l'ouest et le Groenland. Dès la première quinzaine de juin (nos calculs

6. Nous avons introduit au chapitre 1 ces AGCM (Atmospheric Global Circulation Model).

7. <http://www.ipgp.jussieu.fr/~alchenet>

« lissent » un peu le temps et l'espace et les détails ne doivent pas être pris au pied de la lettre), la « zone jaune » a déjà atteint l'Europe du Nord jusqu'à Moscou, le sud du Groenland et l'extrémité de Terre-Neuve, mais surtout une grande bande d'orientation nord-ouest/sud-est couvrant le nord-est des îles britanniques, et l'Europe continentale de la France et de l'Italie au Sud à la Scandinavie au Nord, avec des maxima en Allemagne, aux Pays-Bas et en Europe centrale. Une deuxième bouffée fin juin, puis une troisième début juillet suivent en gros le même chemin. La concentration reste élevée sur l'Europe en juillet (mais la péninsule ibérique paraît souvent épargnée) ; des zones très boréales et l'Asie centrale sont atteintes. Presque toute la partie de la Terre située au nord de 10°N de latitude connaît des concentrations anormales : l'effet de l'éruption est quasiment hémisphérique. Jusqu'en septembre, et de façon intermittente, chaque éruption est suivie d'un effet important en Europe et jusqu'au sud de la Méditerranée centrale. À partir d'octobre, la situation se stabilise. Fin décembre, tout l'hémisphère Nord au-delà de 30°N est cependant encore perturbé, principalement dans la stratosphère. Le lessivage de la troposphère débarrasse en effet les basses couches de l'atmosphère plus rapidement des aérosols.

Bien sûr, cet « exercice numérique » n'est qu'approché. Il est certain par exemple que nous n'avons pas reconstitué exactement la circulation des vents chaque jour de 1783. Nous en avons calculé une approximation, statistiquement et physiquement valide. Pour que la circulation calculée ne s'éloigne jamais trop d'une circulation réelle observée, nous avons recalé chaque jour les vents à toutes les altitudes en utilisant les observations... de l'an 2000. Mais les résultats montrent la validité de l'approche et la réalité des principaux traits des distributions observées. C'est ainsi que le modèle prédit des vents dirigés vers le Groenland : eh bien ! l'analyse chimique de carottes de glace forées dans l'inlandsis et datées (avec les niveaux annuels d'accumulation de neige, puis de glace de plus en plus compacte, un peu comme les arbres sont datés avec leurs anneaux d'accroissement) montrent des pics anormaux de concentration d'acide sulfurique précisément dans les niveaux datés de 1783-1784. Nous pouvons d'autre part comparer l'extension prédite pour le nuage d'aérosols sulfuriques et la zone maximale atteinte par le brouillard de 1783 telle qu'ont pu la reconstituer Self et Thordarson (Figures 16-2 et 16-5) : l'accord est très

satisfaisant. On voit notamment que l'Amérique centrale et le sud de l'Amérique du Nord sont épargnés, alors qu'aux mêmes latitudes l'Afrique, et notamment la Libye, sont fortement touchées. L'absence d'observation du brouillard dans cette région est sans doute liée à sa nature désertique et à la faible densité de sa population. L'Asie est bien touchée de la même façon dans le modèle que dans les observations. Notre modèle nous permet même d'estimer la valeur de la concentration en aérosols sulfuriques à partir de laquelle se condense l'étrange brouillard (jamais revu depuis) et d'affirmer que la zone affectée par les vapeurs s'est en fait étendue au moins 2 000 km au sud de la zone où il était visible. Enfin, en faisant varier dans le modèle l'altitude d'injection des aérosols, on constate que les effets observés ne sont possibles que si l'altitude d'injection atteint la basse stratosphère (ce qui, en retournant l'argument, démontre par une autre voie la capacité d'une éruption basaltique fissurale d'atteindre cette altitude).

Le taux d'injection de SO_2 atteint pendant l'éruption du Laki est considérable (jusqu'à 6 mégatonnes par jour). Or il n'y a pas de réservoir permanent de soufre dans l'atmosphère : avant l'ère industrielle, c'étaient les volcans qui apportaient l'essentiel du flux (0,04 mégatonne par jour en moyenne en temps « normal »), jusqu'à ce que la quantité injectée par l'Homme vienne le noyer (0,3 mégatonne par jour). En regard, l'effet attendu du dioxyde de carbone est moindre, non que les flux soient plus faibles (l'apport annuel de l'Homme est de 7 gigatonnes, celui des volcans de 0,05 gigatonne seulement), mais le réservoir atmosphérique est beaucoup plus important (3 000 gigatonnes) et la production anthropique est grande. Les modèles AGCM permettent (et permettront de mieux en mieux, avec une meilleure prise en compte de la physique et de la chimie fines de certains processus caractéristiques de l'atmosphère, comme la nucléation des nuages) de reconstituer, voire de prévoir, les effets d'éruptions du type Laki, où qu'elles se situent.

Nous ne connaissons pas encore assez bien la séquence des éruptions fissurales en Islande pour évaluer leur fréquence et la taille des plus importantes. Où peut-il par ailleurs s'en produire en d'autres endroits du globe ? Si la conjonction d'une dorsale émergée et d'un point chaud sont nécessaires, comme c'est le cas en Islande, il n'existe aujourd'hui que peu d'endroits où ces conditions sont réunies : la dépression de l'Afar, là où se séparent Arabie

et Afrique et où s'ouvre un nouvel océan, enfant de la mer Rouge et du golfe d'Aden, est l'autre cas d'école⁸. L'ensemble du plancher de cette dépression est recouvert de basaltes épanchés par quantité de fissures depuis 3 ou 4 millions d'années (avec sans doute un paroxysme autour de 2 millions d'années). La chaîne de l'Erta Ale y est en activité volcanique quasi permanente, mais l'édifice volcanique est restreint et abrite la plupart du temps l'un des rares lacs de lave de la planète. Je ne connais pas de travaux décrivant les conséquences passées d'éruptions fissurales en Afar, mais il ne fait guère de doute qu'il y en a eu de nombreuses et d'assez grand volume.

Récemment, un géochimiste de l'Université d'Oregon, Ilya Bindeman, a attiré l'attention de la communauté géologique sur des « super-volcans » responsables de gigantesques éruptions (par rapport à celles que nous avons connues dans les siècles récents), notamment dans l'ouest des États-Unis. Deux immenses caldeiras, de plusieurs dizaines de kilomètres de diamètre, marquent de leur cicatrice la croûte de la Californie, à Long Valley, et de Yellowstone dans le Wyoming. Ces effondrements grossièrement circulaires en forme de chaudrons (d'où leur nom) marquent la trace de l'effondrement d'un édifice volcanique au sein de sa propre chambre magmatique. Trois éruptions (au moins) de ce type ont eu lieu à Yellowstone, il y a 640 000 ans, et 1,3 et 2,1 millions d'années. À Long Valley, la dernière éruption majeure date de 760 000 ans. Ces éruptions auraient émis de 750 à 1 000 kilomètres cubes de magma, et l'analyse au microscope de la taille des bulles piégées dans la roche indiquerait une durée d'éruption de seulement 10 à 100 heures⁹. On peut aussi mentionner l'éruption du Fish Canyon Tuff, le dépôt volcanique sans doute le mieux daté de tous (à 28,02 millions d'années), mais également le plus volumineux (5 000 kilomètres cubes). La caldeira d'effondrement qui lui est associée est La Garita, dans les San Juan Mountains du Colorado.

On connaît (moins en détail) quelques autres éruptions de ce type : à Sumatra, l'éruption du Toba il y a 74 000 ans a émis 2 800 kilomètres cubes de lave et de cendres, ce qui en fait la plus

8. Les îles océaniques de Bouvet, Amsterdam, Saint-Paul ou les Açores sont aussi proches de rides océaniques mais ne correspondent sans doute pas à des points chauds majeurs, ou primaires.

9. Selon Alfred Anderson de l'Université de Chicago ; voir I. N. Bindeman, « Super-volcanoes », *Scientific American*, 26-33, juin 2006.

considérable des derniers 100 000 ans sur Terre. Des éruptions analogues ont dû ébranler la zone de Taupo en Nouvelle-Zélande. Les conséquences climatiques de ces super-éruptions ont fait l'objet de quelques premières modélisations numériques¹⁰. Il est clair qu'elles ont injecté dans l'atmosphère des quantités énormes de produits analogues à ceux du Laki et ainsi causé des modifications climatiques très importantes, dues principalement au soufre (refroidissement, estimé à 5 à 15 °C pour l'éruption de Toba, un véritable hiver volcanique ; amoindrissement de la couche d'ozone...).

Les effets climatiques des très grandes éruptions, qu'elles soient basaltiques ou non, ne font plus de doute. Or un événement comme le Laki n'a laissé qu'une trace faible dans l'histoire de l'humanité, reconstituée avec difficulté, et totalement invisible à l'échelle de temps d'un géologue. Bien que certains cherchent à associer certaines éruptions de super-volcans, comme Toba, à des effets environnementaux, ceux-ci semblent relativement mineurs, toujours à l'échelle des géologues. Aucun volcan des derniers millions d'années ne peut être associé à cet événement immensément plus catastrophique qu'est une extinction en masse. Le plus récent (qui se trouve être le plus petit) des traps, celui de Columbia (situé non loin des super-volcans de l'Ouest américain), est à ce titre particulièrement intéressant. Les géologues y ont suivi, à pied, le marteau à la main, munis de leur sacoche, de leurs cartes, de leurs crayons de couleur et de leur loupe, une énorme coulée (de quelques centaines de mètres d'épaisseur) sur plus de 100 km. Le volume du « Roza flow » a ainsi pu être estimé (en particulier par Steve Self et Thor Thordarson) à plus de 1 500 kilomètres cubes. C'est-à-dire 100 fois plus que la coulée du Laki et presque autant que les projections du Toba. Partant d'arguments de physique des fluides, Self et Jaupart ont montré que la mise en place de telles coulées devait se faire très rapidement. Quelques dizaines de mois devraient suffire, sinon le refroidissement entraînerait une rapide augmentation de la viscosité de la lave et la coulée s'arrêterait bien avant. Cinq mille kilomètres cubes en, disons, cinquante ans, cela représente un flux à peine imaginable de 100 kilomètres cubes par an, soit six fois la valeur de l'éruption du Laki pendant cinquante fois plus longtemps ! On imagine là encore que pareil objet ne

10. Par Phil Jones et ses collaborateurs en 2005.

puisse laisser l'atmosphère intacte... Et pourtant, pas d'extinction significative associée à la coulée de Roza, ni même à l'ensemble des 100 à 200 000 kilomètres cubes de lave des traps de Columbia pris dans leur ensemble.

Allons encore plus loin : il existe, nous l'avons vu, des traps de plus d'un million de kilomètres cubes qui n'ont pas causé d'extinction en masse sévère. Il faut donc, si notre hypothèse est correcte, que des conditions particulières soient remplies lors de l'éruption d'un trap pour qu'il puisse causer une extinction. Même si leur taille et leur chimie sont assez voisines, les traps diffèrent par de nombreux aspects susceptibles de modifier leur impact climatique. Leur *latitude*, qui peut affecter différemment les zones climatiques. Leur *altitude d'injection*, qui peut ne pas toujours atteindre la stratosphère (quoique, au vu du Laki...). Leur *milieu*, sous l'eau ou au contraire à l'air libre. L'effet dans ce cas ne fait pas de doute. Les effets de l'éruption sous-marine du plateau d'Ontong-Java, il y a 115 millions d'années, ont été considérablement atténués par la masse que représentent les eaux océaniques dans lesquelles les gaz pouvaient se dissoudre. La conséquence en est un « simple » événement d'anoxie océanique, pas une extinction en masse. Ces événements d'anoxie sont marqués dans les sédiments par un appauvrissement des faunes et des niveaux de sédiments noirâtres, témoins d'une chute drastique de la concentration en oxygène dans les eaux océaniques. La *nature des sédiments traversés par la lave* lors de son ascension vers la surface : selon que ceux-ci sont riches en sulfates (gypse) ou en carbonates (calcaire), elles injectent des quantités massives de SO_2 ou de CO_2 dans l'atmosphère. Au vu des flux étonnants du Roza flow, une hypothèse se fait jour : si une éruption du type Roza flow ne suffit pas, c'est *toute la séquence d'un trap* qu'il nous faut analyser. Quand l'atmosphère est perturbée, les réactions physico-chimiques avec l'océan permettent à l'ensemble d'atteindre un nouvel équilibre au bout de 1 000 ans environ (c'est la « constante de temps » de l'océan). Si une éruption importante, mais insuffisante pour amorcer une extinction est suivie d'une autre quelques milliers d'années après, l'océan a permis au système de revenir à l'équilibre. La nouvelle perturbation ignore alors la précédente et il n'y a pas d'effet multiplicatif. Si, en revanche, une nouvelle éruption survient avant ce retour à l'équilibre, puis une autre, un effet catastrophique peut se produire, le

système n'est plus capable de retour à l'équilibre et il s'emballe. Une extinction devient alors possible, voire inévitable...

Comment tester une telle hypothèse ? N'est-elle pas hors d'atteinte de ce que peuvent accomplir les géochronologues ? Ceux-ci ne peuvent guère distinguer mieux que le demi-million d'années pour un événement vieux de 65 millions d'années (et c'est déjà remarquable). Comment dépasser l'échelle géologique du million d'années pour atteindre l'échelle climatologique du millier d'années, voire l'échelle de la vie même des organismes qui peuplent la planète ? Nous avons une idée pour y parvenir, mais, pour en avoir le cœur net, il nous fallait retourner dans les traps du Deccan, vingt ans après y avoir pénétré pour la première fois.

Chapitre 17

RETOUR SUR LES TRAPS DU DECCAN ET L'EXTINCTION DES DINOSAURES

« [...] là les couches horizontales de roches superposées, appelées trapps en langue scandinave, les bandes trachytiques, les éruptions de basalte, de tufs, de tous les conglomérats volcaniques, les coulées de lave et de porphyre en fusion, ont fait un pays d'une surnaturelle horreur. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Il me faut d'abord préciser notre angle d'attaque et parler de notre équipe. L'idée est simple, et peut-être un peu floue au départ. Cette énorme pile de coulées de lave, que nous avons « attaquée » par le biais du paléomagnétisme vingt ans plus tôt avec Jean Besse, Didier Vandamme et Marie-Gabrielle Moreau, pouvions-nous estimer la séquence de ses coulées, les durées d'activité effusive alternant avec les périodes de repos, avec une précision meilleure que quelques milliers d'années, ce repère capital fourni par la capacité de retour à l'équilibre de l'océan ? Avec toutes les techniques connues de nous, la réponse était hélas *a priori* négative. Mais nous avons un fil directeur fourni par les volcanologues : ceux-ci étaient désormais capables (et notamment Steve Self) d'estimer la durée de mise en place d'une coulée à partir de ses caractéristiques morphologiques, par comparaison avec des analogues plus récents mais plus petits (comme le volcanisme basaltique d'Hawaï) et en s'appuyant sur la physique des écoulements (la lave en fusion étant un fluide, certes un peu particulier, mais dont les caractéristiques physiques étaient désormais assez bien connues).

La seconde piste venait de notre propre discipline, le magnétisme. Une coulée de lave enregistre en quelques semaines à quelques années tout au plus, lors de son refroidissement, la direction locale du champ magnétique terrestre. Ce dernier est, nous l'avons

vu, affecté de manière incessante par la variation séculaire. En un siècle, la direction du champ peut varier de plusieurs, voire d'une dizaine de degrés. La valeur moyenne observée au cours des trois derniers millénaires par les archéomagnéticiens est de l'ordre de 3 degrés par siècle. Quand des coulées sont aussi gigantesques que celles d'un trap et qu'on les observe sur le bord d'une route sur quelques centaines de mètres latéralement, il est difficile de dire si deux coulées superposées sont réellement distinctes ou si ce sont deux bras, deux lobes d'une même coulée qui ont divergé à un certain point puis se sont recouverts plus loin. Mais si l'analyse magnétique nous montre que les deux directions sont identiques, il y a fort à parier qu'il s'agit de la même coulée. Partant de l'hypothèse raisonnable que la variation séculaire du champ magnétique terrestre avait en gros les mêmes propriétés statistiques il y a 65 millions d'années qu'au cours des derniers millénaires, nous avons décidé de reprendre l'analyse magnétique des coulées des traps du Deccan, de la base au sommet, coulée après coulée, pour appliquer à la série des laves notre horloge de la variation séculaire. C'était un travail de terrain, puis un travail de laboratoire considérable. Il nous fallait reconstituer (au moins en partie) l'équipe d'il y a vingt ans et la compléter de collègues plus jeunes : c'est ainsi que Jean Besse et moi-même, assistés de Frédéric Fluteau et d'Hélène Bouquerel, devons bientôt prendre ou reprendre le chemin de Mahabaleshwar...

Si nous étions capables de détecter des empilements de lave particulièrement épais émis sur des durées très brèves, il nous fallait aussi estimer la durée des accalmies entre ces paroxysmes. À la latitude de l'Inde, il y a 65 millions d'années, par environ 20 à 30° de latitude Sud au milieu de l'océan Téthysien, le climat devait être chaud et humide (il a depuis été modélisé par Frédéric Fluteau et deux de ses collègues). Partant d'idées qui remontent à Jean-Jacques Ebelman (en 1845) et plus récemment (entre autres) à Garrels, Walker et Berner (voir chapitre 1), Pascale Louvat à Paris (avec Claude Allègre), puis Céline Dessert à Toulouse (avec Bernard Dupré et Jérôme Gaillardet) ont montré que la température jouait un rôle considérable dans l'altération des basaltes, et que les laves basaltiques jeunes (comme celles émises par les traps du Deccan) sont particulièrement sensibles à l'altération et à l'érosion chimique. L'atmosphère de ce temps-là était sans doute particulièrement riche en gaz carbonique et en soufre émis par le vol-

canisme, chaude et affectée de pluies acides, redoublant l'intensité et la vitesse de l'altération des basaltes nouvellement émis. Nous savons enfin qu'en climat tropical des sols se développent¹, notamment sur un soubassement basaltique comme celui des traps, pour former d'épaisses carapaces latéritiques (ces sols rouges, ferrugineux, indurés, typiques des ceintures tropicales et souvent catastrophiques pour l'agriculture et la végétation). Une latérite épaisse de plusieurs dizaines de mètres recouvre ainsi la surface supérieure du plateau de Mahabaleshwar où affluent les traps au sud de Bombay. Des niveaux rouges sont bien connus et rapportés dans la littérature. Le professeur K. V. Subbarao, l'un des plus grands experts de la géologie des traps, en a dressé l'inventaire et la carte avec ses étudiants. Il nous fallait donc des experts en sols tropicaux : Martine Gérard et Emmanuel Fritsch (de l'Institut de recherches pour le développement) acceptèrent de se joindre à nous.

Nous pouvions également rencontrer des niveaux de sédiments fossilifères et il nous fallait l'aide d'un paléontologue averti. Sur la recommandation de Jean-Jacques Jaeger, nous convainquîmes Sunil Bajpai, de l'Institut de technologie de Roorkee, de se joindre à nous. Son énergie et sa bonne humeur devaient rapidement en faire un ami précieux. Force est d'avouer qu'au cours de la première mission, en novembre 2003, nous ne rencontrâmes pas un seul sédiment (hors les sols rouges) ni la moindre trace de fossile : ce fut sans doute la mission la moins paléontologique de Bajpai et la plus paléomagnétique (il en devint expert en termes d'échantillonnage).

Il nous fallait aussi songer échantillonner pour refaire avec soin des datations par la méthode potassium-argon due à Cassinot et Gillot : Xavier Quidelleur à Orsay s'en chargerait.

Il fallait enfin un jeune cerveau et de jeunes bras au centre de ce projet, avec en plus l'idée de déboucher un jour sur une modélisation climatique des éruptions des traps : nous eûmes la chance d'intéresser une étudiante de notre DEA de géophysique, titulaire en plus d'un second DEA (de météorologie et d'océanologie) et donc de la double compétence (naissante) qu'il nous fallait. Anne-Lise Chenet avait trouvé son sujet de thèse, d'un volume considé-

1. Voir l'ouvrage *L'Épuisement de la Terre. L'enjeu du XXI^e siècle* (Paris, Odile Jacob, 2008) que Daniel Nahon leur a consacré.

nable et multiforme : jamais cela ne devait la décourager. Avec elle, l'équipe semblait au complet.

Il nous fallait décider où aller, dans l'immense étendue (plus de 500 000 kilomètres carrés subsistant aujourd'hui à l'affleurement). Il nous fallait choisir des coupes, les meilleures possibles, et savoir y identifier les coulées et en déterminer la composition minérale et chimique. Il nous fallait décider de l'ordre dans lequel attaquer ces coupes. Nous ne pouvions accomplir tout ce travail *ex nihilo*, et il allait falloir nous appuyer sur les travaux déjà publiés, pas toujours aisés d'accès ni effectués avec les techniques les plus modernes. C'est alors que la chance nous sourit. La chance est un élément important de la recherche scientifique, il faut savoir la reconnaître et la saisir à temps quand elle se présente.

J'avais été invité à un petit colloque sur les points chauds et les panaches à Cardiff. J'avais décidé d'y présenter les résultats sur la typologie des panaches que je venais d'obtenir lors d'un séjour au Caltech et qui font en partie l'objet du chapitre 7 et du chapitre 11. Je commençais aussi à m'intéresser à l'éruption du Laki comme modèle ultra-réduit d'une éruption de trap. J'étais toujours sous le coup de la critique de Walter Alvarez, qui était persuadé qu'un tel volcanisme fissural était incapable d'expédier ses exhalaisons dans la stratosphère. Je fis à ce colloque deux rencontres importantes : John Grattan et ses travaux importants sur la mortalité à la suite du Laki (chapitre précédent) et Mike Widdowson, un pétrologue, élève de mon vieil ami Keith Cox d'Oxford, grand spécialiste des traps, hélas récemment disparu. J'apprends alors qu'à l'Open University, Mike Widdowson et Steve Self (récemment transfuge de l'Université d'Hawaï) sont depuis deux ans à la tête d'un programme d'étude des traps du Deccan. Tous deux dirigent dans ce cadre la thèse d'une étudiante, Anne Jay, qui a établi avec eux des coupes très détaillées dans la région de Mahabaleshwar et qui les analyse avec une double approche volcanologique (avec Self) et pétrologique (avec Widdowson²). Self vient de montrer l'énormité du volcanisme du Roza flow ; il vient également de reconstituer l'histoire détaillée de l'éruption du Laki. Nos programmes, conçus de façon totalement indépendante, sont très complémentaires. L'équipe de l'Open University peut nous appor-

2. Et aussi paléomagnétique, avec Colin McNiocall, mais de manière insuffisamment précise pour nos nouveaux besoins.

ter des coupes bien étudiées sur lesquelles greffer nos propres travaux de manière mutuellement enrichissante, avec cette double approche pétrologique et volcanologique dans laquelle nous ne sommes pas spécialisés. Nous apportons nos idées sur l'utilisation de la variation séculaire et des sols rouges, et des capacités de modélisation climatique qu'ils n'ont pas. Nous décidons rapidement de coordonner au mieux nos efforts. Des visites alternées de l'équipe de Milton Keynes à Paris et de celle de Paris à Milton Keynes suivront, Anne Jay et Mike Widdowson se joindront à notre expédition et nous ferons porter nos premiers efforts sur la partie haute de la coupe des traps qu'ils sont en train d'analyser.

Mike Widdowson a beaucoup réfléchi au problème de la structure des traps, qui avait aussi intrigué son maître Keith Cox, et moi-même avec Didier Vandamme au milieu des années 1980. Nous avons depuis longtemps fait la remarque que, si les traps ont l'air parfaitement horizontaux sur le terrain, ils sont en fait affectés de pendages très faibles mais systématiques, de telle sorte qu'en des endroits éloignés on ne rencontre pas les mêmes couches à la même altitude. Cela a l'air trivial, mais nombreux sont ceux qui par le passé ont un peu oublié cette observation et réalisé des « corrélations à distance » pour le moins osées... Keith Cox avait montré que la structure des bassins versants des grands fleuves indiens révélait une asymétrie originelle, qu'il liait au bombement de la croûte causé par l'arrivée de la tête du panache peu avant l'éruption des traps. Vandamme et moi avons mis en évidence une structure « en boomerang » (Figure 17-1a), marquée par les déchirures (ou rifts) de la Narmada au Nord (un très vieil accident de la croûte réactivé) et de la côte ouest de l'Inde. Cette dernière marquait la déchirure du micro-continent des Seychelles, arraché à l'Inde peu après l'éruption. Mais Widdowson avait bien avancé. Il avait constaté que les ensembles de coulées du Deccan formaient un empilement de lentilles « sigmoïdes » progressant vers le sud au fur et à mesure que leur âge était plus jeune (Figure 17-1b). Pour effectuer une coupe complète des traps, il suffisait donc d'échantillonner les couches les plus anciennes au Nord, celles d'âge intermédiaire au niveau de Bombay et les plus jeunes au Sud près du village de Mahabaleshwar. Une falaise marquait du nord au sud la zone où effectuer plus facilement les prélèvements (les affleurements au loin de l'escarpement principal étant au mieux de qualité médiocre, plus souvent tout simplement invisi-

bles). Mike Widdowson proposait de voir dans cet escarpement, non pas comme beaucoup l'avaient auparavant supposé la trace d'un grand système de failles normales au lieu de l'ouverture océanique, mais une sorte de fossile ou d'image de ce jeu de failles, formé beaucoup plus à l'ouest, en mer, là où la croûte continentale était beaucoup plus amincie, et lentement raboté par l'érosion depuis le sommet de l'escarpement jusqu'au niveau de la mer. La falaise aurait donc « reculé » de plusieurs dizaines de kilomètres vers l'est³. En tout cas nous avons notre coupe ; il était temps de partir pour Mahabaleshwar.

De cette expédition de terrain, parfois un peu éprouvante avec ses fréquents 40 °C à l'ombre, nous sommes revenus avec des centaines d'échantillons destinés aux divers types d'analyse que nous voulions effectuer. Une seconde mission s'est avérée nécessaire en 2004, une troisième en 2005 plus au nord. À ces missions se sont joints pour diverses phases K. V. Subbarao et son ancien élève, aujourd'hui professeur, Syed Khadri. Anne-Lise Chenet s'est trouvée à la tête de plus de 1 500 échantillons paléomagnétiques qu'elle a soigneusement analysés dans nos laboratoires de Jussieu et de Saint-Maur. Elle a daté avec Xavier Quidelleur une dizaine d'échantillons par la méthode potassium-argon. Martine Gérard a soumis ses échantillons de sols à l'analyse microscopique et par rayons X. Au cours de ces trois années, notre compréhension a avancé de manière irrégulière, chaotique, avec (comme il est de coutume) des moments de déception et d'autres d'enthousiasme. Je ne vais pas ici tenter de reconstituer dans leur ordre chronologique ces péripéties. La soutenance de thèse d'Anne-Lise Chenet fin 2006 a permis la synthèse de ces travaux, aboutissement d'un énorme travail qui aura nécessité débrouillardise sur le terrain, rigueur au laboratoire, imagination dans l'interprétation, et à toutes les étapes autant que possible, bon sens. Alors, où en sommes-nous dans cette saga des traps « revisités » ?

Le paléomagnétisme d'abord (Figure 17-2). Première étape, la détermination des polarités magnétiques. Là encore, confirmation éclatante des précédents résultats. Tous les échantillons les plus

3. Nos résultats devaient en fin de compte infirmer en partie cette hypothèse et reconnaître à proximité de la falaise des Western Ghats la signature incontestable de failles, sans doute liées à l'ouverture de la mer d'Arabie et à l'arrachement des Seychelles du sous-continent indien.

âgés sont de polarité « inverse » : les 250 mètres d'épaisseur de la formation inférieure de Kalsubai près de la ville de Nasik, les 650 mètres des formations supérieures de Kalsubai et inférieure de Lonavala, les 900 mètres du groupe de Wai près de Mahabaleshwar, soit un total d'au moins 1800 mètres d'épaisseur de formations, au sein d'un même épisode de polarité magnétique inverse. Dans cette dernière coupe, vers 950 mètres d'altitude, une cinquantaine de mètres de coulées de lave ayant enregistré une direction très singulière, quasi verticale, qui en temps normal signifierait que l'aimantation a été acquise au pôle : il s'agit de la photographie d'un instant où le champ géomagnétique était en train de se renverser. On sait que ces périodes d'inversion ne durent que quelques milliers d'années. Les 200 derniers mètres de la coupe sont de polarité « normale » et la série se termine avec l'épaisse croûte altérée de latérite qui drape le paysage vers l'est. Tous les résultats antérieurs que nous avons publiés depuis 1986 se trouvaient confirmés et même renforcés. Nous avons alors proposé que le volcanisme du Deccan commençait dans une période de polarité normale, puis couvrait la totalité d'une polarité inverse, et continuait avec une polarité normale. S'il est vrai que des laves, sans doute plus anciennes et de polarité normale, affleurent au nord de la vallée de la Narmada, leur volume est sans doute très restreint. L'analyse de Widdowson (Figure 17-1b) nous montre que l'essentiel du volume des traps s'est formé pendant une partie seulement d'un épisode de polarité magnétique inverse et s'est achevé (mais le volume est peu important) au début de l'intervalle de polarité normale suivant. Une durée qui ne peut guère dépasser quelques centaines de milliers d'années. Mais nous voulions être encore plus précis.

C'est là qu'intervient la seconde partie de l'étude paléomagnétique. Comme nous l'espérons, un certain nombre de directions magnétiques de coulées superposées sont identiques, ou quasiment identiques au vu des incertitudes qui les affectent. Nous pouvons donc suggérer que les coulées qui ont enregistré ces directions se sont mises en place en un temps bref, trop bref pour enregistrer la variation séculaire de direction du champ de l'époque. Nous identifions ainsi dans la partie supérieure de la coupe (les 1 200 mètres de la coupe de Mahabaleshwar) six « paquets » (nous les avons nommés *pulses* en anglais) dont l'épaisseur va de 50 à plus de 200 mètres (Figure 17-2). En comparant des coupes

voisines (ce n'est pas si facile), nous pouvons suggérer que certains de ces paquets de coulées peuvent être suivis sur des centaines de kilomètres et avoir un volume total de l'ordre de 2 000 kilomètres cubes, dans certains cas peut-être beaucoup plus (jusqu'à 10 000 kilomètres cubes sans doute). Avec les données volcanologiques, nous pouvons conclure qu'une vingtaine d'événements volcaniques seulement ont formé les quelque 70 coulées de la coupe de Mahabaleshwar. Les résultats des coupes plus anciennes, situées plus au nord, sont tout aussi frappants.

Le volcanisme du Deccan apparaît donc bien constitué d'un assez petit nombre d'éruptions majeures (nos *pulses* ou paquets), chacun des paquets ayant pu être mis en place en tout au plus quelques dizaines d'années. Rappelons-nous de la morphologie d'ensemble des traps, à laquelle ils doivent leur nom : cette topographie en quelques « marches d'escalier » (Figure 17-3). Ces falaises successives hautes de quelques centaines de mètres ne sont-elles pas tout simplement les traces de paquets de lave émis en peu de temps, présentant des propriétés très homogènes et donc répondant de concert aux forces de l'érosion ? Si cela était vérifié, le très petit nombre total de pulses serait bien confirmé.

Il faut également tenter d'estimer le temps écoulé entre ces paquets, entre les coulées, et pour finir le temps total entre le début et la fin des phases majeures du volcanisme. Première remarque : alors que la plupart des auteurs précédents pensaient voir un très grand nombre de *red boles* (le nom anglais des sols rouges ou des niveaux rougeâtres intercalés entre les coulées – il en est parfois mais moins souvent de verdâtres), nous n'en n'avons pas trouvé beaucoup, et nous n'avons pas été très impressionnés par leur importance. Très souvent une coulée peu altérée repose directement sur la coulée inférieure, sans que l'on retrouve de trace d'altération ou d'un sol ancien fossilisé entre les deux. On peut se demander si beaucoup de temps a pu séparer une telle paire de coulées, dans un climat relativement chaud et humide (au moins avant les événements volcaniques). Parfois, un niveau rubéfié, mais comme on en voit à la suite de l'altération hydrothermale dans des zones volcaniques actuelles. Pour notre spécialiste, Martine Gérard, le temps nécessaire pour former de tels niveaux fins (il y en a au maximum une cinquantaine dans l'ensemble de la série) n'a pas dû beaucoup excéder quelques mois à quelques années. En revanche, nous avons rencontré quelques niveaux

beaucoup plus épais, atteignant un à trois mètres (Figure 17-4), où les deux coulées en contact sont considérablement altérées et en partie remplacées par des niveaux argileux friables dont la composition indique l'état d'avancement des réactions d'altération. Il est beaucoup plus difficile d'évaluer la durée totale nécessaire pour créer de tels niveaux dans le climat de l'Inde de la fin du Crétacé. Martine Gérard pense qu'il y a fallu au moins 1 000 ans, mais sans doute moins de 50 000 : une assez large gamme d'incertitude... Il est important de signaler que ces gros *red boles* sont peu nombreux, et plus nombreux vers le haut de la série que vers le bas.

Nous avons avancé vers notre but : nous savons désormais que, comme nous en avons émis l'hypothèse, le volcanisme des traps résulte d'un petit nombre de très gros *pulses*. Nous pouvons estimer le temps total de l'activité volcanique à quelques millénaires seulement et le temps total de formation des *red boles* fins à quelques siècles ou même décennies. Soit pour l'essentiel de la pile de 3 000 mètres du Deccan une durée totale de moins de 10 000 ans ! Les seules et rares périodes d'arrêt du volcanisme sont sans doute marquées par les quelques *red boles* épais, dont la durée de formation est sans doute de quelques millénaires, même si elle pourrait atteindre 50 000 ans. Le temps total de formation de la partie principale des traps du Deccan, estimé avant 1980 à plusieurs millions, voire plusieurs dizaines de millions d'années, puis à la suite de notre travail de 1986 à un million d'années, se trouve réduit sans doute à moins de 100 000 ans. Et de nombreux paquets, dont le volume atteint peut-être 10 000 kilomètres cubes ont été émis en quelques décennies (ou même en quelques années seulement) – des volumes, des durées et en conséquence des flux qui défient l'imagination.

Les datations ensuite. À la fin des années 1990, nous avons, avec Corinne Hofmann et Gilbert Féraud, déterminé les âges d'une série d'échantillons situés vers la base de la série volcanique entre Bombay et Igatpuri en utilisant le plus soigneusement possible la méthode (relative) utilisant les isotopes de l'argon (mais nous n'avions pas alors fait de détermination paléomagnétique). Avec Anne-Lise Chenet et Xavier Quidelleur, nous avons repris cette étude, d'une part en utilisant la méthode absolue potassium-argon de Cassignol et Gillot, d'autre part en prenant soin de mesurer en parallèle des échantillons provenant des plus anciennes et des plus jeunes coulées de la série principale du Deccan, à la fois du point

de vue des âges et des directions paléomagnétiques. Nous venons ainsi d'obtenir des résultats très intéressants. Tous les âges, du haut en bas de la coupe, ne peuvent être distingués les uns des autres et sont proches de 64,7 millions d'années, avec une incertitude de 1 %, c'est-à-dire de 0,6 million d'années. Cela confirme la brièveté du paroxysme volcanique et le fait que son âge est bien celui de la limite Crétacé-Tertiaire, aux incertitudes expérimentales près. L'âge de la limite n'est en effet toujours pas connu avec une précision meilleure que le pour cent, contrairement à ce qu'affirment certains auteurs⁴. De manière plus nouvelle, nous avons pu établir que la base des séries que nous avons échantillonnées correspond à un épisode volcanique plus vieux d'environ 2 millions d'années (c'est-à-dire vieux de 67 millions d'années) qu'on retrouve du nord du Deccan (au nord de la vallée de la Narmada) à la latitude d'Igatpuri, 500 km plus au sud. Les coulées correspondantes sont mises à l'affleurement par un jeu de failles normales, liées à l'ouverture de la mer d'Arabie et parallèles à la côte, qui n'avaient pas été identifiées jusqu'à présent par les géologues. Leur direction magnétique est très caractéristique (transitionnelle) et ne peut être confondue avec une autre. C'est un exemple intéressant où la conjonction des méthodes de datation isotopique et du paléomagnétisme s'avère capable de détecter des observations structurales importantes difficiles à voir sur le terrain. La limite supérieure de ces laves plus anciennes marque un hiatus, une période de calme volcanique relatif, de près de deux millions d'années. Toutes les laves situées au-dessus ont environ 65 millions d'années et elles s'étendent jusqu'à 500 km plus au sud. La distance entre les centres géométriques des formations de laves anciennes et des formations plus récentes est d'environ 300 km : c'est tout simplement la distance parcourue par l'Inde en direction du nord à la vitesse d'environ 150 mm/an pendant la période du

4. Les raisons de cette affirmation, assez techniques, sont explicitées dans notre article A.-L. Chenet, X. Quidelleur, F. Fluteau, V. Courtillot, N. Fiet, « ⁴⁰K-⁴⁰Ar Dating of the Main Deccan Large Igneous Province : Further Evidence of KTB Age and Short Duration », *Earth Planet. Sci. Lett.*, 263, 1-15, 2007. L'âge estimé de la limite a varié de 65,0 à 65,5 millions d'années, avec une incertitude encore une fois de 1 % environ, au cours de la dernière décennie... L'âge des principaux standards utilisés pour rattacher la méthode relative des isotopes de l'argon à la méthode absolue potassium-argon a lui varié de 2 % depuis quinze ans et n'est pas encore stabilisé... De nombreuses sources d'incertitude sont sous-estimées ou oubliées par certains auteurs qui publient parfois des « barres d'erreur » beaucoup plus faibles.

hiatus. C'est la première fois qu'est ainsi démontré le fait que l'étendue de laves du nord au sud de l'Inde a bien enregistré la dérive des plaques (chaque phase volcanique individuelle étant trop brève pour enregistrer cette dérive ; c'est le hiatus de 2 millions d'années qui permet cet enregistrement).

Troisième élément, la paléontologie. On se souvient que la contribution de nos collègues et amis paléontologues, Jean-Jacques Jaeger, Henri Capetta et Ashok Sahni avait été déterminante dans notre premier travail et nos premières hypothèses des années 1980. Eh bien ! l'expérience vient de se renouveler. À la tête d'une équipe qui comprenait Thierry Adate, Silvia Gardin, Anna Bartolini et Sunil Bajpai, Gerta Keller (que nous avons déjà évoquée à plusieurs reprises) a repris l'étude paléontologique et sédimentologique détaillée du petit affleurement de Rajahmundry, situé à plus de 700 km de Mahabaleshwar et à plus de 400 km des limites des affleurements principaux de laves du Deccan (Figure 17-5). Nous avons montré en 1992, Didier Vandamme et moi, que les deux paquets de coulées de lave observées dans ce site de seulement 35 km² de surface appartenaient respectivement aux intervalles de polarité magnétique 29 N (coulées du haut) et 29 R (coulées du bas). La limite paléontologique entre Crétacé et Tertiaire, incluse dans l'intervalle 29 R, ne pouvait donc pas être loin en dessous. En 2003 puis 2005, Kim Knight, Paul Renne et leurs collègues venaient de confirmer un âge de 64,4 millions d'années pour ces laves (avec la méthode des isotopes de l'argon et une incertitude de 0,5 million d'années⁵). De son côté, Steve Self, avec ses collaborateurs, a montré que les caractéristiques chimiques et volcanologiques des coulées de Rajahmundry permettaient de les rattacher aux épais épanchements de la région de Mahabaleshwar à 700 km de là. Ils rejoignent donc notre équipe pour penser qu'on a là les plus longues (et grosses) coulées volcaniques de la Terre, avec des longueurs pouvant atteindre voire dépasser 1 000 km et des volumes pouvant dépasser 5 000 kilomètres cubes, voire atteindre 10 000 kilomètres cubes.

C'est sur ces entrefaites que Gerta Keller analyse les fossiles présents dans les sédiments situés au-dessous et au-dessus des

5. En fait, ces auteurs évoquent une incertitude atteignant 0,3 million d'années, mais nous avons vu plus haut que nous contestons la possibilité de « faire mieux que le pour cent » en l'état d'avancement de la méthode.

paquets de coulées de Rajahmundry⁶. Ce travail minutieux (joint aux travaux paléomagnétiques, géochronologiques et volcanologiques antérieurs) lui permet d'affirmer que le premier paquet de laves s'est mis en place pendant la période inverse 29 R et s'arrête précisément à la limite paléontologique Crétacé-Tertiaire, tandis que le second paquet se met en place quelques centaines de milliers d'années plus tard dans la période normale suivante, 29 N. Munis de toutes ces informations nouvelles, nous sommes en mesure de dessiner enfin un scénario précis de la crise volcanique du Deccan. C'est ce que nous ferons au chapitre suivant, après avoir envisagé les conséquences climatiques de l'injection de ces gigantesques bouffées de soufre dans l'atmosphère. Puis nous reviendrons sur les autres crises d'extinction pour voir si le scénario obtenu est susceptible de devenir « la règle », c'est-à-dire susceptible d'une application à toutes les autres extinctions en masse.

6. G. Keller, T. Adatte, S. Gardin, A. Bartolini, S. Bajpai, « Main Deccan volcanism phase ends near the K-T boundary : Evidence from the Krishna-Godavari Basin, SE India », *Earth Planet. Sci. Lett.*, 268, 293-311, 2008.

Chapitre 18

DU SCÉNARIO CLIMATIQUE DE LA FIN DE L'ÈRE SECONDAIRE AUX AUTRES EXTINCTIONS

« Mais il est pourtant évident que la surface du globe a été soumise à la combustion, et il est permis de supposer que la croûte extérieure s'est refroidie d'abord, tandis que la chaleur se réfugiait au centre.

— Erreur, répondit mon oncle. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Nous pouvons enfin convertir ces flux de lave en flux de gaz émis vers l'atmosphère, à des hauteurs dont on ne peut plus douter qu'elles aient été stratosphériques. R. B. Stothers a en effet mis à l'échelle les fontaines de lave d'Hawaï : dans le cas du Deccan, les fissures devaient faire des centaines de kilomètres de long et les fontaines de lave nettement dépasser le kilomètre de hauteur. Les panaches thermiques devaient s'élever vigoureusement au-dessus des immenses champs de laves surchauffées et les éruptions paroxysmales envoyer gaz et poussières dans la stratosphère. La corrélation entre teneur en certains éléments (comme le fer) et teneur en soufre a permis à Self et ses collègues¹, et à Benjamin Bonnefoy et Eric Humler de remonter aux teneurs en soufre des laves anciennes du Deccan². Ces teneurs s'étagent entre 1 000 et 1 500 ppm, typiques des laves des îles océaniques (donc associées à des points chauds). Elles permettent d'estimer à environ 100 gigatonnes la quantité de SO₂ émise en moins de 100 ans par les coulées des « paquets », tels que nous les avons identifiés à

1. S. Self, M. Widdowson et T. Thordarson, « Volatile fluxes during flood basalt eruptions and potential effects on the global environment : A Deccan perspective », *Earth Planet. Sci. Lett.*, 248, 518-532, 2006.

2. La concentration en soufre d'une lave récente peut être déterminée grâce aux inclusions vitreuses qui y sont préservées. Dans les laves très anciennes ne subsiste en général aucune inclusion vitreuse non altérée.

l'aide de la volcanologie et du paléomagnétisme (soit 1 à 10 gigatonnes par an). En comparaison, l'éruption du Pinatubo a émis environ 0,02 gigatonne par an. Le Laki a émis, rappelons-le, 0,1 gigatonne en un an. Il se trouve que cette valeur est proche des émissions dues à l'activité industrielle humaine, qui heureusement décroît depuis quelques années (et dont la source n'est pas ponctuelle, unique, ni émise à des altitudes stratosphériques, mais diffuse et émise à des altitudes troposphériques, donc sans conséquences globales de même ampleur). L'injection due à un *pulse* important du Deccan est donc environ de 10 à 100 fois supérieure à celle du Laki et dure de 10 à 100 fois plus longtemps. Et il s'agit d'un unique *pulse*, parmi la trentaine dont nous avons finalement vu avec nos travaux récents et ceux de Self et de Keller qu'ils devaient sans doute s'être répartis en seulement deux ou trois *méga-pulses*, l'un vers 67 millions d'années (le plus « petit »), le suivant (le plus gros) juste avant la limite Crétacé-Tertiaire, le troisième et dernier quelques centaines de milliers d'années plus tard. En comparaison, la quantité de SO_2 relâchée dans l'atmosphère par l'impact de Chicxulub a été estimée par Pierazzo à 50 à 500 gigatonnes. C'est une valeur tout à fait considérable, d'autant qu'elle est produite de manière quasi instantanée. Mais le temps de résidence des aérosols est de plusieurs mois dans la stratosphère et l'effet sur la couche d'ozone peut s'étaler sur plusieurs années : nous ne sommes pas si loin qu'on le croyait des flux d'un gros *pulse* volcanique. Et la mise en place d'un trap ne se produit pas seulement sur la lente échelle de temps « géologique » du million d'années, mais aussi à une échelle de temps tout à fait « humaine », se comptant en années et en décennies. Enfin, l'émission totale des traps pris dans leur ensemble, de l'ordre de 10 000 gigatonnes, est colossale, de 20 à 200 fois Chicxulub ! Et le *méga-pulse* principal, juste avant la limite Crétacé-Tertiaire, en a peut-être relâché près de 5 000 gigatonnes, soit 10 à 100 fois Chicxulub. Plus que tous autres, ces chiffres relativisent l'importance probable de l'impact de l'astéroïde par rapport au cataclysme volcanique contemporain.

Notre scénario se précise et peut désormais être résumé de la manière suivante (Figure 18-1). La gigantesque tête d'un panache, parti des profondeurs du manteau, arrive il y a un peu plus de 67 millions d'années en dessous de la lithosphère du vieux continent indien, qui s'est arraché 20 millions d'années plus tôt à

Madagascar et poursuit sa dérive vers le nord, vers l'inévitable collision avec l'Asie qui va commencer dans une dizaine de millions d'années. L'énorme masse de matériau, relativement chaud et moins dense que les roches du manteau qui l'entourent, soulève le sous-continent (alors île-continent) d'un bon millier de mètres sur plus de 1 000 km de diamètre. Le réseau hydrographique se réarrange à l'aplomb de ce gigantesque dôme. Par des fissures, qui réutilisent parfois de vieilles cicatrices, mémoires de collisions, de cisaillements et de déchirures bien antérieurs des blocs qui avaient formé l'Inde, la masse énorme de laves formées par la fusion partielle de la tête du panache et des roches encaissantes entre en éruption, par 30 degrés de latitude Sud. Entre les toutes premières éruptions, sans doute modestes, et les toutes dernières, contemporaines de l'arrachement du bloc des Seychelles et de l'ouverture de la mer d'Arabie, plusieurs millions d'années vont s'écouler. Les premières coulées arrivent à la surface au nord du rift aujourd'hui suivi par la vallée de la Narmada, il y a 67 millions d'années³, à une période où le champ magnétique terrestre est de polarité normale (le « chron » 30 N). Dans la région d'Igatpuri (près de Latifwadi), une énorme coulée enregistre même le champ magnétique en flagrant délit d'inversion entre les périodes de polarité 30 R et 30 N.

Il faut attendre 2 millions d'années et la période inverse suivante (le « chron » 29 R) pour que l'enfer se déchaîne : tout au long du rift de la Narmada et d'un système de fissures qui va donner naissance à la côte ouest, rectiligne, nord-sud de l'Inde, de grandes coulées de basalte sortent de terre. Il y en a au total des centaines, mais l'essentiel de l'activité (du volume de laves émises et du volume de gaz injectés dans l'atmosphère) se concentre en quelques dizaines de très grands épisodes. Avec nos travaux les plus récents à Mahabaleshwar et Nasik, et ceux des équipes de Steve Self et Gerta Keller à Rajahmundry, il apparaît désormais que ces épisodes sont eux-mêmes regroupés en deux *méga-pulses*, l'un immédiatement avant la limite Crétacé-Tertiaire dont il apparaît de plus en plus clairement comme la cause principale, l'autre quelques centaines de milliers d'années après, expliquant le fait noté depuis longtemps par les paléontologues que ce n'est que

3. Souvenons-nous que les valeurs absolues de ces âges ne sont connues qu'à 0,6 million d'années près.

300 000 ou 400 000 ans après la limite proprement dite que les écosystèmes commencent à se reconstituer.

Nos paroxysmes éruptifs (les *pulses*) ne durent peut-être que quelques décennies, et les *méga-pulses* que quelques siècles à quelques milliers d'années ! Au cours de ces périodes, les coulées, épaisses et complexes, formées de lobes qui se chevauchent, atteignent des lieux situés à des centaines de kilomètres des bouches éruptives et finissent par couvrir sur des centaines de mètres d'épaisseur des dizaines de milliers de kilomètres carrés. Le volume total de certaines de ces coulées atteint sans doute la dizaine de milliers de kilomètres cubes. Pendant leur pic éruptif, elles forment plus de basalte chaque année que les 50 000 km de dorsales actives autour du monde ne forment de croûte océanique (une centaine de kilomètres cubes/an au regard de 25) : l'« opérateur point chaud » domine alors le bilan mondial de l'« opérateur dorsales » ! Au cours de ces épisodes, des fissures de plusieurs centaines de kilomètres de longueur crachent des fontaines incandescentes de plus de 1 000 mètres de haut et injectent chaque année des milliards de tonnes de soufre (mais aussi des quantités bien plus grandes de gaz carbonique et, localement, des masses d'acide chlorhydrique, bromhydrique, fluorhydrique, etc.). Il ne fait plus de doute qu'à chacun de ces paroxysmes la biosphère a été sévèrement ébranlée.

Mais au bout de quelques milliers d'années, à la suite d'une *pulse* unique, et grâce à l'effet stabilisateur puissant de l'océan mondial, le système devait retrouver un certain équilibre. Sauf quand la masse injectée dépassait un certain seuil critique, ou quand plusieurs de ces paroxysmes survenaient de manière suffisamment rapprochée pour que l'océan ne réussisse plus « à suivre » : tel a dû être le cas lors des *méga-pulses*. On entrait alors dans une période de « dérapage » : océan incapable de réguler la température de l'atmosphère et sa composition chimique, empoisonnement de l'atmosphère, pluies acides et refroidissement exceptionnel de la surface du globe pendant des décennies, tant que les coulées étaient actives. Puis, au contraire, réchauffement dû à l'énorme injection de gaz carbonique restant plus longtemps que les aérosols sulfuriques dans l'atmosphère ; et, dans tous les cas, acidification de l'océan. Les *pulses* et *méga-pulses* pourraient être les responsables de la plupart des phases d'extinction successives (extinctions en marches d'escalier) observées par les paléon-

tologues. On imagine cependant sans difficulté que l'impact de Chicxulub, intervenant quelque 100 000 ans après le démarrage de la phase majeure du volcanisme du Deccan, ait apporté à ce monde déjà en fort mauvais état un terrible coup supplémentaire, pour certains un coup de grâce. La météorite s'est écrasée sur l'actuel Mexique, à des latitudes basses et presque aux antipodes du Deccan, entraînant un effet biologique massif⁴, qu'elle n'aurait sans doute pas eu si elle avait atteint la Terre pendant une période de calme volcanique. Mais à ce moment, ce « cofacteur » a eu l'effet qu'aurait eu un gros « pulse » supplémentaire, entraînant avec lui une énorme vague d'extinction, notamment dans le milieu marin déjà très affaibli. Le volcanisme massif (le troisième *méga-pulse*) a repris 100 000 ou 200 000 ans plus tard, toujours dans la période inverse 29 R comme l'attestent nos résultats de Nasik et de Mahabaleshwar, et n'a cessé que peu après le début de la période de polarité magnétique normale suivante (le « chron » 29 N), soit quelque 300 000 à 500 000 ans après l'impact. Le volcanisme des traps du Deccan s'était finalement étalé sur 2 millions d'années, mais n'avait été paroxysmal que lors de trois phases de quelques milliers d'années, les deux principales n'étant séparées que par quelques centaines de milliers d'années. L'extinction en masse dont cet immense épisode volcanique a été l'agent principal, sinon unique, s'est donc étalée sur la même durée, avec des paroxysmes, des tentatives de reprises (extinctions en marches d'escalier) et un redémarrage effectif seulement à la fin du dernier méga-pulse, des centaines de milliers d'années après la « limite » proprement dite.

Les principales interruptions du volcanisme, les phases de repos, sont sans doute marquées par les épais niveaux de sols rouges (en très petit nombre, nous l'avons vu), mais nous ne sommes pas encore en mesure de le démontrer. La limite entre le Crétacé et le Tertiaire elle-même (telle qu'elle est définie de manière désormais conventionnelle par l'anomalie d'iridium) y est sans doute dissimulée quelque part sur la route en lacets qui descend de Mahabaleshwar...

Le scénario que nous venons de proposer pour l'extinction en masse de la fin du Mésozoïque peut sans doute être également

4. Si l'on accepte le scénario dominant des « impactistes », ce que je fais mais que n'accepte pas Gerta Keller (voir plus loin).

proposé pour les autres extinctions en masse, comme la « double extinction » des limites Guadalupien-Tatarien et Permo-Trias, le plus dramatique événement biologique du Phanérozoïque, qui a failli provoquer l'extinction totale de la Vie sur Terre. À ceci près qu'il n'y eut alors aucun impact d'astéroïde. Le volcanisme seul fut donc suffisant. D'autres phénomènes, en apparence secondaires, mais en réalité majeurs, peuvent accompagner le volcanisme catastrophique d'un trap. Si, par exemple, le degré d'acidité (dû aux pluies acides) et l'empoisonnement chimique des eaux, notamment océaniques, sont suffisants, une partie de la vie planctonique peut s'éteindre, et avec elle la « pompe biologique » : ces micro-organismes absorbent une énorme part du gaz carbonique, dont sans cela la concentration dans l'océan et l'atmosphère augmenterait considérablement. Ils sont ensuite « exportés » vers le fond de l'océan, qui séquestre ainsi du CO_2 par le biais de la photosynthèse. L'essentiel des réserves actuelles de gaz carbonique est (heureusement) piégé dans les carbonates des squelettes fossiles de ces organismes, accumulés au cours des millions d'années. Si l'on relâchait cette masse de carbonates, la teneur en CO_2 de l'atmosphère serait multipliée par 50 000 à 100 000⁵. Il se peut que certaines éruptions de traps aient été accompagnées d'une interruption catastrophique de la pompe biologique, conduisant à des concentrations très élevées de CO_2 dans l'atmosphère et à un effet de serre énorme.

Si le réchauffement de l'atmosphère puis au bout d'un certain temps des eaux peu profondes de l'océan a pu être suffisant, une autre catastrophe environnementale devient possible : la sublimation des chlathrates. Voici plusieurs décennies que les géologues marins travaillant à bord des vaisseaux océanographiques remontent au cours de certains forages dans les sédiments du plateau continental des morceaux de matière étrange, un peu comme de la glace sale et plastique : ceux-ci s'évaporent, ou plus exactement se subliment une fois à l'air libre sur le pont du bateau et s'enflamment si l'on approche une allumette. Ce sont des hydrates de

5. L'atmosphère renferme 760 gigatonnes de carbone sous forme de CO_2 et 10 sous forme de CH_4 . L'océan quant à lui contient environ cinquante fois la quantité de CO_2 présente dans l'atmosphère, soit 30 000 gigatonnes de C dans le CO_2 dissout. Le carbone des roches sédimentaires représente 50 à 70 millions de gigatonnes de C. Pour mémoire, il y en a 610 Gt dans la matière organique de la biosphère et 5 000 Gt dans les combustibles fossiles.

méthane (ou chlatrates), stables à l'état solide quand ils sont soumis à une température suffisamment basse et une pression suffisamment élevée : ces conditions sont actuellement réunies en profondeur sous les sédiments des plateaux continentaux, sous quelques centaines de mètres d'eau. La structure en cages de ces « glaces sales » est si efficace qu'un mètre cube relâche 164 mètres cubes de méthane gazeux et 0,8 mètre cube d'eau liquide ! La masse de ces hydrates et leur pouvoir calorifique sont tels qu'ils commencent à intéresser les pétroliers. Mais si jamais l'océan se réchauffe, ou si une éruption massive se produit à proximité, ces hydrates peuvent se sublimer et le méthane ainsi formé envahir l'atmosphère. Or le méthane est un gaz à effet de serre encore plus puissant que le gaz carbonique : il se convertit en quelques années seulement en CO₂.

Il s'est produit, à la fin du Paléocène, il y a 55 millions d'années, un événement climatique exceptionnel. L'analyse des isotopes de l'oxygène dans les coquilles d'organismes marins montre que la température de l'atmosphère et des eaux s'est élevée de manière totalement anormale pendant une période géologiquement assez brève de quelques dizaines de milliers d'années. C'est le LPTM (Late Paleocene Thermal Maximum ou maximum thermique du Paléocène tardif). Dans les sédiments de la même époque, dans les mêmes coquilles fossiles, les géochimistes observent une teneur tout à fait anormale en certains isotopes du carbone, principalement le carbone 12 (¹²C). Le seul moyen connu aujourd'hui d'appauvrir à ce point de la matière organique en ¹²C est de lui apporter le carbone du méthane des chlatrates. Or, à la fin du Paléocène, se produit également une éruption majeure de traps : les traps de la province brito-arctique (et l'ouverture de l'Atlantique Nord). Il est donc tentant de proposer que c'est l'éruption des laves qui est responsable d'un premier réchauffement de l'atmosphère et de l'océan : elle aurait permis d'y franchir un seuil critique et aurait déclenché la sublimation des chlatrates. Cependant, C. Tegner et R. Larsen ont très récemment⁶ proposé que les traps de l'Atlantique Nord eussent non pas démarré mais au contraire interrompu le LPTM, l'effet du refroidissement dû aux aérosols sulfuriques étant dominant.

6. Colloque de l'AGU à San Francisco en décembre 2008.

Au monde froid, imposé par les injections massives d'aérosols sulfuriques consécutives à chaque méga-éruption, qui dure de quelques décennies à quelques siècles à chaque épisode paroxystique, succède donc un monde dans lequel culmine un puissant effet de serre, que ce soit sous l'effet de concentrations très élevées de gaz carbonique, ou parfois avec l'addition catastrophique de masses de méthane. Ce monde chaud persiste quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'années. Il va ensuite avoir tendance à se refroidir en quelques centaines de milliers d'années à cause du puissant effet dont nous avons déjà parlé : le trap porte en effet en lui une capacité « autonettoyante ». L'énorme surface de laves basaltiques fraîches émises par chaque méga-éruption est un puissant « puits » où vont s'enfouir des masses de gaz carbonique. Le basalte est en effet très susceptible à l'altération, sous l'effet des pluies acides chargées en acide carbonique, plus de dix fois plus qu'une autre roche affleurant sur les continents. Les eaux des rivières vont se charger en bicarbonates (et autres éléments solubles) qui résultent de cette altération et les emporter dans l'océan mondial (entraînant des signatures isotopiques reconnaissables, par exemple celle des isotopes du strontium⁷), comme l'ont montré Pascale Louvat et Céline Dessert. Cet effet est particulièrement efficace en milieu tropical (à cause des fortes chaleurs et des fortes précipitations) ; les traps du Deccan étaient peut-être soumis à un tel climat lors de leur formation⁸. Céline Dessert et ses collègues ont modélisé l'effet de ce pompage : ils estiment que la moitié du volume originel des traps (plus de 2 millions de kilomètres cubes) a ainsi pu être « dissoute », et ce en environ un million d'années. Un million d'années après le début de l'éruption des traps, la concentration de l'atmosphère en gaz carbonique pouvait être ainsi pratiquement revenue à la normale, mais pas tout à fait. Résultat inattendu en effet, l'altération des basaltes consomme une masse énorme de carbone, plus que l'ensemble du volcanisme n'en avait émis. La teneur en CO₂ de l'atmosphère à la fin du volcanisme est donc un peu inférieure à celle du début, et dans la mesure où le climat est modulé par cette teneur, il pourrait être un peu plus

7. Voir par exemple M. Javoy et V. Courtillot, « Intense acidic volcanism at the Cretaceous-Tertiary boundary », *Earth Planet. Sci. Lett.*, 94, 409-416, 1989.

8. Des calculs récents dus à Frédéric Fluteau remettraient cependant en partie en question cette vision du climat de l'Inde à la limite KT.

froid à la fin qu'au début ! Nous avons vu au premier chapitre que, dans un passé encore plus lointain, cet effet a pu plonger la Terre dans des glaciations généralisées (« snowball Earth »)...

Ce scénario assez vraisemblable « colle » avec la plupart des données que nous-mêmes et des dizaines d'autres équipes de scientifiques ont accumulées depuis vingt ans. Comme nous l'avons vu, il ne nie pas la réalité d'un grand impact à la limite Crétacé-Tertiaire, mais en relativise les conséquences. La plupart des extinctions en masse, en fait toutes, à l'exception de la seule extinction de la fin du Crétacé, se sont produites au moment d'éruptions de grands traps et sans « l'aide » de la moindre météorite... La variabilité des conditions de l'éruption me semble amplement suffisante pour expliquer pourquoi il n'y a pas deux extinctions semblables, et pourquoi l'impact environnemental des traps a été si différent de l'un à l'autre, alors que pour le géophysicien ou le géochimiste ils ne se distinguent guère l'un de l'autre, ni par le volume, ni par la durée totale, ni par la chimie... La latitude d'injection des produits gazeux ne semble pas être un paramètre important : les traps d'Emeishan sont entrés en éruption près de l'équateur il y a 258 millions d'années, alors que 8 millions d'années plus tard les traps de Sibérie étaient vomis par d'énormes fissures à des latitudes presque polaires. Quand la taille et le flux sont suffisants, l'injection dans la stratosphère puis la répartition globale des aérosols et la saturation du système sont sans doute garanties. En revanche, le milieu dans lequel se produit l'éruption est essentiel. Une éruption sous l'eau ne produit « qu'un » événement d'anoxie général dans l'océan, bien visible par la suite au sein de niveaux sédimentaires noirâtres, anoxiques, mais moins sévère qu'une extinction en masse. Une éruption dans l'atmosphère a des effets plus rapides et plus drastiques. Nous venons de voir comment elle pouvait même *in fine* déclencher une catastrophe secondaire, la sublimation des chlorures et l'invasion de méthane en quantités importantes dans l'atmosphère. Nous avons vu comment sous l'effet successif des aérosols sulfuriques, du gaz carbonique puis de l'altération des basaltes, pouvait se succéder une séquence climatique « froid-chaud-froid » sur trois échelles de temps bien distinctes. Mais le déterminant essentiel de la signature d'un trap semble bien être le détail de la séquence des « méga-éruptions » : leur nombre, leur flux et surtout leur rapprochement dans le temps, le seuil critique temporel étant donné par la capa-

cité de l'océan à rétablir l'équilibre. Des études récentes soulignent également le rôle des sédiments traversés par la lave.

Je suis bien conscient que ce scénario est encore loin de convaincre tout le monde, et que bien des aspects méritent d'être soigneusement testés. Il y a du pain sur la planche pour de nombreux chercheurs de nombreuses disciplines (géologie, géophysique, géochimie, climatologie, paléontologie, etc.) et de quoi fournir matière à de nombreuses thèses. Derrière tout ce programme, le défi de pouvoir mesurer le temps avec une précision cent fois supérieure à ce que nous savons actuellement faire, sans doute dans un premier temps en se contentant de méthodes relatives, en croisant plusieurs techniques, en imaginant des astuces, comme nous avons tenté de le faire pour les traps du Deccan. Le programme que nous mettons en ce moment sur pied en est la conséquence directe : j'espère, avec les membres de notre équipe et ceux qui voudront bien nous rejoindre, « attaquer » maintenant trois autres traps. Avec un groupe international de collègues important, dont Volodya Pavlov, ami et collaborateur de longue date de l'Institut de géophysique de Moscou, nous voulons analyser les épaisses séries de lave des traps de Sibérie, responsables de la plus grande des extinctions (pourquoi ?) et dont on vient de découvrir que la surface d'origine était sans doute le double de l'énorme surface déjà reconnue (et le volume sans doute supérieur à 5 millions de km³) : on les retrouve en effet jusqu'à 10 km de profondeur sous les sédiments du bassin du Kazakhstan, sans doute le remplissage d'un rift, d'un océan qui avait tenté sans succès de s'ouvrir à la suite de l'éruption des traps. Avec Goonie Marsh de l'Université de Rhodes et Maarten de Wit de l'Université du Cap, Frédéric Fluteau et moi-même espérons arracher leur secret aux traps du Karoo, vieux de 183 millions d'années, qui ne sont associés (et ce de manière encore contestée par certains) qu'à une « petite » extinction, celle de la fin du Pliensbachien. Or ce volcanisme, dont Gilbert Féraud et Frédéric Jourdan semblent avoir montré qu'il s'étale sur plusieurs millions d'années, peut-être en deux phases principales, couvre une surface considérable, de plusieurs millions de kilomètres carrés, sous le bassin du Karoo, en Afrique du Sud, dans les monts du Lebombo et jusqu'au rift d'Okavango au Botswana, et sous le désert du Kalahari. Et quand on reconstruit le grand continent du Gondwana avant sa séparation (vers 190 millions d'années), on voit que ce volcanisme se poursuit le long de la chaîne des monts transantarctiques sur plus de 4 000 km jusqu'en

Tasmanie et au sud de l'actuelle Australie ! Pourquoi un volcanisme aussi gigantesque n'a-t-il pas eu plus d'effets sur la biosphère ? Ce sera le travail de thèse de Maud Moulin, qui a rejoint notre laboratoire en 2008. Avec Vadim Kravchinsky, de l'Université d'Alberta, Dmitry Gladkochub de la branche sibérienne de l'Académie des sciences russe et Volodya Pavlov, rejoint par nos collègues géochronologues Xavier Quidelleur et Paul Renne, je souhaiterais enfin pouvoir tester notre hypothèse que les traps de Viluy-Yakutsk, à l'est de la Sibérie, sont bien responsables de l'extinction dite du Frasnien-Fammenien (Dévonien) il y a 360 millions d'années. Les résultats préliminaires sont encourageants. Si l'hypothèse se trouvait vérifiée, il ne manquerait à notre tableau de chasse pour les 550 millions d'années du Phanérozoïque qu'un seul trap, celui qui aurait causé la grande glaciation et les extinctions de la fin de l'Ordovicien.

J'offrirais bien un prix, à défaut mon estime et ma reconnaissance, au chercheur qui mettrait au point une méthode capable de dater une coulée de basalte vieille de près de 200 millions d'années à 1 000 ans près ! Cela voudrait dire franchir en précision un facteur de près de 1 000 par rapport à ce que l'on sait faire actuellement. Nous avons vu que des « astuces » permettent déjà d'énormes progrès, mais en valeur relative : le volcanologue et sa coulée, le paléomagnéticien et sa variation séculaire, peuvent identifier des durées de quelques décennies seulement, même pour des phénomènes aussi anciens. Mais on ne reconstitue pas encore l'intégralité de la séquence, l'alternance des pics éruptifs et des périodes calmes, clefs d'un test irréfutable de nos idées.

C'est ainsi que fonctionnent les sciences de la Nature, et notamment les géosciences (ce qui ne les rend pas moins « nobles » que la physique théorique ou les mathématiques, quoi que prétende le contestable « classement » d'Auguste Comte). Une suite d'observations, d'analyses au laboratoire, de constructions d'hypothèses et de modèles, de calculs et de prédictions d'observations non encore faites susceptibles de conforter, de permettre de corriger ou de rejeter le modèle... C'est une véritable enquête, avec toute sa complexité, faisant aujourd'hui appel à des spécialistes aux méthodes et parfois aux langages très différents. L'accumulation des observations, la formulation de propositions, par la suite vérifiées, n'ont à mes yeux pas cessé de conforter l'hypothèse que c'est bien la dynamique des entrailles de la Terre qui est cause pre-

mière des grands accidents de l'Évolution, et qui s'exprime dans les crises qui marquent l'échelle des temps géologiques.

Les autres hypothèses ne sont pas pour autant niées ou supprimées. Le modèle aujourd'hui le plus connu et le plus généralement accepté et enseigné, on l'a vu notamment aux États-Unis, celui de l'impact de la météorite, n'est pas nié. Ce qui est contesté, c'est sa généralité et sa prééminence, le fait qu'il aurait à lui seul suffi à expliquer l'extinction des dinosaures. Un modèle plus ancien et encore évoqué par certains paléontologues propose que les grands mouvements de régression et de transgression du niveau des océans seraient associés à des phases plus lentes d'extinction. Il existe des données qui appuient cette hypothèse, comme de lents « gradients d'extinction » au cours des millions d'années qui ont précédé la fin du Crétacé. Les régressions supprimeraient de vastes écosystèmes, riches de biodiversité, dans le domaine marin peu profond. La surface continentale exposée modifierait par ailleurs le climat, devenu plus contrasté et extrême (climat continental renforcé). La dynamique du globe peut assez aisément expliquer ces observations : le niveau des mers (en dehors des périodes où existent et fluctuent des calottes glaciaires, périodes rares dans l'histoire géologique) est principalement gouverné par l'activité interne du globe. Quand s'accélère la production de croûte océanique aux dorsales, celles-ci sont plus chaudes, moins profondes, et elles occupent un volume plus important au sein des océans, dont le niveau monte alors (transgression). Quand l'activité de convection du manteau ralentit, le niveau des crêtes des dorsales s'abaisse, leur profil topographique aussi et le niveau de l'eau baisse (régression). L'arrivée à la base de la lithosphère de la tête d'un panache, qui s'étale sur plusieurs millions d'années, traduit une modification (une instabilité) de la convection du manteau. Tectonique des plaques et montée des panaches, deux phénomènes convectifs ayant leur siège dans le même manteau et exprimant les étapes de son lent refroidissement, peuvent très bien être couplées. Les régressions seraient alors en relation avec un « assèchement » de la production par le manteau océanique de nouvelle croûte basaltique aux dorsales, donc avec un ralentissement du mouvement général des plaques, tandis que l'action se concentrerait à proximité de la tête du panache, près du futur lieu d'émission des traps.

Mon ami Philippe Taquet, grand spécialiste des dinosaures, me dit parfois de façon plaisante qu'il s'intéresse plus aux périodes pendant lesquelles ses animaux favoris étaient bien vivants qu'à celle,

brève, où ils se sont éteints en masse. Il existe encore nombre de paléontologues qui, impressionnés par la diversité des scénarios d'extinction qu'ils reconstituent patiemment, et par la multiplicité des mécanismes proposés par des collègues, « géoscientifiques » certes, mais en général pas paléontologues, préfèrent une attitude de prudence, voire de grande diplomatie. Pourquoi telle extinction ne serait-elle pas due à un astéroïde, telle autre à un volcan, telle autre encore à une régression marine ? Pourquoi chercher une solution unique, qui serait forcément, pensent certains, dogmatique ? Bref, pourquoi faire simple, quand c'est peut-être si compliqué⁹ ? Il me semble qu'une telle attitude contredit certaines bases de la démarche scientifique. Le « géoscientifique » moderne¹⁰ se doit de tenter d'expliquer l'ensemble de ses observations dans un modèle cohérent, aussi économique que possible (encore le « rasoir d'Occam¹¹ »).

Jusqu'en 1980, les théories de l'extinction en masse sont nombreuses, floues, pour la plupart non quantitatives et peu convaincantes. La notion même d'extinction n'intéresse en fait guère les paléontologues et les évolutionnistes, à l'image de Darwin qui ne leur consacre que quelques pages dans son ouvrage princeps, pour conclure que leur apparente soudaineté était due à notre incapacité à évaluer la profondeur réelle du temps géologique¹². La découverte de l'iridium dans les sédiments de la limite Crétacé-Tertiaire et la proposition par Alvarez père et fils de l'impact de la météorite font de 1980 une année fondatrice de l'histoire de l'étude des extinctions sur Terre. Le phénomène commençait à intéresser de plus en plus de gens, craignant que nous soyons nous-mêmes entrés dans une nouvelle phase d'extinction massive. En quelques années, les observations accumulées et les modèles construits par de nombreuses équipes rendent l'hypothèse de plus en plus solide. Au milieu des années 1980, la plupart des géoscientifiques modernes, après une phase traditionnelle et plus ou moins longue de résistance (suivant

9. Une exposition à la galerie de l'évolution du Muséum national d'histoire naturelle permettra en 2010 au grand public de poser ces questions et peut-être de trouver des éléments de réponse.

10. Voir note 6, chapitre 1.

11. Voir chapitre 3.

12. Notons que, vers 1833, Élie de Beaumont pense que « les analogies qui au premier aperçu nous feraient chercher, dans l'action volcanique proprement dite, la cause des révolutions de la surface du globe, doivent nous conduire finalement à chercher cette même cause dans les phénomènes beaucoup plus larges de la haute température intérieure de la Terre » (*in* Deparis et Legros, *op. cit.*, p. 280).

les individus et les disciplines), acceptent la validité générale de la théorie de l'impact. La découverte de l'âge et de la durée des traps du Deccan conduit mon équipe à remettre cette hypothèse en question. Convaincus de la réalité de nos analyses et découvrant petit à petit la généralité de la corrélation entre âges des traps et âges des extinctions, nous « changeons de camp » et constituons une « opposition », avec des scientifiques tels que Peter Vogt, Jason Morgan, Dewey McLean, Chuck Officer ou Chuck Drake. En vertu du rasoir d'Occam, il est alors naturel pour nous de rejeter dans un premier temps l'hypothèse de l'impact et d'imaginer que le volcanisme pourrait être seul responsable de toutes les anomalies observées. On découvre que les volcans de point chaud, Mauna Loa à Hawaï et le Piton de la Fournaise à la Réunion, émettent des gaz et des poussières enrichies en hexafluorure d'iridium d'origine volcanique interne. Certains proposent que de très puissantes éruptions pourraient soumettre les roches des parois à des chocs violents et leur arracher des minéraux, affectés de curieuses structures planaires de déformation que l'on pourrait ensuite observer au microscope électronique et qui révéleraient les chocs subis. Force est de constater que le volcanisme, même paroxysmal, n'est pas capable de produire de telles anomalies en telles quantités¹³. Et la découverte du cratère d'impact à Chixculub est également déterminante : on ne peut plus douter de la réalité et de l'âge de l'impact¹⁴. Face à ces deux familles d'obser-

13. Un jeune et brillant géophysicien, Jason Phipps Morgan, fils de Jason Morgan, a cependant proposé un modèle de dégazage profond, massif et violent du gaz carbonique de la tête d'un panache qu'il pense capable à lui seul d'expliquer l'ensemble des observations. Cette vue intéressante est contestée et pour l'instant très minoritaire. Elle mérite cependant d'être signalée.

14. Quoique, pour compliquer un peu les choses, ma collègue et amie la paléontologue Gerta Keller considère que les traces analysées dans des carottes forées non loin du site de l'impact montreraient qu'en fait il y a eu deux impacts : celui qui est lié au cratère aurait en fait 300 000 ans de plus que la limite et ne serait pas responsable des dépôts d'iridium. Ceux-ci seraient le produit d'un second impact, plus intense encore et dont le cratère n'aurait pas encore été trouvé. Cette interprétation est très contestée (par exemple par un autre spécialiste de paléontologie, Jan Smit), mais je n'ai pas réussi à trouver d'erreur manifeste dans l'article dans lequel Keller expose ses observations et son raisonnement. Je me contente de ne pas pouvoir croire au fait que (en plus du volcanisme du Deccan) soient arrivées sur Terre en 300 000 ans, donc sans relation causale possible entre elles, deux météorites : l'une, dont le cratère a été retrouvé, qui est déjà la plus grosse trouvée sur Terre pour la période Phanérozoïque, et dont la probabilité de chute (pour ce diamètre) est estimée à moins d'une par 100 millions d'années, l'autre, dont la probabilité serait plus faible encore, non encore trouvée. Une pour le cratère de Chixculub, une pour l'iridium. C'est vraiment « cher » et la probabilité conjointe me paraît évanescence...

vations désormais incontournables, il fallait d'abord estimer la probabilité *a priori* de l'occurrence simultanée des deux types de catastrophe. Si l'on admet qu'un trap émerge en gros tous les 25 ou 30 millions d'années et que son éruption peut s'étaler sur un million d'années, tandis qu'une météorite de la taille de celle qui a creusé le cratère de Chixculub survient tous les 100 millions d'années, on trouve une probabilité de 3 % que la météorite tombe pendant qu'un trap est actif. C'est petit, mais pas minuscule. En revanche, la probabilité qu'il y ait deux coïncidences sur, disons, 200 millions d'années, est minuscule. En tout cas, les observations sont des observations, pas une probabilité : l'éruption des traps du Deccan et l'impact de la météorite de Chixculub se sont bien produits sur Terre il y a 65 millions d'années.

L'étape suivante consistait à ne pas se contenter de la seule limite Crétacé-Tertiaire, mais à explorer soigneusement les autres limites. Nous avons vu (même si certains le contestent sans doute dans le détail) qu'à chaque extinction massive correspondait un trap, et ce jusqu'à au moins 300 millions d'années dans le passé géologique, qu'à chaque trap ou presque correspondait soit une extinction majeure, soit une extinction mineure, soit un événement global d'anoxie océanique. Seule « exception », les traps de la rivière Columbia, dix fois plus petits que les autres et dont il n'est donc pas étonnant qu'ils n'aient pas laissé de trace paléontologique (et encore, certains pensent les associer à un événement du milieu du Miocène). En revanche, un seul impact, à la limite Crétacé-Tertiaire, a laissé des traces indubitables et bien d'autres impacts observés n'ont pas laissé la moindre trace paléontologique. Je redis qu'il suffirait de la démonstration qu'un autre impact coïncide avec une autre extinction majeure pour que cette théorie doive être revue. Je réaffirme également qu'à ce jour aucune preuve de ce type n'a été apportée et que les quelques propositions faites souffrent de problèmes fatals, voire sont purement et simplement démonstrablement fausses.

Pour conclure cette revue des relations entre volcanisme des traps et extinctions, je considère qu'aujourd'hui, et cela beaucoup plus solidement que lorsque je publiai *La Vie en catastrophes* il y a un peu plus de dix ans, la théorie qui tient la corde pour expliquer les extinctions en masse et qui les explique de la façon la plus générale, est la théorie volcanique. En décembre 2008, au colloque annuel de l'American Geophysical Union, nous avons pu organiser

une séance spéciale de la section de Volcanologie sous le titre « Grandes provinces ignées, extinctions en masse, impacts et changements globaux de l'environnement ». Cette séance, parrainée par six autres sections de l'AGU (Changements globaux de l'environnement, Sciences de l'océan, Paléo-océanographie et paléoclimatologie, Sismologie, Tectonique et Études de l'intérieur de la Terre), a rassemblé plus de cinquante communications et a été précédée d'une conférence de presse dont de nombreux médias ont rendu compte (dont le *San Francisco Chronicle* en première page le lendemain). La majorité de ces nouveaux travaux venait confirmer notre modèle et apporter de l'eau à notre moulin : brièveté des éruptions des traps de Columbia, des traps d'Éthiopie (en moins de 200 000 ans), des traps de la province de l'Atlantique central, liens confirmés et précisés entre traps et changements majeurs de l'environnement dans le cas des traps d'Éthiopie, Nord-Atlantiques, Caraïbes, d'Ontong-Java, de la province de l'Atlantique central, de Sibérie...

Régressions marines, événements d'anoxie, crises de méthane, pluies acides, modifications majeures de l'environnement et du climat peuvent tous être associés directement ou indirectement, de manière donc causale, à un mécanisme unique, qui implique la convection du manteau terrestre. La théorie de l'impact n'en est pas pour autant invalidée, mais son importance réelle apparaît sensiblement diminuée. Elle n'a pas de valeur générale. C'est parce que l'impact s'est produit pendant l'éruption d'un trap qu'il a eu une pareille importance biologique. Il y a fort à parier que s'il était tombé hors d'une telle période, il n'aurait pas eu cet effet véritablement apocalyptique qu'on nomme « extinction en masse ». Ce qui ne veut pas dire qu'il n'aurait pas eu localement d'effet dévastateur. Comme on le voit, il existe un modèle raisonnable, simple et puissant, d'explication des extinctions dans leur généralité¹⁵. Certes, ce modèle doit encore être consolidé. Il reste de quoi faire. Mais il n'est pas besoin pour l'instant de faire plus compliqué...

15. Nous avons vu plus haut que de très grands impacts ont dû se produire au cours du premier milliard d'années de l'histoire de la Terre. Mais pas au cours du dernier milliard d'années...

Chapitre 19

DU NOYAU À LA VIE

« Alors, comme un enfant, je fermai les yeux pour ne pas voir toute cette obscurité. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Nous voici près du terme de notre voyage. Après nous être interrogés sur les divagations et les soubresauts dont l'atmosphère serait le siège, nous avons entamé un voyage vers les profondeurs. Nous avons plongé par la pensée avec les plaques tectoniques de la ceinture de feu du Pacifique dans le manteau de la Terre. Avec ces plaques, nous avons heurté la zone où les minéraux se transforment, deviennent plus compacts, un peu avant 700 km de profondeur. Nous avons poursuivi notre descente au sein, immensément visqueux, du manteau inférieur, pour atteindre la couche qui tapisse son fond. Cette couche D'', dynamique, hétérogène, complexe, et à vrai dire encore mal connue, joue sans doute un rôle essentiel dans les échanges de chaleur entre ce manteau et le noyau sur lequel il repose, donc dans le fonctionnement du système Terre. Certains, comme Clément Narteau, Jean-Louis Le Mouél et Jean-Paul Poirier, la voient comme une surface tourmentée à travers laquelle percolent, s'interpénètrent et réagissent chimiquement silicates et fer liquide.

Nous avons fait une incursion dans ce noyau liquide, brassé par des courants cent mille fois plus violents que ceux qui brassent le manteau, siège du mystérieux champ magnétique qui protège la biosphère terrestre des effets délétères des rayons cosmiques galactiques. Nous avons frôlé la surface de la graine de fer solide presque pur qui, dans quelques milliards d'années, occupera tout le volume du noyau. Nous avons rebroussé chemin avant d'atteindre le centre de la Terre, où règnent 3,6 millions de fois la pression atmosphérique et une température de plus de 5 500 °C, et nous avons entrepris de remonter vers la surface.

Nous avons retraversé la couche D''. Couche limite à la fois chimique et thermique, domaine de la phase minérale « post-pérovskite » tout récemment découverte, peut-être cimetière des derniers résidus engloutis des plaques subductées à la suite de grandes « avalanches », peut-être résidu d'un antique océan de magma. Lieu de naissance d'une foule d'instabilités, dont nos fameux panaches à l'origine des points chauds. La plupart de ces panaches vont sans doute s'enliser dans le manteau inférieur. Mais certains vont le traverser, tels les deux gigantesques super-panaches antipodaux sous le Pacifique et l'Afrique. D'autres panaches, disposés en couronne autour des super-panaches, plus fins mais puissants, vont percer la zone de transition et émerger, comme à Hawaï ou à la Réunion. Après avoir, lors de leur violente naissance, brûlé et fracturé la lithosphère et vomi les grands traps basaltiques, ils vont, au fil de la dérive des plaques, former les grandes chaînes de volcans sous-marins qui aboutissent aux actuels volcans des points chauds actifs. Ce manteau supérieur, qu'ont traversé les panaches, est la partie la plus active du manteau terrestre ; c'est la source de la tectonique des plaques, qui ne sont que la partie émergée de grandes cellules de convection, principal « évacuateur » de la chaleur terrestre.

Les sources d'énergie de cette grande machine thermique sont multiples. Lente évacuation de la chaleur accumulée par les impacts qui ont formé la Terre, il y a 4,5 milliards d'années, de la chaleur libérée par la chute des éléments lourds comme le fer vers son centre et par la cristallisation de la graine, et surtout par la désintégration des éléments radioactifs. La Terre a choisi presque partout le moyen le plus efficace pour évacuer cette chaleur : la *convection*, rendue possible dans le manteau parce que les roches y sont suffisamment chaudes et proches de la fusion pour fluer. Quant au noyau externe, c'est tout simplement un liquide. La chaleur n'est transmise par *conduction*, moins efficace, qu'à travers trois assez minces « couches limites », en première approximation imperméables à la convection : la couche D'', la zone de transition entre 670 et 440 km, et la lithosphère en surface. Chauffé par le dessous, refroidi par le dessus, chauffé par l'intérieur, le manteau est même en convection très vigoureuse, comme l'indique son nombre de Rayleigh plus de 10 000 fois supérieur à la valeur critique nécessaire pour qu'elle s'amorce.

Le moteur principal des mouvements des plaques en surface (donc la source première des séismes et des éruptions volcaniques qui les accompagnent) est tout simplement la force d'Archimède, qui tend à faire sombrer les corps plus denses et surnager les plus légers dans le champ de pesanteur de la planète. Les plaques qui s'enfoncent dans les zones de subduction forment des langues froides qui tirent l'ensemble vers le bas. Les plaques elles-mêmes masquent en partie l'expression de surface de la plupart des panaches profonds. Seuls les plus vigoureux émergent aux volcans de points chauds. L'influence de la géographie des plaques en surface, fortement dissymétrique, se fait sentir dans tout le manteau supérieur, et sans doute jusqu'au fond du manteau. Ses mouvements résultent donc de cette compétition entre plaques plongeantes, froides, et instabilités profondes et montantes, chaudes...

Une question lancinante, qui agite toujours la communauté des géophysiciens et des géochimistes, est celle des liens entre convection dans les deux parties du manteau, inférieure et supérieure. Des arguments géochimiques conduisent à séparer nettement le domaine du manteau qui est source des basaltes des dorsales océaniques de celui qui produit les îles océaniques, donc les points chauds. Le premier est relativement superficiel, celui des points chauds plus profond : il doit être situé à la base du manteau supérieur ou même en dessous. Les deux ne semblent pas communiquer. En revanche, pour les géophysiciens spécialistes de tomographie sismique, les plaques en subduction sont, au moins dans certains cas, capables de s'enfoncer profondément dans le manteau, parfois jusqu'à la couche D'', et les panaches de relier cette couche D'' à la surface. La réponse est sans doute que la pénétration de matériel du manteau supérieur vers le manteau inférieur (subductions) et celle du manteau inférieur vers le manteau supérieur (panaches) sont rares mais réelles. Dans le bilan moyen, à long terme, que voient les géochimistes, l'effet de ce mélange serait négligeable. En revanche, quand il se produit, de manière épisodique et violente, son rôle dynamique est important, qu'il s'agisse d'avalanches de plaques froides vers le noyau ou de la montée de grands panaches vers la surface. La dichotomie terrestre, avec un hémisphère Pacifique océanique et un hémisphère opposé qui rassemble tous les continents, n'est pas verticale, fonction de la profondeur, mais « horizontale », fonction de la géographie. Elle se maintient sans doute depuis au moins 200 millions d'années, peut-

être beaucoup plus. Le rideau froid des zones de subduction, division fondamentale de la structure terrestre, isole des réservoirs profonds géochimiquement distincts.

Les expériences de laboratoire, la théorie de la mécanique des fluides et les calculs sur ordinateur permettent d'explorer les régimes de la convection dans des conditions que l'observation directe de la Terre ne permet pas d'atteindre.

Les plaques tectoniques, relativement minces, deviennent instables quand elles sont vieilles et froides, et plongent dans le manteau en suivant la forme allongée des arcs. On observe bien, dans les expériences, des « rideaux subductants ». Les flux de matière descendants sont compensés par des flux ascendants. Les immenses « super-panaches » y contribuent. L'expérience nous montre qu'un fluide chauffé par le bas évacue une partie de sa chaleur par le biais d'instabilités verticales, les panaches. Ces panaches ne peuvent prendre naissance que dans une couche limite. Leur vitesse d'ascension atteint le mètre par an. Ce sont les têtes gigantesques des plus grands panaches qui ont produit les grands traps. Il n'en existe aucune qui soit active à présent. La plus récente est celle qui a donné naissance aux traps de Columbia, il y a 15 millions d'années. Un argument simple m'amène à penser que les plus grands panaches ont bien leur origine à la base du manteau. Pour produire un trap de 5 millions de kilomètres cubes, les pétrologues nous disent qu'il faut fondre dix fois plus de matière, donc 50 millions de kilomètres cubes de matériel mantellique. Cela implique pour une sphère un diamètre de 500 km : elle occupera donc tout le manteau supérieur. Je ne vois pas comment faire naître une telle instabilité à partir de la zone de transition elle-même ; il n'y a tout simplement pas la place. En revanche, si le panache part de la frontière entre noyau et manteau, il n'y a plus de problème d'« encombrement ». Les tout récents progrès de la tomographie du groupe de Princeton permettent d'ailleurs désormais de constater que certains panaches s'enracinent bien jusqu'à la base du manteau.

Je pense avoir trouvé récemment un indice supplémentaire, pour moi très convaincant, de la connexion entre le noyau et la surface de la Terre. Au cours des quelque 550 millions d'années qui se sont écoulés depuis l'explosion cambrienne de la vie, la fréquence avec laquelle s'inverse le champ magnétique n'a cessé de fluctuer, dans des proportions très importantes (Figure 19-1).

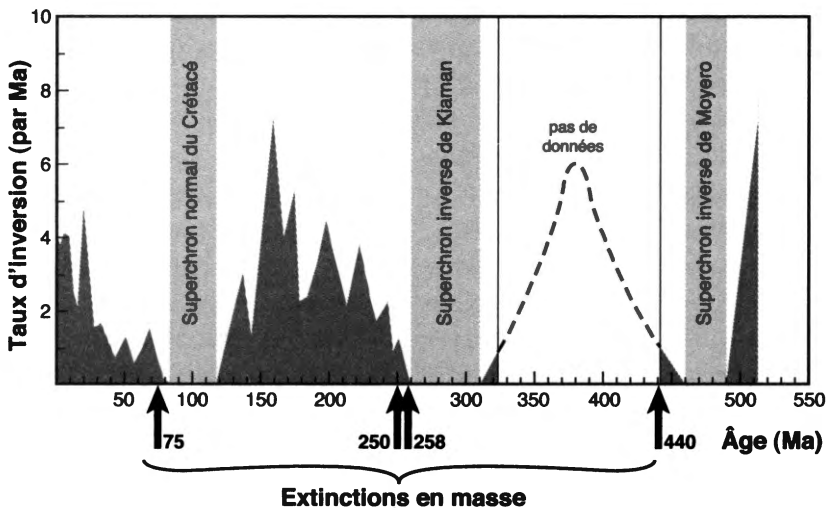


Fig 19-1 : Évolution de la fréquence des inversions du champ magnétique et extinctions massives depuis 550 millions d'années (d'après l'auteur et P. Olson). Les trois phases d'extinction les plus massives (fin de l'Ordovicien il y a 440 millions d'années, fin du Guadalupien et du Permien il y a 258 et 250 millions d'années et fin du Crétacé il y a 65 millions d'années) suivent de quelques millions d'années la fin des trois « superchrons », périodes de plusieurs dizaines de millions d'années au cours desquelles le champ magnétique terrestre avait cessé de s'inverser. Pour nous, c'est un argument fort pour lier les deux de manière causale à travers l'ascension puis l'éruption de grands panaches du manteau aboutissant à des éruptions de traps (voir texte). Les traps sont identifiés dans trois des quatre cas (seuls ceux de la fin de l'Ordovicien, peut-être détruits, n'ont pas encore été retrouvés).

Entre 120 et 80 millions d'années, le champ est resté imperturbablement dans la polarité normale : c'est le « superchron du Crétacé ». Les inversions étaient assez fréquentes auparavant, notamment au cours du Jurassique. Mais une autre période « calme », inverse celle-là, le « superchron de Kiaman », a régné d'environ 320 à 260 millions d'années pendant le Carbonifère et une partie du Permien. En étudiant des séries de roches sibériennes datées du Cambrien et de l'Ordovicien, Yves Gallet et Volodya Pavlov ont montré l'existence d'un épisode antérieur de polarité inverse, le « superchron de Moyero », entre 490 et 460 millions d'années. Trois fois donc, le champ a cessé de s'inverser pendant des dizaines de millions d'années. Ces trois superchrons m'apparaissent comme des événements absolument anormaux et non comme des intervalles de polarité stable seulement un peu longs... Il semble que quelque chose se soit passé dans l'évolution de la dynamo terrestre. Ce n'est pas tout : R. K. Bambach, A. Knoll et S. C. Wang

ont réanalysé les propriétés statistiques de l'intensité des extinctions en masse des espèces. Ces auteurs trouvent que la plupart des extinctions forment une population aléatoire et homogène, à l'exception de quatre extinctions qui paraissent extrêmes, anormales : celles du Crétacé-Tertiaire, du Permien, du Guadalupien et de la fin de l'Ordovicien. Comme on l'a vu, les deux extinctions du Permien et du Guadalupien sont rapprochées dans le temps et forment un couple. Il y a donc au cours du Phanérozoïque trois périodes exceptionnelles dans le comportement magnétique du noyau, qui s'achèvent respectivement vers 80, 260 et 460 millions d'années, et trois périodes d'extinction exceptionnelles qui se produisent vers 65, 250-258 et 440 millions d'années. On peut donc associer ces trois paires d'événements un à un¹ ; le décalage entre reprise des inversions du champ dans le noyau et extinction est de l'ordre de 5 à 20 millions d'années (impossible en l'état des choses d'être plus précis). La probabilité de coïncidence par hasard de deux séries de trois événements de ce genre au cours des derniers 550 millions d'années de l'histoire de la Terre est voisine de zéro.

On sait que les espèces ont traversé sans encombre les nombreuses inversions du champ magnétique terrestre, qui ne peuvent donc être la cause de fortes modifications biologiques. Le champ magnétique protège sans doute des rayons cosmiques la vie sur Terre, mais son affaiblissement lors des inversions n'est pas suffisant pour entraîner des extinctions. Si relation de nature causale il y a entre fréquence des inversions du champ et extinction d'espèces, quel peut bien en être le mécanisme ? Voici une piste.

Quand, depuis des dizaines de millions d'années, le champ magnétique est figé dans une polarité, il ne dispose pas de l'énergie nécessaire pour s'inverser. Le noyau est cependant toujours agité de puissants mouvements de convection qui apportent de la chaleur sous la base du manteau. Cette chaleur est transmise aux roches de la couche D'', dont la température moyenne croît tandis que sa viscosité décroît. Au bout d'un certain temps, la couche devient instable et des panaches se forment. Dès que ces panaches se sont détachés, l'épaisseur de la couche D'' chute. Or le flux de

1. À chacune des trois dernières très grandes phases d'extinction en masse correspond un grand trap (Deccan, Sibérie, Emeishan). Il est tentant, nous l'avons déjà dit plus haut, de faire l'hypothèse qu'un autre grand trap a dû également causer la grande extinction de la fin de l'Ordovicien.

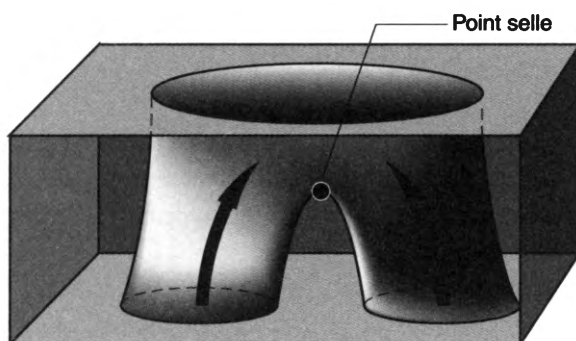
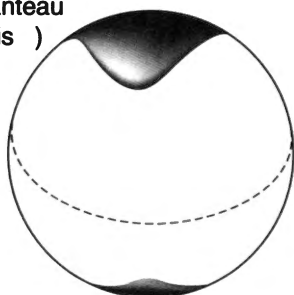
chaleur extrait du noyau pour être injecté à la base du manteau et qui traverse la couche D'' est fonction inverse de son épaisseur. Quand celle-ci décroît, le flux de chaleur augmente, et avec lui l'énergie fournie à la dynamo du noyau. Ce surplus d'énergie relance la production d'inversions par cette dynamo. De leur côté, les panaches s'élèvent dans le manteau, pour aboutir à l'éruption de traps géants, responsables des modifications chimiques et climatiques qui entraîneront une extinction massive des espèces. Voilà comment, avec Peter Olson, nous avons proposé d'interpréter le lien entre inversions et traps. Ce sont les échanges de chaleur entre noyau et manteau qui en sont les causes premières. Nous avons pu montrer que ce mécanisme était compatible avec notre compréhension actuelle du fonctionnement de la dynamo dans le noyau².

Seuls les panaches les plus puissants issus de la couche D'' (et il ne s'en produit qu'un tous les 30 millions d'années environ) réussissent à traverser la zone de transition puis à affecter la lithosphère au point de conduire à l'éruption d'un trap (et souvent à l'ouverture d'un nouveau bassin océanique). Le manteau est donc bien isolé en deux couches la plupart du temps, mais cette séparation est susceptible de quelques ruptures, soit lors de l'ascension des panaches primaires, soit lors des épisodes d'avalanche des plaques en subduction. Pour ce qui est des panaches, leur volume et leur fréquence sont trop faibles pour affecter de manière significative la chimie du manteau supérieur, expliquant ainsi les observations des géochimistes. La circulation globale qui résulte de cette reconstitution de la convection, de symétrie quadrupolaire, est cohérente. Mais elle pose un problème de poule et d'œuf : est-ce que ce sont les avalanches de plaques froides qui déclenchent les super-panaches ou l'inverse ? Les super-panaches se forment spontanément, sans qu'il soit besoin de les déclencher, et oscillent avec une période de l'ordre de 200 millions d'années, la constante de temps caractéristique du cycle de Wilson.

Restons encore un moment sur les symétries de la convection terrestre. Nous avons insisté sur l'opposition à la surface du globe de deux hémisphères dont beaucoup de propriétés apparaissent distinctes, et ce depuis un temps géologique long. Mais la géomé-

2. V. Courtillot et P. Olson, « Mantle Plumes Link Magnetic Superchrons to Phanerozoic Mass Depletion Events », *Earth Planet. Sci. Lett.*, 260, 495-504, 2007.

Géométrie des plaques
au sommet du manteau
(balle de tennis)



Convection à la base
du manteau
(quadrupôle)

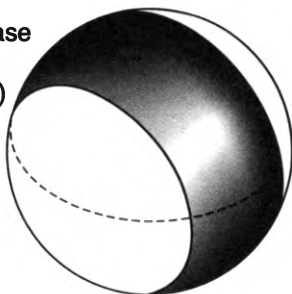


Fig 19-2 : La topologie des frontières de plaque ressemble à la couture d'une balle de tennis (en haut, et voir figure 4-1) qui partage la surface de la Terre en deux. La topologie de la convection à la base du manteau est celle d'un quadrupôle, proposé par Busse (en bas, et voir figure 10-4) ; elle partage la base du manteau en trois parties. Comment relier ces deux géométries très différentes de façon simple ? Luc-Emmanuel Ricou a proposé de le faire par le biais d'une structure en forme de « short » (au milieu), qu'il faut ensuite envelopper par la pensée sur la sphère.

trie des zones de subduction et des dorsales n'est pas celle d'un quadrupôle (le « degré deux »). Xavier Le Pichon a depuis longtemps souligné le fait que ces frontières de plaques ressemblaient plutôt à la couture d'une balle de tennis. La ceinture de feu du Pacifique n'est en effet pas refermée sur elle-même. Elle se prolonge par la zone de subductions et de collisions le long de laquelle se forment l'Himalaya et les chaînes alpines, c'est-à-dire la zone d'affrontement entre Eurasie au Nord et Inde, Arabie et Afrique au Sud. Quant aux dorsales de l'Est Pacifique, elles se prolongent par le sud et l'ouest dans le Pacifique Sud, puis l'océan Indien, et font le tour par le sud de l'Afrique pour se faufiler tout au long de l'océan Atlantique. Le problème géométrique qui se pose à la convection du manteau est de réconcilier la topologie « en balle de tennis » des frontières de plaques en surface, et la géométrie « en quadrupôle » de la convection du manteau profond (Figure 19-2).

Comme l'avait fait remarquer mon « maître en paléomagnétisme », Allan Cox, le manteau terrestre est pris entre deux « atmosphères » fluides et turbulentes. En dessous, le noyau de fer liquide, agité de mouvements chaotiques et siège du champ magnétique. Au-dessus, la véritable atmosphère et l'océan, autres enveloppes fluides aux constantes de temps beaucoup plus rapides, sièges du climat et habitat des espèces vivantes. Cox suggérait qu'aux « gyres » des océans et aux cyclones et anticyclones de l'atmosphère pouvaient correspondre dans le noyau des cyclones et anticyclones, dont certaines configurations critiques auraient pu entraîner les instabilités du champ magnétique, excursions et inversions... Nous avons vu en effet combien le transfert de chaleur du noyau au manteau était déterminant dans la création du champ magnétique et dans la dynamique de la couche D''. Nous avons aussi vu que la Terre interne, solide, pouvait avoir un effet beaucoup plus important qu'on ne le pense en général sur les enveloppes fluides. Et que certains phénomènes qu'étudie la géologie sont moins placides qu'on ne le croit souvent...

Chapitre 20

UNIFORMITÉ, CATASTROPHES ET LOIS D'ÉCHELLE

« Regarde, me dit-il, et regarde bien ! Il faut prendre des leçons d'abîme ! »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

La grande question qui a agité la géologie à la fin du XVIII^e siècle et pendant tout le XIX^e a été l'opposition entre visions catastrophiste et uniformitariste des phénomènes naturels interne à la Terre. De nombreux auteurs ont exposé ce débat (que j'ai moi-même évoqué dans *La Vie en catastrophes*). Heureusement pour le développement des sciences de la Terre, c'est la vision uniformitariste qui a triomphé : les observations de la géologie ne doivent être expliquées qu'à l'aide de processus physiques et chimiques connus, et qui se produisent sous nos yeux (c'est le « principe des causes actuelles »). Dix centimètres par an, c'est 1 000 kilomètres en 10 millions d'années, un temps géologique qui n'est pas long. L'Himalaya et les Alpes continuent à se former « sous nos yeux », l'océan Atlantique et la mer Rouge à s'ouvrir, Los Angeles à coulisser vers le nord par rapport à San Francisco, la Turquie (avec la faille nord-anatolienne) et le Moyen-Orient (avec la faille du Jourdain) à être cisailés inexorablement. Sur ces points, les uniformitaristes ont manifestement raison. Mais l'uniformitarisme est vite devenu dogme, dans une version étroite qui voulait que les vitesses et les amplitudes des phénomènes géologiques n'aient jamais été différentes des valeurs observées aujourd'hui. Or qui nous dit que la Terre n'est pas capable de réactions plus intenses ou plus rapides que ce que la brève histoire de l'Homme lui a permis d'enregistrer ? C'est ce qu'a très vite compris William Whewell¹. Le message devait

1. Dans les années 1830, Whewell exprime ces vues de façon claire et moderne, quand il déclare que les lois naturelles et les processus géologiques sont universels dans leurs aspects physiques et chimiques, mais que nul ne peut garantir la constance de la vitesse avec laquelle ils s'appliquent : « Comment pouvons-nous maintenir

attendre la théorie de l'impact de la météorite des Alvarez pour être ressuscité.

Pour ce qui est des séismes, il n'est pas impossible que nous ayons eu en seulement un siècle un bon aperçu de ce que la Terre est capable de produire de plus fort. Trois séismes ont dépassé la magnitude de 9 depuis un peu plus de cent ans que nous les enregistrons². Un séisme de magnitude 9 correspond à la rupture de *toute* la partie rigide, élastique et fragile de la plaque lithosphérique. On ne peut pas faire plus ! Il est donc probable que la Terre ne puisse produire de séisme de magnitude très supérieure à 9. Ce raisonnement ne s'applique ni aux impacts d'astéroïdes ni aux éruptions volcaniques basaltiques. Quelques siècles seulement n'ont pas permis d'en échantillonner toutes les tailles possibles. Un million d'années n'y suffirait même pas !

Il y a beaucoup plus de petits impacts que de gros, et ceux-ci suivent, comme les séismes, une « loi d'échelle » : une particule de 1 millimètre atteint la Terre toutes les 30 secondes (ce qui donne les étoiles filantes), un objet d'un mètre une fois par an, un objet de 100 mètres, comme celui qui a creusé le Meteor Crater en Arizona, une fois tous les 10 000 ans, et ainsi de suite... Depuis la dernière fonte des glaces, l'Homme n'a donc guère eu l'occasion de voir se former pareil objet, qui échappe à l'expérience uniformitariste *stricto sensu*. Par extrapolation de cette loi, on estime que peut s'écraaser sur Terre un objet de 10 km de diamètre, comme celui qui a creusé le cratère de Chicxulub, tous les 100 à 500 millions d'années. Il n'est donc pas étonnant que les tenants de l'uniformitarisme dogmatique aient résisté dans un premier temps à l'hypothèse des Alvarez.

Il n'est pas étonnant non plus que l'hypothèse du volcanisme ait eu du mal à s'imposer. Les traps ne suivent cependant pas une loi d'échelle. Il y a peu d'épanchements volcaniques de taille intermédiaire entre la coulée du Laki (15 kilomètres cubes) et les traps de Columbia (de l'ordre de 100 000 kilomètres cubes). La raison en est qu'ils ne sont pas produits par le même processus. Les épanchements d'Islande ou d'Afar sont typiques des éruptions qui se produisent tout au long des dorsales océaniques, sous l'effet de l'extension passive de la croûte. Les grands traps sont formés par

que l'homme a été suffisamment longtemps un observateur pour connaître la moyenne des forces qui changent à travers des temps incommensurables ? »

2. Ce sont ceux du Chili en 1960, d'Alaska en 1964 et de Sumatra en 2004.

la fusion partielle de l'énorme tête de panaches issus des profondeurs du manteau. Ceux qui atteignent la base de la lithosphère sont « filtrés » par elle. Les plus petits ne sont pas capables d'arriver jusqu'en surface. Les plus gros « passent », mais il existe une taille maximale qui est sans doute limitée par la quantité d'énergie disponible et la physique des couches du manteau impliquées. Cela explique pourquoi tous les traps ont en gros la même taille, entre 1 et 10 millions de kilomètres cubes de basalte.

Que signifie donc l'uniformitarisme pour un phénomène géologique qui ne se produit que tous les 30 millions d'années environ ? Whewell avait été visionnaire en nous invitant à la modestie : notre espèce est trop récente pour avoir « échantillonné » un tel phénomène... Si je défendais en 1995 dans *La Vie en catastrophes*, avec encore une certaine circonspection, la théorie volcanique proposée en 1986, je n'ai plus aujourd'hui beaucoup de doutes sur le fait qu'elle résume l'essentiel de nos observations. La corrélation temporelle entre extinctions en masse et épisodes de traps n'a cessé de s'enrichir et de se préciser, au point qu'il n'est plus une seule extinction majeure des 300 derniers millions d'années qui n'ait son « trap associé ». L'impact de la limite Crétacé-Tertiaire ne fait pas de doute, mais il est le seul dont la réalité soit démontrée. Il est tombé sur une Terre en pleine catastrophe volcanique, avec l'éruption des traps du Deccan.

Les échelles de temps et d'espace qu'impliquent les sciences de la Terre sont immenses, bien au-delà de l'expérience humaine. Les moyens informatiques modernes permettent d'entreprendre des « expériences numériques » dans lesquelles on simule la réalité, et l'on profite de la puissance et de la vitesse des ordinateurs pour tenter de reproduire en accéléré et à petite échelle les complexes phénomènes naturels. Il faut bien sûr pour cela qu'on en ait saisi les mécanismes physiques et chimiques (et désormais souvent aussi biologiques) et qu'on ait pu les exprimer par des équations qu'on demande à l'ordinateur de résoudre. L'informatique moderne a ainsi permis aux géosciences des avancées très importantes. Mécanisme de rupture des failles, éruption des chambres magmatiques, convection du manteau, images tomographiques, autant de produits qu'on n'aurait pu obtenir autrement³. Le cas du

3. Quoique, par les expériences au laboratoire, analogiques ou « mises à l'échelle », on puisse faire des merveilles...

volcanisme récent du Laki nous a fait apparaître le rôle primordial du soufre dans les modifications de l'environnement, et nous avons vu comment on pouvait en donner une modélisation numérique. On est en droit d'espérer que les modèles numériques des climatologues nous permettront bientôt de passer de l'échelle du Laki à celle, gigantesque, des traps et de nous faire une idée plus précise des conséquences de l'injection massive de gaz à une telle échelle. Ce travail a été amorcé dans notre équipe par Frédéric Fluteau et ses étudiants. Il ne faut cependant jamais perdre de vue que ces moyens informatiques puissants doivent rester un outil, esclave du retour vers la réalité, vers l'observation.

Il est désormais possible de fabriquer une planète virtuelle, numérique, de lui donner lithosphère, manteau et noyau, d'y créer de la convection, de la différenciation chimique, un champ magnétique, de calculer ce qu'on devrait observer en surface en matière de magnétisme, de gravimétrie, de volcanisme, de topographie... On peut alors recueillir ces « données d'observation » virtuelles, les analyser, les « inverser » pour retrouver la structure interne de la planète virtuelle. On peut à l'infini faire varier les dizaines de paramètres impliqués et représenter les résultats sous forme de superbes images en couleur, très (trop ?) parlantes. On peut ainsi imaginer une carrière de géophysicien passée à travailler sur des planètes virtuelles. Cette vision est évidemment caricaturale, mais elle met en évidence un réel danger. Comme bien d'autres progrès technologiques, l'ordinateur peut être le meilleur ou le pire ami de l'Homme. Et quand son accès devient si aisé, la tendance est parfois forte de pencher plutôt pour le pire...

De plus en plus nombreux sont ceux qui tirent la sonnette d'alarme devant le danger croissant de modélisations numériques trop complexes pour être convenablement maîtrisées. Tout récemment, par exemple, Doron Nof de l'Université d'État de Floride soulignait⁴ que la résolution atteinte par les modèles globaux de climat les plus modernes est si élevée que certains de leurs auteurs en viennent à les considérer comme des vérités absolues. Nous avons évoqué au début de cet ouvrage un article récent d'Isaac Held qui ne dit pas autre chose quand il souligne les dangers d'un trop large fossé entre simulation et compréhension d'un problème. Held souligne que la complexité du système climatique nous

4. EOS, vol. 89, n° 52, 544-545, 2008.

empêche encore de construire des théories qualitatives simples et convaincantes pour répondre aux questions qui se posent. Les modèles numériques sont parfois plus élaborés, plus complexes qu'il ne serait nécessaire. Richard Lindzen et d'autres grands climatologues partagent ce point de vue. Et ce qui est valable pour la modélisation climatique l'est naturellement pour la modélisation géophysique.

Il ne faut jamais oublier l'importance primordiale de l'observation (et du bon sens). Voici plus qu'une anecdote : le médecin hongrois Philippe Ignace Semmelweis avait découvert à Vienne en 1848 les méfaits du manque d'hygiène dû aux microbes, alors encore inconnus. Dans sa thèse sur ce médecin, Louis-Ferdinand Céline s'étonne⁵ de ce que les médecins du temps préférèrent le combattre plutôt que de se rendre à l'évidence de ses observations : en un mois, Semmelweis avait fait tomber le pourcentage moyen des femmes atteintes de fièvre puerpérale de 30 % à moins de 1 %. Céline cite fort à propos cette phrase de Stuart Mill : « S'il s'était trouvé que les vérités géométriques pussent gêner les hommes, il y a longtemps qu'on les aurait trouvées fausses. »

Géologues, géochimistes et géophysiciens, nous sommes là pour tenter de mieux pénétrer les secrets de la vraie Terre (et de ses sœurs planétaires). Il y a là bien suffisamment de matière, de travail, et de sources d'excitation. La base, ce sont les données d'observation, directes ou indirectes. Données de terrain (où qu'il soit situé, il faut y aller), données provenant de sondes (surface des planètes du système solaire), de satellites ou d'instruments posés à la surface de la Terre, analyses faites au laboratoire sur des échantillons rapportés du terrain (et cela vaut pour les autres planètes dans la mesure du possible), expériences menées sur ces échantillons ou sur des matériaux analogues, pour lesquels cette analogie peut être établie sur des bases physiques et chimiques. Cette moisson obtenue, il est possible de formuler des hypothèses, des modèles et, dans certains cas, de répondre, au moins en partie, à la question que l'on s'était posée. C'est bien sûr savoir choisir la bonne question, savoir la formuler, qui est l'étape essentielle et souvent la plus difficile du travail scientifique. Alors, la question une fois posée, les observations faites, le modèle en cours de construction, l'outil informatique peut se révéler plus qu'utile, puissant,

5. L.-F. Céline, *Semmelweis*, Paris, Gallimard, « L'Imaginaire », 1999.

parfois indispensable. Dans certains cas, il permet d'espérer atteindre des dimensions spatiales et des durées auxquelles nous n'aurons jamais un accès direct. Mais avant de se jeter sur l'ordinateur, il est essentiel d'acheter son ticket d'entrée dans ce « grand jeu » en acquérant la maîtrise du terrain et de l'observation, en apportant à la communauté des collègues une brassée de données nouvelles, aussi solides que possible, et qui resteront, si elles sont de qualité, bien après que les modèles qu'on en aura déduits et les simulations numériques qu'on aura pu faire auront été oubliés.

CONCLUSION

Mieux comprendre le système complexe que constitue notre planète, où la matière est si dynamique et la vie si dépendante de la matière, n'est possible que par un dialogue ouvert entre tous les champs du savoir. L'aller-retour constant entre l'observation, l'expérience, la théorie, la modélisation, sans qu'aucune n'asservisse les autres... L'interdisciplinarité, terme un peu galvaudé et pourtant indispensable. L'émerveillement de la découverte est à ce prix.

Notre Terre est un système complexe, aux multiples enveloppes aux propriétés si différentes. Malgré leurs différences et leur éloignement, nous avons par exemple vu que les évolutions du noyau et de l'atmosphère sont couplées. Le manteau, qui occupe le plus gros du volume (84 %) et constitue de loin la plus grosse masse de la planète, est le régulateur principal de la machine. Trois couches limites se sont formées, un triple vitrage isolant, pour ralentir le refroidissement. Entre ces vitrages, les deux parties du manteau convectent efficacement. De part et d'autre, noyau et atmosphère convectent aussi, vigoureusement. Le manteau turbulent est flanqué de deux « océans » fluides très dynamiques. Le double système du manteau communique, et impose à l'ensemble un rythme dont l'unité de mesure se chiffre en centaines de millions d'années. Les deux modes de convection, celui qui s'exprime par la tectonique des plaques et celui qui s'exprime par une hiérarchie de panaches, dont le rôle me semble avoir été à tort minimisé, se partagent le travail de refroidissement. Le mode de la tectonique des plaques et de la convection du manteau supérieur domine en général, dans l'espace et dans le temps. Mais il existe quelques moments, relativement brefs (géologiquement), au cours desquels le flux de lave apporté par certains panaches à la surface est bien supérieur à celui qui produit la croûte basaltique tout au long des dorsales océaniques. Pendant ces moments particuliers, les panaches sont l'« opérateur principal » des bilans de

matière et de chaleur sur la Terre. Il se trouve qu'ils sont alors aussi les principaux moteurs des révolutions des espèces : à l'évolution calme, « darwinienne », uniformitariste stricte, se substitue une période de crise où c'est le plus chanceux¹ qui survit. Le manteau contrôle l'extraction de la chaleur du noyau et, partant, le fonctionnement de la dynamo et la production des inversions du champ magnétique. La Terre entière est soumise aux grands cycles de Wilson, du noyau à la biosphère. Les panaches forment un lien essentiel entre eux.

On se trouve ainsi devant une image assez simple et belle de la dynamique de la Terre « actuelle ». L'évacuation de la chaleur à travers le manteau domine les évolutions de ce système complexe. Manteau supérieur et manteau inférieur, couplés de manière épisodique, subissent de grands cycles. Ces cycles de Wilson gouvernent l'ouverture des océans, la collision des continents, la surrection des chaînes de montagne, le passage d'un supercontinent au suivant, mais aussi l'histoire du noyau et l'évolution des espèces... Nous nous trouvons actuellement vers la fin de l'un de ces cycles, celui qui a vu le démantèlement de la Pangée, et nous allons vers la constitution d'un nouveau supercontinent qui a déjà aggloméré l'Asie et l'Inde, qui bientôt englobera l'Afrique (la Méditerranée, dernier vestige de la Téthys, est en train de se refermer et la cicatrice est déjà marquée par les chaînes alpines), l'Arabie (le golfe Persique est une mer peu profonde et la chaîne du Zagros marque la collision), puis l'Australie, qui entrera un jour en collision avec la Chine pour créer un nouvel Himalaya et un nouveau Tibet. Si le Pacifique se referme, les deux parties de l'Amérique, venant de l'Est, viendront à leur tour se coller à l'Asie. À moins que la subduction ne redémarre dans l'Atlantique, s'étendant à partir des petits arcs volcaniques des Antilles et des îles Sandwich. Venant de l'ouest, les Amériques se colleraient alors à l'Europe et à l'Afrique, et l'Atlantique aurait une nouvelle fois fait les frais de cette collision. En tout état de cause, le prochain super-continent aura pour noyau central l'Asie. Laissons à nos descendants, dans quelques dizaines de millions d'années, le soin de lui donner un nom...

1. Je dis « le plus chanceux », car je ne peux considérer que d'être prêt à survivre à une catastrophe écologique qui ne se produit que tous les 30 millions d'années ait à voir avec l'adaptation darwinienne *stricto sensu*...

L'arrivée à la surface de la planète de la tête d'un panache en provenance du manteau peut déclencher l'éruption d'un grand trap basaltique. À nombre de ces traps sont associées des extinctions massives des espèces biologiques. Comment mieux en comprendre et en modéliser le mécanisme ? La simulation des conséquences climatiques de l'éruption du Laki est une « brique élémentaire » qui pourrait permettre de passer à l'échelle d'un trap entier. Déjà, Anne-Lise Chenet et Frédéric Fluteau se sont « fait les dents » sur le cas des traps d'Éthiopie émis il y a 30 millions d'années. Ils ont pu reproduire la distribution des vents et des fragments de poussières volcaniques de la Méditerranée à l'Atlantique Sud et à l'océan Indien. Avec l'exemple du Deccan, nous avons vu que les premiers effets d'une telle crise volcanique étaient sans doute dominés par le soufre : hivers planétaires et pluies acides... Le gaz carbonique peut ensuite, dans certains cas, produire ses effets de serre et réchauffer l'atmosphère. Arrivé à un certain seuil, le méthane des chlatrates sous-marins entre parfois dans la danse, pour produire des climats d'une chaleur extrême, comme lors de l'épisode terminal du Paléocène, il y a 55 millions d'années. Enfin, comme l'ont proposé Céline Dessert, Yves Godderis, Frédéric Fluteau ou Yannick Donnadiou, l'impact à long terme d'un trap sur le climat est sans doute un refroidissement, dû au pompage du gaz carbonique par les laves au cours de leur altération. La moitié des laves du Deccan seraient parties en moins d'un million d'années vers la mer, sous forme de carbonates dissous dans les eaux des rivières et rejetés à l'océan. Le basalte absorbe à terme une grande partie des gaz qu'il a émis. Un trap émis lors de la rupture d'un très ancien super-continent, Rodinia, pourrait être la cause d'un épisode au cours duquel la Terre se serait presque entièrement recouverte de glaces. La dynamique interne du globe a donc eu des conséquences majeures sur les modifications de l'atmosphère, depuis sa constitution jusqu'à ses accidents de parcours, et elle a laissé, sous la forme des extinctions en masse, des traces indélébiles, irréversibles sur la biosphère.

L'influence de la Terre solide sur ses enveloppes fluides ne saurait faire oublier le rôle primordial du Soleil. Modifications de l'ensoleillement, dues à la modulation des paramètres de l'orbite terrestre : ce sont les cycles de Milankovic, responsables des der-

niers âges glaciaires. Énorme variabilité temporelle de notre astre lui-même, depuis le « Soleil faible » du premier milliard d'années jusqu'aux variations de luminosité qui ont vu se succéder « Optimum climatique du Moyen Âge » et « Petit Âge glaciaire ». C'est encore la variabilité naturelle du Soleil qui paraît responsable des alternances décennales de ce que nous avons appelé la « tendance magnétique globale », qu'on retrouve dans le nombre de taches solaires, dans les variations des composantes du champ magnétique et jusque dans les tendances de la température moyenne de la basse atmosphère et surtout de sa variabilité. Le Soleil, source commune des photons qui influencent cette température, et des particules et des champs qui déclenchent les fluctuations des courants électriques dans la haute atmosphère (atmosphère où l'effet de serre est bien sûr essentiel). On s'intéresse de plus en plus à cette météorologie spatiale responsable de grandes pannes électriques dans des métropoles boréales et de pannes de satellites au-dessus du « nouveau triangle des Bermudes » de l'Atlantique Sud.

Quelques dernières réflexions, plus politiques celles-là, et liées à nos derniers travaux sur l'évolution de la température du globe et, partant, du climat. Le lecteur aura vu dès les premiers chapitres, sans doute avec surprise, que nous en sommes arrivés à nous poser des questions sur la validité de la courbe représentant l'évolution de la température moyenne globale de la basse atmosphère, et même à nous interroger sur la signification d'une telle température globale. Il s'agit pourtant d'une notion et d'une courbe apparemment admises et utilisées par tous et rendues célèbres par les rapports du GIEC. Entreprise présomptueuse ? L'avenir nous dira si nous sommes sur une bonne piste ou non. Admettons un instant que ce soit le cas. Admettons que le réchauffement global (irrégulier) des cent cinquante dernières années puisse être dû (au moins en grande partie) à des causes naturelles. On sait aujourd'hui que le climat n'a cessé de changer, à toutes les échelles de temps. Il l'a fait, de manière presque aussi intense que dans les dernières décennies, plusieurs fois au cours des derniers millénaires, la dernière fois au XVI^e siècle (alors dans le sens du refroidissement). Et nous ne parlons pas ici des changements bien plus amples subis au cours des 10 000 ans de la dernière déglaciation qui a déterminé les étapes essentielles de l'histoire humaine. Les causes premières de ces variations, attestées et intenses, sont, nous le savons,

à rechercher dans le Soleil, dans les variations du rayonnement cosmique, dans les caprices volcaniques des plaques et des panaches, avec le cas extrême des éruptions de traps et des extinctions en masse, il y a bien plus longtemps.

Devrions-nous alors juger que nos recherches donnent un encouragement à ce que les habitants du monde se comportent de manière irresponsable en matière de consommation d'énergie ou de pollution atmosphérique, et nous refuser le droit de les entreprendre et d'en faire connaître les résultats ? Mettrions-nous en opposition la science et la technique d'un côté, l'éthique et la responsabilité civique de l'autre ? En aucun cas ! Économiser nos ressources en pétrole, ne serait-ce que pour conserver plus longtemps ces molécules complexes formées sur des millions d'années pour les utiliser ultérieurement de manière plus intelligente qu'en les cassant dans des moteurs de manière irréversible, éviter de faire croître indéfiniment la teneur en CO_2 de l'atmosphère parce que cela entraîne une acidification des océans (et un danger pour nos ressources halieutiques *in fine*) paraissent des attitudes raisonnables, indépendantes de l'interprétation d'un réchauffement climatique anormal, qui serait dû au gaz carbonique d'origine humaine. Il existe des causes sans doute plus urgentes encore, qui nécessitent dès à présent une bonne partie de notre action et de nos ressources. Et ces ressources sont finies : les gouvernements les alloueront-ils en fonction de priorités fondées sur l'analyse scientifique et technique, sur l'avis des experts, sur le dialogue avec les citoyens ? Pensons à la faim dans le monde : voilà un problème bien réel et immédiat qui affecte 800 millions d'êtres humains et qui n'est pas pour dans cinquante ou cent ans... Pensons à l'illettrisme ou à la condition féminine dans bien des pays... Nos ressources finies sont-elles bien allouées en fonction des besoins les mieux démontrés, les plus criants ? Si nous nous tournons à nouveau vers l'action de l'Homme sur la planète et les besoins de ressources qu'il doit y trouver, deux immenses problèmes nous font d'ores et déjà face au début du xxi^{e} siècle – problèmes auxquels le géologue peut d'ailleurs apporter des éléments de réponse capitaux. Tout d'abord, le problème de l'accès aux ressources d'eau potable. Ensuite, le problème de la gestion des déchets dans des civilisations de plus en plus urbaines. Le géologue n'est pas là seulement pour constater des problèmes, mais pour formuler des questions et y apporter des solutions. Et il en est capable : le géologue résout les problèmes !

Il serait intéressant (mais hors du sujet de ce livre et de mes capacités) d'évaluer les moyens consacrés par chaque pays à chacune de ces questions, et de voir si cela reflète bien l'ordre des priorités que la science, notre conscience ou tout simplement notre bon sens nous dictent. Le rôle du scientifique dans l'établissement de ces états des lieux et de ces recommandations est important, mais pas exclusif. Il faut garder en mémoire le fait que défendre une priorité et lui consacrer un ensemble de moyens pour la mettre en œuvre les réduit, voire les exclut, dans un monde réel donc fini, pour d'autres priorités. Le « politiquement correct » du réchauffement climatique ne risque-t-il pas de masquer en partie la gestion d'autres problèmes démontrés, mais trop oubliés malgré leur urgence ? Quelle que soit la réponse, le scientifique doit garder, à côté du sens des responsabilités, un droit absolu à la liberté et à l'imagination. Aucune avancée significative dans le domaine des sciences n'a jamais été faite sans elles. Dans un voyage au centre de la Terre comme n'importe où ailleurs...

Une autre question importante est celle de l'expertise. J'ai eu la chance de piloter pendant plusieurs années une partie de l'administration de la recherche publique en France : une expertise indépendante et de la meilleure qualité possible était évidemment essentielle à nos travaux. L'idée de recourir à un groupe de scientifiques, du type du GIEC, organisant la consultation de centaines de pairs et tentant de dégager de leurs vues un consensus m'aurait *a priori* semblé bonne. Je l'aurais cru, il y a quelques années. J'en suis bien revenu... Sans entrer dans le processus complexe de production des rapports du GIEC, notons qu'il a abouti en 2007 à la publication d'un gros rapport scientifique de près de 1 000 pages coordonné par huit experts. Ont aussi été publiés un « résumé technique » de 58 pages et un « résumé à l'attention des décideurs » de 25 pages. Ce dernier a été publié *avant* le rapport scientifique complet et a requis l'approbation préalable de représentants des gouvernements ! Le consensus exprimé dans ces rapports repose certes sur les compétences et les débats entre les contributeurs. Son analyse nécessite cependant de faire appel aux sciences humaines et sociales, pour y déchiffrer les relations de pouvoir et d'influence entre les participants, sans parler de l'exclusion discrète des contestataires, qui s'expriment par le biais de notes infra-paginales dans le gros rapport que très peu de gens lisent mais qui

n'existent plus dans la conclusion finalement retenue. Or toutes les grandes découvertes en sciences sont minoritaires au moment de leur émergence. Un processus de type GIEC ne peut qu'étouffer cette émergence. C'est un bien réel problème pour les décideurs et les demandeurs d'évaluations.

Autre aspect des relations entre travail scientifique et expertise. Nos travaux ont été contestés, voire ridiculisés, de façon éthiquement contestable, entre autres avec l'argument que nous n'étions pas des experts du sujet ou que nous n'avions pas assez travaillé (*sic*). Qu'est-ce que cela signifie ? Un expert des modèles numériques du climat qui n'a pas une expertise personnelle de l'acquisition des données d'observation et de leurs incertitudes ou un géochimiste qui a contribué à la compréhension des grands cycles de Milankovic, mais qui n'a pas travaillé sur la climatologie à l'échelle beaucoup plus courte du dernier siècle sont-ils plus compétents que des géomagnéticiens spécialisés dans l'observation et le traitement des séries de ces observations à l'échelle du siècle, mais qui ne s'étaient auparavant pas attaqués au climat ? La réponse va de soi : on a besoin de toutes ces compétences, de manière croisée, critique, pluridisciplinaire et sans exclusion. L'écho médiatique des problèmes liés au réchauffement climatique a hélas conduit certains à des attitudes dogmatiques, intolérantes, qui ne sont pas dignes de la science et sont un frein à sa progression². Je m'arrêterai là, sans aborder le rôle parfois douteux des médias pour lesquels les désaccords, de préférence acrimonieux, entre scientifiques font mieux vendre qu'une fade unanimité... Nous étions passés par des étapes semblables, il y a vingt ans, à propos de l'extinction des dinosaures. Il aura fallu vingt ans pour convaincre. Tout espoir n'est donc pas perdu.

D'autant plus que les observations nouvelles qui conduiront à mon avis à une remise en cause de bien des certitudes continuent de s'accumuler. C'est ainsi que les travaux d'un spécialiste suédois de l'étude des anneaux d'accroissement des arbres, Hakan Grudd³, viennent de révéler un biais très important dans la façon dont les

2. Voir le livre de S. Galam déjà cité et, plus récemment encore, alors que la rédaction de ce livre était achevée, de l'ouvrage plein de bon sens de Christian Gérondeau, *CO₂ : le mythe planétaire* (Le Toucan, 2009).

3. H. Grudd, « Tornetrask tree ring width and density AD 500-2004 : A test of climatic sensitivity and a new 1500-year reconstruction of north Fennoscandian summers », *Clim. Dyn.*, DOI 10.1007/s00382-007-0358-2, 2008.

températures sont déduites de la séquence des épaisseurs de ces anneaux. Cet auteur s'est aperçu que les arbres jeunes fournissent des anneaux plus épais que les arbres âgés, et que la présence de trop nombreux arbres jeunes dans les courbes préexistantes a conduit presque tous les auteurs précédents (dont Grudd lui-même) à sous-évaluer les températures antérieures au xx^e siècle. Quand il corrige cet effet, Grudd constate que la fin du xx^e siècle n'a rien d'exceptionnellement chaud, contrairement à ce qui aura été trop souvent affirmé. Autour des années 750, 1000, 1400 et 1750 la température était aussi élevée, voire plus. Et la période de 200 ans autour de l'an 1000, ce fameux Optimum climatique du Moyen Âge, était nettement plus chaude qu'aujourd'hui, et plus chaude qu'on ne l'avait jusqu'alors réalisé, au moins en Fennoscandie (région dont les arbres sont cependant parmi les mieux étudiés et qui jouit d'un grand poids dans les synthèses globales). La courbe de Mann est définitivement morte et celle de Moberg elle-même doit sans doute être révisée...

Et puis voilà que la variabilité de l'irradiance solaire doit aussi être révisée. Nicola Scafetta et Richard Willson viennent de montrer⁴ que les tendances de long terme de cette irradiance avaient été très sous-estimées à cause d'un trou de deux ans dans les observations satellitaires et d'un mauvais raccord des courbes à travers ce trou. La nouvelle courbe montre une croissance à long terme de l'irradiance solaire sur une dizaine d'années culminant vers 1997 et une décroissance depuis et jusqu'à la période présente où le Soleil est à son plus bas depuis 20 ans. Ceci correspond bien à la fin de trente années de réchauffement (de 1970 à 1998) et à la décennie de léger refroidissement qui vient de lui succéder. Et l'amplitude de la composante multidécennale de la variation solaire, qui était estimée à environ $0,07 \text{ W/m}^2$, est en fait de l'ordre du W/m^2 , c'est-à-dire plus de dix fois plus intense. C'est sur la base de l'ancienne valeur que les modélisateurs pensaient pouvoir affirmer que l'effet du Soleil était désormais négligeable par rapport à celui du gaz carbonique... Une ou deux décennies, et non cent ans, devraient permettre de voir si nous nous sommes tant trompés que cela...

4. N. Scafetta et R. Willson, « ACRIM-gap and TSI trend issue resolved using a surface magnetic flux TSI proxy model », *Geophys. Res. Lett.*, 36, L05701, doi :10.1029/2008GL036307, 2009.

Annexe 1

BREF APERÇU DE LA MÉTHODE SATELLITAIRE DE MESURE DE LA FORME DE LA SURFACE DES OCÉANS

Ce que mesure le satellite, ou plutôt un radar embarqué, c'est la distance qui le sépare de la surface de l'eau, calculée à partir du temps mis par un signal radar, qui voyage à la vitesse de la lumière, entre son émission et son retour après avoir été réfléchi par la surface de l'eau. Le satellite lui-même est « poursuivi » par d'autres satellites et sa position est déterminée avec une grande précision ; l'application de constructions géométriques classiques, de type « triangulation », et de la gravitation newtonienne permettent de déterminer les coordonnées exactes du point de la surface de la mer touché par le pinceau du radar. Le nombre de points est si grand et la couverture spatiale si dense que l'on peut alors déterminer la forme de la surface de l'océan. Celui-ci est agité par les vents, animé de vagues, et déformé par les marées.

Il existe une autre source de déformation, à laquelle on n'avait guère songé quand on a lancé les premiers instruments en orbite : la topographie du fond des océans déforme la surface de l'eau sur de très grandes distances et reflète les détails de ce fond. Imaginons par exemple la présence sous 4 000 mètres d'eau d'un ancien volcan. Celui-ci représente une certaine masse qui attire tout autour d'elle (faiblement), y compris l'eau. Celle-ci va donc « s'amasser » au-dessus du volcan pour former une légère bosse, une légère ondulation, cependant suffisante (de quelques décimètres à quelques mètres) pour être repérée par l'altimètre du satellite.

Annexe 2

COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX

Évoquons le comportement des matériaux fluides, et en particulier leurs déformations élastiques et visqueuses. Prenons un ressort auquel on suspend un poids : le ressort s'allonge et l'on observe que cet allongement est proportionnel au poids appliqué. Le ressort reprend sa longueur initiale si l'on enlève le poids. C'est l'élasticité et le coefficient qui la caractérise est déduit du rapport de la déformation à la contrainte exercée ; c'est vrai pour un matériau quelconque, par exemple une parcelle de roches du manteau. L'élasticité est en général « linéaire », ce qui signifie tout simplement que, quand on double le poids, on double l'allongement. Pour un ressort, la réponse est instantanée. Mais si l'on remplace le ressort par un petit piston rempli d'un liquide visqueux, la réponse est plus lente : la contrainte n'est plus proportionnelle à la déformation, mais à la vitesse à laquelle se produit cette déformation et le rapport de proportionnalité est tout simplement la viscosité. Si le matériau est deux fois plus visqueux, la vitesse de déformation est deux fois plus lente. Associons maintenant ressorts et pistons et tirons sur ce dispositif. Dans un premier temps, les ressorts seuls jouent, puis les pistons visqueux se mettent à répondre et la déformation atteint une vitesse limite. Le temps que met le système pour atteindre sa vitesse limite de déformation est essentiellement le rapport de la viscosité¹ du piston au coefficient d'élasticité du ressort. Un corps qui a cette propriété viscoélastique est appelé « corps de Maxwell » (en hommage au grand physicien qui en a défini la loi en 1868). Et il se trouve que les roches qui forment le manteau terrestre se comportent essentiellement comme cela. Leur temps caractéristique (dit « de relaxation ») est de l'ordre du demi-millénaire : voilà pourquoi les ondes d'un séisme se propagent dans la Terre comme dans de l'acier rigide et élasti-

1. Une grande viscosité implique une grande résistance à l'écoulement : une pierre est plus visqueuse que du miel ; ceci peut étonner si l'on s'en tient à l'acception commune du terme visqueux.

que (quelques secondes à quelques minutes sont des temps si brefs par rapport à ce temps de relaxation que le corps se comporte comme si l'on n'avait que le seul ressort), alors que les déformations à l'échelle des temps géologiques (de quelques dizaines de milliers d'années à de nombreux millions d'années) ne « voient » que le piston visqueux et le manteau se comporte comme un vrai fluide (très visqueux il est vrai).

Les travaux les plus récents, dus à Kurt Lambeck, précisent et confirment les résultats plus anciens : à l'échelle de temps de 10 000 ans, la viscosité du manteau, certes énorme, s'établit à environ 10^{23} fois celle de l'eau. Cette valeur permet néanmoins au manteau de fluer, comme l'avait proposé Holmes² dans ses *Principles of Physical Geology* (1945), un livre visionnaire dans lequel la convection du manteau est déjà décrite en termes presque actuels. Le manteau est donc à la fois solide, élastique et visqueux. La pâte de silicone surnommée *silly putty* et vendue comme jeu permet d'observer ce phénomène peu intuitif et pourtant capital, que nous avons décrit à l'aide d'un ressort et d'un piston visqueux : si l'on tire brutalement sur un morceau de cette pâte, il se casse avec une véritable fracture (source d'un petit séisme), mais si on l'étire lentement il se déforme et flue sans se briser.

2. Voir notamment au chapitre 8.

Annexe 3

L'ÉQUATION DE NAVIER-STOKES ET LE NOMBRE DE RAYLEIGH

Comment construire les équations qui gouvernent l'écoulement d'un fluide qu'on chauffe, comme l'huile d'une casserole ou le manteau terrestre ? En écrivant l'une après l'autre quelques lois fondamentales établies par les physiciens, certaines depuis plusieurs siècles, puis en les combinant entre elles (c'est-à-dire en imposant que toutes s'appliquent en même temps et en permanence).

Première loi simple, connue de tous, celle de la *conservation de la masse* (« Rien ne se perd, rien ne se crée »). Il suffit d'écrire que dans un petit cube élémentaire de volume de matière, la masse présente au bout d'un instant est égale à la masse qui y était présente au départ plus toute la masse qui est entrée pendant cet instant par les six facettes du petit cube, moins la masse qui en est sortie... Ce n'est pas sorcier.

La deuxième loi, dite *seconde loi de Newton*, définit la notion de force : un corps soumis à des forces voit sa vitesse changer. Ce changement de vitesse n'est autre que l'accélération. La somme des forces est égale au produit de la masse du corps par son accélération. La loi de l'action et de la réaction, quant à elle, représente la *conservation de la quantité de mouvement*. La question est de bien décomposer toutes les forces présentes : d'abord, sur Terre, la gravité, dont l'intensité dépend directement du *volume* du corps concerné ; puis la pression qu'exerce l'environnement sur la parcelle de fluide considérée, proportionnelle à la *surface* de la parcelle. Nous sommes nous-mêmes soumis à ces deux forces. La première nous maintient les pieds sur Terre. Nous suivons les évolutions de la deuxième chaque fois que nous écoutons les bulletins météorologiques (dans lesquels ces pressions, autrefois exprimées en millibars, le sont aujourd'hui en hectopascals, avec cette chance – qui n'est pas due au hasard – que le chiffre est le même dans les deux unités, environ 1 000 hectopascals pour la pression atmosphérique normale qui représente le poids de toute l'atmosphère sur nos épaules). Troisième contribution : les

contraintes, mécaniques par exemple, que transmet le milieu environnant et qui s'exercent sur la surface de la parcelle de matériau considérée. Ces contraintes sont habituellement séparées en « contraintes normales » et « contraintes de cisaillement ». Une bonne façon de s'en faire une idée est de joindre l'une contre l'autre les paumes des deux mains en exerçant avec les bras une forte pression (la « contrainte normale ») pour les maintenir serrées. Essayons ensuite de faire glisser l'une des paumes (la droite par exemple) vers le haut : nous sentons bien que la paume droite exerce sur la paume gauche une force parallèle (et non perpendiculaire) à la surface de la paume : c'est elle qu'on qualifie de « contrainte de cisaillement ». Elle tend à « cisailler » l'ensemble formé par les deux paumes jointes et serrées. Au bout d'un certain effort, cette contrainte est telle que les deux paumes glissent de manière saccadée l'une par rapport à l'autre. La contrainte de cisaillement a dépassé la résistance du « milieu » qui a « cassé ». Nous venons de faire un petit modèle réduit de tremblement de terre, la surface entre nos deux paumes représentant celle de la faille sur laquelle se produit le séisme.

Il nous faut maintenant expliciter le *comportement du matériau*, la façon dont il se déforme sous l'effet des contraintes. Nous avons vu dans l'annexe 2 une telle loi de comportement avec le « corps de Maxwell » qu'est le *silly putty*, et nous avons vu qu'elle reproduit assez bien ce qui se passe avec le manteau terrestre. Elle demande la connaissance des paramètres caractéristiques que sont l'élasticité et la viscosité. Il ne reste plus qu'à exprimer que l'accélération subie par une parcelle matérielle est égale à la somme de trois termes, correspondant aux trois forces que nous avons envisagées : la gravité (l'accélération de la pesanteur est toujours notée g et vaut à la surface de la Terre environ 10 mètres par seconde au carré), les différences de pressions entre les facettes de la parcelle (on parle de « gradient de pression » ; c'est cette différence qui anime les vents entre anticyclones et dépressions dans l'atmosphère) et enfin un terme dû à la viscosité et qui fait intervenir d'une certaine façon une forme d'accélération de la vitesse. L'équation plus condensée qui renferme toutes ces propriétés est dite de *Navier-Stokes*.

Troisième loi : celle qui exprime la *conservation de l'énergie*. C'est cette fois la deuxième loi de la thermodynamique qui nous fournit le fil conducteur. Tout accroissement de chaleur emmagas-

siné par un corps est proportionnel à la température (absolue) de ce corps et à l'accroissement d'une quantité caractéristique qu'on nomme « entropie ». Quand on écrit cette loi pour une parcelle de fluide, il faut tenir compte de trois sources de chaleur possibles : la chaleur conduite à travers le corps, la chaleur dissipée par les frottements visqueux internes, et la chaleur produite en son sein par le corps lui-même. La chaleur conduite est sans doute la mieux connue dans l'expérience de tous les jours. Le flux de chaleur qui traverse une couche de matériau est proportionnel à la différence de température entre les deux faces du matériau et inversement proportionnel à son épaisseur : une épaisseur double conduit à un flux de chaleur divisé par deux, une différence de température double à un flux de chaleur double (c'est la *loi de Fourier*). La constante de proportionnalité qui relie ces diverses quantités est appelée « conductivité thermique ». Quand elle est forte (comme dans un métal), on a un très bon conducteur de la chaleur ; quand elle est faible (comme pour le bois), on a un bon isolant. Pour ce qui est de la production de chaleur interne, elle est due dans la Terre à la lente désintégration d'éléments radioactifs emprisonnés depuis sa formation il y a 4,5 milliards d'années, et distribués de façon plus ou moins homogène par les processus mêmes de convection du manteau que nous tentons de comprendre.

Il nous reste à invoquer une dernière propriété de la matière, c'est celle qu'on appelle *équation d'état* et qui lie pression, volume et température. On se souvient de la fameuse loi des gaz parfaits apprise au lycée ($PV = RT$) qui dit que, pour un tel gaz, le produit de la pression par le volume est proportionnel à la température, la constante de proportionnalité R étant appelée « constante des gaz parfaits ». De la même manière, pour tout matériau, et en particulier pour les roches du manteau, existe une équation d'état (très différente cependant de la loi des gaz parfaits !) qui lie le volume (ou la masse volumique, souvent notée ρ), la pression et la température. Notons que, de la surface à la base du manteau, 2 900 km, la densité des silicates augmente d'environ 65 %.

En résumé, la *conservation de la masse* implique une équation qui relie entre elles les variations dans le temps et dans l'espace de la masse volumique ρ et de la vitesse en tout point. La *conservation de la quantité de mouvement* conduit à l'équation de Navier-Stokes qui lie entre elles les variations dans le temps et dans

l'espace de la masse volumique, de la vitesse et en plus de la pression en tout point : elle fait intervenir la pesanteur et la viscosité du matériau. Enfin, la *conservation de l'énergie* nous donne une équation qui lie entre elles les variations dans le temps et dans l'espace de la masse volumique, de la vitesse, de la pression et en plus de la température en tout point. Elle fait intervenir beaucoup de paramètres : la viscosité μ , la conductivité thermique k , la production interne de chaleur et deux paramètres thermodynamiques, le coefficient de dilatation thermique α (accroissement relatif de volume pour une augmentation de température de 1 °C) et la chaleur spécifique c_p (quantité de chaleur emmagasinée par le corps pour une augmentation de température de 1 °C, à pression constante). J'introduis quelques lettres et symboles qui vont bientôt nous servir. J'ai tenté d'en maintenir la liste au strict minimum destiné à m'amener au Graal, le nombre de Rayleigh. Encore un peu de patience, nous y sommes presque.

Prises ensemble, ces équations, qui proviennent d'un petit nombre de lois physiques universelles, permettent de calculer complètement les mouvements du fluide, sa température, sa pression et sa masse volumique en tout point, pourvu qu'on connaisse les propriétés du matériau (équation d'état et loi de comportement mécanique) et les conditions aux limites du système : dans le cas du manteau terrestre, soit la température, soit le flux de chaleur qui traverse ses surfaces supérieure (où nous vivons et pouvons faire des mesures) et inférieure (en provenance du noyau et pour lesquels nous pouvons faire des hypothèses). Pour comparer des cas très différents régis par les mêmes équations, par exemple le cas de la Terre avec le résultat d'une expérience de laboratoire (qui se déroule sur des échelles de temps et des dimensions géométriques beaucoup plus réduites), on a coutume de construire un modèle mathématique permettant de transformer les équations pour les rendre « sans dimension¹ » : c'est ainsi qu'on évalue la température par rapport à une différence caractéristique, dans le cas du manteau terrestre, celle qui règne entre la base des plaques et le haut de la limite avec le noyau, qui est (très grossièrement) de

1. Les dimensions, c'est-à-dire les unités, disparaissent parce que chaque terme présentant une dimension est divisé par un terme de référence exprimé dans la même unité. L'équation sans dimension qui en résulte est alors universelle et peut être appliquée à un objet ou un système allant de la taille d'une cuve au laboratoire à celle de la Terre entière.

l'ordre de 3 000 °C. Comme je ne doute pas que certains lecteurs voudront par eux-mêmes faire ces évaluations, je donne quelques autres valeurs utiles. Celles de la masse volumique ρ de l'ordre de $3,6 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$, de la viscosité μ de l'ordre de 10^{21} Pa.s , de la conductivité thermique k de l'ordre de $4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, du coefficient d'expansion thermique α de l'ordre de $3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ et de la chaleur spécifique c_p de l'ordre de $10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Quand on se livre au petit jeu de la mise de l'équation sous sa forme « sans dimension », celle-ci se simplifie considérablement. On y voit bien apparaître la compétition entre forces de pression, forces visqueuses et force d'Archimède liée aux différences de température. L'importance de cette dernière contribution par rapport aux autres se résume entièrement dans un seul nombre, un facteur de proportionnalité, lui-même sans dimension, et qui dépend de huit caractéristiques du système considéré. C'est pour écrire ce nombre, introduit par Rayleigh et nommé en son honneur, que je vous ai proposé ces détours, parfois un peu abstraits. Ce devrait être la seule équation de ce livre. Le nombre de Rayleigh s'écrit donc :

$$Ra = (\alpha \Delta T \rho^2 g c_p b^3) / (\mu k) = (\alpha \Delta T g b^3) / (\nu \kappa)$$

La seule quantité « nouvelle » rencontrée est l'épaisseur totale (b) de la couche considérée, pour nous le manteau, soit 2 900 km. On voit que cette épaisseur intervient à la puissance 3 (au cube) et a donc une énorme influence sur ce qui va se passer. C'est le nombre de Rayleigh qui vient multiplier la force d'Archimède, c'est-à-dire la force d'origine thermique qui va pousser un élément du milieu plus chaud à s'élever ou un élément plus froid à sombrer. Il joue donc un rôle capital. On peut mieux « sentir » la signification de ce nombre quand on voit que son numérateur ($\alpha \Delta T g b^3$) représente le terme de force ascensionnelle d'Archimède dû à l'expansion thermique $\alpha \Delta T$ et son dénominateur ($\nu \kappa$) les effets dissipateurs qui s'y opposent, les frottements visqueux (ν) et la diffusion thermique (κ). C'est donc ce paramètre qui va mesurer la vigueur de la convection dans la Terre. Si vous y introduisez toutes les valeurs numériques fournies au gré des lignes qui précèdent, et en prenant le seul manteau supérieur avec une épaisseur b de l'ordre de 700 km, vous lui trouverez une valeur de l'ordre de 5 millions. Le nombre de Rayleigh critique, à partir duquel le système devient instable, n'est que 1 000 !

Annexe 4

ESCAPADE VERS LES AUTRES PLANÈTES

« Je me souvins alors de cette théorie d'un capitaine anglais qui assimilait la terre à une vaste sphère creuse, à l'intérieur de laquelle l'air se maintenait lumineux par suite de sa pression, tandis que deux astres, Pluton et Proserpine, y traçaient leurs mystérieuses orbites. »

Jules VERNE, *Voyage au centre de la Terre*.

Nous allons évoquer une des évolutions principales des sciences de la Terre depuis une quarantaine d'années : l'analyse de la Terre comme planète parmi d'autres. Nous vivons à un moment privilégié, en ce sens que le dernier quart du xx^e siècle aura été celui des débuts puis de la maturation de l'exploration des planètes, celui de la naissance d'une science nouvelle, la planétologie comparée (qui forme avec la tectonique des plaques et l'étude scientifique de l'environnement le triptyque des géosciences modernes).

Après notre descente jusqu'au centre de la Terre, notre planète nous apparaît avec toute sa force dynamique, machine thermique qui tend inlassablement à se refroidir et a pour cela préféré le mouvement de la matière, la convection comme mode de refroidissement¹. Mais l'image que nous avons est-elle suffisamment générale ? Nous permet-elle de formuler des lois valables par exemple pour l'ensemble du système solaire, et pourquoi pas pour ces exoplanètes que les astronomes sont en train de découvrir par dizaines autour d'autres étoiles ? De la même façon que nous ne pouvions nous contenter d'un point chaud ou d'un panache pour les comprendre tous, ou d'une extinction en masse pour en découvrir le mécanisme dominant, nous ne pouvons nous contenter

1. Cette annexe doit beaucoup à *Mantle Convection in the Earth and Planets*, par Gerald Schubert, Don Turcotte et Peter Olson (Cambridge University Press, 2001), où le lecteur intéressé trouvera des développements plus complets.

d'explorer seulement la Terre et ses entrailles. La Terre n'est en fait que le résultat d'une expérience dans le grand jeu de la formation du système solaire.

Nous savons que les planètes géantes, formées au-delà de l'orbite des astéroïdes, sont essentiellement composées de glaces d'eau et d'ammoniac, et d'éléments légers comme l'hydrogène, condensés loin, dans des régions froides de la nébuleuse proto-solaire. Mais les planètes intérieures (dans l'ordre de leur éloignement du Soleil, Mercure, Vénus, Mars), la Lune et certains des satellites des planètes géantes, comme Io et Europe, sont des corps « telluriques », formés de silicates et parfois dotés d'un noyau, dont beaucoup ont révélé aux télescopes puis aux sondes interplanétaires des preuves d'activité volcanique ou sismique. Certains satellites de glace des planètes géantes (Ganymède, Callisto ou Titan) peuvent également être analysés avec profit avec une vision « tellurique », c'est-à-dire inspirée par nos connaissances des planètes internes (rocheuses) du système solaire, sœurs de la Terre. Ces autres planètes fonctionnent-elles donc comme la Terre, ont-elles par exemple une tectonique des plaques actives ou portent-elles les marques de grands panaches convectifs ?

Nous connaissons aujourd'hui assez bien la topographie des planètes et avons une idée plus ou moins précise de l'âge des terrains qui y affleurent grâce à leur « taux de cratérisation » (densité des cratères par unité de surface). En effet, grâce aux échantillons rapportés de la Lune, il a été possible de reconstituer la décroissance du taux et de la taille des impacts dus aux planétésimes, puis aux astéroïdes depuis le début du système solaire. Le « taux de cratérisation » permet donc de déterminer, au moins de manière approchée, l'âge (relatif) d'une région quelconque d'une planète. Pour ce qui est de Vénus, des radars ont permis de pénétrer l'épaisse couverture de nuages de gaz carbonique et d'aérosols sulfuriques qui masque la surface.

La Terre possède une distribution remarquable, « bimodale » (avec deux maximums bien distincts), de ses altitudes (Figure A4-1) : cette distribution « signe » l'existence de deux types de croûte différents (de densité différente), croûte océanique et croûte continentale. En présence d'eau liquide sur la planète et d'érosion, les parties élevées devraient être rabotées et les sédiments ainsi arrachés combler les parties les plus profondes. Pour maintenir sépa-

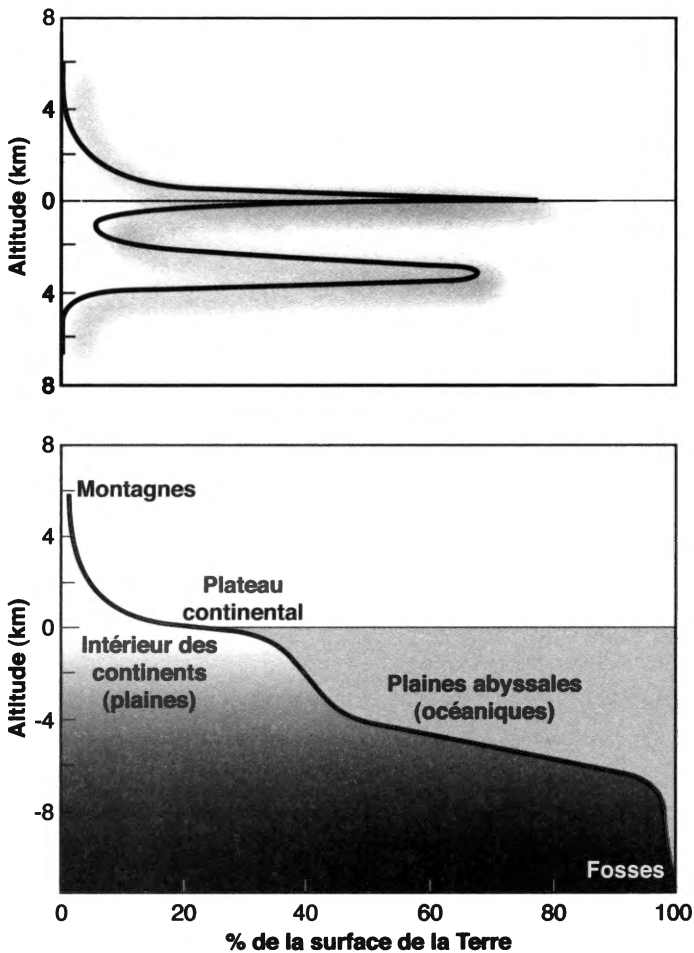


Fig A4-1 : Courbe hypsométrique de la Terre. La partie basse représente le pourcentage de la surface de la Terre situé au-dessus d'une certaine altitude. Cela donne une sorte de profil topographique moyen dans lequel on voit bien l'importance des surfaces émergées de basse altitude mais aussi les plaines abyssales. La courbe du haut donne la quantité relative de surfaces situées à une certaine altitude. Les deux paquets d'altitude les plus fréquents, vers 300 m et -4 000 m, illustrent la distribution bimodale des altitudes sur Terre, qui distingue notre planète de la plupart des autres.

rés les deux maximums de la courbe hypsométrique, une dynamique est nécessaire : c'est celle de la tectonique des plaques.

Les deux altitudes moyennes les plus communes sur Terre sont celles qui correspondent d'une part aux zones basses des continents et aux plateaux continentaux (+ 300 m), d'autre part aux plaines abyssales des bassins océaniques (- 4 000 m). Les deux doivent leur altitude à leur composition chimique et à l'équilibre

isostatique (voir chapitre 6). La croûte océanique basaltique, plus dense que la croûte continentale granitique, « culmine » donc plus bas. La croûte océanique est en moyenne beaucoup plus jeune que celle des continents : environ 60 millions d'années contre 2 milliards ! La bimodalité des âges s'accompagne aussi d'une dichotomie géographique en surface : l'hémisphère Pacifique est principalement « océanique » et jeune, l'hémisphère opposé (« Africain ») continental et vieux. La Terre offre deux faces (qui ne sont pas les hémisphères Nord et Sud...) bien distinctes, que nous avons rencontrées au cours de notre descente dans le manteau. Sans tectonique des plaques, véritable usine chimique qui crée la croûte océanique aux dorsales et la croûte continentale dans les zones de subduction, il n'y aurait pas de bimodalité. Si elle s'arrêtait, l'érosion détruirait les sommets pour remplir les grands fonds, conduisant à une distribution « molle » et unimodale² des altitudes.

Grâce principalement aux levés radar de la mission Magellan, nous connaissons encore mieux la courbe hypsométrique de Vénus que celle de la Terre ! Elle est très « molle » et unimodale, justement. Vénus n'a ni fosses ni dorsales, même si des chaînes de montagne, des rifts et des hauts plateaux localisés existent. Vénus n'a qu'une plaque et pas de continents. L'absence de rugosité peut en partie être attribuée à la température élevée de sa surface (470 °C, le plomb y serait fondu). Il y a cependant quelques hauts reliefs de plus de 10 000 mètres. Ce qui frappe surtout, c'est la densité très uniforme des cratères d'impacts : l'âge de la surface de la plus grande partie de notre planète sœur a été « remis à zéro » par un événement catastrophique, n'ayant duré que quelques dizaines de millions d'années, il y a environ 750 millions d'années. Cet événement tectonique et volcanique majeur est encore mal compris : il pourrait s'agir d'un énorme épisode global de subduction, ou de l'arrêt d'une tectonique des plaques qui aurait précédemment existé. Depuis ce temps, en dehors d'impacts épisodiques, Vénus semble inactive. Pourtant, de taille voisine de celle de la Terre, elle doit renfermer en son sein des sources de chaleur analogues, dont il faut bien qu'elle se débarrasse progressivement : chaleur libérée par la désintégration des isotopes radioactifs de l'uranium, du thorium et du potassium, chaleur originelle accumulée lors de sa for-

2. C'est-à-dire avec un seul mode, un seul maximum.

mation par des impacts géants de planétésimes, chaleur libérée par sa différenciation et l'éventuelle formation d'un noyau... Toutes les planètes partagent cette même histoire, toutes doivent évacuer cette chaleur et le mode le plus efficace pour le faire est la convection de leur manteau. Or Vénus ne montre aucun signe de tectonique des plaques. Son unique plaque aurait une épaisseur lithosphérique considérable, de 200 à 300 kilomètres... Elle n'a pas non plus de véritables continents, ce qui est logique puisqu'elle n'a pas non plus d'eau, d'océans ou d'érosion (tous les ingrédients nécessaires pour fabriquer de la croûte continentale).

D'étranges structures qui constellent la surface de Vénus donnent peut-être des éléments de réponse : ce sont les *coronae* (Figure A4-2). Ce sont des objets quasi circulaires de 100 à 2 500 km de diamètre, dont la partie interne est surélevée (et non affaissée). Les plus grandes ont été interprétées comme des zones de subduction en cours de formation. Vénus se préparerait-elle à un nouvel événement de subduction global, massif, comme il y a 750 millions d'années et serait-ce son mode principal d'évolution ? On a observé l'effondrement du couvercle solidifié de certains lacs de lave (au Kilauea en 1965), qui pourrait offrir un modèle analogue au sort de la surface de Vénus. Après la fin d'une phase où la tectonique des plaques aurait été active, Vénus serait entrée dans un mode de convection « à couvercle stagnant », c'est-à-dire avec une lithosphère de plus en plus épaisse et peu mobile, comme un couvercle sur une cocotte-minute. Mais le feu sous la cocotte n'est pas éteint et l'intérieur continue à chauffer. Attention au passage du seuil critique et au prochain réveil, et donc au prochain épisode massif de remise à zéro de la surface... Cette nouvelle phase d'effondrement et de « resurfaçage » catastrophique pourrait s'amorcer par des déchirures dans la lithosphère provoquées par de gigantesques panaches, comme l'ont suggéré Gerald Schubert et David Sandwell. Si certaines des *coronae* semblent être des amorces de subduction, d'autres sont en fait associées à des mouvements de convection ascendants (panaches), à des dômes (points chauds) et à des rifts (déchirures) qui ne sont pas sans rappeler les têtes de panaches, les traps et le rifting que nous avons décrits sur Terre.

Vénus n'a pas de champ magnétique ; on ne sait si elle en a possédé un au début de son histoire... Certains ont suggéré que sa vitesse de rotation, en effet très faible, conduisait à des forces de

Coriolis insuffisantes pour animer une dynamo. D'autres ont pensé que parce que Vénus était (un peu) plus petite et moins massive que la Terre, elle s'était refroidie plus vite et que son noyau était déjà entièrement solide, ce qui interdirait en effet un champ magnétique propre. David Stevenson a montré que ces deux hypothèses étaient difficilement tenables et que, au contraire, la Terre avait réussi à former une graine, tandis que Vénus n'aurait toujours qu'un noyau entièrement liquide. Elle n'aurait pu former de graine parce que la pression en son centre est un peu trop faible. Dans certains modèles, la graine de Vénus commencerait juste à se former. Or certains modèles de dynamo voient la graine comme un élément nécessaire de la production d'un champ dynamo puissant³.

La Lune forme avec la Terre presque une planète double. Tout le monde s'accorde aujourd'hui à penser que sa naissance résulte de la collision entre la proto-Terre et une petite planète de la taille de Mars. La Lune est constituée de deux types principaux de terrains, les « terres » ou plateaux élevés, faits d'une roche silicatée nommée anorthosite et de couleur claire (datée par les missions Apollo 15 et 16 entre 4,5 – l'âge de formation du système solaire – et 4,4 milliards d'années), et les « mers », des dépressions remplies de lave basaltique sombre, très semblable à celle de la croûte océanique sur Terre (datée par les missions Apollo 11, 12, 15 et 17 entre 3,2 et 3,9 milliards d'années). Les plateaux, dont la croûte est relativement épaisse (70 à 100 km), se sont formés très tôt dans l'histoire de notre satellite, par cristallisation de la surface d'un océan magmatique fondu. Ils ont depuis été criblés d'impacts, surtout pendant la phase majeure de bombardement qui a duré entre 4,0 et 3,8 milliards d'années⁴. À la fin de cet épisode, des impacts considérables ont dû creuser des bassins profonds, de taille imposante. Ce sont ces bassins qui se sont remplis de lave basaltique, formant une croûte beaucoup plus mince (de moins de 20 km à... presque rien sous Mare Crisium), sans doute due à la fusion par-

3. Ceci est cependant très discuté...

4. L'origine de cette phase de bombardement tardif vient d'être magistralement expliquée par A. Morbidelli : elle résulte de la déstabilisation d'une ceinture externe d'astéroïdes lors du passage à proximité de cette ceinture d'Uranus et de Neptune, autrefois situées sur des orbites plus proches du Soleil, modifiées sous les effets perturbateurs de Jupiter et de Saturne.

tielle d'une partie du manteau à la suite de mouvements de convection, entre 3,8 et 3 milliards d'années. Des concentrations de masse (ou « mascons ») ont été découvertes sous les mers lunaires, grâce à l'analyse du champ de pesanteur. Depuis près de 3 milliards d'années⁵, la Lune est une planète morte. Sa courte durée de vie est due à sa petite taille : le refroidissement se fait en effet à travers la surface et cette surface est d'autant plus importante au regard du volume au sein duquel est libérée la chaleur que le rayon de la planète est petit. Notons que la Lune est affectée par une forte dichotomie hémisphérique : sa « face cachée » est essentiellement constituée de plateaux anciens constellés de cratères, tandis que les mers sont concentrées sur la face visible. La petite taille de la Lune n'y interdit pas la convection du manteau si la concentration de celui-ci en éléments radioactifs générateurs de chaleur est semblable à celle de la Terre, ce que laissent supposer les deux mesures du flux de chaleur lunaire réalisées au milieu des années 1970. Mais cette convection, si elle a existé, n'a pas été suffisamment vigoureuse pour avoir homogénéisé le manteau lunaire, comme c'est le cas pour le manteau supérieur terrestre : en témoigne la variabilité chimique des basaltes des mers lunaires (alors que la composition des basaltes des dorsales sur Terre est très homogène). En tout cas, il est peu vraisemblable que le manteau de la Lune soit aujourd'hui animé de mouvements de convection.

Les roches volcaniques de la croûte lunaire sont par endroits aimantées. Les anomalies magnétiques qui en résultent sont mesurées sans ambiguïté par les satellites artificiels qui ont orbité autour de notre satellite naturel⁶. Tout indique donc que, malgré sa petite taille, la Lune possède un noyau de fer et a produit par effet dynamo un champ magnétique interne, encore présent lors des épanchements volcaniques. Mais ce noyau doit aujourd'hui être solidifié et ne peut plus entretenir de dynamo. Son rayon est sans doute inférieur à 400 km. Si la Lune est appauvrie en fer par rapport à la Terre, c'est sans doute à leur violente origine commune qu'elle le doit. Lors du très grand impact qui a formé la

5. Certains auteurs pensent qu'un volcanisme réduit a pu perdurer jusqu'à 2 milliards d'années.

6. Les anomalies magnétiques lunaires sont souvent concentrées à l'antipode des grands bassins marquant les impacts. Pour cette raison, il a été suggéré que c'est le choc qui aurait aimanté les roches, par focalisation des ondes sismiques au point opposé de l'impact.

Lune et la Terre à partir de deux planètes déjà différenciées, c'est la proto-Terre qui a dû capturer une bonne partie du noyau de fer de son « agresseur », ne laissant au nuage qui allait se condenser pour reformer la Lune que la portion congrue.

La planète Mars est aussi marquée par une profonde dissymétrie : la plupart de son hémisphère Sud est couvert de terrains d'altitude plutôt élevée et très anciens au regard de la densité de cratères qui les affecte (plus de 3,8 milliards d'années), tandis que l'hémisphère Nord est dominé par une vaste plaine volcanique plus basse et nettement plus jeune. La courbe hypsométrique de Mars est proche de celle de la Lune. L'âge de la limite entre les deux hémisphères si distincts est estimé aux environs de 3 milliards d'années, mais les âges sur Mars sont très imprécis, dans l'attente (impatiente) du retour d'échantillons. Comme sur la Lune, la zone des vieux plateaux est sans doute un reste de la surface originelle de la planète (qui sur Terre n'a pas survécu), tandis que les plaines volcaniques du Nord font penser à la surface de Vénus. Mars offre aussi à l'observation quelques objets géologiques marquants. Une série d'imposants édifices volcaniques en bouclier (la région de Tharsis et Olympus Mons), très semblables à leurs équivalents terrestres (comme le Mauna Loa, à Hawaï, ou le Piton de la Fournaise, à la Réunion), n'était leur taille gigantesque. Olympus Mons, le plus grand volcan du système solaire, dépasse 26 km d'altitude pour un diamètre à la base de plus de 600 kilomètres et un diamètre de caldeira sommitale de 80 kilomètres (Figure A4-3) ! Ces volcans sont relativement jeunes, de quelques centaines de millions d'années (ou moins ?)... Les trois volcans de Tharsis (Arsia, Pavonis et Ascraeus) sont « posés » sur un vaste dôme de 3 000 km de diamètre et de 10 km d'altitude qui domine la topographie et le champ de pesanteur de toute la planète. Les basaltes des plaines du Nord pourraient avoir rempli une immense dépression due à un impact ancien géant, ou résulter d'un épisode de convection mantellique massive. Une autre structure fascinante est le grand canyon de Valles Marineris qui zèbre la surface sur 4 500 kilomètres de long et 200 kilomètres de large par endroits (Figure A4-3). Avec Claude Allègre et Maurice Mattauer, nous avons, peu après le retour des premières images de la sonde Mariner 9 en 1971, proposé d'y voir une dorsale ou une faille transformante et de relier l'ensemble aux volcans de

Tharsis et à une zone de failles située plus au sud. Nous y voyions un point triple et une tectonique des plaques naissante, figée avant de s'être complètement développée. Valles Marineris s'est bien formé au long d'une série de grabens⁷, délimités par des failles en extension (« normales »).

Il n'y a pas sur Mars d'équivalent des dorsales et des chaînes de montagne terrestres, donc pas de frontières de plaques actives. On pense aujourd'hui que c'est une planète morte d'un point de vue tectonique, après avoir connu une phase primitive de convection mantellique avec peut-être une phase de tectonique des plaques et une dichotomie qui aurait reflété une convection profonde, de « degré deux », comme sur Terre. Mars est aujourd'hui formée d'une plaque unique, dont la lithosphère est épaisse de 100 à 400 km. Quant aux volcans « intraplaque » plus jeunes de Tharsis, ils évoquent fortement un volcanisme de point chaud, localisé au-dessus d'un panache mantellique, qui aurait aminci la lithosphère et permis au magma d'atteindre la surface et de construire ces gigantesques boucliers. Des calculs suggèrent que le mode de refroidissement du manteau dans une planète à une seule plaque est la convection sous forme de panaches. Ceux-ci sont d'autant moins nombreux que le noyau est petit et que les sources de chaleur interne au manteau sont faibles (ce qui est sans doute le cas si les éléments radioactifs ont été « absorbés » par la formation de l'épaisse croûte). Mais on ne sait pas encore construire de modèle aussi asymétrique que le révèle l'observation de la planète, avec les seules zones élevées, relativement proches, de Tharsis et d'Olympus Mons⁸. Mars conserve jalousement une partie de ses secrets...

Si Mars n'a pas de champ magnétique interne d'échelle globale, la croûte ancienne (dans l'hémisphère Sud) a révélé de très fortes anomalies magnétiques, correspondant à une croûte aimantée beaucoup plus épaisse et à des intensités d'aimantation beaucoup plus fortes que ne peuvent en produire les minéraux connus sur Terre. Les spécialistes de magnétisme des roches font assaut

7. Voir note 10, chapitre 7.

8. H. Harder y a presque réussi en invoquant le rôle des changements de phase des silicates – de l'olivine aux phases spinelle puis pérovskite – à la base du manteau martien, si la taille du noyau en autorise l'existence... La transformation du minéral en une phase de plus haute densité absorbe de la chaleur et empêche un nombre important de panaches de pénétrer vers le haut depuis la partie inférieure du manteau. Voir Schubert et coll., *op. cit.*

d'imagination pour proposer des candidats crédibles (magnétite, hématite, sulfures ? et dans quels types de roches ?). Si le problème n'est pas résolu, cette observation démontre néanmoins qu'à un moment de son passé, Mars a possédé un fort champ magnétique. Et les observations de la pesanteur permettent de savoir que Mars possède un noyau métallique de 1 500 à 2 000 km de rayon, formé très tôt lors de son accréation. Les premières cartes d'anomalies magnétiques disponibles semblaient montrer dans certaines régions des bandes parallèles qui rappelaient la peau de zèbre caractéristique de l'expansion des fonds océaniques sur Terre. En 1994, Norm Sleep a suggéré que tout l'hémisphère Nord des vastes plaines volcaniques était en fait le produit d'une séquence ancienne de tectonique des plaques. Comme l'hémisphère Nord, âgé de « seulement » 3 milliards d'années et moins, n'est pas aimanté, et que la croûte des bassins formés dans l'hémisphère Sud par les grands impacts de Hellas et d'Argyre et vieux de 4 milliards d'années n'est pas aimantée non plus, c'est qu'une éventuelle dynamo martienne a démarré très tôt dans l'histoire de la planète et s'est éteinte au bout de quelques centaines de millions d'années.

Or il se trouve que nous possédons des échantillons de Mars sur Terre. En classant tous les types de météorites, les spécialistes avaient mis de côté une série d'objets un peu étranges, les météorites SNC (initiales des noms de trois familles, issues de trois chutes de météorites bien répertoriées – Shergottites, Nakhrites et Chassignites) : ces fragments volcaniques, relativement jeunes (160 à 600 millions d'années), devaient provenir d'un gros objet différencié, probablement d'une planète proche, récemment active. Les concentrations des isotopes des gaz rares (argon, néon, krypton et xénon), mais aussi de l'azote et du dioxyde de carbone piégés dans les minéraux de ces météorites, se trouvent avoir exactement la même valeur que dans l'atmosphère martienne, si ténue soit-elle. Les météorites SNC sont bien des fragments de Mars arrachés par des impacts de météorites et capturés par notre champ gravitationnel.

L'une de ces météorites, Allan Hills 84001 (ou ALH84001), a beaucoup fait parler d'elle depuis qu'en 1997 Joe Kirschvink a suggéré que les carbonates qu'elle renfermait n'avaient pas été chauffés depuis 4 milliards d'années et qu'en 2000, K. L. Thomas-Keptra et ses collègues (dont Kirschvink) ont proposé de voir dans certains des microcristaux de magnétite que renfermaient ces carbo-

nates la trace de fossiles du même âge, impliquant ainsi l'existence de la vie à cette époque reculée et, qui plus est, sur la planète Mars, d'où elle aurait pu être transmise à la Terre. Ben Weiss, alors étudiant de Kirschvink, devait en effet montrer que la météorite, arrachée par un impact à la planète Mars il y a environ 15 millions d'années, n'avait pas été chauffée au-dessus de 40 °C pendant son transfert puis sa capture par la Terre (la rentrée dans l'atmosphère, très brève, ne chauffant significativement qu'une mince pellicule superficielle de la météorite). L'essentiel d'ALH84001 est une roche magmatique (une pyroxénite) qui aurait cristallisé il y a 4,5 milliards d'années, mais elle contient 1 % de carbonates montrant une zonation et renfermant eux-mêmes des cristaux d'oxydes et de sulfures de fer (magnétite et pyrrhotite), datés eux de 4 milliards d'années. Weiss devait démontrer en 2002, à l'aide d'expériences magnétiques très poussées et en utilisant conjointement la méthode des isotopes de l'argon pour les âges, que les carbonates n'avaient pas été chauffés au-dessus de 500 °C, et même peut-être 300 °C depuis 4 milliards d'années et que leurs minéraux de fer renfermaient bien un message paléomagnétique datant de cette époque. La première conclusion qu'on peut tirer de ces travaux est la preuve de l'existence d'une dynamo sur Mars il y a 4 milliards d'années, capable de produire un champ magnétique d'intensité voisine de celle de la Terre aujourd'hui et donc de protéger la surface de la planète de l'influence des rayons cosmiques. En revanche, la preuve de l'existence d'une vie si ancienne sur la planète rouge est fortement mise en doute. Les caractéristiques des cristaux magnétiques d'ALH84001, que l'on pensait typiques des bactéries⁹ trouvées sur Terre, peuvent être retrouvées dans des minéraux formés sans l'intervention d'êtres vivants, comme l'ont établi par exemple Jean-Pierre Valet, Aude Isambert et François Guyot. De son côté, Alix Barrat avait découvert en 1996 dans la météorite de Tataouine, tombée près de Djerba en 1931 et dont des fragments étaient conservés au Muséum d'histoire naturelle de Paris, des globules de carbonates très semblables à ceux de ALH84001 et qui n'étaient pas présents apparemment en 1931 ! Philippe Gillet, de l'École normale supérieure de Lyon, découvre que les sables où a été retrouvée la météorite présentent les mêmes carbonates, qui se révèlent au

9. Dites magnétotactiques.

microscope électronique être de minuscules bâtonnets de quelques centièmes de microns. Des cultures permettent d'identifier des micro-organismes encore inconnus qui ont « poussé » sur les fragments de la météorite et dans le désert alentour malgré la sécheresse. Ce seraient les plus petits organismes terrestres vivants identifiés à ce jour. Les preuves de vie sur Mars ont du plomb dans l'aile...

Il ne fait cependant plus de doute qu'un fluide, très certainement l'eau¹⁰, s'est écoulé, peut-être brièvement, peut-être violemment, et très tôt (puisque des terrains très anciens sont affectés par l'érosion et la sédimentation) à la surface de Mars, laissant quantité de dépôts caractéristiques (réseaux fluviaux avec îles, méandres, chenaux en forme de tresses, glissements de terrain, traces de couches sédimentaires superposées...). Il y avait donc une atmosphère, de l'eau, du volcanisme et un champ magnétique sur Mars au cours des premières centaines de millions d'années. La convection du manteau martien a rapidement été dominée par de puissants panaches. Toutes les conditions pour permettre à la Vie d'apparaître, et d'évoluer. Nous avons vu que, pour l'instant, les preuves de cette vie étaient bien ténues. Cette Mars plus accueillante devait s'éteindre au bout de quelques centaines de millions d'années, victime du refroidissement de la planète et de la formation d'une plaque unique, épaisse. Le volcanisme dû aux derniers grands panaches devait se concentrer dans des régions de plus en plus restreintes. Aujourd'hui souffle un vent ténu qui réarrange sans cesse des dunes, tandis qu'aux pôles se succèdent avec les saisons des calottes de glace de CO₂. Nous devrions en apprendre beaucoup plus, et qui sait devoir remettre en chantier beaucoup de nos idées actuelles avec les prochaines missions d'échantillonnage sur la planète rouge.

Parmi les planètes telluriques, il nous reste Mercure. Nous ne savons pas grand-chose encore sur elle et attendons les premiers résultats de la mission interplanétaire Bepi-Colombo, deux orbiteurs qui doivent être lancés par une fusée Soyouz depuis Kourou en 2013. Mercure est la plus petite, mais la plus dense des planètes

10. Comme l'a clairement établi une équipe menée par Jean-Pierre Bibring de l'université Paris-Sud-Orsay.

telluriques : le fer doit constituer plus de 60 % de sa masse et former un noyau (si elle est bien différenciée) dont le rayon occupe les trois quarts du rayon de la planète ; elle est d'ailleurs le siège d'un champ magnétique interne significatif. Son histoire commença sans doute de manière semblable à celles de Vénus ou de Mars, avec un début chaud, une différenciation rapide, la formation d'une lithosphère épaisse d'environ 200 km. Une source de chaleur interne spécifique pourrait y être la friction due aux effets de marée dans le noyau liquide. Mercure semble cependant morte en surface, homogène et constellée d'impacts. Elle porte les traces de grands épisodes de compression, que l'on pense dus à la contraction de la planète, liée à son refroidissement depuis la fin du grand bombardement (son rayon, actuellement de 2 439 km, ayant diminué de 2 km).

Au-delà de la ceinture d'astéroïdes, on rencontre Jupiter et son important cortège de satellites. Parmi ceux-ci, Io est un paradis pour les vulcanologues. C'est l'une des « planètes » les plus actives du système solaire : plusieurs éruptions étaient en cours lors du passage des sondes qui l'ont photographiée (Figure A4-4). Ses montagnes atteignent 15 km de haut et sont tantôt des volcans, tantôt des constructions de nature tectonique (formées par des failles de chevauchement, « inverses »). De la taille de notre Lune, elle a un manteau de silicates et un noyau métallique de taille importante et, peut-être, un champ magnétique propre et une asthénosphère fondue. Les coulées volcaniques sont principalement faites de silicates, mais les superbes couleurs (dans des tons jaunes, orangés et rouges) des images transmises par les sondes sont dues à la présence du soufre. La source de cette activité extraordinaire pour une planète de si petite taille n'est pas à rechercher dans ses isotopes radioactifs, elle est due à la proximité de Jupiter. Les forces de marée exercées par la planète géante sur son petit compagnon la malaxent au point de relâcher une chaleur considérable par effet de friction interne dissipée dans son sein.

Les autres satellites de Jupiter, à dominante de glaces, ne manquent pas d'attraits : présence d'un océan liquide (d'eau ?) sous la carapace glacée d'Europa ou de Callisto, présence d'une dynamo active sur Ganymède, superbes réseaux de failles de surface sur Europa et Ganymède (mais pas Callisto), volcans et fon-

taines d'eau... On en sait encore trop peu pour en tirer des conclusions utiles à notre bref exercice de planétologie comparée.

À l'issue de ce survol, même si l'on retrouve des processus analogues sur plusieurs planètes qui traduisent tous leur refroidissement inexorable, peut-être par convection dans un passé lointain, force est de constater que la tectonique des plaques telle que nous l'observons sur Terre est unique dans notre système, de même que la présence d'eau sous ses trois phases (et surtout liquide). Des panaches, dont l'expression de surface est très différente, sont en revanche présents sur Vénus (quelques-unes des *coronae*) et sur Mars (Tharsis et Olympus Mons). Une forte dichotomie, la juxtaposition de deux hémisphères très différents, se retrouve sur Mars, la Lune et... la Terre. Cette dichotomie est jugée très ancienne sur Mars et la Lune, acquise vers la fin du grand bombardement à la suite d'impacts géants ou d'un épisode catastrophique de convection mantellique et d'effondrement par subduction de la lithosphère préexistante. Sur Terre, son âge n'est pas connu. La ceinture de feu du Pacifique se marque dans la structure des frontières de plaques et dans celle du manteau révélée par la tomographie sismique depuis au moins 200 millions d'années. C'est très peu à l'échelle des temps que nous venons d'évoquer pour l'évolution de la plupart des autres planètes. Cette dichotomie est associée sur Terre à la structure profonde du manteau, à la géométrie de « degré deux¹¹ » de nombreux indicateurs géophysiques (pesanteur, géoïde, tomographie sismique du manteau inférieur) et géochimiques (anomalie DUPAL, découverte par Bernard Dupré et Claude Allègre). Depuis Friedrich Busse, nous pensons pouvoir la relier à la géométrie « quadripolaire » des deux super-panaches équatoriaux et antipodaux situés dans le manteau profond sous l'Afrique et le Pacifique central, qui gouverneraient une grande part de la dynamique terrestre, du volcanisme de surface dans le centre du Pacifique et de l'Afrique à la circulation du fer liquide au sommet du noyau.

11. Voir chapitre 10.

INDEX

- achondrites : 189-190
acide sulfurique : 45, 72, 246, 248, 250
Açores : 109, 153, 252
Afar : 10, 103-104, 107, 118-120, 153, 169, 179, 182, 229, 251, 296
Afrique du Sud : 26, 88, 125-126, 129, 131, 278
Agassiz, L. : 21
AGCM : 29-30, 32, 249, 251
Ahlbeck, J. : 78
Alaska : 42, 63, 245, 296
albédo : 32, 47, 53
Aletsch (glacier) : 50
Allègre, C. : 14, 78, 90, 151, 168, 170, 179, 189-191, 258, 326, 332
altération : 27-28, 32, 35, 122, 124, 258, 264, 276-277, 303
altimétrie : 78-79
Alvarez, W. : 11, 210, 260, 281, 296
Amérique du Nord : 26, 66-67, 93, 107, 121-122, 157, 165-166, 251
Amérique du Sud : 26, 89, 93, 108, 123-124, 163, 201
ammoniac : 228, 320
Anderson, D. : 11, 109, 150, 168, 252
Andrews, J. : 165
anoxie : 33, 254, 277, 283-284
Antarctique : 23, 26, 44, 79, 93, 126, 157-158, 160-161, 166-167, 173
aphélie : 21
Appalaches : 30
Arago, F. : 202-203
archéomagnétisme : 48, 200, 208
Archimède : 106, 135-136, 168, 180, 215, 287, 317
arcs insulaires : 90
Arctique : 61, 78
Argand, E. : 88
argon : 122-123, 129, 236, 265-267, 328-329
Armijo, R. : 119
Arndt, N. : 131
astéroïde : 13, 189, 236, 270, 274, 281
asthénosphère : 90, 95, 331
atmosphère : 13-14, 19, 23-24, 26-29, 32-33, 35-37, 39-40, 43-45, 47-48, 54, 57-58, 64, 70-71, 73, 75-76, 80-81, 112, 146, 189, 204-205, 213, 228, 234, 239-240, 246-248, 250-251, 253-254, 258, 268-269, 271-272, 274-277, 285, 293, 301, 303-305, 313-314, 328-330
aurores boréales : 47, 53, 204
Australie : 26, 31, 66, 131, 153, 173, 175, 279, 302
azote : 228, 247, 328

Bab-el-Mandeb : 119
Backus, G. : 216
Badro, J. : 142, 191
Bajpai, S. : 259, 267-268
banded iron formations, *voir* BIF
banquise : 36, 78
Barrat, A. : 329
baryum : 190
basaltes : 35, 91, 112, 119-120, 123, 127, 131, 158, 168, 170, 187, 190, 195, 207, 213, 252, 258, 276-277, 287, 325-326
Bellamy, D. : 78
Bénard, H. : 134-136
Berner, R. : 27-28, 258
béryllium : 44
Besse, J. : 10, 30, 113, 116, 151, 165, 167, 173, 178, 182, 212, 230, 257-258
BIF : 33
Bindeman, I. : 252
biosphère : 19, 35, 92, 272, 274, 279, 285, 302-303
Birch, F. : 140, 190
BLAG : 27
Blanter, E. : 60, 68
Bombay : 104, 112, 195, 259, 261, 265
Bonnefoy, B. : 269
Bonneville, A. : 156
Boscovich, R. G. : 106

- Boudon, G. : 103
 Bouguer, P. : 106, 163, 187
 Bourlès, D. : 53
 Boyle, R. : 200
 Brenguier, F. : 154
 Brésil : 121
 Brézin, E. : 55
 Brohan, P. : 58-59
 Brunhes, B. (et période magnétique) : 208-209, 211, 219
 Bullard, E. : 199-200, 210, 216, 220-221
 Burke, K. : 109
 Busse, F. : 171, 219, 292, 332
 Butler, B. : 48

 calcaires : 22, 27, 36
 Californie : 10, 66, 76, 90, 154, 210, 252
 calotte : 23, 26-27, 29-33, 54, 165, 245, 248, 280, 330
 calotte glaciaire : 26, 29, 31-32, 54, 165, 280
 Cambrien (étage géologique) : 175, 289
 CAMP : 124
 Campbell, I. : 129, 177-178, 181
 Campillo, M. : 154
 Canaries : 109, 122, 153, 198
 Cande, S. : 158, 210
 cap Rossello : 24
 Cap Vert : 109, 122, 153, 182
 cap-carbonates : 36
 Cappetta, H. : 113, 230
 carbonates : 35-36, 254, 274, 303, 328
 carbone : 27, 41, 44-45, 191, 236, 274-276
 Carbonifère (étage géologique) : 20, 26, 34, 289
 Carcaillet, J. : 53
 Carlut, J. : 53
 Cassagnol et Gillot (méthode de datation) : 259, 265
 Cavendish, H. : 187, 201
 Cazenave, A. : 79-80
 ceinture de feu du Pacifique : 90, 151, 173, 240, 285, 293, 332
 Cénomanien (étage géologique) : 234
 Cénozoïque : 28, 30, 233
 Chagos (îles) : 104-105, 111, 114
 chaleur latente de cristallisation : 228
 champ coercitif : 207
 champ magnétique : 12-14, 24, 41-42, 47-49, 51-54, 69, 72, 74, 82-83, 91, 115, 166, 199-201, 203, 205, 208-209, 211-222, 228, 257, 271, 285, 288-290, 293, 298, 302, 304, 323, 325, 327, 329-331
 champ poloïdal : 216-217
 champ toroïdal : 216-217
 chaussée des géants : 121
 Chenet, A.-L. : 238, 249, 259, 262, 265-266, 303
 Chicxulub (cratère) : 238, 270, 273, 296
 chlore : 242, 249
 chondrites : 189
 Chung, S.-L. : 130
 circulation atmosphérique : 29, 63, 215
 Clouard, V. : 156
 CO₂ : 23-24, 27-29, 32, 35, 37, 39-40, 43-44, 46-47, 54, 62, 70, 77, 254, 274-276, 305, 330
 Cogné, J.-P. : 28
 Columbia (traps) : 127, 179, 229, 237, 253, 283-284, 288, 296
 conduction : 95, 133, 142, 286
 conductivité thermique : 315-317
 convection : 21, 31, 36, 52, 54, 104, 128, 133-138, 142-144, 150-151, 162, 164, 171, 173, 180-181, 183, 204, 218, 228, 280, 284, 286-288, 290-292, 297-298, 301, 312, 315, 317, 319, 323, 325-327, 330, 332
 Coriolis (force) : 215, 218-219, 324
 couche D'' : 142, 144, 152, 168-169, 178, 180-184, 214, 229-230, 285-287, 290-291, 293
 couche d'ozone : 249, 253, 270
 couches limites : 138, 142, 168, 183, 301
 Cowling, T. G. : 216
 cratons : 228
 Creer, K. : 116
 Crétacé (étage chronologique) : 20, 26, 211, 233, 265, 267, 273, 277, 280, 289
 Croix-Rousse : 20
 Croll, J. : 21
 croûte : 88-90, 94-95, 106-108, 112, 114, 116, 118, 123, 127, 130, 134-135, 138-140, 146, 157, 161, 182, 187, 190, 201, 203, 213, 228, 252, 261, 263, 269, 272, 280, 296, 301, 320, 322-325, 327
 croûte continentale : 88, 107, 118, 130, 182, 187, 262, 320, 322-323

- croûte océanique : 88, 90, 107-108, 112, 157, 187, 272, 280, 320, 322, 324
 Crowley, T. : 45-46
 Curie (température) : 115, 213
 Curie, P. : 115, 213
 Cuvier, G. : 56-57
 cycle de Gleissberg : 205
 cycle de Wilson : 35, 181-182, 184, 291, 302

 Dahlen, T. : 152
 Dalrymple, B. : 210
 Dansgaard, W. : 22
 Darwin, C. : 69, 94-96, 161, 281
 Davaille, A. : 167, 180-182
 de Humboldt, A. : 155
 de Montredon, M. : 240-241, 245
 de Wit, M. : 73, 278
 Deccan (traps) : 11, 35, 55, 105, 112-114, 116, 118, 120, 122, 130, 178, 195, 230, 234, 238, 255, 257-258, 260-261, 263-269, 273, 276, 278, 282, 290, 297, 303
 Delaygue : 82
 dérive des continents : 87-88, 92, 99, 114, 116, 136-137, 144, 208
 dérive des pôles : 10, 161-164, 169
 Dessert, C. : 34-35, 258, 276, 303
 Dévonien (étage géologique) : 131, 231-232, 279
 diagenèse : 116
 diamants : 129, 131
 diffusivité thermique : 181
 dilatation thermique : 79, 144, 181, 316
 dioxyde de carbone, *voir* CO₂
 Doell, D. : 210
 Dolomieu (cratère) : 102
 Dryas jeune : 25
 du Toit, A. : 88, 125
 Ducruix, J. : 205
 Dudok de Wit, T. : 72, 76
 Duncan, B. : 125, 156, 178
 Duplessy, J.-C. : 23-24
 Dupré, B. : 34, 170, 258, 332
 Dwyka (formation) : 125

 El Chichon (volcan) : 247
 El Nino (volcan) : 68
 élasticité : 146, 311, 314
 Elatina : 31
 Elsasser, W. : 216
 Embleton, B. : 31
 Emeishan (traps) : 130-131, 183, 230, 234-235, 277, 290
 Emiliani, C. : 23
 Ératosthène : 185-186
 Ernesto, M. : 122
 Erta Ale (volcan) : 252
 Essex, C. : 58
 Etendeka (traps) : 122, 178
 Éthiopie : 118, 120, 129, 179, 229, 234, 284, 303
 Etna (volcan) : 208-209, 241
 eucaryotes : 35
 Evans, D. : 32, 175
 évaporites : 30
 Everest, G. : 106
 excentricité : 21
 explosion cambrienne : 36, 175, 231, 288
 extinctions : 10-11, 15, 225, 231-235, 237-238, 268-269, 272, 274, 277-278, 281, 283-284, 289-290, 297, 303, 305

 faille d'Owen : 119
 faille de l'Ailao Shan : 130
 faille de San Andreas : 90
 faille du fleuve Rouge : 90, 120
 faille du Jourdain : 90, 295
 faille du Levant : 120
 faille nord-anatolienne : 90, 295
 faille transformante : 119, 326
 failles de décrochement : 91
 failles normales : 262, 266
 failles transformantes : 91, 96, 124, 157
 Faraday, M. : 203, 214
 Farnetani, C. : 179
 fer : 14, 33, 72, 99, 115, 140-141, 161, 184, 188-191, 195-196, 198, 200, 207, 214-215, 217-218, 221-223, 227-228, 269, 285-286, 293, 325, 329, 331-332
 Féraud, G. : 114, 123, 129, 265, 278
 Ferrar : 126, 158
 filtrage : 69
 Fish Canyon Tuff : 252
 Flageollet, J.-C. : 73
 flottabilité : 168, 180-181

- fluor : 242
 Fluteau, F. : 11, 30, 34, 50, 52, 238, 249, 258, 266, 276, 278, 298, 303
 flux coronal ouvert : 72
 Folgheraiter, G. : 48, 208
 foraminifères : 53
 Fortescue : 131
 fosse : 90, 94, 158
 fosse des Aléoutiennes : 94
 fossiles : 26, 44, 88, 113, 116, 123, 161, 232-233, 267, 274-275, 329
 Foucart, S. : 68
 Foukal, F. : 43, 77
 Fournet, J. : 207
 Franklin, B. : 155, 241
 Frasnien (étage géologique) : 231
 Friis-Christensen, E. : 47, 71, 77
 Fritsch, E. : 259
 Fuller, M. : 53, 236
- Gaillardet, J. : 258
 Galam, S. : 82, 307
 Galapagos (îles) : 109
 Gallet, Y. : 48, 50-52, 55, 74, 208, 212, 289
 gallium : 223
 Gange : 106
 gaz carbonique : 248
 gaz carbonique, voir CO₂
 gaz rares : 168, 179, 328
 Genevey, A. : 50, 52
 géodésie : 187
 Gérard, M. : 259, 262, 264
 geyser : 127
 Ghats : 112, 118, 262
 GIEC : 57, 59, 62, 68-70, 73, 75, 77, 83, 304, 306
 Giegengack, R. : 78
 Gilbert, W. : 98, 115, 123, 195-200, 211, 265, 278
 glaciers : 20, 29, 44, 52, 80
 Glangeaud, P. : 208
 Glatzmeier, G. : 220
 Glen, J. : 122, 210
 Godderis, Y. : 30, 34, 303
 Goldreich, P. : 163-164
 golfe d'Aden : 119-120, 252
 Gondwana : 88, 125, 278
 Gordon, R. : 157, 160
 graben : 123, 327
- graine : 14, 138-139, 189, 191, 218-219, 223, 228, 285-286, 324
 grande province magmatique centre-Atlantique : 230
 granites : 187, 213, 228
 Grattan, J. : 242-244, 260
 gravimétrie : 187, 298
 grenat : 140
 grès : 30, 125, 210
 Griffiths, R. : 177-178
 Groenland : 20, 44, 78, 107, 120, 124, 130, 166, 178, 234, 246, 249-250
 Guadalupien : 233, 235, 289-290
 Gulf Stream : 81
 Günz (glaciation) : 20
 Gutenberg, B. et discontinuité : 141, 188
 Guyot, F. : 96, 142, 329
- Harland, B. : 32
 Hartmann, B. : 63
 Haruna (volcan) : 210
 Hawaï : 40, 93-94, 96-99, 101, 103, 107, 111, 133, 153, 155-157, 159-160, 169, 249, 257, 260, 269, 282, 286, 326
 Held, I. : 30, 298
 hélium : 168, 204
 Hertzberg, M. : 78
 Herzenberg, A. : 216
 Himalaya : 29, 91, 106, 228, 293, 295, 302
 Hipparque : 22
 Holmes, A. : 88, 133, 135, 137, 312
 Hospers, J. : 210
 Hulot, G. : 215
 Humboldt, A. de : 201, 203
 Humler, E. : 28, 269
 Hutton, J. : 134
 Huxley, T. H. : 69
 hydrosphère : 19
- Iapetus : 30
 IGRF : 203
 Iguaçu : 121
 IITPW : 174
 impact : 10-11, 13, 52, 71, 73, 189, 227, 236-239, 254, 270, 273-274, 277, 280-284, 296-297, 325-326, 329
 inclinaison magnétique : 31, 115, 196

- Inde : 26, 29-30, 35, 91, 99, 106, 112, 114, 116-120, 127, 130, 160, 166, 170, 178, 231, 258, 261, 265-266, 271, 276, 293, 302
 induction électromagnétique : 204, 216
 inertial interchange true polar wander, *voir* IITPW
 inlandsis : 26, 36, 78, 250
 International Ocean Drilling Program, *voir* IODP
 inversion (champ magnétique) : 24, 53, 64, 91, 149, 152, 154, 208-212, 220, 222, 263, 271, 289-291, 293, 302
 Io : 146, 320, 331
 IODP : 127
 ionosphère : 41, 43, 213
 iridium : 273, 281-282
 irradiances : 41-42, 44-45, 54, 70-72, 77
 Irving, T. : 116, 210
 Isambert, A. : 329
 Islande : 12, 99, 104, 107-108, 111, 121, 124, 153, 169, 178, 183, 210, 230, 241, 245-246, 249, 251, 296
 isostasie : 95, 106
- Jaeger, J.-J. : 113, 117, 230, 232, 259, 267
 Jaupart, C. : 134, 172, 180-181, 247, 253
 Jay, A. : 260
 Jeffreys, H. : 88, 133, 141, 188
 jerks archéomagnétiques : 50, 52, 55
 Jones, P. : 58-60, 253
 Jordan, T. : 150
 Jourdan, F. : 125, 278
 Jouzel, J. : 23-24, 68
 Jupiter : 21, 146, 189, 324, 331
 Jurassique (étage géologique) : 26, 123, 125, 210, 233, 289
- Kalahari : 126, 278
 Kalsubai (formation) : 263
 Karoo (traps) : 125-126, 129, 183, 278
 Keewinawan : 131
 Keller, G. : 267-268, 270-271, 273, 282
 Kent, D. : 35, 53, 123, 165, 181, 210
 Kerguelen : 109, 127, 153, 169, 182
 Kiaman (période magnétique) : 289
 Kilauea (volcan) : 93, 99, 323
 Kilimandjaro (volcan) : 79
 Kimberley : 129
 kimberlites : 129, 131
- Kirschvink, J. : 31, 36, 175, 237, 328
 Knight, K. : 267
 Köppen, W. : 21, 58
 Kossobokov, V. : 41-42, 205
 Kovacheva, M. : 48
 Kravchinsky, V. : 131, 279
- La Condamine : 134, 163, 187
 Labrosse, S. : 142
 Lacquedives : 105
 Laki (volcan) : 12, 239, 241, 243, 245-247, 251, 253-254, 260, 270, 296, 298, 303
 Lambeck, K. : 312
 Langereis, C. : 24
 Laquedives : 104, 111, 114
 Large Igneous Province, *voir* LIP
 Larmor, J. : 215
 Larochelle, A. : 91
 Laskar, J. : 22, 32
 Late Paleocene Thermal Maximum, *voir* LPTM
 latérite : 259, 263
 Laurasia : 88, 131
 Le Goff, M. : 48, 50, 52
 Le Mouél, J.-L. : 10, 12, 41-43, 52, 55, 60-61, 64, 67-68, 195, 199-200, 205, 215, 220, 285
 le Nautonier, G. : 198-199, 204
 Le Pichon, X. : 293
 Le Roy-Ladurie, E. : 20, 242
 Le Treut, H. : 57
 Lebombo : 126, 278
 Lehmann, I. et discontinuité : 188
 Lesotho : 125-126
 Leverrier, U. : 21
 Levrard, B. : 32
 Lidenbrock : 9, 39, 99, 155
 Lindzen, R. : 59, 62, 77, 82, 172, 299
 LIP : 128
 lithium : 190
 lithosphère : 19, 90, 95, 104, 116, 128, 168, 170, 178, 183, 229, 270, 280, 286, 291, 297-298, 323, 327, 331-332
 Livermore, R. : 165
 Lonavala (formation) : 263
 Long Valley (volcan) : 252
 Lorius, C. : 23
 Louvat, P. : 258, 276
 LPTM : 275
 Lune : 32, 145, 227, 229, 320, 324-326, 331-332

- MacDonald (point chaud) : 98, 155, 169
 MacDougall, I. : 210
 Machetel, P. : 151
 MacKenzie, D. : 142
 MacLeod, N. : 237
 Madagascar : 116, 127, 230, 234, 271
 magma : 34, 90, 96, 102, 113, 124, 129, 142, 186, 227, 234, 252, 286, 324, 327, 329
 magnétite : 115, 197, 207, 213, 328
 magnétosphère : 41, 43, 213
 magnétostratigraphie : 210
 Mahabaleshwar : 104, 112, 118, 258-263, 267, 271, 273
 Maldives (îles) : 104-105, 111, 114
 Malkus, W. : 54
 Manighetti, I. : 108, 119
 Mann, M. : 57, 73, 75
 manteau : 9, 14-15, 31, 35-36, 90-92, 95-99, 101, 104, 107, 116, 120, 126, 128, 133-142, 144, 146, 150-152, 160-162, 164-165, 168-171, 173-174, 177-183, 188-190, 201, 213-214, 218, 223, 228-229, 270, 280, 284-293, 297-298, 301-302, 311-317, 322-323, 325, 327, 330-332
 manteau inférieur : 134, 138, 140-142, 150-151, 153, 162, 169-170, 172-174, 179-182, 285-287, 302, 332
 manteau supérieur : 134, 136-137, 139-142, 150-151, 153, 162, 171, 173, 178-179, 181, 183, 229, 286-288, 291, 301, 317, 325
 Marinoenne (glaciation) : 34, 36
 Mars : 145, 189, 227, 320, 324, 326-332
 Marsh, G. : 125, 278
 Mascareignes (plateau) : 104, 114
 Massif Central : 27, 140
 Mattauer, M. : 326
 Matuyama, M. (et période magnétique) : 209, 211
 Mauna Kea (volcan) : 40, 93
 Mauna Loa (volcan) : 14, 93, 282, 326
 Maurice (île) : 103, 105, 114, 326
 Mawson, D. : 32, 203
 Maxwell (lois) : 214, 311, 314
 McKenzie, D. : 151, 178
 Melloni, M. : 48, 208
 Mer Rouge : 108, 119-120, 252
 Mercanton, P.-L. : 209
 Mercure : 209, 320, 330
 Meteor Crater : 296
 météorite : 11, 237, 273, 277, 280-281, 296, 329
 méthane : 23, 228, 275-277, 284, 303
 Milankovic : 13, 19, 21-24, 31, 53, 303, 307
 Mindel (glaciation) : 20-21
 minimum de Maunder : 74-75
 Moberg, A. : 74-76
 Moelg, T. : 79
 Molnar, P. : 155-156
 moment cinétique : 162
 moment d'inertie : 162-164, 187
 Montagner, J.-P. : 151, 153
 Montelli, R. : 152-153
 Montigny, R. : 113, 230
 moraines : 20
 Moreira, M. : 179
 Morgan, J. : 98-99, 109, 130, 155, 160, 166, 178, 282
 Morley, L. W. : 91, 210
 mousson : 30
 Müller, D. : 156-157
 Muttoni, G. : 35
 Namibie : 122, 125-126
 Narmada : 261, 263, 266, 271
 Narteau, C. : 220, 285
 Nasik : 263, 271, 273
 Natkusiak : 131
 NATVP : 124
 Navier-Stokes (équation) : 29, 136, 173, 219, 313-315
 Néel, L. : 49, 209
 Néogène : 27
 Néoprotérozoïque : 31, 34, 36
 Newell, R. : 59
 Newton, I. : 21, 134, 163, 186, 313
 nickel : 189-191
 Noble, D. : 78
 Nof, D. : 298
 Nolet, G. : 152
 nombre d'Ekman : 219, 222
 nombre de Prandtl : 219
 Norman, R. : 196
 North Atlantic Tertiary Volcanic Province, voir NATVP
 noyau : 12, 14-15, 35, 52, 54, 91, 99, 115, 129, 138-139, 141-142, 146, 153, 161, 167-168, 171, 181, 183-190, 196, 201, 212-221, 223, 227-229, 285-288,

- 290, 293, 298, 301-302, 316, 320, 323-325, 327-328, 331-332
 noyau externe : 138, 214, 286
 noyau liquide : 14, 188, 191, 216, 218-219, 223, 285, 331
 Nuna (période magnétique) : 35
- obliquité : 21, 32, 53
 Okavango : 126, 278
 Oligocène (étage géologique) : 234
 olivine : 140, 151, 327
 Olsen, P. : 123
 Olympus Mons (volcan) : 146, 326-327, 332
 ondes P : 147, 153, 188
 Ontong-Java (plateau) : 230
 optimum climatique médiéval : 20, 44-45, 50
 Ordovicien (étage géologique) : 26, 231-233, 236, 279, 289-290
 orgues basaltiques : 123
 Oural : 61, 129, 202
 Oxburgh, R. : 137
 oxydes : 189-190, 329
 oxygène : 22-23, 26, 33, 36, 44-45, 48, 53, 191, 228, 254, 275
- Paléocène (étage géologique) : 234, 275, 303
 paléointensité : 50
 paléomagnétisme : 10, 82, 114-115, 118, 159, 195, 207-208, 257, 262, 266, 270, 293
 Paléozoïque : 36, 131, 175, 231
 panache : 11, 14, 35, 92, 96, 99, 101, 104, 107, 109, 114, 119, 123, 126, 128, 133, 137, 139, 142-144, 152-153, 160, 162, 164, 168-171, 173, 177-183, 218, 229-230, 247, 260-261, 269-270, 280, 282, 286-291, 297, 301, 305, 319-320, 323, 327, 330, 332
 Pangée : 20, 26, 29-30, 34, 88, 124-125, 175, 302
 Pâques (île) : 98, 101, 153, 155-156, 169
 Parana (traps) : 121, 178
 Patriat, P. : 157
 Pavlov, V. : 278, 289
 Peregrinus, P. : 194, 196
 périhélie : 21
 période inverse : 268, 271, 273
- permafrost : 26
 Permien : 26, 231, 233, 235, 289
 pérovskite : 141, 151, 180, 327
 petit âge glaciaire : 20, 39, 44-45, 50, 74-75
 Phanérozoïque : 26, 36, 212, 274, 279, 282, 290
 Pielke, R. : 19, 79
 Pierrehumbert, R. : 82
 Pinatubo : 247, 270
 Piton de la Fournaise (volcan) : 14, 101-103, 140, 154, 282, 326
 Piton des Neiges (volcan) : 103
 plaine des Cafres : 102
 plateau tibétain : 120, 228
 Pliensbachien (étage géologique) : 234, 278
 plomb : 129, 187, 322, 330
 points chauds : 14, 35, 93, 96-99, 101, 103, 105, 107-109, 111, 114, 118-122, 124, 127-128, 132, 134, 152-160, 164-165, 167-169, 171, 173-174, 177-179, 181-183, 195, 229-230, 246, 251-252, 260, 269, 272, 282, 286-287, 319, 323, 327
 Poirier, J.-P. : 16, 53, 189, 191, 214, 241, 285
 Poisson, D. : 203
 polarité inverse : 209, 263, 289
 polarité magnétique : 209, 263, 267, 273
 pompe biologique : 274
 potassium : 227, 322
 précession : 21, 24, 54, 187, 218
 précession des équinoxes : 22, 187
 Prévot, M. : 122
 primaire (ère) : 31, 48, 184, 231, 235
 procaryotes : 35
 Protérozoïque : 33-34, 175
 protoplanètes : 189
 Punta di Maiata : 24
 Puy-de-Dôme (volcan) : 208
 pyroclastiques : 129
 pyroxène : 140
- quartzites : 125
 Quidelleur, X. : 131, 236, 259, 262, 265-266, 279
- radon : 102
 Rajahmundry : 267-268, 271

- Rajmahal : 127, 230, 234
 Ramstein, G. : 30, 34
 Rancourt, D. : 78
 Rayleigh, Lord (et nombre) : 135-136, 138, 143, 180-181, 218, 286, 313, 316-317
 Raymo, M. : 28, 32
 Raymond, C. : 158-159, 209
 rayonnement corpusculaire : 71
 rayons cosmiques : 12, 47-48, 53-54, 71, 77, 228, 285, 290, 329
 rebond post-glaciaire : 135, 165, 169
 réchauffement climatique : 12, 25, 44, 55, 57, 60, 62, 69, 73, 75, 77, 79, 82, 165, 167, 305-307
 red boles : 264-265
 Renne, P. : 122-123, 129, 131, 234-235, 267, 279
 Réunion : 101, 103, 105, 107, 111, 114, 153-154, 157, 159-160, 169, 178, 182, 195, 230, 282, 286, 326
 Ricard, Y. : 173
 Richards, M. : 173, 175, 178
 Ricou, L.-E. : 292
 rift d'Aden : 11
 Rikitake, T. : 220-221
 ringwoodite : 141
 Riss (glaciation) : 20-21
 Roberts, P. : 216, 220
 Rochette, P. : 118
 Rodinia : 35-36, 303
 Rohault, J. : 200
 Romanowicz, B. : 150
 Roza flow : 253-254, 260
 Runcorn, K. : 116

 Sahara : 24
 Saint Helens (volcan) : 247
 Schilling, J.-G. : 104
 Schlich, R. : 157
 Schneider, D. : 159
 Schnirman, M. : 60, 68
 Schwartz, S. : 80
 Sciaky, P. : 78
 Ségoufin, J. : 157
 Self, S. : 244-246, 249-250, 253, 257, 260, 267, 269, 271
 Seychelles : 116-117, 119, 127, 153, 261-262, 271
 Shackleton, E. : 203
 Shackleton, N. : 23

 Shoemaker-Levy (comète) : 146
 Sibérie : 129-131, 183, 202, 230, 234-235, 237, 277-278, 284, 290
 Siscoe, G. : 53
 SNC : 328
 snowball Earth : 26, 31, 33-37, 277
 Solanki, S. : 43, 76-77
 Soleil : 12-13, 19-21, 24, 31, 39, 42-44, 46, 48, 54-55, 63-68, 70-77, 81, 98, 185, 189, 196, 203-205, 213, 239, 247, 303, 305, 320, 324
 sols rouges, voir red boles
 Souriau, A. : 223
 spectro-héliographes : 41
 Stanhill, G. : 43
 Stanley, S. : 233, 235
 Staudacher, T. : 102
 Steinberger, B. : 173-174
 stratigraphie : 24, 31, 131
 stratosphère : 47, 239, 247-248, 250-251, 254, 260, 269, 277
 Stromboli (volcan) : 9, 241
 Sturtienne (glaciation) : 31, 34, 36
 Stutzmann, E. : 151, 182
 Subbarao, K. V. : 259, 262
 Sumatra : 87, 252, 296
 Sumner, D. : 31
 superchrons : 220, 289
 superplumes : 181
 Svensmark, H. : 47, 71, 77

 taches solaires : 21, 43-44, 63-64, 72, 75, 304
 Taponnier, P. : 108, 119, 152
 Taquet, P. : 57, 280
 Tarduno, J. : 159-160
 Tataouine (météorite) : 329
 tectonique des plaques : 19, 280, 284
 Tertiaire (ère) : 26, 233-234, 267, 273
 Thétyes : 30, 35, 88, 157, 170, 302
 Tharsis : 146, 326-327, 332
 Thellier, E. et O. : 48-49, 209, 212
 tholéitique : 112
 Thompson, L. : 79
 Thomson, J. : 134
 Thordarson, T. : 244-246, 249-250, 253, 269
 Thouveny, N. : 53
 Tibet : 11, 29-30, 91, 130, 302
 Tilgner, A. : 54
 tillites : 26

- Tissot, T. : 56
 Toba (volcan) : 252-253
 tomographie : 14, 138, 144, 147-152, 154, 168, 178, 181-182, 287-288, 332
 Toomre, A. : 163-164
 toundra : 26
 TPW : 161, 166
 trap : 10-11, 13, 33-36, 55, 105, 111-114, 116-119, 121-122, 124-125, 127-131, 168, 178-179, 181-183, 229-230, 234-237, 246, 253-255, 257-265, 270, 273-280, 282-284, 286, 288-291, 296-298, 303, 305, 323
 Trias (étage géologique) : 34, 123, 125, 232-234, 237
 Tristan da Cunha (volcan) : 108, 111, 121, 169, 178, 183, 230
 true polar wander : 161

 uranium : 129, 227, 322
 Usoskin, I. : 43, 72, 76-77
 Uyeda, S. : 210

 Valanginien (étage géologique) : 234
 Valet, J.-P. : 220, 329
 Valles Marineris : 146, 326
 van der Hilst, R. : 150-151, 154
 Vandamme, D. : 113, 159, 230, 257, 261, 267
 Varanger : 34
 variation séculaire (champ magnétique) : 49, 68, 199, 201, 203, 205, 213-214, 222, 258, 261, 263, 279
 Veizer, J. : 45, 77
 vent solaire : 71-72
 Ventersdorp : 131
 Vénus : 145, 320, 322-323, 326, 331-332
 Verne, J. : 9, 14, 137, 175

 Vésuve (volcan) : 208, 240-241
 Viluy (traps) : 131
 Vine, F. : 90-91, 210
 viscosité : 134-136, 144, 151, 162, 164-165, 173-174, 181, 214, 222, 253, 290, 311-312, 314, 316-317
 Vogt, P. : 109, 234, 282
 volcan bouclier : 102
 Vostok : 44

 Wai (formation) : 263
 Weaver, R. : 154
 Wegener, A. : 12, 14, 21, 26, 58, 88, 96, 108, 124-125, 133, 137, 162, 209
 Wendler, G. : 63
 Whaler, K. : 215
 Whewell, W. : 295, 297
 White, B. : 178
 Widdowson, M. : 260-261, 263, 269
 Williams, W. : 31
 Wilson, T. : 90, 96-97, 99, 109, 175, 181, 302
 Wunsch, C. : 80-81
 Würm (glaciation) : 20-21

 Xingling, Y. : 233

 Yellowstone : 127, 179, 229, 252

 Zhou, M.-F. : 130
 zone de transition : 134, 138, 140-142, 144, 150, 153, 168-170, 172, 178-179, 181-183, 229, 286, 288, 291
 zones de subduction : 27, 116, 128, 134, 152, 160, 164, 167, 170-171, 183, 213, 228, 240, 247, 287-288, 293, 322-323

REMERCIEMENTS

Je remercie Claude Allègre, Michèle Courtillot, Anne Davaille, Frédéric Fluteau, Jérôme Gaillardet, Yves Gallet, François Guyot, Claude Jaupart, Jean-Louis Le Mouél, Jean-Paul Montagner, Jean-Paul Poirier, Xavier Quidelleur et Yoram Teitler qui m'ont fait l'amitié de relire une première version de cet ouvrage et de me faire part de nombreuses remarques que j'ai pour l'essentiel intégrées dans cette version.

Une première relecture par Gérard Jorland m'a conduit au plan final retenu pour ce voyage ; une seconde, avec Émilie Barian, en a amélioré, je l'espère, la lisibilité. Le coup d'œil et d'esprit d'Odile Jacob, et son indéfectible enthousiasme m'ont été d'un grand soutien. Je tiens à remercier tout particulièrement Joël Dyon qui a exécuté l'essentiel des figures avec son talent habituel et Yoram Teitler qui a construit l'index.

TABLE

Introduction	9
--------------------	---

PREMIÈRE PARTIE Qui contrôle le climat ?

Chapitre premier – Du Soleil et de Milankovic à la tectonique des plaques	19
Le Soleil et Milankovic (20) – La tectonique des plaques (25) – Modélisation climatique (29) – La Terre « boule de neige » (31)	
Chapitre 2 – Du Soleil au noyau	39
Soleil, champ magnétique et climat (41) – Du siècle au millénaire (44) – En reculant dans l'histoire... (48) – ... jusqu'aux temps géo- logiques (53)	
Chapitre 3 – Quelle est la température moyenne de la surface du globe ?	55
Mesurer la température au cours du dernier siècle (57) – La tem- pérature moyenne en Europe (60) – « Durée de vie » des pertur- bations climatiques (63) – L'Amérique du Nord (65) – Une moyenne mondiale ? (66) – Le Soleil nié (68) – Quels mécanis- mes ? (70) – Heurs et malheurs de la courbe « en crosse de hockey » (73) – Une confiance excessive (77) – De la fonte des gla- ces et de la hausse du niveau des mers (78) – Une attitude scien- tifique « politiquement incorrecte » (81)	

DEUXIÈME PARTIE

La descente aux Enfers

(ou le paradis du géophysicien)

Chapitre 4 – Le ballet des plaques	87
Chapitre 5 – Le point chaud de Hawaï	93
Chapitre 6 – La course aux points chauds	101
L'Islande et l'Afar (104) – Tristan da Cunha... et les autres (108)	
Chapitre 7 – Points chauds, « traps » et déchirure des continents	111
De la Réunion au Deccan (111) – L'Éthiopie et l'Afar (118) – De l'île de Rhum au Groenland (120) – Parana et Etendeka (121) – La grande province de l'Atlantique central (122) – La figure héritée de l'Atlantique (124) – Le Karoo et l'Antarctique (125) – Des « petits » traps (127) – Les provinces ignées sous-marines (127) – Les grands traps de Sibérie (128) – En remontant dans l'ère primaire... (130)	
Chapitre 8 – Écoulement de la chaleur, convection, panaches et instabilités	133
Mouvements des plaques et mécanique des fluides (134) – Com- portement des matériaux terrestres, équation de Navier-Stokes et nombre de Rayleigh (136) – La structure en couches de la Terre : sismologie et minéralogie (138) – Couches limites et instabilités (142)	
Chapitre 9 – Imager les profondeurs	145
La tomographie sismologique (147) – Bananes et « doughnuts » (152)	
Chapitre 10 – Mouvement des points chauds et dérive des pôles	155
Les points chauds du Pacifique sont-ils immobiles ? (155) – Et ceux de l'hémisphère indo-atlantique ? (156) – Et d'un héli- sphère à l'autre ? (157) – La « vraie » dérive des pôles (160) – Un retour sur quelques « si »... (166) – Plusieurs types de points chauds ? (167) – Hémisphères, « degré deux » et « <i>superswells</i> » (170) – De l'utilité du numérique bien contrôlé (172) – L'axe de la Terre a-t-il basculé ? (174)	

Chapitre 11 – Les panaches thermochimiques : double diffusion, grosses têtes et petites queues... ..	177
Où sont les grosses têtes ? (178) – Panaches thermiques ou chimiques ? (180)	
Chapitre 12 – Des météorites au noyau	185
Peser la Terre (186) – La découverte du noyau (188)	
Chapitre 13 – <i>Magnus magnes ipse est globus terrestris</i>	193
Petite histoire du magnétisme terrestre (193) – Petrus Peregrinus (194) – William Gilbert (196) – Guillaume le Nautonier (198) – xvii ^e et xviii ^e siècles : de Gellibrand à Halley (199) – xviii ^e et xix ^e siècles : de Humboldt à Sabine (201) – Grands physiciens du xix ^e siècle (203) – Le rôle du Soleil (204) – Variation séculaire et phénomènes internes (205) – Les fondements du paléomagné- tisme (207) – Les inversions enfin acceptées (210)	
Chapitre 14 – La clef du champ	213
Cartographier le flot dans le noyau (214) – La dynamo nucléaire (215) – Des équations touffues aux modèles réduits (219)	

TROISIÈME PARTIE

Colères de la Terre

et extinctions en masse

Chapitre 15 – Une belle corrélation	227
La Terre, machine thermique : récapitulons... (227) – La séquence des traps et l'échelle des temps géologiques (229) – Extinctions, traps et impacts (230) – La corrélation (234)	
Chapitre 16 – Volcanisme et climat : l'éruption du Laki	239
De Mourgue de Montredon à Benjamin Franklin (240) – <i>Annus Mirabilis</i> : la faute du Laki (242) – Empoisonnement par le soufre (247) – Modéliser l'éruption du Laki (249) – Super-volcans et acci- dents climatiques (252) – Du petit Laki aux gigantesques traps (253)	
Chapitre 17 – Retour sur les traps du Deccan et l'extinction des dinosaures	257
Stratégie : l'équipe est constituée (257) – Où aller ? La collabora- tion avec l'Open University (260) – La moisson (262) – Astuce	

paléomagnétique : la découverte des « pulses » (262) – Les *red boles* (264) – La datation « potassium-argon » (265) – L'apport des paléontologues (267)

Chapitre 18 – Du scénario climatique de la fin de l'ère secondaire aux autres extinctions	269
Le scénario volcanique : « méga-pulses » (270) – CO ₂ et chlatrates (273) – Froid, puis chaud... puis froid (276) – De nouveaux tests en cours (278) – Des autres hypothèses (280)	
Chapitre 19 – Du noyau à la vie	285
Le manteau supérieur et le manteau inférieur communiquent-ils ? (287) – Les grands panaches viennent-ils de la limite manteau-noyau ? (288) – Le « short de Ricou » (291)	
Chapitre 20 – Uniformité, catastrophes et lois d'échelle	295
Avons-nous vu les plus gros ? (295) – Puissance et dangers de l'informatique (297) – Le primat de l'observation (299)	
Conclusion	301
Annexe 1 – Bref aperçu de la méthode satellitaire de mesure de la forme de la surface des océans	309
Annexe 2 – Comportement des matériaux	311
Annexe 3 – L'équation de Navier-Stokes et le nombre de Rayleigh	313
Annexe 4 – Escapade vers les autres planètes	319
Index	333
Remerciements	343

DU MÊME AUTEUR

CHEZ ODILE JACOB

- « La dynamique du globe contrôle-t-elle l'évolution des espèces ? », in Y. Michaud (éd.), *Qu'est-ce que la vie ?*, « Université de tous les savoirs », 2000.
- « L'observation du globe », in Y. Michaud (éd.), *Le Renouvellement de l'observation dans les sciences*, « Université de tous les savoirs », 2003.
- « Volcanisme et évolution de la vie sur terre », in Y. Michaud (éd.), *Qu'est ce que la diversité de la vie ?*, « Université de tous les savoirs », 2004.

CHEZ D'AUTRES ÉDITEURS

- « Interprétation des anomalies magnétiques et prospection magnétique », en collaboration avec R. Neumann, in J. Coulomb et G. Jobert (éds), *Traité de géophysique interne*, Masson, 1976.
- « Géothermie », en collaboration avec J. Francheteau, in J. Coulomb et G. Jobert (éds), *Traité de géophysique interne*, Masson, 1976.
- Fossil Magnetic Fields, Papers from a Symposium to Honour Émile Thellier*, édité en collaboration avec C. Allègre et J. Coulomb, Elsevier, « Physics of the earth and planetary interiors », 24, n° 2-3, 1981.
- « La dérive des continents », avec P. Tapponnier, in *La Mémoire de la Terre*, Seuil, 1992.
- La Vie en catastrophes*, Fayard, 1995.
- Evolutionary Catastrophes : The Science of Mass Extinction*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999 ; rééd. en livre de poche 2002.
- « A long-term octupolar component in the geomagnetic field ? », en collaboration avec J. Besse, in J. E. T. Channell, D. V. Kent, W. Lowrie, et J. G. Meert (éds), *Timescales of the Paleomagnetic Field*, American Geophysical Union, Washington, 2004.
- « Evidence for catastrophes in the evolution of life and earth », in A. Bell, J. Swenson-Wright et K. Tybjerg (éds), *Evidence*, Cambridge University Press, Cambridge, 2008.

Ouvrage publié sous
la responsabilité éditoriale de Gérard Jorland

Achevé d'imprimer par SAGIM en septembre 2009
sur rotative Variquik
à Courtry (77181)

Cet ouvrage a été transcodé et mis en pages
chez NORD COMPO (Villeneuve-d'Ascq)

Imprimé en France

Dépôt légal : septembre 2009
N° d'édition : 7381-1939-X
N° d'impression : 11546

L'imprimerie Sagim est titulaire de la marque
Imprim'vert® depuis 2004

NOUVEAU VOYAGE AU CENTRE DE LA TERRE

« Pourquoi entamer ce livre sur le "système Terre" par le climat ?

Parce que le géologue a peut-être plus à apporter au climatologue que celui-ci n'en a encore conscience. Comment avons-nous donc abouti au fameux problème du réchauffement climatique ? Comme souvent en science par des chemins inattendus.

Sans remettre en cause la réalité du réchauffement global des 150 dernières années, on est encore loin d'avoir identifié avec assez de sûreté les moteurs des changements climatiques pour en prédire le devenir.

Pour comprendre les évolutions capricieuses de l'atmosphère et des océans sur les longues échelles de temps, il faut aussi comprendre celles de la terre solide. Partant explorer séismes et volcans, pour la plupart si bien expliqués par le ballet des plaques tectoniques, nous découvrirons les volcans de points chauds. Ces panaches, issus des profondeurs de la Terre, seront notre guide dans ce voyage vers les intérieurs plus mystérieux de notre dynamique planète, pour atteindre le noyau de fer liquide où se concocte le champ magnétique et enfin la graine solide au sein de laquelle réside le centre de la Terre.

Donnant un "coup de pied au fond", nous remonterons à la surface, espérons-le, mieux convaincus des liens profonds qui associent entre elles les évolutions parfois chaotiques des enveloppes si diverses de notre planète. » V. C.

VINCENT
COURTILLOT

Vincent Courtillot est membre de l'Académie des sciences et professeur de géophysique à l'université Denis-Diderot-Paris-VII. Il dirige l'Institut de physique du globe de Paris.

713694.0 

ISBN 978-2-7381-1939-1



9 782738 119391

En couverture : © NASA/Corbis.

27 €

www.odilejacob.fr