

les plaques plongeantes ne s'enfonçaient plus profond.

On essaya alors d'imaginer ce qui se passait à plus grande profondeur, et ce jusqu'à la base du manteau, située à 2 900 kilomètres de profondeur. Pendant plus de 20 ans, les modèles fleurirent. Pour simplifier à l'extrême, les discussions ont longtemps oscillé entre deux modèles extrêmes. Au début de la tectonique des plaques, on privilégia un modèle à deux couches, caractérisé par une couche supérieure, n'ayant que 600 kilomètres d'épaisseur, et une couche inférieure très épaisse. On supposa que les plaques étaient entraînées par les courants de matière situés à la partie supérieure des petites cellules de convection du manteau supérieur. Dans cette configuration, le manteau inférieur était animé par des cellules de convection beaucoup plus grandes, les deux systèmes étant plus ou moins indépendants. Cette interprétation était compatible avec les changements de rhéologie du manteau qui se produisent théoriquement à 410 et à 660 kilomètres de profondeur. À cette profondeur, sous l'effet des augmentations de pression et de température, la structure cristalline des roches est modifiée : l'olivine se transforme en spinelle, puis en pérovskite.

Ce modèle à deux couches est aujourd'hui remplacé par un modèle à une couche, où les plaques descendent à grande profondeur, parfois à 2 900 kilomètres, jusqu'à la base du manteau. La figure 2 montre les conséquences de ce nouveau modèle sur la tectonique des plaques. La dynamique des plaques n'est plus confinée à un système superficiel limité au manteau supérieur ; elle est désormais partie intégrante de la dynamique du manteau terrestre tout entier. Les plaques en mouvement à la surface de la planète correspondent, en définitive, à la partie visible des grands mouvements de matière qui animent le manteau. C'est, pour la géologie, une révolution : comme l'avait pressenti le fabuliste Jean de La Fontaine, «C'est le fond qui manque le moins».

La tomographie sismique du manteau

Les affirmations précédentes sont étayées par la tomographie sismique. L'intérieur du globe est inatteignable par l'exploration directe, mais sa structure est reconstituée par les mesures

des vitesses de propagation des ondes sismiques, lesquelles dépendent de la nature, de la structure et de la température des roches qui s'y trouvent.

Le principe de la tomographie sismique est analogue à celui de la tomographie médicale. Au lieu de rayons X, les géologues utilisent, pour étudier la nature des constituants de la terre, les ondes sismiques élastiques, résultant de tremblements de terre importants. Ces ondes traversent la Terre et ralentissent ou accélèrent en profondeur. En mesurant les temps de propagation de l'onde entre l'épicentre du séisme et diverses stations sur le globe terrestre, on en déduit les variations de vitesses sismiques associées. Celles-ci sont dues à des différences de température du manteau ou à des changements de composition, que l'on sait identifier. Cette tomographie permet de reconstituer la structure des roches traversées par les ondes sismiques.

Les résultats sur la constitution du manteau ont été obtenus grâce au traitement d'un nombre extraordinaire de données. Harmen Bigward et ses collègues se sont en effet servi des ondes émises par 82 000 séismes, bien localisés, qui se sont produits sur toute la surface du Globe entre 1964 et 1995, et qui ont été enregistrés dans tous les observatoires existants. Ces chercheurs ont traité plusieurs millions de données avec des ordinateurs extraordinairement puissants. Comme les ondes se propagent lentement dans les zones chaudes et plus rapidement dans les zones froides, on sait reconstruire un modèle tridimensionnel des variations de structure du manteau. Elles sont visualisées sur des coupes verticales ou sur des cartes établies à différentes profondeurs. Certaines de ces données sont accessibles sur Internet.

La figure 3, obtenue par Stephen Grand détaille comment on a réussi à trouver la trace des plaques dans le manteau. Les couleurs indiquent les variations de vitesse des ondes sismiques par rapport à une valeur moyenne.

La bande bleue qui descend obliquement jusqu'à 2 700 kilomètres de profondeur correspond à une zone froide. On pense qu'il s'agit de la trace laissée par une plaque froide qui s'est enfoncée dans une ancienne zone de subduction. Les matériaux de la plaque se sont beaucoup réchauffés depuis, mais ils se signalent encore, soit par une anomalie thermique, soit par une composition différente.

Cette interprétation fut d'abord mise en doute en raison des écarts de vitesse utilisés, qui étaient jugés trop petits pour être significatifs. Elle est maintenant adoptée, en partie grâce à une argumentation géologique toute simple : la subduction proposée par la tomographie se trouve exactement là où l'on pensait ; les études de surface ont en effet montré que des milliers de kilomètres de plaques océaniques du Pacifique se sont enfoncés sous le continent Nord-américain depuis plus de 150 millions d'années. Comme deux arguments indépendants vont dans le même sens, l'interprétation proposée est adoptée.

Ce type de raisonnement a été simultanément appliqué à toute la planète, et l'on a découvert la trace d'une multitude d'anciennes plaques enfoncées tout autour du Pacifique, depuis la Méditerranée jusqu'en Indonésie. La surface totale de toutes ces plaques retrouvées correspond probablement, et malgré les incertitudes, à plus de 50 millions de kilomètres carrés (100 fois la France!).

Tomographie et paléogéographie

On est désormais capable de reconstituer assez bien les modifications qui se sont produites à la surface de la planète depuis 150 millions d'années. Pour chaque époque, on sait où se trouvaient les grands continents et quelle était la forme des océans. On sait aussi à peu près où s'enfonçaient les grandes subductions océaniques autour du Pacifique et sur le bord Sud de l'Eurasie. Dans ces conditions, lorsque l'enfoncement d'un océan s'est produit pendant une longue période, on a une idée de la longueur de plaque enfoncée et de son âge. C'est ainsi que Stephen Grand a proposé que l'extrémité de la plaque Pacifique enfoncée sous l'Amérique du Nord était âgée d'environ 100 millions d'années. La géométrie de la plaque plongeante n'est, hélas pour l'entendement, pas toujours aussi simple. Il arrive que la plaque s'interrompe et soit relayée à plus grande profondeur par une plaque plus ancienne, dont l'origine reste incertaine. Enfin, lorsque plusieurs subductions se sont succédées sans avoir fonctionné longtemps, l'interprétation devient difficile.

Une toute nouvelle spécialité est née : elle consiste à repérer les plus importants tronçons de plaques enfoncées, à essayer d'avoir une idée de leur âge et à les raccorder aux grands déplacements

de plaques. Cet aspect de la tectonique des plaques, qui concerne des milliers de kilomètres de plaques perdues dans le manteau, est tout à fait nouveau.

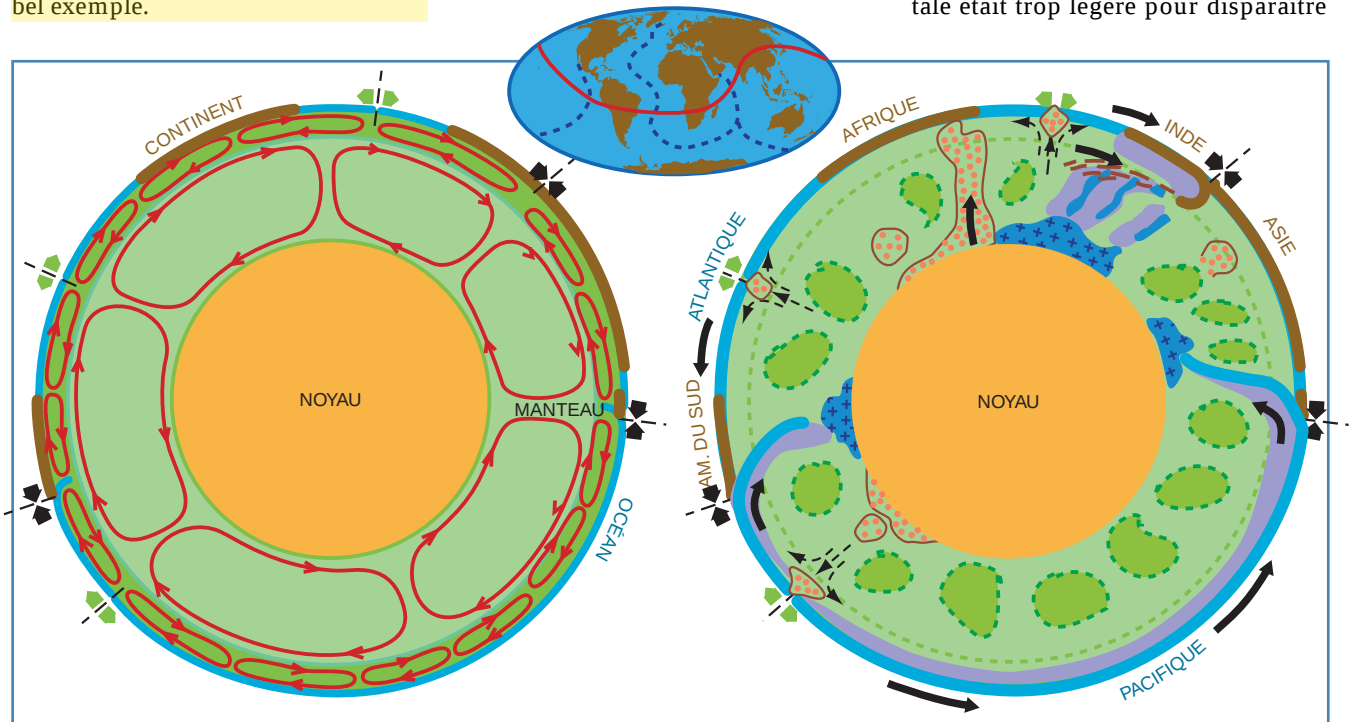
La prospection a commencé : la récente découverte de vieilles plaques océaniques, âgées de 150 millions d'années (Jurassique), qui se trouvent actuellement sous la Sibérie, en est un très bel exemple.

Tomographie et collision

La tomographie ayant montré que l'enfoncement de la lithosphère océanique est un phénomène majeur de la dynamique du manteau, on peut se demander ce qu'elle apporte sur le mécanisme de la collision, lorsque deux plaques

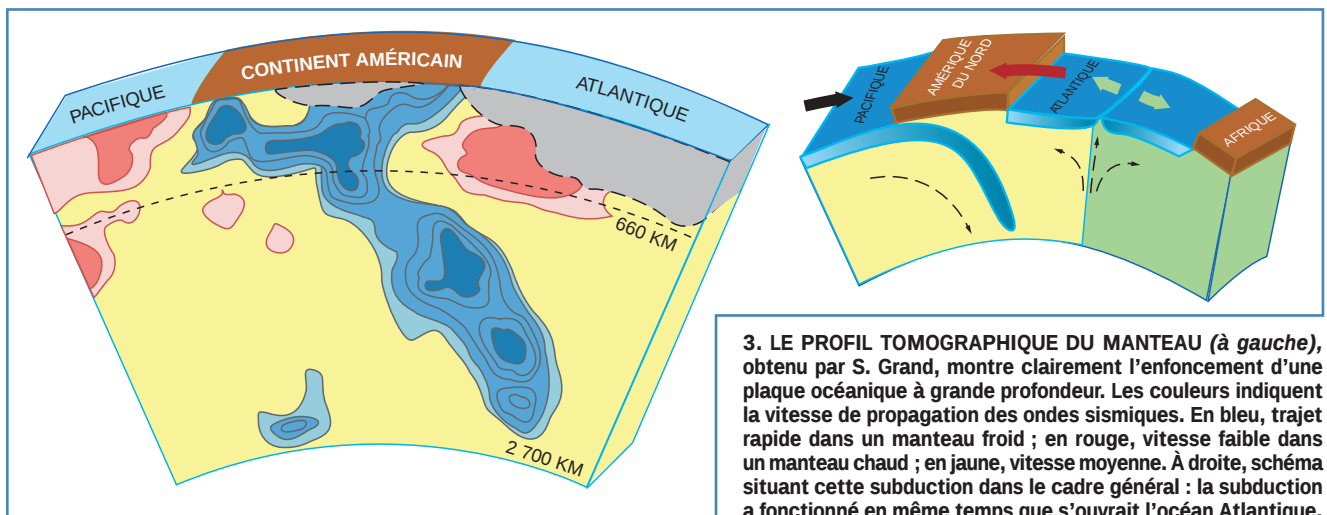
continentales s'affrontent et forment des chaînes de montagnes.

La question est importante, car la tectonique des plaques est née il y a 30 ans avec une règle (théorique) très simple : on pensait que l'arrivée d'un continent dans une zone de subduction bloquait le processus de convergence à cet endroit et que la croûte continentale était trop légère pour disparaître



2. LA NOUVELLE STRUCTURE DU MANTEAU. Dans une des premières interprétations de la structure du manteau (à gauche), celui-ci était partagé en deux parties, avec des cellules de convection séparées dont la géométrie ne s'appuyait pas sur des observations. À droite, on a schématisé les conséquences de la tomographie sismique sur la tectonique des plaques. Les plaques océaniques sont en bleu, les plaques continentales en brun. On a localisé les zones d'écartement situées dans les rides océaniques et les zones comprimées correspondant aux chaînes de montagnes. Notez la grande simplicité des subductions océaniques, qui ont probablement été à l'origine des « cimetières de plaques » (croix sur fond bleu) qui se trouvent à la base du manteau ; on remarque la com-

plexité de la subduction continentale de l'Inde avec des tronçons de plaques océaniques bousculés et probablement renversés par l'avancée actuelle de l'Inde ; la couleur violette, située sous les plaques plongeantes est destinée à donner une idée de la véritable épaisseur du manteau en mouvement. On a représenté quelques zones chaudes (sphérules orange) ; celle située sous l'Afrique s'enracine à la limite du noyau. À l'écart des grands enfoncements de plaques, le manteau est probablement animé par des cellules convectives, mais aucun accord n'est encore réalisé sur leur géométrie. Un modèle récent propose l'existence d'un grand nombre de bulles (esquissées en pointillés verts sur la figure), lesquelles constitueraient le cœur des cellules de convection.



3. LE PROFIL TOMOGRAPHIQUE DU MANTEAU (à gauche), obtenu par S. Grand, montre clairement l'enfoncement d'une plaque océanique à grande profondeur. Les couleurs indiquent la vitesse de propagation des ondes sismiques. En bleu, trajet rapide dans un manteau froid ; en rouge, vitesse faible dans un manteau chaud ; en jaune, vitesse moyenne. À droite, schéma situant cette subduction dans le cadre général : la subduction a fonctionné en même temps que s'ouvrait l'océan Atlantique.