

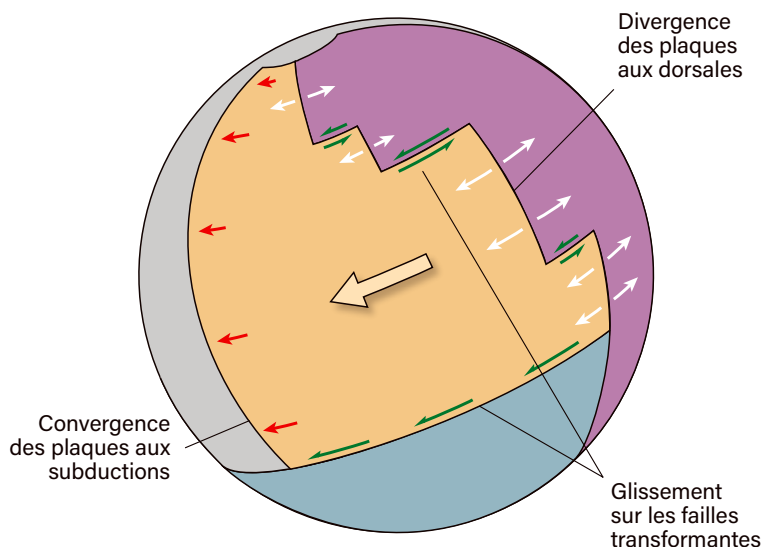
dérive qu'il proposait étant incorrects, des physiciens célèbres de son temps ridiculisèrent son idée. Toutefois, à partir des années 1930, elle commença à gagner du terrain.

Sa progression fut lente, car jusque dans les années 1950, la plus grande part de ce qui était connu sur la structure profonde de la Terre provenait de l'observation de roches continentales et de mesures sismologiques et gravimétriques. Puis, dans les années 1950 et 1960, la bathymétrie livra de premières cartographies du plancher océanique, de sorte que les géologues purent lancer l'étude de sa géologie. Ils découvrirent des escarpements, des volcans et des failles sous-marines de plus de 100 kilomètres de long – comme celle de Sumatra à l'origine du séisme et du tsunami de 2004. L'existence de profondes fosses sous-marines – la profondeur de l'une d'entre elles, celle des Mariannes dans le nord-ouest de l'océan Pacifique, excède les 10 kilomètres – poussa les géophysiciens à expliquer les paysages terrestres par un nouveau phénomène : l'expansion des fonds océaniques. Tout suggérait en effet que, tel un tapis roulant, le fond océanique s'éloigne d'une ligne médio-océanique, où se trouvent des chaînes de montagnes volcaniques. Le GPS (*global positioning system*) nous permet aujourd'hui de mesurer précisément la vitesse de ces plaques : de 1 à 10 centimètres par an (à peu près celle de la pousse de nos ongles!).

Ces observations sont à la base de la théorie de la tectonique des plaques, qui consiste à représenter de façon simplifiée la lithosphère terrestre – c'est-à-dire la croûte et le manteau le plus externe – par un pavage de plaques massives et rigides, susceptibles de se déplacer, d'entrer en collision et de se chevaucher, l'une plongeant sous l'autre, en d'autres termes de « subducter ».

La réalité, toutefois, est plus complexe, car les roches constituant les plaques peuvent se déformer de façon soit élastique – elles reprennent leur forme –, soit plastique – elles ne retournent pas à leur forme antérieure. Par ailleurs, toute la masse solide de la Terre connaît, comme les océans, des « marées terrestres », qui déplacent chaque jour la surface jusqu'à 20 centimètres vers le haut et vers le bas. Mises sous tension par les mouvements tectoniques, de longues failles déforment les plaques avec leur lot de tremblements de terre propageant des ondes sismiques. Et puis, même si les roches nous apparaissent comme solides à notre échelle de temps, à celle des temps géologiques, elles s'écoulent ! Les magnifiques structures rocheuses de l'Himalaya, par exemple, résultent de ce processus. Soumis à d'intenses efforts, les grains minéraux s'y disloquent et leurs atomes et molécules se déplacent pour accommoder les énormes forces mises en jeu.

LA TECTONIQUE DES PLAQUES



La théorie de la tectonique des plaques décrit la façon dont la surface terrestre s'organise et change dans le temps. Même s'il s'agit d'une version simplifiée de la géodynamique, c'est un outil utile pour décrire de façon générale comment la couche la plus froide de la planète – la lithosphère – se déplace en réponse aux phénomènes se produisant dans l'intérieur chaud de la Terre. Elle rend possible aux étudiants et aux scientifiques de se représenter intuitivement le pavage planétaire à partir de la carte mondiale de l'élévation des sols et des fonds marins.

Ainsi, la lithosphère comprend plusieurs grandes plaques et des dizaines de plaques plus petites. Aux limites où les plaques divergent, du magma s'infiltre depuis les profondeurs et s'accumule en longues chaînes volcaniques, tandis que les plaques s'éloignent

les unes des autres (*flèches blanches*) ; à celles où les plaques convergent, elles entrent en collision, de sorte que l'une d'elles s'écrase, plie et plonge sous l'autre dans le manteau (*flèches rouges*) ; le long des autres limites interplaques – des failles transformantes –, les plaques glissent transversalement l'une contre l'autre (*flèches vertes*).

Plusieurs forces concourent pour entraîner ces mouvements : aux frontières convergentes, la « traction de subduction » tire la plaque entière dans le manteau ; ce mouvement induit une divergence à l'autre extrémité de la même plaque, où du magma s'infiltre, se répand et forme une longue chaîne de montagnes volcaniques au fond de la mer : une dorsale. Là s'exerce la « poussée aux dorsales ».

Présent depuis au moins 150 millions d'années, le pavage actuel de la Terre par les plaques tectoniques est singulier : une cinquantaine de plaques de tailles diverses, réparties sur toute la surface de la Terre, un peu comme des débris d'une vitre brisée, jouxtent sept grandes plaques. La superficie de la plus grande, la plaque pacifique, vaut près de 190 fois la surface de la France métropolitaine. Cette immense plaque jouxte à la fois la côte ouest des États-Unis, le Japon et la Nouvelle-Zélande et la plaque Philippine (10 fois l'Hexagone) que bordent la Chine et l'Australie.

Pour évaluer les forces à l'origine de ce pavage tectonique, les scientifiques ont construit des modèles physiques. Les différences

d'élévation permettent à la gravité de façonner de grandes formations rocheuses: de hautes et massives chaînes de montagnes appuient de leur poids sur les régions profondes qui s'étalent d'autant plus que leur résistance est faible. Si à la surface de la Terre les roches se brisent, dans la chaleur des profondeurs, elles s'écoulent. Ainsi, sur les lignes médio-océaniques où se dressent les dorsales océaniques, du magma chaud s'infiltre, se répand et se solidifie au contact de l'eau de mer. Ses accumulations et son refroidissement poussent vers le bas la croûte océanique locale, laquelle tend à s'échapper latéralement, subissant ce que l'on nomme la «poussée aux dorsales». À leurs autres extrémités, les plaques entrent en collision et l'une d'entre elles chevauche l'autre, qui s'enfonce profondément dans le manteau: son poids produit ce que l'on nomme la «traction de subduction». La friction entre deux plaques qui coulisent produit aussi une force résistante. Enfin, le manteau terrestre – la couche de roches chaudes s'écoulant lentement au sein de la Terre – mijote tel le contenu d'une immense casserole planétaire, parcourue par des courants de sa base à sa surface: cette circulation induit une résistance aux mouvements des plaques nommée «entraînement par le manteau». L'ensemble de ces forces tectoniques se combinent pour lentement sculpter la Terre.

L'ŒUF ET LA POULE DE LA GÉODYNAMIQUE

In fine, les modèles géodynamiques posent une question paradoxale: est-ce l'intérieur de la Terre qui conforme sa surface ou la surface de la Terre qui conforme son intérieur? Depuis plus de cinquante ans, les scientifiques élaborent des calculs numériques, où ils combinent les forces tectoniques afin d'apprécier lesquelles dominent. Modélisant le plancher océanique par des blocs rigides, ils ont calculé les forces nécessaires pour les déplacer aux vitesses observées en surface. Ces travaux donnent des résultats contradictoires: si dans la plupart des cas la traction de subduction domine sur la poussée aux dorsales, dans d'autres, c'est l'inverse, et le débat reste ouvert sur l'impact de l'entraînement du manteau.

Face à ces contradictions, les géodynamiciens ont tenté de décrire le système entier constitué par le manteau et la croûte: le «système manteau-croûte». Or si ces deux couches sont constituées de matériaux similaires, des roches silicatées, il faut tenir compte à la fois des forces s'exerçant en profondeur et de celles s'exerçant en surface. Pour attaquer le problème, ces scientifiques ont développé des simulations plus complètes, dans lesquelles le système manteau-croûte est divisé en millions de petites cellules quasi cubiques adjacentes au sein desquelles on résout les équations décrivant le transport de la matière et de l'énergie. Dans les premières

Les mouvements profonds des roches mantelliques sont à l'origine des grandes plaques tectoniques de la Terre, que la résistance au glissement dans les zones de subduction réduit en fragments de taille bien plus modeste. La doctorante Claire Mallard a dressé cette carte de la résistance à l'«écoulement» rocheux, c'est-à-dire de la viscosité en surface mise en regard des flux rocheux dans le manteau sous-jacent. Les régions bleu foncé sont les continents, des zones à viscosité élevée, tandis que les limites rouges représentent les limites entre plaques, où la viscosité est bien plus faible. À l'intérieur de cette simulation de la planète, les flux rouges représentent les panaches s'élevant jusqu'à des points chauds et les surfaces bleu clair des plaques en subduction.

générations de modèles, toutefois, on simplifiait grandement les caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux – densité, viscosité, conductivité thermique... – et on ne pouvait décrire qu'un état instantané de la géologie terrestre. Pour faire mieux, il fallait aussi prendre en compte la complexité de la déformation des roches et les évolutions de la température interne de la Terre sur des millions d'années.

Les roches se déforment parce que les liaisons entre atomes et molécules qui les constituent résistent aux forces appliquées sur elles, phénomène que l'on décrit en calculant des contraintes cisailantes: des forces par unité de surface que les roches exercent les unes sur les autres. Pour chaque «cellule», des contraintes cisailantes s'appliquent sur chaque facette ainsi que la pression. Les contraintes cisailantes s'accompagnent de déformations résultant des propriétés mécaniques du matériau; ces déformations traduisent la résistance des roches au mouvement, en d'autres termes leur élasticité ou plasticité.

Pour une masse rocheuse dans le manteau terrestre, ces efforts s'opposent exactement à la force de flottabilité (égale à l'accélération de la pesanteur multipliée par le volume de ces roches et par la différence entre leur densité et celle du milieu extérieur). À chaque instant l'équilibre est donc complètement réalisé. Ainsi les courants ascensionnels dans le manteau résultent d'une flottabilité positive et de contraintes résistant au mouvement. À l'inverse, les courants descendants – par exemple les plaques plongeant dans le manteau après leur subduction – résultent

