

L'ESSENTIEL

> Depuis plus d'un demi-siècle, les géologues décrivent de façon simplifiée la surface terrestre comme un pavage de plaques rigides mouvantes : c'est la théorie de la tectonique des plaques.

> Fondée sur la modélisation empirique de la façon dont les roches mantelliques se déforment, la première simulation numérique de l'évolution géologique

d'une planète de type Terre reproduit à la fois la convection au sein du manteau et la tectonique des plaques.

> Ces résultats dévoilent quelles forces dominent les changements incessants de la surface terrestre, qui ont rendu la vie possible depuis 4,5 milliards d'années.

L'AUTEUR



NICOLAS COLTICE
géodynamicien, est directeur des études au département Géosciences de l'École normale supérieure à Paris

Les géophysiciens pensent depuis longtemps que les mouvements se produisant dans l'intérieur brûlant de la Terre sont à l'origine de ceux des continents et des fonds océaniques. Encore fallait-il le montrer. C'est ce que fait la première simulation numérique de la planète entière.

De puissantes forces tectoniques ont créé les Alpes. Il y a dix ans, alors que, me rendant de Lyon à Zurich, je les traversais en train, je percevais à peine leur majesté, car mes pensées portaient alors sur l'une des plus grandes énigmes scientifiques qui soient : quels liens existent entre les phénomènes internes à notre planète et les changements spectaculaires de sa surface au cours des âges ? Ces phénomènes ont créé les Alpes, déplacent les continents, mais, surtout, ils rendent notre planète habitable depuis des milliards d'années... Une fois dans la capitale de la Suisse allemande, les deux chercheurs que je venais rencontrer, Paul Tackley et Tobias Rolf, m'ont montré des résultats prometteurs : nous étions proches de la réponse à mes questions !

Depuis trois décennies, Paul Tackley, un géophysicien à l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETH Zurich), s'efforce de simuler sur des superordinateurs massivement parallèles la convection au sein du manteau terrestre. Nombre de phénomènes de transport de matière se produisent au sein de cette couche rocheuse de quelque 2900 kilomètres d'épaisseur située entre la croûte terrestre et le noyau métallique de notre planète. J'étais à Zurich dans l'espoir de pouvoir employer son code informatique afin de travailler sur l'énigme qui me fascinait : l'origine profonde des phénomènes géologiques qui façonnent notre globe. Je m'étais en effet rendu compte que la théorie de la tectonique des plaques (voir l'encadré page 22) ne les explique que de façon... superficielle. Comme Tobias Rolf, l'un des doctorants

de Paul Tackley, avait des intérêts similaires, nous avons alors décidé de collaborer.

Assis dans le bureau de Tobias Rolf, j'ai donc découvert des animations géologiques représentant des années de travail acharné, et j'ai cru halluciner quand, sur l'écran, se sont formées des dorsales océaniques, puis ont commencé des subductions qui se sont poursuivies avant de s'arrêter... Ce soir-là, à l'hôtel, mon esprit est entré en ébullition : je sentais que, même si les modèles que j'avais vus fonctionner étaient encore très approximatifs, nous allions bientôt pouvoir simuler en même temps la convection dans le manteau terrestre et la tectonique des plaques. Autrement dit, il serait possible de se lancer dans l'étude de la dynamique terrestre dans sa globalité ! De fait, quelques années plus tard, en 2018, nous avons lancé la première simulation géodynamique d'une planète tellurique virtuelle et cela nous a permis de mieux comprendre comment évoluent, à l'intérieur et en surface, les planètes rocheuses comme l'est la Terre.

DE LA DÉRIVE DES CONTINENTS À LA TECTONIQUE DES PLAQUES

L'évolution de la Terre pendant ses 4,5 milliards d'années d'existence est spectaculaire. Ce n'est qu'au cours du siècle dernier que nous avons commencé à percevoir les phénomènes physiques superficiels ou profonds qui l'ont constamment modifiée. Dans un ouvrage de 1915 – *La Genèse des continents et des océans* –, le climatologue allemand Alfred Wegener proposa l'idée de dérive des continents et celle de l'existence passée de supercontinents. Les mécanismes d'entraînement et la vitesse de

D'énormes forces tectoniques ont créé les Alpes – ici une crête dans les Dolomites – en comprimant les épaisses couches sédimentaires et le substrat sous-jacent d'un bassin sédimentaire de l'ancien océan disparu de la Thétyhs. Leur formation a commencé il y a environ 135 millions d'années, au tournant du Jurassique et du Crétacé, mais est passée par sa principale phase il y a 30 à 35 millions d'années.

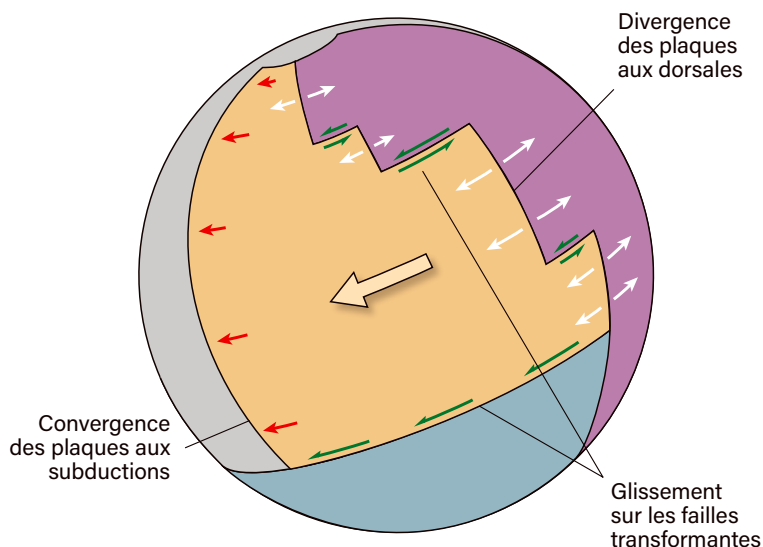
dérive qu'il proposait étant incorrects, des physiciens célèbres de son temps ridiculisèrent son idée. Toutefois, à partir des années 1930, elle commença à gagner du terrain.

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