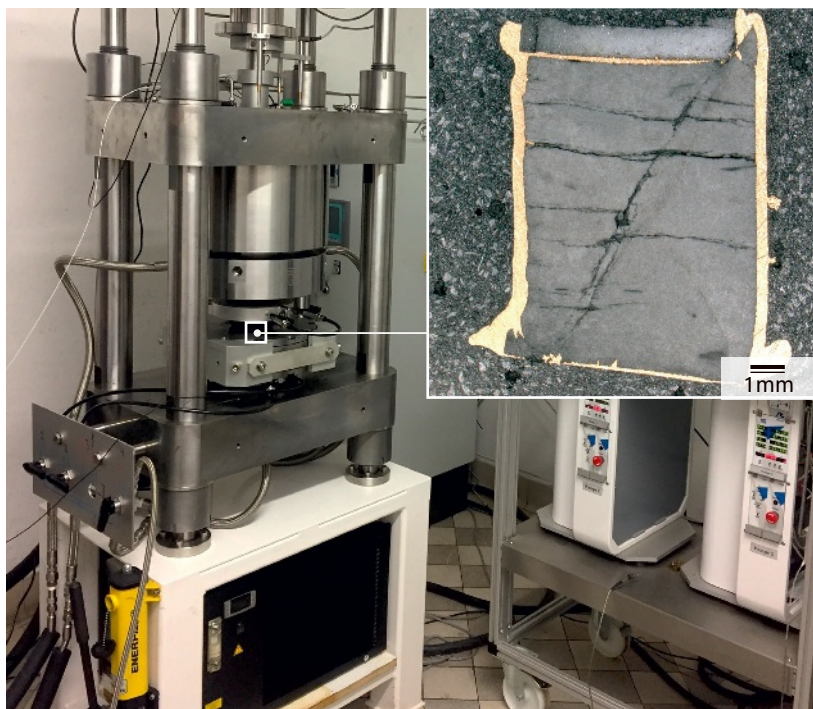


que nous évoquions plus haut. La répartition des tailles de plaques à la surface de la Terre nous apprend que les forces exercées par le manteau doivent être de l'ordre de la résistance des plaques, et que ce sont ces deux phénomènes qui déterminent comment les planchers océaniques se déplacent et les continents dérivent. Le travail de Claire Mallard nous a fourni des indications précises sur les paramètres jouant un rôle crucial dans le modèle.

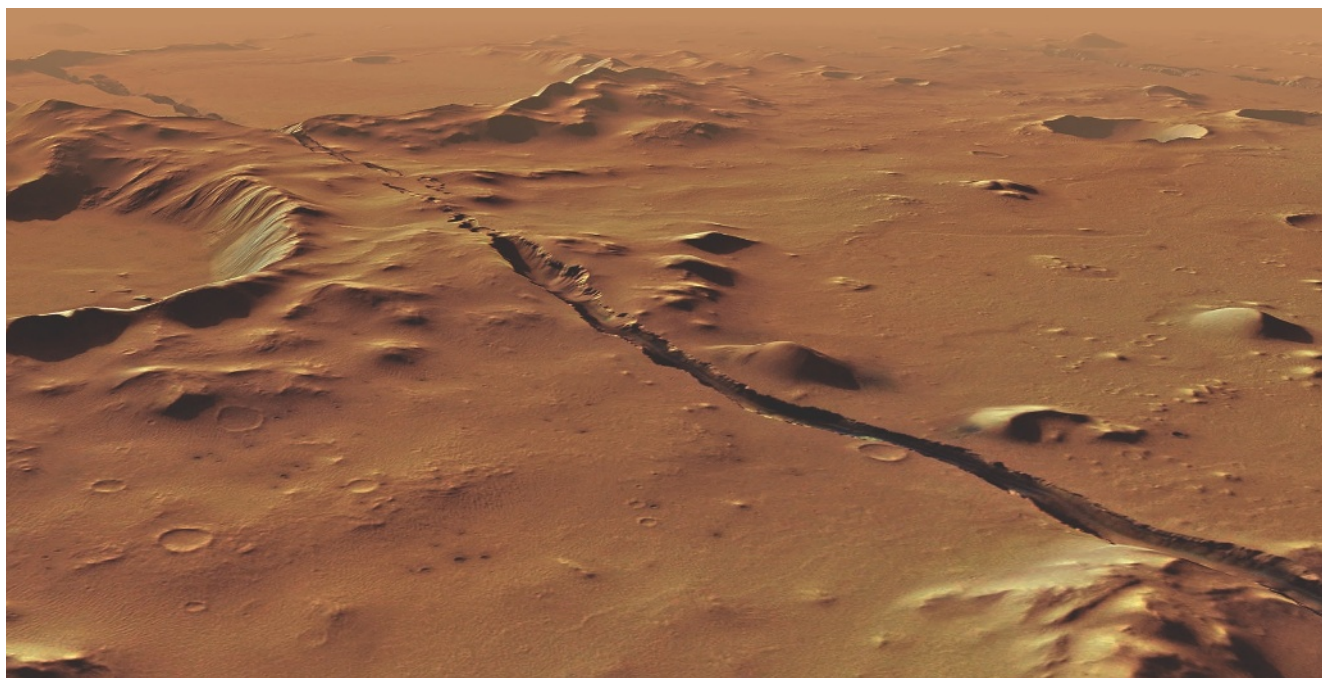
Maëlis Arnould, une autre doctorante de mon équipe, et moi-même avons ensuite poussé le travail afin de construire le modèle complet d'une planète tellurique comparable à la Terre depuis la croûte jusqu'à la surface du noyau. Pour y parvenir, nous avons optimisé la réalisation des calculs afin que les ordinateurs puissent résoudre plus vite les équations sans changer la qualité des solutions. Des astuces étaient nécessaires, car le calcul de l'évolution en trois dimensions d'une planète entière prend des mois... Il n'était donc guère possible de multiplier les essais à l'aveugle... J'ai en particulier passé un été à faire tourner le supercalculateur une semaine avant de l'arrêter pour optimiser les paramètres des modèles influençant les calculs, avant de recommencer encore et encore. Cette campagne d'essais nous a permis d'obtenir des simulations de l'évolution planétaire au bout de plusieurs mois au lieu d'années. Pendant que petit à petit je mettais au point le fonctionnement calculatoire de notre grand modèle, Maëlis Arnould essayait de comprendre à l'aide de modèles 2D comment les courants de convection façonnent la topographie observée. Ce travail nous a indiqué comment interpréter divers phénomènes, comme l'élévation du plancher océanique ou les mouvements verticaux de portions de marges continentales mesurant de 500 à 10 000 kilomètres de long.

Dans nos modèles, la loi de viscosité, qui décrit la façon dont les roches «s'écoulent» en se déformant, joue un rôle central. Nous l'avons formulée d'une façon telle qu'elle varie avec la température puisque les roches froides sont rigides, tandis que les roches chaudes sont molles... Nous tenons aussi compte de la résistance des roches aux contraintes cisailantes: une fois un certain seuil atteint, leur viscosité diminue et elles se ramollissent. Pour ressembler à ce qui existe sur Terre, la viscosité moyenne du manteau doit être fixée à un niveau permettant d'enclencher une convection assez vigoureuse. Il nous fallait aussi appliquer ces modélisations à travers tout le globe au sein d'un maillage assez dense pour produire des images détaillées des plaques et de leurs interactions: notre simulation procède de calculs effectués dans 50 millions de cellules rocheuses, et nous y avons incorporé un milliard de «traceurs», sortes de petites «billes» capables de transporter les caractéristiques des roches en circulation.



La « presse de Griggs » du laboratoire de géologie de l'ENS à Paris sert à l'étude du comportement des roches dans les conditions régnant dans le manteau terrestre supérieur, soit sous des pressions pouvant atteindre 4 000 atmosphères et des températures supérieures à 1 000 °C. Visibles en bas à droite, des pompes hydrauliques actionnent deux pistons imbriqués qui produisent la pression et la force axiale déformant l'échantillon placé sous les pistons (carré blanc). En haut à droite, la coupe d'un échantillon dans sa capsule en or révèle dans l'objectif du microscope l'état de la roche après sa déformation : ses moitiés sont décalées et séparées par une faille.

Un seul «instantané» dans cette simulation – un état de la Terre à un moment donné – représente plus de 20 gigaoctets de données. L'un des principaux défis de ce travail de simulation est que la convection et les plaques constituent un système complexe, au sein duquel la tectonique – en d'autres termes l'apparition spontanée d'un pavage – est une propriété émergente résultant des nombreuses interactions qui se produisent dans le système. Ce comportement d'ensemble est imprévisible, un peu comme celui d'une foule ne résulte pas de façon simple de ceux des individus. Il en va de même dans notre simulation: même si nous avons choisi à bon escient les paramètres du modèle et commencé nos calculs, nous ne pouvions savoir si une tectonique semblable à celle de la Terre, avec ses cycles de subduction et ses formations intermittentes de supercontinents, émergerait. Les caractéristiques de notre modèle sont entrelacées de façon si intime que la simulation doit fonctionner des mois pour que nous puissions évaluer l'intérêt des structures émergentes, sachant que nous avons eu besoin de plusieurs essais afin de saisir comment nos hypothèses de travail influençaient le résultat des calculs. Dès lors, quand la simulation nous a semblé enfin prête à être lancée, j'ai su que, étant donné que nous devrions



attendre pendant des mois la fin de sa fort onéreuse exécution, nous n'aurions qu'une seule chance de voir si elle fonctionnait. Cette partie du projet fut pour moi intimidante et solitaire, un peu comme si j'étais parti explorer la haute mer sur un petit bateau.

OBSERVER L'ÉVOLUTION D'UNE PLANÈTE

En 2018, nous avons été fin prêts à réaliser la simulation qui serait le plus proche possible de la Terre et le calcul s'est poursuivi pendant neuf mois, pendant lesquels nous avons surveillé ses progrès. Chaque jour de simulation représentait plusieurs millions d'années sur Terre, un laps de temps pendant lequel un continent se déplace d'environ 100 kilomètres. Dix jours de calcul étaient nécessaires pour simuler l'évolution planétaire pendant 50 millions d'années, soit à peu près le temps de la formation des Alpes. À mesure que les mois défilaient, nous sommes devenus de plus en plus enthousiastes devant l'évolution des caractéristiques de notre Terre virtuelle, s'agissant tant de la dérive des continents que des subductions. Nous avons vu apparaître des fosses abyssales et des points chauds. Des structures ressemblant à des plaques se sont formées et sont parfois entrées en subduction à leurs extrémités, tandis que dans le manteau de la matière chaude effectuait des mouvements ascensionnels vers la surface.

Même si j'avais consacré des années à l'élaboration de cette simulation, ce n'est qu'au bout de quelques mois que j'ai pris conscience que le modèle de la dynamique terrestre sous-jacent à nos calculs constituait une avancée scientifique

Sur les autres planètes telluriques du Système solaire, le jeu complexe des forces géophysiques façonne aussi la surface. Mars, par exemple, est zébrée par un réseau de failles et de tranchées, telles les fosses de Cerbère, dont cette image fut prise par l'orbiteur *Mars Express*, de l'Agence spatiale européenne. Les données sismiques avancées de l'actuelle mission *InSight*, de la Nasa, combinées à nos simulations du système croûte-manteau, pourraient aider les planétologues à appréhender l'évolution géologique de la Planète rouge.

majeure et pas seulement la réalisation exigeante d'une séquence impressionnante d'images. Tant de choses restaient à tenter, tandis que nous croulions sous le travail d'analyse des données : pour nous y coller, nous avons organisé un atelier de deux semaines dans le sud de la France, et nous avons invité Laurent Husson, de l'université de Grenoble, Claudio Faccenna, de l'université Roma 3, et Thorsten Becker, de celle d'Austin, au Texas, pour nous aider à nous concentrer sur les principales forces sous-tendant la tectonique des plaques.

Dans les modèles que nous avons construits, le manteau et les plaques constituent un système qui s'organise de façon à faire apparaître et se mouvoir des plaques, c'est-à-dire la tectonique. Ainsi, nous étions devenus capables d'exploiter la simulation pour étudier où les forces motrices du système opèrent et comment elles évoluent aux échelles de temps géologiques. Nous avons commencé à explorer et à décrire les relations entre les profondeurs de la Terre et la surface : la topographie, le mouvement de l'axe de rotation par rapport aux enveloppes solides de la Terre, le lien entre les profondeurs de la Terre et le climat, et les modifications du comportement du champ magnétique en réponse à la convection et à la tectonique. Ces simulations produisent désormais des données que nous pouvons comparer aux archives géologiques et géophysiques.

Outre ce calcul de neuf mois, j'ai réalisé d'autres simulations plus petites et plus simples : un seul calcul ne suffit pas en effet à comprendre le système. En synthétisant nos conclusions, nous sommes parvenus à l'idée que dans ce système autoorganisé qui engendre

une circulation profonde et une tectonique de surface, les forces aux plus grands effets – les forces dominantes – agissent dans les 100 premiers kilomètres sous la surface. Ce sont les zones de subduction qui sont associées à celles-ci. En ces endroits, la circulation mantellique sous les plaques en subduction ne suit pas les mouvements de la surface.

Dans les zones continentales, en revanche, tout particulièrement sous les montagnes en formation, ces forces dominantes agissent sur une profondeur de 100 à 500 kilomètres, ce qui nous prouve que les mouvements au sein du manteau peuvent entraîner la surface. Dans ce cas, les vitesses tectoniques sont plus faibles que lorsque les forces sont peu profondes, et atteignent des valeurs d'environ 1 centimètre plutôt que de 10 centimètres par an. Les forces plus profondes dominent lorsque les continents se rejoignent, formant finalement des chaînes de montagnes par collision. Dans l'histoire de la Terre, cela correspond à la période de formation de la Pangée, il y a 300 millions d'années, et peut-être à des agrégations continentales plus récentes. Aujourd'hui, l'Afrique est entrée en collision avec l'Eurasie, l'Inde l'a fait il y a quelque 50 millions d'années et, au cours du dernier million d'années, l'Australie s'est approchée de l'Indonésie.

Nous pouvions aussi étudier le rôle des panaches mantelliques, ces courants ascensionnels de roches chaudes s'élevant de la base du manteau jusqu'à celle des plaques, où ils induisent une activité volcanique: un point chaud. La formation de Hawaï et de l'Islande, par exemple, résulte de ce phénomène, et les géophysiciens s'interrogent pour savoir si l'activité des panaches sépare les continents ou s'il s'agit d'autres phénomènes. Nos modèles suggèrent que les panaches ascendants ne sont pas la cause première de la fragmentation des continents: ils chauffent et ainsi ramollissent les roches par en dessous, ce qui facilite leur déformation. Dès lors, lorsque les plaques continentales sont sous tension, des fractures, futures limites de plaque, tendent à s'y propager. Au cours des 200 derniers millions d'années, les panaches situés aujourd'hui sous l'Islande, Tristan da Cunha ou encore sous l'île norvégienne de Bouvet ont contribué à découper le dernier supercontinent – la Pangée – en plusieurs morceaux.

Attendre plusieurs mois que nos calculs aient produit des évolutions planétaires numériques en valait la peine, car la combinaison de nos modèles – grands ou petits – finit par nous donner une vue d'ensemble des forces à l'origine des mouvements tectoniques actuels et des cycles d'agrégation et de dispersion des continents qui se sont succédé.

Nous aimerions maintenant étudier les failles transformantes, ces limites sans subduction ni dorsale, où les plaques coulissent

horizontalement les unes par rapport aux autres. Dans nos modélisations, ces frontières actives sont diffuses et larges, mais elles sont nettes dans la réalité du terrain, et nous ignorons ce qui induit leur formation et leur évolution. Nous aimerions aussi comprendre comment les montagnes se forment et comment la tectonique des plaques a évolué depuis l'Archéen (–4 000 à –2 500 millions d'années), la plus longue période géologique de la Terre. Enfin, nous aimerions aussi étudier comment les changements induits par la tectonique des plaques influencent le champ magnétique terrestre et le climat de la Terre. Des questions qui ont toujours été importantes, de sorte que maintenant que nous disposons d'une simulation de la convection mantellique globale, nous pouvons essayer de les élucider.

MODÉLISER D'AUTRES MONDES

Comme la théorie de la tectonique des plaques, nos simulations ne sont pas parfaites. Elles ne rendent par exemple pas compte de l'érosion en surface, des failles cassantes de la croûte supérieure, de la migration du magma ou de l'élasticité des roches. Toutefois, elles représentent un outil puissant pour élucider la physique qui sous-tend la tectonique des plaques. Pour les mettre au point, nous avons profité du travail pionnier d'autres équipes, qui nous a permis de simuler l'évolution d'une planète virtuelle entière d'une façon reproduisant les fonctionnements de base de la tectonique et de la convection mantellique. Mon objectif n'a jamais été de produire une planète numérique, mais de construire des outils et des données pour relier les observations de surface aux phénomènes intérieurs à la Terre. La physique sous-tendant nos modèles ne se limite pas à la Terre. Elle peut aussi servir à étudier d'autres planètes, ce qui permettrait d'étudier les relations entre les intérieurs de Mercure, de Vénus et de Mars et leurs surfaces observables.

Cette idée est d'autant plus séduisante que la mission *InSight*, de la Nasa, effectuée désormais des mesures sismiques à la surface de Mars, ce qui nous donne des perspectives sur le fonctionnement de son manteau. Combinée avec les données prélevées sur la Planète rouge, la physique sous-tendant nos simulations pourrait aider les planétologues à élucider des questions essentielles, comme savoir si Mars a eu une tectonique des plaques au début de son histoire. Nous espérons qu'un jour ce genre de simulation aidera les planétologues à comprendre pourquoi les quatre premières planètes de notre Système solaire sont aussi différentes alors qu'elles sont composées de matériaux comparables. Et nous espérons aussi que ces simulations qui expliquent comment les lois de la physique ont façonné notre planète nous montreront aussi comment elles sculptent d'autres mondes. ■

Cet article est traduit et adapté de celui publié dans la revue *American Scientist* (mai-juin 2021) sous le titre « The Chicken, the Egg, and Plate Tectonics », avec son aimable autorisation.

BIBLIOGRAPHIE

M. Arnould et al., **Plate tectonics and mantle controls on plume dynamics**, *Earth and Planetary Science Letters*, 2020.

N. Coltice, **What drives tectonic plates ?**, *Science Advances*, 2019.

M. Arnould et al., **On the scales of dynamic topography in whole-mantle convection models**, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018.

N. Coltice et al., **A mantle convection perspective on global tectonics**, *Earth-Science Reviews*, 2017.

C. Mallard et al., **Subduction controls the distribution and fragmentation of Earth's tectonic plates**, *Nature*, 2016.

C. P. Conrad, **How mantle slabs drive plate tectonics**, *Science*, 2002.

D. Bercovici et al., **The relationship between mantle dynamics and plate tectonics : A primer**, dans M. Richards et al. (éd.), **The History and Dynamics of Global Plate Motions**, *Geophysical Monograph, American Geophysical Union*, 2000.

D. Forsyth, **On the relative importance of the driving forces of plate motion**, *Geophysical Journal International*, 1975.