

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.

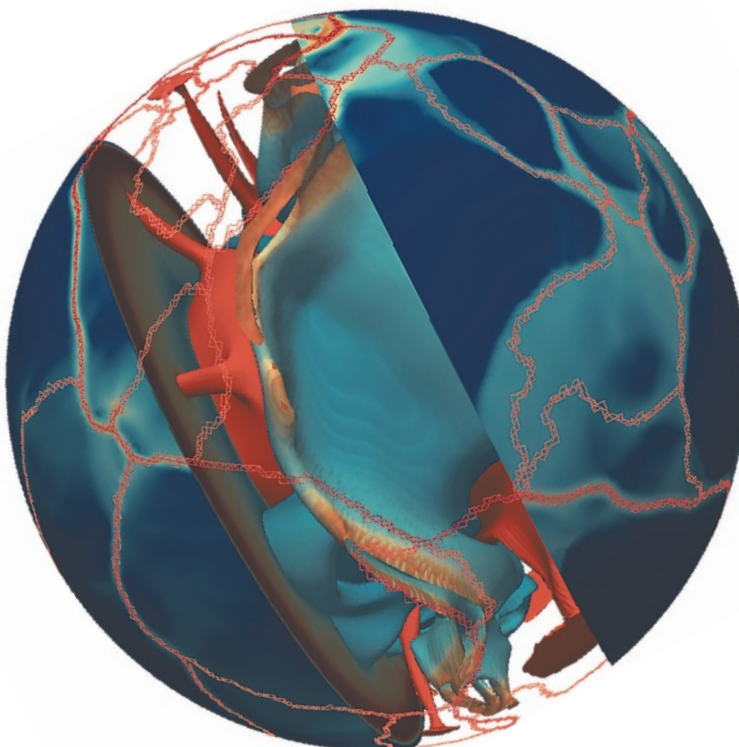
Face à ces contradictions, les géodynamiciens ont tenté de décrire le système entier constitué par le manteau et la croûte: le «système manteau-croûte». Or si ces deux couches sont constituées de matériaux similaires, des roches silicatées, il faut tenir compte à la fois des forces s'exerçant en profondeur 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

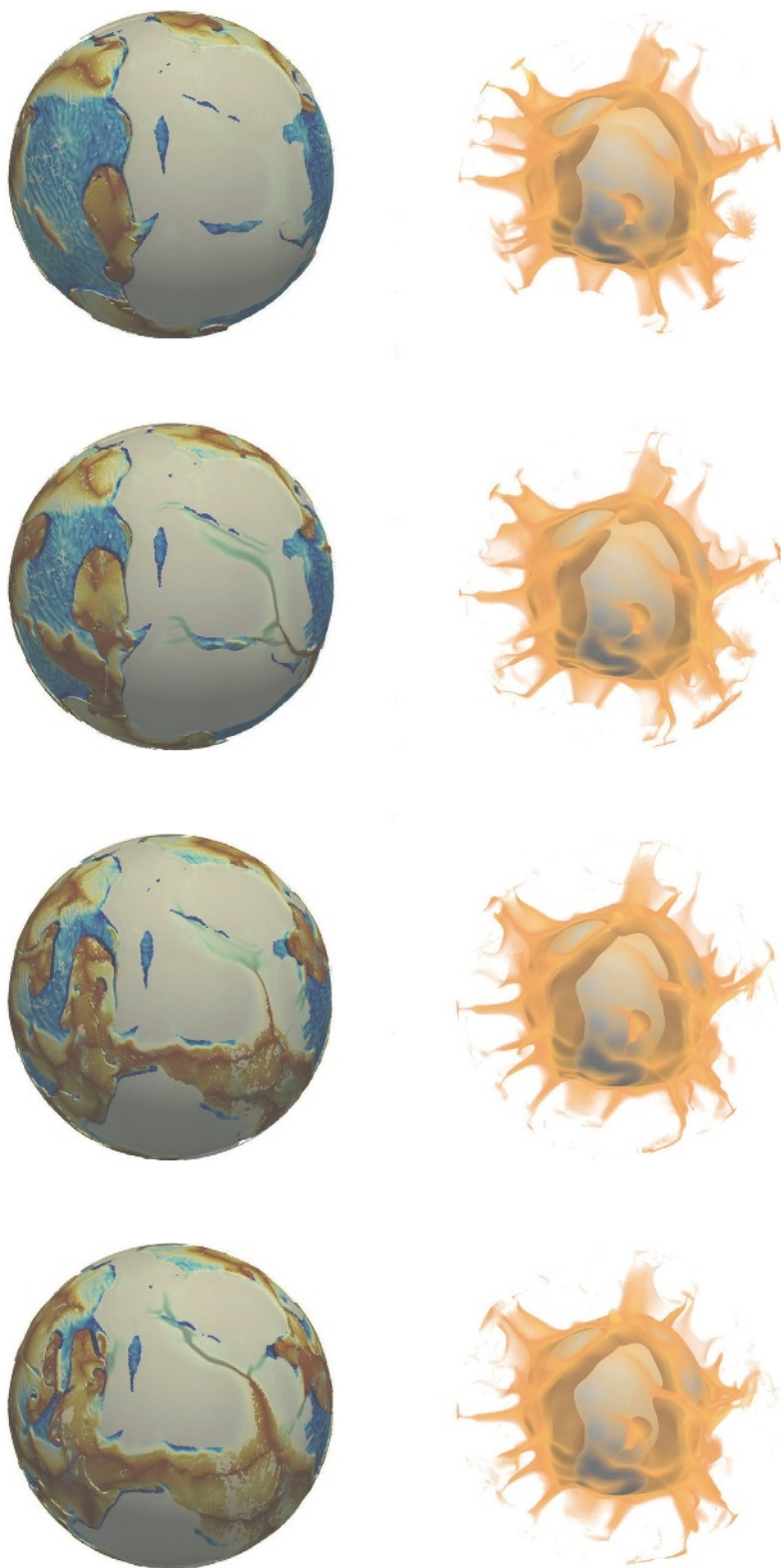
Les mouvements profonds des roches mantelliques sont à l'origine des grandes plaques tectoniques de la Terre, que la résistance au glissement dans les zones de subduction réduit en fragments de taille bien plus modeste. La doctorante Claire Mallard a dressé cette carte de la résistance à l'«écoulement» 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.

génération 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





Avec la doctorante Maëlis Arnould et d'autres collègues, nous avons développé une simulation géophysique d'une planète tellurique entière décrivant à la fois ce qui se produit à sa surface (colonne de gauche) et les profonds mouvements convectifs en son intérieur (colonne de droite). Les plaques se rencontrent et interagissent dans les régions colorées, comme les dorsales médio-océaniques (marron) et les zones de subduction (bleues), là où une plaque plonge sous une autre. Les mouvements ascensionnels de roches au sein du manteau sont aussi représentés (colonne de droite), qui dirigent vers la surface des panaches de roches amollies par la chaleur interne de la Terre.

d'une flottabilité négative et de contraintes résistant au mouvement.

Soumises à ces forces, les roches et les plaques peuvent-elles accélérer ou décélérer? Oui, mais leurs vitesses sont extrêmement faibles: la plaque pacifique, par exemple, qui se déplace de 10 centimètres par an, a une énergie cinétique équivalente à celle d'une voiture lancée à 40 kilomètres par heure. Cette énergie est donc si limitée à l'échelle de cette immense plaque que ses variations sont extrêmement faibles. Cela implique que l'accélération de la plaque – proportionnelle à ces variations – est presque négligeable. L'accélération étant quasi nulle, la vitesse d'une plaque tectonique ne dépend en aucun instant de sa valeur initiale.

ESTIMER LES CONTRAINTES SUR LES ROCHES

Cette dépendance étant inexistante, les modélisateurs affrontent la question de l'estimation des contraintes présentes au sein de chacune des millions de cellules rocheuses définies pour décrire le système manteau-croûte et de la force de flottabilité s'exerçant sur elles. Contrairement à l'atmosphère ou l'océan, le manteau est un milieu solide, de sorte que la prise en compte des contraintes implique de comprendre comment les roches leur résistent. Cela varie en fonction des conditions de température, de pression et... de l'intensité des contraintes elles-mêmes. Pour sa part, la flottabilité varie en fonction de la température (un volume qui chauffe se dilate), mais aussi de différences chimiques affectant la densité des roches mantelliques profondes.

Pour préciser leurs idées, les scientifiques qui travaillent sur ce sujet ont mené des expériences de laboratoire afin d'évaluer de quelle façon les contraintes et la température déforment de petits cylindres de roches (voir l'image page 27). Ils les ont d'abord placés dans une presse à moins de 400 °C – soit une faible température pour un géologue – puis ont observé à quel seuil de contrainte cisailante les cylindres se brisaient. Ces expériences montrent que les contraintes limites mesurées varient peu d'un matériau rocheux à l'autre. Ensuite, lorsque les scientifiques ont mis les cylindres sous pression à plus de 500 °C, ils ont observé que la roche les constituant commençait à «s'écouler», c'est-à-dire à se déformer plastiquement avant de céder à certaines contraintes extrêmes. Les scientifiques ont affiné encore ces essais en changeant les tailles des échantillons et leurs formes. Ils ont poussé leurs expériences aussi à très haute pression afin d'appréhender la structure adoptée par les matériaux en les observant à travers de puissants microscopes.

Il ressort de ces expériences qu'aux pressions de l'intérieur de la Terre les mécanismes physiques à l'œuvre pendant la déformation des