

roches et les lois les décrivant ne sont clairs qu'au-dessus de 1500°C. Aux températures intermédiaires, en revanche, la façon dont les roches «s'écoulent» est difficile à appréhender. Plusieurs mécanismes de déformation concourent. Leur point commun est que, au-dessus de certains seuils de contrainte, l'écoulement, c'est-à-dire la déformation irréversible de la roche – on dit le «fluage» –, se produit d'abord au sein de toutes petites bandes que cela rend très faibles mécaniquement. En ces zones restreintes affaiblies, la roche se déforme plus facilement. Ainsi, cette rétroaction positive rend la déformation très locale. Nous nous sommes donc inspirés de ces observations pour écrire des lois effectives décrivant la déformation des roches, en quelque sorte leur façon de «s'écouler».

Comme évoqué plus haut, les forces de flottabilité s'exerçant au sein du manteau terrestre découlent des différences de densité existant entre des volumes de roches adjacents. Lorsque la température augmente, la densité diminue, car les roches se dilatent. Les régions chaudes

d'écoulements dans le manteau, il faut les intégrer au sein de simulations de l'évolution du système manteau-croûte entier.

À la fin des années 1990, une poignée de géodynamiciens a mis au point des simulations dont le principe était de traduire l'équilibre existant entre les contraintes et la flottabilité dans un volume comparable à celui du manteau terrestre, en tenant compte de la complexité mécanique des roches. Comme nous l'avons évoqué plus haut, ils ont pour cela modélisé de façon simplifiée la façon dont les roches «s'écoulent» à basse température, mais en préservant les caractéristiques essentielles du phénomène. Cette logique fonctionne bien dans le manteau, où les roches se contraignent les unes les autres, de sorte qu'elles se déplacent lentement ensemble et en grandes masses. Il en va autrement sur la surface terrestre, puisque des roches séparées par de faibles distances peuvent s'y déplacer à des vitesses différentes. Les déformations que subissent les plaques se produisent en effet quasi totalement à leurs frontières, parfois sur seulement dix kilomètres de large. Les modélisateurs ont donc dû construire des algorithmes capables de décrire sur toute la planète des changements importants à ce type d'échelle aussi.

Autre difficulté : il s'est avéré que la modélisation des lois d'«écoulement» de la roche issue des expériences de laboratoire à toute petite échelle ne produisait pas à grande échelle des mouvements ressemblant à ceux des plaques tectoniques. Nous avons donc dû prendre en compte ces effets d'échelles en réglant les paramètres de cette modélisation afin d'obtenir des solutions décrivant l'expansion des fonds océaniques et la subduction. Cette optimisation des paramètres n'empêche toutefois pas les simulations de l'évolution du système manteau-croûte d'exiger de très grandes ressources calculatoires, soit des mois de temps de calcul sur des superordinateurs massivement parallèles.

En 1995, ces machines sont devenues assez performantes pour que plusieurs équipes abandonnent leurs approches partielles de la convection mantellique en faveur de simulations d'un manteau sphérique complet. Mais ce n'est qu'en 2010 que les grands calculateurs sont devenus assez abordables pour qu'il soit possible de se lancer dans les simulations bien plus complexes de la Terre entière en trois dimensions. C'est aussi à peu près à ce moment que Paul Tackley est parvenu à rendre son code capable de résoudre les équations de transport et de conservation de l'énergie dans des matériaux dont les propriétés varient fortement. Mon équipe a donc pu utiliser dans les simulations les lois empiriques de la déformation caractérisées par des contraintes-seuil découvertes en laboratoire et adaptées aux grandes échelles pour simuler simultanément la convection dans le manteau et la tectonique en surface.

Les forces de flottabilité découlent des différences de densité entre roches

internes à la Terre ont donc tendance à s'élever, tandis que les régions froides, plus denses, s'enfoncent. Des différences chimiques affectent ces mouvements : par exemple les roches riches en fer tendent à être plus denses que les roches riches en magnésium. Des études sismologiques suggèrent par ailleurs que des régions du manteau de la taille de continents, posées sur la surface du noyau, sont caractérisées par une composition chimique particulière. Pour comprendre ce que cela change en matière de densité, les scientifiques ont placé des échantillons de roches à températures et pressions extrêmes. Ces échantillons de laboratoire sont toutefois très petits comparativement aux régions de tailles continentales posées sur la surface du noyau en question, et les durées pendant lesquelles ils subissent des contraintes sont très courtes par rapport à celles qui caractérisent la déformation des roches à l'échelle des temps géologiques. Dès lors, pour pouvoir correctement prendre en compte ces effets microscopiques à l'échelle de plaques tectoniques, de montagnes ou encore

Avant ma collaboration avec Paul Tackley et Tobias Rolf sur les grandes simulations en 3D, j'avais étudié la structure chimique du manteau terrestre. Des décennies durant, pour les géochimistes, le manteau était stratifié en un manteau supérieur et un manteau inférieur distinct chimiquement. Alors que pour les géophysiciens, leurs roches se mouvaient dans l'ensemble du manteau. La façon dont des masses importantes ou des domaines chimiques persistent au sein d'un système convectif n'avait donc rien de clair. Pour mieux comprendre, j'ai entrepris de rapprocher les observations géophysiques des observations chimiques faites sur les dorsales médio-océaniques et sur des points chauds, comme Hawaii, les îles Galápagos. Ces recherches ont abouti à un compromis: non, le manteau terrestre n'est pas stratifié en deux coquilles concentriques, mais il contient d'immenses domaines se distinguant chimiquement, car capables de résister au mélange des milliards d'années durant.

LA STRUCTURE CHIMIQUE DU MANTEAU

Alors que je travaillais sur la structure chimique du manteau, j'ai pris conscience que la genèse des continents constituait le plus gros problème à résoudre. La formation de croûte continentale aspire en effet certains éléments chimiques, ce qui modifie la composition du manteau sous-jacent. Les continents jouent en outre un rôle au sein du système convectif du manteau et contribuent au refroidissement à long terme de la planète. Collaborant avec des pétrologues, j'avais échafaudé des modèles à continents dérivants suggérant que la formation d'un supercontinent chauffe les roches sous-jacentes. J'avais besoin de prendre en compte l'influence de la convection sur les plaques tectoniques dans ces travaux. C'est ce qui m'a amené à contacter Paul Tackley.

Lors de notre rencontre, j'avais ressenti que Paul Tackley et Tobias Rolf ne prenaient pas toute la mesure de la puissance de leurs modèles 3D. Allongé dans le lit de cette chambre d'hôtel de Zurich en 2010, j'avais compris que nous disposions de la puissance de calcul et des algorithmes nécessaires pour modéliser enfin les profondeurs de la Terre de la même manière que les climatologues et les météorologues modélisent les courants atmosphériques et les fronts de tempête. Je voulais être en mesure de saisir l'intérieur de la Terre au même niveau de détail et de complexité. Les limites fondamentales de la tectonique des plaques proviennent du fait que l'on suppose que les plaques qui interagissent à la surface de la Terre sont parfaitement rigides et que l'on néglige les mécanismes physiques en jeu. Les modèles dynamiques utilisés en climatologie et en météorologie décrivent des interfaces

plus souples, plus «fluides» entre les grands phénomènes atmosphériques, comme les cyclones, les anticyclones, etc., et ils sont construits pour prédire l'évolution des conditions météorologiques sur plusieurs jours. Ces prévisions résultent d'observations effectuées en divers lieux et moments et de modèles physiques capables d'extrapoler les conditions à venir. La même chose est possible concernant des plaques tectoniques, mais il s'agit cette fois d'extrapoler des processus beaucoup plus lents et vers le passé plutôt que vers l'avenir. Il nous fallait créer un modèle prédictif de la tectonique des plaques et l'exploiter dans une simulation assez bien faite pour pouvoir y intégrer les observations géologiques et géophysiques. Cela seulement pouvait nous rendre capables de reconstruire l'évolution de notre vaste planète au cours des dernières dizaines ou centaines de millions d'années.

Toutefois, même si j'avais désormais un objectif clair en tête, sa réalisation allait demander des années de travail. Nous devions d'abord repousser les limites des modèles de Paul Tackley et de Tobias Rolf afin qu'ils deviennent capables de rendre compte de l'essentiel de la tectonique des plaques. Claire Mallard, une doctorante de mon équipe, a commencé à travailler sur eux, et elle a compris ce qu'il faudrait faire pour obtenir des planètes



Nous voulions construire le modèle complet d'une planète tellurique comparable à la Terre



virtuelles pavées d'une façon comparable à la Terre. Grâce à sa série de modèles, nous avons compris que ce sont les mouvements profonds du manteau qui forgent les grandes plaques, tandis que la résistance des plaques près des zones de subduction débite de gros blocs crustaux en une série d'«éclats». Ces deux résultats dépendent d'une seule propriété physique: la résistance des roches à proximité de la surface. Lorsque les roches ont une résistance élevée, la subduction est peu fréquente et les plaques restent grandes plutôt que de se fragmenter en morceaux. Si les roches sont beaucoup plus tendres, les grandes plaques ne peuvent rester intactes, mais se morcellent, ce qui produit les blocs crustaux plus petits dispersés sur Terre