

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 échauffe 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 senti 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

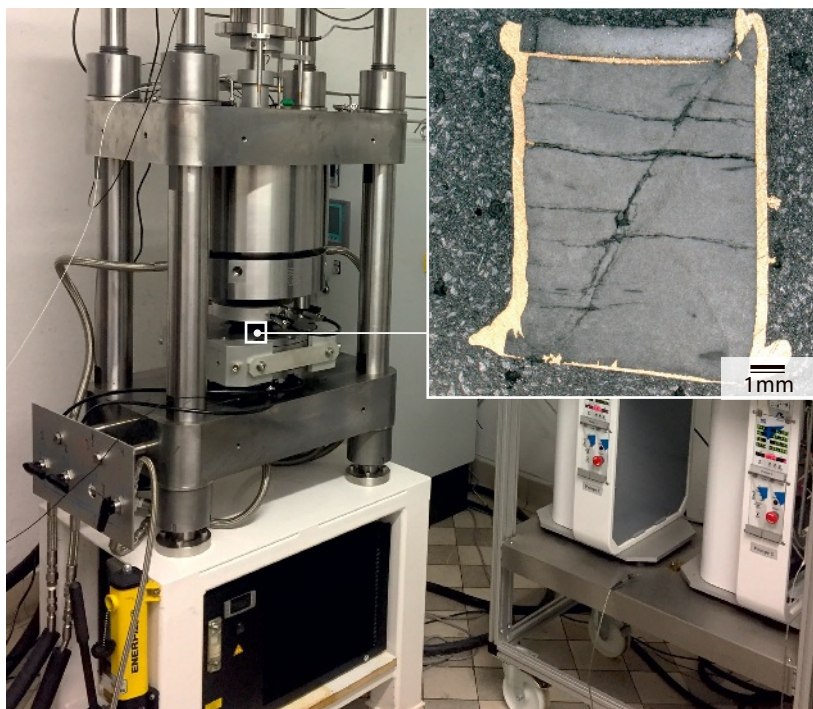
Nous voulions construire le modèle complet d'une planète tellurique comparable à la Terre

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

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