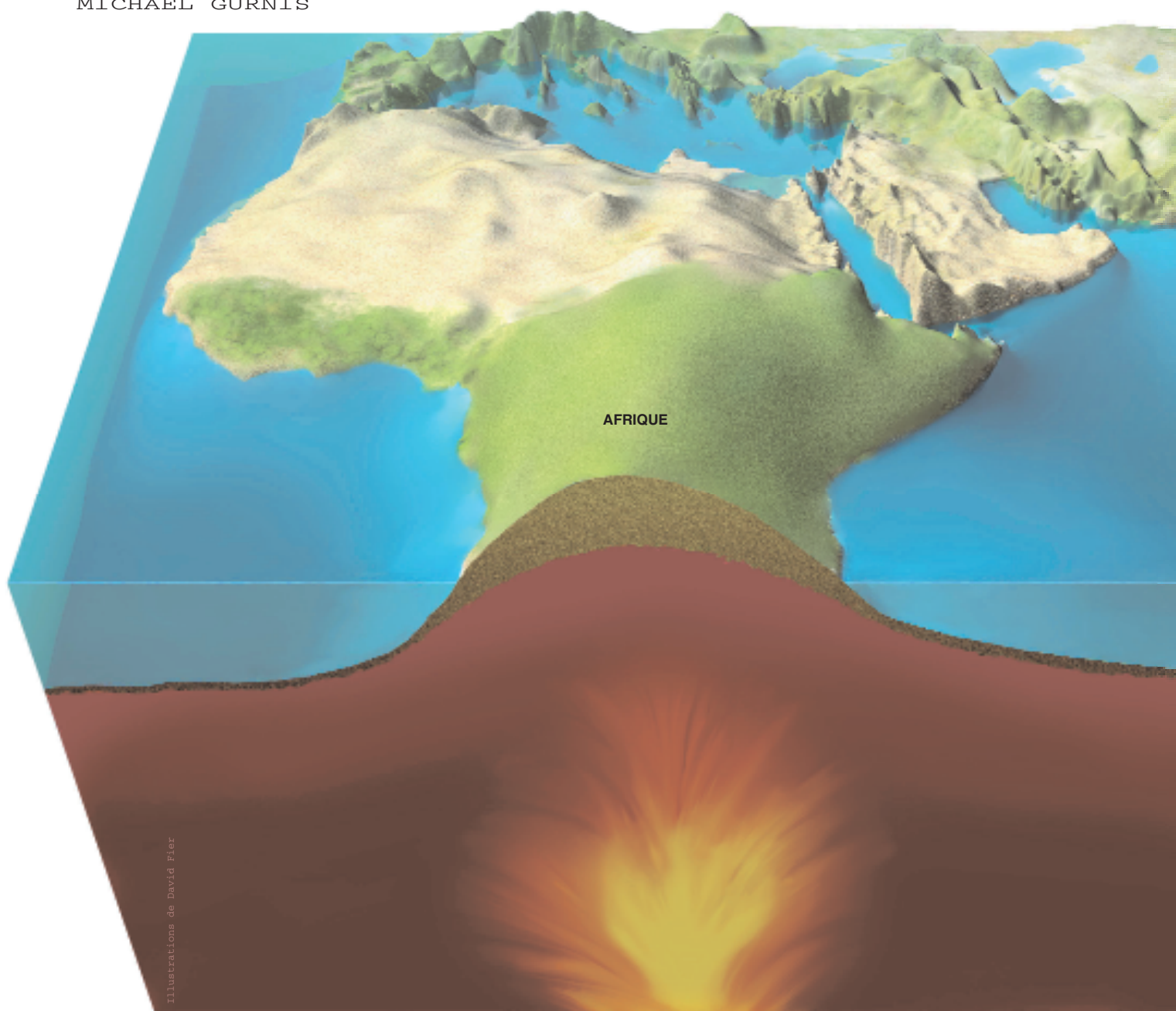


La sculpture des reliefs terrestres

MICHAEL GURNIS

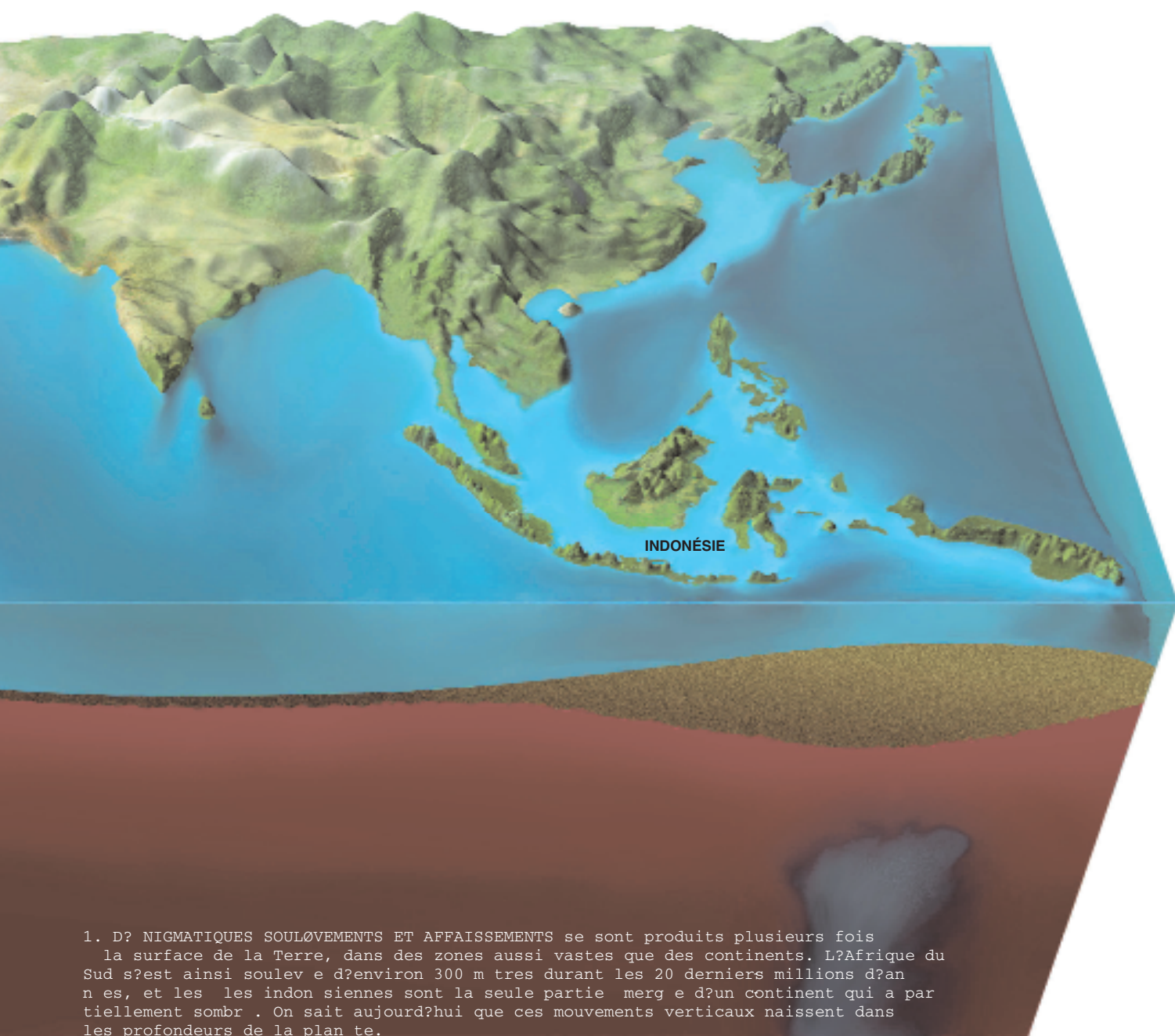


Le relief de la surface de la Terre est façonné par les violentes collisions entre les plaques tectoniques, des fragments mobiles de la croûte terrestre. La chaîne de l'Himalaya, par exemple, résulte de la collision de l'Inde et de l'Asie, et les Andes de l'enfoncement de la plaque océanique de l'océan Pacifique qui plonge sous l'Amérique du Sud. Cependant, les mouvements des plaques tectoniques n'expliquent pas tous les reliefs terrestres.

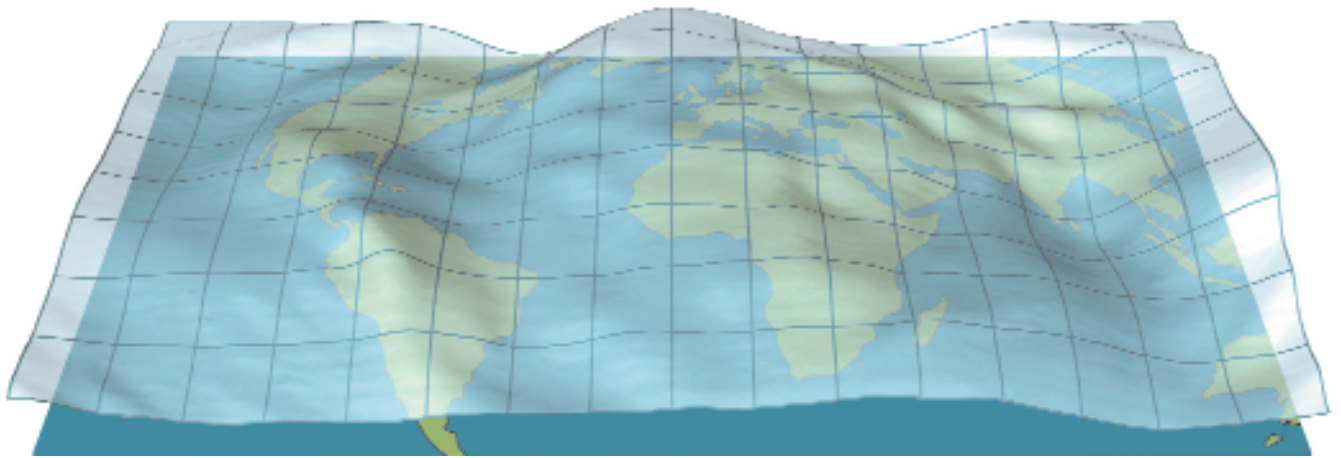
Ainsi, l'Afrique du Sud est couverte de plateaux, parmi les plus vastes du monde, qui s'étendent sur

plus 1 500 kilomètres à plus de 1 500 mètres d'altitude. Des études géologiques ont montré que l'Afrique du Sud et le plancher océanique qui l'entoure s'élèvent lentement depuis plus de 20 millions d'années, bien qu'il n'y ait eu aucune collision tectonique depuis près de 400 millions d'années dans cette zone. Cette région, le «super-bombement» africain, subit un mouvement vertical notable, de même qu'une grande partie de la surface terrestre. Dans le passé, de vastes régions de l'Australie et de l'Amérique du Nord se sont affaissées de plusieurs centaines de mètres, pour resurgir par la suite.

Les géophysiciens pensent depuis longtemps que l'activité des profondeurs de la Terre est la cause de ces mouvements verticaux. Ils en ont cherché des preuves dans le manteau, cette couche composée de roches brûlantes qui se trouve juste sous la croûte terrestre et qui s'étend sur près de 3 000 kilomètres de profondeur, jusqu'au noyau de fer, au centre de la Terre. Le manteau est soumis à d'énormes variations de température et de pression ; elles provoquent un écoulement lent (sur des milliers d'années) de la roche solide, qui se comporte comme une mélasse. Cependant, les géophysiciens ne trouvèrent pas



1. D'ÉLÉVATIONS SOULÈVEMENTS ET AFFAISSEMENTS se sont produits plusieurs fois la surface de la Terre, dans des zones aussi vastes que des continents. L'Afrique du Sud s'est ainsi soulevée d'environ 300 mètres durant les 20 derniers millions d'années, et les Indonésiennes sont la seule partie émergée d'un continent qui a partiellement sombré. On sait aujourd'hui que ces mouvements verticaux naissent dans les profondeurs de la planète.



2. LES VARIATIONS NATURELLES DU CHAMP DE GRAVITATION répondent aux régions où règne un faible champ de gravitation de la Terre sont représentées par la surface transparente, qui indique un déficit de matière dans le manteau. Une bande recouvre la carte du monde. Les points les plus hauts de la gravitation relient la côte Est de l'Amérique, la Sibérie, l'Inde, puis l'Antarctique. Ces variations de la force de gravitation indiquent la localisation des principales hétérogénéités de la Terre. Les zones en creux indiquent la localisation des principales hétérogénéités de la Terre.

d'emblée comment naissent les vastes mouvements verticaux. Aujourd'hui, des modèles informatiques, qui combinent des photographies du manteau actuel et des images reconstruites du manteau passé, expliquent pourquoi certaines régions de la surface de la Terre subissent de tels mouvements ascendants et descendants.

Les géophysiciens élucidèrent d'abord le mystère du super-bombement africain. Depuis la première moitié du XX^e siècle, ils savent que le manteau n'est pas seulement animé d'un lent mouvement de glissement, mais qu'il est malaxé et qu'il mijote comme une soupe épaisse sur le point de bouillir. Les roches les plus chaudes sont les moins denses : elles remontent lentement à la surface. Au contraire, les roches plus froides et plus denses s'enfoncent, jusqu'à ce que la chaleur qui s'échappe du noyau en fusion les chauffe suffisamment pour les faire remonter à nouveau. Ces mouvements de convection sont à l'origine du déplacement horizontal des plaques tectoniques, mais peu de géophysiciens pensaient que les forces engendrées suffisaient à soulever la surface de la planète. Des images de l'intérieur de la Terre finirent pourtant par leur donner raison.

Il y a une vingtaine d'années, des physiciens ont obtenu les premières vues en trois dimensions du manteau en mesurant les vitesses des ondes engendrées par les séismes qui se produisent à proximité de la surface du globe. Ces vitesses dépendent de la composition chimique, de la température et de la pression des roches tra-

versées. Dans les roches chaudes, de faible densité, les ondes sismiques ralentissent, et elles accélèrent dans les régions plus froides et plus denses. Les physiciens enregistrent le temps mis par ces ondes pour se déplacer de l'épicentre d'un séisme jusqu'à une station d'enregistrement. Ils en déduisent les températures et les densités à l'intérieur du globe. Région après région, ils ont ainsi cartographié les températures et les densités dans l'ensemble du manteau grâce aux vitesses sismiques enregistrées lors de milliers de tremblements de terre.

Ces cartographies, de plus en plus détaillées, ont révélé la présence de quelques formations gigantesques dans les parties les plus profondes du manteau. La plus grande d'entre elles se situe juste sous la pointe Sud de l'Afrique. Il y a environ deux ans, des sismologues ont calculé que cette énorme masse en forme de champignon se trouve à environ 1 400 kilomètres du noyau et s'étend sur plusieurs milliers de kilomètres (voir la figure 3). Ce champignon, nommé superpanache, est-il capable de repousser l'Afrique vers le haut ? Dans cette région du manteau, les ondes sismiques sont lentes : les sismologues en ont déduit qu'elle est plus chaude. Toutefois, les mesures ne fournissent la forme et la position du panache qu'à un moment donné. Si sa composition diffère de celle des roches environnantes, il pourrait être plus chaud sans remonter pour autant. Nous avons réalisé un «film» de l'évolution de ce champignon, à partir d'une simulation des phénomènes de

convection dans le manteau. Ce modèle prend en compte la forme et la densité actuelles du superpanache et la date du début de l'élévation de l'Afrique du Sud. Nous avons ainsi déterminé, en 2000, que ce champignon a une flottabilité suffisante pour remonter lentement dans le manteau et pour soulever l'Afrique.

Les géophysiciens ont élucidé le mystère du super-bombement africain assez facilement grâce à des images sismiques et à des modèles informatiques, mais les mouvements ascendants et descendants de l'Amérique du Nord et de l'Australie ont été plus difficiles à expliquer. Les géophysiciens se préoccupent de l'aspect actuel du manteau, sans chercher à expliquer comment il sculpte la surface de la Terre. Pour ce faire, ils doivent s'inspirer de la méthode des géologues, qui étudient comment la surface de la Terre a évolué au cours du temps.

Les fantômes du passé

Les géophysiciens ont commencé à comprendre le soulèvement de certaines parties de l'Amérique du Nord et de l'Australie grâce à l'étude d'un sujet apparemment sans relation : l'influence de la densité du manteau sur le champ gravitationnel de la Terre. Dans les années 1960, on pensait que la gravité serait supérieure au-dessus des régions composées de roches froides, plus denses, dont la masse est plus élevée. Or, lorsque les géophysiciens établirent la première cartographie des variations du champ

de gravitation de la Terre, ils ne trouvèrent pas que la gravité est liée à la température du manteau, du moins pas de la façon à laquelle ils s'attendaient (voir la figure 2).

À la fin des années 1970, Clement Chase, de l'Université de l'Arizona, découvrit, au contraire, que la force de gravitation est la plus élevée, non pas au-dessus des régions froides du manteau, mais au-dessus de «points chauds», c'est-à-dire de zones volcaniques isolées. Plus surprenant encore : il observa une longue bande qui s'étend de l'Est du Canada, passe par le pôle Nord, la Sibérie et l'Inde, pour descendre jusqu'à l'Antarctique, et où la gravité est faible. Il montra que cette bande de faible gravité regroupe plusieurs zones de subduction, c'est-à-dire des zones où les plaques tectoniques océaniques replongent dans le manteau, vieilles de 125 millions d'années. Les fantômes de ces anciennes zones de subduction semblaient abaisser la force de gravitation. Pourtant, là où de

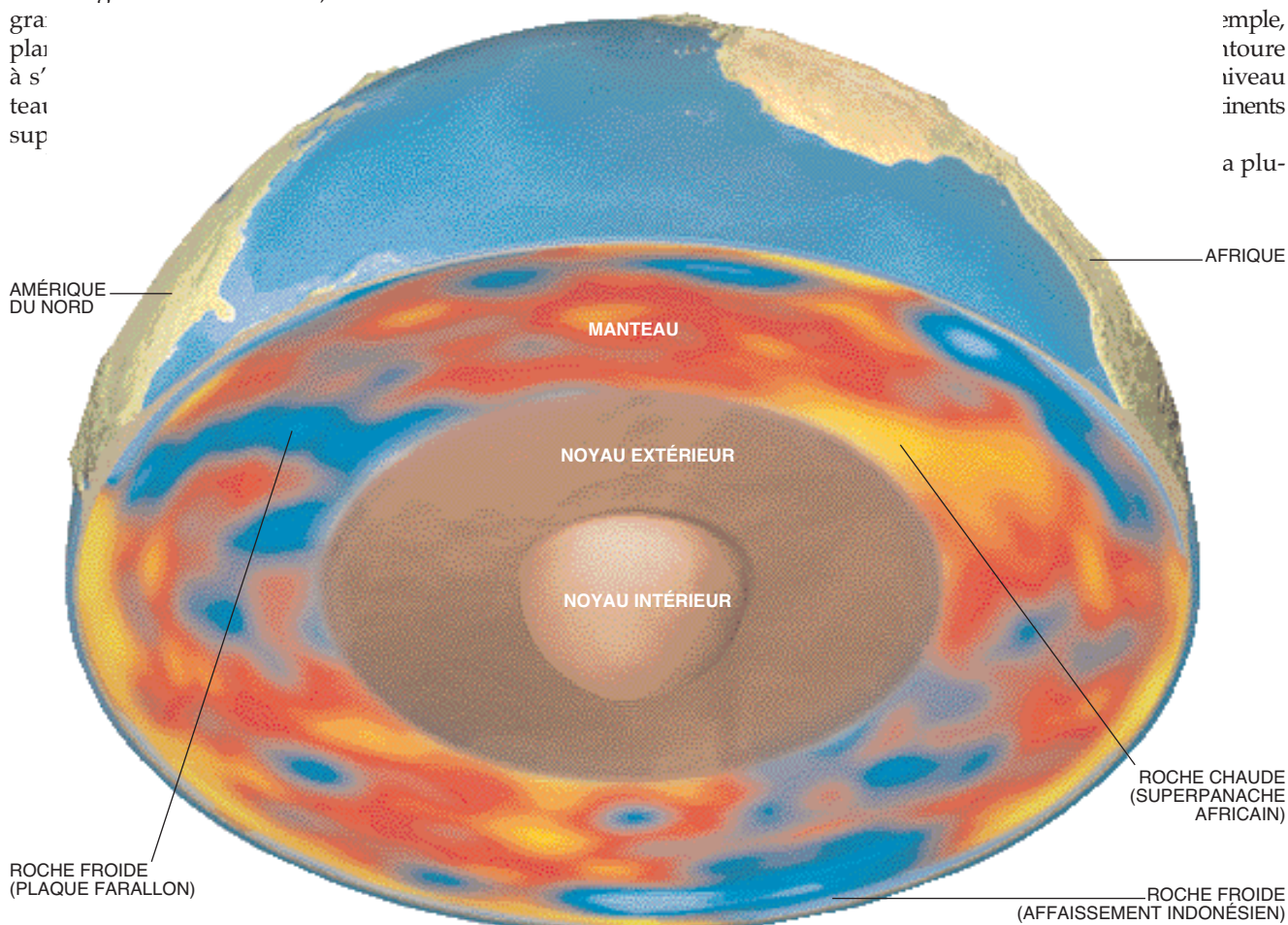
des années 1980, Bradford Hager, de l'Institut de technologie du Massachusetts, résolut ce paradoxe. Il montra que la température n'est pas l'unique facteur qui modifie la densité du manteau. En effet, le manteau, considéré sur une longue échelle de temps, est un fluide en mouvement : lorsqu'un fluide de faible densité remonte, ce qui est le cas des parties chaudes du manteau, le fluide de densité supérieure situé au-dessus de lui est repoussé vers le haut. Sous l'effet de ce lent soulèvement, des roches s'accumulent près de la surface terrestre, de sorte que la force de gravitation augmente. De même, lorsque la matière froide dense s'enfonce, elle attire vers le bas des roches qui se trouvaient auparavant près de la surface : au-dessus de cette région, la force de gravitation diminue. C'est pourquoi les fantômes des zones de subduction ont engendré une bande de faible gravité : une partie du plancher océanique froid continue de s'en-

foncer dans le manteau en attirant la surface vers le centre de la Terre. Si cette hypothèse est correcte, le manteau n'est pas simplement animé de lents mouvements horizontaux de glissement, près de la croûte terrestre, mais aussi de mouvements ascendants et descendants qui atteignent la surface : des zones qui remontent repoussent vers le haut les roches situées au-dessus et celles qui s'enfoncent entraînent vers le bas.

Les mouvements verticaux des continents

Au moment où ce mécanisme fut mis en évidence, des géologues montrèrent que les continents avaient bien subi de tels mouvements verticaux. Le niveau de la mer a changé au fil du temps, et ces fluctuations auraient dû toucher tous les continents de la même façon, mais des géologues ont montré que les variations les plus importantes seraient liées aux mouvements verticaux des continents :

ample, itoure niveau inents a plu-



3. LA CARTE DU MANTEAU a été établie grâce aux mesures sismiques qui ont parcouru la planète, après des milliers d'années de tremblements de terre. Les régions où les ondes se déplacent lentement indiquent la présence de roches chaudes, moins compactes. Sous l'océan Atlantique Sud se trouve une zone de roches chaudes nommée 'superpanache africain'. La carte révèle également la présence de matière froide qui s'enfonce en entraînant

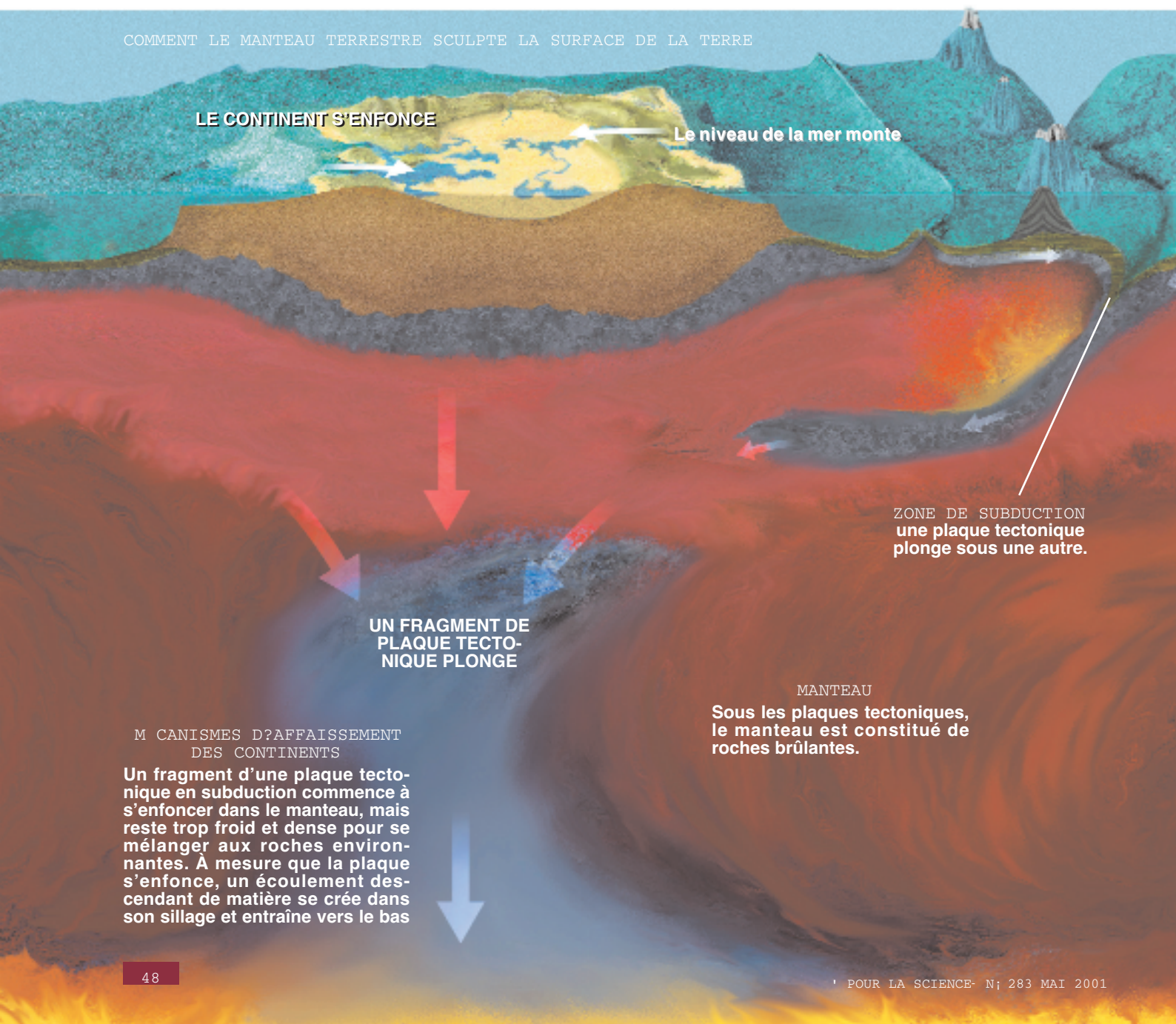
part des géologues continuèrent à douter que les continents se déplacent verticalement, même lorsqu'on découvrit, au début des années 1970, les premiers indices du curieux soulèvement de l'Australie. Le géologue John Veevers, de l'Université Macquarie, à Sydney, examina des affleurements de roches anciennes, à l'Est de l'Australie, et découvrit qu'au cours du Crétacé inférieur (il y a environ 130 millions d'années) une mer peu profonde avait rapidement recouvert la moitié de l'Australie, alors que d'autres continents avaient été submergés beaucoup plus lentement. Autour de ces continents, la mer a atteint son niveau maximal au Crétacé supérieur (il y a environ 70 millions d'années), mais, au même moment, l'océan se retirait déjà des

côtes australiennes. La moitié orientale de l'Australie se serait effondrée de plusieurs centaines de mètres par rapport à d'autres continents, puis se serait soulevée à nouveau avant que le niveau de la mer ait recommencé à baisser. Cette instabilité d'un continent qui s'affaisse, puis se soulève n'est qu'un épisode de l'histoire énigmatique de l'Australie. Il fut suivi d'événements encore plus étranges. Après le Crétacé, l'Australie s'affaissa de nouveau, cette fois de 180 mètres. Aucune interprétation raisonnable fondée sur le mouvement des plaques tectoniques ne semblait expliquer ces mouvements verticaux de grande ampleur.

À la fin des années 1980, l'étude d'une autre région, celle de Denver, dans le Colorado, allait apporter des

éléments pour comprendre la géophysique de l'Australie. Bien que la ville soit située à plus de 1 500 mètres d'altitude, elle est établie sur un socle rocheux plat de sédiments marins déposés au fond d'une mer peu profonde au cours du Crétacé. De vastes océans recouvraient alors la plupart des continents, et le niveau de la mer était plus élevé qu'aujourd'hui d'environ 120 mètres. L'océan n'a jamais pénétré assez loin à l'intérieur des terres pour atteindre la région de Denver, à moins que ce site ne se soit effondré de plusieurs centaines de mètres, de sorte que les eaux auraient alors pu l'envahir.

À partir de la position du littoral de l'Amérique du Nord durant le Crétacé, les géologues ont estimé que cet



M CANISMES D'AFFAISSEMENT
DES CONTINENTS

Un fragment d'une plaque tectonique en subduction commence à s'enfoncer dans le manteau, mais reste trop froid et dense pour se mélanger aux roches environnantes. À mesure que la plaque s'enfonce, un écoulement descendant de matière se crée dans son sillage et entraîne vers le bas

MANTEAU

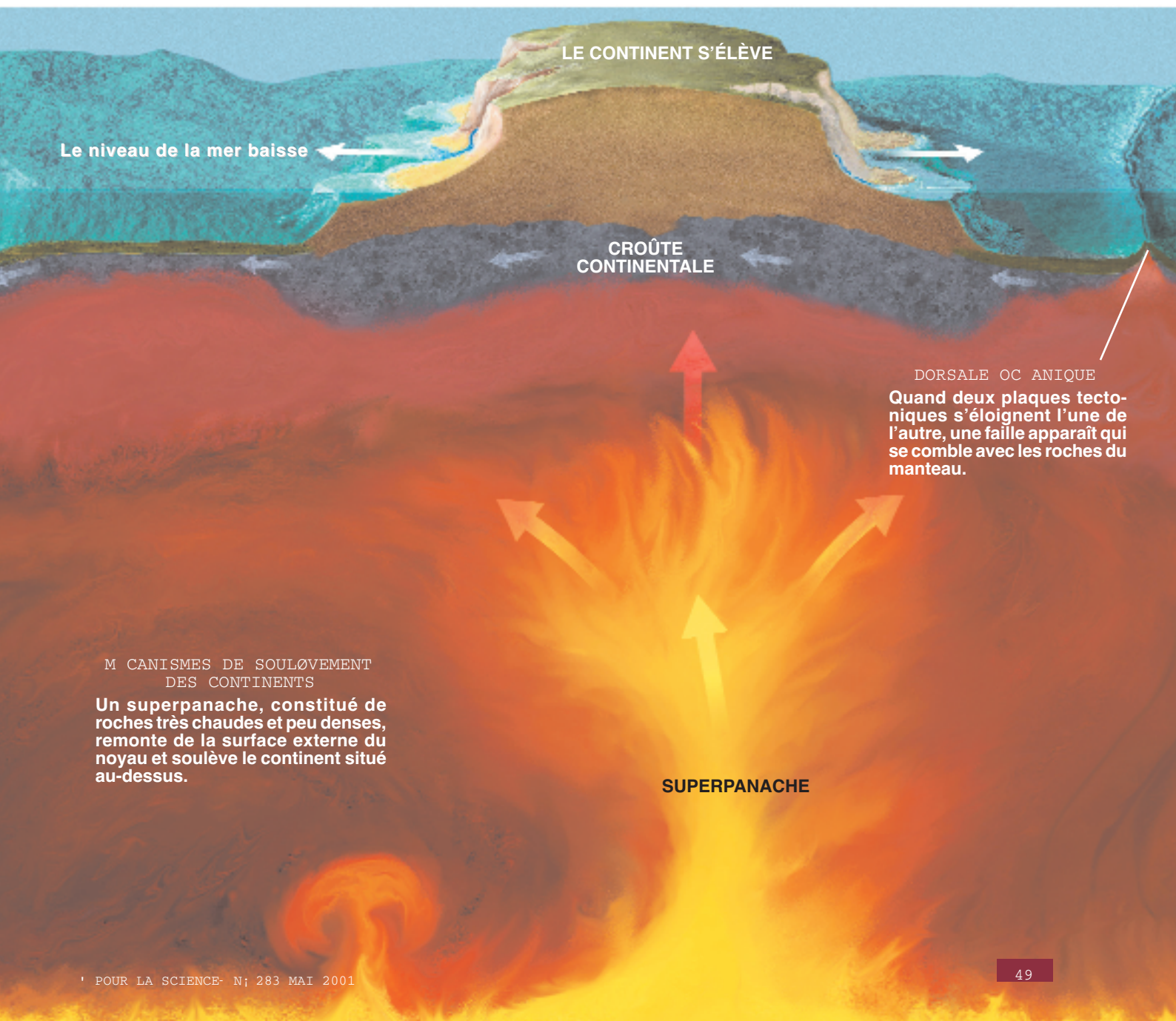
Sous les plaques tectoniques,
le manteau est constitué de
roches brûlantes.

affaissement, puis le soulèvement qui l'a suivi auraient touché une zone de près de 1 000 kilomètres de largeur. Les tenants de la théorie de la tectonique des plaques avaient des difficultés à justifier une telle étendue : la largeur des zones concernées par les mouvements des plaques tectoniques ne dépasse pas quelque 150 kilomètres à partir de leur bord, où la plaque est assez mince pour se courber sous l'effet de la collision. Or, dans la région de Denver, le mouvement vertical s'est déroulé à plusieurs centaines de kilomètres à l'intérieur des terres, très loin de l'influence des collisions de plaques. Un mécanisme totalement différent devait en être responsable.

Une subduction de l'ancien plancher océanique dans le manteau Nord-

américain pouvait-il avoir causé l'affaissement de la région de Denver ? Les géologues trouvèrent que l'effondrement de l'Amérique du Nord durant le Crétacé aurait été causé par une ancienne plaque nommée Farallon, lorsqu'elle plongea dans le manteau sous la côte Ouest. Ils montrèrent, sur une simulation numérique, que l'ancienne plaque s'enfonça dans le manteau presque horizontalement. Lorsqu'elle commença à s'enfoncer, elle aspira, dans son sillage, l'Amérique du Nord assez profondément pour que l'océan s'y déverse. À mesure que la plaque Farallon s'enfonçait, la force d'aspiration faiblissait. La tendance du continent à flotter finit par l'emporter et l'Amérique du Nord refit surface.

La plaque Farallon a depuis longtemps disparu dans le manteau, et l'on ne disposait que d'indices géologiques de son existence, gravés dans le fond de l'océan Pacifique. À la fin des années 1980, les images sismiques n'avaient pas une résolution suffisante pour que l'on puisse détecter un petit fragment de plancher océanique qui s'enfonçait dans le manteau. En 1996, de nouvelles images du manteau ont tout changé. Deux images, obtenues grâce à des mesures sismiques différentes, révélèrent des structures quasi identiques, notamment la plaque Farallon : elle apparaissait nettement sous la forme d'un bloc arqué à quelque 1 500 kilomètres sous la côte Est des États-Unis. Elle se trouve dans la bande de faible gravité observée



MECANISMES DE SOULÈVEMENT DES CONTINENTS

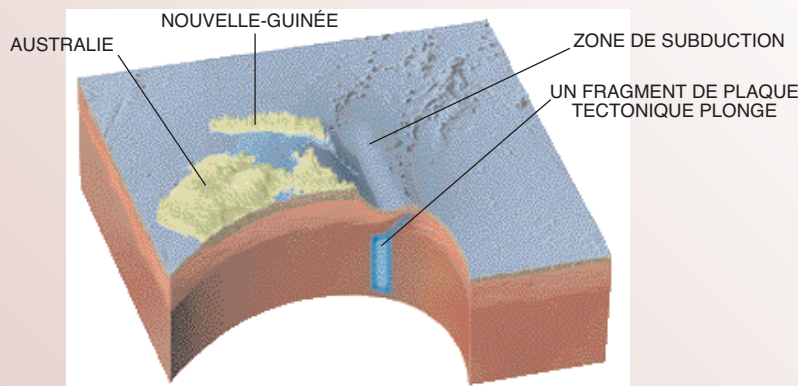
Un superpanache, constitué de roches très chaudes et peu denses, remonte de la surface externe du noyau et soulève le continent situé au-dessus.

SUPERPANACHE

DORSALE OCÉANIQUE
Quand deux plaques tectoniques s'éloignent l'une de l'autre, une faille apparaît qui se comble avec les roches du manteau.

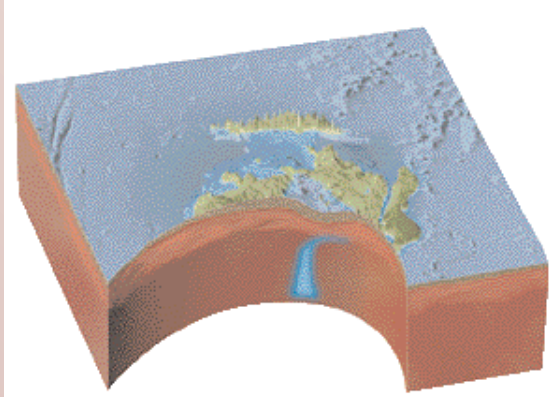
Les mouvements ascendants et descendants de l'Australie

Un modèle informatique révèle comment le fantôme d'une ancienne zone de subduction a aspiré un continent.



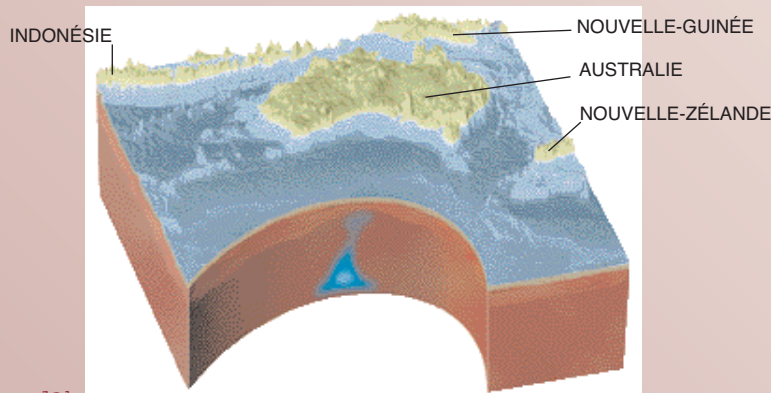
Il y a 100 millions d'années

L'Australie est bordée par une zone de subduction, une profonde tranche où les plaques tectoniques, à l'est, plongent dans le manteau. La plaque qui s'enfonce entraîne avec elle le bord oriental de l'Australie et le manteau dans son sillage. Puis la subduction s'arrête, et le



Il y a 20 millions d'années

Lorsque l'Australie, qui dirige vers l'est, passe au-dessus de la plaque tectonique qui s'enfonce, toute la partie orientale de l'Australie s'arrête d'environ 100 mètres au-dessous du niveau de l'océan. Environ 20 millions d'années plus tard, l'aspiration vers le bas de la plaque s'arrête, mesure qu'elle descend plus profondément dans le manteau et



Aujourd'hui

L'Australie se situe au Nord de sa position initiale. Elle a été repoussée par les déplacements des plaques tectoniques adjacentes qui ont commencé il y a environ 100 millions d'années. Le continent entier s'est élevé par rapport à son altitude maximale, entraînant vers le bas la zone du manteau située sous l'Indonésie, qui, elle aussi, s'enfonce.

20 ans auparavant entre le Canada, la Sibérie, l'Inde et l'Antarctique.

Les mouvements de l'Australie

Les mouvements verticaux de l'Amérique du Nord ont résulté des phénomènes d'aspiration qu'a provoqués la subduction du plancher océanique et qui ont permis à l'océan d'envahir le fossé d'effondrement. Ces mécanismes s'appliquent-ils aux énigmatiques mouvements continentaux de l'Australie? D'après les modèles informatiques établis depuis une quinzaine d'années, le manteau est capable de soulever la surface de plusieurs centaines de mètres, ce qui suffit à causer une baisse apparente du niveau de la mer. Nous avons alors cherché dans l'histoire des plaques tectoniques des éléments qui auraient provoqué les mouvements verticaux de l'Australie. Pendant le Crétacé, l'Australie, l'Amérique du Sud, l'Afrique, l'Inde, l'Antarctique et la Nouvelle-Zélande étaient rassemblées en un vaste supercontinent, nommé le Gondwana, qui a existé pendant plus de 400 millions d'années, avant de se fragmenter et de former les masses continentales actuelles. Pendant presque toute cette période, une gigantesque zone de subduction où des plaques océaniques froides plongeaient dans le manteau entourait le Gondwana. Nous avons alors émis l'hypothèse que cette zone de subduction, qui entourait le Gondwana pendant des centaines de millions d'années, aurait provoqué les mouvements ascendants et descendants de l'Australie.

Pour comprendre comment la plaque froide s'est comportée dans le manteau lorsque le Gondwana s'est disloqué sur une période de plusieurs millions d'années, nous avons simulé l'influence du manteau sur l'Australie au fil du temps. Nous connaissions la position initiale de l'ancienne zone de subduction, l'histoire des mouvements horizontaux des plaques dans cette région et les propriétés du manteau sous-jacent, notamment une estimation de sa viscosité. Nous avons ainsi élaboré un scénario des mouvements de l'Australie qui correspond bien aux observations (voir l'encadré page ci-contre).

La simulation commençait il y a 130 millions d'années, avec la sub-

duction du plancher océanique sous l'Est de l'Australie. Lorsque cette dernière se détacha du Gondwana, elle passa au-dessus de la plaque froide en subduction, qui aspira la plaque australienne vers le bas. Le continent remonta lorsqu'il poursuivit sa migration vers l'Est en s'écartant de la plaque. Nous avons résolu l'énigme du mouvement de l'Australie durant le Crétacé, et nous avons, à l'aide d'un autre modèle, confirmé que l'Australie s'était bien déplacée vers le Nord en direction de l'Indonésie après le Crétacé, et qu'elle s'est affaissée d'environ 180 mètres. D'après ce modèle, l'Indonésie est aujourd'hui aspirée vers les profondeurs plus que toute autre région du monde, parce qu'elle se situe à l'intersection d'énormes systèmes de subduction dans les océans Pacifique et Indien. À mesure que l'Indonésie s'enfonce, elle entraîne l'Australie avec elle. L'Indonésie est un vaste continent submergé, dont seuls les pics montagneux les plus élevés émergent.

L'Indonésie et l'Afrique sont dans des situations opposées : l'Indonésie est tirée vers le bas, tandis que l'Afrique est repoussée vers le haut. Ces mouvements proviennent de modifications qui se produisent dans le manteau depuis quelques centaines de millions d'années et qui sont liés à l'existence passée du Gondwana. L'immense bande de faible gravité découverte il y a une trentaine d'années résulte de la subduction (qui se poursuit) des plaques tectoniques de la vaste zone qui entourait le continent originel. Au centre du Gondwana se trouvait l'Afrique du Sud. Cette région n'a pas subi le refroidissement lié aux plaques qui plongeaient dans le manteau, car elle en était trop éloignée. Ce phénomène expliquerait pourquoi le superpanache chaud remonte aujourd'hui des profondeurs du manteau à cet endroit.

En conclusion, les mouvements du manteau sculptent la surface de la pla-

nète de différentes façons. Ils contribuent au mouvement horizontal des plaques tectoniques, mais ils provoquent également le soulèvement ou l'affaissement des continents. On a découvert que l'écoulement dans le manteau profond se poursuit très longtemps après le mouvement horizontal des plaques tectoniques. Les positions d'anciennes lisières de plaques exercent encore, des millions d'années après leurs déplacements, un effet sur la façon dont la surface est sculptée.

La convection dans le manteau et les mouvements des plaques tectoniques sont sans cesse mieux décrits. Lorsque la convection du manteau change, le champ gravitationnel se modifie, et nous tentons de suivre ces changements. La détection des variations temporelles du champ gravitationnel de la Terre fait partie d'une mission spatiale germano-américaine nommée GRACE, dont le lancement est prévu en juin. Deux vaisseaux en orbite vont cartographier les variations du champ de gravitation terrestre tous les 15 jours, et nous espérons en déduire les lents mouvements verticaux associés à la convection dans le manteau. Un autre projet, nommé USArray devrait nous fournir bientôt des images sismiques de haute résolution : 400 sismographes itinérants fourniront des images de l'intérieur du manteau, sur les premiers milliers de kilomètres sous les États-Unis, et avec une résolution de 80 kilomètres.

À mesure que ces projets donneront des images et des informations précises sur le manteau, et que les ordinateurs disponibles seront de plus en plus puissants, nous comprendrons de mieux en mieux la dynamique de l'intérieur de la Terre. D'ores et déjà, en considérant la plus vaste région de la planète, c'est-à-dire le manteau, comme un gros morceau de roche qui a sa propre histoire, les géologues ont élu-

Michael GURNIS est géophysicien à l'Institut de technologie de Californie.

M. GURNIS et al, *Dynamics of Cretaceous Vertical Motion of Australia and the Australian-Antarctic Discordance*, in *Science*, vol. 279, p. 1499, 1998.

G. DAVIES, *Dynamics Earth : Plates, Plumes and Mantle Convection*. Cambridge university press, 2000.

M. GURNIS et al, *Constraining Mantle Density Structure Using Geological Evidence of Surface Uplift Rates : the Case of the African Superplume*, in *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol.1, N° 1999GC000035, 2000.

Site web du groupe de recherche de M. GURNIS : www.gps.caltech.edu/~gurnis/geodynamics.html.

cidé l'origine de certains bouleversements géologiques qui modèlent la surface de la Terre.