

■ Accrétion océanique

La dérive des

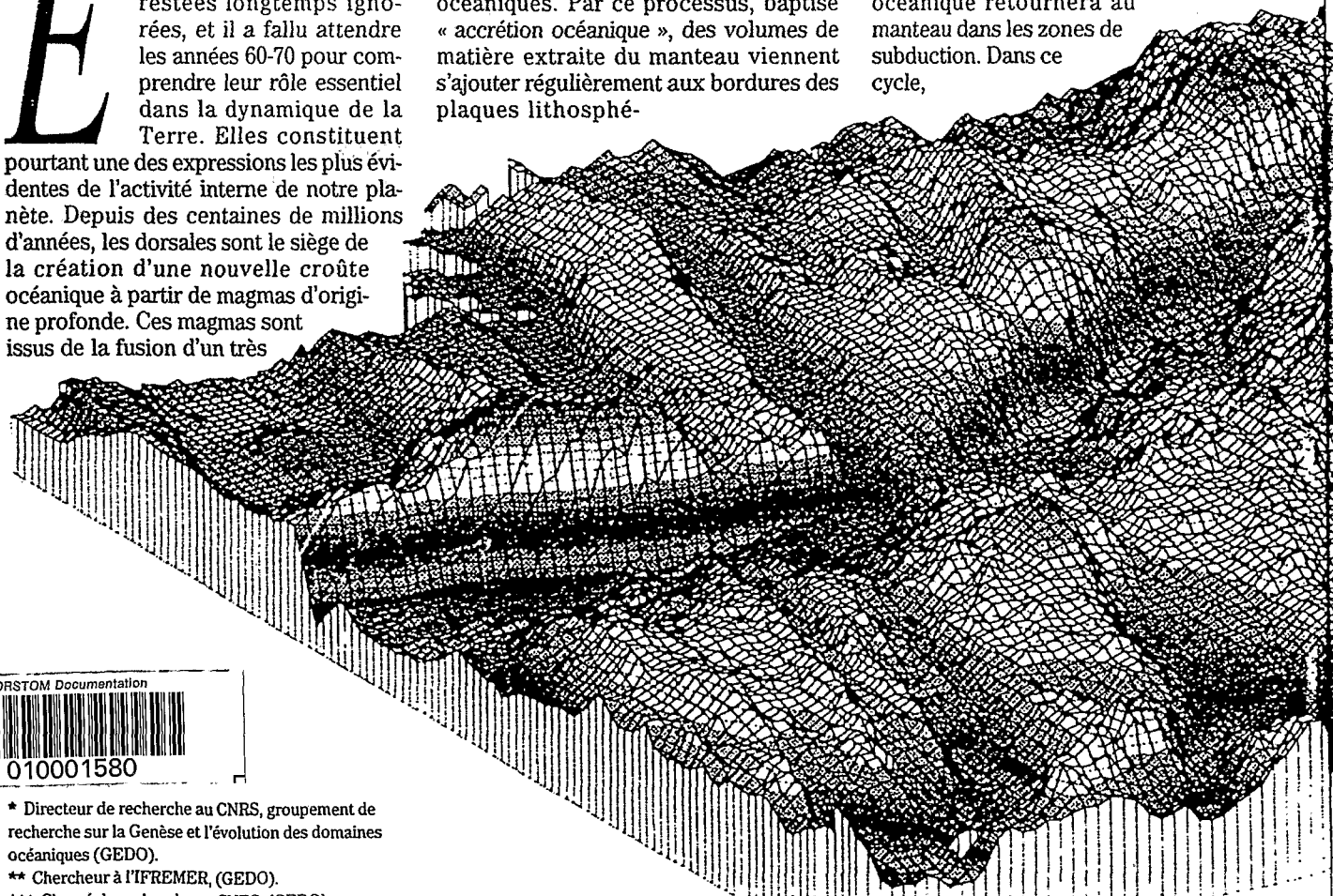
Avec 60 000 km de long, les dorsales océaniques forment la plus longue chaîne volcanique du globe. En quoi leur structure témoigne-t-elle de la vitesse d'ouverture des océans ?

**PAR YVES LAGABRIELLE*,
JEAN-MARIE AUZENDE** ET
PASCAL GENTE*****

Enfoncées sous les eaux, les dorsales océaniques sont restées longtemps ignorées, et il a fallu attendre les années 60-70 pour comprendre leur rôle essentiel dans la dynamique de la Terre. Elles constituent pourtant une des expressions les plus évidentes de l'activité interne de notre planète. Depuis des centaines de millions d'années, les dorsales sont le siège de la création d'une nouvelle croûte océanique à partir de magmas d'origine profonde. Ces magmas sont issus de la fusion d'un très

faible volume du manteau remontant lentement sous l'axe des dorsales. Les magmas s'écoulent en surface sous forme de coulées volcaniques ou sont figés dans des poches (les chambres magmatiques) à quelques kilomètres sous les fonds océaniques. Par ce processus, baptisé « accrétion océanique », des volumes de matière extraite du manteau viennent s'ajouter régulièrement aux bordures des plaques lithosphé-

riques. Les dorsales océaniques, situées aux frontières où les plaques s'écartent (frontières dites divergentes), sont ainsi au cœur de la tectonique des plaques. Après un parcours qui durera 100 à 150 millions d'années, la lithosphère océanique retournera au manteau dans les zones de subduction. Dans ce cycle,



ORSTOM Documentation



010001580

* Directeur de recherche au CNRS, groupement de recherche sur la Genèse et l'évolution des domaines océaniques (GEDO).

** Chercheur à l'IFREMER, (GEDO).

*** Chargé de recherche au CNRS, (GEDO).

O. R. S. T. O. M. Fonds Documentaire

N° : 43138

Cote : B ex 1

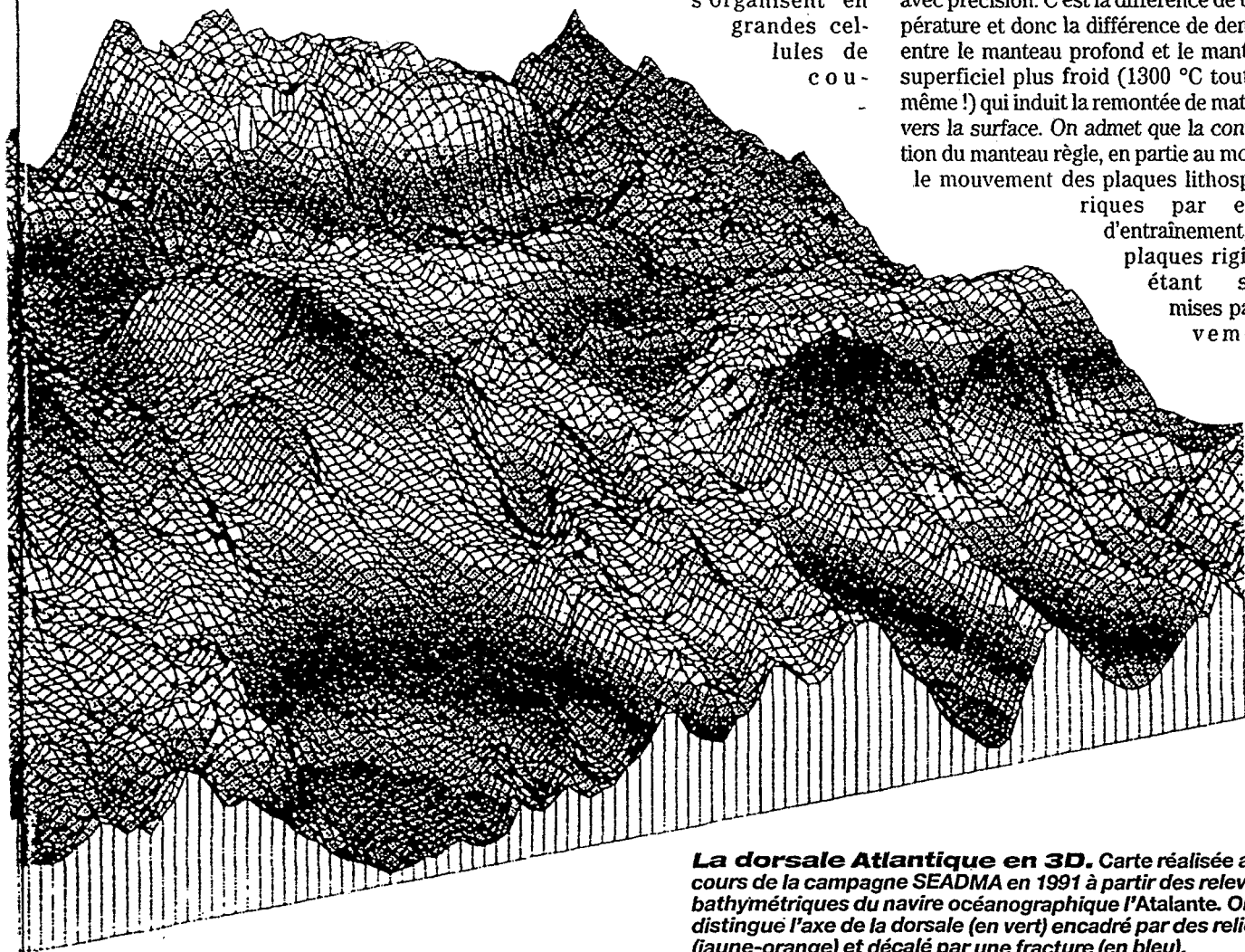
Océans

les dorsales océaniques sont bien le siège du renouvellement des fonds océaniques. Chaque année, la production de volumes considérables de magma se trouve ainsi concentrée en divers points le long des dorsales. On estime à 21 km³ le volume total de mag-

ma produit par an le long des dorsales.

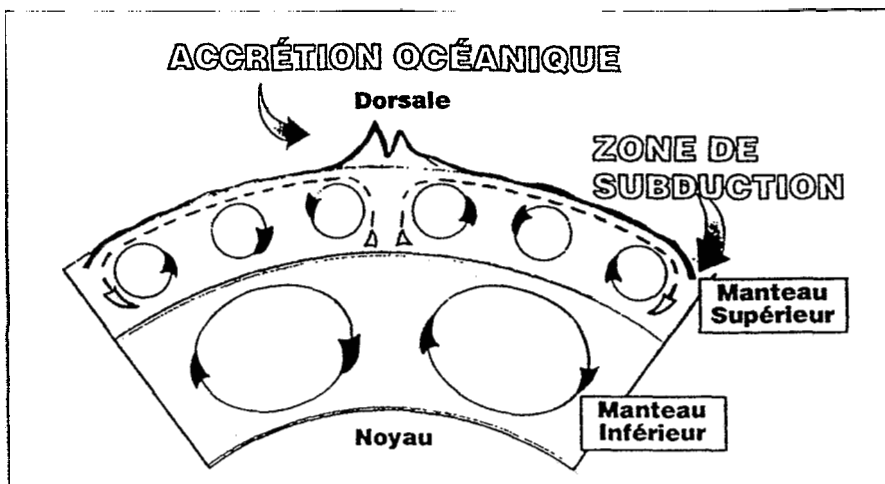
Le système global des dorsales est donc une manifestation de surface des mouvements de matière qui agitent lentement le manteau terrestre. Ce manteau possède la propriété de pouvoir s'écouler à vitesse très lente. Les mouvements s'organisent en grandes cellules de

c o u -
rants ascendants chauds, et descendants froids, baptisées cellules de convection. A l'heure actuelle, on comprend bien les principes généraux qui permettent la mise en mouvement du manteau, même si la forme, la taille et le nombre des cellules de convection ne sont pas connus avec précision. C'est la différence de température et donc la différence de densité entre le manteau profond et le manteau superficiel plus froid (1300 °C tout de même !) qui induit la remontée de matière vers la surface. On admet que la convection du manteau règle, en partie au moins, le mouvement des plaques lithosphériques par effet d'entraînement, les plaques rigides étant soumises passivement



La dorsale Atlantique en 3D. Carte réalisée au cours de la campagne SEADMA en 1991 à partir des relevés bathymétriques du navire océanographique l'Atalante. On distingue l'axe de la dorsale (en vert) encadré par des reliefs (jaune-orange) et décalé par une fracture (en bleu).

PASCAL GENTEGED



Le moteur de la tectonique des plaques : deux cellules de convection indépendantes, l'une dans le manteau supérieur et l'autre dans le manteau inférieur. C'est le modèle qui a la faveur des géophysiciens.

aux mouvements circulaires du manteau sous-jacent. On dit qu'il existe un couplage mécanique possible entre le manteau profond (asthénosphère) et les plaques rigides (lithosphère). Ce phénomène n'agit pas seul, il est admis également que les plaques se mettent en mouvement sous l'effet de leur propre poids, comme dans l'océan Pacifique où elles sont attirées vers les zones de subduction. Les dorsales se trouvent aux endroits du globe où s'effectue la remontée de matière chaude du manteau. Ainsi, la convection du manteau contrôle, en partie au moins, la position des dorsales et donc la forme et l'évolution des bassins océaniques.

Dans chacun des océans, le système de dorsales est différent. Dans l'océan Atlantique, par exemple, la dorsale occupe une position centrale. L'ouverture s'est produite de façon simple, entre les deux Amériques d'une part et l'Afrique et l'Eurasie d'autre part. La croûte océanique vient s'appuyer solidement sur les bordures des continents qui s'écartent ainsi régulièrement depuis 160 millions d'années environ (on dit que les marges sont stables, par opposition aux marges actives où s'effectue la subduction). La dorsale peut être localement hypertrophiée sous l'effet d'une très forte production magmatique et dépasser sa profondeur habituelle jusqu'à émerger. C'est le cas de l'Islande et des Açores.

Cette très haute productivité magmatique est due à la présence d'un point chaud, une remontée ponctuelle de manteau d'origine très profonde (la limite manteau-noyau), coïncidant ici avec l'axe de la dorsale.

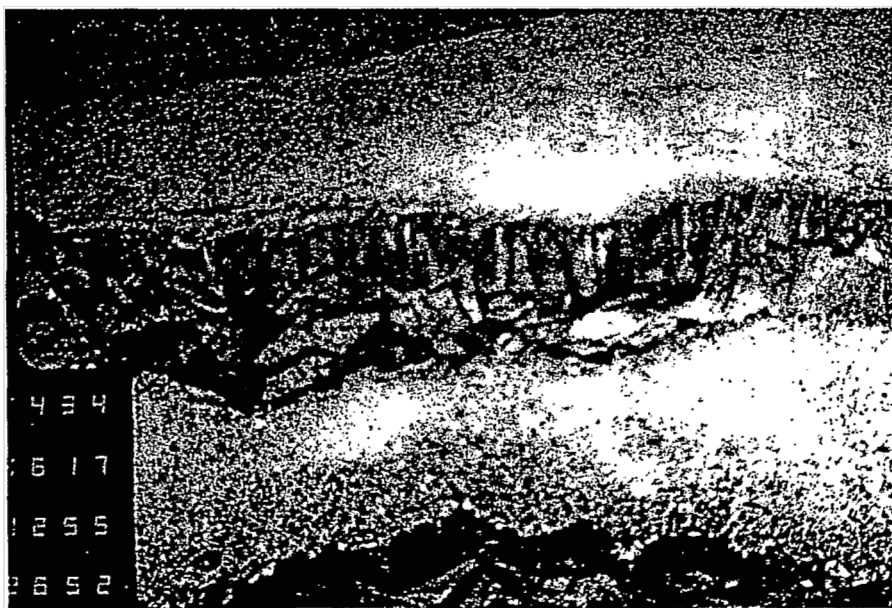
Dans l'océan Pacifique, dont l'histoire est plus ancienne, la dorsale n'est pas en position centrale. Elle vient même buter contre le continent au niveau du golfe de basse Californie où le mouvement en ouverture à la dorsale est « transformé »

par un mouvement de coulissage le long de la faille de San Andreas. Des ramifications de la dorsale Pacifique s'écartent de celle-ci en direction de la marge de l'Amérique du Sud. Ce sont la dorsale Cocos-Nazca et la dorsale du Chili. On a montré récemment que la dorsale du Chili s'enfonce sous le continent sud-américain et s'engage dans la subduction en même temps que les plaques océaniques. C'est une situation exceptionnelle, dont les conséquences sur la genèse des volcans et des failles dans le sud du Chili n'ont pas encore toutes été mesurées. Dans l'océan Indien, le dispositif est plus complexe. Trois dorsales actives convergent en un même point : la dorsale Sud-Ouest indienne, au sud de l'Afrique, qui se raccorde à la dorsale atlantique ; la dorsale de Carlsberg qui se perd au nord dans

le rift de la mer Rouge et la dorsale Est indienne qui, passant au sud de l'Australie, se raccorde ensuite à la dorsale du Pacifique. C'est le long de cette dorsale que s'est opérée une rupture majeure entre le bloc de l'Inde-Australie et le continent antarctique. Cette séparation a profondément marqué notre globe, puisqu'à l'issue de celle-ci, entamée il y a 110 millions d'années, l'Inde allait finir par emboutir le rebord de la plaque eurasienne voilà environ 50 millions d'années, sur plusieurs milliers de kilomètres. La chaîne de l'Himalaya résulte de cette collision.

On détermine la vitesse relative des plaques lithosphériques en étudiant les motifs des anomalies magnétiques du plancher océanique. Les résultats sont très tranchés. Les dorsales produisant le plus de surface de lithosphère nouvelle par an sont dites « dorsales rapides ». La dorsale du Pacifique est appartient à cette catégorie.

Le taux d'ouverture varie de 10 cm/an à l'entrée dans le golfe de basse Californie, à un maximum de 17 à 18 cm/an près de l'île de Pâques. Ce dernier chiffre exprimé avec de telles unités semble faible, mais que l'on ne s'y trompe pas ! En un million d'années, la dorsale du Pacifique au sud de l'équateur a produit une bande de croûte océanique d'environ 150 km de large sur des milliers de kilomètres de long. Les dorsales dites lentes ont des taux d'ouverture inférieurs à 5 cm/an. La mieux connue est la dorsale atlantique dont les taux d'ouverture sont compris du nord au sud entre 2 et 3,5 cm par an. Dès 1973, cette dorsale a été la cible de



Mission NAUDUR accomplie. Paysage typique d'un segment de la dorsale Pacifique est photographié par le submersible Nautile en 1993. Les fissures simples ou répétées sur le plancher du fossé axial sont la marque d'une activité volcanique en sommeil et d'une activité tectonique dominante.

programmes internationaux comme l'opération « FAMOUS » mettant en jeu différents navires et sous-marins. La dorsale la plus lente est la dorsale Sud-Ouest indienne avec une ouverture moyenne de 1,6 cm par an.

Une dorsale rapide peut mettre en place dix fois plus de surface océanique que la dorsale la plus lente. Cette différence est importante, et l'on doit s'attendre à ce que l'aspect de ces différentes dorsales soit fortement contrasté. Les dorsales constituent un relief trapu, culminant à une profondeur presque constante de 2500 m, soit plusieurs milliers de mètres au-dessus des plaines abyssales. Cependant, compte tenu de l'immensité des distances horizontales dans les grands bassins océaniques, les pentes qui mènent du plus profond des océans vers la crête des dorsales sont très faibles. Sur ces surfaces, la couverture sédimentaire atteint 100 à 200 m d'épaisseur et, sauf en des points particuliers, comme autour des volcans actifs des « points chauds » qui percent les plaques lithosphériques, surtout abondants dans le Pacifique, aucune activité tectonique ou volcanique ne vient perturber l'uniformité de ces étendues.

Le paysage change radicalement quand on aborde la crête de la dorsale, où la couverture sédimentaire disparaît. En Atlantique, une profonde vallée occupe la partie la plus élevée de la dorsale. Cette vallée si caractéristique est appelée vallée axiale ou vallée du rift (« Rift Valley »), par analogie avec les vallées qui découpent la partie orientale de l'Afrique, en formant le rift Est africain. C'est un immense fossé d'effondrement (un graben), de 1000 m à 3000 m de profondeur, dont la largeur peut dépasser dix kilomètres. Le paysage est minéral, les reliefs extrêmement escarpés. Ce fossé est limité par de puissantes falaises au pied desquelles s'entassent d'imposants cônes d'éboulis.

Comme l'ont noté tous les observateurs ayant parcouru ces paysages en sous-marin, les failles qui limitent le fossé découpent de façon très spectaculaire des empilements de matériau volcanique typiques de ces domaines. Des laves en tube ou en coussin sectionnées à l'emporte-pièce, ou des coulées plus massives parfois prismées apparaissent le long des murs de faille sur des dizaines de mètres de hauteur. Le fond du fossé axial n'est pas épargné non plus par la tectonique : talus actifs, éboulements, et surtout fissures béantes de plusieurs mètres de largeur, ouvertes dans le *substratum* basaltique, témoignent de l'intense activité qui agite ce domaine. Ça et là dans ce paysage, des volcans coniques de plusieurs centaines de mètres de hauteur s'alignent



Orgues basaltiques. Coupe le long d'une faille mettant à jour des laves massives avec débit en prisme, observée par le Nautilus au cours de la mission STARMER, en 1990.

le long de longues fissures invisibles, dans la direction générale de l'axe, au fond de la vallée centrale. Ces volcans constituent la « zone néo-volcanique », ainsi définie par les premiers spécialistes, et matérialisent la zone la plus active du point de vue magmatique.

L'exploration systématique des océans devait révéler rapidement que la présence d'un large et profond graben axial n'est pas une caractéristique commune à toutes les dorsales. Une telle morphologie se rencontre en effet essentiellement le long de la dorsale de l'Atlantique et dans l'océan Indien. La dorsale du Pacifique est ne présente jamais une très large vallée centrale. En certains points, on peut atteindre le sommet de la dorsale sans rencontrer le moindre fossé d'effondrement axial. Le profil est celui d'un dôme parfait dont le sommet est recouvert de coulées volcaniques extrêmement récentes. La dorsale présente ainsi l'aspect d'un énorme volcan ventru et allongé.

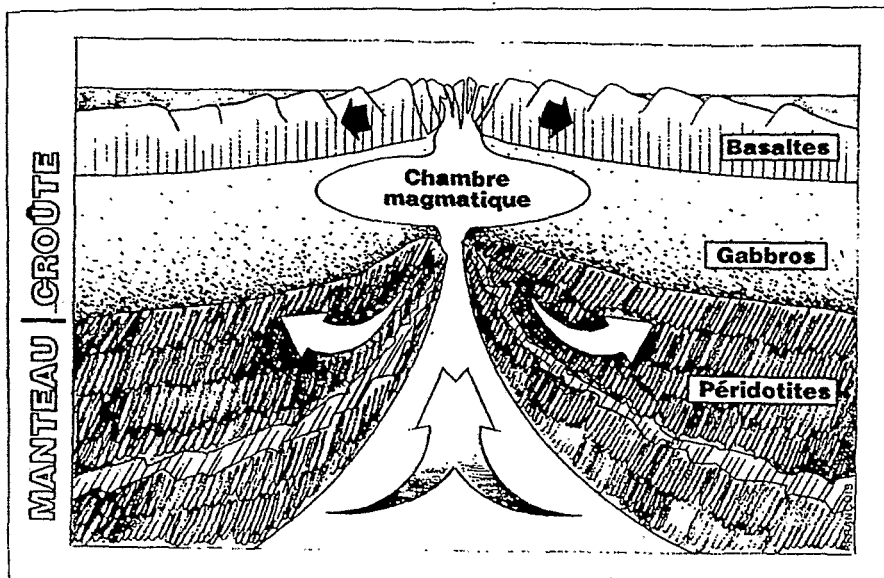
Dans certains secteurs de la dorsale est Pacifique, comme ceux explorés dans les

années 78/79 au large du Mexique par des équipes françaises et américaines, un fossé central réduit est présent. Ce graben mesure au plus 500 à 800 m de largeur pour une profondeur de 100 m seulement. Il pourrait être un équivalent des caldeiras, ces cratères que l'on trouve au sommet des volcans. S'y déplacer en sous-marin est impressionnant. Le sol est littéralement haché de failles et de fis-

sures espacées de quelques mètres qui découpent des lanières de basalte plus ou moins affaissées, en touches de piano. Parfois, de longues échines rocheuses restent en place, fragiles murs de basalte en équilibre précaire. Le fond de ces vallées peut constituer de véritables pièges à basalte. Les magmas émis au cours des fréquentes crises volcaniques s'accumulent, encore liquides, dans les creux du relief. Ils y

forment des lacs de lave dont le toit se solidifie rapidement sous la forme d'une couche de quelques centimètres d'épaisseur de verre basaltique. Si la vidange du lac intervient alors, le magma laisse der-

“ Tous les 150 millions d'années, le fond des océans est entièrement renouvelé. ”



Le tapis roulant du fond des océans. Sur cette coupe d'une dorsale océanique apparaissent des roches volcaniques en provenance du manteau avec ou sans stockage dans une chambre magmatique. Parmi les grandes unités de la lithosphère océanique, on distingue la couche basaltique, celle des gabbros et la couche de péridotites.

rière lui, sous ce toit fragile, un réseau de vastes cavités soutenues par des piliers de plusieurs mètres de hauteur. On pense que ces piliers se sont formés par refroidissement brutal du magma au contact de l'eau piégée sous la coulée et remontant rapidement par ces conduits. Ces paysages ont été découverts pour la première fois il y a moins de quinze ans seulement, lors de plongées françaises et américaines sur la dorsale Pacifique au large du Mexique. Ils étaient totalement insoupçonnés jusqu'alors.

Le lien a été fait immédiatement entre la vitesse d'ouverture et la morphologie des dorsales. La dorsale du Pacifique, rapide, présente un profil en dôme sur lequel peut apparaître un petit graben sommital. À l'inverse, la dorsale atlantique, lente, se caractérise par une très large vallée d'effondrement contenant la zone néo-volcanique constituée de petits volcans alignés.

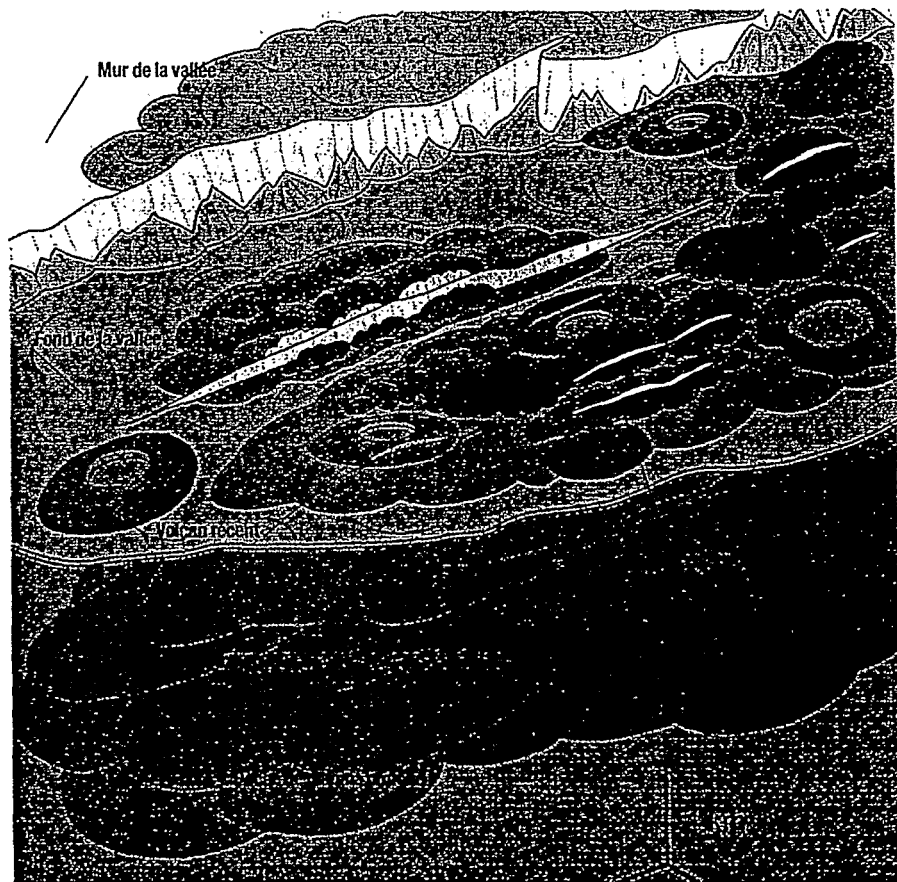
Une dorsale rapide « produit » plus de lave qu'une dorsale lente et l'on conçoit que la morphologie reflète l'abondance ou la maigreur des apports magmatiques. Toutefois, le profil de l'axe actif des dorsales n'est pas seulement une traduction directe d'un volume de roches mis en place. Une dorsale lente est aussi plus « froide » qu'une dorsale rapide. La quantité de chaleur qui monte du manteau est moins élevée à l'axe des dorsales lentes – sauf bien sûr si un point chaud est localisé sous l'axe, comme en Islande. Ceci a une conséquence importante sur la façon dont la limite des plaques va se comporter vis-à-vis de l'étirement. Les dorsales lentes se comportent de façon plus cassante, l'extension en réponse à l'écarte-

ment des plaques étant réalisée, en partie au moins, par le fonctionnement de grandes failles normales qui limitent le fossé. Bien des questions demeurent néanmoins et on comprend mal encore

comment une profonde vallée axiale peut demeurer en permanence, à place fixe et dans des dimensions plus ou moins constantes, dans un contexte d'ouverture océanique. Comment des roches produites dans la vallée axiale se retrouvent-elles au sommet des falaises qui surplombent le graben ? Ce débat fait l'objet de plusieurs hypothèses, dont les meilleurs arguments sont peut-être encore au fond des océans !

Les dorsales ont longtemps été considérées comme une chaîne continue, seulement interrompue de place en place par de grandes zones de fracture, et l'on pensait que les processus actifs (volcanisme, failles) étaient distribués de façon plus ou moins régulière sur de grandes distances le long de l'axe.

Les explorations de ces dix dernières années réalisées soit en submersible, soit à partir de navires de surface, ont permis de faire des progrès essentiels dans la connaissance des mécanismes de l'accrétion océanique. Une image remarquablement organisée de la morphologie des dorsales, et par ce biais, des processus actifs à l'axe, est ainsi apparue. Le long des dorsales du monde, quelle que soit la vitesse de l'ouverture, l'axe est divisé en une succession de segments élémen-



Structure de la vallée de la dorsale atlantique entre l'équateur et le sud des Açores. La vallée axiale est bordée par de puissantes falaises tandis que le fond est occupé par des volcans isolés, alignés le long des fractures du plancher océanique.



Tubes volcaniques mis en place au sommet d'un petit cône près de l'axe volcanique de la dorsale atlantique, photographiés par le Nautille lors de la mission VEMANAUTE en 1988.

taires de plusieurs dizaines de kilomètres de longueur. Ces segments sont décalés les uns des autres par des zones de relais ou des failles transformantes de longueur variée. Ils présentent le plus souvent une morphologie différente de celle des segments voisins.

Ainsi, comme nous l'avons évoqué ci-dessus, la dorsale Pacifique est en fait une suite de segments de 40 à 50 km de long en moyenne présentant soit un fossé central, soit un profil en dôme parfaitement lisse. Cette segmentation est aussi géochimique. La composition des laves émises le long de différents segments peut varier de façon significative. Ces différences morphologique et chimique ont pour origine une segmentation plus profonde, au niveau du manteau, dont les parties les plus chaudes remontent ponctuellement sous forme de « bulles », de diapirs, de plusieurs dizaines de kilomètres de large.

En Décembre 1993, le Nautille plongeait dans le Pacifique sud dans le but d'explorer précisément différents segments de la dorsale dans un secteur où l'ouverture est l'une des plus rapides du monde. L'expédition NAUDUR (Nautille Dorsale Ultra Rapide) nous a permis ainsi d'obtenir de façon très claire une vision détaillée de l'aspect de quatre segments successifs sur une distance, le long de l'axe, de 200 km environ. Dans le segment le plus au nord, la production magmatique est telle que le graben axial est absent. Nous avons pu observer des laves extrêmement fraîches, probablement mises en place quelques mois à quelques semaines auparavant. Plus au

sud, le segment étudié présente un fossé bien marqué, limité par des failles qui coupent à l'emporte-pièce des formations volcaniques plus anciennes, indiquant que l'étirement l'emporte sur les processus volcaniques. Plus au sud encore, nous avons pu observer, au fond du graben axial, le toit solidifié d'un lac de lave dont la mise en place était très récente, comme en témoignent les anomalies de température mesurées par le sous-marin : ici, sur ce dernier segment, une nouvelle crise volcanique succède à une période d'étirement tectonique.

Ainsi, la segmentation des dorsales n'est pas seulement une réalité topographique, elle traduit aussi l'existence d'une activité interne propre à chaque segment. Une des questions essentielles est maintenant de comprendre comment, à l'échelle d'un segment, s'effectue l'alternance entre un stade à volcanisme dominant et un stade à tectonique dominante. Un axe à section en dôme verra-t-il nécessairement, au cours de son évolution, un fossé s'ouvrir à son sommet ? Au bout de combien de temps ? A l'heure actuelle, grâce à ces études mettant en jeu des techniques variées, nous possédons des clés pour lire plus profondément sur les dorsales océaniques l'activité interne du manteau dans les trois dimensions de l'espace. La croûte et le manteau océaniques récemment mis en place et refroidis se comportent comme une couverture plus ou moins rigide et passive sur le manteau asthénosphérique plus chaud et plus mobile. Le modelé des dorsales reflète ainsi directement l'état du manteau sous-jacent. ■

Les contrainctions de l'exp. Le monde et Les par

SCIENCES Avenir

Evolution L'homme est-il le fruit du hasard?

SCIENCES Avenir

Le moral secours corps

SCIENCES Avenir

Les merveilles du monde

SCIENCES ET Avenir

chez vous chaque mois avec 35% de réduction

c'est l'assurance de

- Participer à la grande aventure de la connaissance scientifique
- Aborder dans les meilleures conditions les bouleversements de demain
- Se constituer une véritable encyclopédie scientifique qui s'enrichit et s'actualise à chaque numéro.

BULLETIN D'ABONNEMENT

A adresser à : SCIENCES ET Avenir - Abonnements
25, rue de Turbigo - 75002 PARIS

OUI, je désire m'abonner à Sciences et Avenir et bénéficier d'une remise de 35%.

Je coche ci-après la durée de mon choix

1 AN COMPLET (12 numéros + 6 Hors-série)
299 F au lieu de 462 F*
(Belgique : 2700 FB Etranger : 448 F)

1 AN SIMPLE (12 numéros)
195 F au lieu de 300 F*
(Belgique : 1734 FB Etranger : 289 F)

(TARIFS PAR AVION SUR DEMANDE)
* Prix de vente au numéro

Règlement par chèque bancaire ou postal à l'ordre de SCIENCES ET Avenir
(L'ÉCRIR EN CAPITALS S.V.P.)

NOM

PRENOM

ADRESSE COMPLETE

CODE POSTAL

PAYS