

Les fortifications de Nancy

Les remparts qui entouraient la ville avaient été oubliés. Ils ressurgissent au gré des chantiers de construction.

En 1990, des travaux sont entrepris en vue de l'extension du musée des beaux-arts de Nancy ; on découvre alors les vestiges particulièrement bien conservés d'une enceinte urbaine, oubliée depuis longtemps. Si la ville n'avait pas suscité un grand intérêt de la part des archéologues, car elle est de création récente, ces fouilles ont révélé les restes exceptionnels d'un bastion et d'une ceinture de pierre, démantelés au XVIII^e siècle.

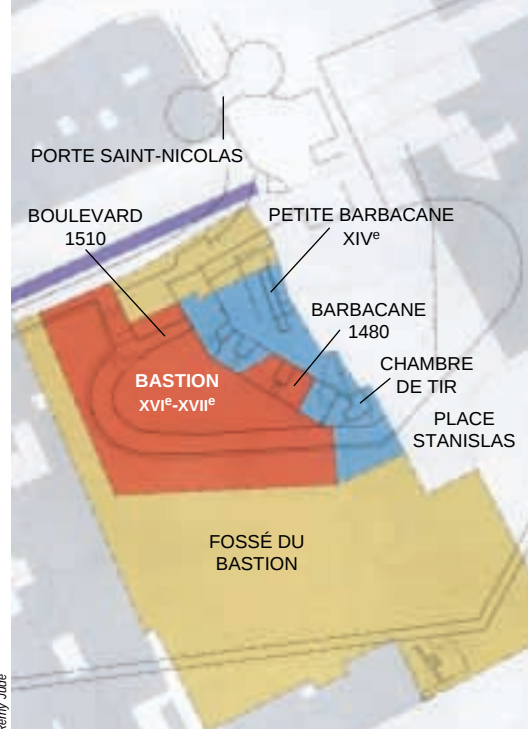
Les fouilles, commencées en 1990, ont été menées au cours de quatre campagnes. La mise au jour du bastion d'Haussonville, du nom du gouverneur de Nancy de 1560 à 1563, et le dégagement de son remparement ont révélé des ouvrages inconnus de l'historiographie nancéenne : une barbacane, c'est-à-dire un ouvrage de fortification avancé qui assure la défense d'une porte, datant des années 1480, et un boulevard d'artillerie, c'est-à-dire un ouvrage de fortification placé en avant d'une enceinte plus ancienne, construit en 1510. Les fouilles ont livré deux siècles d'architecture militaire, à quelques dizaines de mètres de la place Stanislas. L'étude de ces ouvrages et le dépouillement des archives ont renouvelé les connaissances sur la ville et sur ses fortifications. Les archéologues ont également découvert des objets qui, hormis quelques boulets de

pierre, ne sont pas liés à l'utilisation de la forteresse. Ce sont des objets de la vie quotidienne, jetés dans le fossé ou mêlés aux remblais : poterie culinaire, carreaux de poêles décorés, sifflets d'enfant, verrerie, objets métalliques tels épingles de vêtement, chaudron, cotte de maille, objets de cuir et morceaux de tissus. La plupart datent de la première moitié du XVI^e siècle.

Ces découvertes ont permis de retracer l'histoire de la ville. Au XII^e-XIII^e siècle, la porte Saint-Nicolas est élevée pour contrôler l'accès Sud de la cité. À la fin du XIV^e siècle, une barbacane est construite en avant de la porte et en renforce la défense. Vers 1480, le Duc de Lorraine René II (1473-1508) conforte le système défensif de la ville. La barbacane Saint-Nicolas est construite autour de celle du XIV^e siècle. Les fouilles ont révélé un ouvrage conservé sur 3,5 mètres de hauteur, qui atteignait sans doute 7 mètres à l'origine. Ses murs ont 6 mètres d'épaisseur et résistaient aux armes les plus puissantes de l'époque. Des chambres de guet et de tir y avaient été aménagées. Vers 1500-1510, la barbacane Saint-Nicolas est remaniée pour s'adapter aux progrès de l'artillerie.

Les boulevards d'artillerie qui doivent amortir l'impact des projectiles se caractérisent par un remplissage de terre ou par une maçonnerie épaisse. Ils ont été construits lorsque la poudre a commencé à être utilisée dans l'armement, au XIV^e siècle. Puis, les Nancéens ont adapté leur hauteur et leur forme à l'évolution de l'artillerie. Un fossé aménagé devant l'ouvrage complète le système défensif. Un enclos de bois y a été découvert : c'était peut-être une citerne ou un vivier qui, dès le milieu du XVI^e siècle, fut utilisé comme dépotoir.

Vers 1560, l'ensemble barbacane-boulevards a été englobé par la construction



Au cours des quatre campagnes de fouilles faites à Nancy depuis 1990 (la première en rouge, la deuxième en bleu, la troisième en violet et la quatrième en jaune), les vestiges du système défensif de la porte Saint-Nicolas ont été mis au jour.

du bastion d'Haussonville. Vers 1515, le bastion remplace la tour dans la défense des places fortes en Europe. Saillant sur l'enceinte, il a une base polygonale. Il est introduit dans le duché de Lorraine vers 1540 par les ingénieurs fortificateurs italiens. La ville s'étend au Sud-Est et on doit la défendre. Sur les conseils de l'Italien Antoine de Bergame, la duchesse de Lorraine Chrétienne de Danemark opte pour les bastions. L'ingénieur fait élever le bastion d'Haussonville et celui de Vaudémont. Seule la partie Ouest du bastion d'Haussonville a été mise au jour. Le soubassement est constitué de blocs de pierres surmontés de briques. Sur toute la hauteur du parement en briques, des chaînages verticaux renforcent l'ensemble.

En 1661, l'ensemble du front bastionné est démantelé sur ordre du roi de France, qui voyait dans cette construction prestigieuse une menace pour son pouvoir. Dix ans plus tard, lors des guerres de Hollande, le front est reconstruit, par Vauban, sur les parties du soubassement encore en place. Après reconstruction, le bastion d'Haussonville s'élève à 17 mètres de hauteur, alors qu'il n'en faisait que 14 avant sa démolition, en 1661 ; les vestiges mis au jour mesurent cinq mètres environ. L'ensemble sera ensuite progressivement démantelé lorsque la ville s'agrandira. Le front bastionné qui entourait Nancy est aujourd'hui au cœur de la cité qui, en le mettant au jour, a rouvert le livre de son histoire.

René ELTER – AFAN, Nancy



Vue du chantier archéologique du musée des Beaux-arts de Nancy, à proximité de la place Stanislas.

Sismique et tectonique

MAURICE MATTAUER

Grâce à la tomographie sismique, les géologues retracent l'enfoncement des plaques dans le manteau et réanalysent la formation des montagnes. La dynamique de l'écorce terrestre est expliquée par celle du manteau.



Née il y a 30 ans, la tectonique des plaques a restructuré notre connaissance de la dynamique du Globe. Selon cette vision, les plaques se déplacent les unes par rapport aux autres à des vitesses de quelques centimètres par an. De leur écartement naissent les océans, de leur collision, les montagnes.

Au voisinage des rides océaniques, zones de divergence des plaques, la vitesse d'écartement peut atteindre 15 centimètres par an, c'est-à-dire 1 500 kilomètres en seulement dix millions d'années. Lorsque les plaques se rapprochent et s'affrontent, l'une finit par passer sous l'autre. Le phénomène est appelé subduction, et la compression des plaques plisse la croûte terrestre pour former les chaînes de montagnes à proximité de la zone de subduction.

Les zones de subduction les plus nombreuses correspondent à l'enfon-

cement d'une plaque océanique sous une autre ; la vitesse de cet enfouissement atteint dix centimètres par an. Plus rarement, la zone de subduction est le siège de l'enfoncement d'une plaque continentale. La vitesse est alors inférieure à cinq centimètres par an.

La surface des océans augmente actuellement, le long des rides océaniques, d'environ trois kilomètres carrés par an. Comme la surface de la Terre est constante, cette augmentation est nécessairement compensée par l'enfoncement, dans les zones de subduction du manteau, d'une surface de plaques comparable. Une question se pose naturellement : jusqu'à quelle profondeur les plaques plongent-elles dans le manteau ? Nous verrons que les interprétations récentes des variations de vitesse des ondes sismiques ont bouleversé les hypothèses antérieures. Les géologues savent visualiser l'enfoncement des plaques qui plongent plus profondément qu'ils ne le croyaient.

Le lent ballet des plaques à la surface de la Terre est géométriquement simple : les déplacements horizontaux des plaques imposent les enfoncements de plaques froides dans

le manteau, ce qui est compensé par la montée de matériel chaud arrivant dans l'axe des rides océaniques. Pour expliquer ces déplacements, on invoqua, dès le début, des courants de convection. La chaleur issue de l'intérieur de la Terre remontait en surface comme dans un liquide, par des courants de convection en boucle. Des difficultés apparurent dès que l'on chercha à déterminer la taille des cellules de convection.

En cartographiant les emplacements des épicentres des tremblements de terre qui soulignent toutes les zones de subduction, les géologues pensèrent que les plaques s'enfonçaient dans les entrailles de la Terre de quelques centaines de kilomètres seulement, la valeur limite de 600 à 700 kilomètres n'étant atteinte qu'exceptionnellement. On interpréta ces valeurs assez faibles (par rapport aux déplacements horizontaux des plaques) en supposant que les plaques lithosphériques plongeantes perdaient peu à peu leur rigidité en raison de l'augmentation de la température et de la pression avec la profondeur : trop molles,

1. MASSIF DE L'HIMALAYA AU NORD DE L'INDE. Ces montagnes résultent de la collision de la péninsule indienne avec le continent asiatique. La subduction de la plaque indienne qui s'enfonce dans le manteau a été reconstituée par tomographie.

les plaques plongeantes ne s'enfonçaient plus profond.

On essaya alors d'imaginer ce qui se passait à plus grande profondeur, et ce jusqu'à la base du manteau, située à 2 900 kilomètres de profondeur. Pendant plus de 20 ans, les modèles fleurirent. Pour simplifier à l'extrême, les discussions ont longtemps oscillé entre deux modèles extrêmes. Au début de la tectonique des plaques, on privilégia un modèle à deux couches, caractérisé par une couche supérieure, n'ayant que 600 kilomètres d'épaisseur, et une couche inférieure très épaisse. On supposa que les plaques étaient entraînées par les courants de matière situés à la partie supérieure des petites cellules de convection du manteau supérieur. Dans cette configuration, le manteau inférieur était animé par des cellules de convection beaucoup plus grandes, les deux systèmes étant plus ou moins indépendants. Cette interprétation était compatible avec les changements de rhéologie du manteau qui se produisent théoriquement à 410 et à 660 kilomètres de profondeur. À cette profondeur, sous l'effet des augmentations de pression et de température, la structure cristalline des roches est modifiée : l'olivine se transforme en spinelle, puis en pérovskite.

Ce modèle à deux couches est aujourd'hui remplacé par un modèle à une couche, où les plaques descendent à grande profondeur, parfois à 2 900 kilomètres, jusqu'à la base du manteau. La figure 2 montre les conséquences de ce nouveau modèle sur la tectonique des plaques. La dynamique des plaques n'est plus confinée à un système superficiel limité au manteau supérieur ; elle est désormais partie intégrante de la dynamique du manteau terrestre tout entier. Les plaques en mouvement à la surface de la planète correspondent, en définitive, à la partie visible des grands mouvements de matière qui animent le manteau. C'est, pour la géologie, une révolution : comme l'avait pressenti le fabuliste Jean de La Fontaine, «C'est le fond qui manque le moins».

La tomographie sismique du manteau

Les affirmations précédentes sont étayées par la tomographie sismique. L'intérieur du globe est inatteignable par l'exploration directe, mais sa structure est reconstituée par les mesures

des vitesses de propagation des ondes sismiques, lesquelles dépendent de la nature, de la structure et de la température des roches qui s'y trouvent.

Le principe de la tomographie sismique est analogue à celui de la tomographie médicale. Au lieu de rayons X, les géologues utilisent, pour étudier la nature des constituants de la terre, les ondes sismiques élastiques, résultant de tremblements de terre importants. Ces ondes traversent la Terre et ralentissent ou accélèrent en profondeur. En mesurant les temps de propagation de l'onde entre l'épicentre du séisme et diverses stations sur le globe terrestre, on en déduit les variations de vitesses sismiques associées. Celles-ci sont dues à des différences de température du manteau ou à des changements de composition, que l'on sait identifier. Cette tomographie permet de reconstituer la structure des roches traversées par les ondes sismiques.

Les résultats sur la constitution du manteau ont été obtenus grâce au traitement d'un nombre extraordinaire de données. Harman Bigward et ses collègues se sont en effet servi des ondes émises par 82 000 séismes, bien localisés, qui se sont produits sur toute la surface du Globe entre 1964 et 1995, et qui ont été enregistrés dans tous les observatoires existants. Ces chercheurs ont traité plusieurs millions de données avec des ordinateurs extraordinairement puissants. Comme les ondes se propagent lentement dans les zones chaudes et plus rapidement dans les zones froides, on sait reconstruire un modèle tridimensionnel des variations de structure du manteau. Elles sont visualisées sur des coupes verticales ou sur des cartes établies à différentes profondeurs. Certaines de ces données sont accessibles sur Internet.

La figure 3, obtenue par Stephen Grand détaille comment on a réussi à trouver la trace des plaques dans le manteau. Les couleurs indiquent les variations de vitesse des ondes sismiques par rapport à une valeur moyenne.

La bande bleue qui descend obliquement jusqu'à 2 700 kilomètres de profondeur correspond à une zone froide. On pense qu'il s'agit de la trace laissée par une plaque froide qui s'est enfoncée dans une ancienne zone de subduction. Les matériaux de la plaque se sont beaucoup réchauffés depuis, mais ils se signalent encore, soit par une anomalie thermique, soit par une composition différente.

Cette interprétation fut d'abord mise en doute en raison des écarts de vitesse utilisés, qui étaient jugés trop petits pour être significatifs. Elle est maintenant adoptée, en partie grâce à une argumentation géologique toute simple : la subduction proposée par la tomographie se trouve exactement là où l'on pensait ; les études de surface ont en effet montré que des milliers de kilomètres de plaques océaniques du Pacifique se sont enfoncés sous le continent Nord-américain depuis plus de 150 millions d'années. Comme deux arguments indépendants vont dans le même sens, l'interprétation proposée est adoptée.

Ce type de raisonnement a été simultanément appliqué à toute la planète, et l'on a découvert la trace d'une multitude d'anciennes plaques enfoncées tout autour du Pacifique, depuis la Méditerranée jusqu'en Indonésie. La surface totale de toutes ces plaques retrouvées correspond probablement, et malgré les incertitudes, à plus de 50 millions de kilomètres carrés (100 fois la France!).

Tomographie et paléogéographie

On est désormais capable de reconstituer assez bien les modifications qui se sont produites à la surface de la planète depuis 150 millions d'années. Pour chaque époque, on sait où se trouvaient les grands continents et quelle était la forme des océans. On sait aussi à peu près où s'enfonçaient les grandes subductions océaniques autour du Pacifique et sur le bord Sud de l'Eurasie. Dans ces conditions, lorsque l'enfoncement d'un océan s'est produit pendant une longue période, on a une idée de la longueur de plaque enfoncée et de son âge. C'est ainsi que Stephen Grand a proposé que l'extrémité de la plaque Pacifique enfoncée sous l'Amérique du Nord était âgée d'environ 100 millions d'années. La géométrie de la plaque plongeante n'est, hélas pour l'entendement, pas toujours aussi simple. Il arrive que la plaque s'interrompe et soit relayée à plus grande profondeur par une plaque plus ancienne, dont l'origine reste incertaine. Enfin, lorsque plusieurs subductions se sont succédées sans avoir fonctionné longtemps, l'interprétation devient difficile.

Une toute nouvelle spécialité est née : elle consiste à repérer les plus importants tronçons de plaques enfoncées, à essayer d'avoir une idée de leur âge et à les raccorder aux grands déplacements

de plaques. Cet aspect de la tectonique des plaques, qui concerne des milliers de kilomètres de plaques perdues dans le manteau, est tout à fait nouveau.

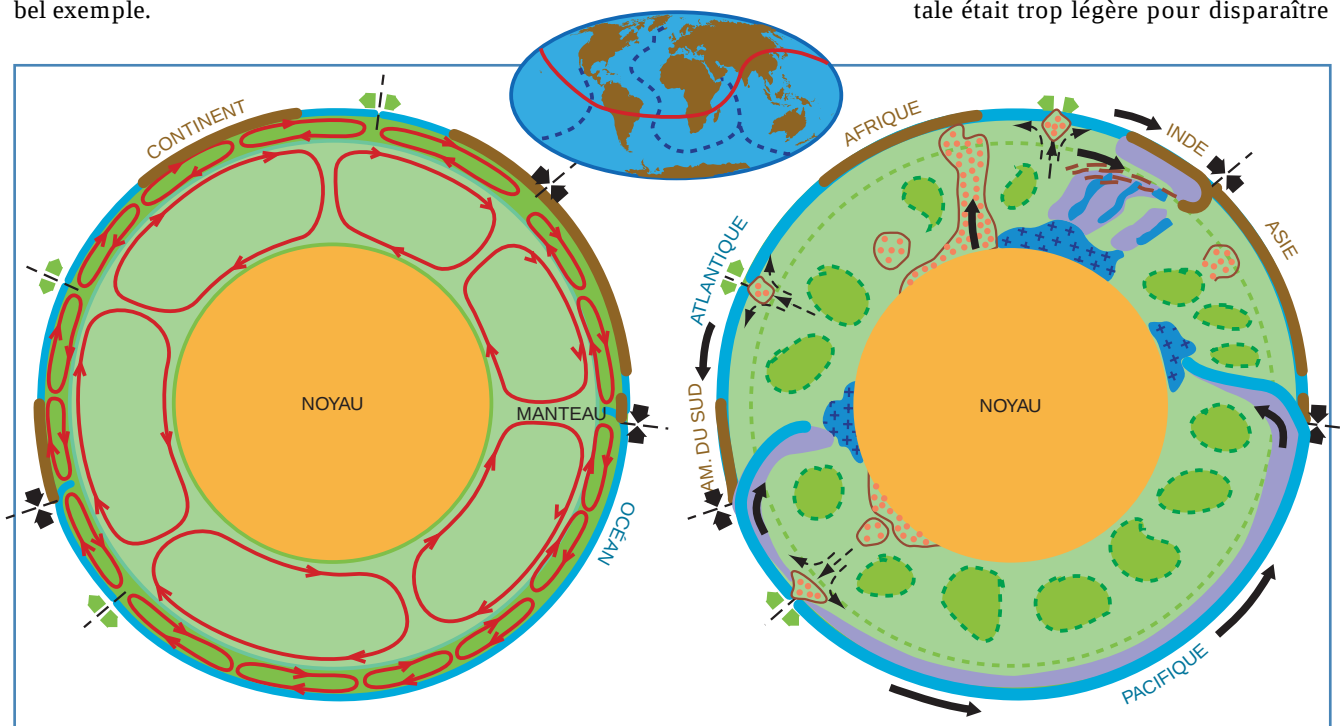
La prospection a commencé : la récente découverte de vieilles plaques océaniques, âgées de 150 millions d'années (Jurassique), qui se trouvent actuellement sous la Sibérie, en est un très bel exemple.

Tomographie et collision

La tomographie ayant montré que l'enfoncement de la lithosphère océanique est un phénomène majeur de la dynamique du manteau, on peut se demander ce qu'elle apporte sur le mécanisme de la collision, lorsque deux plaques

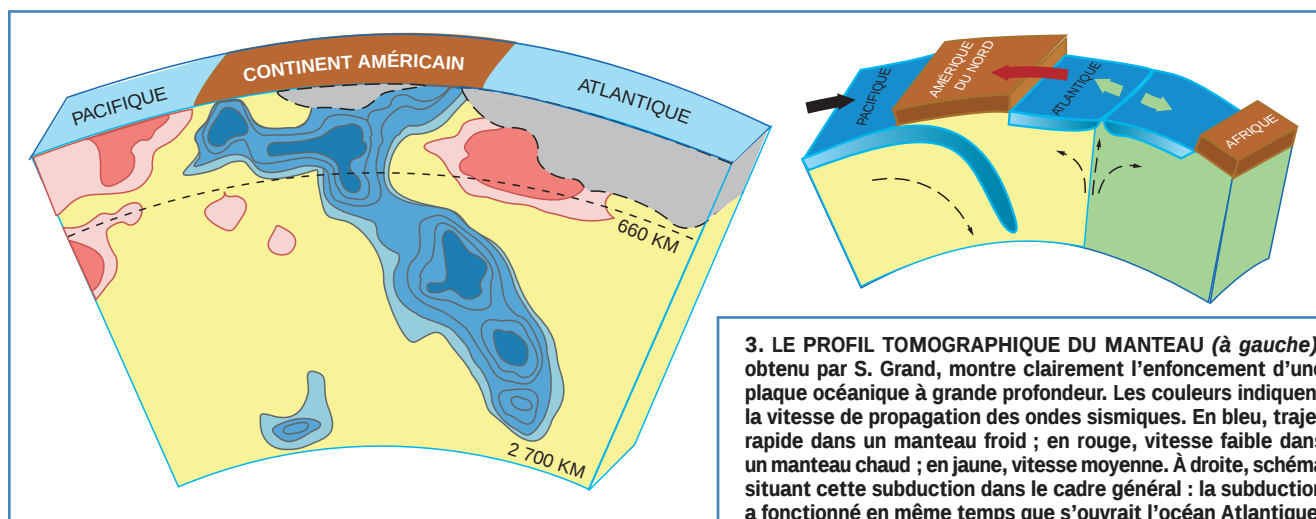
continentales s'affrontent et forment des chaînes de montagnes.

La question est importante, car la tectonique des plaques est née il y a 30 ans avec une règle (théorique) très simple : on pensait que l'arrivée d'un continent dans une zone de subduction bloquait le processus de convergence à cet endroit et que la croûte continentale était trop légère pour disparaître

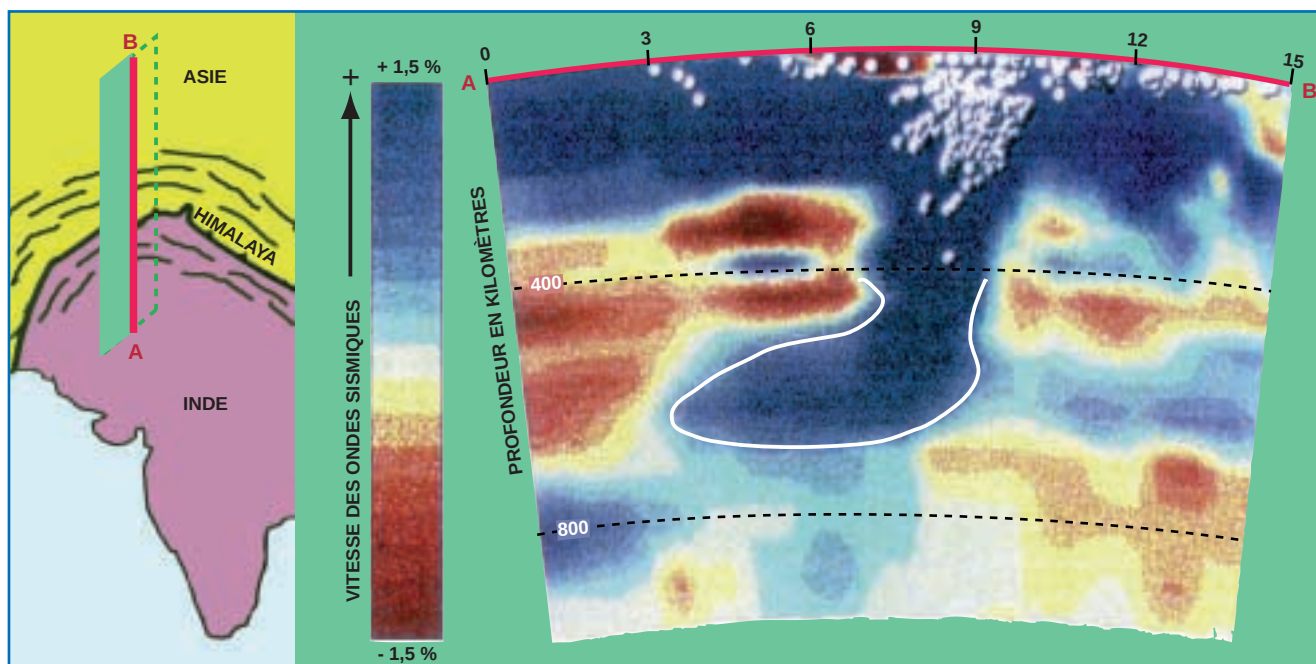


2. LA NOUVELLE STRUCTURE DU MANTEAU. Dans une des premières interprétations de la structure du manteau (à gauche), celui-ci était partagé en deux parties, avec des cellules de convection séparées dont la géométrie ne s'appuyait pas sur des observations. À droite, on a schématisé les conséquences de la tomographie sismique sur la tectonique des plaques. Les plaques océaniques sont en bleu, les plaques continentales en brun. On a localisé les zones d'écartement situées dans les rides océaniques et les zones comprimées correspondant aux chaînes de montagnes. Notez la grande simplicité des subductions océaniques, qui ont probablement été à l'origine des « cimetières de plaques » (croix sur fond bleu) qui se trouvent à la base du manteau ; on remarque la com-

plexité de la subduction continentale de l'Inde avec des tronçons de plaques océaniques bousculés et probablement renversés par l'avancée actuelle de l'Inde ; la couleur violette, située sous les plaques plongeantes est destinée à donner une idée de la véritable épaisseur du manteau en mouvement. On a représenté quelques zones chaudes (sphérules orange) ; celle située sous l'Afrique s'enracine à la limite du noyau. À l'écart des grands enfoncements de plaques, le manteau est probablement animé par des cellules convectives, mais aucun accord n'est encore réalisé sur leur géométrie. Un modèle récent propose l'existence d'un grand nombre de bulles (esquissées en pointillés verts sur la figure), lesquelles constitueraient le cœur des cellules de convection.



3. LE PROFIL TOMOGRAPHIQUE DU MANTEAU (à gauche), obtenu par S. Grand, montre clairement l'enfoncement d'une plaque océanique à grande profondeur. Les couleurs indiquent la vitesse de propagation des ondes sismiques. En bleu, trajet rapide dans un manteau froid ; en rouge, vitesse faible dans un manteau chaud ; en jaune, vitesse moyenne. À droite, schéma situant cette subduction dans le cadre général : la subduction a fonctionné en même temps que s'ouvrait l'océan Atlantique.



4. PROFIL TOMOGRAPHIQUE perpendiculaire à la partie Ouest de la chaîne himalayenne, montrant l'enfoncement de la plaque continentale de l'Inde. Cette figure de Harmen Bijwaard, est reproduite avec l'autorisation des auteurs. Cette coupe relativement superficielle a été complétée, vers le bas, jusqu'à plus de 2 000 kilomètres, par Van der Voo et al., 1999. Les taches blanches correspondent aux épicentres des gros séismes qui se sont produits depuis 40 ans dans la croûte terrestre, en réponse à l'avancée de l'Inde.

cielle a été complétée, vers le bas, jusqu'à plus de 2 000 kilomètres, par Van der Voo et al., 1999. Les taches blanches correspondent aux épicentres des gros séismes qui se sont produits depuis 40 ans dans la croûte terrestre, en réponse à l'avancée de l'Inde.

dans l'asthénosphère. Aussi les géologues pensaient-ils que les continents restaient en surface.

Cette règle a souvent été mise en doute, mais beaucoup continuent de l'utiliser. La tomographie vient d'apporter, là aussi, des données nouvelles dans la chaîne de l'Himalaya, qui est née de la collision entre l'Inde et l'Asie. On sait que là, le système ne s'est pas bloqué, car la collision s'est produite il y a 50 millions d'années, et l'avancée de l'Inde continue toujours après avoir fait surgir, outre l'Himalaya, le Pamir, le Kunlun, le Qilian Shan, le Tien-Shan...

Dans la partie Ouest de l'Himalaya, au Pakistan, la tomographie montre que la plaque indienne s'enfonce en profondeur, mais avec la géométrie représentée sur la figure 2. Dans la partie Nord de l'Inde et dans la chaîne de l'Himalaya, la géologie de surface et la distribution des séismes soulignent bien le plongement vers le Nord de la plaque indienne. Puis celle-ci se verticalise et finit par se renverser : près de 1 000 kilomètres de plaque continentale apparaissent dans le manteau...

Il s'agit là du premier exemple connu de subduction continentale, qui démontre que la vieille règle de la tectonique des plaques doit être abandonnée, et qui réhabilite, bien tard, une interprétation, il est vrai moins compliquée, proposée en 1927 par Émile Argand, dans *La tectonique de l'Asie*.

La dynamique de la subduction s'est ici modifiée au cours du temps. Des milliers de kilomètres de plaques océaniques se sont d'abord enfoncés selon le mode classique. La plaque continentale a suivi le mouvement, mais le système a dû se modifier progressivement pour aboutir, au bout de 50 millions d'années, à une situation actuelle originale. Le manteau supérieur s'est avancé vers le Nord, sur plus de 1 000 kilomètres, en bousculant et en renversant les plaques océaniques qui s'étaient enfoncées avant la collision.

Une véritable mégatectonique est en train de naître ; celle-ci envisage les phénomènes à l'échelle de plusieurs

milliers de kilomètres, aussi bien horizontalement que verticalement. On ne se contente plus d'étudier les « limites » de plaques, qu'elles soient convergentes ou divergentes. On aborde enfin les mécanismes à l'échelle de la planète... Et l'on voit déjà apparaître de grandes provinces caractérisées par des styles mégatectoniques différents. Bien que la subduction océanique intervienne dans les deux cas, la chaîne des Andes se distingue des cordillères Nord-américaines, et la subduction continentale de la plaque indienne est associée à une signature profonde tout à fait particulière et à de grands couissements des plaques dans le manteau.

La découverte de vieilles plaques au sein du manteau profond est toute récente. Les premiers chercheurs qui en ont fait état sont Stephen Grandt et ses collègues de l'Université du Texas, Rob Van der Hilst du MIT, Sri Widiyantoro, de l'Université de Canberra, Harmen Bijwaard et Win Sjakman, de l'Université d'Utrecht, avec Robert Engdahl, du Geological Survey à Denver, et Rob van der Voo, de l'Université du Michigan.

Maurice MATTAEU est professeur de géologie à l'Université de Montpellier.

H.C. NATAF, *Les entrailles de la Terre*, in *Revue du Palais de la découverte*, pp. 11-21, 1996.

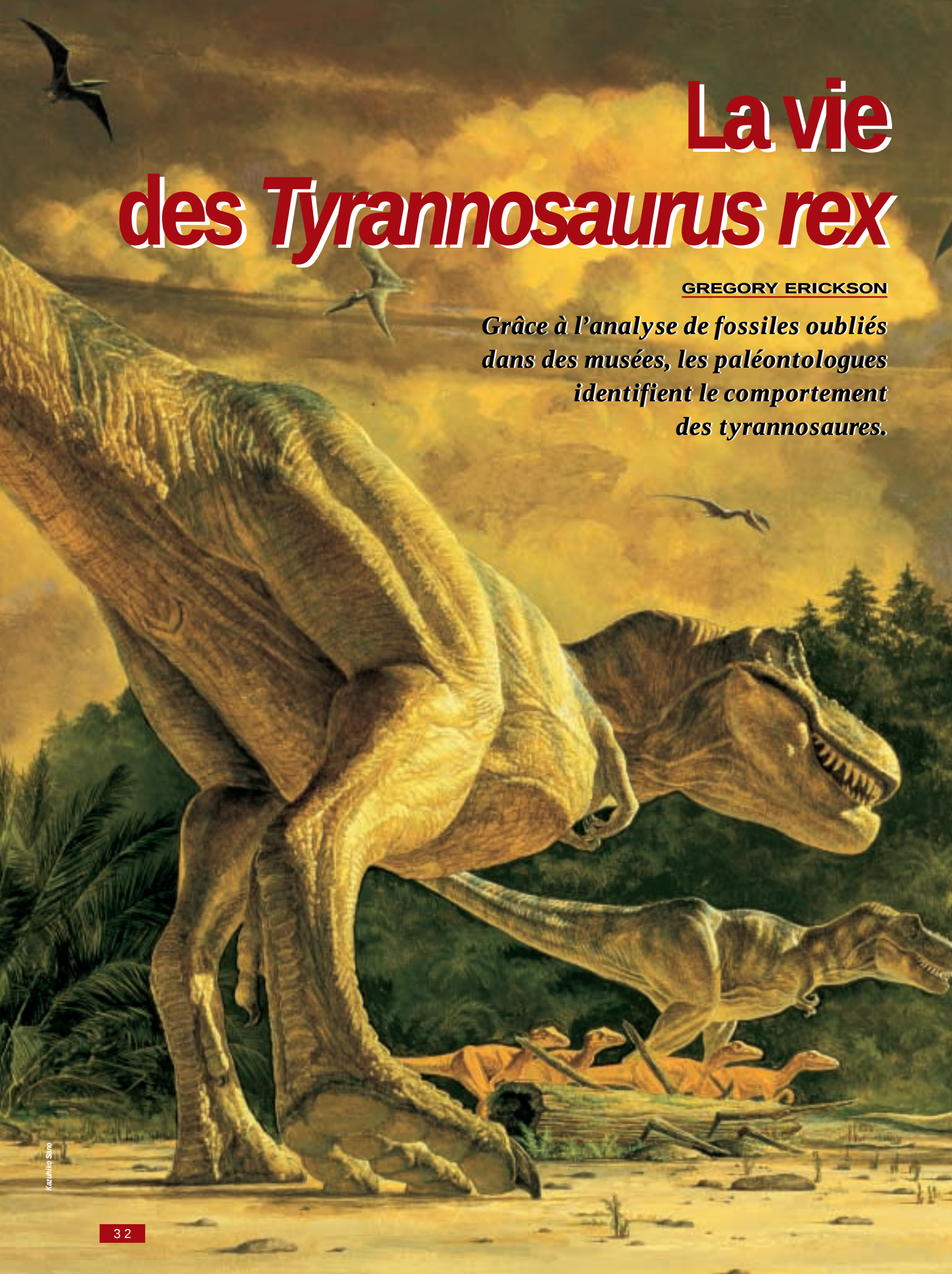
S. GRANDT et al, *Global Seismic Tomography : a Snapshot of Convection in the Earth*, in *GSA Today*, pp. 1-7, avril 1997.

R. VAN DER HILST et al, *Evidence for Deep Mantle Circulation from Global Tomography*, in *Nature*, vol. 386, pp. 578-584, avril 1997.

H. BIJWAARD et al., *Closing the Gap between Regional and Global Travel Time Tomography*, in *Journ. Geoph. Res.*, vol. 103, pp. 30055-30078, décembre 1998.

R. VAN DER VOO et al, *Tethyan Subducted Slabs under India*, in *Earth Plan. Sc. Lett.*, vol. 171, pp. 7-20, août 1999.

R. VAN DER VOO et al, *Mesozoic Subducted Slabs under Siberia*, in *Nature*, vol. 397, pp. 246-249, 29 janvier 1999.



La vie des *Tyrannosaurus rex*

GREGORY ERICKSON

*Grâce à l'analyse de fossiles oubliés
dans des musées, les paléontologues
identifient le comportement
des tyrannosaures.*