

## la Terre solide

### *Des continents à la dérive*

---

Xavier LE PICHON \*

*"C'est une révolte ? Non, Sire, c'est une révolution"*. Cet échange, dit-on, se serait produit entre Louis XVI et l'un de ses ministres après la prise de la Bastille. Il arrive ainsi que dans nos disciplines scientifiques, l'introduction de nouveaux concepts ou de nouvelles méthodes de mesure produisent une véritable commotion. Nous sommes alors amenés à nous poser la question : *"Bourrasque sans conséquence profonde ou véritable révolution ?"*.

Nous sommes maintenant sûrs que dans les années 60, les sciences de la Terre ont vécu une véritable révolution, passant d'un modèle où dominaient les mouvements verticaux à celui d'une planète formée d'un petit nombre de plaques indéformables, sauf sur leurs bordures, et qui se déplacent les unes par rapport aux autres à des vitesses de l'ordre de quelques centimètres par an, soit quelques dizaines de kilomètres par million d'années. Ainsi, l'unique continent Pangée qui existait il y a 200 millions d'années a-t-il pu donner naissance aux continents dispersés actuels, comme le proposait déjà Wegener au début du siècle.

---

\* Texte paru dans la revue "Ciel et Espace", numéro hors-série mars-avril-mai 1992

## X. LE PICHON

Dans notre modèle de la Terre, pourquoi a-t-il fallu attendre soixante ans pour introduire le concept de dérive des continents proposé par Wegener ? Au début du siècle, il n'existait pas de méthode efficace pour mesurer les mouvements continentaux. Le concept n'était donc pas testable. Dans les années 60, au contraire, la mesure de ces déplacements devint possible et la tectonique des plaques montra que ceux-ci s'intégraient dans un système cohérent à l'échelle du globe, rendant compte des déformations actuelles et des séismes qui leur sont liés.

Le modèle global de déplacement des grandes plaques à la surface de la Terre proposé en 1968 était toutefois dépendant d'hypothèses très restrictives. Les plaques sont indéformables, sauf sur leurs frontières. La Terre ne change pas de volume. Les mouvements n'ont pas été affectés par des accélérations significatives au cours des dix derniers millions d'années. Aussi, en effectuant le premier calcul global, je pensais que celui-ci fournirait, au mieux, une première approximation d'une réalité nécessairement plus complexe.

Pour calculer par exemple que Hawaï se rapprochait de Tokyo de 8 cm par an en moyenne depuis dix millions d'années, mes données de base furent les taux moyens de formation de nouvelle croûte à l'axe des rifts au milieu des océans. Je fis la somme des mouvements d'écartement autour de la Terre, en supposant son volume constant et en admettant que le raccourcissement correspondant se fait dans la fosse du Japon par plongement de la croûte océanique sous sa marge. J'ignorai les déformations internes aux plaques, en particulier au sein des continents. J'ignorai les modifications éventuelles des mouvements au cours des dix derniers millions d'années !

La vraisemblance du résultat était indiquée par son accord avec les directions de mouvements détectées lors de la rupture des grands séismes et par la cohérence d'ensemble du modèle global qui lui valut son prodigieux succès. Mais il paraissait bien audacieux d'en déduire la vitesse actuelle des plaques avec une précision raisonnable. D'ailleurs, les mouvements étaient-ils continus ? N'y avait-il pas des accélérations brutales lorsqu'une frontière se rompait durant une série de grands séismes ?

Ce fut donc une grande surprise lorsqu'en 1985, la mesure directe du rapprochement entre Hawaï et le Japon, utilisant les méthodes de la géodésie spatiale, obtint

le même résultat, aux erreurs de mesure près. Le mouvement moyen sur deux ans était le même que le mouvement moyen sur dix millions d'années. Les hypothèses étaient vérifiées au-delà de toute espérance. Les plaques sont de fait des coquilles indéformables alors qu'elles ne mesurent que 100 km d'épaisseur pour des milliers de kilomètres de largeur. Leurs accélérations sur dix millions d'années sont négligeables. Les mouvements sont donc constants sur cette durée. Et l'équivalence entre surface créée à l'axe des dorsales océaniques et surface détruite dans les grandes fosses océaniques et les chaînes de montagnes est bonne : la Terre ne gonfle pas, mais elle ne rétrécit pas non plus.

Grâce à la géodésie spatiale, on peut maintenant, pour un coût raisonnable, déterminer la position absolue d'un point à mieux qu'un centimètre près avec deux méthodes lourdes : l'interférométrie à très longue base (VLBI) et la mesure de distance à un satellite par laser (SLR). On peut surtout à faible coût mesurer une distance entre deux points avec une précision supérieure à  $10^{-8}$  (1 cm pour 1.000 km) en utilisant une méthode légère, le Système de positionnement global (GPS) de la marine américaine. Ce système militaire, utilisé en particulier pendant la guerre du Golfe, fournit quasi-instantanément une position avec une précision d'une dizaine de mètres. En effectuant des mesures plus élaborées, et des calculs assez compliqués, il donne la distance entre deux stations avec la précision relative indiquée plus haut. Les instruments de mesure sont peu volumineux ; leur coût les met à la portée des laboratoires scientifiques. Il devient possible de mesurer assez facilement la position de n'importe quel point à la surface des continents avec une précision du centimètre. En répétant cette mesure deux ou trois ans plus tard, on obtient avec une bonne précision le déplacement relatif du point en question. En s'appuyant enfin sur des réseaux de stations VLBI et SLR, on peut intégrer ces mesures relatives dans un cadre absolu.

Les mesures de déplacement moyen n'étaient possibles qu'au fond des océans, de part et d'autre des dorsales, en les moyennant sur quelques millions d'années. Elles peuvent à présent s'effectuer n'importe où à la surface des continents, et sur quelques années. Il s'agit d'un renversement complet qui ramène l'intérêt scientifique des océans aux continents, dont la tectonique est plus complexe et dont l'évolution concerne au plus haut point toutes les sociétés. Nous n'avons plus besoin de supposer que les plaques sont rigides ni que leur mouvement est permanent car nous pouvons mesurer partout, à tout instant, les déformations continentales.

## X. LE PICHON

Dès aujourd'hui, les résultats obtenus nous fournissent avec une bonne précision les mouvements des grandes plaques. Lorsque ces mesures sont faites à une distance suffisante des frontières de plaques, elles confirment les modèles globaux établis à partir des mesures océaniques. Dans les dix années à venir, nous aurons bien sûr raffiné ce modèle global. Mais nous aurons surtout obtenu le détail des déformations, principalement élastiques, qui se produisent aux frontières de plaques, et donnent naissance aux tremblements de terre. Nous pourrons donc enfin aborder de manière satisfaisante la compréhension du mécanisme de rupture du séisme en combinant mesures géodésiques et mesures sismiques en un modèle mécanique. Nous pouvons donc envisager à court terme la surveillance systématique des zones à haut risque. C'est ce que pourrait faire par exemple le système Doris que vient de mettre au point le CNES, le Centre National d'Etudes Spatiales français.

Enfin, nous obtiendrons une vision claire de la déformation dans les zones tectoniques complexes : zone alpine et méditerranéenne où s'affrontent Afrique et Europe ; zone continentale d'Asie orientale où l'Inde poinçonne l'Asie, fait surgir Himalaya et Tibet et fragmente la Chine ; l'Insulinde enfin où Asie, Pacifique et Australie écrasent et déforment l'inextricable chapelet d'îles et de bassins océaniques.

Un résultat très important semble déjà se dégager. C'est l'existence d'une séparation nette entre mouvements permanents transitoires à l'échelle de quelques centaines d'années tout au plus. Nous pouvons donc prendre comme champ régional de base ce champ de vitesses permanent qui est celui des grandes plaques, dans leurs portions internes stables, mais qui correspond à un champ plus complexe, encore mal connu, dans les grandes zones sismiquement actives. Connaissant le champ régional, nous pouvons nous intéresser à l'étude de l'évolution des anomalies transitoires, principalement liées aux déformations élastiques à l'origine des séismes.

Il s'agit donc bien d'une révolution qui prolonge et amplifie celle de la tectonique des plaques. Cette dernière, il y a vingt-cinq ans, réconciliait tectonique et sismologie. Nous avons du mal à prendre conscience du fait qu'avant 1968, l'étude des séismes et celle de la tectonique étaient complètement séparées. Or la tectonique, qui fabrique les chaînes de montagnes, le fait par une sommation de ruptures successives que la sismologie nous permet d'étudier. L'étude des séismes revient donc à celle de la tectonique instantanée ! Aujourd'hui, la géodésie spatiale réconcilie la géodésie avec

la sismologie en fournissant la description du champ de déformations qui va donner naissance à la rupture sismique. La modélisation du phénomène très complexe et probablement chaotique de la rupture peut être entreprise sur des bases solides. Le géodésien découvre la sismologie et le sismologue ne peut plus se passer de la géodésie. Tous deux, de plus en plus, doivent faire appel à la mécanique pour rendre compte des phénomènes qu'ils observent et mesurent.

Tous deux doivent se tourner vers la tectonique pour comprendre comment la déformation récente s'intègre dans le temps et donne naissance aux structures décrites de manière de plus en plus quantitative par le tectonicien. De la déformation instantanée à la déformation finie, de la sismologie à la géodésie jusqu'à la tectonique, l'unité est enfin établie. Le phénomène peut être considéré dans toutes ses dimensions spatiales et temporelles. Nous entrons dans l'âge d'or de la géodynamique. Encore faut-il que les spécialistes que nous formons possèdent la capacité de profiter de cette révolution ! La solution passe sans aucun doute par la création d'équipes pluridisciplinaires. A quand la formation des tecto-sismo-géodésiens ?

**Xavier LE PICHON**  
Professeur au Collège de France