

Rev. Sc. Nat. Soc. Art. N° 27
Helvétique - Bâle 1970 Contribution COB N° 26

La tectonique des plaques

XAVIER LE PICHON
Centre Océanologique de Bretagne, BP 337 Brest

Résumé

— *La tectonique des plaques admet que les zones orogéniques, où se dissipe l'essentiel de l'énergie mécanique, sont les zones où des mouvements horizontaux différentiels entre plaques lithosphériques rigides se produisent. Le succès de l'hypothèse dépend du fait que les déformations aiséismiques à l'intérieur des plaques sont beaucoup plus faibles que les mouvements le long des zones sismiques. La rigidité des plaques permet donc de traiter de leur cinématique de manière rigoureuse.*

Ce modèle quantitatif de l'évolution de la terre amène une véritable révolution des sciences de la terre. Il conduit à une série de nouvelles démarches et recherches scientifiques s'appuyant sur l'ensemble des disciplines des sciences de la terre. —

Depuis quelques années, l'étude par les géologues et les géophysiciens de la structure de la croûte océanique a conduit à élaborer un modèle d'évolution tectonique du globe dans son ensemble, un modèle qui a permis et qui permet encore de faire des prédictions quantitatives précises. Jusqu'à présent, le succès de ce modèle a été grand puisque ces prédictions ont pu être vérifiées dans leur ensemble, et ceci d'abord dans le domaine des fonds marins, grâce principalement au programme des forages profonds américains JOIDES, mais aussi dans tous les domaines touchant à la géophysique, et en particulier en sismologie. Car, si ce sont des découvertes océaniques qui ont servi de catalyseur à ce bouillonnement d'idées, le modèle qui en est sorti conduit selon le mot du Prof. TUZO WILSON (1968) à une véritable révolution de l'ensemble des sciences de la terre.

Que l'état des sciences de la terre ait été jusqu'alors peu satisfaisant est illustré de façon saisissante par les deux exemples suivants, cités par TUZO WILSON. La structure active la plus importante à la surface de la terre est le système des dorsales médio-océaniques, qui s'étend sur plus de 60000 km de longueur et 1000 km de largeur et dont la crête est marquée par une activité sismique intense. Cette activité s'accompagne d'une énorme dissipation d'énergie qui se traduit par un doublement du flux de chaleur. Et pourtant, la découverte de cette structure ne date que d'une quinzaine d'années et aucune des hypothèses, aucun des modèles d'évolution de la surface de la terre utilisés en géologie et géophysique n'avait seulement pressenti son existence.

De même, soixante ans après que TAYLOR (1910) et WEGENER (1929) aient fait la relation entre le plissement des chaînes de montagnes et les phénomènes de dispersion crustale appelés par WEGENER dérive des continents, il n'existait pas de consensus général sur l'amplitude des mouvements horizontaux différentiels ayant pris place le long des ceintures orogéniques. S'agissait-il de kilomètres, de centaines de kilomètres ou de milliers de kilomètres? Comment espérer bâtir un modèle cohérent d'orogénèse alors que des faits aussi essentiels restaient du domaine de la spéculation la plus vague.

Cette carence générale au niveau de la synthèse avait pour conséquence une accentuation toujours plus grande de l'aspect analytique de chacune des disciplines. Ainsi, les géologues se consacraient-ils en majorité à des travaux descriptifs, toujours plus précis, sur de petits morceaux isolés de la terre. Ainsi les géophysiciens se contentaient-ils d'élaborer des modèles mathématiques rigoureux mais très simplifiés de la distribution de quelques paramètres physiques dans quelques régions du globe. Quant aux géochimistes, il leur était difficile d'arriver à des modèles cohérents à l'échelle de la croûte et du manteau puisqu'on ne savait si l'on devait traiter de systèmes fermés ou de systèmes ouverts.

Le modèle proposé de nos jours, et que l'on a appelé d'un mot qui a fait fortune «la tectonique des plaques», est une hypothèse de travail unificatrice, cohérente à l'échelle du globe, ayant des vertus prédictives quantitatives. Il conduit à une série de nouvelles démarches et recherches scientifiques s'appuyant sur l'ensemble des disciplines des sciences de la terre. Bien que cette hypothèse possède un aspect arbitraire, elle fournit des possibilités nouvelles d'examen de l'ensemble des données géologiques, géophysiques et géochimiques pour en tirer des conclusions qui permettront peut-être l'élaboration d'une théorie précise d'évolution de la surface du globe.

Un article compréhensif étant publié par ailleurs (LE PICHON), on se contente dans cet article de décrire les grandes lignes de ce qu'est la cinématique des plaques.

Définition de la tectonique des plaques

La tectonique des plaques prétend fournir un modèle cinématique qui rend compte de l'activité tectonique actuelle à la surface de la terre. Elle explique cette activité tectonique par l'interaction de quelques grandes plaques de lithosphère le long de leurs bordures qui forment donc les zones orogéniques actuelles. Ces plaques mobiles s'écartent le long des dorsales médio-océaniques où des roches montent de l'asthénosphère pour former une lithosphère nouvelle, glissent le long de grandes failles de cisaillement et convergent sous les guirlandes d'îles le long desquelles la lithosphère s'enfonce pour se diluer dans l'asthénosphère. Ces mouvements sont de l'ordre de quelques centimètres par an soit quelques dizaines de kilomètres par million d'années. Les deux points essentiels sont que ces calottes sphériques peuvent être considérées en première approximation comme par-

faitement rigides et que leurs bordures se manifestent toujours par l'activité sismique qui les accompagne. Il est donc possible de définir de manière simple les frontières de ces grandes plaques et de décrire de manière rigoureuse la géométrie de leur déplacement sur la terre, tout mouvement relatif entre plaques sur la sphère étant une rotation autour d'un axe passant par le centre de la sphère. Le succès de l'hypothèse dépend en fait de l'absence de déformation aiséismique significative dans le plan horizontal à l'intérieur des plaques.

La notion essentielle, dans le cadre de cette hypothèse, est celle de la lithosphère, qui représente la couche superficielle de la terre, comprenant la croûte et une partie du manteau supérieur et dont l'épaisseur est en général de l'ordre de 75 km. Cette lithosphère est définie par ses propriétés physiques et non chimiques. Etant à des conditions de température et de pression relativement basses, elle possède une grande résistance mécanique. L'asthénosphère, au contraire, qui est la couche sous-jacente, entre 100 et quelques centaines de kilomètres, ne possède pas de résistance mécanique à l'échelle de temps appropriée et se conduit donc en première approximation comme un fluide visqueux. La lithosphère est donc un véritable guide de contraintes capable de transmettre intégralement des contraintes à des distances de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres.

Bien que cette hypothèse utilise les idées de dérive continentale de WEGENER (1929) et TAYLOR (1910) et de « sea floor spreading » de HESS, son élaboration progressive a été due principalement

- à la reconnaissance de l'importance de la stratification physique des couches supérieures de la terre en lithosphère et asthénosphère par ELSASSER (1967), MCKENZIE (1967), OLIVER et ISACKS (1967)
- à l'élaboration de la théorie des failles de transformation par TUZO WILSON (1965) et
- à la définition des principes de géométrie sphérique des corps solides par MORGAN (1968)

Structure rhéologique du manteau

D'un point de vue rhéologique, le manteau est divisé en trois couches concentriques. La *lithosphère* est la couche superficielle dont l'épaisseur est de 70 km sous les bassins océaniques. Elle se caractérise avant tout par le fait qu'elle peut supporter pendant des temps importants des contraintes de l'ordre du kilobar sans fluer. *L'asthénosphère*, entre 70 et 350 km, par contre ne le peut pas. La lithosphère est donc un véritable guide de contraintes mécaniques. Il s'en suit que les mouvements les plus faciles à réaliser sont les mouvements horizontaux de glissement de la lithosphère sur l'asthénosphère. La *mésosphère* enfin, en dessous de 700 à 900 km, serait convectivement inerte, ayant dû perdre une grande partie de ses constituants radioactifs dans une phase ancienne de l'histoire de la terre.

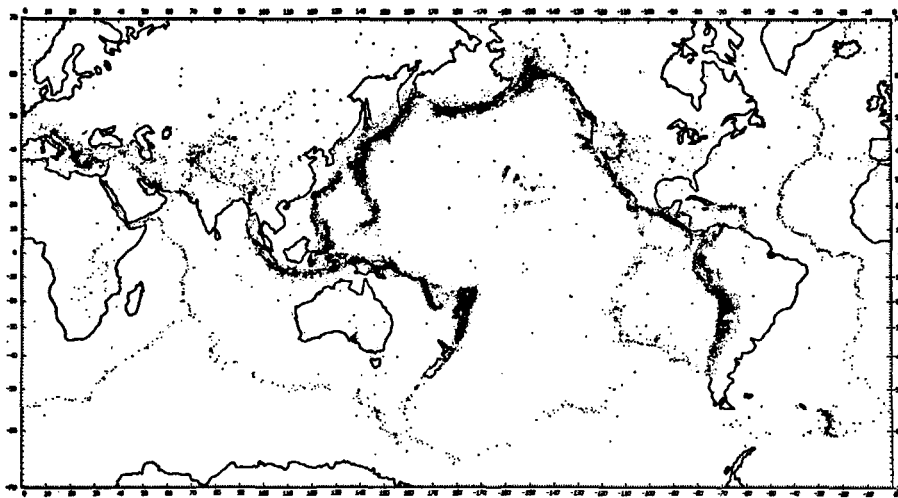


Figure 1

Carte de la sismicité mondiale (d'après BARAZANGI et DORMAN 1969)

Il faut bien remarquer que la définition de la lithosphère est rhéologique et non chimique et qu'elle est en particulier distincte de la notion de croûte. Une plaque lithosphérique peut comprendre indifféremment croûtes océaniques et continentales qui se comportent, pour utiliser une analogie très grossière, comme un morceau de bois gelé dans un bloc de glace.

La sismicité globale est donc l'expression des déplacements relatifs des différentes plaques lithosphériques, les frontières des plaques étant évidemment les ceintures sismiques (fig. 1). Les zones inclinées de séismes profonds, dites plans de BENIOFF, correspondent aux relâchements des contraintes à l'intérieur des plaques lithosphériques en cours de plongée dans l'asthénosphère.

Le schéma général

La surface de la terre est donc constituée par une mosaïque d'un petit nombre de calottes sphériques rigides en déplacement relatif, glissant sur une couche qui n'offre pas de résistance aux contraintes mécaniques (fig. 2). Ces plaques s'écartent des crêtes des dorsales médio-océaniques où se crée de la surface nouvelle, glissent l'une sur l'autre le long des grandes failles de cisaillement où la surface est conservée, et convergent sous les arcs insulaires où l'une des plaques s'enfonce pour se diluer dans l'asthénosphère. Si les dorsales sont les régions du globe où une quantité importante de surface nouvelle est créée tous les ans (de l'ordre de 2 km^2), les arcs insulaires sont celles où une quantité égale de surface lithosphérique est détruite par retour et dilution dans l'asthénosphère.

On peut montrer par ailleurs (MORGAN 1968) que si deux plaques rigides sont en déplacement relatif sur une sphère, le mouvement instan-

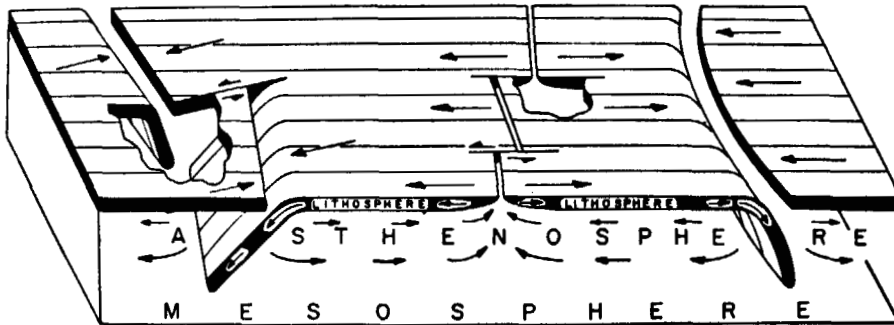


Figure 2

Schéma illustrant la configuration et le rôle respectifs de la lithosphère, de l'asthénosphère et de la mésosphère. Les flèches indiquent les mouvements *relatifs* des blocs principaux. Les flèches dans l'asthénosphère sont hypothétiques et on peut imaginer un système différent de flèches (d'après ISACKS et coll. 1968)

tané que décrit l'une par rapport à l'autre supposée fixe est une rotation autour d'un axe perçant la sphère en deux points appelés pôles eulériens. On peut donc, à partir de l'étude du tracé des failles et de la variation des taux d'expansion à l'axe des dorsales calculer le mouvement relatif de rotation de deux plaques en cours de séparation. En procédant de zone de rapprochement, on peut alors calculer le mouvement résultant dans les zones de rapprochement et obtenir un schéma cohérent à l'échelle globale. LE PICHON (1968) a montré qu'en première approximation ce schéma pouvait être obtenu en utilisant seulement six grandes plaques (fig. 3). Le succès de

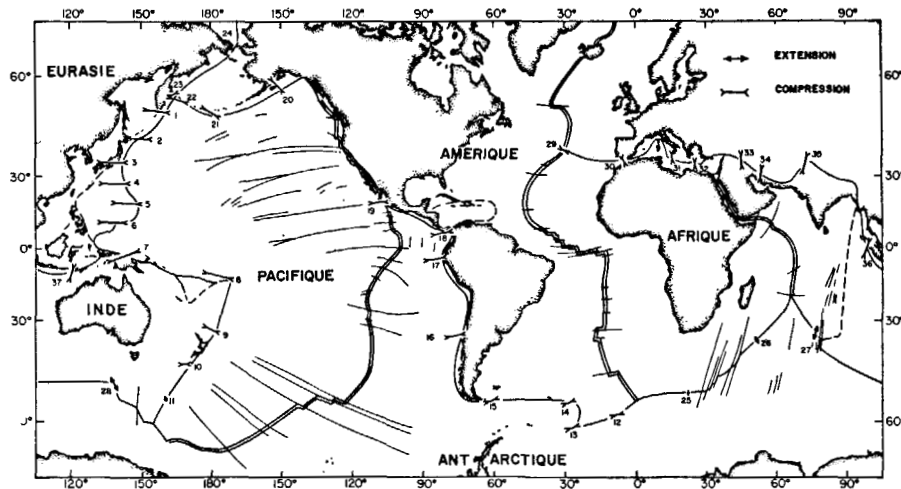


Figure 3

Système des six plaques principales. Les vecteurs mouvements calculés à partir des mouvements d'expansion le long des cinq axes principaux indiqués par une ligne double sont marqués par des flèches proportionnelles à la vitesse du mouvement (d'après LE PICHON 1968)

ce schéma confirme qu'on peut en première approximation négliger les déformations asismiques.

Il faut insister sur le fait qu'on ne sait mesurer que les mouvements relatifs et non les mouvements absolus. Le système de référence est donc arbitraire et les crêtes comme les fossés peuvent être en déplacement. Il n'y a aucune raison pour qu'ils soient fixés à un cadre de référence quelconque.

D'autre part, les limites des plaques actuelles nous sont données par la sismicité. La mesure du mouvement actuel peut être obtenue à partir de l'étude des anomalies magnétiques en particulier (VINE et MATTHEWS 1963), des mécanismes au foyer des séismes et l'observation directe ou les mesures géodésiques. Mais il est évident que lorsqu'on veut reconstituer la tectonique passée, on perd le guide très sûr fourni par la sismicité et la détermination des frontières fossiles de plaques puisque la mesure des mouvements passés est difficile et exige l'utilisation de méthodes différentes. Toutefois l'étude des anomalies magnétiques océaniques et des failles transformantes fossiles et celle du paléomagnétisme fournissent une aide importante à l'interprétation des données géologiques non actuelles en termes de tectonique des plaques.

Il faut à ce sujet prendre garde à une confusion fréquente faite entre déplacements et contraintes. Les contraintes à l'intérieur d'une plaque peuvent être très différentes des déplacements relatifs entre deux plaques. On ne peut donc relier simplement les structures d'une chaîne de montagnes aux mouvements relatifs entre plaques qui les ont créées.

Tectonique des plaques et tectonique continentale

On a insisté sur le fait que la lithosphère est une notion rhéologique, distincte de la croûte qui est une notion chimique et pétrologique. La croûte océanique n'est qu'une mince pellicule superficielle sur la lithosphère alors que la croûte continentale, nettement plus épaisse (30 à 40 km) et bien différenciée est une sorte de bloc gelé à l'intérieur d'une plaque. On sait par ailleurs que la force d'Archimède empêche qu'un continent puisse être absorbé dans le manteau et qu'un continent force donc la plaque dont il est solidaire à rester en surface.

Toutefois, tout ce que l'on sait sur la distribution des plaques actuelles montre qu'il n'existe pas de différences essentielles entre les plaques dont la partie superficielle est entièrement océanique (plaque Pacifique) et celles dont la partie superficielle est principalement continentale (plaque eurasiennne). D'autre part les frontières des plaques passent indifféremment à l'intérieur des océans et des continents. Il n'y a donc aucune raison de penser que la tectonique des plaques est une hypothèse qui n'a de valeur que dans le domaine océanique. Le problème principal vient de ce que, comme les ajustements mécaniques à une rotation donnée sont difficiles entre continents, les ajustements nécessaires sont effectués grâce à la création de nouvelles petites plaques entre les plaques principales. Le cas de la zone alpine-himalayenne est exemplaire. Le problème consiste donc

d'abord à identifier le mouvement principal entre les grandes plaques. Ensuite à retrouver la configuration géométrique des plaques intermédiaires à un instant donné. Enfin connaissant ces frontières, à trouver le mouvement relatif entre chaque plaque.

Il faut insister sur le fait qu'il est probablement illusoire de vouloir obtenir une solution en termes de tectonique des plaques si l'on ne connaît pas précisément au moins les mouvements entre plaques principales et en particulier si l'on ne connaît pas l'ajustement des différentes portions entre elles au début de l'ère secondaire, lorsque le cycle actuel de tectonique des plaques a débuté.

BIBLIOGRAPHIE

1. BARAZANGI, M., et DORMAN, J.: World seismicity maps compiled from ESSA Coast and Geodetic Survey epicenter data, 1961-1967. *Bull.seism.Soc.Am.* 59: 369 (1969).
2. ELSASSER, W.M.: Convection and stress propagation in the upper mantle. Princeton Univ.Tech.Rept. 5 (1967).
3. ISACKS, B.L., OLIVER, J., et SYKES, L.R.: Seismology and the new global tectonics. *J.geophys.Res.* 73: 5855-5899 (1968).
4. MCKENZIE, D.P.: Some remarks on heat-flow and gravity anomalies. *J.geophys. Res.* 72: 6261-6271 (1967).
5. MORGAN, W.J.: Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *J.geophys.Res.* 73: 1959-1982 (1968).
6. LE PICHON, X.: Sea-floor spreading and continental drift. *J.geophys.Res.* 73: 3661-3697 (1968).
7. LE PICHON, X.: Cinématique de la tectonique des plaques. Colloque sur la structure et la dynamique de la lithosphère. Paris, octobre 1970, en préparation.
8. OLIVER, J., et ISACKS, B.: Deep earthquake zones, anomalous structures in the upper mantle, and the lithosphere. *J.geophys.Res.* 72: 4259 (1967).
9. TAYLOR, F.B.: Bearing of the tertiary mountain belt on the origin of the earth's plan. *Bull.geol.Soc.Am.* 21: 179-226 (1910).
10. WEGENER, A.: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Friedrich Vieweg, Braunschweig 1929.
11. WILSON, J. T.: A new class of faults and their bearing on continental drift. *Nature* 207: 343-347 (1965).
12. WILSON, J.T.: Révolution dans les sciences de la terre. *Vie et Milieu, B*, 19: 395-424 (1968).