

Texte de la 197^e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 15 juillet 2000.

**La tectonique des plaques : de l'océan à l'espace
par Xavier Le Pichon,**

Lorsque j'ai commencé ma carrière de chercheur en 1959, nous ne connaissions même pas l'existence de la dorsale médio-océanique, la plus grande structure de notre planète puisqu'elle fait 50 000 kilomètres de long. L'océan était considéré comme au moins aussi âgé que les continents. Or nous avons découvert qu'il était trente fois plus jeune. Nos connaissances sur la partie de la Terre recouverte par l'eau étaient donc embryonnaires. C'est l'exploration des océans qui a conduit à élaborer dans les années soixante la tectonique des plaques proposant pour la première fois un modèle quantitatif cohérent de l'évolution de notre planète.

Paradoxalement, ce modèle, encore très schématique, s'appuyait sur des données entièrement océaniques. Aujourd'hui, grâce aux techniques géodésiques spatiales, la tectonique des plaques progresse très rapidement à partir de données concernant cette fois exclusivement les continents. Ce n'est plus simplement le mouvement des grandes plaques qui est déterminé. On obtient désormais la description détaillée des déformations continues qui affectent les frontières de plaque et qui se traduisent par l'activité sismique. On atteint ainsi une compréhension bien meilleure de ce que l'on appelle le cycle sismique, cycle qui amène le retour semi-périodique des très grands séismes.

La **figure 1** montre la distribution des reliefs au fond de l'océan mondial, telle que nous la restituons les satellites à partir de la déflexion de la surface des océans par la force gravitationnelle. Cet extraordinaire tour de force technique nous révèle un paysage aussi différent de celui des continents que l'est celui de la lune. Le fond de l'océan est dominé par la présence d'une élévation en général médiane, sauf dans le Pacifique, hachée par de grandes fractures perpendiculaires. Nous savons aujourd'hui que c'est à l'axe de ce relief, appelé dorsale médio-océanique, que se forment les nouveaux fonds océaniques au fur et à mesure que s'écartent les plaques adjacentes, à la vitesse de quelques centimètres par an. Ce gigantesque relief fait environ 50 000 kilomètres de long ; si l'océan était drainé de son eau un observateur lunaire caractériserait la Terre comme la planète de la dorsale! Pourtant il y a quarante ans, quand j'ai commencé ma recherche, on commençait à peine à soupçonner l'existence de cette structure qui joue un rôle clef dans le fonctionnement de la Terre. Nous ne comprenions donc rien à ce fonctionnement.

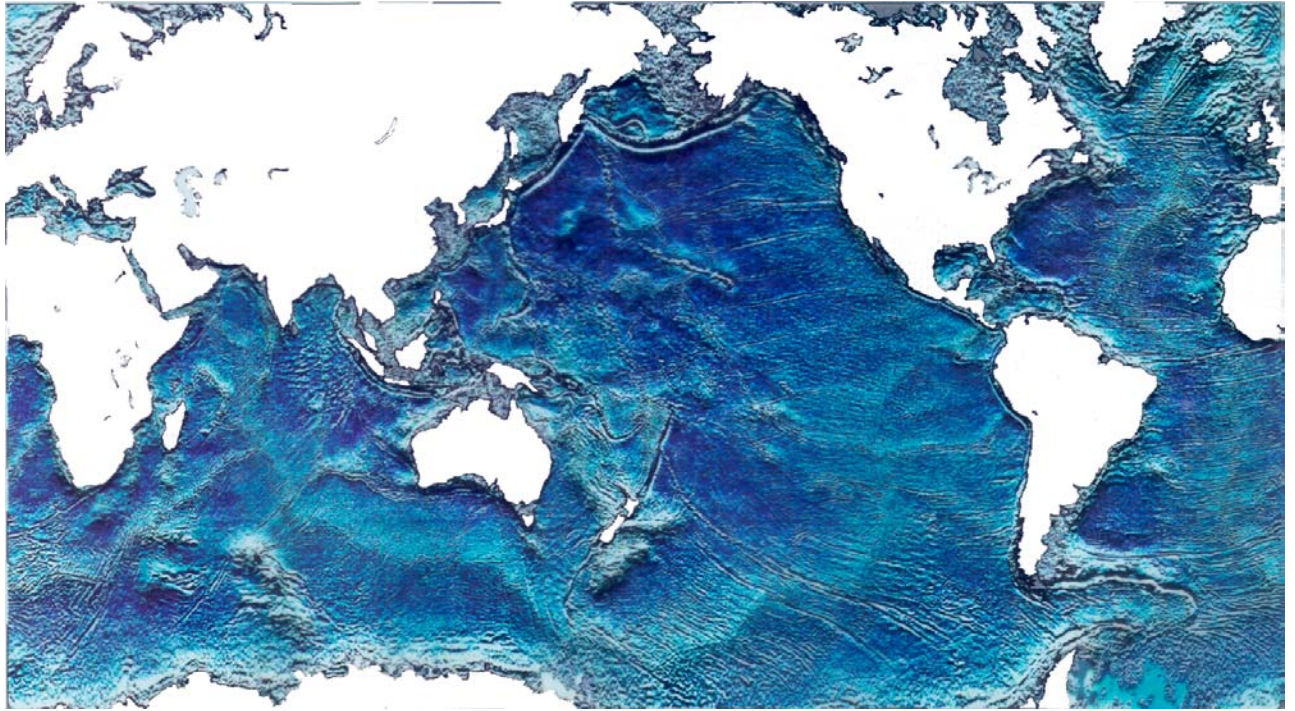


Figure 1 : Bathymétrie de l'océan vue de satellite. Il s'agit en fait d'une topographie miniature de la surface de l'océan qui reflète la topographie réelle du fond sous l'effet de la force d'attraction gravitationnelle. L'essentiel de cette topographie était inconnue il y a quarante ans. Document du GRGS de Toulouse.

De fait, nous pensons que les bassins océaniques sont aussi anciens que les continents et que leur âge se compte en milliards d'années. Nous savons maintenant qu'ils sont environ cinquante fois plus jeunes en moyenne. Nous pensons qu'ils sont tectoniquement calmes. Nous avons découvert qu'ils sont à la source de l'activité sismique et volcanique. Nous les considérons comme le réceptacle des débris de l'érosion des continents depuis leur origine. Mais les énormes couches de sédiment formés par ces débris n'existent pas. Le modèle prévalent admettait que la surface de la Terre n'est affectée que par des mouvements verticaux et considérait la dérive des continents comme un mythe qui avait vécu. Or non seulement les continents mais la totalité des fonds océaniques sont sans cesse remodelés par la Tectonique des Plaques. Nous nous trompions sur toute la ligne : notre conception du mode de fonctionnement de la Terre était fausse.

C'est bien l'exploration des fonds océaniques, menée à grand train par quelques laboratoires financés par la Marine américaine depuis la fin de la seconde guerre mondiale, qui imposa le nouveau modèle de la Terre que l'on a depuis appelé la Tectonique des Plaques. Cette exploration révéla dans les années soixante que non seulement les fonds océaniques sont géologiquement jeunes, puisque leur âge moyen est d'environ 60 millions d'années et que les plus anciens morceaux datent du milieu de l'ère secondaire, mais que cet âge augmente progressivement lorsqu'on s'éloigne de la crête des dorsales (**voir figure 2**). Il devenait clair que la seule manière de produire une telle distribution des âges est un processus de type tapis roulants qui atteignent la surface sous la crête des dorsales et s'en écartent ensuite symétriquement. Et puisque les fonds océaniques couvrent 60 % de la surface de la Terre, il était exclu qu'ils soient créés suite à son expansion. Il aurait alors fallu un accroissement de 250 % de la surface et de 400 % du volume durant une période inférieure à 5 % de son histoire. Il était donc nécessaire qu'une quantité égale de surface de fonds océaniques disparaisse à l'autre extrémité des océans en replongeant dans les profondes fosses dites de subduction qui bordent le pourtour du Pacifique et le nord de l'océan indien.

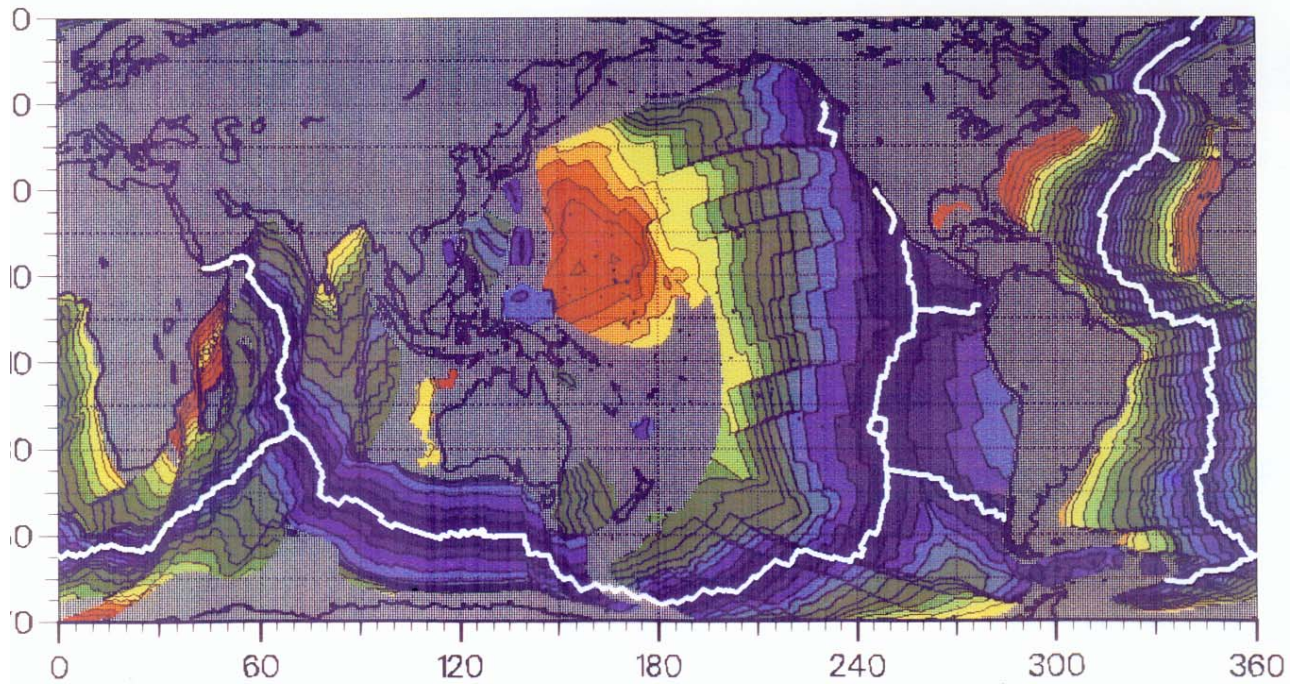


Figure 2 : Carte des âges du fond des océans d'après les anomalies magnétiques. Les âges sont en milliers d'années. Cette carte a été établie par les chercheurs du Lamont Doherty Geological Observatory.

Ainsi s'expliquait l'activité sismique globale, présentée dans la **figure 3**, qui se localise long de la crête des dorsales et des grandes fosses. Ces ceintures sismiques jalonnent les frontières de quelques grandes plaques indéformables et sont dues aux mouvements d'écartement à la crête des dorsales, de rapprochement aux fosses ou de coulissement le long de certaines portions de frontière. L'activité sismique et volcanique est l'expression instantanée et spasmodique du mouvement continu des plaques qui fabrique les reliefs aussi bien océaniques que continentaux. L'étude des séismes devenait partie intégrante de celle de la genèse des reliefs. La sismologie rejoignait la tectonique qui ne s'arrêtait plus à la côte.

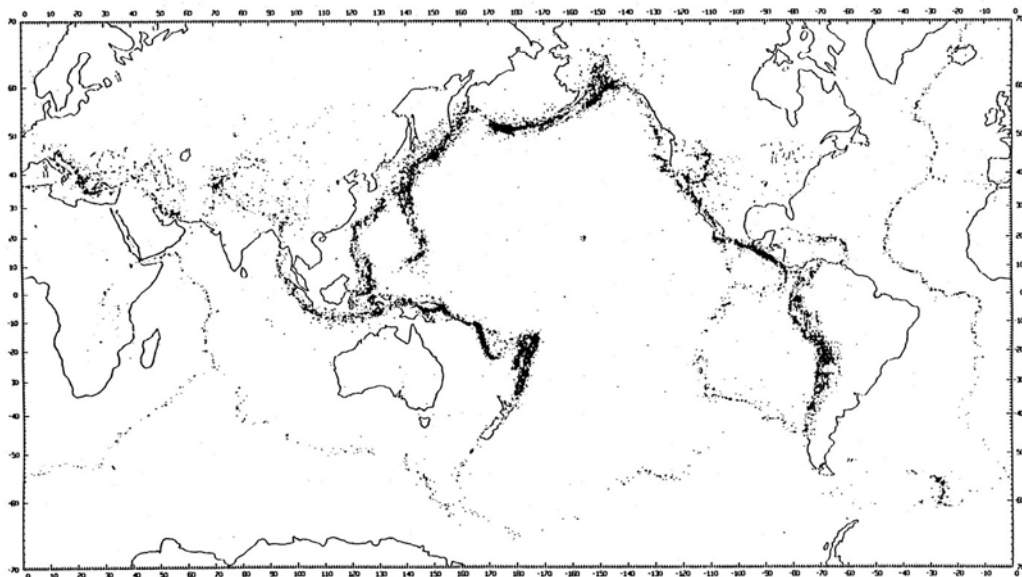


Figure 3 : Sismicité à la surface du globe. Elle apparut pour la première fois dans son ensemble dans les années soixante grâce au réseau de détection des expériences atomiques. La sismicité permet d'identifier les frontières de plaque où le mouvement relatif produit l'activité sismique.

La principale originalité de ce modèle vient de ce qu'il est quantitatif. On connaît la direction de mouvement grâce aux séismes et aux failles de coulissement. On peut par ailleurs mesurer la vitesse d'écartement des plaques à l'axe des dorsales, grâce aux anomalies magnétiques créées par les roches volcaniques qui conservent la polarité du champ magnétique terrestre acquise au moment où elles se sont refroidies. Comme le champ s'inverse périodiquement, des bandes alternées de roches aimantées positivement et négativement restituent la chronologie de ces inversions et permettent de dater le fond des océans. C'est ainsi qu'a été construite la carte des âges de la **figure 2**. La vitesse d'écartement est la dérivée de cette carte des âges, dérivée mesurée sur quelques millions d'années. Le vecteur mouvement relatif des plaques le long de chaque frontière océanique est alors obtenu à partir de la mesure indépendante de la vitesse et de la direction du mouvement. Ce fut la base du premier modèle cinématique global qui utilise ces mesures et le fait que la Terre est une sphère de rayon constant pour calculer le mouvement en tout point des frontières des six plaques principales (**figure 4**).

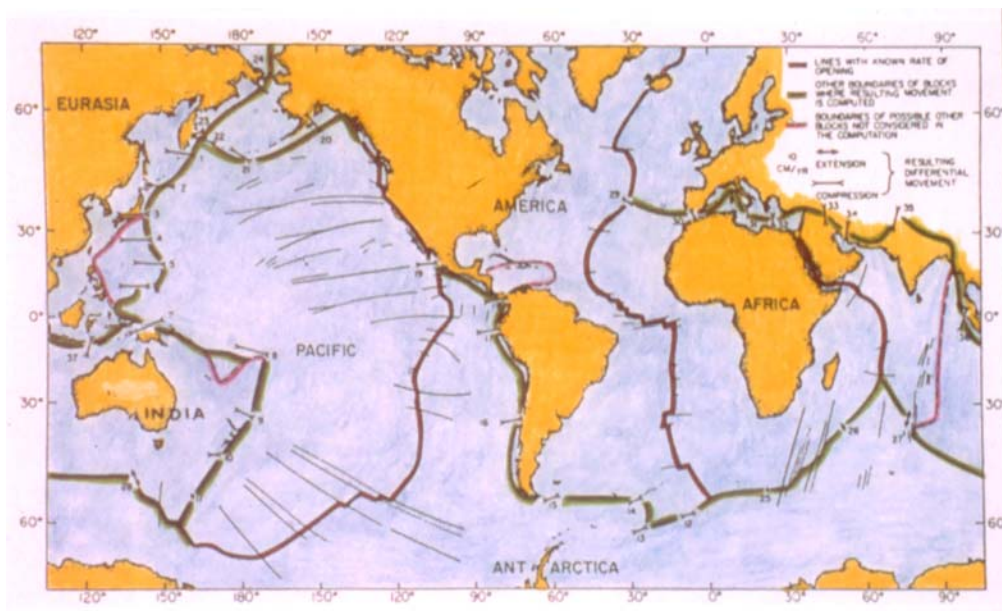


Figure 4 : Figure originale de l'article que je publiai en 1968 qui donnait le premier modèle quantitatif global de déplacement des plaques à la surface de la Terre. Connaissant les mouvements aux frontières en extension à l'axe des dorsales, je calculais les mouvements aux frontières en raccourcissement dans les fosses de subduction sur le pourtour des océans en admettant que la Terre ne changeait pas de volume au cours du temps. J'utilisais six plaques pour rendre le problème unique avec les données dont je disposais. Vingt ans plus tard, la mesure directe des mouvements par satellite a confirmé la validité de mon modèle.

Le modèle cinématique global était obtenu à partir de mesures provenant uniquement des océans, et principalement des crêtes des dorsales. Aucune information obtenue sur les continents n'était utilisée. C'était donc un modèle purement océanique qui permettait pourtant de déterminer la quantité totale de raccourcissement le long des frontières continentales, comme celle qui suit les Alpes et l'Himalaya. Mais la notion de frontière avait-elle encore un sens dans ces zones où la déformation se distribue parfois sur plusieurs milliers de kilomètres ? Pouvait-on par ailleurs avoir

confiance dans l'hypothèse d'une constance du mouvement durant les quelques millions d'années sur lesquels la vitesse d'écartement des plaques était moyennée ?

C'est à partir du milieu des années 80 que la géodésie spatiale permet de répondre à ces questions. Grâce à cette nouvelle technique popularisée de nos jours par l'utilisation croissante du GPS (Global Positioning System), on peut désormais mesurer la position d'un point sur la portion émergée de la Terre avec une précision croissante qui atteint aujourd'hui 2 à 3 millimètres. En répétant cette mesure, on obtient directement la vitesse de la plaque sur laquelle se trouve le point mesuré. Il s'agit bien sûr d'une vitesse instantanée qui peut inclure un certain nombre de transitoires liés en particulier à l'accumulation de déformations élastiques relâchées durant les séismes suivants. Toutefois, lorsque l'on se place loin de frontières de plaques, ces transitoires sont peu importants et l'on a une bonne estimation de la vitesse moyenne de la plaque. Ce point est démontré par l'accord remarquable entre les vitesses de plaque obtenues à partir des mesures océaniques moyennées sur quelques millions d'années et les mesures géodésiques faites à quelques années d'intervalle (**figure 5**). Notez que cette confirmation démontre de manière définitive que, contrairement à ce que maintenaient les derniers partisans d'un modèle d'expansion de la Terre sans subduction, il y a bien équilibre à la surface de la Terre entre création de nouvelle surface à l'axe des dorsales et destruction de surface par subduction dans les fosses et collision le long des chaînes de montagnes actives.

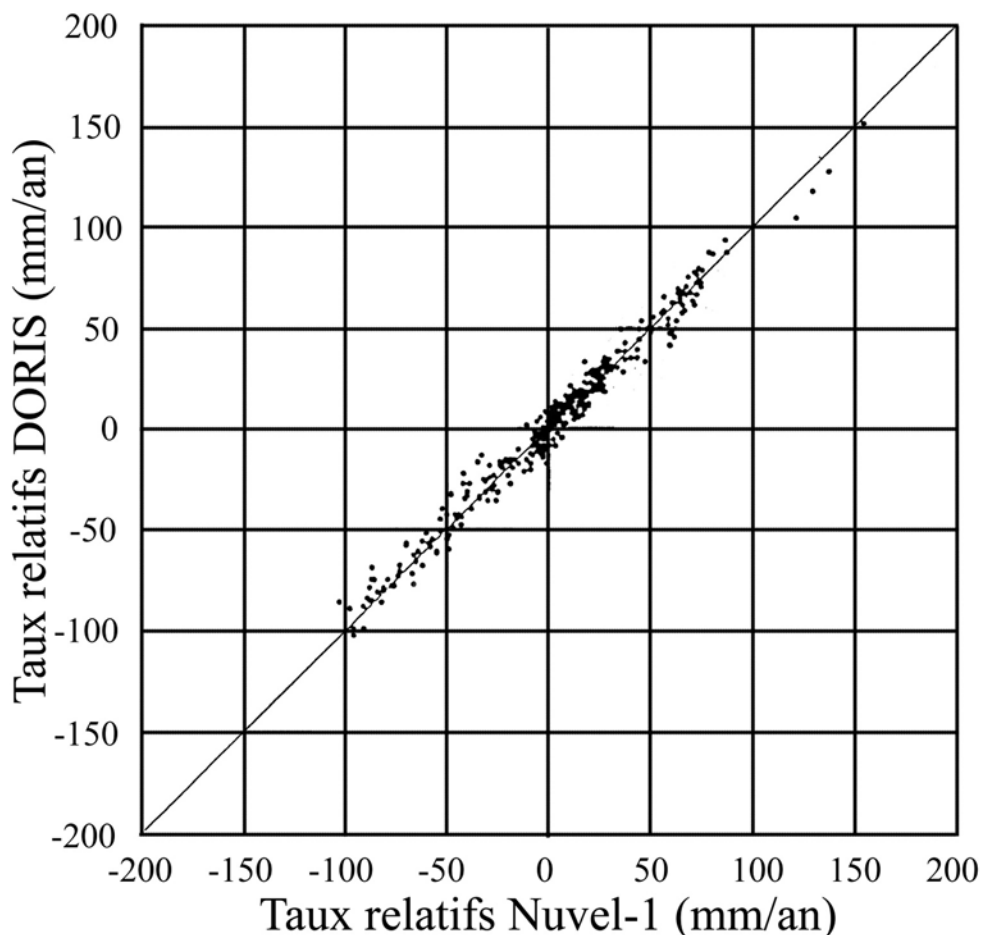


Figure 5 : Mouvements des plaques mesurés par géodésie satellitaire (système français Doris) sur quelques années comparés à ceux mesurés par les taux d'expansion au fond des océans sur 3,5 millions d'années. Un accord parfait correspondrait à la droite. Les faibles déviations

peuvent être attribués au moins en partie à la précision encore insuffisante des mesures. Document du GRGS de Toulouse.

J'avoue que je fus profondément impressionné lorsque la première mesure géodésique du rapprochement entre Hawaï et le Japon, 9 centimètres par an vers l'ouest, vérifia près de vingt ans plus tard la vitesse que j'avais calculée pour mon modèle global. Ainsi, en deux ans de mesure directe, la géodésie retrouvait la vitesse calculée indirectement à partir d'un circuit global et en admettant la constance du mouvement sur dix millions d'années. Désormais un nouvel outil très puissant permettait de mesurer les mouvements de toute portion de plaque émergée en quelques années. On passait d'un système tout océanique moyenné sur quelques millions d'années à un système couvrant tout le domaine émergé et fournissant une véritable vitesse instantanée. On ne dépendait plus des mesures de la vitesse d'expansion à l'axe des dorsales. La cinématique des bassins marginaux devenait accessible aussi bien que celle des zones de déformation continentale.

De fait, on peut maintenant mesurer de manière permanente la position, et donc le mouvement et la déformation, avec la densité d'observations spatiales et temporelles que l'on souhaite. Il est clair que nous entrons dans une nouvelle ère de l'étude de la déformation de la surface terrestre, et que nous avons donc enfin accès à la possibilité d'une modélisation détaillée de celle-ci. Il devient possible d'aborder de manière complètement nouvelle la question de la déformation élastique qui mène aux ruptures sismiques. La **figure 6** montre ainsi l'exemple du réseau d'observation permanente géodésique qui couvre le Japon. Il existe maintenant un site de mesure permanente par GPS tous les 30 kilomètres. Ce réseau permet de suivre en temps réel la déformation du Japon sous l'effet de l'enfoncement des plaques océaniques sous sa bordure orientale. Entre deux séismes, plaque en subduction et arc insulaire japonais sont mécaniquement couplés par le frottement le long de leur plan de contact. Le Japon est poussé vers l'ouest et se raccourcit au rythme de 3 centimètres par an. Au bout d'une centaine d'années, les trois mètres de raccourcissement élastique accumulés sont brutalement restitués au cours de la rupture du grand séisme le long de la fosse qui permet aux deux plaques de rebondir à leur position d'équilibre. La surveillance détaillée d'un cycle sismique complet apportera des connaissances aujourd'hui insoupçonnées sur les mécanismes très complexes qui régissent ces phénomènes. Dès à présent, nous avons beaucoup appris sur la distribution du couplage mécanique sur le plan de contact entre les deux plaques.

GPS96 wrt Eurasia

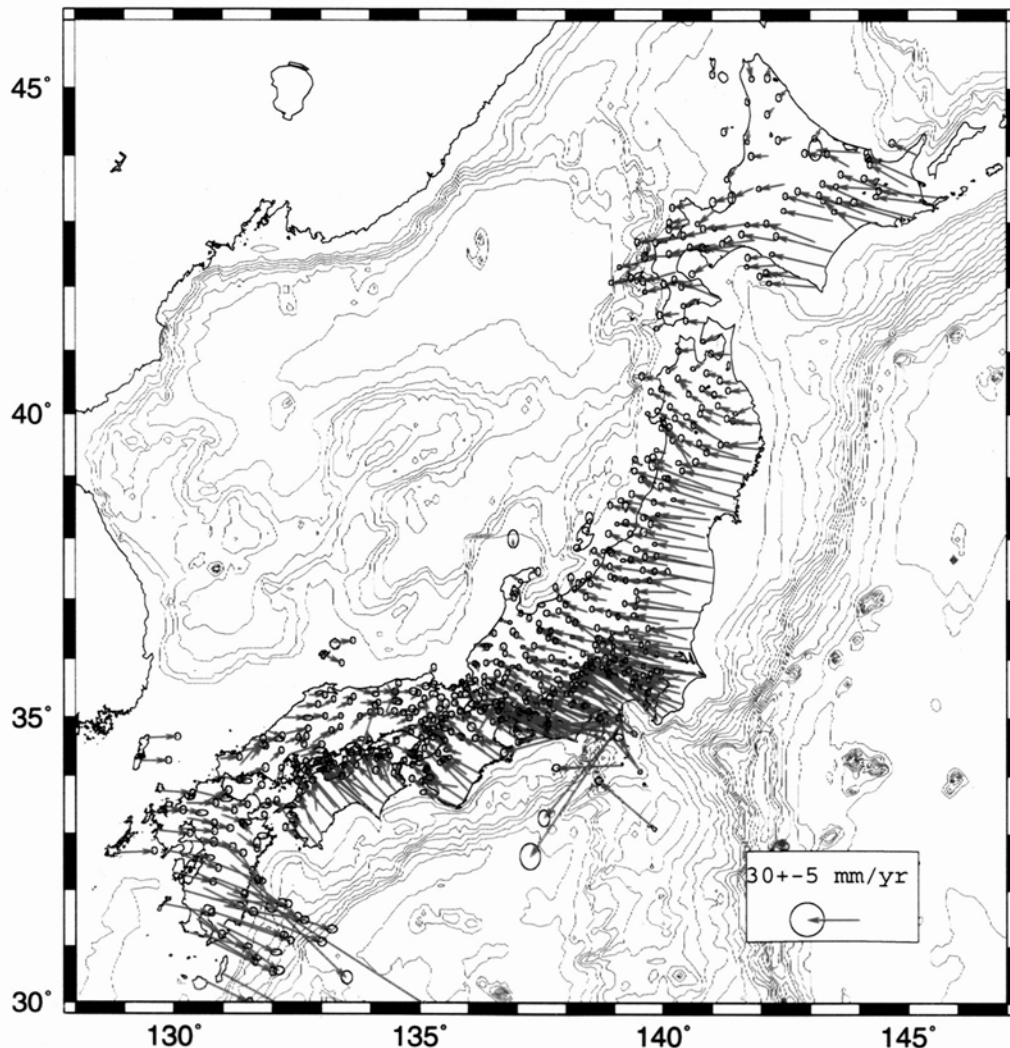


Figure 6 : Vecteurs déplacement mesurés par les stations du réseau GPS permanent du Service Géographique Japonais. Le Japon se raccourcit en permanence de 3 cm/an dans la direction E-O durant les périodes intersismiques. Au bout d'une centaine d'années, la déformation élastique accumulée d'environ trois mètres est soudainement relâchée et le Japon rebondit vers sa position non déformée. De telles mesures nous permettent pour la première fois d'entrer dans une compréhension des mécanismes de déformation aux frontières de plaque conduisant aux grands séismes.

En conclusion, je voudrais redire que nous n'avons rien compris à la vie géologique de notre planète tant que nous avons refusé de regarder pardessus bord vers les profondeurs océaniques. Nombreux étaient à l'époque ceux qui pensaient que l'exploration des fonds océaniques était un gaspillage coûteux puisqu'il ne se passait rien d'important dans ces profondeurs abyssales. N'était-il pas plus important d'étudier les continents qui nous étaient si proches et si essentiels. Aujourd'hui, nous entendons le même genre de discours. l'exploration du fond des océans a conduit au nouveau modèle de fonctionnement de la Terre. Mais maintenant que nous avons ce modèle, la continuation de cette exploration coûteuse est une perte de temps et d'argent. Concentrons-nous sur les continents. Hélas, la même erreur produit les mêmes effets. La Terre est un système complexe qui ne peut s'étudier que comme un tout. Océan et continents jouent des rôles complémentaires. Ignorer l'un conduit à l'incompréhension de l'ensemble.

La seconde leçon, me semble-t-il, concerne la nécessité d'une approche multidisciplinaire pour comprendre les phénomènes très complexes qui gouvernent les mécanismes terrestres. Or les chercheurs que nous formons sont des spécialistes de plus en plus pointus qui tendent à ignorer les résultats provenant des autres disciplines. La tectonique des plaques a fait de la sismologie et de la tectonique deux sous disciplines de l'étude de la déformation de la Terre. La géodésie spatiale a élargi ce champ à la géodésie et à la mécanique des roches. Or jusqu'à présent, géodésiens et mécaniciens étaient formés sans la moindre connaissance dans le domaine de la tectonique et de la sismologie. L'état des connaissances géodésiques et mécaniques des sismologues et tectoniciens n'était guère plus brillant. La formation d'équipes pluridisciplinaires de spécialistes ayant la culture générale indispensable pour aborder ces problèmes complexes est aujourd'hui le principal problème que nous avons à résoudre si nous voulons pleinement bénéficier de cette véritable mutation de la tectonique.