

Chapitre 1

DYNAMIQUE LITHOSPHERIQUE DE CONVERGENCE : LES SUBDUCTIONS

**subduction** : enfouissement lithosphérique dans l'asthénosphère

conditions d'enfoncement selon vous (4) ? \_\_\_\_\_

**constat** : datation des fonds océaniques : pas de lithosphère océanique > 200 Ma or :

- la Terre a 4,56 Ga, et les plus vieilles roches connues (continentales) ont 4,03 Ga (gneiss d'Acasta, Canada) et selon les chercheurs ne se forment qu'en contexte de subduction, ce qui implique de la lithosphère le plus souvent océanique pour se faire (66% des cas)

- de plus, de la lithosphère océanique est continuellement produite au niveau des dorsales (zones de reliefs et d'activité sismo-volcanique au milieu des océans avec relief centrale = ride médiane = rift = relief sous marin d'environ 2,5 km de haut

**question** : que cela signifie-t-il ? qu'il n'y avait pas d'océan avant le Jurassique (-200 Ma) ? Nous savons que non. Comment dépasser cette contradiction ?

COMMENT LA MOBILITÉ HORIZONTALE DES PLAQUES LITHOSPHERIQUES À LA SURFACE TERRESTRE A T-ELLE ÉTÉ MISE EN ÉVIDENCE AU COURS DE LA 2È MOITIÉ DU XXÈ S ET PEUT-ELLE INTIER L'ENFOUCEMENT LITHOSPHERIQUE (= SUBDUCTION) ?

1 / INDICES D'UNE MOBILITÉ HORIZONTALE AMORÇANT LA CONVERGENCE LITHOSPHERIQUE

AP # 1, 2 ET 3

rappel : La lithosphère (moyenne d'épaisseur de la surface terrestre depuis le sol jusqu'à en moyenne - 100 km), est découpée en plaques rigides dites tectoniques dont les mouvements sont à l'origine des activités externes de surface issues de l'activité interne : volcanisme, séismes et évacuation de chaleur en surface, généralement situés à leur frontière sauf cas particuliers des points chauds (voir cycle 4, 4è) intra-plaques  
Diverses méthodes permettent de reconstituer et montrer ses mouvements

Les preuves/indices historiques de la mobilité horizontale de la lithosphère que Wegener n'avait pu justifier suffisamment dans les années 20 faute d'un moteur suffisant à sa mort en 1930, sont établies à partir du début des années 60, notamment grâce aux progrès techniques et de prospection des fonds marins suite à l'effort de guerre de 39-45 qui entraîne des campagnes de mesures et études des océans, jusque là largement méconnus.

RAPPELS : LEXIQUE DE BASE :

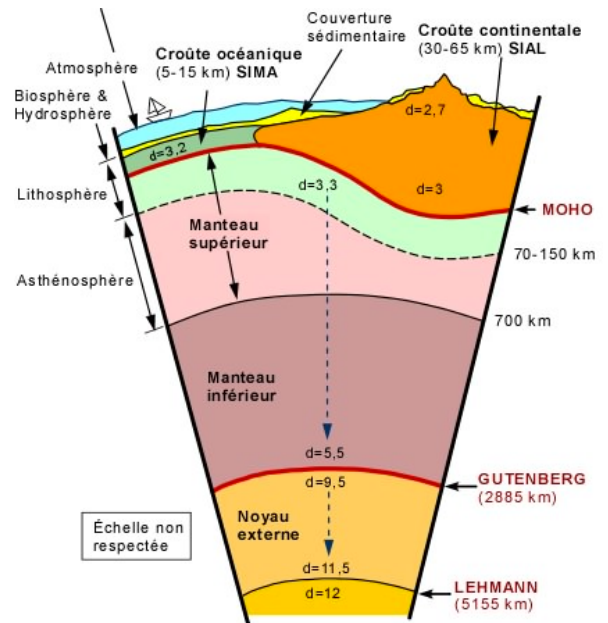
convergence = rapprochement de 2 lithosphères de 2 plaques => <=

divergence = écartement, éloignement de 2 lithosphères de 2 plaques <=>

**lithosphère vs asthénosphère : 2 concepts (épaisseur, constitution, propriétés) => voir ci-dessous**

**concept = idée générale humaine, commode représentation abstraite d'un objet ou d'un ensemble d'objets à caractéristiques communes**

|            | LITHOSPHERE                                      | ASTHENOSPHERE                         |
|------------|--|---------------------------------------|
| ÉTYMOLOGIE | du grec lithos = « pierre », la sphère de pierre | du grec « asthenos », sans résistance |



|             | LITHOSPHERE   | ASTHENOSPHERE  |
|-------------|---|--|
| COMPOSITION | <b>croûte terrestre + petite partie supérieure du manteau supérieur</b><br>située sous le MOHO, de composition variable suivant sa nature (océanique ou continentale) subdivisée en plaques lithosphériques = plaques tectoniques | couche interne partie du manteau supérieur sous la lithosphère et sous la mésosphère qui elle est située à - 670 km jusqu'à - 2900 km c'est-à-dire <b>manteau supérieur sous-lithosphérique</b> , d'épaisseur variable et <b>ductile</b> |
| PROPRIÉTÉ   | <b>rigide</b> , peut :<br>- sous de fortes contraintes => rupture => séisme possible<br>- sous de faibles contraintes : déformation et reprend sa forme initiale après => pas de séismes  | <b>ductile</b> , plus plastique, solide malléable, capable de «fluer» sous de faibles contraintes => pas de rupture possible => pas de séismes possible  |
| ÉPAISSEUR   | <b>70 km sous les océans / 120 à 150 sous les continents</b>  | <b>limite inférieure : - 650 km</b>  |

**point technique géologique : la tomographie sismique** : méthode d'étude du globe des mouvements et hétérogénéités (variations d'état) du manteau (carottage à ses profondeurs impossible techniquement) reposant sur les mêmes principes que les techniques d'imagerie médicale comme celle de l'imagerie à ultrasons : elle réalise des mesures à la surface des objets pour reconstituer ses propriétés internes, ici les vitesses d'ondes sismiques dans les matériaux traversés en profondeur du globe depuis la surface par rapport à un modèle

La notion d'anomalie est très importante en géologie : ce sont leur interprétation (positives quand valeur mesurée > valeur attendue et négative quand inférieure) qui intéressent les chercheurs pour comprendre la présence, l'état (solide rigide, malléable, liquide, plus ou moins dense ...) et les mouvements des matériaux rocheux sous nos pieds

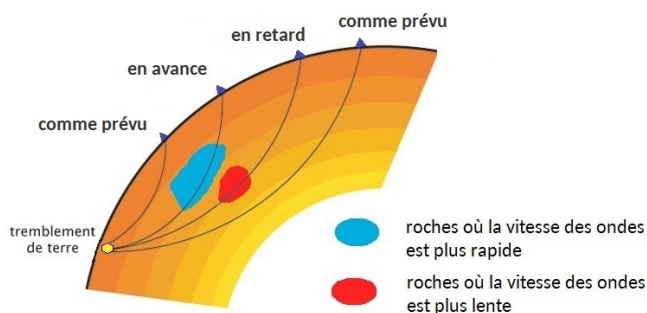
Les données sismiques permettent de construire des modèles théoriques (ici le modèle appelé PREM = Preliminary Reference Earth Model, modèle sismique de vitesse de propagation des ondes S (S comme Secondes, les 2<sup>es</sup> à arriver aux stations sismiques, un peu moins rapides que les P) et P (Premières, les 1<sup>ères</sup> à arriver aux stations) depuis la surface jusqu'au centre de la Terre d'après Dziewonski et Anderson, 1981). Les sauts brusques de vitesse sur le trajet d'une onde sismique sont interprétés comme des discontinuités limitant des enveloppes concentriques : ce modèle correspond à une description « attendue moyenne » du réel. Les données mesurées peuvent présenter de faibles écarts par rapport au modèle et ses valeurs prédites : ce sont des anomalies : ce sont elles qui apportent de précieuses informations pour comprendre le modèle thermique de la Terre : elles permettent aussi d'imaginer les mouvements de convection (mouvement de matière dans un solide sans mouvement visible à l'oeil nu) responsable du faible gradient géothermique (augmentation de température avec la profondeur) dans l'asthénosphère et le manteau inférieur. Les ondes arrivant plus tôt que prévu par le modèle PREM sont passées dans une zone où les ondes se propagent plus rapidement, interprétées comme plus denses que prévu et donc plus froides. Les ondes arrivant plus tard que prévu sont passées par une zone où les ondes se propagent plus lentement que prévu interprétées comme moins denses donc plus chaudes.

#### interprétations des anomalies de vitesse :

- $\Delta v > 0 \Rightarrow \Delta d > 0 \Rightarrow$  zone plus froide que prévue ( $\Delta T < 0$ ) : couleur bleue sur représentation pixelisée
- $\Delta v < 0 \Rightarrow \Delta d < 0 \Rightarrow$  zone plus chaude que prévue ( $\Delta T > 0$ ) : couleur rouge

- formée à partir des éléments tomo- (du grec «coupure») et -graphie («écriture»), la tomographie sismique nous permet d'**obtenir une image de l'intérieur de la planète grâce aux données fournies par les secousses sismiques générées lors des tremblements de terre**. Il existe 2 grandes catégories de tomographie : locale et régionale. La locale est plus précise et donne des informations sur une zone très localisée, souvent peu profonde autour d'une région d'activité sismique importante couverte par de très nombreux **sismographes**. Au contraire, la régionale s'intéresse aux phénomènes de plus grande profondeur et pour cela, exploite l'information obtenue lors de puissants et profonds séismes. La tomographie nécessite des instruments de mesure

Arrivées des ondes sismiques aux stations d'enregistrement ▲



<https://www.pedagogie.ac-nice.fr/svt/productions/tomographie2/> : application

[https://m.simplyscience.ch/terre-et-environnement-jeunes/articles/la-tomographie-sismique-ou-comment-observer-linterieur-de-la-terre.html?\\_locale=fr](https://m.simplyscience.ch/terre-et-environnement-jeunes/articles/la-tomographie-sismique-ou-comment-observer-linterieur-de-la-terre.html?_locale=fr)

très précis pour enregistrer les données et des outils de calculs performants car la quantité de données à analyser est gigantesque.

### les indices de mouvements horizontaux sont :

- [1/ LA REMONTÉE VERTICALE DE MATÉRIEL CHAUD](#) suggéré par la tomographie sismique ( $\Delta v < 0 \Rightarrow \Delta d < 0 \Rightarrow$  zone plus chaude que prévue ( $\Delta T > 0$ ): couleur rouge)
- au niveau des points chauds couplé à la détermination de l'âge des édifices volcaniques qui se forment à sa verticale montre des âges croissants à mesure qu'on s'en éloigne par radiochronologie absolue basées sur la désintégration radioactive d'atomes (isotope en un autre) selon une vitesse connue => voir vidéo exemple peut-être vu en 4è : archipel Hawaï- Empereur
- [2/ MOUVEMENTS PAR LA GÉODÉSIE SPATIALE ET CINÉMATIQUE BASÉE SUR LE GPS À PARTIR DES ANNÉES 90 ET AUTRES TECHNIQUES](#), laser aujourd'hui par ex, permet de construire des vecteurs au sein des plaques montrant leur mouvement relatif par rapport aux autres (aujourd'hui DORIS, 1990)

[HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=WOQPQBWDACQ](https://www.youtube.com/watch?v=WOQPQBWDACQ) : KEZAKO : PRINCIPE DU GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)

[HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=E79T5IPLDK](https://www.youtube.com/watch?v=E79T5IPLDK) : UN EXEMPLE, GALILÉO (EUROPE)

Science très ancienne, la **géodésie** a eu longtemps pour objet la mesure de la forme et des dimensions de la Terre. Depuis quelques décennies, la **géodésie** utilise les observations collectées par les satellites artificiels.

La **géodésie spatiale** et notamment le **système GPS** permet de quantifier le mouvement actuel des plaques (vecteurs vitesse). Grâce à des satellites, au mm près, des stations GPS au sol partout sur Terre sont utilisées. L'étude de la position d'une station sur plusieurs années permet de déterminer le sens et la vitesse du déplacement de la plaque sur laquelle elle se trouve. Les mesures par GPS indiquent une **vitesse absolue des plaques de l'ordre des cm.an<sup>-1</sup>**

Des stations dites GNSS fixes sont installées à différents endroits du globe comme en Islande. Le système GNSS est un réseau satellitaire européen (GALILEO), américain (GPS), mais aussi russe (GLONASS) et chinois (BEIDOU), en orbite à 20000 km, envoyant des signaux vers des récepteurs installés à la surface terrestre. Ils fournissent de précises informations sur la géolocalisation des récepteurs et ils fournissent de nombreuses mesures géodésiques (étude des formes et dimension de la Terre) des plaques. Dans un repère orthonormé sont reportées les valeurs des vitesses mesurées par le récepteur GNSS (en cm.an<sup>-1</sup>). La vitesse, le sens et la direction globale de déplacement de la plaque peuvent être définies, c'est-à-dire un vecteur vitesse.

Ainsi NUVEL 1 (1990) et MORVEL (2010) avec ses 25 plaques et microplaques le corrige à partir de données satellitaires.

**DORIS** : Les déplacements horizontaux des plaques tectoniques qui composent l'écorce terrestre ont longtemps été décrits par des modèles établis uniquement à partir d'observations géologiques sur les frontières de plaques. Le plus récent de ces modèles cinématiques, **NUVEL-1**, suppose que les plaques tectoniques sont rigides et que leurs vitesses de déplacement restent constantes sur plusieurs millions d'années (Ma). DORIS a permis de mesurer pour la première fois les mouvements relatifs de plusieurs plaques, notamment les plaques Afrique et Antarctique. L'accumulation des données dans les années à venir permettra d'affiner les résultats obtenus et de mesurer les vitesses d'autres stations avec la perspective de produire un modèle global des mouvements des plaques tectoniques uniquement basé sur la **géodésie spatiale**. D'autre part, plusieurs stations DORIS se trouvent à proximité de la frontière de deux plaques tectoniques, dans des zones dites " de déformation ". Le traitement des mesures issues de ces stations permet d'étudier les mouvements de ces zones, qui ne sont pas décrits par les modèles de plaques. Enfin, des travaux récents du GRGS ont montré l'intérêt de DORIS pour la mesure des déplacements verticaux des stations.

**LE SYSTEME DORIS** : <https://eduscol.education.fr/localisation/pedago/geologie/DORIS.htm>  
<https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/climatologie-doris-geometre-espace-22417/>  
[https://videothèque.cnes.fr/index.php?urlaction=doc&id\\_doc=14922&rang=1](https://videothèque.cnes.fr/index.php?urlaction=doc&id_doc=14922&rang=1)

cinématique déduite : les modèles historiques NUVEL, NUVEL 1-A & MORVEL

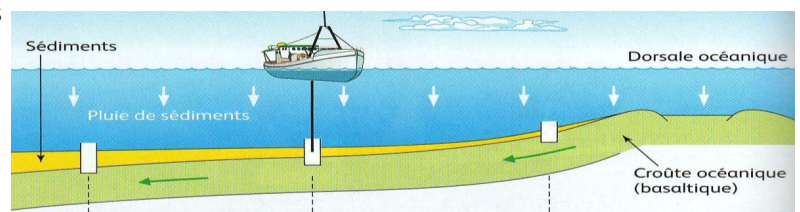
=> Google Earth et les points chauds : indices volcaniques de point chaud

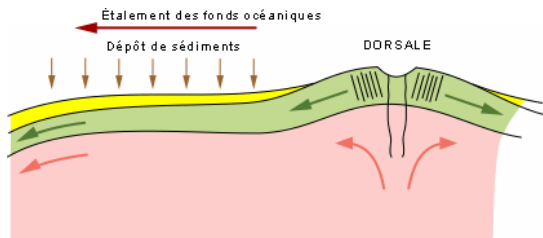
Les données de l'**océanographie** et de la **sismique** (science d'étude des séismes) ont permis de proposer des modèles décrivant le déplacement des plaques NUVEL1. Dans ces modèles, les mouvements relatifs aux frontières de plaques sont des mouvements de divergence dans le cas des dorsales, de convergence le long des fosses de subduction et dans les chaînes de montagnes, ou de coulisse le long des failles transformantes.

L'étude des alignements volcaniques intraplaques permet aussi de caractériser les mouvements des plaques par rapport à la position supposée fixe des points chauds.

Les techniques de positionnement par satellites (GPS) ou des mesures de distance par laser permettent enfin de caractériser le mouvement des plaques en temps réel et de calculer des vitesses de déplacement avec une grande précision.

Les mouvements et les vitesses ainsi déterminés confirment les mouvements et les vitesses prévus dans les modèles établis à partir de données géologiques





(NUVEL1 et mouvements dans le repère « points chauds »)

**La cinématique classique** décrit les mouvements des plaques lithosphériques essentiellement grâce aux données paléomagnétiques (enregistrement des champs magnétiques dus au oxydes de fer de l'olivine des basaltes de la croûte océanique des fonds)

**La cinématique instantanée**, fondée sur les données océaniques, s'appuie sur des données magnétiques qui remontent légèrement dans le passé.

Les cinématiciens ont établi des modèles de déplacement des plaques à l'aide de

formules mathématiques en prenant en compte des contraintes d'ordre varié : les vitesses d'ouverture aux dorsales connues par les anomalies magnétiques, les orientations des zones de fracture, les vecteurs glissement des séismes de subduction, etc.

Les données ne sont donc pas homogènes, mélangeant des moyennes sur plusieurs Ma d'un côté et de véritables instantanés de mouvements sismiques que sont les vecteurs glissement, de l'autre.

Le premier modèle de Le Pichon en 1968 avait 6 plaques, on a ensuite beaucoup utilisé le modèle de Minster et Jordan publié en 1978 à 11 plaques, puis le modèle NUVEL 1 par DeMets et coll. depuis 1990, jusqu'à ce que soit publié le modèle MORVEL à 25 plaques (2010).

Le modèle NUVEL 1 (1990) modélise 12 plaques dont les mouvements sont contraints de la façon suivante :

- **frontières divergentes** : vitesses d'expansion à partir de l'anomalie 2A sur 277 points répartis sur 16 frontières de type dorsale
- **frontières en coulissage** : détermination du pôle relatif de rotation entre 2 plaques par l'intersection des grands cercles perpendiculaires aux traces actives des failles transformantes
- **frontières convergentes** : les vecteurs glissement de 724 séismes majeurs ont été compilés.

En 1994, les auteurs de NUVEL proposent une légère révision du modèle 1, le **modèle NUVEL 1A**, en raison d'un recalage de l'anomalie 2A.

Le dernier né des modèles, **MORVEL**, publié en 2010 (DeMets, Gordon, Argus, etc.) signifie **Mid Oceanic Ridge Velocities**, en raison du poids important alloué aux dorsales : il prend en considération beaucoup plus de plaques que NUVEL et fonde les 3/4 des contraintes sur les anomalies magnétiques. L'Afrique est découpée en 3 « nouvelles » plaques, l'Amérique du Sud également ; les plaques **Caroline, Sundaland**, etc.

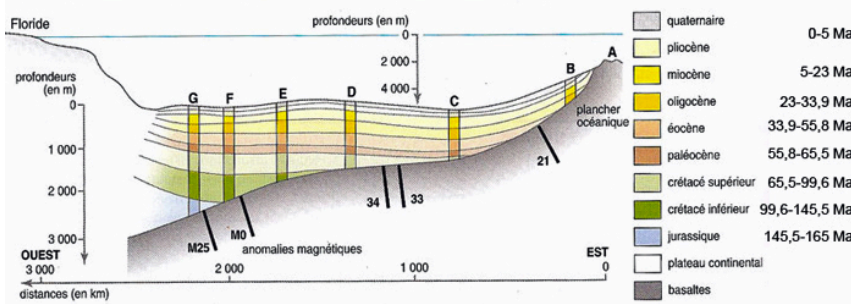
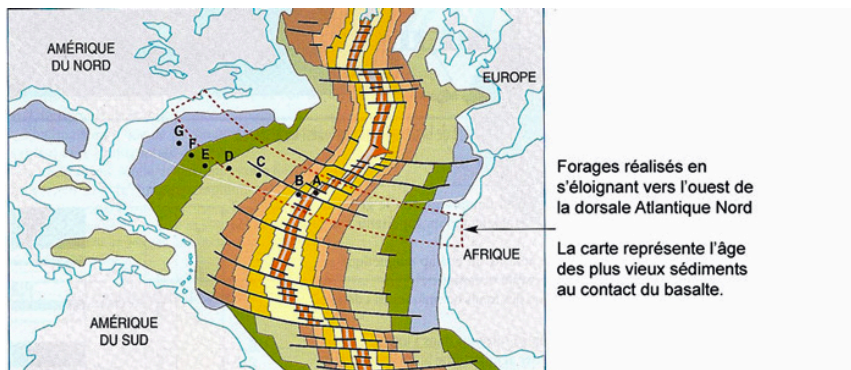
apparaissent. Les mouvements ainsi calculés décrivent 97% de la surface de la Terre. Les données magnétiques pour les taux d'ouverture et les azimuts des failles sont calculés pour 16 plaques majeures. On se sert des données GPS pour contraindre les mouvements des 5 plaques restantes. A la différence de NUVEL 1A, on utilise les anomalies pour les plaques rapides seulement jusqu'à 0.76 Ma. Il combine les déplacements indiqués par les données de NUVEL 1 et les données géodésiques actuelles satellitaires.

- ⇒ **Il y a une cohérence de grande fiabilité intégrée dans le modèle MORVEL (Mid Oceanic Ridge Velocities, 2010 à 2012) entre les estimations cinématiques par données GPS, de point chaud, les anomalies magnétiques, l'âge des sédiments reposant sur le plancher : les auteurs confirment que le postulat des plaques rigides reste très adapté pour décrire les mouvements horizontaux de la surface terrestre.**

**3/ L'ÂGE DES SÉDIMENTS DE FOND, EN S'ÉLOIGNANT DE PART ET D'AUTRE DE LA DORSALE, CROISSANT AU CONTACT DU PLANCHER BASALTIQUE DE LA CROÛTE OcéANIQUE DES FONDS OcéANIQUE (ATLANTIQUE, PACIFIQUE), DATÉS PAR PRINCIPE D'IDENTITÉ PALÉONTOLOGIQUE (PRINCIPE DE DATATION RELATIVE) PAR LEURS FOSSILES (FOND DES ABYSSES)**

**NB :** Un fossile est un reste ou une trace d'organisme conservée le plus souvent dans une roche sédimentaire. La fossilisation est un phénomène exceptionnel lié aux conditions de dépôt et de recouvrement des organismes et à l'histoire géologique future du milieu de dépôt. Un fossile stratigraphique est un excellent moyen de datation relative ; pour cela l'espèce concernée doit avoir une existence la plus courte possible, une relative abondance et une importante répartition géographique mondiale.

**appel :** dorsale : relief médio-océanique où sort la néocroûte océanique, magma issue de la fusion partielle d'une péridotite du manteau qui refroidit en sortant dans l'eau de mer à 4°C environ à près de 1200°C de part et d'autre de sa zone centrale (rift)



**4/ LA CONFIRMATION PAR LA MESURE D'ANOMALIES MAGNÉTIQUES SYMÉTRIQUES DE PART ET D'AUTRE DU RIFT DE LA DORSALE, MESURÉES DANS LES BASALTES OcéANIQUE RAPPROCHÉES D'AUTRES, CONTINENTAUX OÙ L'ÂGE DES ROCHES EST CONNU PAR LES DATES D'INVERSION DU CHAMP (PALÉOMAGNÉTISME DES MINÉRAUX FERROMAGNÉSIENS, FE2O3 HÉMATITE ET FE3O4, MAGNÉTITE, QUI ENREGISTRENT APRÈS LEUR REFFROIDISSEMENT LE CHAMP MAGNÉTIQUE GLOBAL, VOIR PLUS TARD, VINÉ ET MATTHEWS, USA, 1963)**

**BILAN I /**

La lithosphère terrestre est découpée en plaques animées de mouvements. Le mouvement des plaques, dans le passé et actuellement, peut être quantifié par différentes méthodes géologiques : études des anomalies magnétiques, mesures géodésiques, détermination de l'âge des roches par rapport à la dorsale, alignements volcaniques liés aux points chauds. La distinction de l'ensemble des indices géologiques et les mesures actuelles permettent d'identifier des zones de divergence et des zones de convergence aux caractéristiques géologiques différentes (marqueurs sismologiques, thermiques, pétrologique).