

## LE MODELE DE LA TECTONIQUE DES PLAQUES (depuis les années 60)

étude des anomalies magnétiques (**Vine & Matthews, 1963**) => confirmation de la théorie de l'expansion des fonds océaniques de **Hess (1962)** => puis nouvelles recherches => élaboration d'un modèle de la géodynamique interne de la planète : la théorie de la tectonique des plaques ou tectonique globale.

**étymologie tectonique** : du grec ancien ΤΕΚΤΩΝ (« charpentier ») avec le suffixe -ique

**notion de théorie scientifique** : modèle explicatif pour comprendre le Monde, dépassant les faits et permettant des prévisions testables.

**paradigme** : représentation du monde qui peut évoluer avec l'évolution des connaissances, modèle cohérent du monde qui repose sur un fondement défini (matrice, modèle théorique, courant de pensée)

étymologie du mot : παράδειγμα (paradeigma) en grec ancien qui signifie « modèle » ou « exemple » qui vient de παραδεικνύειν (paradeiknūnai) qui signifie « montrer », « comparer » construit sur δείκνυμι (deiknumi), « désigner »

**important : méthodologie : en géologie (et en biologie), ce sont les déviations, les variations par rapport à des valeurs standard des grandeurs physiques (densité, température, vitesse ...) qui apportent des informations, des indices, des idées, de nouveaux questionnements à résoudre et des interprétations : il faut donc privilégier leurs calculs sur une copie !!**

### QUELS SONT LES FONDEMENTS DE CETTE THÉORIE RÉCENTE ?

#### I / NAISSANCE D'UNE THÉORIE : LE 1<sup>ER</sup> MODÈLE D'UNE LITHOSPHERE DECOUPEE EN PLAQUES RIGIDES (XAVIER LE PICHON, FRANCE, 1968)

##### A / Le concept lithosphère / asthénosphère

**Acquis = Collège :**

#### 4<sup>e</sup> : Activité interne du globe terrestre

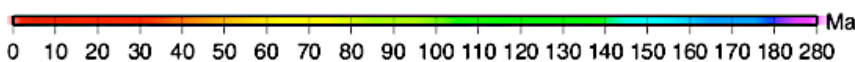
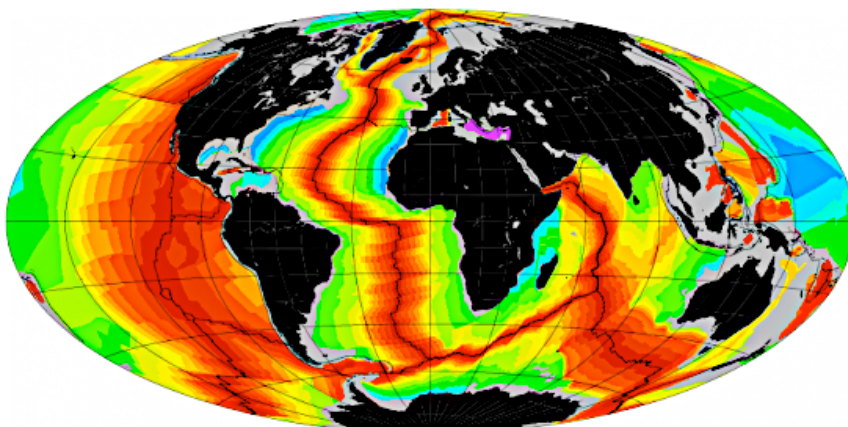
La répartition des séismes et des manifestations volcaniques permet de délimiter 12 plaques.

Les plaques sont mobiles les unes par rapport aux autres et leurs mouvements transforment la surface du globe.

À raison de quelques cm.an<sup>-1</sup>, les plaques s'écartent et se forment dans l'axe des dorsales. Elles se rapprochent et s'enfouissent au niveau des fosses océaniques.

**objectif** : retracer une partie du cheminement de Oliver, Isacks et Sykes à partir de 1964

⇒ distribuer planche rappel sur séismes



source: [planet-terre.ens-lyon.fr](http://planet-terre.ens-lyon.fr)

**Document d'appel :**

**Comment expliquer la carte ?**

**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 environ 4,03 Ga (gneiss d'Acasta, Canada). De plus, de la lithosphère océanique est continuellement produite au niveau des dorsales / **question** : cela signifie-t-il qu'il n'y avait pas d'océan existant avant le Jurassique ?? Nous savons que non.

## Comment expliquer l'âge de la lithosphère océanique ?

**hypothèse émise** : « la lithosphère de plus de 200 Ma a disparu par enfouissement dans l'asthénosphère »  
Vérifier cette hypothèse par des arguments scientifiques. Recherchons des indices explicatifs.

### 1/ l'apport de la sismique : le plan de Bénéioff en zone de subduction (1930-1955)

**rappels** : 4è : <http://www.biologieenflash.net/animation.php?ref=geo-0087-1>

séisme si et seulement si 1/ contraintes fortes accumulées en contexte rigide => 2/ seuil des contraintes franchi : rupture de roches en profondeur au niveau d'une faille souvent préexistante => 3/ lors de toute transformation, il y a conservation de l'énergie (1er principe de la thermodynamique), ce qui implique qu'une néoénergie ne peut provenir que de la conversion d'une autre forme préexistante : l'énergie des contraintes tectoniques est libérée en cette faille (hypocentre de projection en surface = épiceutre) sous forme de chaleur par frottement et de trains d'ondes sismiques élastiques dans toutes les directions

∃ 3 types de séismes :

- superficiels  $p < - 100$  km
- intermédiaires :  $-100$  km  $< p < - 400$  km
- profonds -  $400$  km  $< p < - 700$  km

### a/ mise en évidence

**Histoire des Sciences** :

**1935** : Wadati : en Asie, disposition des séismes profonds = près des fosses et particulière

**1949** : Bénéioff : idem en Amérique du Sud => les hypocentres près des fosses selon un plan incliné remarquable fosse => continent d'où le nom de plan de Wadati-Bénéioff

**1955** : Bénéioff : le fond océanique doit être entraîné dans les profondeurs sous les océans

**exemple** : la fosse bordant le Chili constitue une frontière entre une région océanique, dite de Nazca, et une région continentale, l'Amérique du Sud. Au niveau de la fosse, les séismes ne sont que superficiels, les foyers intermédiaires et profonds sont nettement décalés vers le continent et d'autant plus qu'ils sont profonds

**constat** : la répartition des séismes entre la fosse et la zone volcanique (essentiellement superficiels) près des fosses océaniques permet de distinguer un plan incliné d'inclinaison (= **pendage**) variable suivant les zones de subduction, matérialisé par les hypocentres intermédiaires ou profonds de ces séismes de - 100 jusqu'à - 700 km pour les plus profonds !!

Les séismes plus profonds augmentant avec l'éloignement de l'arc magmatique.

On a la même disposition des foyers pour toutes les fosses océaniques péri-Pacifique (Du Pacifique Ouest, comme celles des Mariannes)

### b/ interprétation

## Pourquoi y -a-t-il des séismes à plus de - 100 km de profondeur ?

> **p = - 50 km** : (pression, température) ne devraient pas permettre la rupture d'un matériau telle que séisme or ils vont jusqu'à atteindre environ - 700 km !! (à peu près - 670 km : limite manteau supérieur / inférieur)

comme asthénosphère = plastique, ductile, pas de rupture de roches en profondeur possible

=> **hypothèse** : existence d'une lithosphère rigide selon un certain plan à des profondeurs où normalement ∄

**raisonnement par l'absurde** : si lithosphère statique, devrait se réchauffer (milieu environnant plus chaud qu'elle) et perdre son identité rigide donc gagner en ductilité ou se désagréger : si sa propriété persiste (voir tomographies + étude  $\Delta v$  ondes sismiques), c'est qu'elle est renouvelée en permanence or nous avons vu qu'elle est créée au niveau des dorsales donc il existe des zones où disparition

**AU VOISINAGE DES FOSSES OCÉANIQUES, LA DISTRIBUTION SPATIALE DES FOYERS SISMIQUES S'ÉTABLIT SELON UN PLAN INCLINÉ REPÉRABLE JUSQU'À VERS - 700 KM NOMMÉ PLAN DE WADATI-BENIOFF, CE QUI TRADUIT UN ENFOUCEMENT LITHOSPHÉRIQUE DANS DES ZONES DITES DE SUBDUCTION. IL VARIE EN VALEUR SELON LA ZONE DE SUBDUCTION CONSIDÉRÉE : ON REMARQUE UN ALIGNEMENT VOLCANIQUE EN AVANT DE LA FOSSE ET AUSSI DES SÉISMES DANS LA PLAQUE CHEVAUCHÉE.**

**remarques** :

-1/ **vocabulaire** : distinguer plaque océanique plongeante = plaque subduite de la plaque chevauchante sous la quelle l'autre s'enfonce

-2/ le « pourquoi des séismes profonds ? » est toujours d'actualité (bien que l'on pense plutôt qu'ils seraient liés à l'existence de marges actives, quand une plaque glisse sous une autre lors d'une subduction) ainsi que sur leur type de mécanisme. Seul consensus actuel : existence d'une dépendance du mécanisme en fonction de la profondeur.

## 2/ quelques bases (années 60)

**déjà, 1933** : Holmes : séismes en profondeur = déjà associés à lithosphère dans le manteau puis Wadati (1935) et plus tard Carey (1953) / manteau = homogène, constitué de péridotite

<http://www.edumedia-sciences.com/fr/a89-les-3-types-d-ondes-sismiques>

**1964** : Jack Oliver, Bryan Isacks, et Lynn Sykes étudient les ondes P produites par un séisme profond dont l'épicentre se trouve à égale distance des stations sismiques Fidji et Tonga. Les ondes P directes parviennent 2 secondes plus tôt à la station Tonga (Vava'u) qu'à la station Fidji.

**constat** : étude d'un séisme profond (ondes P) ayant accusé un retard d'ondes : les ondes P directes parvenant 2 secondes plus tôt d'un côté à la station Tonga (Vava'u) qu'à la station Fidji pourtant équidistantes !

### Comment expliquer cela ?

**interprétations** : 1967 : sachant que la vitesse des ondes augmente quand la température du milieu traversé diminue, ils en déduisent que :

-1/ **la répartition des séismes se fait le long d'un plan incliné appelé plan de Wadatti-Benioff de 100 km d'épaisseur** or la croûte en fait bien moins de 2 à 10 fois - donc la lithosphère, unité froide et rigide, plonge dans une couche plus ductile (-rigide) et plus chaude nommée asthénosphère

-2/ **en plongeant, cette unité froide et cassante se fracture, ce qui occasionne les séismes**

⇒ **on retrouve bien l'existence de 2 couches telles que l'avait imaginé Wegener : une couche rigide reposant sur une plus plastique. Mais il pensait que la croûte continentale reposait sur une croûte océanique plastique or les études des  $\Delta$  vitesses des ondes sismiques montre une lithosphère au niveau des océans comme des continents reposant sur une asthénosphère plastique, ductile (solide étirable sans rupture).**

**constats :**

**années 60** : nombreuses mesures : précision de la vitesse des ondes P et S dans la partie superficielle du manteau

-100 km à - 300 km : ↘ v ondes S = zone à faible vitesse (LVZ en anglais : Low Velocity Zone)

> - 300 km : ↗ v ondes S à nouveau

**interprétations :**

- **100 km à - 300 km** : v ondes S due à changement d'état physique du milieu traversé : les ondes S ne traversant pas les milieux liquides, sont fortement ralenties en milieu ductile : cette **LVZ semble donc relativement ductile** en raison d'une fusion partielle (1%) des roches : en effet, les conditions de température et de pression à - 100 km= là où débute la fusion des roches mantelliennes (péridotites)

> - **300 km** : conditions pression / température telles que fusion partielle impossible : manteau solide => ↗ v ondes S à nouveau

V ondes > le long du plan de W-B que si éloignement => cette  $\Delta V$  ondes indique la présence de structures aux comportements mécaniques différents :

-1 **zone solide cassante au niveau du plan**

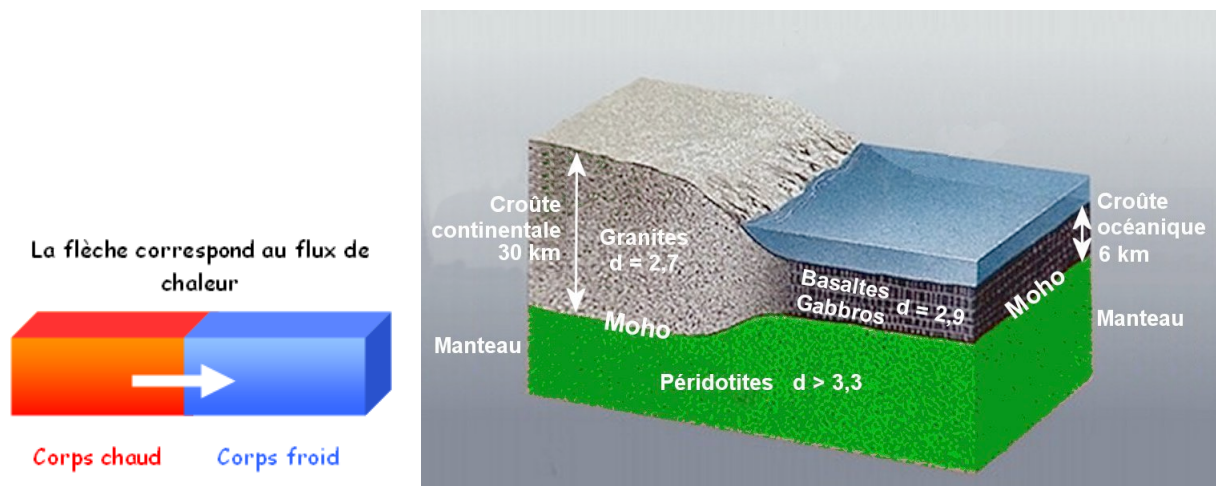
- **du matériel solide plus ductile autour**

⇒ **donc 2 zones aux propriétés physiques mécaniques différentes : 1 rigide, l'autre plus ductile, plastique**

⇒ la structure superficielle du globe à 2 grandes parties

	LITHOSPHERE	ASTHENOSPHERE
ÉTYMOLOGIE	du grec lithos = « pierre », la sphère de pierre	du grec asthenos, sans résistance
COMPOSITION	croûte terrestre + petite partie supérieure du manteau supérieur située sous le MOHO, de composition variable suivant sa nature (océanique ou continentale) subdivisée en plaques lithosphériques = plaques tectoniques	couche interne ductile partie du manteau supérieur sous la lithosphère et sous la mésosphère située à - 670 km çàd manteau supérieur sous-lithosphérique, d'épaisseur variable

	LITHOSPHERE	ASTHENOSPHERE
PROPRIÉTÉ	rigide, peut : - sous de fortes contraintes => rupture => séisme possible - sous de faibles contraintes : déformation et reprend sa forme initiale après => pas de séismes	ductile, plus plastique, capable de «fluer» sous de faibles contraintes => pas de rupture possible => pas de séismes possible
ÉPAISSEUR	70 km sous les océans / 120 à 150 sous les continents	limite inférieure : - 650 km



#### a/ ondes sismiques & structure verticale du globe

**discontinuité croûte / manteau = le Moho** : caractérisée par une variation nette de vitesse des ondes sismiques liée à un changement de composition chimique entraînant un changement de propriétés physiques entre la croûte et le manteau. Il se situe ici à environ -30 km en milieu continental et à environ -10 km en milieu océanique.

**après - 670 km** : une discontinuité entre le manteau supérieur et le manteau inférieur (ou mésosphère) qui se poursuit **jusqu'au noyau à -2900 km** où à nouveau de fortes  $\Delta v$  ondes sont constatées existe + notion de zone d'ombre :

<https://www.youtube.com/watch?v=Zb3NMzvwbiU>

pas d'ondes S car module de cisaillement = 0 dans les liquides or  $V_{\text{ondes S}} = \sqrt{\tau / \mu}$  avec  $\tau$  = : module de cisaillement /  $\mu$  : masse volumique du matériau traversé

zone d'ombre entre 103 et 140 ° pour les P, entre 103 et 180° pour les S directes (voir logiciel ondes P).

**idem à - 5100 km** : discontinuité de Lehmann : limite entre noyau externe liquide et graine

#### b/ ondes sismiques & lithosphère/ asthénosphère

Sous le Moho, au sein du manteau, la vitesse des ondes sismiques est d'abord constante jusque vers 100 km environ, ce qui traduit un milieu homogène. Les ondes P et S entrent ensuite dans une zone de faible vitesse ou LVZ (Low Velocity zone). Le sommet de la LVZ marque le début de l'asthénosphère et correspond à peu près à l'isotherme 1300°C. Au delà de la LVZ, la vitesse des ondes sismiques croît progressivement (car la densité du milieu croît de la même manière) jusqu'à 670 km.

#### c/ lithosphère continentale & océanique

- **manteau** : le manteau est péridotitique, qu'il soit lithosphérique (densité : 3,3) ou asthénosphérique (densité : > lithosphère), çàd composé de péridotite, une roche vert sombre à 90% composée des minéraux olivine et pyroxènes : ainsi, ce n'est pas une différence de propriétés chimiques qui distinguent lithosphère et asthénosphère mais physiques : le 1<sup>er</sup> est rigide, la 2<sup>e</sup> plus ductile, plastique

- **croûtes** :

TYPE	CONTINENTALE	OCÉANIQUE
NATURE	plus homogène	plus hétérogène

TYPE	CONTINENTALE	OCÉANIQUE
ÉPAISSEUR MOYENNE	35 km	7 km
COMPOSITION POUR PROFONDEUR ↗	<b>granitoïdes (granites et dérivés proches)</b> voir TS	<b>1/ sédiments</b> <b>2/ basaltes</b> (en coussins = pillow lavas sur 0,5 km, en filons sur 1,5 km), roches magmatiques issues de la solidification rapide et de la cristallisation partielle du magma en surface <b>3/ gabbros</b> (5 km en moyenne) issus d'une solidification plus lente et d'une cristallisation complète du magma en profondeur basaltes et gabbros ont la même composition minéralogique donc chimique (olivine, pyroxène, feldspath plagioclases)
DENSITÉ	2,7	2,9
ORIGINE	voir TS	à l'axe des dorsales par remontée de magma mantellique
BILAN	<b>croûte océanique et continentale = 2 entités différentes</b>	

### d asthénosphère > 3,3

**lithosphère et asthénosphère n'ont pas de différence majeure de composition chimique car la base de la lithosphère et le sommet de l'asthénosphère sont péridotitiques (à péridotites). Ce qui les distingue c'est, on l'a vu, leurs propriétés mécaniques : une lithosphère rigide cassante avec donc possibilité de séismes et une asthénosphère plus ductile, ne pouvant les générer => la lithosphère océanique est plus dense que la lithosphère continentale en raison des roches constitutives de leur croûte plus denses, ceci peut constituer un argument d'un déplacement vertical possible de la lithosphère océanique sous la continentale, voire d'un enfoncement. Pour qu'elle s'enfonce, il faut que sa densité dépasse celle de l'asthénosphère sous-jacente donc qu'elle s'élève.**

### Comment une densité d'un matériau peut s'élever en se déplaçant ?

#### hypothèses élèves :

- H1 : un épaissement engendre une prise de masse et son poids en N peut dépasser en valeur les forces opposées (résistances diverses, poussée d'Archimède)
- H2 : un refroidissement progressif en s'éloignant de la dorsale contracte le matériau qui devient plus dense

### 3/ une limite thermo-mécanique en zone de subduction

#### a/ une limite inférieure thermique

- **à l'aplomb de la zone volcanique** : flux thermique très élevé (peut atteindre > x 15 la valeur moyenne des autres régions du globe)
- **au niveau de la fosse océanique** : flux thermique faible (en W.m<sup>-2</sup>)
- **au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ces 2 zones** : il redevient moyen

La modélisation des **isothermes** (variations de température en profondeur) dans une zone de subduction montre des anomalies thermiques négatives : elles sont **déformées**, comme si une zone froide locale plongeait sans avoir le temps de s'équilibrer en température avec la zone plus chaude dans laquelle elle s'enfonce : elle refroidirait son environnement plus vite qu'elle ne se réchauffe en s'y enfonçant.

**géotherme** : sur un graphique, courbe représentant la température en fonction de la profondeur (ou de la pression)

**isotherme** : sur une carte ou sur une coupe, courbe joignant les points d'une surface qui sont à la même température

La capacité de déformation d'une roche est liée au rapport **T/T<sub>f</sub>** où T est la température de la roche et T<sub>f</sub> sa température de fusion. Plus ce rapport est proche de 1, et plus la roche est déformable.

< - 100km : R < 0,5 : cela signifie que la roche a un comportement cassant : c'est le domaine de la lithosphère.

> - 100 km : 0,5 < R < 1 : cela signifie que la roche a un comportement ductile : c'est le domaine de l'asthénosphère.

Dans les conditions de pression et de température de la lithosphère, les roches ont un comportement cassant et la chaleur se propage par conduction (sans mouvement de transfert) .

À partir de la LVZ (isotherme 1300 °C) les conditions de pression et de température sont voisines de celles nécessaires à la fusion commençante de la péridotite mantellique : les ondes sismiques y sont légèrement ralenties (LVZ), les roches à comportement ductile et la chaleur transmise par conduction mais aussi convection (avec cellules de transfert). Δ structure pétrographique résulte d'une Δ composition chimique entre croûtes (de composition basaltique OU granitique), manteau (formé de péridotites) et noyau. Δ structure géophysique repose, elle, sur une différence de comportement mécanique des roches. Les croûtes océanique et continentale et la partie supérieure du manteau supérieur (jusqu'à la LVZ), sont solidaires sur le plan mécanique et forment ensemble la lithosphère rigide et cassante. L'asthénosphère sous-jacente est constituée du reste du manteau supérieur et, bien que solide, se caractérise par sa ductilité.

**La convection est un transfert de chaleur par mouvement de matière. Les mouvements au sein du manteau sont lents (quelques cm.an-1) et affectent un SOLIDE (déformable) ⇒ voir aussi TS**

Les matériaux terrestres chauds et peu denses montent puis s'étalent à la surface de la Terre alors que les matériaux froids et denses s'enfoncent dans le manteau. C'est la gravité qui attire les masses les plus denses vers le bas. Ces dernières, en prenant la place des masses les moins denses, repoussent celles-ci vers le haut. A composition chimique, minéralogique et pétrologique homogènes, le manteau inférieur (-670 à -2900 km) ne présente de différence que de température. Les zones mantelliques rouges sont des masses de péridotite SOLIDES et CHAUDES, qui montent donc, alors que les zones lithosphériques bleues sont des masses de péridotite SOLIDES et FROIDES (avec un peu de croûte) qui descendent. Il ne s'agit en aucun cas de magma.

**1967 : NOM DE ZONES DE SUBDUCTION DONNÉ AUX ZONES OÙ FOSSE OCÉANIQUE + PLAN LITHOSPHÉRIQUE OCÉANIQUE S'ENFONÇANT DANS LE MANTEAU ASTHÉNOsphérique (LATIN : SUB = EN DESSOUS ; DUCERE = CONDUIRE ANGLAIS : SLAB : PANNEAU PLONGEANT )**

**AU NIVEAU D'UNE FOSSE OCÉANIQUE, LA LIMITE DE LA LITHOSPHÈRE EST D'ORDRE THERMIQUE VERS 1300°C .**

**- À L'APLOMB DE LA ZONE VOLCANIQUE : FLUX THERMIQUE TRÈS ÉLEVÉ**

**- AU NIVEAU DE LA FOSSE OCÉANIQUE : FLUX THERMIQUE FAIBLE**

**- ÉLOIGNEMENT PROGRESSIF DE CES 2 ZONES : REDEVIENT MOYEN**

**LES ISOTHERMES DANS UNE ZONE DE SUBDUCTION SONT DÉFORMÉES, COMME SI LA ZONE FROIDE PLONGEAIT SANS AVOIR LE TEMPS DE S'ÉQUILIBRER EN TEMPÉRATURE AVEC LA ZONE PLUS CHAUDE DANS LAQUELLE ELLE S'ENFONCE : LE RÉCHAUFFEMENT DE LA LITHOSPHÈRE EST LENT.**

v ondes P = f (température)

**AP # 17 Activité 2**

### **Pourquoi ce plongement lithosphérique ?**

ductilité du manteau à partir du géotherme 1300 °C qui marque la limite lithosphère/asthénosphère => ∃ déplacement, inflexion de la lithosphère océanique plongeant dans l'asthénosphère => ∃ fosse océanique sous lithosphère sus-jacente (océanique ou continentale). Comme la lithosphère plongeante est froide, rigide et cassante => apparition de nombreux foyers sismiques délimitant le plan de Wadati-Benioff

**La différence de température induit une modification de vitesse des ondes sismiques et constitue un indice de distinction entre la lithosphère et l'asthénosphère : la limite litho-sthénosphérique est thermo-mécanique.**

### **b/ l'apport de la tomographie sismique**

La tomographie sismique confirme l'existence d'une lithosphère rigide et froide, matérialisée par les zones d'anomalies de vitesse positive (v ondes S plus rapides que prévu) d'environ 100 km d'épaisseur (dix fois plus épaisse que la croûte océanique), qui s'enfonce dans une asthénosphère plus chaude et moins rigide qu'elle.

### **Pourquoi aucune lithosphère ne dépasse 200 Ma ?**

- A 25 Ma, la lithosphère s'enfonce spontanément : la densité de la lithosphère dépasse celle de l'asthénosphère (tableau)  
- dans les zones de subduction, des anomalies de vitesse positives observées dans un secteur de forme « plaque lithosphérique » sont observées : elles indiquent un matériau plus dense que prévu donc plus froid. (document tomographie sismique)

La tomographie sismique est basée sur la référence PREM (Preliminary Reference Earth Model), modèle radial de vitesse de propagation des ondes S et P depuis la surface jusqu'au centre de la Terre d'après Dziewonski et Anderson (1981). A partir de cette référence, les anomalies de vitesse de propagation des ondes sismiques enregistrées à différentes profondeurs du globe sont définies, c'est-à-dire les écarts entre les vitesses mesurées à partir de séismes et celles attendues prévues par ce modèle. Cette technique confirme l'existence d'une lithosphère rigide et froide d'environ 100 km d'épaisseur qui s'enfonce dans un matériau plus chaud, moins rigide, plus ductile en zone de subduction.

La densité de la lithosphère océanique (d = 3,0) à proximité de la dorsale est inférieure à celle de l'asthénosphère sous-jacente (d = 3,25). Quand la lithosphère océanique vieillit et atteint cet âge de 25 à 35 Ma , elle s'éloigne de la dorsale et sa température diminue de sorte que le géotherme 1300°C, qui marque la limite lithosphère asthénosphère, s'enfonce.

## Quelles causes ↗ densité lithosphère océanique ? Hypothèses ?

- ↘ température
- épaississement lithosphérique => incorporation matériel asthénosphérique plus dense qu'elle

### SCHÉMA-BILAN :

#### ouverture :

- sur la lithosphère constituée de plaques rigides, suite du cours
- approfondissement du phénomène de subduction en TS (les déformations tectoniques en compression : prisme d'accrétion, la genèse du magma par métamorphisme lié à un apport d'eau, volcanisme explosif de la plaque chevauchante)

#### remarque :

asthénosphère = plus « molle » que lithosphère mais solide => exerce très grande résistance mécanique ralentissant considérablement l'enfoncement de la lithosphère en subduction.

- quand âge litho > 35 Ma :  $d_{\text{litho}} > d_{\text{astheno}}$  => tendance plongement spontané dans celle-ci mais pas systématique car rigide
- quand âge litho oc > 180 Ma :  $d_{\text{litho}}$  telle que forces de gravité l'entraînent obligatoirement dans l'asthénosphère.

↗ ÉLOIGNEMENT DORSALE => ↗ ÂGE DE LA LITHOSPHÈRE AUGMENTE => ↘ TEMPÉRATURE (REFROIDISSEMENT PROGRESSIF ET ↘ FLUX THERMIQUE) => CONTRACTION THERMIQUE => ↗ DENSITÉ + ↗ ÉPAISSEUR (CONTRACTION THERMIQUE + ↗ DE CELLE DES SEDIMENTS SUS-JACENTS) +OR ↗ DENSITÉ TELLE QUE  $d_{\text{LITHO}} > d_{\text{ASTHÉNO}}$  => ENFONCEMENT PROGRESSIF LITHOSPHÈRE OCÉANIQUE FROIDE, DENSE ET ÉPAISSE DANS UNE COUCHE SOUS-JACENTE ASTHÉNOsphérique PLUS DUCTILE ET CHAUDE => ∃ LIMITE LITHOSPHÈRE / ASTHÉNOsphère THERMO-MÉCANIQUE (ISOTHERME 1300°C)

AU VOISINAGE DES FOSSES OCÉANQUES, LA DISTRIBUTION SPATIALE DES FOYERS (HYPOCENTRES) DES SÉISMES EN FONCTION DE LEUR PROFONDEUR S'ÉTABLIT SELON UN PLAN INCLINÉ APPELÉ WADATI-BÉNIOFF  
LES DIFFÉRENCES DE VITESSE DES ONDES SISMiques PAR RAPPORT AU MODELE PREM QUI SE PROPAGENT LE LONG DE CE PLAN, PAR RAPPORT À CELLES QUI S'EN ÉCARTENT, PERMETTENT DE DISTINGUER : LA LITHOSPHÈRE ( $\Delta V > 0$ ) DE L'ASTHÉNOsphère ( $\Delta V < 0$ )  
L'INTERPRÉTATION DE CES DONNÉES SISMiques (DU PLUS RAPIDE QUE PRÉVU EST DU MOINS DENSE DONC PLUS CHAUD ET INVERSEMENT) PERMET DE MONTRER QUE LA LITHOSPHÈRE S'ENFONCE DANS LE MANTEAU AU NIVEAU DES FOSSES DITES DE SUBDUCTION.  
LA LIMITE INFÉRIEURE DE LA LITHOSPHÈRE CORRESPOND GÉNÉRALEMENT À L'ISOTHERME 1300° C,  
- LE MODÈLE DE LA TECTONIQUE DES PLAQUES REPOSE SUR LA DISTINCTION LITHOSPHÈRE / ASTHÉNOsphère  
- LA LITHOSPHÈRE EST UNE ENVELOPPE RIGIDE REPOSANT SUR L'ASTHÉNOsphère PLUS DUCTILE, PLUS PLASTIQUE : LA LIMITE ENTRE LES 2 N'EST PAS CHIMIQUE MAIS PHYSIQUE, THERMO-MÉCANIQUE MÊME  
- LA LITHOSPHÈRE OCÉANIQUE EST PLUS DENSE QUE LA LITHOSPHÈRE CONTINENTALE EN RAISON D'UNE CROÛTE PLUS DENSE, LEUR ÉPAISSEUR MANTELLIQUE ÉTANT COMPARABLE.

<http://www.biologieenflash.net/animation.php?ref=geo-0031-1>

## B/ un 1<sup>er</sup> modèle global

### 1/ l'apport de la sismique

#### a/ répartition mondiale des séismes

carte de la répartition mondiale des séismes (2000-2008)

**constats :** (leur demander)

3 zones principales d'activité sismique terrestre :

- les dorsales océaniques, où séismes superficiels ( $> 20$  km)
- la zone péri-Pacifique, surtout le long des fosses océaniques où séismes superficiels, intermédiaires ou profonds
- au sein des continents : des Alpes aux chaînes asiatiques, avec séismes superficiels ou intermédiaires

#### b/ une intense activité au niveau des fosses océaniques en zone de subduction

⇒ voir avant § plan de W-B

### 2/ des frontières inter-plaques (années 60)

### a/ en zone de divergence : les dorsales océaniques

une dorsale, longue structure géologique discontinue, formée de segments décalés les uns par rapport aux autres par des zones de fracture est telle que 2 types de limites existent entre plaques à son niveau :

- les segments de dorsale, zones de création de nouvelle lithosphère océanique depuis des matériaux asthénosphériques => écartement des plaques avec séismes superficiels
- les fractures joignant 2 segments, voir b/

### b/ en zone de coulissage : les failles transformantes

faille = fracture dans la lithosphère avec glissement des parties séparées

failles transformantes = limites inter-plaques lithosphériques des zones associées à des séismes superficiels où il n'y a ni subduction (enfouissement de lithosphère) ni accréation (création de lithosphère océanique à la dorsale). Elles découpent les dorsales perpendiculairement. Les frontières près de ce type de faille sont géologiquement actives (séismes, volcans...).

La faille transformante agit selon un mouvement de coulissage ce sont des arcs de cercle car tous les mouvements de plaques lithosphériques sont des rotations (conformément au théorème d'Euler), des coulissements entre 2 plaques. Tous les 200 à 300 km, ces failles décalent l'axe de la dorsale. Seules les zones qui séparent 2 axes subissent une sismicité importante, en raison du déplacement en sens contraire de leur portion de lithosphère.

terme créé en 1965 par John Tuzo Wilson dans Nature : appliqué à toutes les failles décrochantes reliant 2 autres types de structure (2 segments de dorsales, une dorsale et un arc insulaire, etc.), donc au niveau desquelles "le mouvement s'arrête soudainement ou change de forme et de direction" dit-il. Parmi ces failles, il décrit les transformantes reliant 2 segments de dorsales, des "failles cisailantes horizontales qui se terminent abruptement à chaque bout mais peuvent néanmoins montrer de grands déplacements. Chacune peut être conçue comme une paire de demi-cisaillements jointes par leurs extrémités". Il prend l'exemple Atlantique qui donnent l'apparence d'un décalage senestre (vers la gauche) des segments de dorsale, mais en réalité à des failles à mouvement dextre (vers la droite). C'est à ce type de faille que l'on restreint aujourd'hui le qualificatif de « transformante ». La plus célèbre est celle de San-Andreas, en fait ensemble de failles transformantes assurant le coulissage de la plaque Pacifique contre la Nord Américaine. Certains auteurs considèrent qu'il s'agit de décrochement ou « faille décrochante ».

### c/ en zone de convergence : les fosses océaniques de subduction

zones de disparition d'une lithosphère de plaque sous une autre d'une autre plaque qui la chevauche, par plongement asthénosphérique : nombreux séismes superficiels, intermédiaires mais aussi profonds = associés.

### Bilan :

1968 : XAVIER LE PICHON, FRANCE PROPOSE L'EXISTENCE DE 6 PLAQUES DE FRONTIÈRES DÉPENDANT DE LEUR ACTIVITÉ TECTONIQUE AVEC CALCULS DES MOUVEMENTS RELATIFS DE CES PLAQUES (LES UNES PAR RAPPORT AUX AUTRES). IL EN EXISTE 3 TYPES : DIVERGENCE (DORSALES), DÉCROCHEMENT (FAILLES TRANSFORMANTES), CONVERGENCE (SUBDUCTION)

=> INTRODUCTION CETTE MÊME ANNÉE DU TERME THÉORIE DE LA TECTONIQUE DES PLAQUES

## II / CONSOLIDATION DE LA THÉORIE : LE RENFORCEMENT DU MODÈLE D'UNE EXPANSION Océanique (ANNÉES 70 - 80)

### A / L'apport du volcanisme intra-plaque : les points chauds (années 60 & 70)

[http://www.notre-planete.info/terre/risques\\_naturels/volcanisme/points\\_chauds.php](http://www.notre-planete.info/terre/risques_naturels/volcanisme/points_chauds.php)

<http://raymond.rodriquez1.free.fr/Documents/Terre-int/hawaii5.swf>

Il existe un volcanisme intra-plaque (voir carte mondiale), tant continental qu'océanique, éloigné des frontières de plaques

**ex :** cas de l'archipel volcanique des îles Hawaï, prolongé par les monts de l'Empereur dans l'Océan Pacifique

La datation des volcans indique que leur âge augmente quand on s'éloigne d'Hawaï, les volcans de l'Empereur étant les plus anciens.

**hypothèse :** existence de points chauds dans le manteau, situés profondément où du magma remonte depuis - 2900 km limite manteau/noyau (petite couche D" au-dessus), traverse la lithosphère et donne naissance à des volcans => anglais : hot spots. Le point chaud du volcanisme hawaïen est actuellement situé au-dessous de ces îles : sa position est fixe depuis 80 Ma.

Certains pensent qu'ils ne sont pas si fixes mais cette fixité sert de référentiel pour mesurer des déplacements de plaques, le meilleur restant les étoiles du ciel (quasars).

=> c'est le déplacement de la plaque Pacifique au-dessus de ce point chaud qui engendre la chaîne volcanique hawaïenne observée. L'alignement des volcans n'est aujourd'hui plus considéré comme la conséquence du déplacement de la plaque lithosphérique : leur écartement fournit un moyen de calculer la vitesse de déplacement de la plaque :  $d = v t \Rightarrow v = d / \Delta t$  où  $\Delta t$  = différence d'âge entre les 2 volcans, d la distance qui les sépare. On trouve là-bas des vitesses de 8 à 10 cm.an<sup>-1</sup>



**NB** : la différence d'orientation entre certains volcans d'une chaîne et les autres révèle un changement de direction du déplacement de la plaque que l'on peut donc dater : cela s'est produit il y a 40 Ma entre la chaîne volcanique hawaïenne et celle des monts de l'Empereur.

**On a remarqué que ces vitesses sont proches de celles trouvées depuis les anomalies magnétiques : cette concordance confirme la réalité de la mobilité horizontale des plaques lithosphériques sur le Globe.**

Les panaches sont des remontées A L'ETAT SOLIDE, de manteau inférieur chaud ; ils se manifestent en surface par des anomalies thermiques positives (« points chauds » appelés aussi « hot spots ») et topographiques (soulèvement de la lithosphère)

## B/ l'apport des prospections sous-marines : forages & âge des sédiments océaniques (voir chapitre précédent)

## C/ l'apport de la géodésie : le GPS (depuis les années 80)

**GPS = Global Positioning System**, système de positionnement par satellite

2010 : 31 satellites > + 20 000 km du niveau de la mer / 4 visibles en permanence en chaque point du globe

<http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dossiers/d/physique-topographie-decouvrir-fonctionnement-gps-504/page/2/>

[http://www.canal-u.tv/video/tele2sciences/comment\\_fonctionne\\_un\\_gps.12297](http://www.canal-u.tv/video/tele2sciences/comment_fonctionne_un_gps.12297)

**principe** : émission de signaux captés par des récepteurs au sol tel que connaissance précise de l'emplacement d'un point (longitude, latitude, altitude)

**précision maximale** : x mm

**utilisations** :

- faire des cartes sur l'écran dans la voiture en temps réel et calculer des itinéraires
- évaluer les vitesses instantanées de plaques pour un accord avec des données géologiques (âge des sédiments / plancher océanique) donc des vecteurs vitesse

**Les vecteurs vitesses de déplacement sont du même ordre de grandeur que celles calculées à partir des anomalies magnétiques et des points chauds** : elles sont plus importantes au niveau du Pacifique que dans l'Atlantique.

Les stations PAMA et HILLO, dans la plaque Pacifique se déplaçant à même vitesse et dans la même direction (ESE-NNW) que celle de l'alignement des volcans hawaïens, cela montre que la plaque Pacifique se comporte, comme toute autre plaque lithosphérique, comme un bloc rigide. Toute mesure dans l'Atlantique Nord montre un éloignement Europe / Amérique du Nord, confirmant ainsi la dérive des continents wegenerienne, entraînée par l'expansion des fonds océaniques (Hess, 1962)

## III / L' EVOLUTION ACTUELLE DE LA THEORIE : LE RENOUVELLEMENT DE LA LITHOSPHERE OCEANIQUE

### A / Les magmas des zones d'accrétion : nature & origine

<http://www.biologieenflash.net/animation.php?ref=geo-0014-1>

**1/ données sismiques** : ∃ zone où magma basaltique, à qqes km sous l'axe de la dorsale, appelée chambre magmatique

**2/ tomographie sismique** : anomalies de vitesse des ondes sismiques < 0 : traversée d'un matériau moins dense que prévu, plus ductile => plus chaud que prévu => peut indiquer aussi zone magmatique sous l'axe de la dorsale

**3/ - 50 à -100 km sous la dorsale : conditions de fusion partielle de la péridotite réalisées** mais conditions de fusion totale non atteintes. Sous les dorsales, l'isotherme 1300°C est à une profondeur inférieure à la normale : la lithosphère = peu épaisse et la limite supérieure de l'asthénosphère est à une faible profondeur.

Les péridotites asthénosphériques sont soumises à un mouvement ascensionnel par décompression adiabatique (diminution de pression à température constante) car l'asthénosphère remonte du matériel plus chaud que le manteau autour avec transfert de chaleur du à un phénomène de convection.

**en laboratoire** : une péridotite à - 160 km = encore solide or à - 80 km, 1300°C sont atteints d'après le géotherme de dorsale donc début de fusion partielle (5 à 15%) : le liquide formé forme un magma «bouillie cristalline»

Le liquide magmatique de composition basaltique remonte dans la chambre magmatique à quelques km de profondeur, s'y refroidit, ce qui entraîne la cristallisation d'une partie du magma : en 1er se forment les cristaux d'olivine, puis de pyroxène et enfin ceux de plagioclases (en fonction de la température) : c'est le processus de la cristallisation fractionnée : mélange de cristaux et de liquide = bouillie cristalline. Les dorsales sont le siège d'une production magmatique de **20 km<sup>3</sup>.an<sup>-1</sup>**

### B/ Evolution de ces magmas

La péridotite initiale fond partiellement, le liquide résiduel ayant une composition différente de celle-ci. Le magma basaltique formé a la même composition chimique que le liquide de fusion dont il provient.

La roche péridotitique résiduelle, partie non fondue de la péridotite initiale, n'a pas la même composition que cette dernière : elle constitue le nouveau manteau lithosphérique océanique.

**Au niveau des dorsales se crée la lithosphère océanique dont la structure est liée au fonctionnement de la chambre magmatique : la fusion partielle des péridotites de l'asthénosphère sous l'effet de la baisse de la pression à température constante entraîne la création d'un magma acide. Les cristaux qui se forment dans la chambre magmatique formeront les gabbros et les magmas basaltiques remontant vers la surface et se refroidissant ainsi rapidement. Se formera aussi le complexe filonien et la couche de basalte à la surface de la croûte océanique. Il reste sous les gabbros la péridotite résiduelle appauvrie des ses éléments partis dans le magma : elle est extrêmement basique, hydratée, serpentinisée elle formera le manteau de la lithosphère océanique. La lithosphère océanique se transforme en vieillissant. La circulation hydrothermale l'hydrate. Elle se refroidit à son contact et donc s'épaissit par contraction.**

[http://www.youtube.com/watch?v=8ly6gVMXR8&feature=em-subst\\_digest](http://www.youtube.com/watch?v=8ly6gVMXR8&feature=em-subst_digest)

**BILAN : LES NOUVEAU APPORTS ACTUELS EN GÉOSCIENCES AUJOURD'HUI, EN 2017, DOIVENT S'INSCRIRE DANS L'ACCORD AVEC LE CADRE DE LA FAMEUSE THÉORIE SCIENTIFIQUE EN COURS DE LA TECTONIQUE DES PLAQUES, UNIVERSELLEMENT RECONNUE GLOBALEMENT ET REPOSANT SUR QUELQUES FONDEMENTS :**

- 1 / À L'APLOMB DE L'AXE DES DORSALES, IL Y A CRÉATION DE LITHOSPHÈRE OCÉANIQUE :

UNE LITHOSPHÈRE OCÉANIQUE AMINCIÉ, PLUS CHAUDE AVEC ARRIVÉE DE NOUVEAUX MATÉRIAUX D'ORIGINE ASTHÉNSPHÉRIQUE REMONTANTE EST CRÉÉE, S'ACCOMPAGNANT AVEC UN ÉLOIGNEMENT PROGRESSIF DE PART ET D'AUTRE DE LA DORSALE DE CES NÉOBASALTES ET GABBROS À PARTIR D'UN MAGMA ASTHÉNSPHÉRIQUE : 1/  $\Delta P$  ET/OU  $\Delta \theta$  => 2/ FUSION PARTIELLE PÉRIDOTITIQUE DE L'ASTHÉNSPHÈRE AU NIVEAU DES DORSALES + TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION => 3/ OR LA TEMPÉRATURE DES PÉRIDOTITES EST CONSTANTE CAR INERTIE DES ÉCHANGES DE CHALEUR AVEC L'ENCAISSANT PLUS FROID DONC ON A UNE REMONTÉE ADIABATIQUE (SANS ÉCHANGES DE CHALEUR AVEC LES ROCHES AUTOUR) AVEC DÉCOMPRESSION => ON PARLE DE FUSION PARTIELLE D'UN MAGMA PAR DÉCOMPRESSION ADIABATIQUE => 4/ ON OBTIENT UN RÉSIDU SOLIDE (PÉRIDOTITE RÉSIDUELLE) + UN LIQUIDE EN FUSION DE COMPOSITION CHANGEANTE OÙ ONT MIGRÉ PRÉFÉRENTIELLEMENT LES ÉLÉMENTS ATOMIQUES LES PLUS SOLUBLES DANS LE MAGMA => CETTE NÉOLITHOSPHÈRE OCÉANIQUE FORMÉE PAR REFROIDISSEMENT DU MAGMA PEUT ÊTRE DE 2 GRANDS TYPES :

- REFROIDISSEMENT RAPIDE => À BASALTE À OLIVINE, PYROXÈNES ET FELDSPATHS PLAGIOCLASES + VERRE (MICROLITES DANS UN VERRE), C'EST-À-DIRE QUE LES ÉLÉMENTS N'AYANT PAS EU LE TEMPS DE CRISTALLISER DONC D'OCCUPER DE LA PLACE FORMENT DES BAGUETTES OU UNE PÂTE AMORPHE (VERRE)
- REFROIDISSEMENT LENT => À GABBROS À MÊME COMPOSITION CHIMIQUE MAIS À MACROCRISTAUX, C'EST-À-DIRE QUE LES ÉLÉMENTS ONT EU LE TEMPS DE BIEN CRISTALLISER DONC D'OCCUPER DE LA PLACE, D'AVOIR UNE BIEN PLUS GRANDE TAILLE, BIEN INDIVIDUALISÉS

- 2 / EN ZONE DE CONVERGENCE LITHOSPHÉRIQUE TYPE SUBDUCTION, IL Y A DISPARITION DE LITHOSPHÈRE OCÉANIQUE :

LES DONNÉES TOMOGRAPHIQUES CONFIRMENT UNE PLONGÉE DE LA LITHOSPHÈRE OCÉANIQUE FROIDE, ÂGÉE, DANS L'ASTHÉNSPHÈRE JUSQUE PARFOIS TRÈS PROFONDÉMENT SANS FUSION TOTALE (JUSQU'À - 2900KM, INTERFACE MANTEAU / NOYAU, DISCONTINUITÉ DE GUTENBERG / ZONE D")

A / LA LITHOSPHÈRE BOUGE : SI ELLE ÉTAIT STATIQUE, ELLE SE RÉCHAUFFERAIT À CES PROFONDEURS ET PERDRAIT SON IDENTITÉ OU SE DÉSAGRÈGERAIT OR NON DONC LA PRODUCTION COMPENSE LE MOUVEMENT DE DISPARITION DE CETTE LITHOSPHÈRE

B / LA LITHOSPHÈRE PLONGE DANS LE MANTEAU SOUS-JACENT ASTHÉNSPHÉRIQUE

- SÉISMES > - 100 KM, À - 100 À - 150 KM => À DES PROFONDEURS INATTENDUES : CELA SIGNE LA PRÉSENCE D'UN ENSEMBLE RIGIDE À CES PROFONDEURS DONC UNE LITHOSPHÈRE PLONGEANTE DANS LE MANTEAU SOUS-JACENT ASTHÉNOsphérique
- LA DENSITÉ LITHOSPHÈRE EST > À CELLE DE L'ASTHÉNOsphÈRE AU NIVEAU DES FOSSES, CE QUI INITIE UN ENFONCEMENT PAR SUBSIDENCE SOUS SON PROPRE POIDS AU MILIEU D'UNE ASTHÉNOsphÈRE DUCTILE : P > F DE PRESSION D'ARCHIMÈDE

### C / LA LITHOSPHÈRE EST DENSE

LES  $\Delta V$  ONDES SISMQUES (ANOMALIES POSITIVES : TRAVERSEE DES ONDES PLUS RAPIDES QUE PRÉVU) SUGGÈRENT LA TRAVERSÉE D'UN MATÉRIEL PLUS DENSE QU'ATTENDU (PAR LE MODÈLE PREM) INTERPRÉTÉ COMME UN MATÉRIEL PLUS FROID QUE CE QU'ON ATTEND DONC UNE LITHOSPHÈRE PLONGEANTE (PANNEAU)

### D / LA LITHOSPHÈRE EST FROIDE

- LES ANOMALIES NÉGATIVES DES ISOTHERMES AUTOUR DU PANNEAU PLONGEANT LE CONFIRMENT (ELLES DESCENDENT LOCALEMENT PLUS BAS QU'ATTENDU) : CELA SUGGÈRE LA PRÉSENCE D'UN MATÉRIEL PLUS FROID QUE SON ENVIRONNEMENT ET QUI SE RÉCHAUFFE MOINS VITE EN PLONGEANT QU'IL NE REFROIDIT SON ENCAISSANT (ROCHES AUTOUR)
- LES DONNÉES DE TOMOGRAPHIE SISMQUE MONTRENT QUE LES  $\Delta V$  ONDES SISMQUES SONT > 0 AU NIVEAU DU PANNEAU PLONGEANT, CE QUI SUGGÈRE LA TRAVERSÉE D'UN MATÉRIEL PLUS DENSE QUE PRÉVU ET DONC AUSSI INTERPRÉTÉ COMME PLUS FROID QUE PRÉVU => MÊME CONCLUSION QUE A/. AINSI, DES MOUVEMENTS VERTICAUX ENGENDRENT UNE MOBILITÉ HORIZONTALE !

### DONC

LA THÉORIE DE LA TECTONIQUE DES PLAQUES CONSIDÈRE LA PARTIE SUPERFICIELLE DE LA TERRE OU LITHOSPHÈRE (CROÛTE + PETITE PARTIE DU MANTEAU SUPÉRIEUR) RIGIDE DÉCOUPÉE EN PLAQUES LITHOSPHÉRIQUES QUI SE DÉPLACENT SUR L'ASTHÉNOsphÈRE SOLIDE MAIS MOINS RIGIDE (PLUS DUCTILE, MALLÉABLE, PLASTIQUE).

LES MOUVEMENTS DES PLAQUES :

- PERMETTENT DE PRÉVOIR LES ZONES À RISQUES SISMQUES ET VOLCANIQUES
- S'EXPLIQUENT PAR LA DISSIPATION DE L'ÉNERGIE THERMIQUE INTERNE

<http://prezi.com/kvuetcs1cbnw/la-tectonique-des-plaques-un-modele-qui-senrichit/>

[http://www.youtube.com/watch?v=K91\\_9YtK0bI](http://www.youtube.com/watch?v=K91_9YtK0bI)

<http://www.biologieenflash.net/geo/flash/0024.swf>

<http://www.svtotonou.com/medias/files/accretion-subduction-1.swf>

[http://www.canal-u.tv/video/universite\\_de\\_tous\\_les\\_savoirs\\_au\\_lycee/la\\_tectonique\\_des\\_plaques\\_emmanuel\\_tric.4181](http://www.canal-u.tv/video/universite_de_tous_les_savoirs_au_lycee/la_tectonique_des_plaques_emmanuel_tric.4181)

**Ouverture (TS) : Quel est le moteur de la tectonique des plaques ? => Partie 1B**