

CORRIGÉ DU DST # 1

EXERCICE 1 : ROC : RESTITUTION ORGANISÉE DE CONNAISSANCES

BARÈME

Organisation cohérente par rapport à la question posée	Organisation cohérente mais maladroite. (Des maladresses toutes les grandes idées sont présentes dans le devoir)		Organisation insuffisamment cohérente par rapport à la question posée. (La question n'est que partiellement traitée, toutes les grandes idées ne sont pas présentes)		Réponse incohérente par son organisation ou son contenu. (La question n'est pas traitée, l'élève récite son cours sans lien avec la question).							
Des connaissances et des éléments argumentatifs (expériences, observations, ...) complets et exacts (issus ou non du ou des documents ²) et bien mis en relation	Des connaissances et des éléments argumentatifs (expériences, observations, ...) complets et exacts (issus ou non du ou des documents ²) mais maladroitement mis en relation	Des connaissances et des éléments argumentatifs (expériences, observations, ...) incomplets et exacts (issus ou non du ou des documents ²)	Des connaissances et des éléments argumentatifs (expériences, observations, ...) (issus ou non du ou des documents ²) incomplets mais exacts	Des connaissances et des éléments argumentatifs (expériences, observations, ...) (issus ou non du ou des documents ²) incomplets et avec des erreurs³	Quelques rares connaissances et éléments argumentatifs (expériences, observations, ...) exacts (issus ou non du ou des documents ²)	Aucun élément pour répondre à la question						
10	9	8	7	7	6	5	4	3	2	2	1	0

La qualité de communication permet de discriminer les points attribués (7 ou 8 par exemple).

L'existence admise de mouvements verticaux impliquait pour Wegener dès 1912 une dérive continentale lente, c'est-à-dire nécessairement aussi des mouvements horizontaux puisqu'il considérait les continents flottant au-dessus d'une couche plus fluide. Nous savons depuis que toute la lithosphère dérive et non juste la croûte continentale. Elle correspond aux désormais 25 plaques du globe du modèle MORVEL depuis la 1ère carte de Xavier le Pichon qui en dessina 6 en 1968 : de la croûte tantôt granitoïdique continentale d'environ 35 km d'épaisseur moyenne ou océanique basaltique / gabbroïque (6 à 12 km) et la partie la plus supérieure au-delà du MOHO du manteau supérieur, rigide, jusque vers - 100km à la limite thermique 1200-1300°C avec l'asthénosphère. Leur mobilité est attestée par différents indices empruntés à la sismique, le volcanisme de point chaud, les anomalies paléomagnétiques, la géodésie satellitaire jusqu'à une intégration dans le modèle MORVEL (2010 à 2012) succédant au modèle NUVEL1-A (à partir de 1990) présenté dans le document fourni.

EN QUOI LES PROGRÈS TECHNIQUES PROGRESSIFS ONT-IL APPORTÉ QUELQUE CHOSE À LA CONSTRUCTION PROGRESSIVE DE CE MODÈLE AU COURS DU TEMPS ?

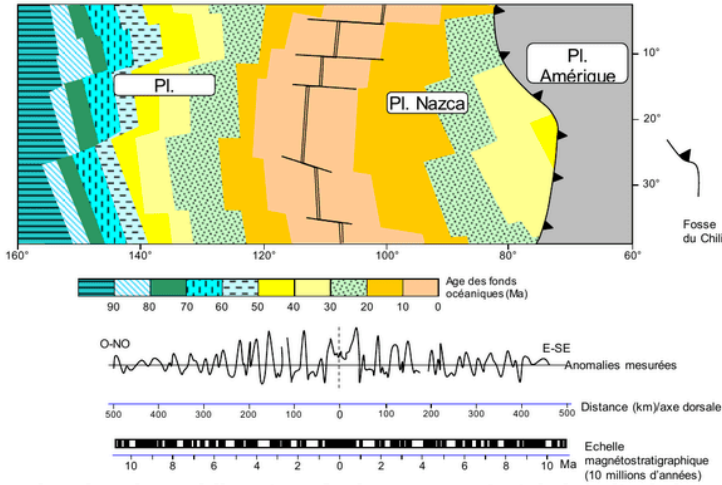
Même si nos sens ne perçoivent pas les mouvements lithosphériques en raison de l'heure échelle temporelle (des mm à cm.an-1), nous disposons donc d'arguments scientifiques pour l'étayer. Voyons-en les grandes lignes

I / APPORT DE LA SÉDIMENTOLOGIE PAR L'ÉTUDE DES FONDS OCÉANIQUES (BATHYMÉTRIE)

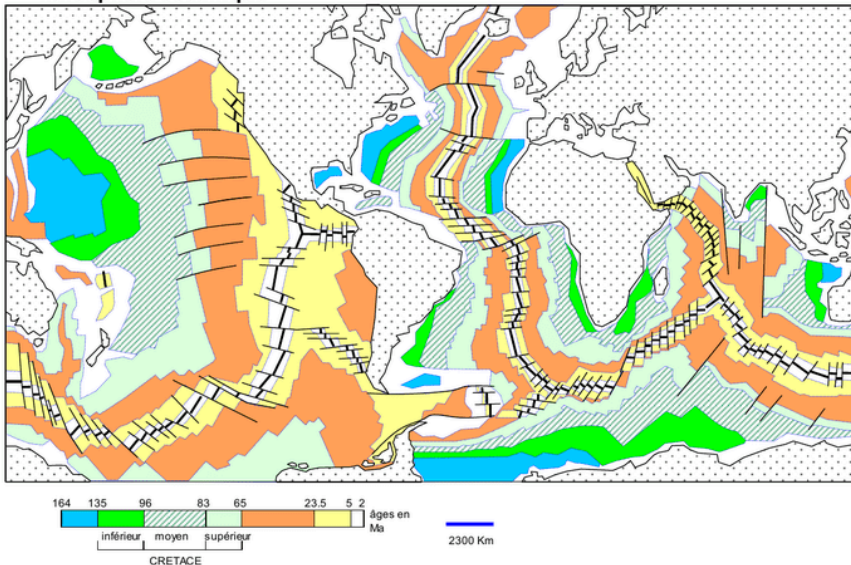
Après la seconde guerre mondiale, des forages ont estimé de manière indirecte l'âge du plancher océanique (croûte basaltique) par la couche de sédiments immédiatement supérieure (principe de superposition des couches et d'identité paléontologique avec les fossiles contenus permettant leur datation) : on a réalisé pour cela des carottes sédimentaires de forages en bateaux et analyses. L'âge est croissant en s'éloignant du rift des dorsales, parallèlement à son axe et symétriquement. Ceci indique, suggère l'existence d'une expansion océanique (divergence inter-plaques) et donc d'une mobilité horizontale quantifiable à 8 à 12 cm.an-1 pour la plaque Pacifique par exemple pour le rift médio-Pacifique (2 à 4 pour le rift médio-océanique)

II / APPORT GÉOLOGIQUE : LE VOLCANISME DE POINTS CHAUDS

Dorsale Pacifique Est- âge des fonds océaniques et anomalies magnétiques

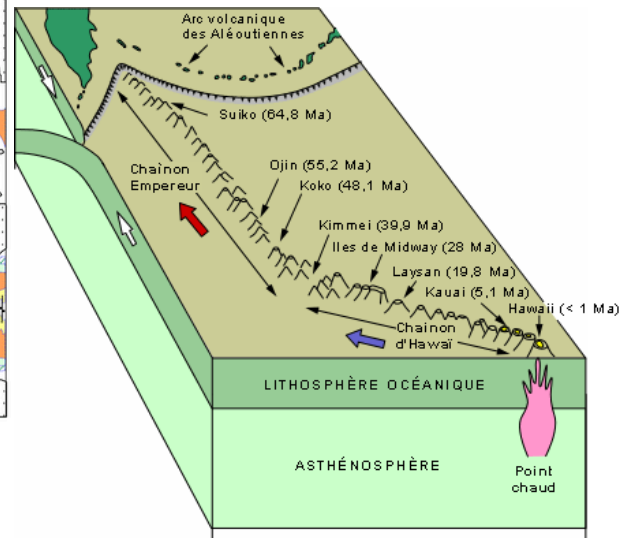


Age des plus vieux sédiments océaniques au contact du basalte de la lithosphère océanique



Les volcans alignés le plus souvent sont l'indice de surface intraplaque de l'activité de points chauds profonds supposés globalement immobiles prenant par exemple pour certains origine à la base de l'interface manteau / noyau : la couche D'' voir l'exemple de l'archipel Hawaï-Empeur

on trouve entre Midway daté de 27 Ma et l'actuel volcan à la verticale du point chaud Hawaï une vitesse d'environ 8 à 9 cm.an-1 pour la plaque Pacifique et une direction de mobilité Nord-Ouest depuis 40 Ma où elle était avant plus dirigée vers le Nord



III / APPORTS DU PALÉOMAGNETISME

Les basaltes, roches volcaniques sombres, sont aimantées par leurs minéraux ferromagnésiens (magnétites Fe₃O₄ notamment) enregistrant la polarité du champ magnétique lors du refroidissement de la lave.

Une anomalie positive magnétique correspond à la valeur mesurée - la calculée. Le champ magnétique terrestre est généré par des mouvements convertis du noyau, composé à 90% de fer liquide. Ce champ dipolaire s'est inversé de nombreuses fois au cours des temps géologiques.

Lors des temps géologiques, il s'est produit une succession d'inversions du pôle magnétique (le Nord était proche du Sud géographique) : ces inversions sont quasi-immédiates à l'échelle des temps géologiques (ordre de grandeur million d'années) et sont enregistrées partout sur Terre : une échelle magnéto-stratigraphique a été établie avec les périodes de polarité normales (noires, où le Nord magnétique était au Nord géographique actuel) et des périodes de polarité inverse (blanches). En 1965, un navire océanographique mesure le champ magnétique du son océanique entre la Nouvelle Zélande et le Chili : après plusieurs traversées, il apparaît un même profil symétrique de part et d'autre de la dorsale. En accord avec l'échelle magnétostratigraphique, ces profils corroborent les anomalies Atlantique.

A/ la notion d'anomalie magnétique

-Les roches de la croûte terrestre portent donc l'aimantation induite par le champ ambiant, et l'aimantation rémanente. Elles deviennent ainsi à leur tour sources d'un champ magnétique superposé au champ principal. Les écarts entre les valeurs du champ magnétique mesuré et les valeurs attendues dans le cas où seul le champ principal est pris en compte définissent les anomalies magnétiques :

- si le champ d'anomalie a la même polarité que le champ principal actuel alors l'anomalie est dite positive
- si le champ d'anomalie a une polarité inverse à celle du champ principal actuel, alors l'anomalie est dite négative

La fossilisation du champ magnétique dans les laves océaniques : les basaltes émis au niveau de l'axe de la dorsale, se solidifient et cristallisent rapidement au contact de l'eau. Leur température s'abaisse au dessous du point de Curie, et ils acquièrent une aimantation (liée à leurs minéraux ferromagnésiens), qui enregistre la polarité du champ magnétique terrestre au moment de leur formation. Les roches induisent un champ dont les caractéristiques correspondent au champ fossilisé, qui se surimpose au champ actuel

La fossilisation du champ magnétique dans les sédiments : l'aimantation rémanente détritique. Les particules magnétiques contenues dans la fraction sédimentaire sont orientées au cours de leur chute sur le fond comme autant de petits doublés magnétiques orientés selon la direction du champ régnant au moment du dépôt. Les couches successives de sédiments enregistrent donc les variations du champ magnétique au cours du temps.

B/ perspective historique

Paléomagnétisme de la lithosphère océanique : travaux de Vine & Matthews (1963) :

- 1/ les anomalies magnétiques identifiées correspondent à des successions d'inversions irrégulières du champ magnétique.

Les anomalies s'alignent selon des linéaments le long desquels les roches ont le même âge

- 2/ pour la dorsale Pacifique : symétrie de la configuration des anomalies magnétiques de part et d'autre de l'axe de la dorsale. Connaissant l'âge de l'anomalie, on peut mesurer la distance à l'axe de la dorsale et ainsi obtenir des vitesses de demi-ouverture à la dorsale. Les anomalies permettent de reconstituer les configurations passées des systèmes de dorsale et, in fine, les configurations successives des océans. Les travaux de Vine & Matthews confirment au 1er ordre les hypothèses formulées par Hess, et le fameux modèle d'ouverture en tapis roulant des océans (cependant les anomalies ne permettent pas de confirmer le rôle des cellules de convection dans l'ouverture, qui a depuis les années 60 été remis en question). Ce modèle postule que le plancher océanique est repoussé de part et d'autre de la dorsale quand du nouveau magma arrive en surface, à l'axe de la dorsale. Les inversions paléomagnétiques sont fossilisées par le plancher océanique au fur et à mesure de sa formation, et induisent des anomalies du champ magnétique par rapport au champ actuel. Les anomalies les plus récentes sont proches de l'axe de la dorsale et les plus anciennes en sont éloignées. La configuration des anomalies magnétiques au niveau de la plupart des dorsales est loin d'être aussi régulière qu'un « cas idéal » présenté souvent.

La cinématique instantanée des plaques : le modèle MORVEL -Plus jeune anomalie identifiée quasiment partout : la 2A, datée à 3.16 Ma. Permet de connaître vitesse et direction d'ouverture des océans moyennée sur 3.16 Ma. Considéré instantané à l'échelle des temps géologiques. Dans le Pacifique, une anomalie datée à 0.78 Ma permet de contraindre la cinématique instantanée avec une meilleure résolution temporelle.

- ⇒ **donc le paléomagnétisme est donc une méthode clef pour valider la théorie de la tectonique des plaques** et reconstruire les visages passés de la Terre. Les anomalies magnétiques du plancher océanique peuvent parfois dater avec plus de précision un événement géologique ayant affecté la lithosphère continentale : ex : la collision Arabie-Eurasie à l'origine du Zagros à -25 Ma env. Des incertitudes toutefois, autorisant dans certains cas plusieurs scénarios géologiques, et différentes façons d'aborder un problème (ex. collision inde-eurasie)

IV/ CINÉMATIQUE DÉDUITE PAR GÉODÉSIE : CONSTRUCTION DES MODÈLES HISTORIQUES NUVEL, NUVEL-1A & MORVEL ET LES BALISES DU SYSTÈME GPS COUPLÉES AUX SATELLITES

La géodésie spatiale et notamment le système GPS permet de quantifier le mouvement actuel des plaques. Grâce à des satellites, au mm près, des stations GPS au sol partout sur Terre sont utilisées. L'étude 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⁻¹

A/ le modèle NUVEL 1 (à partir de 1990)

Les données de l'océanographie et de la sismique 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 et dans les chaînes de montagnes, ou de coulissage horizontal le long des failles transformantes.

Le modèle NUVEL 1 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.
- plus le % de frontières d'une plaque est en subduction (voir l'intensité des vecteurs vitesse de la plaque PACifique) , plus la vitesse de la plaque augmente, ce qui est un indicateur que la force motrice de slab pull est majeure pour expliquer via sa verticalité la mobilité horizontale de la lithosphère (intensité > 10 fois celle du ridge push à la dorsale)
- 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

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) par triangulation 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.

La cinématique instantanée, fondée sur les données océaniques, s'appuie sur des données magnétiques qui remontent légèrement dans le passé, jusqu'au chron 2A.

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 1er 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 à 12 plaques.

- **B/ le modèle MORVEL (à partir de 2010)**

Le dernier né des modèles est le modèle **MORVEL**, publié en 2010 (Mid Oceanic Ridge Velocities), baptisé ainsi en raison du poids important alloué aux dorsales : il prend en considération beaucoup plus de plaques que NUVEL et fonde les $\frac{3}{4}$ des contraintes sur les anomalies magnétiques. Ce modèle combine les déplacements issus de données géologiques (paléomagnétisme, fonds océaniques, points chauds) pour le dernier million d'années et de données géodésiques actuelles des satellites. Ce modèle est toujours en évolution...

- 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 NUVEL1 et les données géodésiques actuelles satellitaires.
- **Par la fiabilité des calculs et la très bonne corrélation avec les données GPS, les auteurs confirment que le postulat des plaques rigides reste très adapté pour décrire les mouvements horizontaux de la surface terrestre.**

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) t 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-1). La vitesse, le sens et la direction globale de déplacement de la plaque peuvent être définis, c'est-à-dire un vecteur vitesse.

⇒ il y a une cohérence intégrée dans le modèle MORVEL (Mid Oceanic Ridge VELOCities, 2010 à 2012) entre les estimations cinématiques par GPS, point chaud, anomalies magnétiques, âge des sédiments reposant sur le plancher.

C/ le système DORIS

DORIS a permis de mesurer pour la 1ère fois les mouvements relatifs de plusieurs plaques, notamment 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 2 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.

BILAN

La lithosphère terrestre est découpée en plaques tectoniques lithosphériques animées de mouvements sur l'asthénosphère déformable. 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 par sédimentologie, 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, pétrologiques).

EXERCICE 2 : PRS : APPORT SISMIQUE À LA DISTINCTION LITHOSPHERE / ASTHENOSPHERE

Analyse des documents et mobilisation des connaissances dans le cadre du problème scientifique posé

Connaissances complètes et pertinentes Informations prélevées pertinentes et complètes (justification et tri)	4
Connaissances complètes et pertinentes mais informations prélevées incomplètes ou peu pertinentes (manque de justification ; tri incomplet)	3
Connaissances incomplètes mais informations issues des documents complètes et pertinentes (justification et tri)	2
Seuls quelques éléments pertinents issus des documents et/ou des connaissances	1
Absence de traitement des éléments prélevés	0

Exploitation (mise en relation/confrontation) des informations prélevées et des connaissances au service de la résolution du problème

Réponse explicative et cohérente au problème scientifique	Complétude et pertinence des arguments nécessaires à la réponse au problème posé	3
Argumentation incomplète mais réponse explicative cohérente avec le problème posé		2
Absence d'explication ou réponse incomplète ou non cohérente au problème scientifique posé		1
Arguments absents et/ou réponse explicative absente ou incohérente		0

Démarche personnelle

Rédaction correcte de la démarche	Bonne adaptation de la démarche au sujet (qualité de sa construction)	3
Rédaction incorrecte de la démarche		2

Construction insuffisamment cohérente de la démarche <u>mais bonne rédaction</u>		1
Absence de démarche ou démarche incohérente		0

EN QUOI LE COUPLAGE DES ÉTUDES DE LABORATOIRE SUR LA VISCOSITÉ DES MATÉRIAUX SOUMIS À DIFFÉRENTES CONTRAINTES ET L'EXPLOITATION DES DONNÉES DE LA TECHNIQUE DE TOMOGRAPHIE SISMIQUE ONT-ILS PERMIS DE CARACTÉRISER LA DISTINCTION LITHOSPHERE /ASTHÉNOPHÈRE, POURTANT SANS CHANGEMENT RHÉOLOGIQUE (MÊME ROCHE : LA PÉRIDOTITE) ET DE COMPLÉTER AINSI LA CONNAISSANCE DE LA STRUCTURE VERTICALE DU GLOBE SOUS NOS PIEDS, À DES PROFONDEURS INACCESSIBLES À LA CONNAISSANCE DE CE QUI S'Y TROUVE, VUES LES LIMITES DES FORAGES HUMAINS À -12,2 KM ?

Informations utiles saisie des documents et exploitation

Document 1 : sous la Cordillère des Andes, arc volcanique explosif, entre celle-ci et la fosse du Pérou, se situent des anomalies très positives (+6%) selon un plan incliné d'une certaine épaisseur interprétées comme du matériau plus dense que prévu interprété comme plus froid au-delà de -100km et jusqu'à plus de -700 km : ceci est expliqué comme la plongée d'un lithosphère froide à l'inertie thermique faible dans l'asthénosphère ductile, déformant les isothermes autour d'elle et déformée car flexurée sous la Cordillère (zone noire changeant d'orientation après la fosse, associée à son pendage)

Document 2 : les variations de vitesse de propagation des ondes P s'expliquent par :

- 1/ une accélération avec le MOHO par rapport au modèle PREM (passage à une roche plus dense, la péridotite depuis un granite ou un gabbro)
- 2/ pour ce qui nous intéresse : un ralentissement des vitesses (anomalies négatives) correspondant donc à un matériau plus ductile (déformable et moins visqueux) entre -120 km sous les continents et -100 km sous les océans (car croûte océanique plus mince donc lithosphère moins épaisse et donc limite avec l'asthénosphère moins basse) et -225 km soit 100 km de ralentissement par rapport aux vitesses attendues après 1300°C : cela peut être interprété comme la traversée d'une péridotite plus chaude, moins cohésive, à déformabilité plus grande et moins visqueuse : le sommet de l'asthénosphère est la LVZ, Low Velocity Zone

Document 3 : cette LVZ peut être vue comme une baisse de viscosité d'un facteur supérieur à 100 en raison d'un réchauffement au-delà de 1300°C, un peu comme le réchauffement d'une glace de 20°C, qui rend moins visqueux expérimentalement le matériau en laboratoire : ce ralentissement des ondes au-delà dans une zone de > 100Km de profondeur environ est lié à une hausse de la vitesse de déformation dans la péridotite de l'asthénosphère qui permet le glissement de la lithosphère froide telle que celle plus dense qu'elle sous les Andes (plaque Nazca sous l'Amérique Sud) et qui s'épaissit à ses dépendants en l'incorporant par refroidissement, la rendant plus lourde et gagnant en densité en plongeant, ce qui entretient le slab pull, moteur de subduction

BILAN

La différenciation lithosphère / asthénosphère est thermo-sismique et associée à un changement de propriété : une déformabilité croissante essentiellement de la péridotite mantellique par baisse de viscosité et réchauffement en lien avec l'isotherme 1300°C après -100 km à -120 km de profondeur pendant environ 100 km