

***Epreuves d'admissibilité – exploitation d'un dossier documentaire –  
durée 4 heures***

---

**L'océan Atlantique**

**Le sujet proposé a pour objectif d'étudier la géologie de l'océan Atlantique et d'établir les faits qui permettent de comprendre son fonctionnement actuel et de reconstituer son évolution.**

**Le sujet comporte quatre parties auxquelles sont associés 14 documents.**

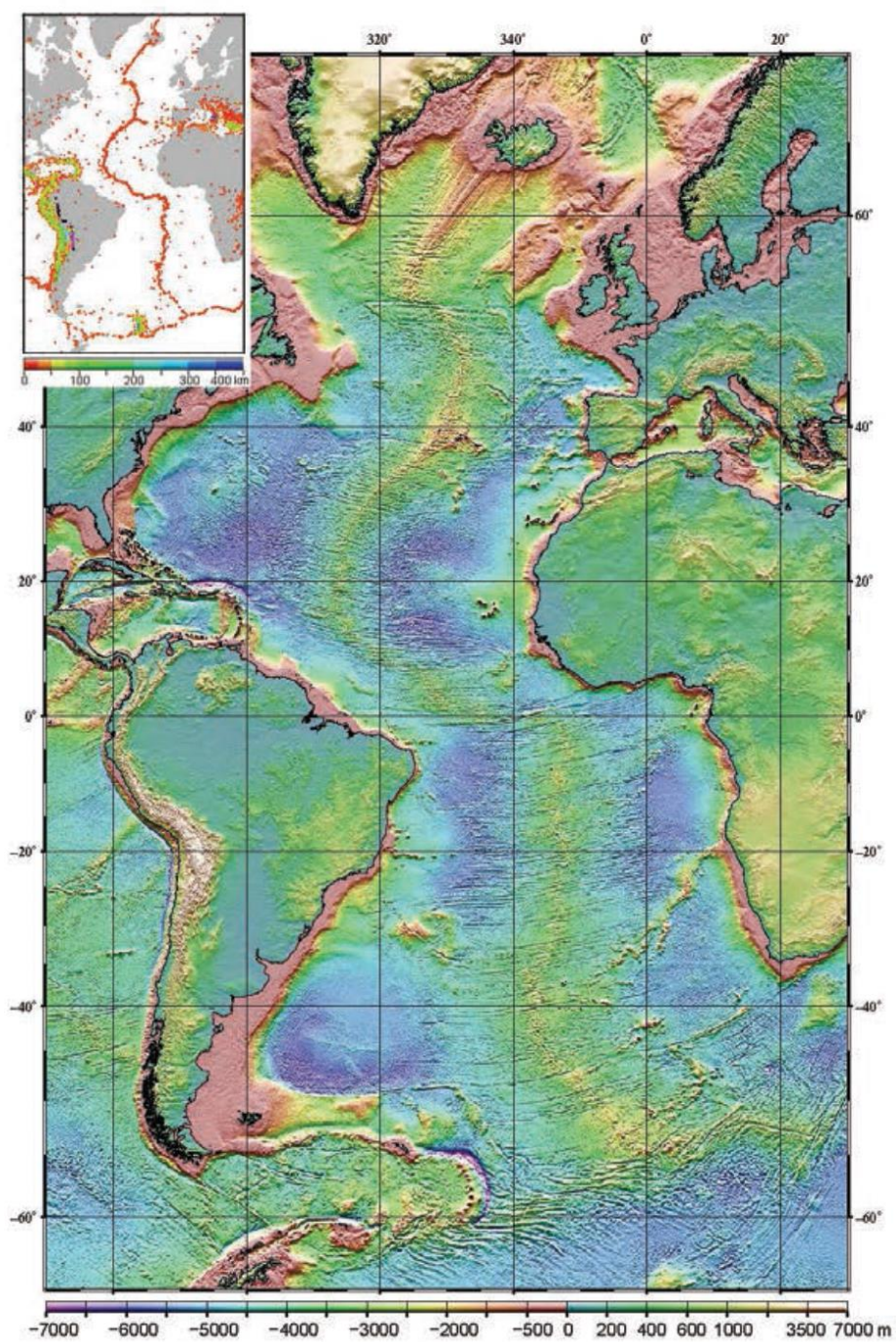
- 1. Contexte géodynamique de l'océan Atlantique : documents 1 à 3**
- 2. Mouvements horizontaux et verticaux des plaques dans l'Atlantique : documents 4 à 6**
- 3. Devenir et évolution de la lithosphère de l'océan Atlantique : documents 7 à 10**
- 4. Apport de la modélisation à la compréhension de l'expansion océanique : documents 11 à 14**

**Les extraits de programmes proposés en annexe sont une aide à la rédaction. Ils n'ont pas le statut de document et n'ont pas à être exploités comme tels.**

**Annexe :**  
**Extraits de programme**

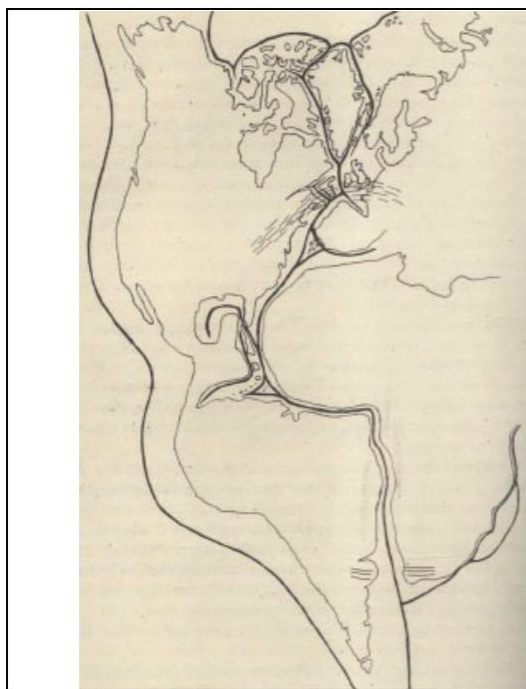
EDELSTEIN

<b>Quatrième : L'activité interne du globe</b>			
	<p>La partie externe de la Terre est formée de plaques lithosphériques rigides reposant sur l'asthénosphère qui l'est moins.</p> <p>La répartition des séismes et des manifestations volcaniques permet de délimiter une douzaine de plaques.</p> <p>Les plaques sont mobiles les unes par rapport aux autres et leurs mouvements transforment la surface du globe.</p> <p>À raison de quelques centimètres par an, les plaques s'écartent et se forment dans l'axe des dorsales.</p> <p>Elles rapprochent et s'enfouissent au niveau des fosses océaniques.</p> <p>La collision des continents engendre des déformations et aboutit à la formation de chaînes de montagnes.</p>	<p>Exploiter les résultats des variations de vitesse d'ondes sismiques pour en déduire la limite lithosphère-asthénosphère.</p> <p>Traduire (en respectant des conventions) sous la forme d'un schéma :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- les mouvements aux limites de plaques ;</li> <li>- le fonctionnement de la lithosphère.</li> </ul> <p>Situer dans le temps des découvertes scientifiques en exploitant les textes de Wegener.</p> <p>Observer, recenser et organiser des informations relatives aux mouvements des plaques, aux phénomènes associés et aux déformations.</p> <p>Présenter ces informations sous une forme appropriée.</p> <p>Participer à la conception et la mise en œuvre d'un protocole pour modéliser les déformations à la surface de la Terre.</p>	<p>Sont exclues :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- l'étude complète de la structure du globe ;</li> <li>- la nature des roches qui composent la lithosphère et l'asthénosphère ;</li> <li>- l'étude des mouvements convectifs ;</li> <li>- l'étude de l'origine de l'énergie responsable du mouvement des plaques.</li> </ul> <p>Thèmes de convergence : énergie, développement durable, sécurité</p>
<b>Première S : La tectonique des plaques : l'histoire d'un modèle</b>			
	<p><b>L'hypothèse d'une expansion océanique et sa confrontation à des constats nouveaux</b></p> <p>Au début des années 1960, les découvertes de la topographie océanique et des variations du flux thermique permettent d'imaginer une expansion océanique par accréation de matériau remontant à l'axe des dorsales, conséquence d'une convection profonde.</p> <p>La mise en évidence de bandes d'anomalies magnétiques symétriques par rapport à l'axe des dorsales océaniques, corrélables avec les phénomènes d'inversion des pôles magnétiques (connus depuis le début du siècle), permet d'éprouver cette hypothèse et de calculer des vitesses d'expansion.</p> <p><i>Objectifs et mots clés. Cette étude est l'occasion de fournir aux élèves les données fondamentales sur le magnétisme des roches (magnétite, point de Curie). [Limites. Un élève doit situer cet épisode de l'histoire des sciences dans les années 1960. La mémorisation des dates précises et des auteurs n'est pas attendue.]</i></p> <p><i>Convergences. Physique : magnétisme.</i></p> <p><i>Pistes. Les variations du champ magnétique terrestre ; les inversions magnétiques.</i></p>	<p>Comprendre comment la convergence des observations océanographiques avec les mesures de flux thermique a permis d'avancer l'hypothèse d'une expansion océanique réactualisant l'idée d'une dérive des continents.</p> <p>Comprendre comment la corrélation entre les anomalies magnétiques découvertes sur le plancher océanique et la connaissance plus ancienne de l'existence d'inversion des pôles magnétiques confirma l'hypothèse de l'expansion océanique.</p> <p>Calculer des taux d'expansion.</p>	
	<p><b>Le renforcement du modèle par son efficacité prédictive</b></p> <p>Le modèle prévoit que la croûte océanique est d'autant plus vieille qu'on s'éloigne de la dorsale. Les âges des sédiments en contact avec le plancher océanique (programme de forage sous-marins JOIDES) confirment cette prédiction et les vitesses prévues par le modèle de la tectonique des plaques.</p> <p>Le modèle prévoit des vitesses de déplacements des plaques (d'après le paléomagnétisme et les alignements de volcans intraplaques). Avec l'utilisation des techniques de positionnement par satellites (GPS), à la fin du XXème siècle, les mouvements des plaques deviennent directement observables et leurs vitesses sont confirmées.</p> <p><i>[Limites. L'étude des forages marins se limite à l'interprétation du premier sédiment au contact de la croûte magmatique. L'interprétation des inversions magnétiques enregistrées dans les sédiments des carottes de forage n'est pas au programme.]</i></p> <p><i>Pistes. Les systèmes de positionnement satellitaire (physique, mathématiques).</i></p>	<p>Saisir et exploiter des informations sur cartes.</p> <p>Concevoir, réaliser et exploiter un modèle analogique.</p> <p>Réaliser des mesures sur le terrain pour comprendre le principe du GPS.</p> <p>Saisir et exploiter des données sur des logiciels.</p>	

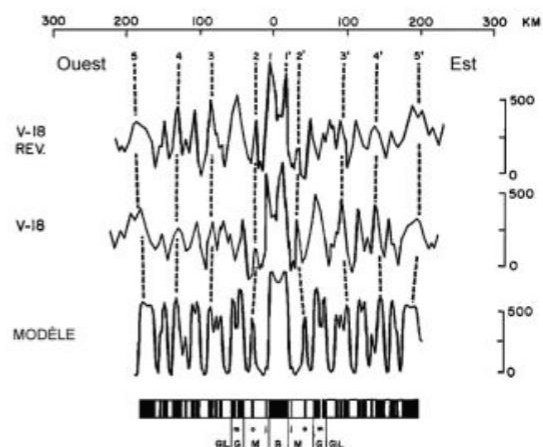


Document 1 : Carte bathymétrique de l'océan Atlantique. L'encart montre la répartition et la profondeur des séismes.





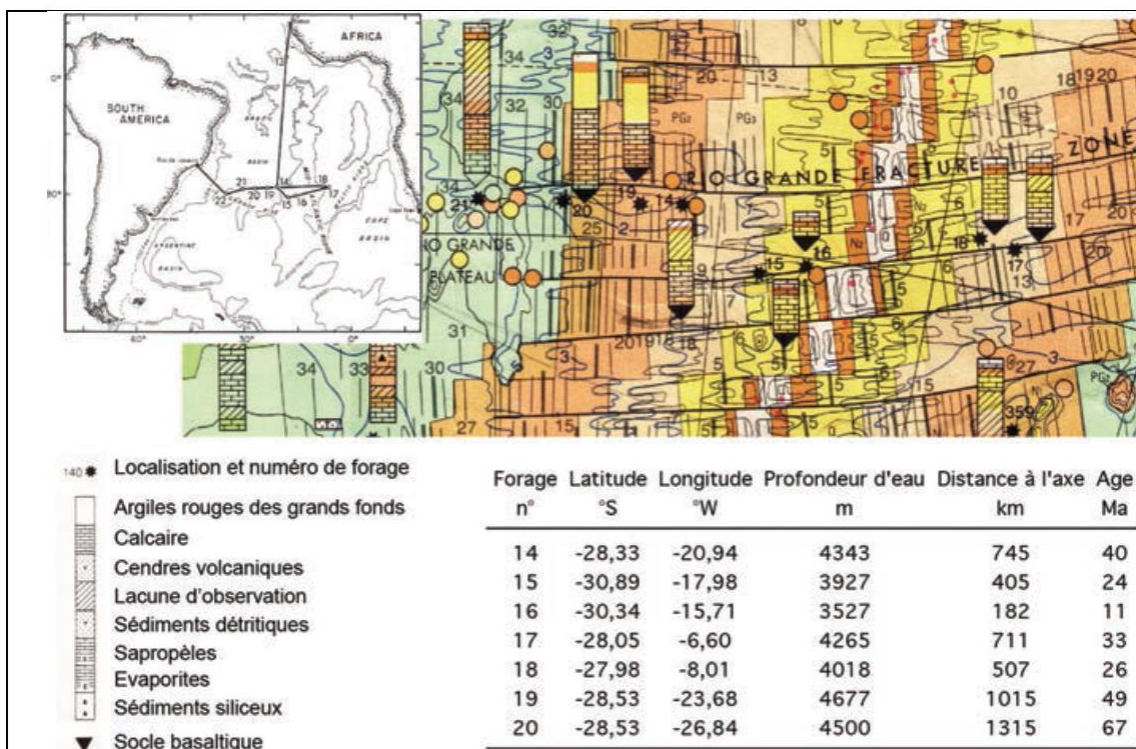
Document 2 : Reconstruction des continents autour de l'Atlantique (Wegener, 1915).



Document 3 : Profil magnétique mesuré à travers la dorsale médio-atlantique (V-18) présenté au-dessous de son image miroir par rapport à l'axe de la dorsale.

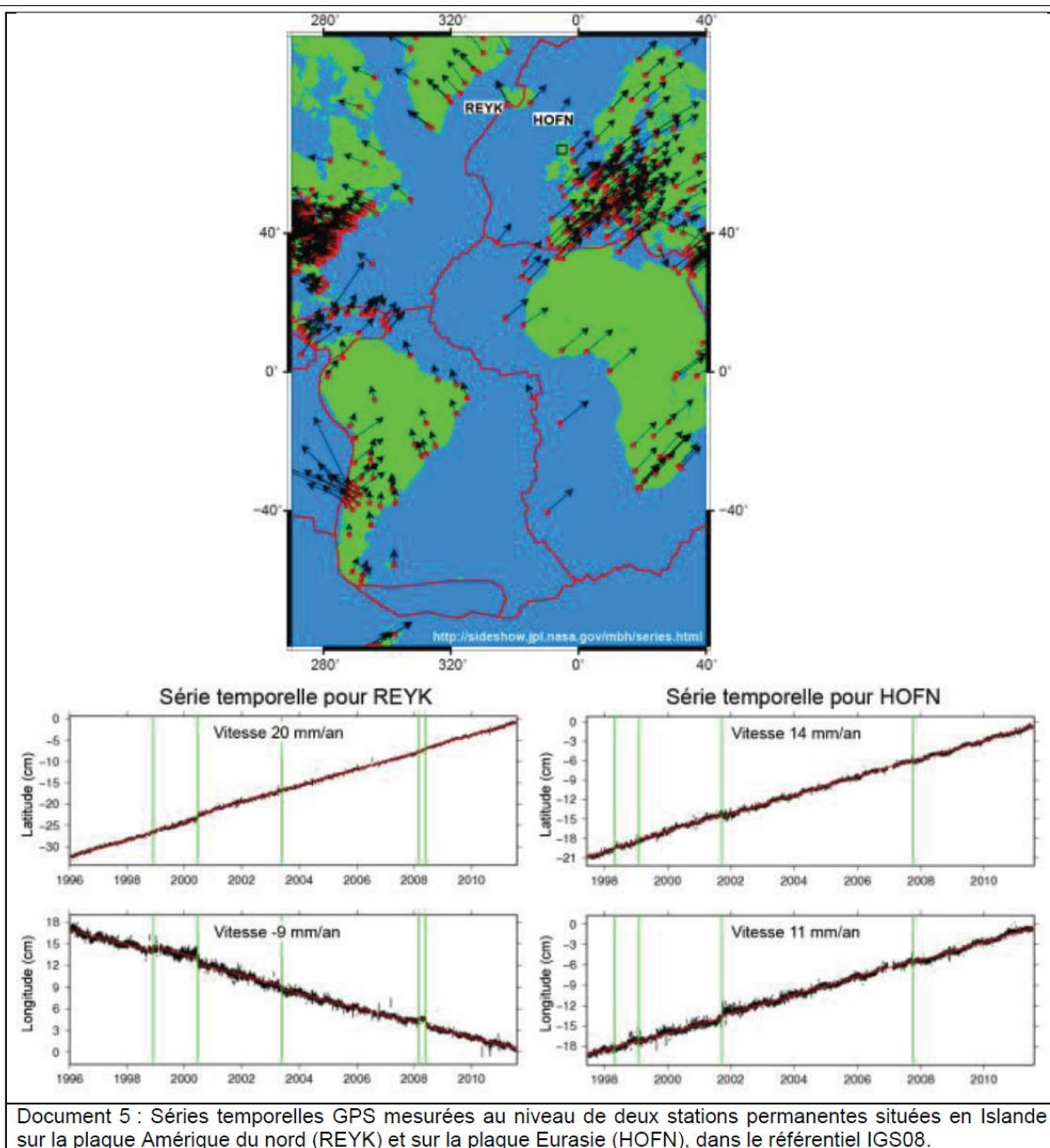
En bas, profil théorique d'anomalie magnétique calculé à partir du modèle d'inversion du champ magnétique.

Échelle verticale en nanoTesla (d'après Diskson et al, 1968).

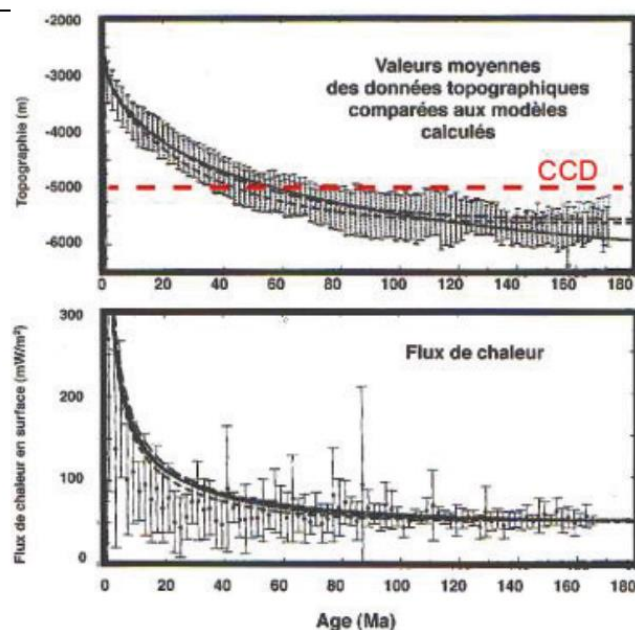


Document 4 : Localisation des forages DSDP (Deep Sea Drilling Program) réalisés en 1968 dans l'Atlantique sud (extrait de la carte UNESCO-CCGM de l'océan Atlantique). Le tableau indique la distance des forages à l'axe de la dorsale et l'âge des sédiments les plus anciens au niveau de chaque forage (en million d'années).

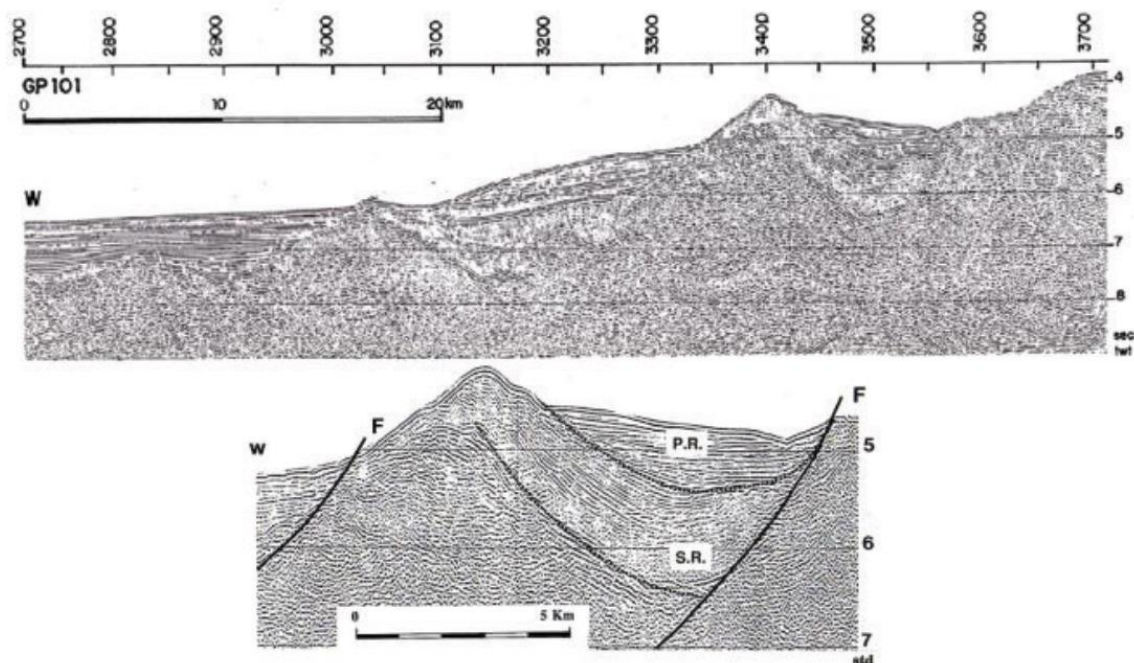
Les colonnes représentent la lithologie des forages. La hauteur est proportionnelle à l'épaisseur de la couche forée.





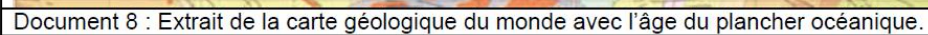


Document 6 : Évolution de la topographie et du flux de chaleur en fonction de l'âge de la lithosphère océanique (d'après Doin et Fleitout, 1996). La profondeur de la CCD (de l'anglais *Carbonats Compensation Depth* dans l'Atlantique est indiquée.

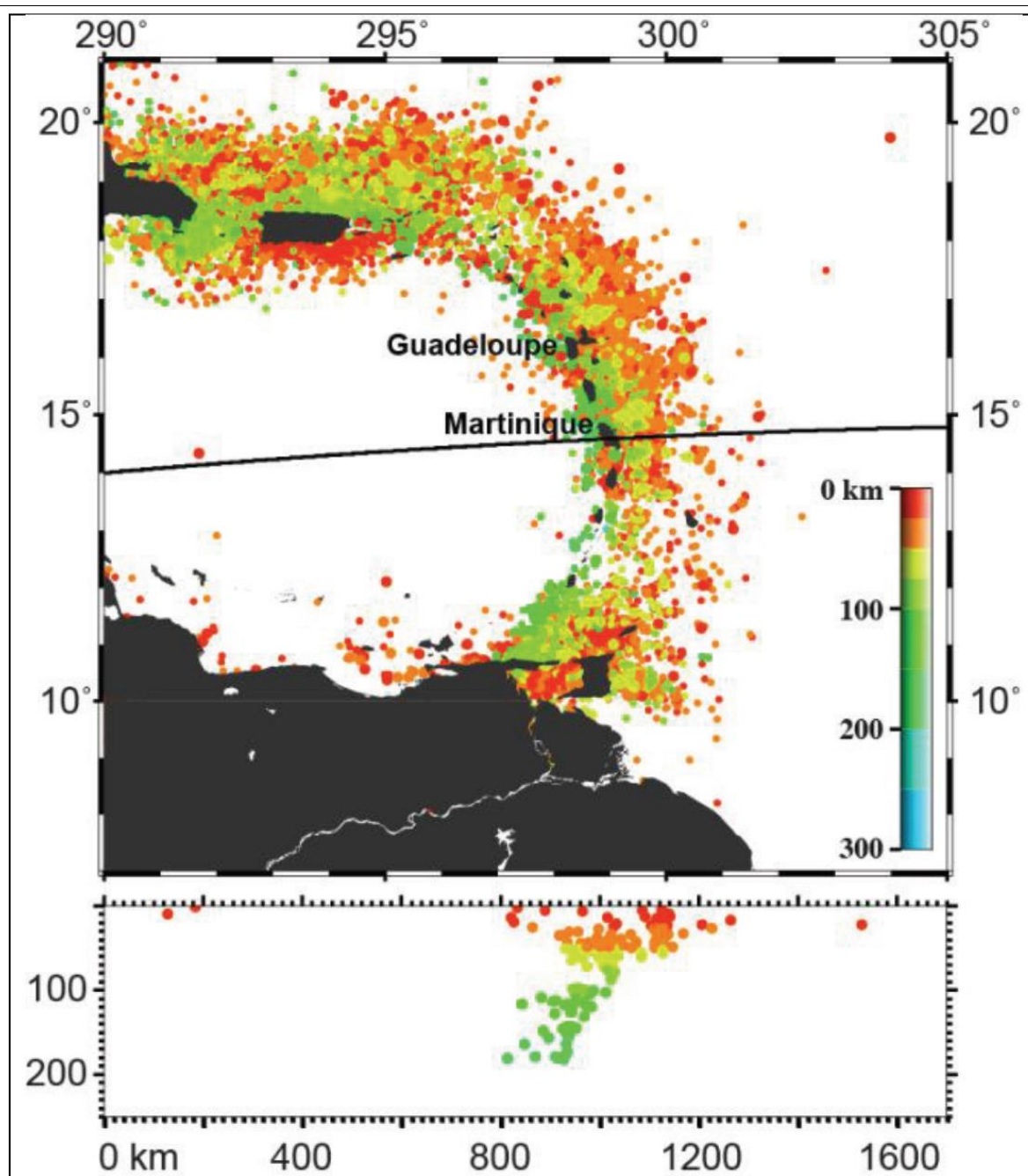


Document 7 : Profil de sismique réflexion du sommet de la marge de Galice au large de l'Espagne et détail du profil en bas. std : secondes, temps double (in Boillot et Coulon, 1998)



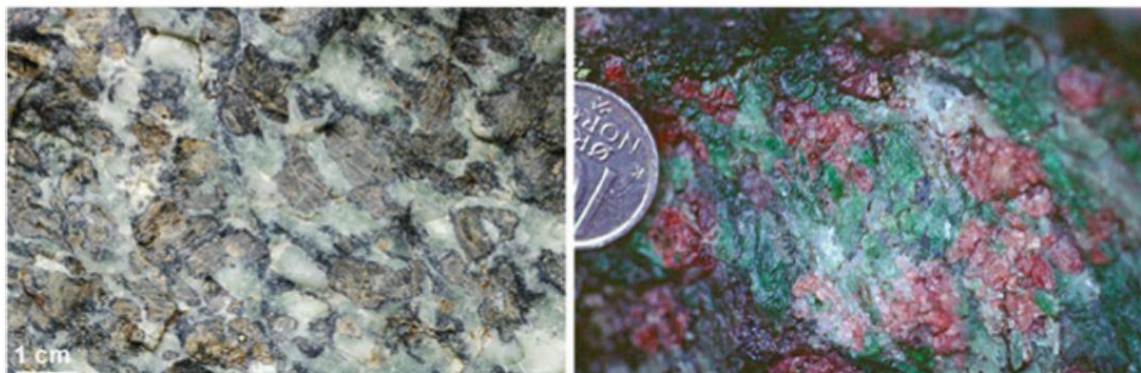


Document 8 : Extrait de la carte géologique du monde avec l'âge du plancher océanique.



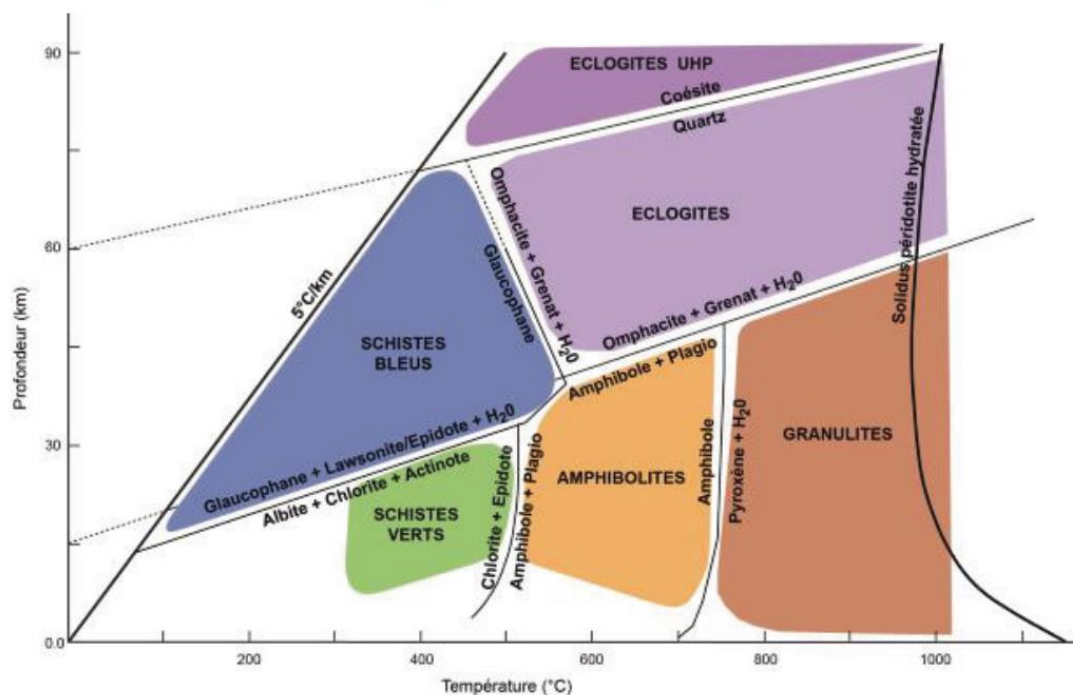
Document 9 : Répartition et profondeur des séismes aux Antilles (localisation sur le document 8).



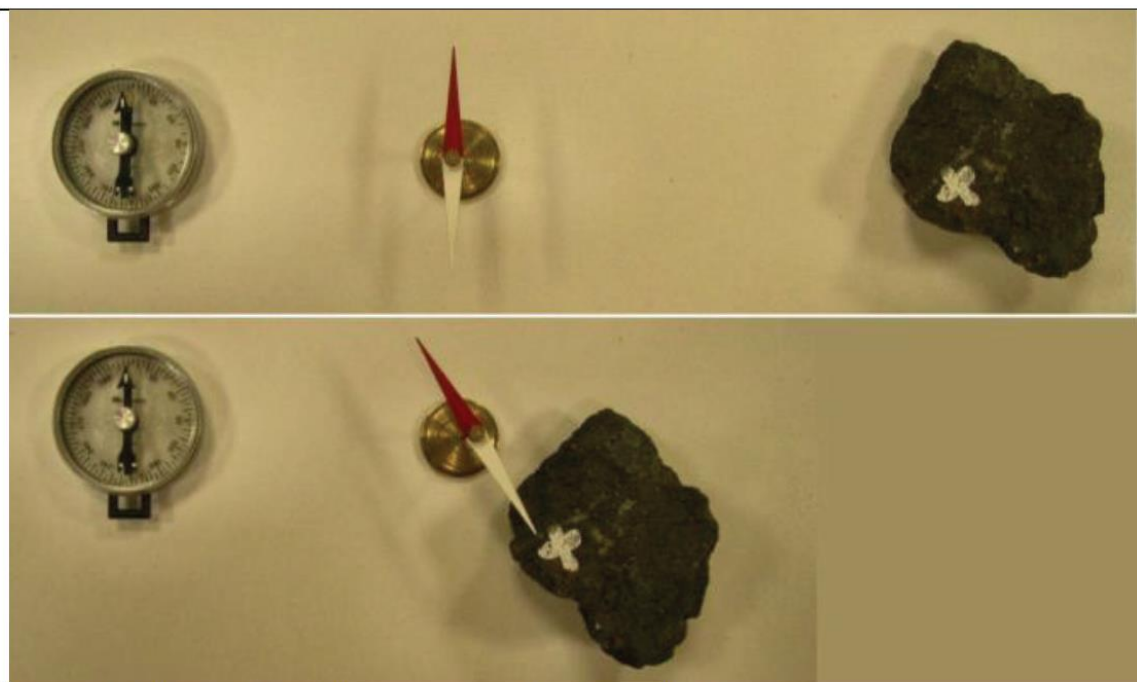


Document 10a : Échantillons de roches métamorphiques :

- à gauche roche à pyroxène, plagioclase et amphibole sodique
- à droite roche à grenat et pyroxène sodique



Document 10b : Faciès du métamorphisme, domaines de stabilité de quelques associations minérales et solidus hydraté d'une péridotite.



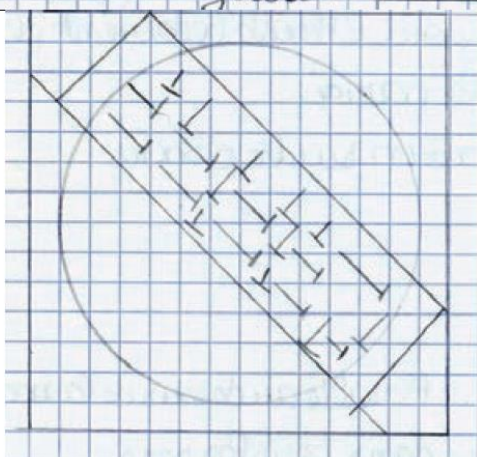
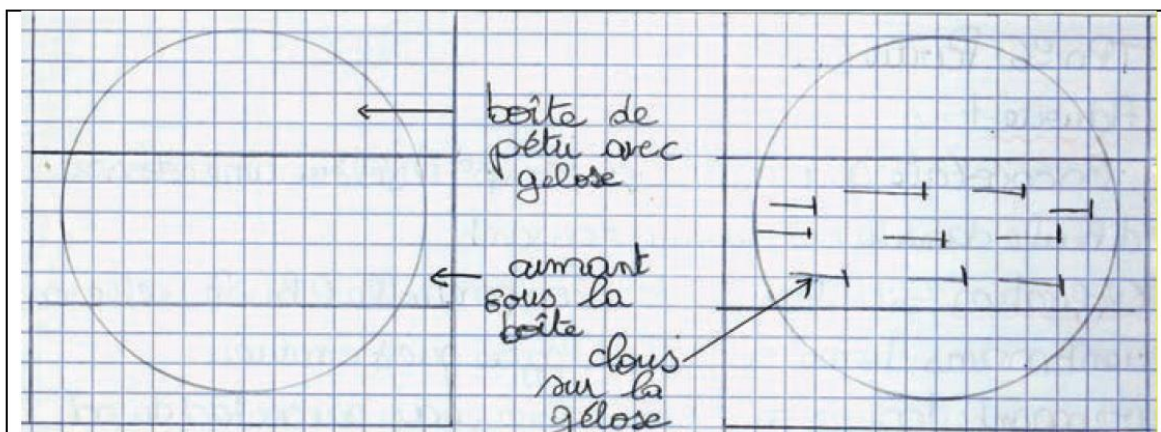
Document 11 : Mise en évidence de la rémanence magnétique dans un basalte.



**La pâte microlitique de ce basalte contient de nombreux minéraux opaques de magnétite**

Document 12 : Lame mince d'un basalte océanique au microscope en lumière polarisée analysée (LPA).





On constate que les dents s'orientent de façon parallèle à l'aimant.

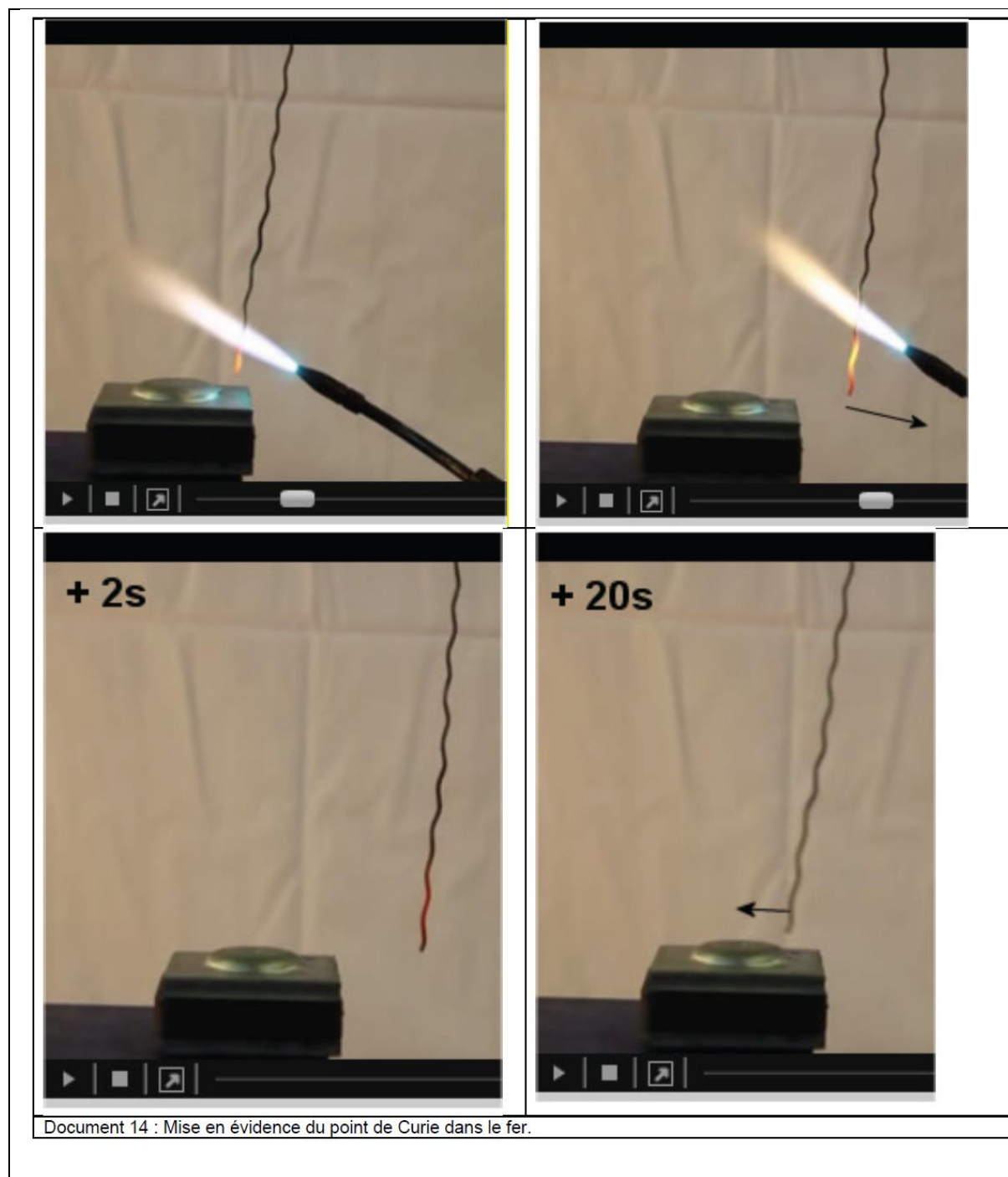
### Explication

En suite, ils s'orientent suivant le champ magnétique créé par l'aimant situé sous la boîte de pétur.

A nouveau dans cette nouvelle manip les dents prouvent bien l'orientation du champ magnétique de l'aimant.

L'aimant correspondrait au champ magnétique terrestre. Les dents représentent les éléments ferro-magnétiques (pyroxène, olivine) contenu dans le basalte.

La gelose correspondrait au verre du basalte.



### *Corrections et remarques concernant l'exploitation du dossier documentaire*

**1. Libellé des questions dans le sujet (première ligne de chaque tableau); éléments de correction (deuxième ligne); commentaires relatifs aux réponses des candidats (troisième ligne)**

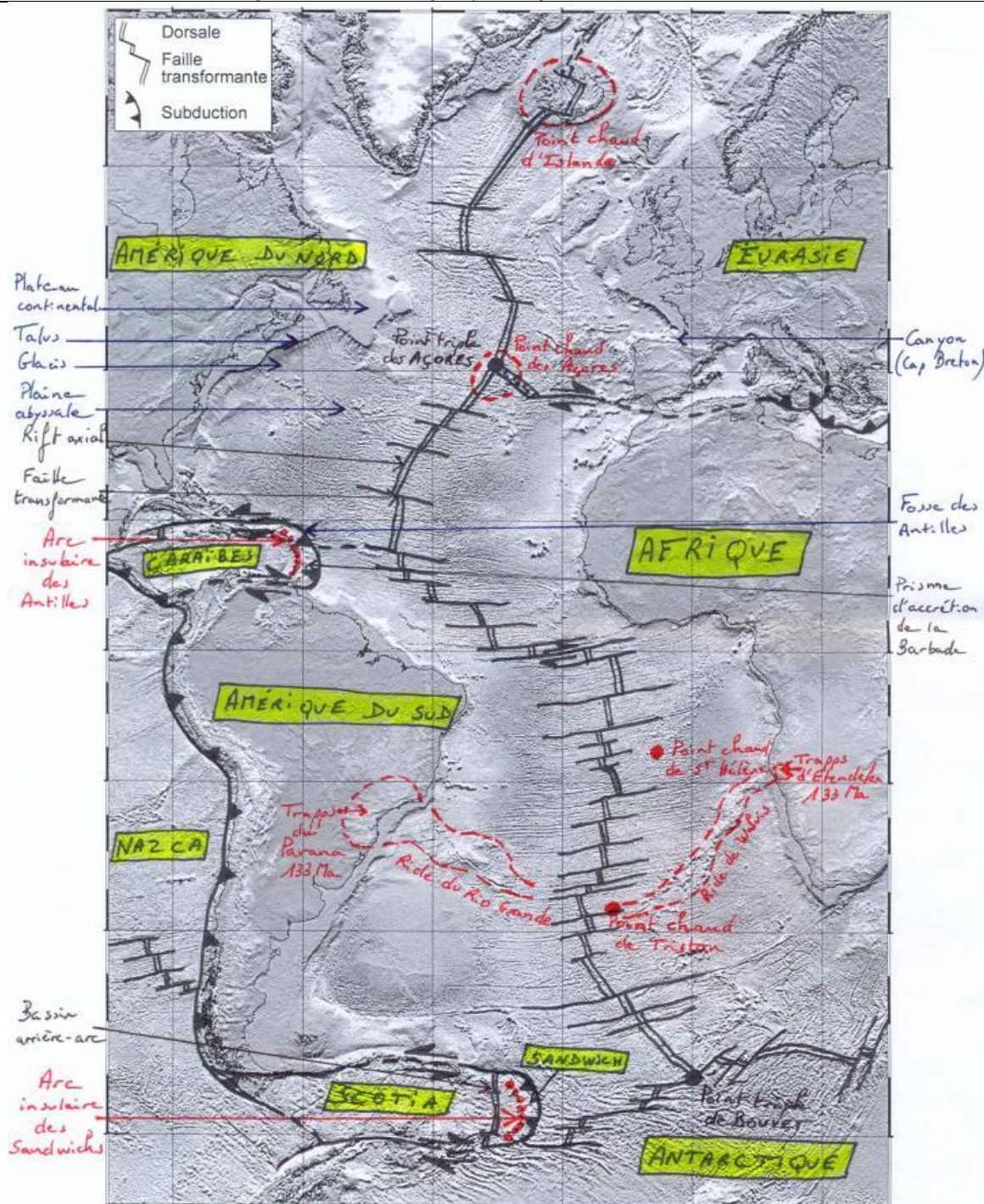
**1. Contexte géodynamique de l'océan Atlantique (documents 1 à 3)**

**1.1. Plaques tectoniques en présence et morphologie des fonds océaniques (document 1)**



Vous annoterez le **document 1 à l'aide de vos connaissances**, en identifiant :

- les plaques tectoniques dont vous soulignerez les limites en utilisant les figurés de la légende
- les éléments morphologiques caractéristiques des fonds océaniques
- les points chauds et les points triples au niveau de la dorsale
- le sens de la faille transformante de la Romanche au niveau de l'équateur
- toute structure témoignant du contexte géodynamique.



Carte tectonique et principaux éléments morphologiques de l'océan Atlantique

#### Commentaire :

Cette première question ne présentait pas de difficulté particulière, l'océan Atlantique figurant parmi les exemples classiquement enseignés tant dans le secondaire qu'à l'université. Devenir enseignant en Sciences de la Terre suppose une connaissance des échelles spatiales et temporelles. La géographie des différents océans et continents, de même que l'échelle stratigraphique, font partie des notions attendues pour enseigner de manière sereine. Les correcteurs ont été surpris que des notions

essentielles de la description morphologique des océans (plateau continental, talus, plaine abyssale...) n'aient pas été convenablement exposées. Certaines copies présentaient de manière étonnante un niveau fin de détail sur les différents points chauds sans décrire correctement les éléments morphologiques de base. Heureusement, certains candidats se sont distingués par la rigueur et l'étendue des connaissances, le soin apporté à l'illustration et la culture géographique. La réponse à cette question était généralement un bon indicateur de la qualité à venir de la copie.

## 1.2. Nature des marges de l'océan Atlantique

*Vous préciserez la nature des marges de l'océan Atlantique.*

Les marges de l'océan Atlantique sont de deux types : des marges continentales passives ou des marges actives.

- Les marges continentales passives, sans activité sismique ni volcanique, résultent de l'étirement et de la déchirure de la lithosphère continentale. Elles correspondent à la transition entre la croûte continentale et la croûte océanique. Ce ne sont pas des frontières de plaques. Parmi les marges passives, on distingue :

- des marges passives non volcaniques, comme la marge ibérique (**document 7**) ou la marge nord Gascogne en France ;

- des marges passives volcaniques, comme la marge de Norvège ;

- des marges passives transformantes, comme la marge de Côte d'Ivoire – Ghana.

- Les marges actives correspondent aux zones de subduction, caractérisées par une activité sismique et volcanique. Elles sont localisées sur la bordure Ouest de l'océan Atlantique :

- la zone de subduction des Antilles (Caraïbes) où la lithosphère océanique des plaques Amérique du nord et Amérique du sud plonge sous la plaque Caraïbes (**document 9**) ;

- la zone de subduction des Sandwichs où la lithosphère océanique de la plaque Amérique du sud plonge sous la plaque Scotia et la plaque Sandwich.

### **Commentaire :**

Comme précédemment, il n'y avait a priori aucune difficulté particulière dans cette question. Les marges passives, étudiées notamment dans le cadre de la stratigraphie séquentielle, ont été décrites de manière convenable par de nombreux candidats. Certaines confusions perdurent, notamment celles qui concernent la transition océan-continent et les limites de plaques. Les candidats ont souvent répondu de manière laconique, se contentant de donner de manière incomplète les caractères généraux des marges passives et actives, sans mettre en relief les différences entre les deux types de marges.

## 1.3. Evolution des idées sur la mobilité de la lithosphère (documents 2 et 3)

*À partir des **documents 2 et 3 exploités à l'aide de vos connaissances**, vous montrerez comment les idées sur la mobilité de la lithosphère ont évolué au vingtième siècle.*

A partir de 1912, Alfred Wegener (1880-1930) développe sa théorie des grandes translations : la dérive des continents. Wegener s'appuie sur quatre types d'arguments :

- géographiques : concordance des côtes de l'Atlantique et emboîtement des continents (**document 2**) ;

- paléontologiques : coïncidence des paléo-faunes et des paléo-flores de part et d'autre des océans (Glossopteris, plantes du Permo-Trias ; Mésozaur, petit reptile d'eau douce ou marin côtier du Permien inférieur d'Amérique du sud et d'Afrique ; Lystrosaure ; Cynognathus) ;

- paléoclimatiques : traces d'une glaciation (tillites, moraines fossilisées) d'âge fin Carbonifère – début Permien sur plusieurs continents (Amérique du sud, Afrique, Inde, Australie, Antarctique), traces de climats chauds et humides (régions productrices de charbons carbonifères) et de climats arides (dépôts évaporitiques à sel et gypse, ceintures désertiques à dépôts de sables, grès, dunes) que Wegener regroupe au Carbonifère supérieur en une « grande ceinture de Carbonifère productif qui parcourt l'Amérique du nord, l'Europe, l'Asie mineure et la Chine et coïncide avec notre équateur » ;

- géologiques : ajustement des boucliers anciens, "continuité structurale" des chaînes plus récentes comme la chaîne calédonienne.

Ces arguments permettent à Wegener de reconstruire un super-continent, la Pangée, constitué de la quasi totalité des terres émergées, qui persistera environ 100 Ma de la fin du Carbonifère jusqu'au



début du Jurassique, et aux dépens duquel s'ouvrira l'océan Atlantique (**document 2**).

La principale objection faite à Wegener est qu'il manque un moteur au déplacement des continents : « la Terre est aussi rigide que l'acier, donc les continents ne peuvent pas se déplacer ».

La datation du plancher océanique à l'aide des anomalies magnétiques, selon l'hypothèse de Vine et Matthews (1963), est la pierre angulaire de la théorie de l'expansion océanique. Comme le montre le **document 3**, où l'on voit un profil magnétique identique à son image miroir par rapport à l'axe de la dorsale médio-Atlantique, l'âge du plancher océanique augmente à partir de la dorsale et la distribution des âges est symétrique de part et d'autre de la dorsale.

Les anomalies magnétiques sont mesurées par des magnétomètres tractés par des navires océanographiques (apport des progrès techniques). Les magnétomètres mesurent l'intensité totale du champ magnétique (et non pas les trois composantes du champ magnétique : intensité, inclinaison, déclinaison), à laquelle il faut soustraire le champ magnétique de référence de la Terre (IGRF) pour conserver uniquement les anomalies créées par la partie supérieure de la croûte océanique. Les anomalies ne représentent que quelques pourcents de l'intensité totale mesurée, leur unité est le nanoTesla.

L'aimantation thermorémanente de la croûte océanique est acquise à l'état solide par passage des minéraux magnétiques (comme la magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ou la titanomagnétite  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ) sous la température de Curie ( $\sim 580^\circ\text{C}$  pour la magnétite). Si la croûte a été créée en période de champ normal (similaire à l'actuel), on observe une anomalie positive, si elle a été créée en période inverse (pôles sud et nord magnétiques permutés), on observe une anomalie négative. Les inversions successives sont enregistrées sur le plancher océanique comme sur une bande magnétique (code barre) et constituent la structure magnétique "en peau de zèbre" du plancher océanique. Les inversions du champ magnétique ne sont pas périodiques mais aléatoires ce qui permet d'associer un âge à une séquence d'anomalies à l'aide du calendrier des inversions divisé en périodes normales et inverses : Brunhes (normale), Matuyama (inverse), Gauss (normale), Gilbert (inverse), etc...

D'autres arguments mettent en évidence la mobilité de la lithosphère : des arguments paléomagnétiques sur les continents (trajectoires de "dérive apparente" des pôles), les mesures de flux de chaleur, les données des forages océaniques (**document 4**), les mécanismes au foyer des séismes, les failles transformantes, la mise en évidence de la subduction de la lithosphère océanique, etc... À la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, les mesures directes du mouvement des plaques lithosphériques par les techniques de géodésie spatiale, notamment le GPS (**document 5**), confirmeront les vitesses relatives des principales plaques.

#### **Commentaire :**

Cette question nécessitait un long développement sur l'historique des découvertes qui ont permis l'émergence du concept de dérive des continents par Wegener au début du 20<sup>ème</sup> siècle, concept tout d'abord réfuté par manque de mécanisme physique convaincant, puis la proposition de l'expansion océanique par Vine et Matthews, et enfin les modèles globaux de tectonique des plaques depuis le modèle NUVEL-1 jusqu'aux développements récents de la géodésie spatiale. Si la plupart des candidats présentaient une connaissance solide des arguments de Wegener, les notions de lithosphère, de plaque lithosphérique et de mouvements à la surface d'une sphère, de même que les hypothèses de base permettant la construction de modèles tectoniques globaux ont rarement été correctement exposés.

## **2. Mouvements horizontaux et verticaux des plaques dans l'Atlantique (documents 4 à 6)**

### **2.1. Mouvements relatifs mesurés par forage**

*Après avoir précisé comment a été élaborée la carte du **document 4**, vous calculerez la vitesse d'écartement des deux plaques.*

La carte du **document 4** est un extrait de la carte de l'océan Atlantique de l'Atlas Géologique du Monde publié par CCGM-UNESCO en 1984. L'âge du plancher océanique y est représenté avec des couleurs conventionnelles (vert pour le Crétacé, orange-jaune pour le Cénozoïque) et les colonnes représentent la lithologie des forages.

Le plancher océanique peut être daté de manière directe par forage, soit par datation du contenu paléontologique des sédiments les plus anciens déposés sur la croûte océanique, soit par datation radiochronologique des basaltes par la méthode Ar/Ar (K/Ar précédemment) sur roche totale, ou bien

de manière indirecte par les anomalies magnétiques (cf. § 1.3). La méthode de datation la moins chère et la plus efficace est la méthode indirecte par les anomalies magnétiques, c'est donc elle qui est utilisée pour dresser les cartes des fonds océaniques comme celle du **document 4**.

En 1968, au moment de l'avènement de la tectonique des plaques, un grand programme international de forages océanographiques sans but lucratif a été lancé afin notamment de tester l'hypothèse de l'expansion océanique en datant la croûte océanique à différentes distances de la dorsale. Il s'agit du programme DSDP (Deep Sea Drilling Program) avec le navire foreur Glomar Challenger, auquel succédera en 1985 le programme ODP (Ocean Drilling Program) avec le navire foreur JOIDES Resolution, puis en 2004 le programme IODP (Integrated Ocean Drilling Program) avec le navire foreur japonais Chikyu capable de forer à 6 km sous 6000 m d'eau.

Le troisième leg du programme DSDP a été consacré à la datation des sédiments les plus anciens déposés sur la croûte océanique de l'Atlantique sud de part et d'autre de la dorsale (**document 4**), pour tester le modèle d'accrétion océanique et calibrer le calendrier des inversions du champ magnétique. Il s'est déroulé entre Dakar (Sénégal) et Rio de Janeiro (Brésil) du 1<sup>er</sup> décembre 1968 au 24 janvier 1969 (encart du **document 4**).

La vitesse moyenne d'écartement entre les plaques Afrique et Amérique du sud, c'est-à-dire la vitesse d'expansion océanique, est estimée en divisant la distance d'un forage à l'axe de la dorsale par son âge. On peut également étudier l'évolution de cette vitesse en divisant la distance entre deux forages voisins par leur différence d'âge. Dans les deux cas, la vitesse mesurée d'un côté de la dorsale ne représente que le demi-taux d'accrétion.

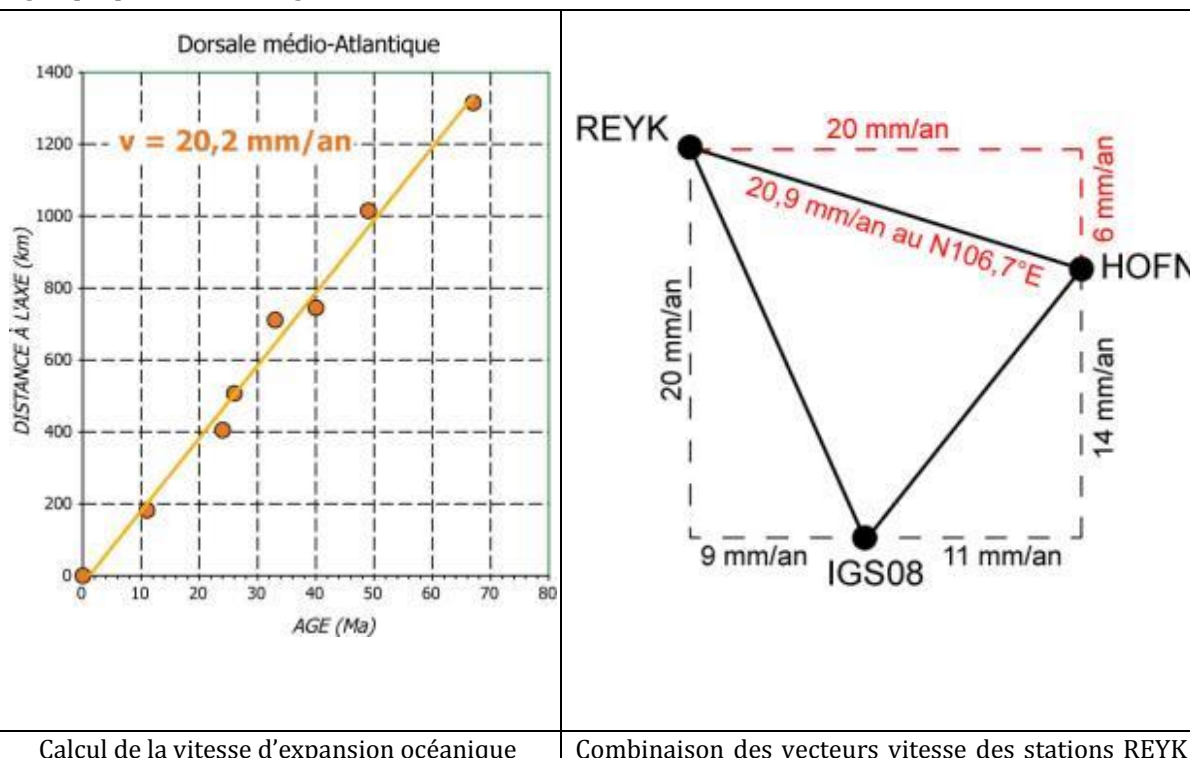
À l'aide du tableau, on peut tracer le graphe « distance = f(âge) » en reportant tous les forages de part et d'autre de l'axe de la dorsale (voir le graphe ci-après).

On constate que tous les points s'alignent sur une droite, ce qui signifie que :

- 1/ la vitesse d'expansion océanique est restée constante pendant la période considérée (67 Ma),
- 2/ l'accrétion est symétrique par rapport à l'axe de la dorsale.

En calculant la pente de la droite, on obtient un demi-taux d'accrétion de 20 mm/an, soit une vitesse d'écartement des plaques Afrique et Amérique du sud de 40 mm/an. Ce taux d'accrétion est caractéristique d'une dorsale lente, par opposition à une dorsale rapide comme la dorsale Est-Pacifique ( $> 7 \text{ cm.an}^{-1}$ ). Les dorsales lentes et rapides se distinguent par une morphologie, une sismicité, une rugosité de la lithosphère et un manteau (HOT versus LOT) différents.

Ce résultat est une confirmation de la théorie de l'expansion océanique tant pour la symétrie des âges que pour l'ordre de grandeur de la vitesse.





dans l'Atlantique sud (demi-taux) à partir des forages DSDP.	et HOFN pour calculer la vitesse d'écartement entre les plaques Amérique du nord et Eurasie en Islande.
<p><b>Commentaire :</b></p> <p>La première partie de la question a donné lieu à des confusions sur les méthodes de datation des fonds océaniques. Les anomalies magnétiques sont rarement citées alors qu'elles sont le fondement de la carte de l'âge des fonds océaniques.</p> <p>La deuxième partie de la question a été traitée convenablement par de nombreux candidats. Trop souvent, les calculs de vitesse, corrects, ne tiennent compte que d'une mesure, ce qui appauvrit la discussion quant à la régularité des déplacements des plaques.</p>	

## 2.2. La technique GPS et ses apports

*Vous préciserez la technique du GPS (document 5) et ses apports à la connaissance de la dynamique de la lithosphère.*

### La technique du GPS

Depuis les années 1990s' les mouvements des plaques sont mesurés par satellite. Les méthodes spatiales déterminent des distances en mesurant le temps de trajet des ondes électromagnétiques. Les points visés sont des satellites artificiels, sauf dans le cas du VLBI où ce sont des sources radio extragalactiques.

Les méthodes spatiales utilisées pour mesurer les mouvements des plaques sont :

- GPS : Global Positionning System
- DORIS : Détermination d'Orbite et Radio-positionnement Intégré par Satellite
- VLBI : Very Long Baseline Interferometry
- SLR : Satellite Laser Ranging

La méthode la plus utilisée est le GPS, créé dans les années 80' par le département de la Défense des Etats-Unis pour des raisons militaires. Un système équivalent, Galileo, est en développement en Europe.

La constellation GPS comprend actuellement 30 satellites (18 au lancement du projet, puis 24) en orbite à ~20.000 km autour de la Terre. Les satellites GPS sont répartis sur 6 orbites circulaires (5 satellites par orbite) inclinées de 55° par rapport au plan de l'équateur et décalées en longitude de 60°.

Le satellite envoie un signal de fréquence donnée reçu par une station terrestre. La mesure du temps de trajet du signal permet de calculer la distance satellite-station (la position du satellite étant connue). Avec un minimum de trois satellites visibles simultanément, on peut calculer la position de la station instantanément par trilatération. Le calcul des orbites des satellites est actuellement très précis et les limites de ces méthodes sont surtout liées à la propagation des ondes dans l'atmosphère et à la stabilité des stations. La précision des mesures peut atteindre quelques millimètres en horizontal, elle est moins bonne en vertical, et elle augmente avec le temps de mesure et la répétition des mesures.

Un réseau mondial de plus de 2000 stations permanentes a été développé, dont les résultats sont analysés et diffusés par le Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, en collaboration avec la NASA (<http://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>).

Le succès du GPS par rapport aux autres méthodes spatiales tient à sa facilité de mise en œuvre. Une station réceptrice GPS, qui comprend une antenne de ~20 cm de diamètre et un récepteur (ordinateur portable), est peu encombrante et facilement transportable, ce qui permet de mener des campagnes de mesures temporaires un peu partout dans le monde et de les répéter à intervalle de temps régulier. Ces mesures sont ensuite rattachées aux mesures du réseau permanent.

Depuis le début du 21ème siècle, il existe des modèles cinématiques globaux exclusivement basés sur les mesures satellitaires.

### Les apports du GPS à la connaissance de la dynamique de la lithosphère

La comparaison des résultats des modèles « géodésiques » aux modèles antérieurs « géologiques », basés sur des données essentiellement océaniques et en particulier sur les vitesses d'expansion océanique mesurées par les anomalies magnétiques sur les 3 derniers millions d'années (Ma) (modèles NUVEL-1 et MORVEL), montre que :

- au premier ordre, les vitesses des plaques sont confirmées par les données géodésiques : les mouvements des plaques sont donc stationnaires sur 3 Ma ;
- au niveau des frontières convergentes, mal renseignées par les modèles « géologiques », des

vitesse ont été précisées : la vitesse de convergence Inde-Asie est ainsi passée de 5 à 4 cm/an ;

- la cinématique devient continentale grâce aux mesures GPS réalisées sur les continents : la déformation de l'Asie sous l'effet de la collision de l'Inde a été révélée, comme la cinématique d'extrusion de la plaque Anatolie sous l'effet de la collision de l'Arabie ;
- les campagnes GPS au niveau des frontières de plaques en domaine continental, comme par exemple faille de San Andreas en Californie ou faille nord Anatolienne en Turquie, mesurent les effets transitoires liés aux séismes et le comportement non rigide aux frontières de plaques (déformation distribuée) ce qui permet de prendre en compte la déformation interne des plaques et les frontières diffuses.

#### **Commentaire :**

Le principe de trilatération est assez bien connu et souvent bien expliqué. Néanmoins, peu de candidats ont apporté un très bon niveau de précision (orbite des satellites, horloges atomiques, limitations de la méthode dues aux basses couches atmosphériques).

### **2.3. Mouvements relatifs mesurés par GPS**

*Vous montrerez comment il est possible de quantifier le déplacement relatif des deux plaques Amérique du Nord et Eurasie au niveau de l'Islande et vous comparerez le résultat avec celui du **document 4**.*

Le **document 5** montre des séries temporelles de mesures GPS réalisées en Islande pendant plus de 12 ans au niveau de deux stations permanentes :

- REYK située sur la plaque Amérique du nord ;
- HOFN située sur la plaque Eurasie.

Les mouvements des deux stations sont mesurés dans le référentiel IGS08. Les composantes latitudinales (N-S) et longitudinales (E-W) des vitesses sont indiquées (la composante verticale a été omise).

Les deux stations étant peu éloignées, on peut calculer leur mouvement relatif en travaillant dans un plan (hypothèse de Terre plate) et en additionnant les vecteurs vitesse. Si d'autre part on néglige la déformation diffuse à la frontière de plaque, la vitesse entre les plaques Amérique du Nord et Eurasie est directement déduite de l'évolution de la distance entre les deux stations.

En traçant un triangle de vitesse entre REYK et HOFN, on déduit le module de la vitesse instantanée entre les plaques Amérique du nord et Eurasie (voir ci-dessous) :

$$((20 - 14)^2 + (9 + 11)^2)^{1/2} = (36 + 400)^{1/2} = 436^{1/2} = \sim 21 \text{ mm/an}$$

Le résultat obtenu indique que les plaques Amérique du Nord et Eurasie s'écartent l'une de l'autre à la vitesse d'environ 21 mm/an, ce qui est cohérent avec le contexte géodynamique qui correspond à la dorsale lente médio-Atlantique.

#### **Comparaison avec les mesures par forages**

- Les vitesses mesurées par GPS sur quelques années sont des vitesses instantanées par comparaison avec les vitesses basées sur les forages (ou sur les anomalies magnétiques) mesurées sur plusieurs millions ou dizaines de millions d'années.
- Les vitesses mesurées en Islande et dans l'Atlantique Sud (2 à 4 cm/an) sont caractéristiques d'une dorsale lente.
- Les vitesses sont mesurées entre des couples de plaques différents : Amérique du Nord et Eurasie en Islande, Amérique du Sud et Afrique dans l'Atlantique Sud. Les différences de vitesses ne peuvent donc pas être discutées en fonction de la distance au pôle de rotation (pole d'Euler).

#### **Commentaire :**

Cette question a dérouté de nombreux candidats, pour qui la notion de vecteur et le théorème de Pythagore ont posé problème. Le jury rappelle que les acquis de mathématiques du second degré restent attendus dès lors qu'ils sont en rapport avec les sciences de la vie et de la Terre et susceptibles d'être utilisés en classe de collège comme de lycée.

### **2.4. Bathymétrie et subsidence thermique**

*En exploitant les forages du **document 4** et le **document 6**, vous expliquerez l'évolution bathymétrique*



*du plancher océanique.*

Le **document 6** met en évidence une corrélation entre subsidence, flux de chaleur, et âge de la lithosphère océanique. La subsidence augmente avec l'âge de la lithosphère, tandis que le flux de chaleur diminue.

Le modèle thermique de lithosphère qui rend compte de l'évolution de la subsidence et du flux de chaleur présente des colonnes verticales de manteau qui se mettent en place rapidement par remontée adiabatique à l'axe de la dorsale puis se refroidissent par leur sommet (en contact avec l'eau froide de l'océan) au cours de leur dérive latérale liée à l'arrivée de nouveau matériel. Ce refroidissement progressif se traduit par un approfondissement progressif des isothermes en fonction de l'âge et donc de la distance à la dorsale. Des calculs montrent que la profondeur des isothermes évolue en fonction de la racine carrée du temps. Ce refroidissement prédit aussi un épaississement progressif de la lithosphère par transformation de manteau asthénosphérique en manteau lithosphérique lorsque les températures diminuent. Ainsi, en s'éloignant de la dorsale, la lithosphère océanique s'hydrate, se refroidit, s'épaissit et devient plus dense.

Pendant le refroidissement, l'équilibre isostatique est assuré par subsidence des fonds de manière à ce que la subsidence compense la différence de masse (liée à la différence de densité) entre une colonne de lithosphère jeune, chaude et légère, et une colonne d'asthénosphère vieille, froide et dense. Un calcul permet de montrer que la subsidence varie en fonction de la racine carrée de l'âge de la lithosphère. La dorsale médio-Atlantique est ainsi un relief positif parce que les fonds voisins s'enfoncent suivant le processus de subsidence thermique au cours de leur refroidissement en fonction de leur âge. Cette évolution (densité modifiée par effet thermique) correspond au modèle de Pratt par opposition au modèle d'Airy qui correspond à une analyse mécanique de l'écorce terrestre dont la densité est constante et qui est épaissie ou amincie par déformation.

Sur le **document 4**, les colonnes représentant les forages montrent que la couverture sédimentaire s'épaissit en s'éloignant de l'axe de la dorsale, proportionnellement à l'âge de la lithosphère. Cette sédimentation de plus en plus épaisse participe à la subsidence de la croûte océanique par isostasie. Dans le même temps, la lithologie change et passe de calcaires à des argiles rouges des grands fonds. Ce changement de lithologie est à mettre en relation avec la bathymétrie car la distribution des sédiments dans l'océan Atlantique est contrôlée par la profondeur, à l'exception des sédiments terrigènes contrôlés par l'apport des grands fleuves.

En domaine océanique franc, les sédiments proviennent de la chute des fines particules provenant des eaux de surface. Ce sont des particules argileuses flottant sur de longues distances, et des particules carbonatées ou siliceuses provenant des organismes du plancton comme coccolithophoridés et foraminifères. Si les argiles ne subissent aucune modification chimique lors de leur chute, la sous-saturation croissante en profondeur de l'eau de mer est responsable d'une dissolution croissante des fines particules carbonatées. Ainsi au-dessous d'une profondeur critique nommée CCD ou profondeur de compensation des carbonates et qui se situe autour de 5000 m dans l'océan Atlantique (**document 6**), toutes les particules carbonatées sont dissoutes et l'on ne trouve plus que la sédimentation siliceuse (tant que la profondeur est supérieure à celle de la CCD) et les argiles des grands fonds (NB. les argiles rouges des grands fonds ne sont pas uniquement liées aux argiles d'origine continentale transportées par les courants contouritiques. Elles sont aussi le résultat de l'altération hydrothermale de la croûte océanique et des résidus de la dissolution des carbonates).

Dans l'Atlantique, les sédiments carbonatés prévalent de part et d'autre de la dorsale au dessus de la CCD, alors que les argiles rouges des grands fonds dominent dans les plaines abyssales. Dans l'Atlantique sud, les rides asismiques issues du point chaud de Tristan da Cunha sont au-dessus de la CCD et sont couvertes de sédiments carbonatés.

#### **Commentaire :**

Cette question est peut-être celle qui a été la moins bien traitée. Le modèle thermique de lithosphère qui refroidit et épaissit, causant la subsidence dite "thermique" du plancher océanique, a rarement été expliqué de manière satisfaisante, en lien avec les documents proposés. La confusion entre croûte et lithosphère océaniques a été notée dans de nombreuses copies. Si le stress de l'épreuve peut expliquer quelques erreurs, les notions fondamentales, exigibles des lycéens, doivent absolument être maîtrisées.

### **3. Devenir et évolution de la lithosphère de l'océan Atlantique (documents 7 à 10)**

### 3.1. Le rifting et la déchirure continentale

*Vous rappellerez les principes de la sismique-réflexion et vous réaliserez une interprétation du profil du document 7.*

La divergence continentale provoque un étirement de la lithosphère continentale et son amincissement accommodé par des failles normales dans la croûte supérieure. C'est la phase de rifting, qui précède la déchirure continentale et la phase d'expansion océanique. Ce processus en deux étapes est à l'origine de la formation des marges passives :

- 1/ la phase de rifting pendant laquelle l'étirement de la lithosphère continentale provoque son amincissement et conduit à sa déchirure ;
- 2/ la phase d'expansion océanique (ou d'accrétion océanique) pendant laquelle une dorsale médio-océanique se met en place avec production de nouvelle lithosphère océanique entraînant l'ouverture d'un océan et la séparation de deux plaques tectoniques.

Les marges continentales passives, sans activité sismique ni volcanique, sont les témoins de la lithosphère continentale étirée pendant le rifting et qui a évolué postérieurement par subsidence thermique. Elles correspondent à la transition entre la croûte continentale et la croûte océanique. Ce ne sont pas des frontières de plaques.

On trouve des témoins du rifting de la Pangée au niveau des marges passives de l'Atlantique, comme la marge de Galice au large de l'Espagne (**document 7**).

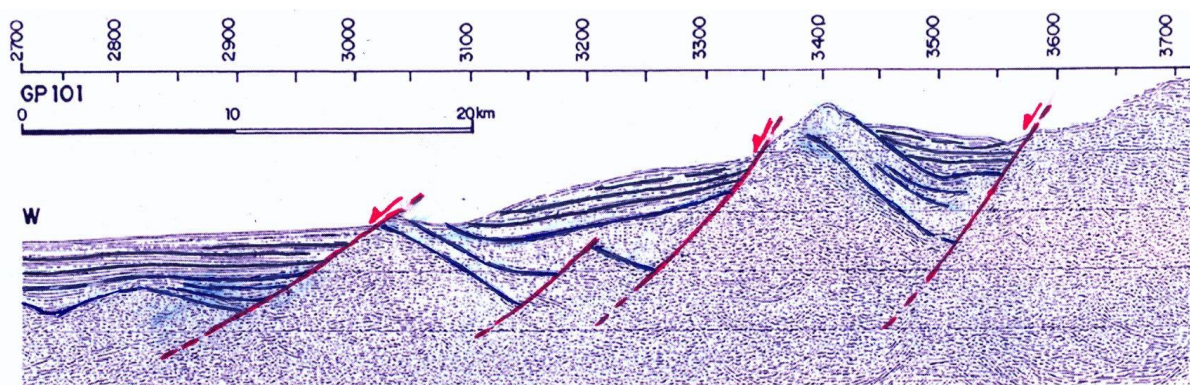
#### Principes de la sismique réflexion

La sismique réflexion est une méthode utilisée pour imager la structure du sous-sol à l'aide d'ondes sismiques provoquées. Les ondes sont émises à la surface de la Terre, par explosion en mer (canons à air comprimé) et vibrations à terre (camions vibrosismiques), et sont réfléchies par les interfaces géologiques qui correspondent aux limites entre les formations (contrastes de lithologie, densité, porosité) et aux failles. Les signaux réfléchis sont enregistrés en surface par une série de récepteurs en ligne (hydrophones ou géophones). Les sismogrammes obtenus en déplaçant le dispositif (en maintenant la distance source-récepteur constante) sont juxtaposés sur un profil sismique pour étudier l'évolution latérale des réflecteurs. Connaissant la vitesse de propagation des ondes dans le milieu traversé et le temps de parcours source-récepteur, la profondeur des structures rencontrées est ensuite calculée.

#### Interprétation du profil sismique

Des blocs basculés de la marge, limités par des failles normales, sont visibles sur les profils de sismique réflexion du **document 7**.

Sur le profil, il est possible de mettre en place les concepts de blocs basculés bordés par des failles normales ( $\pm$  listrique), sédiments pré-rifts, syn-rifts et post-rifts, discordance post-rift (break-up unconformity). On soulignera la notion de sédiments syn-rifts en éventail, marqueurs de la période d'extension. La transition aux sédiments post-rift marque la fin de l'épisode d'extension et le début de l'océanisation : la phase de spreading succède à la phase de rifting.



**Commentaire :**

Quand elle l'a été, cette question a été traitée de manière à peu près satisfaisante par les candidats.

### 3.2. Histoire de l'ouverture de l'Atlantique

À l'aide des **documents 7 à 10** :

*Vous retracez l'histoire géodynamique de l'océan Atlantique depuis le stade "super-continent" jusqu'à l'actuel.*

Avec l'extrait de la carte géologique du monde (**document 8**), il est possible de reconstruire les grandes étapes de l'ouverture de l'Atlantique.

#### ➤ Ouverture de l'Atlantique central au Jurassique

La plus ancienne lithosphère océanique, d'âge Jurassique (couleurs bleues), est observée dans l'Atlantique central. Elle indique que l'ouverture de cette portion d'Atlantique a débuté au Jurassique Moyen, dans le prolongement des océans téthysiens comme l'océan alpin plus à l'Est, entre les blocs continentaux Amérique du Nord et Europe d'une part, et Afrique et Amérique du sud d'autre part. La Pangée a donc persisté dans cette région du Carbonifère supérieur jusqu'au Jurassique inférieur pendant environ 100 Ma. L'ouverture de l'Atlantique central est contemporaine de la mise en place de la province magmatique centre-atlantique (CAMP) vers 200 Ma (dont l'enveloppe est représentée sur la carte par des tirets rouges).

#### ➤ Ouverture de l'Atlantique sud au Crétacé supérieur

L'Atlantique sud s'ouvre au Crétacé inférieur « en ciseaux » avec une propagation du sud vers le nord (sur la carte, la lithosphère océanique d'âge Crétacé inférieur en vert foncé est plus large au sud qu'au nord). Il sépare la plaque Afrique de la plaque Amérique du sud. Cette ouverture provoque un mouvement de convergence N-S entre l'Afrique et l'Eurasie, qui va fermer les océans téthysiens et aboutir à la formation des Alpes. L'ouverture de l'Atlantique sud est immédiatement précédée par d'importants épanchements basaltiques de type trapps datés de 133 Ma, qu'on retrouve au Brésil (trapps du Parana) et en Afrique (trapps d'Etendeka). Ils sont associés à la mise en place au point chaud Tristan da Cunha.

#### ➤ Ouverture de l'Atlantique nord au Crétacé supérieur et au Tertiaire

La séparation de l'Eurasie et de l'Amérique du nord débute au Crétacé supérieur avec une branche avortée dans le golfe de Gascogne où l'anomalie 34 a été identifiée (84 Ma). Au nord, l'océan Crétacé supérieur passait dans la mer du Labrador entre le Canada et le Groenland. À l'Eocène, cette branche coexiste avec l'océan moderne entre le Groenland et l'Eurasie, en isolant une plaque Groenland. A partir de l'Oligocène, la dorsale du Labrador cesse de fonctionner et seule la branche orientale reste active jusqu'à nos jours en se propageant dans l'océan Arctique et l'embouchure de la Léna. La plaque Groenland se rattache alors à la plaque Amérique du nord. L'ouverture de l'Atlantique nord est contemporaine de la mise en place du point chaud d'Islande au Paléocène.

Ainsi, les trois des épisodes d'ouverture de l'Atlantique sont corrélée temporellement et spatialement avec des épanchements volcaniques volumineux interprétés comme l'arrivée de la tête de panaches mantelliques sous la lithosphère continentale associés à une fusion importante du manteau. La mise en place des points chauds réchauffe et affaiblit la lithosphère continentale, provoquant la localisation du rifting et à terme la déchirure lithosphérique. Ainsi, l'impact des panaches mantéliques déclenche la déchirure de la lithosphère continentale, c'est ce que l'on nomme "rifting actif".

#### ➤ Mort de l'Atlantique

La lithosphère océanique de l'océan Atlantique plonge dans l'asthénosphère au niveau des zones de subduction des Antilles et des Sandwichs, aux extrémités nord et sud de la plaque Amérique du Sud. Au niveau des Antilles, le plan sismique de Wadati-Benioff se suit jusqu'à 200 km de profondeur (**document 9**). La géométrie des deux zones de subduction est très similaire avec une plaque supérieure, portant un arc volcanique et un bassin arrière-arc, qui migre rapidement vers l'Est aux dépens de la lithosphère Atlantique. Au-dessus de la subduction des Antilles, le volumineux prisme d'accrétion de la Barbade se développe à partir des sédiments terrigènes du fleuve Orénoque.

Ainsi, l'océan Atlantique commence à disparaître localement sur sa bordure Ouest.

#### **Commentaire :**

Cette question, qui n'a pas été traitée par tous les candidats, s'est révélée très discriminante. D'un côté, de trop nombreux candidats n'ont absolument pas exploité les documents et ont présenté de manière schématique et dogmatique les cycles de Wilson. De l'autre, de trop rares candidats ont utilisé la carte



géologique du monde pour dater l'ouverture en précisant bien le diachronisme entre l'Atlantique central, l'Atlantique Sud et l'Atlantique Nord. Les notions de base concernant le métamorphisme dans les zones de subduction laissent le plus souvent à désirer. Les candidats doivent acquérir pendant leur préparation aux concours des connaissances "de base" solides s'ils veulent pouvoir les mobiliser dans les stratégies pédagogiques de leur futur métier.

### 3.3. Origine et devenir d'un gabbro

À l'aide des **documents 7 à 10** :

*Vous retracez l'origine et le devenir d'un gabbro au cours de cette histoire.*

L'évolution d'un gabbro océanique se déroule en trois étapes principales.

#### 1/ Formation de la croûte océanique

La croûte océanique se forme à l'axe des dorsales. Le modèle classique de croûte océanique, correspondant à la colonne ophiolitique type de la conférence Penrose (1972), d'une épaisseur de 6 à 7 km, est observé sur la coupe de la faille transformante de la Vema le long de la dorsale médio-Atlantique au sud des Açores :

- la croûte supérieure est composée de basaltes (pillows, coulées) surmontés par une couverture sédimentaire et reposant sur un complexe filonien avec des dykes de dolérites ;
- la croûte inférieure est constituée de gabbros ;
- sous la croûte, le manteau est formé par des péridotites de type lherzolite pour les dorsales lentes et harzburgite pour les dorsales rapides.

À l'axe des dorsales, le magma se met en place dans des chambres magmatiques peu profondes. La cristallisation lente dans la chambre produit les gabbros de texture grenue. L'émission de magma en surface est à l'origine des laves basaltiques de texture microlitique. Le complexe filonien correspond à la zone d'alimentation des émissions de surface.

#### 2/ Hydrothermalisme aux dorsales

La circulation hydrothermale au niveau des dorsales évacue environ 30% du flux de chaleur d'origine interne vers la surface du globe et participe au refroidissement de la lithosphère océanique. Elle est à la base de flux importants d'éléments entre la croûte et l'océan. Des observations de sorties d'eau anormalement chaude ont été faites dans les sites sous-marins hydrothermaux au niveau des fumeurs noirs qui crachent des fluides à 350°C chargés de sulfures de fer, de cuivre et de zinc, qui précipitent au contact de l'eau mer pour former des cheminées atteignant plusieurs dizaines de mètres de hauteur. D'autres sorties, les fumeurs blancs, ont des températures moins élevées.

L'interaction entre l'eau de mer et les roches de la croûte océanique entraîne des modifications chimiques et minéralogiques de la croûte qui est métamorphisée dans les conditions du faciès schistes verts (épidote, chlorite, actinote) puis faciès amphibolites avec hydratation des minéraux ; couronnes d'amphiboles hornblende autour des pyroxènes (cf. **doc. 10b**).

#### 3/ Subduction de la lithosphère océanique

La subduction des gabbros de la lithosphère océanique est illustrée par le **document 10a** :

- À gauche : roche à plagioclase et pyroxène brun entouré d'une couronne d'amphibole bleue sodique (glaucofane).

Diagnostic : métagabbro à glaucofane typique du faciès "schistes bleus", relique d'une croûte océanique enfouie par subduction dans des conditions HP-BT.

- À droite : roche à grenat (rouge) et pyroxène vert sodique (jadéite ou omphacite).

Diagnostic : éclogite à grenat-omphacite (jadéite) typique du faciès "éclogites", témoin d'un enfouissement à des T et P supérieures à celles du faciès "schistes bleus".

**Remarque** : la libération d'eau lors du passage du faciès amphibolite au faciès éclogite entraîne une faible fusion de la péridotite sus-jacente. Le magma produit, siliceux et hydraté, participera à l'accrétion continentale par la mise en place de plutons granitiques (au sens large).

#### Commentaire :

La réponse à cette question nécessitait une prise en compte des documents, ce qui a rarement été le cas. Le plus souvent le candidat s'est contenté d'une récitation de connaissances, souvent du niveau de la classe de terminale, et concernant essentiellement le "devenir du gabbro" plutôt que son "origine". Le

jury regrette un nombre non négligeable d'erreurs grossières difficilement admissibles, faisant du gabbro une roche métamorphique ou volcanique. La décompression adiabatique est rarement citée et encore moins expliquée.

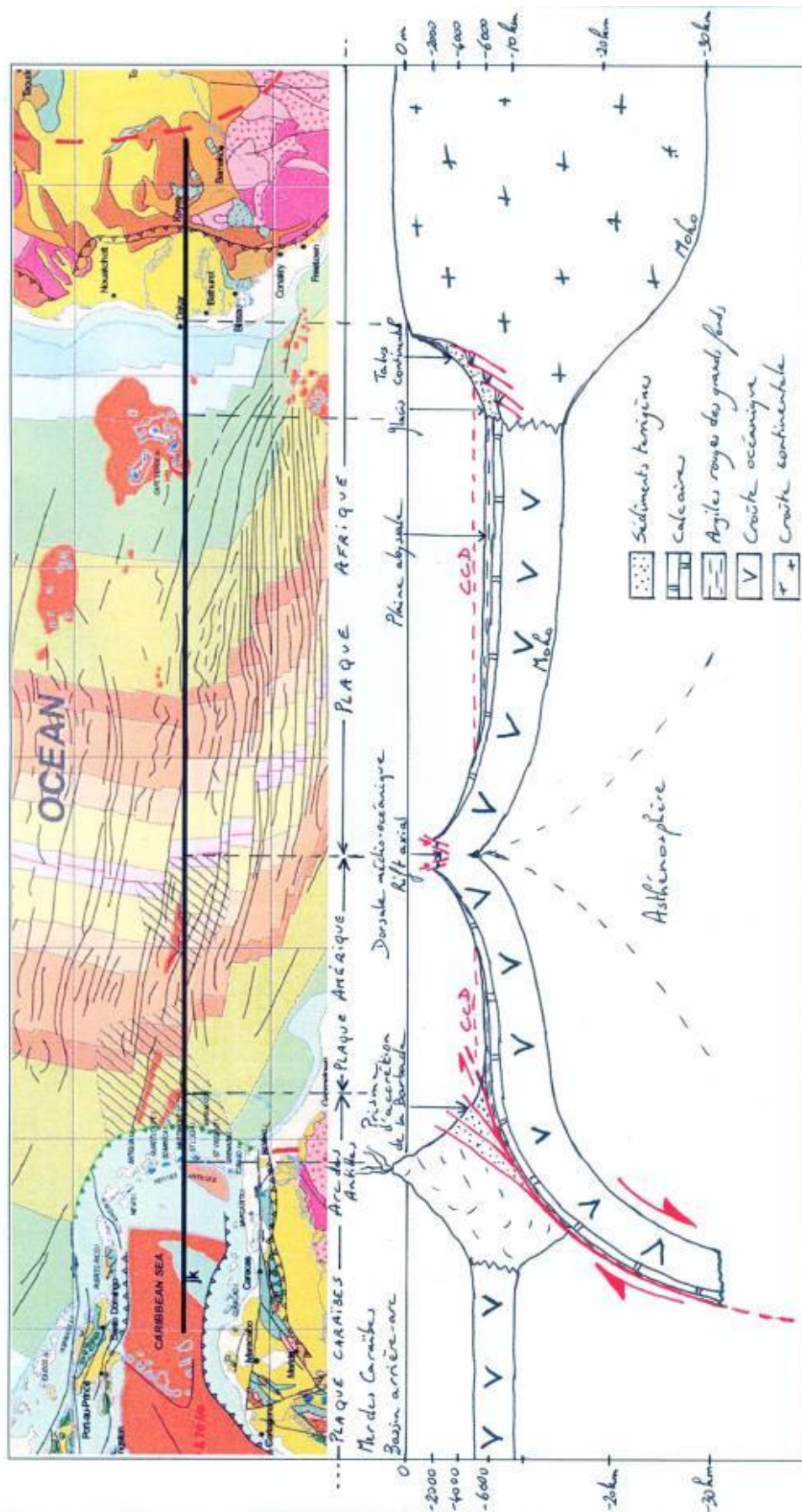
Les lames minces ne sont que très rarement décrites et peu de candidats s'y réfèrent pour argumenter la chronologie des réactions minéralogiques par les relations géométriques. Quand ils sont cités et utilisés les facies du métamorphisme sont bien connus, ainsi que les minéraux caractéristiques associés.

S'agissant de connaissances extrêmement classiques, le traitement de cette question a beaucoup déçu et inquiété le jury.

### **3.4. Coupe de l'océan Atlantique**

*Vous réaliserez une coupe E-W en-dessous et selon le trait positionné sur l'extrait de carte : topographie, structures, lithologies, ...*

3.4. Vous réaliserez une coupe E-W en-dessous et selon le trait positionné sur l'extrait de carte : topographie, structures, lithologies, ...







### 3.5. Mise en activité en classe de première

*Vous montrerez comment vous pourriez utiliser les **documents 7 et 8** pour mettre en activité en classe des élèves de première scientifique.*

**Remarque préliminaire** : les propositions ci-dessous ne sont évidemment pas exclusives. Toute proposition pertinente dans le cadre du programme de première S est acceptable. Plusieurs utilisations mettant en œuvre des compétences différentes et/ou se complétant peuvent être proposées.

→ **Document 7** : la question 3.1 a permis d'interpréter ce profil. Avec les élèves, on peut l'utiliser soit avant, soit après la mise en évidence du lien entre la distension et la formation de failles normales et de blocs basculés (didactisation du document).

- **Utilisation 1** : Modélisation analogique à partir d'un matériau suffisamment déformable et cassant pour subir une distension et engendrer des failles. Classiquement, on utilise du sable humide, ou du plâtre... On pourrait et pourra discuter les limites de l'analogie, en particulier dans l'homothétie des grandeurs : résistance des matériaux, durée de déformation, forces mises en jeu, ...

**Remarque** : La modélisation consiste à appliquer une force extensive horizontale (contrainte  $\sigma_3$ ) avec une force maximale (contrainte  $\sigma_1$ ) verticale. Il en résulte une fracturation faisant un angle d'environ  $30^\circ$  avec la contrainte maximale, donc des failles avec un pendage de  $60^\circ$ . La même modélisation avec une contrainte maximale horizontale (compression) générera des failles inverses avec un pendage de  $30^\circ$  (et des plis si la déformation est suffisamment lente).

- **Utilisation 2** : Recherche de conditions favorables à l'accumulation rapide et protégée de matière organique à l'origine de sédiments pétrologènes. Les marges passives sont de bonnes candidates car leur subsidence thermique et les gradients thermiques associés sont favorables à la maturation de la matière organique. Le profil du **document 7** permet de mettre en évidence les failles normales qui accommodent la subsidence syn et post-rift.

**Remarque** : La légende de la carte du **document 4** contient le figuré "S" comme "sapropèle" dans des sédiments carbonatés servant de roche mère. Il n'y a pas de colonne montrant ce figuré. On trouve également des sapropèles au large des marges sur-alimentées (côte Sud-Est des E.U. par exemple).

**Remarque** : Il est possible de mettre ce **document 7** en relation avec le **document 8** en proposant de le localiser géographiquement et donc de le situer du point de vue géodynamique.

→ **Document 8** :

- **Utilisation 1** : Utilisation d'un calque et reconstruction de l'état d'ouverture de l'Atlantique à différentes époques, jusqu'à l'emboîtement des continents "comme Wegener".

- **Utilisation 2** : Argumentation du modèle de la tectonique des plaques reprenant l'idée de l'expansion océanique, qui prévoit que la croûte océanique est d'autant plus vieille que l'on s'éloigne de la dorsale ; on fait l'étude des sédiments océaniques pour confirmer l'hypothèse d'expansion (cf. question 2.1) ;

**Remarque** : on peut faire réfléchir les élèves sur les façons dont les fonds océaniques ont été étudiés (navire foreur) (cf. question 2.1) ;

- **Utilisation 3** : Utilisation en l'état sans modification avec par exemple la réalisation d'un calque centré sur les fonds de l'Atlantique Sud ou la réalisation de log de part et d'autre de la dorsale pour réaliser une coupe avec les sédiments, à partir de quelques log schématiques (proches de ceux du **document 4**) pour reproduire les couches de sédiments (erreur fréquente d'une disposition "classique" avec couches superposées parallèles au fond océanique sur toute la superficie du plancher océanique)

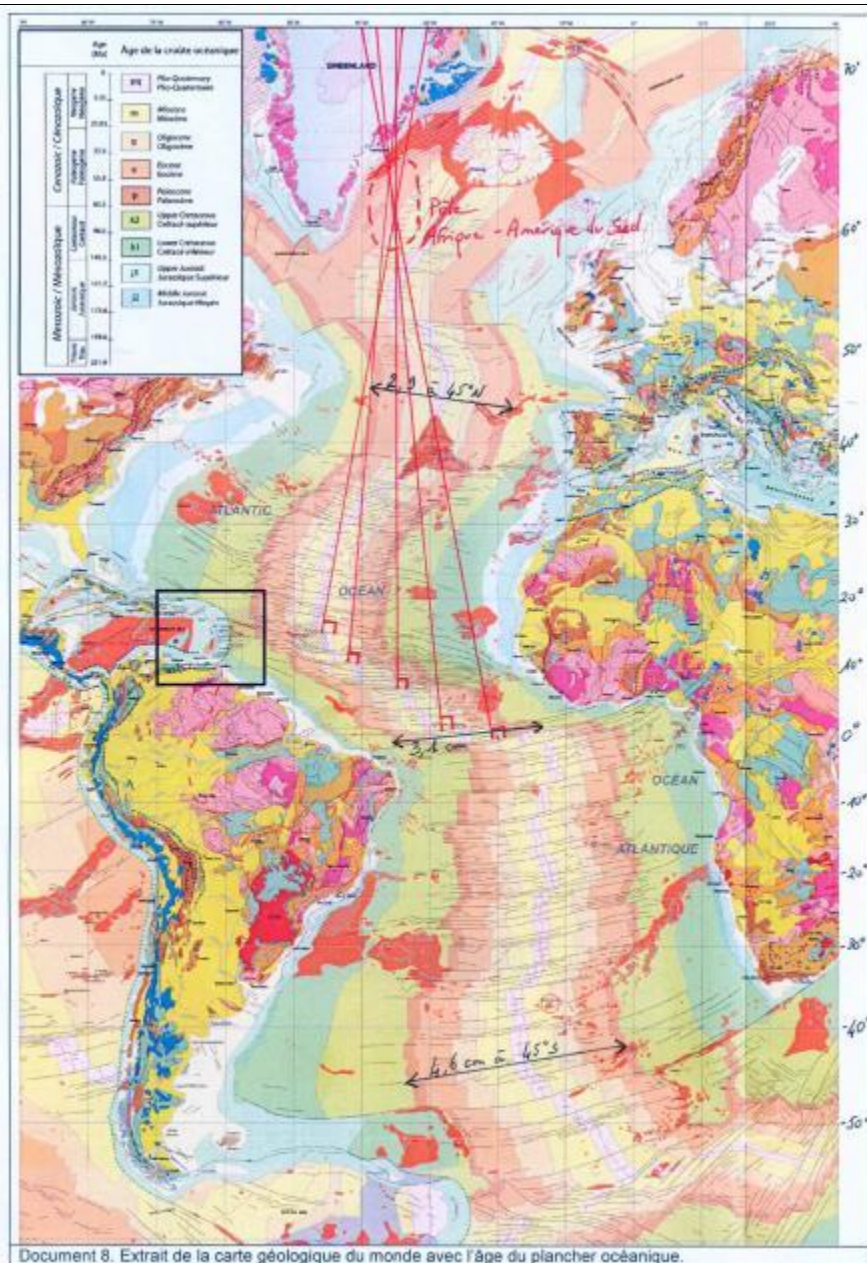
- **Utilisation 4** : Calcul d'une vitesse de divergence, comme dans le **document 4** et la

question 2... mais sans indication d'échelle. Il faut donc que l'élève calcule les distances à partir des longitudes (puisque l'ouverture de l'Atlantique est E-W, en sachant qu'il y a  $360^\circ$  et un rayon de 6400 km. Ce sont des connaissances normalement disponibles, mais qu'on peut fournir à ceux qui ne les ont pas, sous forme d'aides. Au niveau de l'équateur, on trouve aisément qu'un degré de longitude mesure 111 km. Pour les latitudes, la longueur des cercles parallèles à l'équateur diminue en fonction du cosinus de la latitude, avec  **$r = R \cdot \cos(\text{latitude})$**  où  $r$  est le rayon du petit cercle à une latitude donnée et  $R$  le rayon de la Terre (6400 km). La légende fournissant les âges entre deux étages, l'élève peut, par proportionnalité, calculer des distances, donc des vitesses moyennes. On trouve par exemple, au niveau de l'équateur 37 mm/an et 39,5 mm/an à  $45^\circ$  Sud et 24 mm/an pour le  $45^\circ$  Nord. On en déduit que les pôles de rotation, pour l'ouverture de l'Atlantique Sud ou Nord, se trouvent dans l'hémisphère Nord. Avec des élèves, le calcul au niveau de l'équateur est accessible à tous. Le calcul au niveau d'autres latitudes pourra être proposé "pour aller plus loin", comme façon de différencier en fonction de l'appétence des élèves pour les calculs et/ou de leurs facilités (**voir figure ci-dessous**).

La mesure dans le nord peut être comparée à celle obtenue avec la technique du GPS (question 2.3), soit 21 mm/an.

- **Utilisation 5** : Détermination du pôle Eulerien de rotation des deux plaques Afrique et Amérique du Sud en traçant des perpendiculaires aux failles transformantes dans l'Atlantique central (**voir figure ci-dessous**).





Page 24 sur 29

Le programme prévoit de modéliser ou simuler "pour comprendre que les mouvements des plaques sont des rotations de pièces rigides se déplaçant sur une sphère".

- **Utilisation 6** : Illustration du principe de la cinématique absolue à partir du point chaud Tristan da Cunha (cercle rouge vers 36°S) et des deux rides volcaniques de Rio Grande et de Walvis, dans l'Atlantique Sud, afin de "corréliser les directions et les vitesses de déplacements des plaques tirées des données paléomagnétiques avec celles déduites de l'orientation et des âges des alignements volcaniques intraplaques" (programme). Les deux rides dessinent un V pointant vers le sud et matérialisent le mouvement des deux plaques, d'une part d'écartement de l'une par rapport à l'autre, et d'autre part vers le Nord. Les trapps d'Etendeka en Afrique (comme ceux de Parana en Amérique du Sud) sont datés de 133 Ma. On peut calculer la vitesse en fonction de la distance parcourue, calculée comme précédemment avec les longitudes.

*NB. La dorsale s'est déplacée vers l'ouest par rapport au point chaud, il y a environ 30 Ma. Depuis ce saut de la dorsale, le point chaud ne se trouve plus sous l'axe et il a par ailleurs perdu en vigueur.*

**Remarque** : les trois activités précédentes (4, 5 et 6) peuvent être traitées en interdisciplinarité avec le professeur de mathématiques, notamment dans le cadre de

### *l'accompagnement personnalisé*

#### **Commentaire :**

Le jury a noté une grande hétérogénéité dans les réponses, de l'absence à une réponse correcte, mais nombre des candidats se sont contentés de répéter ce qu'ils ont dit et fait précédemment (analyse de profil et calcul de vitesses), mais peu ont intégré ces activités dans une démarche plus globale.

Concernant l'exploitation du **profil de sismique réflexion du document 7**, peu de candidats ont traité cette question et parmi eux peu proposent une exploitation possible en classe. Souvent ils décrivent le document, évoquent éventuellement de le coupler à un modèle mais ne voient pas comment l'utiliser pour que les élèves soient en activité.

Concernant l'exploitation de la carte du document 8, elle est mieux connue et les activités proposées, même si elles sont rarement transposées pour un élève de première S, sont cohérentes.

## **4. Apport de la modélisation à la compréhension de l'expansion océanique**

*En vous appuyant sur les **documents 11 à 14** et tout autre document issu de ce dossier, dont les extraits de programme en annexe, vous montrerez comment on peut utiliser la modélisation, d'une part dans les apprentissages, d'autre part dans la construction des notions relatives à l'expansion océanique de la classe de quatrième à celle de première scientifique*

*Quelques données physiques :*

- point de Curie du fer : environ de 800°C
- point de Curie de la magnétite : environ 700°C
- solidus d'un basalte à l'air libre : environ 900°C

La modélisation analogique est une façon d'aborder **expérimentalement** des phénomènes inaccessibles à l'expérimentation directe, en particulier pour des **échelles de temps et d'espace**, comme c'est souvent le cas en géologie. Elle nécessite donc de considérer les **transferts d'échelles** et de s'interroger sur les **limites** de ces transferts.

L'approche quantitative n'est pas toujours possible et il faut souvent se contenter de "**mimer**" le réel, qualitativement, surtout en situation didactique. Il s'agit de montrer et/ou faire réaliser des phénomènes qui "fonctionnent comme", d'où l'analogie.

### **Construction des notions**

La modélisation proposée (**document 13**) permet de matérialiser l'acquisition d'une **aimantation thermorémanente** par un basalte lors de sa cristallisation à partir d'un magma, à l'aplomb d'une dorsale (par exemple de type Atlantique). L'analogie porte d'une part sur l'orientation de clous dans un champ magnétique mimant le champ magnétique terrestre et d'autre part sur la solidification de la gélose mimant la cristallisation de la lave = solidus (**document 13**). Cette modélisation laisse à penser que dans un basalte existe des "aiguilles" de minéraux ferromagnétiques, comme la magnétite visible dans le fond microlitique du basalte du **document 12**. Mais ce ne sont pas des aiguilles comme le laissait supposer la modélisation avec clous et gélose. Par ailleurs, cette modélisation suggère que l'orientation s'acquière dans la lave en fusion, représentée par la gélose fondue.

L'expérience du **document 14** met en évidence le **point (ou température) de Curie**, température au-dessus de laquelle l'aimantation est annulée pour être à nouveau acquise en dessous. Et ce de manière définitive, tant qu'ils ne repasseront pas au-dessus de la température de Curie, pour les matériaux ferromagnétiques. Les données fournissent 580°C pour la température de Curie de la magnétite et environ 900°C pour la solidification totale (= solidus) d'un basalte. Ce dernier est donc totalement cristallisé lorsque la magnétite acquiert l'aimantation du champ magnétique ambiant, donc terrestre. Ce ne sont donc pas les "aiguilles de magnétite" qui s'orientent, mais les **moments magnétiques** (au niveau des spins des électrons).

### **Apprentissages**

La modélisation est donc une **approximation de la réalité** dont il faut connaître les **limites** et qui peut entraîner des **obstacles** cognitifs si ces approximations viennent en conflit paradoxal avec une

connaissance, ici par exemple, les températures de Curie de la magnétite et celle du solidus basaltique.

Les deux manipulations permettent, entre autres, d'évaluer la capacité à "mettre en œuvre un protocole".

Cette approche permet de travailler l'évaluation des compétences expérimentales du baccalauréat, épreuve comptant pour quatre points dans la note d'admissibilité. On peut évaluer les capacités "réaliser" par la mise en œuvre d'un protocole (**document 13 et 14**), et "communiquer", les résultats de mesures pouvant être communiqués sous la forme d'un schéma (**document 13**) ou de photographies (**document 14**), légendés et commentés, en laissant le choix à l'élève du moyen de communication.

### Utilisations possibles

**Au collège**, afin de "*observer, recenser et organiser des informations relatives aux mouvements des plaques* (programme)" (**documents 3 et 4**), on met en évidence la rémanence magnétique dans un basalte (**document 11**) pour construire les notions "d'anomalie magnétique" (très faible variation du champ actuel quand on le mesure sur place) et "d'inversion des pôles". On peut alors s'interroger sur l'origine de cette thermorémanence et le lien avec la mise en place du basalte, donc son intérêt dans l'accrétion océanique. C'est parce que cette acquisition est contemporaine de la sortie du basalte qu'elle peut la dater. Et c'est parce qu'elle est corrélable sur toute la surface du globe qu'elle peut être utilisée comme datation, par les inversions connues partout et précisément datées. La modélisation illustre l'orientation du magnétisme au-dessus d'une certaine température, qui correspond dans le **document 13** à la solidification de la gélose.

**Au lycée**, après avoir, en première S, "*mis en évidence des bandes d'anomalies magnétiques* (programme)", on explique cette rémanence par des connaissances de science physique concernant le magnétisme (**point de Curie** et **magnétite** – mots clés du programme), avant de les utiliser pour "*prévoir des vitesses de déplacement des plaques* (programme)". La lame mince du **document 2** permet d'envisager une **observation microscopique** en lumière polarisée, analysée ou non. L'élève peut communiquer par un croquis ou une photographie traitée (légende, titre, grossissement), en mettant en évidence **deux phases de cristallisation**, une première, lente et en profondeur, donnant de gros cristaux (plagioclases, pyroxènes, traces d'olivine) et une seconde, rapide et en surface, donnant des microlites, essentiellement de plagioclases et pyroxènes, avec aussi de la magnétite (oxyde cubique = minéral opaque, noir en LPA et LPNA). Par rapport au modèle explicatif des clous dans la gélose, s'oppose alors la forme des cristaux qui ne sont pas du tout en "aiguilles". **L'expérimentation du document 14** permet de construire la notion d'acquisition de la thermorémanence magnétique à l'état solide, au sein d'un basalte déjà cristallisé.

### Limites du modèle

C'est à la fois celles de toute analogie... et le but de cette question, à savoir apporter des connaissances (ici de physique avec le point de Curie) pour discuter les approximations d'un modèle, l'améliorer ou le rejeter, à moins de l'utiliser pour une première approche et compréhension d'un phénomène. Toute approche didactique d'une notion nécessite une graduation des représentations qu'il faut faire évoluer au fur et à mesure de la progression cognitive. Il est nécessaire, pour cela, de placer l'élève face à l'incapacité de la représentation du moment à expliquer un apport supplémentaire, soit d'observation (un nouveau fait : ici, pas de "baguettes de magnétite") soit de connaissance (point de Curie en dessous du solidus).

Dans le modèle "clou-gélose" (niveau collège) :

- on "visualise" un phénomène (orientation d'objets ferromagnétiques dans un champ magnétique) ;
- on pense que l'acquisition magnétique se fait au sein d'un basalte encore partiellement liquide ;
- on imagine l'orientation de cristaux de magnétite "en baguette" ;
- on comprend mal les lames minces de basalte dans lesquels la magnétite n'est jamais en baguette.

Avec l'expérimentation du point de Curie, on enrichit le modèle avec l'idée :

- d'une aimantation liée à la température ;
- d'une acquisition au sein d'un matériel solide ;
- d'une orientation au niveau des atomes de la magnétite et non de la magnétite au sein du basalte.

Concernant la modélisation, certains candidats n'en parlent pas du tout, d'autres récitent un cours sans l'adapter et d'autres encore, plus rares, essaient de discuter de la validité du modèle dans le contexte



fourni. Les limites du modèle du **document 13** sont très peu énoncées, de même que la notion d'obstacle. Peu de candidats pensent à la critique des modèles et à la formation apportée aux élèves au cours de cette étape.

Un lien est parfois trouvé entre les documents, ainsi qu'une démarche, parfois cohérente et adaptée au niveau, qui les intègre. Mais certains documents sont négligés ou trop peu exploités pour que l'on comprenne l'intérêt pour l'élève. Peu de candidats différencient ce qui est fait en classe de quatrième et ce qui est à traiter en première scientifique.

L'utilisation des modèles dans le cas particulier du sujet a été beaucoup plus problématique. Peu de candidats dégagent les notions que permettent d'aborder les différents documents. Une très grande majorité cite l'orientation des cristaux dans le basalte montrant qu'ils n'ont pas compris que le moment magnétique est enregistré par la roche alors qu'elle est à l'état solide. Il y a un déficit important dans l'analyse, peut-être par manque de temps, qui se sent dans la rédaction. Dans un concours, le facteur temps est un élément de différenciation des candidats.

## **2. Remarques générales**

Si beaucoup de candidats ont traité l'ensemble des questions, d'autres ont rendu des copies presque blanches ou n'ayant pas abordé la partie pédagogique située à la fin. Ce qui conduit à deux hypothèses explicatives, celle de la gestion du temps ou celle du manque de connaissances.

Le sujet a permis néanmoins de mettre en évidence les connaissances de certains candidats, mais aussi les lacunes d'autres, sans doute trop nombreux s'agissant de notions de bases en géologie, toutes enseignées au lycée. Il est pourtant nécessaire qu'un futur professeur maîtrise les bases scientifiques qui constitueront les fondements sur lesquels se construiront ses enseignements, par actualisation et apports des pratiques de classe. Beaucoup de candidats ne parviennent pas à traiter de façon satisfaisante les questions de didactique car ils ne maîtrisent manifestement pas le fond scientifique associé. D'ailleurs les candidats qui réussissent bien la partie scientifique réussissent bien la partie didactique.

Le jury a regretté que de trop nombreux candidats n'aient pas correctement lu ou compris les questions, ce qui les a conduits à ne pas y répondre ou y répondre très incomplètement. Il en est de même des documents, rarement exploités pour en extraire des informations en lien avec la question.

La forme des réponses, dans des cadres, ne dispense pas les candidats, futurs enseignants potentiels, d'un effort de présentation.

Le jury rappelle les efforts que doit faire tout candidat pour montrer sa maîtrise des notions et de sa capacité à répondre à une question ou une consigne :

- Prendre le temps de lire les questions ou consignes pour bien comprendre ce qui est demandé et éviter des hors sujet ou des réponses trop partielles ;
- S'appuyer sur les documents et y faire référence pour argumenter ou expliquer. Quand ils sont utilisés, c'est trop souvent pour une simple illustration d'un exposé de connaissances souvent superficielles et pas toujours en lien avec la question.
- Expliciter toute représentation par un titre, des légendes, des annotations, ...
- Construire la réponse comme une explication pour un destinataire non expert, avec tous les arguments nécessaires à sa compréhension. Affirmer par exemple que "le GPS donne la position" ou que "les carottes sont datées" sans dire comment n'est pas suffisamment explicite.
- Faire un effort de présentation et faire preuve d'une maîtrise de la langue suffisante. La relecture pour corriger les erreurs d'orthographe ou de grammaire, l'usage de couleurs, par exemple pour mettre en évidence les idées fortes, l'absence de ratures et une disposition dans les cadres respectueuse de l'horizontale rendent la lecture plus fluide et facile.

Il est manifeste que de nombreux candidats ont suivi une formation sur les aspects pédagogiques et didactiques ; il leur restera à mûrir tous ces aspects !

Au global, les bonnes copies montrent que les candidats ont su gérer le temps de l'épreuve, qu'ils ont su ménager les différentes parties, qu'ils ont bien lu les consignes en intégrant l'analyse des documents aux constructions scientifiques proposées. La bonne connaissance des exigences attendues d'un élève de collège ou de lycée leur a également permis de proposer des activités pertinentes permettant de construire un savoir scientifique à partir de faits.