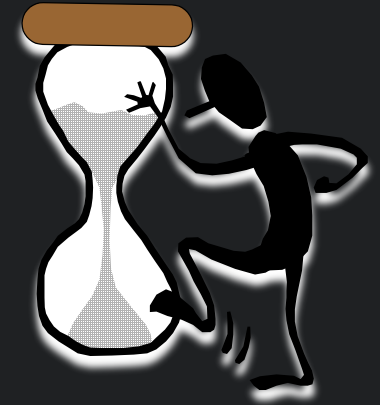




Thème 1B TP 1 : l'âge des croûtes océaniques et continentales

On cherche à déterminer l'âge maximal d'une croûte océanique et celui d'une croûte continentale.



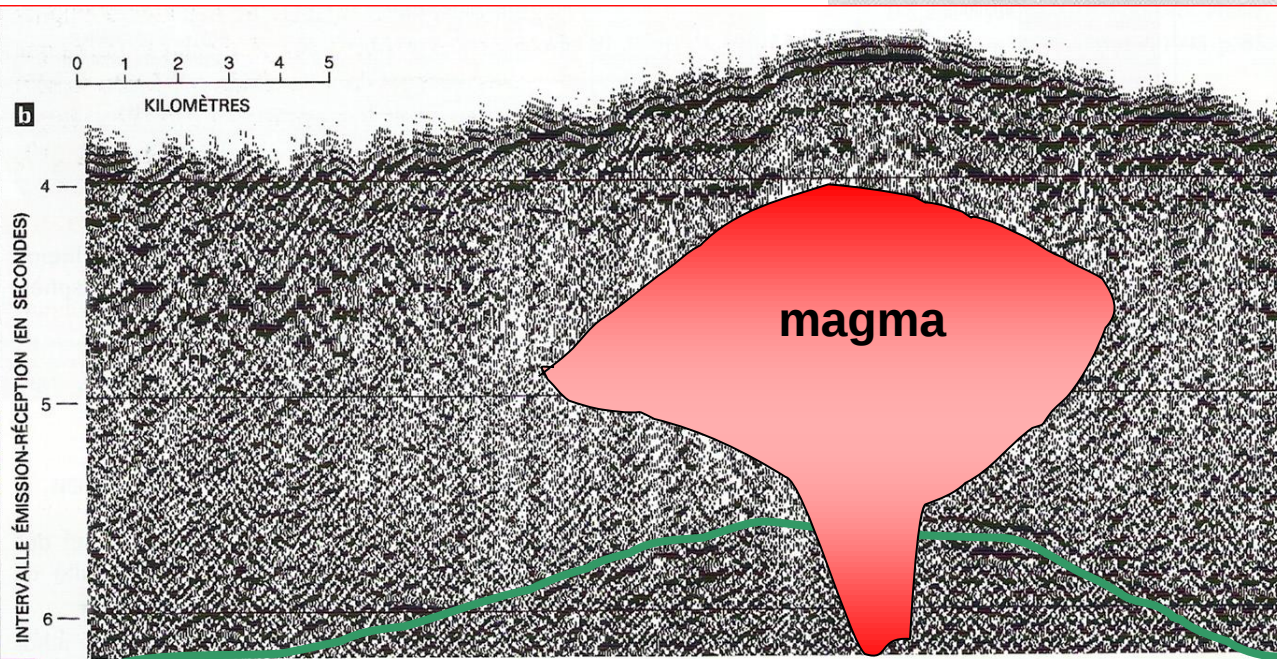
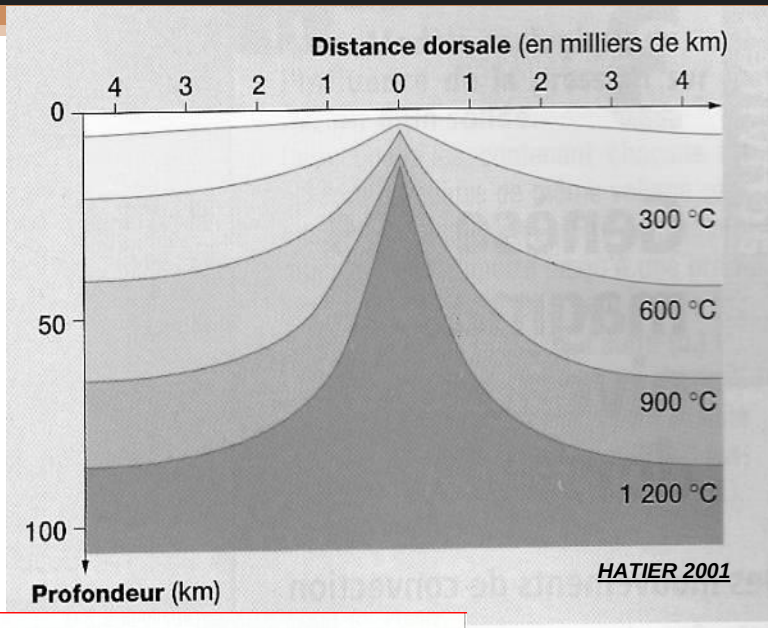
Lycée E. Delacroix Tale S

- L'âge de notre planète est estimé à 4,55 milliards d'années. Cet âge absolu a été estimé par Clair Patterson (1922-1995), à partir de la méthode Uranium/Plomb, en datant des météorites formées au même moment que notre planète. En effet, la **découverte de la radioactivité par Henri Becquerel (1852-1908)** en 1896, va permettre de dater de manière absolue des événements très anciens.
- On cherche à déterminer l'âge maximal d'une croûte océanique et celui d'une croûte continentale.

Rappels de la classe de 1^{ère} S

- La lithosphère océanique est créée au niveau des **dorsales, zones de divergence** de deux plaques lithosphériques. En effet, à l'aplomb des dorsales, du manteau asthénosphérique au comportement ductile, remonte plus vite qu'il ne se refroidit; cette décompression engendre une **fusion partielle de la péridotite asthénosphérique**. Le magma créé va refroidir plus ou moins rapidement engendrant la naissance de la **croûte océanique** faite de **gabbros** en profondeur, et de **basaltes en coussins** en surface. La **partie mantellique résiduelle** (qui n'a pas fondu), forme alors **le manteau lithosphérique**, au comportement rigide - cassant et donc plus dense que le manteau asthénosphérique.
- Au cours du temps, la lithosphère océanique s'éloigne de la dorsale, se **refroidissant et s'épaississant**. Seul le manteau lithosphérique s'épaissit aux dépens du manteau asthénosphérique; en effet la croûte océanique conserve une épaisseur constante d'environ 10 km.
- Lorsque la lithosphère océanique devient **plus dense** que l'asthénosphère sous-jacente, celle-ci plonge dans le manteau asthénosphérique; on parle de **subduction**. Cette subduction peut être mise en évidence en étudiant la répartition des foyers sismiques dans les zones de subduction. En effet, les forces de frottement engendrées par le plongement de la plaque, entraînent des séismes. Ceux-ci apparaissent alignés sur une coupe perpendiculaire à la frontière des deux plaques convergentes. Le **plan de Wadati-Benioff** comprenant les foyers sismiques alignés, matérialise ainsi le plongement d'une plaque lithosphérique cassante dans une asthénosphère ductile.

Isogéothermes au niveau d'une dorsale

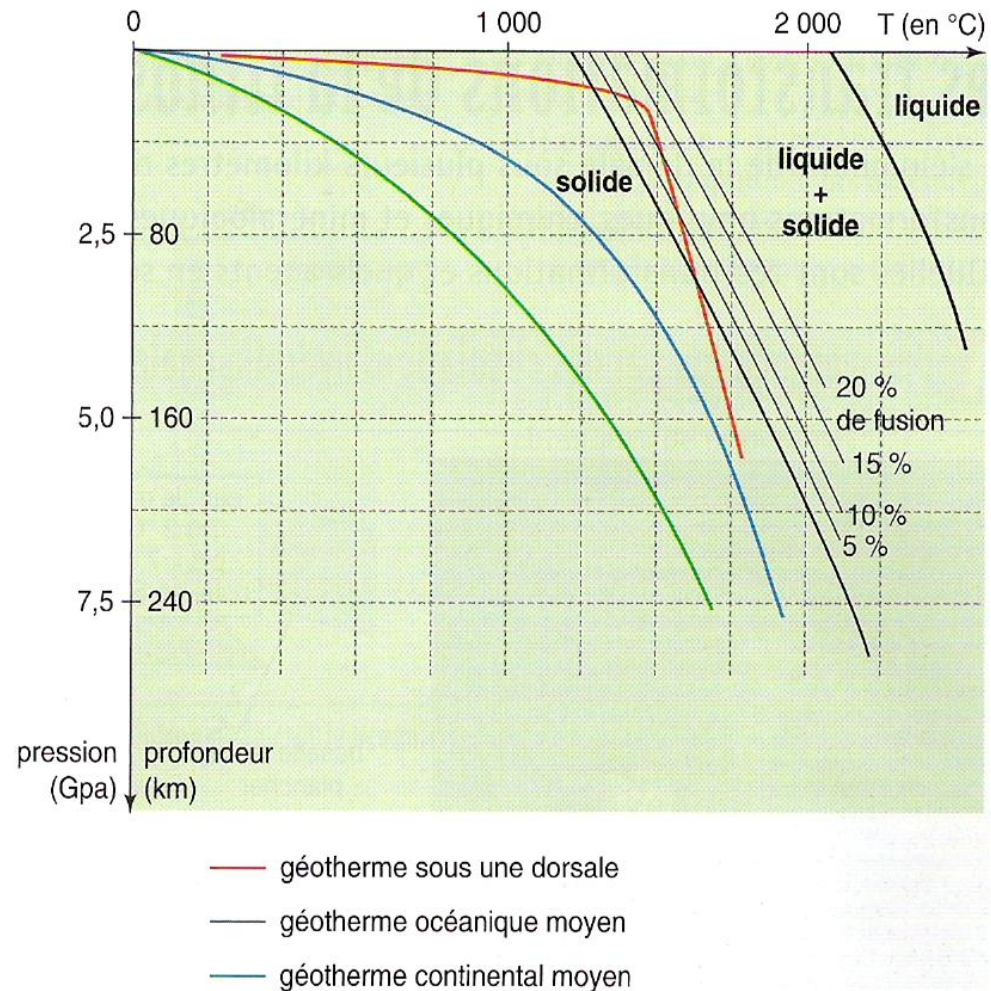
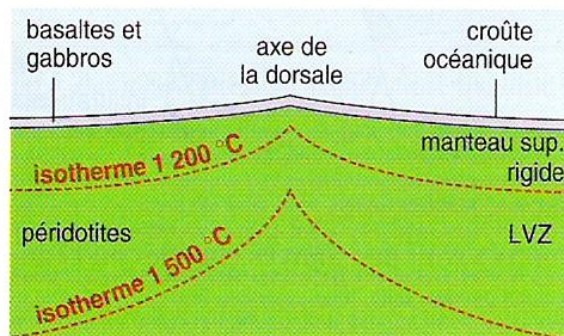


1 a. Principe de la sismique réflexion. b. Profil de sismique réflexion à l'axe de la dorsale du Pacifique Est. La ligne sombre localisée à six secondes est interprétée comme le Moho.

L'origine de la fusion de la péridotite, et conséquence sur la nature du magma des dorsales

On sait aujourd'hui soumettre des matériaux à des pressions et des températures comparables à celles régnant dans le manteau à de grandes profondeurs.

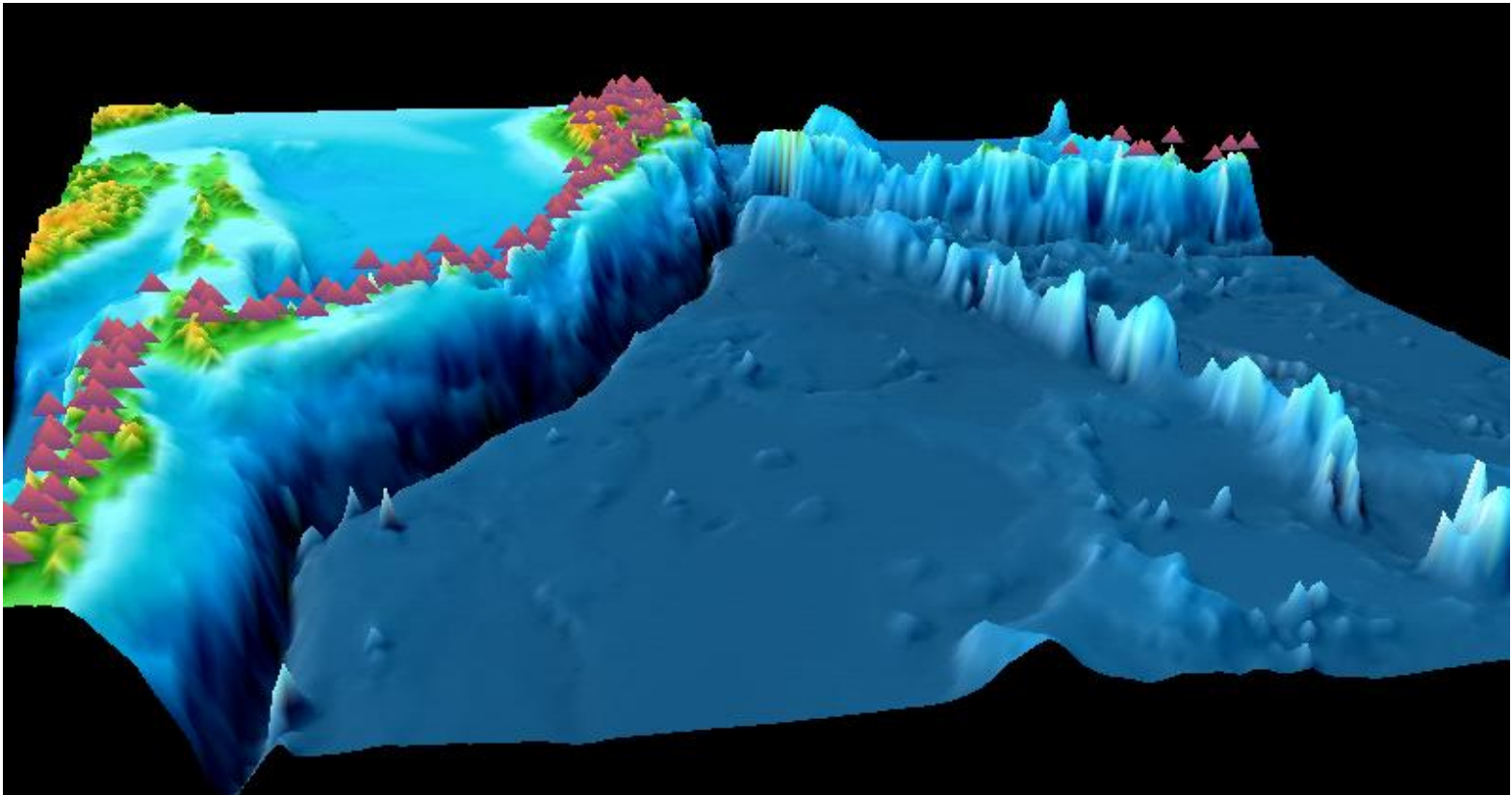
En soumettant une péridotite à de telles conditions, on peut définir les conditions de pression et de température pour lesquelles apparaît la première trace de liquide (début de fusion) et disparaît le dernier cristal (fusion totale). On peut préciser dans cet intervalle le taux de fusion des péridotites, c'est-à-dire la proportion de liquide produit dans les différentes conditions.



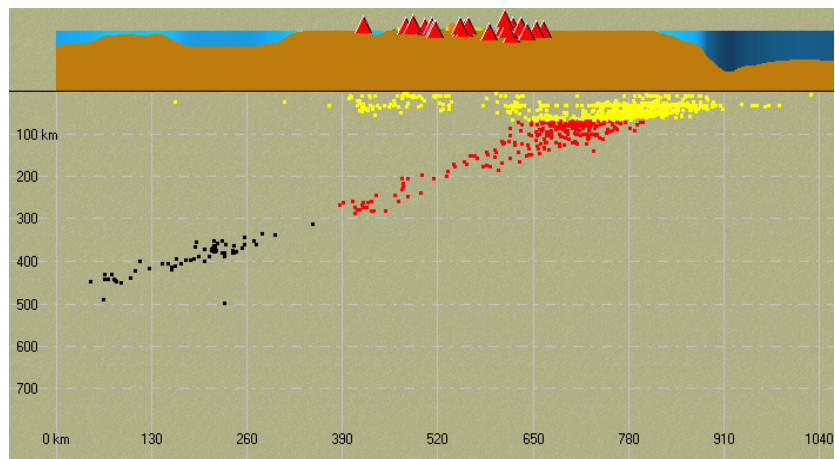
Vue 3D de l'archipel des Mariannes

Ouest

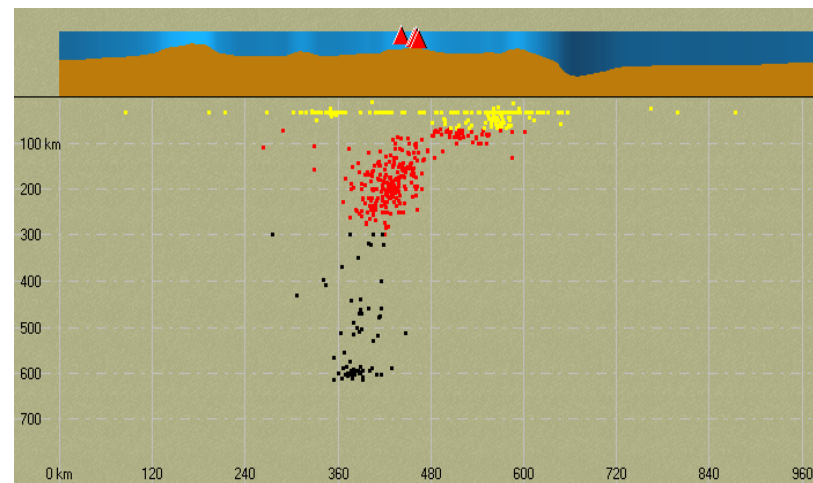
Est



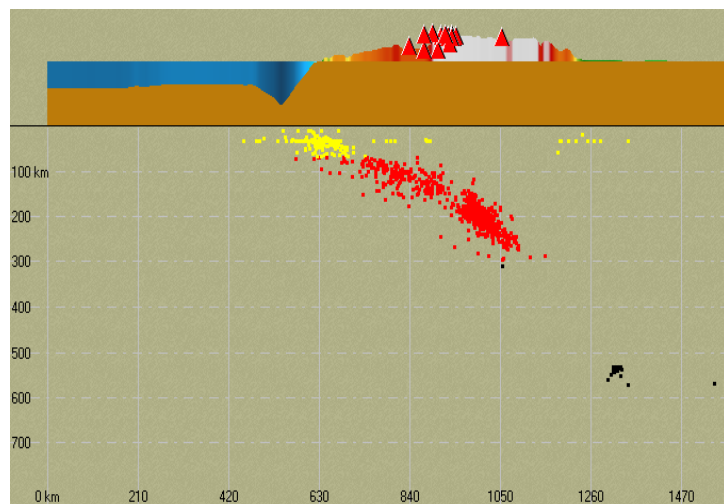
Coupes réalisées à partir du logiciel *Sismolog*



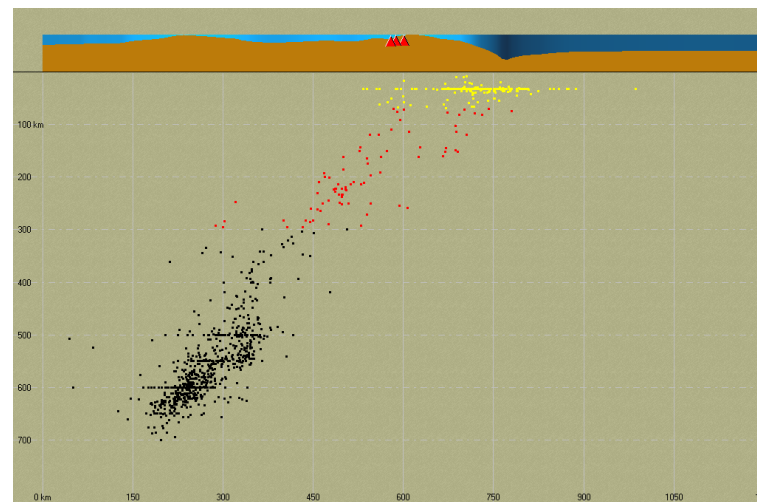
Japon



Les Mariannes



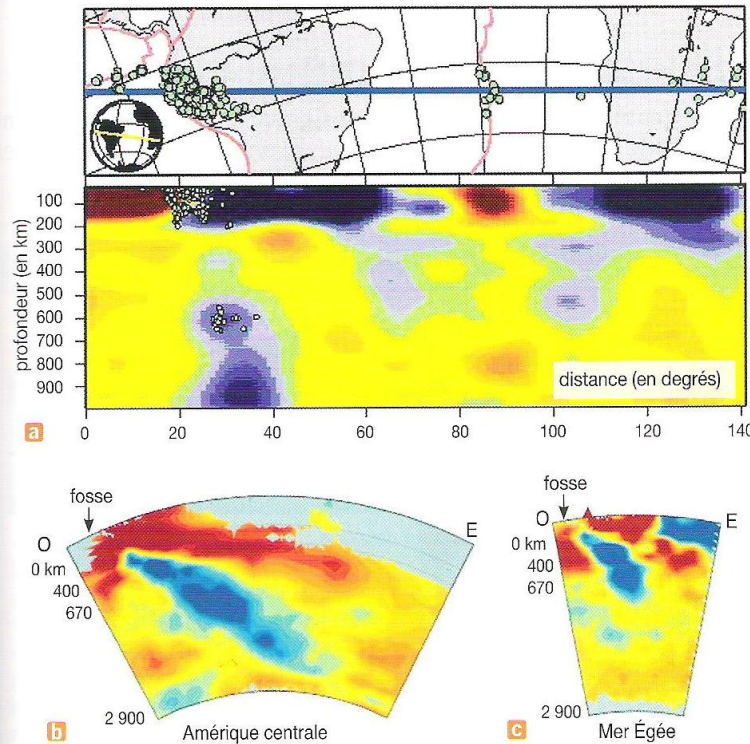
Chili



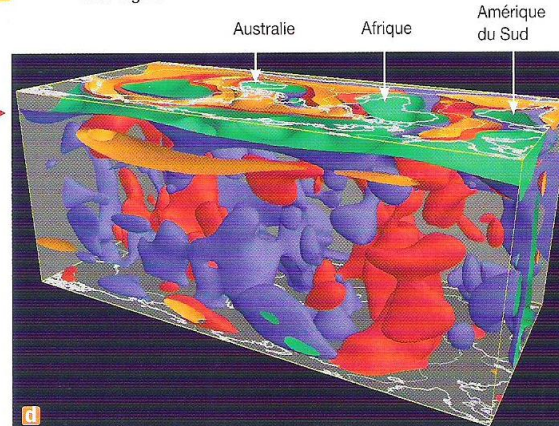
Archipel des îles Kermadec

D'après Sismolog

B La tomographie et la dynamique de la lithosphère océanique



Un traitement informatique des données de la tomographie sismique permet de modéliser les anomalies thermiques au sein du manteau (les anomalies chaudes sont toujours en rouge et les anomalies froides, en bleu). Sur le *bloc diagramme* ci-contre, où les continents sont repérés dans la partie supérieure, on peut par exemple noter, dans la profondeur du manteau, l'anomalie chaude correspondant à la dorsale médio-atlantique.



Les résultats tomographiques peuvent être représentés par des coupes verticales en 2D : les couleurs chaudes (tons rouges) révèlent des zones plus chaudes, les couleurs froides (tons bleus), des zones plus froides.

Coupe entre la dorsale Est-Pacifique et l'est de l'Afrique (a).

Coupes de zones de subduction : en Amérique centrale (b) et en mer Égée (c).

Ces anomalies thermiques peuvent être mises en relation avec la dynamique de la lithosphère océanique :

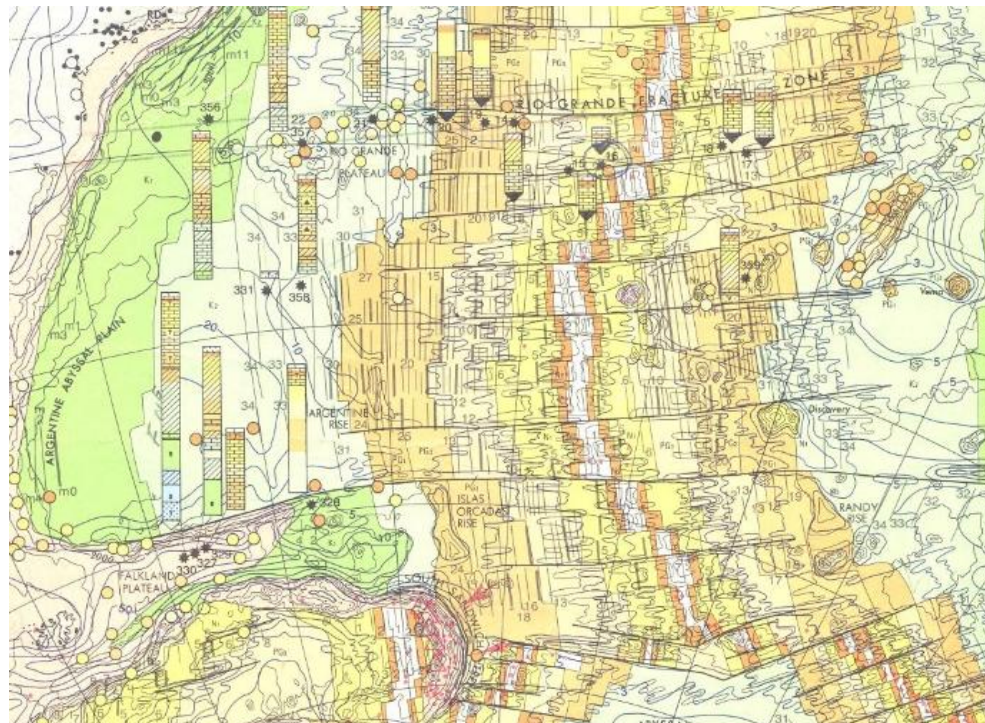
- une zone chaude suggère une montée magmatique (courant ascendant dans le manteau) à l'origine de la création de lithosphère océanique ;
- une zone froide anormalement profonde suggère un enfoncement de la plaque lithosphérique dans le manteau, c'est-à-dire la disparition de plancher océanique au niveau des zones de subduction.

Activité 1: datation de la croûte océanique

- La croûte océanique naît au niveau des dorsales et appartient à la lithosphère océanique qui, animée d'un mouvement de divergence, s'éloigne de l'axe de la dorsale. Ainsi, **une croûte océanique sera d'autant plus âgée qu'elle sera loin de la dorsale**. De plus, les **roches sédimentaires** sont des roches qui se déposent dans un milieu aqueux. Elles sont donc très présentes au fond des océans, sous forme de strates superposées. Donc les forages dans la croûte océanique, présenteront des carottes très épaisses lorsqu'ils seront réalisés loin de la dorsale. Le **sédiment directement en contact avec le plancher basaltique** permettra d'estimer un **âge relatif** de la croûte océanique.
- Cln: pour estimer l'âge de la croûte océanique il faut forer près des côtes (**marges passives**).

Les forages et leur apport dans la datation de la croûte océanique

- Découvrir la carte géologique au 1/34 000 000 de l'Océan Atlantique!
- ☞ Dans un premier temps, apprenez à lire la légende!



Atlas géologique du monde Geological World Atlas

Coordonnateurs Généraux / General coordinators: G. CHOUBERT et A. FAURE-MURET

Océan Atlantique / Atlantic Ocean

1/34 000 000

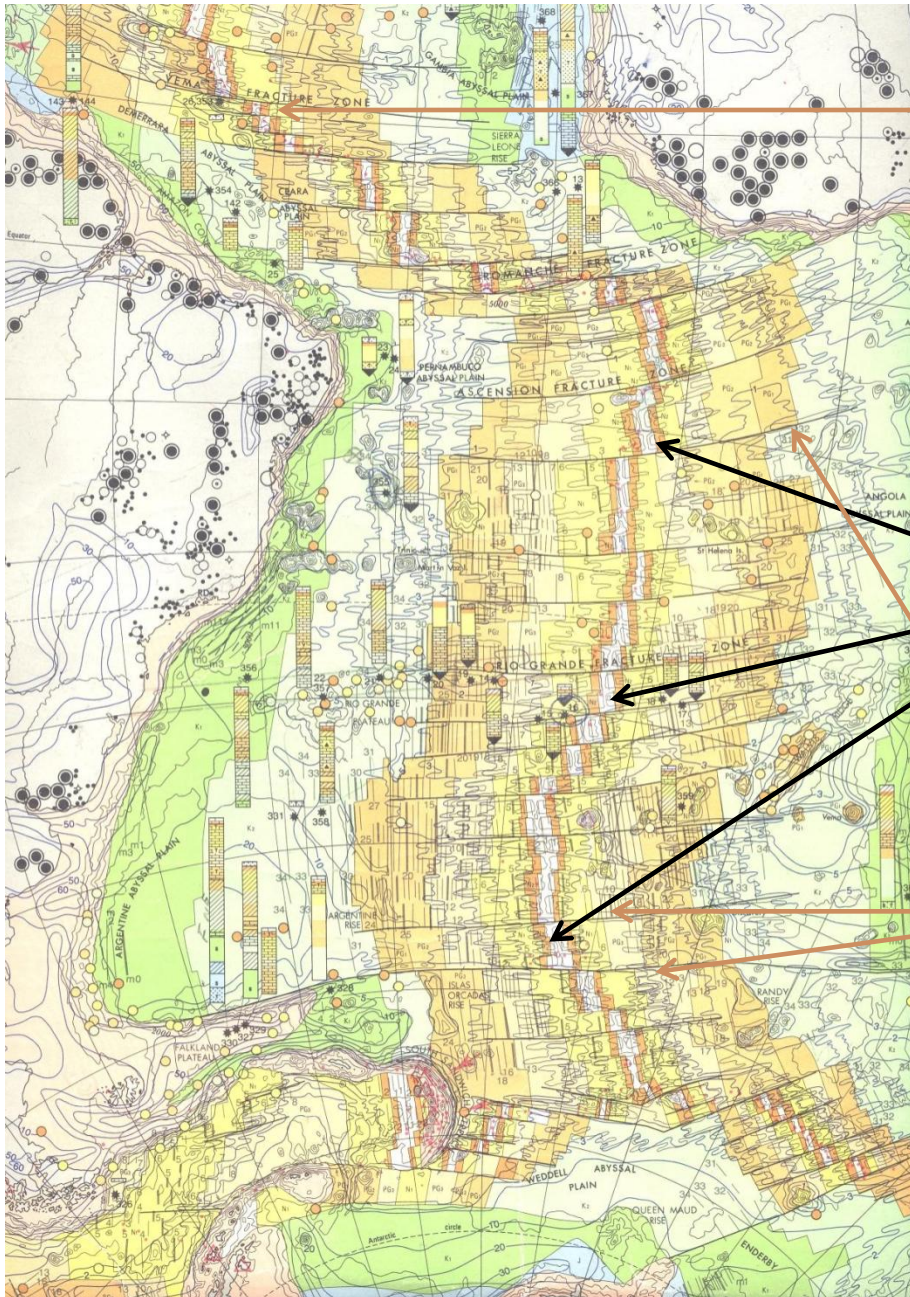
Coordonnateurs / Coordinators: Raymond FREEMAN-LYNDE Jr. et Marie THARP

Travaux Cartographiques / Cartographic work: Suzanne B. MACDONALD

Lamont — Doherty Geological Observatory — COLUMBIA UNIVERSITY, PALISADES, NEW YORK, U.S.A.

Data compiled up to end 1978





Faille de Vema: faille transformante remarquable car elle a permis d'observer directement la lithosphère via une mission en submersible

Cœur de la dorsale médio-Atlantique déformée dans sa trajectoire par les failles transformantes

Failles transformantes

L'expansion océanique confirmée par les forages

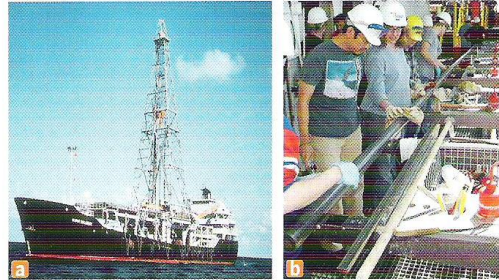
À partir de 1964, des navires spécialisés permettent de réaliser de nombreux carottages des fonds océaniques. L'étude directe des sédiments océaniques et du plancher basalitique va confirmer pleinement l'expansion océanique jusqu'alors déduite de mesures géophysiques.

A L'âge et l'épaisseur des sédiments au contact du basalte

• Des campagnes de forages des fonds océaniques

De 1968 à 1975, 270 forages répartis dans tous les océans ont été réalisés par le navire « Glomar Challenger » (J.O.I.D.E.S Deep Sea Drilling Project). L'objectif de ces forages en mer profonde est de fournir des données concernant le plancher océanique.

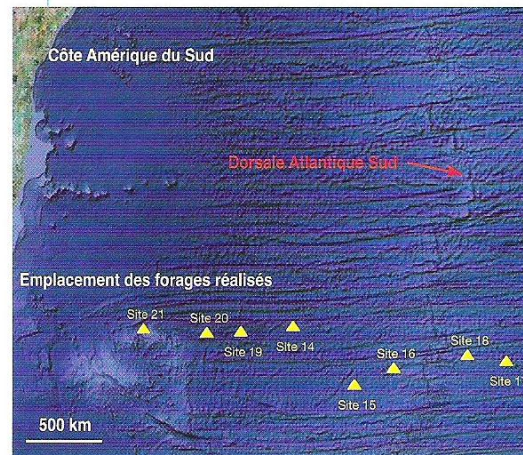
Ce plancher est ainsi « carotté » sur une épaisseur qui peut dépasser 1700 mètres, sous une tranche d'eau parfois supérieure à 3 km. Les carottes obtenues permettent d'étudier les sédiments (**pétrographie**, **stratigraphie**) et de définir l'âge du substrat basalitique.



Le navire Glomar Challenger (a) a prélevé des milliers de carottes de sédiments provenant du fond de l'océan. Les scientifiques à bord du navire (b) nettoient et préparent une carotte de 9,5 mètres de long fraîchement retirée du fond océanique. Les carottes sont ensuite découpées en segments plus courts et divisées en deux dans le sens de la longueur (c) : une moitié est utilisée pour analyse, l'autre est conservée pour archive.



• Les résultats d'une campagne de forages



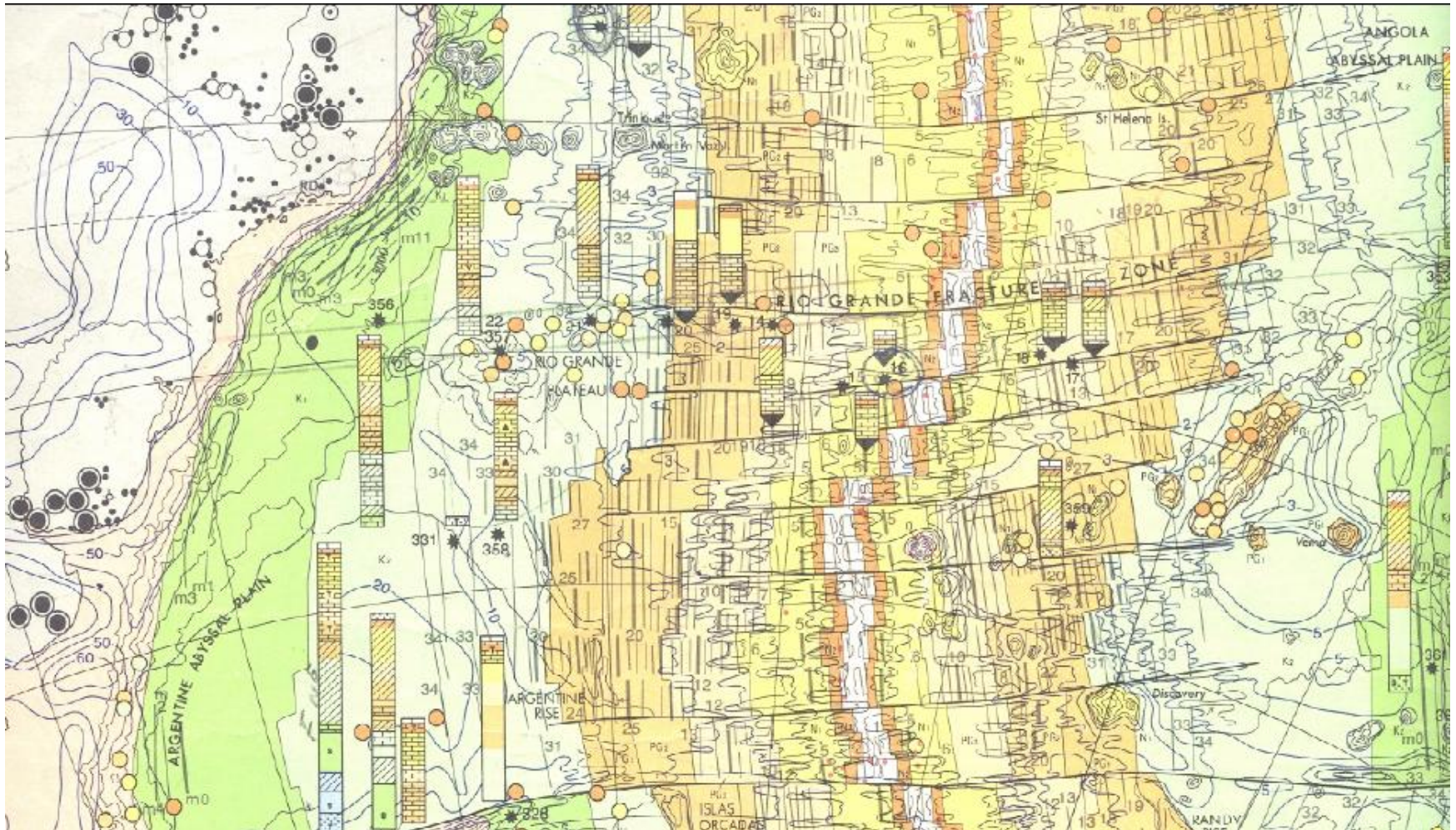
👉 Recherche ces sites de carottage sur la carte 1/ 34 000 000

Le Glomar Challenger a notamment réalisé en 1968-1969 les forages numérotés 14 à 21, dans l'océan Atlantique vers 30° de latitude sud (*carte ci-contre*). Tous ces forages ont atteint le fond basalitique ; les sédiments au contact du basalte ont pu être datés grâce aux fossiles qu'ils contenaient (*tableau ci-dessous*).

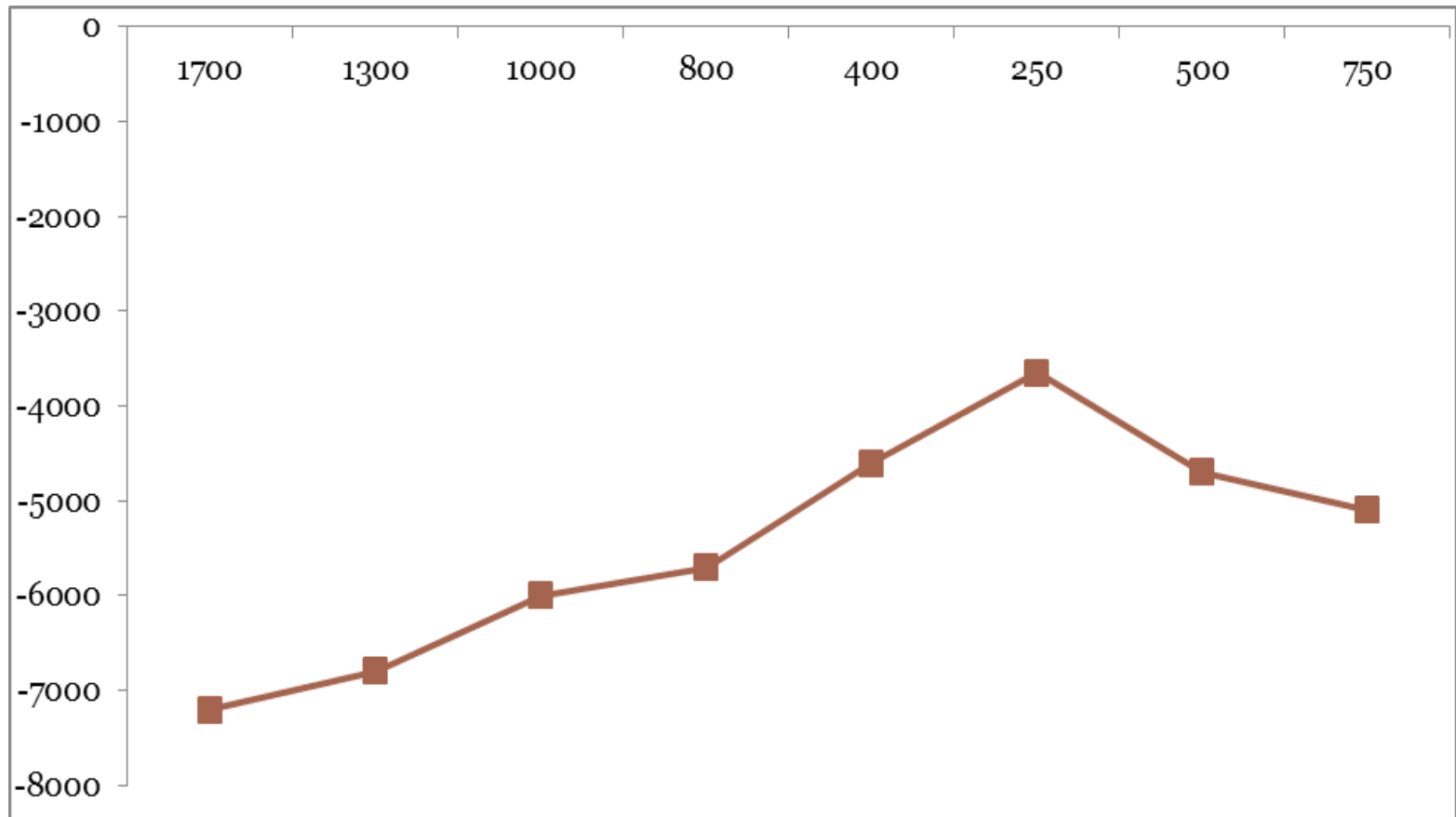
	Site n° 21	Site n° 20	Site n° 19	Site n° 14	Site n° 15	Site n° 16	Site n° 18	Site n° 17
Âge du sédiment en contact avec le basalte (en Ma)	75	65	48	40	23	11	23	35
Distance à la dorsale (en km)	1700	1300	1000	800	400	250	500	750
Épaisseur des sédiments (en m)	3 200	3 000	2 500	2 200	1 100	750	1 200	1 700
Profondeur moyenne du toit du basalte (en m)	-7 200	-6 800	-6 000	-5 700	-4 600	-3 650	-7 400	-5 100

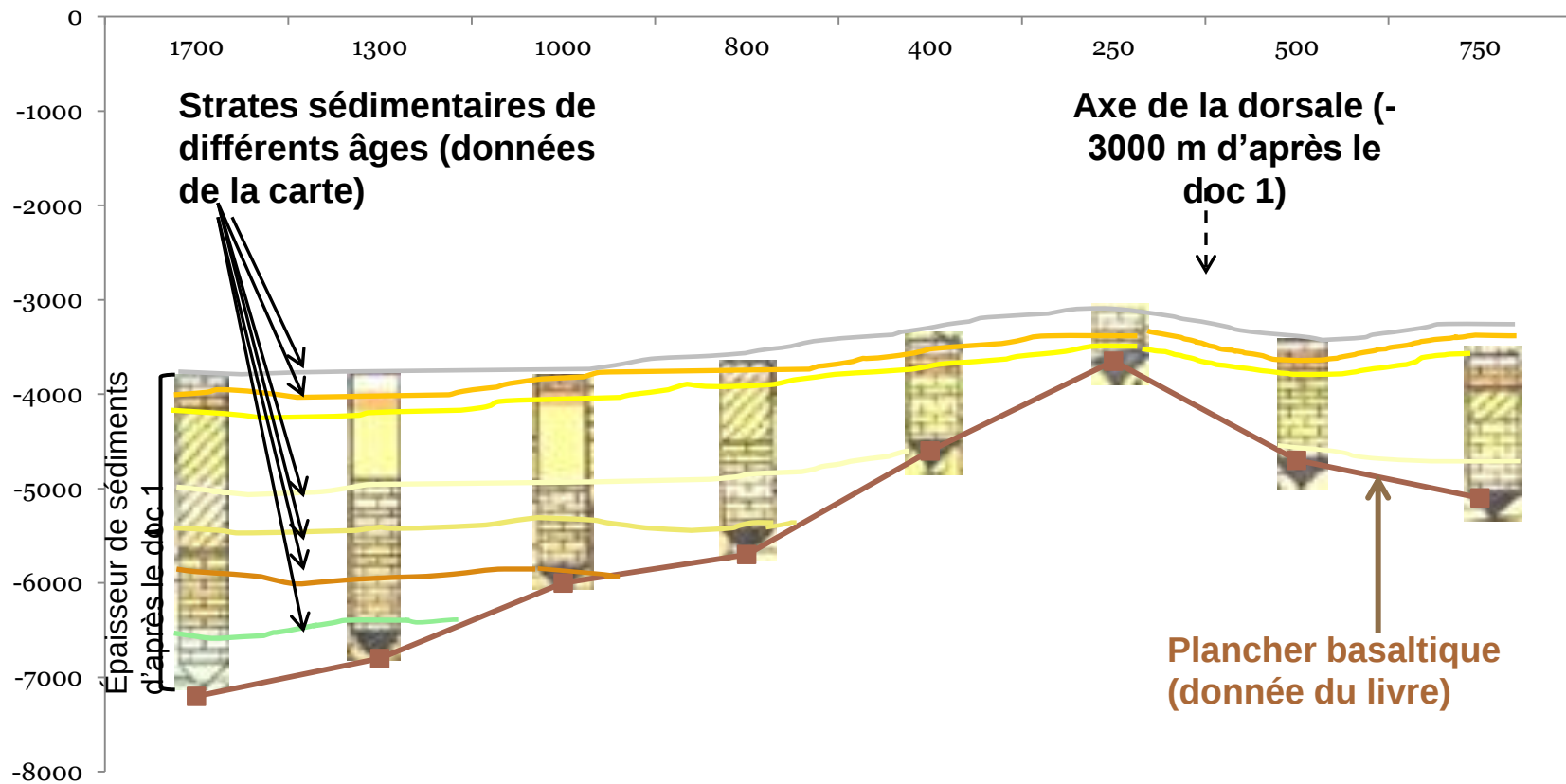
Doc. 1 Des données recueillies par le navire foreur Glomar Challenger en 1968-1969.

Carte géologique au 1/34 000 000 de l'Océan Atlantique

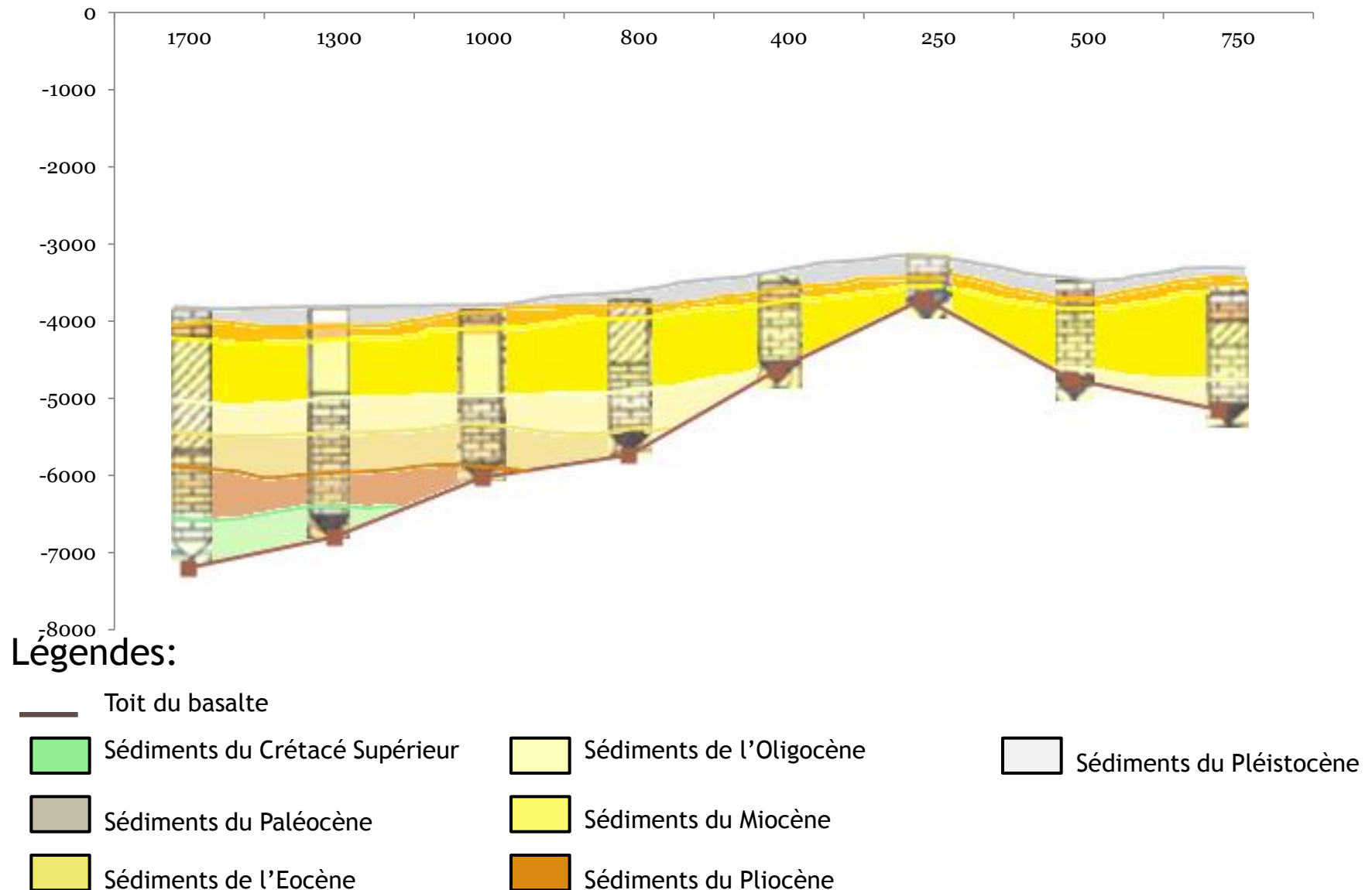


Document à compléter : Positionnement des carottes sur le socle océanique

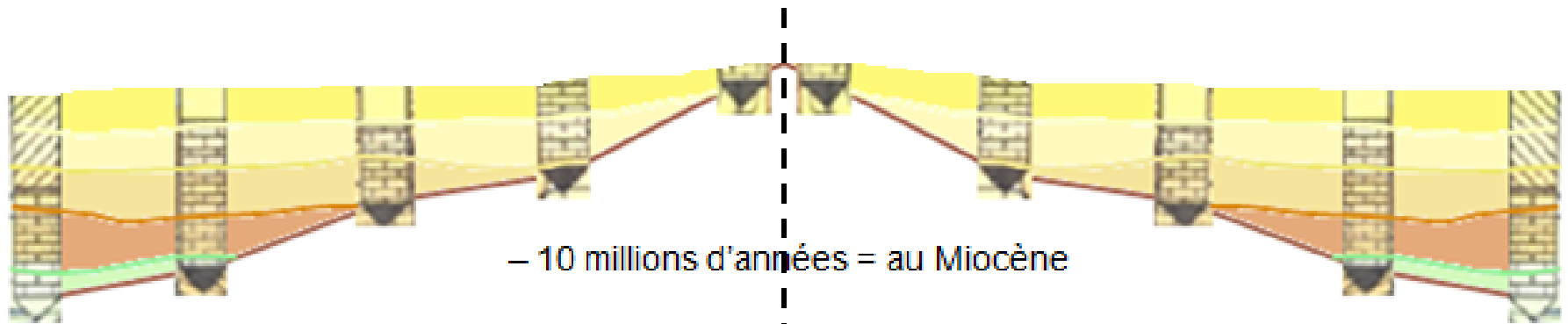




Remplissage des strates sédimentaires



Axe de la dorsale



- 10 millions d'années = au Miocène



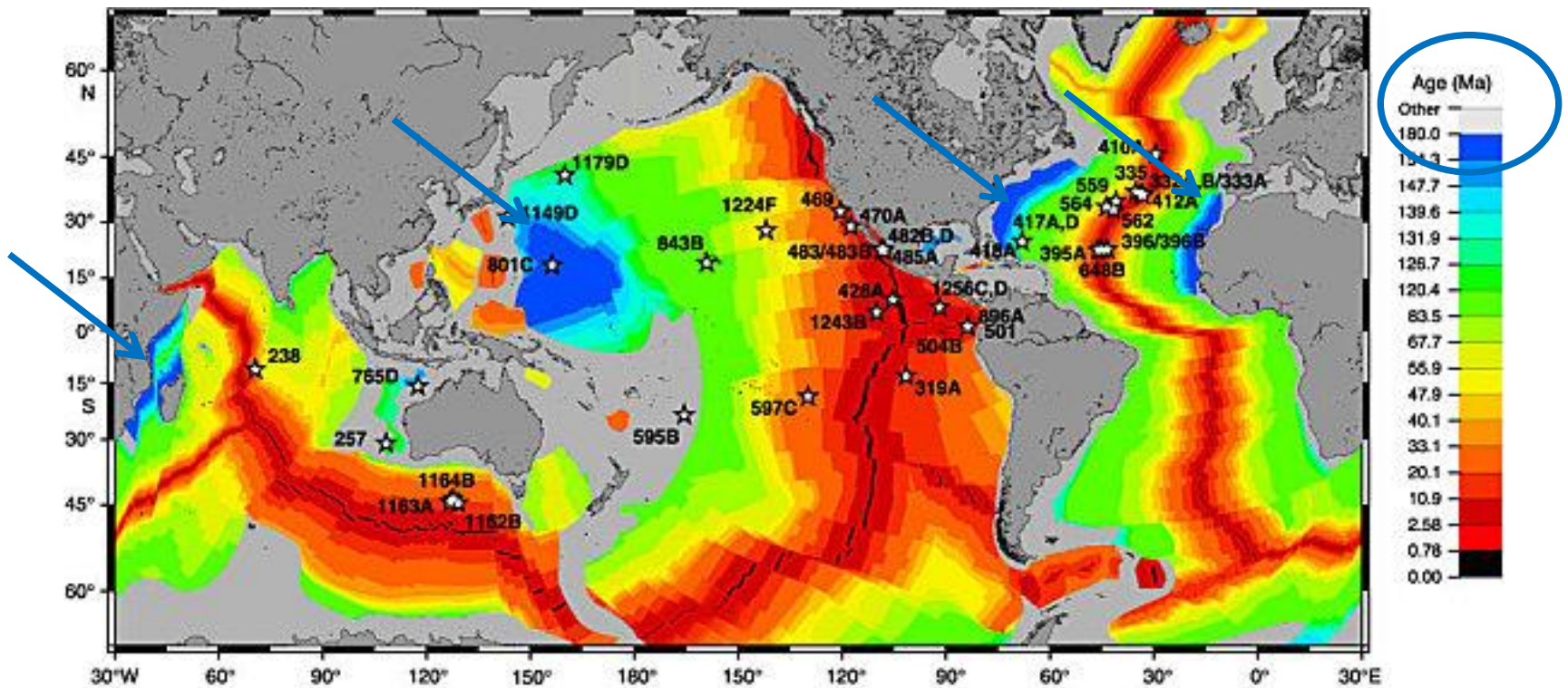
-40 millions d'années = Eocène



-75 millions d'années = Crétacé
supérieur

Reconstitution des étapes de l'accrétion océanique il y a -75, -40 et -10 Ma

Doc annexe 1 : Carte de l'expansion des fonds océaniques



Traces écrites

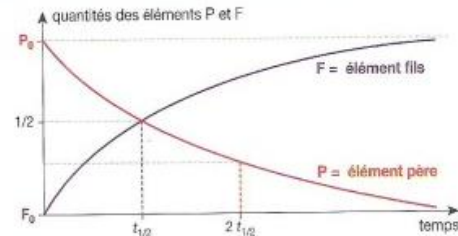
- La **lithosphère océanique** naît à l'axe des dorsales (zone de divergence) et subduit au niveau des zones de subduction (zones de convergence). Cette lithosphère océanique créée à l'axe de la dorsale, par fusion partielle de la péridotite asthénosphérique, voit son **manteau lithosphérique s'épaissir** au cours du temps (au dépend du manteau asthénosphérique), avec une croûte océanique d'épaisseur relativement constante (avec accumulation notamment de sédiments déposés en strates). Cet épaississement de la lithosphère océanique la rend **plus dense** et induit **son recyclage dans le manteau par subduction** au niveau des zones de convergence.
- L'épaississement progressif de la LO au fur et à mesure de son éloignement de la dorsale, associé à son refroidissement et donc à une augmentation de sa densité, fait qu'il n'existe pas sur Terre de **lithosphère océanique plus âgée que 200 Millions d'années** en équilibre sur l'asthénosphère.

L'âge de la lithosphère continentale

La croûte continentale est une enveloppe terrestre beaucoup plus ancienne que la croûte océanique. Pour déterminer l'âge de roches aussi anciennes (des centaines de millions d'années, voire des milliards d'années), les scientifiques utilisent un géochronomètre basé sur la désintégration d'isotopes radioactifs.

A Le principe du géochronomètre rubidium/strontium

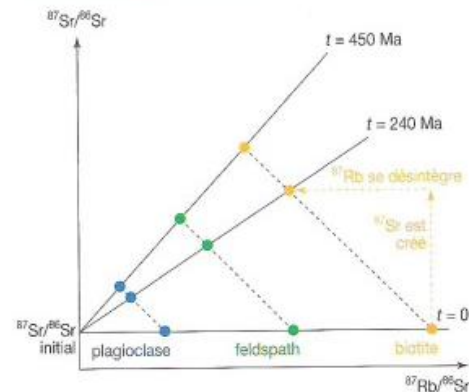
- Depuis la découverte de la radioactivité en 1896 par Becquerel, on a mis en évidence l'existence de nombreux éléments chimiques possédant des isotopes naturels radioactifs, qui, en se désintégrant spontanément, émettent divers rayonnements et se transforment en éléments stables. On peut doser la quantité des différents isotopes dans un échantillon à l'aide d'un spectromètre de masse qui sépare les isotopes.
- En se désintégrant, un élément radioactif « père » se transforme spontanément en un élément « fils ». C'est ainsi que le rubidium 87 (^{87}Rb) se transforme en strontium 87 (^{87}Sr).
- La désintégration de tout élément radioactif constitue une véritable « horloge » car elle se fait en suivant une loi mathématique immuable de décroissance exponentielle en fonction du temps : quelle que soit la quantité d'élément « père »



présente au départ, il faut toujours le même temps pour que cette quantité soit réduite de moitié par désintégration. Cette durée caractéristique d'un élément est sa demi-vie ($t_{1/2}$).

Doc. 1 Le principe physique des chronomètres géologiques.

- Rubidium et strontium sont des éléments présents dans les minéraux des roches de la croûte continentale. Le strontium présente deux isotopes stables : ^{87}Sr et ^{86}Sr . Le ^{87}Rb , quant à lui, est radioactif et se désintègre en ^{87}Sr . Au cours du temps, la quantité initiale de ^{86}Sr reste donc constante, tandis que celle de ^{87}Rb diminue au profit de ^{87}Sr , qui, elle, augmente.
- Au moment de la cristallisation d'une roche, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est le même pour tous les minéraux d'une roche : en effet, les minéraux incorporent la même proportion de ces deux isotopes du même élément (la proportion qui est présente dans le magma). En revanche, certains minéraux sont plus riches que d'autres en ^{87}Rb : le rapport $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ n'est pas le même pour tous les minéraux. C'est ce que traduit la droite initiale ($t = 0$) du graphique ci-contre, parallèle à l'axe des abscisses.
- Au cours du temps, ^{87}Rb diminue au profit de ^{87}Sr . Donc le rapport $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ diminue et le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ augmente. Cependant, cette variation est d'autant plus importante que le minéral est riche en Rb. À un temps t , on obtient une droite avec un coefficient directeur, a , non nul. Une telle droite est dite droite isochrone car elle relie des points correspondant à des minéraux de même âge. Il est facile de comprendre que plus le temps passe, plus le coefficient directeur de cette droite est important, puisqu'il y aura encore moins de ^{87}Rb et plus de ^{87}Sr .



Le coefficient directeur de la droite est donc indicateur du temps écoulé depuis la cristallisation de la roche. On peut démontrer mathématiquement que :

$$t = \ln(a + 1) / \lambda$$

avec λ : constante de désintégration (propre à l'élément)

$$\begin{aligned} &^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} \\ \text{Demi-vie} &= 48,8 \cdot 10^9 \text{ ans} \\ \lambda &= 1,42 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1} \end{aligned}$$

Doc. 2 La méthode de la droite isochrone.

Application du principe de datation absolue à deux granites du Massif Central

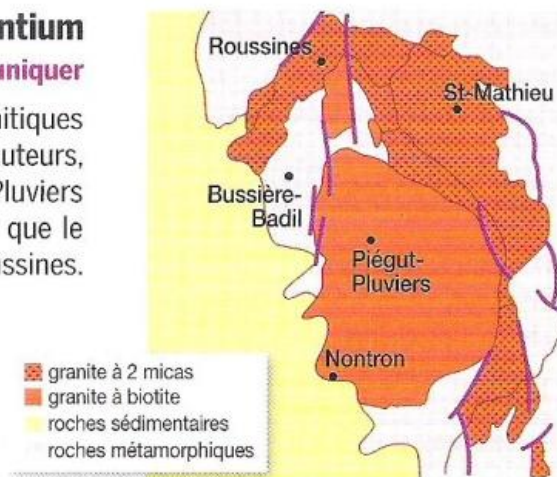
10 Datation de deux granites par la méthode Rubidium-Strontium

Raisonner, communiquer

À la limite entre le Limousin et la Dordogne, affleurent deux massifs granitiques dont l'âge de mise en place a longtemps divisé les géologues. Pour certains auteurs, la mise en place du granite de Saint-Mathieu-Roussines et celle de Piégut-Pluviers (carte ci-contre) seraient contemporaines. En revanche, d'autres pensent que le granite de Piégut-Pluviers serait postérieur au granite de Saint-Mathieu-Roussines.

QUESTION :

À partir de vos connaissances et des données sur les mesures isotopiques Rubidium-Strontium de ces deux massifs granitiques, déterminez l'âge de ces massifs.



• Granite de Piégut-Pluviers

n° échantillon	X = $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	Y = $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
01RT5738	1,97	0,7148
02RT5740	3	0,7197
03RT5743	4,87	0,7282
04RT5744	3,24	0,7213
05RT5745	2,64	0,7219
06RT5742	1,36	0,7125

• Granite de Saint-Mathieu

n° échantillon	X = $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	Y = $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
01RT5730	11,69	0,7696
02RT5731	8,54	0,756
03RT5732	5,09	0,7404
04RT5734	6,56	0,7448
05RT5735	9,04	0,7573
06RT1189	11,98	0,768

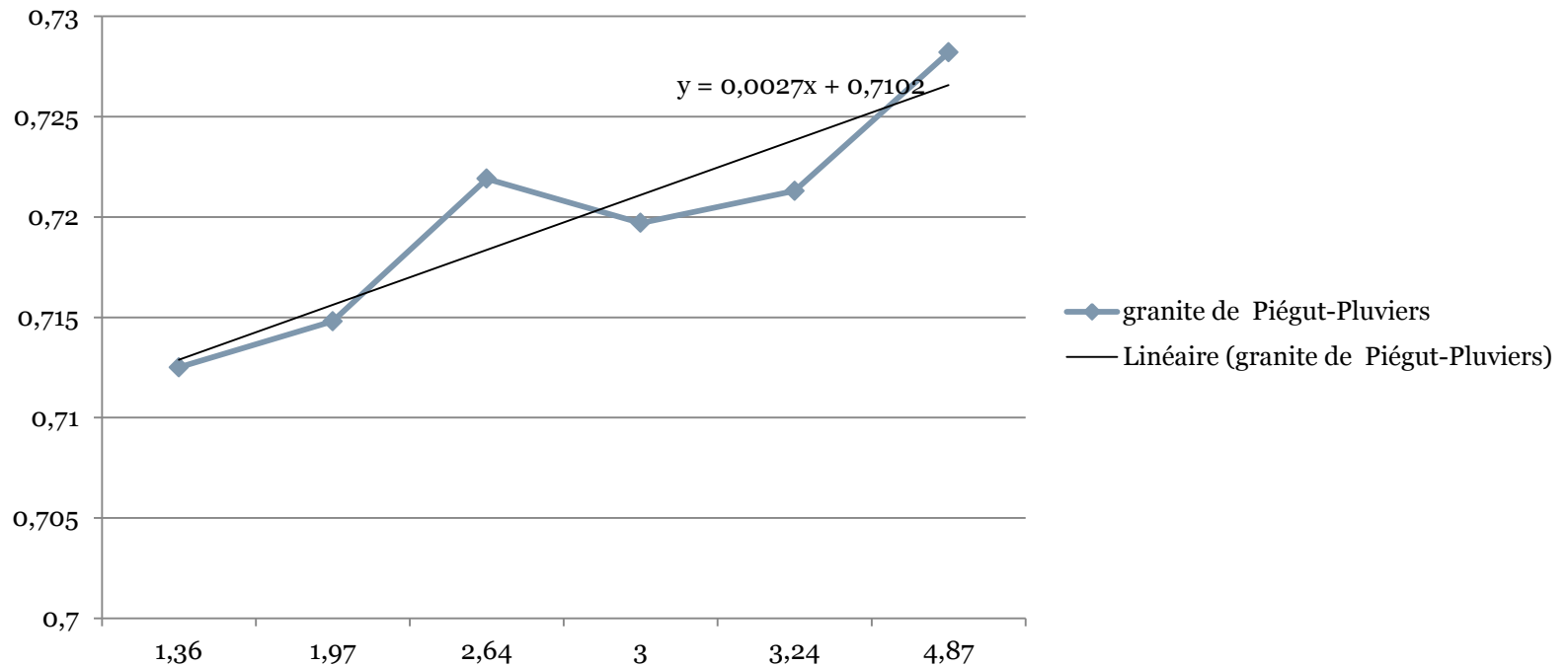
Remarques :

1. Dans les tableaux, RT signifie « roches totales » ; en effet, les mesures effectuées sur la roche totale à différents endroits choisis de l'affleurement donnent les mêmes résultats que des mesures effectuées sur différents minéraux dans un même échantillon.

2. Pour les formules de calcul, voir page 152.

3. Compte tenu de la précision des mesures, l'âge de mise en place des granites peut être apprécié avec une incertitude d'environ 15 millions d'années.

granite de Piégut-Pluviers

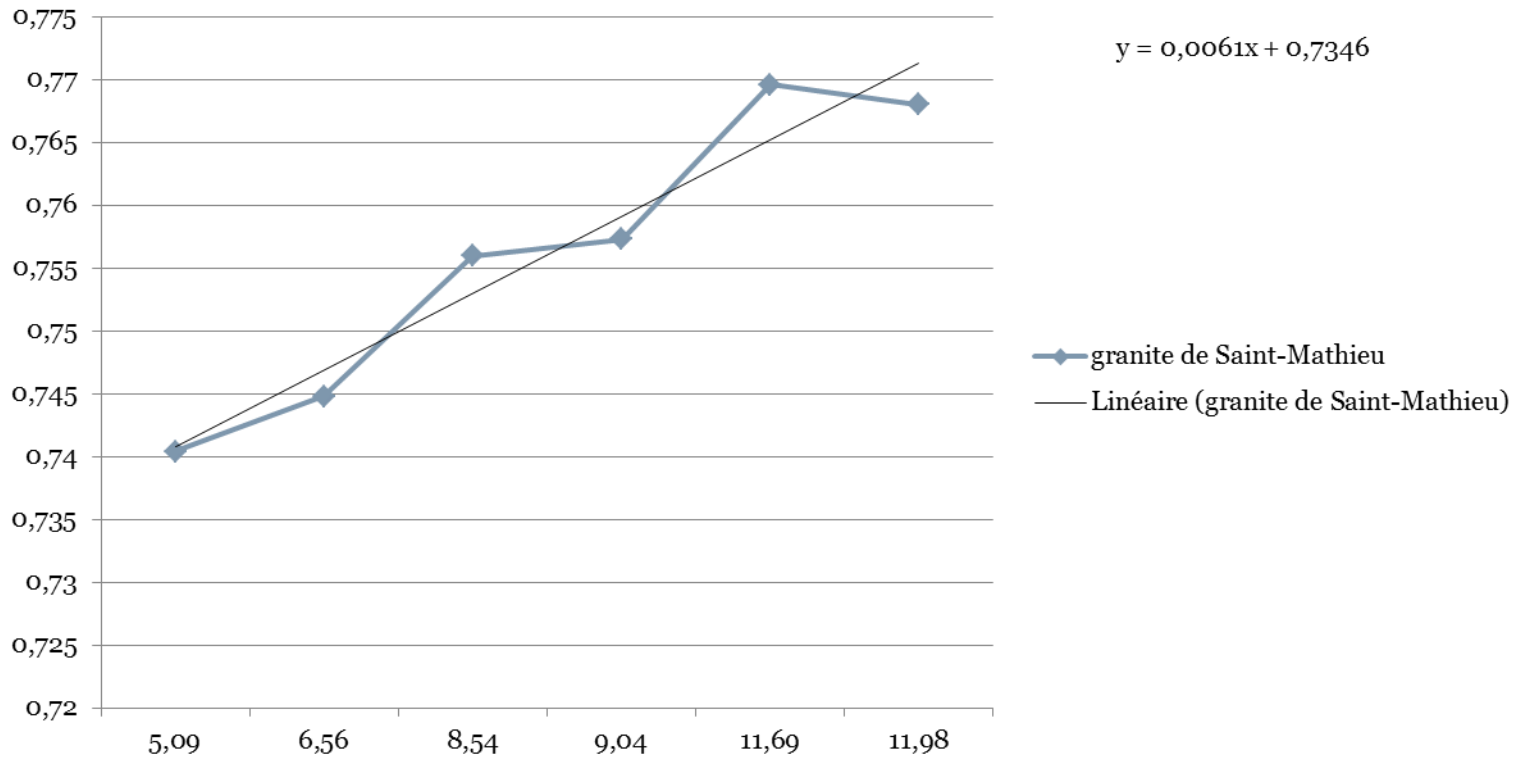


Or $t = \ln(1 + a)/\lambda$

AN: $t = \ln(1 + 0,0027)/1,42,10^{-11}$

$t = 190$ millions d'années

granite de Saint-Mathieu



Or $t = \ln(1 + a)/\lambda$

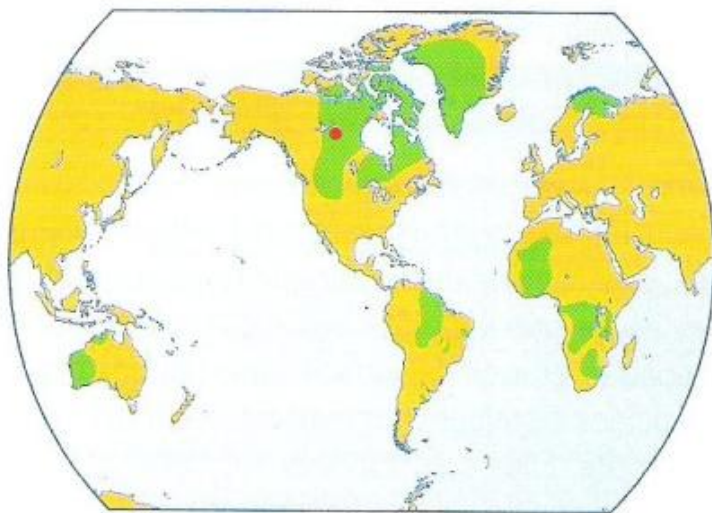
AN: $t = \ln(1 + 0,0061)/1,42,10^{-11}$

$t = 428$ millions d'années

Carte géologique de la France au 1/1 000 000^e



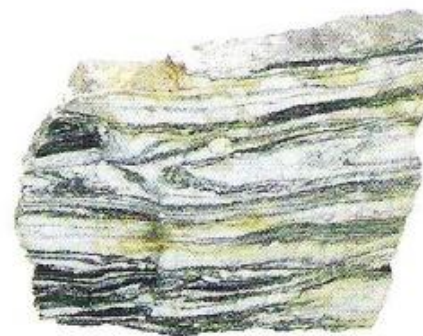
Les roches les plus anciennes sont continentales (-4,03 Ga, datation par Rb/Sr)



- Au début de son histoire, il y a 4,5 Ga (milliards d'années), la Terre ne comportait pas de continents. Les plages vertes sur le planisphère représentent des roches d'un âge compris entre 2,5 Ga et un peu plus de 4 Ga.

On pense que ces plages correspondent aux premières masses continentales qui se sont formées sur le globe.

- Parmi les plus vieilles roches terrestres connues figurent les gneiss de la formation d'Acasta dans la région du grand Lac des Esclaves au Canada (point rouge sur le planisphère), avec un âge de 4,03 Ga. Cette datation a été faite par radiochronologie en utilisant une méthode comparable à la méthode Rb/Sr, mais avec des radioéléments différents.



Doc. 4 Des roches présentes sur Terre depuis la formation des premiers continents.

Traces écrites

- L'étude de la carte au 1/1 000 000^e éditée par le BRGM révèle en France, des roches magmatiques/métamorphiques atteignant les 600 Millions d'années. Mais comment fait-on pour trouver cet âge absolu des roches?
- L'avènement de la **radioactivité** (découverte par Becquerel en 1896) a trouvé son application dans la datation des échantillons pétrographiques. Par exemple, le radio-isotope ^{87}Rb se désintègre en ^{87}Sr , **en fonction du temps**. Les mesures des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ dans les minéraux d'une roche que l'on cherche à dater, forment une droite, qualifiée d'**isochrone** (la roche étudiée étant considérée comme un système fermé après cristallisation des minéraux étudiés, ces derniers seront donc considérés de même âge). L'âge de l'échantillon sera alors calculé en appliquant la formule suivante:
- **$t = \ln(a + 1)/\lambda$** ; où λ est la constante de désintégration propre à un radio-isotope donné
- Ainsi plus la pente de la droite isochrone sera grande, plus l'échantillon étudié sera âgé.

- La loi de décroissance radioactive a donc permis de dater de manière absolue les roches de la croûte continentale (et océanique également). Les résultats de datation révèlent que:
 - La croûte continentale est beaucoup plus âgée que la croûte océanique.
 - Les plus vieilles roches de la croûte continentale se trouvent au Canada et sont datées de -4,03 Ga!
- Comment expliquer que la croûte continentale est plus âgée que la croûte océanique?
- Que devient la croûte océanique de plus de 200 Ma?