

74.06B

SESSION 2007

Filière BCPST

SCIENCES DE LA TERRE

Epreuve commune aux ENS de Paris, Lyon et Cachan

Durée : 4 heures

L'usage d'une calculatrice de poche à alimentation autonome, non imprimante et sans document d'accompagnement, est autorisé. Une seule calculatrice à la fois est admise sur la table de travail, et aucun échange n'est autorisé entre les candidats.

Les variations du niveau marin

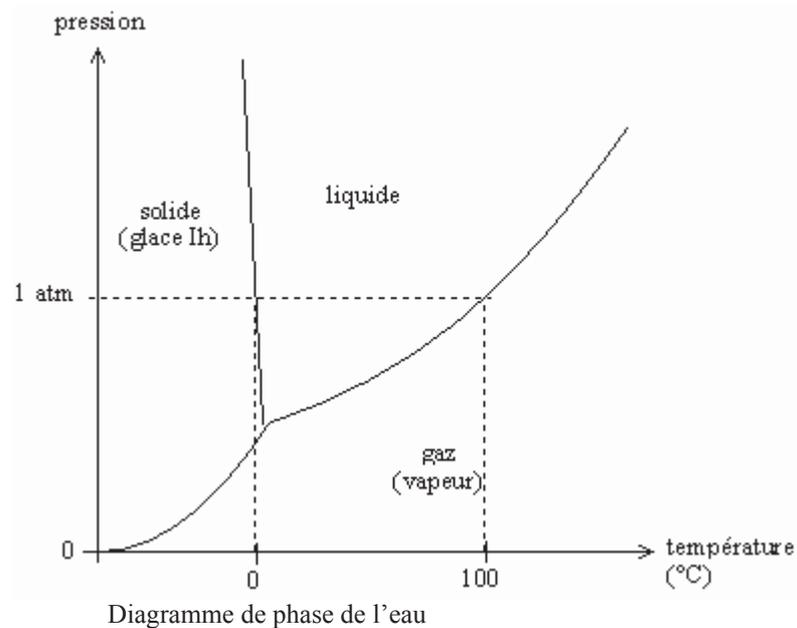
Programmes et ouvrages des sciences de la Terre présentent séparément phénomènes sédimentaires, variations climatiques et rhéologie de la lithosphère. Après avoir revu les états de l'eau à la surface de la Terre, leur contrôle par les changements climatiques et leur influence sur le niveau marin, l'objectif de ce devoir sera d'explorer les possibilités de combinaison des processus externes (climatiques) et internes (tectoniques) dans le contrôle des variations passées, absolues et relatives, du niveau des mers. Il s'agira à partir de différents types de données géophysiques et géochimiques de mesurer ou calculer les durées, les vitesses et les espaces caractéristiques auxquels les différents processus concernés interviennent.

NB : On fera l'hypothèse que la Terre est une sphère parfaite dont le rayon est de 6 370 kilomètres, et dont 70 % de la surface est occupée par les océans. La masse volumique de l'eau de mer est de $1,03 \text{ g/cm}^3$.

Partie 1. Les états de l'eau à la surface de la Terre (document A)

Il existe actuellement dans les régions continentales de haute-latitude des pergélisols (glace d'eau permanente dans le sous-sol, en proportion variable selon les lieux). La figure A1 présente la répartition de différentes formes de pergélisols sur le territoire du Canada.

- 1.1. L'extension des pergélisols : Décrivez succinctement la disposition générale des différentes formes de pergélisols sur le territoire canadien.
- 1.2. Les pergélisols sous-marins : Des forages effectués en mer de Beaufort (100 m de profondeur d'eau ; point A des figures A1 et A4) ont rencontré un pergélisol sous-marin.
 - a. Calculez la pression sur le fond à la profondeur de 100 m. Elle sera exprimée en bar ($10^5 \text{ N.m}^{-2} = 1 \text{ bar}$) ; Donnez les raisons thermodynamiques montrant que ce pergélisol n'est pas en équilibre avec son environnement physique actuel (la température des eaux de fond est comprise entre 0 et 2°C selon les lieux).



- b. Comment expliquez vous la présence d'un pergélisol dans ce contexte ?
- 1.3. Les températures du sous-sol : Les profils thermiques (températures en fonction de la profondeur) réalisés dans les forages à terre, sur la côte du nord-Alaska, sont reportés sur la figure A2 (il s'agit près de la surface des températures moyennes annuelles).
 - a. Expliquez la rupture de pente du profil thermique observée à la base du pergélisol à la profondeur de 650 m dans le forage *Prudhoe Bay*.

- b. Comparez la conductivité thermique des pergélisols des forages *Cape Thompson* et *Cape Simpson* (on admet que le flux géothermique à la surface est identique).
- c. Que signifie le rebroussement vers la droite des profils thermiques dans la partie superficielle de tous les forages ? Quelle information obtient-on par l'extrapolation linéaire jusqu'en surface (pointillés) des profils thermiques ?
- d. Quels sont les facteurs qui déterminent les profondeurs des pergélisols observées actuellement sur la côte Nord-Alaska.

1.4. La dégradation du pergélisol : L'enregistrement des températures en continu sur une année dans le forage Norman à la latitude de 65° est reporté sur la figure A3.

- a. Comment la *couche active* peut-elle être définie, et par quel phénomène est-elle affectée au cours d'un cycle annuel ?
- b. De combien de degrés Celsius au moins la température moyenne annuelle au sol de cette région devrait-elle augmenter pour conduire à la disparition complète du pergélisol sur ce site ? (reproduisez un schéma graphique simple à partir de la figure A3 par lequel vous déterminez cette valeur).
- c. En vous référant aux données disponibles sur les figures A1 et A4, calculez grossièrement en km^3 le volume total d'eau liquide libérée si tout le pergélisol discontinu du territoire du Canada fondait (on admettra que la teneur moyenne en glace du pergélisol discontinu est de 20% et que la profondeur maximale du pergélisol discontinu est de 50 mètres).
- d. La libération d'eau liquide par la fonte des pergélisols discontinus aurait-elle un effet sur le niveau marin absolu ? (justifiez votre réponse)

1.5. Glaces aériennes et glaces marines. On estime le minimum du niveau marin à -135 m par rapport au niveau actuel pour le dernier maximum glaciaire ($19\,500 \pm 250$ ans).

- a. De quels témoins géologiques et géomorphologiques dispose-t-on pour mesurer le niveau marin correspondant au dernier maximum glaciaire ?
- b. De quels témoins géologiques et géomorphologiques dispose-t-on pour cartographier l'extension des glaces d'inlandsis ?
- c. Calculez grossièrement la quantité de glace continentale aérienne (exprimée en km^3) que cela a mobilisé ?
- d. Quelle observation simple effectuée tous les ans à partir des satellites permet-elle de montrer que la fonte des glaces de banquises n'a pas d'influence sur une hausse du niveau des mers.

Partie 2. Les variations récentes du niveau marin (document B)

- 2.1. La mer des Caraïbes. Le diagramme de la figure B1 reporte l'altitude absolue, par rapport au niveau actuel, des mers des récifs à coraux de la mer des Caraïbes en fonction de leur âge.
- Pourquoi les récifs à coraux sont-ils utilisés comme marqueurs de l'évolution du niveau marin ? Sous quelle condition peut-on admettre qu'il s'agit de celle du niveau marin absolu ?
 - Calculez à partir du diagramme la vitesse moyenne (exprimée en mm/an) de remontée du niveau marin absolu au cours des 5 derniers milliers d'années.
 - D'après des mesures réalisées *in situ* (Polynésie, Bahamas), on admet qu'un écosystème récifal corallien placé dans des conditions physico-chimiques optimales produit environ $3 \text{ kg/m}^2/\text{an}$ de sédiment carbonaté aragonitique, et que ce même sédiment a une porosité moyenne de 50%. Calculez la vitesse de montée du niveau marin à partir de laquelle un platier récifal corallien pourrait être ennoyé ? (les coraux ont un test aragonitique, la masse volumique de l'aragonite est de $2,95 \text{ g/cm}^3$).
- 2.2. La côte scandinave. La coupe exposée sur la côte occidentale du bouclier scandinave au nord de la Norvège (coupe de Tromsø ; $69^\circ 40' \text{ N}$; figures B2 et B3) montre la succession suivante des dépôts depuis le bas vers le haut. La base de l'affleurement montre des argiles à galets striés de socle. Ces argiles sont surmontées par des sables quartzueux à galets lavés puis par un niveau d'accumulation de galets encroûtés par une abondante épifaune (*Modiolus modiolus*, *Balanus balanus*, *Chlamys islandica*, bryozoaires, algues rouges). Au-dessus, se rencontrent des couches sableuses à débris de coquilles incluant en particulier deux horizons à rhodolites (concrétions carbonatées construites par les algues rouges). Le premier horizon a été daté à $5\,520 \pm 80$ ans BP. L'ensemble de ces dépôts forme actuellement une terrasse en bord de mer. Le toit de cette terrasse est situé à l'altitude de $+9,8 \text{ m}$ par rapport au niveau moyen de la mer.
- De quel processus général la succession vers le haut des dépôts est-elle le témoin ? (argumentez brièvement votre réponse)
 - Par quelle méthode a-t-on pu dater la formation des rhodolites ?
 - Sachant que les rhodolites se forment sous une profondeur d'eau de 20 mètres, comment expliquez vous l'altitude actuelle à $+7,2 \text{ m}$ de la couche à rhodolites datée à $5\,520 \pm 80$ ans BP ?
 - Calculez la vitesse du processus (exprimé en mm/an) reconnu dans la question précédente (vous prendrez en compte la courbe d'évolution du niveau marin holocène de la mer des Caraïbes en admettant que celle-ci traduit l'évolution du niveau absolu des mers ; figure B1).
 - Définissez niveau marin absolu (eustatisme) et niveau marin relatif. Il s'agit de distances entre des points. Essayez de trouver lesquels. Vous pouvez vous aider d'un schéma.

Partie 3. Les variations anciennes du niveau marin : La ride des Maldives (documents C et D)

- 3.1. La plate-forme carbonatée des Maldives : Un profil de sismique-reflexion combiné à des données ponctuelles issues de forages (localisation sur la figure D1) a permis de construire une coupe stratigraphique au travers de la ride des Maldives (Figure C1).
- Décrivez avec les termes *ad hoc* les dispositions géométriques des couches au sein de chacune des unités stratigraphiques limitées par les surfaces numérotées de 1 à 5 sur la figure C1.
 - Localement et par définition, le niveau marin relatif (ou potentiel d'accommodation) augmente quand de l'espace disponible pour l'accumulation des sédiments est créé. Cet espace est rempli au fur et à mesure ou non par les sédiments. D'après les géométries générales des unités stratigraphiques (quatre unités limitées par les surfaces numérotées de 1 à 5) (figure C1), déduisez les états successifs du niveau marin relatif (augmentation, état stationnaire, diminution correspondant respectivement à la création, le statu quo, la suppression de l'espace disponible), ceci à l'échelle de la ride des Maldives.
 - Comparez pour chacune des unités stratigraphiques la tendance nette du niveau marin relatif sur la ride des Maldives à celle du niveau marin absolu fournie sur la figure C2. Qu'en concluez-vous ?
 - Sur le forage NMA-1 (figure C3), évaluez la tendance nette et l'évolution et des profondeurs d'eau des dépôts entre la limite inférieure et supérieure de chacune des unités stratigraphiques (quatre unités limitées par les surfaces numérotées de 1 à 5). On admet pour simplifier que la courbe Gamma-Ray traduit la teneur en argiles des dépôts et varie corrélativement avec la profondeur d'eau du dépôt.
 - Comparez pour chacune des unités stratigraphiques du forage NMA-1 la tendance nette du niveau marin relatif à celle de la profondeur d'eau des dépôts. Qu'en concluez-vous ?
 - En résumé, énoncez les facteurs de contrôle de l'évolution au cours du temps de la profondeur d'eau à un endroit donné.
 - Sur la figure C2 sont superposées pour les 100 derniers millions d'années les variations du niveau absolu des mers (qui dérivent des analyses de la série sédimentaire située au large du New Jersey ; Miller et co-auteurs, 2005) et les variations de la composition isotopique ($\delta^{18}\text{O}$) des tests de foraminifères benthiques des océans (Zachos et co-auteurs, 2001). Discutez la corrélation des deux courbes.
- 3.2. Subsidence de la ride des Maldives (site NMA-1):
- Calculez pour le site NMA-1 la vitesse moyenne (exprimée en mm/an) de la subsidence totale (S_{tot}) du substratum basaltique depuis 37 Ma (âge du premier dépôt marin) jusqu'à l'actuel.

- b. Calculez l'enfoncement du substratum basaltique qui est dû à la charge de la couche totale des sédiments carbonatés (qui se mettent bien sûr en place sous l'eau). Vous effectuerez ce calcul en utilisant le modèle d'équilibre isostatique d'Airy (on admet que la tranche d'eau résiduelle est d'épaisseur négligeable). La colonne sédimentaire carbonatée à une porosité moyenne de 20% ; la masse volumique du matériel sédimentaire (calcite) est de $2,71 \text{ g/cm}^3$; la masse volumique des fluides de la porosité des sédiments est de $1,03 \text{ g/cm}^3$; la masse volumique du manteau sous-jacent est de $3,3 \text{ g/cm}^3$. Calculez alors la vitesse moyenne de la subsidence propre, sans charge sédimentaire (dite subsidence tectonique ou S_{tec}) du substratum basaltique depuis 37 Ma (âge du premier dépôt) et calculez le rapport S_{tec}/S_{tot} .
- c. On admet lors de l'enfouissement les sédiments carbonatés une perte de porosité par simple compaction mécanique sans changement du volume des grains. L'évolution de la porosité obéit alors à la loi empirique suivante :

$$\Phi = \Phi_0 e^{-cz}$$

Φ : porosité ; Φ_0 : porosité initiale ; z : profondeur d'enfouissement

Pour les sédiments carbonatés : $c = 0,7 \text{ (km}^{-1}\text{)}$ et $\Phi_0 = 50 \text{ (}\%)$

1) Calculez l'épaisseur initiale de la couche sédimentaire basale limitée par les surfaces 1 et a (tableau 1). Pour plus de commodité, on calcule la porosité pour le toit de chaque couche. On admet que cette valeur représente la porosité moyenne de chaque couche ;

2) Calculez l'enfoncement du substratum entre le temps $t = 37 \text{ Ma}$ correspondant à la surface 1 et le temps $t_1 = 34 \text{ Ma}$ correspondant à la surface a. Vous prendrez en compte la décompaction de la couche, ainsi que la différence de profondeur d'eau des dépôts et celle du niveau marin absolu entre les deux surfaces (tableau 1) ;

Surface (numéro)	Age (Ma)	Profondeur forage (km)	Epaisseur couche (km)	Profondeur d'eau (m)	Niveau marin absolu (m)
5	0	0		0	0
			0,852		
4	13	0,852		50	5
			0,326		
3	16	1,178		400	15
			0,34		
2	24	1,518		50	5
			0,34		
a	34	1,858		20	45
			0,255		
1	37	2,113		30	20

Tableau 1 : Données relatives au forage NMA-1 (le niveau marin absolu est indiqué par rapport au zéro des mers actuelles)

3) Construisez (sur papier millimétré) un diagramme montrant l'enfoncement au cours du temps de l'interface sédiments-basalte. Vous procéderez par étapes en calculant la compaction de chaque couche déjà déposée par le recouvrement de chaque couche nouvellement déposée ;

4) Décrivez sommairement et discutez le résultat obtenu.

Partie 4. La dorsale asismique de l'Océan Indien (Chagos-Laccadive) (document D)

4.1. Discutez la répartition des plus fortes anomalies gravimétriques positives (supérieures à 50 mgals) et négatives (inférieures à -50 mgals) dans la partie orientale de l'Océan Indien (on exclura les anomalies de la mer d'Oman) (Figure D1).

4.2. Les plateaux basaltiques sous-marins de l'Océan Indien ont été étudiés par les forages scientifiques du programme *Ocean Drilling Project* (sites ODP 706, ODP 713, ODP 715) et par des forages d'exploration industrielle (site Elf NMA-1). La position et les résultats des forages sont reportés respectivement sur la figure D1 et le tableau 2.

Volcans aériens	Altitude maximale (mètres)	Epaisseur de sédiments (mètres)	Age du basalte (Ma)	
La Réunion	3 069	0	0 à 2	
Mauritius	280	0	2 à 7	

Plateaux sous-marins	Profondeur d'eau (mètres)	Epaisseur de sédiments (mètres)	Epaisseur du basalte pénétré (mètres)	Age du basalte pénétré (Ma)
ODP 706	2 320	47,5	77,4	33,2 ± 0,5
ODP 713	2 915	155,1	84,7	49,3 ± 0,6
Elf NMA-1	0	2221	115,5	55
ODP 715	2 266	211,3	76,5	57,2 ± 1,8

Tableau 2 : Données relatives aux édifices basaltiques de l'Océan Indien (les âges sont indiqués en millions d'années – Ma)

Le forage NMA-1 a perforé 115,5 m de basalte à grain fin et à olivines. Ce basalte a été radiométriquement daté à 55 Ma. Ce basalte est altéré et disposé en couches de 10 m d'épaisseur (effusion aérienne). De manière similaire, les basaltes forés par les sites ODP montrent des indices de mises en place à l'air libre ou en conditions subaériennes (eaux très peu profondes).

- a. Construisez un diagramme montrant la relation entre l'altitude actuelle du toit des basaltes et l'âge des édifices et plateaux basaltiques (utilisez le papier millimétré).
- b. Décrivez (par une forme mathématique) et interprétez cette courbe d'évolution générale de l'altitude des édifices et plateaux basaltiques au travers de l'Océan Indien. Quelle hypothèse peut-on formuler sur l'origine de cette ligne volcanique qui s'étend depuis l'île de La Réunion jusqu'au plateau du Deccan sur le continent Indien ?
- c. Quels seraient alors la nature et l'âge de l'événement géodynamique ayant pu conduire à la rupture dans sa partie médiane de la continuité de cette ligne d'édifices et de plateaux basaltiques ? (voir figure D1)
- d. Quelle a pu être l'influence de cet événement sur le volume des bassins océaniques, et par conséquent, sur le niveau marin absolu (tectono-eustatisme) ? Détectez vous un possible écho de cet événement sur la courbe du niveau marin absolu disponible sur la figure C2 ?

Partie 5 . Synthèse

D'après les données fournies et obtenues dans ce travail, essayez de construire un tableau ou un diagramme rassemblant échelles de temps, vitesses, et extensions dans l'espace des différents processus eustatiques et tectoniques contrôlant les variations des niveaux marins. Vous considérerez une échelle globale, régionale (10^7 - 10^5 km²), et locale pour l'extension dans l'espace.

DOCUMENT A

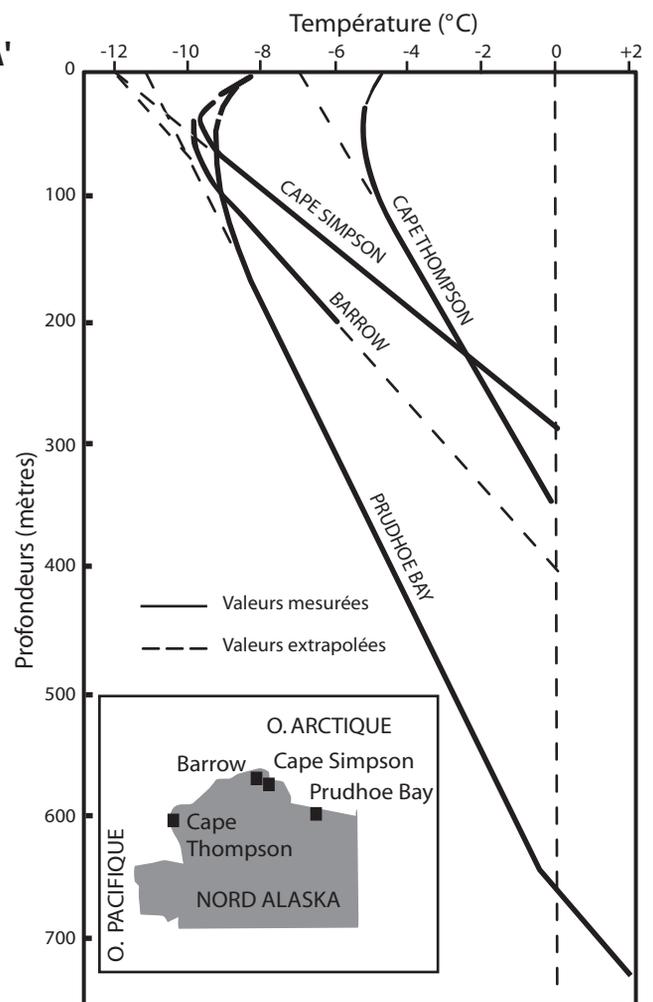
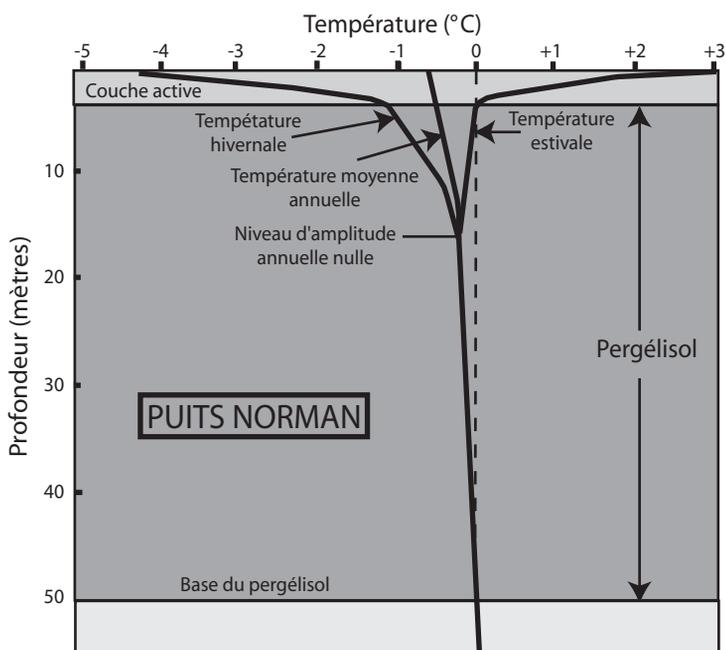
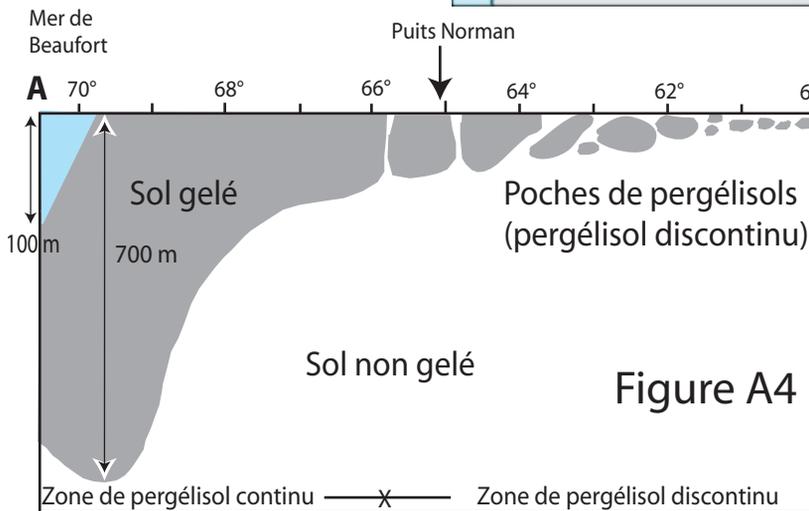
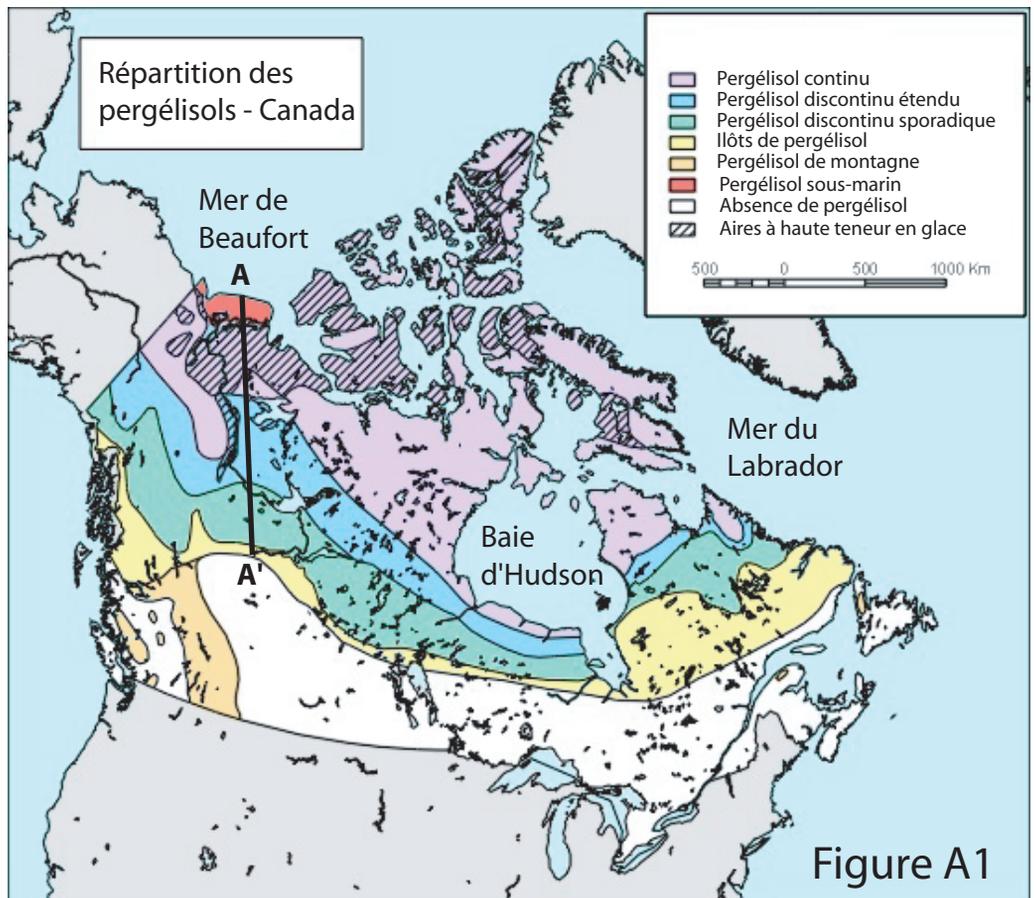


Figure A2

Figure A3

DOCUMENT B

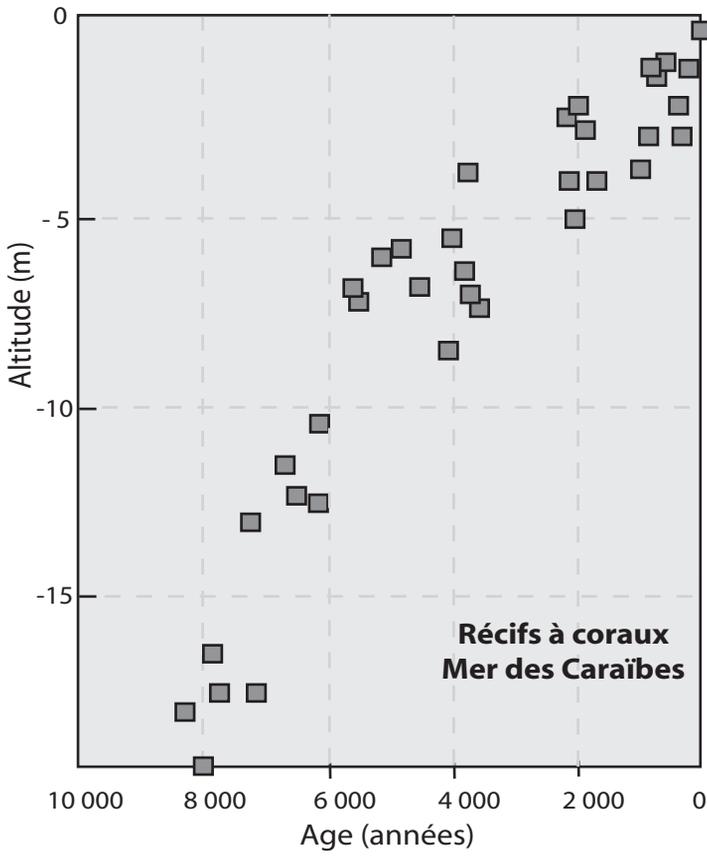


Figure B1

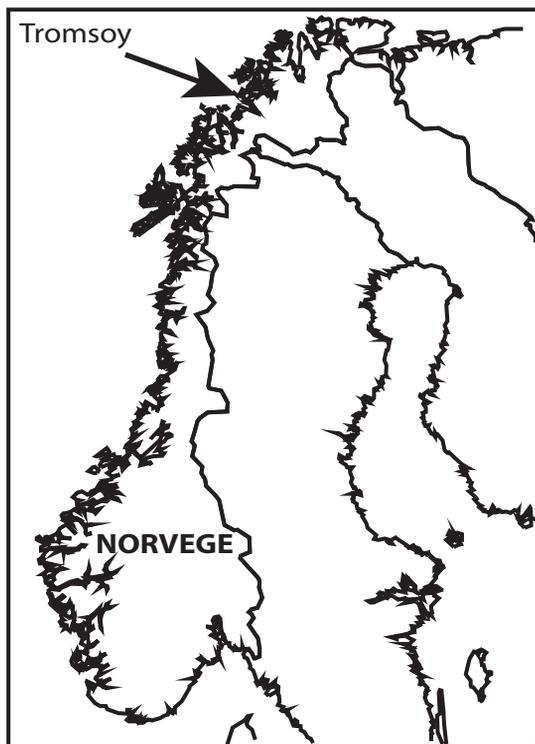


Figure B2

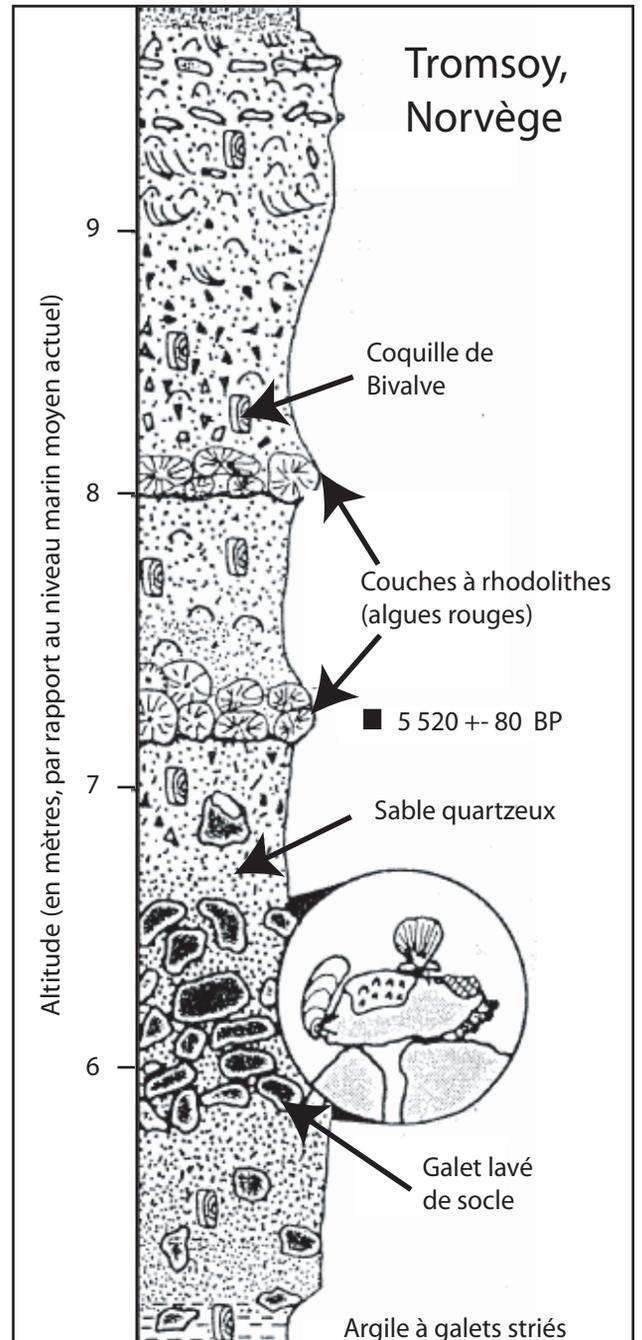


Figure B3

DOCUMENT C

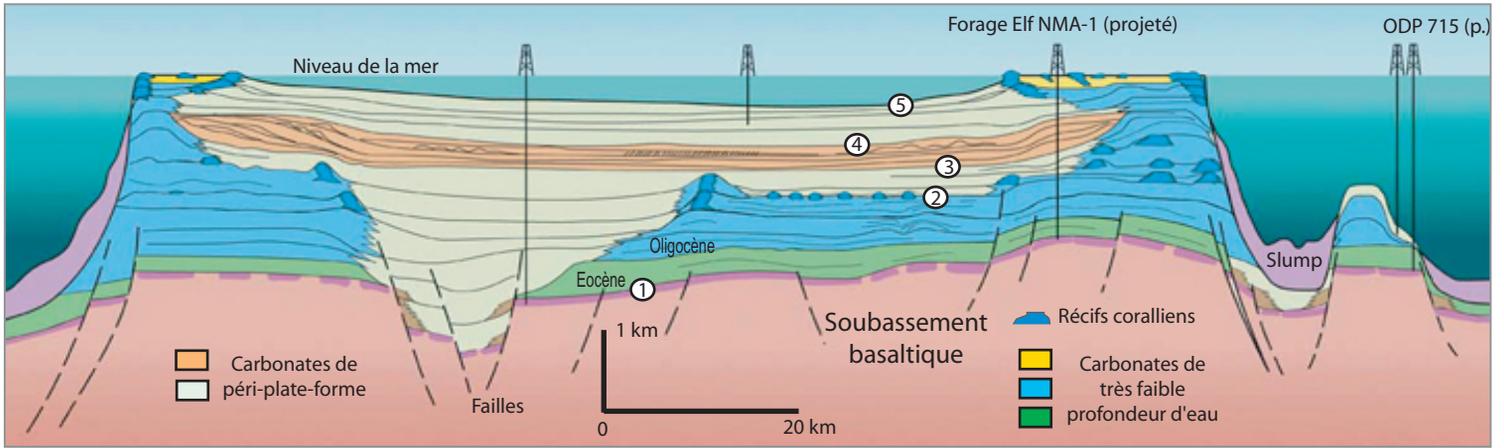


Figure C1 : Coupe transversale de la ride des Maldives (dérivée d'une ligne sismique)

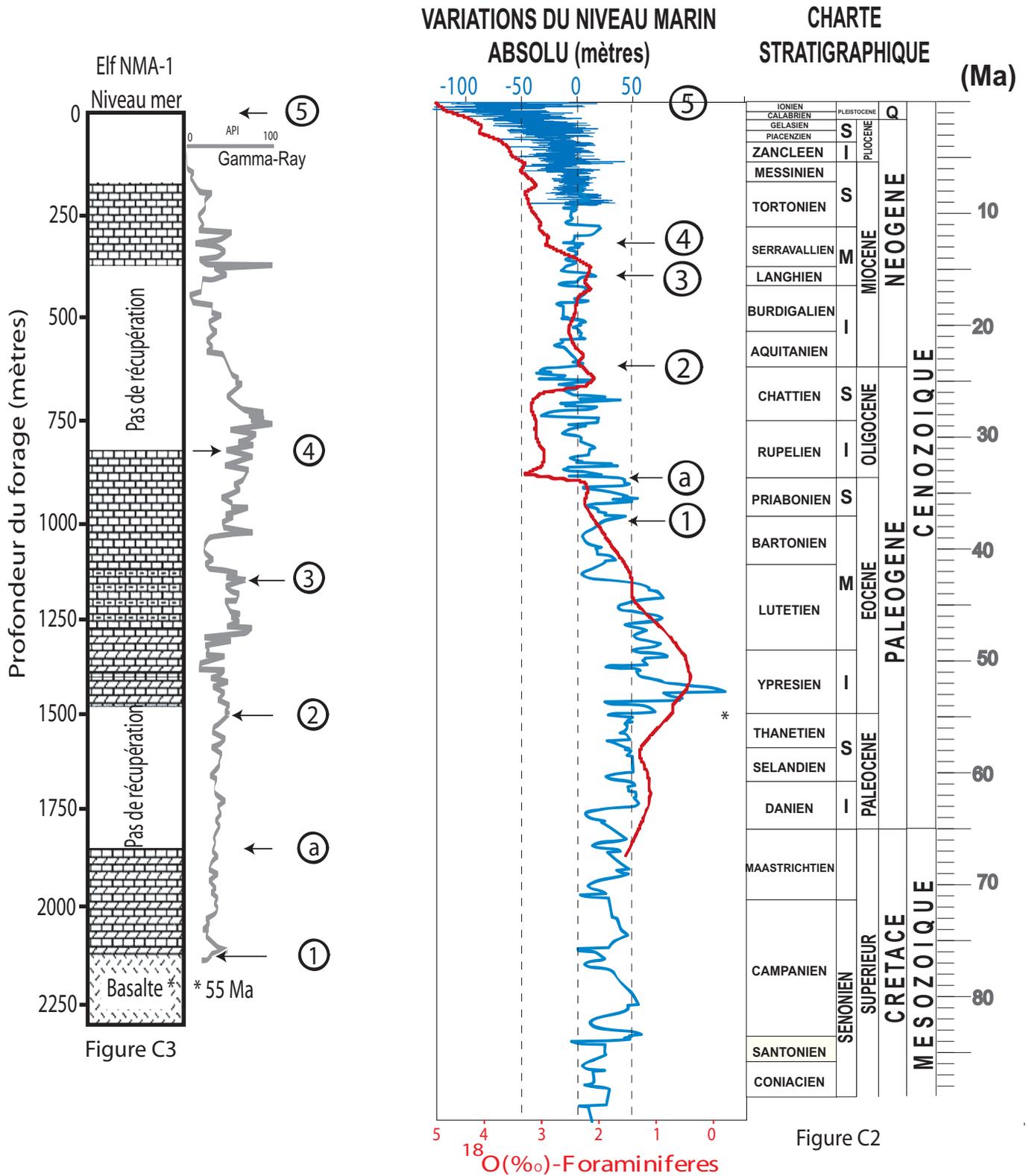


Figure C2

DOCUMENT D

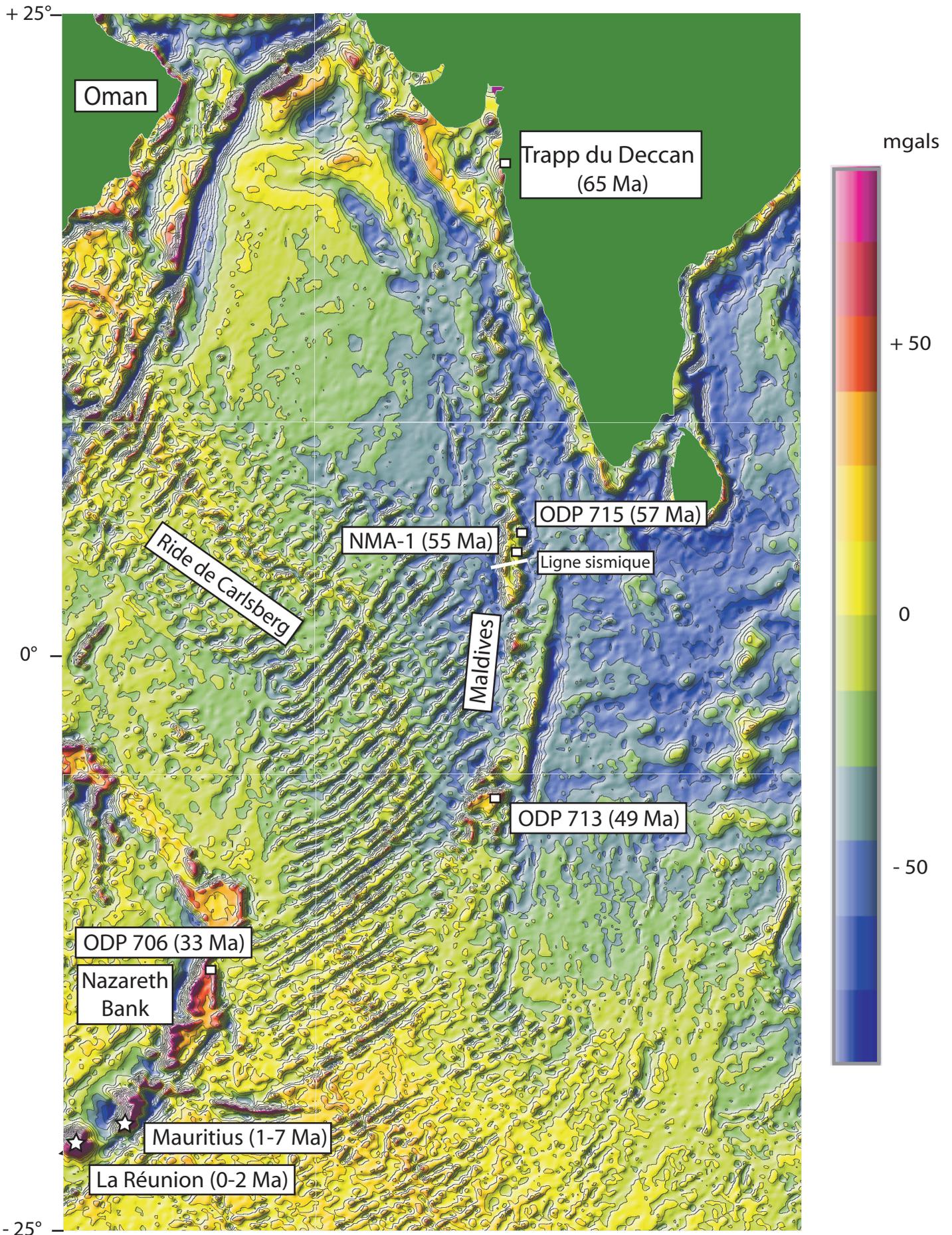


Figure D1 : Carte des anomalies gravimétriques de l'Océan Indien ; Emplacements et âges des édifices basaltiques aériens et sous-marins