

ÉCOLES NORMALES SUPÉRIEURES
ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

CONCOURS D'ADMISSION SESSION 2019

FILIÈRE BCPST

COMPOSITION DE SCIENCES DE LA TERRE

Épreuve commune aux ENS de Lyon, Paris, Paris-Saclay et à l'ENPC

Durée : 4 heures

L'utilisation des calculatrices est autorisée pour cette épreuve.

1 Il faut le fer

Dans l'histoire de la maîtrise des métaux par l'Homme, l'Âge du Bronze (cuivre-étain) a précédé l'Âge du Fer. Cependant, quelques rares objets en fer ont été confectionnés dès l'Âge du Bronze, ce qui a posé la question de l'éventuelle maîtrise localement précoce de l'industrie du fer, mais aussi de l'origine de ce fer.

1.1 Fer terrestre ou extraterrestre

1.1.1 Les objets en fer de l'Âge du Bronze étant riches en nickel par rapport à la grande majorité des objets plus tardifs, deux origines du fer, et du nickel associé, ont été proposées : fer extrait de latérites développées sur un matériau d'origine mantellique (les péridotites sont riches en Ni par rapport aux autres roches de surface) ou fer provenant de sidérites (les météorites de fer, voir figure 1, sont aussi très riches en Ni).

D'après vos connaissances et la figure 1, comparez l'état initial du fer dans les deux sources proposées, latérites et météorites de fer, à l'état du fer utilisé dans les objets fabriqués par l'Homme. Quelle est la source la plus abondante ? Quelle est la source nécessitant le moins de transformations ?

1.1.2 La figure 3 présente les domaines de composition chimique des latérites riches en nickel (les gisements de fer terrestres les plus riches en nickel), des météorites de fer et de groupes d'objets en fer datant de l'Âge du Fer. Le tableau 1 contient les analyses partielles de divers autres objets en fer.

Les artefacts (objets fabriqués par l'Homme) représentés sur la figure 3 nécessitent-ils d'envisager une origine extraterrestre pour le fer ?

1.1.3 D'après les données du tableau 1 concernant les artefacts de l'Âge du Bronze et en utilisant la figure 3, discutez point(s) fort(s) et limite(s) de l'hypothèse d'une origine extraterrestre du fer de ces objets par rapport à une origine terrestre « mantellique ».

1.1.4 Sachant que, lors de processus d'altération en conditions oxydantes, le fer est moins mobile que le cobalt, lui-même moins mobile que le nickel, proposez une explication possible aux limites apparentes de l'hypothèse « extraterrestre » pour les artefacts de l'Âge du Bronze.

1.1.5 Les bracelets de Czestochowa (tableau 1) datent de l'Âge du Fer.

Quelle est l'origine la plus probable pour le fer de ces bracelets ? Proposez une explication à cette particularité par rapport aux autres artefacts de l'Âge du Fer de la figure 3.

1.2 Les météorites et la Terre

Les météorites sont des objets peu abondants mais diversifiés qui ont permis d'élaborer un modèle de formation du système solaire et de la Terre. Parmi elles, les chondrites, type de météorites dites non différenciées. Plus particulièrement, dans le cadre du modèle CHUR (*CHondritic Uniform Reservoir*), la chimie des chondrites carbonées CI est considérée comme représentant la chimie du matériel à partir duquel se sont formées la Terre et les planètes rocheuses. Deux autres types de météorites, dites différenciées, sont ici abordées : les sidérites (figure 1) et les pallasites (figure 2).

1.2.1 En restant dans le cadre du modèle CHUR, expliquez le principe de calcul de la chimie du noyau terrestre à partir des données chimiques des chondrites CI et d'échantillons terrestres choisis. Quelles sont les données physiques supplémentaires nécessaires à ce calcul ? Grâce à quel outil et à quelle découverte majeure l'acquisition de ces données physiques a-t-elle été possible ?

1.2.2 Décrivez et comparez succinctement sidérites et pallasites à partir des figures proposées (figures 1 et 2) et des roches que vous connaissez.

1.2.2 À partir des données fournies et de vos observations précédentes, expliquez ce que peuvent représenter respectivement chondrites CI, pallasites et sidérites par rapport à l'histoire et à la structure de la Terre ?

1.3 Altération et latérites

Prenons le cas d'un profil latéritique développé sur une roche mère de type périclétique. Outre la roche mère à la base, ce profil est formé d'un horizon argileux de 4 m d'épaisseur surmonté d'une cuirasse ferrugineuse de 2,7 m d'épaisseur. Le tableau 2 présente certaines caractéristiques de cette latérite.

1.3.1 Dans le cas d'un processus d'altération isovolume (un volume donné de roche altérée correspond au produit de l'altération du même volume de roche mère), à partir d'un simple bilan de masse, exprimez la concentration c_{alt} d'un élément immobile (non mobilisé par l'altération) dans un horizon altéré en fonction des caractéristiques de la roche mère et de l'horizon altéré (densités d_0 et d_{alt} , et concentration c_0 de l'élément immobile dans la roche mère).

1.3.2 Dans le cas d'un processus d'altération avec compaction (un volume donné V_{alt} de roche altérée correspond au produit de l'altération d'un volume plus grand V_0 de roche mère), à partir d'un simple bilan de masse, exprimez la concentration c_{alt} d'un élément immobile (non mobilisé par l'altération) dans un horizon altéré en fonction des caractéristiques de la roche mère et de l'horizon altéré (densités d_0 et d_{alt} , concentration c_0 , volume initial V_0 et volume altéré correspondant V_{alt}).

1.3.3 Connaissant les mobilités relatives Fe / Co / Ni (question 1.1.4.) lors de l'altération, proposez une explication simple aux concentrations et enrichissements relatifs entre ces trois éléments dans la cuirasse ferrugineuse.

1.3.4 Les concentrations en Fe, Ni et Co dans l'horizon argileux (tableau 2) sont données avec deux valeurs : une valeur minimale et une valeur maximale observable dans une partie plus enrichie. L'enrichissement en Ni se situe en partie basse de l'horizon argileux, l'enrichissement en Co se situe dans la partie médiane de cet horizon alors que l'enrichissement en Fe est observé au sommet de l'horizon argileux.

Proposez une explication simple aux concentrations et enrichissements relatifs (valeurs et localisations) en Fe, Ni et Co dans l'horizon argileux de cette latérite.

1.3.5 En considérant le titane comme effectivement immobile lors de toutes les étapes de formation de cette latérite, cuirasse et horizon argileux ont-ils pu se former de façon isovolume ? Précisez vos réponses précédentes en retraçant les principales étapes de formation du profil latéritique et de mobilisation des métaux étudiés.

2 Une île pas si fixe

La figure 4 est un extrait de la carte géologique du monde publiée en 2000 par la Commission de la carte géologique mondiale (CCGM) et l'UNESCO. Extrait de la légende en figure 6.

2.1 D'après son étude, caractérisez l'accident majeur traversant l'île du Sud (South Island) de Nouvelle-Zélande en le replaçant dans le contexte géodynamique et cinématique local et en prenant en compte ses prolongements au Nord-Est et au Sud-Ouest.

2.2 Expliquez la particularité volcanique de l'île du Nord (North Island) par rapport à l'île Sud. Proposez une explication à la présence d'une mince « zone d'accrétion océanique » au Nord-Est de l'île Nord.

3 Une subduction volcanique

La figure 5 est un extrait de la carte géologique du monde publiée en 2000 par la Commission de la carte géologique mondiale (CCGM) et l'UNESCO. Extrait de la légende en figure 6.

3.1 Présentez le contexte général en nommant les 4 plaques lithosphériques en présence et leurs relations. Comment peut-on qualifier le point P de coordonnées approximatives 76°W-47°S ? Existe-t-il un autre point semblable sur cet extrait de carte ?

3.2 L'étude de l'activité magmatique sur la côte Ouest-chilienne permet de distinguer deux zones : la zone volcanique Sud (ZVS), de Santiago au point P, et la zone volcanique australe (ZVA), du point P au Cap Horn. La ZVS est caractérisée par des roches magmatiques de la série calco-alcaline (basalte-andésite-dacite-rhyolite) alors que la ZVA montre des roches de la série adakitique. Les adakites sont très largement volcaniques et ne montrent pas de terme basique (basaltique). Le matériau source principal du magma adakitique est de type metabasalte amphibolitique à grenat.

Rappelez les caractéristiques géodynamiques pouvant expliquer la formation de magmas calco-alcalins en précisant le contexte et le matériau source.

Pour les adakites, quelle pourrait être, ici, l'origine du matériau source, et quel contexte particulier pourrait permettre sa fusion partielle ?

3.3 Aux alentours du point P, la subduction est de direction N80 aussi bien au Nord qu'au Sud, mais avec une vitesse de subduction locale de l'ordre de 7 cm/a au Nord et de 1 cm/a au Sud.

Quel renseignement quantitatif donne cette différence de vitesse de subduction sur le mouvement relatif entre les deux plaques subduites ?

Comment évoluera la position particulière du point P à l'avenir par rapport à la côte chilienne, en supposant des vitesses relatives futures identiques aux vitesses actuelles (évolution géométrique qualitative et estimation quantitative) ?

Quelle est la conséquence attendue de cette évolution sur la localisation du magmatisme adakitique ?

4 Isotopes et fractionnement

On s'intéresse ici au fractionnement isotopique de l'oxygène de l'eau. La différence de masse entre les isotopes ^{18}O et ^{16}O induit des comportements légèrement différents lors de différents processus physico-chimiques, ces différences de comportement étant « symétriques » lorsqu'on considère deux processus « symétriques » tels qu'évaporation et précipitation.

4.1 Quelques bases

Notons R , le rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) dans la phase considérée. Ce rapport étant de l'ordre de 1/500 et les variations observées étant faibles, ces dernières sont exprimées en variation par rapport à un standard selon la notation « delta » : $\delta = (R - R_{st}) / R_{st} = R/R_{st} - 1$.

Le fractionnement isotopique observé lors du passage partiel d'un état à un autre peut être défini de deux manières, par un coefficient de fractionnement α ou par le fractionnement isotopique Δ , plus pratique par la suite. En notant « v » la phase vapeur d'eau et « l » la phase eau liquide, on a : $\alpha_{v-l} = R_v/R_l$, et $\Delta_{v-l} = \delta_v - \delta_l$.

4.1.1 En partant des définitions ci-dessus, trouvez une relation simple entre α et Δ , en partant de l'expression de la quantité « $\alpha - 1$ » et du fait que les valeurs de δ sont très petites par rapport à 1 (quelques ‰).

4.1.2 Le standard choisi est l'océan moyen SMOW (*standard mean ocean water*). Par définition, quelle est la valeur δ_{edm} de l'eau océanique ?

4.1.3 Lorsqu'un peu d'eau de mer s'évapore, on note, pour des températures de l'ordre de 15 à 25°C, un fractionnement Δ_{v-l} de l'ordre de -10‰. D'après cette valeur, la vapeur d'eau contient-elle plus ou moins de ^{18}O que l'eau dont elle provient ?

4.1.4 Observons une masse M d'eau de mer qui s'évapore, masse négligeable par rapport à la masse de l'océan. Quelle est la valeur de δ_v ? La valeur δ_l de l'eau de mer « résiduelle » est-elle modifiée ? Si toute cette masse de vapeur d'eau précipite en une seule fois, quelle sera la valeur δ_p de la pluie obtenue ?

4.2 Précipitation fractionnée

Partons toujours d'une même masse M de vapeur d'eau issue de l'évaporation océanique, comme ci-dessus.

4.2.1 Dans le cas de la précipitation très partielle de cette vapeur d'eau, quelle est, d'après les données précédentes, la valeur δ_p de la pluie obtenue ?

4.2.2 On considère la précipitation de 10 % de la vapeur d'eau initiale (0,1M), considérée par la suite comme « partielle » par rapport au stock de vapeur d'eau total.

Expliquez ce que peut représenter la quantité $M \cdot \delta$ pour l'isotope ^{18}O (composant minoritaire de l'oxygène et contenu dans une fraction minoritaire de l'eau considérée).

Par un bilan de masse (conservation) de ^{18}O basé sur $M \cdot \delta$, rappelez ou déterminez les valeurs de $\delta_p(0,9)$ et $\delta_v(0,9)$, les valeurs respectives de la pluie et de la vapeur d'eau lorsque la fraction résiduelle de vapeur est de 0,9 (10 % de précipitation et donc 90 % de vapeur résiduelle).

En procédant par étapes de précipitation de 0,1M, déterminez $\delta_p(0,8)$ et $\delta_v(0,8)$ puis $\delta_p(0,7)$ et $\delta_v(0,7)$.

4.2.3 La démarche ci-dessus est une approche du calcul de précipitation / cristallisation fractionnée de Rayleigh (la phase formée ne réagit plus avec la phase résiduelle). En gardant les notations proposées ci-avant, on obtient par un calcul intégral, la formule : $\delta_v(f) - \delta_v(1) = (\alpha_{l-v} - 1) \cdot \ln(f)$, avec f la fraction résiduelle de vapeur d'eau.

Vérifier la validité de l'approche initiale par rapport à cette formule en exprimant $(\alpha_{1,v} - 1)$ en fonction des données disponibles. Déterminez $\delta_v(0,1)$.

4.2.4 D'après les résultats précédents, et en considérant que la majeure partie des pluies provient de vapeur d'eau évaporée en zone intertropicale, proposez une évolution du δ_p des précipitations en fonction de la latitude et, sur les continents, de la distance à la mer. À distance égale à la source de vapeur d'eau, expliquez quel est l'effet attendu de la présence d'une chaîne de montagnes.

4.2.5 À quels types de précipitations les valeurs $\delta_v(0,1)$ et $\delta_v(<0,1)$ sont-elles à priori associées ?

4.2.6 L'évaporation incessante d'eau de mer apportant des précipitations sur les continents peut-elle entraîner une évolution du δ_{edm} au cours du temps dans le cas d'un système climatique global stationnaire ?

4.3 Fractionnement et changement climatique

4.3.1 Envisageons maintenant un changement climatique avec entrée en période de glaciation. Expliquez l'effet attendu du stockage progressif de glaces aux pôles sur la valeur du δ_{edm} de l'océan. Le fractionnement isotopique considéré n'étant que légèrement accru par une température plus faible, proposez une explication possible à la baisse des valeurs de δ observées dans les glaces polaires lors de ces épisodes.

4.3.2 Les valeurs de δ_{edm} au cours du temps sont obtenues principalement par l'étude des tests calcaires de foraminifères qui ont cristallisé en équilibre avec l'eau de mer de leur époque. La figure 7 montre l'évolution du δ_{edm} (indiqué $\delta^{18}O$ des océans) telle qu'elle a pu être reconstruite pour les derniers 450 000 ans.

D'après cette courbe, donner la date d'un maximum et d'un minimum glaciaire. Quelle différence observe-t-on entre les périodes d'englacement (d'un minimum à un maximum glaciaire) et les périodes de déglaciation (d'un maximum à un minimum glaciaire) ?

4.3.3 Lors du dernier maximum glaciaire, le niveau moyen des océans était environ 120 m sous le niveau actuel. En prenant un océan moyen actuel de 4000 m de profondeur et d'après les données disponibles, estimez le δ_g moyen des glaces stockées à l'époque et qui ont fondu depuis.

4.3.4 En gardant la valeur δ_g obtenues précédemment, estimez δ_{edm} des océans si les calottes antarctiques et groenlandaises fondaient complètement, entraînant alors une hausse du niveau des océans de l'ordre de 80 m.

Illustrations et données



Figure 1 : Un échantillon de sidérite, météorite de fer.

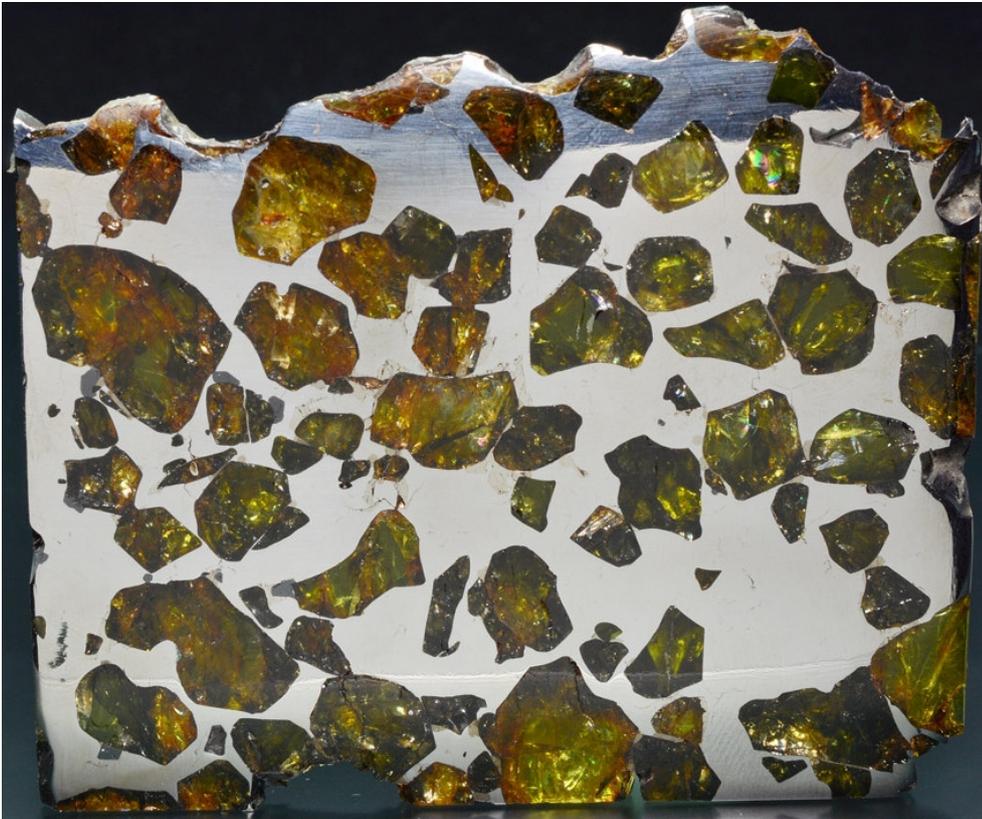


Figure 2 : Tranche polie d'une météorite de type pallasite.

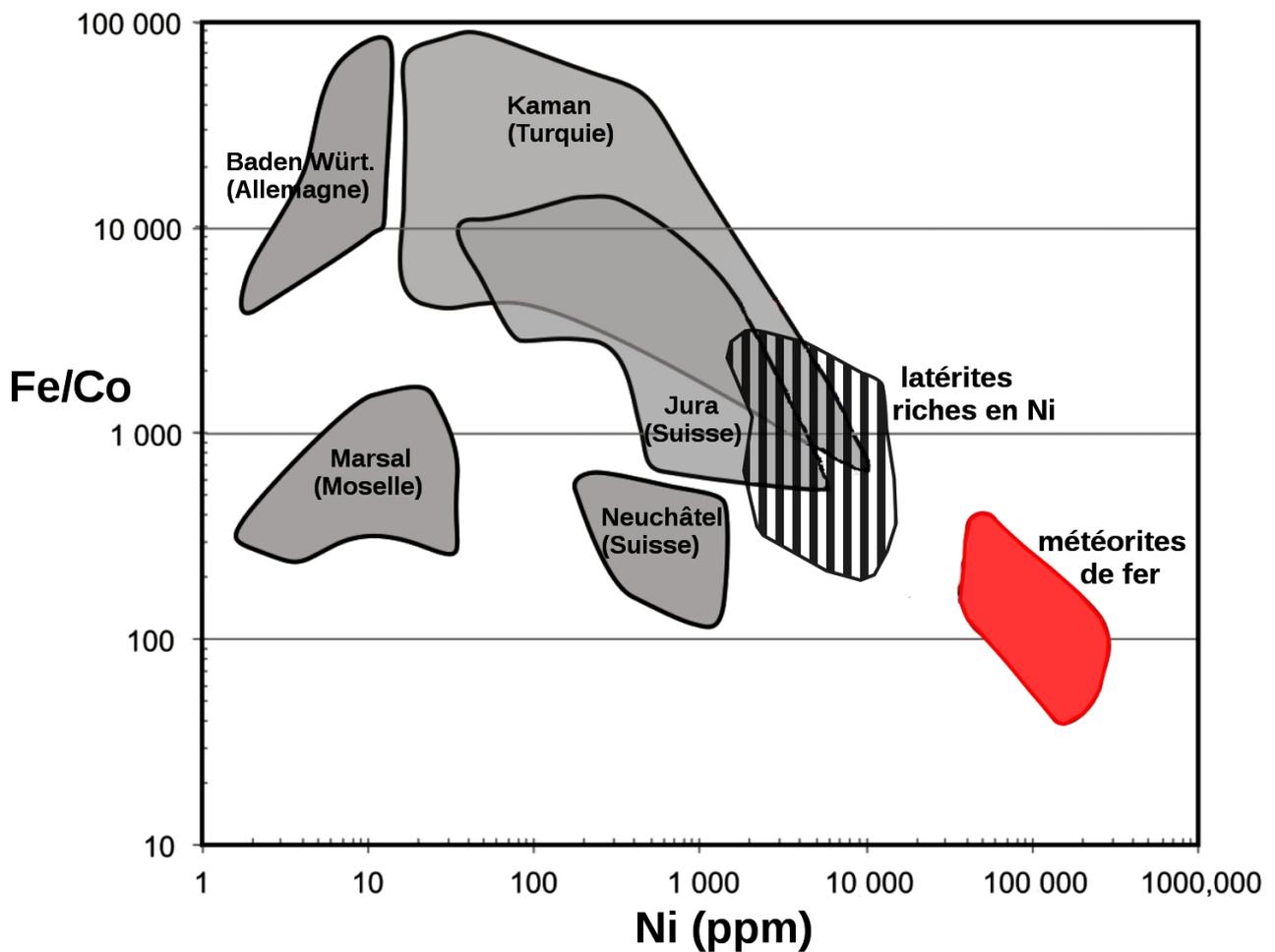


Figure 3 : Diagramme Fe/Co - Ni (teneurs massiques). Les latérites représentées sont les gisements de fer terrestres les plus riches en Ni. Les domaines gris correspondant à des objets de l'Âge de Fer de différentes origines géographiques.

	Fe	Ni	Co
Âge de Bronze			
Hache de Zou (Chine)	92	6,9	0,6
Perle de Gerzeh (Égypte)	86	8,1	0,95
Médaille de Tell Um el-Marra (Syrie) - 3 prélèvements	91,2	1,14	0,42
	95,77	2,52	0,49
	92,96	3,21	0,63
Hache d'Ougarit (Syrie) - 2 prélèvements	90,16	6,55	0,54
	91,38	2,32	0,36
Âge de Fer			
Bracelet de Czesochowa (Pologne)	78	18	0,6

Tableau 1 : Composition en Fe, Ni et Co (% massique) de quelques artefacts de fer.

	densité	Fe	Ni	Co	Ti
Cuirasse	2,5	34	0,29	0,039	0,02
Horizon argileux	1,7	11,4 à 15	0,40 à 1,8	0,021 à 0,054	0,02
Roche mère	3,2	6	0,21	0,011	0,01

Tableau 2 : Densité et composition en Fe, Ni, Co et Ti (% massique) des horizons d'une latérite.

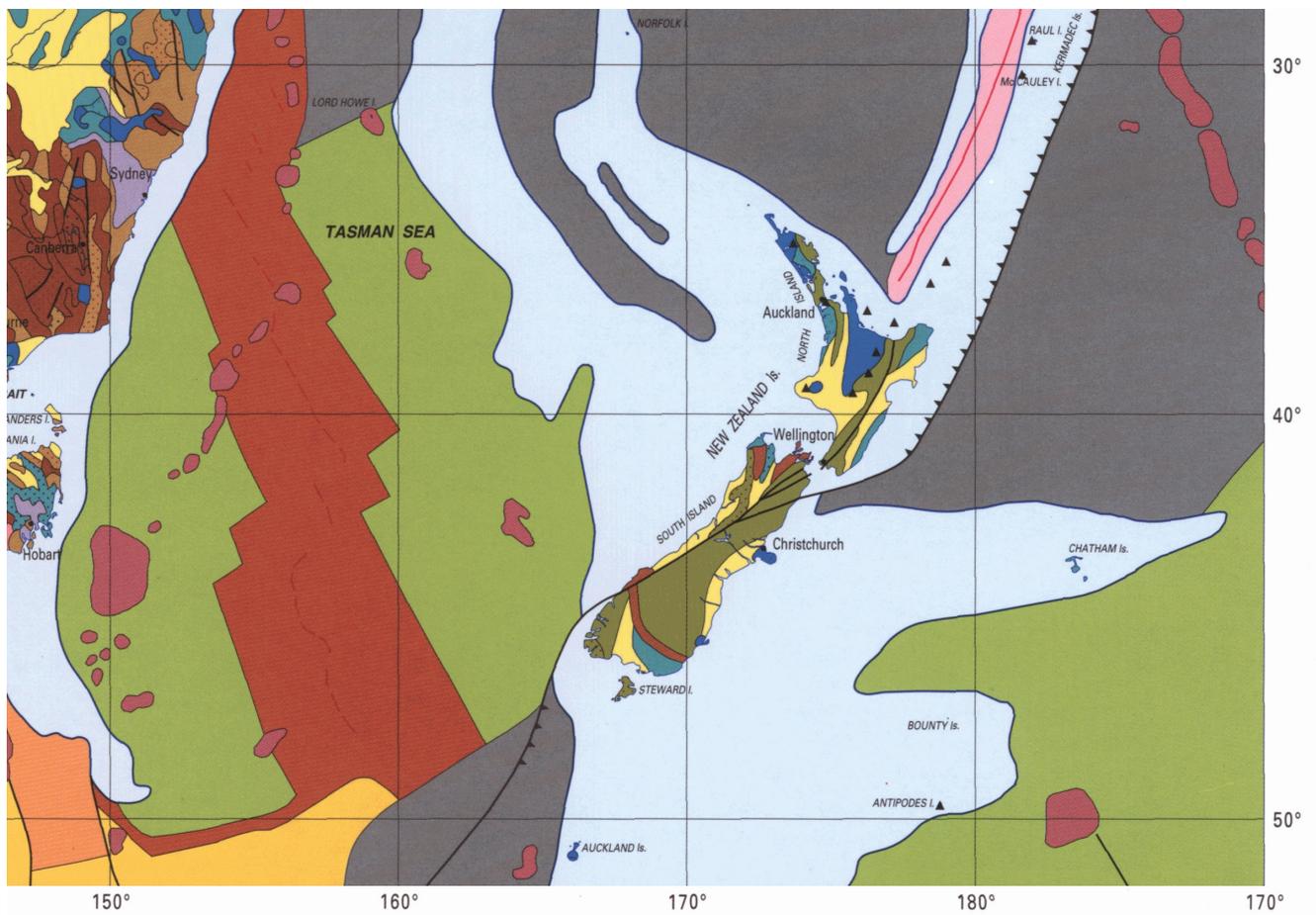


Figure 4 : Extrait de la carte géologique du monde, focalisé sur la Nouvelle-Zélande.

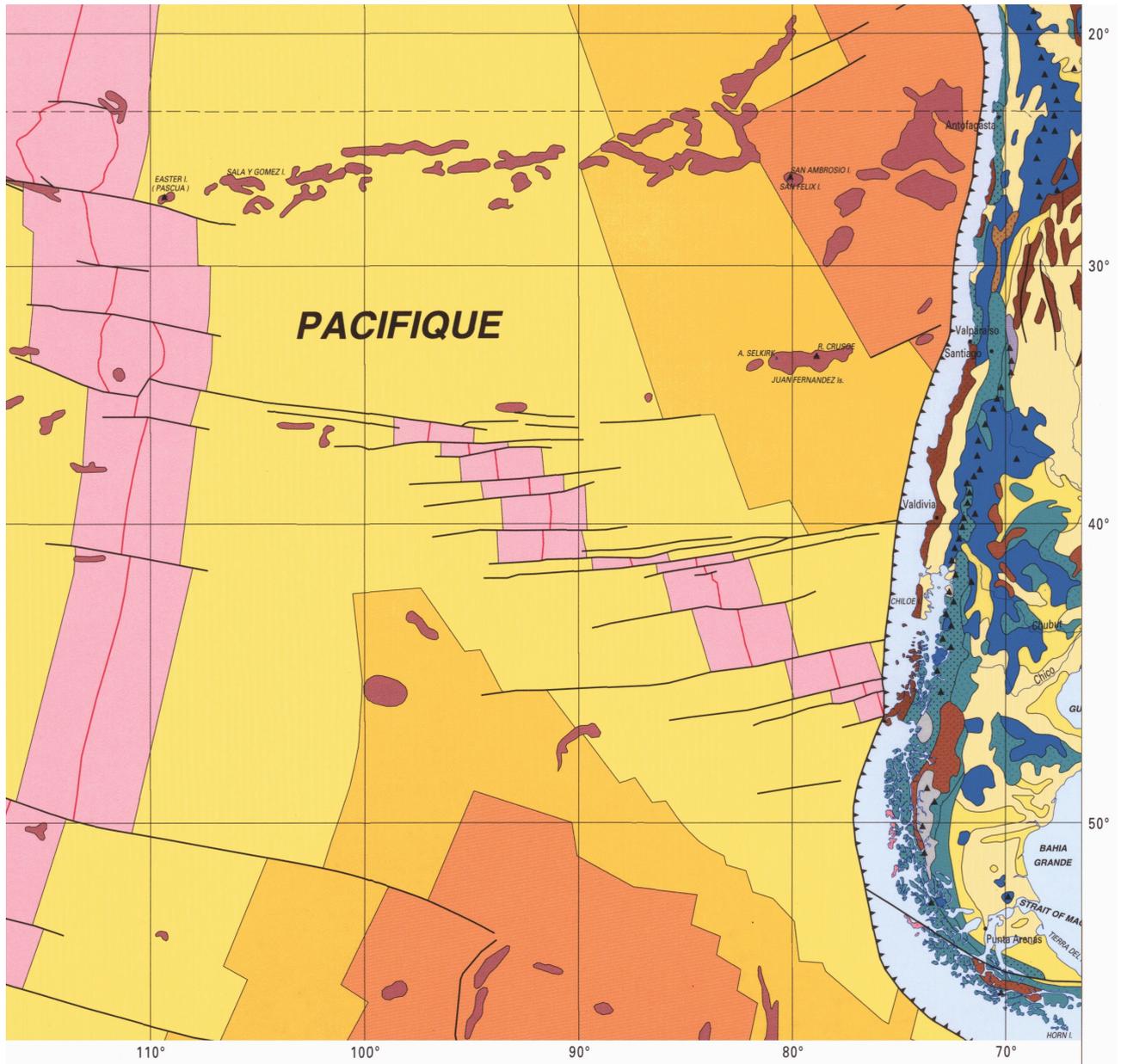
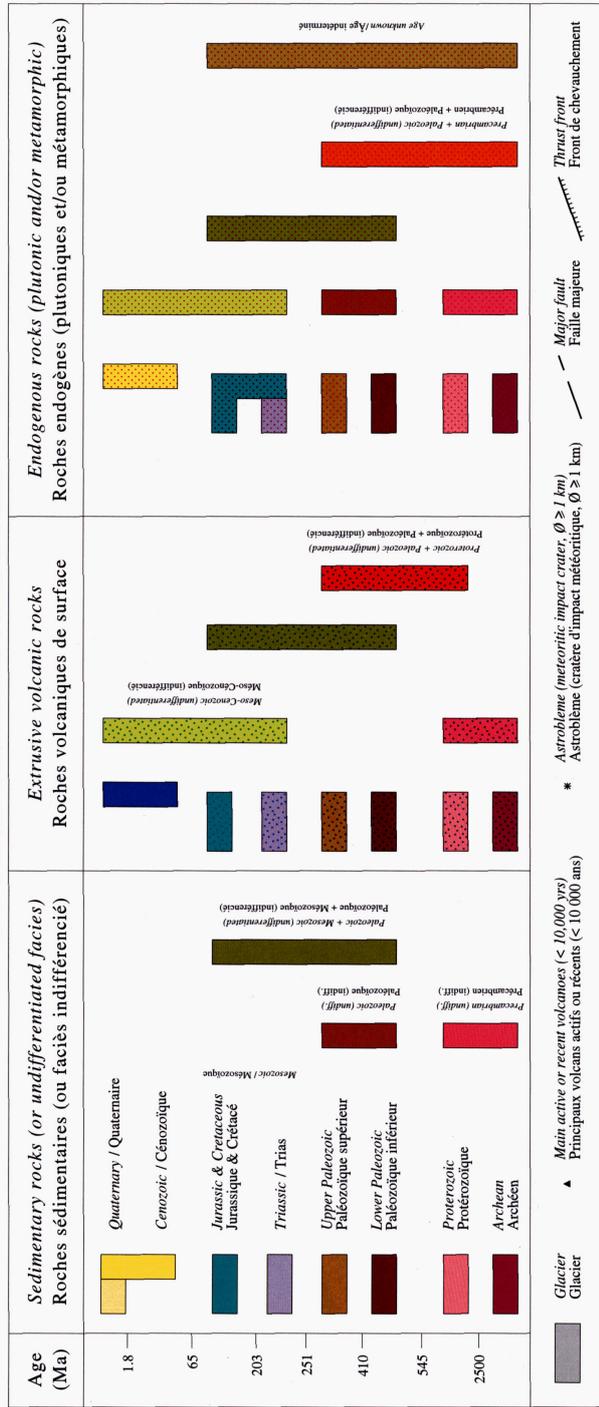


Figure 5 : Extrait de la carte géologique du monde, Sud de la côte Ouest de l'Amérique du Sud.

CONTINENTAL AREAS / ZONES CONTINENTALES



OFFSHORE AREAS / ZONES SOUS-MARINES

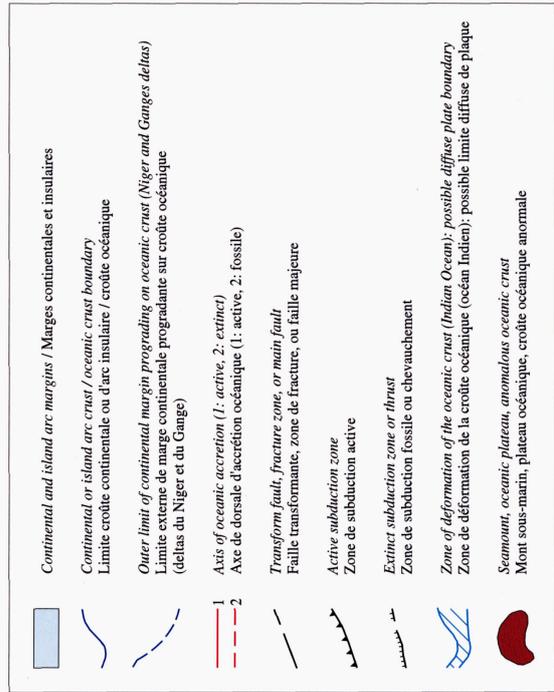
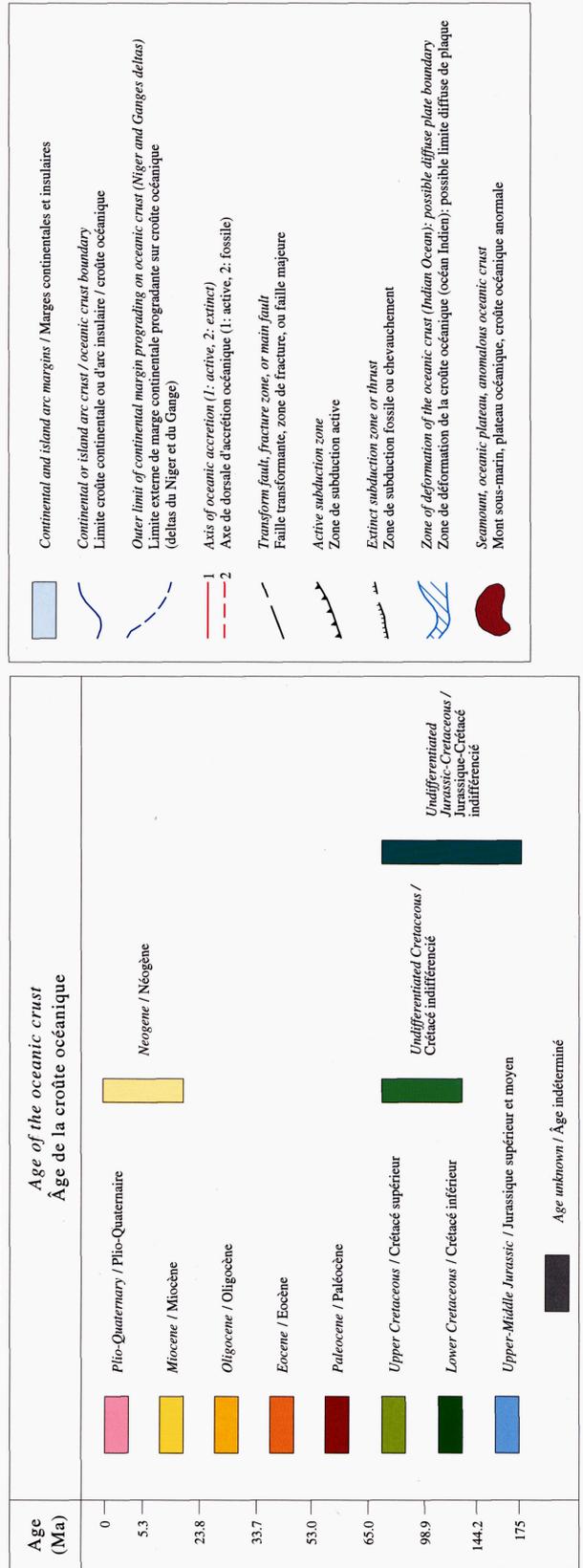


Figure 6 : Extrait de la légende de la carte géologique du monde.

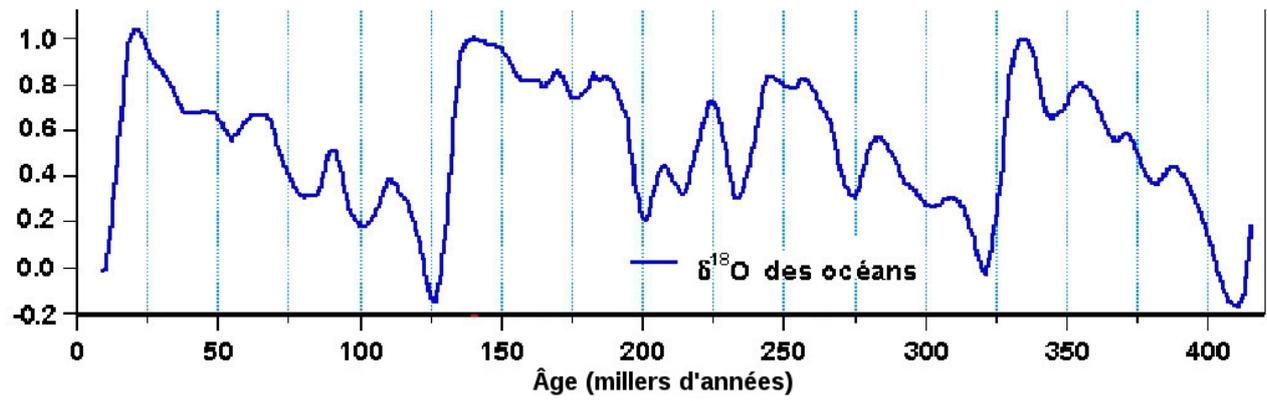


Figure 7 : Variations du $\delta^{18}\text{O}$ moyen de l'eau des océans au cours des temps géologiques.

Fin du sujet