Naissance et vie des océans

Fête de la science

du 11 au 13 octobre 2024.

Christine Auclair, Annie Cornée et Dominique Rossier, membres de la SAGA, avec la collaboration de Lola Johannes, MNHN.

Pour l'édition 2024 de la Fête de la Science, le thème retenu à l'échelle nationale s'intitulait « Océan de savoirs », s'inscrivant ainsi dans le cadre de l'Année de la Mer**,** qui est célébrée, en France, de septembre 2024 à septembre 2025. Naturellement, la SAGA pouvait facilement entrer dans ce thème par le biais de la géologie et a proposé l'atelier « Naissance et vie des océans ». Un thème vaste et ambitieux qui a été décliné en trois grandes parties :

- l'exploration du domaine océanique ;
- la sédimentation océanique ;
- l'ouverture et la fermeture de l'océan.

I. L'exploration du domaine océanique

La nécessité d'étudier les fonds océaniques est apparue clairement dans la deuxième moitié du XIX^{e} siècle. À ce moment, on installe les premiers câbles télégraphiques transatlantiques ; il devient rapidement indispensable de connaître précisément les reliefs sous-marins.

Les premières grandes campagnes de recherche océanique vont alors permettre non seulement de cartographier finement les fonds océaniques (carte bathymétrique) et de déterminer la structure des océans,

mais aussi d'étudier la faune et la flore, de comprendre la circulation des eaux océaniques, d'analyser la température, la salinité et donc la densité des océans, d'analyser les sédiments, etc.

C'est l'expédition à bord du navire britannique, *HMS Challenger*, entre 1872 et 1876, qui a marqué les débuts des grandes campagnes de recherches et de l'océanographie moderne.

Au cours du XX^{e} siècle, et plus encore ces dernières décennies, de grandes expéditions ont été et sont organisées par de nombreux pays ; des centaines de forages ont été réalisés, allant jusqu'à 1 500 m d'épaisseur et par des profondeurs d'eau atteignant 7 000 m.

La France, qui détient le deuxième domaine maritime mondial (après les États-Unis), participe activement à ces recherches. Elle dispose actuellement de quatre navires hauturiers (en plus des engins sous-marins et des navires côtiers) : le *Marion Dufresne II* (figure 1), le *Pourquoi Pas ?* (le quatrième du nom ; rappelons que le premier avait été construit par le commandant Charcot), l'*Atalante* et le *Thalassa*, capables de réaliser des campagnes océanographiques sur tous les océans, hors zones polaires.

Figure 1. Le Marion Dufresne II. Source Wikipédia.

Pour notre atelier, deux spécialistes de géologie marine étaient présentes : Eva Moreno et Lola Johannes, respectivement responsable scientifique et gestionnaire technique de la collection de sédiments et roches océaniques du Muséum. Toutes les deux ont participé à des campagnes océanographiques dans l'océan Indien et aux Antilles, à bord du Marion Dufresne II et du Pourquoi pas ?.

Elles ont présenté l'organisation de ces missions, leur déroulement, la vie à bord du navire, les techniques de prélèvement, le fonctionnement d'un carottier, le travail sur les carottes qui sont remontées, les analyses effectuées à bord, etc. (figure 2).

Figure 2. Lola Johannes commente la carotte devant une classe de terminale. Photo A. Cornée.

Pour montrer tout ce que l'on peut tirer de l'étude d'une carotte, Eva Moreno et Lola Johannes avaient choisi une carotte prélevée lors d'une campagne du Marion Dufresne, entre le bassin de Somalie et le bassin des Mascareignes dans l'Océan Indien, par 3 585 m de profondeur (n° d'inventaire : MHNH-GS-MD90-0927). La carotte entière mesure presque 9 m. Pour que cela soit plus facilement ergonomique, les carottes sont toujours découpées à bord du bateau en section d'1,50 m ou de 1 m. La section présentée dans l'atelier est la 3^{e}, dont le sommet et la base sont compris entre 3 m et 4,50 m.

Elle montre deux parties bien différentes (figure 3) :
- à la base une boue calcaire beige à blanche à coccolithes, discoasters et foraminifères ;
- au-dessus une vase plus sableuse beige, à foraminifères et coccolithes.

Ces deux parties sont séparées par un lit à nodules polymétalliques bien visibles.

Ce qui est intéressant à souligner, c'est que la base correspond à l'Eocène moyen, tandis que la partie supérieure est attribuée au Pliocène supérieur et au Pléistocène inférieur. C'est-à-dire qu'il manque près de 40 millions d'années entre ces deux parties ! Cette lacune peut être expliquée par un non dépôt et/ou par l'érosion due à de forts courants de fond, liés à la naissance de l'océan Austral (Australie qui se détache de l'Antarctique). La présence de nodules polymétalliques au niveau de la lacune indique une période pendant laquelle les taux de sédimentation étaient très faibles, une condition nécessaire pour la formation des nodules (cf. partie II).

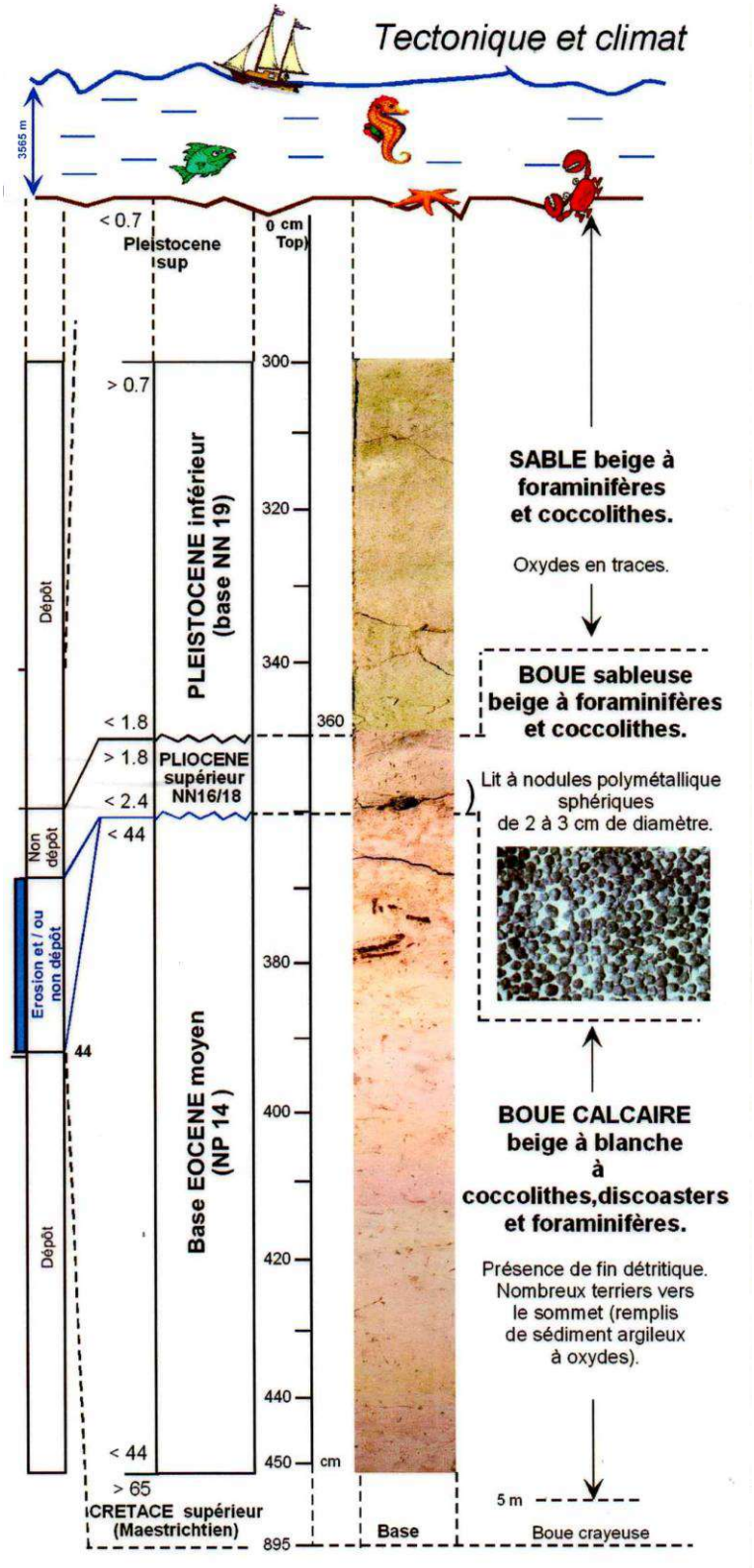


Figure 3. Description détaillée de la carotte GS900927, section III. Document de la collection sédiments et roches océaniques. MNHN.

II. La sédimentation océanique

L'exploration des océans a permis de mieux connaître la topographie des fonds marins, la nature et la répartition des différents types de sédiments, ainsi que leur succession en fonction du temps. Les données tirées de ces recherches peuvent être traduites en cartes et en coupes. Sur un grand poster, nous en avons présenté plusieurs : une carte du relief des fonds marins ; une carte bathymétrique mondiale ; la carte de

l'épaisseur des sédiments, etc. La carte de la répartition des grands types de sédiments (figure 4) montre très nettement que la nature des sédiments varie selon les endroits. Nous avons cherché à expliquer cette répartition particulière.

Les faciès sédimentaires reflètent à la fois la variabilité des apports qui ont permis leur formation et les caractéristiques du milieu océanique où ils se sont déposés (proximité des côtes, morphologie, profondeur, courants, température, salinité, pH, teneur en O_2, concentration en CO_2, etc.).

La présentation des grandes lignes de la sédimentation océanique qui suit est forcément simplificatrice car, en un lieu donné et à un temps donné, la sédimentation est le résultat de la combinaison des plusieurs des facteurs évoqués ci-dessus.

On distingue deux grands types d'apports à la sédimentation océanique : les apports détritiques dus à l'altération des continents et la destruction des sols, et les apports d'origine marine liés à la production biogène dite primaire (organismes marins, plancton, microplancton…).

De la côte jusqu'aux grands fonds, on reconnaît plusieurs grands domaines (figure 5), chacun d'eux étant caractérisé par des sédiments particuliers.

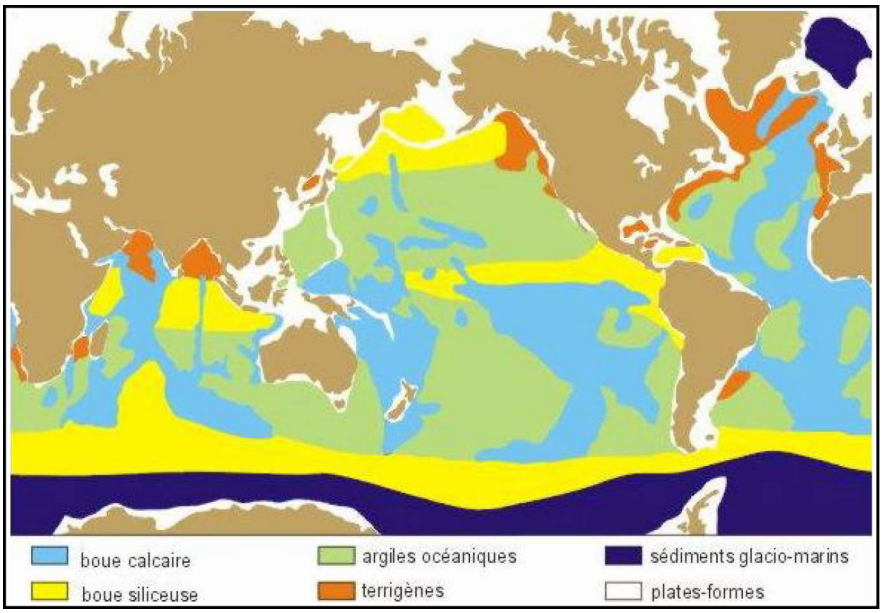


Figure 4. Carte de la répartition globale actuelle des sédiments océaniques.
D'après Boulvain (2021), Éléments de sédimentologie et de pétrologie sédimentaire.

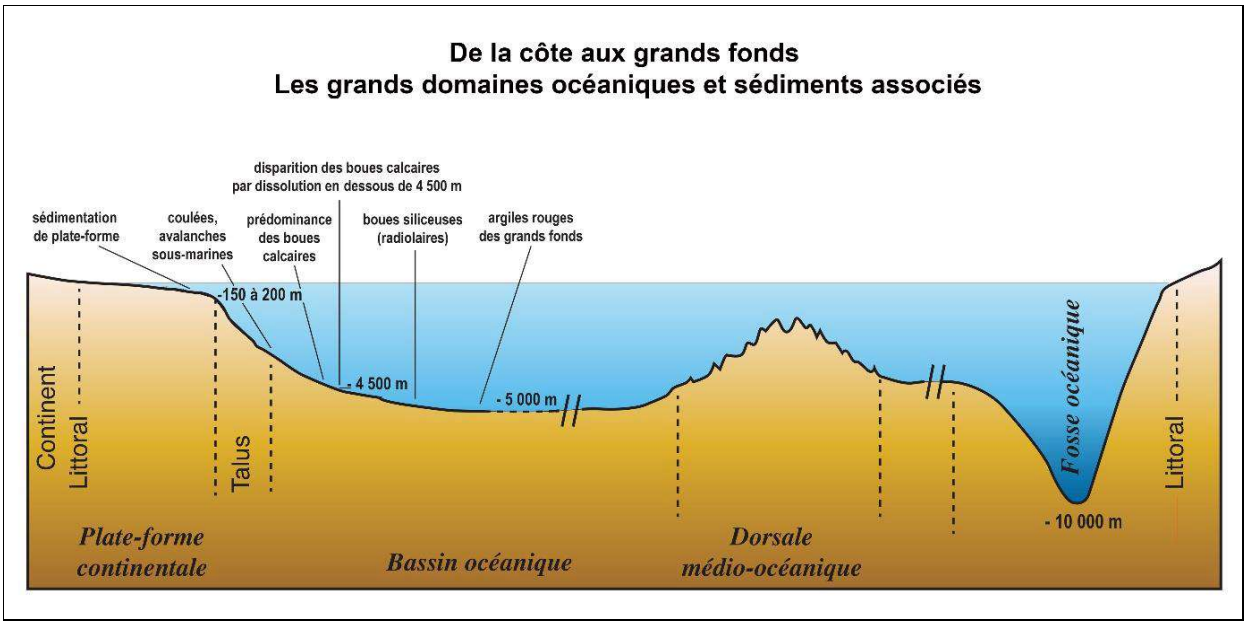


Figure 5. Coupe schématique montrant les principaux domaines océaniques et leur sédimentation.
D'après Pomerol et Renard (Éléments de géologie, 11e édition, Masson, 1997), modifié.

1. La plate-forme continentale
(de 0 à 200 m de profondeur)

La nature de la sédimentation littorale dépend essentiellement des apports détritiques du continent et de la productivité biologique, ces deux facteurs dépendant eux-mêmes de la latitude et du climat.
- Dans les **régions tempérées et froides**, les matériaux détritiques, dus à l'altération des continents et à la destruction des sols et apportés par les fleuves, dominent.

Pour illustrer ce type de dépôt et les roches qui en résultent, quelques exemples de roches détritiques étaient exposés : grès rouge du Permo-Trias ; quartzite du Trias ; argile plastique de l'Yprésien.

- Dans les **régions chaudes de basses latitudes,** les organismes qui fixent le carbonate de calcium sont très abondants. À leur mort, les éléments carbonatés s'accumulent au point de constituer la matière principale du sédiment. Sous ces latitudes, les organismes marins côtiers non seulement prolifèrent, mais ils sont très diversifiés. C'est en effet sur les plates-formes continentales que l'on observe la plus grande biodiversité du domaine marin.

La précipitation biologique de carbonate de calcium est due à :
- des animaux qui fabriquent des coquilles ou tests calcaires qui sont transportés, brisés et accumulés après leur mort, par exemple : mollusques littoraux (gastéropodes, bivalves), oursins, foraminifères benthiques ;
- des animaux qui fixent le calcium dans leur squelette et édifient des constructions carbonatées (bioconstructions) : c'est notamment le cas des coraux ;
- à des microorganismes et organismes planctoniques qui accumulent le carbonate de calcium dans leur test ou leur coquille : exemple des foraminifères planctoniques, des coccolithophoridés (à l'origine de la craie), des ptéropodes (gastéropodes pélagiques). Leur contribution devient prépondérante en haute mer (cf. paragraphe « Le bassin océanique »).

Il existe aussi une précipitation de carbonates de calcium due à des algues et des cyanobactéries (qui forment des constructions calcaires appelées stromatolites). Cet aspect n'a pas été abordé dans l'atelier. La formation de certains calcaires peut aussi être due à une simple précipitation d'origine chimique.

Des exemples de roches carbonatées et de fossiles caractéristiques de la plate-forme carbonatée (figure 6) étaient illustrées par : un calcaire lutétien à gastéropodes et foraminifères (milioles) ; une craie crétacée à nannofossiles (et foraminifères) ; un calcaire récifal messinien ; des coraux du Silurien et du Dévonien ; une plaque à oursins du Burdigalien ; des ammonites d'âges différents, etc.

Figure 6. Exemples de roches et de fossiles du domaine de plate-forme.
Photo J.-L. Fromont.

2. Le talus continental

Le talus borde l'extrémité distale de la plate-forme et la relie au bassin océanique. Cette zone est marquée par une grande instabilité. Elle est le lieu de glissements en masse et de courants de turbidité. Les sédiments dévalent la pente ou les canyons sous-marins qui entaillent le talus et vont s'étaler sur le glacis et jusque dans les plaines abyssales : coulées de débris, cônes sous-marins, séquences turbiditiques.

Nous n'avions pas d'échantillons pour illustrer ce domaine.

3. Le bassin océanique

Loin des côtes, la part due aux microorganismes planctoniques, calcaires et siliceux, devient prédominante dans la sédimentation océanique. Dans ce domaine, les taux de sédimentation sont faibles. Selon les conditions (en particulier la profondeur et l'éloignement des continents), vont se former des vases (on dit aussi boues) de natures différentes.

- Les boues calcaires se déposent sur les fonds au-dessus de la CCD (profondeur de compensation des carbonates), c'est-à-dire la profondeur à partir de laquelle la totalité du carbonate de calcium apporté depuis la surface est dissoute. Cette limite varie d'un océan à l'autre et, dans les océans actuels, elle se situe entre 3 000 m et 5 500 m, avec une moyenne de 4 500 m/5 000 m.

On distingue :

• les boues à foraminifères, abondantes dans l'Atlantique ;

• les boues à coccolites ;

• les boues à ptéropodes, coquilles très fines de mollusques pélagiques, très facilement dissoutes (elles ne déposent pas au-delà de -2 000 m).

Pour illustrer les boues calcaires et les roches qui résultent de leur transformation en roches (diagenèse), nous avons présenté : un modèle de foraminifère planctonique ; un modèle de coccolithophoridée ; une boue calcaire à nannofossiles et foraminifères ; une craie oligocène, provenant du banc des Seychelles et prélevée à 1 050 m de profondeur ; un sable à foraminifères planctoniques du Pléistocène supérieur (3 897 m). Les élèves et les visiteurs ont pu observer ces foraminifères à la loupe binoculaire.

- Les boues siliceuses

Les eaux superficielles des océans sont sous-saturées en silice et la dissolution des tests siliceux y est grande. Elle diminue en profondeur, sous l'effet de la pression et de la baisse des températures. Alors, à grandes profondeurs, au-dessous de la CCD, la sédimentation siliceuse domine.

On distingue :

- les boues à diatomées, surtout abondantes dans les mers froides de haute latitude, riches en éléments nutritifs ;
- les boues à radiolaires bien représentées dans la zone équatoriale des océans Pacifique et Indien, où la divergence des eaux de surface (effet de Coriolis) entraîne une remontée d'eaux plus profondes et plus froides (upwelling) qui sont riches en éléments nutritifs.

Ces boues siliceuses et les roches qui en résultent étaient illustrées par : une boue siliceuse à diatomées pléistocène du plateau de Kerguelen (1 020 m) ; une diatomite marine du Messinien ; un modèle de radiolaire ; une radiolarite du massif du Chenaillet. Une loupe binoculaire permettait d'observer une lame mince de radiolarite d'Oman et un frottis très riche en squelettes de radiolaires.

- Les argiles rouges des grands fonds et les nodules polymétalliques

Ces sédiments rouge brun ont une triple origine :

• terrigène (apports fluviatiles et surtout éoliens, très fins) ;

• néoformée (à partir des fluides de l'hydrothermalisme sous-marin) ;

• cosmique.

Les argiles rouges sont constituées à 85 % de minéraux argileux, néoformés pour l'essentiel : smectites ferrifères, phillipsite, oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse.

C'est surtout dans ce domaine que se forment les nodules polymétalliques.

Les nodules polymétalliques sont constitués par des dépôts d'épaisseur millimétrique à centimétrique d'oxy-hydroxydes (MnO_2, Fe_2O_3, Fe_3O_4, $Fe(OH)_3$...) autour d'un ou plusieurs noyaux ou sur un support rocheux. La précipitation des métaux, en solution dans l'eau de mer, s'effectue sous des conditions oxydantes à l'interface eau-sédiment, selon des processus complexes. Le facteur biologique (productivité, activité bactérienne), la composition de l'eau de mer, les phénomènes de remobilisation diagénétique et le volcanisme sous-marin jouent, entre autres, un rôle important dans la formation de ces dépôts particuliers.

Les probabilités d'occurrence sont maximales pour des profondeurs supérieures à 4 000 m, mais on trouve aussi ces formations à des profondeurs plus faibles, sur certains reliefs océaniques (rides, plateaux...). Les données de l'environnement sédimentaire indiquent que ces dépôts se développent dans des zones à très faibles taux d'accumulation, ou mieux encore, là où il y a absence totale de sédimentation. Ils peuvent ainsi

souligner les lacunes stratigraphiques dans les séries sédimentaires (cf. la carotte présentée en partie II).

Pour illustrer ce domaine très profond, ont été présentés (figure 7) :

- une boue argileuse rouge du Pléistocène, prélevée à 4 815 m dans l'océan Indien central ;
- des nodules, dont un présenté en coupe pour montrer leur structure interne (concentrique et fibro-radiée) (figure 8). Leur noyau peut être une coquille ou une dent de requin, comme c'est le cas sur deux des échantillons exposés. Ces échantillons ont été prélevés à une profondeur de 5 000 m, dans l'océan Indien.

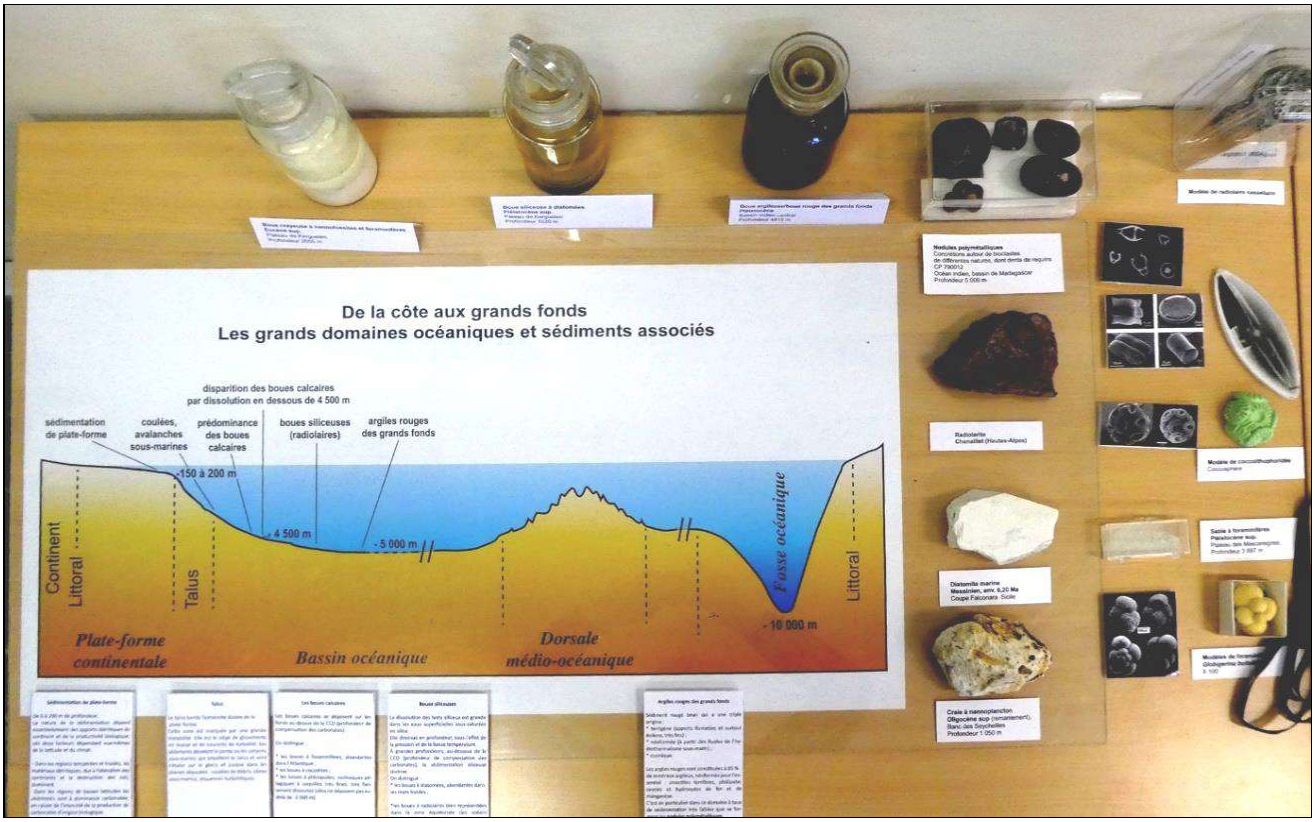


Figure 7. Présentation des boues et des roches du domaine océanique, en regard de la coupe allant de la côte aux grands fonds. Photo J.-L Fromont.

Figure 8. Nodules polymétalliques prélevés à une profondeur de 5 000 m dans l'océan Indien. Deux nodules se sont formés autour de dents de requin. Collection des roches et sédiments marins du MNHN. Photo A. Cornée.

4. Les dorsales, ou rides médio-océaniques

Le domaine océanique est aussi caractérisé par des structures particulières, constituées d'un ensemble de reliefs formant une chaîne de montagne, de part et d'autre d'un rift central : ce sont les dorsales océaniques. Ces chaînes sous-marines, que l'on rencontre dans tous les océans, constituent un relief continu qui s'étend sur près de 60 à 80 000 km de long et sur 1 000 à 3 000 km de large. Leur surface atteint 33 % de la surface du plancher océanique et représente 25 % de la surface du globe terrestre. C'est au niveau de ces dorsales que vont naître les océans.

Leur fonctionnement et leur évolution seront abordés dans la partie III qui suit. C'est aussi là que se forment les fumeurs noirs qui ont fait l'objet de la « création collective » décrite à la fin de l'article.

5. Les fosses océaniques

Ce sont les zones les plus profondes de l'océan, avec par exemple la fosse des Mariannes qui atteint presque 11 000 m de profondeur. Elles sont très étroites et assez inaccessibles (présence de forts courants, fortes profondeurs, difficulté de s'y déplacer, etc.). De ce fait, elles sont encore peu explorées et sont donc mal connues.

III. Ouverture et fermeture de l'océan

La présentation se concentre d'abord sur le grand cycle géologique de la création (ouverture) puis de la disparition (fermeture) d'une croûte océanique[1], accompagnée par la formation d'une chaîne de montagne. Le moteur du cycle est la tectonique des plaques.

La seconde partie est consacrée à une « bonne surprise » : pour observer une croûte océanique, il n'est pas indispensable d'embarquer sur un navire océanographique. En effet, on peut trouver et visiter très simplement dans notre pays des témoins de plusieurs croûtes océaniques. On découvre de multiples reliques de celles-ci dans nos chaînes de montagne, dans les plus anciennes comme dans les plus jeunes. Il est même possible d'observer leurs roches au microscope dans l'atelier de pétrographie présenté par la SAGA.

[1] *Nous rappelons que la croûte océanique, couche supérieure d'une plaque océanique, est toujours solidaire d'une couche inférieure mantellique. Cette dernière est rigide, par opposition à l'asthénosphère plastique. L'ensemble constitue la lithosphère océanique, sensiblement moins épaisse que la lithosphère continentale.*

À l'origine de la naissance d'un océan, une extension de la lithosphère continentale (le rift) apparaît sur un continent, provoquant un fossé d'effondrement entre de grands systèmes de failles. Si l'extension continue, la mer envahit le fossé. Simultanément, le manteau remonte sous la croûte amincie et entre en fusion : c'est la naissance d'un volcanisme sous-marin, puis l'édification d'une dorsale océanique, l'océanisation. En quelques dizaines de millions d'années, d'immenses étendues de croûte océanique se créent, puis se referment avec la collision entre les deux plaques continentales des marges de l'océan. Mais quel est le « moteur » de ces transformations et quelle est l'échelle de temps ?

Pour éviter une certaine lassitude du public devant l'abondance des concepts et des termes employés, et cependant montrer le lien étroit avec les concepts abstraits de la tectonique des plaques, nous illustrons par des blocs-diagrammes. Ils parlent à l'imagination des visiteurs. Les diagrammes, avec leurs textes d'accompagnement, composent le premier panneau exposé, reproduit sur la figure 9.

On peut ensuite aborder les témoins concrets et visuels de croûtes océaniques**,** créées puis disparues ! Oui, ces témoins existent sur notre territoire, et il faut aller les chercher dans les chaînes de montagnes, les orogènes, nés des collisions entre plaques continentales, à l'issue du grand cycle d'ouverture/fermeture des plaques océaniques (figure 10**,** extraite du deuxième panneau exposé).

Le vendredi, « journée des scolaires »

Comme chaque année, il est prévu de recevoir le vendredi des classes de la région parisienne. Les dernières années ont vu défiler dans nos ateliers des élèves d'école élémentaire, souvent des classes de CM1 et CM2, ainsi que des collégiens (de la sixième à la quatrième). Aussi, nous nous préparons à les recevoir à nouveau, en imaginant de transformer les schémas habituels, assez abstraits, en un récit imagé sous forme de bande dessinée avec des planches à projeter (figure 11), avant de faire travailler les élèves sur les microscopes...

Mais, une semaine avant le jour J, surprise. Nous recevons un message du Muséum nous annonçant quatre classes de terminale et une classe de seconde, tout au long de la journée de vendredi ! Faut-il refaire la présentation ? En tous cas, il faut l'étoffer et la mettre au niveau de l'enseignement en première et en terminale. Alors se succèdent des échanges de courriels et de coups de téléphone avec les professeurs de SVT : « *Oui, nos élèves connaissent la tectonique des plaques ; oui, ils savent se servir d'un microscope polarisant…* »

Heureusement, pour répondre à ces jeunes visiteurs au bon niveau, nous avons préparé une présentation des vestiges des croûtes océaniques disparues dans les chaînes de montagne de notre pays. C'est là que les années de voyage, d'exposés et de séminaires de pétrographie de la SAGA vont servir de réserve, pour y puiser les ressources didactiques : panneaux, photos, lames minces avec leurs dossiers…et, bien sûr, échantillons spectaculaires de roches témoins, comme les belles glaucophanites de l'île de Groix, les éclogites de Loire-Atlantique et de Vendée et les gabbros du massif du Chenaillet …

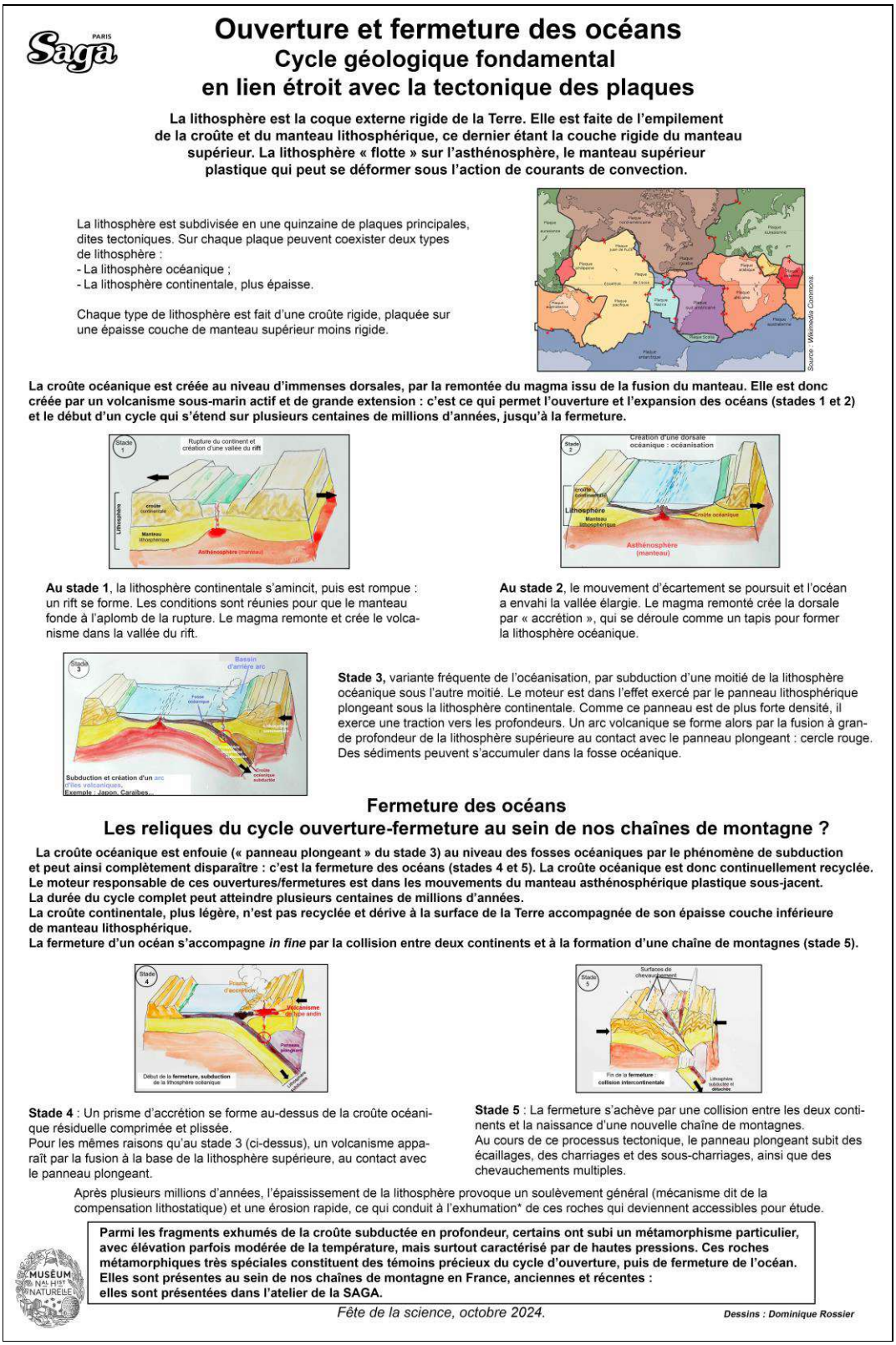


Figure 9. Les différents stades d'ouverture et de fermeture des océans.

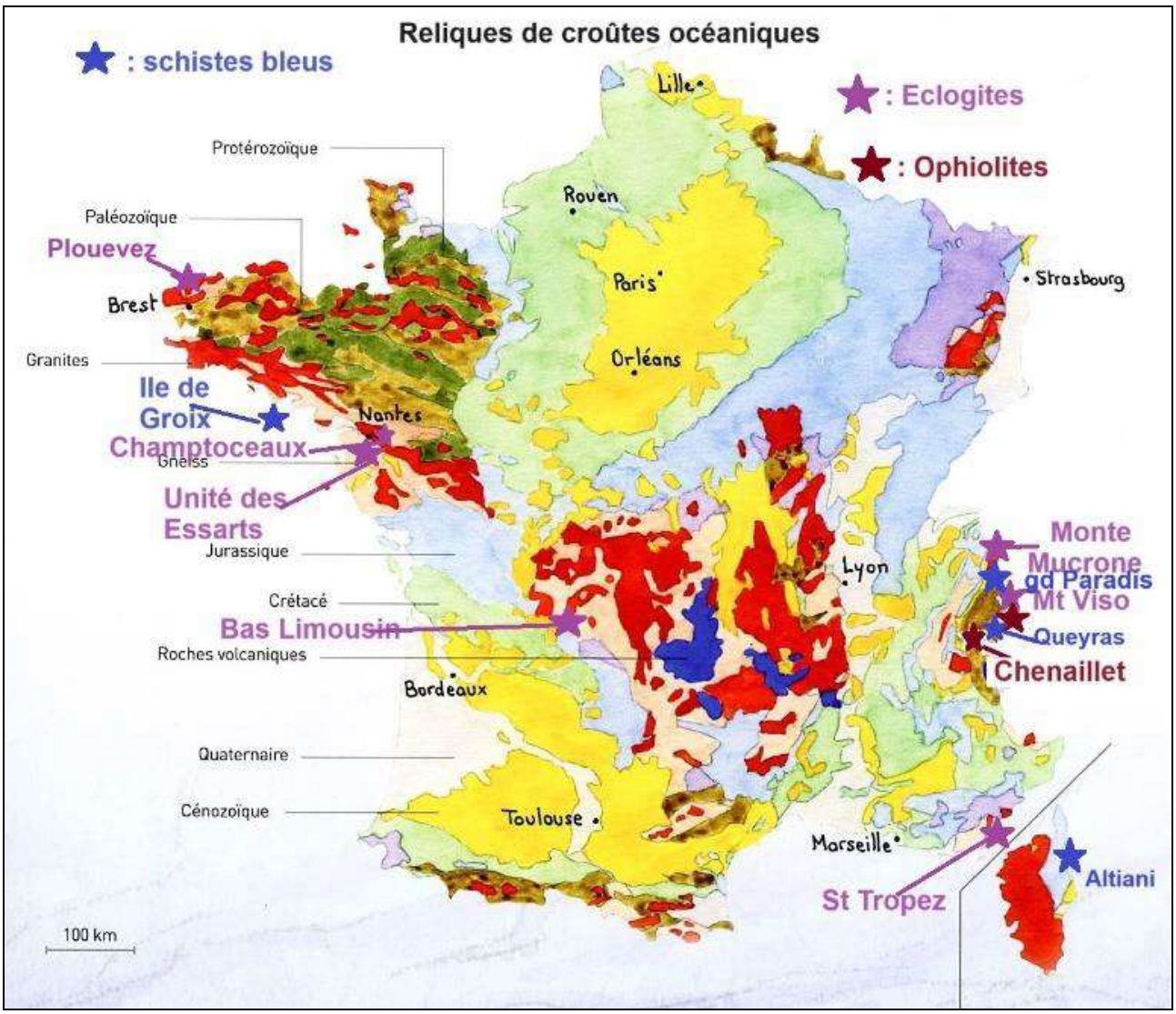
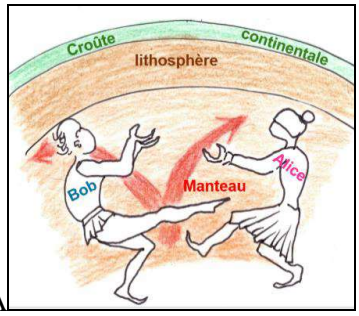
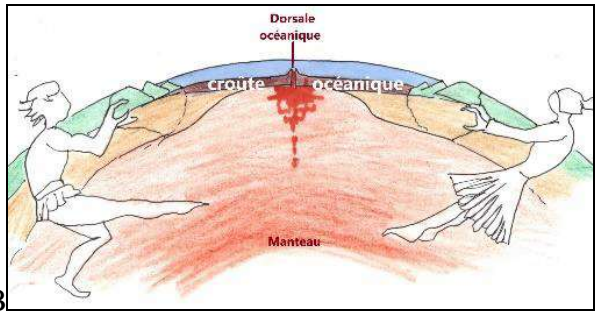
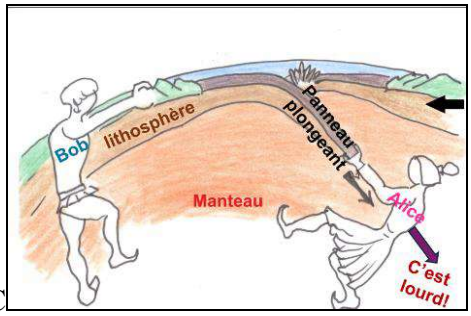


Figure 10. Les reliques de croûtes océaniques en France métropolitaine.
*Ces témoins sont des fragments exhumés de la croûte enfouie en profondeur, lors de la fermeture d'un océan par subduction. Ces fragments ont alors subi un métamorphisme intense, dit de hautes pressions, ce qui leur donne une structure et une composition minérale exceptionnelles : il en est ainsi pour les schistes bleus de l'île de Groix et les éclogites de Loire-Atlantique et de Vendée, ainsi que celles du Bas Limousin. Mais il y a aussi des reliques de fragments de croûte non enfouie, donc encore intacte, et charriée lors de l'édification de la chaîne de montagne, comme dans la chaîne des Alpes. Ce sont des ophiolites, avec laves en coussins (*pillow lavas*), serpentinites et gabbros (exemple : le Chenaillet).*

A 

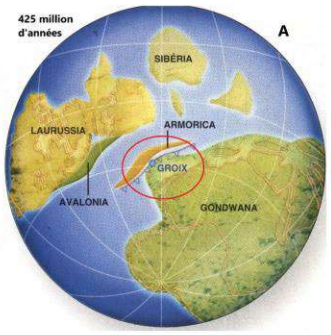
B 

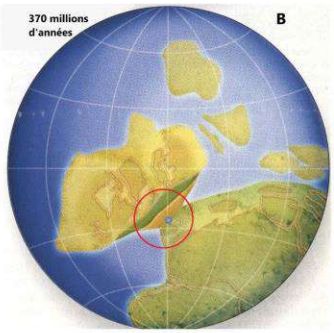
C 

Figures 11A, 11B et 11C. Extraits de la bande dessinée.
Bob et Alice, les diablotins moteurs du manteau et de la lithosphère.
***A** : mouvements de convection, moteurs du manteau agissant sur la lithosphère.*
***B** : les diablotins étirent la plaque continentale et une dorsale océanique se crée.*
***C** : la gravité est un moteur puissant de fermeture d'une plaque océanique.*
Dessins : D. Rossier.

Chaque chapitre est illustré par des panneaux dont nous donnons trois exemples. Tout d'abord, avec les figures 12 et 13, un océan disparu et avec lui sa croûte océanique, engloutis lors de la formation de la grande chaîne varisque (ou hercynienne), puis, avec les figures 14, qui présentent la conservation opportune du fragment de plaque océanique d'un jeune océan lors de sa fermeture et de la formation des Alpes.

Les schistes bleus de l'île de Groix, témoins d'un océan disparu





Suivons « Groix » dans son histoire depuis 425 Ma (Silurien), jusqu'à la création de la **chaîne hercynienne** (300 Ma).

Île de Groix, au large de Lorient

Planisphères et cliché tirés de : *Groix : une île fossile*. Ballèvre *et al.*. Pour la science. N° 305.

- Au départ, un petit océan (bande étroite) sépare une microplaque **Armorica** (Bretagne, Galicie) du supercontinent **Gondwana**. À ces dates, Groix est un fragment de la croûte océanique : planisphère **A**.
- Puis au Dévonien, il y a 370 millions d'années, ce petit océan commence à se refermer si bien que la microplaque plonge sous la microplaque Armorica : planisphère **B**. C'est la **subduction**.
- Enfin, à partir de 340 millions d'années, la microplaque armoricaine entre en collision avec le continent Gondwana : c'est la naissance de la grande chaîne hercynienne. À la faveur de cette collision, un fragment de la croûte subductée est exhumée : Groix en fait partie !

  Le panneau plongeant, gorgé d'eau, subit un métamorphisme de hautes pressions, et de température modérée : schéma de la **figure 1**.

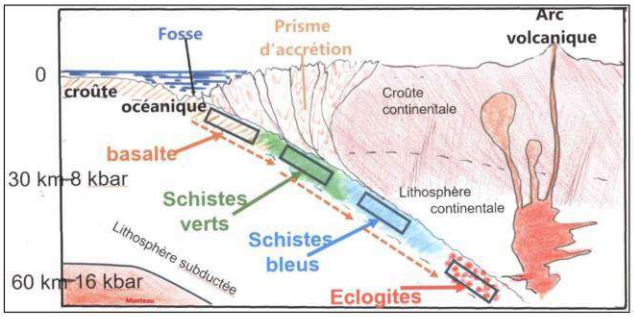


Figure 1 : la lithosphère océanique, plus lourde que la lithosphère continentale, est entraînée sous elle à grandes profondeurs lors de la fermeture : c'est la **subduction**. Les roches de la croûte océanique subissent de fortes pressions, accompagnées d'une augmentation de température plus modeste. Les minéraux sont transformés en plusieurs étapes, les « faciès », jusqu'à l'apparition du faciès des éclogites dans lequel ils se déshydratent. La profondeur atteinte pour l'île de Groix est à la limite entre faciès des schistes bleus et celui des éclogites (**figure 3**). *Dessin D. Rossier, SAGA*

Le basalte de la croûte océanique se transforme d'abord en schiste vert puis, à partir d'une profondeur d'environ 40 km, un nouveau minéral apparaît, souvent associé au grenat : **le glaucophane…C'est lui qui donne la teinte bleue à violacée aux schistes bleus. Figure 2**.

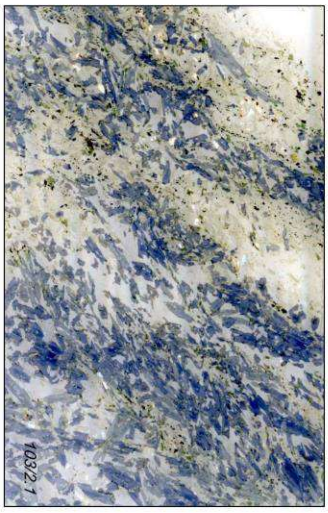


Figure 2. Glaucophanite.
Échelle 2,5 cm à la base. *Cliché D.Rossier*

Figure 3. Schiste bleu à glaucophane et grenats, avec début d'apparition du faciès éclogitique, marqué par l'omphacite verte.
Cliché D. Rossier

Figure 12. Schistes bleus de l'île de Groix. Une brève histoire de la « microplaque » Armorica sous laquelle disparaît la croûte océanique dont est issue l'île de Groix. Mais jusqu'à quelle profondeur et quelle température ? L'examen des magnifiques glaucophanites de l'île donne la clé de ce métamorphisme des extrêmes.

Les éclogites de Vendée

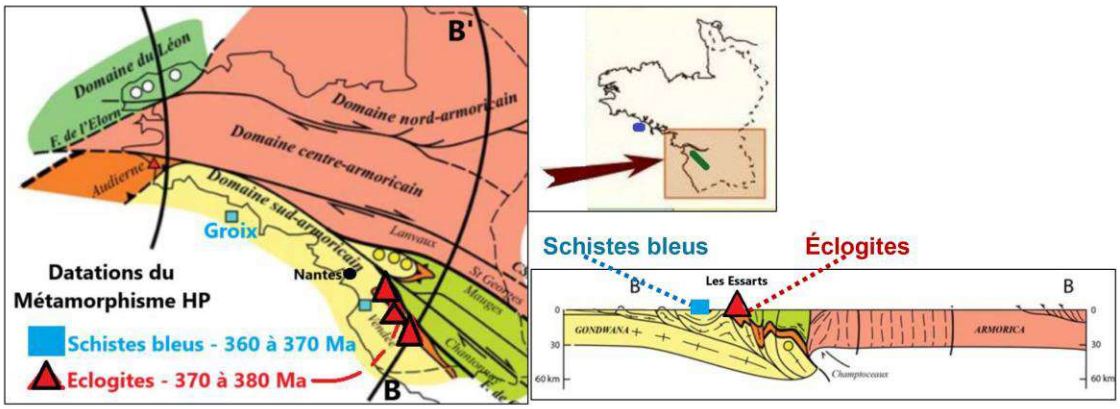
Unité des Essarts,

La Compointrie et carrière de la Gerbaudière

- Au Dévonien, il y a 370 millions d'années, le petit océan entre la microplaque **Armorica** et **Gondwana** commence à se refermer et la plaque océanique plonge sous **Armorica**. C'est la **subduction**.

- À partir de 340 millions d'années, la microplaque **Armorica** entre en collision avec **Gondwana** : c'est la naissance de la **chaîne hercynienne**. À la faveur de cette collision, un fragment de la croûte est subductée puis exhumée : l'**unité des Essarts** en fait partie !
  Le panneau plongeant, gorgé d'eau, subit un métamorphisme de hautes pressions. Le basalte de la croûte océanique se transforme d'abord en schiste vert puis, à partir d'une profondeur d'environ 60 km, un nouveau minéral apparaît, l'**omphacite**, associé au **grenat** dans les **éclogites**. **Figures 1** et **2**.

Figure 1. **Éclogite** de la Compointrie : **grenats** et **omphacite**, cyanite, quartz.
Échelle : 4 cm à la base *Cliché D. Rossier*



L'unité de **Haute Pression** des Essarts apparaît constituée de fragments d'une lithosphère océanique, étirés et boudinés au sein d'une ancienne croûte continentale très déformée (gneiss encaissants).

Cassure fraîche. Échelle : 1,3 cm

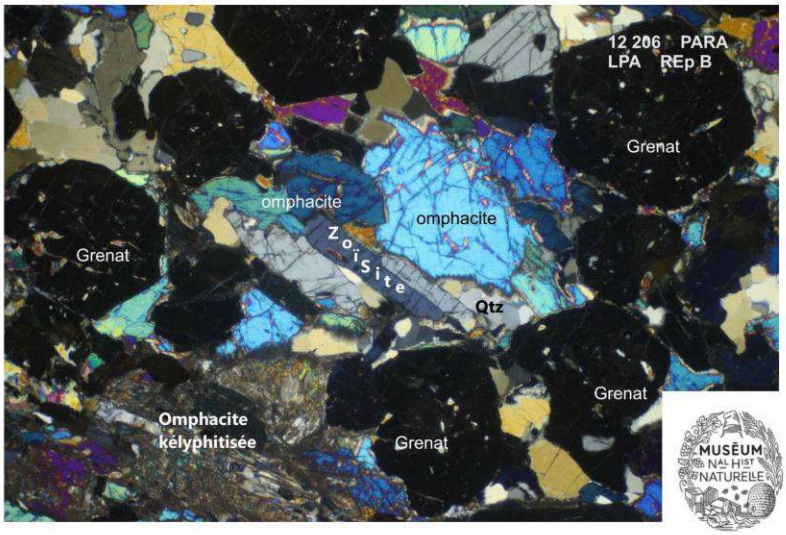
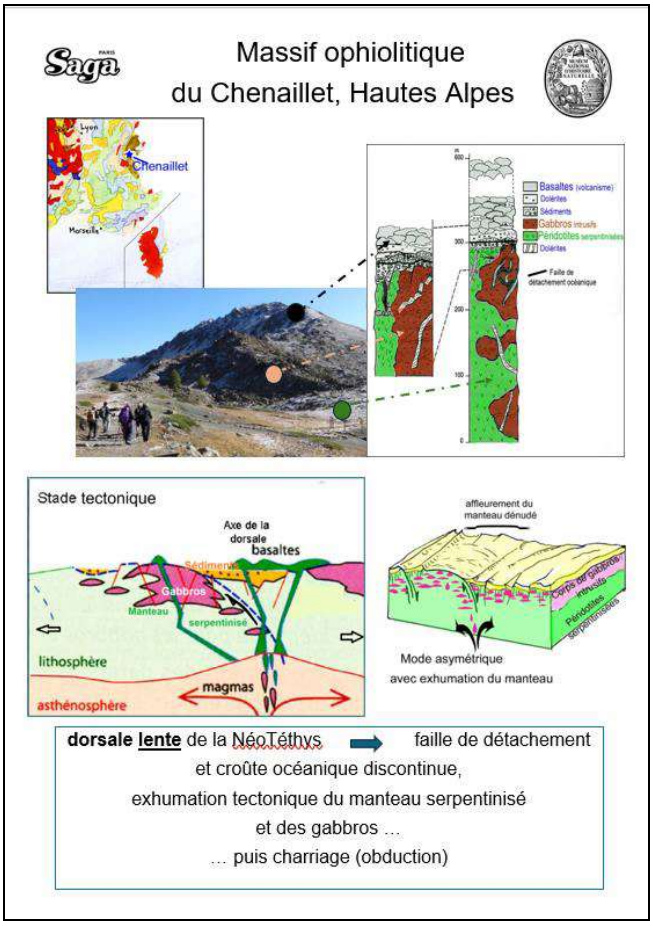


Figure 2. Éclogite de la Gerbaudière : **grenats** et **omphacite**, zoïsite, quartz.
Échelle : 5 mm à la base

Clichés D. Rossier

Figure 13. Les éclogites de Loire-Atlantique et de Vendée. Ce sont les « sœurs jumelles » des glaucophanites… Le même métamorphisme produit là encore de superbes minéraux, grenat et omphacite, signatures des conditions de pression et de température atteintes lors de la subduction.



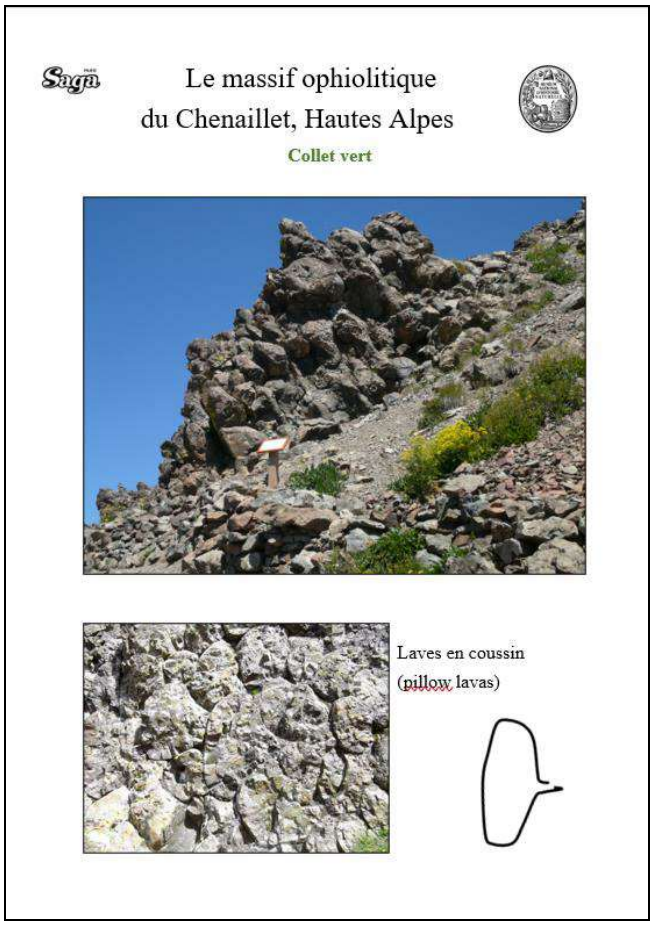


Figure 14. Les ophiolites du massif du Chenaillet (Hautes-Alpes). Une histoire d'obduction et de faille de détachement, et la conservation d'un site extraordinaire : la paroi de laves en coussins du Collet Vert.

Les élèves, puis le grand public tout au long de ces trois jours, ont pu manipuler les échantillons de roches (figures 15 et 16). Et aussi observer les magnifiques formes et teintes des glaucophanites et des éclogites au microscope polarisant (figures 17 et 18).

Figure 15. Schiste bleu, glaucophanite à grenats de l'île de Groix. Les filets plissés d'amphibole de teinte bleue intense (glaucophane) sont interrompus par un essaim de gros grenats pourpres. Échelle : 8 cm à la base.

Figure 16. Éclogites de l'unité des Essarts (Loire-Atlantique). Dans cette éclogite, les grenats atteignent une taille centimétrique, et sont pris dans une matrice où l'omphacite d'origine a été transformée en amphiboles, lors de l'exhumation de la roche et de son retour à des conditions de température et de pression normales.

Figure 17. Guidés par Roland Mahérault, des élèves de terminale observent des lames minces de roches métamorphiques (éclogites et glaucophanites) au microscope polarisant. Photo J.-L. Fromont.

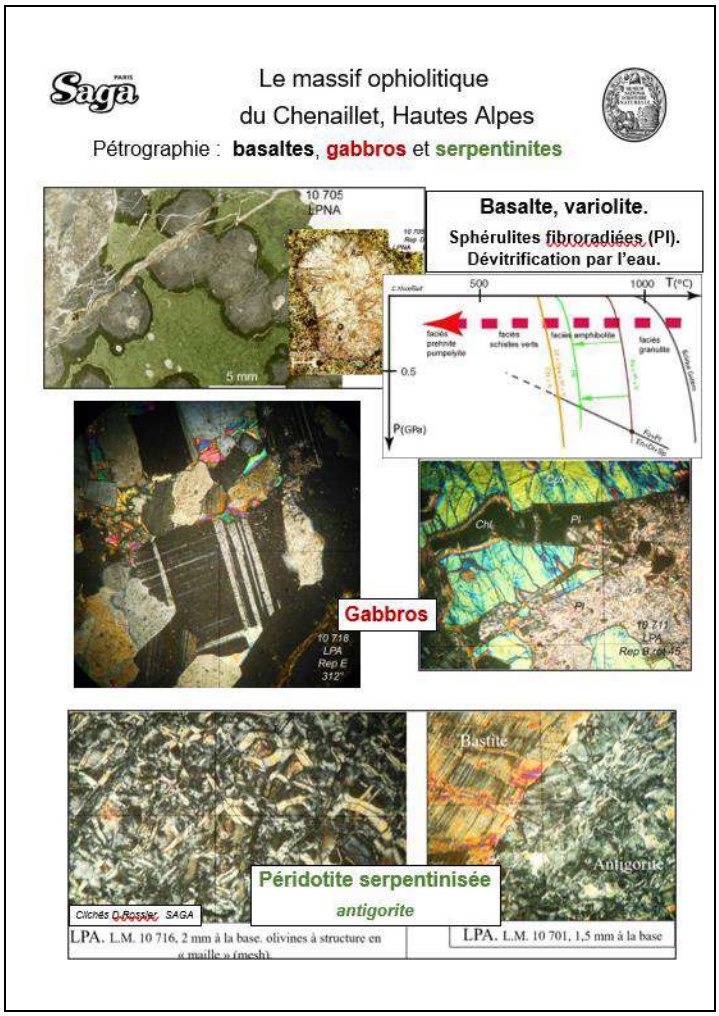


Figure 18. L'examen en lames minces des gabbros et des serpentinites des ophiolites du Chenaillet permet de remonter à l'histoire de la formation de la croûte océanique au voisinage d'une dorsale océanique.

IV. Une création collective : un fumeur noir et la faune associée

L'atelier démarre devant une carte géographique où les enfants sont amenés à comprendre comment les fumeurs noirs se forment au fond de l'océan. Nous leur montrons la dorsale médio-atlantique, où les plaques tectoniques, comme la plaque nord-américaine et la plaque eurasienne, s'écartent, créant des fissures. L'eau de mer pénètre dans ces fissures et chauffe au contact des roches situées en profondeur. Ensuite, l'eau chaude remonte à la surface et rencontre l'eau froide de l'océan, formant des cheminées appelées fumeurs noirs. Nous expliquons que ces fumeurs libèrent des minéraux et des gaz des profondeurs, créant un habitat unique pour des organismes comme les vers tubicoles, qui y vivent en utilisant l'énergie provenant de ces sources sous-marines.

Figure 19. Une vie riche et diversifiée se développe autour des fumeurs noirs.

Ensuite, les enfants (et les plus grands) vont reconstituer cette faune, soit en pâte à modeler, soit par des origamis (figures 20 et 21).

Figure 20. L'atelier enfants créé et animé par Christine Auclair et Coline Madry. Photo A. Cornée.

Ils vont donner libre-cours à leur créativité et créer collaborativement et artistiquement tout un espace peuplé de vers, crabes, mollusques aux formes et aux couleurs diverses (figure 21).

A. *Tout est prêt !*

B. *À la fin du 1er jour.*

C. *L'œuvre finale.*
Figure 21. Reconstitution d'un fumeur noir et de la riche faune associée. Photos A. Cornée.

Bilan

Comme les deux années précédentes, nous avions la chance d'être installés dans le grand amphithéâtre d'entomologie. Cela nous a permis de proposer trois animations en parallèle (figure 22), plus l'atelier enfants qui n'a pas désempli.

Le vendredi, de 10 h à 17 h, l'atelier de la SAGA a accueilli cinq groupes (classes de terminale et de seconde), soit 75 élèves qui venaient de Paris, Sartrouville et Vincennes.

Samedi et dimanche, nous avons reçu près de 200 visiteurs qui étaient très intéressés et ont posé beaucoup de questions.

Figure 22. Journée des scolaires : chaque classe était subdivisée en trois sous-groupes auxquels ont été présentées successivement la partie ouverture et fermeture de l'océan (par ***D. Rossier****), la partie exploration des océans (par* ***E. Moreno et L. Johannes****) et la partie sédimentation océanique (par* ***D. Pérès****). Photo A. Cornée.*

Remerciements

Pour l'organisation de la Fête de la Science au Muséum : Anne Villoutreix et Christine Russello.

Pour le prêt d'échantillons :
Caroline Noyes et Louis Bouchet, collections de géologie générale du Muséum ; Eva Moreno et Lola Johannes, collection sédiments et roches océaniques du Muséum ; Jean-Marie Rouchy, collection de recherche, géologie ; Patrick De Wever nous a fourni un modèle de radiolaire.

Pour la préparation et l'animation de l'atelier :
Christine Auclair, Nicole Chandon, Annie Cornée, Patrick Dherbecourt, Jean-Louis Fromont, Yves Grimault, Lola Johannes, Jacky Juchet, Coline Madry, Roland Mahérault, Eva Moreno, Dimitri Pérès, Danielle Piaud, Dominique Rossier et Richard Tremblier.

Sources

Pour la préparation de cet atelier, de très nombreux documents, ouvrages et sites Internet ont été consultés. Les plus importants sont référencés ci-dessous.
Renard M., Lagabrielle Y., Martin E., de Rafélis M., avec la collaboration de S. Leroy et N. Coltice, 2021. Éléments de Géologie, 17e édition. Dunod, 1134 p.
Beauchamp J. Cours de sédimentologie. *Mise à jour 2005.* https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours-sed/sed-0.htm.
Bourque P.-A. Planète Terre. http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html. *Dernière mise à jour 2010.*
CNRS Sagascience. Océans. Que reste-t-il à découvrir ? https://lejournal.cnrs.fr/infographies/oceans-que-reste-t-il-a-decouvrir.
Webb P. Introduction to Oceanography. Ouvrage en ligne, *Last update : August, 2023*. https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/.

****

Index articles parus en 2024

Janvier 2024

Brève paléontologie : une nouvelle espèce de langoustine crétacée préservée avec ses œufs.
Alain Guillon. Séismes en Afghanistan en octobre 2023.
Les 101 premiers géosites mondiaux de l'IUSG.
Luc Bonnard. La SAGA à Luc-sur-Mer.
Ophélie Weinert. L'odyssée de Jean-Pierre Alibert. Le cas du trophée du Muséum national d'Histoire naturelle.

Mars 2024

Jacqueline Macé. Les grès gravés découverts récemment en forêt de Fontainebleau.
Dominique Rossier, Bruno Beyaert et Yves Grimault. Effondrement et reconstruction du strato-volcan du Cantal. *Seconde partie* : la cicatrice fossile de l'effondrement, la Roche Noire.
Brève paléontologie : un gisement fossilifère à préservation exceptionnelle découvert dans le sud de la France.

Mai 2024

Richard Tremblier et Nicole Préaux. Une météorite « anticonformiste » : levons le voile sur les aubrites.
Michel Gastou. Eaux minérales et thermominérales.
Christine Canape. Esquisse géologique de l'île de Pâques.
Dominique Rossier et Roland Mahérault. Un volcanisme récent dans le massif du Cézallier : lecture de paysage et drone. 1re partie : volcanisme du puy de Mazoires et vallée des Rentières.
André Souesme. L'histoire foisonnante du nom des minéraux.
Catherine Berthoux. Et la peinture fut.
Dimitri Pérès. Canjuers, un site paléontologique français, fouillé hier et aujourd'hui par la SAGA.
Jean-Louis Fromont. Le gigantopithèque d'Asie. Le retour ! Merci à la pharmacopée chinoise et ses superstitions.
Olivier Madec. Qu'en est-il de l'inscription au patrimoine mondial de l'UNESCO des sites mégalithiques de Carnac et des rives du Morbihan ?
Jean-Christophe Genet. Et après nous ? Que faire de nos collections ? L'exemple de la collection J.-P. Malfay.

Juillet 2024

Jacqueline Macé-Bordy. Le bois fossile de Villejust (Essonne) exposé au Jardin des Plantes, à Paris.
François Audubert et Denise Géliot. Des rhinocéros en Essonne : Itteville, un géosite du Stampien supérieur méconnu.
Régine Morizot-Koutlidis. La Commission de paléontologie en exploration dans la région de Caen.

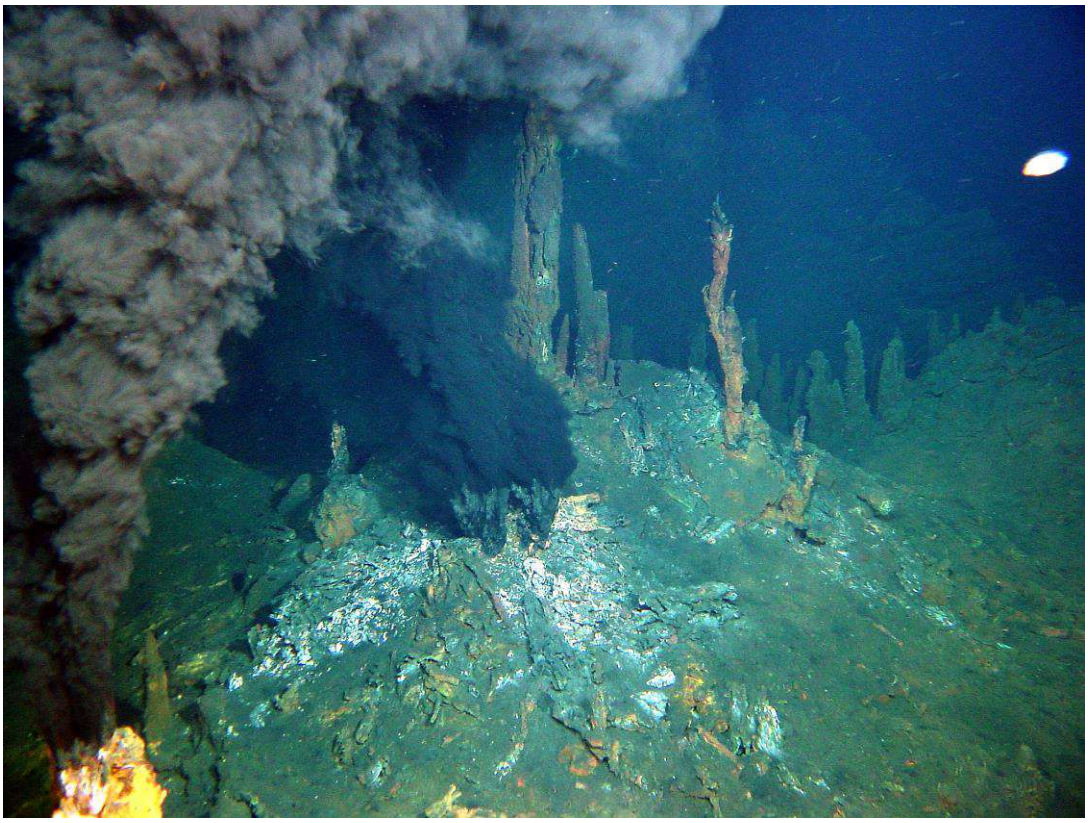
Septembre 2024

Brève paléontologie : la découverte d'un « Pompéi » marin datant de 515 millions d'années au Maroc.
Daniel Levert. Les mines du Laurion, foyer névralgique de la démocratie occidentale.
Jean-Pierre Auzenda. Les gisements de Melka Kunture (Éthiopie).

Novembre 2024

Brève paléontologie : la collection d'Orbigny classée dans les onze premières géo-collections de l'IUGS.
Brève Quaternaire : la découverte d'un bras perdu du Nil éclaire la construction des pyramides d'Égypte.
Régine Morizot-Koutlidis. Entre Yonne et Cure : deux spots géologiques à redécouvrir.
Été 2024 : découverte d'une nouvelle espèce de dinosaure à Angeac.
André Souesme. L'évolution minérale.

Naissance et vie des océans



Cheminées hydrothermales, également appelées « fumeurs noirs »,
photo prise par le robot sous-marin ROV Victor 6000.
Site hydrothermal Rainbow, en Atlantique nord (au nord-ouest des Canaries).
© Ifremer (2008). Cheminées hydrothermales du site Rainbow. Ifremer.
https://image.ifremer.fr/data/00568/67987/.

Société Amicale des Géologues Amateurs
Muséum national d'Histoire naturelle
61 rue Buffon. 75005 Paris
Adresse postale : 43 rue Buffon. CP 48. 75005 Paris