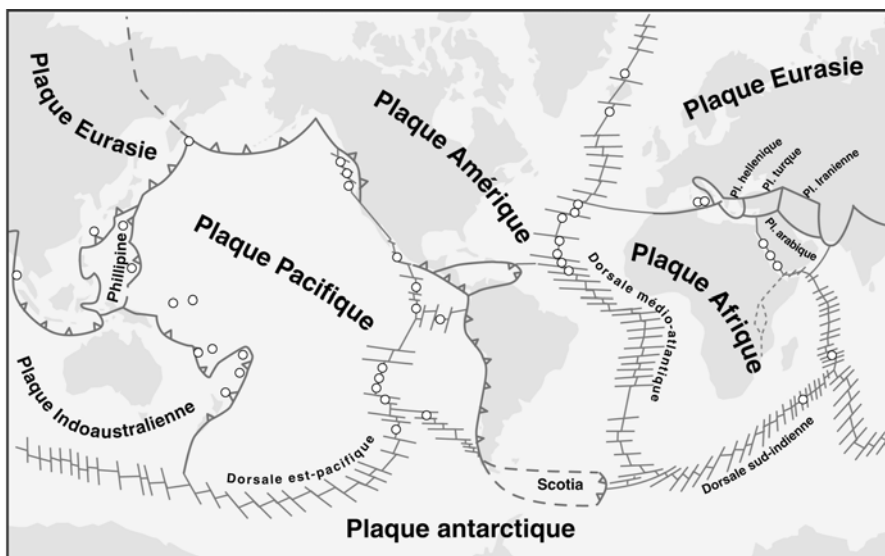


Texte de la 204^e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 21 juillet 2000.

Les grands fonds océaniques et les gisements de métaux de demain par Thierry Juteau

La dorsale océanique mondiale

Les fonds océaniques se renouvellent de manière continue par émission de magma basaltique au niveau de la Dorsale océanique mondiale. Dans le cadre de la théorie de la Tectonique des plaques, c'est ce que l'on appelle « l'accrétion continue des fonds océaniques ». La Dorsale océanique est la plus grande chaîne volcanique active de la Terre (**Figure 1**). C'est aussi, et de loin, la source principale de roches magmatiques volcaniques et plutoniques à la surface du globe. Cette immense chaîne volcanique est entièrement sous-marine (sauf en de rares endroits où la conjonction avec un « point chaud » fait émerger la Dorsale, comme en Islande). Elle s'étend sur plus de 60 000 km de long à travers les océans du globe, et ses reliefs, larges de 1 000 à 3 000 km, occupent environ le tiers de la surface totale des fonds océaniques. La crête de la Dorsale culmine en moyenne à $-2\,500\text{m}$ et s'élève donc de 2,5 à 3 km au-dessus des grandes plaines abyssales qui la séparent des talus continentaux.



Enfin, il faut ajouter à cela les zones d'accrétion secondaires des bassins arrière-arc (Bassin Nord-fidjien, Bassin de Lau, Bassin de Woodlark, Bassin de Manus dans le Pacifique sud-ouest ; rift de Caïman dans la mer des Caraïbes, etc.). Dans la région du Sud-ouest Pacifique, des travaux cartographiques détaillés ont révélé l'existence, dans plusieurs de ces bassins, de segments de dorsale océanique pouvant se relayer sur parfois plus de mille km (Bassin Nord-fidjien par exemple).

Le volcanisme sous-marin des dorsales

Sous la couche sédimentaire qui tapisse le fond des océans actuels, le socle dur constituant le sommet de la croûte océanique est partout formé de coulées basaltiques. Des centaines de forages des programmes internationaux DSDP (*Deep Sea Drilling Project*), puis ODP (*Ocean Drilling Program*), dans tous les océans du monde, l'ont amplement prouvé. Cette couche basaltique épaisse de plusieurs centaines de mètres en moyenne a été créée et

s'est mise en place tout le long de la Dorsale océanique mondiale. Elle occupe actuellement environ 360 millions de km², une surface bien supérieure à celle des continents.

Ce volcanisme de grande profondeur reste encore mal connu. Rappelons qu'aucune éruption profonde n'a pu être observée jusqu'à présent, même si des coulées fluides vieilles de quelques jours à peine, ont pu être observées par submersible sur la Dorsale Est-pacifique. La zone volcanique active de la Dorsale forme une bande étroite, souvent de moins d'un kilomètre de large, à l'axe même de la dorsale. Cette zone active se caractérise par l'aspect noir et brillant du verre basaltique, par le grand nombre de fragiles protubérances vitreuses à la surface des laves, par l'absence complète de sédiment et de faune. À grande profondeur, le basalte émis à 1 200°C subit en surface une trempe thermique extrêmement brutale en débouchant dans l'eau de mer glaciale à 2°C. L'effet de cette trempe thermique sur la morphologie des coulées dépend principalement du *volume* de lave émis :

- L'émission de volumes modérés de lave entraîne invariablement la formation de laves en coussins, ou *pillow-lavas*, constituant des corps effusifs à morphologie remarquablement variée, le plus souvent tubulaire, mais jamais planaire. La lave basaltique se vitrifie instantanément en surface, et cette couche de verre épaisse de 1 à 2 cm empêche la coulée de s'étaler en surface, l'obligeant à s'écouler en doigts de gants. Elle forme des tubes qui se chevauchent les uns les autres, et avancent vers le bas de la pente par éclatements successifs de la croûte vitreuse frontale. La pression interne de la lave en fusion dans les tubes fait d'ailleurs craquer la croûte vitreuse en de nombreux endroits, ce qui entraîne la formation de nombreuses protubérances vitreuses et petites coulées secondaires.

- L'émission de volumes très importants mène à la formation de corps effusifs à morphologie essentiellement planaire : lacs de lave, coulées fluides et coulées massives. Les émissions fissurales très volumineuses produisent des lacs de lave. La trempe thermique a peu de prise sur un très gros volume de lave issu d'une large fissure. Une telle masse incandescente de lave ira envoyer tous les creux topographiques situés sur son chemin, formant un véritable lac de lave temporaire dont la surface, plane sur plusieurs km², tranche sur le moutonnement des *pillow-lavas* encaissants.

À l'échelle d'un segment de dorsale, le rapport entre les surfaces couvertes respectivement par les lacs de lave (y compris les coulées fluides) et par les *pillow-lavas* se corrèle de manière quasiment linéaire avec le taux d'accrétion : il est maximum et proche de 100 % sur les segments les plus rapides de la Dorsale Est-pacifique, et minimum et inférieur à 10 % sur les dorsales les plus lentes, par exemple sur la dorsale médio-Atlantique, ou encore dans le rift axial de la Mer Rouge, où le rapport coulées fluides/*pillows* avoisine zéro.

La tectonique à l'axe et le cycle volcano-tectonique

À peine créée à l'axe, la jeune croûte océanique en cours de refroidissement est immédiatement soumise aux forces de distension de la séparation des plaques et transportée latéralement loin de l'axe. D'innombrables plans de fracture se développent dans la croûte fragile, qui la découpent en une série de blocs bordés de failles.

Les fissures ouvertes sont les signes superficiels les plus communs de la rupture tectonique de la zone axiale. Par définition, elles ne montrent pas de déplacement vertical des deux lèvres. Les escarpements de failles normales sub-verticales, parallèles à l'axe de la Dorsale, représentent l'autre type de structure tectonique extrêmement commun dans la zone axiale. Leur rejet vertical varie de quelques dizaines de cm à plusieurs dizaines de mètres. De part et d'autre de la zone volcanique axiale, ces failles découpent la jeune croûte océanique en une série de blocs surélevés (*horsts*) et de blocs effondrés (*grabens*), parallèles à l'axe. Des failles de détachement à faible pendage ont été décrites, en particulier sur les dorsales « lentes » comme la Dorsale médio-Atlantique.

Les études récentes ont montré que chaque segment de dorsale évolue dans le temps suivant un cycle volcano-tectonique fondamental, au cours duquel les processus magmatiques, tectoniques et hydrothermaux s'influencent réciproquement. La nécessité d'un cycle volcano-tectonique résulte du fait que les éruptions volcaniques des dorsales, comme celles du volcanisme aérien, sont intermittentes, alors que le processus de l'accrétion, lui, est continu. Chaque éruption volcanique est précédée et suivie d'une phase de quiescence plus ou moins longue. On peut distinguer ainsi des stades d'accrétion magmatique, relativement brefs dans le temps, correspondant à des éruptions volcaniques en surface, et des stades d'accrétion tectonique, correspondant à des phases d'arrêt du volcanisme, au cours desquelles la jeune croûte océanique axiale est soumise à des contraintes d'extension purement tectoniques.

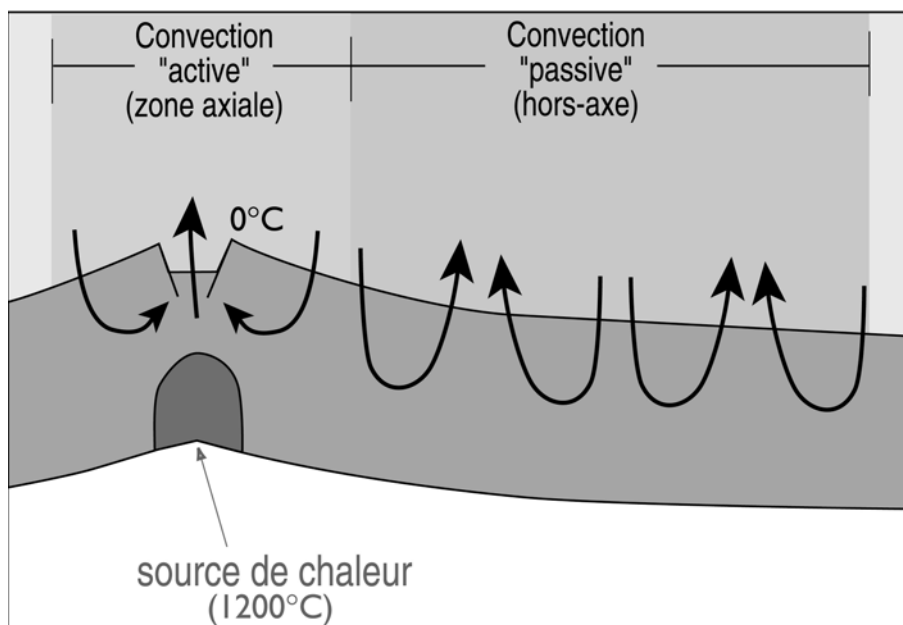
Fumeurs noirs, oasis sous la mer et minerais métalliques

Dès sa consolidation dans la zone axiale de la Dorsale, la croûte basaltique constituant le nouveau plancher océanique est immédiatement exposée au contact de l'eau de mer, qui s'infiltre par toutes les fissures et cavités, par tous les pores de la couche basaltique. L'interaction entre l'eau de mer et les roches de la croûte océanique entraîne de profondes modifications des propriétés physiques, chimiques et minéralogiques de la croûte océanique. Par ailleurs ces échanges chimiques contribuent à contrôler la chimie de l'eau de mer, et à maintenir constante la composition des océans.

Les conséquences métallogéniques de l'interaction basalte-eau de mer au niveau des dorsales sont très importantes. La découverte relativement récente, sur la Dorsale Est-pacifique, de sources hydrothermales chaudes précipitant des sulfures polymétalliques riches en fer, cuivre et zinc (les célèbres « fumeurs noirs »), ainsi que des oxydes de fer et de manganèse, s'est étendue depuis à toutes les dorsales et aux bassins arrière-arc.

Convection « active » et convection « passive »

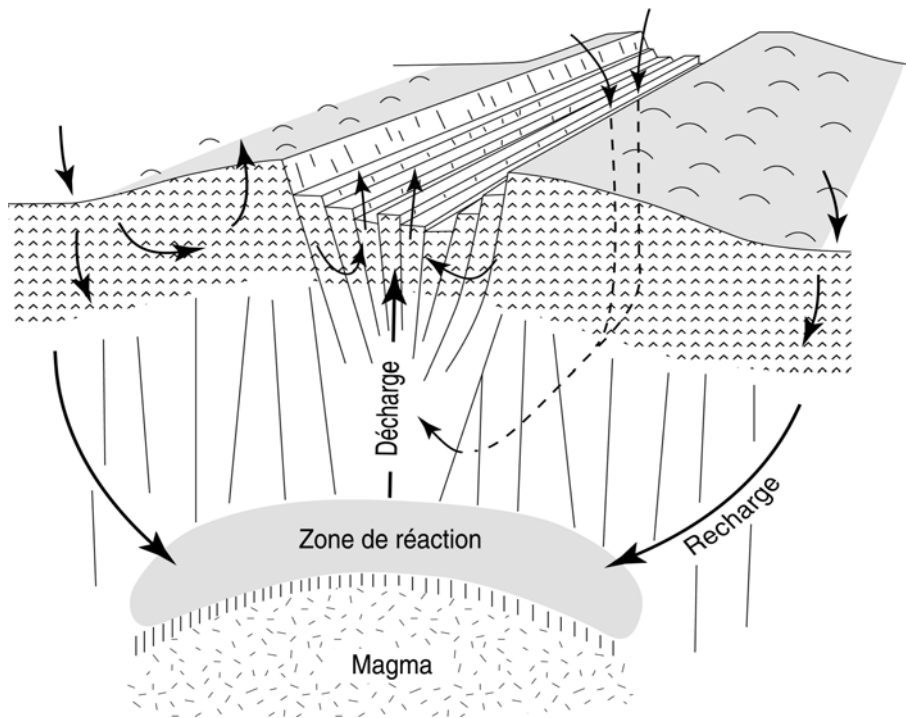
On peut distinguer deux types de régimes convectifs de l'eau de mer dans la croûte océanique (**Figure 2**) :



- Les systèmes actifs sont strictement localisés à la zone axiale des dorsales, au toit de réservoirs magmatiques, où la chaleur est extraite à travers une couche limite. Dans de tels systèmes, les températures sont élevées ($T > 300^{\circ}\text{C}$), et la circulation hydrothermale est vigoureuse et rapide.

- Les systèmes passifs se développent hors-axe, la chaleur étant fournie simplement par le refroidissement lent de la croûte et de la lithosphère. Les températures sont nettement plus basses ($T < 200^{\circ}\text{C}$), et les vitesses de circulation beaucoup plus lentes que dans les systèmes actifs. Les systèmes passifs sont beaucoup moins spectaculaires que les systèmes actifs, et donc plus difficiles à détecter et à étudier. Ce sont eux, cependant, qui évacuent la plus grande quantité de chaleur, au moins dix fois plus que les systèmes actifs.

La **Figure 3** montre les différentes parties d'un système hydrothermal actif au niveau d'une dorsale océanique. Ce système comprend de nombreuses zones de recharge descendantes, par où l'eau de mer froide pénètre dans la croûte et se rapproche du toit de la chambre magmatique, en réagissant avec les basaltes traversés, à des températures croissantes. Dans la *Zone de Réaction de Haute Température (ZRHT)*, l'eau de mer s'est transformée en un fluide hydrothermal chaud et se charge en métaux dissous et en soufre réduit. Ce fluide de faible densité très proche des conditions critiques remonte vers la surface, et se canalise dans des zones de décharge focalisées ou diffuses.



Ainsi se dessine une véritable circulation convective de l'eau de mer à travers la croûte océanique.

Aspects métallogéniques de l'hydrothermalisme océanique : les dépôts de sulfures polymétalliques massifs

Les amas sulfurés massifs des fonds océaniques et la découverte des fumeurs noirs

Au cours des vingt dernières années d'exploration des océans, de nombreux dépôts de sulfures polymétalliques ont été découverts sur le plancher océanique profond, dans des sites géologiques variés (**Figure 1**). Tous ces dépôts ont en commun d'une part la proximité d'une

source de chaleur, induisant la circulation hydrothermale de l'eau de mer à travers des roches fracturées et faillées, d'autre part le mélange du fluide hydrothermal avec l'eau de mer ambiante, provoquant la précipitation de sulfures métalliques et d'autres minéraux, à la surface ou juste sous le plancher océanique.

Ces dépôts contiennent de fortes concentrations en Zn, Cu, Pb, Ba, Ag ou Au. Dans des environnements fortement sédimentaires, certains d'entre eux peuvent atteindre une taille de plusieurs millions à plusieurs dizaines de millions de tonnes, comparables à certains dépôts analogues exploités à terre.

Bien que 1 % à peine des grands fonds océaniques aient été explorés en détail, on recense aujourd'hui plus d'une centaine de dépôts de sulfures polymétalliques sur le plancher océanique, dont l'immense majorité se situe dans l'océan Pacifique (**Figure 1**).

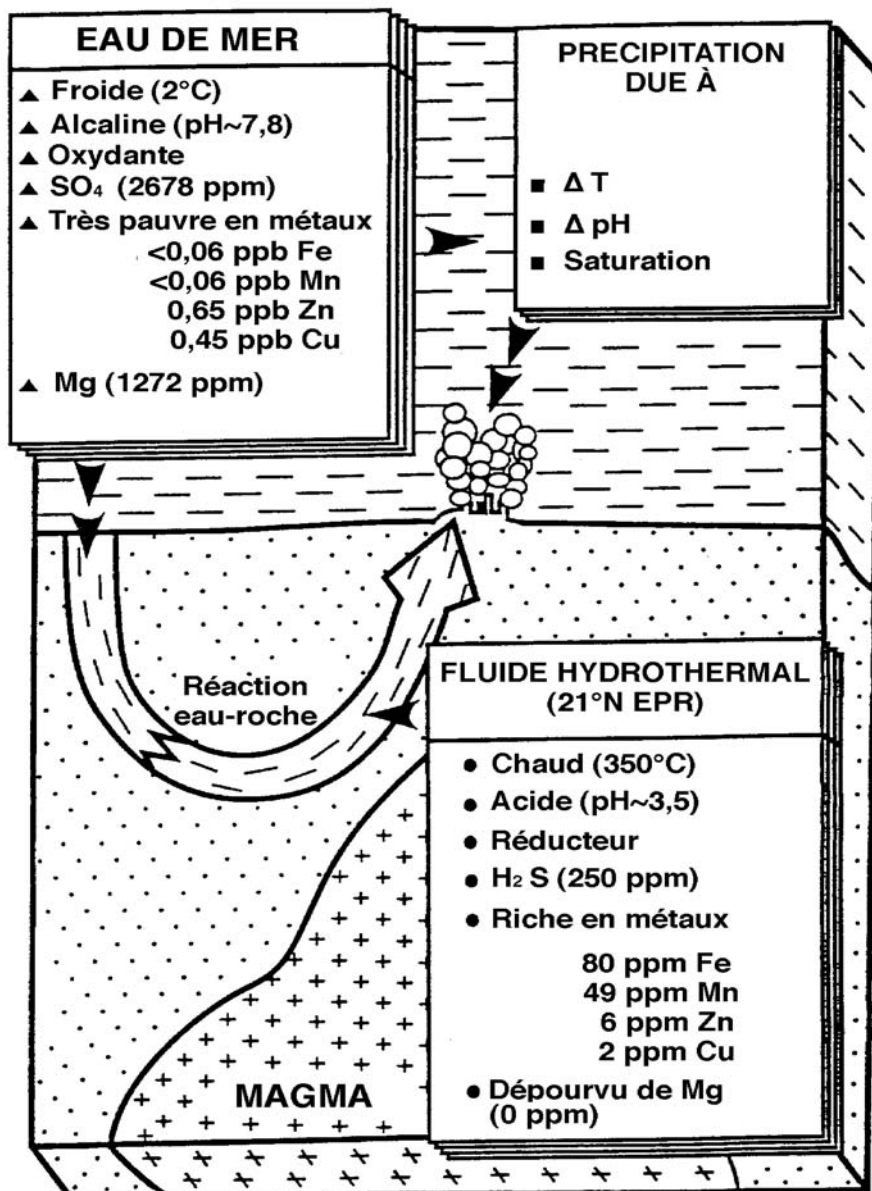
Les premières découvertes de sulfures polymétalliques eurent lieu au milieu des années 1960 dans plusieurs fosses de la région axiale de la Mer Rouge. En 1977, des sources tièdes entourées de spectaculaires faunes hydrothermales furent découvertes sur le rift des Galapagos. En 1978, des cheminées de sulfures inactives furent découvertes et échantillonnées à l'axe de la dorsale Est-pacifique à 21°N, lors d'une campagne franco-américaine de plongées. Un an plus tard en 1979, une expédition américano-française dans la même zone fit la remarquable découverte de l'activité hydrothermale de haute température, sous la forme de cheminées de sulfures crachant un fluide hydrothermal noir et tourbillonnant à 350°C, les célèbres fumeurs noirs (ou *black smokers* en anglais). Entourés d'une spectaculaire faune hydrothermale, ces fumeurs noirs sont essentiellement constitués de sulfures polymétalliques, de silice amorphe et de sulfates de calcium (anhydrite) et de baryum.

De tels champs hydrothermaux à fumeurs noirs furent ensuite découverts en de nombreux endroits de la Dorsale océanique mondiale, ainsi que dans un certain nombre de bassins arrière-arc ou marginaux, et au sommet de certains *seamounts*.

Le modèle génétique

Cas extrêmement rare dans le panorama actuel de la métallogénie, les fumeurs noirs permettent d'observer en temps réel la formation d'un gisement métallifère, en l'occurrence d'un amas de sulfures polymétalliques. Les eaux hydrothermales chaudes précipitent directement des sulfures de fer, cuivre et zinc sur la paroi interne des cheminées. Celles-ci finissent par s'écrouler, et leurs fragments accumulés et enchevêtrés, cimentés par des minéraux de plus basse température, édifient petit à petit un « amas sulfuré » sur le plancher océanique basaltique.

Le modèle métallogénique est ici particulièrement clair, du moins dans ses grands lignes (**Figure 4**) : l'eau de mer froide s'infiltré dans la jeune croûte océanique par les innombrables fissures ouvertes qui s'y développent ; cette eau légèrement alcaline au départ (son pH est proche de 8) précipite ses sulfates et carbonates, au fur et à mesure qu'elle descend et se réchauffe progressivement à l'approche des réservoirs magmatiques. Vers 2 ou 3 km de profondeur, surchauffée à plus de 350°C et devenue très acide (son pH est devenu inférieur à 4) et corrosive, l'eau remonte vers la surface à l'axe de la dorsale, dissolvant sur son passage les métaux et le soufre contenus à l'état de traces dans la couche basaltique. En débouchant dans l'eau de mer glaciale, cette eau chaude chargée de métaux précipite ces sels dissous en masse. Une fraction de cette charge reste dans le panache hydrothermal qui s'étale à plusieurs centaines de mètres au-dessus des cheminées. Riche en hydroxydes de fer et de manganèse, ce panache déposera lentement ses fines particules tout autour du site.

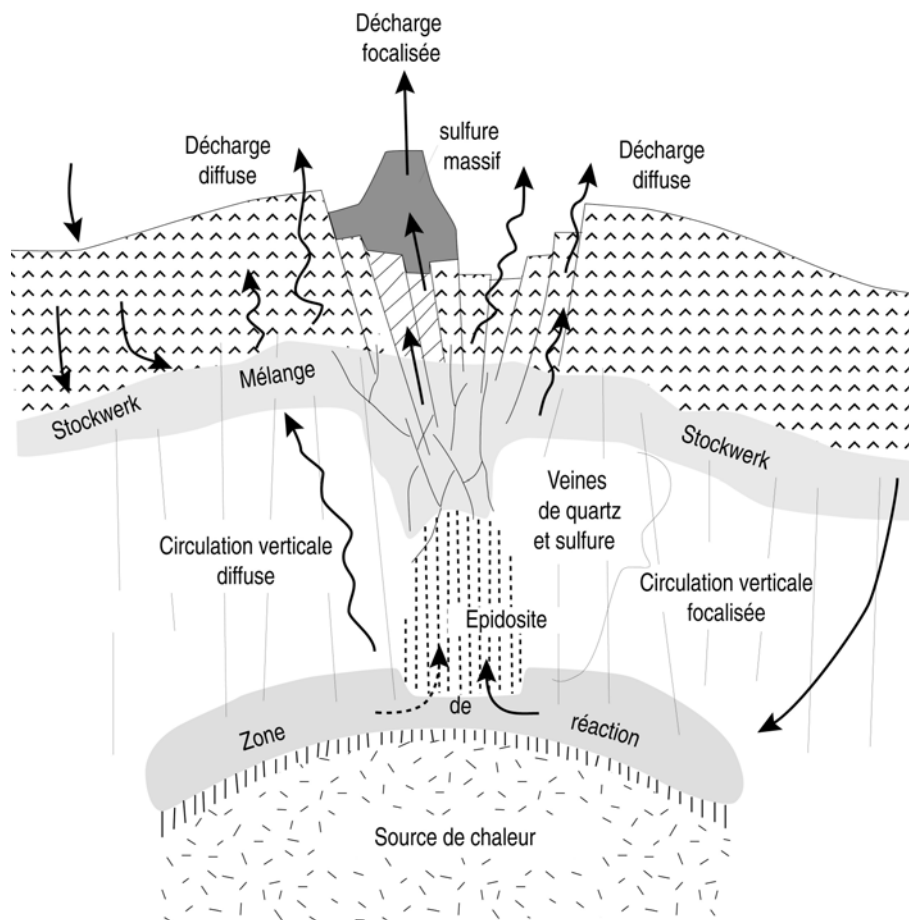


Vers une meilleure compréhension des gisements terrestres

Du coup, nous comprenons beaucoup mieux comment de nombreux gisements métallifères, aujourd'hui terrestres, ont pu se former dans les océans du passé. A commencer par les gisements de sulfures polymétalliques riches en cuivre des ophiolites, ces fragments de lithosphère océanique égarés sur les marges continentales ou sur les arcs insulaires. Beaucoup d'entre elles contiennent des concentrations exploitables de sulfures de cuivre, de fer et de zinc, avec parfois des traces non négligeables d'or et d'argent.

Ces sulfures forment des amas à l'intérieur ou à la surface d'anciennes coulées basaltiques sous-marines à pillow-lavas, exactement comme à l'axe des dorsales actuelles. De plus, on y retrouve des fragments circulaires d'anciennes cheminées hydrothermales et même, dans certains cas, des restes fossiles de faunes hydrothermales. Tels ces tubes fossilisés découverts en 1985 dans le minerai de la mine de Bayda, dans les ophiolites des montagnes d'Oman, vieilles de cent millions d'années environ. La morphologie des empreintes de tubes évoque irrésistiblement les colonies d'*Alvinella* proliférant sur les « diffuseurs blancs » et les « fumeurs noirs » de la Dorsale Est-pacifique.

Les analogies sont telles que la conclusion s'impose d'elle-même : ces amas sulfurés polymétalliques des ophiolites, connus et exploités à Chypre, en Oman, en Turquie, à Terre-Neuve ou aux Philippines, représentent d'anciens dépôts hydrothermaux formés par des fumeurs noirs, sur les dorsales d'océans aujourd'hui disparus.



Conclusions

Les ressources minérales de l'océan profond sont les sulfures polymétalliques massifs dans les zones d'accrétion (dorsales, bassins arrière-arc, etc.) et les sommets des volcans sous-marins ou *seamounts*, les nodules de manganèse des grandes plaines abyssales, et les encroûtements manganésifères sur les flancs des *seamounts* et des îles volcaniques.

Les métaux potentiellement récupérables dans ces dépôts sont le cuivre, le zinc, le plomb et l'argent (sulfures), plus l'or et le baryum (sulfates) dans les amas sulfurés polymétalliques ; le cobalt, le nickel, le cuivre et le manganèse (oxydes/hydroxydes) et éventuellement les éléments du groupe du platine (ou PGE), dans les nodules et croûtes de Mn. Le fer est abondant dans tous ces dépôts, mais n'a pas de valeur commerciale.

N'en doutons pas, l'homme ira chercher les métaux de plus en plus loin sous la mer, lorsque les gisements terrestres seront épuisés, comme il l'a fait pour les hydrocarbures. Déjà des compagnies minières japonaises et australiennes demandent des permis d'exploration dans les bassins arrière-arc du sud-ouest Pacifique, potentiellement riches en dépôts hydrothermaux, plus proches des continents et moins profonds que les dorsales des grands océans terrestres. Les immenses champs de nodules de manganèse qui tapissent les grandes plaines abyssales des océans resteront, longtemps encore, inexploitable en raison de leur grande profondeur (plus de 5000 m) et de leur éloignement des continents. Ce sont donc, en

priorité, les dépôts hydrothermaux de sulfures polymétalliques massifs qui seront prospectés et exploités sur les fonds océaniques dès le 21^{ème} siècle. Leur inventaire, pour l'essentiel, reste à faire.

Légendes

Figure 1. Carte de l'océan mondial, montrant la Dorsale Océanique Mondiale, les principales fosses océaniques marquant les zones de subduction, et la localisation des champs de sulfures massifs hydrothermaux connus actuellement dans les océans (d'après Yves FOUQUET, Centre Ifremer de Brest, novembre 1999, simplifié).

Figure 2. Schéma illustrant les deux types de régimes convectifs dans la croûte océanique. D'après les conceptions de Lister (1982).

Dans la cellule axiale, une circulation active de haute température est entretenue par la présence permanente d'une puissante source de chaleur (chambre magmatique, ou roches très chaudes). Dans le domaine hors-axe, une circulation de plus basse température (<200°C) est maintenue par le refroidissement passif de la croûte et de l'ensemble de la lithosphère.

Figure 3. Schéma montrant les différentes parties du système hydrothermal sous-marin développé au niveau des dorsales océaniques.

L'eau de mer froide pénètre et descend dans la croûte par de vastes zones de recharge, et réagit avec la croûte à des températures croissantes au cours de sa migration vers le bas. Des réactions chimiques de haute température se développent dans la Zone de réaction, juste au-dessus de la source de chaleur (habituellement la chambre magmatique), d'où les fluides hydrothermaux remontent rapidement vers la surface par des zones de décharge focalisées ou diffuses.

Figure 4. Modèle métallogénique pour les dépôts hydrothermaux de la dorsale est-Pacifique, utilisant les données acquises à 21°N. d'après SCOTT (1992).

L'eau de mer froide, oxygénée et très pauvre en métaux, se transforme en un fluide hydrothermal chaud, réducteur et riche en métaux, par interaction avec les roches chaudes situées à quelques kilomètres du plancher océanique. Le fluide hydrothermal remonte rapidement et se mélange avec l'eau de mer ambiante pour précipiter une grande partie de sa charge minérale. Cette précipitation est une conséquence du refroidissement rapide et de la remontée du pH, par addition du sulfate de l'eau de mer. 1 ppb = 10⁻⁹ (partie par milliard, en masse).

Figure 5. Schéma d'une zone de décharge hydrothermale dans la zone axiale d'une dorsale océanique, d'après les études menées sur plusieurs complexes ophiolitiques (Oman, Chypre, Terre-Neuve, etc.). D'après Alt (1995).

Enracinées dans la zone de réaction, des épidosites massives, roches formées essentiellement d'épidote et de quartz, jalonnent les zones de remontée focalisées des fluides chauds, et passent vers le haut à des *stockwerks* minéralisés (denses réseaux de veines hydrothermales anastomosées), alimentant en surface les fumeurs noirs déposant les amas sulfurés polymétalliques sur le plancher océanique.