

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

GÉOLOGIE

Pétrologie sédimentaire

Des roches aux processus

2^e édition

Frédéric BOULVAIN



Chapitre I

Introduction

1. SEDIMENTOLOGIE & PETROLOGIE SEDIMENTAIRE

La sédimentologie est une discipline jeune parmi les Sciences de la Terre. Elle est en effet liée à l'essor des études du milieu actuel au cours des dernières décennies. Même si le terme *sédimentologie* est relativement neuf et dérive de l'anglais *sedimentology* (terme utilisé depuis 1932), on peut néanmoins reconnaître un des pères fondateurs de la discipline en Charles Lyell (Ecoissais, 1797-1875).

C'est en grande part la conséquence de l'élaboration de son *principe des causes actuelles* ou plutôt des *causes réelles* selon la traduction correcte du terme anglais *actual* (C. Lyell, 1834. *Principles of Geology*). Ce principe postule que les causes des changements géologiques n'ont jamais été autres que celles qui se manifestent de nos jours et qu'elles ne se sont jamais manifestées avec une intensité plus grande.

Il devient donc possible d'expliquer la genèse des dépôts par une comparaison avec la nature actuelle: c'est un champ énorme qui s'ouvrait ainsi à la recherche. Précisons que Lyell était aussi persuadé de la grande étendue des temps géologiques (il avait observé des dépôts feuilletés et avait attribué leur régularité à un cycle annuel, ce qui exigeait des centaines de milliers d'années pour déposer l'ensemble de la formation).

En schématisant, on peut dire que la *sédimentologie* au sens strict a pour but l'étude des sédiments. La *pétrologie sédimentaire* s'attache quant à elle à l'étude et la reconstitution des environnements de dépôt anciens des roches sédimentaires. Ceci comprend l'identification des processus sédimentaires, des milieux de dépôt, l'étude de leur évolution au cours du temps, la reconstitution de l'architecture des différents environnements au sein d'un bassin de sédimentation et aussi, il ne faut pas l'oublier, l'étude de la transformation des sédiments en roches au cours du temps (par compaction, diagenèse...).

Cette distinction un peu floue entre sédiments et roches sédimentaires (=des sédiments meubles ou consolidés, que le cycle géologique amène hors de leur contexte de dépôt original...) n'a pas une importance primordiale et il est courant d'entendre parler de sédimentologie pour les deux objets d'étude.

L'importance de la sédimentologie est considérable: près de 90% de la surface terrestre est couverte de sédiments ou est constituée de roches sédimentaires, avec les proportions suivantes: argilites/siltites: 50% ; grès: 15% ; calcaire et roches organiques: 12% ; roches volcano-sédimentaires: 22%. Malgré leur grande étendue, les roches sédimentaires ne représentent cependant que le 1/20^e en volume de la croûte superficielle (16 km d'épaisseur). Leur étude est néanmoins capitale pour les raisons suivantes:

- elles contiennent le pétrole, le gaz naturel, le charbon et les fertilisants;
- elles représentent un des principaux aquifères;
- elles contiennent les fossiles, sur lesquels reposent notre connaissance de l'évolution de la vie sur Terre;
- elles sont en relation avec l'atmosphère et l'hydrosphère (cycle du C, etc.);

- elles permettent de reconstituer l'évolution de notre planète par les études paléogéographiques, paléoclimatiques, depuis l'échelle locale jusqu'à celle des bassins. L'enregistrement sédimentaire étant continu, cette reconstitution est elle aussi continue.

2. PROCESSUS SEDIMENTAIRES ET CYCLE GEOLOGIQUE

Rappelons d'abord ce qu'est le *cycle géologique*. Les roches peuvent être classées en trois grands groupes qui sont les roches ignées ou magmatiques, les roches sédimentaires et les roches métamorphiques. Les roches ignées résultent du refroidissement et de la cristallisation de magmas, issus soit du manteau, soit de la fusion de roches métamorphiques (cf. Boulvain, 2013). Les roches métamorphiques résultent de la modification, par l'action de la chaleur et de la pression, de roches ignées ou sédimentaires, lesquelles proviennent de la transformation par diagenèse de sédiments. Comme ces sédiments proviennent de la désagrégation de roches sédimentaires, métamorphiques ou magmatiques, l'ensemble de ces phénomènes forme un cycle appelé *cycle géologique* (Fig. I.1). Dans la première partie du livre qui va suivre, on étudiera les étapes de ce cycle géologique impliquant les processus sédimentaires.

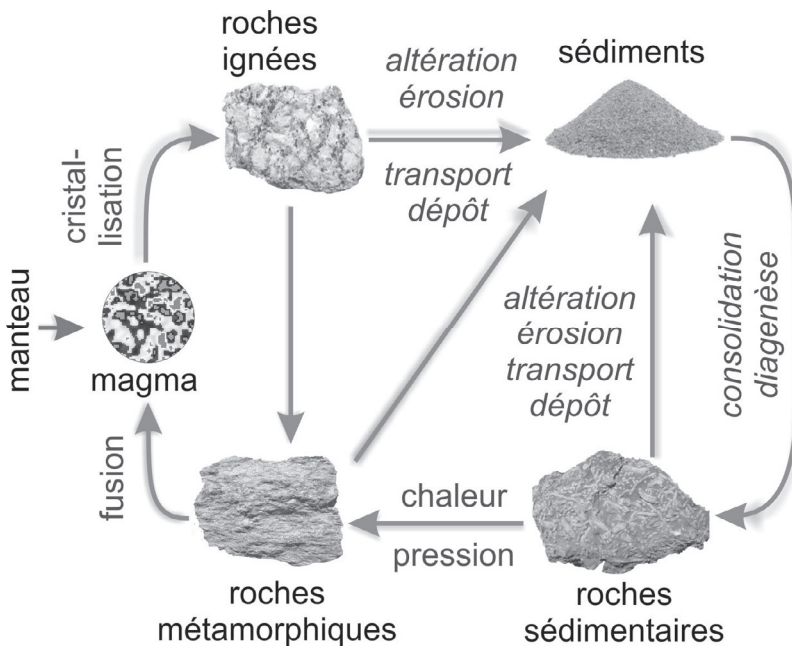


Fig. I.1 : le cycle géologique.

Au sein du cycle géologique, les processus sédimentaires comprennent l'*altération*, l'*érosion*, le *transport*, le *dépôt* et la *diagenèse*. Les sédiments détritiques, formés de grains issus de la dégradation de roches préexistantes, transportés et déposés dans un bassin de sédimentation, constituent l'illustration la plus évidente de cette partie du cycle. Dans le cas des sédiments biogéniques et chimiques, résultats de la précipitation organique et/ou chimique, les constituants sont amenés au bassin sédimentaire sous la forme d'ions

solubles. Une exception notable au cycle est cependant fournie par les sédiments d'origine volcanique, où les particules sont injectées directement dans le milieu de dépôt.

Plus spécifiquement, l'*altération* est la destruction de roches ignées, métamorphiques ou sédimentaires par désagrégation mécanique et décomposition chimique, voire biologique (gélifraction, insolation, décompression, action des racines, de l'eau, du vent, etc.). L'altération donne naissance à une grande variété de produits: sols, débris rocheux, ions en solution dans les eaux superficielles. L'*érosion* correspond à l'enlèvement de ces produits d'altération des zones d'altération active et le *transport* est leur mouvement vers les zones de *dépôt*. La *diagenèse* est le résultat de processus post-dépôt comme la compaction, la recristallisation, la cimentation.

Pour en savoir plus :

F. Boulvain, 2013. Géologie générale. Du minéral aux géosphères. Ellipses (Technosup), 236 p.

Quelques ouvrages généraux de sédimentologie et pétrologie sédimentaire :

I. Cojan & M. Renard, 2021. Sédimentologie (3^e édition). Dunod, 500 p.

J-F. Deconinck & H. Chamley, 2011. Bases de sédimentologie (3^e édition). Dunod, 224 p.

D. Prothero & F. Schwab, 2013. Sedimentary geology (an introduction to sedimentary rocks and stratigraphy) (3rd edition). Freeman & Co, 593 p.

H.G. Reading, 1996. Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy (3rd edition). Blackwell, 704 p.

M. Tucker, 2001. Sedimentary petrology (3rd edition). Blackwell, 262 p.

Chapitre II

L'altération

Si l'on examine un sable fluviatile dans la partie amont du bassin versant d'une zone où affleurent des granites (30 à 50% de plagioclases, 5 à 35% de feldspaths potassiques, 5 à 10% de quartz), on constatera paradoxalement que le quartz en est un minéral essentiel. Dans la partie aval du système fluviatile, il peut même être pratiquement seul.

C'est l'*altération* qui est responsable de l'augmentation de la proportion de quartz (minéral résistant) dans les sédiments. En effet, les silicates de haute température (péridots, pyroxènes, plagioclases calciques...) sont vulnérables à l'altération car l'arrangement des tétraèdres de silice est peu organisé (néso-, soro- et inosilicates). Les minéraux de moyenne et basse températures (inosilicates à deux chaînes, phyllo- et tectosilicates) sont plus résistants. Les verres, amorphes car figés à très haute température, sont les plus vulnérables (cf. Boulvain, 2013).

Dans le cas du quartz, il faut ajouter le fait que ce minéral possède aussi une bonne résistance aux chocs lors du transport car il ne se clive pas.

L'altération a pour effet de décomposer une roche en deux ensembles:

- des ions solubles et des grains qui vont être mobilisés par l'érosion;
- un dépôt résiduel, demeurant sur place.

Les mécanismes responsables de l'altération, phénomène prenant place aux températures et pressions *faibles* régnant à la surface de la Terre, sont l'*altération physique*, l'*altération biologique* et l'*altération chimique*.

1. ALTERATION PHYSIQUE

Les processus mis en œuvre dans l'altération physique sont les suivants:

- les *alternances de gel-dégel*, en climat suffisamment humide, fragmentent les roches (gélifraction/cryoclastie). L'eau en gelant augmente son volume de 9-10% et agit comme un coin, élargissant progressivement les fractures (Fig. II.1A & B);
- les *variations répétées de température* (40-50°C d'amplitude journalière dans le Sahara, par exemple) ont à peu près le même effet que le gel: les différences de dilatation thermique entre les minéraux d'une roche provoquent l'apparition de fractures;
- la *décompression* survient lorsque des roches ayant subi un enfouissement sont libérées de la pression lithostatique par érosion des formations supérieures. Des joints de décompression, pratiquement parallèles à la surface du sol se développent progressivement (Fig. II.1C).
- l'*usure mécanique* par des grains détritiques emportés par le vent, l'eau, la glace (Fig. II.1D).

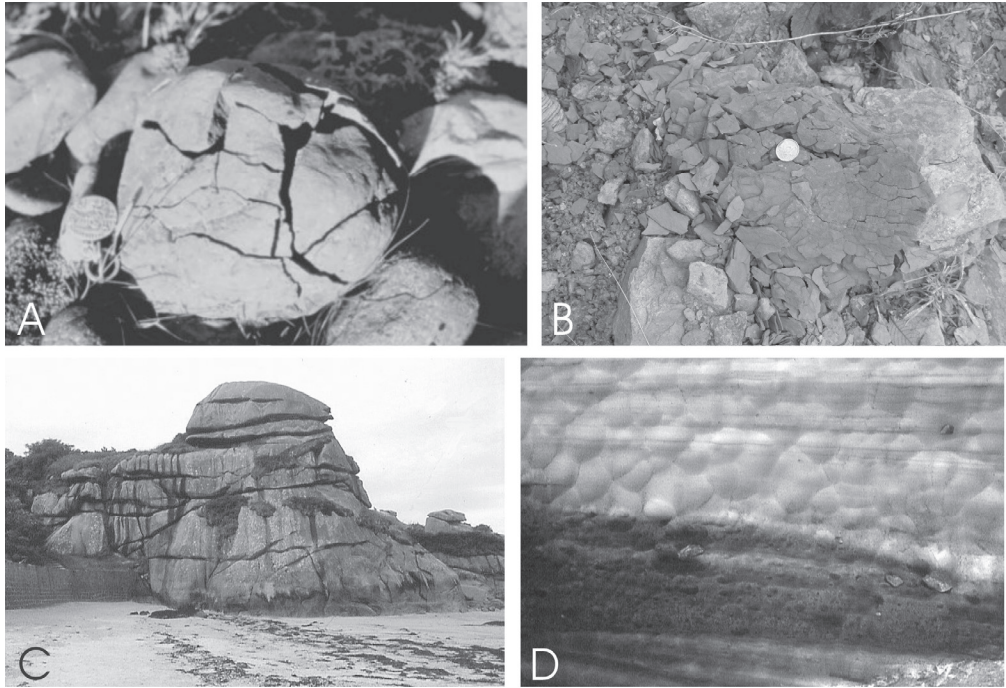
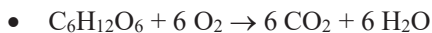


Fig. II.1 : altération physique. A : cryoclastie d'un basalte (roche macrogélive, se débite en gros fragments), Islande. B : cryoclastie d'un schiste (roche microgélive), Belgique. C : joints de décompression dans un massif granitique, Ploumanach, France. D : glace chargée de sable et de graviers, Vignemale, Pyrénées, France.

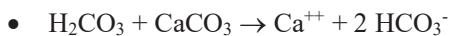
2. ALTERATION BIOLOGIQUE

On distingue l'altération provoquée par l'action chimique de composés produits par des organismes (plantes, microbes...) de l'action purement mécanique de plantes ou d'animaux (par exemple: dilatation des racines jouant le rôle de coin dans des fractures). L'ingestion de matériaux par des animaux vivant dans les sols est un processus faisant intervenir en même temps les deux types de mécanismes.

Un premier processus important est l'oxydation de la matière organique (par la fermentation ou la respiration), produisant de l'eau et du CO_2 , lui-même impliqué dans des réactions de mise en solution:



La combinaison du CO_2 et de l'eau donne naissance à l'acide carbonique (H_2CO_3), un acide faible qui peut néanmoins solubiliser la calcite (ou un autre carbonate):



On a en effet observé que pour une concentration de CO_2 équivalente à la concentration atmosphérique ($\sim 3.10^{-4}$ atm), la concentration de Ca^{++} et HCO_3^- était respectivement de 20 mg/l et 60 mg/l. Dans un sol où la concentration de CO_2 peut atteindre 3.10^{-2} atm, les

concentrations respectives de Ca^{++} et HCO_3^- peuvent augmenter jusqu'à 90 mg/l et 260 mg/l.

L'action des microorganismes est importante et ne se limite pas à la production de CO_2 . Dès leur arrivée en subsurface, les minéraux des roches sont soumis au métabolisme microbien. Des colonies croissent à la surface des minéraux, s'infiltrent dans les fractures à la recherche d'éléments essentiels à la vie.

L'altération microbienne se manifeste surtout sous la forme d'une dissolution par des acides organiques dont le plus fréquent est l'acide oxalique. L'attaque des minéraux par ces acides libère des cations métalliques qui, combinés aux anions organiques, donnent naissance à des complexes organo-métalliques (dans le cas des oxalates, combinés au calcium issu de la dissolution des carbonates, cela donnera naissance à CaC_2O_4 , fréquent dans les sols). Beaucoup de microbes possèdent la faculté de produire des molécules spécifiques en fonction du type de minéral à dégrader.

Outre l'action des acides organiques, la formation de biofilms d'EPS (polymères extracellulaires) maintient une hydratation constante autour des minéraux qui favorise les réactions de mise en solution.

3. ALTERATION CHIMIQUE

L'altération chimique agit de deux façons: certains minéraux (halite, calcite,...) sont dissous totalement et leurs ions sont évacués en solution. D'autres minéraux, comme les micas ou les feldspaths sont transformés en nouvelles espèces minérales (surtout en argiles), souvent de granulométrie plus fine et plus facilement mobilisables par l'érosion. La plupart des réactions impliquées dans l'altération nécessitent la présence d'eau et d'air. Passons en revue les réactions les plus significatives (Prothero & Schwab, 2013).

3.1. Réactions chimiques impliquées dans l'altération

La **mise en solution**: c'est la réaction la plus simple, faisant intervenir de l'eau, ou de l'eau et un acide. Envisageons quelques cas concrets:

- la solubilité du quartz est très faible (6 ppm dans les eaux de surface); la réaction de mise en solution est la suivante: $\text{SiO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$
- la calcite, par contre est beaucoup plus soluble (environ 2000 ppm), parce que l'eau de pluie se charge en CO_2 et agit comme un acide faible. La réaction est la suivante: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}^{++} + 2 \text{HCO}_3^-$ (bicarbonate en solution) ;
- la halite et les autres halogénures sont très solubles (solubilités de plusieurs milliers de ppm).

L'**hydratation** et la **déshydratation**, ou de manière plus concrète: minéral + eau = nouveau minéral hydraté; la déshydratation étant le processus inverse. Les réactions les plus importantes sont:

- la déshydratation du gypse pour produire de l'anhydrite: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$ ainsi que la réaction inverse ;

- l'hydratation de l'hématite pour produire de la limonite: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe}(\text{OH})_3$
- l'hydratation de la kaolinite pour produire de la gibbsite.

L'**hydrolyse**: c'est le processus par lequel un cation d'un minéral est remplacé par le H^+ d'une solution acide. Cette réaction a pour conséquence de détruire le minéral (mise en solution complète) ou de le convertir en une nouvelle espèce. A titre d'exemple, l'olivine et les pyroxènes se dissolvent complètement, alors que les feldspaths se dissolvent partiellement, produisant de la silice en solution et des minéraux argileux. Comme les eaux météoriques contiennent du CO_2 dissout, les réactions se présentent comme suit:

- Mg_2SiO_4 (forstérite) + $4 \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow 2 \text{Mg}^{++} + 4 \text{HCO}_3^- + \text{H}_4\text{SiO}_4$
- $4 \text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (albite) + $4 \text{H}_2\text{CO}_3 + 18 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{Na}^+ + 8 \text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ (kaolinite) + 4HCO_3^-

(Remarque: ces réactions d'altération des minéraux silicatés sont donc des *pompes* à CO_2 atmosphérique!)

L'**oxydation-réduction**: le processus d'oxydation le plus connu est la transformation de Fe^{2+} en Fe^{3+} ; le manganèse se comporte de la même manière que le fer, avec la pyrolusite (MnO_2) et la manganite ($\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) comme principaux produits d'oxydation :

- $\text{Fe}^{2+}_2\text{SiO}_4 + 1/2 \text{O}_2 + 5 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe}^{3+}(\text{OH})_3 + \text{H}_4\text{SiO}_4$
- $4 \text{Fe}^{2+}\text{S}_2 + 15 \text{O}_2 + 8 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3 + 8 \text{H}_2\text{SO}_4$

Les **réactions impliquant la matière organique**: on a vu qu'une réaction importante est l'oxydation de la matière organique, produisant de l'eau et du CO_2 , lui-même impliqué dans différentes réactions d'altération:

- $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2 \rightarrow 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$

Le Tableau II.1 propose une synthèse des produits les plus courants de l'altération chimique. Les constituants solubles sont évacués par l'eau, les minéraux résiduels et néoformés demeurent sur place et constituent des *altérites* ou bien sont transportés par l'eau, le vent, la glace et les écoulements gravitaires.

constituants solubles	Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , H_4SiO_4 , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-
minéraux résiduels	quartz, zircon, magnétite, ilménite, rutile, grenat, sphère, tourmaline, monazite
minéraux néoformés	kaolinite, montmorillonite, illite, chlorite, hématite, goethite, gibbsite, boehmite, diaspore, silice amorphe, pyrolusite

Tab. II.1 : produits les plus courants de l'altération chimique.

3.2. Paramètres contrôlant l'altération chimique

Le climat est probablement le facteur le plus important dans le contrôle de l'altération chimique. Une température élevée va favoriser la cinétique des réactions chimiques.

L'humidité est également importante, puisque beaucoup de réactions se passent en milieu aqueux. L'altération chimique est donc prééminente en climat chaud et humide.

En climat froid, même si les précipitations sont abondantes, l'eau est à l'état de neige ou de glace, favorisant l'altération physique (Figs II.2 & 3).

D'autres facteurs occupent également une place importante, quoique plus indirecte: c'est par exemple le cas du drainage. Si les ions mis en solution ne sont pas évacués, un équilibre chimique peut être atteint et les réactions d'altération finissent par s'arrêter. Le relief, également, contrôle la pente des réseaux fluviaux et la rapidité des courants, donc l'intensité de l'évacuation des ions: on a pu montrer par exemple que pour des circulations faibles, l'albite est transformée en kaolinite, alors qu'avec une circulation d'eau plus rapide, elle est transformée en gibbsite (car la silice en solution est mieux évacuée).

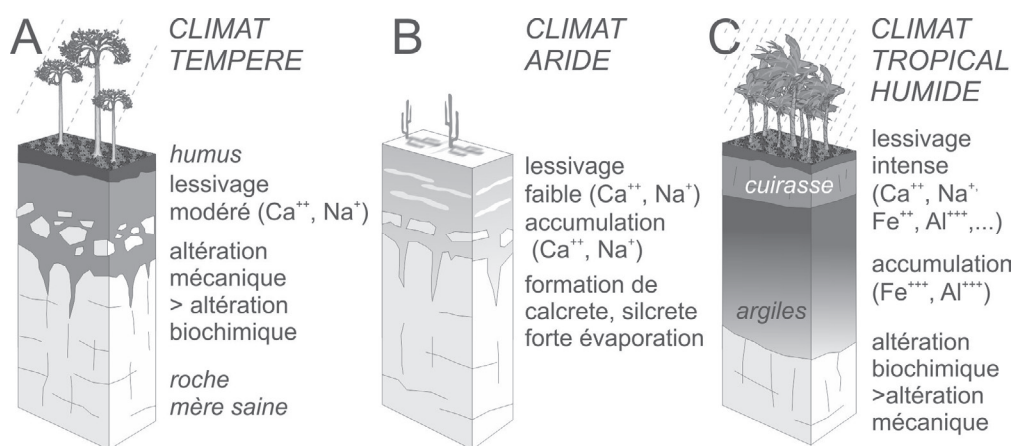


Fig. II.2 : influence du climat sur le profil d'altération. A : en climat tempéré, l'altération mécanique domine. L'altération biochimique est faible et consiste surtout dans le départ de cations très solubles comme Na^+ et Ca^{++} des minéraux les moins stables. B : en climat aride, la pluviosité très faible et la forte évaporation permettent la précipitation sur place des cations solubles et la constitution d'un horizon induré (calcrete, silcrete). C : en climat tropical humide et en climat équatorial, l'altération est surtout chimique. L'eau abondante et chaude provoque une mise en solution de la plupart des minéraux, avec précipitation des ions Fe^{3+} , Al^{3+} , Si^{4+} et développement d'une cuirasse latéritique. Un horizon riche en argile se met aussi en place et résulte de processus de néoformation à partir des minéraux de la roche-mère et à partir des ions venant des horizons supérieurs.

L'acidité-alcalinité et le degré d'oxydo-réduction des eaux sont également des paramètres contrôlant l'altération chimique. Si l'on porte en graphique l'Eh en fonction du pH pour des environnements naturels variés (Fig. II.4), on constate que l'eau pluviale est légèrement acide, tout comme les sols. Ce sont donc des milieux où dissolution et hydrolyse vont jouer un rôle dominant. Par contre, le pH de l'eau de mer est de 8: peu de réactions d'hydrolyse ont lieu en milieu marin.

On observe aussi que la plupart des environnements en contact avec l'atmosphère sont oxydants. Des conditions réductrices ne règnent que dans les milieux isolés (bassins marins à circulation restreinte, fjords, lacs stratifiés, etc.) ou les milieux dont tout