

TECHNOSUP

LES FILIERES TECHNOLOGIQUES DES ENSEIGNEMENTS SUPERIEURS

---

GEOLOGIE

# Pétrologie sédimentaire

Des roches aux processus

(2<sup>e</sup> édition revue et augmentée)

**Frédéric BOULVAIN**



## Avant-propos

L'étude des sédiments et des roches sédimentaires nous aide à comprendre les visages de notre planète. Couvrant près de 90% de sa surface, ils nous parlent de son histoire mouvementée, de ses paysages changeants, de ses climats présents et passés.

Du flanc de ses montagnes jusqu'à ses abysses, les roches et sédiments enregistrent l'histoire de la Terre et de la Vie.

Ces archives immenses possèdent aussi une magnifique beauté. De celle, mystérieuse, d'un paysage ruiniforme à la grâce géométrique de rides de courant s'étirant sur l'infini des plages, les sédiments nous montrent et nous incitent à comprendre une partie des merveilles de notre monde.

*« Tout au long des éternels estrans miroitants,  
infinis marins peuplés d'étranges merveilles,  
se tracent des mondes éphémères et mouvants  
de rides abstraites que la marée réveille ».*

Cet ouvrage s'articule en deux parties: la première s'intéresse aux processus sédimentaires qui accompagnent l'histoire d'un grain minéral depuis son érosion jusqu'à son dépôt dans un lac ou un bassin océanique, sans oublier la transformation ultérieure de ce sédiment en roche. La seconde est consacrée aux grandes familles de roches sédimentaires et à leur environnement de dépôt.

Certaines familles sont abordées de manière plus détaillée que d'autres : c'est un reflet de la variété des informations que l'on peut retirer de leur étude. Un calcaire fossilifère par exemple, permet d'ajouter aux données liées à la nature de la roche et aux structures sédimentaires, toute la richesse des informations issues des assemblages organiques. La finalité de cette seconde partie est de livrer des clés permettant d'interpréter les environnements de dépôt anciens. Le temps intervient dans le dernier chapitre et permet d'envisager l'évolution des bassins sédimentaires.

Cet ouvrage introductif, issu de mon enseignement en géologie à l'Université de Liège, s'adresse aux étudiants en Sciences de la Terre ainsi qu'aux étudiants d'autres disciplines abordant ce type de matière dans leur cursus. Il intéressera également le curieux disposant d'un bagage scientifique général, souhaitant comprendre ce que nous racontent les roches sédimentaires sur le passé et le présent de notre planète. La variété des notions abordées prime ici sur leur traitement exhaustif. Quelques pistes bibliographiques sont suggérées pour approfondir certains sujets, mais les références sont loin d'être complètes.

Je voudrais exprimer toute ma gratitude aux nombreux collègues, chercheurs et étudiants dont les observations et discussions m'ont accompagné dans le monde fascinant de la géologie sédimentaire. Merci en particulier à Anne-Christine Da Silva pour ses avis et suggestions quant à la 2<sup>e</sup> édition. A mes maîtres, parmi d'autres Paul Dumont, Alain Herbosch, Bernard Mamet, Jean-Claude Plaziat et Bruce Purser, je dois le meilleur de cet ouvrage.



# Table des matières

<b>Première partie: Processus sédimentaires</b> .....	9
<b>Chapitre I: Introduction</b> .....	10
1. Sédimentologie et pétrologie sédimentaire .....	10
2. Processus sédimentaires et cycle géologique .....	11
<b>Chapitre II: L'altération</b> .....	13
1. Altération physique .....	13
2. Altération biologique.....	14
3. Altération chimique.....	15
3.1. Réactions chimiques impliquées dans l'altération .....	15
3.2. Paramètres contrôlant l'altération chimique.....	16
<b>Chapitre III: L'érosion</b> .....	19
1. Erosion éolienne .....	19
1.1. Déflation éolienne .....	19
1.2. Corrasion .....	19
2. Ruissellement et érosion fluviale.....	20
2.1. Cuestas.....	22
2.2. Torrents .....	23
2.3. Rivières et fleuves .....	24
3. Erosion karstique .....	30
4. Erosion glaciaire.....	32
5. Erosion marine .....	33
5.1. Mécanismes de l'érosion marine.....	33
5.2. Formes d'érosion littorale .....	34
<b>Chapitre IV: Le transport</b> .....	36
1. Eboulements et glissements en masse sans fluides .....	36
2. Ecoulements gravitaires.....	37
2.1. Ecoulements de grains.....	37
2.2. Ecoulements de sédiment fluidisé .....	38
2.3. Ecoulements de boue et de débris .....	38
2.4. Courants de turbidité .....	39
3. Ecoulements de fluides.....	41
3.1. Ecoulement laminaire-écoulement turbulent.....	41
3.2. Mise en mouvement des sédiments .....	42
3.3. Transport des sédiments .....	43
3.4. Dépôt des sédiments .....	44
<b>Chapitre V: Le dépôt</b> .....	46
1. Moraines .....	46
2. Granulométrie des sédiments .....	49
2.1. Introduction .....	49
2.2. Analyses granulométriques .....	49
2.3. Granoclassement .....	53
3. Figures sédimentaires .....	53
3.1. Introduction .....	53
3.2. Description et genèse de quelques figures sédimentaires.....	54
<b>Chapitre VI: L'évolution post-sédimentaire</b> .....	83
1. Pédogenèse .....	83
1.1. Critères de pédogenèse en milieu carbonaté .....	84
2. Compaction .....	88
2.1. Evaluation du taux de compaction par mesure directe.....	89

3. Fossilisation.....	90
4. Diagenèse .....	90
4.1. Evolution de la matière organique.....	91
4.2. Cimentation-dissolution-recristallisation-remplacement .....	94
4.3. Diagenèse carbonatée .....	96
4.4. Compaction et diagenèse d'une boue argileuse.....	102
4.5. Diagenèse d'un sable.....	102
<b>Deuxième partie : Roches sédimentaires.....</b>	<b>105</b>
<b>Chapitre VII: Les familles de roches sédimentaires .....</b>	<b>106</b>
1. Introduction .....	106
2. Bassins sédimentaires.....	107
3. Remarques méthodologiques .....	109
<b>Chapitre VIII: Les roches détritiques .....</b>	<b>111</b>
1. Introduction .....	111
2. Roches détritiques meubles .....	112
3. Roches détritiques cohérentes .....	112
3.1. Grès .....	112
3.2. Conglomérats et brèches .....	117
3.3. Roches argileuses et silteuses-pélites .....	121
4. Environnements de dépôt des roches détritiques.....	123
4.1. Sables et graviers.....	123
4.2. Argiles et silts.....	149
<b>Chapitre IX: Les carbonates: environnements de dépôt, description et interprétation .....</b>	<b>156</b>
1. Introduction .....	156
2. Domaine continental.....	156
2.1. Carbonates lacustres .....	156
2.2. Tufs et travertins.....	157
2.3. Grottes .....	158
2.4. Caliches, calcretes .....	158
3. Domaine marin .....	159
3.1. Plates-formes carbonatées tempérées .....	159
3.2. Plates-formes carbonatées tropicales.....	161
3.3. Talus .....	167
3.4. Bassin .....	168
4. Description et interprétation des carbonates .....	169
4.1. Classification des roches carbonatées .....	169
4.2. Identification de quelques grains carbonatés.....	171
4.3. Vers la notion de faciès .....	174
4.4. Microfaciès standards.....	176
4.5. Interprétation des paléoenvironnements carbonatés.....	180
<b>Chapitre X: Les bioconstructions carbonatées .....</b>	<b>185</b>
1. Tapis microbiens et microbialithes.....	185
1.1. Introduction .....	185
1.2. Description et classification .....	185
1.3. Caractéristiques des stromatolithes .....	187
2. Récifs et monticules récifaux .....	192
2.1. Généralités - terminologie .....	192
2.2. Stabilisation - minéralisation.....	194
2.3. Evolution autogénique – évolution allogénique.....	196
2.4. Les bioconstructions dans l'histoire géologique .....	197

2.5. Récifs algo-coralliens des eaux tropicales superficielles .....	201
2.6. Récifs et monticules récifaux profonds .....	214
<b>Chapitre XI: Les roches organiques</b> .....	220
1. Introduction .....	220
2. Sédiments organiques actuels.....	222
3. Roches et sédiments organiques anciens .....	222
3.1. Charbons.....	223
3.2. Pétrole.....	224
3.3. Hydrocarbures non conventionnels .....	226
<b>Chapitre XII: Les roches siliceuses</b> .....	227
1. Introduction .....	227
2. Pétrographie.....	227
3. Géochimie .....	228
4. Silicites litées.....	229
5. Cherts et silex nodulaires .....	230
6. Silicites non marines .....	231
<b>Chapitre XIII: Les phosphorites</b> .....	233
1. Introduction .....	233
2. Classification .....	233
<b>Chapitre XIV: Les roches ferrifères</b> .....	236
1. Introduction .....	236
2. Géochimie et pétrographie .....	236
3. Formations ferrifères précambriennes .....	239
4. Formations ferrifères phanérozoïques .....	240
5. Formations ferrifères actuelles .....	241
5.1. Fer des marais.....	241
5.2. Nodules polymétalliques .....	241
<b>Chapitre XV: Les évaporites</b> .....	244
1. Introduction .....	244
2. Evaporites continentales.....	246
3. Evaporites marines peu profondes .....	247
3.1. Sabkhas.....	247
3.2. Evaporites de plate-forme.....	248
4. Evaporites profondes .....	248
5. Diagenèse .....	249
6. Tectonique évaporitique .....	250
<b>Chapitre XVI: Les dépôts volcano-sédimentaires</b> .....	252
1. Introduction .....	252
2. Roches pyroclastiques .....	253
3. Autres dépôts volcano-sédimentaires .....	255
4. Diagenèse des matériaux volcano-sédimentaires .....	256
<b>Chapitre XVII: Les séquences sédimentaires</b> .....	258
1. Introduction .....	258
2. Courbes de faciès et microfaciès .....	258
3. Notion de séquence .....	259
3.1. Types de séquences .....	261
3.2. Empilements de séquences .....	261
3.3. Corrélations séquentielles.....	262
3.4. Origine des séquences .....	264
4. Stratigraphie séquentielle .....	266
4.1. Notion d'accommodation .....	267

4.2. Séquence de dépôt-le modèle d'Exxon .....	267
4.3. Identification des différents ordres de séquences.....	270
4.4. Cortège régressif.....	271
4.5. Des pistes pour les systèmes carbonatés .....	272
Index.....	275



Première partie  
**Processus sédimentaires**

# 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'ouvrirait 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.

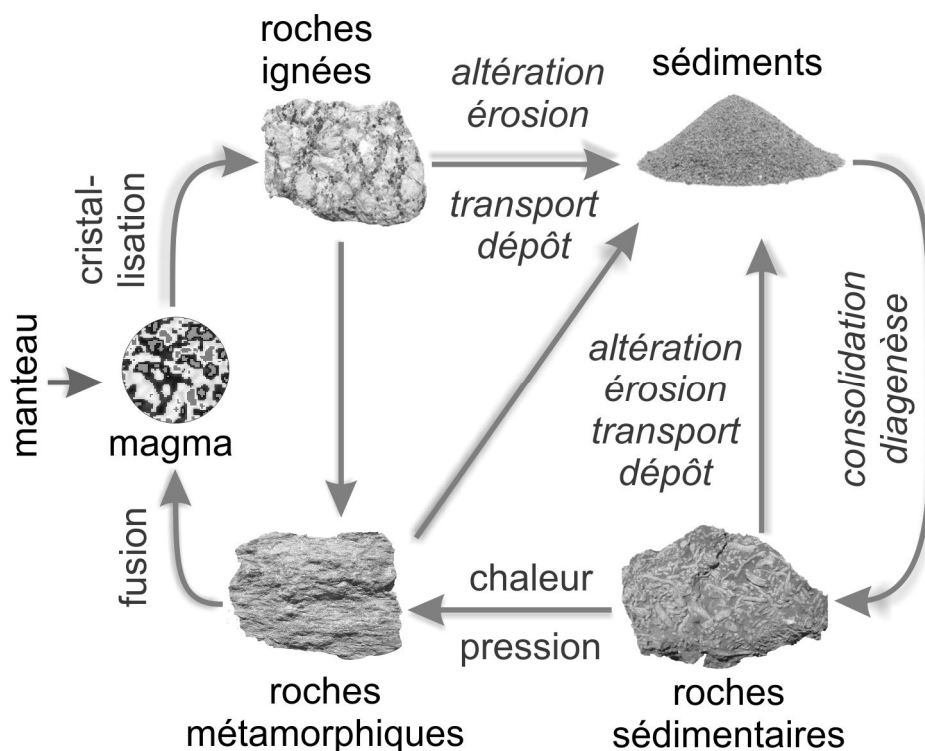
L'importance de la sédimentologie est considérable: près de 90% de la surface terrestre est couverte de sédiments ou est constituée de roches sédimentaires, avec les proportions suivantes: argilites/siltites: 50% ; grès: 15% ; calcaire et roches organiques: 12% ; roches volcano-sédimentaires: 22%. Malgré leur grande étendue, les roches sédimentaires ne représentent cependant que le 1/20<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> édition). Dunod, 500 p.

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

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

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

M. Tucker, 2001. Sedimentary petrology (3<sup>rd</sup> 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:

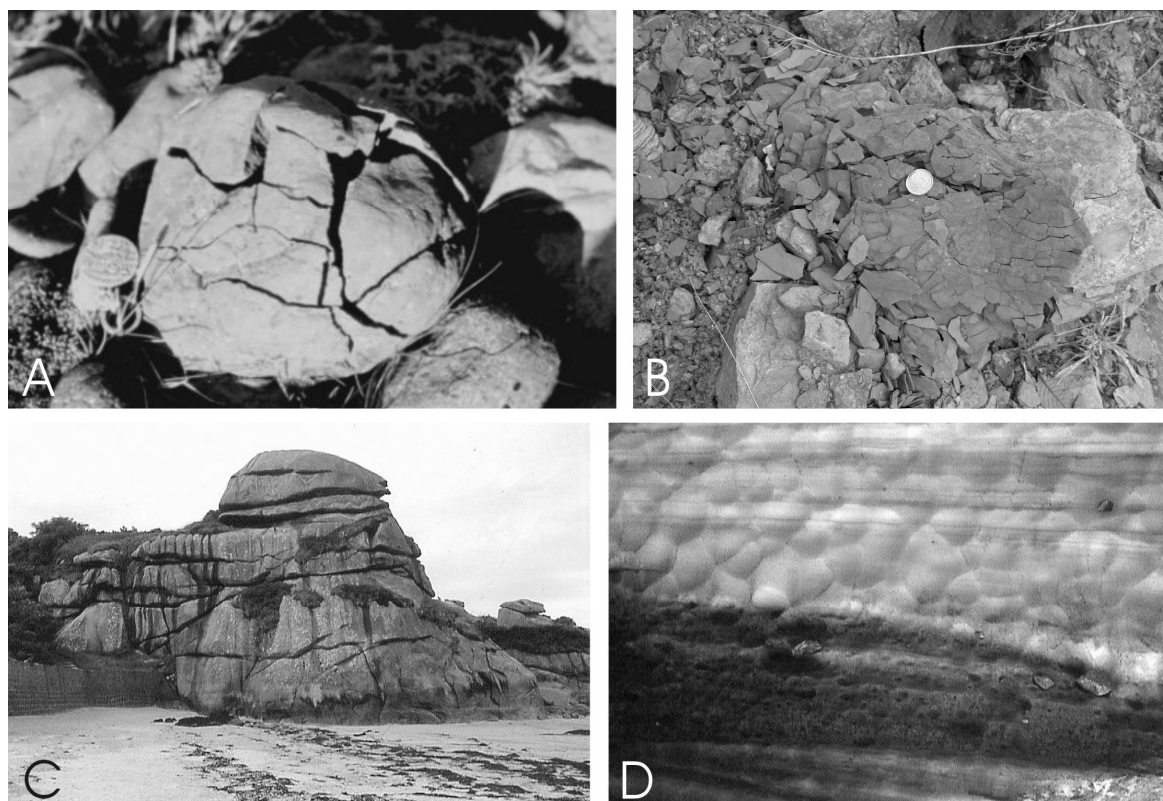
- des ions solubles et des grains qui vont être mobilisés par l'érosion;
- un dépôt résiduel, demeurant sur place.

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).

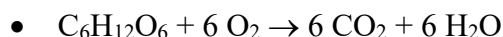


**Fig. II.1 : altération physique.** A : cryoclastie d'un basalte (roche macrogélive, se débite en gros fragments), Islande. B : cryoclastie d'un schiste (roche microgélive), Belgique. C : joints de décompression dans un massif granitique, Ploumanach, France. D : glace chargée de sable et de graviers,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

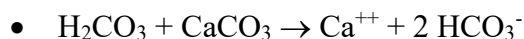
## 2. ALTERATION BIOLOGIQUE

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  $\text{CO}_2$ , lui-même impliqué dans des réactions de mise en solution:



La combinaison du  $\text{CO}_2$  et de l'eau donne naissance à l'acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), un acide faible qui peut néanmoins solubiliser la calcite (ou un autre carbonate):



On a en effet observé que pour une concentration de  $\text{CO}_2$  équivalente à la concentration atmosphérique ( $\sim 3.10^{-4}$  atm), la concentration de  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{HCO}_3^-$  était respectivement de 20 mg/l et 60 mg/l. Dans un sol où la concentration de  $\text{CO}_2$  peut atteindre  $3.10^{-2}$  atm, les

concentrations respectives de  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{HCO}_3^-$  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  $\text{CO}_2$ . Dès leur arrivée en subsurface, les minéraux des roches sont soumis au métabolisme microbien. Des colonies croissent à la surface des minéraux, s'infiltrant 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  $\text{CaC}_2\text{O}_4$ , 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  $\text{CO}_2$  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 ;