

Chapitre 2

CYCLE DES ROCHES SEDIMENTAIRES



Chapitre 2

CYCLE DES ROCHES SEDIMENTAIRES

I - GENERALITES SUR LES ROCHES

A - Définitions

B - Classification des roches

- 1 - En fonction de la composition minérale**
- 2 - En fonction de l'homogénéité**
- 3 - En fonction de leurs modes et milieux de formations**

C - Roches sédimentaires

- 1 - définition**
- 2 - cycle sédimentaire**

II - PROCESSUS DE FORMATION DES ROCHES SEDIMENTAIRES

A - Altération physique (mécaniques)

- 1 - Désagrégation physique (mécanique)**
- 2 - Variation de la température**
- 3 - Action du gel**
- 4 - Action des végétaux**

B - Altération chimique

- 1 - Dissolution**
- 2 - Oxydations / réductions**
- 3 - Hydratation**
- 4 - Décarbonatation**
- 5 - Hydrolyse**
- 6 - Altération et formation du sol**

C - Érosion

- 1 - Définition**
- 2 - Principaux agents d'érosion**

D - Transport

- 1 - Principaux agents de transport**
- 2 - Force des agents de transport**
- 3 - Durée du transport**

E - Processus de sédimentation

- 1 - Sédimentation et formation des strates**
- 2 - Caractéristiques des milieux de sédimentation**

F - Diagenèse

- 1 - Définition**
- 2 - Quelques agents de diagenèse**
- 3 - Principaux processus de la diagenèse**

III - MILIEUX DE SEDIMENTATION

- A - Milieux continentaux**
- B - Milieux intermédiaires**
- C - Milieux marins**

IV - CLASSIFICATION DES ROCHES SEDIMENTAIRES

- A - Classification selon leur mode de formation**
- B - Classification selon leur nature**

V - INTERET DE LA GEOLOGIE DES ROCHES SEDIMENTAIRES

- A - Intérêt scientifique**
- B - Intérêt économique**

I – GENERALITES SUR LES ROCHES

A - Définitions

Une roche est fondamentalement un matériau de l'écorce terrestre. Il s'agit d'un matériau formé par un agrégat naturel de minéraux, de fossiles, et/ou d'éléments d'autre(s) roche(s). La pétrographie (du grec petra = pierre, et graphê = décrire) est la science de la description et de l'analyse des roches.

Un minéral est un assemblage d'atomes ordonnés formant une espèce chimique naturelle. La minéralogie est la description et l'étude des minéraux.

Un cristal est un corps solide chimiquement homogène, partiellement ou complètement délimité par des faces planes. Les angles entre ces faces sont constants pour les cristaux d'une même espèce. La cristallographie est la science des cristaux, au sens large.

B - Classification des roches

1 - En fonction de la composition minérale

On peut avoir deux types de roches : les roches monominérale qui sont composées d'un minéral majoritaire (comme le calcaire pur, constitué de très petits cristaux de calcite) et les roches pluriminérale qui sont un agrégat de plusieurs minéraux (tel le granite, constitué de trois sortes de minéraux : le feldspath, le quartz et du mica).

2 - En fonction de l'homogénéité

On distingue les roches dures et cohérentes (pierre), les roches plastiques (argiles), les roches meubles (arènes, sables,...), les roches fluides ou liquides (huiles, pétroles,...) et les roches fluides ou gazeuses (gaz,...).

3 - En fonction de leurs modes et milieux de formations

a - Roches sédimentaires (voir ci-dessous)

b - Roches métamorphiques

Les roches métamorphiques (ou cristallophylliennes) sont formées par la transformation de roches ignées ou sédimentaires sous l'effet de température et/ou de pressions élevées. Deux grands types de métamorphisme produisent la majorité des roches métamorphiques : le métamorphisme de contact et le métamorphisme régional. Un troisième type est plus restreint : le métamorphisme de choc.

c - Roches magmatiques

Les roches magmatiques (également appelées roches ignées ou roches éruptives), se forment quand un magma se refroidit et se solidifie, avec ou sans cristallisation complète des minéraux le composant. Cette solidification peut se produire :

★ en profondeur, cas des roches magmatiques plutoniques (dites aussi « intrusives ») qui se sont refroidies en profondeur, lentement et sans dégazage dans la chambre magmatique.

★ à la surface, cas des roches magmatiques volcaniques (dites « extrusives » ou « effusives ») qui se sont refroidies brutalement en surface après une éruption volcanique.

Remarque : Contrairement aux roches sédimentaires (roches exogènes), les roches métamorphiques et les roches magmatiques sont qualifiées d'endogènes car elles se sont formées en profondeur.

Les roches hydrothermales, sont aussi des roches endogènes, formées à partir de solutions ou de gaz à haute température, en relations variables avec des magmas.

C – Roches sédimentaires

1 - définition

Ce sont des roches exogènes, c'est-à-dire qui se forment à la surface de la Terre. Elles constituent 75 % des formations que nous observons à la surface de la terre. D'une manière globale, ces roches résultent de l'accumulation en couches et du compactage de débris d'origine minérale (dégradation d'autres roches), organique (restes de végétaux ou d'animaux, fossiles).

La caractéristique principale des roches sédimentaires est de se déposer le plus souvent en couches parallèles (dépôts stratifiés en lits successifs ou strates) d'épaisseur et de composition variables.



E.M. EL FALEH

2 - cycle sédimentaire

Le cycle sédimentaire comporte plusieurs étapes : érosion et altération, transport, sédimentation et diagenèse. Ce cycle, qui sera détaillé dans ce cours, est schématisé dans la figure 13.

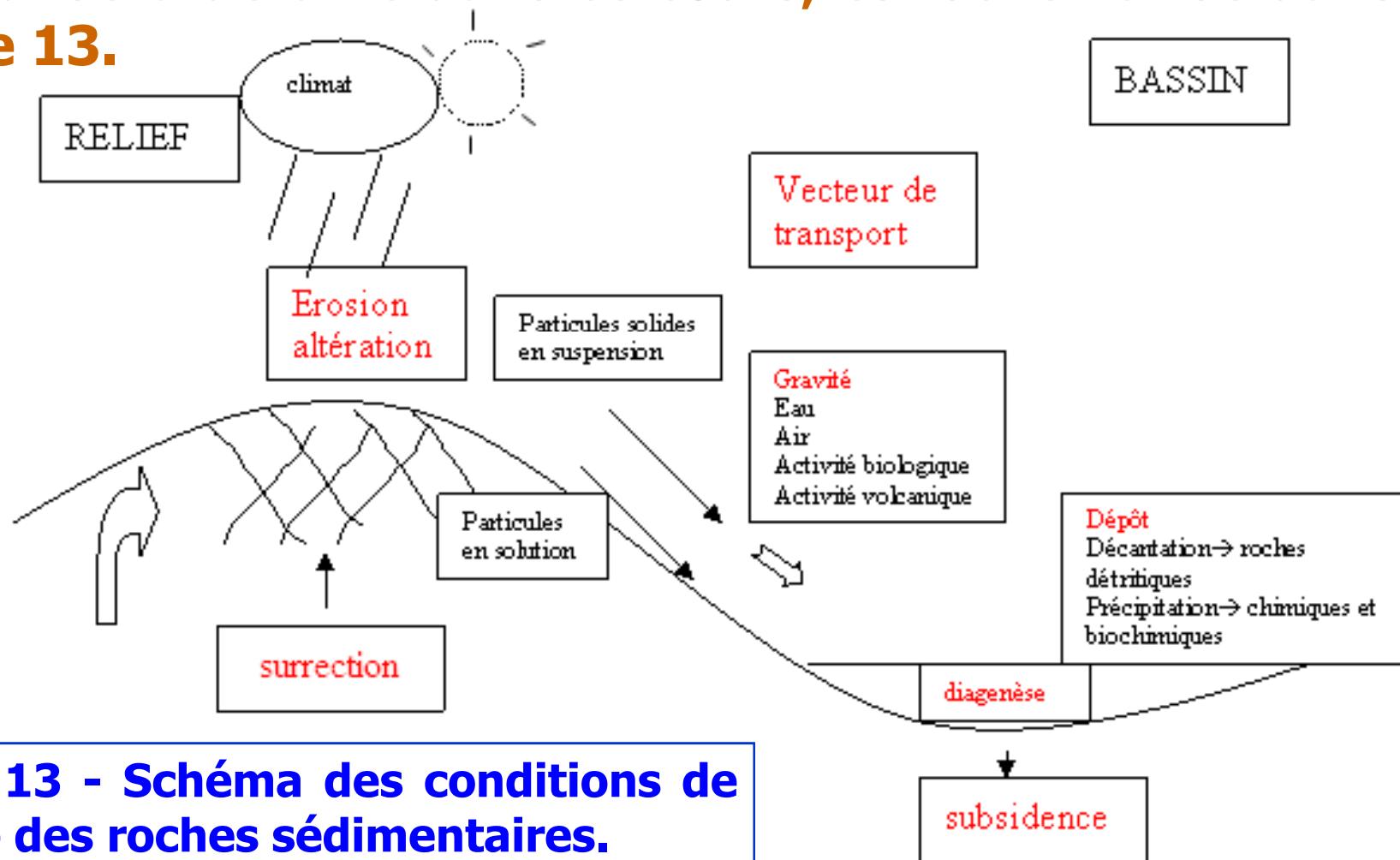


Figure 13 - Schéma des conditions de genèse des roches sédimentaires.

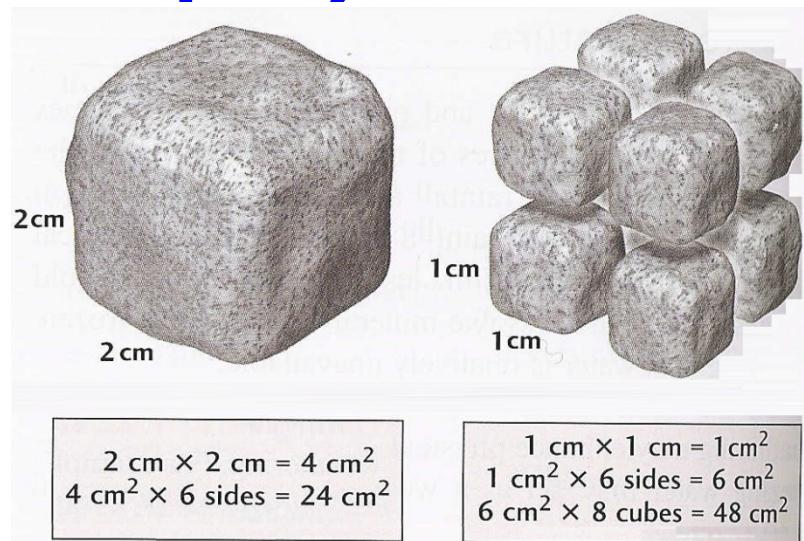
II - PROCESSUS DE FORMATION DES ROCHES SEDIMENTAIRES

Le processus de formation des roches sédimentaires commence par l'altération, qui regroupe les processus physiques, chimiques et biologiques qui conduisent de la roche saine à ses produits de décomposition.

D'une manière générale, on distingue deux types d'altérations : l'altération physique et l'altération chimique.

A - Altération physique (mécaniques)

L'altération physique (ou mécanique) ne change pas la composition chimique de la roche. Elle modifie les rapports surface/volume (schéma, ci-contre) en facilitant ainsi l'altération chimique.

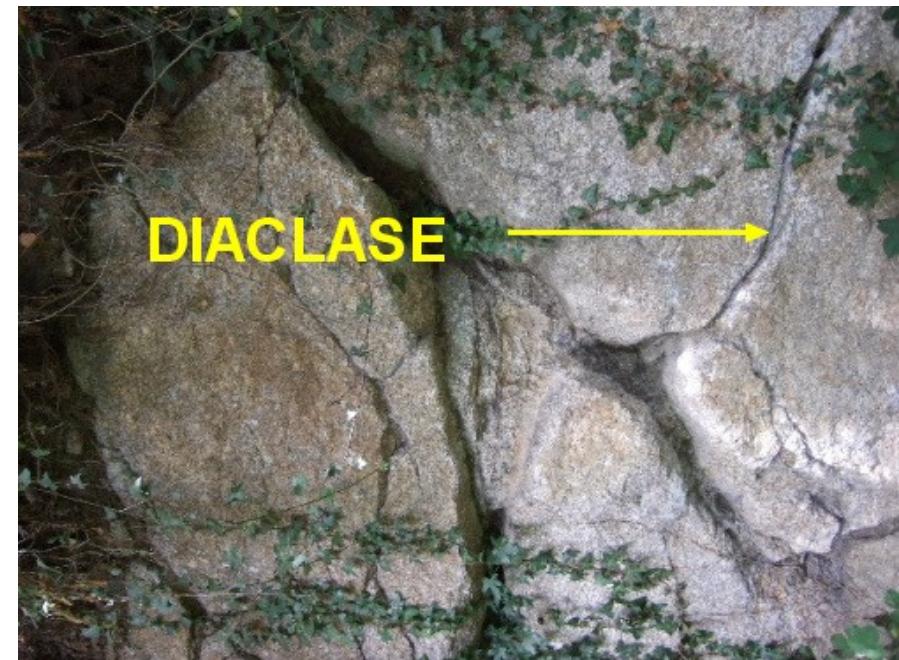


1 - Désagrégation physique (mécanique)

Rares sont les roches formant un bloc parfaitement uni. De nombreuses discontinuités parsèment généralement les roches. Ce sont :

- ❖ des **diaclasses** (schéma, ci-contre), cassures dues à des déformations profondes ;
- ❖ des **failles**, cassures accompagnées d'un déplacement ;
- ❖ des **joints**, discontinuités entre deux strates dues à des variations lors la formation d'une roche sédimentaire ;
- ❖ **porosité**, les minéraux ou particules ne forment pas un bloc homogène mais laissent des pores entre eux.

L'altération va agir principalement au niveau de ces surfaces de discontinuité.



2 - Variation de la température

Les variations brutales de température (par exemple, entre le jour et la nuit) peuvent être à l'origine de la désagrégation physique d'une roche en agissant sur sa cohésion. Elles entraînent des dilatations et des contractions successives. Soumise à ces variations de volume incessantes, la roche se fissure puis éclate. C'est la thermoclastie. La fissuration est plus importante dans les roches composées de minéraux différents n'ayant pas le même coefficient de dilatation. Des microfissures apparaissent alors à la limite entre les minéraux. Ce phénomène de thermoclastie est surtout observé dans les régions de forte amplitude thermique (climat continental, polaire, désert, haute montagne)



3 - Action du gel

Le gel est un principal agent d'érosion dans les hautes montagnes. Dans ces zones, soumises au gel, interviendra le phénomène de cryoclastie : l'eau qui s'infiltre dans les diaclases augmentera de volume lors des périodes de gel, participant ainsi à l'élargissement des diaclases et à la fragmentation de la roche. Ceci forme des éboulis qui sont entraînés par les glaciers et les eaux de ruissellement.



4 - Action des végétaux

Le développement des racines peut entraîner l'agrandissement des fissures au sein des roches et faciliter leur altération. De plus, les racines peuvent également favoriser l'altération chimique.



B - Altération chimique

Contrairement à l'altération physique, l'altération chimique modifie la composition chimique de la roche car l'eau y intervient.

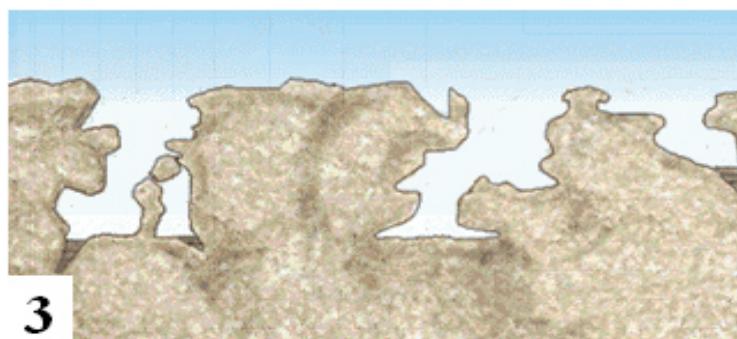
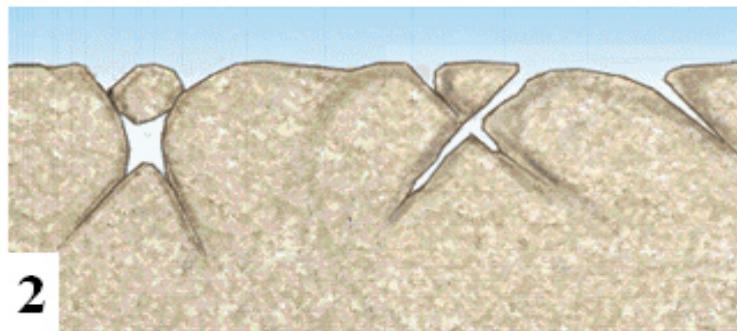
De par ses propriétés et son abondance relative, l'eau se trouve à la base de toutes les altérations exogènes des roches. Les molécules d'eau sont chargées électriquement et se comportent comme des dipôles. Les propriétés de l'eau vis-à-vis des minéraux s'expliquent essentiellement par cette propriété. Pure, elle se comporte comme un acide faible par les ions H⁺ libres qu'elle renferme.

Les réactions mettant en jeu la molécule d'eau sont de différents types et ont lieu essentiellement en climat humide. Les éléments solubles qui en résultent sont lessivés et les parties insolubles restent sur place, se recombinant pour former de nouveaux minéraux, principalement des argiles. Ces réactions sont : la dissolution, les oxydations/réductions, l'hydratation, la décarbonatation et l'hydrolyse.

1 - Dissolution

La dissolution est d'autant plus forte que la solubilité des minéraux est élevée ; les plus vulnérables étant les minéraux des roches salines (sel gemme, potasse, gypse). Le résultat de cette dissolution aboutit à la formation de reliefs originaux :

❖ **Lapiés** : Un lapiés (du latin *lapis*, pierre) est une forme de surface du modelé karstique. Il s'agit d'une surface de roches calcaires (ou dolomitiques) creusée par dissolution de trous, de cannelures ou de rigoles, larges de 1 cm à 1 m, séparées par des lames tranchantes (schéma, ci-contre).



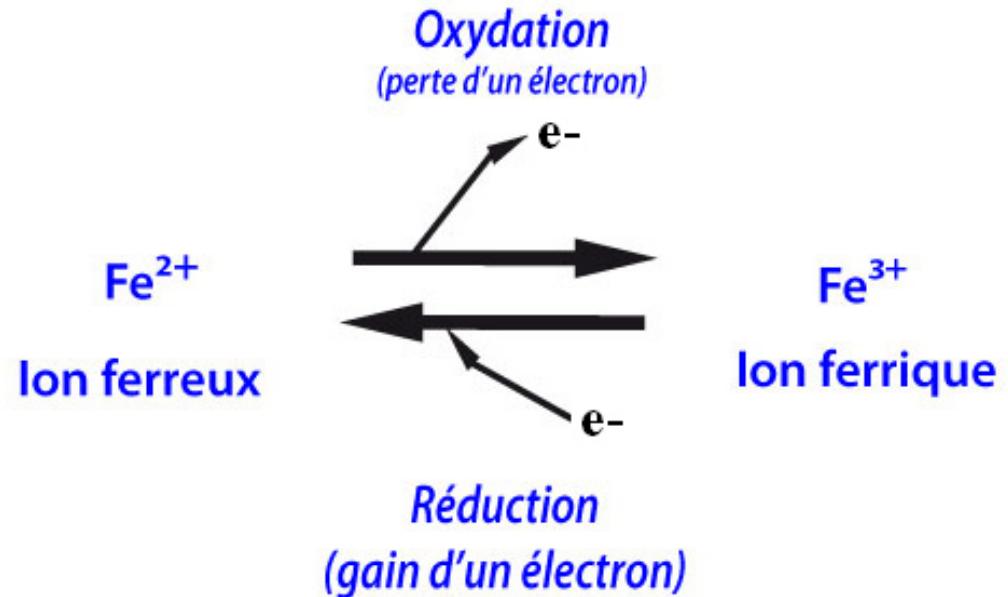
◆ **Dissolution dans du gypse** : Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est une roche exogène, une évaportite, relativement soluble dans l'eau. Dans les zones montagneuses, sa dissolution crée des reliefs particuliers sous forme "d'entonnoirs". L'eau, la neige s'accumulent dans de petites dépressions où la dissolution s'opère, donnant des paysages caractéristiques.



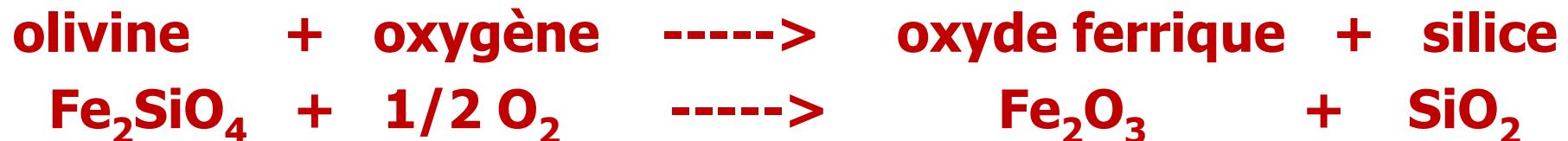
Photographie : Pierre Thomas

2 - Oxydations / réductions

Les oxydations concernent surtout le fer qui passe de l'état ferreux à l'état ferrique.



Exemple pour l'olivine (minéral des roches magmatiques, comme le basalte) :



Les réductions sont plus rares : elles se déroulent dans les milieux hydromorphes (saturés d'eau de façon permanente ou périodique) et produisent en particulier du fer ferrique au fer ferreux soluble.

3 - Hydratation

Il s'agit de l'incorporation de molécules d'eau à certains minéraux peu hydratés. Elle produit un gonflement du minéral et donc favorise la destruction de la roche. C'est le cas de des argiles (smectites) et des ferro-magnésiens (pyroxènes, amphiboles) en serpentine, chlorite, épidote.

4 - Décarbonatation

Elle produit la solubilisation des calcaires et des dolomies sous l'action du CO₂ dissous dans l'eau.



Carbonate
de calcium
insoluble

Dioxyde de
carbone

Eau

Bicarbonate de
calcium soluble

Il en résulte des paysages particuliers qui se rencontrent, le plus souvent, dans les régions où le sous-sol est constituée surtout de roches carbonatées : calcaires et dolomies. Il s'agit des reliefs karstiques (fig. 14). Le mot «Karst » vient de Kras, région de Slovénie où ce relief est bien présent ; il fut germanisé en Karst lors de l'intégration du pays à l'Empire Austro-hongrois.

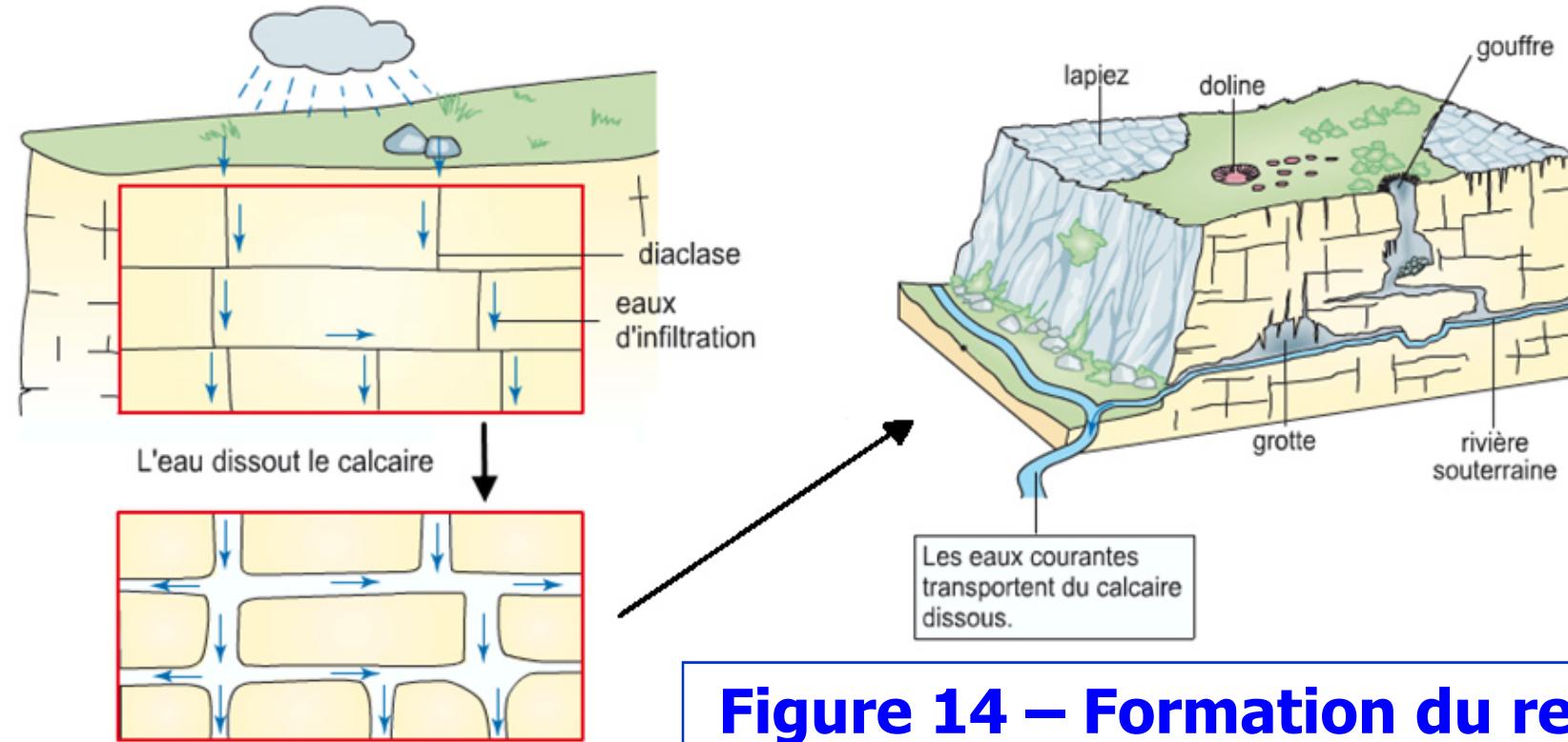


Figure 14 – Formation du relief karstique.

Dans les reliefs karstiques, l'eau, plutôt que de couler en surface comme dans d'autres régions, s'infiltre dans le sous-sol. Ce relief se rencontrera le plus souvent dans le cas où le sous-sol est constituée surtout de roches carbonatées : calcaires et dolomies (plus de détail sur ce type de relief vous sera donné dans un autre cours de ce semestre).

Les paysages karstiques sont caractérisés par des formes de corrosion de surface mais aussi par des formations superficielles et souterraines étonnantes. Comme exemple de ces formations, on cite les lapiez, les dolines, les gouffres, les grottes,....

Les lapiez (ou lapiaz) du latin : lapis (la pierre), sont des rigoles (petites tranchées) de dissolution plus ou moins parallèles, tracées sur les sols calcaires par l'action de l'eau (ruissellement) ou par les alternances de gel et de dégel. La roche est comme déchiquetée, dentelée, avec des aspérités coupantes parfois, des trous, des crevasses, des rainures.....

Les dolines sont des dépressions plus ou moins arrondies de la surface dans laquelle le calcaire a été dissout par l'eau de pluie, provoquant l'affaissement du sous-sol. Les argiles de décalcification (résidus de la dissolution chimique du calcaire) s'accumulent au fond de ces dolines, retenant l'eau et rendant ces surfaces fertiles et cultivables. Si le fond de la doline continue à se creuser, on peut avoir formation d'un gouffre ou aven.

5 - Hydrolyse

C'est une mise en solution dans l'eau ou hydrolyse. Elle est définie comme étant la destruction d'un édifice moléculaire complexe en édifices moléculaires plus simples sous l'influence de l'eau. En effet, cette destruction se fait par les ions H^+ libres de l'eau agissant comme un acide faible. L'hydrolyse transforme les roches cristallines en silicates hydratés (argiles) ; elle constitue la principale réaction d'altération.

La molécule d'eau est considérée comme un dipôle : positif à une extrémité, négatif à l'autre. A la surface des minéraux, certaines molécules sont en partie brisées et libèrent un certain nombre de valences. Ces valences attirent les dipôles d'eau qui vont pouvoir arracher des ions à la charpente cristalline. Cette extraction dépend du potentiel ionique Z/R des ions. Z/R est le rapport entre la charge Z et le rayon ionique R . Dans des conditions de pH et de température normales, la force d'arrachage et donc la solubilité des ions dépend, avant tout, du potentiel ionique. En fonction du potentiel ionique Z/R , le diagramme de Goldschmidt (fig. 15) classe les insolubles et les solubles. La plupart des éléments chimiques sur Terre sont insolubles, ils n'aiment pas l'eau!

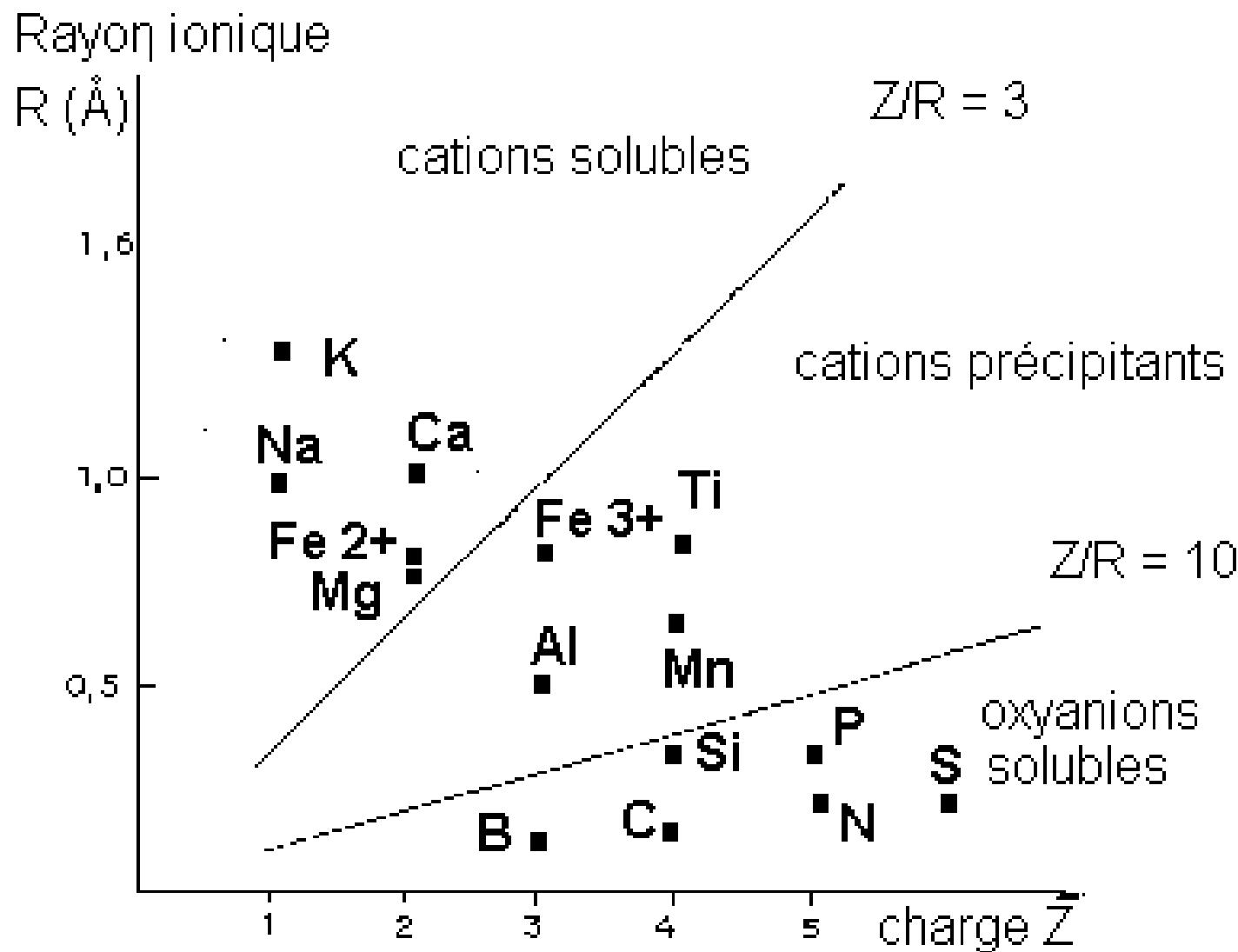


Figure 15 - Diagramme de Goldschmidt.

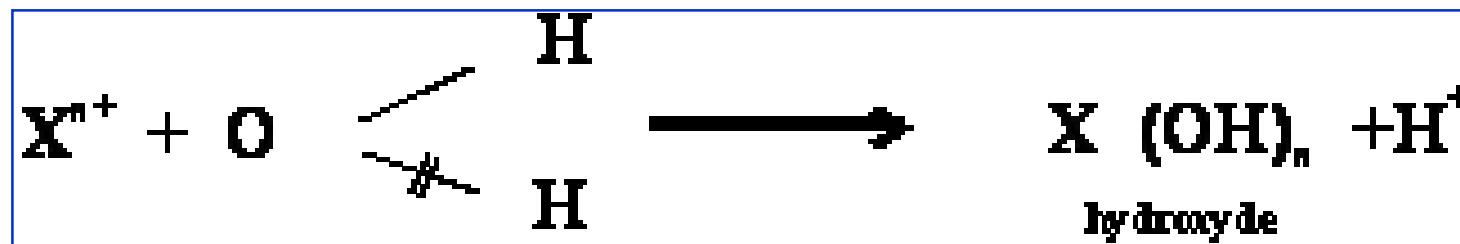
Grâce à ce diagramme, on peut réaliser trois principales catégories (en mettant de coté la catégorie des cations anti-stoke, $Z/R < 1$)

❖ **$Z/R < 3$ (domaine des cations solubles)** : ces cations s'hydratent au contact de l'eau et prennent alors une taille plusieurs fois supérieure à leur rayon ionique.

Exemples: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} (rayons ioniques : 0,8 Mg, 0,95 Na, 0,98 Ca) présents dans les calcaires, les dolomies,

Il est donc souvent question des ions sodium, calcium et magnésium lorsqu'il s'agit de caractériser la salinité de l'eau.

❖ **$3 < Z/R < 10$ (domaine des précipitations d'hydroxydes)** : les cations sont suffisamment attractifs pour rompre la molécule d'eau.

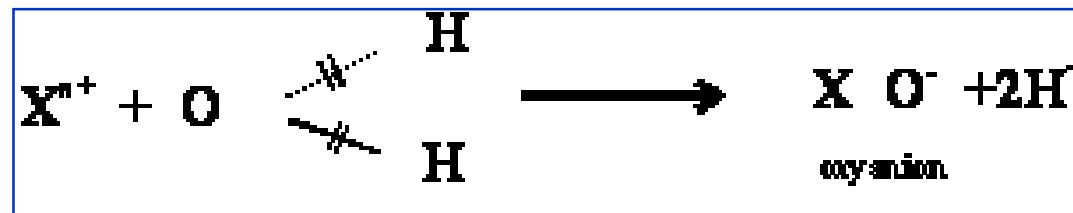


Ces cations précipitent à l'état d'hydroxydes insolubles, qui sont à l'origine de gisements métallifères résiduels.

Exemples : Fe^{3+} , Al^{3+} qui donnent respectivement FeOOH (limonite) et AlOOH (boehmite présente dans la bauxite).

De tels ions sont les premiers à être lessivés dans les cours d'eau lorsque leur milieu ambiant s'acidifie, principalement en raison des pluies d'acide ou autres

❖ $Z/R > 10$ (domaine des oxyanions solubles) : les cations attirent l'anion oxygène, du dipôle formé par la molécule de l'eau, au point de se l'accaparer. Des ions H^+ sont libérés.



Exemples : C^{3+} , Si^{4+} qui donnent respectivement les carbonates et les silicates, dont le globe terrestre est rempli.

On trouve aussi dans cette catégorie les phosphates, nitrates et sulfates.

Tous ces oxyanions sont très mobiles. Ils précipitent volontiers avec les cations solubles, sous forme par exemple de carbonate de calcaire CaCO_3 , qui donne le tartre !!!

Le bilan général d'une réaction d'hydrolyse peut s'écrire :

Minéral primaire + Eau -----> Minéral secondaire + Solution secondaire

L'hydrolyse peut être totale ou partielle.

☞ **L'hydrolyse totale : le minéral est détruit en plus petits composés possibles (hydroxydes, ions).**

Exemple de l'hydrolyse totale d'un feldspath sodique, l'albite (aluminosilicate de sodium, constituant principale des roches magmatiques) :



**Albite + eau -----> gibbsite + [acide silicique + ions]
précipité solution de lessivage**

☞ **L'hydrolyse partielle : la dégradation est partielle et donne directement des composés silicatés (argiles). Ces composés diffèrent selon les conditions de milieu (abondance de l'eau).**

Exemple de l'hydrolyse partielle d'un feldspath sodique, l'albite :



Albite + eau \longrightarrow **argile (kaolinite) + [acide silicique + ions]**
solution de lessivage

Le bilan général d'une réaction d'hydrolyse peut s'écrire :

Minéral primaire + Eau \longrightarrow **Minéral secondaire + Solution de lessivage**

Exemple : Altération d'un feldspath calcique (aluminosilicate de calcium, constituant principale des roches magmatiques) :



Minéral primaire

Eau

Minéral secondaire
(argile)

Solution de lessivage

D'une manière générale, on distingue trois types d'altérations chimiques (fig. 16) selon la pluviométrie, le drainage, c'est-à-dire l'intensité des phénomènes d'hydrolyse et de lixiviation (entraînement des composés solubles de la phase migratrice) :

❖ **La bisiallitisation (Si, Al, cations)**



❖ **La monosiallitisation (Si, Al) $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$;**

❖ **L>Allitisation (Al) $\text{Al}(\text{OH})_3$.**

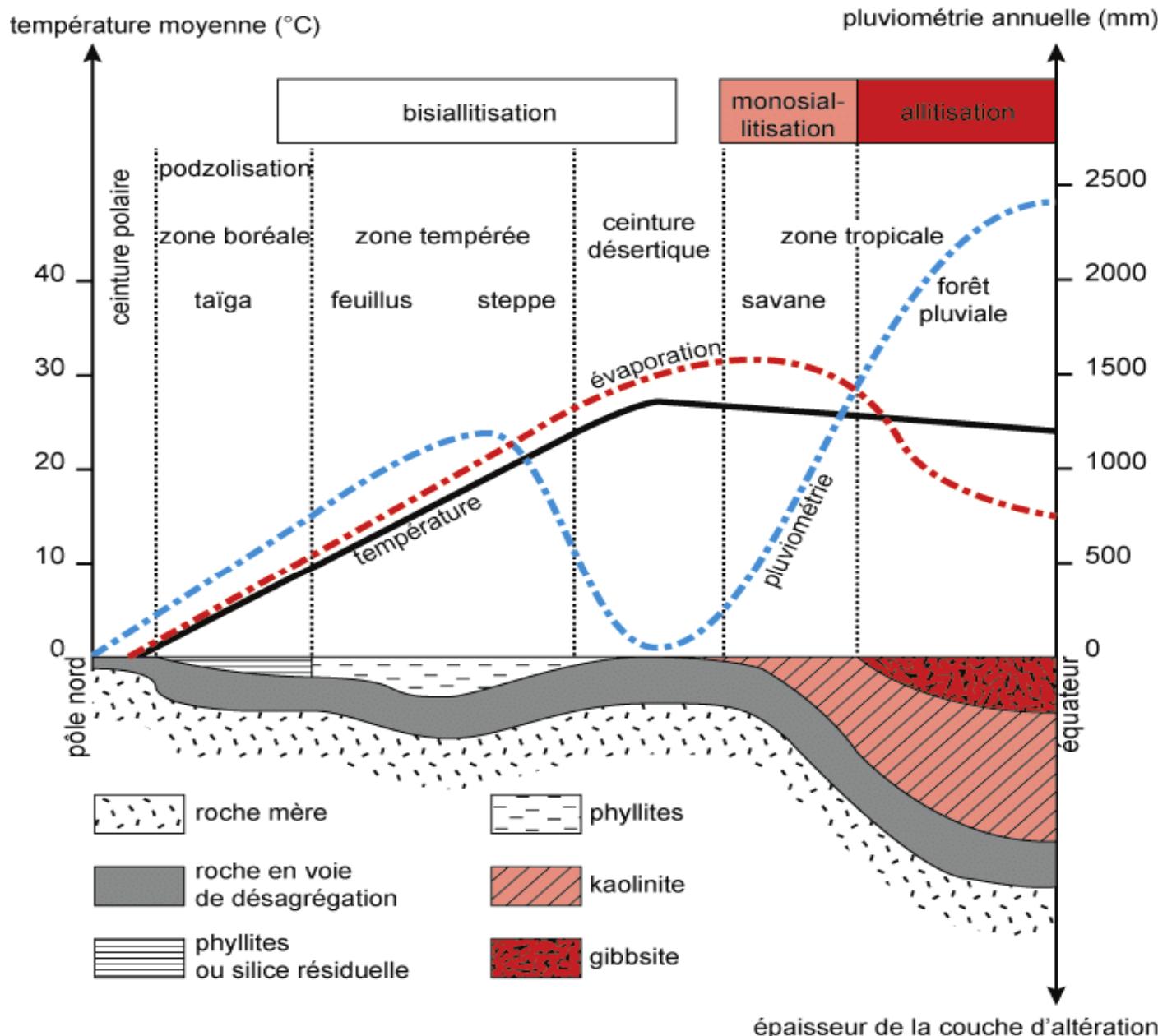


Figure 16 - Types d'altérations chimiques et zonation climatique.

- ❖ La bisiallisation : Les cations basiques et la silice sont incomplètement exportés. La silice réagit avec la totalité des composés hydroalumineux pour donner des argiles comme les smectites (2/1).
- ❖ La monosiallisation : Les cations basiques sont entièrement exportés. Une partie de la silice non exportée réagit avec la totalité des composés hydroalumineux pour donner des argiles de type la kaolinite (1/1) argiles électriquement neutres.
- ❖ L>Allitisation : La phase migratrice (cations basiques et silice) sont entièrement exportés, seul l'aluminium sous forme de $\text{Al}(\text{OH})_3$, AlOOH reste en place (formation de bauxite).

L'eau de pluie pénètre dans le sous-sol granitique en circulant le long des fractures horizontales et verticales (diaclasses) qui délimitent des blocs anguleux de taille variable. En s'infiltrant, cette eau provoque la destruction partielle ou totale de certains minéraux du granite par hydrolyse (réaction chimique qui aboutit à la transformation des minéraux d'une roche par l'eau).

6 - Altération et formation du sol

a - Définition

Le sol est la partie la plus superficielle de l'écorce terrestre, à l'interface entre géosphère, biosphère et atmosphère. Il possède des constituants minéraux, venant de l'altération de la roche-mère, des constituants organiques, venus de la décomposition d'êtres vivants, et des constituants gazeux circulant dans ses interstices.

b - Constituants et propriétés du sol

Les principaux constituants du sol sont de quatre types : constituants organiques (débris d'organismes végétaux par exemple), constituants minéraux (sable, argile...), des gaz qui circulent dans les interstices du sol, et enfin la " solution du sol", formée d'eau et d'ions. A partir de là, un sol va avoir certaines caractéristiques qui peuvent être déterminer par des analyses au laboratoire (analyses physico-chimiques) :

- **texture** : composition granulométrique du sol, c'est à dire la proportion de chacun de ses constituants solides (argiles, sables, graviers...) , qui ont des tailles différentes.
- **structure** : façon dont ses constituants sont agencés les uns par rapport aux autres. Dans un sol brun, on a des agrégats de sable et de complexe argilo-humique qui peuvent être agencés de façon plus ou moins fragmentée.
- **porosité** : volume total des espaces laissés libres entre les agrégats ou les particules solides. Elle conditionne la circulation de l'eau, des gaz et de certains animaux dans le sol.
- **perméabilité du sol** : dépend de la structure du sol, c'est sa capacité à laisser passer l'eau vers les couches inférieures.
- **capacité de rétention en eau** : quantité d'eau retenue par le sol et soit utilisable par les plantes, soit liée à des particules solides par des forces physiques qui empêchent cette utilisation.

C – Principaux horizons du sol

Le sol apparaît, s'approfondit et se différencie en strates superposées, les horizons, qui forment le profil pédologique. Sur une coupe de sol, ces horizons se distinguent essentiellement les uns des autres par des critères :

- ★ de couleur qui traduisent des variations en quantité et en nature des constituants organiques et des oxy-hydroxydes de fer ;
- ★ de texture qui traduisent des variations de composition granulométrique ;
- ★ de structure qui traduisent des variations de mode d'assemblage des constituants minéraux et organiques.

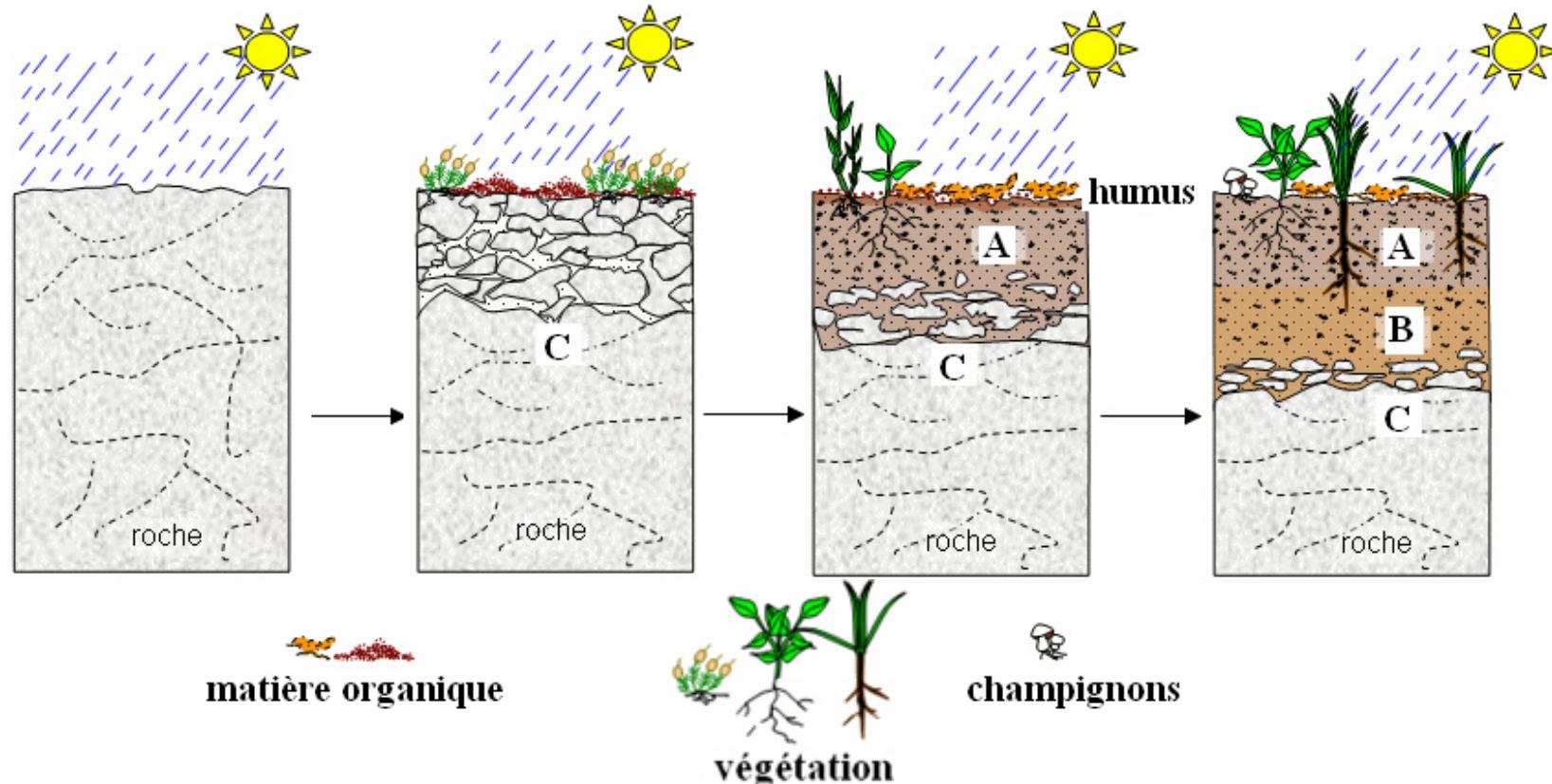
Les principaux horizons sont les suivants :

- ◆ horizon A : horizon de surface à matière organique (débris de végétaux) ;
- ◆ horizons B : horizons intermédiaires apparaissant dans les sols évolués ;
- ◆ horizon C : roche peu altérée.

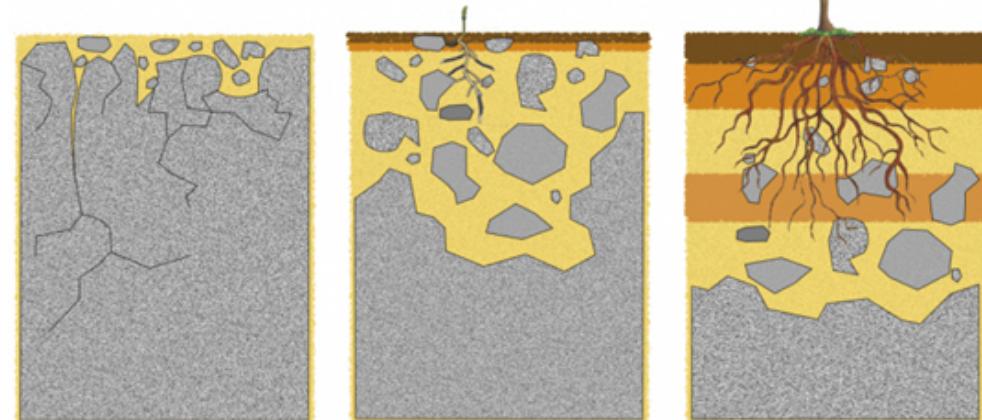
d - Formation d'un sol

D'une manière générale, trois étapes sont nécessaires à la formation d'un sol à savoir (fig. 17) : l'altération superficielle de la roche mère, l'enrichissement en matières organiques issues d'êtres-vivants et enfin, la différentiation des horizons sous l'action des eaux d'infiltration (lessivage). Ainsi, trois facteurs entrant en jeu dans la formation d'un sol :

- ☞ **la roche mère** : ses propriétés physiques ou sa composition chimique ont une influence directe sur la nature et sur la rapidité de l'évolution d'un sol ;
- ☞ **les végétaux** : fournisseurs de l'essentiel de la matière organique présente dans le sol, et qui influencent aussi son évolution ;
- ☞ **le climat**, qui affecte les deux facteurs précédents, par la température en ce qui concerne l'altération de la roche mère, et les précipitations pour les phénomènes de & migration se déroulant au niveau du sol.



**Figure 17 – Altération
d'une roche et
formation du sol.**



C – Erosion

1 – Définition

L'érosion est ensemble des phénomènes qui altèrent, enlèvent les débris et particules issus de l'altération et modifient le relief.



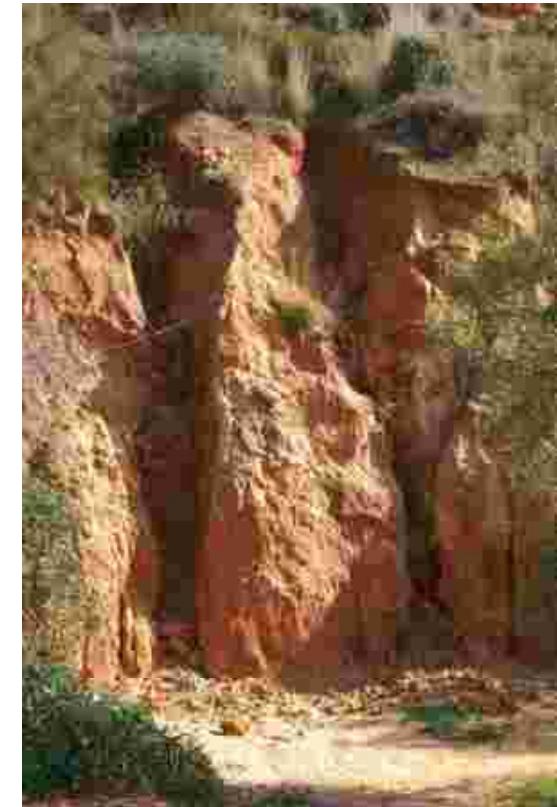
Elle peut également se définir comme étant l'usure du relief sous l'action des agents externes ou internes. Nous envisagerons ci-dessous les plus courantes.

L'altération et l'érosion sont des phénomènes clés dans le cycle des roches.

2 - Principaux agents d'érosion

a - Eau

C'est l'agent d'érosion le plus commun dans le monde. Dans de nombreuses régions, les pluies ont des effets dévastateurs. **Le ruissellement provoque une dénudation des terrains.** Dans des cas extrêmes, cela peut aboutir à un véritable ravinement (photo ci-contre).

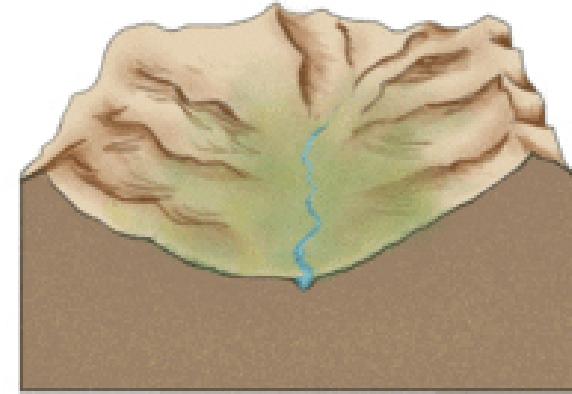


D'une manière globale, il est admis que la vitesse de l'eau est le paramètre prépondérant de l'action érosive du ruissellement superficiel.

Dans le cas des sols, l'érosion hydrique provoque le décapage de la couche superficielle du sol. Ceci provoque la baisse de la production végétale par la diminution du bilan hydrique et la pauvreté en éléments fertilisants.

b – Glace

Si les eaux de ruissellement constituent un agent d'érosion très important, l'eau sous sa forme solide, la glace, est aussi très efficace pour modeler les surfaces continentales.



Les glaciers sont des masses importantes de glace continentale, en mouvement, qui se forment dans les régions froides, en haute montagne ou à des altitudes élevées, où la neige s'accumule et ne se fond pas d'une année sur l'autre (fig. 18). Ils occupent 10% de la surface des continents, mais leur répartition est inégale.



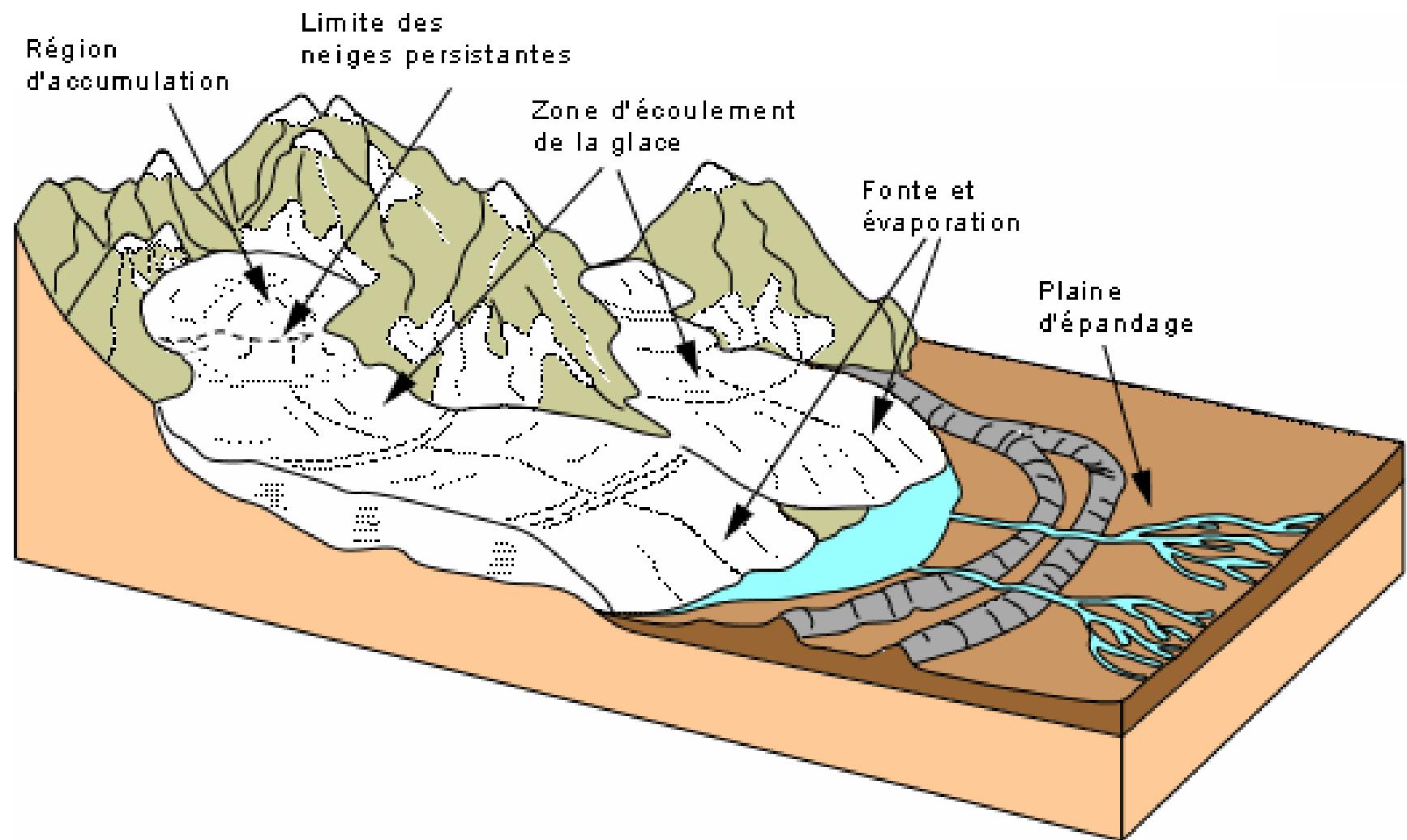


Figure 18 - Accumulation des neiges et formation des glaciers.

Les glaciers façonnent le substrat sur lequel ils s'écoulent, polissant les roches dures, arrachant des débris, les transportant et les abandonnant au terme de leur course : c'est l'érosion glaciaire qui crée des modèles originaux, dont la plupart n'apparaissent qu'après le recul ou la disparition totale des glaciers. L'accumulation des débris transportés par les glaciers porte le nom de moraines (voir Fig. 22, page : transport).



c – Vent

Le sable arraché et transporté par le vent sculpte (نحت) les rochers ; le vent est le principal agent d'érosion en milieu désertique. On parle d'érosion éolienne.

Dans le cas d'un sol, l'érosion éolienne s'installe quand :

- **il existe de vents violents et réguliers durant de longues périodes dans la même direction (vents dominants) ;**
- **il s'agit d'un sol à texture grossière, sableux notamment ;**
- **il existe des reliefs atténués sur des grandes étendues plates ;**
- **le climat a une saison sèche entraînant la dessiccation des horizons superficiels du sol et la disparition du couvert végétal.**

D - Transport

1 - Principaux agents de transport

Les particules sont entraînées par les agents de transport qui circulent à la surface de la Terre à savoir : l'eau (de ruissellement, d'infiltration, des rivières, de la mer), le vent ou la glace (inlandsis, glaciers de montagne).

Ces agents de transport ont une capacité variée de mise en mouvement des particules ou ions et exportation vers des milieux de sédimentation. En général, la possibilité de transport dépend de deux facteurs principaux :

- ❖ la capacité de transport de l'agent de transport.
- ❖ les caractéristiques (taille, densité, cohésion) des particules formées par altération :

- **mobilisation** : évacuation en solution de matière produite par dissolution.
- **ablation** : après altération les particules se trouvent à la surface du sol ou au fond d'une rivière. Elles ne sont entraînées que si l'agent de transport peut vaincre les forces de pesanteur ou de cohésion.
- **enlèvement** : fragmentation et ablation simultanée.

2 - Force des agents de transport (granulométrie et tri)

Par étude de la granulométrie (répartition des éléments selon leur taille), il apparaît que les agents de transport peuvent réaliser un tri variable des particules :

❖ le vent, peu porteur, trie des sédiments éoliens, fins et assez homogènes, mais d'autant plus gros que le vent est fort.

D'une manière globale, le vent n'exerce son action que sur des matériaux de taille bien définie ($< 1 \text{ mm}$). Il existe trois modes différents d'entraînement des particules (fig. 19) :

- ◆ **la saltation** : le mouvement initial des particules du sol est une série de sauts.
- ◆ **la reptation en surface** : les particules de plus grande dimension roulent ou glissent à la surface du sol.
- ◆ **la suspension** : les fines poussières emportées et

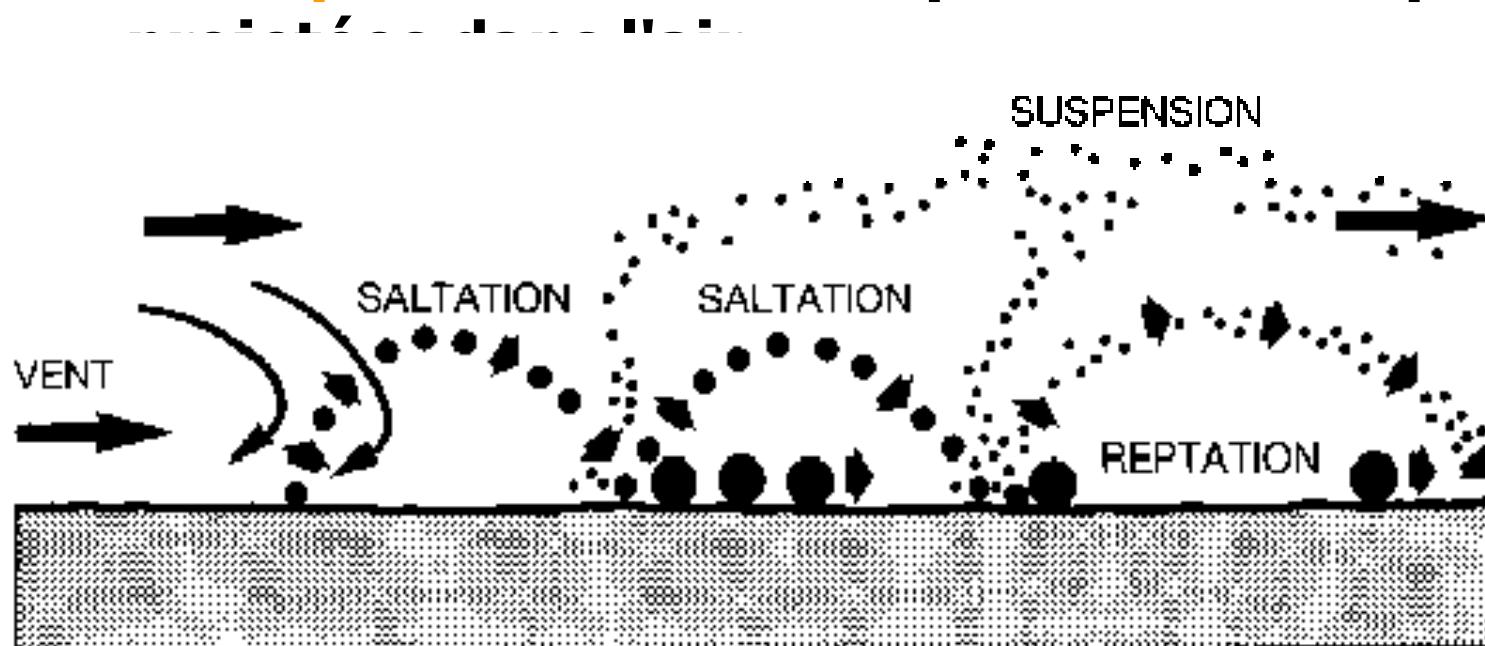


Figure 19 - Différents modes d'entraînement des particules.

❖ Pour l'eau, la taille des particules transportées dépend de la vitesse du courant, et de la nature des particules (fig. 20).

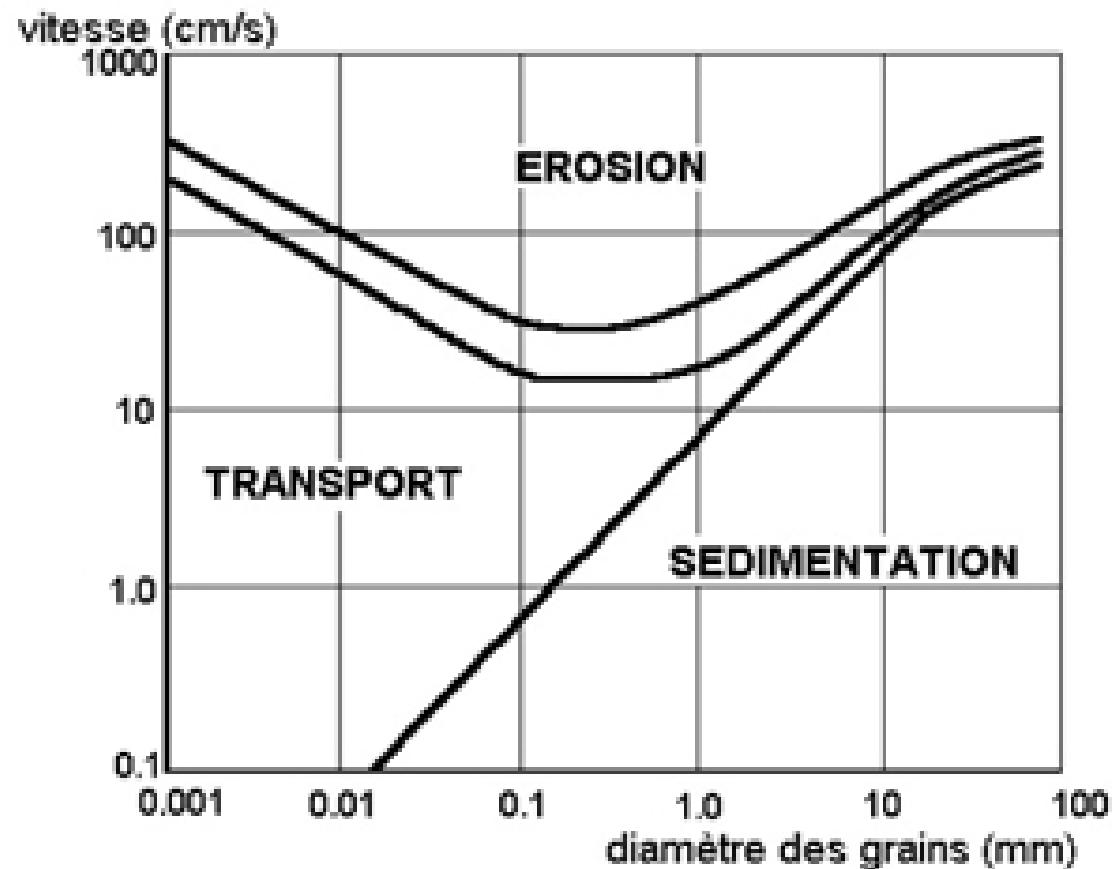
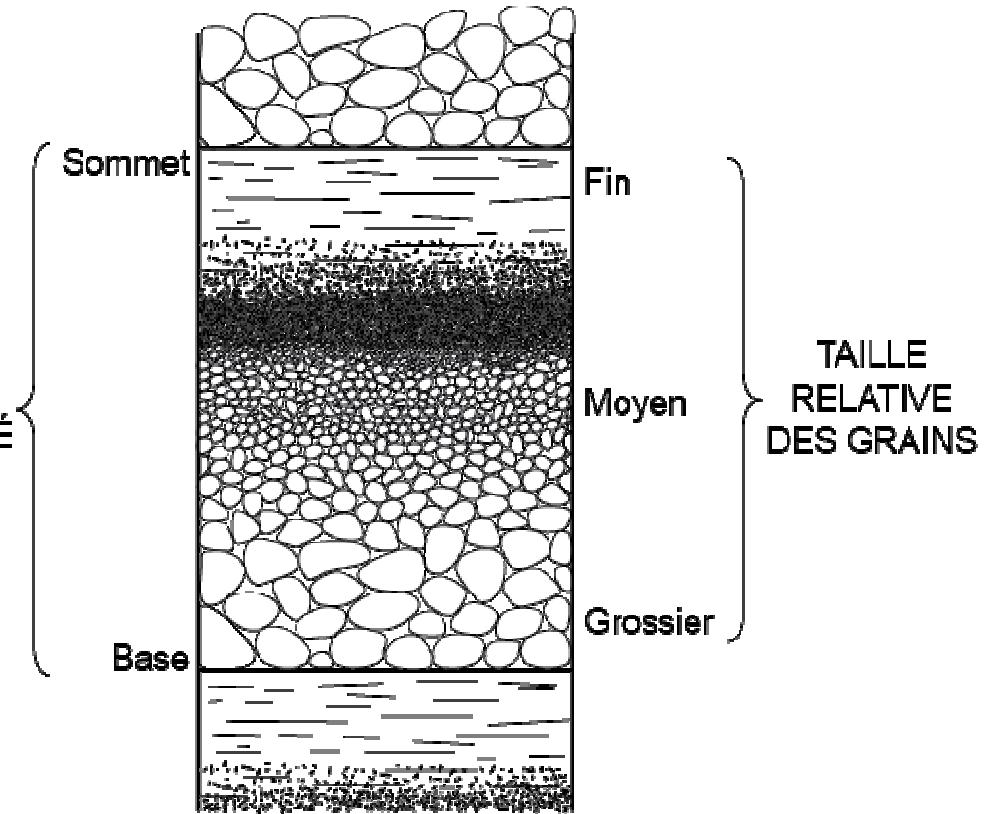


Figure 20 - Diagramme de Hjulström (Les échelles sont logarithmiques). Plus les particules sont grosses, plus il faut un courant rapide pour les transporter. Mais la taille des particules est en relation avec leur nature. Les particules les plus fines (argiles) se comportent comme des particules de plus grande taille, car elles ont tendance à s'agréger en particules plus grosses).

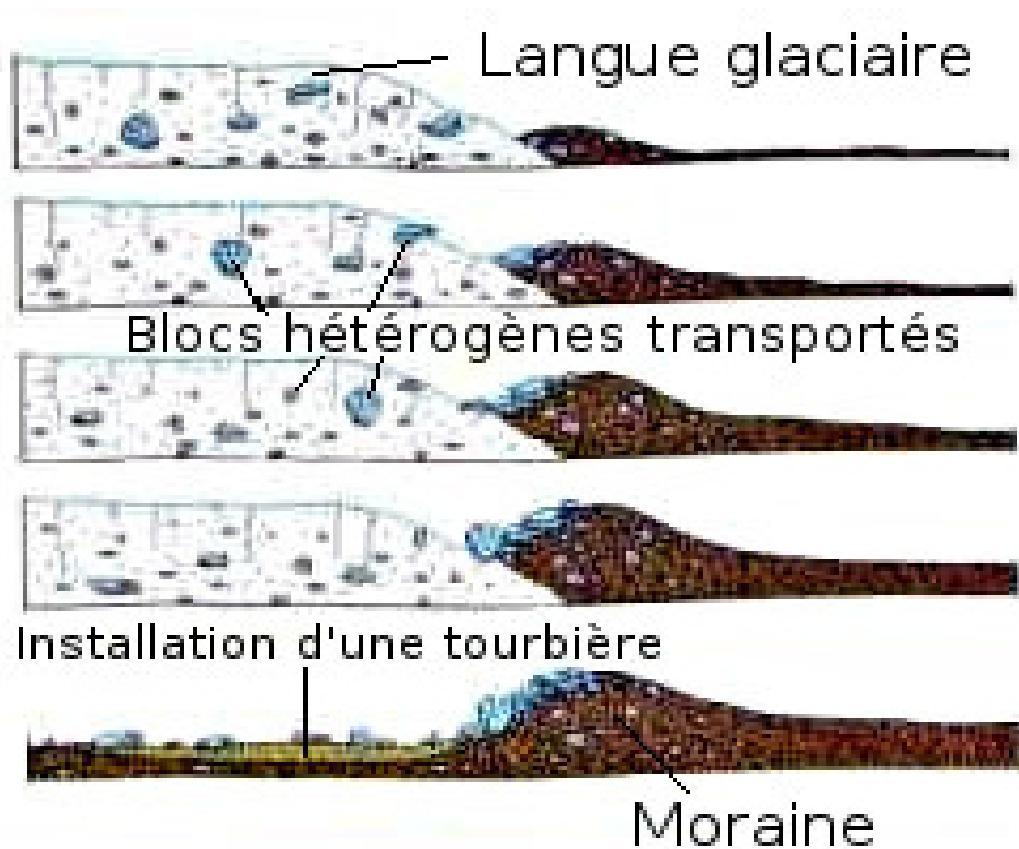
Un courant rapide (torrent) entraîne de plus grosses particules qu'une rivière lente en plaine. Le long du trajet d'un cours d'eau, la vitesse, et donc la charge transportée, varient en fonction du profil du cours d'eau (tendance au ralentissement) et selon la période de l'année (sous nos latitudes, période de crue en hiver ou au printemps, période d'étiage en été). Les particules d'argile, qui sont des paillettes très fines, peuvent s'agglomérer (floculation), elles se comportent alors au transport comme des particules de plus gros diamètre (à gauche du diagramme de Hjulström).

Par ailleurs, le transport par l'eau peut aboutir à un tri, c'est-à-dire un classement des éléments lors de leurs dépôts. Ce tri va se faire principalement selon le poids : plus un élément (particules) est lourd plus il sera déposé rapidement. Lorsque les particules les plus grossières se déposent à la base et les fines vers le sommet (fig. 21), on parle de granoclassement normal (le type le plus courant). Dans le cas contraire, c'est un granoclassement inverse. Notons que le tri peut être aussi horizontal.

**Figure 21 -
Granoclassement normal.**



❖ les glaciers n'opèrent aucun tri, ils transportent des particules de toutes tailles : aussi bien des poussières (la farine glaciaire) que des blocs de plusieurs tonnes, abandonnés au hasard lors du recul des glaciers. L'accumulation de ces particules transportées par les glaciers est nommée moraine (fig. 22).



**Figure 22 –
Transport par les
glaciers.**



3 – Durée du transport (forme des éléments)

L'étude de la forme des grains des éléments détritiques peut donner des indices sur la nature de l'agent du transport et la durée de ce transport :

- ☞ les grains non usés, avec des angles des pointes, indiquent un transport nul ou faible ;
- ☞ Les grains émoussés et luisants indiquent un transport dans l'eau où les grains se polissent en frottant les uns sur les autres ;
- ☞ Les grains ronds et mats indiquent un transport par le vent, où les grains sont projetés les uns sur les autres, piquetant leur surface.

D'une façon globale, plus le transport est long et plus ses effets sont visibles. Les agents de transport, eau et glace, comme les particules, sont soumis à la gravité qui les entraîne ensemble vers des points bas. Ce qui explique que souvent la sédimentation se produit dans l'eau, mais pas toujours !

E - Processus de sédimentation

1 - Sédimentation et formation des strates

Des particules en équilibre dans l'agent de transport vont chuter et se déposer (sédimenter) si l'agent de transport ralentit (concavité d'un méandre, arrivée en plaine d'une rivière) ou disparaît (fonte du front du glacier et dépôt des moraines frontales). En général, la sédimentation (ou la précipitation des éléments transportés en solution) des particules se fait dans un milieu de sédimentation.

Un milieu de sédimentation est un bassin (dépression) où règne un ensemble de facteurs physiques, chimiques et biologiques suffisamment constants pour former un dépôt caractéristique. Quel que soit le milieu : marin, lacustre (lacs), fluviatile (fleuves et rivières) ou terrestre (désert), l'ensemble des particules finit par se déposer en couches superposées formant des dépôts sédimentaires.

Ainsi, le géologue pourra reconstituer les conditions ayant régné dans un milieu ancien à l'aide des caractéristiques de ses dépôts.

Les dépôts sédimentaires se présentent donc sous forme de couches successive, les plus basses couches correspondant aux dépôts les plus anciens. Comme la sédimentation est variable au cours du temps (changements de nature des sédiments, discontinuités physiques, modifications de granulométrie), il se forme des couches distinguables, ou strates (fig. 23), d'épaisseurs et de dénominations variables (banc : couche, surtout si elle est dure ; lit / niveau /assise / horizon : mince ; lamine : très mince, de l'ordre du mm)

Ainsi, le géologue pourra reconstituer les conditions ayant régné dans un milieu ancien à l'aide des caractéristiques de ses dépôts.

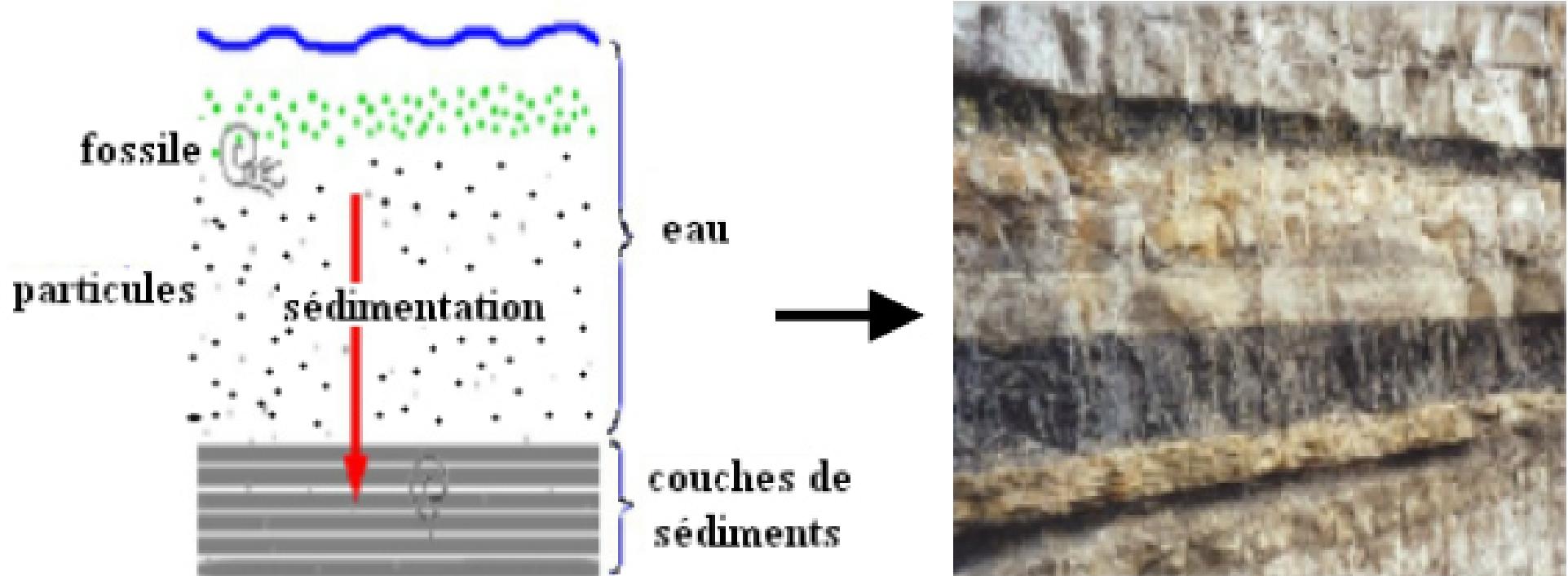


Figure 23 - Sédimentation et formation des strates.

La reconnaissance et la répartition des milieux anciens de sédimentation constituent une des bases de la paléogéographie.

2 - Caractéristiques des milieux de sédimentation

Si on applique le principe de l'actualisme (théorie postulant que les lois régissant les phénomènes géologiques actuels étaient également valables dans le passé), on peut déduire de l'aspect de certaines figures (ou structures) sédimentaires des renseignements sur les caractéristiques du milieu au moment du dépôt des sédiments.

Par exemple, les houles et les courants (chenaux de delta, courants de marée) sont responsables de la formation de certaines figures sédimentaires nommées les ripple-marks (expression anglaise : ripple-mark, de ripple, ride, et mark, marque). **Il arrive que ces dernières (figures sédimentaires) soient conservées et fossilisées (fig. 24).** Pour cela, il faut qu'elles soient enfouies par un dépôt de particules apportées par un nouveau courant moins agressif que le précédent. Si l'intensité de ce nouveau courant n'érode pas les dépôts précédents, les rides seront préservées. Parfois c'est la contre-empreinte (c'est-à-dire son moulage) qui est conservé à la surface inférieure de la couche ultérieure.

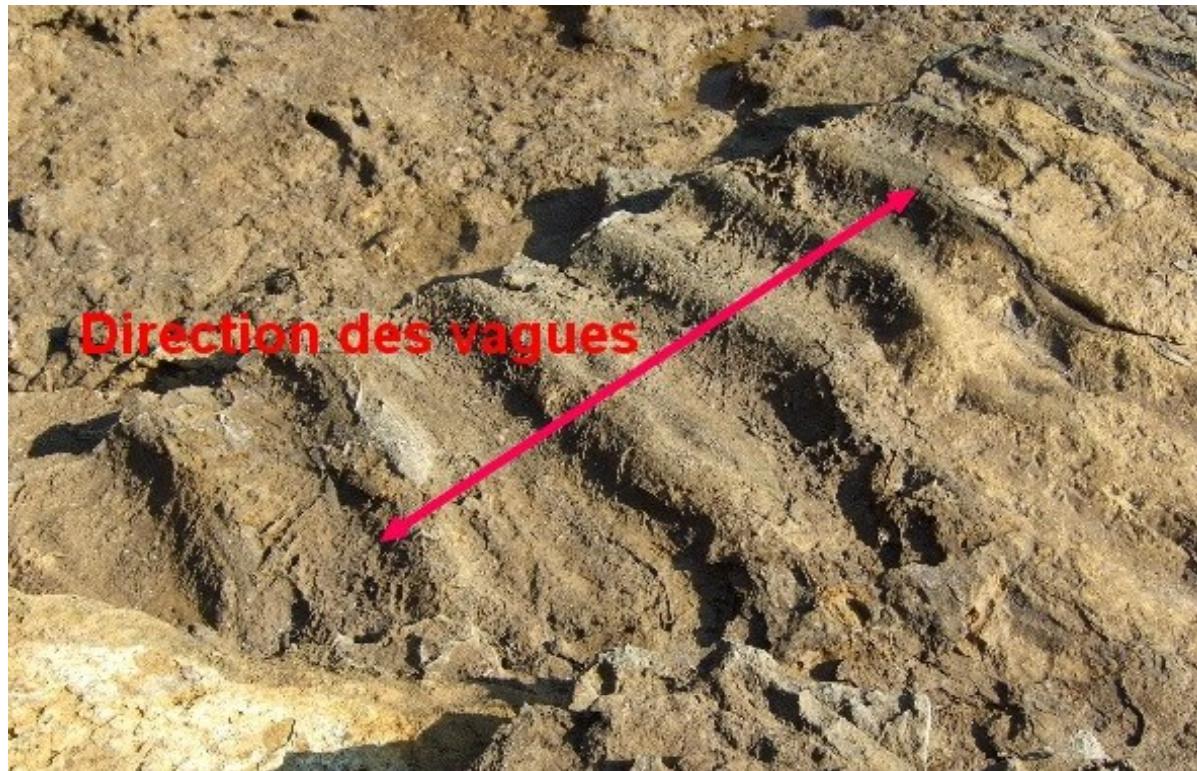


Figure 24 - Ripple-marks fossiles (le sens du courant ou le sens d'arrivée des vagues est perpendiculaire à l'orientation des crêtes des rides ; le côté de la ride en pente douce est tourné du côté de l'arrivée du courant).

Le type de rides qu'on rencontre (rides de houle ou rides de courant) permet d'en déduire le type de milieu de dépôt. Ainsi, en milieu lacustre, les rides de houle seront beaucoup plus nombreuses que les rides de courant. En milieu fluviatile, ce sera l'inverse (plus de détail sur les figures (ou structures) sédimentaires vous sera donné en STU4).

F – Diagenèse

1 – Définition

Les sédiments, une fois déposés, sont généralement meubles et riches en eau. La diagenèse va correspondre à leur transformation chimique, biochimique et physique pour former des roches. En d'autres termes, la diagenèse est la transformation d'un sédiment meuble en une roche compacte. Cette transformation progressive commence dès le dépôt et elle augmente avec le temps et la profondeur.

2 - Quelques agents de diagenèse

- ◆ Activité biologique notamment bactérienne ;
- ◆ Mécanismes physiques : modifications du sédiment sous l'effort de la pression lithostatique ce qui entraîne l'expulsion de l'eau interstitielle d'où une compaction de la roche (voir explication, ci-dessous) ;
- ◆ Transformations chimiques : À cause de l'enfouissement, les conditions de pression et de température augmentent, il y a donc une évolution chimique du minéral qui peut même aller jusqu'au métamorphisme.

Ces agents agissent sur le sédiment qui devient ainsi induré et se transforme en roche.



3 - Principaux processus de la diagenèse

Les processus de la diagenèse sont variés et complexes : ils vont de la compaction du sédiment à sa cimentation, en passant par des phases de dissolution, de recristallisation ou de remplacement de certains minéraux.

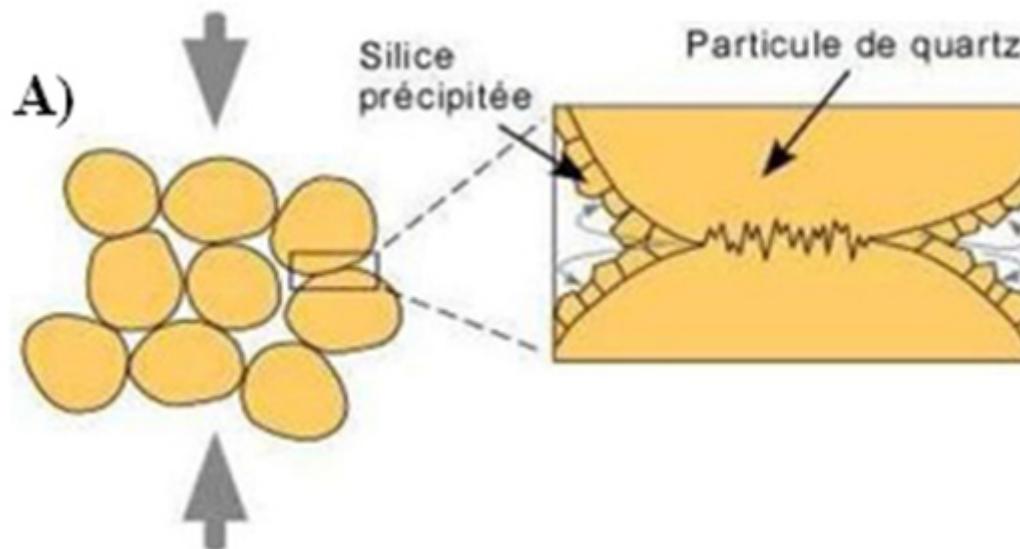
Les processus diagénétiques qui sont principalement responsables du passage de sédiment à une roche sont la compaction et la cimentation.

*** Compaction :** sous la pression de l'eau et/ou des sédiments, les particules sédimentaires se rapprochent, se réarrangent dans l'espace. Le volume diminue avec la baisse de porosité, donc la densité augmente ; si les pores contiennent de l'eau, elle est chassée. La pression des grains les uns contre les autres peut favoriser leur dissolution au point de pression : ils tendent à s'imbriquer (« s'engrener »).

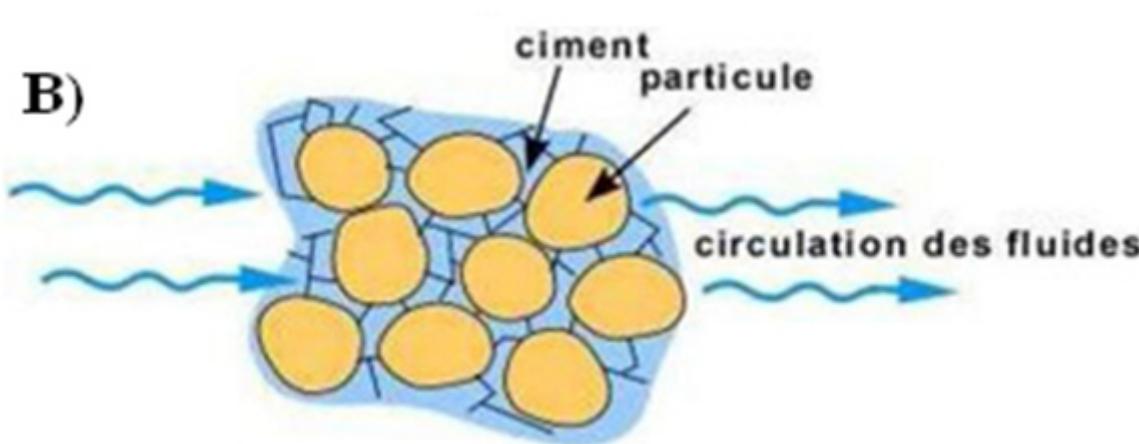
La compaction d'un sédiment peut conduire à sa cimentation. Ainsi, la pression élevée exercée aux points de contact entre les particules de quartz d'un sable amène une dissolution locale du quartz, une sursaturation des fluides ambients par rapport à la silice et une précipitation de silice sur les parois des particules qui cimente ces dernières ensemble.

*** Cimentation : Dans le cas de la compaction et cimentation (fig. 25A), l'eau des interstices est riche en éléments dissous. Si elle atteint la saturation, ces éléments précipitent et cristallisent, formant un ciment qui lie les grains et transforme le sédiment meuble en roche cohérente (exemple, le sable devient grès : figure, ci-contre).**

Dans le cas de la cimentation pré-compaction (fig. 25B), les fluides qui circulent dans le sédiment précipitent des produits chimiques qui viennent souder ensemble les particules (exemple : la calcite qui précipite sur les particules d'un sable et qui finit par souder ces dernières ensemble).



* Dans le cas de la compaction et cimentation (fig. 25A), l'eau des interstices est riche en éléments dissous.



* Dans le cas de la cimentation pré-compaction (fig. 25B), les fluides qui circulent dans le sédiment précipitent des produits chimiques qui viennent souder ensemble les particules

**Figure 25- Cimentation : Compaction et cimentation
A) ; cimentation pré-compaction B).**

Exemple d'un passage du sédiment à la roche (formation du grès, fig. 26) :

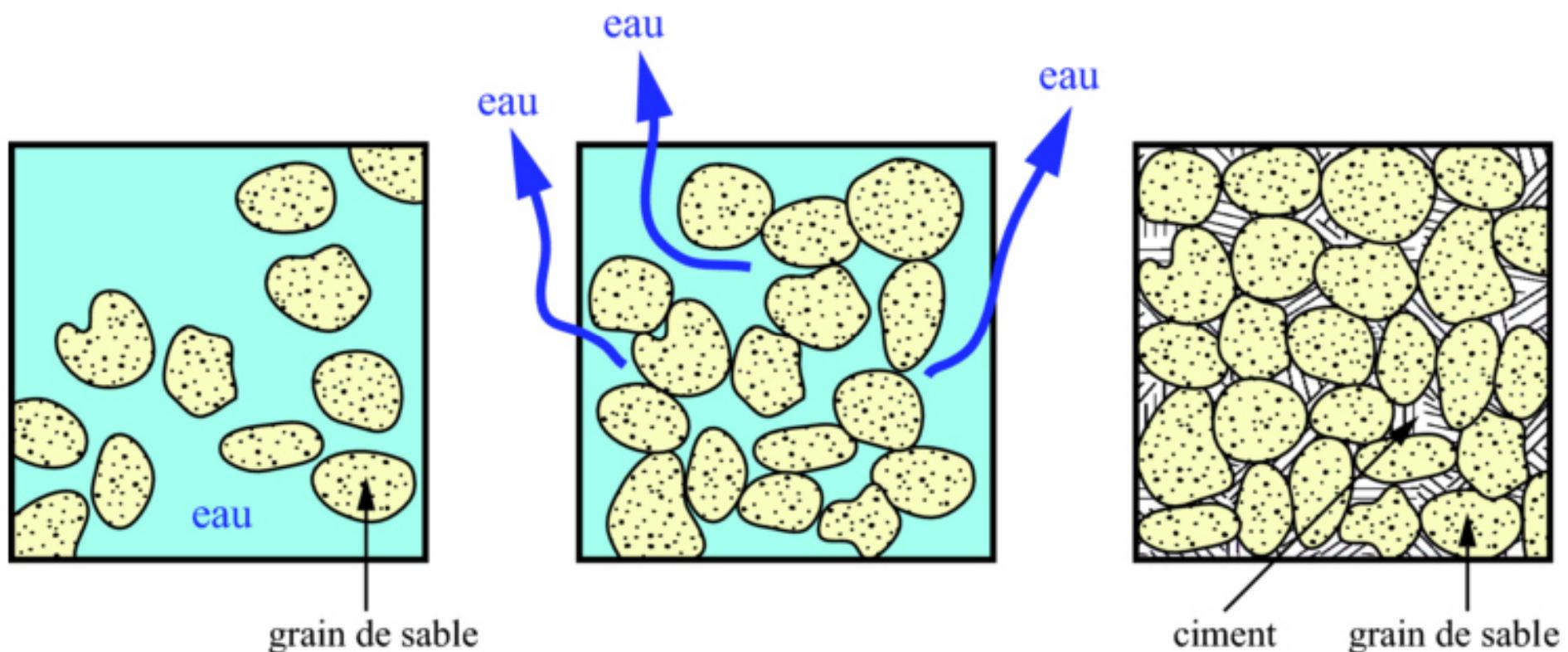


Figure 26 - Passage du sédiment à la roche (exemple : formation du grès).

Le grès est une roche sédimentaire composé de grains de quartz (le constituant le plus dur de l'arène) transportés par l'eau sans être dégradés. Ces grains finissent par se déposer. Pendant la diagenèse, l'eau est chassée. Sous l'effet de la pression élevée exercée aux points de contact entre les particules de quartz d'un sable amène une dissolution locale du quartz, une sursaturation des fluides ambients par rapport à la silice et une précipitation de silice sur les parois des particules qui cimente ces dernières ensemble. Les grains de quartz sont ainsi liés les uns aux autres et forment une roche appelée grès.

Remarque : Le ciment, souvent siliceux ou calcaire, n'a pas forcément la même nature que les grains (par exemple, il existe des grès à grains de quartz et à ciment siliceux, et d'autres à ciment calcaire).

III - Milieux de sédimentation

La sédimentation ou formation des sédiments peut s'effectuer dans divers milieux (continentaux, mixtes, marins). Dans ces milieux, les matériaux qui contribuent à la formation des sédiments peuvent provenir des sources suivantes :

- **apports par les fleuves et par les glaciers ;**
- **précipitation chimique des éléments renfermés en dissolution dans les eaux ;**
- **accumulation des parties squelettiques sécrétées par les organismes;**
- **action des vagues sur les côtes ;**
- **projections volcaniques, apport par les vents, chutes d'origine cosmique ;**
-

A - Milieux continentaux

Dans les milieux continentaux, les sédiments ne forment pas une couche uniforme de sédiments à la surface de la Terre. Ils sont distribués en fonction de leur origine, c'est-à-dire principalement en fonction de la disponibilité des particules sédimentaires détritiques et de leur agent de transport (fig. 27).

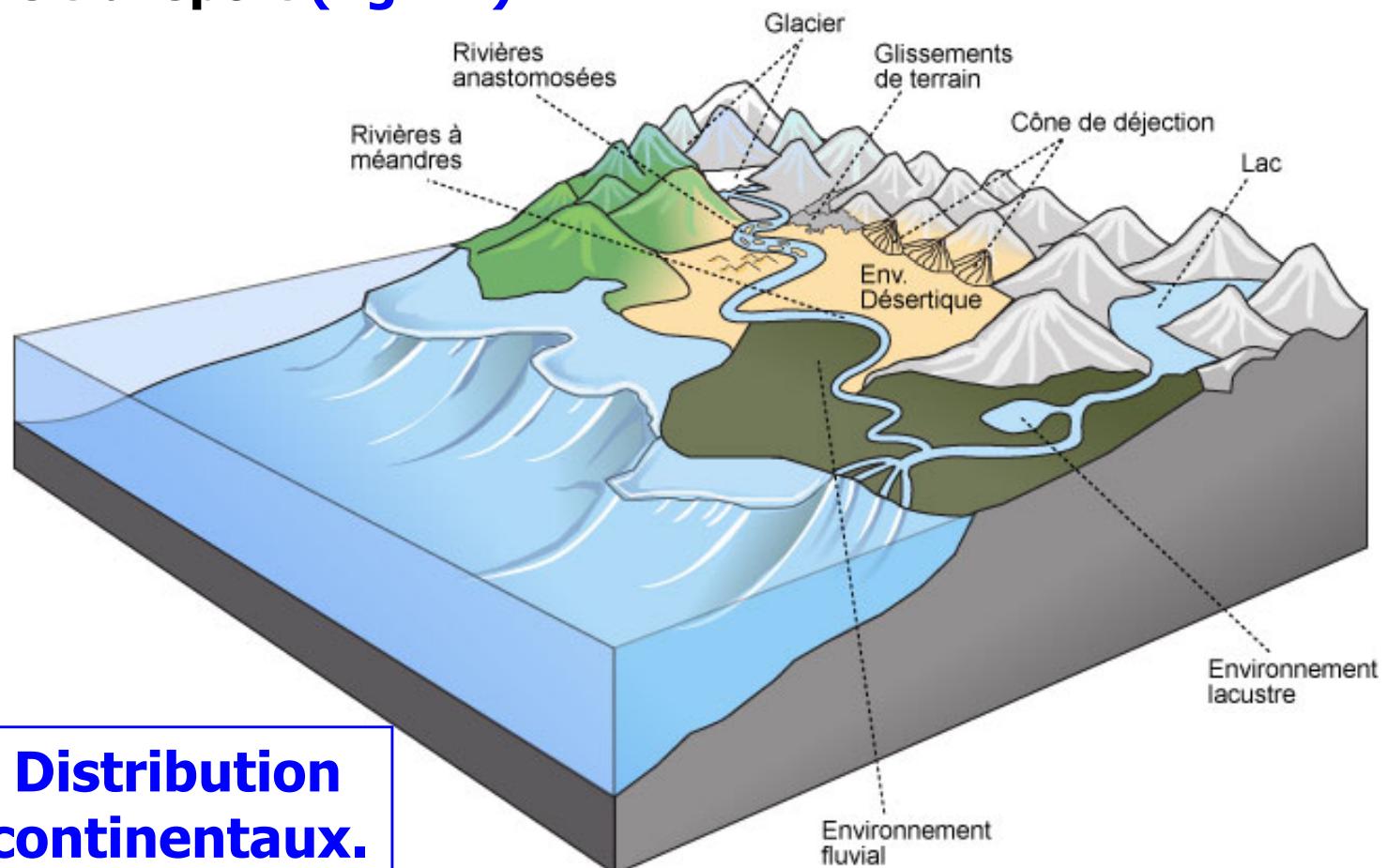


Figure 27 - Distribution des dépôts continentaux.

Les principaux types de dépôts formés dans ces milieux sont donnés le tableau suivant :

Agent de transport	Milieu de dépôt	Sédiment
Gravité seule	Pente	Éboulis
Gravité + eau	Pente	Coulée boueuse
Rivière	Plaine	Sables limons (tuf calcaire)
(Rivières)	Lac et marécage	Sable, boue carbonatée, travertin
Glace	Montagnes, zones polaires	Moraines
Vent	Zones arides	Sable poussiére (dépôt éolien)

En général, les dépôts continentaux sont caractérisés par la taille et la nature des grains qui les constituent. Par ailleurs, la taille des grains/sédiments déposés dépend de la force de l'agent de transport et peut donc varier dans un même milieu (environnement). L'exemple le plus simple est celui des rivières qui dans leur lit peuvent avoir des sédiments très grossiers alors que sur les plaines d'inondation (et dans les lacs) les sédiments sont très fins (**fig. 28**). Ces derniers, enrichissent le sol de la plaine, qui est généralement très fertile.

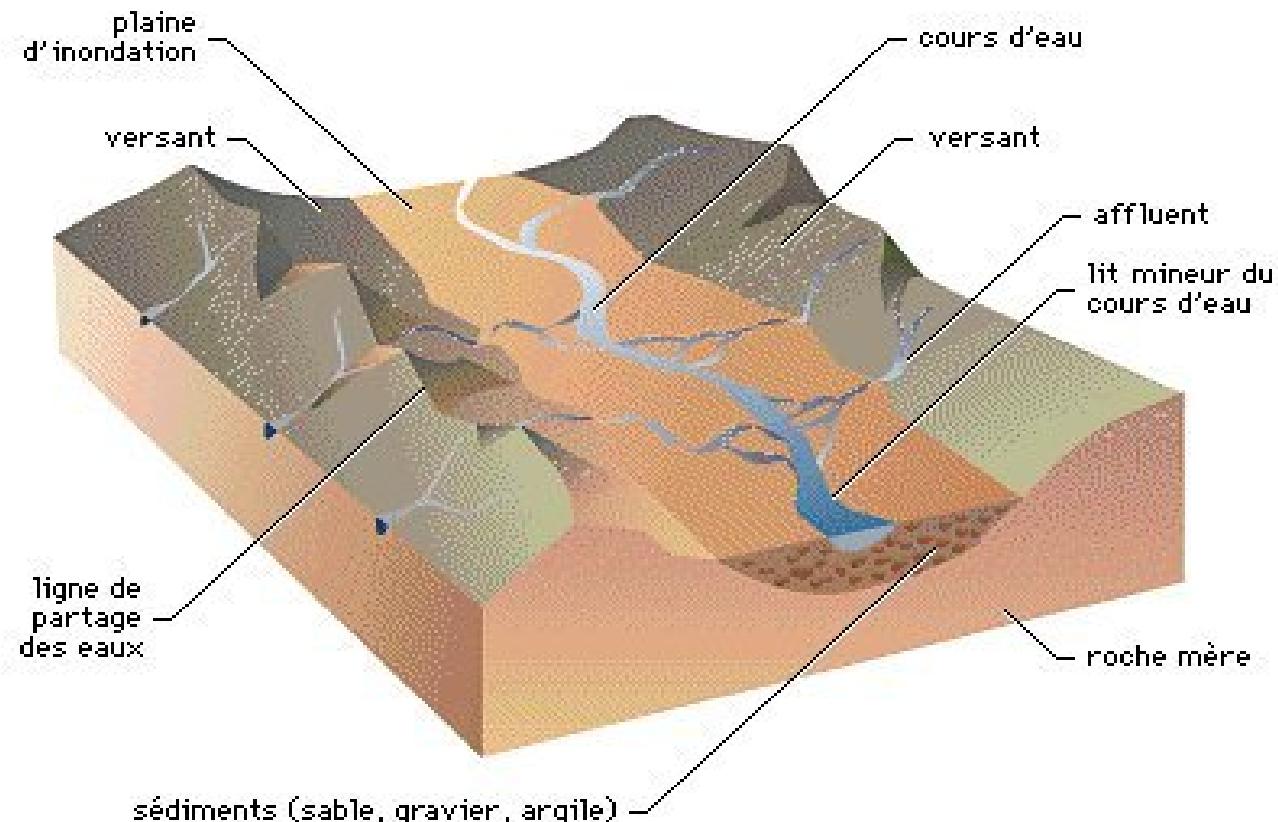


Figure 28 - Plaine d'inondation ou plaine alluviale (vaste étendue de terrains sablonneux, graveleux et argileux qui recouvrent le fond d'une vallée).

B - Milieux intermédiaires

Les milieux intermédiaires (ou milieux mixtes) sont situés aux limites du domaine marin et du domaine continental et présentent des caractères mixtes. Parmi ces milieux, on distingue :

- estuaires : il s'agit de la parties du cours élargi de certains fleuves qui est contiguë à la mer, dans laquelle l'eau est salée ou saumâtre, l'influence de la mer prépondérante, les marées sont sensibles, et où il y a peu ou pas de courant. Dans ces milieux, le dépôt essentiel est la vase formée de sable quartzeux ou calcaire.

-deltas : les sables et les limons charriés par les eaux d'un fleuve dont l'action est dominante n'étant plus sujets à des remaniements, peuvent parvenir à combler l'estuaire peu à peu, puis s'étendre progressivement dans le domaine maritime, sous la forme de vastes plaines triangulaires d'alluvions.

Dans ces milieux intermédiaires, la nature et la taille des sédiments des dépôts côtiers sont influencées par les trois processus qui déterminent l'environnement de dépôt sédimentaire côtier : les courants de marées, les caractéristiques hydrauliques de la houle et des vagues et enfin, les caractéristiques du débit des rivières.

C - Milieux marins

Dans ces milieux, deux régions différentes sont à distinguer (fig. 29) :

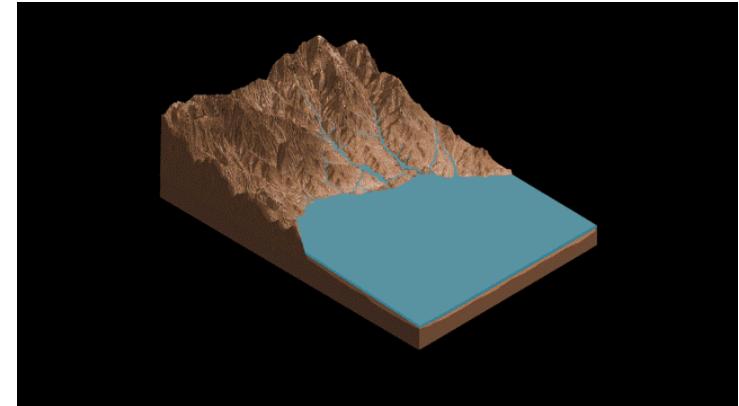


Figure 29 - Principaux domaines marins.

- 👉 La plate forme caractérisée par une pente régionale faible, assez constante et des profondeurs variables mais qui sont inférieures à 200m ; dans ce milieu, les sédiments sont essentiellement silico-clastiques quand l'apport détritique est fort ou carbonatés lorsque l'apport détritique est faible et le climat favorable au développement des organismes constructeurs.
- 👉 Le domaine océanique : situé au-delà de la plate forme où les pentes du fond de la mer sont variables et où la profondeur peut être très grande et supérieure à environ 300m ; dans ce domaine, se dépose des sédiments de mer profonde ou sédiments pélagiques ; il s'agit des sédiments détritiques fins venant du talus auxquels s'ajoutent les particules fines tombant de la surface (débris planctoniques, poussières volcaniques...).

IV - Classification des roches sédimentaires

Il existe de nombreux types de roches sédimentaires. Leur classification se fait à partir de deux critères : leur mode de formation et leur nature.

A - Classification selon leur mode de formation

❖ **Les roches détritiques terrigènes** : on les nomme ainsi car elles proviennent de la dégradation d'une roche mère d'origine endogène tel le granite. Les matériaux endogènes étant riches en silice (d'où également le nom de silicates), les roches détritiques qui en résultent portent également le nom de silicoclastiques (**claste signifiant grain**). Le tableau ci-dessous, présente une classification granulométrique de ces roches.

Taille des particules (mm)	Classes granulométriques	Eléments	Sédiments non consolidés	Sédiments consolidés
256	RUDITES	BLOCS ----- GALETS, CAILLOUX	GALETS, CAILLOUTIS	CONGLOMERAT
16		----- GRAVIERS	GRAVIERS, GRAVES	MICROCONGLOMERAT
2				
1	ARENITES	très grossiers GRAINS grossiers DE moyens SABLE fins très fins	SABLE	ARENITE "GRES"
0,50				
0,25	LUTITES	PARTICULES SILTEUSES ----- ARGILES	SILT ----- ARGILE	SILTITE "PELITE" ----- ARGILITE
0,125				
0,063				
0,050				
0,002				

❖ **Les roches organogènes ou biologiques** : sont liées à l'activité des organismes vivants. Les organismes forment des squelettes minéralisés qui vont pouvoir être fragmentés pour former des bioclastes (débris de squelette d'organisme). Il peut y avoir transport mais il existe aussi des organismes constructeurs qui construisent eux-mêmes la roche, comme les récifs coralliens. On peut citer le charbon ou le calcaire.

❖ **Les roches chimiques et biochimiques (tableau, ci-dessous).**

Roches chimiques	<u>carbonatées</u> calcaire marneux oolithiques et les dolomites	<u>siliceuses</u> les silex et les meulières	<u>évaporites</u> Gypse et sel gemme
Roches biochimiques	<u>carbonatées</u> Caclaires récifaux ou d'accumulation	<u>siliceuses</u> Diatomites Radiolarites Spongolites	

❖ **Les roches résiduelles**: elles sont formées par concentration en un lieu donné de solution quasi « insoluble » lors d'une altération chimique très forte d'une roche préexistante. La majorité des constituants sont solubilisés mais il reste une phase très peu soluble qui précipite *in situ*. Comme exemple de ces roches, on cite la bauxite, formée par l'altération des roches granitiques ; elle peut être facilement purifiée et transformée directement en aluminium.

Remarque : les roches détritiques terrigènes (ou silicoclastiques) et les roches carbonatées sont les plus les plus importantes puisqu'elles constituent plus de 95% des roches sédimentaires.

B - Classification selon leur nature

- ❖ **Les roches siliceuses** : elles sont constituées principalement de silice (SiO_2). Le grès et le silex en font partie.
- ❖ **Les roches carbonatées** : elles ont une grande proportion de carbonate de calcium (CaCO_3). Le calcaire et la craie en font partie.
- ❖ **Les roches argileuses** : ils sont composés pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général d'aluminium plus ou moins hydratés et présentent une structure feuilletée ou fibreuse.
- ❖ **Les roches salines (évaporites)** : elles sont constituées de minéraux ayant précipité à la suite d'une augmentation de leurs concentrations dans une saumure (eau fortement salée).

- ◆ **Les roches carbonées** : elles désignent l'élément de carbone présent sous différentes formes dans la croûte terrestre.
- ◆ **Les roches phosphatées** : ce sont des roches exogènes (se formant à la surface de la croûte terrestre) contenant une plus ou moins grande quantité de phosphate.
- ◆ **Les roches ferrifères** : elles sont constituées principalement de fer (Fe)

Remarque : Dans cette classification, les roches faites d'un mélange de constituants chimiques pourront être rangées dans plusieurs catégories: par exemple, les marnes (argile + calcaire), les brèches polygéniques (éléments de divers types pétrographiques), le loess (dépôt éolien formé de quartz, d'argile et de calcaire)...

V - Intérêt de la géologie des roches sédimentaires

A - Intérêt scientifique

Une roche sédimentaire est une roche formée suite à l'accumulation et au compactage de débris minéraux, organiques ou de précipités chimiques. Cette accumulation étant discontinue dans le temps, elle donne naissance à une stratification, c'est-à-dire une superposition de strates de nature plus ou moins différente qui correspondent à des séquences de dépôt de matériel minéral. Les strates les plus récentes se déposent au-dessus des précédentes : il s'agit du principe de superposition.

Nous avons vu précédemment qu'en général, les roches sédimentaires se déposent en strates. Leur superposition (les strates les plus récentes se déposent au-dessus des précédentes) constitue ce que l'on appelle une série sédimentaire qui correspond au " journal " de l'histoire géologique d'un point géographique donné.

C'est ainsi que les roches sédimentaires vont constituer pour le géologue, un outil important permettant de retracer l'histoire d'un milieu donné notamment en matière de datation relative.

Les argiles qui sont des silicates d'alumines hydratés à structure en feuillets (phyllites ou phyllosilicates). Elles ont des intérêts dans plusieurs domaines scientifiques comme la paléogéographie (reconstitution des milieux récents et anciens), la stratigraphie séquentielle, la géologie pétrolière, l'Agronomie, le paléoclimat, etc.

Les phosphates sédimentaires, exploités pour leur richesse en phosphore (P), représentent les gisements les plus importants au monde (80% de la production mondiale). Le Maroc dispose de quatre grands gisements de phosphate : gisement des Oulad-Abdoun, gisement des Ganntour, gisement des Meskala (près d'Essaouira) et gisement d'Oued-Eddahab. La production de ce phosphate brut est assurée dans quatre centres miniers : Khouribga (gisement des Oulad-Abdoun), Youssoufia et Benguerir (gisement des Ganntour) et Boucraâ (gisement d'Oued-Eddahab).

Notre pays renferme les 3/4 des réserves mondiales de phosphate en nombre ; il est le premier exportateur dans le monde et le 3ème producteur après les USA et la Russie. Au Maroc, l'exportation des phosphates constitue un monopole de l'Etat représenté par l'Office Chérifien des Phosphates (OCP) créé en 1920.

Sur le plan scientifique, l'étude des phosphates peut donner de nombreuses informations sur le milieu marin dans lequel ces roches sont formées indicateurs de paléoenvironnement particuliers).

B - Intérêt économique

Certaines roches sédimentaires sont utilisées directement pour leur résistance mécanique (calcaires ou grès dans l'habitat et le génie civil) ou leurs propriétés chimiques (calcaires, argiles, gypses dans l'industrie des chaux, ciments et plâtres). Les charbons fournissent de l'énergie et un matériel précieux aux industries chimiques.

C'est dans les roches sédimentaires qu'on rencontre les principaux gîtes de fer, d'aluminium, de manganèse et de magnésium, et dans les alluvions que se situent les « placers » à or, à platine ou à pierres précieuses comme par exemple, les gemmes que l'on taille et polit pour les usages de la bijouterie et autres.

Les argiles se caractérisent par leurs propriétés absorbantes et adsorbantes. Par conséquent, elles sont utilisées dans les industries pharmaceutiques et cosmétiques. Elles ont aussi d'autres utilisations qui sont très importantes dans de nombreux domaines comme par exemple, ceux des produits de terre cuite et céramique.

Les phosphates sont des produits utilisables dans de nombreux domaines : agriculture sous forme d'engrais, fabrication de l'acide phosphorique, industrie alimentaire, pharmaceutique, peinture, photographie, pétrolière, fabrication des insecticides et des pesticides, des textiles, traitement des eaux potables, matériaux de plastiques...

Enfin, deux propriétés particulières, la porosité et la perméabilité, leur (roches sédimentaires) confèrent un rôle essentiel en permettant l'accumulation locale des fluides qui percolent à travers l'écorce terrestre : il s'agit soit des hydrocarbures, qui migrent à partir des « roches mères » vers des pièges sédimentaires ou structuraux, soit de l'eau qui s'accumule dans des nappes.

La recherche de ces pièges (hydrogéologie, pétrole,..) est une des applications majeures de la géologie.

Fin du chapitre 2