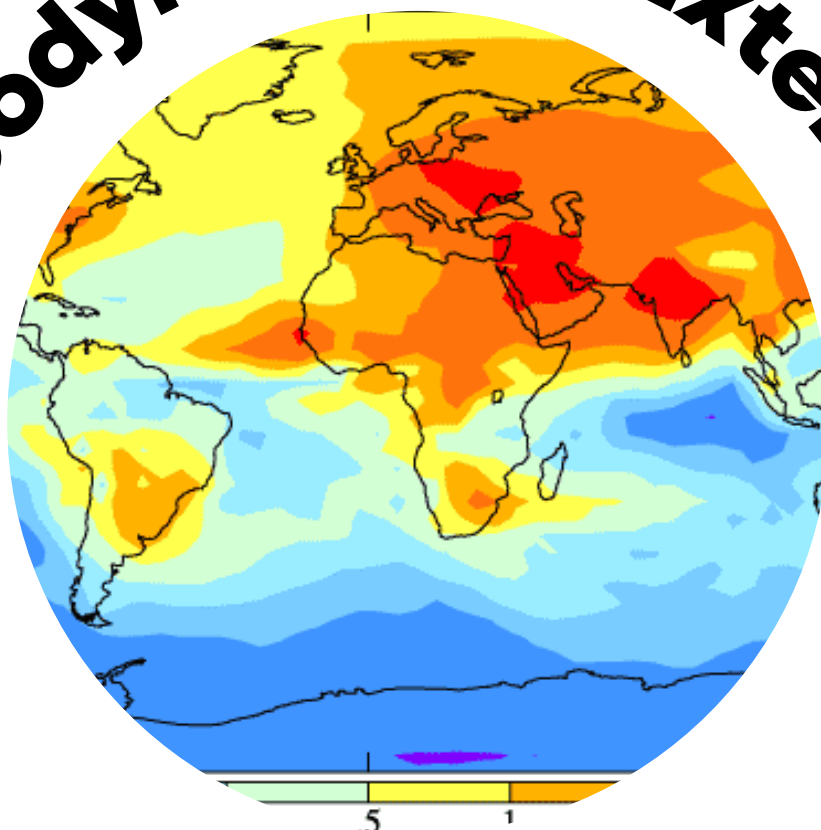


# Géodynamique Externe



SCIENCES DE LA  
VIE ET DE LA TERRE



## Shop



- Cahiers de Biologie + Lexique
- Accessoires de Biologie



## Etudier



Visiter [Biologie Maroc](http://www.biologie-maroc.com) pour étudier et passer des QUIZ et QCM en ligne et Télécharger TD, TP et Examens résolus.



## Emploi



- CV • Lettres de motivation • Demandes...
- Offres d'emploi
- Offres de stage & PFE

# Polycopié du cours

**Filière :**

**Sciences de la Vie et de la Terre**

**Semestre : 2**

**Module 10 :**

**Géodynamique Externe**

**Pr. Abdelmounim EL M'RINI**

**Pr. Habiba AASSOUMI**

**Pr. Jamal Eddine STITOU EL MESSARI**

**TETOUAN**

**2015**

# Table des matières

Introduction générale

Première Partie : Circulation atmosphérique et notions de climatologie

- Structure et composition de l'atmosphère
- Le bilan énergétique de la Terre
- Répartition du rayonnement solaire à la surface de la Terre
- La circulation atmosphérique générale
- Facteurs influençant la répartition des climats
- Changements climatiques et Histoire climatique de la terre

Deuxième Partie : Cycle des roches sédimentaires et principaux milieux de sédimentation

Chapitre 1 :

Cycle des roches sédimentaires

Altération

Erosion

Transport

Dépôt

Diagenèse

Classification des roches sédimentaires

Roches détritiques

Roches chimiques

Roches biochimiques

Roches carbonées

Intérêts de la géologie des roches sédimentaires

Chapitre 2 : Milieux de sédimentation

Milieux Continentaux

Milieux mixtes

Milieu marin

Troisième Partie : Notions d'hydrologie et d'hydrogéologie

# Introduction Générale

## Rappel :

La Terre sous forme d'une sphère aplatie aux pôles, a un rayon polaire de l'ordre 6356,774 km, et un rayon équatorial d'environ 6378,160 km. Les océans occupent plus de 70% de la surface du globe.

L'intérieur de la Terre est constitué d'un certain nombre de couches superposées, qui se distinguent par leur état solide, liquide ou plastique, ainsi que par leur densité.

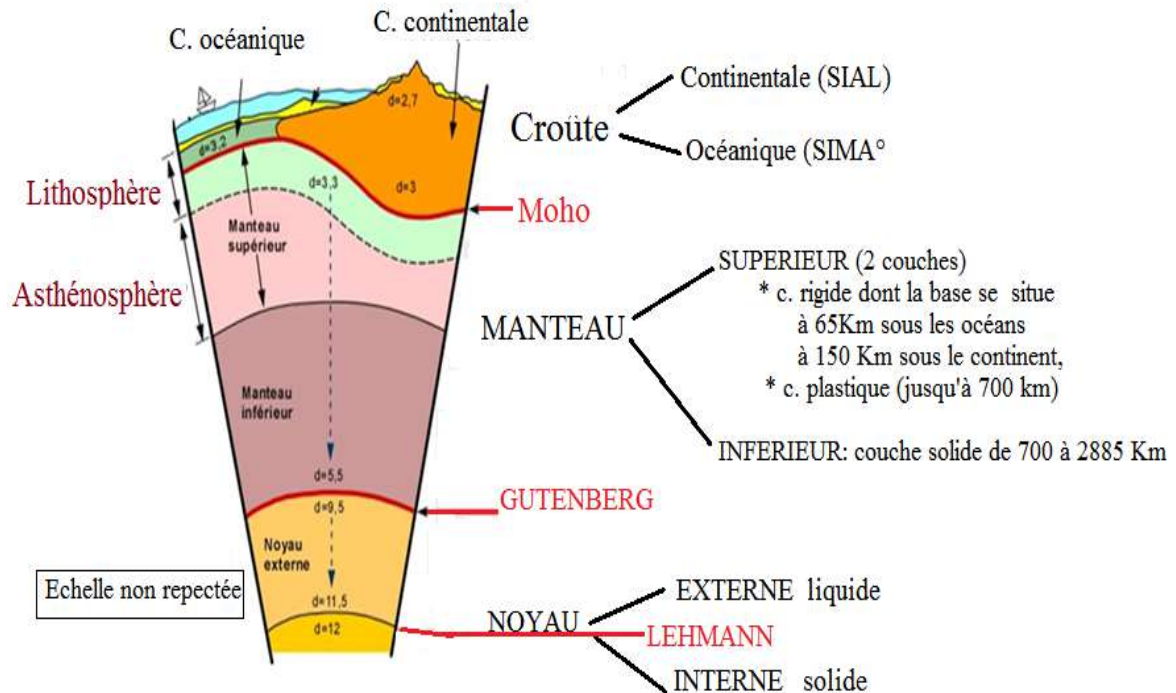


Figure 1 - Structure interne de la terre.

Chacune de ces couches possède des propriétés chimiques et sismiques différentes (cf. cours de Géodynamique Interne). D'où les 3 discontinuités qui les séparent :

- discontinuité de Mohorovicic (MOHO) entre la croûte terrestre et le manteau,
- discontinuité de Gutenberg entre le manteau et le noyau,
- discontinuité de Lehmann qui sépare noyau interne et noyau externe.

## Définition :

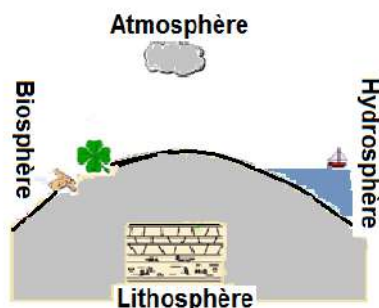
**La Géodynamique** = Science qui s'intéresse à l'ensemble des processus, physiques, mécaniques et chimiques, affectant la Terre. Elle étudie les phénomènes naturels qui ont affecté le géo-matériau et qui l'affectent encore. Elle est subdivisée en :

**\*\* Géodynamique Interne**, étudie les processus internes de la planète, et leurs répercussions mécaniques en surface. Dans la partie > de la lithosphère, ces déformations se manifestent par le :

- *Magmatisme*,
- *Métamorphisme*,
- *Séismes*,
- *Tectonique globale*.

**\*\* Géodynamique Externe**, qui concerne l'évolution dynamique de la surface de la Planète. L'eau, la glace, le vent sculptent les surfaces continentales. *Des changements* infimes, se reproduisent sur de longues périodes, finissent au cours du temps, par modifier la physionomie des continents.

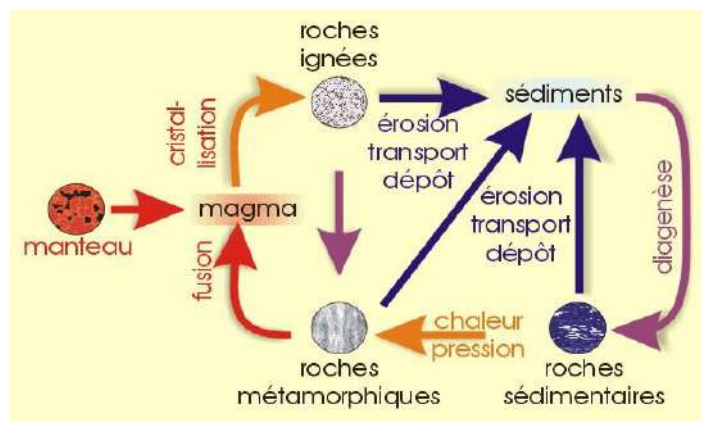
La surface de la Terre, où interagissent les enveloppes externes (Atmosphère, Hydrosphère et Biosphère) avec l'enveloppe solide (Lithosphère), est le siège de processus géologiques très différents, suivant leur nature et leur intensité : ce sont les **processus exogènes** ou **Géodynamique externe**.



**Figure 2 - Enveloppes externes de la lithosphère.**

Ces processus sont définis en grande partie par les conditions physiques à la surface, en particulier par le climat, dont les variations restent gravées dans la succession géologique. En plus, leur intensité est liée aux particularités de la structure superficielle de la lithosphère: relief, résistance des roches...etc.

Ces changements enregistrés par le **relief de la lithosphère**, associés aux mouvements tectoniques, stimulent l'activité des facteurs externes, et delà, l'existence d'un lien certain entre géodynamique interne et géodynamique externe, ce qui définit en fin de compte le **Cycle Géologique**. Il s'agit d'une boucle fermée qui se répète sans cesse.



**Figure 3 - Cycle Géologique.**

### **L'énergie :**

Tous ces phénomènes nécessitent de l'énergie, et il existe 3 types d'énergie qui agissent.

#### **\* Énergie thermique interne :**

Correspond à l'énergie dégagée pour que les éléments instables passent en des éléments stables. Cette énergie est responsable du métamorphisme, de la fusion partielle, des mouvements horizontaux ou verticaux (chaînes de montagnes, plis). C'est l'énergie responsable de l'Orogenèse.

**\* Energie thermique externe :**

C'est l'énergie solaire. Elle est le moteur des climats (réchauffements, précipitations, circulations aériennes et marines... etc.), qui jouent le rôle principale dans les processus de géodynamique externe. Ces phénomènes provoquent une altération chimique et mécanique et une partie du transport, où l'eau ou plutôt le cycle de l'eau joue le rôle principal.

**\* Energie gravitationnelle :**

Une énergie qui participe directement ou indirectement aux processus de la géodynamique externe.

*Directement* : entraînement par chute ou par glissement le long des pentes.

*Indirectement* : à travers les écoulements des eaux continentales, des reliefs vers les embouchures, qui impliquent érosion et transports des particules sédimentaires.

Indépendamment de leur nature, les processus exogènes peuvent se produire en plusieurs étapes suivant le cycle sédimentaire (Fig. 3).

## Première Partie : Circulation atmosphérique et notions de climatologie

### Quelques définitions :

**Albédo** : Rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface à l'énergie solaire incidente en pourcentage (pouvoir réfléchissant).

**Atmosphère** : Enveloppe gazeuse de la terre et d'autres astres (air sec, vapeur d'eau, impureté et autres gaz: gaz carbonique, ozone, etc.).

**Biosphère** : Ensemble des êtres vivants (couvert végétal, monde animal, activités humaines ...).

**Climat** : Etat moyen de l'atmosphère à un endroit donné, résultant de la succession de différents types de temps, sur une période plus ou moins longue.

**Climatologie** : Etude scientifique des climats, tandis que la **météorologie** analyse les situations momentanées de l'atmosphère pour en prévoir l'état futur.

**Constante solaire** : Quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de 1m<sup>2</sup> située à une distance de 1 unité astronomique (distance moyenne terre-soleil) exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil si l'atmosphère terrestre n'existait pas. Pour la Terre, c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère (1367 W/m<sup>2</sup>).

**Couche d'ozone** : Partie de l'atmosphère située entre vingt et cinquante kilomètres d'altitude (stratosphère). Elle absorbe la plupart des rayons ultraviolets dommageables sur le plan biologique. L'absorption des rayons ultraviolets par l'ozone crée une source de chaleur qui forme la stratosphère (une région où la température augmente avec l'altitude).

**Cryosphère** : Constituée par l'enveloppe glaciaire ou neigeuse (calottes glaciaires polaires ou montagneuses, banquises et glaces de mer, étendues neigeuses,...).

**Hydrosphère** : Comprend l'ensemble de toutes les étendues liquides (océans, mers, cours d'eau, étendues lacustres, fleuves, ..).

**Lithosphère** : Comprend les éléments de l'enveloppe corticale rocheuse (masses continentales) et les aérosols.

**Surfusion de l'eau** : Un état métastable (c'est-à-dire qu'une petite perturbation peut suffire pour déclencher abruptement le changement vers la phase solide) de l'eau, où elle demeure liquide à des températures plus basse que son point de solidification.

**Temps** : Ensemble des conditions physiques des basses couches de l'atmosphère (°C, pression, vents, humidité, précipitations,...) à un moment donné et à un endroit donné.

## I – Structure et composition de l'atmosphère

### I.1 - Structure de l'atmosphère

- L'atmosphère est une couche gazeuse maintenue autour de la terre par gravité.
- Entre 0 et 100 km d'altitude, les variations de température permettent de subdiviser l'atmosphère en plusieurs couches superposées.

#### - **Troposphère** : 0 à 10/11 Km d'altitude

- Caractérisée par la diminution de la température avec l'altitude, 6°C/km
- Forme l'essentiel de la masse atmosphérique
- Concentre toute la vapeur d'eau : 98 %

C'est une zone de turbulences : Nuages, et donc c'est là où se déroulent les phénomènes météorologiques.

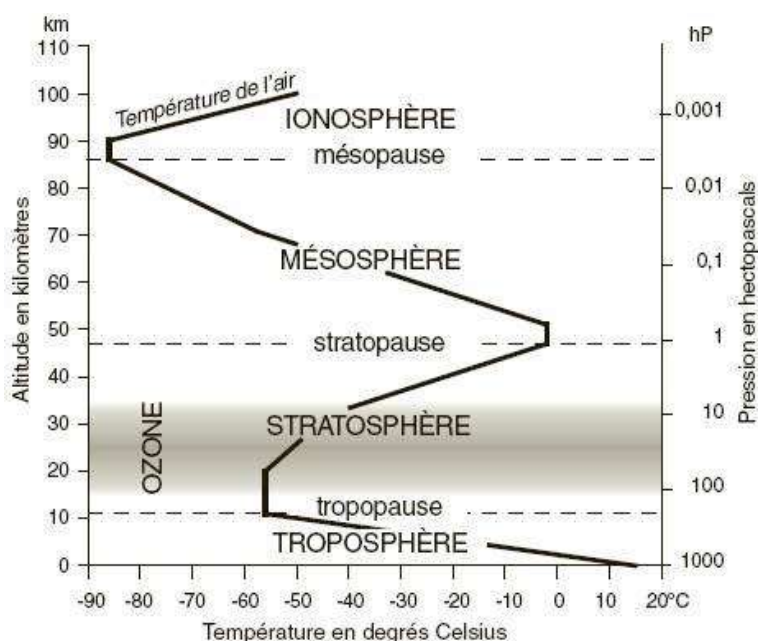


Figure I.1 - Structure de l'atmosphère

## La troposphère

- ✓ C'est la *couche "vivante" de l'atmosphère* ;
- ✓ Elle contient **90% de la masse totale de l'atmosphère** terrestre ;
- ✓ Elle est le siège de **nombreux échanges** entre la terre et la troposphère (cycle de l'eau, présence des nuages,...) ;
- ✓ C'est une couche troublée par des mouvements d'apparence désordonnée dans le sens **vertical et horizontal**.
- ✓ Du fait de ce brassage incessant, sa composition chimique est assez constante.

**Tropopause** (6 km au pôle, 18 km à l'équateur) : La limite ; supérieure de la troposphère et inférieure de la stratosphère. Il s'agit d'une couche où la température est stable

**- Stratosphère** : 10/11 à 50 km d'altitude

- Montre une température variable :  $-10^{\circ}\text{C}$  à  $-60^{\circ}\text{C}$
- Sans nuages, laminaire
- Renferme la couche d'ozone à 25 km d'altitude.

**- La mésosphère** : 80-50 km d'altitude.

- Température de  $-80^{\circ}\text{C}$  à environ  $-10^{\circ}\text{C}$  (la couche la plus froide).

**- La thermosphère** : 200-80 km d'altitude

- Montre des températures variables, de  $-80^{\circ}\text{C}$  au bas de la couche jusqu'à  $400$  à  $1400^{\circ}\text{C}$  dans la couche supérieure
- Elle fait la transition entre l'espace et l'atmosphère.

### I.2 - Composition de la troposphère

Elle se compose principalement d'azote (78%) et d'oxygène (21%) avec seulement de petites concentrations d'autres gaz. Presque toute la vapeur d'eau ou humidité atmosphérique se trouve dans la troposphère.



Figure I.2 - Composition actuelle de la troposphère

**- La vapeur d'eau :**

Le pourcentage de la vapeur d'eau dans l'air est très variable dans le temps et dans l'espace. Il dépend de plusieurs conditions. On note par ailleurs que l'eau existe dans l'air sous ses autres formes : état solide et liquide constituant ainsi les divers types de nuages.

**-Les impuretés (pollution atmosphérique) :**

Les impuretés dans l'atmosphère sont de deux sortes :



- ✓ Les aérosols : les causes sont soit naturelles (vents de sable, poussière volcanique, pollen, ..) soit dues aux activités humaines (fumées d'usines, ...).
- ✓ Les gaz polluants : anhydride sulfureux, oxyde de carbone, hydrocarbure, ...

### I.3 – L'eau dans l'atmosphère

L'eau peut se présenter sous différents états (ou phases) dont les propriétés physiques varient de façon continue. Ce sont principalement l'état solide (neige ou glace), l'état liquide, l'état gazeux (vapeur d'eau). Ces états ne dépendent que de la pression et de la température.

#### I.3.1 - Humidité et condensation

L'air ne peut contenir qu'une quantité limitée de vapeur d'eau, quantité pour laquelle il est dit **saturé**. Cette quantité augmente avec la température. À 30 °C, par exemple l'air peut contenir 7 fois plus de vapeur d'eau qu'à 0 °C.

Ainsi, si on refroidit l'air humide, on va d'abord atteindre la saturation, et si on continue à le refroidir, l'eau va se condenser en fines gouttelettes. On dit que l'on a atteint le **point de rosée**. C'est ce phénomène qui est à l'origine de la formation des brouillards et des nuages = l'air chaud peut être sec ou humide, l'air froid est toujours sec.

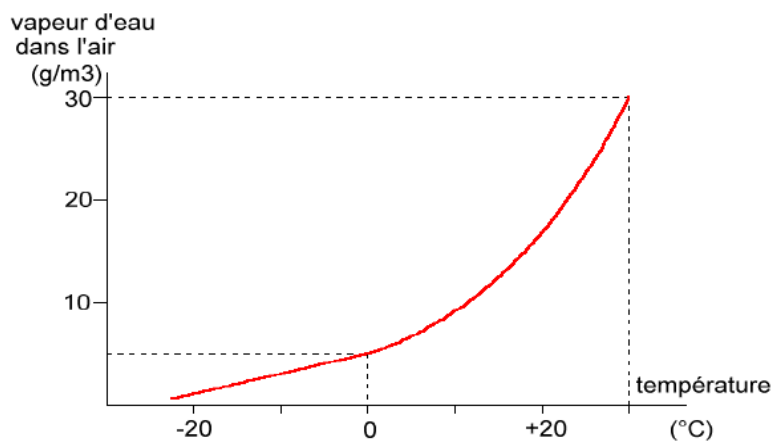


Figure I.3 - Quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air en fonction de la température

#### I.3.2 - Précipitations (pluie, grêle, neige)

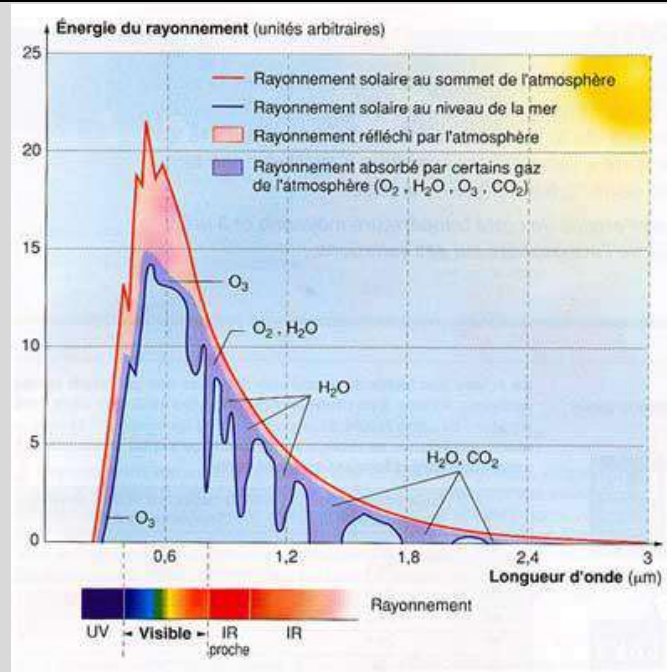
Pour que la pluie se produise, il est nécessaire que l'eau de condensation des nuages forme des gouttes dont le poids soit plus élevé que la force dirigée vers le haut que leur appliquent les masses d'air dans leur mouvement ascendant. Le processus le plus simple est celui où les gouttelettes se réunissent par **coalescence** au cours de collisions.

Beaucoup de nuages sont au moins en partie à une altitude où la température est au-dessous de zéro, ce qui permet que s'y forment des cristaux de glace. Très souvent, cette formation se fait alors qu'il existe des gouttelettes d'eau en **surfusion**. Comme la pression de vapeur au-dessus de la glace est plus faible que la pression de vapeur au-dessus de l'eau, l'eau des gouttelettes tend à s'évaporer pour venir se condenser sur les cristaux de glace, entraînant leur croissance (c'est-à-dire de neige).

À noter que la pluie peut se produire alors que l'eau est en surfusion. Elle se transforme alors immédiatement en glace en tombant sur le sol : c'est la pluie verglaçante.

#### Exercices :

1. Quel est le paramètre qui permet d'individualiser les différentes couches de l'atmosphère ?
2. En combien de couches l'atmosphère est-elle divisée ? Quel est le nom de chacune de ces couches, et quel est le nom des limites entre elles ?
3. D'après le schéma ci-dessous, quelles sont les longueurs d'onde du rayonnement solaire absorbées par l'ozone dans la haute atmosphère ? Pourquoi ce gaz est-il essentiel à la vie terrestre ?



Rayonnement solaire mesuré au sommet de l'atmosphère et au niveau de la mer.

## II - Le bilan énergétique de la Terre

Pour qu'un corps soit dynamique, il lui faut une importante source d'énergie. Par la suite, cette énergie est transformée en énergie mécanique (forces de mouvement). La source d'énergie à l'origine de la dynamique des enveloppes externes est extérieure à la Terre : le Soleil.

- ✓ Le **bilan radiatif** ou rayonnement net de la planète qui correspond à la **différence entre le flux solaire absorbée**, et le **flux thermique émis** vers l'espace.
- ✓ L'état **thermique du système Terre-atmosphère est relativement stationnaire** = équilibre entre le flux solaire absorbé, qui chauffe la Terre, et la chaleur rayonnée (flux thermique sortant).
- ✓ L'énergie solaire reçue par la Terre par unité de temps est la **constante solaire** =  $342 \text{ W/m}^2$  ; mais avec une répartition très inégale selon les lieux et les moments.

Le vent, la pluie, les orages, l'écoulement des rivières sont des manifestations immédiates de la **machine climatique dont la principale source d'énergie est le soleil**.

## II.1 – Interactions du rayonnement solaire incident

Au cours de son trajet dans l'atmosphère, une partie de ce rayonnement va être **renvoyée dans l'espace sans modifications**, le reste, après des **transformations diverses**, sera en définitive retourné vers l'espace (Figure I.4) :

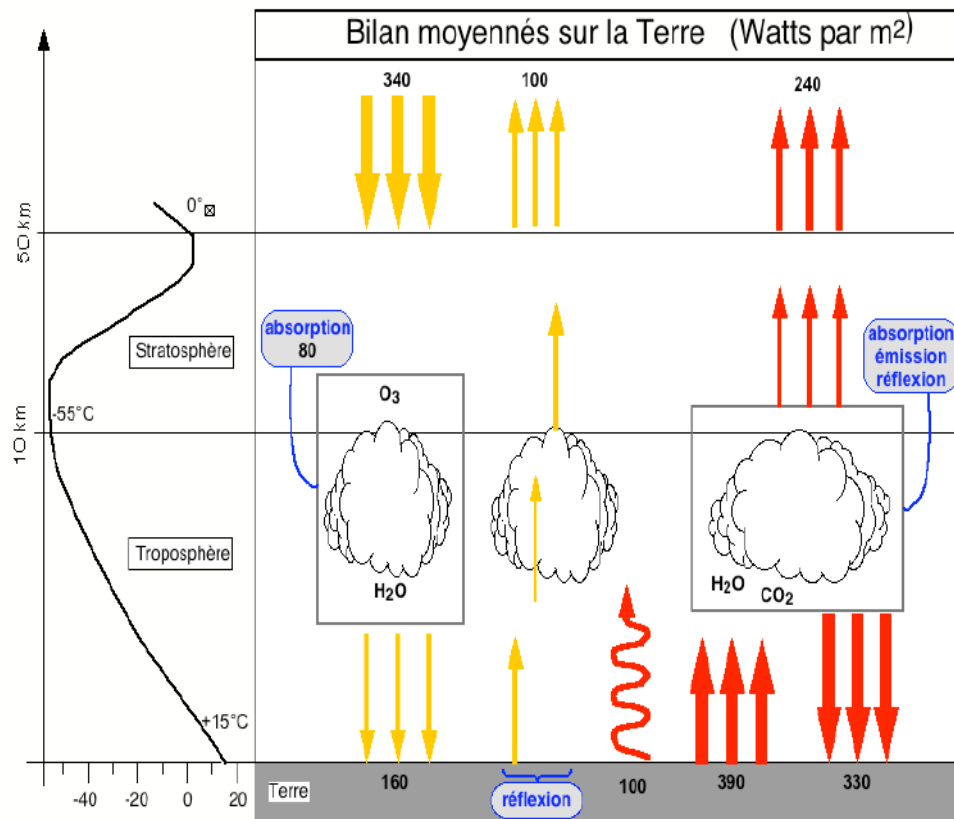


Figure I.4 - Bilan énergétique de la terre

### ❖ Absorption :

- **absorption sélective** par les gaz constituant l'atmosphère ;
- 20 % de l'énergie incidente est absorbée, dont environ 3 % par les nuages ;
- cette énergie n'est pas perdue : elle est **transformée en chaleur** ;
- **élimination des rayonnements** infrarouges et ultraviolets.

L'absorption des infrarouges par les **gaz à effet de serre** augmente largement la température de la troposphère par rapport à ce qu'elle devrait être sans ces gaz (au sol, en moyenne **15 °C au lieu de -19 °C**).

### ❖ Diffusion :

- les gaz de l'atmosphère et les poussières **diffusent les rayons solaires dans toutes les directions** ;
- la plus grande partie est **dirigée vers le sol** (23 % du rayonnement incident) ;
- une autre partie, retournée vers l'espace (environ 3 %), est **perdue pour le système climatique**.

❖ **Réflexion :**

- Principalement par **les nuages** dont la surface supérieure, extrêmement réfléchissante ;
- **Joue un rôle fondamental dans les climats** puisqu'elle renvoie vers le ciel 19 % du rayonnement incident ;

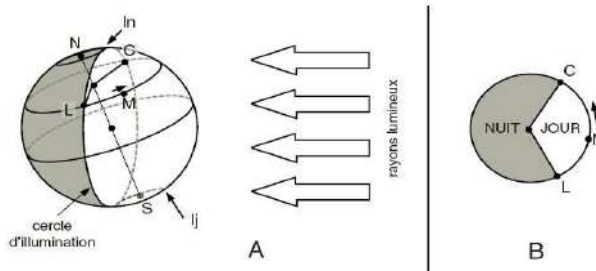
Ainsi, il ne parvient au sol que 58 % du rayonnement solaire incident. Encore doit-on tenir compte de la **réflexion sur les surfaces claires du globe** (glaces polaires et zones désertiques) ; « albédo », qui renvoient vers l'espace 9 % du rayonnement incident, ce qui n'en laisse effectivement que **49 % pour chauffer le sol**.

**II.2 - Répartition du rayonnement solaire à la surface de la Terre**

De grandes différences existent dans la façon dont le **rayonnement solaire est réparti à la surface de la Terre et en fonction du temps selon les latitudes et selon les saisons**. C'est en effet les **positions relatives du Soleil et de la Terre** qui règlent cette répartition.

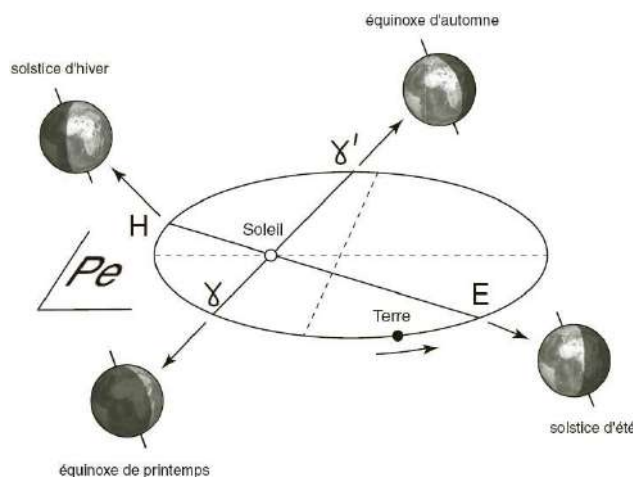
II.2.1 – L'orbite terrestre ; les saisons

- ✓ L'écliptique est le plan dans lequel la Terre se déplace autour du Soleil ;
- ✓ L'axe de la **rotation de la Terre sur elle-même**, mouvement qui donne les jours et les nuits, n'est pas perpendiculaire à ce plan mais **oblique** (actuellement  $23^{\circ} 27'$ ).



**Figure I.5 - L'inégalité des jours et des nuits**

Au cours du trajet annuel de la Terre sur son orbite, son axe de rotation reste constamment parallèle à lui-même. **Deux situations extrêmes** sont alors observables au cours de l'année :



**Figure I.6 - Orbite terrestre, obliquité et saisons**

Les solstices : moments où les **rayons du soleil sont les plus inclinés** sur le plan équatorial ;

Les équinoxes : moments où les **rayons du soleil arrivent perpendiculairement sur l'axe de rotation de la terre** = la durée du jour et de la nuit sont égales partout sur terre.

L'obliquité de l'axe de rotation de la Terre fixe les latitudes des cercles polaires et des tropiques (respectivement  $66^{\circ} 32'$  et  $23^{\circ} 27'$ ).

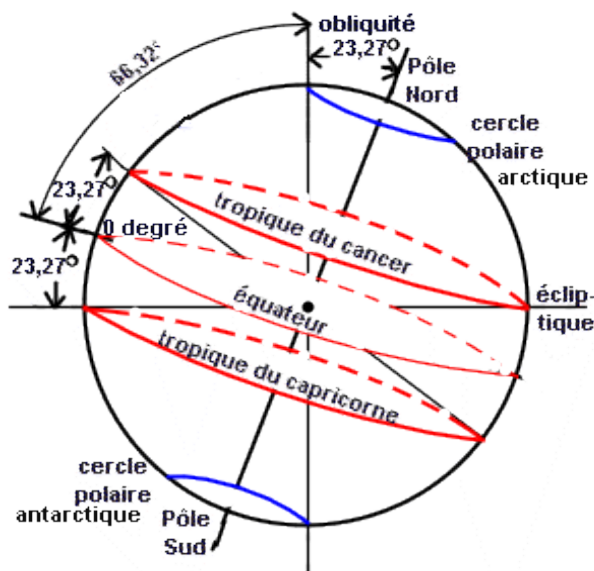


Figure I.7 - Obliquité et détermination des latitudes

### II.2.2 – Répartition du rayonnement solaire au cours de l'année selon les latitudes

L'**inégalité des jours et des nuits**, leurs **variations au cours des saisons**, conduit à une **inégalité de la répartition du rayonnement solaire** dans l'espace et dans le temps.

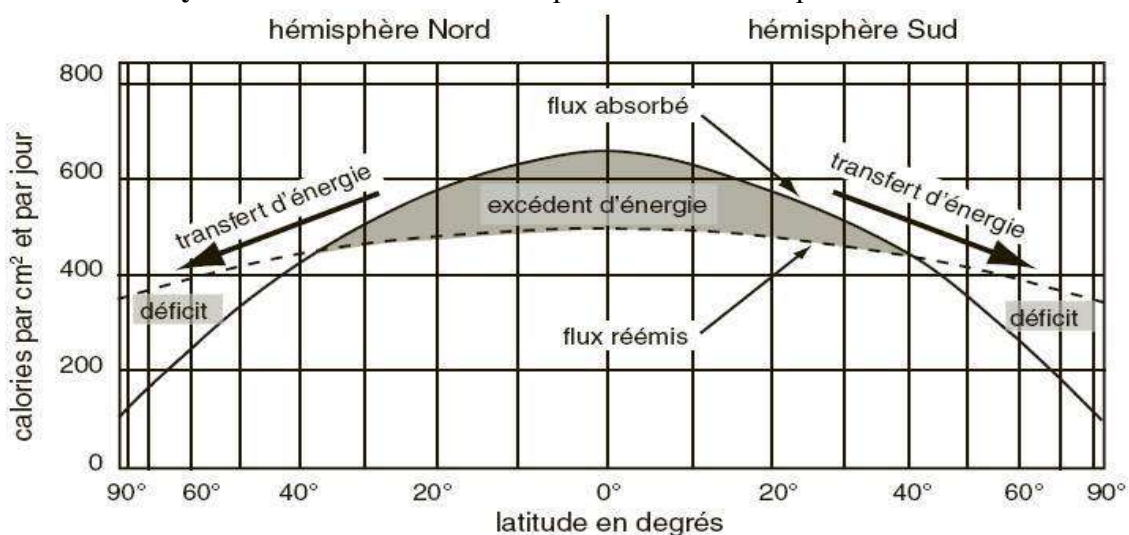


Figure I.8 - Énergie reçue du Soleil à la surface de sol aux différentes latitudes (courbe en trait plein) et énergie renvoyée vers l'espace aux mêmes latitudes (courbe en pointillés)

Les **variations latitudinales** des entrées d'énergie solaire dans le système atmosphérique sont principalement dues à la **valeur de l'angle d'incidence** du rayonnement solaire à la surface de la Terre.

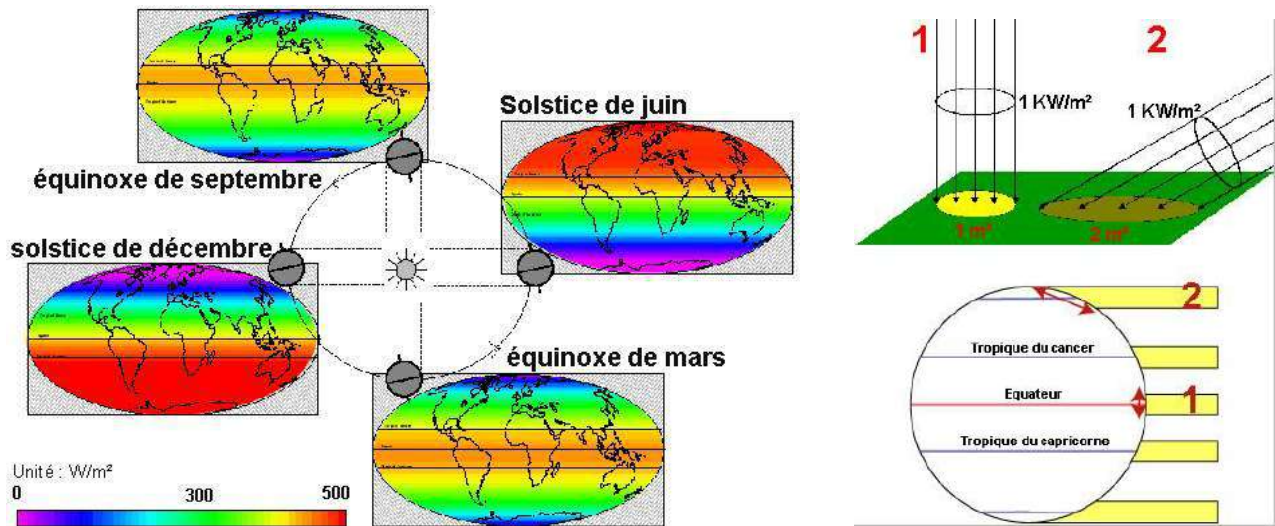
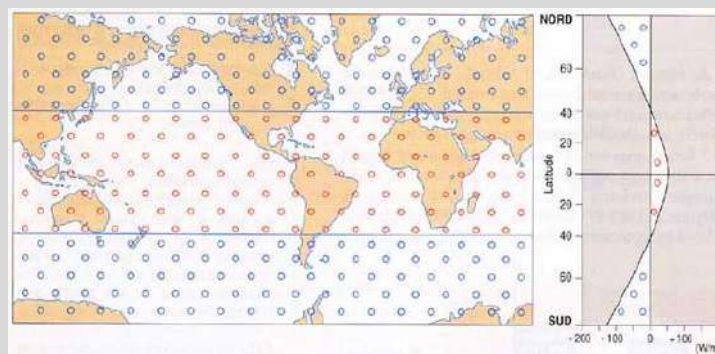


Figure I.9 - Incidence des rayons solaires et apports énergétiques selon les latitudes

Ainsi, le **moteur principal des mouvements des masses d'air atmosphériques**, c'est-à-dire des **vents**, et des **masses d'eau océaniques**, c'est-à-dire des **courants**, se trouve dans les **différences** qui existent, en chaque point de la surface terrestre, **entre l'énergie rayonnante reçue du Soleil** et celle qui est **renvoyée dans l'espace**. Toute **modification de ces bilans énergétiques** sera donc susceptible d'entraîner des **variations climatiques**.

Exercices :



**Bilan énergétique en tout point du globe terrestre (différence entre le rayonnement solaire absorbé et le rayonnement réémis par la Terre), en Watt par mètre carré.**

- 1) Identifiez les zones *excédentaires* et les zones *déficitaires* en énergie solaire reçue par rapport au rayonnement infrarouge émis par la Terre. A quelles latitudes particulières le bilan énergétique est-il équilibré ?
- 2) Quelle conséquence cela a-t-il sur la distribution des températures de surface du globe.

### III – Généralités sur les circulations

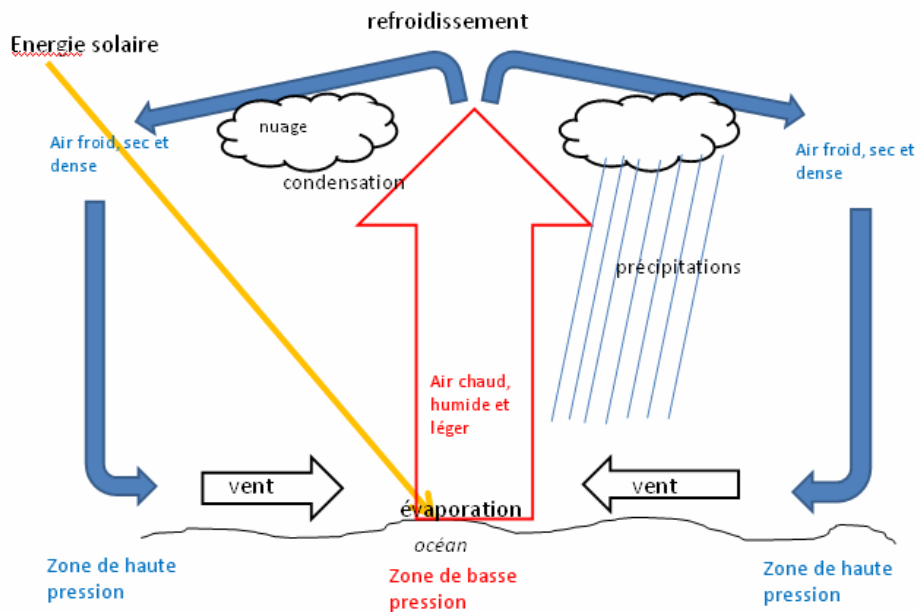
- 🌐 Comment le système Terre-atmosphère redistribue-t-il cette énergie solaire des régions excédentaires vers les régions déficitaires ?
- 🌐 Quelles sont les conséquences pour la surface du globe de cet équilibre thermique qui tente de s'établir sans cesse entre les pôles et l'équateur ?

#### III.1 – La circulation atmosphérique générale

La principale cause du mouvement des masses d'air est l'inégalité de la répartition de l'énergie calorifique en leur sein qui produit le phénomène de convection thermique.

### III.1.1 – La convection thermique

Si un échauffement se produit au sein d'une masse d'air, il va en résulter une dilatation de l'air de cette région, la pression va diminuer et l'air de cette région chauffée devra se déplacer du centre vers la périphérie, ce mouvement horizontal étant appelé **advection**. En définitive, on va assister à un mouvement ascendant de l'air dans la région chauffée, avec une zone de divergence des masses d'air au sommet de la colonne et une zone de convergence vers le bas, l'air dispersé vers le haut étant renvoyé vers le bas dans ce dispositif qui est appelé **cellule de convection**.



**Figure I.10 - Circulation de l'air entre deux couches de température différente : principe d'une cellule convective**

L'intensité du vent sera proportionnelle au gradient de pression = *la force de gradient*.

Anticyclones (Hautes Pressions)	Dépressions (Basses Pressions) « Cyclones »
Mouvement descendant (Subsidence)	Mouvement ascendant (Ascendance)
Temps stable (pas de nuages) et dégagé	Temps instable (nuages) et de précipitations
En été : Sec et ensoleillé	En été : Humide et couvert
En hiver : Sec mais froid	En hiver : Humide mais plus chaud

Si la Terre ne tournait pas, il y aurait donc une circulation d'air qui irait des pôles vers l'équateur près du sol et de l'équateur vers les pôles en altitude. Mais la Terre tourne sur elle-même, ce qui complique un peu les choses.

### III.1.2 – L'effet de Coriolis

Pour des masses se déplaçant horizontalement sur Terre, la force de Coriolis  $F_c$  dépend de la **vitesse angulaire de rotation de la Terre  $\omega$**  (pratiquement constante), de la **latitude du point considéré  $\phi$** , et de la **vitesse  $v$  de déplacement** de ces masses selon la formule  $F_c = 2 \omega \cdot \sin(\phi) \cdot v$ . Elle **dévie les trajectoires des masses mobiles vers la droite dans l'hémisphère Nord, vers la gauche dans**

**l'hémisphère Sud.** Comme  $\varphi$  va de  $90^\circ$  à  $0^\circ$  du pôle à l'équateur, et que  $\sin(\varphi)$  va, sur ce même parcours de 1 à 0, on voit que la force de Coriolis est **maximale au pôle, diminue lorsque l'on s'en éloigne, et devient nulle à l'équateur.** Le vent sera la résultante de la force de gradient modifiée par la force de Coriolis : sa direction est tangente à la limite des 2 zones, et sa vitesse varie en raison inverse de l'écartement des isobares.

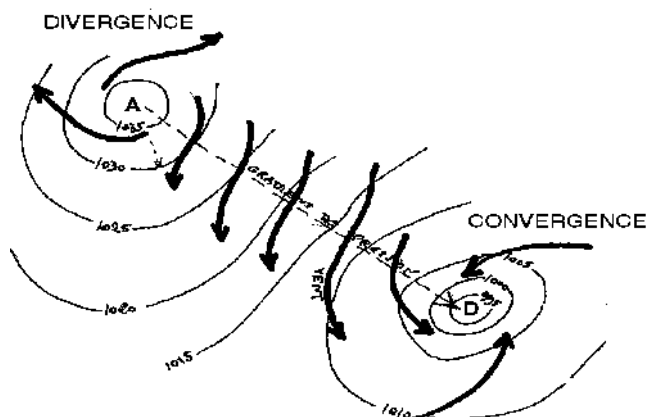


Figure I.11 - Déviation des vents de surface dans l'hémisphère nord (loi de Buys-Ballot)

### III.1.3 – Les cartes météorologiques

Ce sont des cartes qui décrivent les principaux phénomènes atmosphériques actuels ou à venir. Il ya plusieurs types. *Les plus communes sont les cartes figurant les pressions au sol et les fronts des perturbations.*

On peut y ajouter les courbes de **température**, la **hauteur de précipitation**, le **sens et la force des vents**....

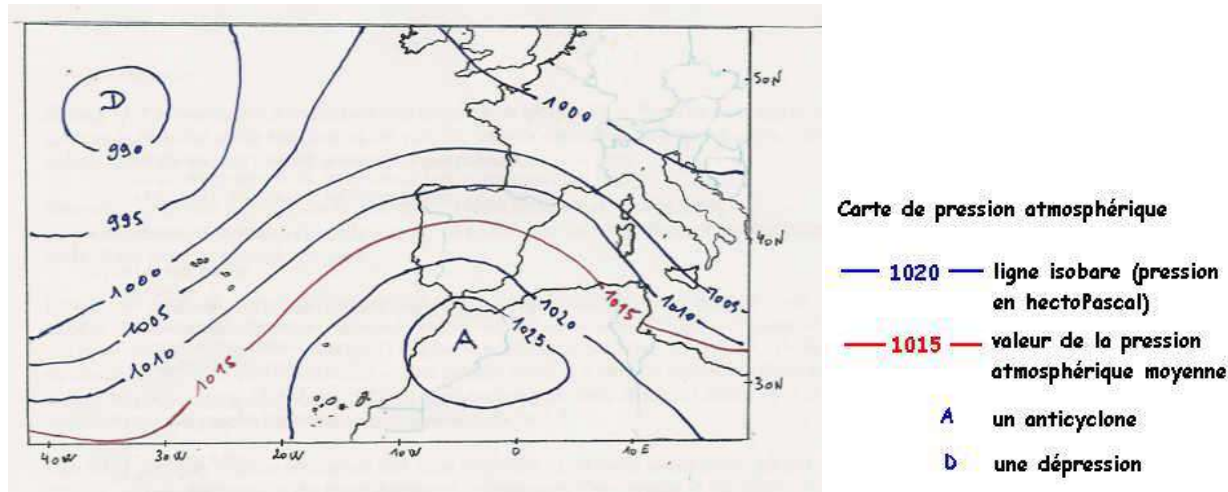


Figure I.12 - Exemple de carte des isobares

#### Questions :

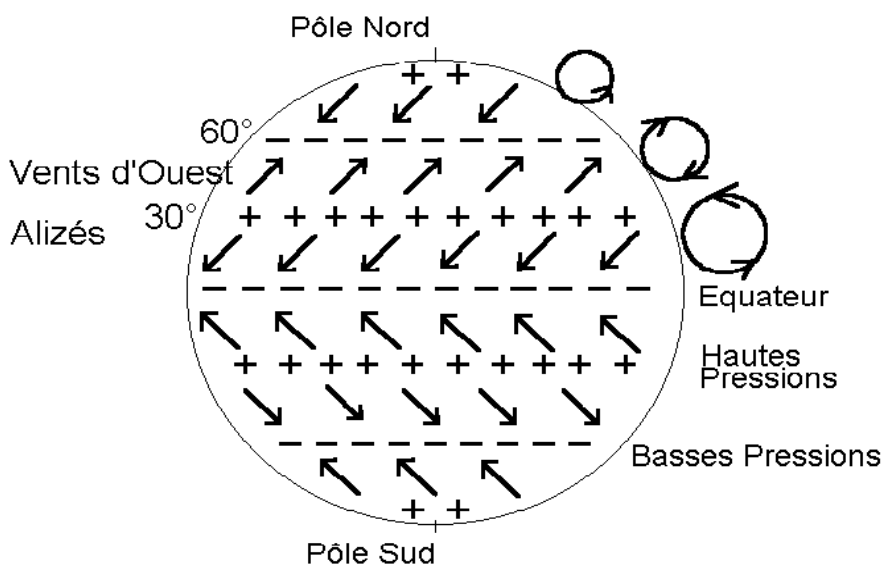
- Rappelez la **valeur moyenne** de la pression atmosphérique.
- Donnez la localisation de la zone de la carte où la pression atmosphérique est la plus élevée. Quelle est la valeur de la pression atmosphérique enregistrée ? Comment nomme-t-on cette zone de **haute pression** ?
- Donnez la localisation de la zone de la carte où la pression atmosphérique est la plus faible. Quelle est la valeur de la pression atmosphérique enregistrée ? Comment nomme-t-on cette zone de **basse pression** ?



### III.1.4 – Répartition des masses d'air et circulation générale

La circulation atmosphérique générale, est donc le résultat, à la fois, du **déséquilibre énergétique entre les pôles et la zone intertropicale** et de l'**effet de Coriolis**. L'atmosphère n'est pas immobile, l'air se déplace autour du globe. **L'air surchauffé à l'équateur va se déplacer pour venir réchauffer l'air refroidi des pôles.**

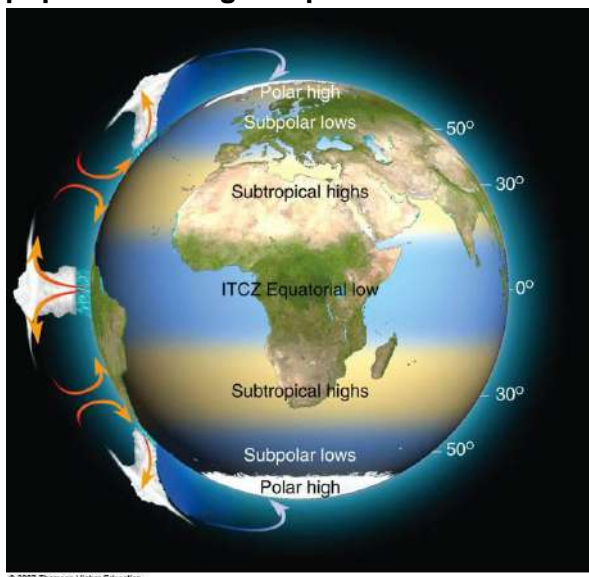
On distingue trois **zones de circulation des vents entre l'équateur et les Pôles**. La première zone est celle de **Hadley** qui se situe entre l'équateur et 30 degrés N et S où l'on retrouve des **vents réguliers soufflant du nord-est dans l'hémisphère nord et du sud-est dans celui du sud : les alizés**. La deuxième se situe aux **latitudes moyennes**, c'est la **cellule de Ferrel**. Finalement, la **cellule polaire** se retrouve au nord et au sud du 60ième parallèle avec une circulation de surface généralement d'est.



**Figure I.13 - Distribution des pressions à la surface du globe et système des vents**

Comme résultat, on observe des régimes de **précipitations orageuses et intenses le long de l'équateur** et des **précipitations plus continues aux latitudes moyennes**, tandis que le **temps sec et généralement clair domine dans les sous-tropiques et les régions polaires**.

- Équateur :
  - zone dépressionnaire
  - nuageux
- 30° N :
  - zone anticyclonique
  - ensoleillé
- 45° N - 60° N :
  - zone dépressionnaire
  - nuageux
- Latitudes polaires :
  - zone anticyclonique
  - Clair
- Les différentes zones varient annuellement de 10° à 15° N-S à cause de la variation saisonnière de l'inclinaison du soleil.



## IV – Classification et principales régions climatiques du monde

Le climat d'un endroit représente un "composite" du *temps* dominant à long terme qui se produit à cet emplacement. Le **climat** peut être défini comme étant les conditions moyennes qu'il fait dans un endroit donné (température, précipitations, ...) calculées d'après les observations d'au moins 30 ans.

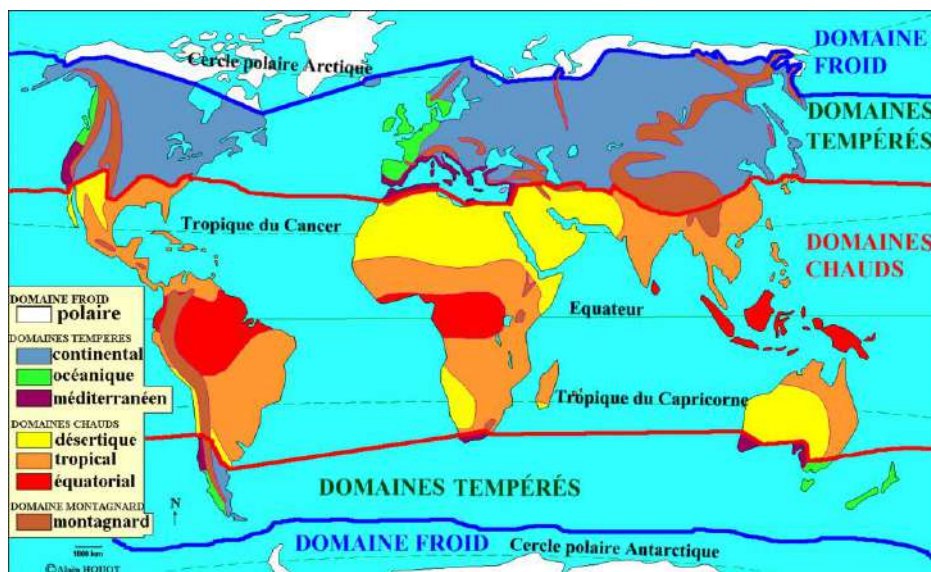


Figure I.14 - Principales régions climatiques de la terre

La structuration en **zones parallèles à l'équateur** constitue le trait fondamental de la **répartition des climats terrestres**. Cependant, celle-ci est **modifiée**, et parfois occultée, par la **répartition irrégulière des mers, des terres et des reliefs**, qui engendre une **azonalité des climats**.

### IV.1 – Facteurs influençant la répartition des climats

#### IV.1.1 – Le relief

En plus de la **diminution de la température avec l'altitude**, le relief a une grande influence sur les précipitations. Ce phénomène s'appelle **effet orographique** ou **effet Foehn** : Lorsque le **vent** rencontre une montagne plus ou moins perpendiculairement, il suit le relief et **s'élève**. La **pression atmosphérique diminue avec l'altitude** et la **température de l'air diminue**. Si l'humidité est assez grande au départ, la vapeur d'eau contenue dans l'air va se condenser à partir du niveau où il atteint la **saturation**. Généralement le **versant abrité du vent est plus aride que le versant au vent**.

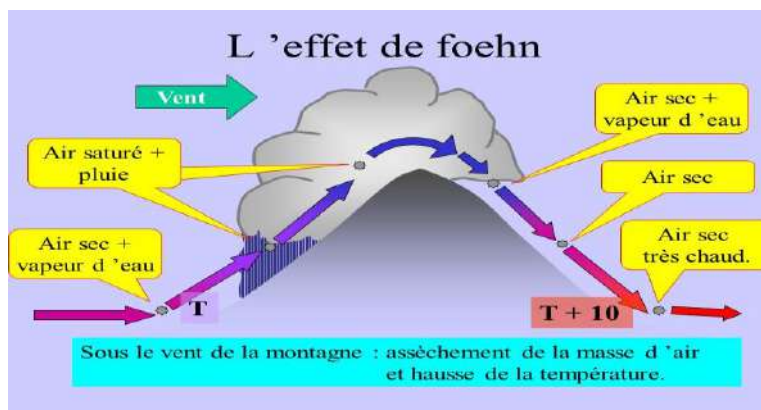


Figure I.15 - Illustration de l'effet de Foehn

#### IV.1.2 – Les courants marins

L'océan mondial absorbe deux fois plus d'énergie solaire que l'atmosphère. **Le transfert de chaleur et d'énergie de l'océan vers l'atmosphère se fait principalement dans les régions intertropicales.** Le rôle des **courants marins** sera donc d'essayer **d'égaliser au maximum cette différence.** Ils distribuent de grandes quantités d'énergie / chaleur des régions chaudes vers des zones plus froides grâce à leur forte inertie thermique. **Les eaux chaudes de surfaces peuvent donc réchauffer une région, et inversement.**

**La circulation thermohaline** est la circulation permanente à grande échelle de l'eau des océans, engendrée par des **écarts de température et de salinité des masses d'eau.** La salinité et la température ont en effet un **impact sur la densité de l'eau de mer.**

**Les eaux refroidies plongent** au niveau des **hautes latitudes** et descendent **vers le sud**, à des profondeurs comprises entre 1 et 3 km. Elles sont alors **réchauffées sous les Tropiques**, et **remontent à la surface**, où elles se refroidissent à nouveau, et ainsi de suite.

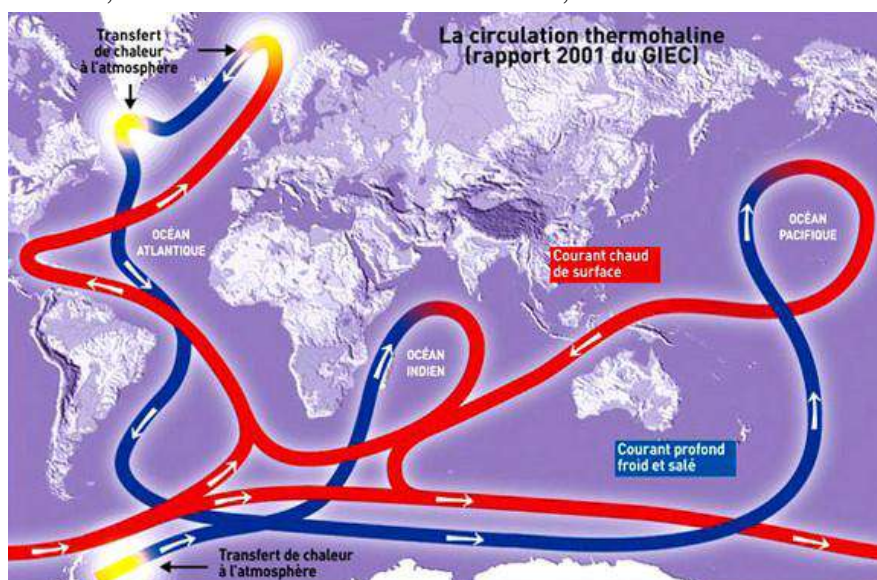


Figure I.16 - La circulation thermohaline

#### Exercices :

1. Quel est le moteur de la circulation atmosphérique ?
2. Décrire les grandes caractéristiques de la circulation atmosphérique et préciser en quoi celle-ci assure des transferts de chaleur !
3. Indiquez la relation entre les lignes isobares et les vents de surface. Y a-t-il des différences entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud ?
4. Dans quelle(s) région(s) se forment les eaux profondes de la circulation thermohaline ?

#### V – Changements climatiques et Histoire climatique de la terre

- ✓ La **paléoclimatologie** permet de **reconstituer l'histoire du climat** et d'en comprendre les mécanismes. Pour ce faire : il faut reconstituer les **paramètres climatiques** du passé, les **dater**, trouver les **lois qui rendent compte de leurs changements.**

- ✓ Beaucoup de données et **indicateurs témoignent des variations du climat** durant l'histoire de la terre.
- ✓ La Terre a connu un grand nombre d'événements ; **alternance de périodes chaudes et froides** qui ont façonné les paysages terrestres.

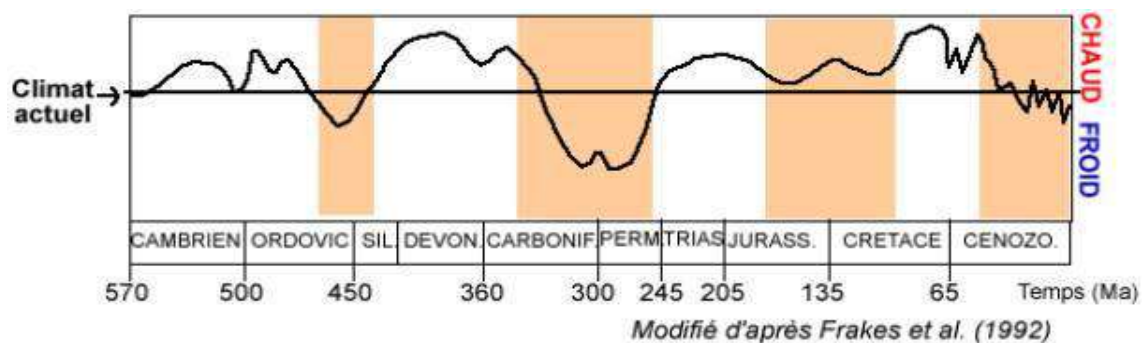


Figure I.17 - Variations du climat terrestre depuis le Cambrien

Depuis le Cambrien, la Terre a connu trois **glaciations** majeures :

- (1) à la fin de l'Ordovicien (445-444 Ma) ;
- (2) à la limite **Carbonifère-Permien** (300-270 Ma) ;
- (3) depuis la base de l'Oligocène (35-0 Ma).

Le Trias et la base du Jurassique (250-175 Ma), et surtout **le Crétacé**, sont probablement parmi les **périodes les plus chaudes de l'histoire de la Terre**.

## V.1 – Variations au cours de l'histoire géologique

### V. 1. 1 - Témoins des variations historiques du climat de la terre

Nous pouvons déterminer les climats passés de la terre par l'analyse, entre autres, de la **distribution des dépôts** (désertiques, glaciaires, ...) et la **distribution des flores et des faunes qui sont sensibles au climat**.

Certaines roches peuvent être utilisées comme des **marqueurs de température** : leurs conditions de formation sont des **indicateurs climatiques**.

- tillites, loess, **dépôts glaciaires = froid**
- coraux, argiles rouges, évaporites = **chaud**

#### a- Exemple de glaciation permo-carbonifère

- ❖ Au carbonifère et au permien, les **continents** étaient **regroupés vers les latitudes sud**. De nombreux indices (**moraines**, stries glaciaires...) montrent qu'une imposante calotte polaire recouvrait ces zones.
- ❖ A la même époque, la France se trouvait à des latitudes proches de l'équateur. Les terrains carbonifères que l'on trouve en France en particulier contiennent des traces (bois fossilisés, charbon) qui attestent de la présence de forêts très importantes caractéristiques d'un climat tropical.

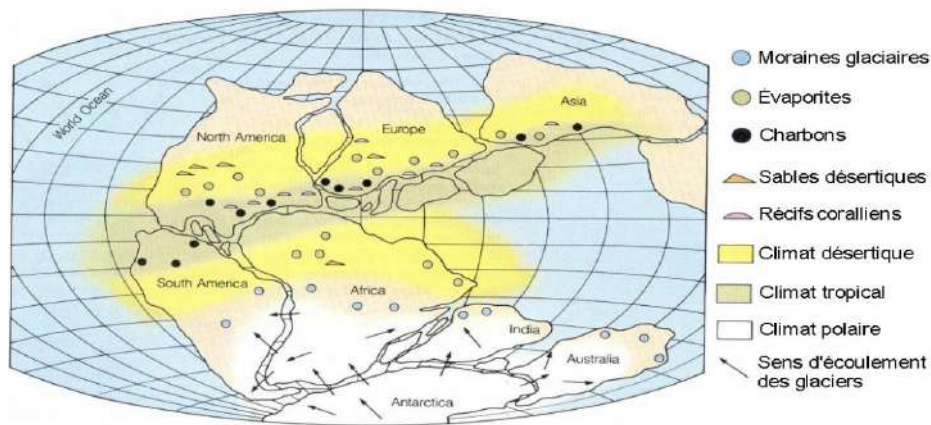


Figure I.18 - Disposition des terres et des mers et dépôts au Permo-Carbonifère

- ❖ En Afrique de l'Ouest, Australie, Inde, Amérique Latine et Antarctique, on trouve des **roches caractéristiques des environnements glaciaires** (roches moutonnées) âgées de 300 millions d'années « Carbonifère » ;
- ❖ L'étude précise de ces **vestiges glaciaires permet de reconstituer** le sens d'écoulement de la glace et d'établir l'**étendue passée** de la calotte glaciaire.

#### b- Exemple de période chaude « Crétacé »

- ❖ Après la glaciation du Permo-Carbonifère, la Terre connaît une **période chaude** qui dure jusqu'à - 40 Ma.

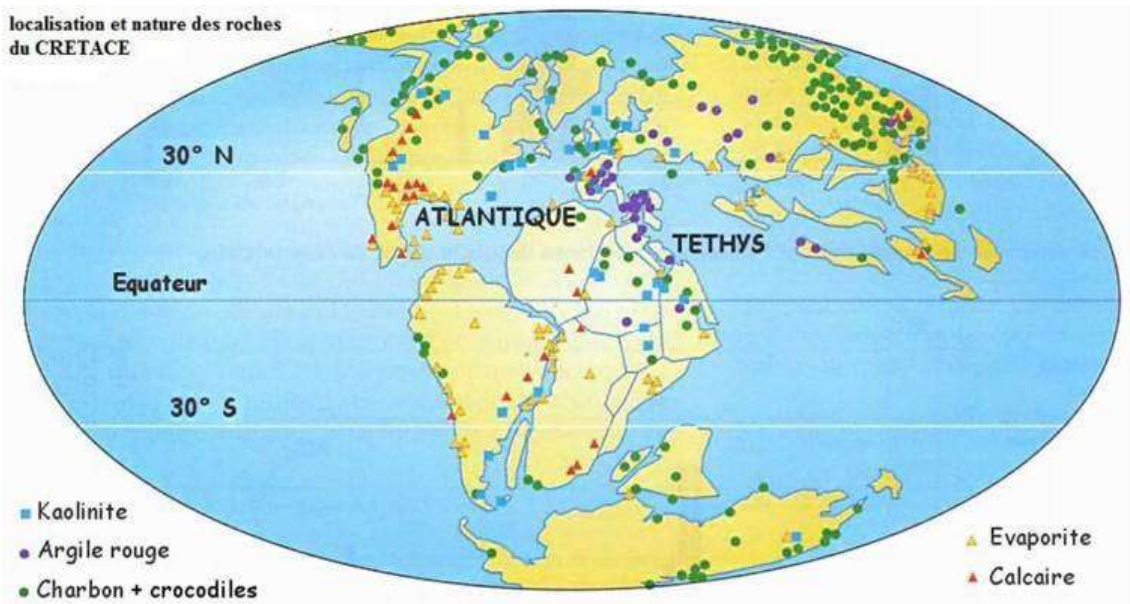


Figure I.19 - Disposition des terres et des mers et dépôts au Crétacé

- ❖ La localisation et la nature des roches présentes au Crétacé nous fournissent des informations sur le type de climat qui a permis leur formation. En utilisant le **principe de l'actualisme**, on peut considérer que les conditions de formation de ces roches sont les mêmes qu'aujourd'hui.
- ❖ Au Crétacé, les **roches indicatrices du climat chaud se retrouvent à proximité des pôles**, dont on démontre par ailleurs que leurs **positions sur le globe ont peu changé** depuis cette époque.

- ❖ La Terre était entièrement **dépourvue de glace** et le **niveau marin était d'environ 250m au dessus** du niveau actuel.

#### V. 1. 2 - Facteurs des variations historiques du climat de la terre

Les **variations de température de la Terre et les changements associés** ont des **causes complexes**. Elles peuvent être classées dans les catégories suivantes :

- ❖ **Facteurs astronomiques** : comme des variations dans l'**excentricité** de l'orbite de la terre autour du soleil, des **changements dans l'inclinaison de l'axe de la terre** (obliquité) et la **précession** de l'axe de la terre.
- ❖ **Facteurs géologiques** : comme la **dérive des continents**, les **éruptions volcaniques**, la **formation de montagnes**.
- ❖ **Facteurs océaniques** : changements dans la **circulation océanique**, des **variations du niveau de la mer**.
- ❖ **Facteurs atmosphériques** : tels que le rôle des **gaz à effet de serre**, les effets de la **couche nuageuse**.
- ❖ **Couverture de la surface terrestre** (Albedo).

**A l'échelle du million d'années**, le mécanisme principal semble être la tectonique des plaques qui affecte la répartition des continents et des mers.

**De la dizaine de milliers au million d'années**, La transition entre les états climatique est contrôlée par les fréquences des mécanismes de forçage astronomique.

**Du millier à la dizaine de milliers d'années**, Variations de la concentration en gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub> et méthane atmosphériques).

##### **a- Déplacement des continents à la surface de la terre**

- Un **point donné du globe peu être situé dans des zones climatiques diverses**. Les vitesses de déplacement étant de l'ordre de quelques cm/an, un changement notable du climat ne pourra être appréciable que pour des durées considérables.
- Les **régions** qui sont aujourd'hui en **bordure des côtes**, et dont les climats sont tempérés, **on eu un caractère continental** très affirmé.
- la **formation de reliefs** et en particulier de chaînes de montagnes.
- Redistribution des **courants marins**.

##### **b- Forçages astronomiques**

Selon la théorie de Croll-Milankovitch, 3 paramètres astronomiques modulent le climat :

- ✓ **Excentricité** : le degré d'aplatissement de l'ellipse par rapport à un cercle (100 000 – 400 000 ans).

- ✓ **Obliquité** : l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à l'écliptique. Actuellement, l'obliquité est de  $23^{\circ} 27'$  mais, dans les 5 derniers millions d'années, elle a varié de  $21^{\circ} 50'$  à  $24^{\circ} 50'$  avec une période de 41 000 ans.
- ✓ **Précession des équinoxes** : changement graduel d'orientation de l'axe de rotation. Un tour complet étant effectué en 26 000 ans.

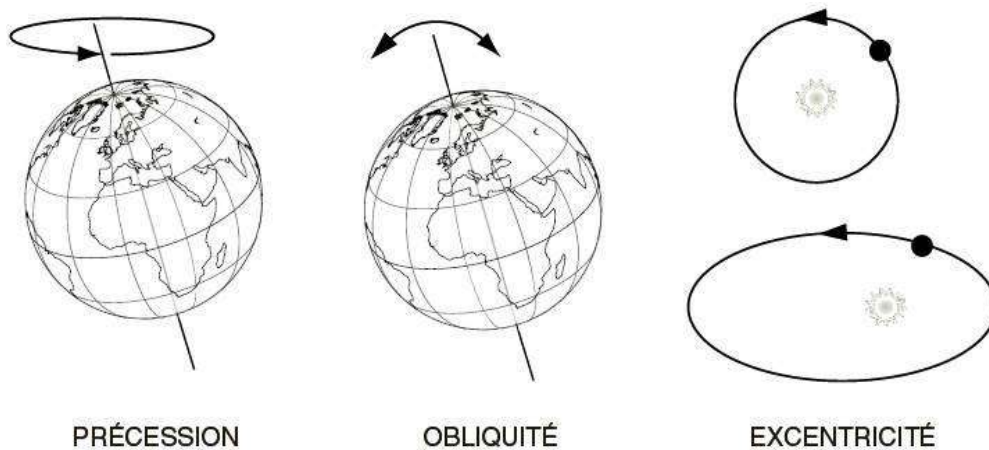


Figure I.20 - Les éléments variables de l'orbite terrestre : précession, obliquité, excentricité

### c- Modifications de l'atmosphère

Parmi les phénomènes qui peuvent s'opposer à l'entrée du rayonnement solaire incident, on peut comprendre les **éruptions volcaniques** qui projettent dans l'atmosphère des quantités parfois considérables de très fines particules de **gaz** et de **cendres volcaniques**.

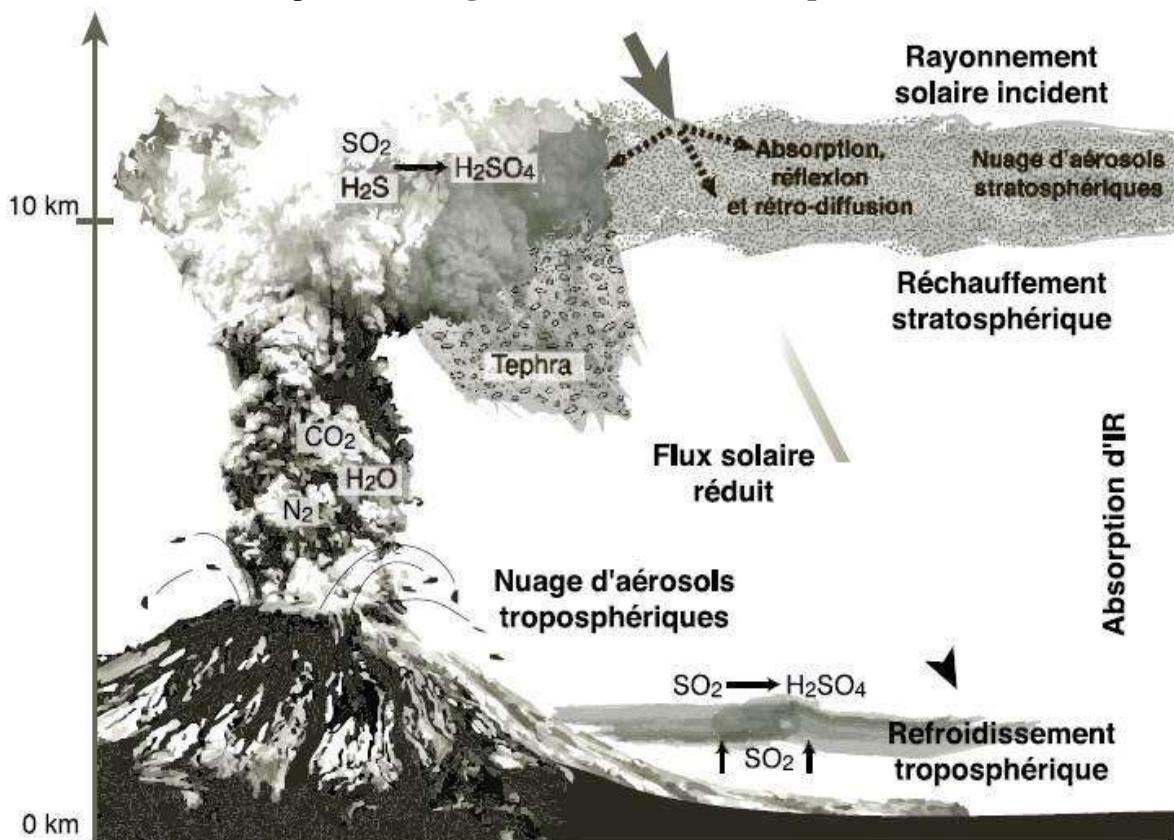


Figure I.21 - Impact d'une éruption volcanique sur l'atmosphère

Quelques exemples récents peuvent donner une idée de l'impact de ces phénomènes :

En 1883, l'éruption du **Krakatoa** a entraîné sur tout le globe une **baisse de la température de l'ordre de 0,4 °C**. Plus près de nous, l'éruption du **volcan Pinatubo** dans les Philippines, en juin 1991, a entraîné, pendant 2 ou 3 ans, des **baisses de température de 0,2 °C à 0,4 °C**.

## V.2 – Variations au cours de l'histoire humaine

### ❖ Le dernier cycle glaciaire

Une **partie de la préhistoire humaine** s'est déroulée durant le dernier **cycle glaciaire**. Les changements climatiques considérables qui ont eu lieu durant cette période ont certainement eu une **influence sur le développement de notre évolution et sur celui de nos civilisations**. On notera que le développement d'*Homo sapiens* est contemporain du maximum glaciaire et que l'avènement néolithique de sa **sédentarisation** correspond au **réchauffement holocène**.

### ❖ Le dernier millénaire

D'après les données historiques, au cours des 1100 dernières années, la terre a connu des variations climatiques :

- ✓ 900 - 1200 : climat chaud «*Optimum médiéval*»
- ✓ Fin XIII : climat froid (600 ans) : «*Petit âge glaciaire*»

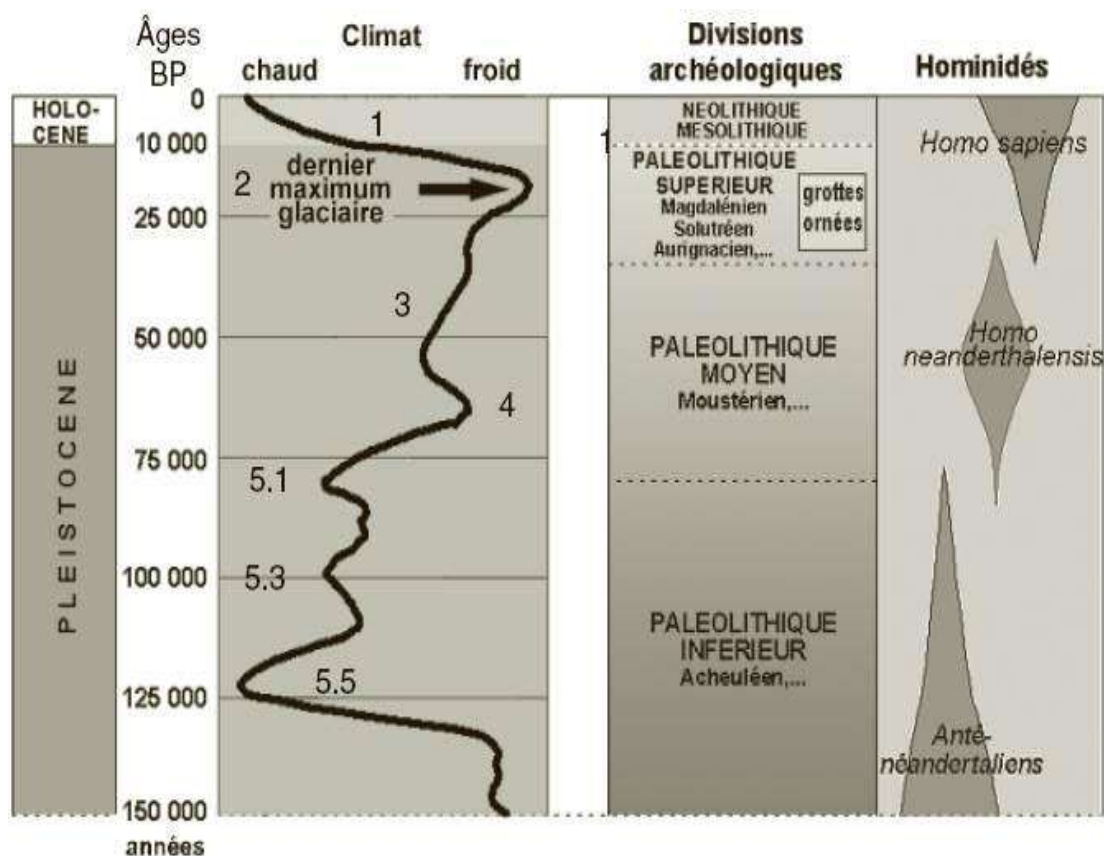


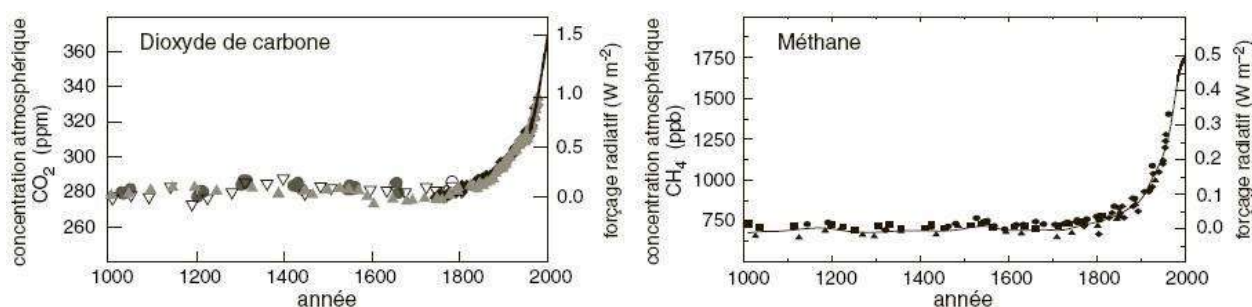
Figure I.22 - Le dernier cycle glaciaire (Würm) et l'homme

### ❖ L'époque industrielle

Si, jusqu'au XIXe siècle, les variations climatiques ont été guidées par des processus naturels, l'**activité industrielle**, qui s'est développée à partir de cette période, a apporté à ce fonctionnement



des modifications non négligeables. Ces modifications sont dues, pour la plus grande part, à **l'introduction dans l'atmosphère de gaz à effet de serre.**

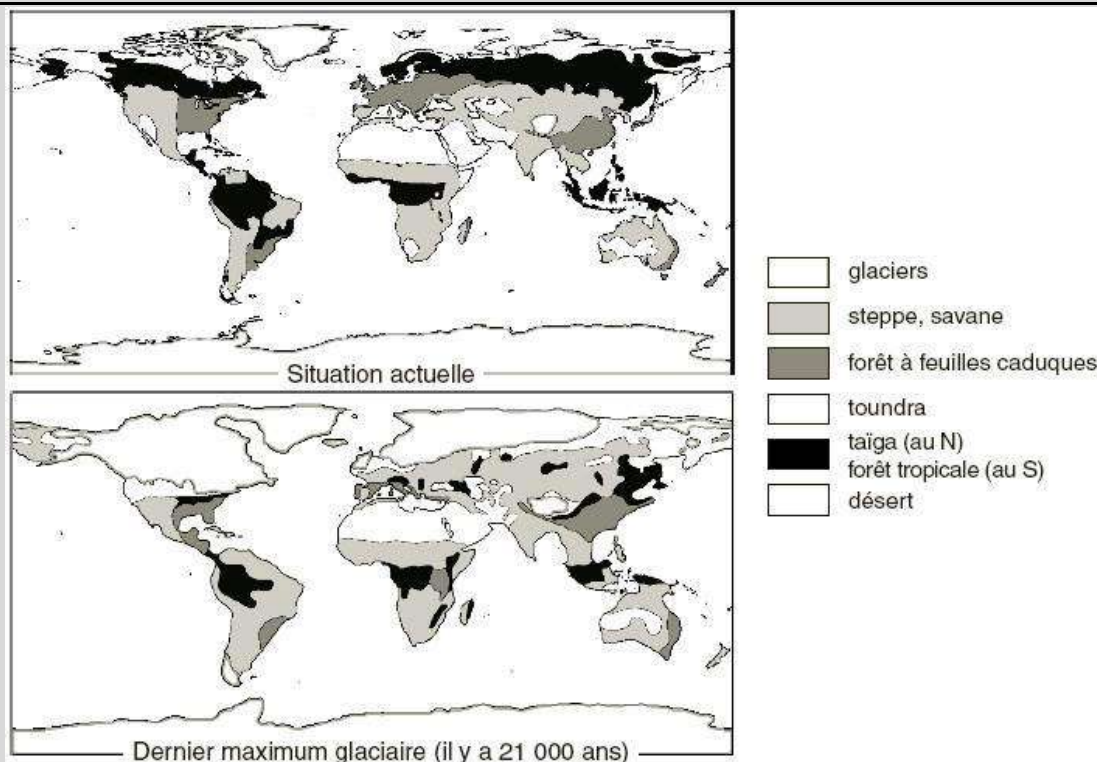


**Figure I.23 - Évolution de la concentration de l'atmosphère en dioxyde de carbone et en méthane**

L'augmentation de l'effet de serre dû à l'introduction de ces gaz dans l'atmosphère a été rendu responsable du **réchauffement** de la troposphère que l'on constate en examinant les variations séculaires de sa température moyenne. Entre 1880 et 2008, elle a été **d'environ 0,6 °C.**

**Exercices :**

- 1- Quels témoins les géologues pourraient-ils utiliser pour connaître les climats anciens de plus d'un million d'années ?
- 2- Trouvez la relation entre les principales crises biologiques et les variations du climat au cours de l'histoire géologique de la terre !
- 3- Commentez la figure ci-dessous !



**Répartition des glaciers et des biomes au dernier maximum glaciaire et à l'actuel**

## Deuxième Partie : Cycle des roches sédimentaires et principaux milieux de sédimentation

### OBJECTIFS :

Présentation des processus physiques, chimiques et biologiques, responsables du façonnement des formes du relief à travers le cycle des roches sédimentaires. Ensuite présentation des différents types de R.S., leurs intérêts géologiques, ainsi que les différents types de milieux de leurs dépôts.

### CHAPITRE 1 CYCLE DES ROCHES SEDIMENTAIRES CLASSIFICATION DES R.S., INTERETS GEOLOGIQUES DES R. S.

#### INTRODUCTION :

Les roches sédimentaires, nommées aussi roches exogènes sont des roches qui se forment à la surface de la terre suivant les étapes suivantes.

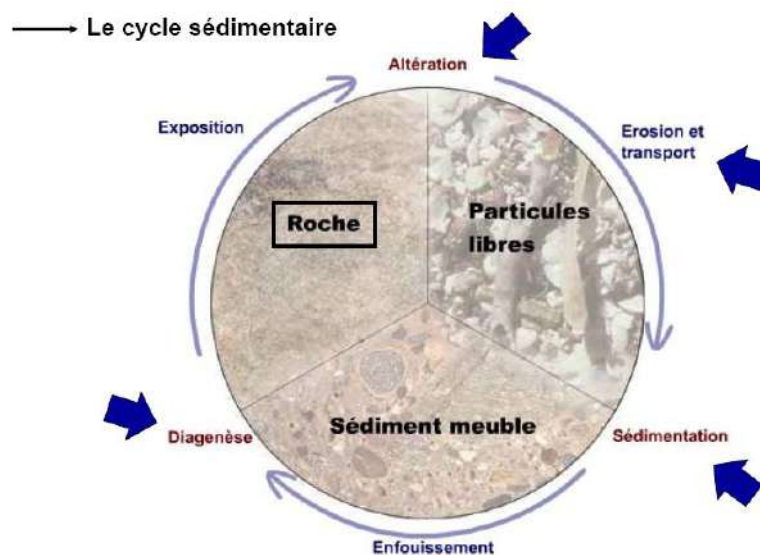


Figure II-1. Cycle des Roches Sédimentaires.

#### I- ALTERARION / EROSION :

##### I.A : ALTERATION :

Ensemble de modifications chimiques et physiques qui affectent les sédiments et les roches exposés à l'Atmosphère, à l'Hydrosphère et à la Biosphère.

Ces mécanismes physiques et chimiques transforment la roche mère en particules, en libérant des ions emportés en solution ou en formant de nouveaux minéraux.

Elle implique plusieurs processus qui agissent sur place sans aucun déplacement de la roche.

##### I.A.1 - L'Altération physique : = désagrégation mécanique.

Un certain nombre de processus physiques produisent la désagrégation « fragmentation » des roches, aboutissant à une modification de relief. Parmi ces processus, on trouve :

• **La thermoclastie** : fragmentation d'une masse rocheuse causée par de fortes variations répétées de la température extérieure. Ce phénomène est fréquent dans les déserts tropicaux où l'écart entre les températures diurnes et nocturnes peut dépasser 50°,

• **La gélifraction** (Fig. II-2) : fragmentation de la roche par l'action du gel et du dégel. Ce phénomène est intense dans les endroits où la température avoisine 0°C à certaines périodes de l'année, comme en haute montagne et dans les régions polaires,

• **L'exfoliation et la desquamation** : fracturation en feuillets d'une roche compacte et homogène,

• **L'haloclastie** (Fig. II-3) : fragmentation de la roche causée par la formation de cristaux de sels suite à l'évaporation de l'eau qu'elle contient,

• **L'usure mécanique** par le choc ou le frottement des grains détritiques emportés par le vent, l'eau ou la glace.

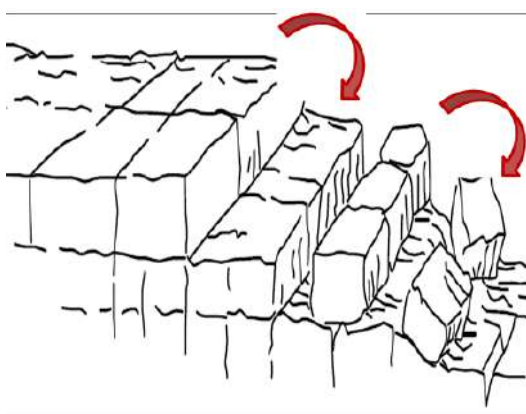


Figure II-2- Gélifraction: Roches fissurées se débitent en blocs, d'après « Modern Physical Geography »

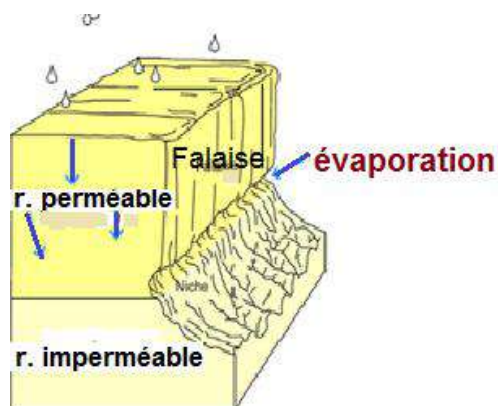


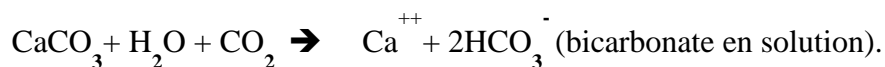
Figure II-3. Haloclastie, d'après « Modern Physical Geography ».

La désagrégation mécanique est particulièrement importante dans les zones désertiques (où le T° peut atteindre 50°C entre le jour et la nuit), sous climats humides et froid où la T° varie autour de 0°C (action du gel et du dégel). Ce type d'altération est responsable de l'accumulation des manteaux d'éboulis caractéristiques des zones désertiques et des montagnes.

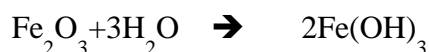
#### I.A.2 - L'Altération chimique :

Elle nécessite la présence d'eau (essentiellement sous climat humide), entraînant une modification de la *composition chimique de la roche*. Ceci implique un ensemble de réactions, telles :

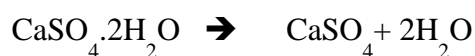
- **La Dissolution**: réaction simple, faisant intervenir de l'eau, ou un acide, et intéresse surtout les roches salines (sel gemme, potasse et gypse) qui sont très solubles. Les roches carbonatées sont moins solubles, mais l'eau de pluie, chargée en  $\text{CO}_2$ , agit comme un acide faible lors de sa mise en contact avec la calcite. Ce phénomène de dissolution des carbonates appelé **décarbonatation**, se fait par la réaction suivante :



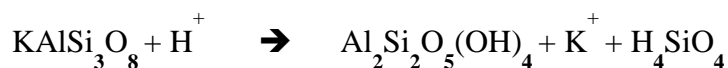
- **L'Hydratation** : incorporation de molécules d'eau à certains minéraux peu hydratés contenus dans la roche comme les oxydes de fer. (ex. l'hydratation de l'hématite pour produire de la limonite :



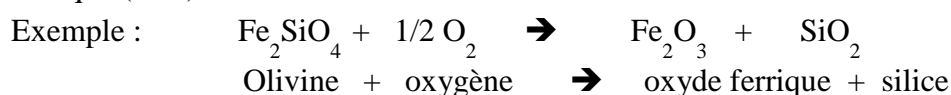
- **La Déshydratation** : perte de molécule d'eau (ex. déshydratation du gypse pour produire de l'anhydrite :



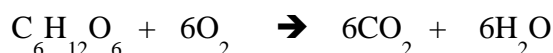
- **L'Hydrolyse** : destruction des minéraux par l'eau, le processus par lequel un cation d'un minéral est remplacé par le  $\text{H}^+$  d'une solution acide. La réaction peut soit détruire complètement le minéral, c'est une hydrolyse dite **totale**; ou le convertir en une nouvelle espèce, l'hydrolyse est dite **partielle**. Exemple : les feldspaths se dissolvent partiellement, produisant de la silice en solution et des minéraux argileux.



- **L'Oxydation-Réduction** : intéresse surtout le fer qui passe de l'état ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) à l'état ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ).



- **Les Réactions impliquant la matière organique**. Exemple l'oxydation de la matière organique, produisant de l'eau et du  $\text{CO}_2$ , lui-même impliqué dans des réactions de mise en solution.



### Facteurs contrôlant l'altération chimique :

Trois principaux facteurs influencent l'altération chimique à la surface de la terre : la lithologie, le climat et l'acidité du milieu. D'autres facteurs peuvent s'ajouter à savoir la présence ou l'absence d'un sol et le temps d'exposition aux processus d'altération.

#### *1.a- Facteurs lithologiques :*

La porosité de la roche : est un facteur, qui commande la présence de l'eau dans la roche nécessaire pour toute altération chimique.

La composition minéralogique : Certains minéraux, se décomposent plus facilement que d'autres, certains sont solubles d'autres non.

La Résistance d'un minéral à l'altération : dépend en grande partie de sa nature, en particulier de l'énergie des liaisons, qui varie en fonction des ions : *Exemple* :

- \* le  $K^+$  est faiblement lié à l'oxygène,
- \* le  $Fe^{++}$  et le  $Mg^{++}$  le sont moyennement;
- \* le  $Si^{4+}$  établit au contraire des liaisons très fortes.

La Solubilité des ions : influence le lessivage des ions dans le sol. Elle dépend principalement de leur **potentiel ionique** : rapport  $Z/R$  ( $Z$  = nombre de charges ;  $R$  = rayon ionique) (Figur II-4).

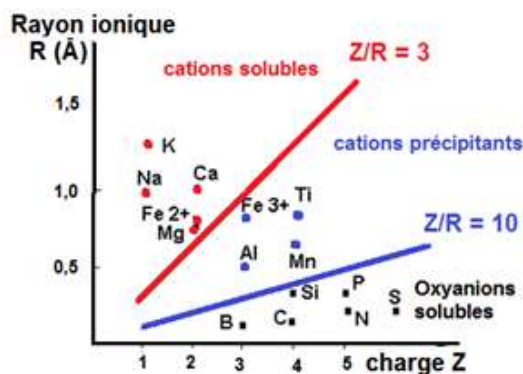


Figure II-4. Classification des ions par Goldschmidt.

D'une manière générale, les minéraux se décomposent dans le même ordre qu'ils se sont formés dans les magmas. Les minéraux qui cristallisent, les premiers, aux plus fortes températures sont les moins stables. Alors que ceux qui cristallisent en dernier, aux basses températures sont les plus stables (Figure II.5).

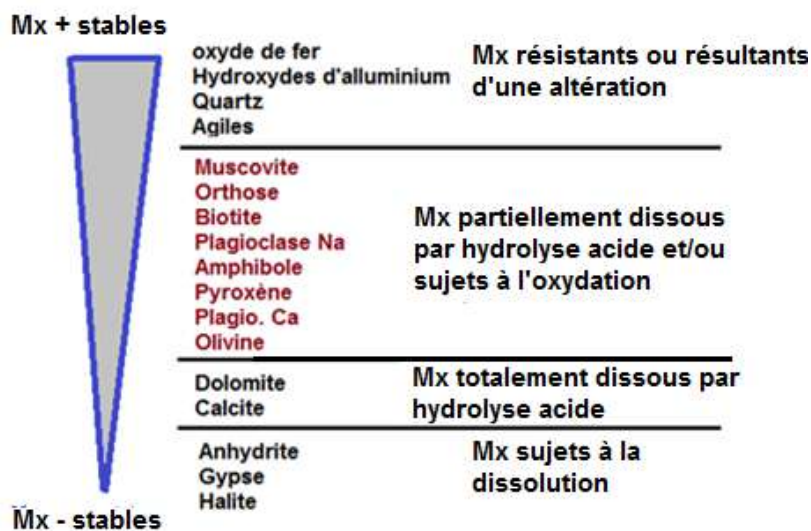


Figure II.5 - Stabilité des minéraux.

### 1.b- Facteurs climatiques :

Le climat est probablement le facteur le plus important dans le contrôle de l'altération chimique.

- **La température** : agit directement sur la vitesse des réactions chimiques. Les réactions chimiques doublent de vitesse (2V) lorsque la température augmente de 10°C ( $T^{\circ}_1 + 10^{\circ}C$ ). Il y a donc une zonalité de l'altération chimique ;

- **L'humidité** est également importante, puisque beaucoup de réactions se passent en milieu aqueux.

L'altération chimique est donc **lente**, sans être absente, dans la zone périglaciaire, car la T° est basse et dans les déserts, à cause du déficit d'humidité. Par contre elle est **intense** sous l'équateur où les processus disposent à la fois de chaleur et d'eau en abondance pendant toute l'année.

### ***1.c- L'acidité du milieu :***

L'acidité ou l'alcalinité des eaux sont également des paramètres importants contrôlant l'altération chimique.

Exemples :

\* **Le Fer** : sa mise en solution dans une roche, est  $10^5$  fois plus grande, quand le P<sub>H</sub> passe de 8 (basique) à 6 (faiblement acide).

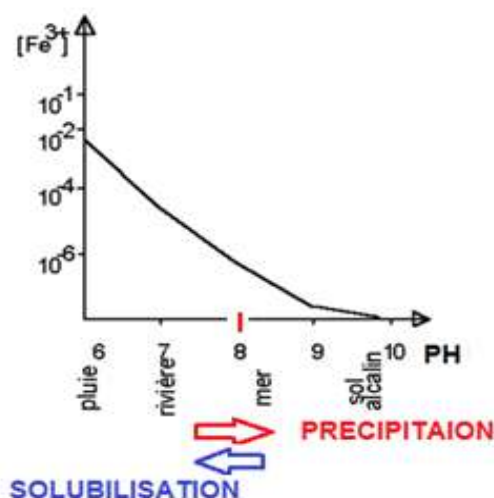


Figure II.6 - Solubilité du Fe<sup>3+</sup> en fonction du PH de la solution.

\* **L'aluminium**: ne se met en solution que pour des PH < 4,

\* **La silice** : ne se met en solution que pour des PH > 9.

### **I.A.3 - L'Altération biologique :**

Elle est en fait une action physique ou chimique induite par des organismes vivants. Par exemple la présence d'une racine dans la fissure d'une roche peut en favoriser l'expansion. La corrosion induite par les acides produits par des organismes tels certaines plantes, microbes,....etc.

### **Bilan de l'altération**

#### **\*\* Formation de nouveaux minéraux :**

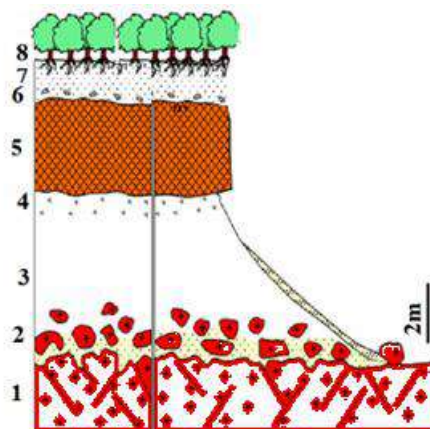
Les nouveaux minéraux formés sont en général des phyllosilicates. Ils proviennent soit de la transformation d'un phyllosilicate préexistant, soit d'une néoformation à partir d'un silicate non en feuillet dont la structure est complètement détruite. Les réactions ont lieu surtout dans le sol. L'altération peut se résumer, d'une façon simple, à :



Les principaux facteurs seront: composition chimique et minéralogique, T°, pH, temps de contact, concentration, drainage, granulométrie... etc.

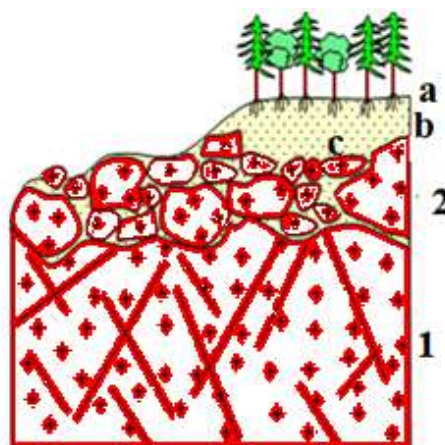
**\*\* Formation de sols :** résultent de l'altération des roches. L'épaisseur et le type de sol varient suivant le climat sous lequel ils se forment.

Exemple : altération d'un granite sous deux types de climat :



**Figure II.7 - Profile d'altération d'une roche granitique en climat tropical humide**  
(<http://www.intellego.fr/>)

**1 : granite (roche mère non altérée et diaclasée, 2 : zone d'arénisation réduite (formation de grains fins et grossiers) ; 3 – 4 : horizon riche en argile ; 5 : cuirasse latéritique (roche rouge ou brune) ; 6 : sol à concrétion ; 7 : sol beige graveleux, 8 : horizon humifère**



**Figure II.8 - Profile d'altération d'une roche granitique en climat tempéré**  
(<http://www.intellego.fr/>).

**1 : granite (roche non altéré et diaclasée, 2 : zone d'arénisation (arènes en boule), c : arènes granitiques ; b : horizon d'accumulation ; a : horizon humifère.**

Dans tous les cas l'altération est un processus agissant en surface des roches ou près de cette surface.

### **I.B - L'EROSION :** (Correspond à la mobilisation des produits de l'altération)

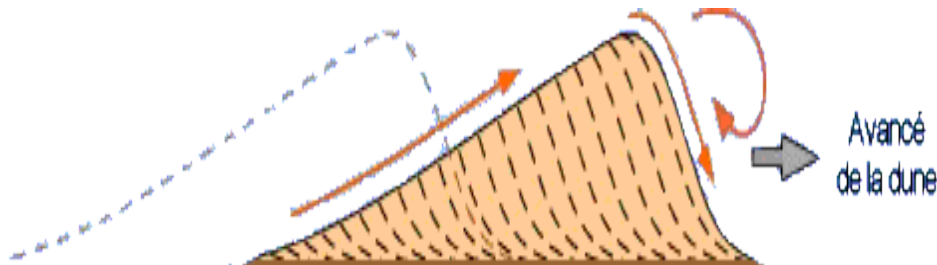
Ensemble de phénomènes qui *enlèvent* (arrachent) les débris et particules issus de l'altération et *modifient* les reliefs. Il s'agit d'un phénomène d'usure des roches. Les reliefs montagneux sont peu à peu remplacés par des surfaces plus ou moins planes, de faible altitude, appelées surface d'aplanissement.

En général l'érosion fait suite aux processus d'altération qui désagrègent les roches et produisent les particules sédimentaires. Mais parfois l'érosion agit sur des roches non altérées.

Elle dépend de plusieurs facteurs :

- la taille du matériel (les blocs sont moins facilement érodés que les sables) ;
- l'intensité de l'agent érosif,
- la topographie (montagne, colline, plaine, vallée. . . etc.,
- la présence ou non de végétation (une couverture végétale dense protège de l'érosion).

I.B.1. L'érosion éolienne : Le vent est un agent d'érosion important et très efficace particulièrement dans les régions désertiques, les zones côtières et les plaines à végétation éparse. Il agit de 2 façons : par déflation et par corrasion.



**Figure II.9 - Erosion éolienne.**

\* **La déflation**: est le balayage des particules par le vent. La taille des débris transportés (balayés) dépend de la force du vent. Le transport sera ainsi sélectif :

Les particules fines et sèches seront balayées, laissant sur place les cailloux assez lourds. Ce processus contribue à la formation des :

- *Hamadas* : plateaux rocheux dénudés.
- *Regs* (déserts rocheux) : champs de cailloux anguleux. Après balayage des surfaces désertiques par le vent, il y a départ des poussières et sables fins.
- *Sebkhas*. La déflation continue d'arracher les débris jusqu'à atteindre le niveau des eaux souterraines. L'eau durcit la surface et se forment ainsi de grandes dépressions indurées.

\* **La corrasion ou abrasion éolienne**: est l'usure des roches par le vent armé de grains de quartz. Ces grains tendent à polir et user les roches même dures.

Ce processus aboutit :

- à la formation des *roches en champignon*, car son action est plus importante à proximité de la surface du sol.
- au creusement des *alvéoles* et des *taffonis*,
- à arrondir les cailloux et grains de quartz.

I.B.2. L'action de la pluie (le ruissellement) : Les gouttes de pluie par leur impact génèrent une action érosive considérable, particulièrement sur les terrains non-consolidés comme les sols.

Les eaux de pluie, qui ne s'infiltrent pas, couvrent la surface terrestre d'une couche d'eau de faible épaisseur, qui va s'écouler le long des pentes de manière concentrée ou diffuse. Cet écoulement ou ruissellement va entraîner les matériaux les plus fins (argiles, silts, sables, graviers) vers l'aval et laissant sur place les cailloux et les blocs.

L'importance de l'effet érosif de la pluie dépend de la taille et de la masse des gouttes, de leur vitesse de chute, de la durée de l'averse et de la pente du substrat.

Il existe 2 types de ruissellement :

-Le ruissellement concentré (filets d'eau), conduit au creusement ou ravinement de la surface topographique. L'absence du couvert végétal, surtout en climat semi-aride, accentue ce type d'érosion, qui devient plus importante avec creusement de ravins plus profonds et plus nombreux, donnant lieu à des terrains ou paysages appelés « badlands ».



-Le ruissellement diffus (pellicule d'eau ruisselante) génère plutôt des pavages rocheux et des cheminées des fées.

Les effets du ruissellement sont particulièrement marqués dans les régions arides et semi-arides à végétation éparse.

Exemple : Le relief karstique : il résulte à la fois des phénomènes de " dissolution - ruissellement " en surface et des phénomènes de " dissolution - circulation " en profondeur. (cf. partie.III : eau sous-terrain).

**I.B.3. L'érosion fluviale :** (Figures II.10 – II.11) Les rivières, fleuves et torrents sont capables d'éroder leur substrat, de transporter et d'accumuler des sédiments. L'érosion est d'autant plus importante que la vitesse, la turbulence et la charge sédimentaire du cours d'eau sont élevées.

Dans le cas des substrats peu consolidés, la turbulence du courant suffit à creuser le fond du cours d'eau et à saper les berges. Pour entailler les formations rocheuses dures, le courant doit transporter des sédiments grossiers (sables, graviers) qui jouent le rôle d'abrasif.

L'érosion fluviale est particulièrement importante dans la partie haute d'un cours d'eau. Elle produit des vallées :

- en V dans les roches meubles. Ces vallées peuvent être soit étroites, si elles sont situées dans le cours supérieur (= haute vallée), ou large si elles sont situées vers le cours inférieur (= basse vallée).

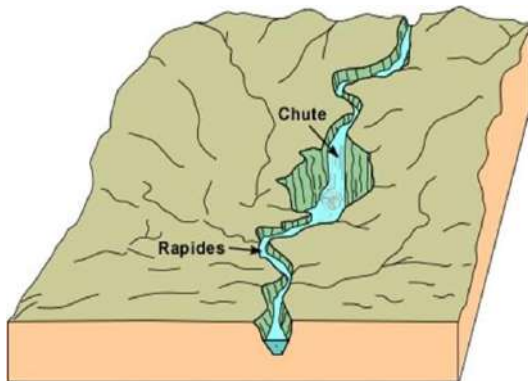


Figure II.10 - Vallée en V.

- en U, ou gorges dans les roches consolidées.

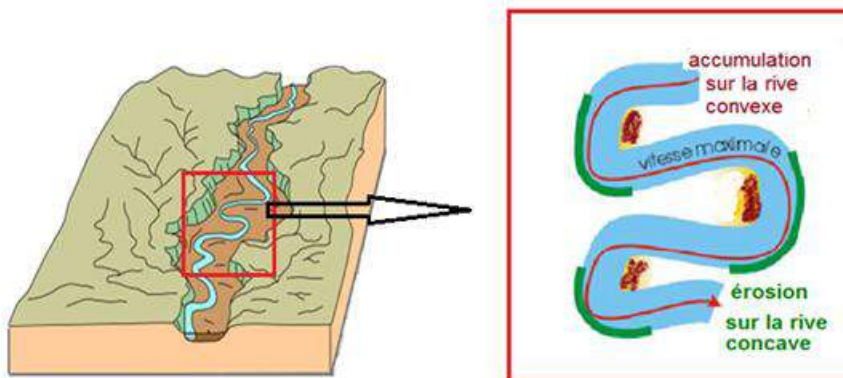


Figure II.11 - Vallée en U.

Figure II.12 - Formation des méandres par érosion

Dans les sinuosités des cours d'eau, ou méandres, l'érosion a lieu sur la rive concave, abrupte où le courant est fort, qui par conséquent recule. Alors que la rive convexe, basse et où le courant circule lentement, est le siège de dépôt. Ces mouvements des rives sont à l'origine de la migration des méandres vers l'aval (Figure II.12).

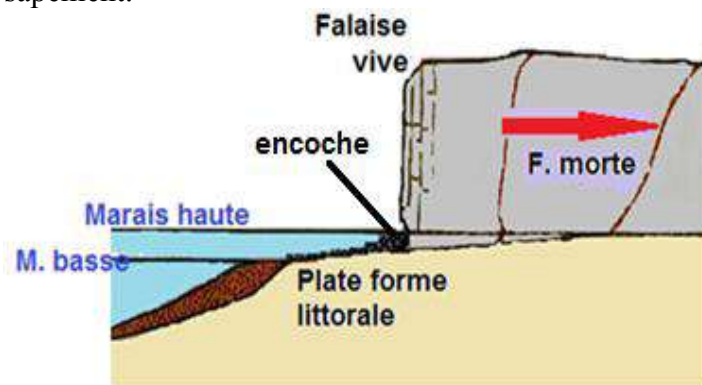
I.B.4.L'érosion marine : Les vagues et les courants marins sont des agents d'érosion qui contribuent au façonnement des rivages, mais ces derniers sont également actifs en milieu marin profond. Sur les littoraux, l'érosion marine produit les falaises, les encoches et les plates-formes d'abrasion (Fig. 15). En milieu marin profond, les courants peuvent déplacer des matériaux et creuser des chenaux.

Au niveau des côtes l'érosion est le résultat de plusieurs facteurs, qui agissent généralement ensemble, dont les plus importants :

- la force des vagues et des courants marins,
- les chocs provoqués par les débris de roches transportés par les vagues,
- l'action chimique de l'eau marine.

**1- Erosion des falaises :**

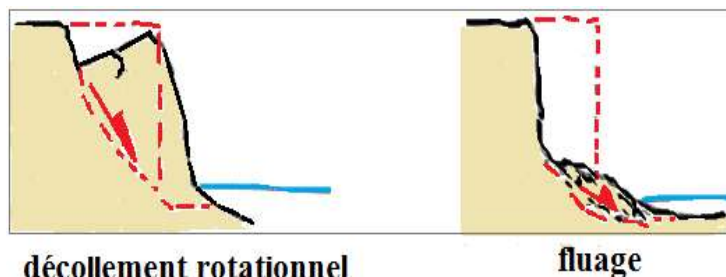
**\*\* Dans le cas des falaises dures :** au pied de l'abrupte, l'action mécanique des vagues, en particulier lorsqu'elles sont armées de projectiles tels les galets, provoque la formation d'une encoche de sapement.



**Figure II.13 - Recul de falaise et formation de la plate forme littorale.**

Cette encoche s'approfondit progressivement jusqu'au moment où les roches en surplomb s'écroulent sous effet de la pesanteur. La mer alors déblaie les éboulis qui se sont déposés au bas de la falaise. Le phénomène recommence une fois les éboulis déblayés. La falaise recule produisant ainsi une plateforme d'abrasion.

**\*\* Dans le cas des falaises tendres** (argileuses ou marneuses par exemple) on ne retrouve généralement pas d'encoche basale. Ce type de falaise évolue rapidement par glissements qui se font de deux manières : décollement par rotation (ou faille panamienne) et fluage (Figure II-14).



**Figure II.14 - Evolution d'une falaise tendre.**

**2- Erosion des côtes basses :**

L'érosion des côtes est en soi un phénomène naturel : la mer vient chercher du matériel à un endroit pour venir le redéposer ailleurs.

\*\* *Les côtes basses rocheuses* : sont caractérisées par des escarpements rocheux (1,5 -10 m de hauteur), les vagues y sont plus fracassantes. L'érosion dans ce type de côte montre une zonation typique :

- *Lapiés*: situés au-dessus du niveau de la haute mer (touché par les embruns et lors des tempêtes) taille 0.5 m de large sur 0.25 m de profondeur
- *Plateforme à vasques*: partie découverte à mi-marée et couverte à haute mer. Formée par des mares assez large (100<sup>2</sup> de m ) et à fond plat et peu profondes (3 à 10cm) tapissé d'algues vertes.
- *Mares de défoncement des vasques*: dans la moitié inférieure de la zone de balancement des marées. La plateforme est perforée d'un réseau de trous de quelques m<sup>2</sup> de superficie chacun, où se trouve des mares de plusieurs décimètres de profondeur.
- *Falaise de basse mer* : sur le niveau de la basse mer.



Figure II.15 - Zonation morphologique sur une côte calcaire de la côte atlantique marocaine (d'après Guilcher).

\*\* *Les côtes basses meubles* : exemple d'une plage.

Les matériaux d'une plage sont constamment mobiles, ils sont sans cesse déplacés. Le budget sédimentaire d'une plage est défini par la somme de l'alimentation et de l'érosion, ainsi la plage peut :

- s'engraisser, si la somme est positive
- s'éroder, si la somme est négative
- rester stable, si la somme est nulle.

L'érosion d'une plage peut être due à des causes naturelles ou à l'intervention humaine.

I.B.5.L'érosion glaciaire : Un **glacier** est une masse de glace plus ou moins étendue qui se forme par le tassement de couches de neige accumulées. Écrasée sous son propre poids, la neige expulse l'air qu'elle contient, se soude en une masse compacte et se transforme en glace.

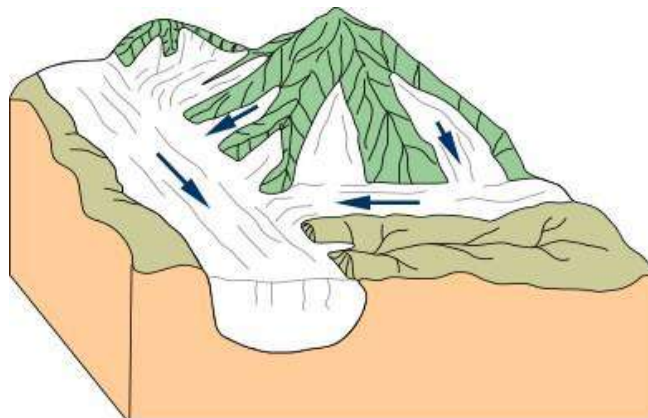


Figure II.16 - Mouvement d'un glacier.

Le mouvement des glaciers provoque 3 groupes de processus d'érosion : l'abrasion, l'enlèvement (arrachement) de blocs et érosion fluvio-glaciaire.

- **Abrasion mécanique** : provoquée par le frottement de la glace chargée de matériaux rocheux sur le substrat. Ce frottement conduit à des creusements de petits sillons (de qqs mm de profondeur), appelés stries glaciaires, parallèles à la direction d'écoulement de la glace.

- **Arrachement de blocs** : le glacier arrache des blocs rocheux lors de son mouvement lent. Ces blocs seront incorporés dans la moraine de font (cf. chapitre 2).

L'arrachement donne aux roches dites moutonnées, une morphologie dissymétrique : elles sont polies à l'amont, là où le glacier est compressé sur la roche, et anguleuses à l'aval des obstacles, là où le glacier se décolle de la roche et où par regel des eaux sous-glaciaires, des morceaux de roche sont arrachés (figure II.17).

- Un cas particulier de l'érosion glaciaire est constitué par l'érosion **glacio-karstique**: ce type de modelé se rencontre dans des zones calcaires, en même temps que d'autres formes *karstiques*.



Figure II.17 - Roche moutonnée.

L'épaisseur d'un glacier peut atteindre des 100<sup>èmes</sup> m. C'est une masse importante qui agit sur la roche de fond comme un bulldozer. Le creusement se fait progressivement à mesure de l'écoulement sur de longues périodes de temps. Au cours des temps, vont se creuser des vallées en U (auge), qui peuvent atteindre aussi des 100<sup>èmes</sup> de mètres de profondeur.

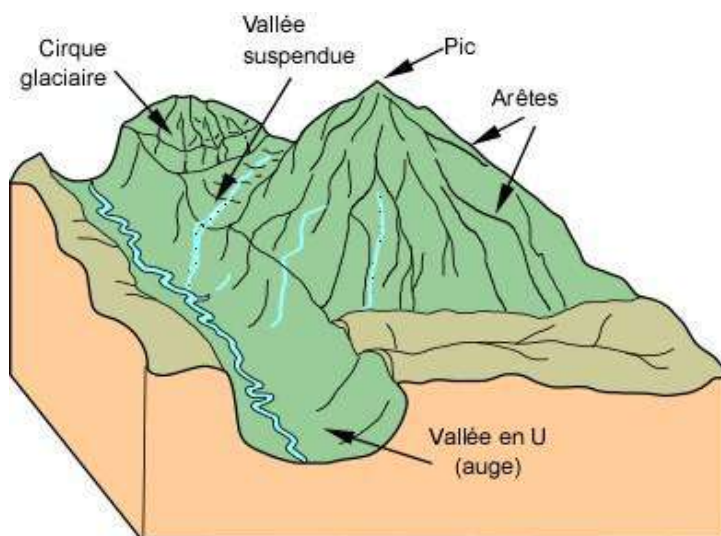


Figure II.18 - Modelé glaciaire.

## II- LE TRANSPORT DES PARTICULES SEDIMENTAIRES

### Généralités

Les particules sédimentaires, issues de l'altération et de l'érosion, vont se mettre en mouvement et se faire transporter, soit par l'écoulement d'un fluide (eau, vent, glace) ou par l'action de la gravité. Le transport des sédiments s'effectue généralement en plusieurs phases (transport, dépôt, transport,... etc.) et les moteurs de transport peuvent se succéder dans le temps et/ou combiner leur action.

Les sédiments sont transportés depuis les zones sources jusqu'aux zones de dépôt par trois types de processus:

- \* glissements en masse par gravité en l'absence de fluides,
- \* écoulements gravitaires en présence de fluides,
- \* écoulements d'eau, d'air ou de glace.

### 1- Les écoulements par un fluide (eau, air ou glace) :

#### \*\* Rappel de la mécanique des fluides :

L'eau, le vent et la glace peuvent déplacer les particules sédimentaires sur de grandes distances. La capacité d'un fluide à mobiliser et transporter des sédiments dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont sa masse volumique  $\text{g/cm}^3$ , sa viscosité et sa vitesse.

- Masse volumique de : Eau de mer =  $1,03 \text{ g/cm}^3$ , eau douce =  $1 \text{ g/cm}^3$ , glace =  $0,9 \text{ g/cm}^3$ , air =  $0,001 \text{ g/cm}^3$ .
- Viscosité de la glace < Viscosité de l'eau < Viscosité de l'air.

Les principales différences entre sédiments éoliens (sable fin et silt), glaciaires (galets, sable, boue) et alluviaux sont la conséquence de ces masses volumiques et viscosités distinctes.

En général, l'aptitude d'un fluide en mouvement à transporter du sédiment dépend en partie de son mode d'écoulement. Il en existe deux types (Figure II.19) :

- \* les écoulements laminaires : les lignes de courant sont parallèles entre elles,
- \* les écoulements turbulents : les lignes de courant se recoupent.

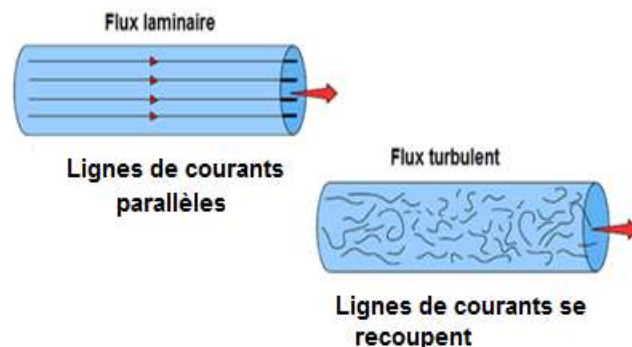


Figure II.19 - Ecoulements d'un fluide.

Pour un même fluide (par exemple : l'eau), la capacité d'un courant turbulent (c'est à dire la charge solide qu'il peut transporter) est plus élevée que celle d'un courant laminaire.

La turbulence d'un écoulement est proportionnelle à sa vitesse et inversement proportionnelle à la viscosité du fluide.

L'air et l'eau montrent le plus souvent des écoulements turbulents alors que la glace, beaucoup plus visqueuse, s'écoule de manière laminaire.

## 2-L'entraînement des particules :

En fonction de la vitesse de courant et de la dimension des particules, Hjulström a établie un diagramme délimitant les 3 domaines de la géodynamique externe et montrant le comportement des particules en fonction de leur taille et de la vitesse du courant.

Une particule est mise en mouvement lorsque la vitesse d'écoulement d'un fluide atteint une valeur limite appelée *vitesse critique d'érosion*. Cette vitesse est toujours plus élevée que la vitesse nécessaire au maintien du déplacement d'une particule déjà en mouvement.

La vitesse critique d'érosion dépend de la viscosité du fluide et de la taille de la particule :

- minimale pour les particules dont le diamètre est compris entre 0.1 et 0.5 mm,
- plus élevée pour les particules dépassant 0.5 mm, qui sont plus lourdes, plus grande pour les particules fines (argiles, silts) qui sont plus cohésives en raison des forces électrostatiques qui les lient. Ce paradoxe s'appelle l'*effet de Hjulström*.

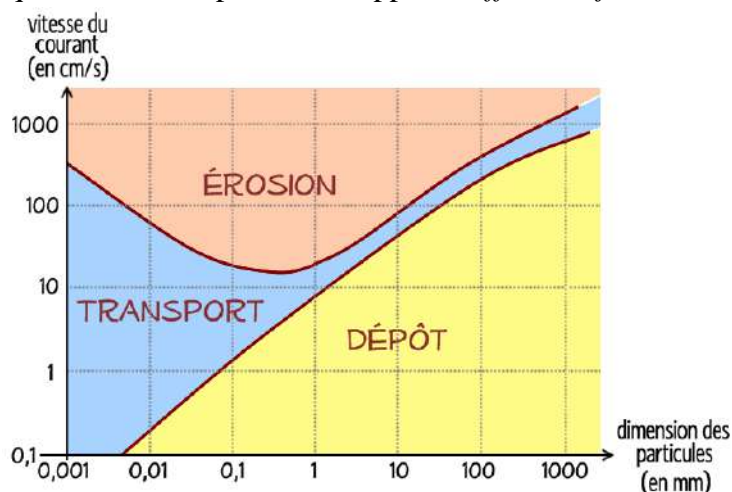


Figure II.20 - diagramme de Hjulström : équilibre des particules en fonction de leur taille et de la vitesse du courant qui les balait.

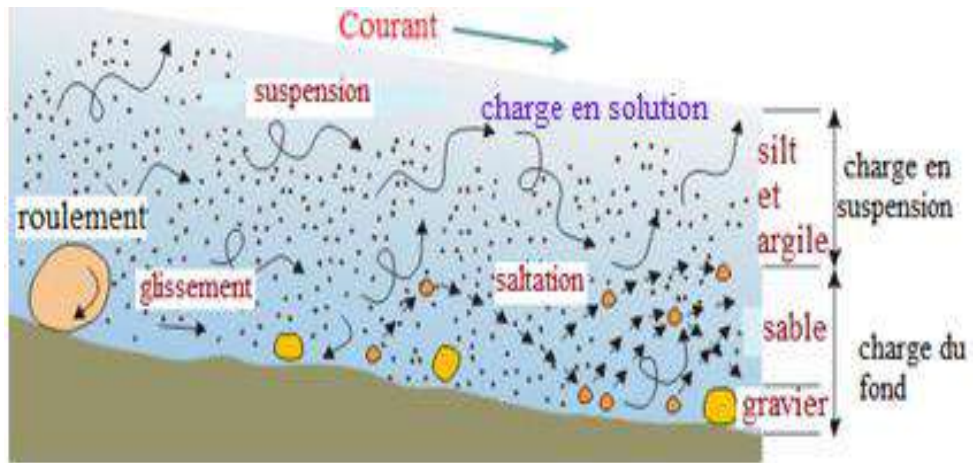
## 3- Principaux agents de transport :

En plus du vent et de la glace, l'eau reste l'agent principal du transport des particules sédimentaires. Selon le mode et l'énergie du transport, le sédiment résultant comportera des structures sédimentaires variées.

L'agent de déplacement a une capacité variée de mise en mouvement des particules ou ions et leur exportation vers des milieux de sédimentation.

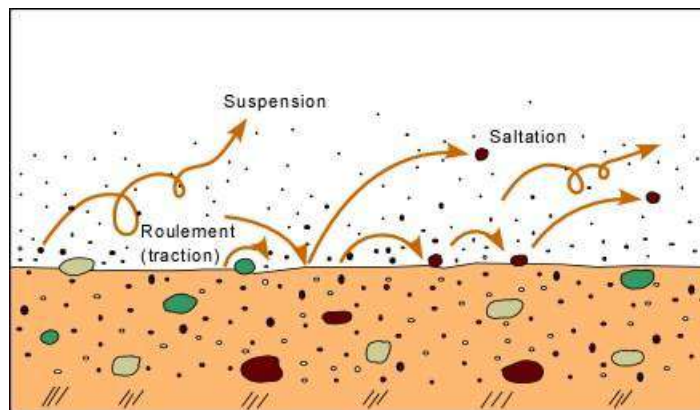
### 3.a- Déplacement par un fluide (eau, vent, glace) :

- **Transport par l'eau** : L'eau est le plus important agent de transport des particules sédimentaires. On distingue plusieurs modes de transport dans l'eau : roulement et traction le long du fond, saltation et en suspension. Les particules en mouvement par roulement, traction et saltation constituent la charge du fond (galets, sables). La charge en suspension est constituée de particules plus fines (argile silt ...etc.). Dans un cours d'eau, de nombreuses substances sont également transportées sous forme dissoute « en solution » dans l'eau.



**Figure II.21 - Mode de transport par l'eau.**

- **Transport par le vent** : L'air étant un fluide de faible densité et de faible viscosité, il ne peut transporter que des particules de petite taille (quelques  $1/10^{\text{ème}}$  de mm). Par contre le choc des grains entre eux est plus violent que dans le transport aquatique. Les grains présentent des traces de chocs en « V ».



**Figure II.22 - Mode de transport par le Vent.**

Les sédiments éoliens peuvent être transportés par reptation, roulement, saltation et en suspension (Fig. II.22).

A noter que des particules peuvent être transportées sur de très grandes distances. Chaque année, des quantités énormes (plusieurs millions de tonnes) de poussières du Sahara arrivent en Europe.

- **Le Transport par la glace** : La glace des glaciers est un fluide très visqueux qui s'écoule de manière laminaire à des vitesses pouvant atteindre quelques dizaines de mètres par an. La charge qu'elle transporte dépend de l'approvisionnement du matériau.

Les glaciers peuvent transporter d'énorme quantité de débris, sur de grande distance. Le matériau transporté est fortement hétérogène et hétérométrique, ne montre aucun classement par taille (ça peut aller de blocs énormes Jusqu' aux argiles).

### **3.b- Ecoulements gravitaires en présence de fluide : (Figure II.23)**

Dans ces phénomènes les particules sédimentaires sont en suspension dans un fluide, mais leur mouvement est dû à la gravité et non au déplacement du fluide lui-même. On distingue 3 types :

**\*\*Grains flows** : se déclenchent lorsque la pente d'un dépôt est supérieure à la pente d'équilibre. Les particules sont maintenues en mouvement par des forces dispersives dues

aux multiples collisions entre les grains. L'air ou l'eau n'agit que comme lubrifiant, mais ne propulse pas les grains.

**\*\*Débris flows :** sont des écoulements, sous l'action de la gravité, de boues contenant quelques gros éléments (galets, blocs). Lorsque les forces de gravité deviennent moins fortes que les forces de frottement, la coulée s'arrête.

**\*\*Courants de turbidité :** sont des écoulements gravitaires, dans lesquels les sédiments sont maintenus en suspension par la turbulence du fluide interstitiel. Ils se produisent quand le choc ébranle une masse de sédiments. Ce mélange d'eau et de sédiments a une densité plus grande que celle de l'eau et se déplace vers le bas sous l'effet de la gravité.

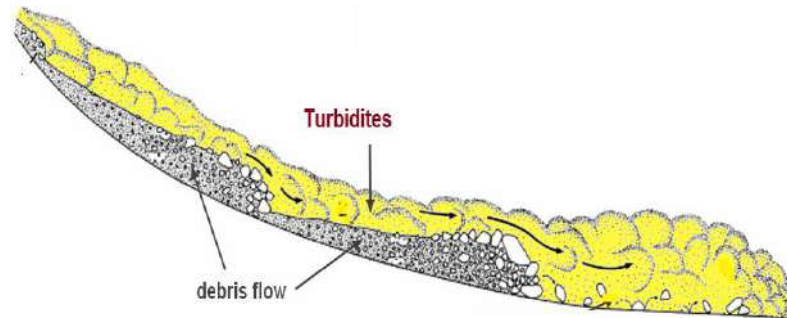


Figure II.23 - Ecoulement gravitaire en présence d'eau.

### 3.c. Eboulis de gravité en l'absence de fluide :

Ces processus déplacent des masses considérables de sols et débris rocheux sur des distances courtes. Dans ce cas, les sédiments ne sont pas transportés par le mouvement d'un fluide, mais en masse par l'action de la gravité après une rupture de pente. Les fluides, principalement l'eau, sont souvent présents dans ce type de transport, mais ils ne servent qu'à réduire le frottement entre les grains.

Selon la présence croissante d'un fluide, on distingue les processus suivants (Figure II.24) :

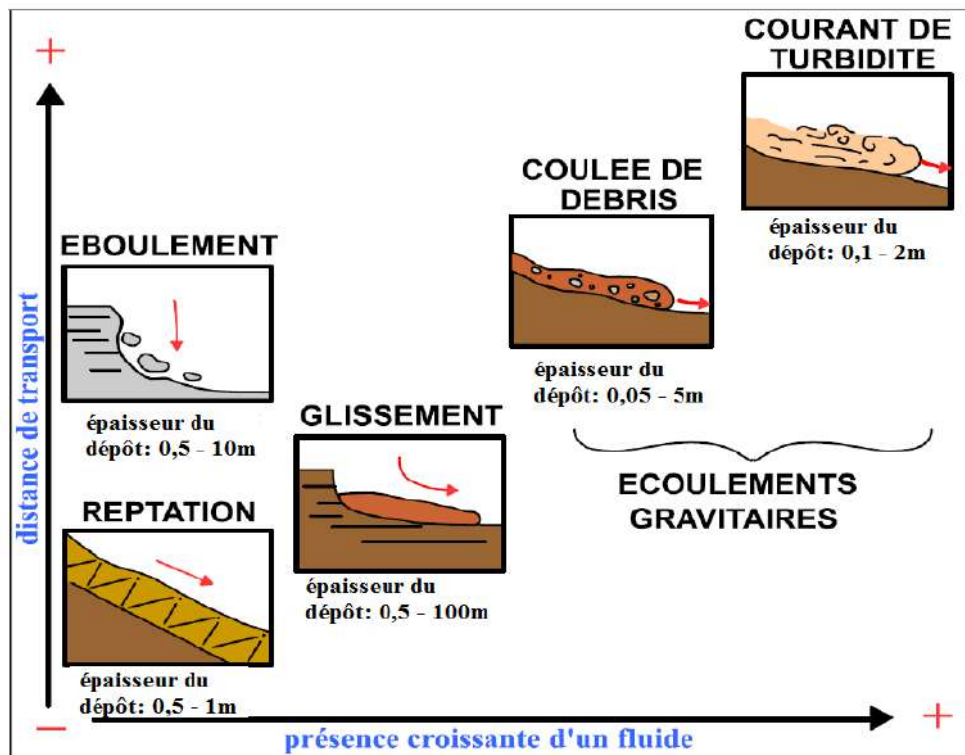


Figure II.24 – Déplacement en masse et écoulement gravitaire.



\* **la reptation** : mouvement lent des sols selon la pente, généralement sans décollement.

\* **les glissements** : déplacement d'une masse de roches ou de sédiments selon une surface de rupture. Les fluides ne jouent qu'un rôle mineur, par leur effet lubrifiant à la base des unités transportées. Ils sont très variés et nombreux (glissement rapide, actif ou sans signe d'activité, rotationnel... etc.).

\* **les éboulements rocheux et éboulis** : chute libre de blocs à partir de reliefs escarpés. Leur accumulation de façon chaotique et sans classement à la base des falaises (écroulement d'un pan de falaise donne des dépôts appelés éboulis. Ils sont très fréquents en montagnes et dans les endroits très fortes pentes (Figure II.25).

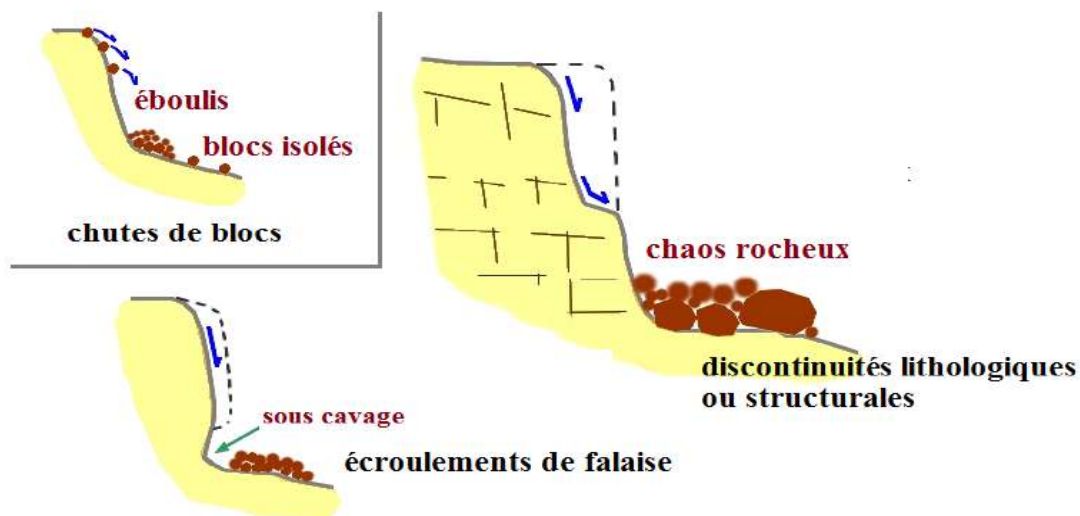


Figure II.25 - Eboulis de gravité.

#### 4- Les effets du transport :

Le transport prolongé des particules sédimentaires conduit généralement à :

- une réduction de la taille des grains,
- un tri du matériel (un classement du sédiment en fonction de la taille des grains),
- une augmentation de l'arrondi des particules.

L'ampleur de ces effets dépend cependant de la taille et de la nature des grains transportés, ainsi que de la viscosité et de la vitesse du fluide en mouvement.

L'eau et le vent ont par exemple une bonne capacité à trier les sédiments, mais ce n'est pas le cas de la glace.

Les galets sont rapidement arrondis lors d'un transport fluvial (10 km pour un galet calcaire, 300 km pour un galet siliceux).

Les sables, qui sont souvent constitués de quartz, peuvent rester anguleux même après avoir subi un long voyage subaquatique. Ces mêmes sables sont par contre plus facilement arrondis lors d'un transport éolien car les impacts entre les grains sont plus violents en raison de la faible viscosité de l'air.

### III- DEPÔT DE SEDIMENTS (Sédimentation)

La sédimentation peut être définie comme une accumulation des particules sédimentaires sur une surface. Les constituants de roches sédimentaires sont très variés, d'où la notion de roches hétérogènes. Ils peuvent être classés dans trois grandes catégories :

**1- Les Particules solides terrigènes :** Toute particule issue à l'état solide de l'altération et de l'érosion, à partir des terrains anciens, est considérée terrigène. Elles sont de 2 types :

**1.a- Détritiques inorganiques:** ce sont des débris de roches ou de minéraux provenant de l'altération et érosion du continent,

**1.b- Détritiques organiques (bio-détritiques):** composés d'au moins 50% de débris d'organismes terrestres ( plantes, charbon, bitumes, ambre, squelettes ...etc).

**2- Les Particules solides non terrigènes,** peuvent être :

**2.a-Volcanoclastiques :** particules d'origine volcanique, comprenant des fragments de roches, des cristaux et des morceaux de verre volcanique. Parfois, des cendres volcaniques projetées vers l'atmosphère finissent par retomber dans les océans.

**2.b-Bioclastiques :** débris provenant des organismes vivants dans le bassin de sédimentation ( coquilles, tests, os ...etc).

**3-Les Particules solides naissant dans l'eau du bassin par :**

**3.a- Sécrétion biologique :** exemple, boues carbonatées secrétée par des organismes tels les algues ;

**3.b- Précipitation (bio) chimique :** exemple, Ooïdes, grains constitués d'un "nucleus" (fragment de coquille, grain de sable) autour duquel précipite de la calcite ou de l'aragonite, formant un "cortex".

**3.c- précipitation orthochimique (chimique pure),** correspond aux précipités chimiques dans le bassin de sédimentation ou à l'intérieur du sédiment durant la diagenèse.

#### III.1- PROCESSUS DE DEPOT :

##### *Principes de base :*

\*\* le dépôt de sédiments a lieu lorsque la vitesse de l'agent de transport diminue, ou lorsque cet agent de transport disparaît (fonte de glace, disparition de la pente ...etc.). Les substances transportées en solution dans l'eau, précipitent et s'accumulent dans le bassin de sédimentation lorsque les conditions physico-chimiques sont favorables.

\*\* Le bassin de sédimentation est un milieu (une dépression) où règne un ensemble de facteurs physiques, chimiques et biologiques suffisamment constants pour former un dépôt caractéristique; exemples : milieu fluvial, milieu lacustre, milieu deltaïque, milieu marin.

\*\* la granulométrie des particules, la texture des sédiments, la géométrie des dépôts constituent des importants indicateurs de l'agent de transport, sa vitesse au moment de dépôt et sa direction.

### 1- **Sédimentation des particules détritiques :**

Le dépôt des particules détritiques s'effectue en fonction de la vitesse du courant et de la granulométrie du sédiment. Elle est déterminée par les conditions qui régnaient au moment du dépôt, mais il n'y a pas de relation directe.

### 2- **Floculation des colloïdes :**

Les fines particules argileuses, transportées en suspension dans l'eau (état colloïde), peuvent flocculer, et par conséquent leur taille augmente ce qui facilite leur dépôt.

### 3- **Précipitation chimique :**

Sa nature dépend du climat, du chimisme de l'eau, de l'activité organique.

Exemples :

- Sous un climat froid, l'hydrolyse ferrique précipite en pisolites, les frustules siliceuses de diatomées s'accumulent.
- Sous un climat tempéré, il y a surtout précipitation de  $\text{CaCO}_3$  par mécanisme purement chimique ou par l'intermédiaire des organismes vivants (algues cyanobactéries, plantes supérieures, mollusques ...etc.).

## III.2- **LES DIFFERENTS TYPES DE DEPÔTS :**

Les dépôts sédimentaires peuvent être classés en 4 catégories principales d'après le processus du transport des particules sédimentaires:

**1- Les dépôts de courant de traction**, formés par un matériel grossier, graviers et sables, transporté par roulement et saltation.

**2- Les dépôts de décantation**, formés de sédiments fins (argiles, silts, débris d'organismes), transportés en suspension.

**3- Les dépôts gravitaires** sont des sédiments très mal classés (mélange de particules fines et grossières) issus de déplacements en masse (coulée de boue, coulée de débris).

**4- Les dépôts glaciaires, ou diamictites**, s'accumulent après la fonte d'un glacier. Ils sont très mal classés et chaotiques (pas de tri) et ressemblent aux dépôts gravitaires.

## IV- **DIAGENESE**

C'est l'ensemble des processus physiques et chimiques qui affectent les sédiments (état meuble) après leur dépôt et les transforme progressivement en roches sédimentaires (état consolidé).

Les phénomènes de la diagenèse affectent les sédiments entre la surface (diagenèse précoce) et une profondeur de 10 à 12 km (diagenèse tardive) où la T° est d'environ 300°C.  
La transformation des sédiments en roche cohérente se déroule en plusieurs étapes :

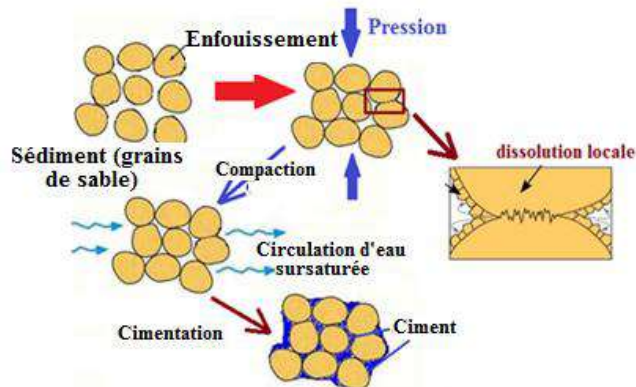


Figure II.26 - Etapes de la diagenèse.

**1. La compaction :** est un phénomène physique et/ou chimique responsable du tassement des roches sous l'effet d'une surcharge sédimentaire. Ce processus se réalise au fur et à mesure que d'autres sédiments viennent recouvrir le dépôt pour l'amener progressivement sous plusieurs dizaines, centaines ou même milliers de mètres de matériel.

**Résultat :** Arrangement plus serré des grains, réduction de la taille des pores, expulsion de l'eau contenue dans ces derniers, et finalement, réduction du volume et un accroissement de la densité du sédiment.

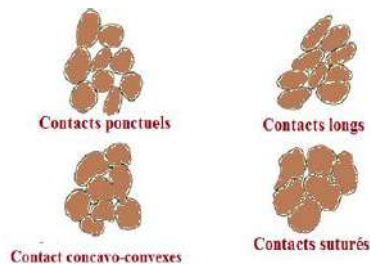


Figure II.27 - Différents types de contacts entre les grains après compaction.

**N.B. :** Tous les sédiments ne réagissent pas de la même façon lors de la compaction. En général, les dépôts fins, qui sont très poreux, sont davantage affectés par la compaction que les sédiments grossiers. Le volume d'un sédiment boueux (un mélange d'argiles et de silts) peut être réduit de 30% par compaction à une profondeur de 1000 m).

**2. La dissolution :** la mise en solution des constituants chimiques des grains ou de ciments. Elle peut être causée par une augmentation de la pression ou par la présence d'eaux agressives (*vadose*) (c.à.d. riches en CO<sub>2</sub> dissout ou à pH élevé) dans les pores.

Exemples :

\* Les minéraux calcaires (calcite, aragonite) sont dissous dans les eaux froides et riches en CO<sub>2</sub>.

\* Les minéraux silicatés (feldspaths, amphiboles, pyroxènes) sont dissous dans des conditions de T° élevée.

La dissolution peut être sélective et n'attaquer que certains grains du sédiment ou de la roche. Dans les calcaires, ces grains dits «instables» sont souvent constitués d'aragonite. Ce phénomène conduit à une augmentation de la porosité du sédiment ou de la roche : porosité «secondaire».

**3. La cimentation :** l'eau qui circule entre les grains finit par être sursaturée en certains minéraux. En circulant entre les grains, elle précipite ces minéraux dans les pores des grains. Ces derniers se soudent et on obtient alors une roche sédimentaire.

**4. La recristallisation :** au cours de l'enfouissement, la pression et la Température augmentent favorisant la dissolution de certains minéraux. Ces derniers vont se recristalliser sous de nouvelles conditions de milieu.

## CONCLUSION :

La désagrégation mécanique prédomine dans les régions présentant de forts reliefs, un faible couvert végétal, et caractérisées par de grandes amplitudes thermiques.

L'altération chimique peut entraîner, suivant la nature des roches qu'elle affecte, une dissolution (roches carbonatées) ou une hydrolyse (roches silicatées) de certains de leurs minéraux. Dans ce dernier cas, l'altération s'accompagne de la production d'argiles dont la nature témoigne de l'intensité de l'hydrolyse, elle-même augmentant avec la température des eaux de drainage et l'intensité de celui-ci.

Les êtres vivants influent de multiples façons sur l'altération : ils accroissent la désagrégation mécanique et interviennent sur la chimie des eaux de drainage en les acidifiant notamment, ce qui renforce leur potentiel d'altération. Enfin, l'altération des roches est presque toujours accompagnée d'une consommation de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> et interfère donc avec le Cycle du Carbone.

Les produits de l'altération peuvent aussi être mobilisés, sous forme solide, par des fluides en mouvement : on parle alors d'érosion. Dépendante de l'hydrodynamisme des eaux continentales, elle est donc conditionnée par l'existence, l'entretien et la vigueur des reliefs.

L'altération et l'érosion se traduisent au final et le plus souvent par le transport de particules détritiques, d'espèces ioniques en solution et de débris organiques depuis les aires continentales vers l'exutoire naturel des réseaux fluviaux, le milieu marin. Chacune de ses lignées participe alors, directement ou indirectement, à la formation de sédiments.

Cependant, une partie des produits d'altération peut échapper à cette logique et contribuer à la formation sur place de formations résiduelles; compte-tenu de l'influence du climat sur leur production, celles-ci sont à même de constituer, lorsqu'elles sont conservées au cours des temps géologiques, une mémoire des conditions climatiques anciennes.

## V- CLASSIFICATION DES ROCHES SEDIMENTAIRES

Les roches sédimentaires couvrent à peu près 70 à 75% de la surface terres émergées, alors qu'elles ne forment que 5 % environ de l'écorce terrestre. Elles sont de composition chimique et minéralogique très variée.

D'une manière générale, les roches sédimentaires sont constituées par 3 grands pôles (ou fractions) différents :

- (1) Le pôle détritique : Par érosion de roches en places,
- (2) Le pôle biologique : Dû à la production biologique (fixation des éléments),
- (3) Le pôle chimique : Par précipitation, concentration ou évaporation.

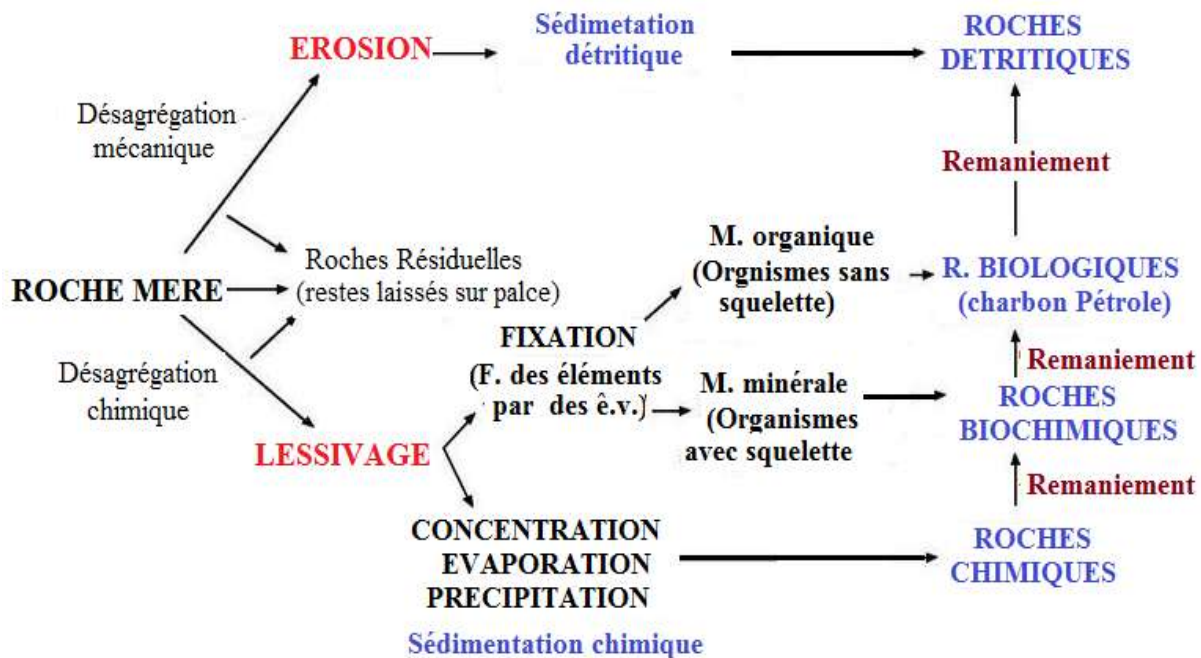


Figure II.28 - Grands types de Roches Sédimentaires.

### 1- LES ROCHES DETRITIQUES :

Elles sont formées de débris et de fragments de roches anciennes qui ont subi une érosion mécanique. Ou par l'accumulation de squelettes d'organismes vivants.

Selon l'origine des débris qui les constituent, ces roches sont classées en plusieurs types :

- \*R. détritiques terrigènes (silicoclastiques),
- \*R. détritiques volcanoclastiques,
- \*R. détritiques biodétritiques.

## 1.A- Roches détritiques terrigènes :

Appelées aussi R. silicoclastiques, elles sont essentiellement composées de minéraux résistants (quartz, feldspath, micas) et de fragments rocheux, appelés lithoclastes. Elles représentent environ 70% des roches affleurant à la surface de la Terre.

En fonction de la taille de leurs éléments constitutifs, ces roches sont subdivisées en 3 grands groupes : **Classification granulométrique.**

**\*\* Conglomérats :** Constitués principalement d'éléments dont la taille est  $> 2\text{mm}$  (au moins 50%). Ces lithoclastes, sont souvent entourés d'une matrice formée par des éléments plus petits que 2mm.

En fonction de la forme des lithoclastes on distingue les conglomérats :

- Poudingues**, caractérisés par des lithoclastes arrondis,
- Brèches**, dont la plupart des grains sont anguleux.

Taille	50cm	20cm	2cm	2mm	50 $\mu$	2 $\mu$
Particules	Blocs	Galets	Graviers	Grains	Poussières	P.ultra-fines
Sédiments	Blocs	Glaets	Graviers	Sables	Silt	Boue
ROCHES	Conglomérats (1)			Grès Wackes	Pélites	Shales
GROUPES	RUDITES		ARENITES		35 $\mu$	LUTITES

Tableau 1 : Classification simplifiée des roches détritiques.

En fonction de la nature des lithoclastes, poudingues et brèches sont appelés :

- Monogéniques** (ou monomictes), les lithoclastes possèdent la même composition,
- Polygéniques** (ou polymictes), les lithoclastes sont de composition différente.

Un **conglomérat intraformationnel** est un conglomérat monogénique dont les éléments et la matrice sont de même nature.

**\*\* Grès :** Les constituants majeurs des grès, sont le quartz, feldspaths et lithoclastes (fragments de roches) qui peuvent être entourés par *une matrice* formée de matériel plus fin ( $t < 63 \mu\text{m}$ ), ou encore être liés par *un ciment*, souvent constitué de quartz ou de calcite.

Pour combiner la composition minéralogique des grès avec la teneur en matrice fine, Dott a choisi de diviser les grès en 3 grandes familles:

- Les Arénites (de 0 à 15% de matrice)
- Les Wackes (15 à 75% de matrice)
- Les Mudrocks ou Mudstones (> 75% de matrice)

\*\* **Pélites ou Lutites:** Sont formées de particules de taille  $< 63\mu\text{m}$ . Cette catégorie regroupe les :

- **Siltstones**, ou grès fins ( $63\mu\text{m} < T < 4\mu\text{m}$ ),
- **Argilites** ( $t < 4\mu\text{m}$ ).

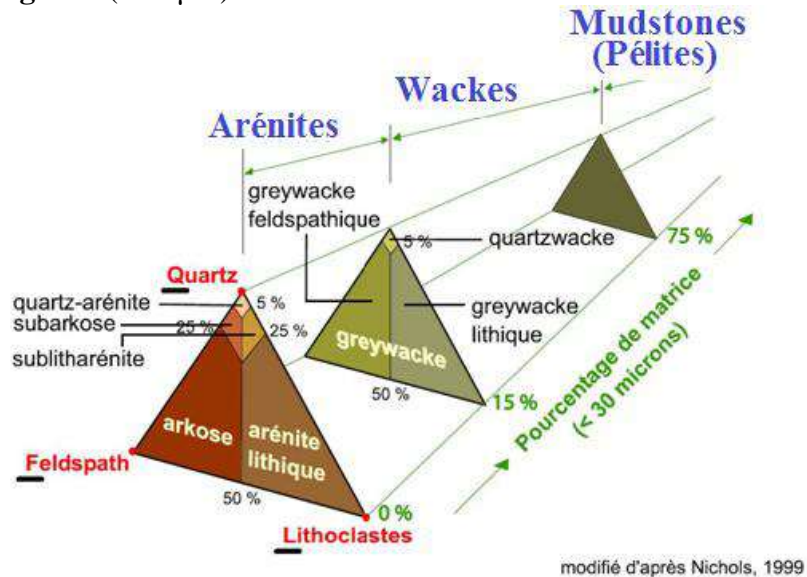


Figure II.29 - Classification de Dott.

### 1.B- Roches détritiques volcanoclastiques :

Sont des roches à double origine à la fois sédimentaires et volcaniques. Elles sont subdivisées en 3 groupes :

1.B.1 - Les R. Pyroclastiques : correspondent à l'accumulation de matériel solide ou pâteux éjecté d'un volcan lors de son éruption explosive, ou lors de l'effondrement d'une colonne éruptive ou encore de l'écroulement d'un dôme volcanique. Telles les roches détritiques, elles sont classées en fonction de la granulométrie :

- **Les brèches et agglomérats volcaniques** : particules de  $t > 64\text{ mm}$ .

Les brèches volcaniques sont composées de fragments volcaniques solides, alors que les agglomérats correspondent à une accumulation de bombes ou fragments de roches encore fondus.

- **Les lapilli** :  $2\text{mm} < t < 64\text{mm}$
- **Les cinérites** : sont des dépôts de cendres,  $t < 2\text{ mm}$ .



1.B.2 -Les R. Hyaloclastiques (hyaloclastites) : résultent de la fragmentation de coulées de lave au contact de l'eau ou de la glace lors d'éruptions sous-marines ou sous-glaciaires, ou lorsqu'une coulée de lave subaérienne entre en contact avec un plan d'eau.

Les roches hyaloclastiques sont souvent associées aux laves en coussins (pillow lava), et sont riches en verre volcanique en raison du refroidissement rapide de la lave.

1.B.3 -Les R. Epiclastiques : sont des dépôts résultant de l'altération, de l'érosion et du transport de roches volcaniques ou volcanoclastiques **préexistantes**.

Elles sont classées en fonction de leur granulométrie en 3 catégories :

\* Les **conglomérats volcaniques épicastiques** : taille de particules > 64 mm.

\* Les **grès volcaniques** :  $2 \text{ mm} < t < 64 \text{ mm}$ .

\* Les **pélites volcaniques épicastiques** :  $t < 2 \text{ mm}$ .

Les roches épicastiques peuvent contenir des fragments d'origine non-volcaniques et même des fossiles.

### **1.C - Roches bio-détritiques :**

Ce sont des roches formées d'au moins 50% de débris de squelettes, ou tests d'organismes vivants.

## **2- LES ROCHES CHIMIQUES ou ORTHOCHIMIQUES:**

Dans cette catégorie, selon la nature de la substance précipitée, on distingue :

**2.A- Roches chimiques Carbonatées** : formées de calcite, d'aragonite ( $\text{CaCO}_3$ ), ou de dolomite ( $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ ).

Elles résultent de la précipitation de carbonates à partir d'une solution aqueuse. La solubilité du  $\text{CaCO}_3$  dans l'eau est fonction de la teneur de celle-ci en dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Une précipitation survient lorsque le  $\text{CO}_2$  est soustrait au système comme, par exemple, lors d'une évaporation, d'une baisse subite de la pression ambiante ou d'une augmentation de la  $T^\circ$ .

Les principales roches de cette catégorie sont:

- les **Travertins** (ou tufs calcaires), qui se forment aux émergences des sources et comportent fréquemment des empreintes de végétation;

- les **Stalactites** et les **Stalagmites**, qui précipitent dans les grottes suite à l'évaporation des eaux d'infiltration;

- les **Calcrètes**, croûtes calcaires que l'on trouve dans certains sols.

**2.B- Roches siliceuses** : formées de quartz (ou silice)  $\text{SiO}_2$ . Elles sont constituées d'au moins 50% de silice, et se forment aussi bien en milieu marin qu'en milieu lacustre. La silice

provient de la dissolution de roches diverses et en particulier les roches volcaniques. Elles peuvent précipiter directement, lorsque le seuil de sursaturation en silice est atteint. Les formes les plus courantes sont le quartz, la calcédoine et l'opale. Exemples de roches : silex

**2.C- Roches évaporitiques :** Elles se forment lorsqu'une certaine quantité d'eau se trouve plus ou moins isolée en milieu aride. La concentration en ions de l'eau isolée augmente, jusqu'à ce que ceux-ci précipitent au fond de la retenue d'eau. Les principaux minéraux évaporitiques sont le Gypse, sel gemme et Halite.

**2.D- Roches Ferrifères :** contenant divers composés de fer (oxyde de fer  $Fe_2O_3$ , hydroxyde de fer  $FeO(OH)$ ...). Le lessivage et l'altération de cendres de laves volcaniques, ainsi que l'activité hydrothermale associées, constituent une source considérable de fer.

### 3- LES ROCHES BIO-CHIMIQUES :

Elles résultent d'une bio-précipitation, c.à.d. précipitation par l'action des organismes vivants, qui ont utilisés des substances dissoutes dans l'eau pour la construction de leurs enveloppes ou tests (plancton, algues ...etc). En fonction du minéral utilisé par ces organismes on trouve :

**3.A- Roches bio-chimiques Carbonatées :** Résultent de la précipitation de carbonates à partir d'une solution aqueuse, sous l'influence de micro-organismes, tels les algues et bactéries. Exemple : Craie

**3.B- Roches bio-chimiques siliceuses :** Dans ce cas la silice provient de la dissolution d'organismes à test siliceux. Exemples : Radiolarites, diatomites...etc.

**3.C- Roches phosphatées :** formées de variétés du minéral apatite  $Ca_5(PO_4)_3(F \text{ ou } Cl \text{ ou } OH)$ , un cousin du minéral des dents et des os. Exemple : Phosphate

### 4- LES ROCHES CARBONÉES ou ORGANIQUES :

Ce sont des roches biogéniques issues de l'accumulation, de l'enfouissement et de la transformation de sédiments riches en matière organique d'origine animale ou végétale.

**4.A- Les Roches carbonées d'origine végétale :** constituent la famille des charbons, et dérivent de la carbonisation de débris de bois, feuilles, spores, algues, etc.. Cette famille comprend 4 variétés en fonction de la profondeur d'enfouissement : (Figure II.30).

\*\* la **Tourbe (1)**: charbon peu évolué de couleur brune, débris végétaux bien visibles, avec 55 à 60 % de carbone,

\*\* la **Lignite (2)**: charbon brun-noir, plus évolué, débris ligneux encore visibles, avec 66 à 70 % de carbone,

\*\* le **Houille (3)**: (ou charbon s.s.), roche noire, compacte, avec 80 à 90 % de carbone,

\*\* l'**Anthracite (4)** : semblable à la houille, mais avec un taux de carbone de 94 à 96%.

**4.B- Les Roches carbonées d'origine animale :** elles forment la famille du pétrole.

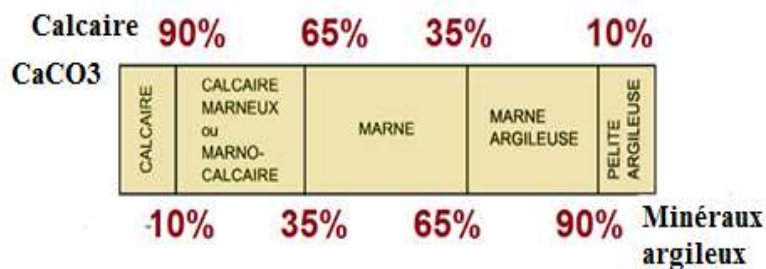


**Figure II.30 - Formation de charbon.**

**5- LES SERIES « CONTINUES » :**

Certaines roches sont difficiles à classer car elles sont composées du mélange de sédiments d'origine différente : argile et calcaire, calcaire et quartz ou encore calcite et dolomite.

Exemple : **série argilo-calcaire** est faite du mélange de matériel argileux et de matériel calcaire biodétritique. Elle comprend les termes suivants : calcaires marneux (entre 10 et 35% d'argile) ; marnes (entre 35 et 65% d'argile) ; marnes argileuses (entre 65 et 90% d'argile).



**Figure II.31 - Série argilo-calcaire**

**CONCLUSION**

On constate donc combien il est difficile d'aborder les notions de classification des roches sédimentaire. Cette difficulté réside dans le fait qu'il existe des roches d'origine diverses à la fois. On peut donc rencontrer plusieurs formes intermédiaires entre différents critères de classement dans les affleurements naturels.

**VI- INTERÊTS GEOLOGIQUES DES R. SEDIMENTAIRES**

Les roches sédimentaires se forment suite à l'accumulation et au compactage de débris minéraux, organiques ou de précipités chimiques. Cette accumulation étant discontinue dans

le temps, donne naissance à une stratification. Plusieurs spécialités de la Géologie fondamentale et appliquée sont directement liées à l'étude des roches sédimentaires telles :

**\*La Stratigraphie :** les strates les plus récentes se déposent au-dessus des précédentes, il s'agit du *principe de superposition*. Cet ensemble de strates constitue alors ce que l'on appelle une série sédimentaire qui correspond au " journal " de l'histoire géologique d'un point géographique donné.

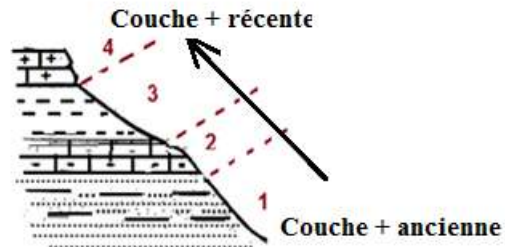


Figure II.32 - Série sédimentaire

A de rares exceptions près, les joints de stratification sont, à l'origine, horizontaux ce qui est le fondement de la Stratigraphie, et ce qui permet d'établir des échelles chronologiques relatives. La stratigraphie occupe une place fondamentale dans la pratique de la géologie.

**\*La Paléontologie :** Les roches sédimentaires, peuvent contenir des fossiles (traces ou restes d'organismes ayant vécu dans les temps lointains du passé). Leur étude fait l'objet de la Paléontologie. Il s'agit là d'une autre branche indispensable dans la pratique de la géologie.

**\*Les reconstitutions de paléogéographie, paléoclimat et paléo-environnement :** la géographie c'est la répartition des Terre et des mers à la surface de la Terre. Or à travers les âges géologiques, la disposition des continents et des océans a changé, entraînant des bouleversements paléotectoniques importants. Ces dispositions, peuvent être mises en évidence par l'étude des formations sédimentaires, leur nature et leur contenu fossilifère.

Une reconstruction paléogéographique s'accompagne souvent d'éléments de contexte paléoclimatologique et paléoenvironnemental.

**\*L'Hydrologie et Recherche des Hydrocarbures :** Certaines R. sédimentaires possèdent des propriétés particulières, porosité et perméabilité, qui leur confèrent un rôle essentiel pour l'accumulation locale soit des eaux dans des « nappes », ou des Hydrocarbures.

## CONCLUSION

L'étude des roches sédimentaires est une discipline de la géologie appelée « Sédimentologie ou Pétrologie sédimentaire ». Cette étude se fait suivant de nombreux protocoles : observation macroscopique, observation sous microscope, études géochimiques. Ceci dans le but, de comprendre leur genèse et le contexte de cette dernière (paléogéographie, paléoclimat, paléoenvironnement ...etc.), de dater les séries sédimentaires, de chercher les roches susceptibles de contenir des fluides présentant un intérêt économique (eau, hydrocarbure)...etc.

## CHAPITRE : 2

### LES MILIEUX DE SEDIMENTATION.

Rappel :

Les particules, transportées à l'état solide ou en solution, par les différents agents de transport, se déposent ou précipitent ensuite dans un milieu de sédimentation.

Un milieu (ou bassin) de sédimentation est une « **unité géomorphologique** » de taille et de forme déterminée où règne un ensemble de facteurs physiques, chimiques et biologiques suffisamment constants pour former un dépôt caractéristique.

Les sédiments peuvent être décrits donc en fonction de leur milieu de dépôt : continental (désertique, fluviatile, glacier, lacustre...), marin (mer, océan) ou intermédiaire (delta, estuaire).

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

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

### LES PRINCIPAUX MILIEUX DE DEPOT.

On distingue trois grands domaines de dépôts sédimentaires :

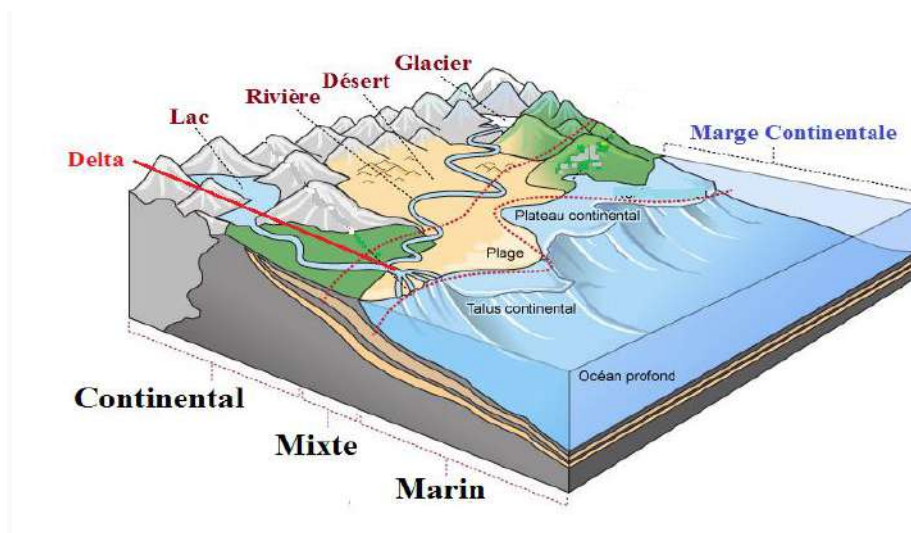


Figure II.33 – Principaux milieux de dépôt.

#### I- LE MILIEU CONTINENTAL

Il s'agit des domaines hors de l'influence de la mer. Il peut être aérien ou aquatique.

#### A- LES ENVIRONNEMENTS AERIENS :

## 1- MILIEU DESERTIQUE :

Un milieu désertique se trouve sous toutes les latitudes, tous climats et tous environnements qu'il soit côtier ou intracontinental. Le désert correspond à des zones continentales avec peu ou pas de couvert végétal, à cause de l'insuffisance des précipitations.

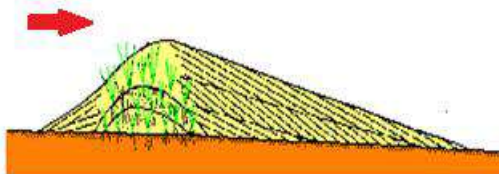
Quand l'énergie du vent diminue, les particules transportées se déposent donnant naissance à des dunes de sables, des *löss* et/ou même des cendres volcaniques. Il s'agit de dépôts éoliens.

### **\*\* Les dépôts de sables éoliens :**

Plusieurs facteurs contrôlent le dépôt et la forme des accumulations sableuses tels: la source et la quantité de sable, la direction et la force du vent, la nature de la surface sur laquelle va se déposer le sable.

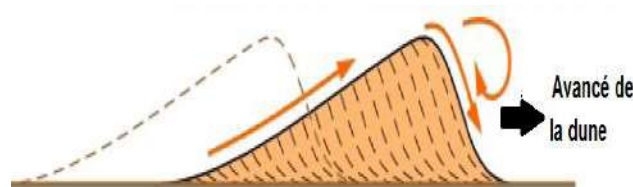
Il existe différents types de corps sableux, mais les plus importants et les plus caractéristiques restent les dunes.

Les *dunes éoliennes* sont des monticules de sables édifiés par le vent dans les déserts ou sur les littoraux. Elles peuvent atteindre une hauteur de 5 à 10m pour une longueur d'onde de quelques 100èmes de m au maximum. Cette hauteur dépend de l'intensité du vent et de la taille des grains de sable.



**Figure II.34 - Dune éolienne.**

Ces dépôts peuvent être remis en mouvement s'ils ne sont pas fixés par la végétation. Les dépôts sont des sables et des poussières.



**Figure II.35 - Migration de la dune.**

Les dunes peuvent avoir différentes tailles et aussi différentes formes. D'où plusieurs types, en fonction du régime du vent et la quantité de sable disponible (Figure II-36) :

### **a- Les dunes *perpendiculaires* à la direction du vent dominant :**

\* les *barkhanes* dunes en croissant avec concavité abrupte sous le vent,

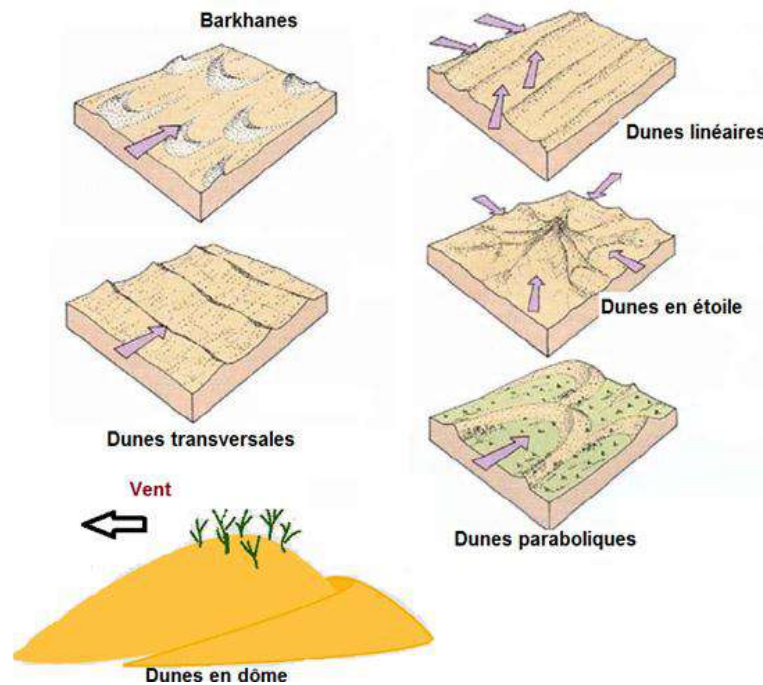
- \* les dunes transversales : rubans perpendiculaires à la direction du vent; la pente sous le vent est la plus forte,
- \* les dunes paraboliques : en forme de langue (forme linguoïde) dont la convexité abrupte est sous le vent.

**b- Les dunes parallèles à la direction du vent dominant :**

- \* les dunes longitudinales (ou *seif*),

**c- Les dunes à formes complexes, œuvres des vents tournants :**

- \*les dunes en dôme et dunes en étoile.



**Figure II.36 - Principaux types de dunes éoliennes.**

**\*\* Les dépôts de poussières :**

Les poussières sont composées essentiellement de particules de la taille des silts et argiles et transportées donc en suspension. Les poussières montrent des vitesses de chute dans l'air très faibles et de là elles peuvent rester longtemps dans l'air et être transportées sur de grandes distances. Elles sont ainsi déposées en dehors des limites des déserts constituant des loess.

**\*\* Les dépôts désertiques marqués par l'influence de l'eau:**

Ils correspondent principalement aux dépôts des wadis, des lacs désertiques et des sebkhas.

- **Les dépôts de wadis** : Les wadis sont des cours d'eau des milieux désertiques, ils sont secs la plupart du temps, à l'exception des périodes juste après les pluies.

La sédimentation est très rapide et les dépôts sont le plus souvent sous forme de cônes. Ces dépôts sont souvent grossiers surtout dans les chenaux.

- **Les dépôts de lacs désertiques et sebkhas** : Les lacs désertiques sont d'une nature semi-permanente, alors que les sebkhas sont très souvent à sec et montrent un fond incrusté de sel.

Les dépôts sont en général fins (silts et argiles) qui alternent avec des niveaux de sel. Ces niveaux évaporitiques plus développés dans les sebkhas.

Des sables liés à l'action éolienne peuvent s'intercaler dans les dépôts désertiques marqués par l'influence de l'eau.

## 2 - LA PENTE OU EBOULIS:

Ce sont des dépôts gravitaires, suite à une rupture de pente.

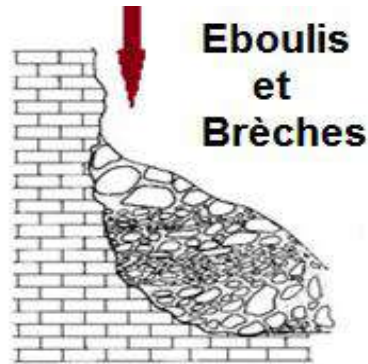


Figure II.37 – Dépôt de pente.

## 3- LES MILIEUX GLACIAIRES :

Un glacier correspond à toute masse de glace formée par l'accumulation de la neige. Les glaciers couvrent environ 16 millions de Km<sup>2</sup> et renferment 98,5 % des eaux douces de la planète. Les altitudes aux quelles se forment les glaciers diffèrent suivant les régions et dépendent de la latitude.

Les glaciers peuvent avoir des tailles variables, depuis la plaque de neige persistante transformée en profondeur (névé) jusqu'aux immenses étendues de glaces continentales (inlandsis). Il existe plusieurs types (Figure II.38) :

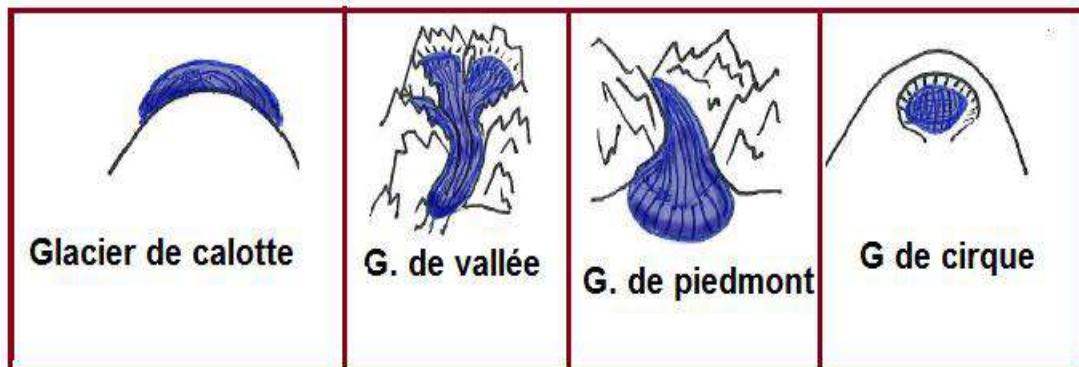


Figure II.38 - Différents types d'appareils glaciaires.



**1. Les inlandsis ou Calottes:** situées dans les régions polaires (Antarctique et Groënland), ces étendues de glaces peuvent atteindre plusieurs milliers de mètre d'épaisseur, et peuvent se prolonger à la surface de la mer en formant des barrières de glace. L'accumulation s'explique plus par la faiblesse de l'ablation que par l'abondance de l'alimentation. Le mouvement de la glace est lent sauf sur les langues périphériques. Celles-ci atteignent quelquefois la mer pour donner des icebergs (glace continentale).

**2. Les glaciers de vallées:** Fréquents dans les chaînes alpines et dans les régions polaires non occupées par les inlandsis, ces masses de glace se trouvent piégées entre les murs d'une vallée de montagne. Ils se présentent en réseau dendritique. La zone d'alimentation comprend des langues issues de glaciers de cirque ou de plateau. Les langues confluent et donnent en aval une langue terminale.

**3. Les glaciers de piedmont :** apparaissent lorsque les glaciers de vallée sont suffisamment alimentés pour se développer à l'extérieur des montagnes. Ce sont des masses de glace formées par la coalescence de plusieurs glaciers de vallée qui se déversent dans la plaine et édifient ainsi des lobes de piedmont (glacier de piémont ou de plaine).

**4. Les glaciers de cirque:** Il s'agit de glaciers suspendus en haute montagne de dimensions réduites en général. Ils sont dominés par des parois sub-verticales d'où descendent les coulées de neige et les avalanches qui les alimentent. Les cirques sont les formes glaciaires et se présentent souvent en groupe, juxtaposés sur les deux versants d'une arête.

**5. Les banquises** (ce ne sont pas de vrais glaciers) : La congélation des eaux marines forme la banquise, une croûte continue d'environ 2m d'épaisseur.

### \*\* Les dépôts glaciaires :

Les matériaux transportés par les glaciers sont sédimentés lorsque la glace fond. Les dépôts glaciaires sont très hétérogènes, non classés, riches en particules fines mais aussi en gros blocs. On peut noter également des dépôts périglaciaires.

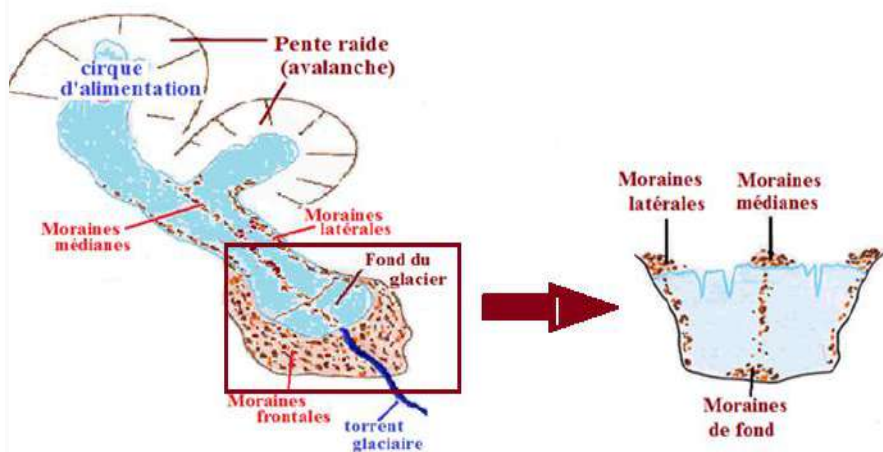


Figure II.39 - Moraines d'un glacier de montagne.

Coupe transversale dans un glacier.

Le retrait du glacier laisse sur place tous ces dépôts, appelés moraines qui caractérisent les paysages glaciaires. Ce sont des accumulations détritiques complexes et variées. Les

glaciologues reconnaissent trois types de moraines : latérales, médianes et frontales (Figure II.39).

**\*Moraine de fond** : appelée aussi « Till », est invisible sous la glace. Ce dépôt est arraché du fond de la vallée et broyé par le mouvement de la glace,

**\*M. latérale** : au niveau des marges du glacier, dépôt composé de roches arrachées par la glace et par le cycle gel-fonte,

**\*Moraine frontale** : se trouve à l'extrémité aval, où les restes des rochers tombent de la glace.

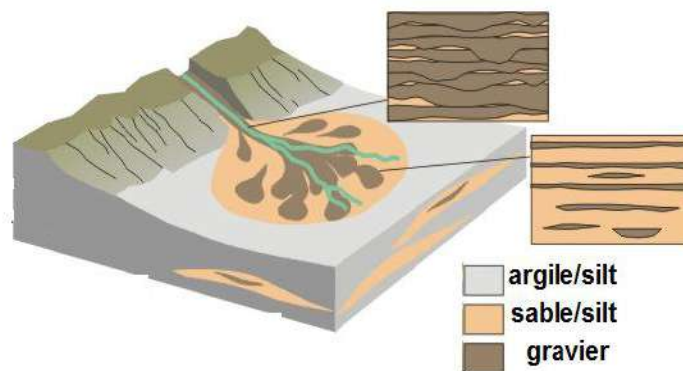
**Remarques** : La distribution des dépôts glaciaires et éoliens peut être visualisée sous une représentation mondiale puisqu'il s'agit d'une distribution directement liée aux régions climatiques. Ainsi, dans le cas des dépôts éoliens en zones arides, il est possible de distinguer les zones désertiques avec formation de dune.

## I.B- MILIEUX AQUATIQUES :

### 1. MILIEU FLUVIATILE :

Les fleuves sont surtout des agents de transport. Cependant, ils déposent aussi les sédiments aux endroits où la vitesse du courant diminue. Un fleuve dépose dans son ou ses chenaux formant son lit mineur des amas de galets et sables appelés barres. Lors des crues, il envahit sa plaine d'inondation et y dépose des matériaux généralement plus fins.

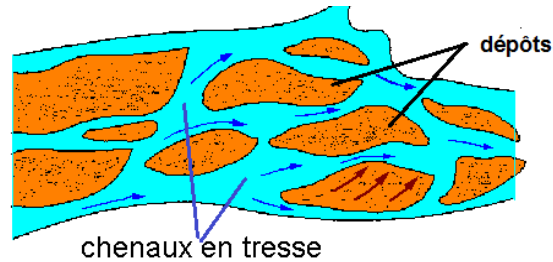
#### **\*\* Les dépôts fluviaux :**



**Figure II.40 - Schéma d'un cône alluvial.**

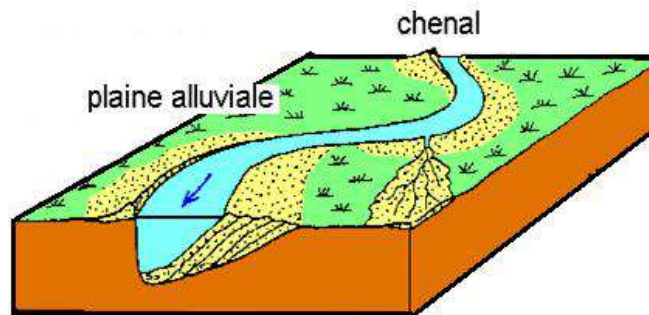
**\* Cônes alluviaux** : sont les premiers corps sédimentaires à se développer. Ils sont caractéristiques des zones tectoniquement actives, avec un rajeunissement permanent de reliefs. Le dépôt est en général une alternance d'écoulements en masses mal classées, de conglomérats et sables fluviaux.

**\*Dépôt du Système fluviatile tresse :** Dans la partie un peu supérieure et moyenne de leur cours, beaucoup de systèmes fluviatiles possèdent un réseau en tresse. Les chenaux s'entrecroisent. Leur charge est importante et grossière et leur débit est variable. Les dépôts de graviers, de sables grossiers et boueux, sous forme de barre qui séparent les chenaux.



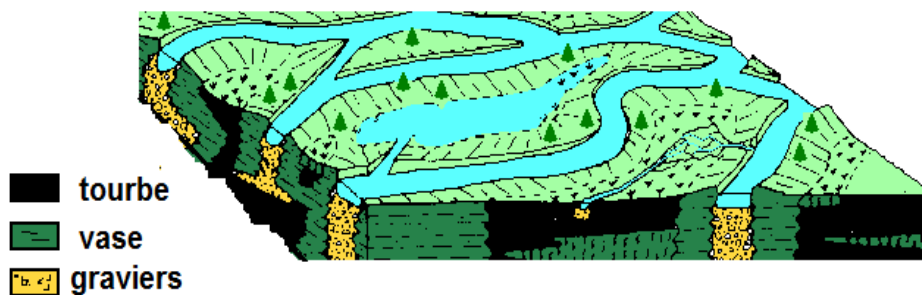
**Figure II.41 - Dépôt de barres de sable dans des chenaux en tresse.**

**\*Dépôt du Système fluviatile à méandre :** Dans la partie inférieure du système fluviatile, la plus part des matériaux grossiers ont été déjà déposés. Le tracé fluviatile devient plus sinueux, et les chenaux s'élargissent. Les rivières se trouvent donc entourées par de vastes plaines d'inondation, siège de dépôts de sédiments laminaires fins.



**Figure II.42- Dépôts de plaine d'inondation par un méandre.**

**\*Dépôts du système fluviatile anastomosé :** Les chenaux anastomosés divaguent peu dans la plaine alluviale qui est fréquemment inondée. Elle est couverte de marécage et la végétation y est abondante. La vitesse du cours d'eau est faible, les sédiments qui s'y déposent sont fins et riches en matière organique.

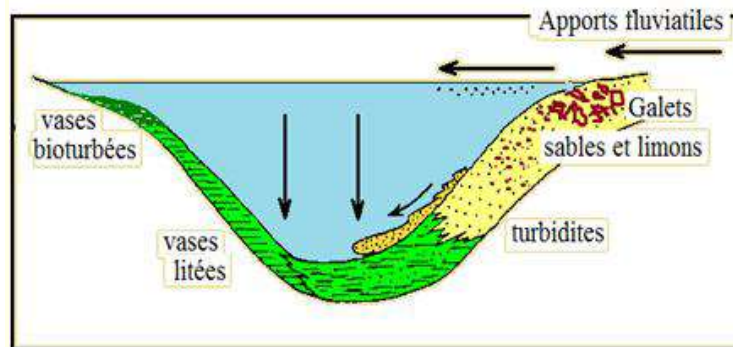


**Figure II.43 - Dépôt de plaine par un fleuve à chenaux anastomosés.**

## 2. MILIEU LACUSTRE :

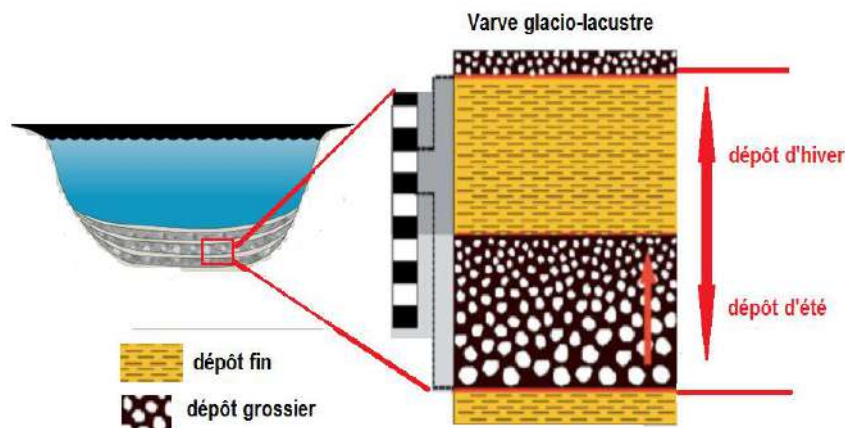
Un lac est un corps d'eau douce permanent enclavé dans le continent. Les matériaux apportés par **les rivières** se déposent dans un lac selon une zonation concentrique assez théorique qui dépend de l'hydrodynamisme (Fig. 13) : galets le long des rives, sables dans les zones périphériques soumises à l'action des vagues, vases dans le centre plus profond et plus calme.

Ainsi plus les particules sont petites, plus elles seront amenées au large, d'où cette sédimentation caractéristique.



**Figure II.44 - Coupe schématique dans un lac.**

Si les sédiments sont apportés par un glacier, la granulométrie des apports dépend des variations dynamiques, journalières et saisonnières fluvio-glaciaires (Fig. II.45): L'été, les grosses particules transportées par les eaux de fontes se déposent au fond du lac, et les petites particules restent en suspension. L'hiver, il n'y a plus d'apports (tout est gelé), seules les particules fines en suspension se déposent en une couche peu épaisse. Chaque année on peut donc observer une alternance dans la sédimentation, donnant naissance à des varves (ou laminites).



**Figure II.45 - Dépôts glacio-lacustres : Varves**

Dans les parties profondes du lac, se déposent des turbidites contenant des éléments grossiers.

Dans les lacs froids, l'évaporation étant modérée, des sursaturations peuvent avoir lieu entraînant des dépôts par précipitation de calcite (si l'activité organique est suffisante il y a libération de CO<sub>2</sub>). On peut noter également des dépôts chimiques et biochimiques (Travertins, Tufs et évaporites) dans certaines conditions (minéralisation de substance organique ou évaporation intense).

## Conclusion

La sédimentation continentale est essentiellement constituée par des accumulations détritiques. Les sédiments d'origine chimique et biochimiques ne se trouvent guère que dans les lacs, marécages. Les dépôts d'origine chimiques peuvent être trouvés aussi dans les sebkhas et grottes.

## II- LES MILIEUX MIXTES (INTERMEDIAIRES)

Ils sont situés aux limites du domaine marin et du domaine continental et présentent des caractères mixtes.

L'embouchure d'un cours d'eau dans la mer représente un domaine intermédiaire où s'affrontent les influences marines et fluviales. Les conditions physico-chimiques et dynamiques sont bien différentes, surtout entre un bassin marin et un cours d'eau fluviale.

\*Du point de vue *dynamique*, la brusque diminution de vitesse du courant fluvial, à la rencontre de la mer, entraîne la déposition et la sédimentation des matériaux transportés.

\*Du point de vue *physico-chimique*, l'arrivée des solutions colloïdales transportées par les eaux douces fluviales, dans un milieu marin salé entraîne leur coagulation ou floculation. Ainsi leur taille augmente ce qui facilite leur dépôt.

Il en résulte donc, qu'au niveau des embouchures, les dépôts vont être rapides et importants. Mais l'action des vagues et des marées peut les évacuer et les transporter au large.

Les relations entre les processus de dépôt et d'érosion (influence fluviale ou marine) déterminent la formation de ces embouchures, d'où les types suivants :

### 1- LES DELTAS :

Un delta est un type d'embouchure d'un cours d'eau qui se jette dans une mer ou océan. Dans ce cas, le fleuve se divise en plusieurs bras. Entre les différents bras existent des zones humides : marécages ou étangs. Au moment des grandes crues, le fleuve peut changer de cours et ouvrir de nouveaux bras vers la mer ou bien abandonner un bras ancien.

a- Morphologie d'un Delta : Un delta se compose de 3 grandes parties, qui sont de l'amont vers l'aval :

\* **la Plaine deltaïque**, qui est le prolongement de la plaine alluviale. Elle est parcourue par un réseau de chenaux ramifiés de distributions. Entre les chenaux s'étendent des zones marécageuses, souvent garnies de végétation sous un climat humide.

\* **Le front du delta**, qui est le prolongement de la plaine deltaïque sous la mer. Lieu de rencontre des eaux douces chargées de sédiments et de l'eau salée. C'est aussi le site où les particules sont reprises et dispersées par les agents hydrodynamiques du bassin récepteur. La forme de sédimentation est différente selon la densité de l'eau du fleuve, fonction de la charge, et la taille des particules transportées. Par exemple, si la densité de l'eau douce est voisine de celle de la mer, la charge se dépose rapidement en une barre de front de delta. Les dépôts dans cet environnement sont soumis au remaniement permanent des vagues et des courants.

\* **Le prodelta** est la partie la plus externe et la plus profonde du delta. C'est la zone essentiellement sous-marine, qui échappe à l'action des vagues et des courants littorale. Il s'y dépose des sédiments fins généralement bio-turbés car très riches en matière organique d'origine continentale.

Le prodelta fait place progressivement, vers le large, aux dépôts marins du plateau continental, de nature essentiellement argileuse.

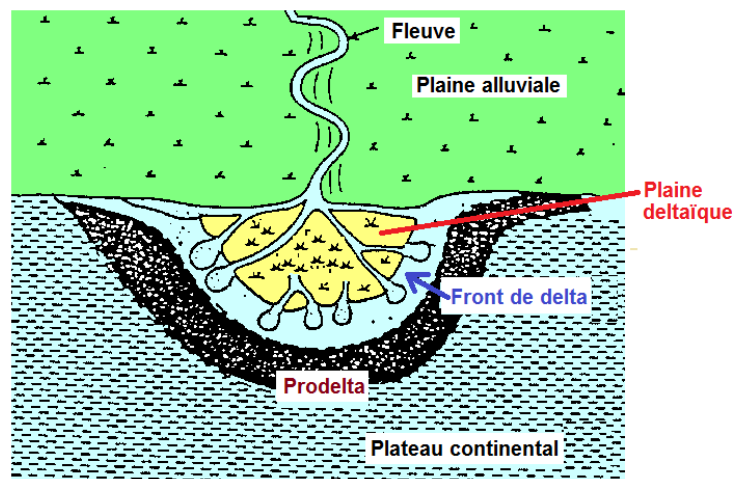


Figure II.46 - Morphologie d'un delta.

La morphologie des deltas dépend de l'importance relative de 3 facteurs : le volume des apports sédimentaires du fleuve; l'énergie de la houle et l'énergie de la marée. D'où plusieurs types.

#### **b- Types de Delta :**

**1-Deltas à dominance fluviale:** sont lobés ou allongés (appelés en "patte d'oiseau). Dans la plaine deltaïque, les distributaires sont nombreux et rectilignes. Ils y déposent des barres sableuses. Les distributaires sont bordés par des levées qui les isolent des zones interdistributaires plus basses et marécageuses.

**2-Deltas à dominance de marée:** les chenaux sont méandriques et évasés à leur embouchure. Le sable s'accumule en barres de méandre et en barres tidales à l'embouchure.

**3- Deltas à dominance de vagues:** l'action des vagues se fait sentir sur le front du delta. Les sables sont donc remaniés et forment des cordons littoraux et des plages, et les particules fines sont dispersées vers le large.

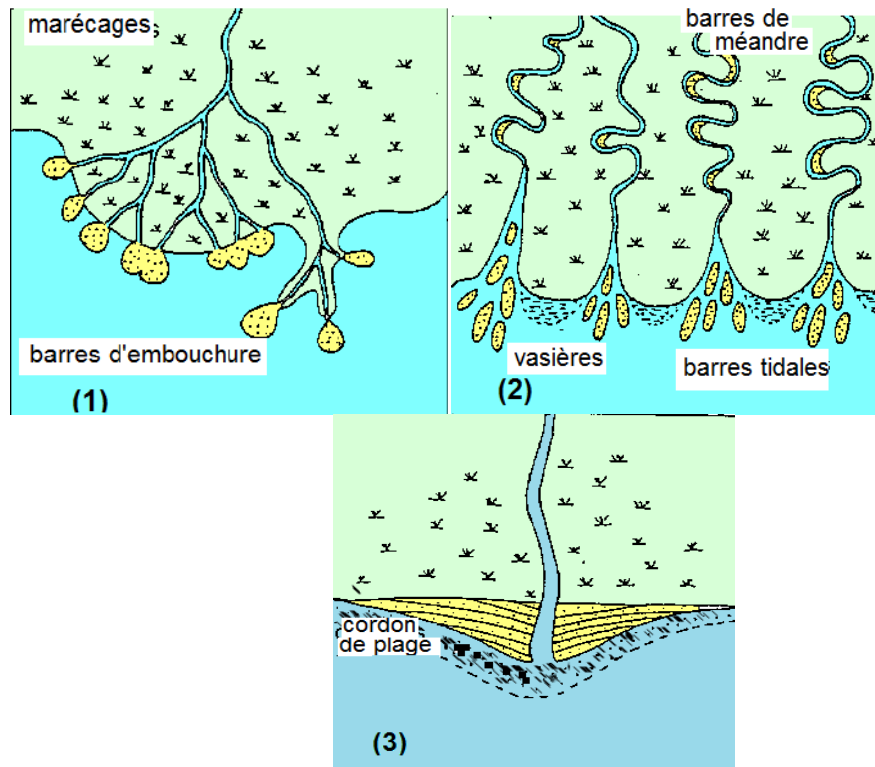


Figure II.47 - Deltas à dominance : (1) fluviale, (2) de marée, (3) de vague.

c- **Les faciès deltaïques:** les dépôts dans un delta est fonction de plusieurs facteurs, dont la densité des eaux douces et salée, la densité de la charge, le climat ...etc.

*\*Au niveau de Plaine deltaïque,* les faciès sont affectés par l'influence des marées. Des barres sableuses et des galets se déposent dans les chenaux. Les zones interdistributaires sont constituées de limons et argiles, riches en matière organique sous climat humide, en évaporites sous climat sec et suffisamment chaud. En climat semi-aride se développent des encroûtements calcaires alors qu'en climat aride peuvent se former des dunes éoliennes à partir des sables fluviatiles. Des dépôts sableux de rupture de levée accidentent la sédimentation fine dans les plaines de deltas à dominance fluviale.

*\*Au niveau du Front de delta,* lieu de rencontre des eaux douces chargées de sédiments et des eaux salées, la forme de sédimentation est différente selon la densité de l'eau du fleuve, de la charge, et de la taille des particules transportées. Si la densité de l'eau douce est voisine de celle de la mer, la charge se dépose rapidement en une barre de front de delta. Pour une densité d'eau douce plus grande, la charge forme un courant de densité qui suit le fond et gagne le large. Pour une densité plus faible, les particules en suspension forment un nuage qui se disperse à la surface de l'eau de mer.

\**Au niveau du Prodelta*, se déposent des sédiments fins généralement bioturbés car très riches en matière organique d'origine continentale.

L'accumulation deltaïque progresse sur la plate-forme et présente une forte épaisseur si la marge est subsidente ou lorsque la progradation atteint la bordure de la plate-forme et se poursuit sur le talus.

Les dépôts de deltas se font par progradation avec un granoclassement, mais on peut distinguer 2 types de dépôts :

- Quand les eaux fluviales rentrent dans des eaux salées calmes, le sel provoque une augmentation de densité, elles sont dispersées latéralement au dessus des eaux marines. Le dépôt de sable est accentué en bordure, les particules en suspensions se déposent par décantation. (hypoclinal),
- Quand les eaux fluviales sont froides et denses, la dispersion est de type turbide (Hyperclinal).

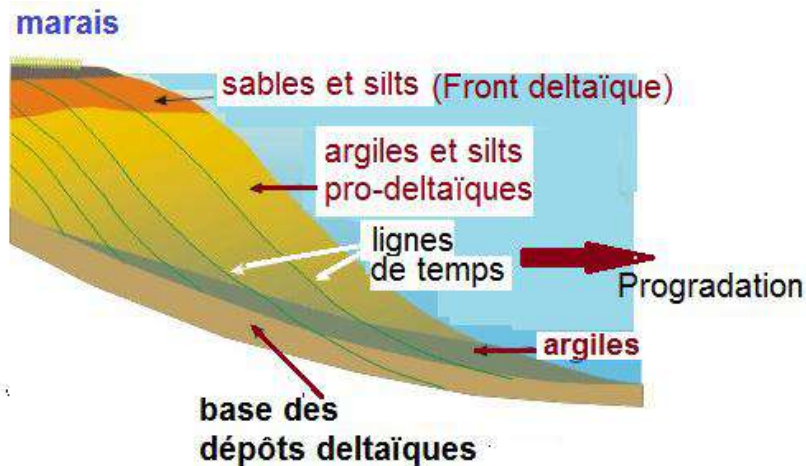


Figure II.48 - Coupe simplifiée dans un delta.

## 2-LES ESTUAIRES :

Un estuaire est défini comme la partie terminale d'un fleuve, de forme évasée et où une remontée de la mer est visible à marée haute. C'est en fait une zone de transition entre les eaux douces et les eaux marines induisant des propriétés physico-chimiques très variables dans le temps et l'espace. D'où la difficulté de leur donner une limite spatiale.

Chaque estuaire est donc particulier et fonction des propriétés des eaux douces du fleuve et celles des eaux littorales. Le fleuve apporte seulement des particules fines en suspensions et/ou en solution, de même, l'hydrodynamisme marin est fort. C'est donc la mer qui s'avance dans le continent, et les eaux salées pénètrent dans la vallée fluviale.

Le dépôt caractéristique des estuaires est la vase. Cette dernière est formée de particules fines de la classe des lutites (limons, argiles), de sulfures, d'hydroxydes de fer et de colloïdes organiques. Les graviers et les sables sont rares.



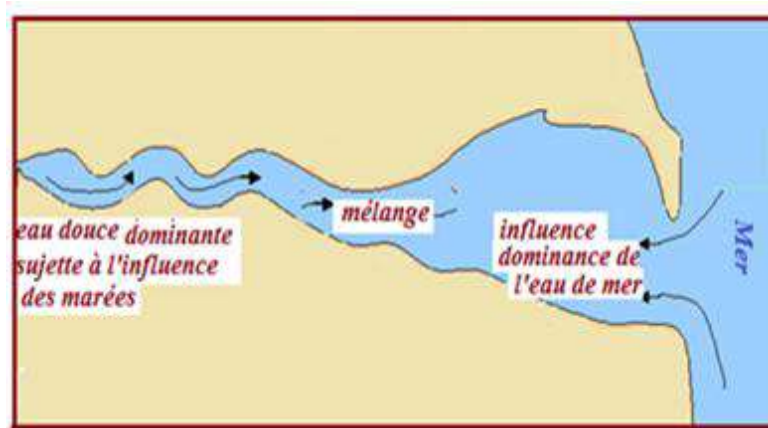


Figure II.49 - Schéma d'un estuaire.

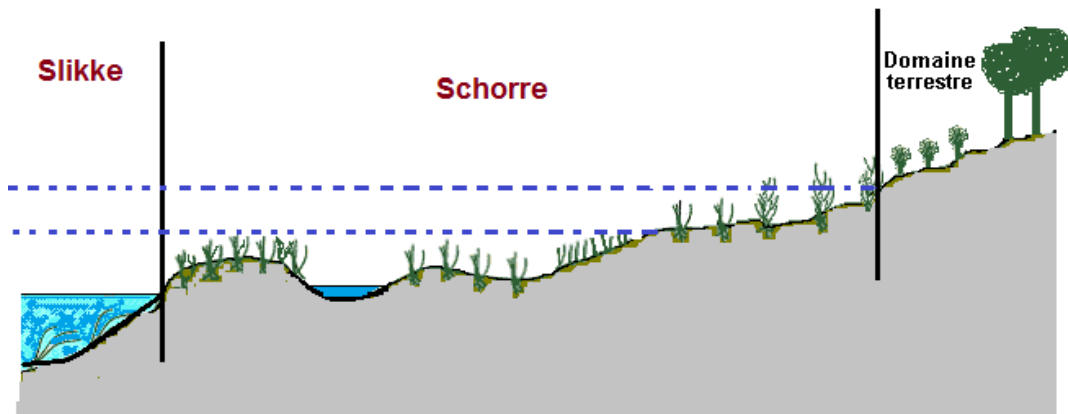


Figure II.50 - Morphologie d'un estuaire.

Comme dans les vasières littorales, la marée délimite le schorre, et la slikke (Fig. II.50) :

\*\* Le schorre : zone supratidale couverte de végétation herbacée, formée de vase relativement sèches. Cette zone n'est submergée que par les marées plu fortes,

\*\* La Slikke, est la partie basse du marais littoral, zone intertidale non colonisée par la végétation, et inondée à chaque marée haute.

Dans les régions équatoriales, les estuaires sont colonisés par la mangrove. Dans le chenal fluvial peuvent se déposer des barres sableuses. Ces dernières peuvent devenir importantes au point de progader vers la mer, dans ce cas, l'estuaire se transforme en delta.

Toutefois, comme dans la plupart des milieux naturels, il n'existe pas de limite exacte entre ces différents milieux de dépôt, et le transfert de masse entre les continents et les océans est continu et en perpétuel changement, car il est étroitement lié aux changements climatiques, activités anthropiques ...etc.

### 3-LES LAGUNES:

Une **lagune** est une étendue d'eau généralement peu profonde séparée de la mer par un **cordon littoral** (dunes, plage... etc), souvent constitué de sable fin. Ce cordon littoral est un espace qui se modifie naturellement. Lorsque le cordon littoral est un récif, on parle de « lagon ».

Les dépôts caractéristiques de lagunes sont les évaporites, car l'eau de mer contient du calcium, sodium, potassium ...etc. L'évaporation de l'eau provoque la concentration des ces éléments.

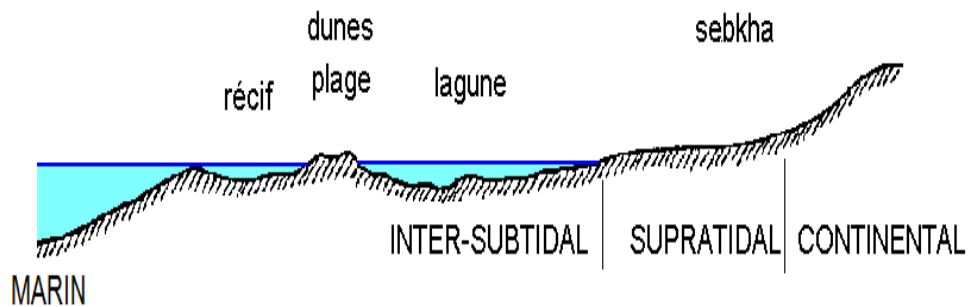


Figure II.51 - Profile transversale au niveau d'un littoral.

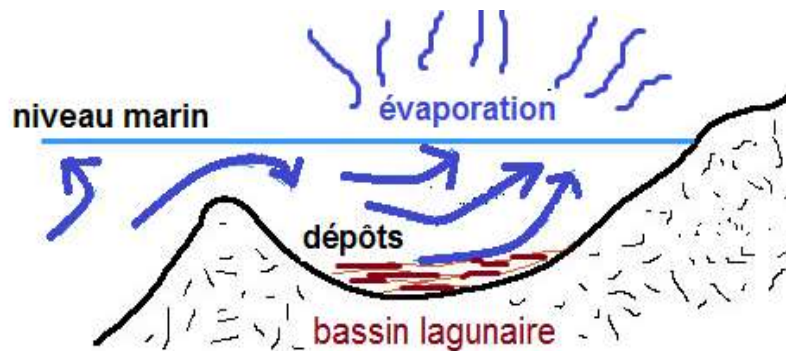


Figure II.52 - Dépôt des évaporites dans une lagune

### III- LE MILIEU MARIN

Il comprend les océans et les mers, et se trouve hors de l'influence du continent. Leurs traits **les plus caractéristiques** sont l'étendue de leur surface et la salure de leur eau.

La distance au continent et la profondeur de l'eau permettent de définir plusieurs zones caractérisées par leur hydrodynamisme et leur type de sédimentation.

#### III.1- Morphologie des Fonds Océaniques

La subdivision des fonds océaniques est fonction de leur composition, leur morphologie et leurs caractéristiques biologiques. On distingue 2 grandes zones :

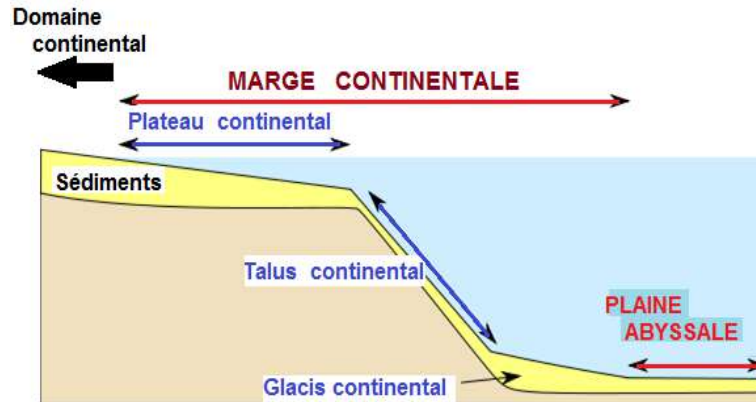


Figure II.53 - Morphologie d'un fond océanique.

**1- La Marge Continentale** : correspond à la zone située entre le continent et la croûte océanique. En allant du continent vers le large, on trouve :

**1.a- Le Plateau continental**: de 0 à 200 m de profondeur, à pente très faible ( $0^{\circ}$ - $1.5^{\circ}$ ), largeur (5 -1500m) , épaisseur crustale (30 – 35 Km). Lui-même subdivisé en 4 étages :

- **Supratidal** ou **supralittoral** : au dessus des maximums des marées hautes.
- **Intertidal** ou **médiolittoral**: qui correspond à la zone de balancement des marées.
- **Infratidal** ou **infalittoral**: avec une immersion constante et qui va jusqu'à 40 m de profondeur.
- **Circalittoral** : de 40 à 200 m environ, jusqu'à la rupture de pente.

**1.b- Le Talus ou Pente continentale**: jusqu'à 2500 m à 3000 m de profondeur, à pente importante, et largeur de 10 à 100Km. Cette zone montre l'amincissement crustal, elle est entaillée par de canyons sous-marins.

**1.c- Le Glacis continental** : jusqu'à 5000 m de profondeur, pente plus faible ( $1^{\circ}$  -  $1,5^{\circ}$ ). Lieu de la Transition Océan/Continent (TOC).

**2- Les Plaines Abyssales ou lits Océaniques** : couvrent la plus grande partie des océans (76.2 %), à pente très douce, avec des profondeurs moyennes de 5000 à 6000 m. Les formes les plus caractéristiques du relief des fonds océaniques sont des dépressions ou *cuvettes* et les *dorsales médio-océaniques*.

### III.2- Les Dépôts Sédimentaires Océaniques

Les océans reçoivent des continents une grande masse de sédiments, apportés soit par l'intermédiaire des eaux courantes (fleuves et glacier), soit par le vent. Mais une part importante de ces sédiments peut être produite sur place au sein du milieu marin lui-même, soit par la précipitation chimiques d'éléments dissous, soit parce que ces éléments dissous ont été extraits de l'eau de mer par des organismes vivants.

La sédimentation marine est liée à plusieurs facteurs dont l'hydrosphère et tous les phénomènes associés : vagues, courants ...etc., la proximité du continent ; les reliefs océaniques (littoral, plaine abyssale, fosses, dorsale ....etc.).

### **1) Dans les milieux littoraux :**

Le littoral comprend la ligne de côte (plages, falaises) et la plate forme littorale (bande immergé de profondeur < 200m).

Les dépôts littoraux sont dits *néritiques*. Leur nature dépend essentiellement des apports détritiques du continent et de la productivité biologique. Ces deux facteurs dépendent eux - même de la latitude et du climat.

- Dans les régions tempérées froides, l'apport détritique est fort. La sédimentation est à dominance silico-clastique.

- Dans les régions chaudes, l'apport détritique est faible. Le climat est favorable au développement des organismes constructeurs, qui fixent le  $\text{CaCO}_3$ . Après leur mort, les éléments carbonatés s'accumulent et on a une sédimentation littorale carbonatée.

### **2) Dans les milieux de talus sous-marin :**

Le talus borde l'extrémité distale de la plate-forme. Il est généralement entaillé par des canyons sous-marins par où transitent les matériaux qui arrivent sur le glacis et la plaine abyssale.

Les dépôts détritiques ou carbonatés s'y accumulent. Tout déséquilibre déclenche un déplacement gravitaire vers le glacis. Ces mouvements peuvent être des éboulis sous marins, glissement en masse, coulées de débris ou courants de turbidités. Les sédiments détritiques rythmés mis en place en bas du talus par les courants de turbidité,

### **3) Dans la plaine abyssale :**

Les grands fonds océaniques, ne reçoivent que les particules fines, principalement des argiles d'origine continentale apportées en suspension par les courants océaniques et des poussières transportés par les vents qui proviennent de l'érosion continentale ou de l'activité volcanique. Dans les hautes latitudes s'ajoutent les matériaux glaciaires apportés par les glaces flottantes (Iceberg) et les vents. D'autres particules fines organiques d'origine océaniques, provenant d'organismes planctoniques, sont essentiellement des débris carbonatés et siliceux. La nature de ces dépôts profonds, appelés pélagiques, dépend de la nature et de l'abondance du plancton, de la température et de la profondeur de l'eau qui agissent sur la dissolution de la calcite et de la silice.

La dissolution du calcaire augmente avec la profondeur, ce phénomène dû à l'augmentation de la teneur en  $\text{CO}_2$ , à basse température et haute pression. Au-delà d'une certaine profondeur, tous les débris carbonatés sont dissous et le sédiment ne contient pas de carbonates. Cette limite de compensation des carbonates (CCD), peut se trouver à différentes profondeurs suivant les endroits : vers 500m dans l'Atlantique, elle est moins profonde dans les hautes latitudes où l'eau est plus froide.

La dissolution des tests siliceux est grande dans les eaux superficielles sous-saturées en silice. En profondeur, à basse  $T^\circ$  et haute pression, la dissolution de silice diminue. Donc au dessous de la CCD, c'est la sédimentation siliceuse qui domine si la production de silice est importante.

Donc dans le milieu marin, les dépôts sont plus importants au pied de Talus continental, au niveau du glacis. La sédimentation d'origine océanique est très faible (environ 1cm/ 1000ans). La partie de la plaine abyssale proche de la dorsale océanique est la plus pauvre en sédiments, car elle est de formation récente.

La couche de sédiments est plus importante au pied du talus continental; la sédimentation d'origine océanique est très faible (de l'ordre de 1 cm tous les 1000 ans). La partie de la plaine abyssale proche de la dorsale océanique est la plus pauvre en sédiment car elle est de formation récente.

## CONCLUSION

Quel que soit le milieu, continental (terrestre ou aquatique), intermédiaire ou marin, l'ensemble des particules finit par se déposer en couches superposées formant des dépôts sédimentaires. Ces derniers se présentent donc sous forme de couches successives dont les plus basses correspondant aux dépôts les plus anciens.

Les milieux de dépôts continentaux sont locaux et transitoires par rapport aux milieux marins qui fournissent la majeure partie des roches sédimentaires.

La variété des milieux de dépôts continentaux est surtout liée aux conditions climatiques. La sédimentation marine dépend indirectement des mêmes conditions, mais elle est surtout liée à tous les phénomènes associés (vagues, courants, houles...etc.), et au relief océanique (littoral et pré-continent, plaines abyssales, fosses, dorsales). Ainsi, la nature et l'épaisseur des produits sédimentaires sont différents d'une zone à une autre. D'où plusieurs types de dépôts.

Ainsi le géologue pourra reconstituer les conditions ayant régnés dans un milieu ancien à l'aide des caractéristiques de ces dépôts. La reconnaissance et la répartition des milieux de sédimentations anciens constituent une des bases de la Paléogéographie, paléoclimat et paléo-environnement.

<b>Structures et Figures Sédimentaires</b>		
<b>Agent</b>	<b>Mode de sédimentation</b>	<b>Structure</b>
Glacier →	Transport puis dépôt en vrac ou par accrétion	→ Massive → Massive avec foliation
Eau courante →	Saltation, flotaison suspension	→ Stratifiée avec structures sédimentaires
Eau calme →	Décantation des parties fines et faibles courants de fond	→ Stratification parallèle
Gravité →	Accumulation en pente avec tri grossier	→ Litage grossier à pente forte
Vent →	Saltation ou Suspension	→ Structure sécantes ou d'accumulation

## Partie III : Les eaux souterraines

### I - Notion de perméabilité des roches

Le sable, le grès et beaucoup de roches calcaires sont des roches perméables, car elles sont poreuses ou fissurées.

On appelle porosité d'une roche, le rapport :

$$P = \text{Volume des vides} / \text{Volume totale de la roche}, \quad 1 \geq p \geq 0$$

Les roches perméables présentent des espaces vides (interstices) qui laissent passer l'eau. Les argiles et les marnes sont imperméables ( $P = 0$ ), car leur particules sont très fines et ne laissent pas entre elles des vides pour le passage de l'eau.

### II - Types de circulation des eaux souterraines

#### II.1. La circulation capillaire :

Les eaux 'infiltrent et circulent lentement dans les vides des roches poreuses, perméables. Ces roches constituent ainsi des réservoirs d'eau, qu'on appelle nappes d'eau.

On distingue deux types de nappes :

- **Nappes libres** : Quand les eaux s'infiltrent dans des couches perméables reposant sur des couches imperméables ;

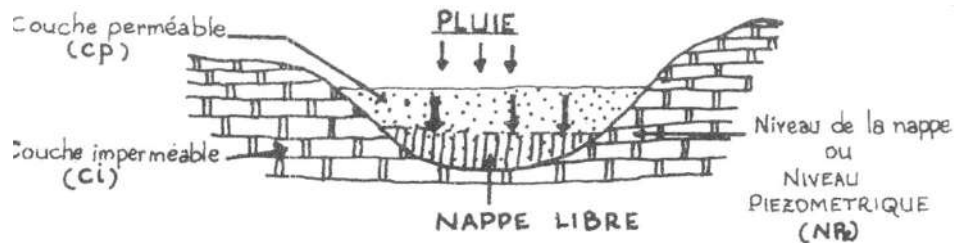


Figure III.1 – Schématisation d'une nappe libre

- **Nappes captives** : Quand les eaux sont emprisonnées entre deux couches imperméables. Si on réalise un forage qui atteint la nappe captive, l'eau monte vers la surface par pression et jaillit à la surface du sol. Ce forage est dit puits artésien.

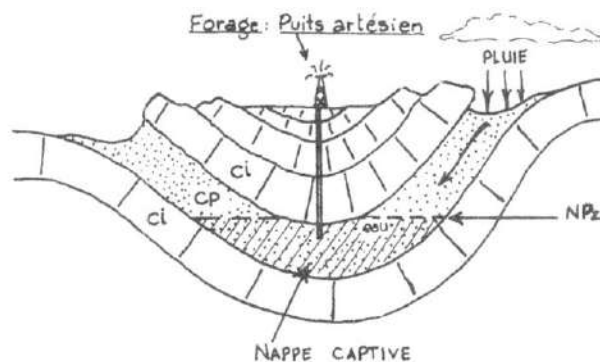


Figure III.2 – Schématisation d'une nappe captive

### II.1.1. La circulation fissurale :

L'eau circule beaucoup plus rapidement dans les roches fissurées

### II.1.2. La circulation dans les roches solubles :

Les calcaires sont des roches solubles. Leur solubilité augmente quand les eaux qui les traversent sont riches en CO<sub>2</sub> ; gaz carbonique acide :



## II.2. L'action dissolvante des eaux souterraines

Quand les eaux souterraines attaquent, par dissolution, un plateau calcaire elles forment des cavernes et des grottes qu'on appelle un *Karst*.

Les grottes karstiques sont tapissées de *stalactites* (vers le haut) et *stalagmites* (vers le bas). Des rivières souterraines peuvent traverser ces grottes.

En surface : A la surface du plateau calcaire il y'a formation de structures qui témoignent de la dissolution des calcaires

*Lapiez* : surface rugueuse de dissolution.

*Doline* : dépression circulaire avec dissolution du calcaire sur place par élargissement des fissures.

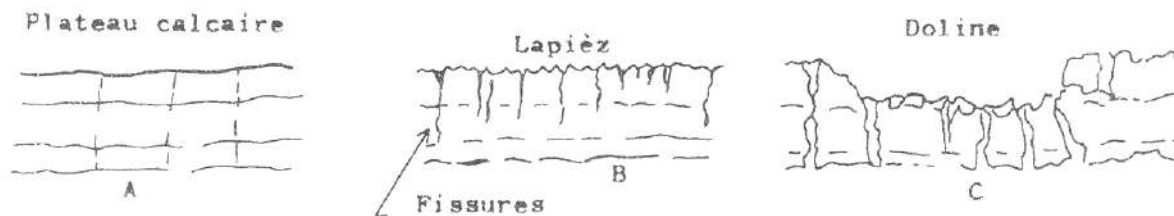


Figure III.3 - Formation d'une doline

**Ouvala** : résultat de la communication de 2 ou plusieurs dolines ;

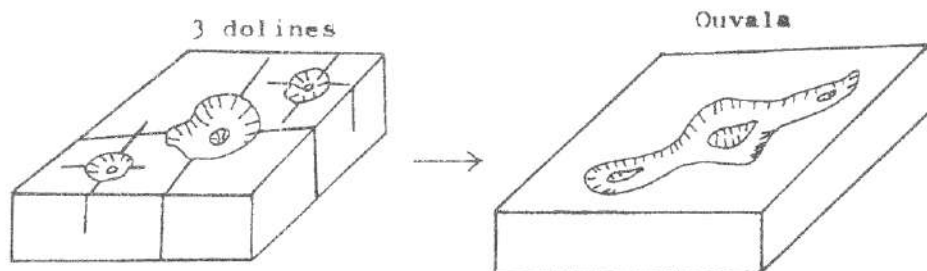
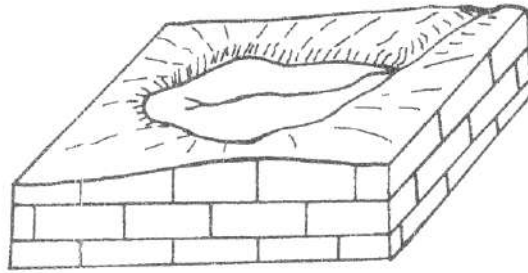


Figure III.4 - Formation d'une ouvala

*Relief ruiniforme* : paysage 'en ruines' du à la dissolution.

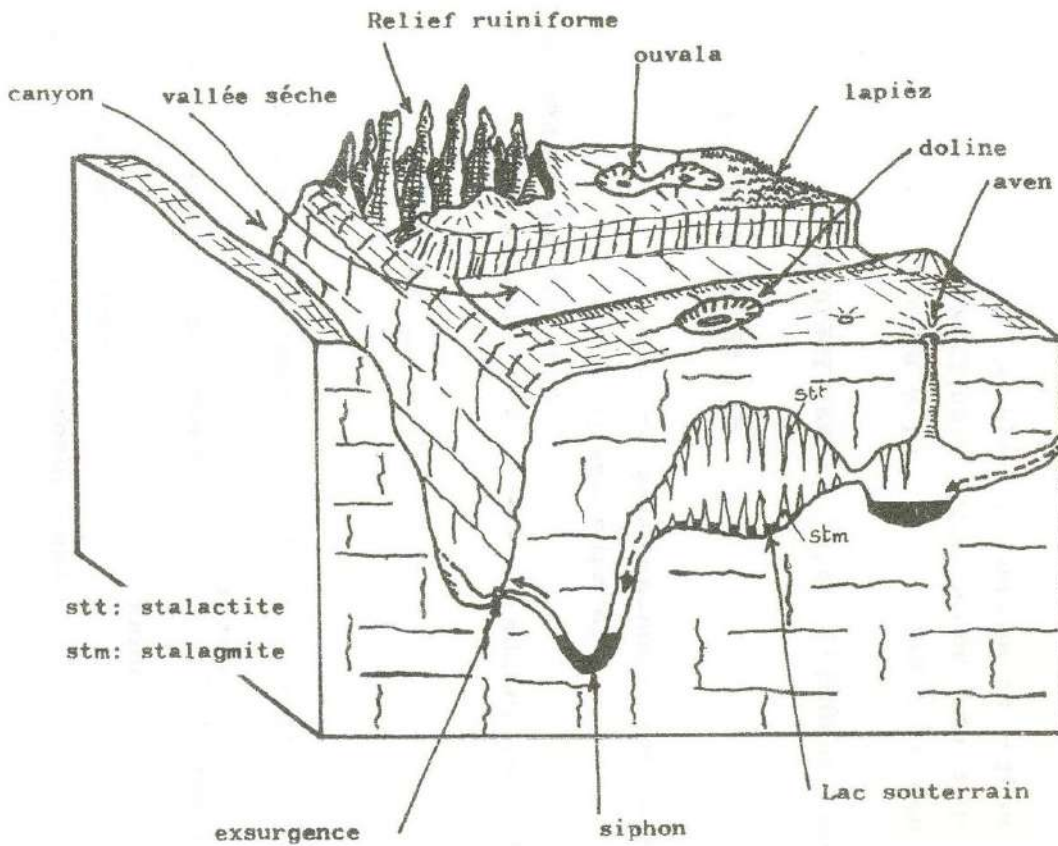
*Aven* : trou vertical faisant communiquer la grotte avec la surface du plateau.

*Poljé* : plaine en dépression allongée en vallée.



**Figure III.5 - Un poljé**

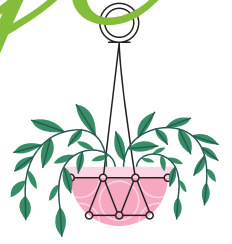
*Exsurgence* : apparition des eaux souterraines en source.



**Figure III.6 - Modelé karstique**



# Bon courage



## LIENS UTILES 🙌

### Visiter :

1. <https://biologie-maroc.com>

- Télécharger des cours, TD, TP et examens résolus (PDF Gratuit)

2. <https://biologie-maroc.com/shop/>

- Acheter des cahiers personnalisés + Lexiques et notions.
- Trouver des cadeaux et accessoires pour biologistes et géologues.
- Trouver des bourses et des écoles privées

3. <https://biologie-maroc.com/emploi/>

- Télécharger des exemples des CV, lettres de motivation, demandes de ...
- Trouver des offres d'emploi et de stage

