



Université Abdelmalek Essaadi
École Nationale des Sciences
Appliquées - Al Hoceima

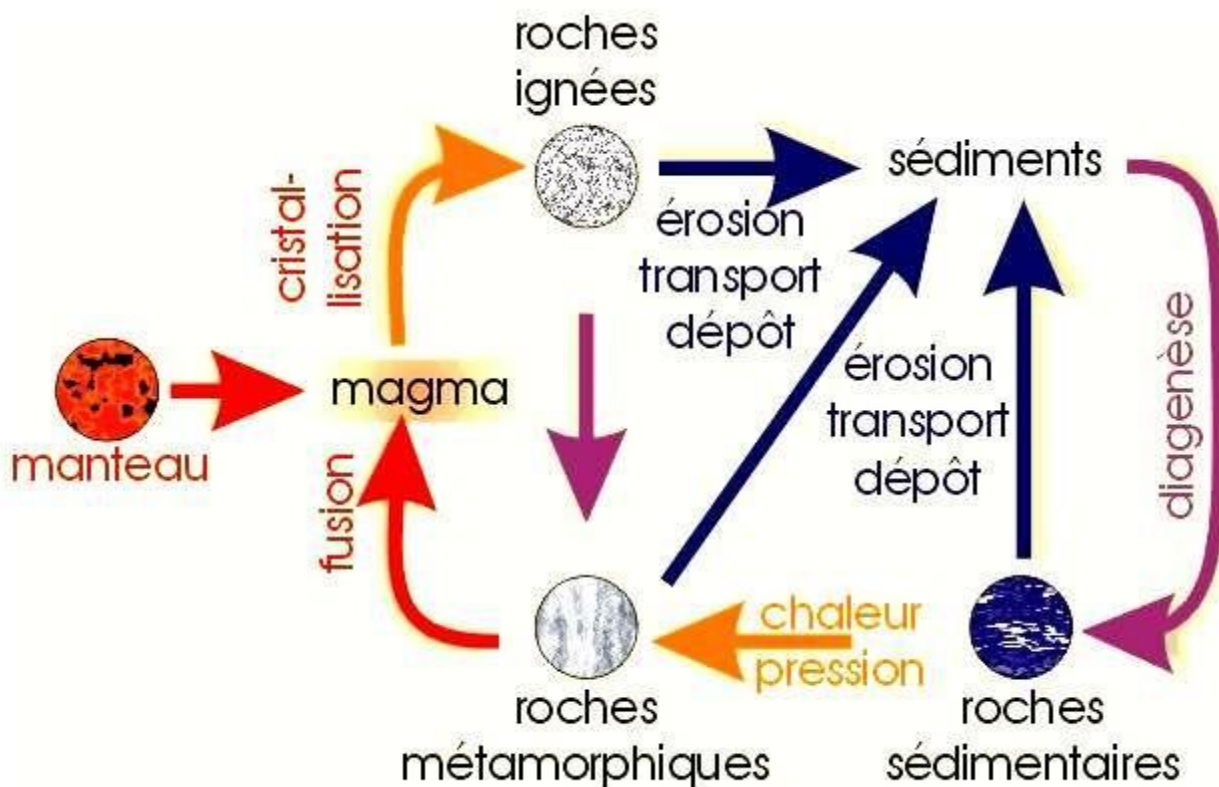


Département Génie Civil, Énergétique et Environnement

Filière : CP1

Module : Géologie Générale

Partie I : Altérations Géologiques



Pr. N. NOUAYTI

Année universitaire : 2019-2020

Altérations Géologiques et Roches Sédimentaires

I. Généralités

Les roches sédimentaires sont le résultat de 4 processus sédimentaires : l'érosion, le transport, la sédimentation et la diagenèse (fig. 1).

L'eau, la glace, le vent, sculptent les surfaces continentales et aboutissent à créer de nouveaux reliefs (paysages) dont les caractères sont étudiés par la géomorphologie. Ces paysages obtenus reflètent la nature, la composition et l'architecture des formations géologiques.

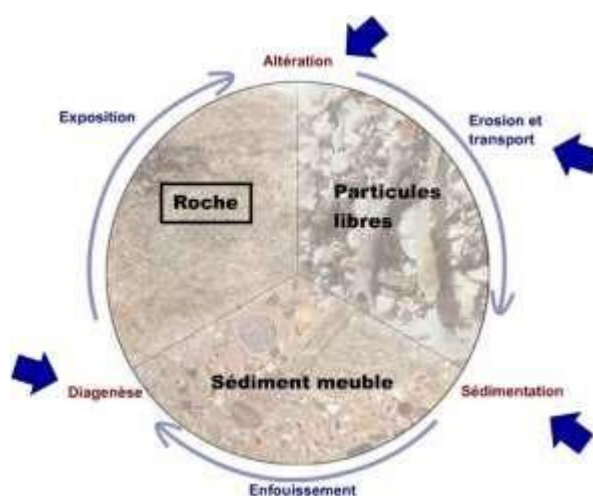


Fig. 1 : Cycle d'évolution d'une roche sédimentaire.

-- L'érosion des roches par désagrégation mécanique et/ou altération chimique conduit à la formation d'éléments dissociés et meubles.

-- Le transport des éléments érodés s'effectue dans l'atmosphère par le vent et dans l'hydrosphère par l'eau ou la glace.

-- La sédimentation s'effectue dans un bassin sédimentaire marin, littoral ou continental, et le sédiment déposé comprend du matériel détritique, chimique ou biologique.

-- La diagenèse est le processus de consolidation (lithification) des dépôts sédimentaires conduisant à la transformation du sédiment en roche sédimentaire.

II. L'altération (érosion) des roches

Elle tend à arracher les éléments dissous ou meubles de la roche mère sous l'effet de l'altération chimique et/ou la désagrégation mécanique.

II.1. L'altération chimique

C'est l'ensemble des phénomènes de décomposition des roches (magmatiques, métamorphiques et sédimentaires) sous l'action des agents atmosphériques (O_2 , CO_2 , H_2O) et/ou l'activité biologique.

Elle transforme (décompose) la totalité ou une partie des constituants minéraux des roches et engendre des produits meubles allant de la taille du grain à celle des colloïdes.

On donne le nom d'**altérites** aux formations superficielles produites par l'altération et qui sont parfois colorés par des sels métalliques.

Les minéraux s'altèrent généralement selon leur plan de clivage. Ils peuvent passer directement en solution (lixiviation). Pour certains minéraux, tels que les feldspaths, la vitesse des réactions dépend beaucoup de la taille des grains et de la température.

Elle comprend différents processus tels que la dissolution, l'oxydation et l'hydrolyse.

II.1.1. La dissolution

C'est une dissociation de la molécule en ions par l'eau (solvant). Ainsi, les éléments chimiques se trouvent sous forme d'ions dans l'eau. Par exemple :

$\text{NaCl (solide)} + \text{H}_2\text{O} \text{ -----} > \text{Na}^+ + \text{Cl}^- \text{ (solubles)}$; On parle ainsi de **lixiviation**.

L'activité de la dissolution dépend de la constitution minéralogique des roches et de leur perméabilité liée à leur porosité et à leur fissuration.

D'une manière générale, les roches sédimentaires sont plus sensibles à la dissolution que les roches magmatiques et métamorphiques. Ainsi, la famille des évaporites (roches évaporitiques) constituées par des chlorures (halite ou sel gemme) ou des sulfates (anhydrite, gypse) comptent parmi les plus solubles d'entre elles. Mais les carbonates ou les roches carbonatées (calcaire) sont beaucoup plus solubles dans l'eau chargée en CO_2 dont l'eau de pluie en contient plus de 2% est parmi les éléments les plus important entrant dans le phénomène de dissolution, il se forme alors un bicarbonate instable :

$\text{CaCO}_3 \text{ (solide)} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \text{ -----} > \text{Ca}(\text{CO}_3\text{H})_2 \text{ (bicarbonate soluble)} + \text{Résidus insolubles (argiles)}$

Cette réaction d'équilibre joue un rôle essentiel dans les phénomènes de **karstification** et donne un paysage spectaculaire dans les régions carbonatées (figs. 2)

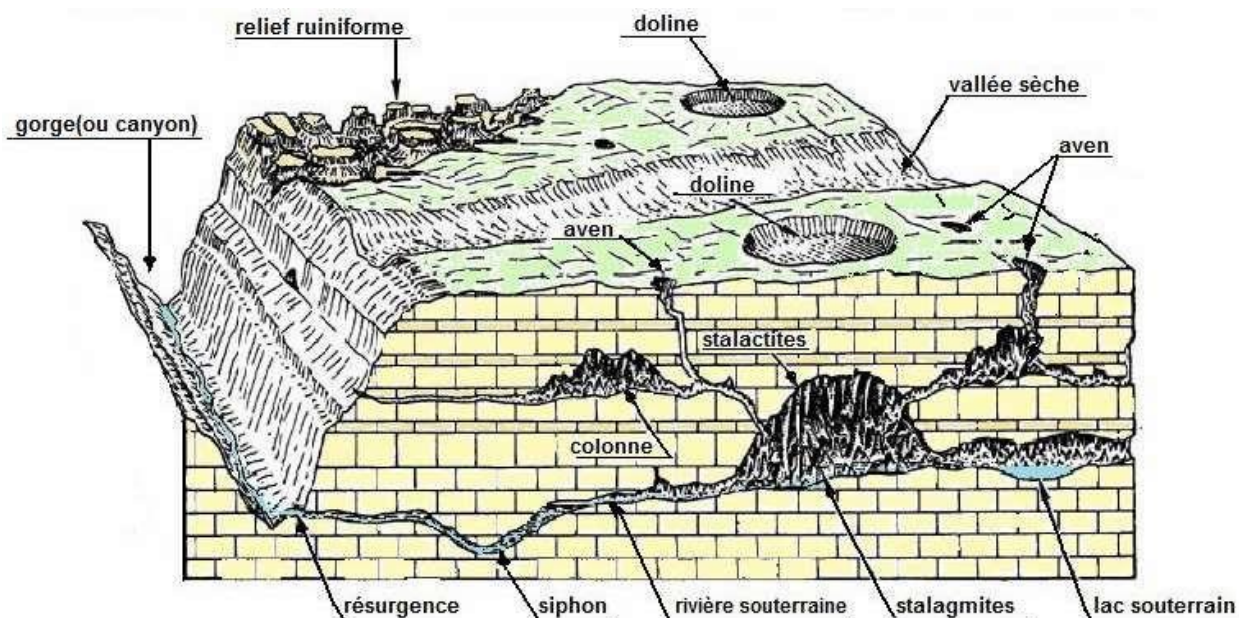


Fig. 2: Morphologie karstique en 3D.

II.1.2. L'oxydation

Elle joue un rôle déterminant dans l'altération des roches et elle est provoquée par l'oxygène atmosphérique qui produit des oxydes et qui est marquée souvent par des changements de couleur des minéraux.

Les oxydations intéressent surtout le fer qui passe de l'état ferreux Fe^{2+} à l'état ferrique Fe^{3+} , ce qu'on appelle la **rubéfaction**.

Exemple : $2\text{Fe}_3\text{O}_4$ (magnétite noire) + $\frac{1}{2} \text{O}_2$ ----- > $3 \text{Fe}_2\text{O}_3$ (hématite rouge)

Fe_2SiO_4 (olivine) + $\frac{1}{2} \text{O}_2$ ----- > Fe_2O_3 (oxyde ferrique) + SiO_2 (silice)

II.1.3. L'hydratation

Elle concerne les roches composées d'éléments susceptibles de fixer des molécules d'eau (argiles, anhydrite). Elle s'accompagne d'une augmentation de volume (gonflement) des minéraux conduisant à la perte de cohésion des roches et donc à leur destruction.

L'hydratation de l'anhydrite (CaSO_4) augmente son volume de près d'un tiers et le transforme en gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) qui est plus vulnérable à la dissolution. La dissolution du gypse provoque des effondrements et des tassements.

Les argiles lorsqu'elles se gonflent par hydratation, donne naissance à des actions mécaniques d'érosion tels que les coulées de boue et les glissements de terrains (fig. 4).

Certains minéraux se transforment avec de l'eau en une formule plus stable. Par exemple :

$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (géothite rouge) + $\frac{1}{2} \text{O}_2$ ----- > $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \frac{3}{2} \text{H}_2\text{O}$ (limonite jaune)

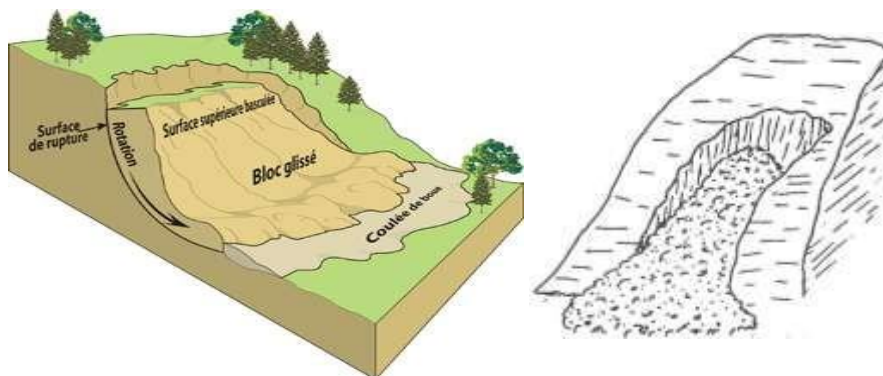


Fig. 4: Glissement de terrain et coulée de boue.

II.1.4. L'hydrolyse

Elle consiste à la destruction des structures cristallines des minéraux (roches magmatiques et métamorphiques) par les ions H^+ libres de l'eau et contribue à la formation de nouveaux minéraux : **néoformation**. Elle varie largement en fonction du pH des eaux et la température du milieu (climat).

A l'état liquide, l'eau se comporte comme un dipôle. C'est à dire qu'il a un pôle négatif susceptible d'être attirée par les charges positives et un pôle positif susceptible d'être attirée par les charges négatives. La dissociation de H_2O en H^+ et OH^- permet la formation d'hydrates très solubles (KOH , NaOH , ...) à partir des ions métalliques des minéraux.

H^+ joue un rôle important dans la destruction des minéraux

La réaction générale de l'hydrolyse peut s'écrire :

Minérale primaire + H₂O-----> minérale secondaire (néoformé) + solution de lessivage

II.2. Exemples d'altération des roches

II.2.1. L'arénisation (granite)

C'est un mode d'altération du granite en zones tempérées.

Les granites sont des roches magmatiques plutoniques constituées principalement des minéraux suivants: quartz, feldspaths (orthose et plagioclases), mica (biotite et muscovite).

Au contact de l'atmosphère, l'altération des granites sur une épaisseur de quelques mètres conduit à la formation de particules fines (micrométriques), des sables (arènes) et des boules (altération en boules) (fig. 7).

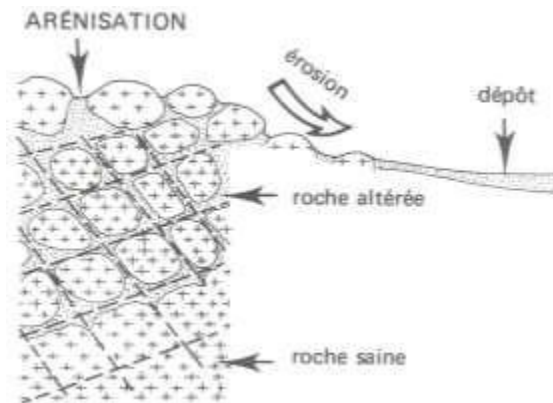


Fig. 7 : Phénomènes d'arénisation d'un massif granitique.

La biotite et les plagioclases sont les minéraux les plus fragiles, ils s'altèrent plus vite en particules très fines : argiles. Ces dernières se gonflent suite à l'hydratation et développent des forces internes accélérant la fracturation mécanique.

Arène : roche meuble constituée de sable à dominance de quartz (résistant à l'altération).

II.3. L'érosion mécanique

L'érosion mécanique ou la désagrégation mécanique s'effectue par une usure progressive (déblaiement) ou par arrachement des éléments fractionnés de la roche par les agents d'érosion.

Les principaux agents d'érosion mécanique sont l'eau à l'état liquide ou solide (gel) ainsi que le vent.

La destruction de des roches se manifeste de façons très différentes selon le climat (influence des agents météoriques), la lithologie (nature des roches) et l'énergie des courants (éoliens et aquatiques).

II.3.1. La thermoclastie et la cryoclastie

La thermoclastie (effet de chaleur) et la cryoclastie (effet du froid) correspondent à une fragmentation provoquée par les changements de la température journalière et saisonnière (écart thermique élevé), à la suite d'une alternance de dilatations et de contractions génératrices de fissures dans les roches (fig. 9).

La fissuration est importante dans les roches composées de minéraux différents n'ayant pas le même coefficient de dilatation: des microfissures apparaissent à la limite entre les minéraux. L'eau qui s'infiltre dans les fissures et les pores puis gèle avec augmentation de volume ajoute son effet. Les cristaux de glace s'accroissent perpendiculairement à la surface de la fente et augmentent son ouverture: la roche est gélive, elle éclate sous l'effet du gel (**gélifraction**). La désagrégation

mécanique est particulièrement importante sous les climats désertiques où les variations de température peuvent dépasser 50 °C entre le jour et la nuit. Elle est également grande sous les climats humides dont la température varie autour de 0 °C (action du gel et du dégel).

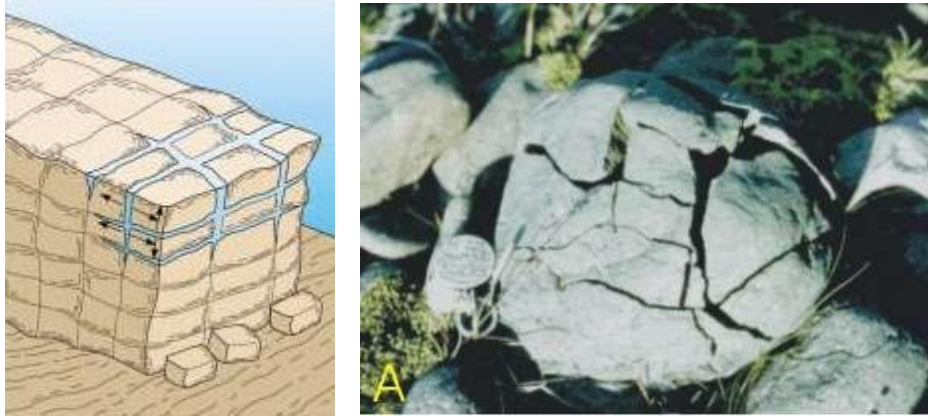


Fig. 9 : Phénomène de cryoclastie (A: cryoclastie d'un basalte)

II.3.2. L'action biologique

L'action des organismes animaux par perforation et des organismes végétaux par le développement des racines contribuent à la dégradation des roches (fig. 10).

Les études ont porté notamment sur l'effet des organismes adhérant à une roche: algues vertes, diatomées, lichens, champignons, bactéries. Ceux-ci adhèrent à la surface grâce en particulier à des organes appropriés qui pénètrent dans les fissures et exfolient les minéraux lamellaires (lichen exfoliant la biotite). Ils produisent une désagrégation et une microdivision de la surface de la roche ainsi qu'une attaque chimique par sécrétion d'acide oxalique produit par les lichens comme par les racines des végétaux supérieurs.

On peut aussi ajouter les activités anthropiques : terrassement des routes et modification du paysage.



Fig. 10 : Action des lichens et des racines des arbres.

II.3.3. Action du vent

Le vent est un fluide qui résulte de déplacement des masses d'air à des températures et des densités différentes. Il est caractérisé par sa direction (rose du vent : vent de sud = vent qui provient de sud) et sa vitesse (km/h).

Le vent constitue un facteur important d'érosion et de transport des sédiments à la surface de la planète. Il est particulièrement actif dans les régions sèches où la végétation est quasi-absente, comme les déserts. Les régions désertiques, qu'on définit comme les régions qui reçoivent moins de 20 cm de précipitations/an, couvrent près du tiers de la surface terrestre. Les grands déserts du monde (Sahara, Kalahari, Gobi, les déserts d'Australie) se trouvent entre les latitudes 10° et 30° de part et d'autre de l'équateur (fig. 11).

Ces régions sont constamment sous des conditions de haute pression atmosphérique où descend l'air sec, ce qui est aussi vrai pour les régions polaires qui sont aussi considérées comme désertiques compte tenu qu'elles reçoivent moins de 20 cm/an de précipitations (en équivalent pluie).

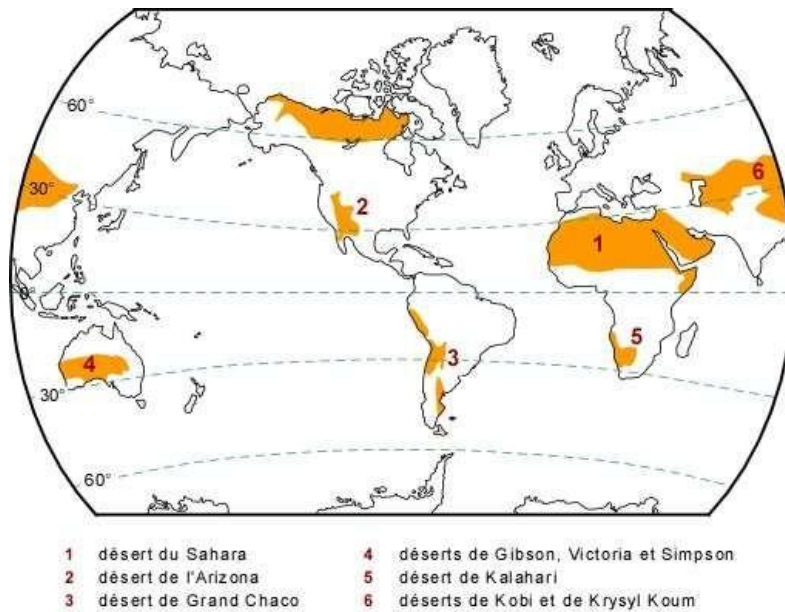


Fig. 11 : Répartition géographique des déserts.

Le vent agit sur les roches par les matériaux qu'il transporte par l'abrasion éolienne (*corrasion*) (fig. 12), et emporte les matériaux dans l'atmosphère (*déflation*).

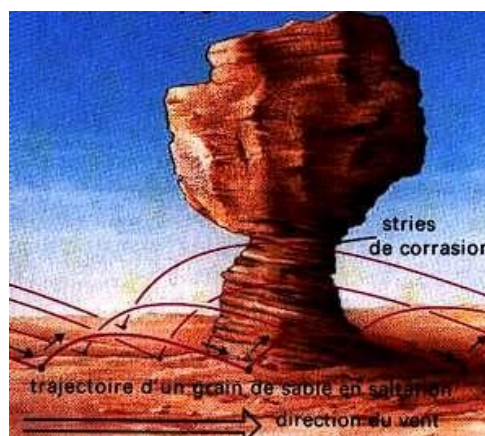


Fig. 12: Corrasion des roches en milieu désertique.

II.3.4. Action de l'eau

L'eau agit sur les roches sous forme de courants aquatiques, en fonction de sa vitesse d'écoulement et de la nature de la roche érodée. Parmi ces courants on cite les vagues et les marées au niveau des plages et les courants fluviaux au niveau des continents.

Exemples de formes d'érosion par l'eau (fig. 13):

Le ravinement au niveau des oueds, talweg, talus,... ;

Cheminées de fée, constituées de matériaux hétérogènes moins consolidés et chapeautées d'un bloc ;

Les inselbergs : reliefs en forme de pain de sucre ;

Les badlands : zones argileuses creusées en une multitude de ravins.



Fig. 13 : de gauche à droite : ravinement, badlands, cheminées de fée.

III. Le transport des éléments érodés

Les résidus de l'érosion à l'état ionique (en solution) ou solide de dimensions variées, sont ensuite transportés par : l'eau (fleuves, vagues, marées) ; la glace ; le vent ; et la gravité.

III.1. Transport par l'eau (aquatique)

L'eau transporte des matériaux détritiques (granulaire) et des éléments en solution. Les matériaux détritiques sont transportés d'autant plus loin qu'ils sont plus petits, des milliers de km pour les grands fleuves. Ils se choquent et s'usent au cours du transport. On distingue deux grands types d'écoulement:

III.1.1. Transport des solutions

Les éléments ioniques produits de la dissolution Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^- , sont transportés par les eaux marines ou par les eaux continentales (de ruissellement et d'infiltration).

En climat tempéré, les rivières transportent plus de matière en solution qu'en suspension (milliards de tonnes/ an) par rapport aux climats arides à semi-arides.

III.1.2. Transport des éléments solides

a) Milieu continental : courants fluviaux

L'action des eaux fluviales dépend de plusieurs facteurs :

- La vitesse d'écoulement de l'eau (débit),
- La taille, la forme et la densité des éléments érodés.

Le débit liquide : c'est le volume d'eau qui transite une section du cours d'eau pendant l'unité de temps (m^3/s) ; $Q = V.S$ (V =vitesse en m/s et S la section mouillée en m^2).

Le dédit solide : c'est la charge des matériaux transportés par le cours d'eau pendant l'unité de temps (kg/jour ou tonnes/an).

L'écoulement permanent ou temporaire, peut être laminaire (la vitesse est régulièrement croissante ou décroissante entre 2 points) ou le plus souvent turbulent (la vitesse est irrégulièrement variable d'un point à l'autre).

Le mode de transport des matériaux érodés est fonction de leur taille granulométrique (fig. 14).

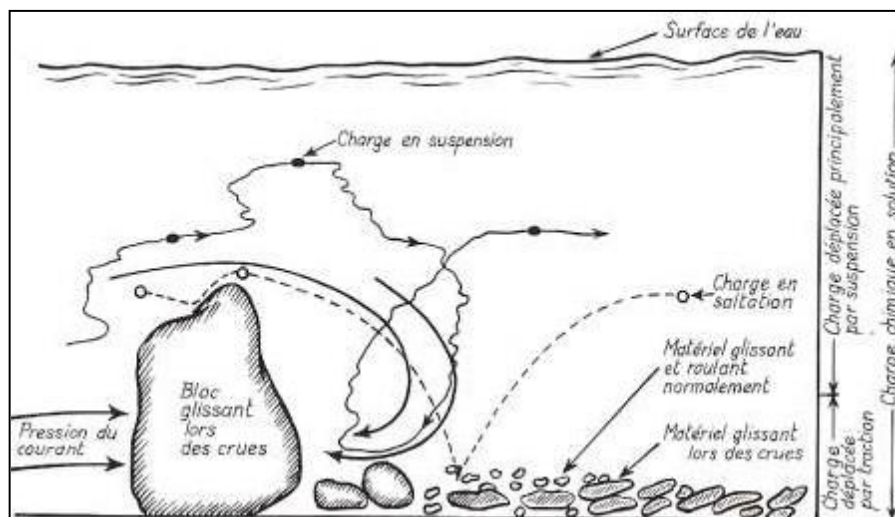


Fig. 14 : Modes de transport des matériaux dans un cours d'eau.

Transport en solution : Les éléments ioniques produits de la dissolution Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^- , sont transportés par les eaux de ruissellement et d'infiltration.

Transport en suspension : matériaux très fins généralement $< 60 \mu\text{m}$: argile, silts et vase;

Transport par roulement : roulement des matériaux sur le fond (sable, galets) ;

Transport par saltation : Sables fins et moyens ; se fait par sots et caractérise l'écoulement turbulent ;

Transport par traction : blocs, galets, graviers, sable grossiers $> 1\text{mm}$ qui glissent sur le fond sous l'effet de la pression des courants (crues).

En fonction de la vitesse du courant et de dimensions des particules, **Hjulström** a établi un diagramme délimitant les 3 domaines d'érosion, transport et sédimentation (fig. 15).

La courbe supérieure fixe le minimum de vitesse de courant nécessaire pour éroder un sédiment de taille donnée.

La courbe inférieure fixe la vitesse au dessous de laquelle le matériel érodé peut se déposer.

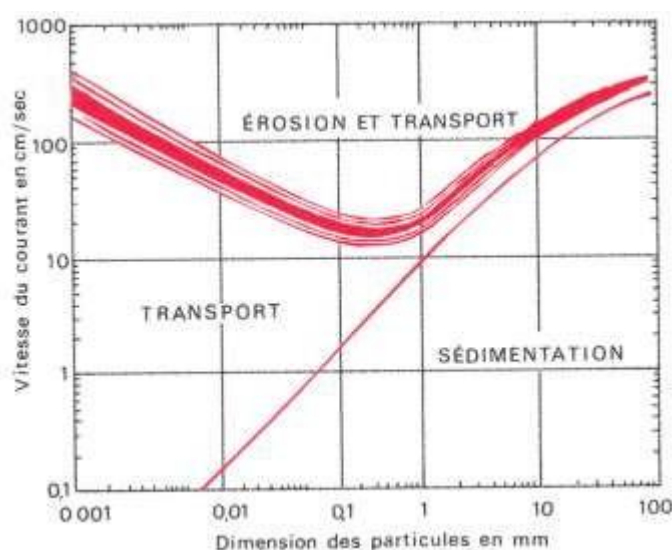


Fig. 15: Diagramme de Hjulström (simplifié).

b) Milieu marin : courants marins

Lorsque les cours d'eau fluviaux débauchent dans un océan, Les sédiments transportés vont être repris par l'action marine. Les agents de transport marin sont les vagues, les marées, et les courants marins (upwelling).

Les **vagues** (houles) est le mouvement ondulatoire que subit la surface de la mer sous l'influence du vent. Elles se caractérisent par une longueur d'onde, l'amplitude (hauteur), la direction et la vitesse de propagation.

Les **marées** sont des variations du niveau des mers provoquées par l'attraction de la lune et du soleil. Les marées ont une amplitude maximale quand la lune et le soleil ajoutent leur action au moment de la pleine et de la nouvelle lune ("marées de vives eaux"). Elles sont minimales quand les actions des deux astres se contrarient ("marées de mortes eaux"). L'action de la lune est dominante, l'attraction du soleil ne représente que 45% de celle de la lune: les marées suivent le cycle lunaire, soit 29 jours environ, pendant lequel il y a deux périodes de vives eaux et deux de mortes eaux. La masse d'eau oscille selon une période correspondant à la moitié d'un jour lunaire qui est d'environ 24 heures 50 minutes. Pendant 6 heures environ la mer monte; elle reste étale pendant quelques minutes (marée haute); puis elle redescend pendant 6 heures, reste étale (marée basse), et le cycle recommence (cycle semi-diurne). Dans certaines régions, le cycle est diurne (un cycle de marée par jour dans le golfe du Mexique).

Les **upwellings** sont des courants de fonds marins et qui arrivent à la surface selon des chenaux.

III.2. La glace

Lorsque les températures moyennes d'une région se situent sous 0°C, les précipitations se font le plus souvent sous forme de neige et s'accumulent sous forme de glace. On reconnaît deux grandes zones d'accumulation des glaces : les régions polaires et les régions en hautes altitudes.

On aura par conséquent deux grands groupes de glaciers : les calottes polaires, et les glaciers alpins (ou de montagnes) en hautes altitudes.

Les calottes polaires

On estime que les glaces couvrent aujourd'hui à peu près 10% des masses continentales. La calotte polaire de l'**Antarctique** est la plus grande et la plus épaisse. Elle couvre pratiquement tout le continent antarctique (fig. 19).

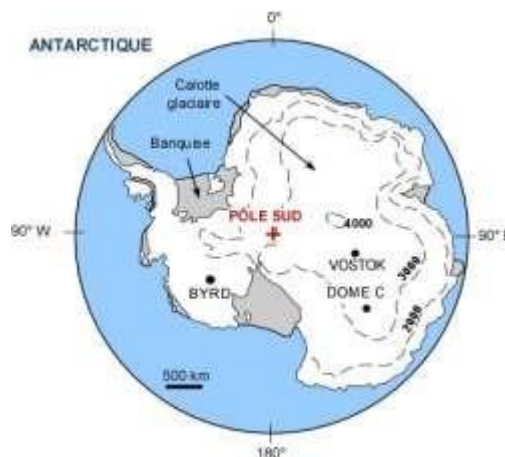


Fig. 19 : Répartition spatiales des glaciers polaires antarctiques.

Les glaciers alpins

Dans les secteurs montagneux qui se situent sous 0°C en moyenne, l'eau s'accumule sous forme de neige qui se compacte en glace. Mais la glace ne peut s'accumuler indéfiniment. Puisque les zones d'accumulation ne sont pas confinées, la glace s'écoule sous l'effet du poids du matériel à la zone d'accumulation. Il initie et conduit l'écoulement de la glace en poussant sur toute la masse qui s'écoule vers l'aval. Cet écoulement est lent: 180 m/an pour les plus grands glaciers des Alpes, de 90 à 150 m/an pour les glaciers plus petits.

En plus de l'érosion, les glaciers sont des agents de transport très puissants. Les sédiments glaciers sont des blocs, galets et fragments de roches. Ces matériaux charriés par la glace sont appelés **moraines** (fig. 20).

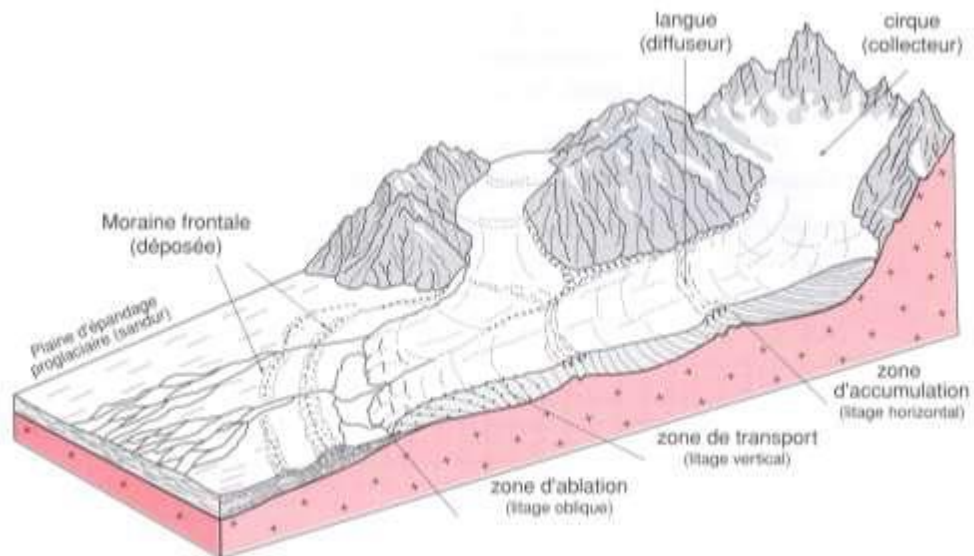


Fig. 20: Différentes parties d'un glacier alpin (Campy et Macaire, 2003).

Les eaux de fonte du glacier redistribuent les matériaux glaciaires sur une plaine d'épandage; il y a tout un cortège de dépôts qu'on dit **fluvio-glaciaires**.