

Pétrologie des roches sédimentaires

(Résumé Chapitre-1)

Introduction et Processus de formation des roches sédimentaires

I- Introduction

- **Pétrologie** Du grec πέτρα = pétra = roche et λόγος = logos = science C'est la branche de la géologie qui étudie les roches et leurs conditions de formation.

- **Pétrologie sédimentaire** : C'est l'étude des roches sédimentaires. Elle permet de reconstituer les paléo-environnements, paléogéographies et paléoclimats à proximité du lieu de dépôt de la roche.

On utilise souvent le principe d'actualisme (Lyell, 1830) « Le présent est la clef du passé ». Les conditions de formation d'une roche ancienne sont identiques aux conditions dans laquelle une roche similaire actuelle se forme.

II- Processus de formation des roches sédimentaires

Si les roches ignées forment le gros du **volume** de la croûte terrestre, les roches sédimentaires forment le gros de la **surface** de la croûte. Quatre processus conduisent à la formation des roches sédimentaires:

- l'**altération superficielle** des matériaux qui produit des particules,
- le **transport de ces particules** par les cours d'eau, le vent ou la glace qui amène ces particules dans le milieu de dépôt,
- la **sédimentation** qui fait que ces particules se déposent dans un milieu donné pour former un sédiment et, finalement,
- la **diagenèse** qui transforme le sédiment en roche sédimentaire.

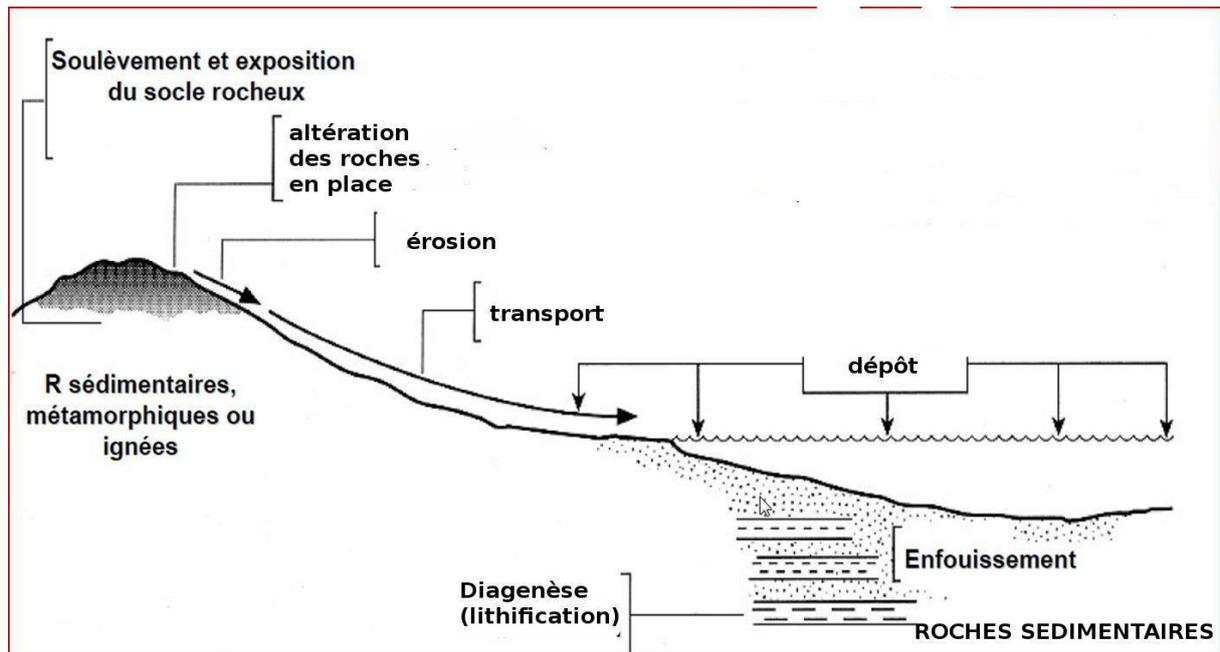


Figure 1. Processus de formation des roches sédimentaires (Réf : Ulb,ac,be modifié).

II- 1 L'altération des continents

a. Principaux aspects de l'érosion continentale

La destruction du continent constitue la source principale des matériaux sédimentaires. Ce phénomène intéresse aussi bien les roches magmatiques que les roches métamorphiques et sédimentaires. Les êtres vivants y contribuent également. Les actions purement mécaniques des agents d'érosion produisent des fragments qui sont à l'origine des roches détritiques. Les phénomènes chimiques donnent des solutions de lessivage qui sont les sources des minéraux néoformés des roches d'origine chimique. Les roches érodées forment un manteau d'altération (éluvion) qui après lessivage peut donner des roches résiduelles riches en fer, en aluminium... La contribution des organismes à cette couche, sous forme d'humus, aboutit à la formation d'un sol dont la nature et l'épaisseur varie selon les climats. Les composants de cette pellicule d'altération sont déblayés à leur tour et transportés sous forme solide ou en solution. Ils peuvent se déposer temporairement dans des pièges continentaux (rivières, lacs) mais sont finalement remobilisés à plus ou moins longue échéance pour être déversés dans le milieu marin. Ces transformations, surtout chimiques, correspondent à une adaptation des roches aux conditions physico-chimiques de la surface.

b. La Désagrégation Mécanique

Un certain nombre d'agents physiques produisent la fragmentation des roches. Les variations de température entraînent la dilatation ou la contraction des roches: soumise à des variations de volume incessantes, une roche se fissure puis éclate. 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 pénètre 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 (exemple, la craie).

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). Elle est responsable de l'accumulation des manteaux d'éboulis caractéristiques des zones désertiques et des montagnes. La cristallisation du sel ajoute son action le long des littoraux et dans les zones désertiques. Près des côtes, les embruns salés pénètrent dans les pores des roches. Les cristaux de sels s'y développent et produisent des craquelures. Les sulfates de Na et Mg sont les plus efficaces. Enfin, le transport par l'eau, et accessoirement l'action du vent, use les matériaux et produit des éléments plus fins: limons, poussières...

c. Les réactions chimiques de l'altération

Principales réactions d'altération

L'altération chimique des roches se fait en présence d'eau; elle a lieu essentiellement en climat humide. Les réactions sont des hydrolyses, accessoirement des oxydations, des hydratations, des décarbonatations pour les roches calcaires. Les éléments solubles sont lessivés. Les parties insolubles restent sur place, se recombinaient et forment des minéraux de néoformation, principalement des argiles. Les organismes peuvent intervenir à tous les stades de ce processus. Ils fournissent en particulier des matériaux minéraux ou organiques.

- Dissolution

Ce processus chimique simple intéresse les roches salines: sel gemme, potasse et gypse.

- Oxydation et réduction

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

olivine + oxygène -----> oxyde ferrique + silice



Les réductions sont plus rares; elles interviennent dans les milieux hydromorphes et produisent en particulier le passage du fer ferrique au fer ferreux soluble.

- Hydratation

C'est une incorporation de molécules d'eau à certains minéraux peu hydratés contenus dans la roche comme les oxydes de fer; elle produit un gonflement du minéral et donc favorise la destruction de la roche.

- Décarbonatation

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



- Hydrolyse

Les hydrolyses, c'est à dire la destruction des minéraux par l'eau, sont les principales réactions d'altération.

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

Cas d'un feldspath sodique, l'albite:



albite + eau -----> gibbsite + acide silicique + ions précipité <-----solution ----->

Les corps résultants peuvent ensuite réagir entre eux et donner des minéraux argileux.

* L'hydrolyse est partielle lorsque la dégradation est incomplète et donne directement des composés silicatés (argiles). Ces composés diffèrent selon les conditions de milieu. L'hydrolyse partielle de l'albite donne soit de la kaolinite, soit des smectites.

Exemple de formation de kaolinite:



albite + eau -----> kaolinite + ac.silicique + ions

Minéraux formés

Les nouveaux minéraux formés sont en général des phyllosilicates. Ces minéraux proviennent soit de la transformation d'un phyllosilicate pré-existant, soit d'une néoformation à partir d'un silicate non en feuillet à la suite du réarrangement de la structure cristalline. Les réactions ont lieu surtout dans le sol.

d. Rôle Des Organismes Dans L'altération : Principaux effets des êtres vivants sur les roches

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 (hyphes de 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. Les cations des minéraux sont extraits par complexolyse. Sous les lichens adhérant à la roche est mise en évidence la formation de composés mal cristallisés à base de Si, Al et Fe, de nombreux composés à base de Ca et des gels organo-minéraux, résultats de la complexolyse et précurseurs du sol.

e. Bilan de l'altération

Une réaction générale d'hydrolyse peut s'écrire:

Minéral Primaire + Réactifs en solution -----> Minéral Secondaire + Solution de lessivage

La destruction des édifices cristallins silicatés produit des fragments de chaîne silicatées qui, au moins dans un premier temps, restent sur place, et des ions solubles qui sont emportés par l'eau ou lessivés. L'importance respective de l'héritage, des transformations et des néoformations est étroitement liée à l'intensité de l'altération et au lessivage. Pour une altération et un lessivage faible, les argiles 2/1 se forment. Avec l'augmentation de l'intensité de ces paramètres, ce sont des argiles 1/1, plus pauvre en silice, qui sont synthétisées. Pour un fort lessivage, les cations solubles sont entraînés et les phyllosilicates ne peuvent plus se former: il reste sur place le quartz et les oxydes de fer et d'aluminium.

II.2 Transport des matériaux

Les matériaux produits par les phénomènes d'érosion sont généralement déplacés sous l'action de la gravité et de l'eau, plus accessoirement sous l'action du vent.

a. Transport par gravité pure

Ce mode de transport se rencontre dans les régions présentant des différences d'altitude créant des pentes, et où la désagrégation mécanique est forte, c'est à dire essentiellement en montagne et en régions désertiques. Les éléments sont déplacés sur une faible distance, quelques centaines de mètres, exceptionnellement quelques km et s'accumulent en cônes d'éboulis: par exemple ceux de la Casse déserte au col de l'Izoart. Ils sont non usés et de toute taille; les plus gros descendent plus loin et forment la frange du cône: un certain grano-classement horizontal s'établit. La porosité des éboulis est grande et la percolation des eaux bonne. La cimentation est rapide, surtout en pays calcaire, et donne une brèche de pente à éléments anguleux.

Très souvent, à la suite de fortes pluies par exemple, à la gravité pure s'ajoute l'action de l'eau. Les éboulis comprenant une phase fine d'argile forment des coulées boueuses qui glissent sur les pentes et peuvent causer des dégâts considérables. Les éléments sont anguleux, mal classés (en vrac) et emballés dans une matrice argileuse. Ce sont les "coulées de débris" ou "coulées de solifluxion" aériennes qui peuvent apparaître dans tout matériel meuble à éléments fins

situé sur une pente et remobilisé par les pluies: sols, cendres volcaniques. Les coulées de solifluxion forment les colluvions des fonds de vallée.

Lorsque la quantité d'eau incorporée est plus grande, les coulées sont plus fluides et passent aux "laves torrentielles" s'écoulant dans les lits des torrents au cours d'un orage: le terrain de camping du Grand Bornand (Savoie) a été ainsi envahi par une coulée boueuse qui a dévalé le lit du torrent de la Borne à la suite d'un fort orage en 1987. Les eaux très chargées en matériaux des rivières de pays désertiques ("wadi") constituent des écoulements intermédiaires entre le courant de traction classique d'un cours d'eau et la coulée de débris.

b. Transport par la glace

Sous climat froid et humide, la neige se transforme en glace par compaction et fusion. La glace s'écoule comme un fluide visqueux et forme un glacier. La charge transportée dépend de l'approvisionnement en matériaux. En montagne, le glacier peut transporter des éboulis en telle quantité que ces derniers recouvrent et dissimulent complètement la glace (cas du Glacier Noir dans l'Oisans). La charge est beaucoup plus faible pour les glaciers polaires en calotte. La compétence d'un glacier est également grande: certains blocs dépassent plusieurs mètres. Ils sont abandonnés à la fonte des glaces et constituent des "blocs erratiques" caractéristiques du passage des glaciers. Citons ceux de la région lyonnaise apportés des Alpes par le glacier du Rhône au cours des glaciations quaternaires.

Les matériaux transportés sont fortement hétérométriques et ne montrent pas de classement par taille. Les éléments ne sont pas usés par des séries de chocs entre eux, comme cela se produit dans un transport éolien ou aquatique, mais ils peuvent être broyés entre eux ou contre les parois de la vallée sous l'effet de la pression de la glace, jusqu'à former une "farine glaciaire" faite de quartz et autres éléments très fins qui sont une proie facile pour l'érosion torrentielle ou éolienne. La distance de transport est de quelques dizaines de km pour les glaciers de montagne mais elle peut dépasser la centaine de Km pour les grands systèmes glaciaires (glaciers du Groenland)

c. Transport par l'eau

- Eaux sauvages et eaux chenalisées

L'eau transporte des matériaux détritiques en suspension et des éléments en solution. La charge d'une rivière est en moyenne de 120 grammes par d'éléments en solution pour 510 g par m³ de suspension. Sa compétence est également bien plus faible que celle d'un glacier et dépasse rarement quelques dizaines de cm. Les matériaux détritiques sont transportés d'autant plus loin qu'ils sont plus petits, des milliers de km pour les grands fleuves: il s'établit un classement longitudinal. Ils se choquent et s'usent au cours du transport. On distingue deux grands types d'écoulement:

* l'écoulement non canalisé, ou "eaux sauvages", correspondant au ruissellement sur une pente. L'érosion est importante mais la longueur du transport est faible; très vite, les filets d'eau se rassemblent et forment un chenal. Le ruissellement apparaît à la suite de fortes pluies; il est développé en montagne, en particulier dans les bassins de réception des torrents; lorsque la charge est grande, il évolue en de véritables coulées boueuses. Les matériaux fins sont arrachés, ceux qui sont protégés par un bloc peuvent être épargnés, ils constituent alors un pilier sous le bloc appelé "demoiselle coiffée" ou "cheminée de fée". Sous climat désertique, les orages provoquent des écoulements en nappes, ou sheet flood, peu chenalisés qui recouvrent de vastes surfaces mais sont très éphémères.

* les eaux canalisées qui coulent dans un ou plusieurs chenaux en fonction de la pente on parle généralement de torrent pour une pente et une vitesse forte, de rivière pour une pente et une vitesse faible.

- Transport des solutions

Cet aspect du transport d'une rivière est souvent négligé. Pourtant la quantité de matière transportées en solution est considérable. En climat tempéré, une rivière de plaine transporte plus de matière en solution qu'en suspension: c'est le cas de la Seine dont l'eau contient une quantité importante d'effluents industriels. La quantité totale de matière en solution apportée par les fleuves aux océans a été chiffrée à des milliards de tonnes par an. La répartition des éléments chimiques diffère de celle de l'eau de mer: l'eau de rivière est comparativement plus riche en silice et carbonates dissous.

- Transport des éléments solides

La quantité des éléments transportés dépend des caractères du fluide, vitesse et viscosité, et de ceux des éléments eux-mêmes, taille, forme, densité. L'écoulement de l'eau produit sur

l'élément une force verticale, dirigée de bas en haut, qui s'oppose à son poids apparent et tend à le soulever. Cette force est proportionnelle à la vitesse du courant. Les petits éléments (argiles, sables) sont arrachés du fond et suspendus dans l'eau. Toute diminution de vitesse produit leur chute. Ce transport par suspension est celui des particules de petite taille. Le transport par suspension est celui des particules de petite taille. Les éléments plus gros ne s'élèvent pas au-dessus du fond, sauf épisodiquement, à la suite d'une brusque élévation de la vitesse instantanée (saltation), ils roulent ou rampent sur le fond. Le diagramme de Hjulström illustre le comportement des particules en fonction de leur taille et de la vitesse du courant. Pour des vitesses fortes, les particules sont arrachées du fond (érosion) et transportées. Pour des vitesses plus faibles, les petites particules déjà arrachées sont transportées, les plus grosses restent sur le fond. On remarque que les particules argileuses demandent une plus forte énergie d'arrachement que les sables car elles sont plus cohérentes entre elles et offre à l'eau une surface plus lisse que les sables.

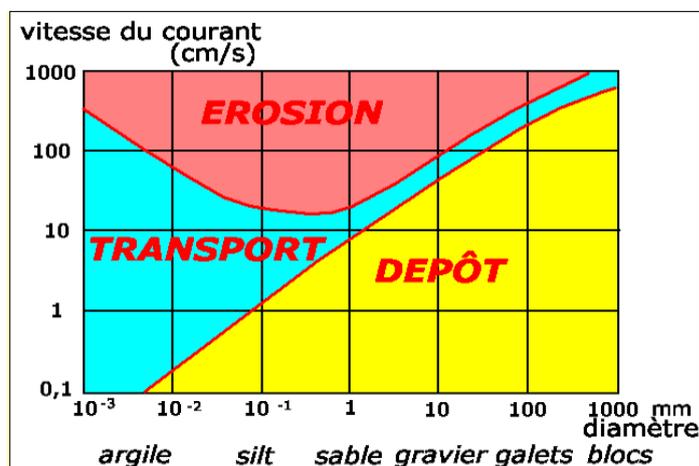


Figure 2. Diagramme de Hjulström (simplifié). *source :* https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Hjulstr%C3%B6m

Au cours de leur transport, les grains s'entre-choquent et s'usent: c'est l'abrasion. Ce phénomène est faible pour les sables; leur masse varie peu, leur forme reste plus ou moins anguleuse, leur surface montre des traces de choc en coup d'angle. L'usure est nulle pour les particules fines; elle est en revanche importante pour les graviers et les galets qui diminuent de taille par éclatement, broyage, ébréchure, broyage, écaillage ou dissolution et deviennent arrondis. L'abrasion dépend de la nature et la taille des galets, l'énergie de la rivière, sa charge solide et la nature du fond de son lit. Exemples: des éboulis décimétriques de granodiorite deviennent arrondis après un transport un torrent de 10 km. En revanche, des

grains de quartz inférieurs à 1 mm ne montrent pas de différence notable après un transport de plus de 200 km.

d. Transport par le vent

L'air est un fluide transporteur de faible viscosité; sa charge et sa compétence seront faible: les particules transportées ont des tailles de quelques 1/10^{ème} de mm, quelques cm par vent violent. Le choc des grains entre eux est plus violent que dans un transport aquatique (l'eau amortit les chocs). Les grains présentent des traces de choc en "V" et prennent une surface dépolie. L'érosion et le transport éolien prennent une grande importance dans le cas de sédiment meuble, non protégé par la végétation, ni rendu plus cohérent par une imprégnation d'eau. Ces conditions sont rencontrées dans les régions désertiques où la désagrégation mécanique produit des matériaux de toute taille; les particules fines sont balayées (déflation), les éléments plus grossiers restent sur place et forment les surfaces caillouteuses, des regs. Les particules de l'ordre de 0,1 à 1 mm transportées par le vent érodent les roches qu'elles rencontrent: cette action de "sablage" est visible aussi bien sur des panneaux entiers de roches (falaises, monument comme le Sphinx du Caire) que sur les cailloux au sol qui prennent un aspect dépoli et présentent des surfaces planes (galets à facettes ou "dreikanter"). Elles peuvent être accumulées plus loin en dunes. Quand les poussières sont entraînées à haute altitude, elles sont disséminées très loin: les poussières sahariennes, de quelques dizaines de microns, tombent parfois sur la France et colorent la pluie en rouge. Les zones de plage, constituées de matériaux sableux et soumises au vent, constituent également un domaine d'action privilégié pour le vent. Les grains sont prélevés sur les zones exondées (inter- et supra tidales); ils sont transportés généralement vers l'intérieur des terres et déposés en dunes littorales. Les cendres émises par une éruption volcanique sont largement disséminées à la surface du globe par les vents et colorent les couchers de soleil; en 1982, l'éruption du volcan mexicain El Chichon a projeté 500 millions de tonnes de poussières volcanique dans l'atmosphère.

II.3 Sédimentation et milieux sédimentaires

Tout le matériel transporté s'accumule dans un bassin de sédimentation, ultimement le bassin marin, pour former un dépôt. Les sédiments se déposent en couches successives dont la composition, la taille des particules, la couleur, etc., varient dans le temps selon la nature des

sédiments apportés. C'est ce qui fait que les dépôts sédimentaires sont stratifiés et que les roches sédimentaires issues de ces dépôts composent les paysages stratifiés.

II.3.1 PRINCIPAUX MILIEUX DE SEDIMENTATION

- **Les milieux continentaux**

a) milieux aériens

- * sols

- * pentes: éboulis, coulées de solifluxion

- * vallées torrentielles: alluvions

- * piedmonts:

- * milieux glaciaires

- * dépôts éoliens

b) milieux aquatiques:

- * plaines alluviales (grandes rivières permanentes)

- * lacs

- * marécages

- **Les milieux marins**

a) milieux littoraux (plage et plate-forme littorale)

- sédimentation à dominance silico-clastique quand l'apport détritique est fort

- sédimentation à dominance carbonatée là où l'apport détritique est faible et le climat favorable au développement des organismes constructeurs.

b) milieux de talus sous-marin:

sédiments détritiques rythmés mis en place en bas du talus par les courants de turbidité

c) bassin et fosse océanique:

détritiques fins venant du talus auxquels s'ajoutent les particules fines tombant de la surface: débris planctoniques, poussières volcaniques...dépôt de boues pélagiques ou hémi-pélagiques. Le long des marges actives, un prisme sédimentaire souligne la position de la subduction.

• Les milieux intermédiaires

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

* estuaires: influence de la mer prépondérante

* deltas: le fleuve a une action dominante; sédimentation abondante.

* lagunes: très étendues si la bordure du continent est très plane.

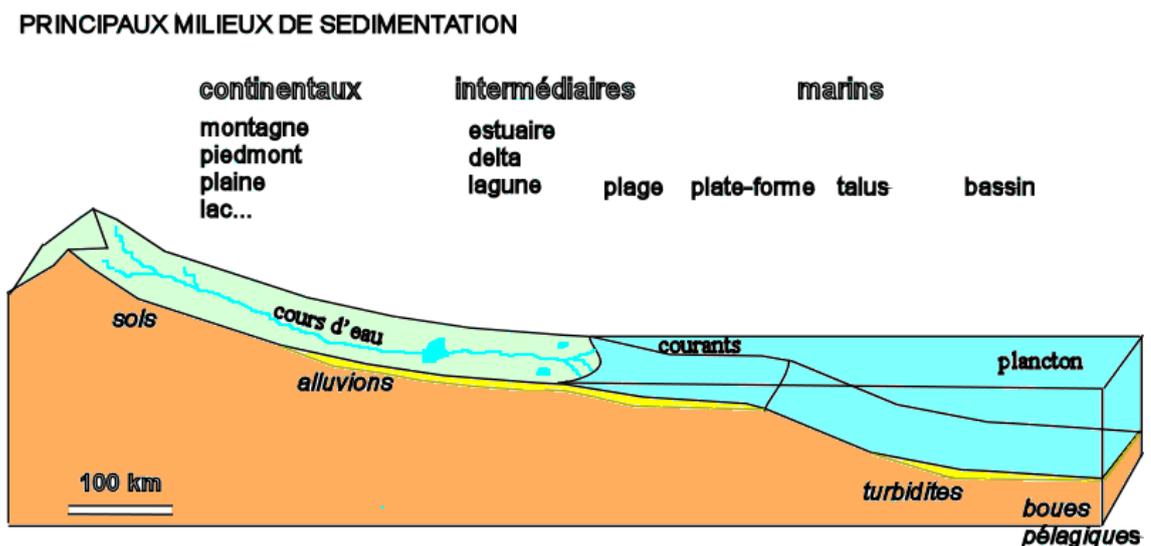


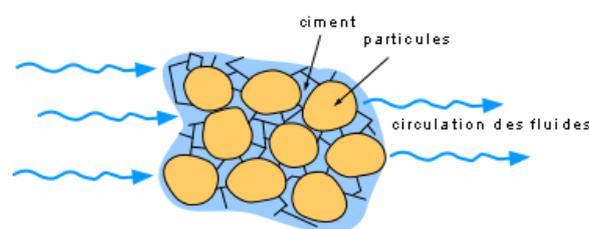
Figure 3. Principaux milieux de dépôt.

II.4 La diagenèse

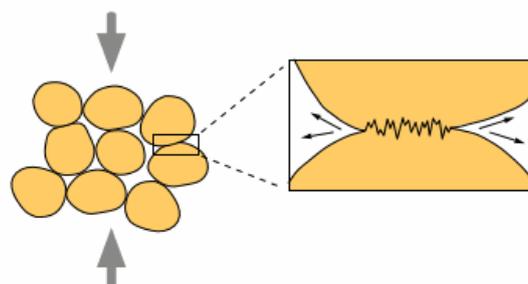
La diagenèse est la transformation d'un sédiment en une roche sédimentaire.

Elle englobe tous les processus chimiques et mécaniques qui affectent un dépôt sédimentaire après sa formation. Elle commence sur le fond marin, dans le cas d'un sédiment marin, et se poursuit tout au long de son enfouissement, c'est-à-dire, à mesure que d'autres sédiments viennent recouvrir le dépôt et l'amener progressivement sous plusieurs dizaines, centaines ou même milliers de mètres de matériel. Les processus de diagenèse sont variés et complexes : ils vont de la **compaction** du sédiment à sa **cimentation**, en passant par des phases de **dissolution**, de **recristallisation** ou de remplacement de certains minéraux. Le processus diagénétique qui est principalement responsable du passage de sédiment à roche est la cimentation. Il s'agit d'un processus relativement simple : si l'eau qui circule dans un sédiment, par exemple un sable, est sursaturée par rapport à certains minéraux, elle précipite ces minéraux dans les pores du sable et ceux-ci viennent souder ensemble les particules du sable; on obtient alors une roche sédimentaire qu'on appelle un grès. Le degré de cimentation peut être faible, et on a alors une roche friable, ou il peut être très poussé, et on a une roche très solide. La cimentation peut très bien se faire sur le fond marin (diagenèse précoce), mais il est aussi possible qu'il faille attendre que le sédiment soit enfoui sous plusieurs centaines ou même quelques milliers de mètres de matériel (diagenèse tardive).

L'**induration** (cimentation) d'un sédiment peut se faire tôt dans son histoire diagénétique, avant l'empilement de plusieurs mètres de sédiments (pré-compaction), ou plus tardivement, lorsque la pression sur les particules est grande due à l'empilement des sédiments.



CIMENTATION PRÉ-COMPACTION



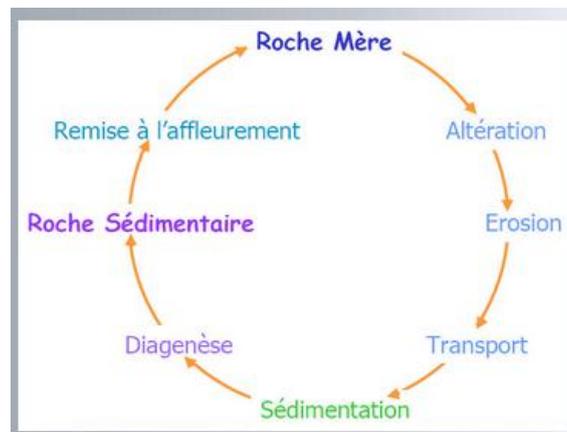
COMPACTION ET CIMENTATION

Dans le cas de la cimentation pré-compaction (schéma du haut), les fluides qui circulent dans le sédiment précipitent des produits chimiques qui viennent souder ensemble les particules. Exemple : la calcite qui précipite sur les particules d'un sable et qui finit par souder ces derniers ensembles. La compaction d'un sédiment (schéma du bas) peut conduire à sa cimentation. Ainsi, la pression élevée exercée aux points de contact entre les particules de quartz d'un sable amène une dissolution locale du quartz, une sursaturation des fluides par rapport à la silice et une précipitation de silice sur les parois des particules cimentant ces derniers ensembles.

III- Cycle sédimentaire

Le cycle sédimentaire comporte plusieurs étapes :

- Altération, Erosion, Transport ;
- Sédimentation ;
- Diagenèse ;



- Altération, Erosion, Transport déterminent les types, les proportions et l'état des particules transportées qui permettront de constituer un dépôt d'origine détritique
- Sédimentation
Enregistre les conditions locales du lieu et du moment de dépôt.
- Diagenèse
Modifications subies par le sédiment après son dépôt jusqu'à sa transformation en

roche sédimentaire. Ces modifications du sédiment peuvent « effacer » des traces enregistrées à l'étape précédente.