



Lycée François-René de CHATEAUBRIAND
 136 BOULEVARD DE VITRÉ, CS 10637
 35706 RENNES CEDEX 7
CLASSE PRÉPARATOIRE BCPST 1C
 Biologie Chimie Physique Sciences de la Terre

ENSEIGNEMENT DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE (SVT)
 °° SCIENCES DE LA TERRE °°
 >> Cours <<

Chapitre 25

Sédimentation et diagenèse
 COURS COMPLET RÉDIGÉ

Objectifs : extraits du programme

Savoirs visés	Capacités exigibles
ST-E-1-2 Érosion et entraînement de matière	
En surface des continents, l'érosion se traduit par des flux de matières en solution (solutés) ou en suspension (particules). Ce flux conduit à un tri minéralogique et chimique qui préfigure la formation de nouveaux matériaux.	
Précisions et limites : Ce point correspond à la phase de transport des produits d'altération. On ne traite pas de l'impact des activités humaines sur les transferts de surface. L'étude des sols est développée en BCPST 2. À cette occasion, sont remobilisés les acquis sur les processus d'altération participant à la formation des sols.	
Liens : Les sols (BG-B) Le climat de la Terre (BG-C) Activités de terrain	
ST-E-2 La sédimentation des particules et des solutés	
La sédimentation s'opère dans des bassins sédimentaires dont la géométrie est conditionnée par le contexte géodynamique. Dans un bassin sédimentaire, la répartition des sédiments dépend de l'espace potentiellement disponible (accommodation) entre le niveau de la mer et le fond du bassin. La variation du niveau marin absolu (eustatisme) ou du niveau de base (substitué du niveau marin en domaine continental) gère les variations d'espace disponible pour la sédimentation, en lien avec les effets de la subsidence et du flux sédimentaire.	- Exploiter des données montrant le lien entre le contexte géodynamique et le type de bassin. - Exploiter des données issues de documents complémentaires (cartes, données géophysiques et sédimentologiques) permettant de comprendre l'origine et l'histoire géodynamique (subsidence) d'un bassin sédimentaire intracratonique (le Bassin parisien).
Précisions et limites : Le Bassin parisien est traité en TP de cartographie (partie ST-A). La stratigraphie séquentielle n'est pas au programme.	
Les dépôts de particules en suspension (sédiments détritiques) sont liés aux conditions hydrodynamiques des milieux et se produisent dans des environnements variés. Les sédiments présentent des structures et des figures sédimentaires diverses, à différentes échelles, traduisant les régimes hydrodynamiques.	

Précisions et limites : Dans le cas des structures sédimentaires, on se limite à l'identification des rides et au litage horizontal. Le diagramme d'Allen n'est pas à mémoriser. La structure tripartite (plaine deltaïque, front de delta, prodelta) des deltas n'est pas exigible : seuls les mécanismes à l'origine de leur dynamique (origine et dépôt des particules en fonction de l'hydrodynamisme) sont à connaître.	
La sédimentation des solutés est précédée d'une bioprécipitation ou d'une précipitation chimique. La sédimentation carbonatée résulte pour l'essentiel de l'activité d'êtres vivants : organismes produisant des tests et des coquilles ou bactéries provoquant des précipitations. Elle se produit surtout en domaine marin de plateforme et caractérise aussi les environnements récifaux. La sédimentation carbonatée pélagique est le fait de micro-organismes planctoniques (Foraminifères planctoniques, Coccolithophoridés). Les dépôts ne s'observent pas au-delà d'une certaine profondeur, qui définit la profondeur de compensation des carbonates (PCC) variable d'une zone océanique à une autre et fluctuante à l'échelle des temps géologiques. La silice dissoute dans l'eau de mer peut être utilisée par des micro-organismes planctoniques (Radiolaires, Diatomées), ce qui alimente la sédimentation de boues siliceuses, non limitée par la profondeur et inégalement distribuée. La précipitation de solutés en domaine lagunaire ou littoral, peut engendrer des évaporites (gypse- anhydrite, halite, sylvite) par concentration des solutions.	
Précisions et limites : En ce qui concerne les environnements carbonatés, on se limite à l'étude d'une plate-forme associée à un milieu récifal. Le rôle des stromatolithes en tant que bio-constructeur dans ces environnements est souligné. La nomenclature relative aux différents types de récifs est hors programme. Seule la classification de Dunham est exigible ; la classification de Folk est hors programme.	
Liens : Climat et variabilité climatique (BG-C-3) La carte géologique (ST-A) La dynamique des enveloppes internes (ST-C) Le phénomène sédimentaire (ST-H) Les ressources géologiques (ST-I-2) Les grands ensembles géologiques (ST-J) Activités de terrain	
ST-E-3 La diagenèse	
Au cours de l'enfouissement, les sédiments sont transformés en roches sédimentaires (diagenèse). Ces transformations sont marquées par des mécanismes physiques de compaction et par des mécanismes chimiques de précipitation.	- Exploiter des observations pétrologiques (roches et photographies de lames minces) et des données relatives aux transformations diagenétiques (cimentation).
Précisions et limites : On se limite aux phénomènes de cimentation dans les carbonates, en montrant la différence entre sparite et micrite. La dolomitisation est hors programme.	

Introduction

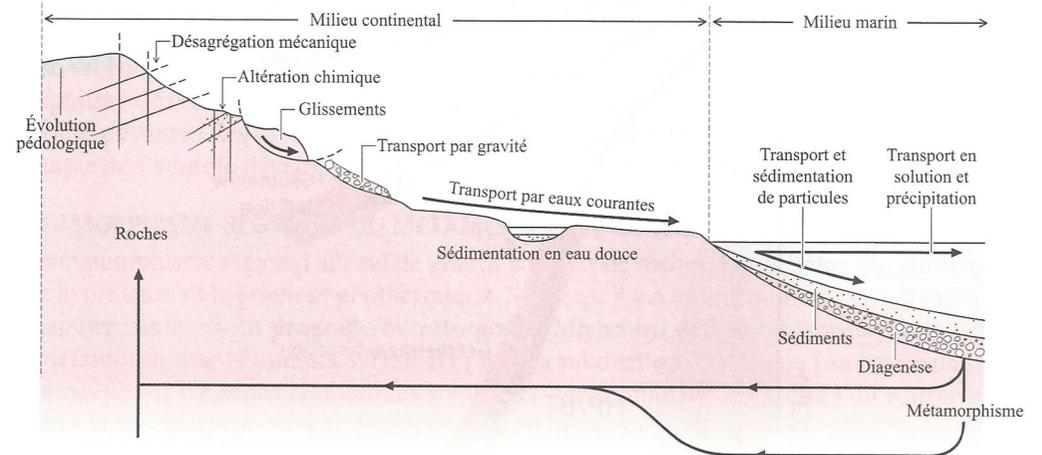
Après avoir expliqué les **mécanismes d'altération mécanique** et **chimique** qui aboutissent à l'**altération des continents** et à la **production de particules** ou d'**ions** qu'on peut appeler **sédiments** dans le **chapitre 24**, nous allons à présent nous intéresser aux **étapes suivantes du phénomène sédimentaire** (figures 1-2) :

- Le **transport des sédiments** par des **agents physiques** (eau, vent, gravité, glace) ;
- Le **dépôt des sédiments** ou **sédimentation** ;
- La **transformation des sédiments en roches sédimentaires** ou **diagenèse** (même si ce dernier point sera très partiellement traité).

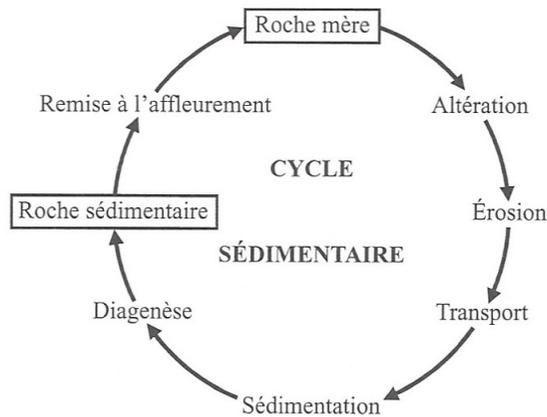
Rappels du TP E2 sur les roches sédimentaires

- **Sédiments** : *particules ou ions issues de l'altération (au sens large) d'une roche pré-existante, ou parfois des restes d'êtres vivants, et subissant un transport avant dépôt.*
- **Roches sédimentaires** : *roches constituées d'un assemblage de particules sédimentaires et/ou ions cristallisés, et/ou parfois de restes d'êtres vivants, qui ont subi une consolidation.*

Comment les sédiments se déplacent-ils et se déposent-ils ?
 Quel est leur devenir après dépôt ?



▲ FIGURE 2. Une autre vue d'ensemble du phénomène sédimentaire.
 D'après EMMANUEL et al. (2007).



▲ FIGURE 1. Le cycle sédimentaire. D'après EMMANUEL et al. (2007).

*Si (et seulement si) la roche sédimentaire subit à son tour l'altération, alors on aboutit à un processus sédimentaire cyclique qu'on peut nommer **cycle sédimentaire** (figure 2).*

I. Un transport des sédiments par des agents physiques précédant leur dépôt (sédimentation) dans des bassins sédimentaires

- On considère ici que les **processus d'altération** (traités dans le **chapitre 23**) ont **déjà eu lieu** mais ils **évidemment nécessaires en amont de tout transport ou dépôt sédimentaire**.

A. Les sédiments, des entités subissant un transport par des agents physiques

- Le **transport de particules** n'est pas un **phénomène chimique** mais bien un **phénomène physique**. Il nécessite de l'**énergie cinétique** apportée par un **agent physique** à l'origine du **déplacement**.

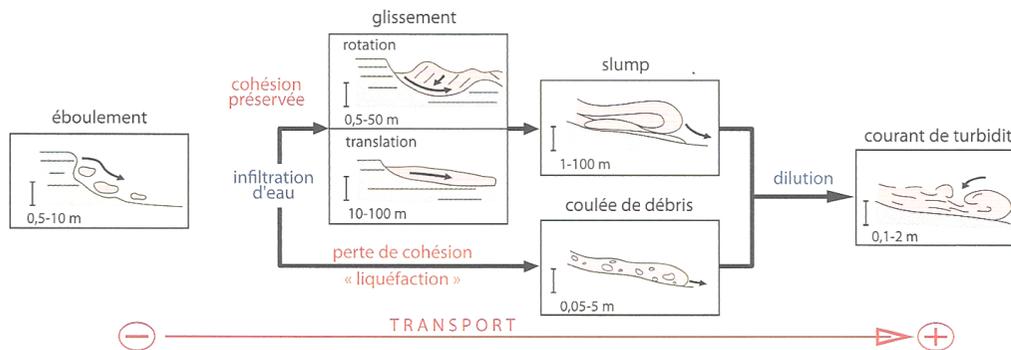
1. Cas des ions en solution : un transport par l'eau liquide

- Les **ions en solution** (exemples : carbonates, calcium...) sont transportés par les **courants aquatiques**, qu'ils sont **continentaux** ou **marins / océaniques**.

2. Cas des particules de roches (sédiments détritiques) : un transport par des agents variés

- On rappelle qu'on appelle **sédiments détritiques** les **particules issues de l'altération (chimique ou mécanique) de roches pré-existantes subissant un transport puis un dépôt**.

a. Un possible déplacement à courte distance par la gravité

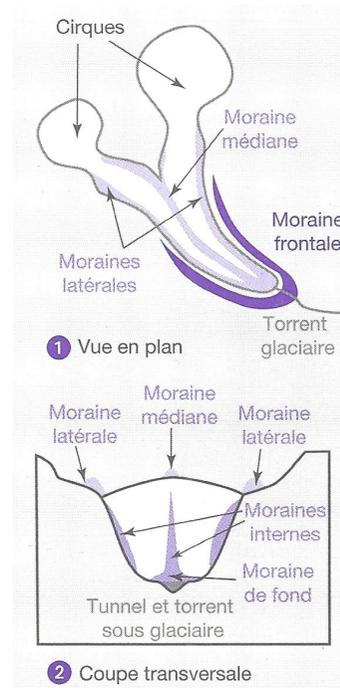


▲ FIGURE 3. **Flux sédimentaires dus à la gravité.**
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

- La **gravité** (*attraction entre la planète et l'ensemble des corps qui s'y trouvent*) peut être à l'origine de **formes de déplacement sédimentaires à courte distance** (figure 3), dans l'ordre croissant de distance de transport :
 - Sans intervention d'eau
 - Des **éboulements** : *dissociations de blocs rocheux suivies d'un déplacement désordonné le long d'une pente.*
 - Avec intervention d'eau

- Des **glissements de terrain** : *glissements de matériel sédimentaire plastique qui tend à rester cohésif lors du processus.* Ce processus nécessite :
 - un **matériau plastique** (argile, gypse...),
 - une **pente**,
 - et une **imprégnation en eau** plus ou moins forte.
- Des **slumps** (de l'angl. *to slump*, écrouler) : *glissements latéraux de sédiments non consolidés gorgés d'eau sous l'effet de la gravité, l'ensemble restant cohérent mais étant fortement remanié.*
- Des **coulées de débris** : *glissements latéraux de sédiments non consolidés gorgés d'eau sous l'effet de la gravité, l'ensemble ne restant pas cohérent.*
- Des **courants de turbidité** : *glissements latéraux de sédiments transportés sous le double effet de l'eau et la gravité, et remise en suspension le temps du déplacement.*

b. Un déplacement possible par la glace en environnement glaciaire : cas des moraines



▲ FIGURE 4. **Localisation des moraines dans un glacier de type alpin.**
D'après DENCEUD *et al.* (2013).

- Les **moraines** sont des **débris rocheux de taille variable, non classés par granulométrie, érodés et transportés par un glacier**.
- On distingue notamment, en fonction de la **localisation** au sein du glacier (figure 4) :
 - Des **moraines de fond**,
 - Des **moraines internes**,
 - Des **moraines latérales**,
 - Des **moraines frontales**.

- La **glace** est un **agent de déplacement lent** ; la **vitesse d'avancement d'un glacier varie** selon la **pente**, la **rétection** exercée par la **roche sous-jacente**...
- Dans les **Alpes**, la **vitesse d'un glacier** est typiquement comprise entre **100 et 500 m • an⁻¹**.

c. Un déplacement possible par le vent

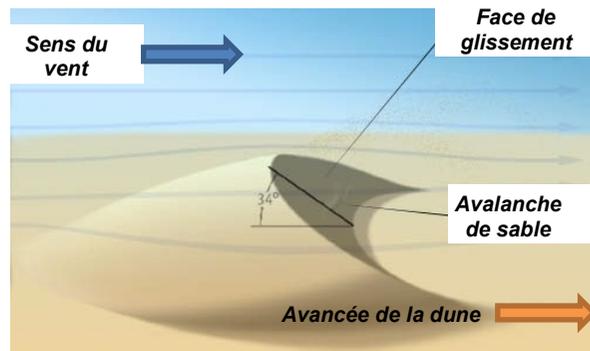
α. Le vent, un agent abrasif (déflation + corrasion)

- On appelle **vent** le **mouvement local d'une masse atmosphérique en réponse généralement à des différences de température entre masses d'air**.
- Ce vent a **deux actions** :
 - La **déflation éolienne** : **action abrasive et dispersive du vent lorsqu'il comporte une importante énergie cinétique (souvent associée à une vitesse élevée)**.
 - La **corrasion** : **action abrasive due à l'impact des particules transportées par le vent sur les roches ou d'autres particules**.

β. Le vent, agent de transport producteur de structures sédimentaires

- Le **transport éolien de particules** peut générer des **structures sédimentaires**.

i. Les dunes, édifices sableux continentaux généralement mobiles



▲ FIGURE 5. **Barkhane.**

<http://www.geowiki.fr/index.php?title=Barkhane> (consultation mars 2019)

- Les **dunes** (figure 5) sont des **édifices sableux continentaux hauts de quelques mètres à plus de 100 m** que l'on trouve dans les **déserts sableux** ou les **littoraux**. Les **grains de sable** sont généralement des **billes de quartz**. Elles se déplacent sous l'action du vent.

Il existe des **dunes de sable calcaire coquilliers** (ex. Bahamas) ou encore de **gypse** (*White Sand Monument* au Nouveau-Mexique)... c'est toutefois **anecdotique**.

- Il existe une **certaine diversité de dunes**.
- La plus commune est la **barkhane** (figure 5), une **dune convexe formée sous un vent unidirectionnel en réponse à la présence centrale ou sous-jacente d'un obstacle (végétation, rocher...)**.
(!) La **convexité** est face au vent

L'action du vent est efficace dans les milieux arides ; au contraire, la présence d'un couvert végétal atténue notablement son action abrasive comme sédimentaire.

- Notez que **certaines dunes** peuvent être **stabilisées** par la **végétation** et posséder ainsi un **déplacement amoindri** ; c'est notamment le cas des **dunes littorales** sous nos **latitudes tempérées**.

ii. Les poussières éoliennes (poussières océaniques, poussières volcaniques, lœss)

- Il existe plusieurs **types de poussières éoliennes**, toutes caractérisées par des **grains marqués par les chocs de corrasion** :
 - Les **poussières océaniques**, **particules transportées par le vent vers l'océan**.
Notons que le **Sahara** particulièrement exporte annuellement à l'Ouest environ **260 millions de particules** (dont 60 millions reviennent dans le désert et **200 millions** tombent au **fond de l'océan**).
 - Les **poussières volcaniques**, **finas particules transportées par le vent issues d'explosions volcaniques**.
 - Les **lœss** (parfois appelé « **limon des plateaux** » sur nos vieilles cartes géologiques), **dépôts éoliens périglaciaires notamment formés lors des glaciations quaternaires** (voir **BCPST2**).

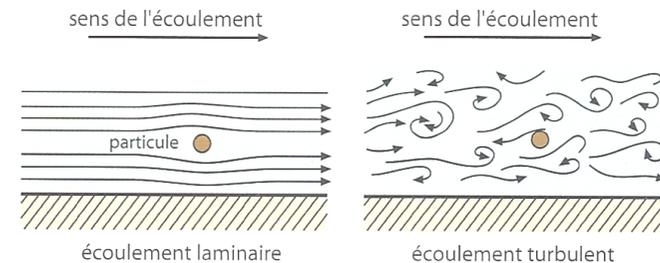
d. Un déplacement fréquemment assuré par l'eau

- L'agent majoritaire de **déplacement des particules sédimentaires** est, évidemment, **l'eau** avec ses **courants**.

α. Les modalités physique de transport d'une particule et la diversité des écoulements (laminaires ou turbulents)

i. Une particule emportée dans des courants laminaires ou turbulents

- Un **processus hydraulique** présente généralement, au moins à un moment donné, une **direction préférentielle d'écoulement**.
- Dès lors, l'**écoulement** peut être (figure 6) :
 - **Laminaire** : **vitesse du fluide équivalente en tout point**.
 - **Turbulent** : **vitesse du fluide variable dans l'espace d'où des déplacements de liquide souvent erratiques, malgré une fréquente direction préférentielle**.
- Des **variations temporelles** entre ces états, de même que des **situations intermédiaires**, existent.



▲ FIGURE 6. **Écoulement laminaire vs. turbulent.**

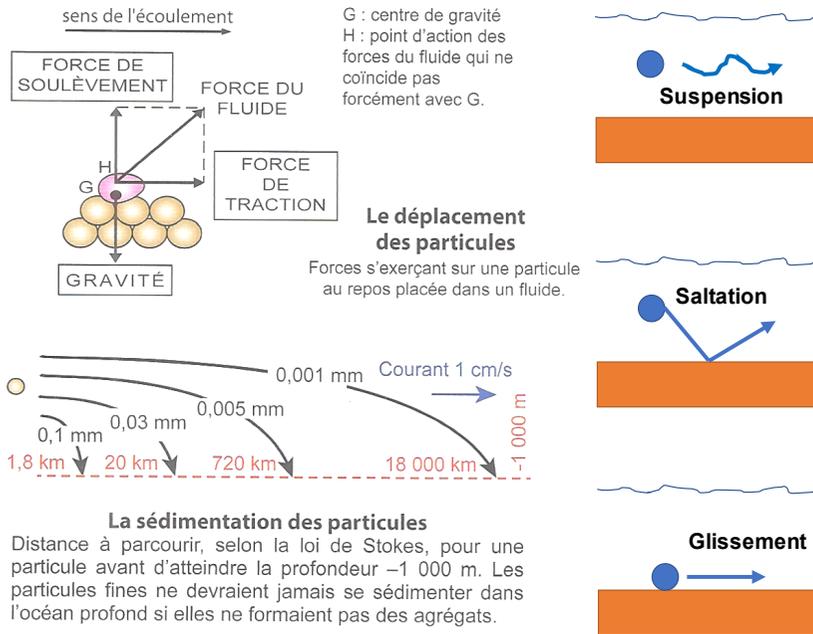
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

- Enfin, il existe des **écoulements bidirectionnels** (cas des **marées**) ou encore **oscillatoires** (cas de la **houle**).

ii. Une particule qui subit une force communiquée par l'énergie cinétique du fluide

- Une **particule** subit une **force du fluide** (figure 7), décomposable en :
 - Une **force de soulèvement** – qui doit être **supérieure à la gravité** pour déclencher un **soulèvement** de la particule.

- Une **force de traction**, responsable du **déplacement horizontal** de la **particule**.
- Le **déplacement de la particule** augmente :
 - Quand la **valeur** de ces **forces augmente**.
 - Quand la **taille de la particule diminue**.



▲ FIGURE 7. **Déplacement et sédimentation des particules : aspects physiques et modalités de transport.** D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013) et original.

La **loi de STOKES** est une **loi évaluant la force de frottement d'un fluide sur une sphère en déplacement dans le fluide**.

Elle permet de prédire la **vitesse limite de chute d'une sphère** soumise à la **pesanteur** dans un **fluide** :

$$v = \frac{2 r^2 g \Delta(\rho)}{9 \mu}$$

v , vitesse limite de chute (en $m \cdot s^{-1}$) ;
 r , rayon de la sphère (en m) ;
 g , accélération de la pesanteur (en $m \cdot s^{-2}$) ;
 $\Delta(\rho) = \rho_p - \rho_f$, différence de masse volumique entre la sphère et le fluide (en $kg \cdot m^3$) ;
 μ , viscosité dynamique du fluide (en $Pa \cdot s$).

iii. Une particule qui se déplace en suspension, par saltation ou par glissement

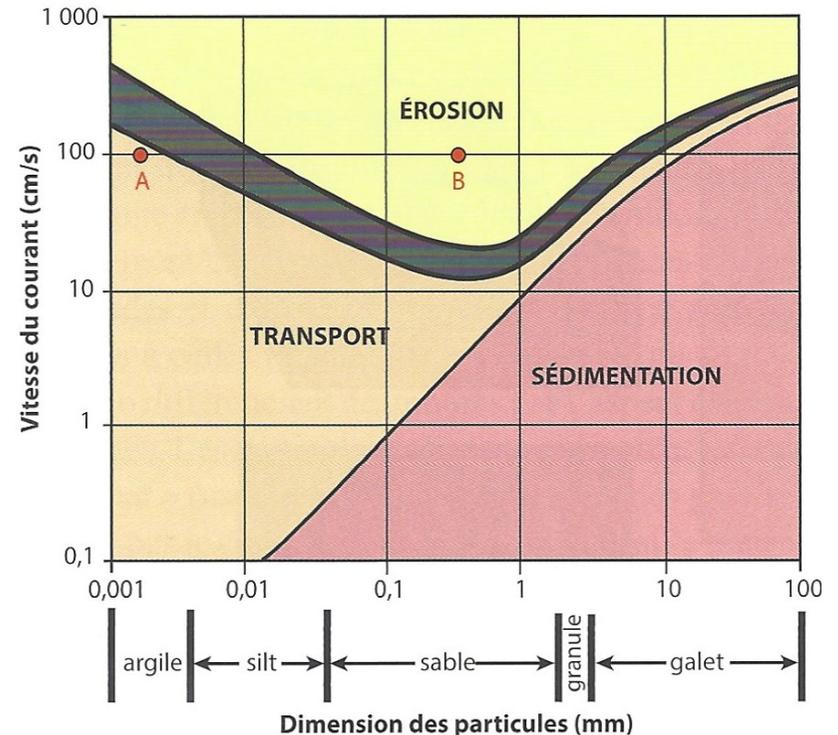
- Une **particule** peut se **déplacer** par :
 - **Suspension** (*avancée dans la masse du liquide*)
 - **Saltation** (*avancée par sauts sur le substrat*)
 - **Glissement** sur le **substrat**.
- En fonction des **variations des conditions hydrodynamiques**, le **mode de transport** d'une particule peut **varier**.

β. **Relation entre vitesse d'écoulement, taille des particules et triptyque transport-dépôt-érosion : le diagramme de HJULSTRÖM (1935)**

- La **force exercée par un fluide** sur une **sphère** est directement liée à la **vitesse** à laquelle il circule (cf. loi de STOKES).
- En 1935, le Suédois Filip HJULSTRÖM (1902-1982) produit, dans sa thèse, un **diagramme expérimental** où il représente le **comportement d'un sédiment détritique** en fonction de la **vitesse du courant hydraulique** (figure 8).

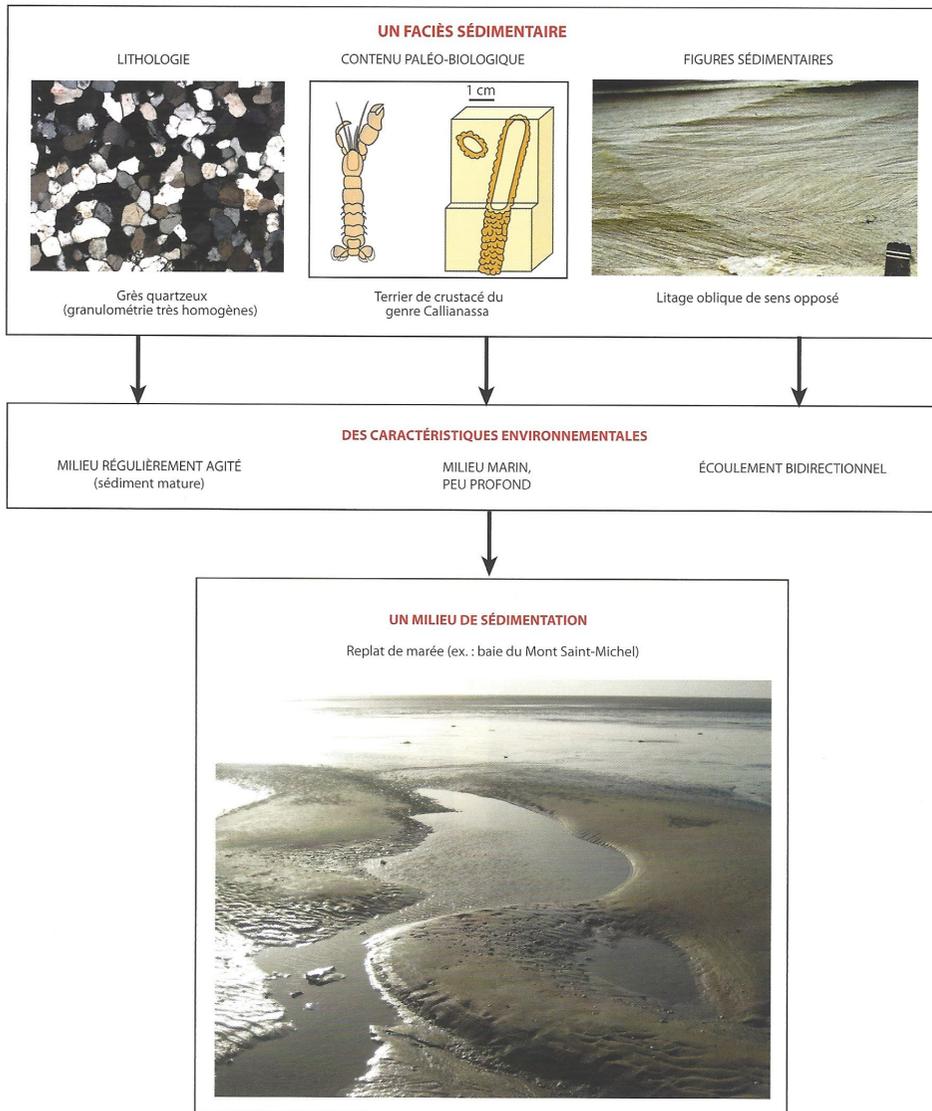
Notons que ce **diagramme très simple** est **intéressant au premier ordre**, mais attention :

- Il n'est **pas forcément valable** pour **toutes les particules détritiques** (dont la masse, en lien avec la **composition**, peut varier) ;
- Il **n'inclut pas la forme des grains** (qui agit évidemment sur la **préhension du fluide...**).
 Ainsi, par exemple, les **argiles** forment des **feuillets**, puis des **agrégats...**
 Cela explique qu'elles **s'érodent moins facilement que les sables** (ce qui peut surprendre, de prime abord)
- Il ne tient pas compte de la **pression exercée par la colonne d'eau** ;
- Il ne prend pas en compte les **phénomènes d'accélération / décélération** de l'écoulement, en supposant une vitesse constante du fluide.



▲ FIGURE 8. **Diagramme de HJULSTRÖM (1935).** D'après JAUJARD (2015).
 [La partie grisée correspond à un comportement variable entre transport et érosion]

γ. Un impact des modalités de transport et de dépôt sur les figures sédimentaires formées : notion de faciès sédimentaire



La reconstitution d'un paléoenvironnement : de la description à l'interprétation.

L'exemple pris est la formation des sables (et grès) de Fontainebleau du Bassin parisien (Stampien).

▲ **FIGURE 9. Du faciès au paléoenvironnement.**
D'après JAUJARD (2015).

i. Le faciès sédimentaire : un ensemble de caractéristiques constitutives et géométriques des dépôts sédimentaires renseignant sur leurs modalités de mise en place

- On peut appeler **faciès sédimentaire** l'ensemble des caractéristiques lithologiques (composition des particules sédimentaires, nature d'un éventuel ciment...), géométriques (figures de sédimentation ou d'érosion) voire paléontologiques (présence de fossiles et leur nature) qui caractérisent les conditions de sédimentation d'un dépôt donné et permettent de reconstituer un environnement de dépôt, y compris un paléoenvironnement.

Voir plus loin (partie II) pour les principaux caractères de faciès rencontrés dans les dépôts détritiques ou carbonatés.

ii. Un outil de reconstitution des paléoenvironnements (en appliquant le principe d'actualisme)

Un **paléoenvironnement** est un **environnement passé de dépôt d'un sédiment ou de formation d'une roche sédimentaire.**

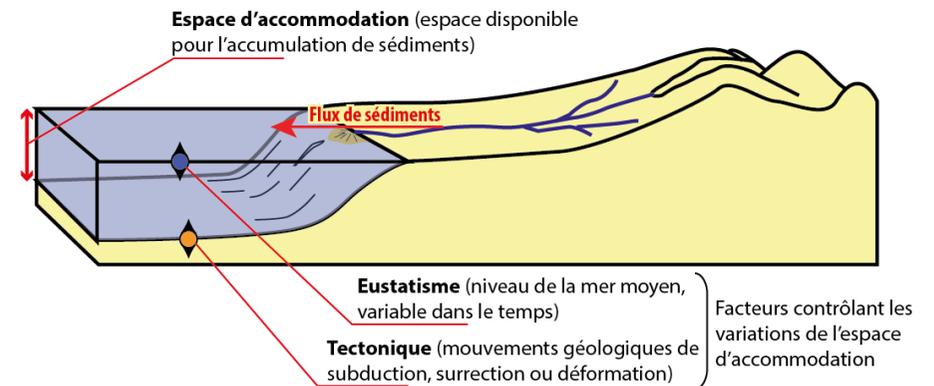
- La reconstitution des paléoenvironnement s'appuie sur le **principe d'actualisme (= uniformitarisme)** qui stipule que « **le présent est la clef du passé** », c'est-à-dire que **les processus géologiques à l'œuvre aujourd'hui se produisaient aussi jadis en générant les mêmes conséquences.**

B. Des dépôts qui s'effectuent dans des zones en déclivité : les bassins sédimentaires

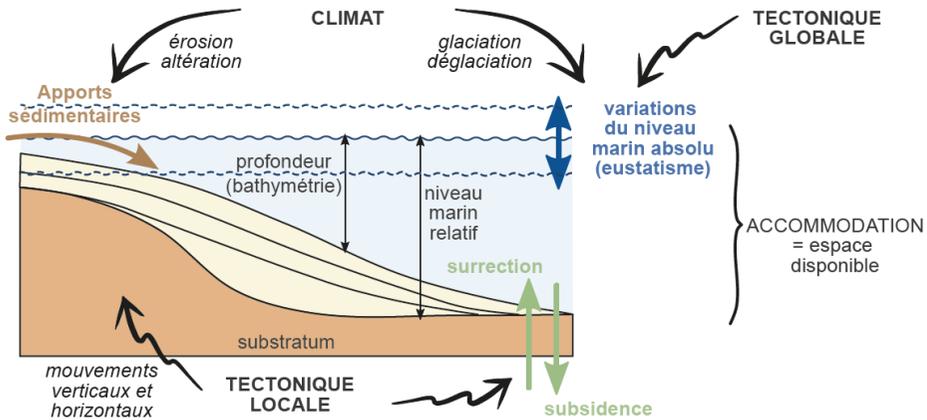
- Un **bassin sédimentaire** est une **zone de taille variable en déclivité par rapport aux reliefs alentour qui accueille des sédiments qui s'y déposent.**

1. Les facteurs contrôlant l'espace disponible (= accommodation) au sein des bassins

- Vocabulaire emprunté à la stratigraphie séquentielle, on peut **espace disponible** ou **accommodation** (un anglicisme) l'**espace disponible à la sédimentation dans une zone donnée** (figures 10-11).



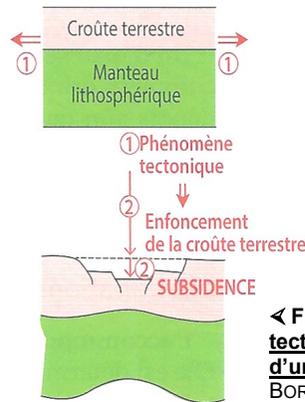
▲ **FIGURE 10. L'espace disponible en milieu marin : une vision simple.**
D'après E. ROQUETTE sur Wikipédia (consultation juin 2022).



▲ FIGURE 11. **L'espace disponible en milieu marin : une autre vision.**
D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2022).

a. Le contrôle tectonique et géodynamique : la subsidence tectonique (et/ou thermique)

► La subsidence : un enfoncement de la croûte terrestre
ex : Rifting



◀ FIGURE 12. **Subsidence tectonique et formation d'un bassin.** D'après BORDI *et al.* (2018).

- En géologie, on parle de **subsidence** pour désigner *l'abaissement ou l'affaissement d'un terrain ou d'une région géologique*.
- Les **bassins sédimentaires** sont des zones généralement en **subsidence**, c'est-à-dire qu'elles subissent un **affaissement lent et plus ou moins régulier**.
- **Cette subsidence est généralement due à des mouvements tectoniques** qui, au minimum, initient souvent la mise en place du bassin : c'est alors une **subsidence tectonique** (figure 12).

Dans le cas du rifting, la **subsidence tectonique** étant le **premier mouvement initiant la genèse du bassin**, on peut l'appeler **subsidence initiale**.

- Il existe aussi, dans certains contextes géodynamiques, une **subsidence thermique** *lorsque le refroidissement de la lithosphère engendre son affaissement* (cas dans le cadre du rifting, ou quand on s'éloigne d'une dorsale...).

b. Le contrôle sédimentaire : une subsidence qui peut s'accroître sous le poids des sédiments

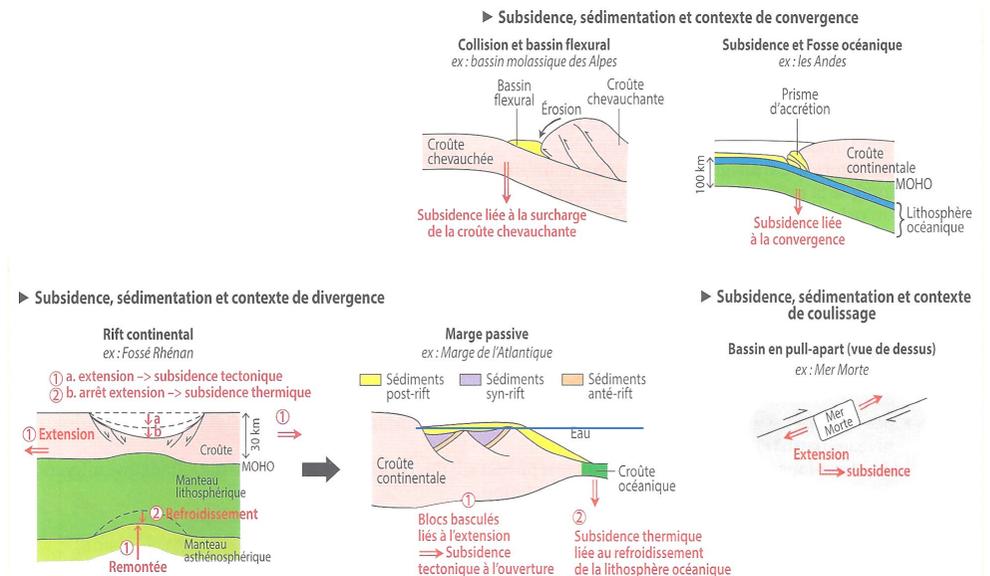
- **Lorsque des sédiments s'accumulent dans un bassin, leur poids peut augmenter l'affaissement du bassin** : c'est alors une **subsidence de charge sédimentaire** qui se **superpose** généralement au **phénomène tectonique** et/ou thermique.
- Ces **processus sédimentaires** sont eux-mêmes influencés par le relief et les conditions climatiques.

c. Le contrôle eustatique : des dépôts affectés par les variations absolues du niveau marin (eustatisme)

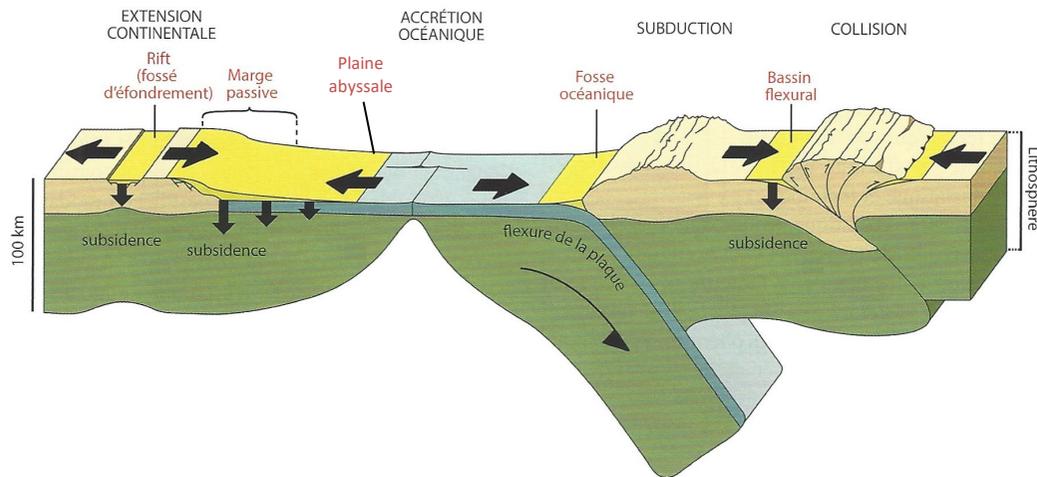
- Au cours des temps géologiques, **le niveau moyen des mers (ligne des eaux moyenne contre les continents) subit des variations** : c'est l'**eustatisme**.
- Les **conditions de sédimentation** en milieu marin / océanique ou littoral ainsi que la **nature des dépôts accumulés** étant très liées à la profondeur, ces variations du niveau marin modifient les **conditions de dépôt**.

La **stratigraphie séquentielle** est explicitement hors programme.

2. Les bassins sédimentaires, des formations très liées au contexte géodynamique

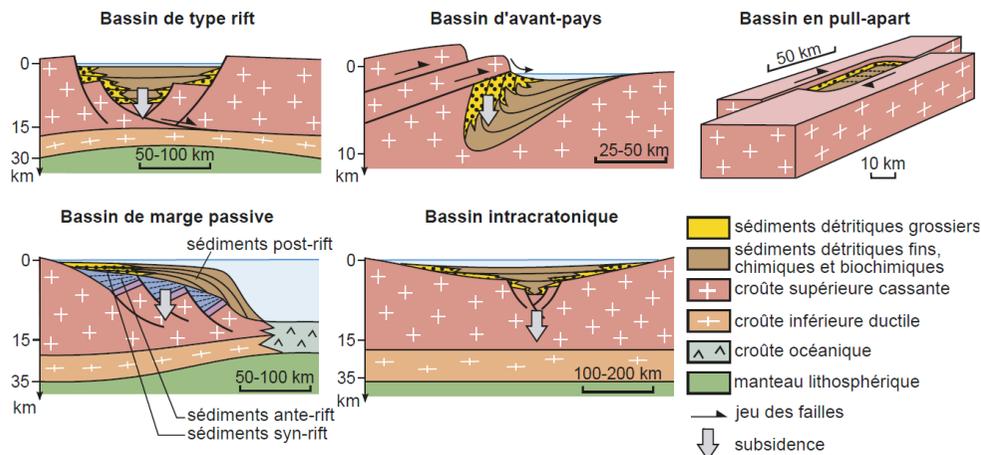


▲ FIGURE 13. **Diversité des bassins sédimentaires en lien avec les mouvements lithosphériques principaux.** D'après BORDI *et al.* (2018).



▲ FIGURE 14. Diversité des bassins sédimentaires en lien avec les mouvements lithosphériques principaux : une vision simplifiée. D'après JAUJARD (2015), légèrement modifié.

Jaune : sédiments // Beige : croûte continentale // Bleu : croûte océanique // Vert : manteau lithosphérique



▲ FIGURE 15. Diversité des bassins sédimentaires en lien avec les mouvements lithosphériques principaux : une autre. D'après PERRIER, BEAUX et al. (2015).

a. Préalable : la diversité des contextes géodynamiques

- Les principaux contextes géodynamiques sont les suivants (figures 13-15) :
 - Le **contexte de convergence**, où deux plaques lithosphériques se rapprochent, ce qui peut provoquer :
 - Une **subduction** : passage d'une plaque sous une autre.
 - Une **collision** : affrontement des deux plaques.

- Le **contexte de divergence**, zone où deux plaques divergent l'une de l'autre, ce qui intervient au niveau des dorsales et des rifts continentaux.
- Le **contexte de coulissage**, zone où deux plaques coulissent l'une par rapport à l'autre.
- Et puis surtout, il existe de nombreuses zones stables où la sédimentation peut s'effectuer également.

b. Les bassins associés aux zones de convergence

α. Des bassins flexuraux (= molassiques = d'avant-pays) dans les chaînes de montagne

- On appelle **bassin flexural (= molassique)** ou **bassin d'avant-pays** un bassin formé au sein d'une chaîne de montagne par flexure de la lithosphère et où s'accumulent des sédiments issus de l'érosion du relief de la montagne (nommés **molasses**).
Ex. Avant-pays alpin

β. Des prismes d'accrétion au niveau des zones de subduction

- Sous l'effet de la subduction, les sédiments posés sur la lithosphère océanique en subduction peuvent subir une accumulation contre la plaque sus-jacente et se comprimer les uns sur les autres sous forme de prisme : cela forme un **prisme d'accrétion**.

Les prismes ne sont pas toujours présents dans les zones de subduction.

c. Les bassins associés aux zones de divergence

α. Des rifts continentaux

- On appelle **rift** une zone d'amincissement de l'écorce terrestre caractérisée par un fossé d'effondrement où deux plaques divergent. C'est un lieu propice pour une accumulation de sédiments.
Ex. Fossé rhénan (rift avorté)

β. Les plaines abyssales

- Les **plaines abyssales** sont les plaines profondes (4000-6000 m sous le niveau de la mer) présentes de part et d'autre des dorsales océaniques.
Ex. Plaine atlantique

γ. Les marges passives

- Les **marges passives** sont les zones stables de transition entre croûte océanique et croûte continentale (héritées du rifting originel) situés aux bordures sans subduction des océans.
Ex. Marge atlantique

Voir point 3.b. sur la zonation bathymétrique des marges passives

(!) Rigoureusement, les marges continentales passives ne sont pas vraiment des zones en divergence en activité mais plutôt les bordures océans en divergence, dont la structure est elle-même héritée du rifting continental à l'origine de l'océan.

d. Les bassins en pull-apart, liés aux failles décrochantes (= coulissantes)

- Plus rares, les **bassins en pull-apart** (en angl. traction-écartement) sont des bassins sédimentaires qui se forment au niveau de failles décrochantes (= coulissantes).
Ex. Mer morte

e. Les bassins intracontinentaux associés aux zones stables

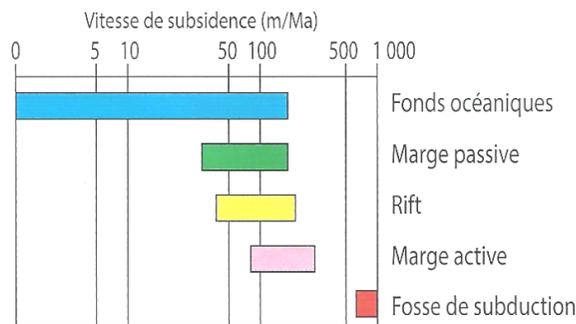
(« atectoniques ») : les bassins intracratoniques

- Les **plaines** situées dans de **grandes zones continentales géodynamiquement stables de basse altitude** qui peuvent subir un **dépôt modéré de sédiments fluviaux, éoliens, glaciaires**...
- La **subsidence**, généralement **faible**, peut être due à :
 - Une **flexure de grande longueur d'onde** de la **lithosphère** en lien avec les **zones géodynamiquement actives** ;
 - La **charge sédimentaire**.Ex. Plaine canadienne ; Bassin parisien (même si l'essentiel des dépôts a été réalisé à d'autres époques, en milieu plutôt maritime !)

Les **déplacements sédimentaires** sont particulièrement **importants** dans les **milieux arides à faible végétation (déserts)** (ex. Sahara, Gobi) et les **milieux glaciaires et périglaciaires (situés à proximité de zones englacées où des vents intenses et le froid hivernal ont une action abrasive et dispersive)** (ex. Scandinavie).

f. Remarque : variation du taux de subsidence en fonction du contexte géodynamique

- La **subsidence** n'est **pas du tout équivalente** en fonction des **contextes géodynamiques (figure 12)** ; l'**espace créé** au cours du temps varie donc en fonction du contexte, ce qui **affecte** nécessairement les **possibilités de dépôts**.



▲ FIGURE 12. **Subsidence et contextes géodynamiques : des vitesses variables.**
D'après BORDI *et al.* (2018).

3. Des environnements de dépôt continentaux et océaniques

- Les **dépôts sédimentaires** peuvent s'effectuer en **milieu continental** ou en **milieu océanique** dans les **bassins** que nous avons présentés précédemment.

a. Les lieux de dépôts continentaux

- Les **dépôts continentaux** se font essentiellement sous l'**action de l'eau** (rivières et fleuves, lacs) mais peuvent aussi impliquer la **glace** (glaciers) ou encore les **vents** (environnements périglaciaires et désertiques).

α. La sédimentation fluviale (rivières et fleuves) : le dépôt d'alluvions

- Les **sédiments transportés et/ou déposés par les fleuves et rivières** s'appellent des **alluvions** (presque toujours au pluriel – c'est **féminin** !).

i. Notions de fleuve et de rivière

- On appelle **fleuve (exoréique)** un **cours d'eau douce qui débouche dans la mer ou l'océan** ; la **zone où le fleuve entre en contact avec le domaine maritime** s'appelle une **embouchure**.

Une exception : l'endoréisme

On appelle **fleuve endoréique** un **cours d'eau qui se jette dans un bassin continental clos**.

Il se forme alors :

- un **bassin endoréique d'eau douce** (exemple : delta de l'Okavango en Afrique)
- **ou un bassin endoréique d'eau salée** (exemples : étangs salés ; Mer Caspienne, plus grand bassin endoréique, principalement alimenté par la Volga).

- On appelle **rivière** un **cours d'eau qui débouche dans un autre cours d'eau douce (fleuve ou autre rivière)**. On dit que **le cours d'eau qui se jette dans un autre** est un **affluent** du second. La **zone de contact entre les deux cours d'eau** s'appelle un **confluent**.

On peut parler de **ruisseau** pour une « **petite** » **rivière**, bien que ce terme ne soit absolument pas codifié.

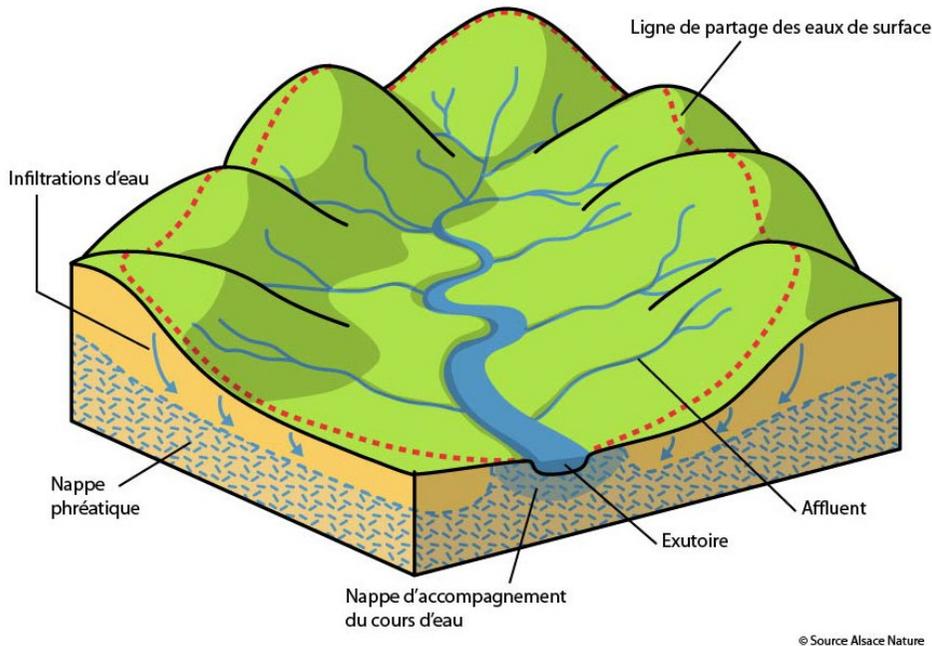
- Le **lieu où débute un cours d'eau** s'appelle la **source**. Il arrive que celle-ci soit un **glacier**, un **lac**, une **résurgence (lieu de sortie d'eaux souterraines)** ...

ii. Notions de bassin versant (et de sous-bassin versant) et de nappe phréatique

- On appelle **bassin versant (figure 13)** l'**ensemble des aires continentales où l'eau collectée (issue des précipitations) aboutit dans un fleuve donné**.

On peut parler de **sous-bassin versant** pour désigner le **bassin collecteur d'une rivière**.

- **Toutes les eaux ne ruissellent pas** sur le plancher du bassin ; **beaucoup** percolent et **s'infiltrent dans le sol**. Les **eaux souterraines** forment une **nappe phréatique** qui **alimente** de manière importante les **cours d'eau**.

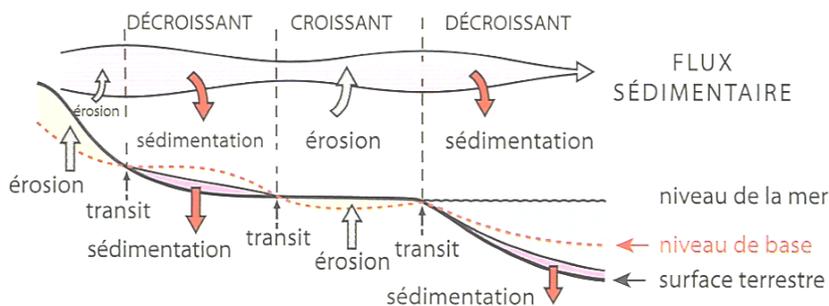


▲ FIGURE 13. Un bassin versant : une vision simple.

<http://www.syribt.fr/notre-territoire/definition/> (consultation mars 2019)

iii. Une tendance à la sédimentation dans les déclivités du lit du cours d'eau et une tendance à l'érosion au niveau des proéminences : notion de profil d'équilibre (= niveau de base)

- Le **niveau de base** ou **profil d'équilibre** (figure 14) est une **surface en dessous de laquelle il y a sédimentation et au-dessus de laquelle il y a érosion**.
- Dans les faits, ce niveau est difficile à placer mais permet de comprendre que :
 - Les **zones en déclivité** dans le lit d'un fleuve ou d'une rivière sont plutôt des **lieux de dépôt** ;
 - Les **zones proéminentes** (« reliefs ») sont plutôt sujettes à l'**érosion**.



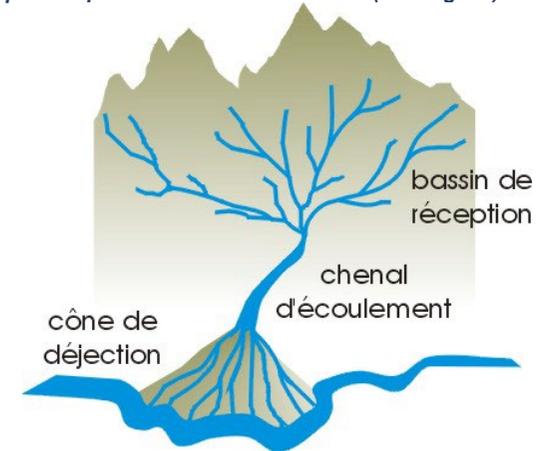
Le concept de niveau de base

Le niveau de base est le niveau en dessous duquel un fleuve ne peut plus creuser. Quand la topographie se situe au-dessus, il y a érosion, quand elle est en dessous, il y a sédimentation. En domaine littoral, on peut l'assimiler au niveau marin.

▲ FIGURE 14. Niveau de base. D'après LAGABRIELLE et al. (2013).

iv. Des dépôts sédimentaires qui varient en fonction des reliefs

➤ Des dépôts de pente dans les hauts reliefs (montagnes) : les cônes alluviaux

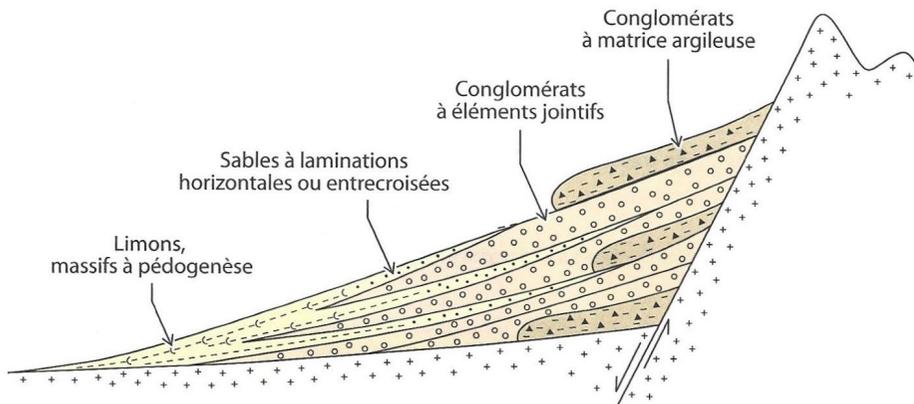


▲ FIGURE 15. Un cône alluvial (= cône de déjection).

D'après BOULVAIN (2018)

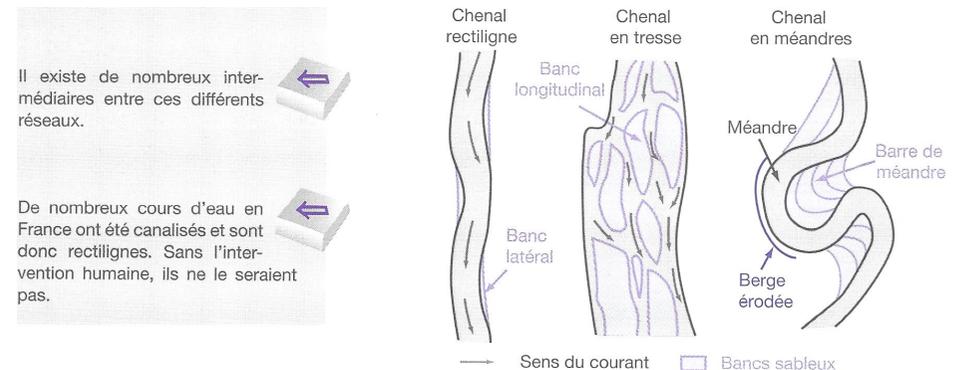
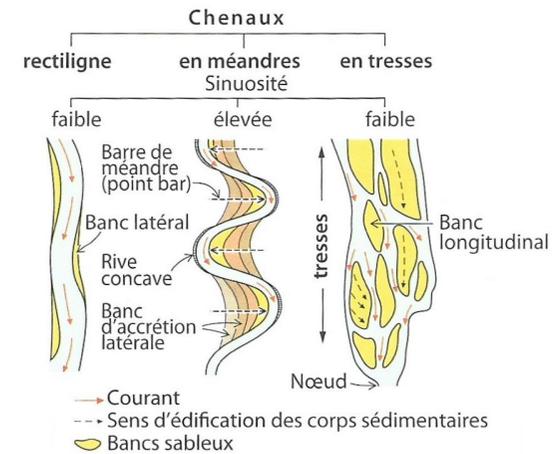
- Un **cône de déjection** ou **cône alluvial** (figure 15) est un **amas, en forme d'éventail, de sédiments, transportés par l'eau (ou la glace), déposés dans une vallée suite à une rupture de pente** (typiquement là où se déverse un **torrent**, souvent en montagne).
- Il y a ici un double effet du **courant d'eau** et de la **gravité**.
- On observe un **granoclassement** relatif (figure 16) : les **matériaux à forte granulométrie** sont **proximaux** par rapport au lieu de coulée et les **matériaux à plus faible granulométrie s'étalent davantage** dans l'espace vers la **bordure du cône**.

On appelle **granoclassement** un tri naturel des sédiments détritiques, dans le sens croissant ou décroissant de taille des grains (granulométrie), de manière verticale et/ou horizontale.



▲ FIGURE 16. Coupe schématique d'un cône alluvial [pour information].
D'après RENARD et al. (2018).

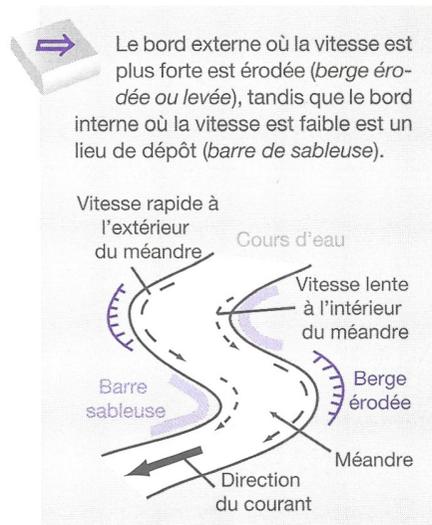
- De nombreux cônes de déjection coalescents peuvent former une marge sédimentaire situé en avant des reliefs montagneux qu'on appelle un **piémont**.
- Une **chenalisation variable (rectiligne, à méandres ou en tresses)** dans les zones planes à faible pente (vallées planes, plaines alluviales)
- On s'intéresse ici aux vallées à faible pente et aux plaines alluviales (surfaces géographiques planes et de très faible altitude au milieu desquelles coule un cours d'eau).
- Il s'y forme des **chenaux** (sing. **chenal**), c'est-à-dire des zones d'écoulement d'eau s'écoulant au sein d'alluvions préalablement déposées.
- On peut distinguer des chenaux plus ou moins sinueux (figure 17) :
 - Les **chenaux rectilignes**, chenaux plutôt rares, étroits et profonds, à faible sinuosité et à faible accumulation sédimentaire.
 - Souvent dûs à l'action humaine qui contient le lit des fleuves
 - Peuvent se former naturellement en cas de fort débit (grands fleuves) ou pour les ruisseaux/rivières encaissés mais... ils évoluent souvent vers une méandrisation.
 - Les **chenaux en tresse**, chenaux larges et peu profonds où des bancs sableux mobiles se forment au centre d'un cours d'eau.
 - Plutôt dans les zones de relief modéré, avec une certaine pente.
 - Peuvent être présents dans les plaines alluviales en cas de fort débit.
 - Les **chenaux à méandres**, chenaux caractérisés par une sinuosité élevée et une sédimentation latérale (plus fine que les chenaux en tresse).
 - Plutôt présents dans les plaines alluviales, pour des cours d'eau à débit modéré.



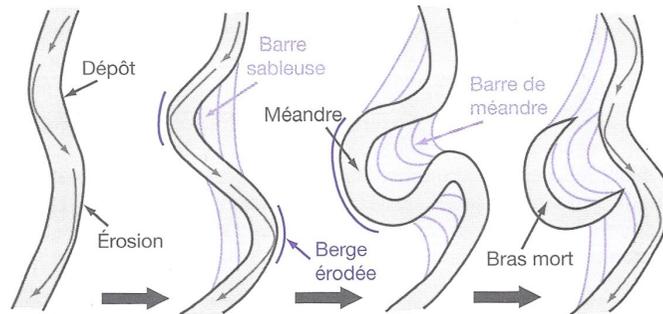
▲ FIGURE 17. Deux représentations possibles des trois grands systèmes de chenaux.
D'après RENARD et al. (2018) et DENOEUDE et al. (2013).

Quelques informations sur les chenaux à méandres

- Dans les méandres, la vitesse du courant est plus élevée dans les parties concaves, qui sont des zones d'érosion, que dans les parties convexes, qui sont des zones de dépôt (figure 18).
- Ce système de dépôt-érosion aboutit à un déplacement et un creusement progressifs des méandres au cours du temps.
- In fine, quand un méandre est de plus en plus marqué, l'érosion peut mener à ce que deux berges érodées se rejoignent et condamnent le méandre qui devient alors un méandre anastomosé ou bras mort (figure 19).



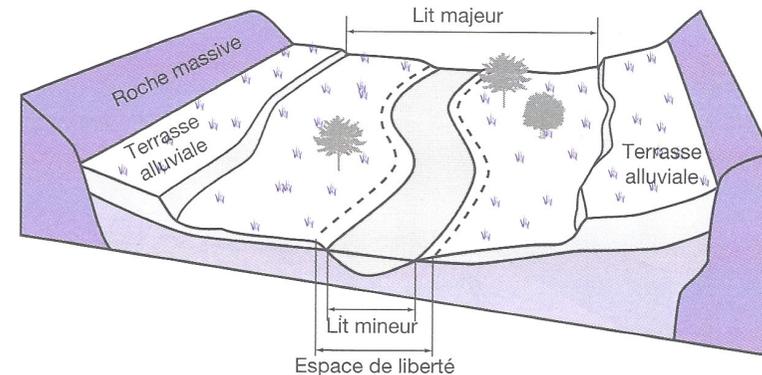
▲ FIGURE 18. **Hydrodynamisme d'un méandre.**
D'après DENOEUDE *et al.* (2013).



▲ FIGURE 19. **Déplacements de méandre et anastomose.**
D'après DENOEUDE *et al.* (2013).

v. Le lit d'un cours d'eau et les terrasses alluviales

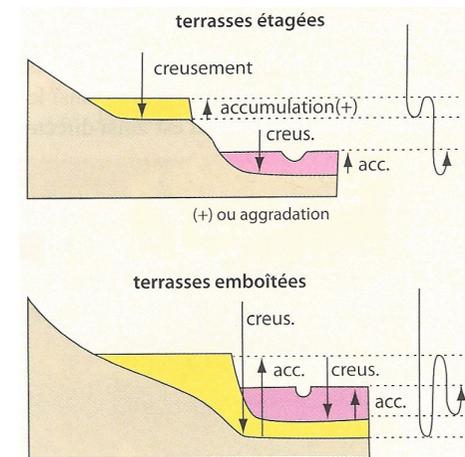
- Pour un cours d'eau, on peut définir (figure 20) :
 - Un **lit mineur** : *chenal ou ensemble de chenaux dans lequel le cours d'eau s'écoule habituellement.*
 - Un **lit majeur** (ou **plaine d'inondation**) : *espace occupé par le cours d'eau lors d'une crue.*
 - Un **espace de liberté (= mobilité)** : *espace du lit majeur dans lequel le lit mineur peut se déplacer.*
 - Des **terrasses alluviales (= fluviatiles)** : *zones planes constituées d'alluvions déposées par un cours d'eau situées sur les versants d'une vallée.*
- (!) C'est le cas des rivières ou fleuves qui s'encaissent dans leurs propres alluvions.



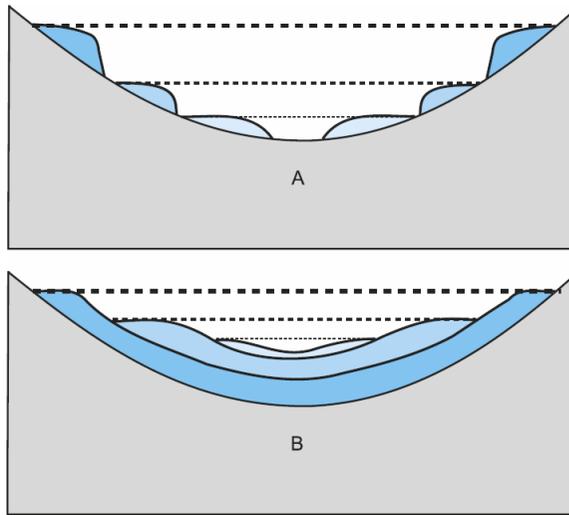
▲ FIGURE 20. **Les différents espaces d'un cours d'eau.**
D'après DENOEUDE *et al.* (2013).

- On peut distinguer deux types de dispositions de terrasses (figures 21-22) :
 - Les **terrasses étagées** lorsque l'érosion est prononcée et qu'apparaissent entre elles des morceaux du substrat non alluvionnaire.
 - Les **terrasses emboîtées**, lorsque les terrasses suivantes sont creusées dans les précédentes.

(!) Les **terrasses** sont un des rares cas liés au **phénomène sédimentaire** où l'on peut observer des **dépôts antérieurs situés au-dessus de dépôts postérieurs** (existence d'exceptions).



▲ FIGURE 21. **Terrasses étagées vs. emboîtées.**
D'après RENARD *et al.* (2018)



Terrasses fluvio-glaciaires.

(a) Terrasses étagées. (b) Terrasses emboîtées. Le substratum est figuré en gris.

▲ FIGURE 22. Les terrasses : une autre vision.
D'après PEYCRU *et al.* (2008).

Terrasses et glaciations : le système fluvio-glaciaire

Les **terrasses** se sont généralement mises en place sous l'effet des **glaciations-déglaciations** qui ont eu lieu au **Quaternaire**.

Voir chapitre 26 sur les variations climatiques

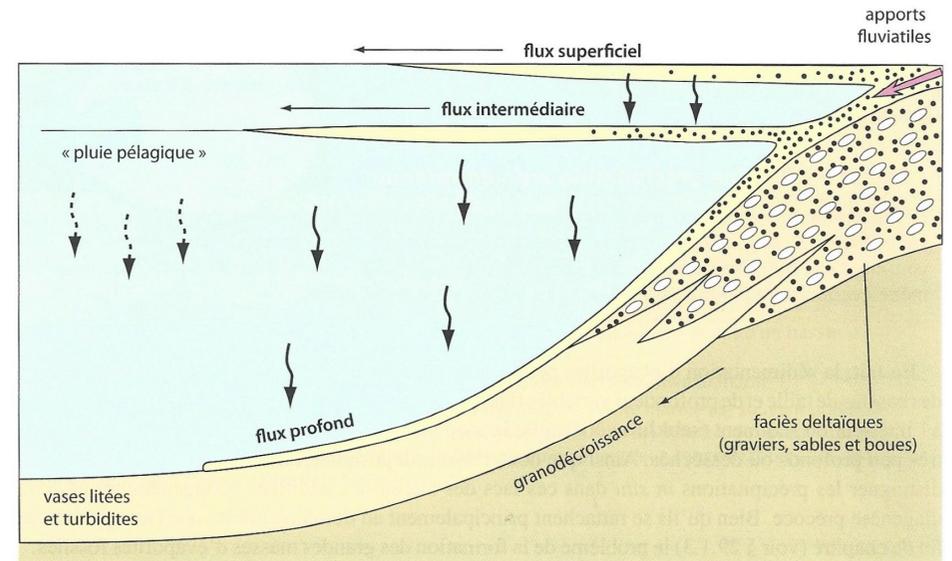
- En **période glaciaire**, les importants **glaciers** alimentent de **grands cours d'eau à fort débit**, à **large lit** et à **dépôts important** (en raison d'une **forte érosion**).
- En **période interglaciaire**, les **petits glaciers** alimentent des **cours d'eau à moindre débit**, à **lit étroit** et à **dépôts moins nombreux** ; les fleuves **creusent** alors les importants **dépôts mis en place** lors des **périodes glaciaires**.

Cette **alternance d'alluvionnement intense et de surcreusement par un cours d'eau due aux alternances des glaciations et déglaciations au cours de temps géologiques** s'appelle le **système fluvio-glaciaire**.

β. La sédimentation lacustre : des dépôts granoclassés et d'éventuelles varves

- Les **étendues d'eau douce continentales (lacs)** sont généralement alimentées par des **cours d'eau** qui y charrient des **sédiments** (figure 23).
- On note un **granoclassement** : plus on est **proche des berges** et notamment de **l'embouchure du cours d'eau**, plus les **sédiments** présentent une **granulométrie élevée**, alors que celle-ci **diminue** avec **l'éloignement des berges**.
- Au fond des lacs s'accumulent des **vases** (**mélanges de limons et d'argiles riches en eau**).

Il arrive que les **alternances de saison** modifient le **flux sédimentaire** de sorte que se forment, dans le **fond des lacs**, des **varves, fines strates annuelles où la granulométrie varie en lien avec la variation du flux sédimentaire (lié à la fonte des glaciers) au cours des saisons**.



Sédimentation détritifique dans un lac de climat tempéré à stratification thermique, en fonction d'apports fluviaux.

Les flux superficiels sont des venues d'eau légère, chaude, apportée en été par les cours d'eau, qui provoquent un dépôt sédimentaire en laminations à grain décroissant vers le large. Les flux intermédiaires concernent des eaux de densités qui se répandent en été au-dessus de la thermocline avec les particules qu'elles transportent ; ces particules se sédimentent lorsque l'inversion des densités à l'automne annule la thermocline. Les flux profonds résultent de courants de turbidité de haute énergie ou de venues d'eaux denses et froides consécutives au dégel, qui apportent sur le fond des eaux oxygénées et riches en particules grossières.

▲ FIGURE 23. Sédimentation détritifique lacustre zonation latérale.
D'après PEYCRU *et al.* (2008).

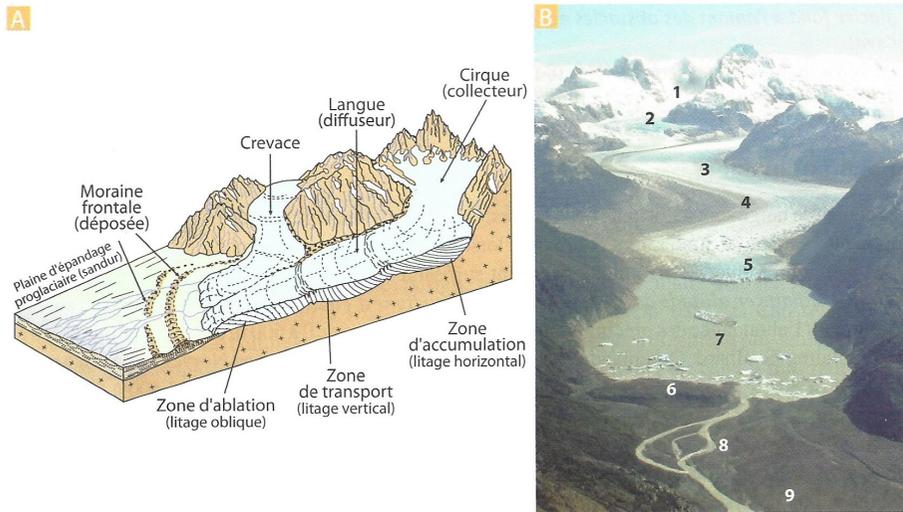
La possibilité d'une sédimentation évaporitique et carbonée

Les **lacs** peuvent aussi être le **siège** :

- D'une **sédimentation évaporitique** en cas de **forte salinité** et de **forte évaporation**.
- D'une **sédimentation carbonée** en cas d'accumulation de **matière organique** et de son **enfouissement** dans des **conditions anoxiques**. L'accumulation de **matière organique** peut d'ailleurs **assombrir les varves**.

γ. La sédimentation glaciaire et périglaciaire

- Trois grands types de glaciers : les glaciers de type alpin, les calottes et les calottes polaires (= inlandis)
- Un **glacier** est un **vaste ensemble de glace, formée par accumulation et tassement de neige, qui perdure au fil des saisons (même si sa taille peut varier au cours de l'année) et qui se situe sur un continent**.
- Ils sont typiques de **climats froids** (où le **froid persiste longtemps au cours de la saison**) que l'on rencontre aux **hautes latitudes** (climats polaire et subpolaire) et aux **hautes altitudes** (climat montagnard).

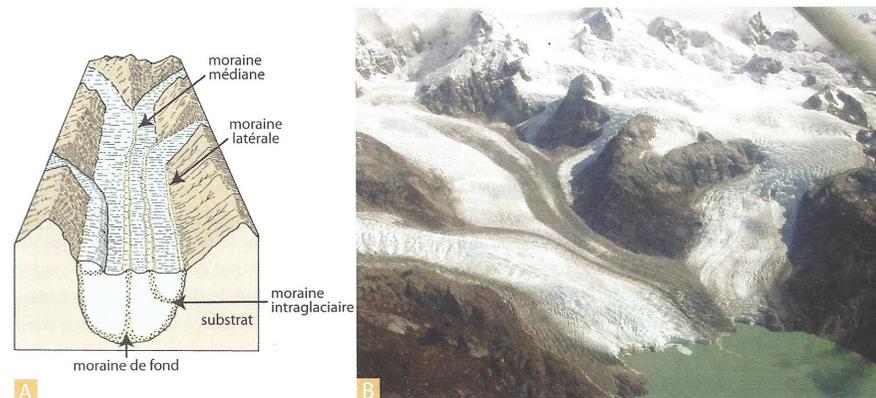


Les glaciers de type alpin.

A. Différentes parties d'un glacier alpin et divers types de moraines et de crevasses.

B. Le glacier Nef (Parc national Laguna San Rafael, Patagonie, Chili).

1. cirque collecteur ; 2. zone de séracs ; 3. langue ou diffuseur ; 4. moraines latérales ; 5. zone d'ablation ; 6. moraine frontale déposée (le glacier a subi une phase importante de retrait entre 1945 et 2000) ; 7. lac proglaciaire de retrait (actuellement 3,5 km de long) et vêtage de la langue glaciaire ; 8. torrent glaciaire (réseau en tresses anastomosées), un des tributaires du Rio Baker, l'une des plus importantes rivières chiliennes (1 000 m³/s) ; 9. plaine d'épandage proglaciaire (sandun).

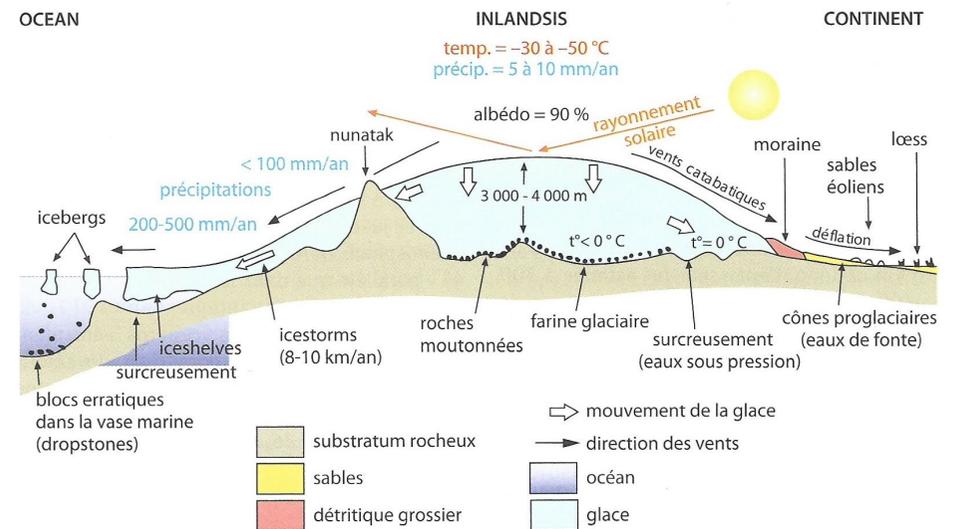


Vallées et moraines glaciaires (glaciers de type alpin).

A. Les divers types de moraines d'un glacier alpin.

B. Le glacier Leones en Patagonie (Chili). La confluence des moraines latérales des glaciers affluents aboutit à la formation des moraines médianes très régulières, mais complexes. Les bandes fines de deuxième ordre proviennent des éperons séparant les cupules des cirques. Elles n'apparaissent nettement que vers l'aval, par suite de l'ablation (photo B. Pouyaud, IRD).

▲ FIGURE 24. Glaciers de type alpin. D'après RENARD *et al.* (2018)



▲ FIGURE 25. Calottes polaires (= inlandsis). D'après RENARD *et al.* (2018)

- On distingue **trois grands types de glaciers** :
 - Les **glaciers de types alpin** (ce qui ne veut pas dire qu'ils sont dans les Alpes... !) (figure 24) : ce sont des **glaciers encaissés dans un relief, le plus souvent situés dans une vallée** et typiques de **régions montagnardes**.
Ex. glaciers de montagne
 - Les **calottes (glaciaires)** : **vastes étendues de glace où tout le relief (ou presque) est localement situé sous la glace mais dont la superficie est inférieure à 50 000 km²**.
Ex. Vatnajökull en Islande.
 - Les **calottes polaires** ou **inlandsis** (mot suédois) (figure 25) : ce sont des **glaciers de très grande superficie recouvrant tout ou partie d'un continent**.
Deux exemples actuels : Groenland (1,7 millions de km²) et Antarctique (14 millions de km²).

Pour les **calottes et calottes glaciaires**, des **pitons rocheux peuvent dépasser du glacier** : ce sont des **nunataks** (mot groenlandais) (figure 25).

Attention ! La **banquise** (**étendue de glace issue du gel de l'eau de mer**) n'est **pas un glacier**. Elle n'est pas située sur un continent.

ii. La production de moraines, de **dropstones** et de roches moutonnées par tous les glaciers

- En **avançant sur les continents**, les **glaciers** (figures 24-25) arrachent des **roches** et les **transportent sur des distances variables**. On peut citer :
 - Les **moraines** : **sédiments détritiques de taille variable (plutôt des cailloux) transportés et déposés par les glaciers**.
 - La **farine de roche** : **sédiments détritiques de type limon transportés et déposés par les glaciers ou les eaux de fonte, formant des petites nappes d'aspect laiteux dans les lacs où débouchent les eaux**.

- Les **dropstones** : **sédiments détritiques de grosse taille (rochers) tombés sur un substrat ou sur des sédiments nettement plus fins, suite à la fonte des glaces.**
- Le **substrat** est du reste **abîmé** et **limé** par le **glacier** ; il peut alors se former des **roches moutonnées, roches polies et plus ou moins striées par le passage d'un glacier.**

iii. La production d'icebergs (qui libèrent des sédiments lors de la fonte) par les calottes qui charrient des roches sur le sol marin en tombant

- La **calotte polaire** dépasse généralement sur les **océans**, ainsi que certaines **calottes glaciaires**. Les **icebergs** sont des **morceaux de calotte (polaire ou non) se détachant de la calotte et dérivant sur les océans**. Leur fonte provoque la chute des **sédiments** qui y sont emprisonnés.

iv. En domaine périglaciaire : des dépôts éoliens fréquents (de type lœss) et les pergélisols polaires

- Les **domaines périglaciaires** sont les **zones continentales situées à proximité d'un glacier.**
- Ils sont caractérisés par des **vents catabatiques (masses d'air froides descendants des reliefs, où se trouvent en l'occurrence les glaciers)** qui produisent à la fois de la **déflation (abrasion par le vent)** et un **refroidissement des roches**. On y forme typiquement des **lœss (limons d'origine éolienne)**.
- En **région polaire ou subpolaire, les sols peuvent geler en permanence, ce qui les rend imperméables à l'infiltration** : ce sont les **pergélisols**.

δ. La sédimentation désertique : la genèse de dunes éoliennes mobiles de sable

- En milieu **chaud ou froid** mais avec de **très faibles précipitations**, c'est le vent qui est l'**agent principal d'altération** ; ceci est accentué par l'**absence ou quasi-absence de végétation**. L'on aboutit à des **paysages de dunes** (ex. barkhanes).
Ex. Désert du Sahara

b. Les embouchures : le domaine fluvio-marin

- Nous l'avons déjà dit, on appelle embouchure la **zone où un fleuve (eau douce) entre en contact avec le domaine maritime (eau salée)** (pour les fleuves **exoréiques**) ou bien, dans le cas d'un **fleuve endoréique**, avec le **bassin terminal du fleuve**.

Les **zones où l'on trouve une coexistence ou un mélange d'eaux douces fluviales et d'eaux salées maritimes** s'appellent le **domaine fluvio-marin**.

(!) Il peut se former des **eaux mélangées (eau douce + eau salée), à salinité plus faible que celle des mers et océans** : ce sont les **eaux saumâtres**.

a. Deux types d'embouchures surtout déterminés par l'importance des marées : les deltas et les estuaires

- On distingue, quoique des intermédiaires existent (**figure 26**) :
 - Les **estuaires** qui sont des **embouchures avec un seul chenal unique**.
→ Ils se forment plutôt lorsque l'**hydrodynamisme** est **dominé** par de **forts courants côtiers** ou les **marées**.
Ex. en France : les fleuves débouchant dans l'Atlantique ou la Manche : la Seine, la Garonne, la Loire...
 - Les **deltas** qui sont des **embouchures à multiples chenaux séparés par des bancs sédimentaires**.
→ Ils se forment plutôt lorsque l'**hydrodynamisme maritime** est **faible** ou si le **flux sédimentaire** est très **important**.

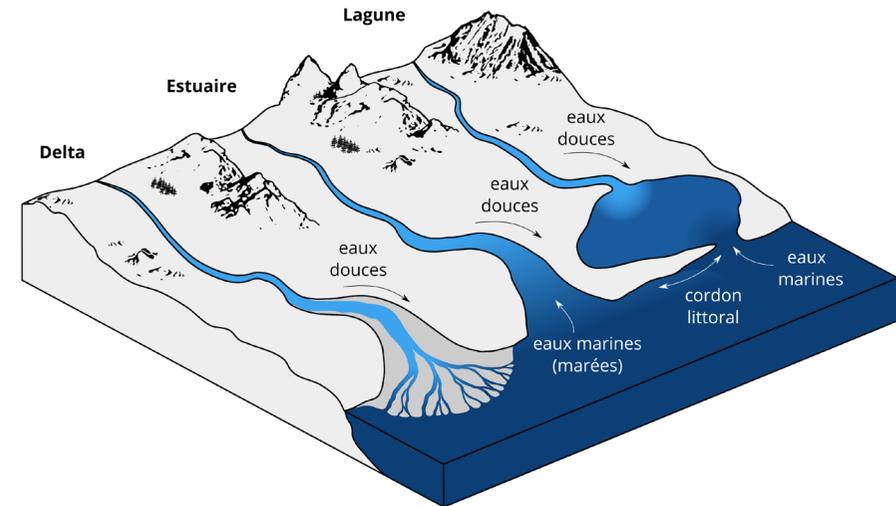
Ex. en France : le Rhône, débouchant sur la Méditerranée (sans marées ni forts courants).

β. Une sédimentation contrôlée par les paramètres hydrodynamiques fluviaux (débit) et maritimes (houle, vagues, marées, courants marins) ainsi que le flux sédimentaire

- La **sédimentation estuaire** ou **deltaïque** est **contrôlée** par des **paramètres** variés :
 - Ceux en lien avec le **fleuve** :
 - Le **débit fluvial (quantité d'eau déversée par unité de temps)**
 - Le **flux sédimentaire (quantité de sédiments déversés par unité de temps)**
 - Ceux en lien avec le **domaine maritime** :
 - La **houle**,
 - Les **vagues**,
 - Les **marées**,
 - Les **courants**.
- Il paraît hors de propos, dans un **cours** comme celui-ci, de préciser dans le détail l'impact de toutes ces **modalités**.

Voir plus loin pour les **définitions**

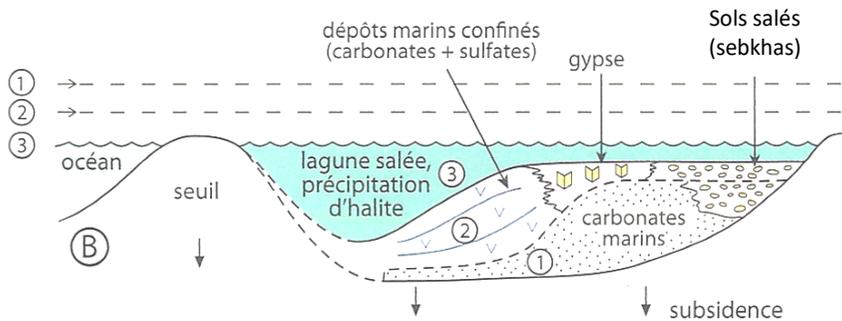
Notons que les **sables** qui se trouvent sur les **plages** sont **issus de l'altération des continents** et du **charriage** par les **fleuves**.



▲ FIGURE 26. **Le domaine fluvio-marin.** © Office international de l'Eau.

c. Les lagunes, espaces littoraux de sédimentation plutôt évaporitique à remplissage maritime faible

- Une **lagune** (**figure 27**) est un **lac d'eau de mer ou saumâtre avec une connexion transitoire (ex. marées hautes) ou permanente avec la mer (bras de mer ; sédiments poreux permettant à l'eau de mer de percoler...)** mais où **l'évaporation dépasse les apports d'eau**.
(!) Un apport d'eau douce y est possible (**figure 26**).



▲ FIGURE 27. Lagune subsissant une baisse du niveau marin et une évaporation, ce qui aboutit à la précipitation d'évaporites. D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013)

d. Les environnements de dépôts océaniques (incl. marges continentales)

- On inclut ici les modalités de sédimentation en bordure océanique.

a. Présentation du cadre géologique et sédimentaire océanique

i. Quelques notions préliminaires : continent, marge continentale, océan, mer

- Un **continent** peut être défini de deux façons :
 - Au sens géographique : il s'agit d'une **vaste étendue émergée à la surface du globe (bordée par la mer ou l'océan)**.
 - Au sens géologique : il s'agit d'une **région émergée reposant sur une croûte continentale**.

Il existe ainsi une **zone de transition océan-continent** où l'eau de mer est présente mais où le socle est néanmoins constitué de croûte continentale : c'est la **marge continentale**.

On parlera de :

- Marge passive**, si la zone est peu active tectoniquement (pas de subduction).
- Marge active**, si la zone comprend une subduction de la croûte océanique sous la croûte continentale.

- Un **océan** peut être défini de deux façons :
 - Au sens géographique : il s'agit d'une **vaste étendue d'eau salée comprise entre deux continents**.

Les géographes parlent aussi de « **l'Océan mondial** » pour désigner le **continuum d'eaux salées situés autour des continents, incluant les mers**.

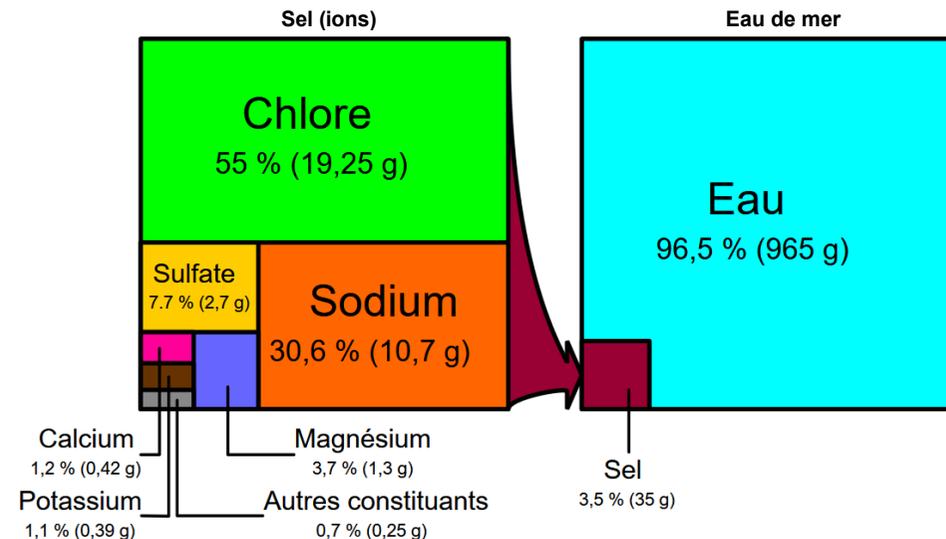
- Au sens géologique : il s'agit d'une **vaste étendue d'eau reposant sur une croûte océanique. Et cette seconde définition exclut les « mers » !**
- On peut alors, au sens du géologue, définir une **mer** comme une **vaste étendue d'eau salée reposant essentiellement sur une croûte continentale**.
Ex. la Manche (plateau continental atlantique) ; la Méditerranée (océan en cours de fermeture, relié à l'océan par un détroit)

Pourquoi l'eau de mer est-elle salée ?

L'eau de mer (figure 28) comprend une **concentration importante d'ions dissous, notamment les ions chlorures et les ions sodium** ; on y trouve en moyenne **35 g d'ions dissous par L** (contre environ **1 g • L⁻¹** dans l'eau douce).

Les raisons sont les suivantes :

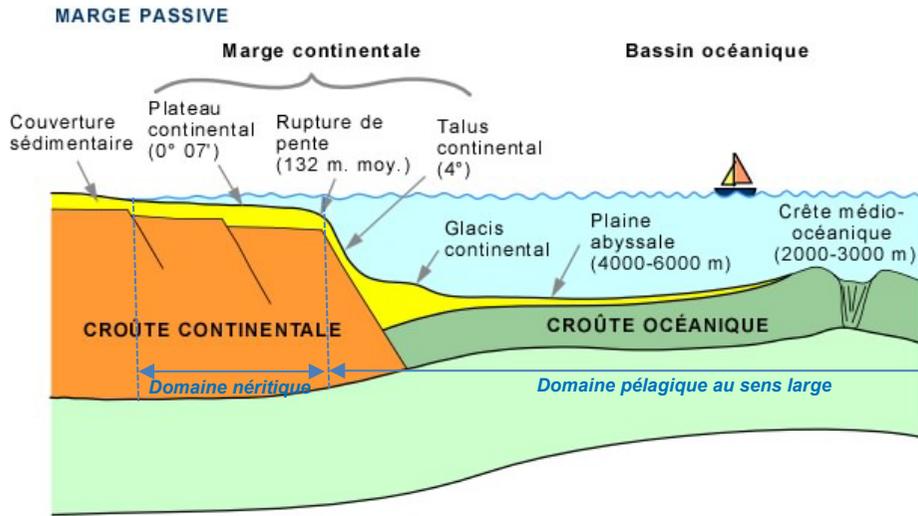
- Les rivières charrient de nombreux ions vers l'océan où, ensuite, l'évaporation les concentre. D'ailleurs, on constate que de nombreuses mers endoréiques ou certains lacs (parfois dits « lacs salés ») présentent une salinité plus élevée que les eaux douces.
- Certains ions sont issus d'échanges entre la croûte océanique et l'eau de mer au cours des temps géologiques, notamment pendant les premiers milliards d'années. Depuis plusieurs milliards d'années, il semble qu'il y ait un **équilibre** entre les processus donneurs d'ions (hydrothermalisme, apports par eaux douces...) et les processus retrancheurs (hydrothermalisme...) ... ou encore entre dilution par les eaux douces et évaporation.



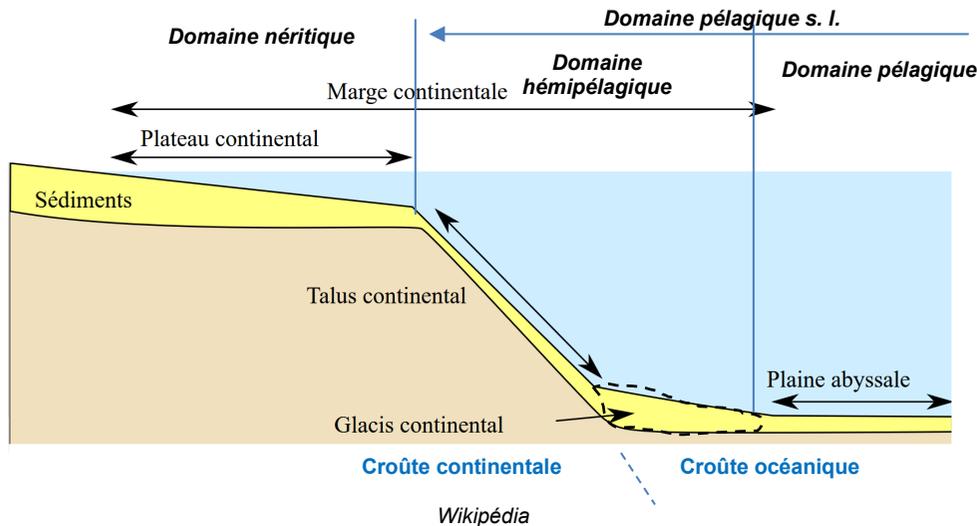
▲ FIGURE 28. Composition d'1 L (1 kg) d'eau de mer. Wikipédia

ii. Zonation bathymétrique océanique globale : cas d'une marge passive

- Le **domaine océanique** (figure 29) peut être zoné de la façon suivante (du plus proche au plus loin de la côte), basé sur la **bathymétrie** (c'est-à-dire la **profondeur du fond des océans**) – ici dans le cas d'une **marge passive** :
 - a/ Trois zones avec pour fondement de la croûte continentale :
 - Plateau continental = plateforme continentale** : zone de faible profondeur (jusqu'à 200 m environ) et de faible pente (< 1°) située entre le trait de côte et le talus continental.
 - Talus continental = Pente continentale** : zone d'augmentation brutale de la pente (qq°) et donc de diminution brutale de la profondeur située en arrière du plateau continental.
 - Glacis continental** : zone de transition entre le talus et la plaine abyssale où se déposent des flux sédimentaires gravitaires en provenance du plateau.
 - b/ Une zone avec pour fondement de la croûte océanique :
 - Plaine abyssale** : zone de très faible pente, presque plane, de fortes profondeurs (> 4000 m).



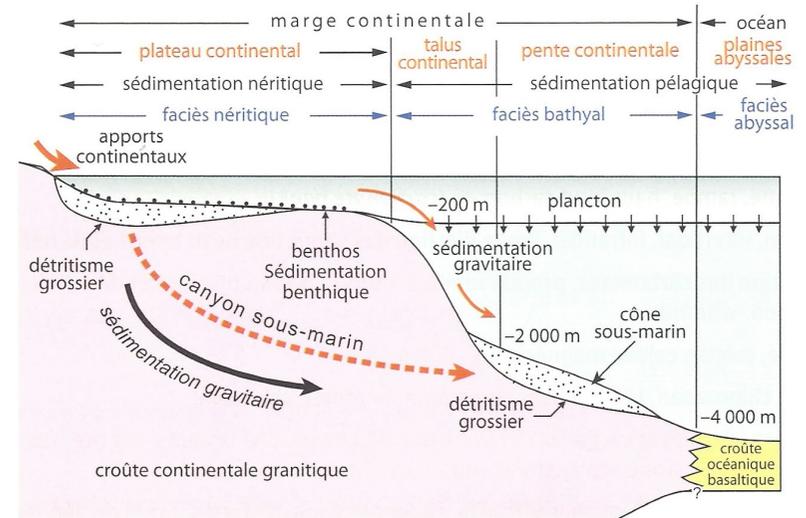
<http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/relief.oceans.html>
P.-A. BOURQUE (Univ. Laval, Canada) (consultation mars 2018), complété.



▲ FIGURE 29. Zonation océanique globale : deux visions.

iii. Zonation sédimentaire océanique : néritique, hémipélagique, pélagique

- Les géologues distinguent **trois domaines de sédimentation** (figures 29-30) :
 - Le **domaine néritique** : **domaine du plateau continental**.
 - Le **domaine hémipélagique** (parfois **pélagique bathyal**) : **domaine du talus et du glacis continental**.
 - Le **domaine pélagique** (parfois **pélagique abyssal**) : **domaine de la plaine abyssale**.



Les grands types d'environnements de la sédimentation marine.

L'échelle des hauteurs est exagérée (la pente du talus est de 4 à 5 degrés) et les profondeurs limites des divers domaines ne sont données qu'à titre d'exemples. On peut superposer à une zonation topographique (plateau continental, talus, pente continentale, plaines abyssales), une zonation de profondeur des faciès (néritique = sédimentation sur la plate-forme, bathyal = sur le talus et la pente, abyssal = sur les plaines) ou une terminologie basée sur le type de sédimentation. Ainsi on opposera la sédimentation pélagique qui se réalise à partir des organismes vivants en pleine eau à la sédimentation benthique qui se réalise à partir des organismes vivants sur le fond. Dans ce cas, les terminologies ne se recoupent pas exactement, la sédimentation benthique se développe principalement sur la plate-forme mais pas uniquement. La sédimentation néritique ne se réduit pas à la sédimentation benthique, elle comporte une composante terrigène qui peut être importante. La sédimentation pélagique est surtout visible dans les domaines profonds mais elle existe aussi sur la plate-forme où elle est masquée par la sédimentation benthique beaucoup plus productive sauf lors d'événements particuliers (cas des craies du Crétacé supérieur par exemple).

▲ FIGURE 30. Environnements sédimentaires marins. D'après RENARD *et al.* (2018)

Que veut dire « pélagique » en biologie / écologie / paléontologie ?

Attention, le terme n'a pas le même sens en biologie qu'en géologie.

Les écologues distinguent en effet :

- Le **benthos**, ensemble des organismes vivants qui vivent sur le fond des océans / mers ou lacs (fixés ou non).
- Le **pélagos**, ensemble des organismes vivants qui vivent dans la colonne d'eau. On peut y distinguer :
 - le **plancton**, dont les représentants subissent des déplacements passifs et suivent les mouvements d'eau et courants (pas de nage ou alors à très courte distance).
 - le **necton**, dont les représentants réalisent des déplacements actifs et se déplacent en nageant, parfois au contraire des courants.

iv. Zonation hydrodynamique du domaine littoral

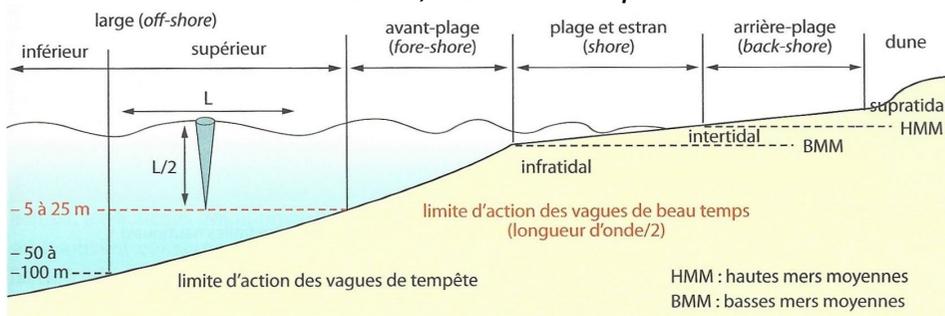
- Le **domaine côtier** peut être zoné de la façon suivante (du plus proche au plus loin des terres émergées) (figure 31) :

Les écologues ont une **zonation un peu différente** (encadré A)

- **Arrière-plage = backshore = zone supratidale** : zone non atteinte par la mer (à l'exception des embruns) sauf en cas de tempêtes.
- **Estran (= zone intertidale) = foreshore = zone intertidale** : zone de balancement des marées.

Le terme « **plage** » (= beach = shore) englobe généralement les deux ensembles précédents.

- **Avant-côte = shoreface = zone infratidale** : zone toujours inondée où l'action des vagues (de beau temps) se fait sentir sur les sédiments.
- **Large = offshore** : zone toujours inondée où l'action des vagues ne se fait pas sentir sur les sédiments, sauf en cas de tempête.



Zonation hydrodynamique et environnements de dépôts du domaine marin côtier.

▲ FIGURE 31. **Zonation hydrodynamique du domaine littoral.** D'après RENARD et al. (2018)

Encadré A La zonation littorale des écologues

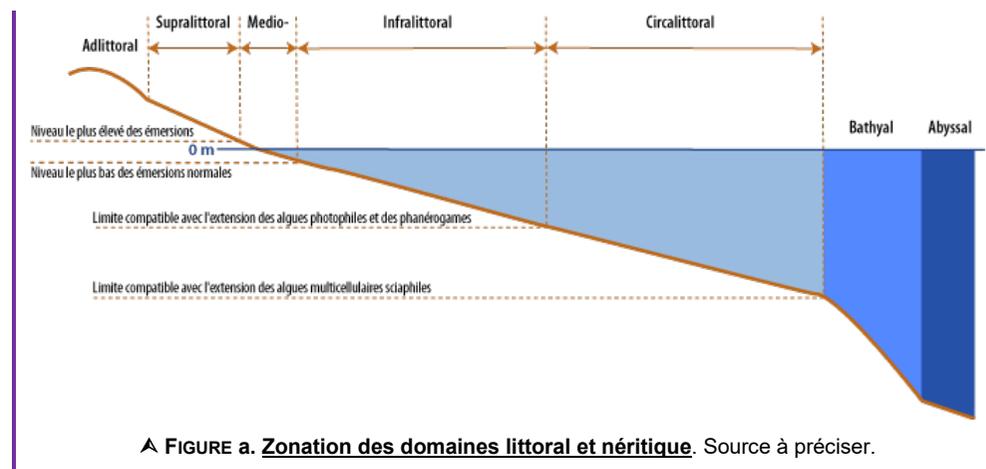
Les **écologues** distinguent classiquement (figure a) :

- L'**étage adlittoral** : zone non atteinte par la mer et peu par les embruns où se trouvent les premières traces de végétation terrestre (correspond typiquement aux dunes).
- L'**étage supralittoral** : situé au-dessus des pleines mers de vive-eau qui n'est atteint que par le ressac et les embruns.
- L'**étage médiolittoral** : zone située entre le niveau des pleines mers de vive-eau et le niveau des basses-mers de morte-eau.

(!) Contrairement aux **géologues** qui retiennent souvent les **marées moyennes**, les **écologues** retiennent plutôt les **pleines mers de vive-eau** (à fort coefficient) et les **basses-mers de mortes-eaux** (à faible coefficient).

>> Il n'y a donc pas de superposition stricte entre estran et étage médiolittoral.

- L'**étage infralittoral** : zone située sous le niveau des basses-mers de morte-eau où peuvent exister les organismes photosynthétiques photophiles.
- L'**étage circalittoral** (ou **circumlittoral**) : zone située sous l'étage infralittoral où peuvent encore exister les 'algues' pluricellulaires sciaphiles. Il est limité inférieurement par la limite d'existence des 'algues' pluricellulaires.



▲ FIGURE a. **Zonation des domaines littoral et néritique.** Source à préciser.

v. L'hydrodynamisme en domaine océanique et littoral : houle, vagues, marées et courants (océaniques et fluviaux)

- L'**eau océanique** est affectée par différents mouvements d'ensemble qui impactent évidemment la **sédimentation** :

Voir les **figures sédimentaires** dans la **partie II.A.**

- La **houle** : mouvement ondulatoire d'ensemble de la surface de la mer formé par des vents globaux dus à une dépression atmosphérique.

Un **raz-de-marée** ou **tsunami** est une sorte de houle à très grande longueur d'onde provoquée par un séisme.

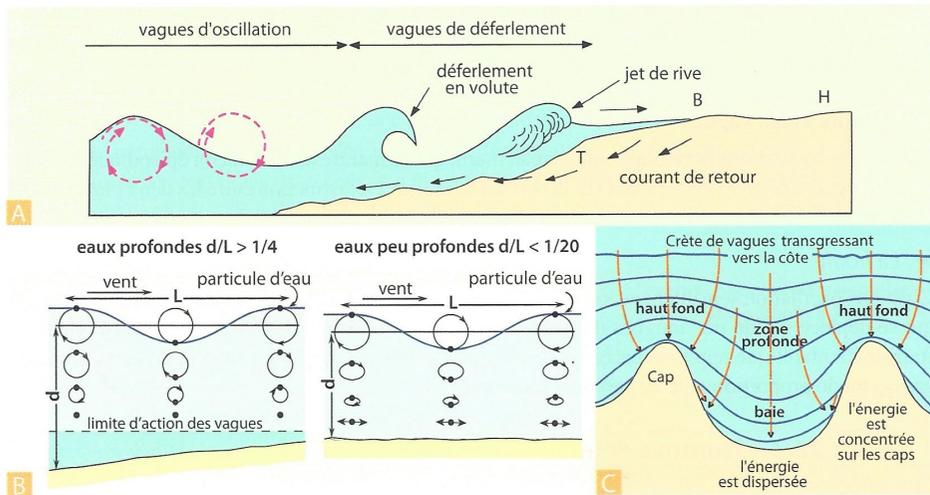
- Les **vagues** : mouvement ondulatoire local de la surface de la mer formé par des vents locaux.

(!) Sur la côte, les vagues viennent s'échouer sur la plage ou les rochers en formant des rouleaux : ce sont des **vagues de déferlement**.

Houle et vagues se superposent dans les faits.

(!) Les particules affectées par ces mouvements sont situées en eaux peu profondes et sont animées d'un mouvement oscillant (figure 32).

- Les **marées** : mouvements oscillatoires de montée et baisse du niveau marin en réponse aux forces gravitationnelles s'exerçant sur la Terre liées à la Lune et, dans une moindre mesure, au Soleil (figure 33).
- Les **courants océaniques** : mouvements directionnels des masses d'eau gouvernés par la chaleur (masses d'eau chaudes vs. froides), les vents et d'éventuelles différences de salinité.
- Les **courants fluviaux**, dus au flux d'eau douce provenant des fleuves.
- En profondeur, seuls les courants océaniques profonds agissent sur les eaux ; l'hydrodynamisme est donc plus faible qu'en milieu proximal.



Les vagues.

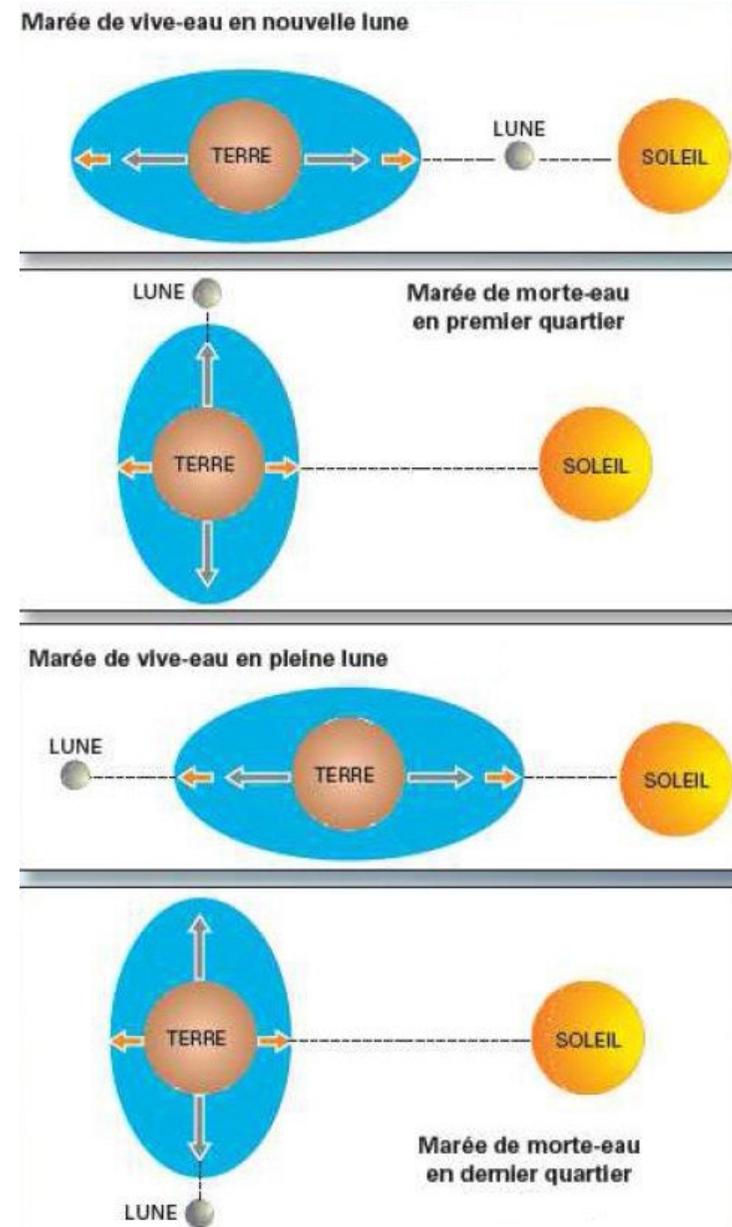
A. Schéma de déferlement des vagues : lors du déferlement, le jet de rive est formé d'eau écumante et tourbillonnante (H : haute plage, B : bourrelet de plage, T : talus de déferlement.) Les flèches rouges pointillées indiquent les trajectoires circulaires des particules d'eau qui se déplacent dans le sens de la vague sur la crête et en sens inverse dans les creux.

B. Trajectoires des particules d'eau dans les vagues. En eaux profondes, la diminution exponentielle des orbites aboutit à la limite d'action des vagues. En eaux peu profondes, les orbites s'aplatissent en se rapprochant du fond, ce qui finit par engendrer un mouvement de va-et-vient qui va provoquer un vannage des sédiments.

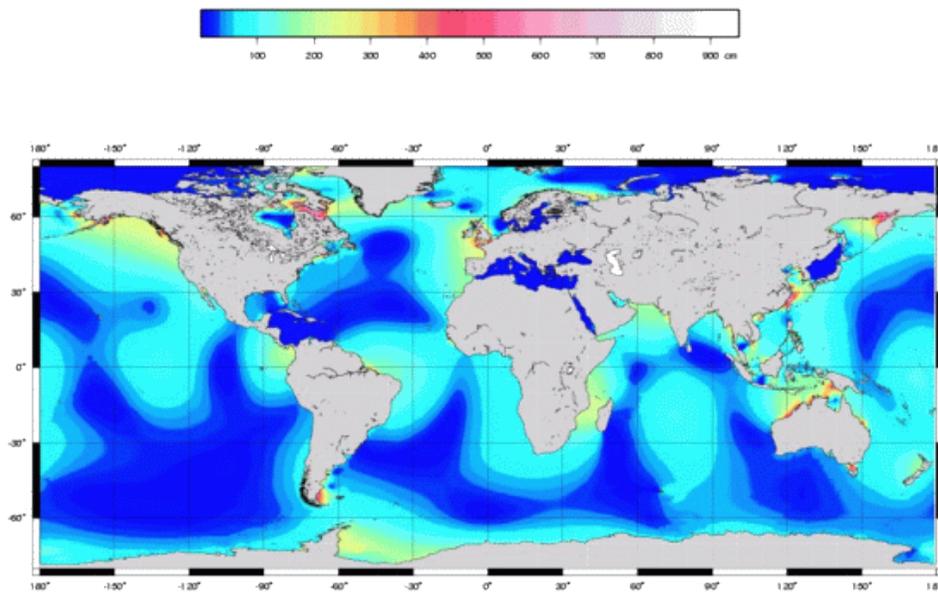
C. Influence de la morphologie côtière sur l'action des vagues : les caps et les hauts-fonds provoquent un phénomène de convergence qui concentre l'intensité tandis que les baies et les zones profondes provoquent une divergence. Dans le cadre du plan de prévention des tsunamis en Méditerranée (www.planseisme.fr), les modélisations réalisées, à partir de l'accident survenu à Nice en 1979 (micro-tsunami provoqué par un effondrement sous-marin lors des travaux d'extension de l'aéroport), montrent une telle concentration induisant des hauteurs de vagues plus importantes autour des caps, notamment le Cap d'Antibes.

▲ FIGURE 32. Les vagues. D'après RENARD *et al.* (2018)

- Un **cycle de marée** ou **cycle tidal** s'étale sur **environ 12 heures**.
- Le **plus bas niveau atteint par la mer lors d'un cycle de marée** s'appelle **basse mer BM** (« marée basse » du langage courant) et le **plus haut niveau atteint par la mer lors d'un cycle de marée** s'appelle **pleine mer PM** ou **haute mer HM** (« marée haute »).
- On appelle **marnage** la **différence de hauteur entre basse mer et pleine mer**.
- Le **marnage varie** au cours de l'année (on parle de marées de « fort » ou « faible » coefficient) ; il est notamment **important** :
 - lors des **équinoxes** [faibles marées lors des **solstices**]
 - **lorsque les astres sont alignés [syzygie] → marées de vive-eau** (ou vives-eaux)
 - [faible marée si astres en **quadrature** → **marées de morte-eau** (ou mortes-eaux)]
- Le **marnage varie** sur la planète et dépend de la **taille du bassin**, de sa **latitude** et des **reliefs continentaux** en bordure (figures 34-35).
- Une **houle** ou des **vagues** de grande taille, notamment en cas de **vents violents**, peuvent provoquer des **marées** où le **niveau de mer s'élève de manière exceptionnelle (marées de tempête)**.

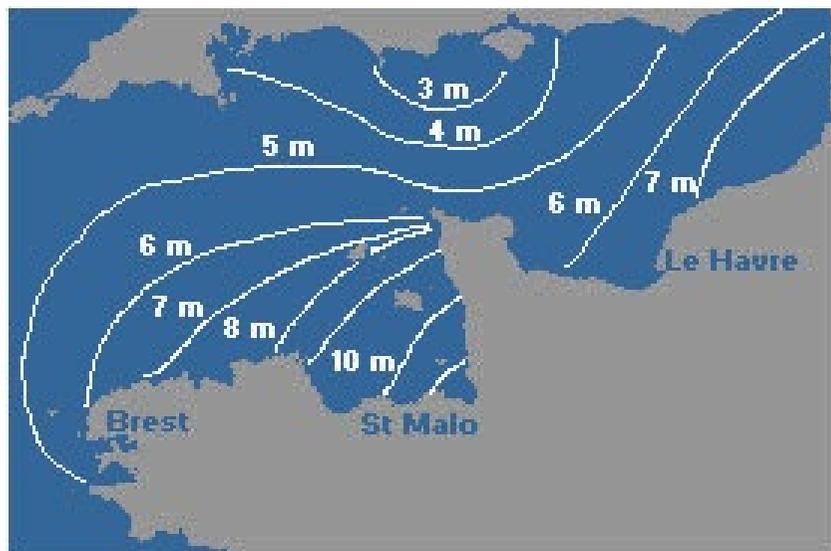


▲ FIGURE 33. Les marées et l'effet du positionnement des astres sur leur intensité. D'après RENARD *et al.* (2018)



▲ FIGURE 34. **Marnage moyen dans le monde (en cm)**

<http://www.shom.fr/les-activites/activites-scientifiques/maree-et-courants/marees/marnage-et-types-de-marees/>
(consultation mars 2019)



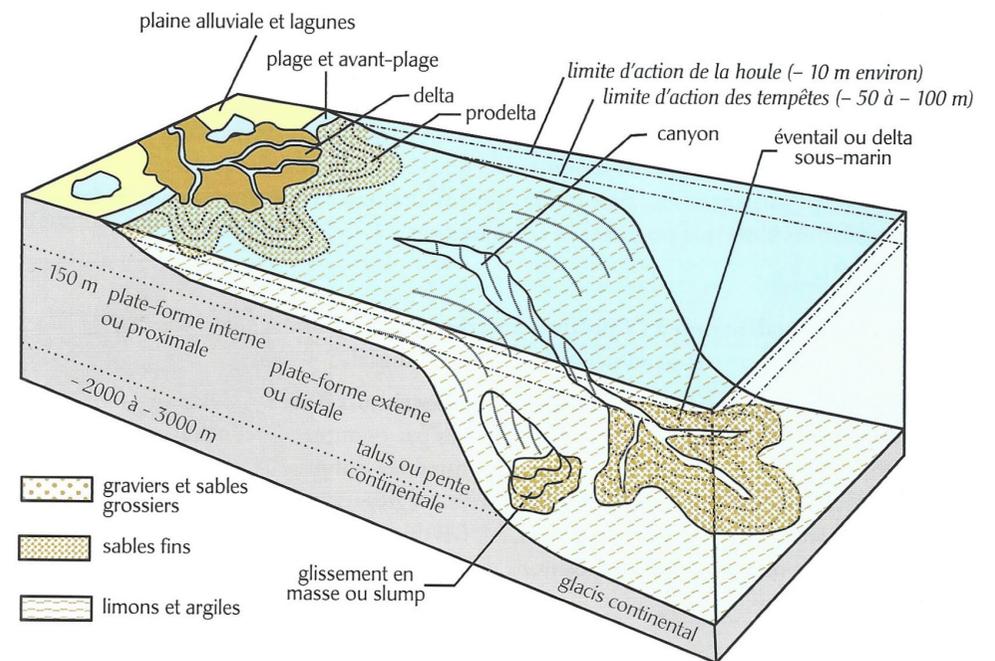
▲ FIGURE 35. **Marnage dans la Manche.**

<http://marees.free.fr/marnage.html> (consultation mars 2019)

vi. Les effets de la rupture de pente sur la sédimentation : formation du glacis par des courants de turbidité

- Au niveau du **talus continental**, on peut noter (figure 36) :
 - Que les **sédiments s'accumulent en bas de pente** sous l'effet de **courants de turbidité** après glissement le long de la pente.
 - Que **certaines endroits de la pente continentale sont creusés par des vallées sous-marines profondes (prolongeant un fleuve ou ayant une origine tectonique)** : ce sont les **canyons sous-marins**. **Au bas de ces canyons, le flux sédimentaire s'accumule** sous forme d'**éventails (ou deltas) sous-marins (= cônes sous-marins)**.
- Nous l'aurons l'occasion d'y revenir (partie II.A), ces sédiments, largement accumulés par **effet gravitaire**, présentent un **granoclassement vertical et latéral**.

β. Une sédimentation détritico-néritique et hémipélagique : un contrôle par le flux sédimentaire, la pente, la distance au littoral et l'hydrodynamisme



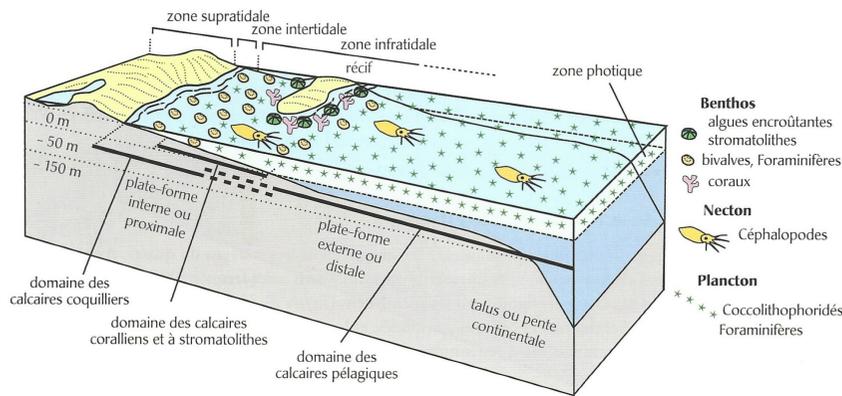
▲ FIGURE 36. **Principaux environnements de dépôt de la sédimentation détritico-néritique et hémipélagique.** D'après BEAUX *et al.* (2011).

- La **sédimentation détritico-océanique néritique et hémipélagique** (figure 36) est principalement contrôlée par :
 - Le **flux sédimentaire d'origine fluvial**, responsable de l'**apport sédimentaire** ;
 - La **proximité avec le fleuve**, les **sédiments** étant d'autant plus **nombreux** que la **proximité** avec un fleuve est grande.
 - Le **relief**, avec notamment la **pente** qui génère des **courants de turbidité** et les **canyons sous-marins** qui génèrent des **deltas sous-marins**.

- La **distance au littoral**, responsable d'un **granoclassement latéral** : plus on s'éloigne de la côte, plus les **sédiments** sont fins et seules les argiles finissent par être **transportées au large**.
- Les **conditions hydrodynamiques** (courants fluviaux, courants océaniques, houle et vagues, marées) qui peuvent notamment être à l'origine de **figures sédimentaires** (voir **partie II.A**), impactant les **conditions de dépôt**.

γ. Une sédimentation carbonatée (biogène) néritique, hémipélagique et des îles océaniques : une sédimentation très largement biogène

i. La sédimentation de plateforme (domaine néritique, voire hémipélagique)



▲ FIGURE 37. Principaux environnements de dépôt de la sédimentation carbonatée (néritique et hémipélagique). D'après BEAUX et al. (2011).

Benthos / pélagos (plancton / necton) [sens écologique]

Les écologues distinguent :

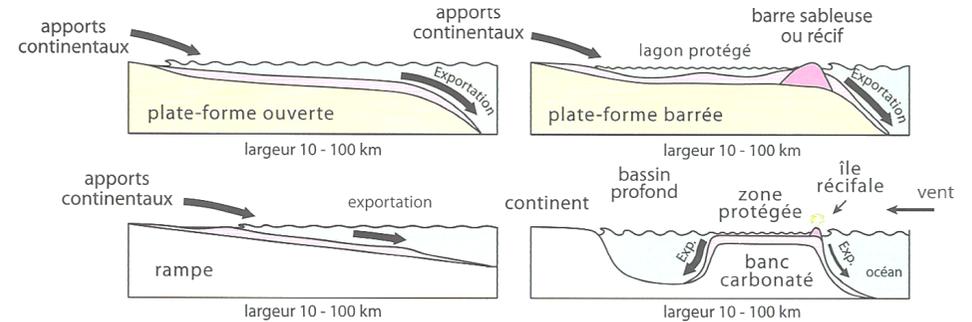
- Le **benthos**, ensemble des organismes vivants qui vivent sur le fond des océans / mers ou lacs (fixés ou non).
- Le **pélagos**, ensemble des organismes vivants qui vivent dans la colonne d'eau. On peut y distinguer :
 - le **plancton**, dont les représentants subissent des déplacements passifs et suivent les mouvements d'eau et courants (pas de nage ou à très courte distance).
 - le **necton**, dont les représentants réalisent des déplacements passifs et se déplacent en nageant, parfois au contraire des courants.

- Comme nous aurons l'occasion de le préciser dans la **partie II.B** (mais aussi dès le **I.C.**), la **précipitation de carbonates** en milieu océanique est très largement due aux **organismes vivants** : on appelle cela une **bioprécipitation**.
- En fonction de la **localisation** et de la **mise en place** de la **sédimentation carbonatée néritique et hémipélagique**, on parlera de (**figure 38**) :
 - Sédimentation carbonatée de **plateforme ouverte** pour désigner une **sédimentation carbonatée sur un plateau continental se terminant par un talus (marge passive)**.
 - Sédimentation carbonatée de **plateforme de type rampe** si la **pente du bassin de sédimentation ne présente pas de rupture brutale**.

- Sédimentation carbonatée de **plateforme barrée** si un **récif** ou une **barre sableuse** vient délimiter une partie de la plateforme de l'océan, dessinant alors un **lagon**.

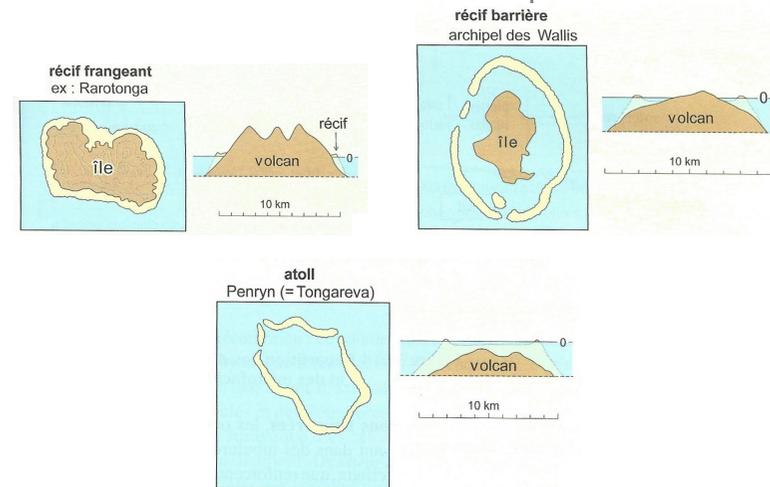
- Lagon** : zone située à proximité d'un continent ou d'une île, généralement de faible profondeur, et séparée de l'océan ou de la mer par une barre sableuse ou, plus souvent, un **récif**.
- Récif** : chaîne de rochers généralement d'origine biogène et de nature carbonatée (ex. récif corallien).

- Sédimentation de **banc carbonaté** si la zone de sédimentation carbonatée est située loin du continent.



▲ FIGURE 38. Principales modalités de dépôt de la sédimentation carbonatée (néritique et hémipélagique). D'après LAGABRIELLE et al. (2013).

ii. La sédimentation récifale autour des îles océaniques actuelles ou submergées



▲ FIGURE 39. Typologie des récifs coralliens en milieu océanique distal [pour information]. D'après RENARD et al. (2018).

- Les **îles océaniques** sont des **îles situées loin du continent d'origine généralement volcanique, même si le volcan peut être éteint**. Il y a alors souvent un **récif** (figure 39).

On parlera d'**atoll** pour **désigner un récif situé autour d'une île océanique immergée**.

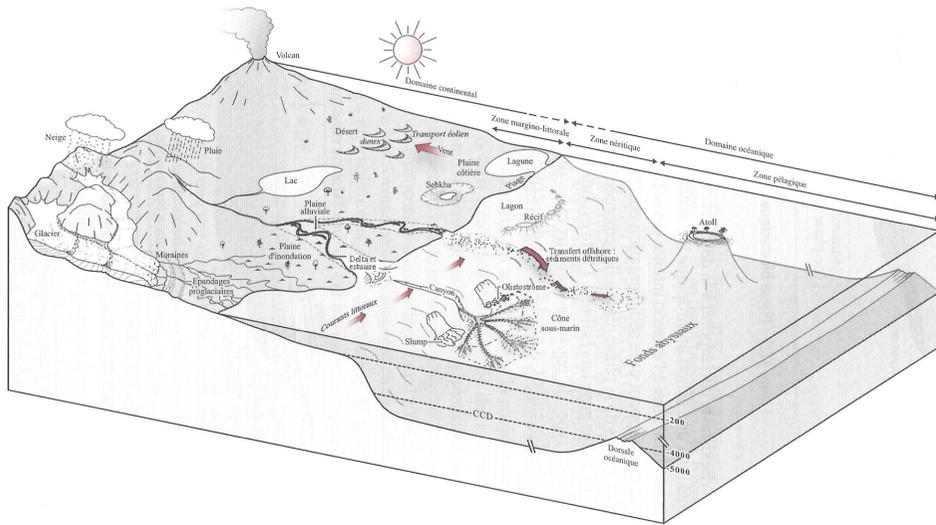
6. Une sédimentation océanique profonde (pélagique) variée : terrigène, carbonatée, siliceuse biogène

- La **sédimentation océanique profonde** (des **plaines abyssales**), souvent dite **pélagique**, comprend essentiellement :
 - Des **sédiments glaciaires**, issus des **retombées des icebergs**
 - Des **sédiments terrigènes** surtout dus aux **apports fluviaux**
 - Des **sédiments carbonatés** dus à la **bioprécipitation**
 - Des **sédiments siliceux biogènes** dus à la **bioprécipitation**
 - Des **argiles rouges des grands fonds**, lents **dépôts fins** dus aux **particules détritiques se déplaçant dans l'océan** (parfois emportées par les vents ou les nuages – pouvant même être d'origine volcanique) et finissant par **se déposer dans l'océan profond**, là où la **sédimentation biogène est faible ou inexistante**.

Cet aspect est explicité dans le grand C.2.

e. Bilan : vue d'ensemble des lieux de sédimentation

- Voir la **figure 40** et le **tableau I**.



A FIGURE 40. La diversité des environnements sédimentaires : vue d'ensemble.
D'après EMMANUEL et al. (2007).

▼ TABLEAU I. La diversité des environnements sédimentaires : vue d'ensemble.
D'après EMMANUEL et al. (2007).

Environnement sédimentaire	Caractéristiques	Type sédimentation	Domaine
Glaciers	Calottes ou inlandsis Glaciers de montagne Érosion mécanique et chimique Particules très grossières (blocs) à très fines	Dépôts glaciaires et para-glaciaires avec les moraines puis les complexes fluvioglaciers et glacio-lacustres.	Continental
Volcans	Matériel produit de type effusif (coulées, dykes, neck, batholithe granitique, laccolite) ou explosif (poussières, cendres, lapilli)	Dépôts volcano-sédimentaires : cinérites	
Désert	Poussières et particules issues de l'érosion mécanique et chimique et transportées par des processus éoliens	Dépôts éoliens en milieu désertique	
Lac	Restes organiques	Formation de complexes dunaires (dunes, barkhanes)	
Fleuves et rivières	Granulométrie variable Transport de particules, d'éléments dissous et de déchets organiques. Nombreuses figures sédimentaires	Dépôts lacustres avec alternance carbonatée (précipitation) et argilo-siliceuse (détritique) + MO = Vases	
Plaine d'inondation /alluviale	Particules moyennes (sables) aux argiles (parfois) riches en MO d'origine végétale	Dépôts fluviaux Chenaux, barres, levées et brèches de débordement...	
Delta et estuaires	Estuaire : Embouchure des fleuves dans les mers à courants côtiers ou de marée importants. Mélange de particules sablo-argileuses Delta : Embouchure des fleuves dans les mers à marées de faible amplitude	Levés de débordement avec litages plans à oblique, rides, Tourbe à charbons. Dans les bassins d'inondation, possibilité de développements pédogénétiques (carbonatés ou anhydratique)	
Lagune	Bassins avec connexion plus ou moins importante avec la mer franche	Dépôts estuariens vaseux	
Lagon	Milieu marin à faible tranche d'eau Milieu énergétique calme Organismes benthiques	Dépôts deltaïques Alternances sablo-argileuses à taux de sédimentation élevé et à forte composante organique = fort potentiel en hydrocarbures	
Récif	Organismes bioconstructeurs carbonatés (coraux, mollusques, algues, bactéries...) dans des conditions environnementales particulières (température, salinité, turbidité, agitation, oxygénation...)	Sédimentation évaporitique	
Plateau continental	Fortes accumulations d'organismes benthiques et de sédiments détritiques grossiers	Sédimentation bioclastique calcaire	
Talus et pente	Entaillés par des canyons sous-marins qui permettent le transport des sédiments détritiques grossiers en domaine profond. Arrachements (olistostromes) et glissements (slump)	Construction récifale (frangeant, barrière et atoll) bioherme ou biostrome	
Cônes sous-marins	Terminaison des canyons en deltas profonds avec chenaux en éventail Accumulation de sédiments fins et grossiers transportés par les courants de turbidité	Sédimentation néritique carbonatée Dépôts soumis à l'action des vagues et des courants	
Plaines abyssales	En fonction de la profondeur (CCD), tests ou squelettes d'organismes planctoniques carbonatés et/ou siliceux + argiles rouges des grands fonds et particules authigéniques (nODULES polymétalliques)	Sédimentation gravitaire et hémipélagique	
Dorsales médio-océaniques	Idem sédimentation plaines abyssales + précipitations chimiques issues des sources hydrothermales (oxydes, sulfures, Si...)	Sédimentation pélagique	

C. Des dépôts répartis dans le monde de manière assez contrôlée : vue d'ensemble de la sédimentation mondiale

1. Des continents avec une sédimentation plutôt faible et surtout caractérisés par des sols

Revoir le [chapitre 23](#) (Altération)

a. Les continents, des lieux d'érosion et de faible sédimentation dont la répartition est surtout contrôlée par le contexte tectonique et l'activité fluviale

- Rappelons que les **continents** sont avant tout un **lieu d'érosion** et de **transport de sédiments** plutôt que de **dépôt**, même si évidemment des processus de **sédimentation** sont **observables**.
- Les **environnements sédimentaires continentaux** supposent la **genèse de déclinivité** qui sont sous le joug de deux ensembles de processus :
 - Les **processus tectoniques**, liés au **contexte géodynamique**, qui, comme nous l'avons vu, peuvent créer des **territoires en déclinivité**, y compris au sein de **reliefs importants**.
 - Les **processus de circulation des eaux douces** (qui dépendent eux-mêmes en partie des **reliefs liés à la tectonique**) qui sont responsables à la fois de l'**essentiel du transport** et de l'**essentiel des dépôts**.
- Fort de ces constats, il est **difficile de dégager de grandes tendances de sédimentation**.

b. Les continents, des domaines recouverts de sols en lien avec les conditions climatiques et la végétation : une zonation latitudinale et altitudinale

- En revanche, on peut effectivement noter que la **latitude** – ou l'**altitude** – contrôlent **deux processus** :
 - Les **modalités d'altération** (détaillées au [chapitre précédent](#))
 - Et, par conséquent, le **type de formation résiduelle** à un **endroit donné**, notamment le **type de sol formé** (revoir aussi le [chapitre précédent](#)).
- Comme nous l'avons vu au [chapitre précédent](#), on peut rendre compte de ces éléments à partir du **diagramme de PEDRO** qui montre clairement que ce sont les **conditions climatiques** qui déterminent l'**altération** et le **sol formé**.

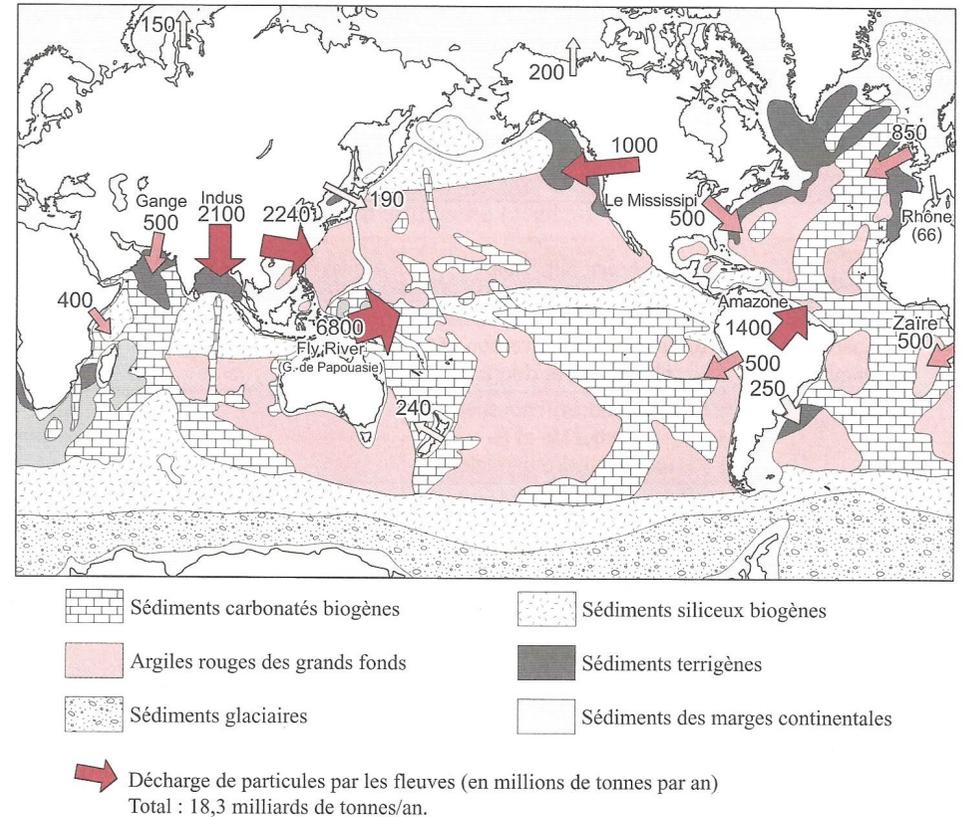
Rappelons que les **êtres vivants**, notamment la végétation, participent à la **mise en place des sols**, ainsi qu'à leur **maintien en place (biostasie)**. Il existe d'ailleurs une **zonation latitudinale et altitudinale** des **grands biomes terrestres** qui est liée aux **climats** et aux **types de sols** (voir le [chapitre 20](#) sur les **écosystèmes**).

2. Des océans dont la sédimentation pélagique (= profonde) dégage des grandes tendances sédimentaires

- On s'intéresse ici à la **sédimentation océanique profonde**, c'est-à-dire à la **sédimentation pélagique (abyssale)**.

a. Vue d'ensemble de la sédimentation océanique profonde à double zonation : méridienne et latitudinale

- Voir la [figure 41](#).



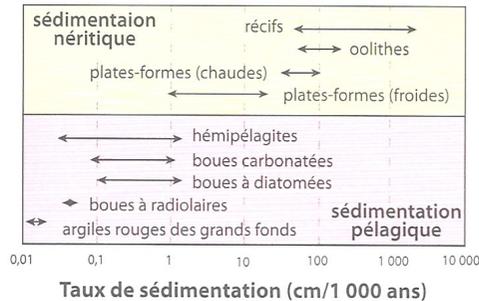
▲ **FIGURE 41. Sédiments océaniques dominants : répartition de la sédimentation pélagique actuelle.** D'après EMMANUEL *et al.* (2007).

[À savoir expliquer... idéalement à savoir refaire en simplifié...]

- On notera :
 - Une **zonation méridienne** des **dépôts**, surtout due à la **proximité des continents (forts dépôts détritiques)** et à la **profondeur** (présence de **carbonates aux profondeurs modérées**)
 - Une **zonation latitudinale**, surtout d'**origine climatique**.

b. Une sédimentation océanique profonde lente

- Il est à noter que l'**apport sédimentaire**, qu'il soit **détritique** ou **biogène**, est bien **moindre en domaine pélagique** qu'en **domaine néritique**, ce qui induit des **taux de sédimentation pélagiques** bien **plus faibles** que les **taux de sédimentations néritiques** (figure 42).



▲ FIGURE 42. **Taux de sédimentation néritiques vs. pélagiques.**
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

c. Origine et contrôle de la nature de la sédimentation océanique profonde

- On se propose ici de **décrire** et d'**expliquer** sommairement la **typologie sédimentaire** présentée sur la **carte de la figure 41**.

a. L'apport détritique : un apport essentiellement fluvial, proche des continents (zonation méridienne), et fort en zone tropicale (zonation latitudinale)

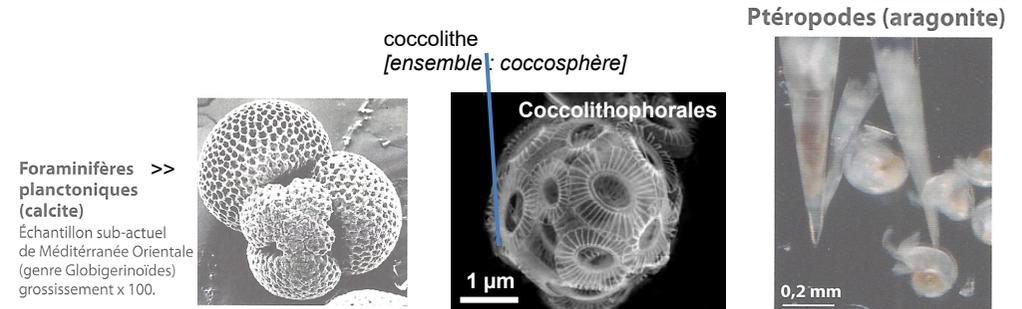
- Les **sédiments détritiques terrigènes** (sables, limons, argiles) sont largement **apportés par les fleuves** d'où un **fort apport sédimentaire détritique** (figure 41) :
 - Près des continents plutôt qu'en **plein milieu de l'océan** (participation à la **zonation méridienne**) ;
 - Dans les **zones équatoriales** où les **fleuves** ont un **débit** et un **flux sédimentaire** plus important qu'en zones tempérées, en lien avec l'**efficacité de l'altération** dans les **climats tropicaux** (revoir le **chapitre 20**) (participation à la **zonation latitudinale**).

β. Les boues carbonatées : une formation par bioprécipitation dans les eaux chaudes (contrôle latitudinal) et peu profondes (contrôle bathymétrique, en lien avec la lysocline et la CCD)

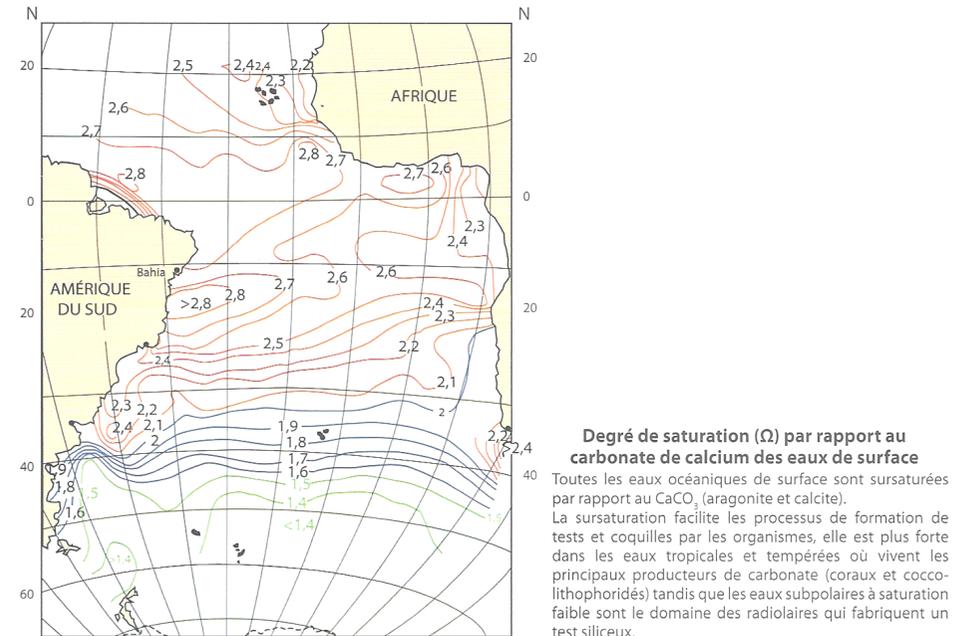
- Les **boues carbonatées** sont majoritairement dues à des **micro-organismes planctoniques à test (= coquille) calcaire** ; ce sont donc des **sédiments biogènes**.
- Les **micro-organismes** concernés sont notamment (figure 43) :
 - Des **Foraminifères**, **organismes zooplanctoniques de forte taille possédant pour certains un test calcaire** [ex. Globigérines] (→ calcite)
 - Des **Coccolithophoridés**, **organismes phytoplanctoniques recouverts de plaques de calcite (nommées coccolithes) formant une coccosphère protectrice** (→ calcite)
 - Des **'ptéropodes'**, **ensemble polyphylétique de Mollusques à coquille calcaire présentant un appendice en forme d'aile** (→ aragonite)

- Les **boues carbonatées** se forment essentiellement :
 - Dans les **eaux chaudes** (figure 44), situées **entre les latitudes moyennes et l'équateur**, où les **ions carbonates** sont très **disponibles à la bioprécipitation**.

L'apparent paradoxe de la forte bioprécipitation des carbonates dans les eaux chaudes
Nous avons vu, dans le **chapitre 23 (Altération)**, que la **dissolution des carbonates augmente** lorsque la **température augmente**... Pourtant ici, on affirme que de **fortes températures favorisent la bioprécipitation** ! En réalité, dans le cas de la **précipitation biochimique**, celle-ci est d'autant plus **efficace** que la **disponibilité en ions carbonates** dans la solution est grande, ce qui est le cas dans les **eaux chaudes** où beaucoup de ces ions sont **dissous** !



▲ FIGURE 43. **Quelques organismes pélagiques bioprécipitant les carbonates.**
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013) et INSU (CNRS).



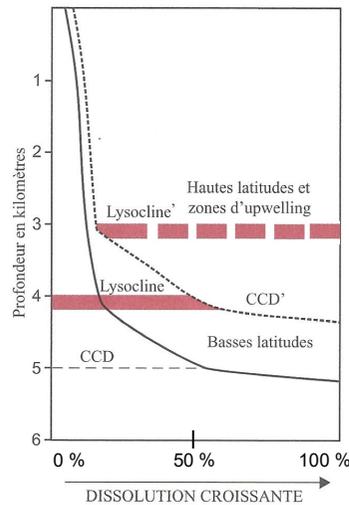
▲ FIGURE 44. **Saturation des eaux atlantiques en CaCO₃.**
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

- 2/ Dans les eaux **pas trop profondes**, typiquement situées au-dessus de **3000 m** de profondeur (profondeur d'apparition de la **lysocline***) et en tout cas au-dessus de **4500 / 5000 m de profondeur** (profondeur d'apparition de la **CCD***) (figure 45). Ces conditions de « faible profondeur » sont remplies :
 - o Dans les **plaines abyssales** proches des **marges continentales**
 - o Au **niveau des dorsales** où la **lithosphère océanique remonte**.

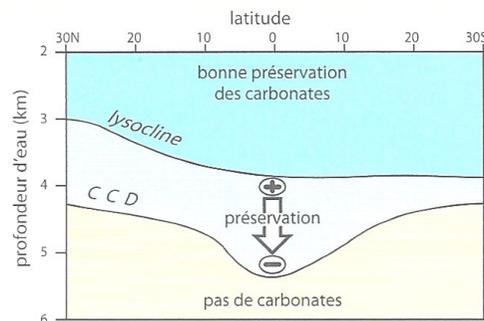
***Lysocline et CCD (Calcite Compensation Depth)**

- **Lysocline** : **profondeur où la dissolution des carbonates augmente rapidement**.
- **CCD (Calcite Compensation Depth**, originellement **Carbonate Compensation Depth**, soit « profondeur de compensation de la calcite / des carbonates ») : **profondeur où la dissolution des carbonates est complète**.

Il existe aussi une **ACD (Aragonite Compensation Depth)** et une **lysocline pour l'aragonite**.



(a) Courbe de dissolution des tests et particules carbonatés (billes de calcite laissées 1 an)



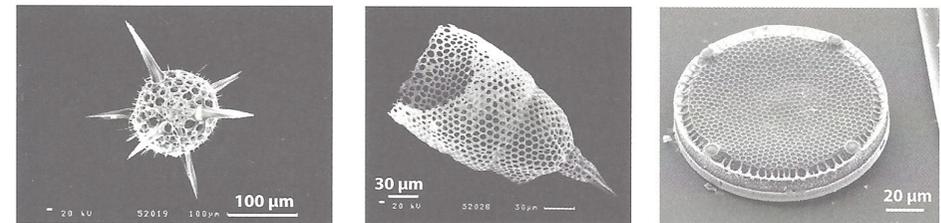
(b) Variation de la profondeur de la lysocline et surtout de la CCD en fonction de la latitude.

▲ FIGURE 45. **CCD et lysocline**. D'après EMMANUEL *et al.* (2007) et LAGABRIELLE *et al.* (2013).

- Notons que la **CCD varie avec la latitude** (figure 45.b) : plus on s'approche de l'équateur, plus la CCD est basse (ce qui favorise la **conservation des carbonates**).
- Elle est néanmoins **abaissée dans les zones d'upwellings**, sur lesquelles nous revenons ci-dessous.

γ. Les boues siliceuses : un dépôt d'eaux froides ou à haute productivité (une ceinture équatoriale et deux ceintures péripolaires)

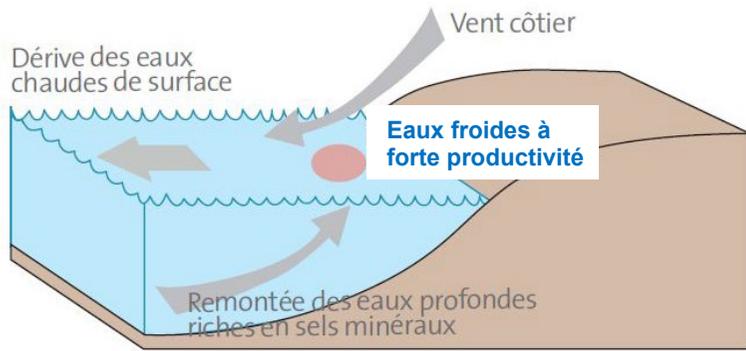
- Les **boues siliceuses** sont majoritairement dues à des **micro-organismes planctoniques à test siliceux** ; ce sont donc des **sédiments biogènes** produits par **biominéralisation de silice SiO₂** (malgré la faible disponibilité des ions silicium dans l'eau de mer).
- Les **micro-organismes** concernés sont notamment (figure 46) :
 - Des **Radiolaires**, **organismes zooplanctoniques à test siliceux**.
 - Des **Diatomées**, **organismes phytoplanctoniques (mais parfois benthiques, en milieu proximale) recouverts d'un test siliceux externe à deux valves nommé frustule**.
- Ces **dépôts** s'observent :
 - Au **niveau des eaux froides** que l'on trouve à **deux endroits** :
 - o Les **zones péripolaires** (ceintures péripolaires)
 - o Les **zones d'upwellings** (figure 47) qui sont des zones de **remontées d'eaux froides (et riches en nitrates d'où une forte productivité primaire puis, en séquence, secondaire) venant des profondeurs lorsque de forts vents poussent au large les eaux de surface**. D'importants **upwellings** s'observent au niveau de l'Océan pacifique et de l'Océan indien (ceinture équatoriale), favorisant la **productivité d'organismes siliceux**, en même temps qu'ils **relèvent la CCD** (favorisant la **dissolution de carbonates**) (figure 48).
 - À des **profondeurs plutôt importantes** où :
 - o le **franchissement de la CCD** empêche la **préservation des carbonates**,
 - o alors que les **tests siliceux** sont plutôt **dissous lentement au-dessous de 1000 m** (figure 49) Ceux qui **échappent à la dissolution en surface** peuvent alors **s'accumuler sur les hauts fonds**.



Radiolaires
Exemples du Quaternaire (125 000 ans) de Méditerranée (sud de la Crète).
À gauche, Radiolaire Spumellaire, à droite Radiolaire Nacellaire.

Diatomées

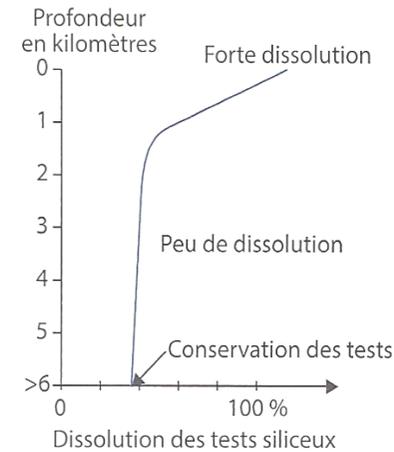
▲ FIGURE 46. **Quelques organismes pélagiques bioprécipitant la silice**.
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).



▲ FIGURE 47. **Le principe d'un upwelling côtier.**

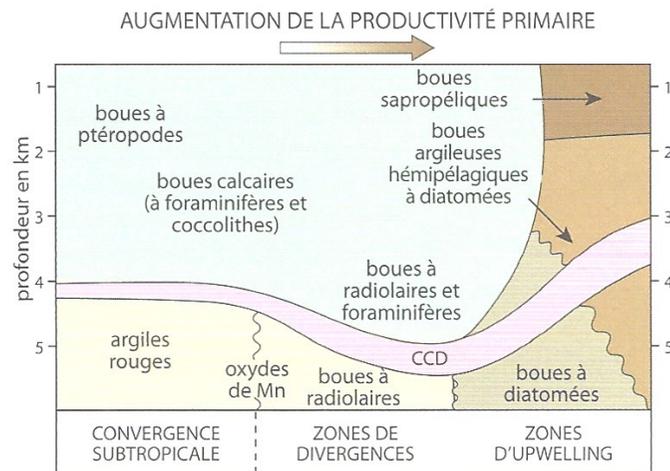
<https://education.francetv.fr/matiere/geographie/cm2/article/l-upwelling-thalassa-des-mots-a-la-mer>
(consultation mars 2019)

Pour les puristes : cette figure est **simplifiée** et ne tient pas compte du transport d'EKMAN (hors programme).



▲ FIGURE 49. **Profondeur et préservation des tests siliceux.**

D'après BORDI *et al.* (2018).



Influence de la production primaire et de la profondeur sur la sédimentation pélagique

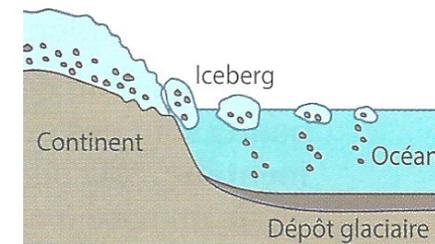
En dessous de la CCD, il n'y a qu'une sédimentation siliceuse : argiles rouges des grands fonds, boues à radiolaires et boues à diatomées.

▲ FIGURE 48. **Les zones d'upwelling et leur impact sédimentaire.**

D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

δ. Les sédiments glaciaires : une sédimentation détritique liée aux inlandsis et calottes

- En domaine océanique périglaciaire, on trouve une **sédimentation essentiellement détritique, non granoclassée**, issue pour l'essentiel de **blocs et particules de taille variable** emportées par les icebergs qui chutent sur le plancher océanique lors de la fonte des icebergs.



▲ FIGURE 50. **La sédimentation détritico-océanique glaciaire en lien avec le transport par les icebergs et leur dépôt par gravité suite à la fonte.**

D'après BORDI *et al.* (2018).

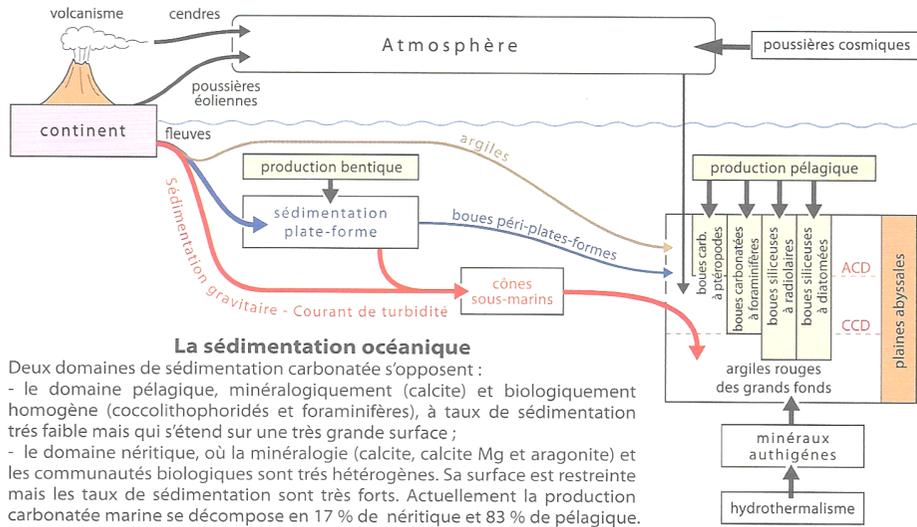
ε. Les argiles des grands fonds (« argiles rouges ») : des apports variés (fluvial, éolien, volcanique, hydrothermale et cosmique) dans les zones de faibles productivité biologique

- On appelle **argiles des grands fonds** ou encore **argiles rouges des grands fonds**, des **dépôts détritiques, largement argileux, de couleur rouge-brun**, qui s'accumule dans les zones où les autres modalités de sédimentation océanique profonde agissent peu ou pas.

- Ce sont des zones de **faible productivité biologique** où **peu de tests** s'accumulent sur les **fonds océaniques**.
- On note une **triple origine** de ces argiles :
 - **Terrigène** : dépôts détritiques fins
 - d'origine **fluviatile** (argiles et silts voyageant loin dans les **courants océaniques**),
 - d'origine **volcanique**,
 - et surtout d'origine **éolienne** ;
 - **Néoformée** : production de **minéraux argileux** par l'**hydrothermalisme** sous-marin.
 - **Cosmique** : apport de **poussières cosmiques** (environ 30 000 t/an !).

d. Un couplage entre sédimentation néritique et pélagique

- Notez que la **sédimentation océanique pélagique (= profonde)** dépend de la **sédimentation océanique néritique (= proximale)**, notamment pour ses **apports terrigènes** mais aussi de **certaines sédiments biogènes remaniés** (figure 51).

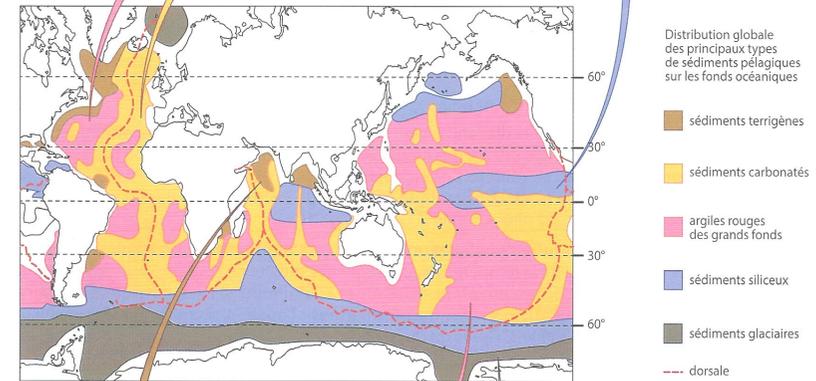
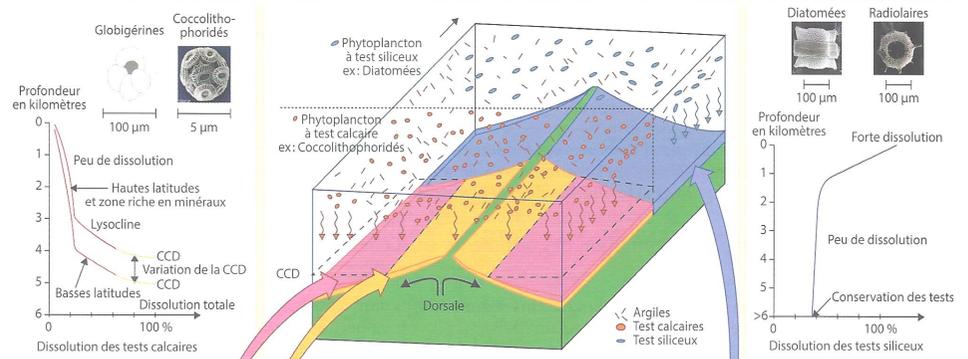


▲ **FIGURE 51. La sédimentation détritique océanique glaciaire en lien avec le transport par les icebergs et leur dépôt par gravité suite à la fonte.**
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

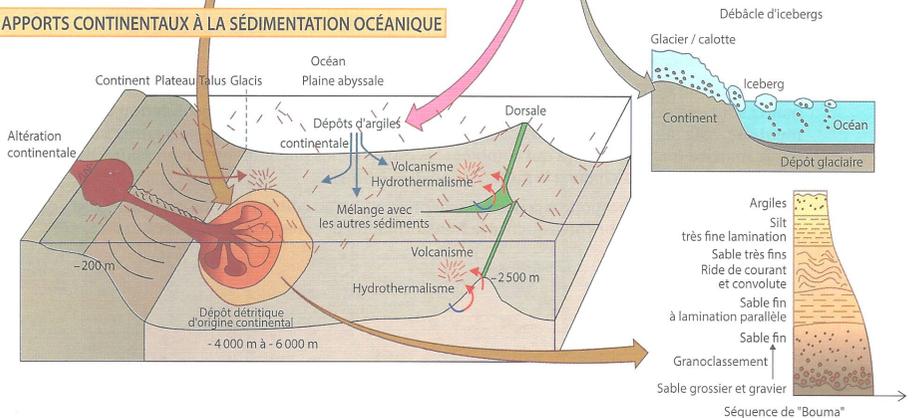
e. Bilan

- Voir la **figure 52** pour une **vue d'ensemble de la sédimentation océanique** centrée sur la **sédimentation pélagique**.

FRACTIONS BIOGÈNES DE LA SÉDIMENTATION OCÉANIQUE



APPORTS CONTINENTAUX À LA SÉDIMENTATION OCÉANIQUE



▲ **FIGURE 52. Vue d'ensemble de la sédimentation océanique.**
D'après BORDI *et al.* (2018).

Bilan (adapté du programme)

- ✓ Les **éléments en suspension** ou en **solution** sont transportés jusqu'à des **zones de dépôts**.
- ✓ La **répartition des sédiments actuels** à l'échelle **mondiale** est liée à **différents paramètres** (latitude, profondeur océanique, diversité des êtres vivants...).

II. Les types de dépôts sédimentaires et les modalités de formation des roches sédimentaires : un panorama

Cette partie se base évidemment sur le TP 6.3, consacré aux roches sédimentaires

- On s'intéresse ici à la **formation des dépôts sédimentaires** et **roches sédimentaires** en lien avec leur **mode de dépôt** et de **formation**.
- On rappelle que la **formation des sédiments** a été abordée dans le **chapitre 23**.

Capacités exigibles

- ✓ **Établir** pour la lignée détritique la relation existant entre granulométrie, apport sédimentaire, énergie du milieu et répartition de dépôts.
- ✓ **Décrire** la mise en place d'une roche carbonatée.
- ✓ **Souligner** le rôle de la vie dans les phénomènes de bioprécipitation.
- ✓ **Discuter** l'effet de différents facteurs (température, pH, êtres vivants, profondeur, teneur en CO₂ atmosphérique) sur l'équilibre de précipitation / dissolution des carbonates.
- ✓ **Établir** les conditions nécessaires à l'apparition d'un gisement de carbone, charbon ou hydrocarbures (accumulation rapide, anoxie, enfouissement, diagenèse).

A. Le devenir des particules fragmentaires de roches : la lignée détritique

- La **lignée détritique** correspond aux **sédiments particuliers issus de la dégradation de roches pré-existantes et aux roches sédimentaires formées à partir de ces particules de roche**.

1. Les particules fragmentaires de roches : les sédiments détritiques

- Il est d'usage de sérier les **sédiments détritiques** selon **deux modalités**.

a. Des débris de taille variable : la classification granulométrique (rudites, arénites, lutites)

- On peut classer les **sédiments détritiques** en fonction de la **granulométrie** des **plus gros clastes** présents (ou parfois du **claste dominant**) (**tableau II**) : **cailloutis, grave, sable, limon, argile**.

▼ **TABLEAU II. Classification granulométrique des sédiments et roches sédimentaires détritiques.**

Classe granulométrique	Taille des grains	Nom des grains	Nom du sédiment	Nom de la roche sédimentaire		
Rudites	> 2 mm	> 256 mm	Blocs	Cailloutis	Conglomérat**	
		4 à 256 mm	Galets			
		2 à 4 mm	Graviers			Gravier / grave
Arénites	63 µm* à 2 mm	Sables	Sable	Grès		
Lutites	< 63 µm*	2 à 63 µm	Silts = Limon(s)	Silts = Limon(s)	Siltite	Pélite <i>sens large</i>
		< 2 µm	Argiles	Argile(s)	Argilite = Pélite <i>sens strict</i>	

* 63 µm = 1/16° de mm

** On rappelle (TP 6.3) qu'un **conglomérat dont les particules massives sont anguleuses** est appelé **brèche** et qu'un **conglomérat dont les particules massives sont arrondies** est appelé **poudingue**.

b. Des roches initiales de nature variable : la classification chimique (sédiments silicoclastiques = terrigènes [cas dominant], calcoclastiques, bioclastiques et volcanoclastiques)

- On peut classer les **sédiments détritiques** en fonction de leur **nature chimique** (c'est-à-dire de la nature chimique de la roche d'origine) :
 - Silicoclastiques = terrigènes** : *fragments de roches silicatées.*
 - Calcoclastiques** (terme rare) : *fragments de roches carbonatées.*
 - Bioclastiques** (terme rare) : *fragments d'origine biologique (y compris de nature carbonatée ou siliceuse).*
 - Volcanoclastiques** : *projections volcaniques (de composition magmatique).*

2. Des sédiments qui peuvent enregistrer leurs conditions de transport et de dépôt

- Bien que **non codifié rigoureusement**, on désignera ici par le terme de **figures sédimentaires** la **géométrie des dépôts sédimentaires, nous renseignant sur leur origine et leurs modalités de mise en place.**

Il s'agit donc là évidemment d'un **élément central du faciès sédimentaire** défini plus haut (partie I).

a. La forme et l'aspect de surface des grains : une conséquence mécanique de la distance et du mode de transport

α. La morphologie des grains : morphoscopie et exoscopie

- On appelle **morphoscopie** (figure 53) *l'étude de la morphologie extérieure des particules détritiques qui sont classées selon leur forme (sphéricité) et leur aspect de surface (anguleux ou émoussé)*, notamment appliquée aux grains de sable (formés généralement de quartz, très peu altérables chimiquement et dont la morphologie est donc très liée aux phénomènes mécaniques, notamment le transport).

Sphéricité	forte						
	faible						
		0	1	2	3	4	5
		très anguleux	anguleux	subanguleux	subémoussé	émoussé	très émoussé

▲ FIGURE 53. **Exemple de classification morphoscopique.**

<https://www4.ac-nancy-metz.fr/base-geol/fiche.php?dossier=198&p=4actirea>

(consultation mars 2019)

- L'étude morphoscopique au microscope électronique à balayage** ou **exoscopie** a constitué une grande avancée historique pour la morphoscopie.

β. Cas du transport par l'eau : un arrondi et un aspect lisse d'autant plus importants que l'a été la distance de transport

- Dans le cas d'un **transport par l'eau**, les **particules** :
 - Sont **plutôt arrondies et lisses** dans le cas d'un **transport important** ;
 - Sont **plutôt anguleux** dans le cas d'un **transport faible** ou **inexistant**.

Dans le cas des **conglomérats**, on notera que :

- Les **brèches** sont généralement des **roches** dont les **déchets** ont subi un **faible transport** et ont été **déposés par gravité**.
- Les **poudingues** ont souvent subi un **transport important**.

γ. Cas du transport par le vent : des particules peu sphériques et très choquées

- Les **sables éoliens** et les **loëss**, en lien avec leur **transport éolien** et la **corrasion** qui lui est associée, sont généralement des **particules peu sphériques** et présentant de **nombreux petits chocs** à leur surface.

δ. Cas du transport par la glace : des particules souvent anguleuses et irrégulières

- Les **particules piégées dans la glace** ont une morphologie généralement **anguleuse et irrégulière**, **sauf** lorsque la **taille du glacier** (et donc la distance de transport) **augmente**, auquel cas les particules tendent à s'arrondir et s'émousser un peu.

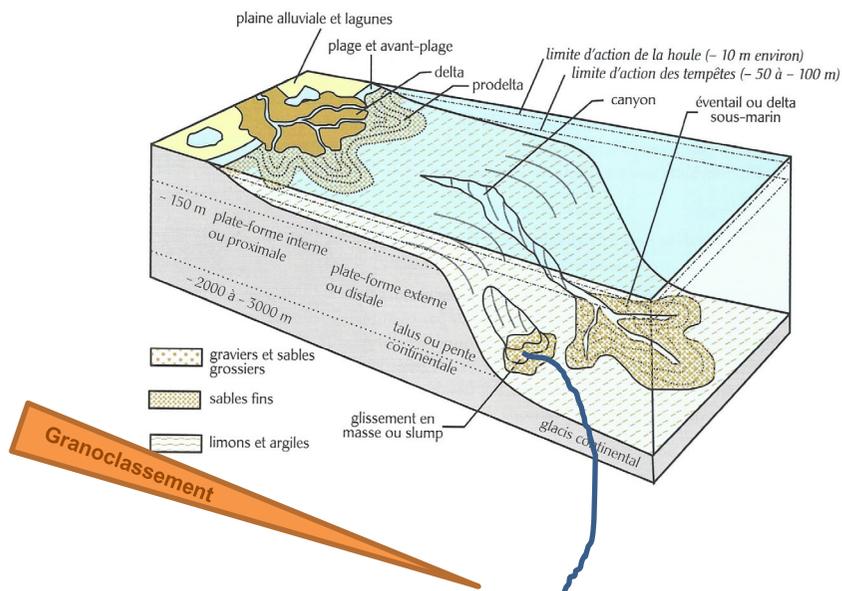
b. Un lien entre énergie du milieu et distance de transport : le tri granulométrique (= granoclassement)

α. En milieu littoral et sur la marge continentale : une diminution globale de la granulométrie en lien avec l'avancée vers le large et un apport sédimentaire dû aux fleuves

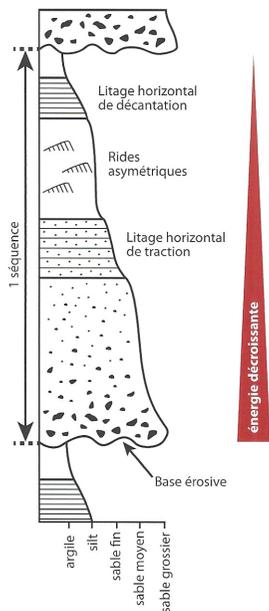
- En **milieu littoral** et sur la **marge continentale**, l'apport détritique (figure 36 – remise page suivante et annotée) :
 - Les **fleuves** sont responsables largement de l'**apport de sédiments détritiques** dans la mer ou l'océan ;
 - Les **sédiments les plus fins** sont ceux qui subissent le plus **grand transport** de sorte qu'on peut les retrouver jusque sur les **plaines abyssales** dans le cas des **argiles et limons fins** : on observe donc un **granoclassement latéral** (*même si ce point est à nuancer avec les aspects suivants*).

β. Dans les écoulements gravitaires (notamment les courants de turbidité) : un granoclassement vertical (cas de la séquence de Bouma) et horizontal

- Dans les **écoulements gravitaires** et particulièrement les **courants de turbidité** (que l'on retrouve dans le **fond des lacs à forte pente** ou surtout au niveau du **glacis continental**), on observe un **double granoclassement** :
 - Un **granoclassement latéral**, en lien avec l'**étalement des sédiments fins** par rapport aux **sédiments plus gros et plus lourds** qui parcourent une **distance plus faible**.
 - Un **granoclassement vertical**, montrant des séquences où les **dépôts sableux** (plus lourds) se déposent **avant les dépôts silteux et argileux** (plus fins et légers) (figure 54).



▲ FIGURE [36]. Principaux environnements de dépôt de la sédimentation détritique marine (rappels). D'après BEAUX et al. (2011).



La séquence de Bouma (d'après Cojan et coll., 2003).

Le litage horizontal de traction (niveau sableux) correspond à une vitesse de courant plus importante que pour les rides asymétriques (voir Fig. 8-8). Le litage horizontal de décantation (silt et argile) se forme lorsque l'écoulement est passé (milieu calme).

▲ FIGURE 54. La séquence de BOUMA, séquence théorique des dépôts turbiditiques. D'après JAUJARD (2015).

On appelle **turbidites** les **roches montrant des dépôts dus à des courants de turbidité**. La **séquence de BOUMA** est une **séquence élémentaire proposée en 1962 pour décrire l'organisation typique de dépôts turbiditiques**.

y. Une absence de granoclassement des dépôts glaciaires

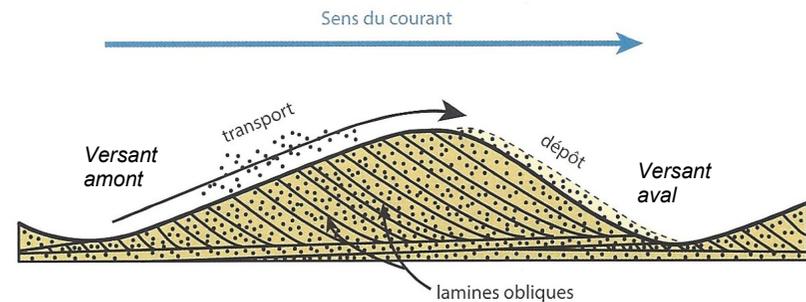
- D'une manière générale, les **dépôts glaciaires**, qu'ils soient **continentaux** ou **océaniques**, ne sont **pas granoclassés**.

c. Un lien entre hydrodynamisme et répartition géométrique des dépôts : les rides de courants (*ripple marks*)

- On appelle **rides de courants** (*ripple marks*) des **figures sédimentaires formées au fond de l'eau en présence de courants donnés**.

a. En présence de courants unidirectionnels : des rides asymétriques ou des antidunes à litage oblique

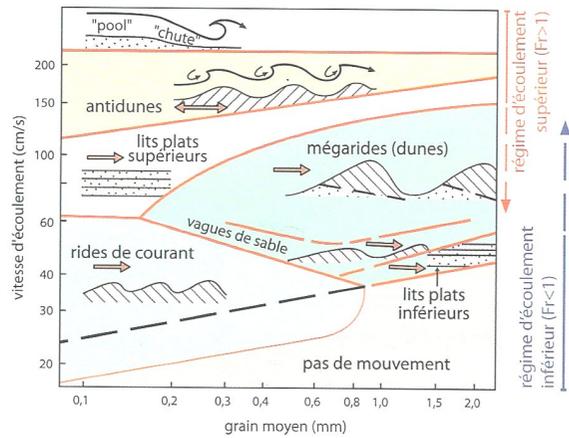
- Les **rides asymétriques** (figure 55) sont des **rides de courants asymétriques à litage oblique et parallèle où le versant amont (face au courant) est le plus grand** ; elles traduisent fondamentalement un **écoulement unidirectionnel** (ex. courant fluvial...).



Formation d'une ride de courant (d'après Cojan et coll., 2003).

▲ FIGURE 55. Organisation et fonctionnement d'une ride asymétrique. D'après JAUJARD (2015).

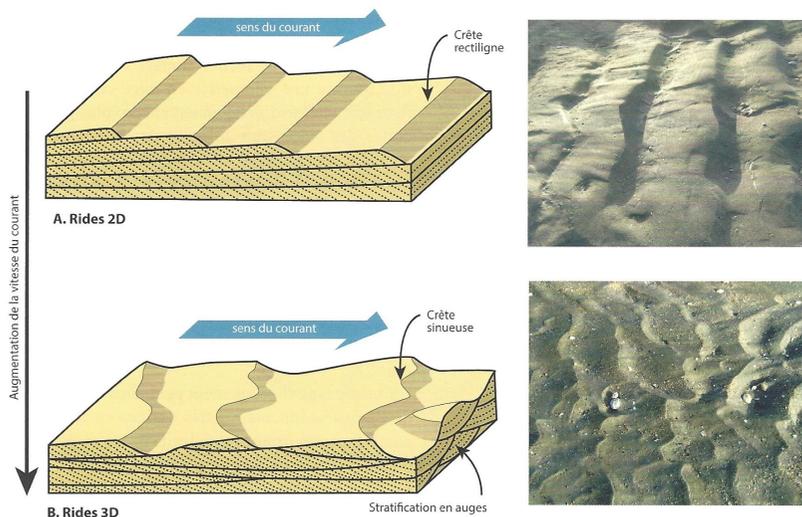
- **Le type de rides formées et l'orientation des lamines sont fonction de la taille des grains et de la vitesse moyenne d'écoulement**, ce dont rend compte le **diagramme d'ALLEN** (figure 56).
- On notera que :
 - Les **régimes d'écoulements faible** (dits « inférieurs ») induisent des **dunes asymétriques** dont la **taille** dépend de la **taille des grains**.
 - Les **régimes d'écoulements élevés** (dits « supérieurs ») induisent des **antidunes** qui sont des **structures quasi-symétriques où les laminations sont dans le même sens que le sens du courant, en lien avec un léger reflux sur la face amont**.
 - Les **zones de transitions** induisent des **lits plats**.



Domaines des différentes structures sédimentaires en fonction de la vitesse du courant et de la granulométrie du sédiment

▲ FIGURE 56. **Diagramme d'ALLEN**. D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013). [Fr : nombre de FROUDE]

β. Un impact de l'énergie de l'écoulement : rides 2D (stratifications parallèles) vs. rides 3D (stratifications en auge)



Écoulement unidirectionnel et Figures sédimentaires (d'après Harms *et al.*, 1975).

- A. Rides asymétriques à crêtes rectilignes (rides 2D), la photographie montre des rides 2D en baie du Mont Saint-Michel (la distance entre deux crêtes est d'environ 10 cm).
- B. Rides asymétriques à crêtes sinusoïdales (rides 3D), la photo montre des rides 3D en baie du Mont Saint-Michel (la distance entre deux crêtes est d'environ 10 cm).

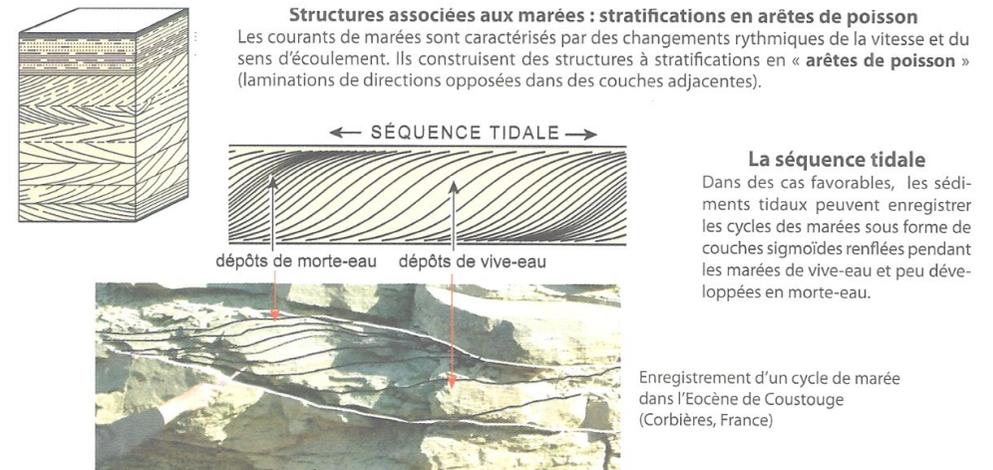
▲ FIGURE 57. **Rides 2D, rides 3D**. D'après JAUJARD (2015).

- Quand la **vitesse augmente**, généralement l'écoulement laminaire devient plus **turbulent** et on observe une transition entre (figure 57) :
 - Des **rides de bas régime énergétique à laminations (en coupe perpendiculaire au sens du courant) parallèles, et à crête rectiligne** : ce sont les **rides 2D** (2 dimensions).
 - Des **rides de fort régime énergétique à laminations (en coupe perpendiculaire au sens du courant) en auge, et à crête sinueuse** : ce sont les **rides 3D** (3 dimensions).

γ. Sous l'effet des marées : des rides asymétriques à litage entrecroisé (= en arêtes de poisson)

- Le **courant de montée de la marée (flot)** comme le **courant de descente de la marée (jusant)** sont tous deux des **courants unidirectionnels** tendant à former des **rides asymétriques**.
- Toutefois, comme ils sont dans un sens opposé, ils forment des rides opposées qui, lorsqu'elles se superposent, présentent des **laminations entrecroisées (= en arêtes de poisson)** (figure 58).

L'explication de ces structures géométriques, en réalité en lien avec plusieurs cycles successifs de marée, n'est pas évidente.



Structures associées aux marées : stratifications en arêtes de poisson
Les courants de marées sont caractérisés par des changements rythmiques de la vitesse et du sens d'écoulement. Ils construisent des structures à stratifications en « arêtes de poisson » (laminations de directions opposées dans des couches adjacentes).

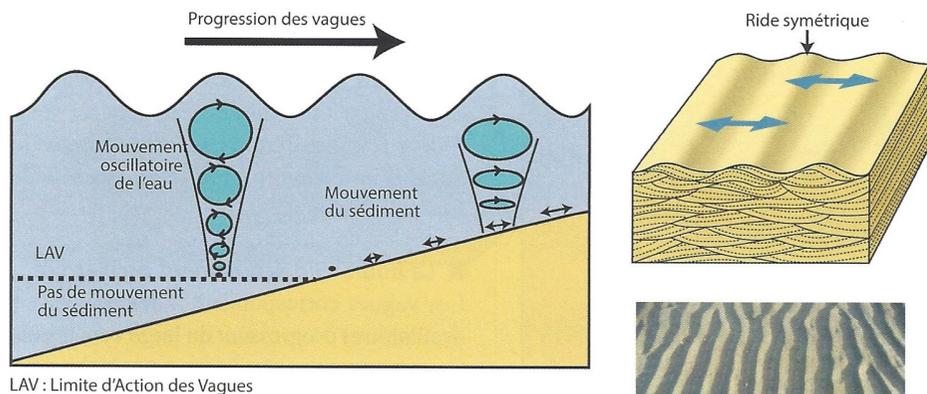
La séquence tidale
Dans des cas favorables, les sédiments tidaux peuvent enregistrer les cycles des marées sous forme de couches sigmoïdes renflées pendant les marées de vive-eau et peu développées en morte-eau.

Enregistrement d'un cycle de marée dans l'Eocène de Coustouge (Corbières, France)

▲ FIGURE 58. **Stratifications entrecroisées (d'origine tidale)**. D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

δ. Sous l'effet des vagues : des rides symétriques

- Lorsque c'est l'effet des **vagues** qui **prédomine** dans un lieu, le **mouvement oscillatoire** imprimé aux **grains** implique la formation de **rides symétriques** montrant des **laminations en auge** (figure 59).



LAV : Limite d'Action des Vagues

Les rides de vagues (d'après Harms, 1975).

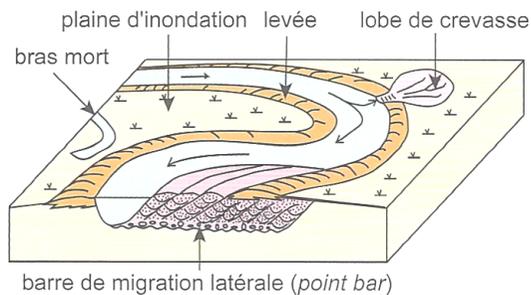


20 cm

▲ FIGURE 59. Rides symétriques (rides de vagues). D'après JAUJARD (2015).

ε. Dans les chenaux à méandre : une barre de migration latérale

- Dans les chenaux en méandre, on trouve une **barre de migration latérale** (figure 60) qui est une **superposition oblique de dépôts alluvionnaires granoclassés verticalement**.



▲ FIGURE 60. Figure sédimentaire de méandre : la barre de migration latérale. D'après LAGABRIELLE et al. (2013).

d. D'autres indicateurs mécaniques : les figures d'érosion et d'impact

- On peut trouver en **surface du sédiment** (figure 61) :
 - Des **figures d'érosion** comme :
 - Les **figures en croissant** (*crescent marks*) qui sont des **marques dues à la déflexion du courant en deux branches suite à la rencontre d'un obstacle**.
 - Les **figures en flûte** (*flute casts*) qui sont des **affouillements du fond sédimentaire par des vortex liés aux courants turbulents**.

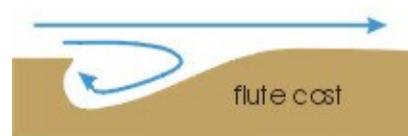
- Les **marques de ruissellement** (*rill marks*) qui sont des **figures ayant l'allure de micro-rivières (de l'ordre du mm au cm) observables lors du retrait des eaux sur les plages**.
- Des **traces d'impact d'objets**, emportés ou non par le **courant** comme dans le cas des **figures de traction** (*groove mark*), où **un objet a rainuré le sédiment**, ou des **figures d'impact** (*tool marks*), où **un objet a impacté le sédiment**.
- Des **gouttes de pluie** (*rain drops*) formant de petits **cratères elliptiques** ;
- Des **fentes de dessiccation**, **craquelures polygonales typiques de sédiments argileux ayant subi une intense déshydratation** ;
- Des **empreintes de cristaux**...



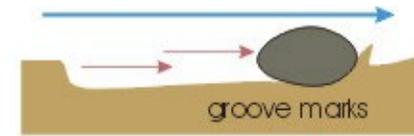
Crescent marks

Flute casts

Rill marks



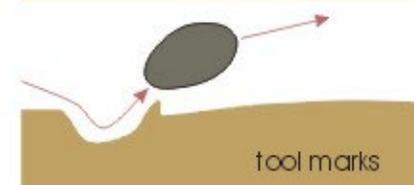
flute cast



groove marks



figure en croissant



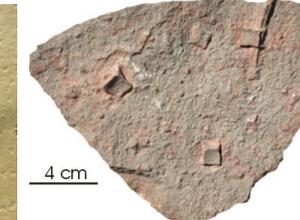
tool marks



Fentes de dessiccation



Gouttes de pluie

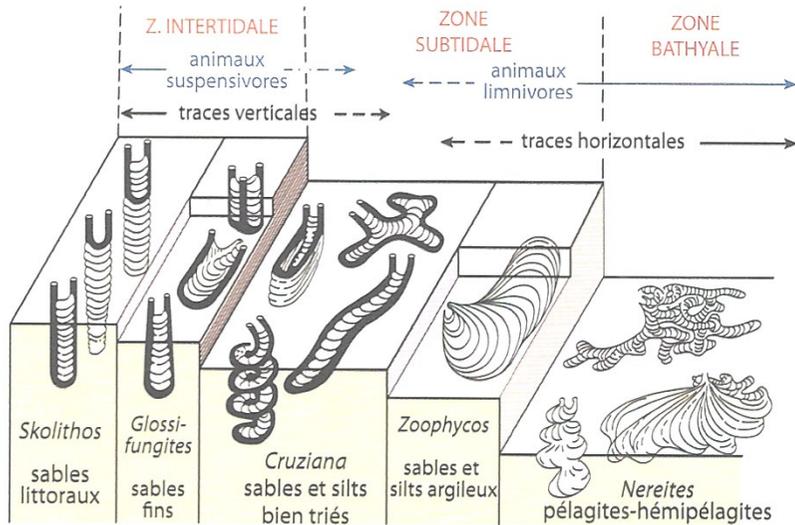


Traces de cristaux (halite) dans un grès

▲ FIGURE 61. Figures sédimentaires de surface variées. D'après BOULVAIN (2018)
La flèche bleue indique le sens du courant.

e. Les traces d'activité biologique comme les fossiles et les ichnofossiles

- Enfin, on peut trouver des **traces biologiques** comme :
 - Des **fossiles**, **restes d'organismes** ou de **squelettes d'organismes** (ou leurs **empreintes**).
 - Des **ichnofossiles**, **traces fossilisées de l'activité d'organismes** (souvent **animaux**) : **traces de locomotion**, de **remaniement du sédiment** (**bioturbation**), de **terriers**...
- Dans le cadre d'une **reconstitution d'un paléoenvironnement**, ces indices peuvent permettre une **zonation bathymétrique des dépôts** (figure 62).

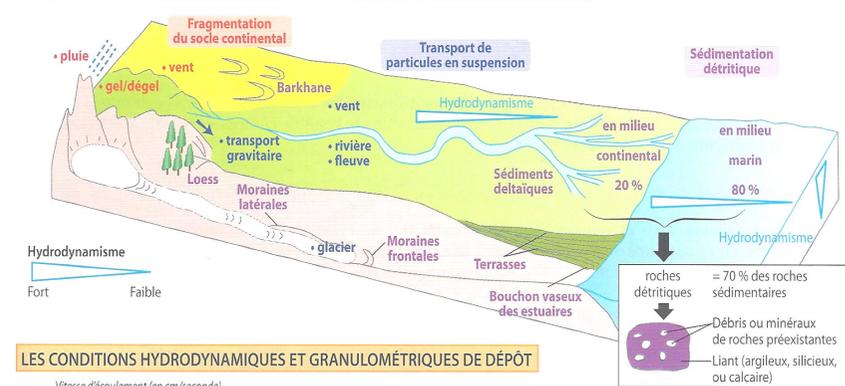


▲ FIGURE 62. **Quelques ichnofaciès indicateurs de la bathymétrie.**
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

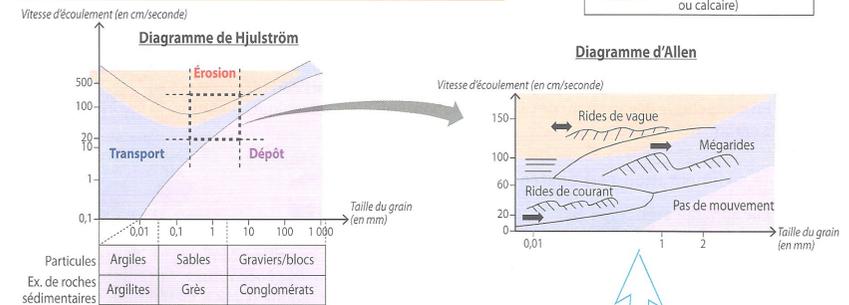
3. Bilan : vue d'ensemble de la sédimentation détritique

- Voir la figure 63.

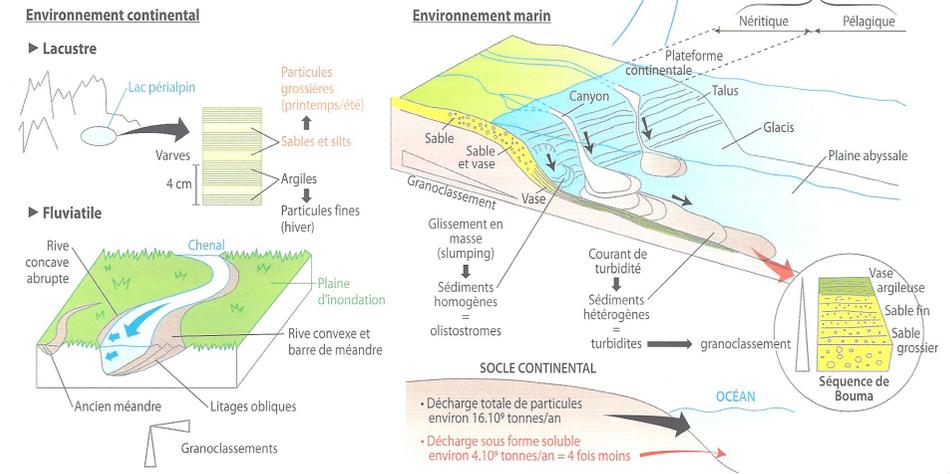
LES ENVIRONNEMENTS HYDRODYNAMIQUES DE LA SÉDIMENTATION DÉTRITIQUE



LES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES ET GRANULOMÉTRIQUES DE DÉPÔT



LES STRUCTURES ET FIGURES SÉDIMENTAIRES



▲ FIGURE 63. **La sédimentation détritique : une vue d'ensemble.**
D'après BORDI *et al.* (2018)

4. La transformation des sédiments en roches détritiques : quelques données sur la diagenèse détritique (diagramme de STRAKHOV, 1969)

- On appelle **diagenèse** l'ensemble des processus qui assurent la transformation d'un dépôt sédimentaire en roche sédimentaire cohérente lors de leur enfouissement.
- Plusieurs processus, à la fois successifs et concomitants, caractérisent la diagenèse. Le diagramme de STRAKHOV (1969) (figure 64) replace ces processus en lien avec le degré d'enfouissement des sédiments.

a. La dégradation de matière organique

- L'activité aérobie puis anaérobie de communautés bactériennes successives assure progressivement la dégradation de la matière organique en composés volatils (notamment du CO₂).

b. La formation de nouveaux minéraux (authigenèse)

- L'authigenèse est la cristallisation d'un minéral néoformé au sein d'une roche sédimentaire sans ajout/retrait de matière au sein de la roche.
Ex. formation de pyrite par réaction entre des sulfures et des ions fer.

c. La cimentation

- La cimentation est la liaison des sédiments entre eux.
- Celle-ci peut être permise par :
 - Un ciment, liant cristallisant lors de la diagenèse et donc postérieure au dépôt (ex. quartz, calcite...).
 - Et/ou une matrice, liant mis en place lors du dépôt et constitué de particules plus fines que les clastes les plus gros (ex. argiles ou boue carbonatée).

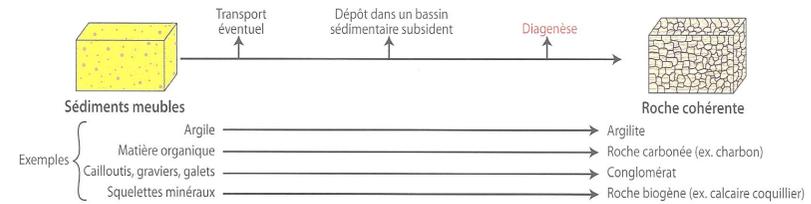
d. La compaction (mécanique et chimique)

- L'accumulation des sédiments induit une augmentation du poids au-dessus d'un dépôt donné, ce qui aboutit à sa compaction d'où une diminution progressive de la porosité et une expulsion des fluides.
- La compaction comprend deux dimensions :
 - Une dimension mécanique, due à l'accumulation de sédiments sus-jacents ;
 - Une dimension chimique, due à la dissolution et la recristallisation de certains minéraux (comme le quartz), notamment en bordures de grains.

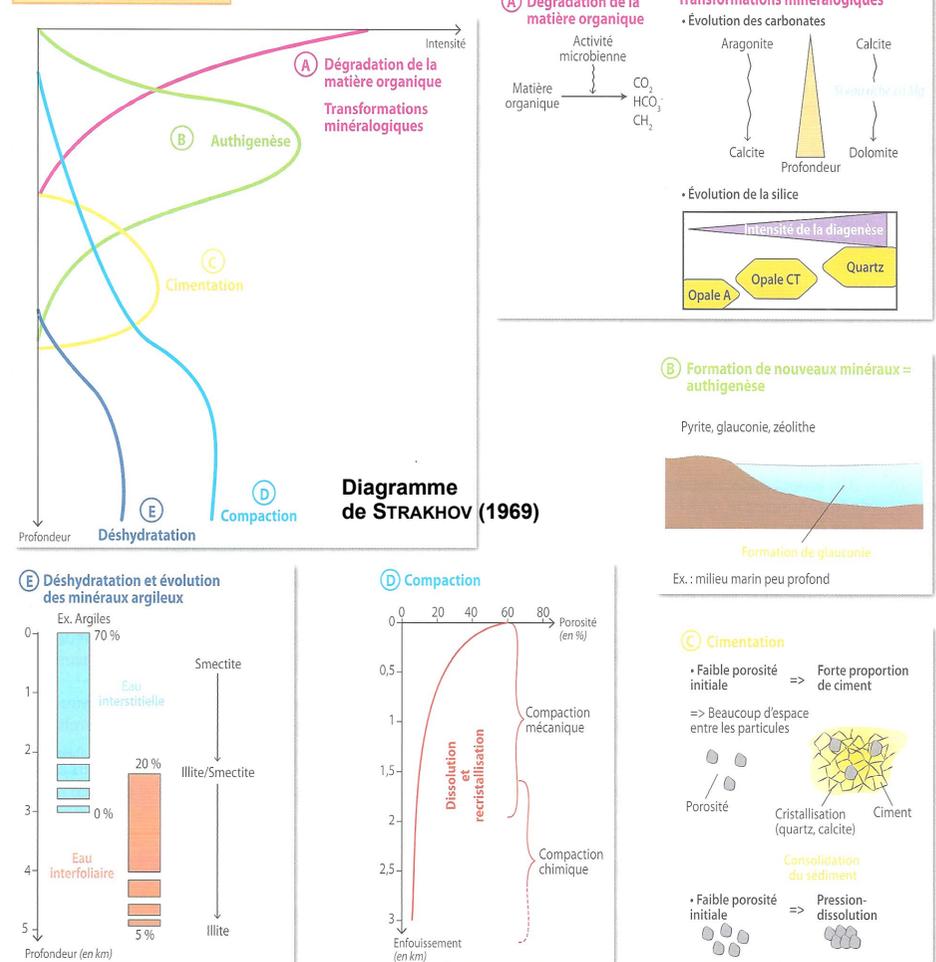
e. La déshydratation

- Associée à la compaction (ainsi qu'à l'augmentation de température) due(s) à l'enfouissement, on tend à observer une expulsion des fluides (eau, gaz...) au cours de la diagenèse.

LA DIAGENÈSE = TRANSFORMATION DES SÉDIMENTS EN ROCHES DANS DES BASSINS SÉDIMENTAIRES SUBSIDENTS



LES ÉTAPES DE LA DIAGENÈSE



▲ FIGURE 64. La diagenèse (détritique) : une vue d'ensemble. D'après BORDI et al. (2018)

B. Le devenir des ions : la lignée ionique (chimique et biochimique)

- On peut parler de **lignée ionique** pour désigner **les ions en solution (issus de l'altération des roches) et leur précipitation, par voie chimique ou biogène**.
Certains roches un peu anecdotiques (silex siliceux, phosphorites...) non abordées par le programme ne seront pas évoquées.

1. La lignée biogène siliceuse

- Les **roches siliceuses biogènes** se forment essentiellement en milieu océanique, malgré la **sous-saturation de l'eau en silice**.
- On peut noter que **trois ensembles d'organismes** produisent des **boues siliceuses** qui s'accumulent sur le **fond des océans** :
 - Les **Radiolaires**, produisant des **radiolarites** ;
 - Les **Diatomées**, produisant des **diatomites** ;

Ces organismes **planctoniques** se trouvent **partout**, y compris en **milieu pélagique** où leur **contribution à la sédimentation océanique** est majeure (cf. I-C).

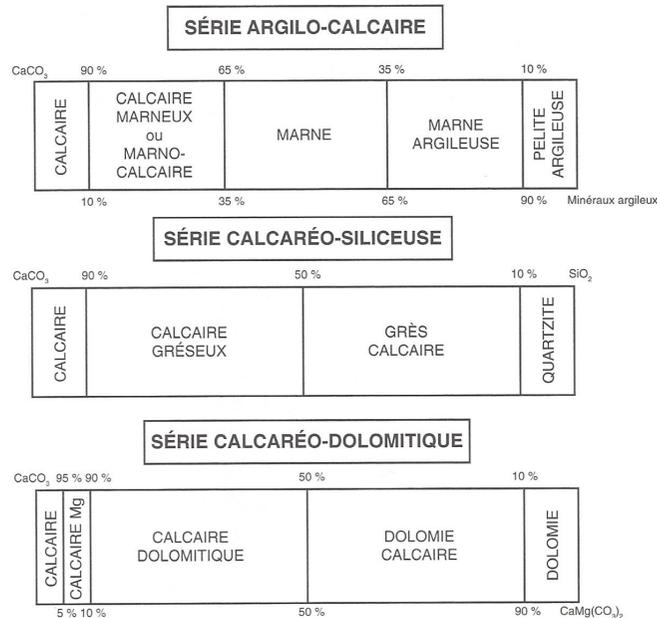
- Les **Spongiaires**, produisant des **spiculites** (les **Éponges** possédant un squelette formé de **spicules calcaires ou siliceux**).

Ce sont des **organismes benthiques** (= fixés) surtout **littoraux** mais on en trouve à **toutes les profondeurs**.

2. La lignée carbonatée (très largement biogène)

- Les **roches carbonatées biogènes** se forment quasi-exclusivement en **milieu océanique**.

a. Panorama de la diversité chimique des roches carbonatées



▲ FIGURE 65. Séries continues de roches sédimentaires contenant deux phases.
D'après EMMANUEL *et al.* (2007).

- On appelle **roches carbonatées** les **roches dont la base constitutive est le carbonate de calcium CaCO₃ (calcite ou aragonite)**.
- Les **roches qui en comprennent une majorité** s'appellent des **calcaires**.
- Les **roches carbonatées** sont **rarement pures** et peuvent contenir (figure 65) :
 - Une **phase argileuse**.

Les **roches constituées dans des proportions semblables d'argiles et de carbonate de calcium** s'appellent des **marne**.

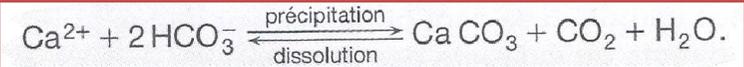
- Une **phase sableuse (siliceuse)**.
- Une **phase dolomitique** ; la **dolomite** est un **minéral de formule (CaMg(CO₃)₂)**.

Les **roches carbonatées qui comprennent plus de 50 % de dolomite** s'appellent des **dolomies**.

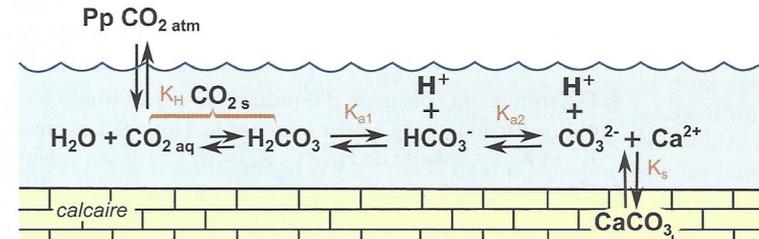
b. Le système carbonates et la (bio)précipitation du carbonate de calcium

a. Un équilibre entre dioxyde de carbone / ions hydrogénocarbonates et carbonates

- L'**essentiel des ions carbonates** et du **calcium** présent dans les **eaux** provient de la **dissolution de roches carbonatées**, en milieu continental ou océanique.
- La **réaction de précipitation** ou de **bioprécipitation** du **carbonate de calcium** est la suivante :



- Dans le détail, cette **réaction implique plusieurs réactions** dont la **formation d'ions bicarbonates (HCO₃⁻) et d'acide carbonique H₂CO₃** (figure 66).
Ces aspects sont repris dans le **chapitre 25 sur le cycle du carbone**.



Les divers équilibres du système des carbonates.

▲ FIGURE 66. Les réactions chimiques en jeu dans le système des carbonates.
D'après PEYCRU *et al.* (2015).

β. Une très faible précipitation chimique et une très large bioprécipitation

- On observe une **précipitation purement chimique** des **carbonates** dans deux cas seulement (et encore... certains géologues pensent que des organismes vivants pourraient peut-être participer) :
 - Dans les **paysages karstiques**, au niveau des **stalagmites** et **stalagmites** où l'équilibre peut être très localement déplacé en faveur de la précipitation plutôt que de la dissolution.

Revoir le chapitre 23 (Altération continentale)
 - Dans les **environnements de forte évaporation**, par exemple en **contexte évaporitique** (voir **point 3**) où l'on trouve des **calcaires lithographiques**.

Un débat existe pour connaître l'origine des **oolithes, petites structures (> 2 mm) calcaires sphériques laminées qui se forment dans les environnements marins chauds, peu profonds et agités.**

On a longtemps pensé que ce milieu, favorable à la **concentration des carbonates**, en favorisait la **précipitation chimique** mais... la présence de **biofilms bactériens autour des oolithes** et la possibilité d'en **reproduire expérimentalement** avec des **Bactéries** font de plus en plus penser à une **origine en partie biologique...**

- Le reste de la **formation des carbonates** (peut-être 99 % ?) est dû à des **organismes qui bioprécipitent le carbonate de calcium**. Il paraît difficile d'en faire un **catalogue complet** mais on citera **quelques exemples** (tableau III).
- On notera que ces **organismes** se trouvent :
 - En **eaux douces**, même s'ils sont anecdotiques ;
 - En **eaux marines** majoritairement.

TABLEAU III. Quelques organismes bio-précipiteurs de carbonates.

Document J. SEGARRA (TB2, Lycée P.-G. de Gennes, Paris 13)

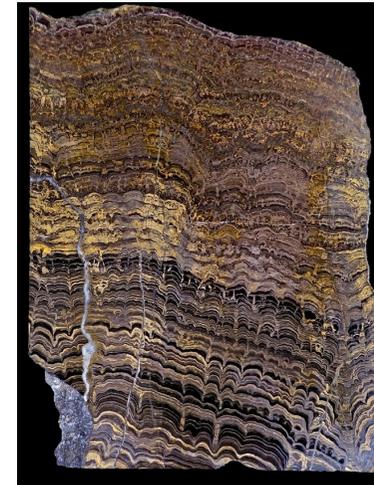
	Aragonite	Calcite	Aragonite et Calcite
Mollusques			
céphalopodes	X		
gastéropodes	X		
bivalves	X		X
Coraux scléactiniaires	X		
Foraminifères			
benthiques	=	X	
planctoniques		X	
Coccolithophoridés		X	

Encadré B Les Bactéries et les carbonates

Longtemps négligée, la **carbonatogenèse bactérienne** (**bioprécipitation des carbonates par les Bactéries**) participe probablement bien plus à la **production mondiale de carbonates** qu'on ne l'a pensé.

Les **stromatolithes** sont des **roches connues depuis plusieurs milliards d'années qui se forment encore aujourd'hui par superposition de fines couches sédimentaires ou du CaCO₃ est fréquemment bioprécipité ou biopigé par des Cyanobactéries.**

Les **niveaux sombres** visibles correspondent à des **lamines riches en matières organiques issues de Bactéries mortes.**



▲ **Stromatolithe bolivien.** Wikipédia

γ. Quelques facteurs agissant sur le système carbonates

i. Le dioxyde de carbone CO₂ atmosphérique : un acidifiant défavorisant la précipitation

- Comme nous pouvons le voir sur la **figure 66**, le **CO₂** dissous dans l'eau, en équilibre avec le **CO₂ atmosphérique**, favorise la **dissolution des carbonates** en favorisant l'**acidification** du milieu aquatique.

On ne présente plus le célèbre exemple de **certaines espèces de coraux** qui tendent à disparaître à cause de l'**acidification des océans** qui serait en partie due à la **hausse de la concentration atmosphérique en CO₂**. La **hausse de température des océans** serait aussi en cause.

ii. L'acidification, facteur défavorable à la précipitation

- Lié au point précédent, notons qu'une **baisse du pH** défavorise la **précipitation**.

iii. La température, facteur défavorable à la précipitation chimique... mais favorable à la bioprécipitation !

- Nous avons vu, dans le **chapitre 23 (Altération)**, que la **dissolution des carbonates augmente** lorsque la **température augmente**... Pourtant ici, on affirme que de **fortes températures** favorisent la **bioprécipitation** ! En réalité, dans le cas de la **précipitation biochimique**, celle-ci est d'autant plus **efficace** que la **disponibilité en ions carbonates** dans la solution est grande, ce qui est le cas dans les **eaux chaudes** où beaucoup de ces **ions** sont **dissous** !

iv. La hausse de profondeur, facteur défavorable à la précipitation (notions de lysocline et de CCD)

- Comme nous l'avons vu plus haut, lorsque la **profondeur augmente**, la **dissolution des carbonates augmente** en lien avec la **lysocline** et la **CCD**.

v. Les êtres vivants : un effet variable mais une contribution globale décisive à la précipitation biochimique

- Certains êtres vivants ont une **activité altérative des roches carbonatées : bactéries productrices d'humus, racines** (qui acidifient)...
- Pour autant, comme nous l'avons souligné, les **êtres vivants** restent l'**agent principal** de production de **matière carbonatée**.

c. La classification des roches carbonatées : classifications de FOLK (1959) et DUNHAM (1962)

- Les **deux classifications** sont en réalité **complémentaires** et souvent utilisées en **association**.

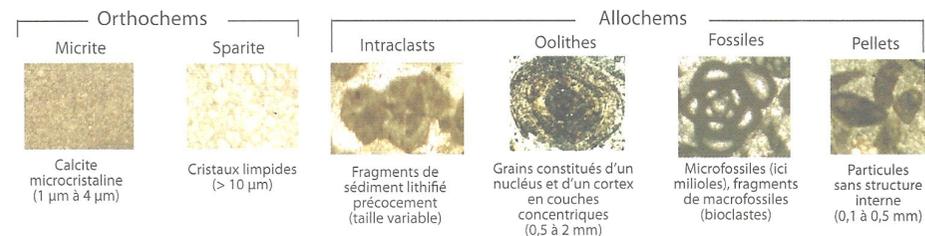
α. Une classification fondée sur la nature des éléments figurés et de la phase de liaison (Folk, 1959) [pour information]

- La **classification de FOLK (1959)** (tableaux IV-V) est fondée sur :
 - La **proportion de grains carbonatés** nommés **allochems**, qui peuvent être :
 - Des **fossiles**, ou **fragments de fossiles (bioclastes)** ;
 - Des **oïdes**, **grains ovoïdes** où du **carbonate de calcium a crû à partir d'un noyau qui peut être non carbonaté** ;
 - Des **péloïdes**, **particules cristallines sans structure interne (par exemple : déjections d'organismes psammivores)**.
 - La **nature de la phase de liaison** nommée les **orthochems** qui peuvent être :
 - Une **matrice de calcite microcristalline** qu'on nomme **micrite**.
 - Un **ciment de calcite formé de cristaux plus limpides** qu'on nomme **sparite**.

Rappel sur le vocabulaire de la phase de liaison

- La **matrice** est un **dépôt fin contemporain du dépôt des gros grains**.
- Le **ciment** est un **dépôt postérieur au dépôt des grains, réalisé lors de la diagenèse**.

▼ **TABLEAU IV. Classification de FOLK (1959).**
D'après RENARD *et al.* (2018)



Le nom de la roche est ensuite constitué d'un préfixe venant de l'allochem dominant et d'un suffixe caractérisant l'orthochem. Exemple : oolithes + sparite = oosparite ; pellets + micrite = pelmicrite

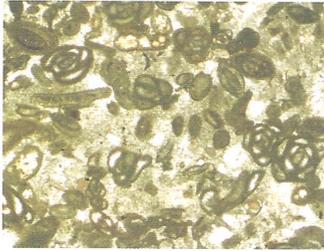
		CALCAIRES & DOLOMIES PRIMAIRES				
		> 10 % Allochems		< 10 % Allochems		
		Sparite > Micrite	Micrite > Sparite	1 à 10 % Allochems	< 1 % Allochems	Bioherme
Rapport Fossiles sur Pellets	> 25 % Intraclastes	Intrasparite	Intramicroite	Micrite à intraclastes	Micrite	
	> 25 % Oolithes	Oosparite	Oomicrite	Micrite oolithique		
	R > 3	Biosparite	Biomicroite	Micrite fossilifère		
	3 > R > 1	Biopelsparite	Biopelmicroite			
	R < 1	Pelsparite	Pelmicroite	Micrite à pellets		
DOLOMIES SECONDAIRES						
		Présence de fantômes d'allochems		Absence de fantômes d'allochems		
> 25 % Intraclastes		Dolomite à intraclastes		Dolomite cristalline		
> 25 % Oolithes		Dolomite oolithique				
Rapport Fossiles sur Pellets	R > 3	Dolomite fossilifère				

▼ **TABLEAU V. Classification de FOLK (1959) simplifiée.**
D'après BEAUX *et al.* (2011)

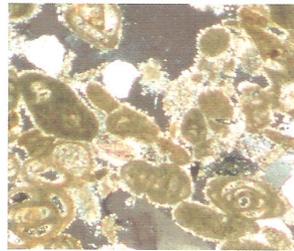
Éléments figurés dominants	Matrice dominante (micrite)	Ciment dominant (sparite)	Construction
bioclastes	biomicrite	biosparite	biolithite
oolithes	oomicrite	oosparite	
péloïdes	pelmicroite	pelsparite	

β. Une classification fondée sur la proportion de grains, leur disposition et la présence ou l'absence de boue carbonatée (DUNHAM, 1963) : un indicateur d'hydrodynamisme

La classification de Dunham correspond à une approche différente de celle de Folk : la nature des grains carbonatés n'est plus prise en compte. Ils sont considérés comme de simples particules sédimentaires et ce qui importe c'est l'architecture définie par les rapports entre les grains (grains jointifs ou non) et la présence ou non de boue carbonatée [(bio)précipitation de taille inférieure à 10 µm].

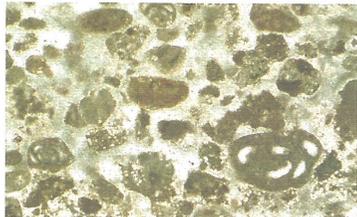


Packstone/wackestone à milioles et pellets Lutétien moyen du Bassin de Paris

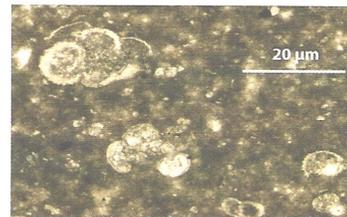


Grainstone à milioles et pellets Lutétien moyen du Bassin de Paris

DISPOSITION DES GRAINS	FRÉQUENCE DES GRAINS	PRÉSENCE DE BOUE CARBONATÉE	ABSENCE DE BOUE CARBONATÉE
JOINTIFS	> 10 %	PACKSTONE	GRAINSTONE
NON JOINTIFS	< 10 %	WACKSTONE	
		MUDSTONE	



Wackestone à pellets et milioles Marnes et Caillasses (Lutétien Sup., Bassin de Paris)



Mudstone à foraminifères planctonique Scaglia Rossa, Tertiaire inférieur (Gubbio, Italie)

Deux autres catégories complètent la classification : les **boundstones** pour les roches construites (récifs et monticules biogéniques) et les **calcaires cristallins** (la recristallisation a totalement effacé la texture sédimentaire). Pour les boundstones, une classification dérivée, plus détaillée, a été proposée par Embry et Klovan (1971, fiche 61). L'intérêt majeur de la classification de Dunham est qu'elle positionne les microfaciès en termes d'énergie du milieu (fiche 62).



▲ FIGURE 67. Classification de DUNHAM (1963). D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

▼ TABLEAU VI. Classification de DUNHAM (1963) simplifiée. D'après DENEUD *et al.* (2013)

Critères d'identification des roches			Nom de la roche
Texture sédimentaire non reconnaissable			Calcaire cristallin
Constituants liés au cours du dépôt (calcaire bioconstruits)			Boundstone
Constituants non liés au cours du dépôt	Pas de boue carbonatée		Grainstone
	Présence de boue carbonatée	Grains jointifs	Packstone
		Grains non jointifs	Fréquence des grains > 10 %
	Fréquence des grains < 10 %		Mudstone

Cette classification permet de caractériser le milieu de dépôt. Par exemple, la présence de boue carbonatée indique un dépôt dans des eaux calmes. Ainsi, les *mudstones* et *wackestones* se déposent dans des eaux calmes (milieux profonds ou protégés) tandis que les *grainstones* et les *packstones* se déposent dans des eaux plus agitées (action des vagues). Les *boundstones* sont des roches construites par des êtres vivants : algues, coraux (récifs coralliens) ou bactéries (ex. *stromatholites*).

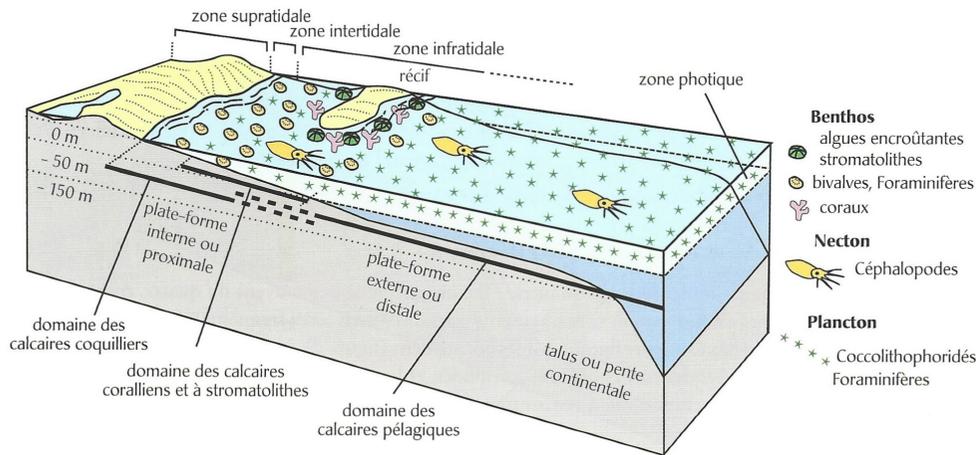
Si plus de 10 % des grains ont une taille supérieure à 2 mm, les roches peuvent être appelées *rudstones* (plutôt que packstone) si les grains sont jointifs et *floatstones* (plutôt que wackestones) lorsque les grains ne sont pas jointifs.



- La classification de DUNHAM (1963) (figure 67 + tableau VI) est une classification qui s'attache moins à décrire les constituants mais s'attarde sur leur agencement au moment du dépôt, lequel traduit l'hydrodynamisme du milieu.
- Trois principaux critères sont utilisés :
 - La présence ou l'absence de boue carbonatée (particules chimiques ou biochimiques de taille inférieure à 20 µm) ;
 - La disposition des grains : jointive (*grain supported*) ou non jointive (*mud supported*) ;
 - La proportion de grains (inférieure ou supérieure à 10 %).

d. Les environnements de dépôts carbonatés

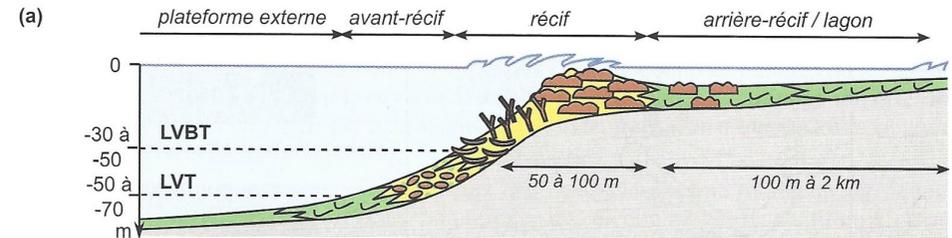
- Revoir la **figure 37** pour une vue d'ensemble.



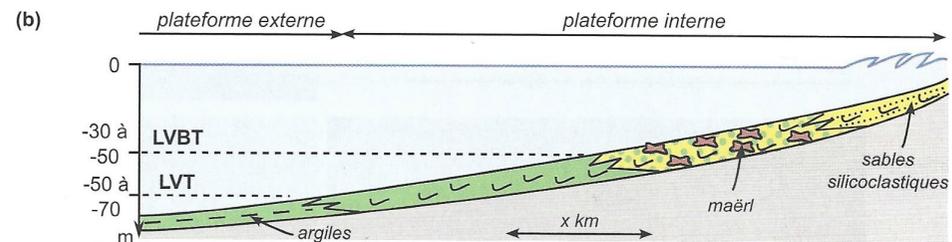
▲ FIGURE [37]. Principaux environnements de dépôt de la sédimentation carbonatée. D'après BEAUX *et al.* (2011).

α. La sédimentation carbonatée récifale et de plateforme : une sédimentation surtout benthique en eaux chaudes largement contrôlée par l'hydrodynamisme

- Les environnements néritiques carbonatés ont déjà été présents dans la **partie I**.
- Dans le cas de la **sédimentation néritique récifale** ou de **plateforme** (figure 68) :
 - On note une **zonation par la profondeur** dans le cas d'une **plateforme ouverte**, en lien avec l'**hydrodynamisme** qui **décroit** avec la **profondeur**.
 - On note une **même zonation** dans le cas de la **sédimentation avant-récif**, pour la même raison, mais, après un **récif**, on trouve dans le **lagon (zone de faible profondeur hydrodynamiquement calme située derrière un récif)**, une **sédimentation semblable à celle des profondeurs**, en lien avec le **faible hydrodynamisme** de la zone.
- On notera que l'**essentiel de la sédimentation carbonatée** est ici le fait d'organismes **benthiques** (= **vivant sur le fond**).



type de roche	mudstone	wackestone / mudstone	grainstone (débris)	boundstone	packstone / wackestone	mudstone / wackestone
organismes	foraminifères planctoniques échinodermes, pectens, algues rouges..		coraux, algues vertes et rouges, mollusques ...		coraux isolés, mollusques, échinodermes, foraminifères benthiques, algues rouges, stromatolithes..	
agitation	faible	moyenne	forte à très forte		variable	faible



type de roche	mudstone	wackestone / mudstone	packstone / grainstone	grainstone
organismes	foraminifères planctoniques, échinodermes, pectens, algues rouges..		mollusques, échinodermes, foraminifères benthiques, algues rouges	
agitation	faible			forte à très forte

Les différents environnements sédimentaires de plates-formes : (a) modèle de plateforme barrée en mer chaude ; (b) modèle de plateforme ouverte en mer tempérée.

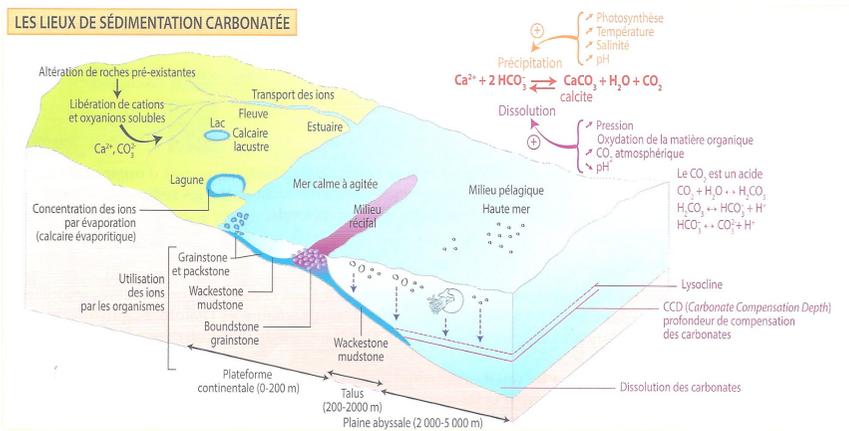
La classification des roches carbonatées selon Dunham (1^{re} ligne des tableaux) est présentée dans la **fiche méthode 9**. LVBT : limite d'action des vagues de beau temps ; LVT : limite d'action des vagues de tempêtes.

▲ FIGURE 68. Environnements néritiques : plateforme barrée et plateforme ouverte. D'après PEYCRU *et al.* (2015).

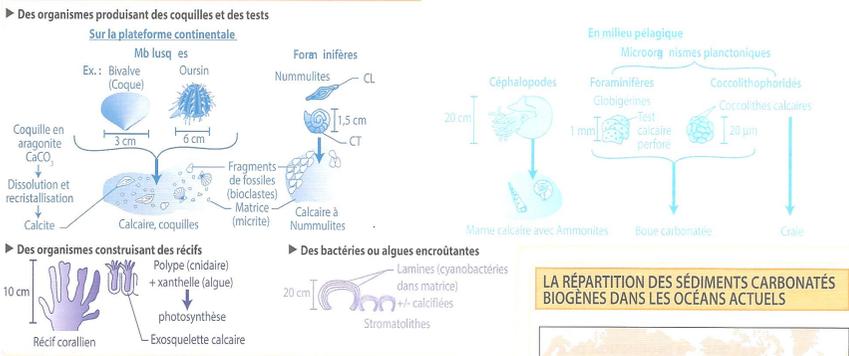
β. La sédimentation carbonatée pélagique, une sédimentation surtout planctonique en eaux chaudes et au-dessus de la CCD

- Tous ces aspects sont développés dans la **partie I-C**.

e. Bilan : vue d'ensemble de la sédimentation carbonatée



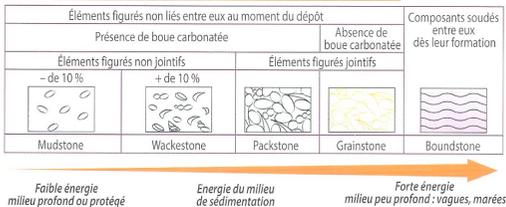
UNE SÉDIMENTATION CARBONATÉE ESSENTIELLEMENT BIOGÈNE



DES CALCAIRES NON BIOGÈNES



LA CLASSIFICATION DE DUNN DES ROCHES CARBONATÉES



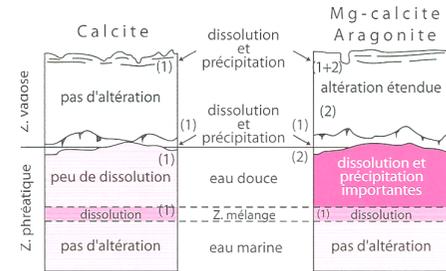
▲ FIGURE 69. La sédimentation carbonatée : vue d'ensemble. D'après BORDI et al. (2018).

f. La diagenèse carbonatée

α. Des processus semblables à la diagenèse détritique : un enfouissement qui induit notamment une compaction, une cimentation et des recristallisations

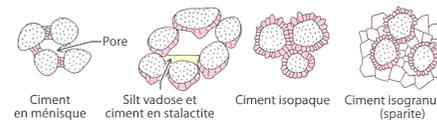
- Comme dans le cas des sédiments détritiques, on peut observer une **compaction (physique et chimique) des sédiments**.
- On peut aussi observer une **liaison par mise en place d'un ciment par circulation de boues carbonatées**.
- On peut observer des **recristallisations de calcite** qui peuvent alors lieu **en milieu aérien (zone vadose)** ou **en milieu aquatique (zone phréatique)** (figure 76).
- Enfin, notons que l'**aragonite** et la **calcite magnésienne** sont **métastables** et ont tendance à **recristalliser en calcite** au cours du temps (figure 76).

C'est un ensemble de processus physiques (compaction) et chimiques (dissolution/recristallisation) qui affectent les sédiments après leur dépôt. La diagenèse est donc en continuum avec la sédimentation (diagenèse précoce) et le métamorphisme auquel elle passe de façon transitionnelle. La diagenèse précoce est principalement le fait de processus biochimiques tandis que la diagenèse tardive correspond à des processus physico-chimiques, plus lents (compaction, transformation minéralogique, au cours de l'enfouissement.



Les différents types de ciments

Les ciments de la diagenèse précoce (fiche 63) sont des marqueurs du paléoenvironnement. Les ciments anisotropes (et les silts carbonatés tapissant le fond des cavités) caractérisent la zone vadose, les ciments isotropes la zone phréatique.



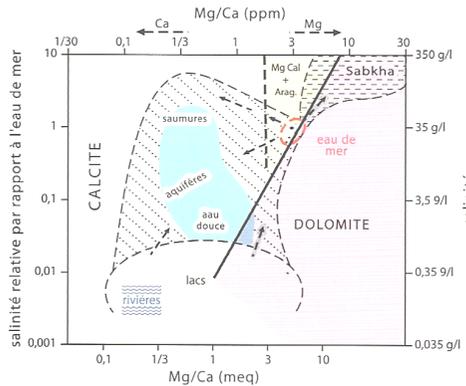
Dans le domaine pélagique, la diagenèse précoce est réduite du fait de l'absence de carbonates métastables (production calcitique) et d'eau douce dans le milieu interstitiel. L'évolution diagénétique, principalement par compaction, peut donc se résumer à la succession : **boues** → **craies** → **calcaires**.

▲ FIGURE 70. La sédimentation carbonatée : vue d'ensemble. D'après LAGABRIELLE et al. (2013).

β. La possibilité d'une dolomitisation ou d'une dédolomitisation

- On appelle **dolomitisation** la **transformation de calcite (ou d'aragonite) en dolomite sous l'effet d'une incorporation d'ions magnésium Mg²⁺** (figure 71).
- Notons que les ions **Mg²⁺**, fortement hydratés, ne précipitent pas directement à partir de l'eau de mer (même si certains organismes peuvent bioprécipiter de la dolomite).

La dolomite ne précipite pas directement à partir de l'eau de mer car la forte hydratation de l'ion Mg rend difficile son incorporation dans un cristal. Elle se forme donc au dépend d'un précurseur calcitique ou aragonitique selon la formule : $2 \text{CaCO}_3 + \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + \text{Ca}^{2+}$
 Cette réaction, qui est commandée par le rapport Mg/Ca du milieu, peut être précoce sous forme de protodolomite à petits cristaux ($\text{Ca}_{55}\text{Mg}_{45}(\text{CO}_3)_{100}$, diagenèse syn-sédimentaire) et faire croire à une origine primaire. Des dolomites tardives, à gros cristaux, se forment au cours de l'enfouissement.

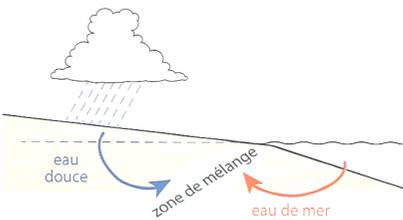


Le domaine de formation des carbonates en fonction de la salinité et du Mg/Ca des eaux
 L'eau de mer correspond aux conditions de formation de l'aragonite et de la calcite Mg, et dans une moindre mesure de la dolomite. Aux faibles salinités, la dolomite peut se former pour des Mg/Ca proches de 1, aux fortes salinités, la formation nécessite des Mg/Ca élevés (5 à 10 dans les sabkhas).

- Les trois conditions de la dolomitisation :
- 1 - Le CaCO_3 est instable et se dissout.
 - 2 - Les solutions sont sursaturées par rapport à la dolomite qui précipite.
 - 3 - Il faut un renouvellement des ions Mg afin que le processus puisse se poursuivre.

Un modèle de dolomite précoce de sursature : la sabkha d'Abu Dhabi (fiche 63)

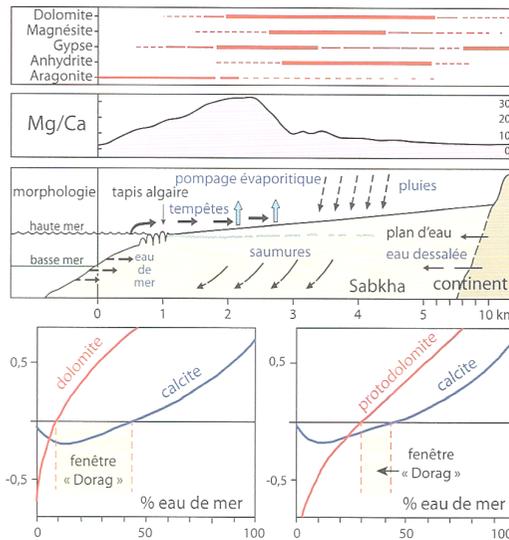
L'association avec les évaporites est bien connue (fiche 54), le modèle de sabkha en est une variante dont l'hydrologie est complexe même si la source du Mg est clairement marine. L'évaporation, la précipitation d'aragonite puis de gypse élèvent le Mg/Ca jusqu'à 35 dans les sédiments ce qui permet la précipitation de protodolomite.



Dolomites de faible salinité
 Le modèle de mélange (Dorag model)

Le fait que des mélanges d'eau douce et de mer soient sursaturés par rapport à la dolomite et sous-saturés par rapport à la calcite et l'aragonite a conduit à différents modèles de dolomitisation par mélange (Dorag signifie « métis » en Persan). Très en vogue dans les années 1980, le modèle Dorag est remis en cause car la fenêtre de dolomitisation pour la protodolomite, forme qui précipite dans la nature, est très réduite (10 % de mélange).

▲ FIGURE 71. La dolomitisation : vue d'ensemble.
 D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).



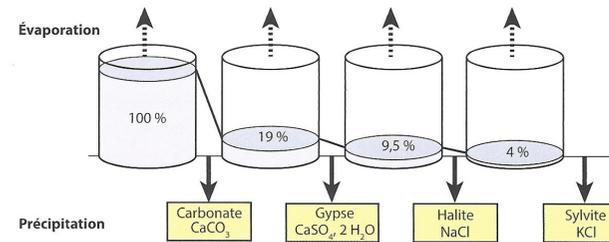
- La **dolomitisation** se réalise dans **trois conditions** :
 - Un contexte de **dissolution du carbonate de calcium CaCO_3** ;
 - Une **sursaturation du milieu en magnésium** (souvent liée à une forte salinité) ;
 - Des **processus alimentant l'eau en magnésium**, assurant la poursuite du processus.
- Notons enfin que, **en surface, la dolomite est instable et les eaux douces (par exemple météoriques) ont tendance à altérer chimiquement la dolomite et emporter les ions Mg^{2+} , avec pour conséquence la formation de calcite résiduelle** : c'est la **dédolomitisation**.

3. La lignée évaporitique : la formation d'évaporites (= roches salines)

a. Des roches variées formées séquentiellement par cristallisation à partir d'eau à forte salinité subissant une évaporation progressive et intense : la séquence évaporitique

- On appelle **évaporites** ou **roches salines** (figure 72) des **roches formées par précipitation d'ions dissous dans des eaux à forte salinité suite à évaporation**.

Il est admis que la **sédimentation évaporitique** est surtout **chimique** et **non biochimique**.



Séquence de cristallisation des évaporites (d'après Caron *et coll.*, 2003).

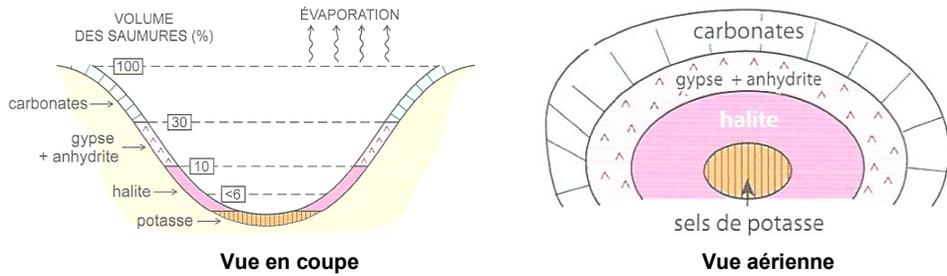
Lors de l'évaporation progressive de l'eau de mer (en bleu), les sels dissous précipitent successivement. La proportion d'eau restante est indiquée en pourcentage.

▲ FIGURE 72. La séquence évaporitique.
 D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

- On note que **la précipitation des minéraux évaporitiques obéit à une séquence de cristallisation à mesure que les eaux se concentrent en ions suite à l'évaporation** : c'est la **séquence évaporitique**.

Calcite → Gypse → Halite → Sylvite

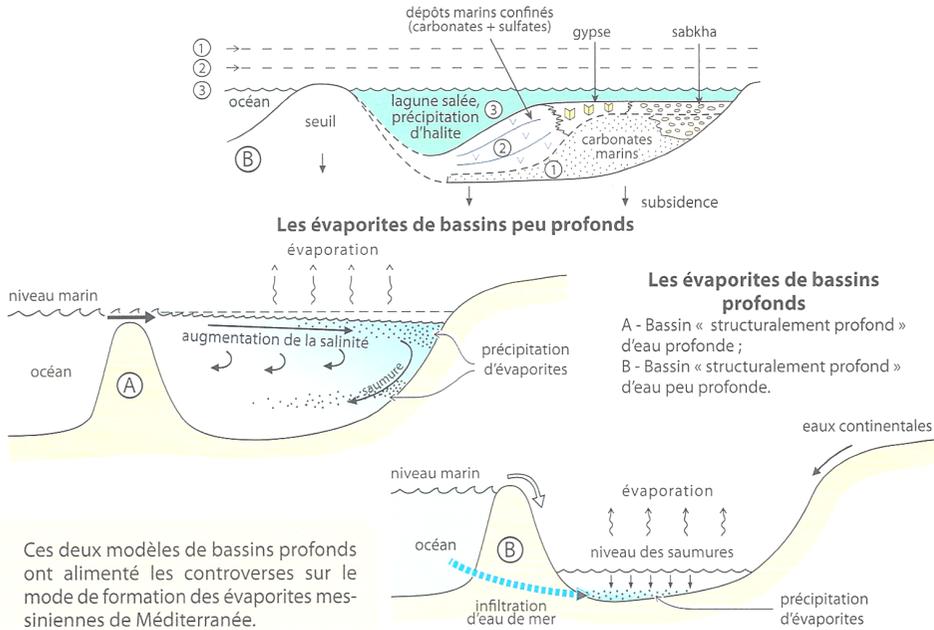
- Dans un **bassin évaporitique**, cette **séquence** se retrouve par la présence de **ceintures de cristallisation** en lien avec les différents temps de la séquence (figures 73-74).



▲ FIGURE 73. Répartition des dépôts dans un bassin évaporitique. D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

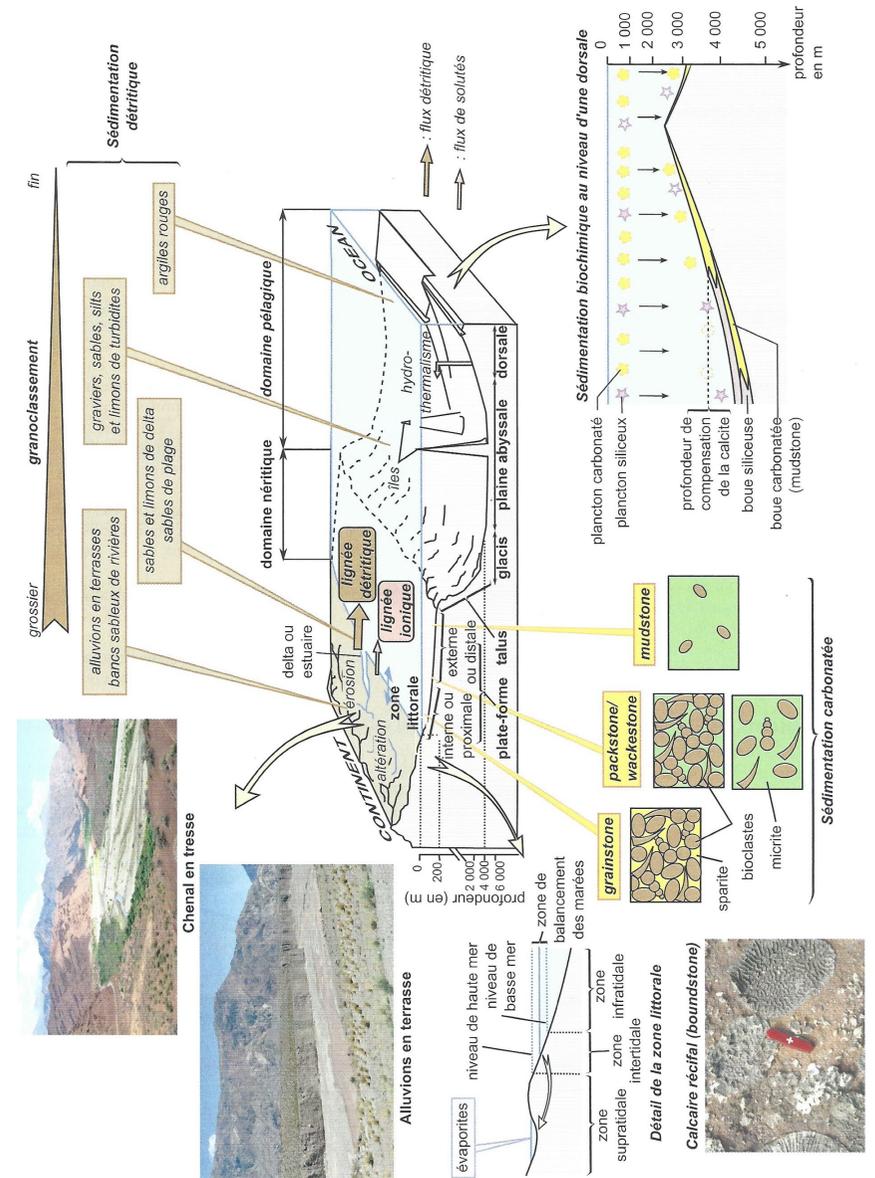
b. Des contextes de dépôt à forte salinité

- On cite comme contextes de dépôts (figure 74) :
 - Des bassins peu profonds avec un contact intermittent avec l'eau de mer (de type lagunes)
 - Des bassins profonds,
 - Soit avec une couche hypersalée sommitale alimentée par l'océan, et une couche profonde (qui se déplace vers le fond par gravité).
 - Soit situés sous le niveau marin et alimentés par infiltrations ou éclaboussures.



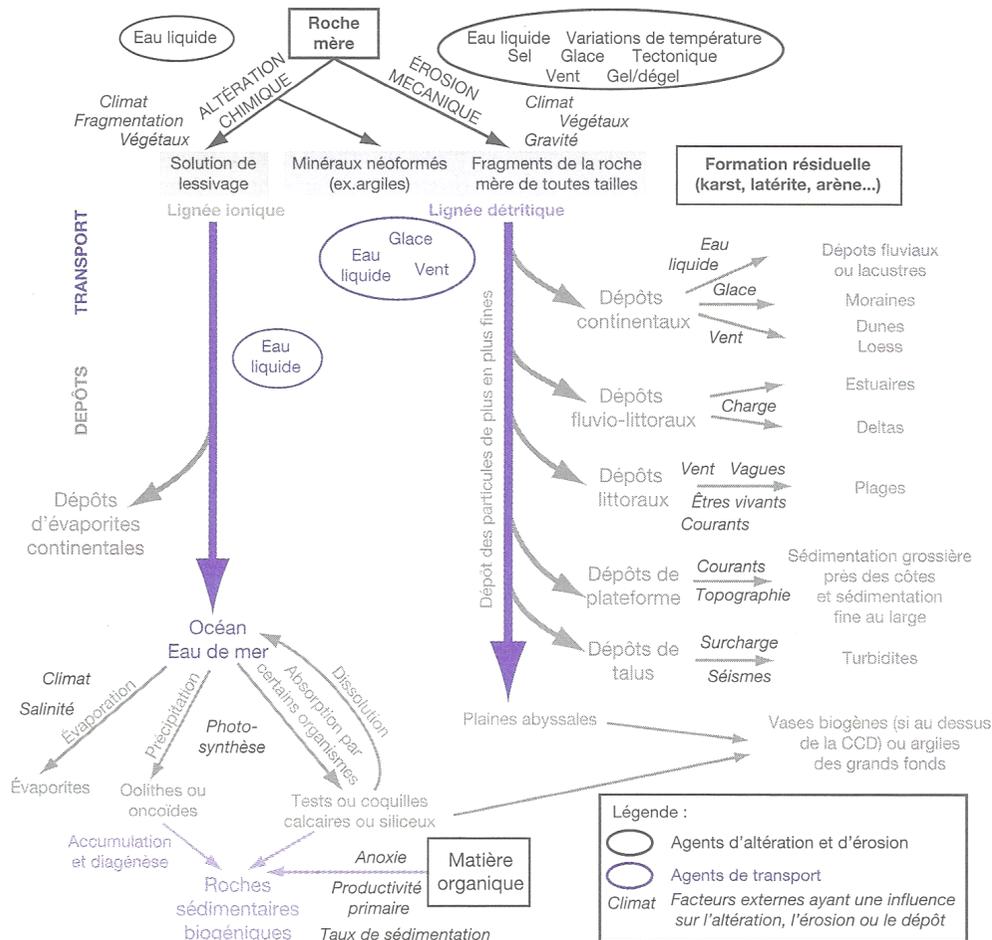
▲ FIGURE 74. Typologie sommaire des bassins évaporitiques. D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

Bilan



▲ FIGURE 75. La sédimentation : vue d'ensemble (hors sédimentation carbonnée). D'après PEYCRU *et al.* (2015)

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes



▲ FIGURE 76. Vue d'ensemble du phénomène sédimentaire.
D'après DENOEUDE et al. (2013)

Il est conseillé de maîtriser les **grandes lignes du plan**
Le plan ne doit pas être perçu comme un carcan figé, ou comme un modèle de plan de dissertation à ré-utiliser en devoir, mais bien comme un **outil d'apprentissage et de structuration des concepts importants**. Vous pouvez en recopier les grandes lignes ou annexer le plan du polycopié directement.

Il est conseillé de réaliser un **lexique des principales définitions**.

Il est conseillé de reproduire les **schémas (et tableaux) majeurs** :

Liste indicative.

° Vue d'ensemble du phénomène sédimentaire

- Transport
- ° **Glacier**
- ° **Transport de particules** : écoulements + suspension / saltation / glissement
- ° Diagramme de **HJULSTRÖM**
- ° Types de **bassins** (schéma d'ensemble)
- ° **Profil d'équilibre**
- [° **Cône de déjection**]
- ° Types de **chenaux** / fonctionnement d'un **méandre**
- ° **Terrasses** étagées et emboîtées
- ° **Estuaire / delta** (+ lagune)
- ° **Zonation océanique bathymétrique**
- [° **Zonation hydrodynamique littorale**]
- ° Environnements de **dépôts détritiques**
- ° Environnements de **dépôts carbonatés**

- **Sédimentation océanique**
- ° **Répartition** des dépôts (à savoir expliquer)
- ° **Lysocline / CCD**
- ° **Dissolution de silice**

- **Sédimentation détritique**
- ° **Classification granulométrique**
- ° **Séquence de BOUMA**
- ° **Ride asymétrique**
- ° Diagramme d'**ALLEN**
- ° Diagramme de **STRAKHOV**

- **Sédimentation carbonatée**
- ° **Équations !**
- ° Classification (simplifiée) de **FOLK**
- ° Classification (simplifiée) de **DUNHAM**
- ° **Répartition des dépôts** simple en contexte **néritique**

- **Sédimentation évaporitique**
- ° **Séquence** de cristallisation
- ° **Répartition des dépôts**
- [° Types de **bassins** concernés ? bof]

Et les **schémas bilans** proposés ici ou là !

Vous devez en outre **savoir / pouvoir** :

- ° **Reconnaître** les principales **roches sédimentaires** vues dans le **TP 6.3**.
- ° **Exploiter** un **log sédimentaire**
- ° **Calculer** un **taux de subsidence**

Références

- ARNDT, N., C. GANINO & S. KESLER (2015). *Ressources minérales. Origine, nature et exploitation*. 2^e édition (1^{er} édition 2010). Dunod, Paris.
- AUBOIN, J., J. DERCOURT & B. LABESSE (1970). *Manuel de travaux pratiques de cartographie. 1^{er} cycle et maîtrise*. Dunod, Paris.
- AUBOIN, J., R. BROUSSE & J.-P. LEHMAN (1978). *Précis de géologie. 2. Paléontologie, stratigraphie*. Dunod (Bordas), Paris, 3^e édition (1^{er} édition 1967).
- BABIN, C. (1991). *Principes de paléontologie*. Armand Colin, Paris.
- BARD, J.-P. (1990). *Microtextures des roches magmatiques et métamorphiques*. Masson, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 1980).
- BEAUX, J.-F. & A. MAGECIER (2012). *Les sciences de la Terre*. Nathan, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 2010).
- BEAUX, J.-F., J.-F. FOGELGESANG, P. AGARD & V. BOUTIN, 2011. *Atlas de Géologie Pétrologie. BCPST 1^{er} et 2^e années*. Dunod, Paris.
- BERNARD, J.-J., D. CONTINI, G. GODET & G. GOHAU (1995). *Le Temps en Géologie. Sciences de la Terre*. Hachette, Paris.
- BIJU-DUVAL, B. (1999). *Géologie sédimentaire. Bassins. Environnements de dépôts. Formation du pétrole*. Technip, Paris, Institut français du pétrole (École du Pétrole et des Moteurs), Rueil-Malmaison (92).
- BISHOP, A. C., W. R. HAMILTON, A. R. WOOLEY (2001). *Guide des minéraux, roches et fossiles*. « Les Guides du naturalistes », Delachaux et Niestlé, Paris, 336 pages.
- BORDI, C., F. SAINTPIERRE (dir.), M. ALGRAIN, R. BOUDJEMAI, H. CLAUCE, O. GUIPPONI & Y. KRAUSS (2018). *Mémento Géologie BCPST 1^{er} et 2^e années*. Vuibert, Paris.
- BORDI, C., F. SAINTPIERRE (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, R. BOUDJEMAI, H. CLAUCE, O. GUIPPONI & Y. KRAUSS (2021). *Mémento Géologie BCPST 1^{er} et 2^e années*. Vuibert, Paris.
- BOTTINELLI, L., A. BRAHIC, L. GOUGUENHEIN, J. RIPERT & J. SERT (1993). *La Terre et l'Univers. Sciences de l'Univers*. Hachette, Paris.
- BOULVAIN, F. (2014), en ligne. Diagenèse carbonatée. *Pétrologie sédimentaire*. Département de Géologie, Université de Liège (B).
URL : <http://www.geolsed.ulg.ac.be/sedim/diagenese.htm> (consultation août 2018)
- BOULVAIN, F. (2017a), en ligne. Éléments de sédimentologie et pétrologie sédimentaire. *Pétrologie sédimentaire*. Département de Géologie, Université de Liège (B).
URL : <http://www.geolsed.ulg.ac.be/sedim/sedimentologie.htm> (consultation août 2018)
- BOULVAIN, F. (2017b), en ligne. Identification microscopique des principaux constituants des roches sédimentaires (notes de travaux pratiques). *Pétrologie sédimentaire*. Département de Géologie, Université de Liège (B).
URL : <http://www.geolsed.ulg.ac.be/TP/TP.htm> (consultation août 2018)
- BOULVAIN, F. (2017c), en ligne. Dynamique des bassins sédimentaires. *Pétrologie sédimentaire*. Département de Géologie, Université de Liège (B).
URL : http://www.geolsed.ulg.ac.be/sedim/dyn_bassins.htm (consultation août 2018)
- BOULVAIN, F. (2018), en ligne. Une introduction aux processus sédimentaires. *Pétrologie sédimentaire*. Département de Géologie, Université de Liège (B).
URL : <http://www.geolsed.ulg.ac.be/processus/processus.htm> (consultation août 2018)
- BOULVAIN, F. & P. DUMONT (non daté), en ligne. Lexique de géologie sédimentaire. *Pétrologie sédimentaire*. Département de Géologie, Université de Liège (B).
URL : <http://www.geolsed.ulg.ac.be/sedim/lexique.htm> (consultation août 2018)
- BRUNET, F., D. ANDRAULT & G. CHAZOT (2007). *La Terre interne. Roches et matériaux en conditions extrêmes*. Vuibert, Paris.
- CARON, J.-M., A. GAUTHIER, J.-M. LARDEAUX, A. SCHAAF, J. ULYSSE & J. WOZNIK (2003) (2^e édition, 1989). *Comprendre et enseigner la planète Terre*. Ophrys, Gap – Paris, 303 pages.
- CHAMLEY, H. (2000). *Bases de sédimentologie*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 1987).
- CAMPY, M. & J.-J. MACAIRE (2003). *Géologie de la surface*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 1989).
- CHANTRAINE, J., A. AUTRAN, C. CAVELIER (dir.) et collaborateurs (2003). *Carte géologique de la France à l'échelle du millionième*. Service géologique national, Bureau de Recherches géologiques et minières, Orléans, 6^e édition.
- CHAPUS, J.-L. (2006) (2^e). *Initiation à la géomorphologie*. « Universités Géographie », Ellipses, Paris, 172 pages.
- COJAN, I. & M. RENARD (2006). *Sédimentologie*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 1999).
- CORDIER, P. & H. LEROUX (2008). *Ce que disent les minéraux*. Belin, Paris.
- DANIEL, J.-Y., C. AUBOURG & P. DE WEVER (dir.) (2000). *Problèmes résolus de Sciences de la Terre et de l'Univers*. Vuibert, Paris.
- DANIEL, J.-Y. (dir.), A. BRAHIC, M. HOFFERT, R. MAURY, A. SCHAAF & M. TARDY (2006). *Sciences de la Terre et de l'Univers*. Vuibert, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 1999).
- DAUTEL, O. (dir.), A. PROUST, M. ALGRAIN, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, F. SAINTPIERRE, M. VABRE & C. BOGGIO (2017). *Biologie Géologie BCPST 1^{er} année*. Vuibert, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), C. BORDI, F. SAINTPIERRE, M. ALGRAIN-PITAVY, M. QUERTINIEZ, A. PROUST, M. VABRE A. HELME-GUIZON & B. MOLLIER (2019). *Biologie Géologie BCPST 2^e année*. Vuibert, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, B. MOLLIER, A. PROUST, M. QUERTINIEZ, F. SAINTPIERRE & M. VABRE (2021). *Prépas scientifiques BCPST 1^{er} année. Biologie Géologie. Tout-en-un*. Vuibert, Paris.
- DE WEVER, P., L. LABROUSSE, D. RAYMOND & A. SCHAAF (2005). *La mesure du temps dans l'histoire de la Terre*. Vuibert, Paris.
- DEBELMAS, J., G. MASCLE & C. BASILE (2008). *Les grandes structures géologiques*. Dunod, Paris, 5^e édition (1^{er} édition 1991).
- DECONINCK, J.-F. (2006). *Paléoclimats. L'enregistrement des variations climatiques*. Société géologique de France – Vuibert, Paris.
- DELMAS, R., S. CHAUZY, J.-M. VERSTRAETE & H. FERRÉ (2007). *Atmosphère, océan et climat*. Belin, Paris.
- DENŒUD, J., T. FERROIR, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2011). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2^e année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1^{er} année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2014). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2^e année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DERCOURT, J. (2002). *Géologie et géodynamique de la France. Outre-mer et européenne*. « Sciences Sup », Dunod, Paris, 3^e édition (1^{er} édition 1997), 330 pages.
- DERCOURT, J., J. PAQUET, P. THOMAS & C. LANGLOIS (2006). *Géologie. Objets, méthodes et modèles*. Dunod, Paris, 12^e édition (1^{er} édition 1974).
- DUCHAUFOUR, P. (2001). *Introduction à la science du sol. Sol, végétation, environnement*. Dunod, Paris, 6^e édition (1^{er} édition 1984, *Abrégé de pédologie*).
- EMMANUEL, L., M. DE RAFÉLIS & A. PASCO (2007). *Maxi fiches Géologie*. Dunod, Paris, 228 pages + VIII.
- FOUCAULT, A. & J.-F. RAOULT (2005). *Dictionnaire de Géologie*. Dunod, Paris, 6^e édition (1^{er} édition 1980).
- FOUCAULT, A., J.-F. RAOULT, F. CECCA & B. PLATEVOET (2014). *Dictionnaire de Géologie*. Dunod, Paris, 8^e édition (1^{er} édition 1980).
- GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1^{er} année BCPST-véto*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- JAUVARD, D. (2015). *Géologie. Géodynamique. Pétrologie. Études de terrain*. Maloine, Paris.
- JOLIVET, L. & H.-C. NATAF (1998). *Géodynamique*. Dunod, Paris.
- JUNG, J. (1958). *Précis de pétrographie. Roches sédimentaires, métamorphiques et éruptives*. Masson et Cie, Paris.
- JUPIN, H. (1996). *Le Cycle du carbone*. Hachette supérieur, Paris.
- LAGABRIELLE, Y., R. MAURY & M. RENARD (2013). *Mémo visuel de Géologie. L'essentiel en fiches. Licence. Prépas. CAPES*. Dunod, Paris.
- LIZEAUX, C., D. BAUDE (dir.), C. BRUNET, A. CHASLEIX, B. FORESTIER, G. GUTJAHN, Y. JUSSERAND, A. MATHEVET, P. PILLOT, S. RABOUIN & A. VAREILLE, 2010. *Sciences de la Vie et de la Terre Seconde*. Bordas, Paris.
- MARSHAK, S. (2010). *Terre, portrait d'une planète*. Traduction O. ÉVRAD. De Boeck, Bruxelles (3^e édition américaine 2008).
- MASCLE, G. (2008). *Les roches, mémoire du temps*. EDP Sciences, Les Ulis (91).
- MATTAUER, M. (1998). *Ce que disent les pierres*. Belin – Pour la Science, Paris.
- PERRIER, C. & J.-F. BEAUX (dir.), A. BOUFFIER, L. BOUGEIOIS, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J. DÉMARET-NICOLAS, A. EMOND, S. MAURY, O. MONNIER, T. SOUBAYA, A. VERGNAUD & A. WOEHRLÉ (2021). *Biologie-Géologie BCPST 1. Tout-en-un*. Dunod, Paris.
- PEYCRU, P. (dir.), J.-M. DUPIN, J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, C. VAN DER REST, F. CARIU, C. PERRIER & B. AUGÈRE (2008). *Géologie tout-en-un 1^{er} et 2^e années BCPST*. Dunod, Paris.
- PEYCRU, P., J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, C. BECK, F. CARIU, J.-M. DUPIN, J.-L. SCHNEIDER, M. TARDY & C. VAN DER REST (2015). *Géologie tout-en-un BCPST 1^{er} et 2^e années*. Dunod, Paris.
- POMEROL, C., Y. LAGABRIELLE, M. RENARD & S. GUILLOT (2011). *Éléments de géologie*. Dunod, Paris, 14^e édition (1^{er} édition 1965).
- PROVOST, A. & C. LANGLOIS (2011). *Mini manuel de Géologie – Roches et géochimie*. Dunod, Paris.
- RENARD, M., Y. LAGABRIELLE, E. MARTIN & M. DE RAFÉLIS (2018). *Éléments de géologie. 16^e édition du « Pomerol »*. 1^{er} édition 1965 (Armand Colin). Dunod, Paris.
- ROBERT, C. & R. BOUSQUET (2013). *Géosciences. La dynamique du système Terre*. Belin, Paris.
- ROTARU, M., J. GAILLARDET, M. STEINBERG & J. TRICHET (2006). *Les climats passés de la Terre*. Société géologique de France – Vuibert, Paris.
- SOREL, D. & P. VERGELY (2010). *Atlas. Initiation aux cartes et aux coupes géologiques*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 1999).
- TROMPETTE, R. (2003). *La Terre. Une planète singulière*. Belin, Paris.

Plan du chapitre

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction	2
I. Un transport des sédiments par des agents physiques précédant leur dépôt (sédimentation) dans des bassins sédimentaires	3
A. Les sédiments, des entités subissant un transport par des agents physiques	3
1. Cas des ions en solution : un transport par l'eau liquide	3
2. Cas des particules de roches (sédiments détritiques) : un transport par des agents variés	3
a. Un possible déplacement à courte distance par la gravité	3
b. Un déplacement possible par la glace en environnement glaciaire : cas des moraines	3
c. Un déplacement possible par le vent	4
α. Le vent, un agent abrasif (déflation + corrasion)	4
β. Le vent, agent de transport producteur de structures sédimentaires	4
i. Les dunes, édifices sableux continentaux généralement mobiles	4
ii. Les poussières éoliennes (poussières océaniques, poussières volcaniques, loëss)	4
d. Un déplacement fréquemment assuré par l'eau	4
α. Les modalités physique de transport d'une particule et la diversité des écoulements (laminaires ou turbulents)	4
i. Une particule emportée dans des courants laminaires ou turbulents	4
ii. Une particule qui subit une force communiquée par l'énergie cinétique du fluide	4
iii. Une particule qui se déplace en suspension, par saltation ou par glissement	5
β. Relation entre vitesse d'écoulement, taille des particules et triptyque transport-dépôt-érosion : le diagramme de HJULSTRÖM (1935)	5
γ. Un impact des modalités de transport et de dépôt sur les figures sédimentaires formées : notion de faciès sédimentaire	6
i. Le faciès sédimentaire : un ensemble de caractéristiques constitutives et géométriques des dépôts sédimentaires renseignant sur leurs modalités de mise en place	6
ii. Un outil de reconstitution des paléoenvironnements (en appliquant le principe d'actualisme)	6
B. Des dépôts qui s'effectuent dans des zones en déclinivité : les bassins sédimentaires	6
1. Les facteurs contrôlant l'espace disponible (= accommodation) au sein des bassins	6
a. Le contrôle tectonique et géodynamique : la subsidence tectonique (et/ou thermique)	7
b. Le contrôle sédimentaire : une subsidence qui peut s'accroître sous le poids des sédiments	7
c. Le contrôle eustatique : des dépôts affectés par les variations absolues du niveau marin (eustatisme)	7
2. Les bassins sédimentaires, des formations très liées au contexte géodynamique	7
a. Préalable : la diversité des contextes géodynamiques	8
b. Les bassins associés aux zones de convergence	8
α. Des bassins flexuraux (= molassiques = d'avant-pays) dans les chaînes de montagne	8
β. Des prismes d'accrétion au niveau des zones de subduction	8
c. Les bassins associés aux zones de divergence	8
α. Des rifts continentaux	8
β. Les plaines abyssales	8
γ. Les marges passives	8
d. Les bassins en <i>pull-apart</i> , liés aux failles décrochantes (= coulissantes)	8
e. Les bassins intracontinentaux associés aux zones stables (« atectoniques ») : les bassins intracratoniques	9
f. Remarque : variation du taux de subsidence en fonction du contexte géodynamique	9
3. Des environnements de dépôt continentaux et océaniques	9

a. Les lieux de dépôts continentaux	9
α. La sédimentation fluviale (rivières et fleuves) : le dépôt d'alluvions	9
i. Notions de fleuve et de rivière	9
ii. Notions de bassin versant (et de sous-bassin versant) et de nappe phréatique	9
iii. Une tendance à la sédimentation dans les déclinivités du lit du cours d'eau et une tendance à l'érosion au niveau des proéminences : notion de profil d'équilibre (= niveau de base)	10
iv. Des dépôts sédimentaires qui varient en fonction des reliefs	10
> Des dépôts de pente dans les hauts reliefs (montagnes) : les cônes alluviaux	10
> Une chenalisement variable (rectiligne, à méandres ou en tresses) dans les zones planes à faible pente (vallées planes, plaines alluviales)	11
v. Le lit d'un cours d'eau et les terrasses alluviales	12
β. La sédimentation lacustre : des dépôts granoclassés et d'éventuelles varves	13
γ. La sédimentation glaciaire et périglaciaire	13
i. Trois grands types de glaciers : les glaciers de type alpin, les calottes et les calottes polaires (= inlandsis)	13
ii. La production de moraines, de <i>dropstones</i> et de roches moutonnées par tous les glaciers	14
iii. La production d'icebergs (qui libèrent des sédiments lors de la fonte) par les calottes qui charrient des roches sur le sol marin en tombant	15
iv. En domaine périglaciaire : des dépôts éoliens fréquents (de type loëss) et les pergélisols polaires	15
δ. La sédimentation désertique : la genèse de dunes éoliennes mobiles de sable	15
b. Les embouchures : le domaine fluvio-marin	15
α. Deux types d'embouchures surtout déterminés par l'importance des marées : les deltas et les estuaires	15
β. Une sédimentation contrôlée par les paramètres hydrodynamiques fluviaux (débit) et maritimes (houle, vagues, marées, courants marins) ainsi que le flux sédimentaire	15
c. Les lagunes, espaces littoraux de sédimentation plutôt évaporitique à remplissage maritime faible	15
d. Les environnements de dépôts océaniques (incl. marges continentales)	16
α. Présentation du cadre géologique et sédimentaire océanique	16
i. Quelles notions préliminaires : continent, marge continentale, océan, mer	16
ii. Zonation bathymétrique océanique globale : cas d'une marge passive	16
iii. Zonation sédimentaire océanique : néritique, hémipélagique, pélagique	17
iv. Zonation hydrodynamique du domaine littoral	18
v. L'hydrodynamisme en domaine océanique et littoral : houle, vagues, marées et courants (océaniques et fluviaux)	18
vi. Les effets de la rupture de pente sur la sédimentation : formation du glacis par des courants de turbidité	20
β. Une sédimentation détritico néritique et hémipélagique : un contrôle par le flux sédimentaire, la pente, la distance au littoral et l'hydrodynamisme	20
γ. Une sédimentation carbonatée (biogène) néritique, hémipélagique et des îles océaniques : une sédimentation très largement biogène	21
i. La sédimentation de plateforme (domaine néritique, voire hémipélagique)	21
ii. La sédimentation récifale autour des îles océaniques actuelles ou submergées	21
δ. Une sédimentation océanique profonde (pélagique) variée : terrigène, carbonatée, siliceuse biogène	22
e. Bilan : vue d'ensemble des lieux de sédimentation	22
C. Des dépôts répartis dans le monde de manière assez contrôlée : vue d'ensemble de la sédimentation mondiale	23
1. Des continents avec une sédimentation plutôt faible et surtout caractérisés par des sols	23
a. Les continents, des lieux d'érosion et de faible sédimentation dont la répartition est surtout contrôlée par le contexte tectonique et l'activité fluviale	23

b. Les continents, des domaines recouverts de sols en lien avec les conditions climatiques et la végétation : une zonation latitudinale et altitudinale	23	e. Les traces d'activité biologique comme les fossiles et les ichnofossiles	33
2. Des océans dont la sédimentation pélagique (= profonde) dégage des grandes tendances sédimentaires	23	3. Bilan : vue d'ensemble de la sédimentation détritique	33
a. Vue d'ensemble de la sédimentation océanique profonde à double zonation : méridienne et latitudinale	23	4. La transformation des sédiments en roches détritiques : quelques données sur la diagenèse détritique (diagramme de STRAKHOV, 1969)	34
b. Une sédimentation océanique profonde lente	24	a. La dégradation de matière organique	34
c. Origine et contrôle de la nature de la sédimentation océanique profonde	24	b. La formation de nouveaux minéraux (authigenèse)	34
α. L'apport détritique : un apport essentiellement fluvial, proche des continents (zonation méridienne), et fort en zone tropicale (zonation latitudinale)	24	c. La cimentation	34
β. Les boues carbonatées : une formation par bioprécipitation dans les eaux chaudes (contrôle latitudinal) et peu profondes (contrôle bathymétrique, en lien avec la lysocline et la CCD)	24	d. La compaction (mécanique et chimique)	34
γ. Les boues siliceuses : un dépôt d'eaux froides ou à haute productivité (une ceinture équatoriale et deux ceintures péripolaires)	25	e. La déshydratation	34
δ. Les sédiments glaciaires : une sédimentation détritique liée aux inlandsis et calottes	26	B. Le devenir des ions : la lignée ionique (chimique et biochimique)	35
ε. Les argiles des grands fonds (« argiles rouges ») : des apports variés (fluvial, éolien, volcanique, hydrothermale et cosmique) dans les zones de faibles productivité biologique	26	1. La lignée biogène siliceuse	35
d. Un couplage entre sédimentation néritique et pélagique	27	2. La lignée carbonatée (très largement biogène)	35
e. Bilan	27	a. Panorama de la diversité chimique des roches carbonatées	35
II. Les types de dépôts sédimentaires et les modalités de formation des roches sédimentaires : un panorama	28	b. Le système carbonates et la (bio)précipitation du carbonate de calcium	35
A. Le devenir des particules fragmentaires de roches : la lignée détritique	28	α. Un équilibre entre dioxyde de carbone / ions hydrogénocarbonates et carbonates	35
1. Les particules fragmentaires de roches : les sédiments détritiques	28	β. Une très faible précipitation chimique et une très large bioprécipitation	36
a. Des débris de taille variable : la classification granulométrique (rudites, arénites, lutites)	28	γ. Quelques facteurs agissant sur le système carbonates	36
b. Des roches initiales de nature variable : la classification chimique (sédiments silicoclastiques = terrigènes [cas dominant], calcoclastiques, bioclastiques et volcanoclastiques)	29	i. Le dioxyde de carbone CO ₂ atmosphérique : un acidifiant défavorisant la précipitation	36
2. Des sédiments qui peuvent enregistrer leurs conditions de transport et de dépôt	29	ii. L'acidification, facteur défavorable à la précipitation	36
a. La forme et l'aspect de surface des grains : une conséquence mécanique de la distance et du mode de transport	29	iii. La température, facteur défavorable à la précipitation chimique... mais favorable à la bioprécipitation !	36
α. La morphologie des grains : morphoscopie et exoscopie	29	iv. La hausse de profondeur, facteur défavorable à la précipitation (notions de lysocline et de CCD)	37
β. Cas du transport par l'eau : un arrondi et un aspect lisse d'autant plus importants que l'a été la distance de transport	29	v. Les êtres vivants : un effet variable mais une contribution globale décisive à la précipitation biochimique	37
γ. Cas du transport par le vent : des particules peu sphériques et très choquées	29	c. La classification des roches carbonatées : classifications de FOLK (1959) et DUNHAM (1962)	37
δ. Cas du transport par la glace : des particules souvent anguleuses et irrégulières	29	α. Une classification fondée sur la nature des éléments figurés et de la phase de liaison (FOLK, 1959) [pour information]	37
b. Un lien entre énergie du milieu et distance de transport : le tri granulométrique (= granoclassement)	29	β. Une classification fondée sur la proportion de grains, leur disposition et la présence ou l'absence de boue carbonatée (DUNHAM, 1963) : un indicateur d'hydrodynamisme	38
α. En milieu littoral et sur la marge continentale : une diminution globale de la granulométrie en lien avec l'avancée vers le large et un apport sédimentaire dû aux fleuves	29	d. Les environnements de dépôts carbonatés	39
β. Dans les écoulements gravitaires (notamment les courants de turbidité) : un granoclassement vertical (cas de la séquence de Bouma) et horizontal	29	α. La sédimentation carbonatée récifale et de plateforme : une sédimentation surtout benthique en eaux chaudes largement contrôlée par l'hydrodynamisme	39
γ. Une absence de granoclassement des dépôts glaciaires	30	β. La sédimentation carbonatée pélagique, une sédimentation surtout planctonique en eaux chaudes et au-dessus de la CCD	39
c. Un lien entre hydrodynamisme et répartition géométrique des dépôts : les rides de courants (ripple marks)	30	e. Bilan : vue d'ensemble de la sédimentation carbonatée	40
α. En présence de courants unidirectionnels : des rides asymétriques ou des antidunes à litage oblique	30	f. La diagenèse carbonatée	40
β. Un impact de l'énergie de l'écoulement : rides 2D (stratifications parallèles) vs. rides 3D (stratifications en auge)	31	α. Des processus semblables à la diagenèse détritique : un enfouissement qui induit notamment une compaction, une cimentation et des recristallisations	40
γ. Sous l'effet des marées : des rides asymétriques à litage entrecroisé (= en arêtes de poisson)	31	β. La possibilité d'une dolomitisation ou d'une dédolomitisation	40
δ. Sous l'effet des vagues : des rides symétriques	31	3. La lignée évaporitique : la formation d'évaporites (= roches salines)	41
ε. Dans les chenaux à méandre : une barre de migration latérale	32	a. Des roches variées formées séquentiellement par cristallisation à partir d'eau à forte salinité subissant une évaporation progressive et intense : la séquence évaporitique	41
d. D'autres indicateurs mécaniques : les figures d'érosion et d'impact	32	b. Des contextes de dépôt à forte salinité	42
		Bilan	42
		Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	43
		Références	44
		Plan du chapitre	45
		Plan simplifié du chapitre	47
		Plan très simplifié du chapitre	47

Plan simplifié du chapitre

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction	2
I. Un transport des sédiments par des agents physiques précédant leur dépôt (sédimentation) dans des bassins sédimentaires	3
A. Les sédiments, des entités subissant un transport par des agents physiques	3
1. Cas des ions en solution : un transport par l'eau liquide	3
2. Cas des particules de roches (sédiments détritiques) : un transport par des agents variés	3
B. Des dépôts qui s'effectuent dans des zones en déclivité : les bassins sédimentaires	6
1. Les facteurs contrôlant l'espace disponible (= accommodation) au sein des bassins	6
2. Les bassins sédimentaires, des formations très liées au contexte géodynamique	7
3. Des environnements de dépôt continentaux et océaniques	9
C. Des dépôts répartis dans le monde de manière assez contrôlée : vue d'ensemble de la sédimentation mondiale	23
1. Des continents avec une sédimentation plutôt faible et surtout caractérisés par des sols	23
2. Des océans dont la sédimentation pélagique (= profonde) dégage des grandes tendances sédimentaires	23
II. Les types de dépôts sédimentaires et les modalités de formation des roches sédimentaires : un panorama	28
A. Le devenir des particules fragmentaires de roches : la lignée détritique	28
1. Les particules fragmentaires de roches : les sédiments détritiques	28
2. Des sédiments qui peuvent enregistrer leurs conditions de transport et de dépôt	29
3. Bilan : vue d'ensemble de la sédimentation détritique	33
4. La transformation des sédiments en roches détritiques : quelques données sur la diagenèse détritique (diagramme de STRAKHOV, 1969)	34
B. Le devenir des ions : la lignée ionique (chimique et biochimique)	35
1. La lignée biogène siliceuse	35
2. La lignée carbonatée (très largement biogène)	35
3. La lignée évaporitique : la formation d'évaporites (= roches salines)	41
Bilan	42
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	43
Références	44
Plan du chapitre	45
Plan simplifié du chapitre	47
Plan très simplifié du chapitre	47

Plan très simplifié du chapitre

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction	2
I. Un transport des sédiments par des agents physiques précédant leur dépôt (sédimentation) dans des bassins sédimentaires	3
A. Les sédiments, des entités subissant un transport par des agents physiques	3
B. Des dépôts qui s'effectuent dans des zones en déclivité : les bassins sédimentaires	6
C. Des dépôts répartis dans le monde de manière assez contrôlée : vue d'ensemble de la sédimentation mondiale	23
II. Les types de dépôts sédimentaires et les modalités de formation des roches sédimentaires : un panorama	28
A. Le devenir des particules fragmentaires de roches : la lignée détritique	28
B. Le devenir des ions : la lignée ionique (chimique et biochimique)	35
Bilan	42
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	43
Références	44
Plan du chapitre	45
Plan simplifié du chapitre	47
Plan très simplifié du chapitre	47

© Tanguy JEAN. Les textes et les figures originales sont la propriété de l'auteur. Les figures extraites d'autres sources restent évidemment la propriété des auteurs ou éditeurs originaux.

Document produit en juin 2022 (adapté d'un support de TB) • Dernière actualisation : juin 2023.

Contact : Tanguy.Jean4@gmail.com

Adresse de téléchargement : <https://www.svt-tanguy-jean.com/>



Ces données sont placées sous licence *Creative Commons Attribution – Pas d'Utilisation commerciale 4.0 CC BY NC* qui autorise la reproduction et la diffusion du document, à condition d'en citer explicitement la source et de ne pas en faire d'utilisation commerciale.