Document téléchargeable sur le site
https://www.svt-tanguy-jean.com/

Lycée Valentine LABBÉ
41 rue Paul DOUMER – BP 20226
59563 LA MADELEINE CEDEX
CLASSE PRÉPARATOIRE TB
(Technologie & Biologie)

ENSEIGNEMENT DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE (SVT)
°° SCIENCES DE LA TERRE °°

Partie 6. Géodynamique externe
>> Cours <<

Chapitre 24

Sédimentation et ressources géologiques

Objectifs : extraits du programme

Connaissances clefs à construire	Commentaires, capacités exigibles
6.2 Sédimentation et ressources Géologiques	
Les éléments en suspension ou en solution sont transportés jusqu'à des zones de dépôts.	- identifier différents vecteurs de transport (eau, vent) - décrire la relation existant entre vitesse du courant, taille des particules et les processus transport/dépôt/érosion (diagramme de Hjulström). - caractériser des aires de sédimentation actuelles en domaines continental et océanique. **Lien** : Classe de terrain **Limite** : la géométrie des corps sédimentaires et les variations de l'espace disponible par eustatisme et tectonique ne sont pas abordées.
Le dépôt des particules en suspension est à l'origine de roches détritiques. Les ions en solution sont à l'origine des roches sédimentaires d'origine biochimique ou chimique.	- établir pour la lignée détritique la relation existant entre granulométrie, apport sédimentaire, énergie du milieu et répartition de dépôts. **Lien** : travaux pratiques (TP 6.3. Roches sédimentaires) - décrire la mise en place d'une roche carbonatée. La diagenèse est seulement mentionnée. - 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.
La matière organique peut être conservée et transformée en roches carbonées.	- établir les conditions nécessaires à l'apparition d'un gisement de carbone, charbon ou hydrocarbures (accumulation rapide, anoxie, enfouissement, diagenèse).
La répartition des sédiments actuels à l'échelle mondiale est liée à différents paramètres (latitude, profondeur océanique, diversité des êtres vivants…).	- décrire et interpréter la répartition des sédiments actuels à l'aide d'un planisphère.
Le processus sédimentaire induit le tri mécanique et/ou géochimique d'éléments. Ceux-ci peuvent être concentrés et constituer des ressources.	- présenter la ressource comme un gisement exploitable et économiquement rentable. - montrer la diversité des ressources et l'inégalité des disponibilités locales - distinguer les problématiques (prospection, extraction, transport coût…) associées à une ressource locale abondante et à une ressource plus rare, nécessairement importée. Lien : travaux pratiques, classe de terrain **Limite** : les exemples seront limités aux roches décrites dans le chapitre

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 23, 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 6.3 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.***

Le programme invite par ailleurs à aborder le **phénomène sédimentaire** sous l'angle des **ressources géologiques**, c'est-à-dire des ***produits géologiques utilisables par l'homme dans le cadre de ses activités***.

Comment les sédiments se déplacent-ils et se déposent-ils ?
Quel est leur devenir après dépôt ?
Comment se forment et sont exploitées les ressources sédimentaires ?

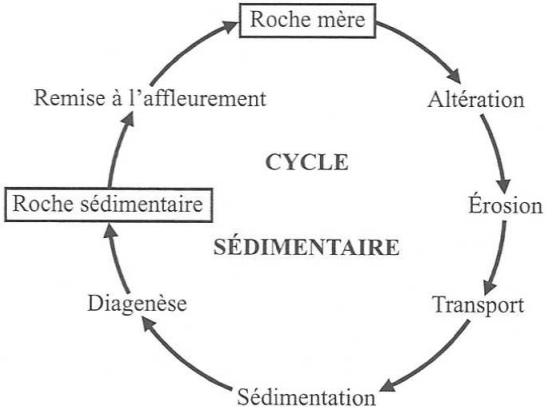


FIGURE 1. Le cycle sédimentaire. D'après EMMANUEL *et al.* (2007).

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).

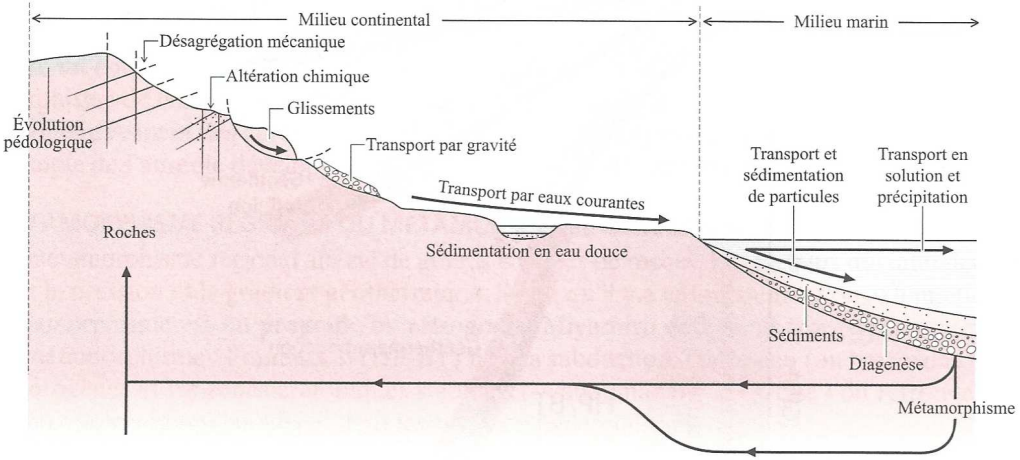


FIGURE 2. Une autre vue d'ensemble du phénomène sédimentaire.
D'après EMMANUEL *et al.* (2007).

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**.

Capacités exigibles	✓ **Identifier** différents vecteurs de transport (eau, vent) ✓ **Décrire** la relation existant entre vitesse du courant, taille des particules et les processus transport/dépôt/érosion (diagramme de HJULSTRÖM). ✓ **Caractériser** des aires de sédimentation actuelles en domaines continental et océanique. ✓ **Décrire** et interpréter la répartition des sédiments actuels à l'aide d'un planisphère.

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

- Les **ions en solution** (exemples : carbonates, calcium…) dont 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

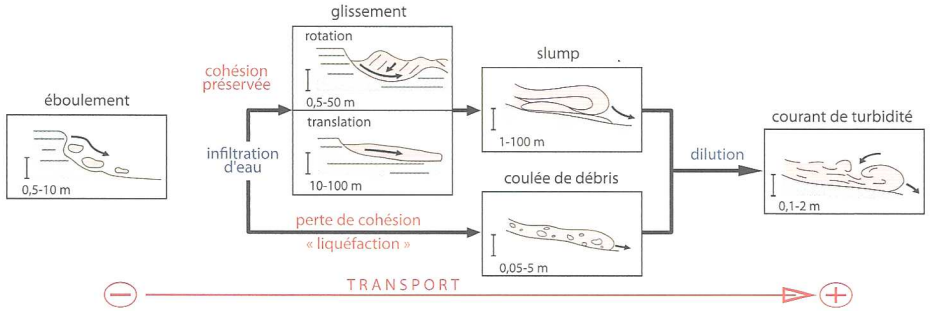


FIGURE 3. Flux sédimentaires dus à la gravité.
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

- 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** :
  1/ Sans intervention d'eau
  - Des **éboulements** : ***dissociations de blocs rocheux suivies d'un déplacement désordonné le long d'une pente***.

  2/ 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

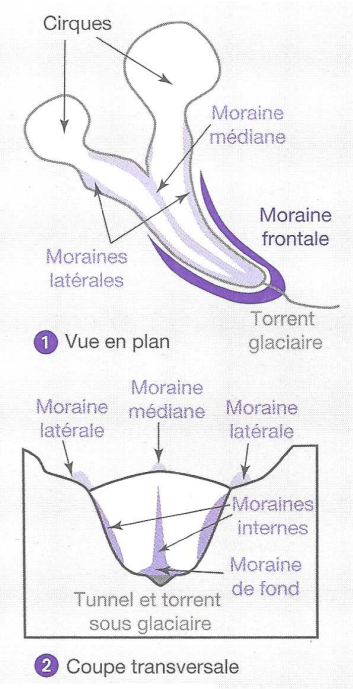


FIGURE 4. Localisation des moraines dans un glacier de type alpin.
D'après DENŒUD *et al.* (2013).

- 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 **rétention** 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

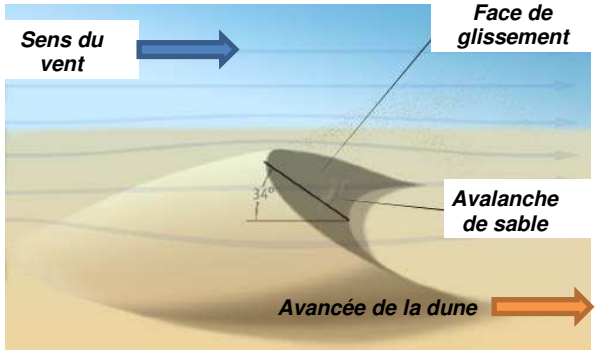


FIGURE 5. Barkhane.
http://www.geowiki.fr/index.php?title=Barkhane (consultation mars 2019)

- 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 coquillers** (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**, ***fines 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 chapitre 26).

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.

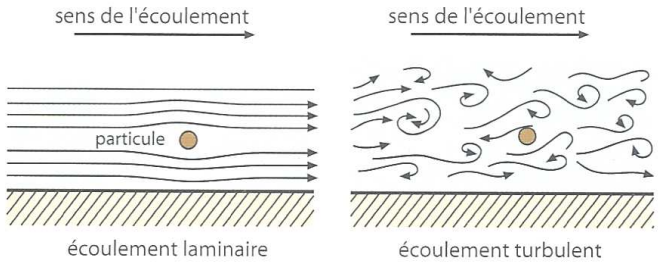


FIGURE 6. Écoulement laminaire vs. turbulent.
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

- 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**.
  - Quant la **taille de la particule diminue**.

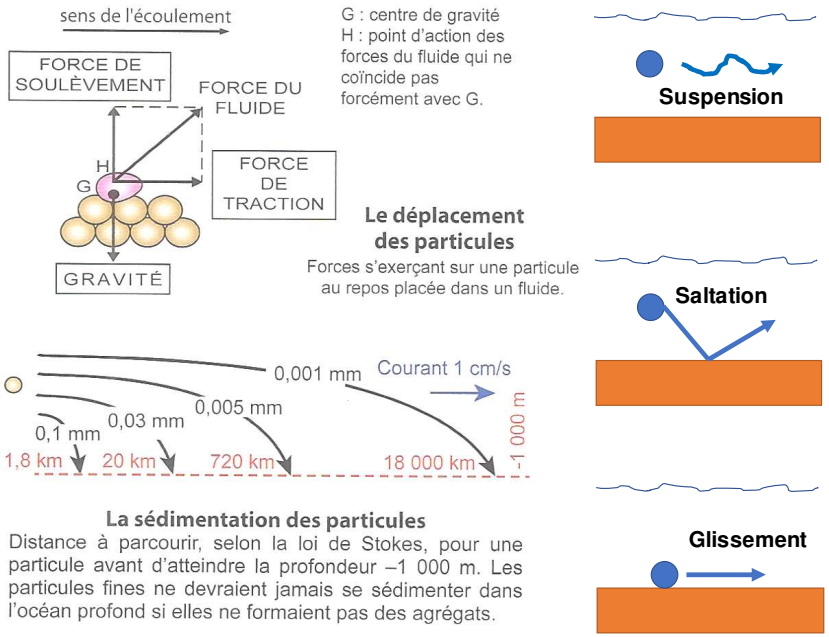


FIGURE 7. Déplacement et sédimentation des particules : aspects physiques et modalités de transport. D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013) et original.

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 • s^{-1}) ;
r, rayon de la sphère (en m) ;
g, accélération de la pesanteur (en m • s^{-2}) ;
$\Delta(\rho) = \rho_p - \rho_f$, différence de masse volumique entre la sphère et le fluide (en kg • m3) ;
μ, viscosité dynamique du fluide (en Pa • 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.

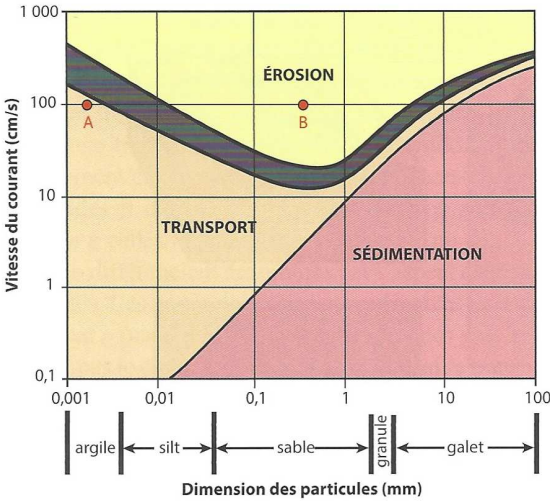
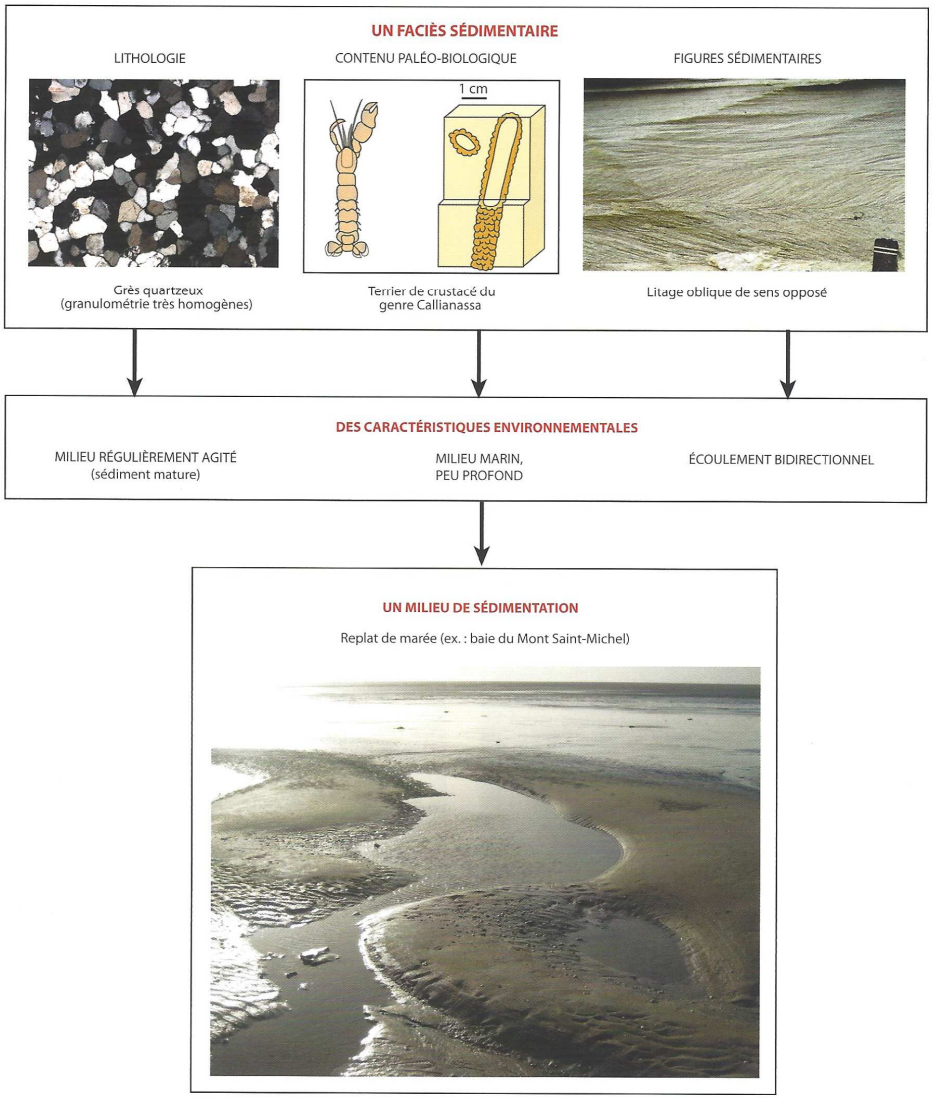


FIGURE 8. Diagramme de HJULSTRÖM (1935).
D'après JAUJARD (2015).
[La partie grisée correspond à un comportement variable entre transport et érosion]

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 8bis. 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** rencontrées 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

1. Les bassins sédimentaires, zones de subsidence

a. Notion de bassin sédimentaire

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

b. Des bassins initialement formés par subsidence tectonique

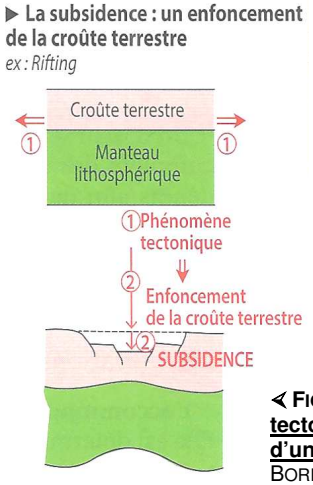


FIGURE 9. Subsidence tectonique et formation d'un bassin. D'après BORDI *et al.* (2018).

- 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 9).

Dans le détail, il existe une **dimension thermique** à **certaines subsidences** mais, comme la géodynamique interne n'est pas à votre programme, il me semble superflu de rentrer dans de tels détails.

c. 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**.

d. 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

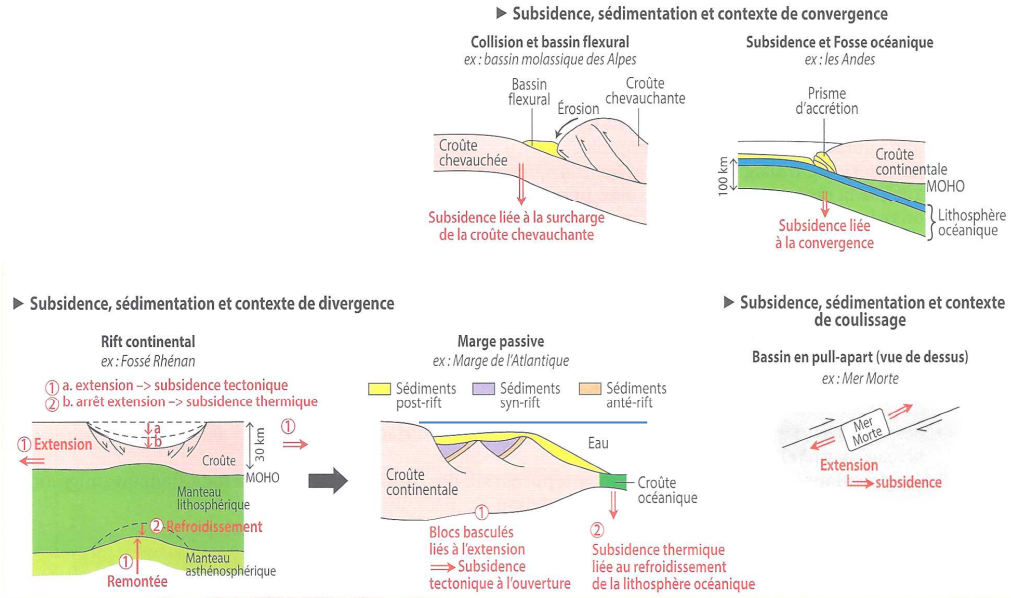


FIGURE 10. Diversité des bassins sédimentaires en lien avec les mouvements lithosphériques principaux. D'après BORDI *et al.* (2018).

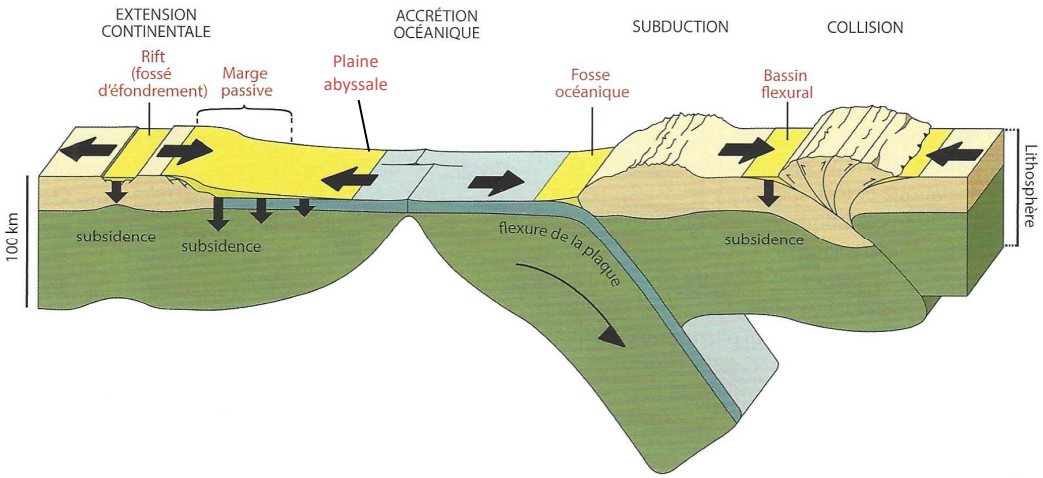


FIGURE 11. Diversité des bassins sédimentaires en lien avec les mouvements lithosphériques principaux : une vision simplifiée. D'après JAUJARD (2015), légèrement modifié.

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

a. Préalable : la diversité des contextes géodynamiques

- Les **principaux contextes géodynamiques** sont les suivants (figures 10-11) :
  - 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**.

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 **plaines** situées dans de ***grandes zones continentales géodynamiquement stables de basse altitude*** qui peuvent subir un **dépôt modéré** de **sédiments fluviatiles**, **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**.

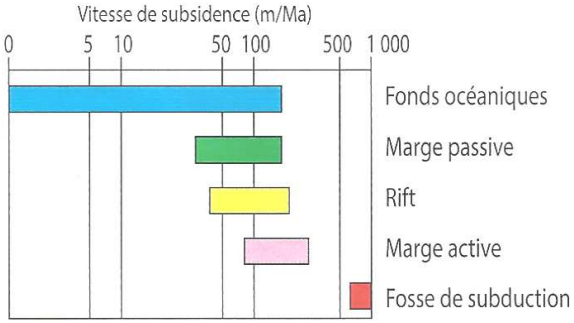


FIGURE 12. Subsidence et contextes géodynamiques : des vitesses variables.
D'après BORDI *et al.* (2018).

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 fluviatile (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**.

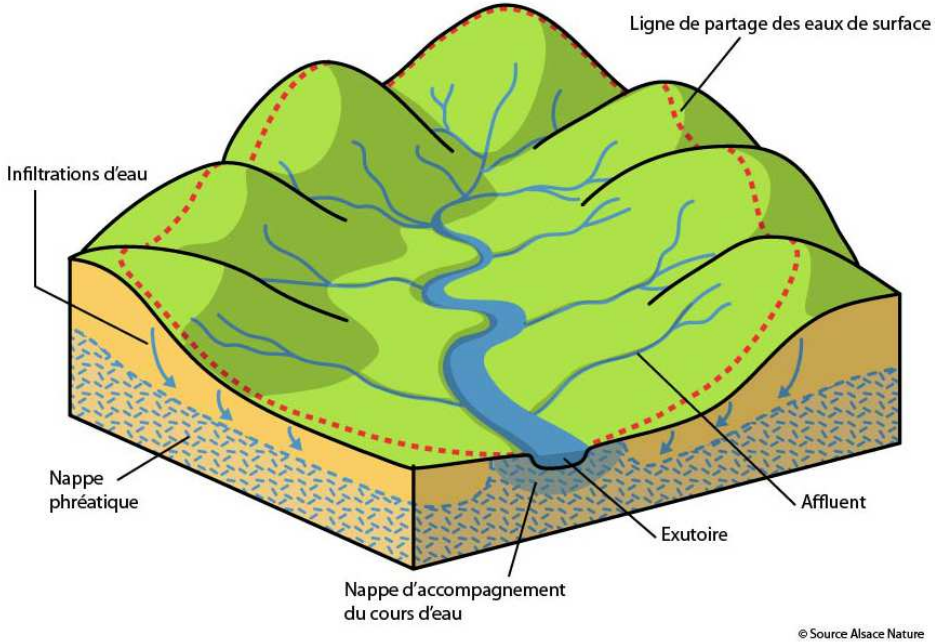
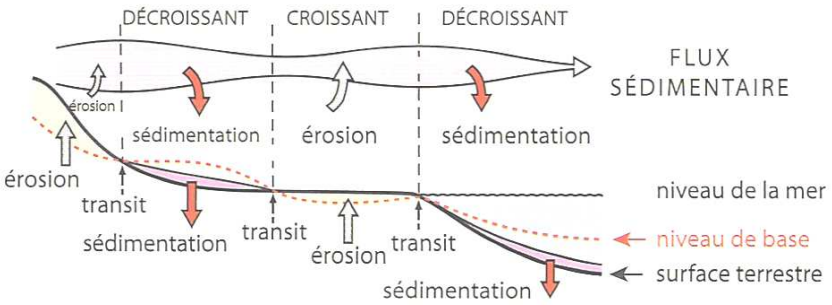


FIGURE 13. Un bassin versant : une vision simple.
http://www.syribt.fr/notre-territoire/definition/ (consultation mars 2019)

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

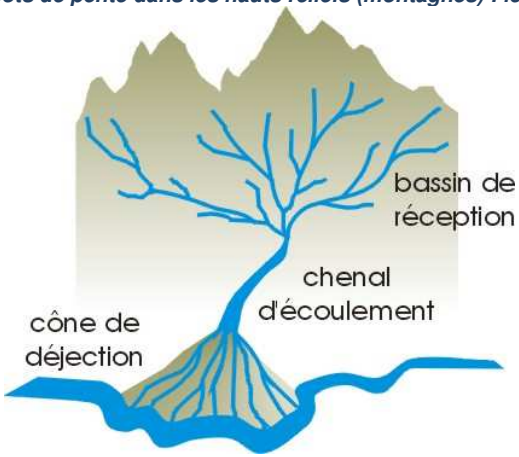


FIGURE 15. Un cône alluvial (= cône de déjection).
D'après BOULVAIN (2018)

- 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***.

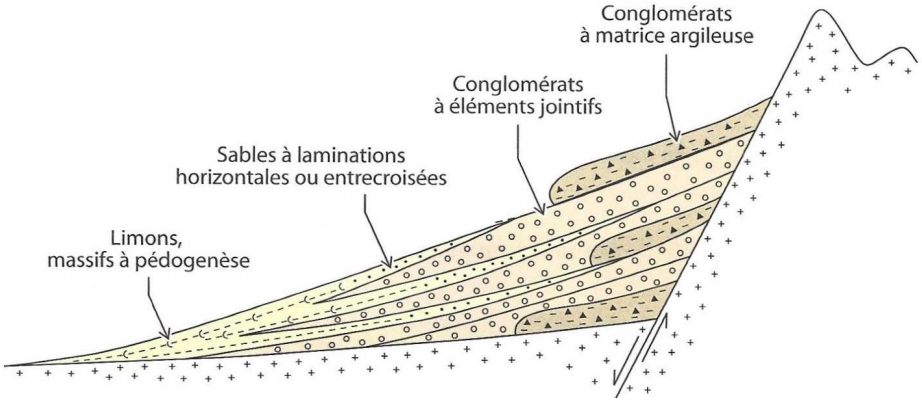


FIGURE 16. Coupe schématique d'un cône alluvial [pour information].
D'après RENARD *et al.* (2018).

- ***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**.

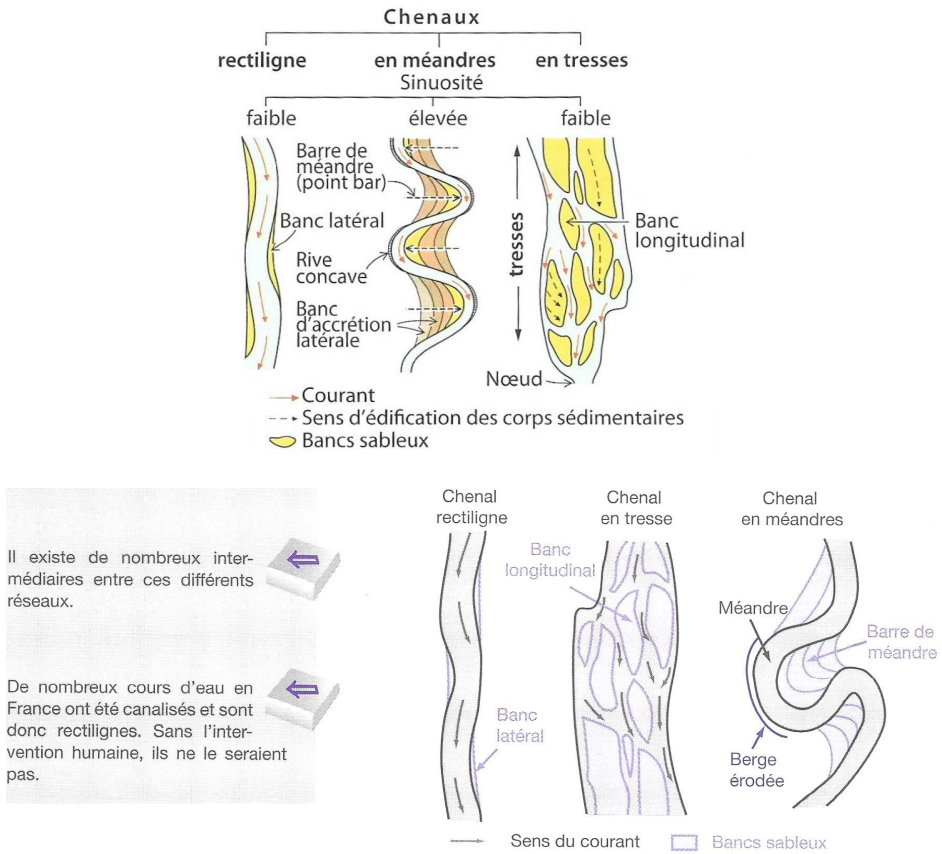


FIGURE 17. Deux représentations possibles des trois grands systèmes de chenaux.
D'après RENARD *et al.* (2018) et DENOEUD *et al.* (2013).

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).

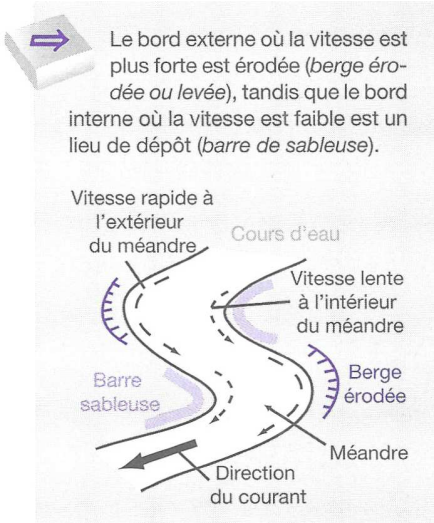


FIGURE 18. Hydrodynamisme d'un méandre.
D'après DENOEUD *et al.* (2013).

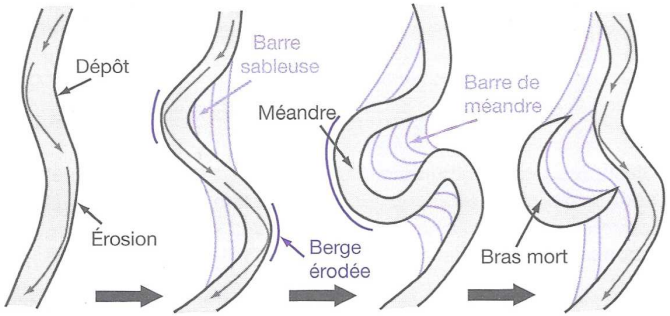


FIGURE 19. Déplacements de méandre et anastomose.
D'après DENOEUD *et al.* (2013).

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 leures propres alluvions.

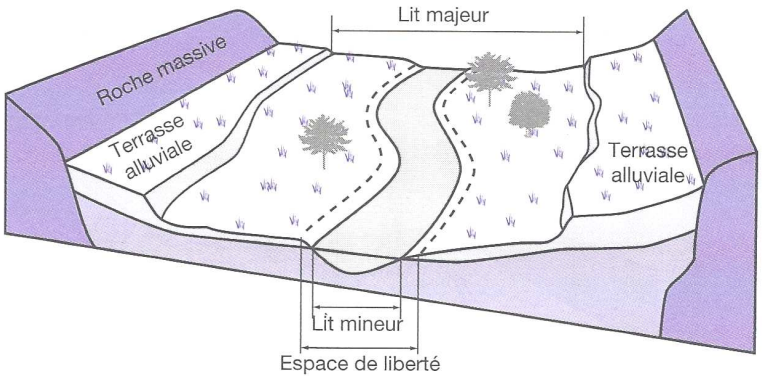


FIGURE 20. Les différents espaces d'un cours d'eau.
D'après DENOEUD *et al.* (2013).

- 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 alluvionaire***.
  - 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).

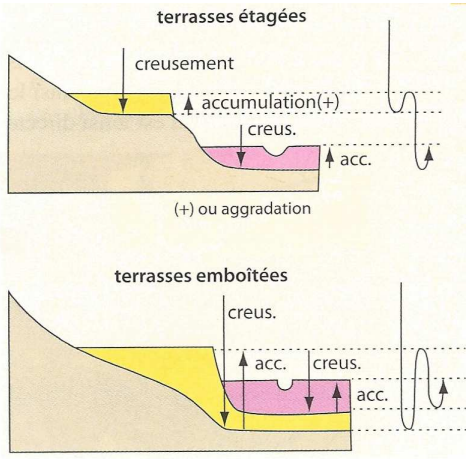
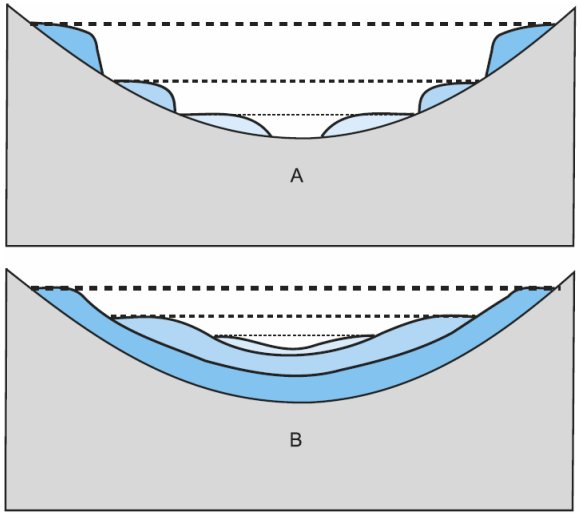


FIGURE 21. Terrasses étagées *vs.* emboîtées.
D'après RENARD *et al.* (2018)



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

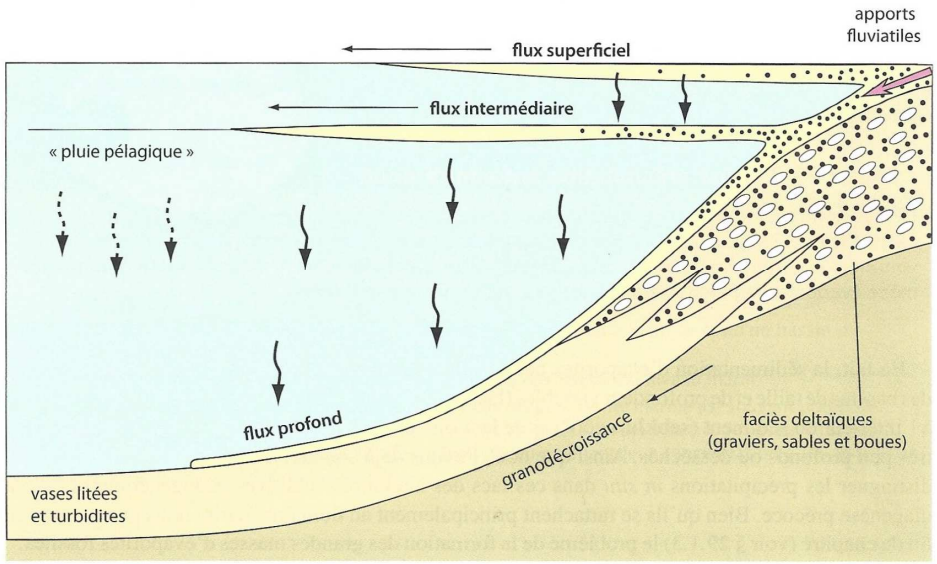
- En **période glaciaire**, les **importants glaciers** alimentent de **grands cours d'eau** à **fort débit**, à **large lit** et à **dépôts important** (en raison d'une **forte érosion**).
- En **période interglaciaire**, les **petits glaciers** alimentent des **cours d'eau à moindre débit**, à **lit 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 détritique dans un lac de climat tempéré à stratification thermique, en fonction d'apports fluviatiles.

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 détritique lacustre zonation latérale. D'après PEYCRU *et al.* (2008).

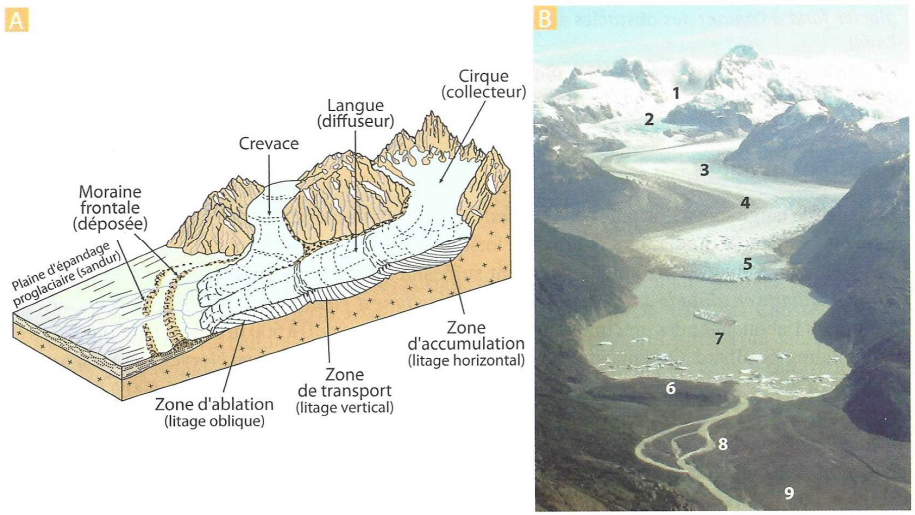
La possibilité d'une sédimentation évaporitique et carbonée

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

i. Trois grands types de glaciers : les glaciers de type alpin, les calottes et les calottes polaires (= inlandsis)

- 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**).

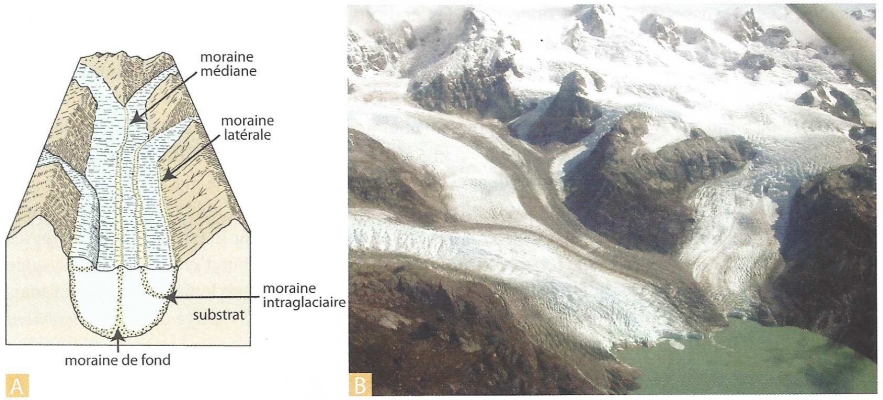


Les glaciers de type alpin.

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

B. Le glacier Nef (Parc national Laguna San Rafaèl, 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 vêlage de la langue glaciaire ; 8. torrent glaciaire (réseau en tresses anamostosées), un des tributaires du Rio Baker, l'une des plus importantes rivières chiliennes (1 000 m³/s) ; 9. plaine d'épandage proglaciaire (sandür).



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)

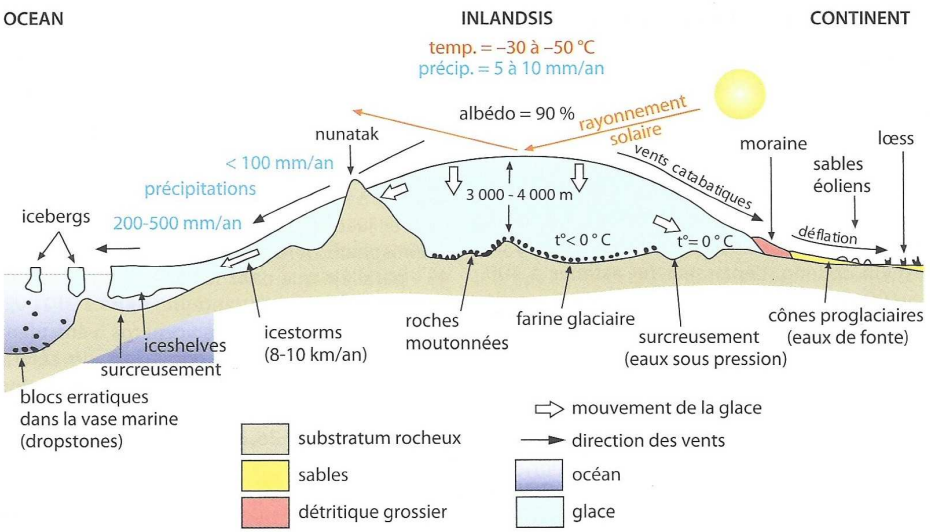


FIGURE 25. Calottes polaires (= *inlandsis*). D'après RENARD *et al.* (2018)

- 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 inférieur 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 fluviatiles 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**.

α. 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** :

Voir plus loin pour les **définitions**

    - 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**.

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

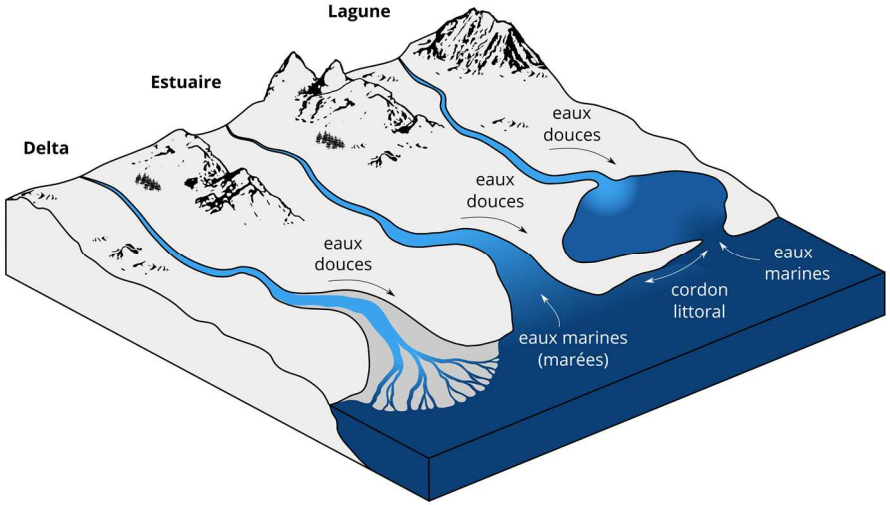


FIGURE 26. Le domaine fluvio-marin. © Office international de l'Eau.

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).

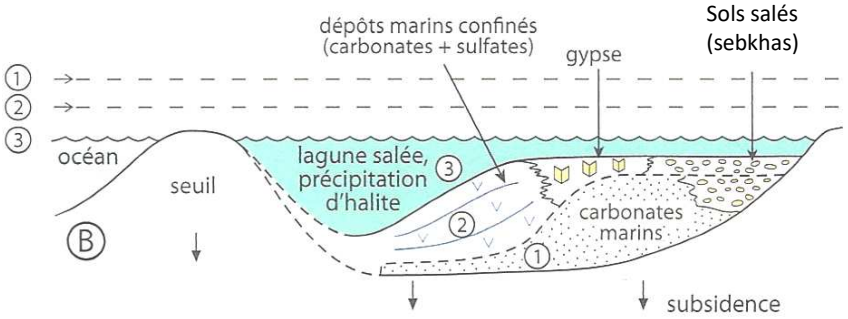


FIGURE 27. Lagune subissant une baisse du niveau marin et une évaporation, ce qui aboutit à la précipitation d'évaporites. D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013)

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

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

α. 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 **concentrent**.
  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**.

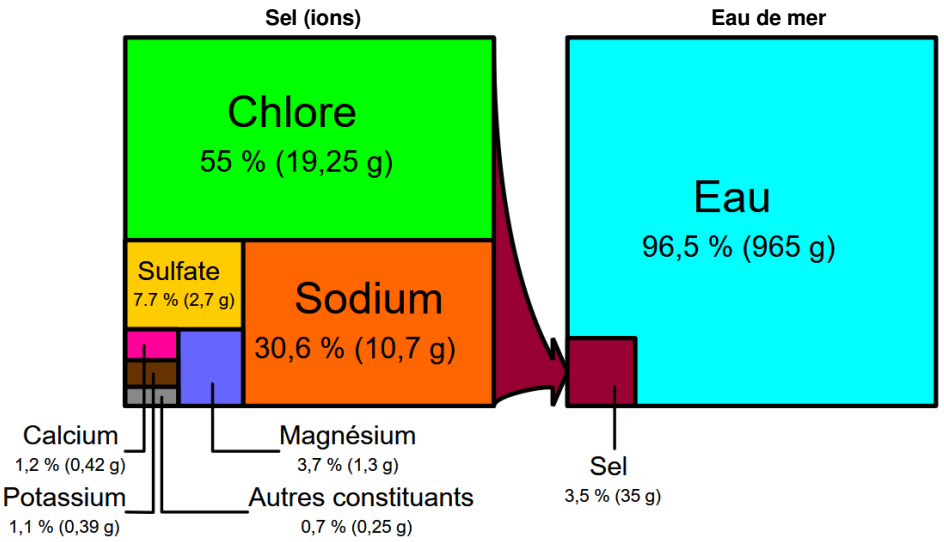


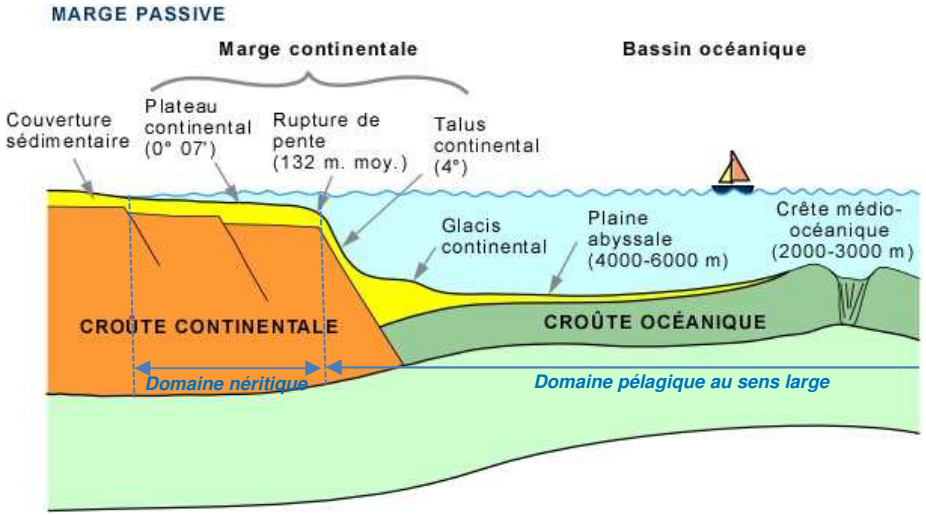
FIGURE 28. Composition d'1 L (1 kg) d'eau de mer. *Wikipédia*

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 (qqs °) 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.

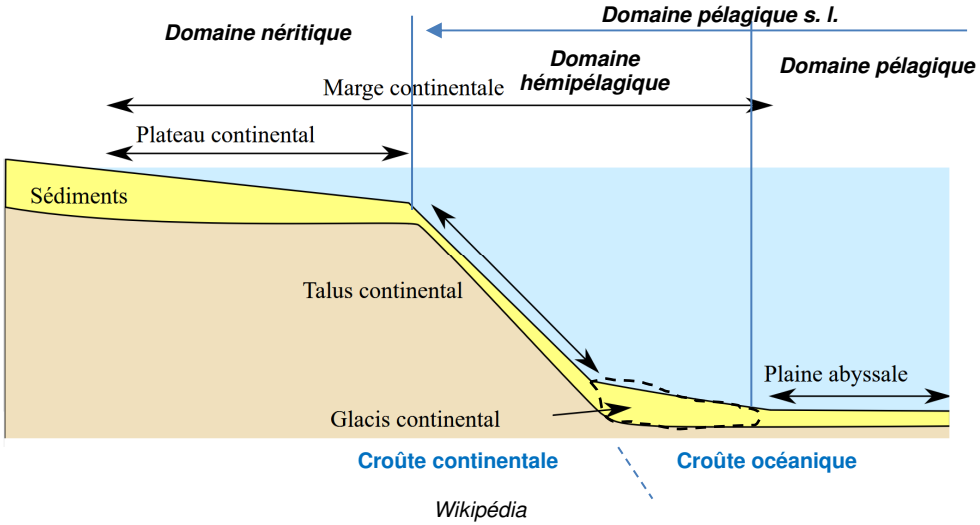
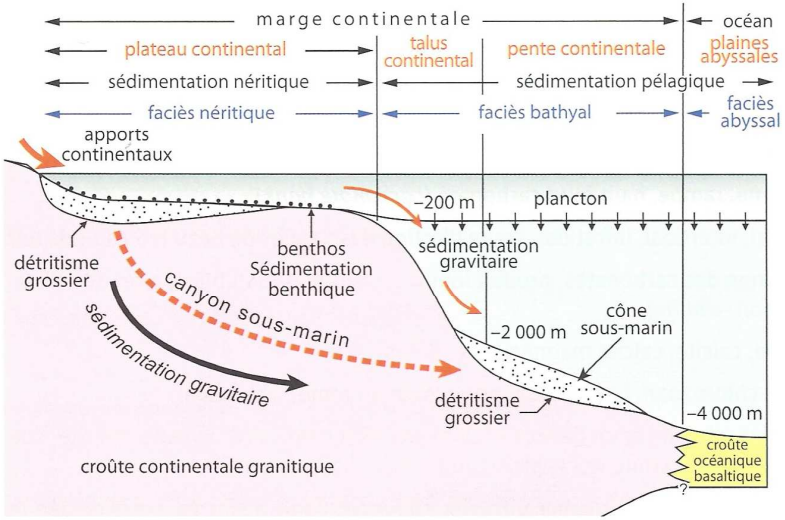


FIGURE 29. Zonation océanique globale : deux visions.

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 benthique qui se réalise à partir des organismes vivants sur le fond à la sédimentation pélagique ou planctonique (organismes vivants en pleine eau). 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

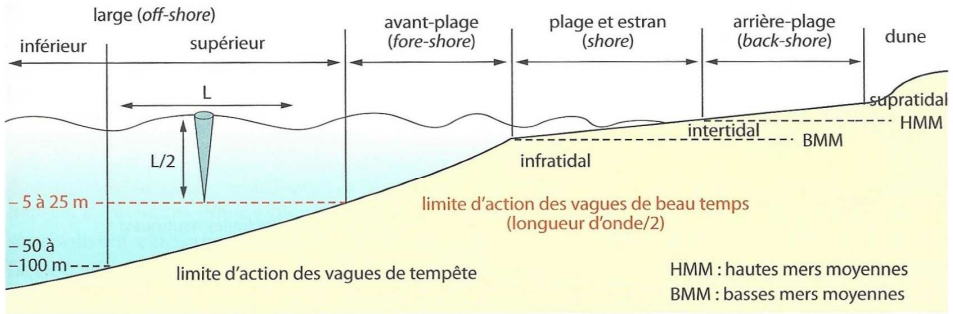
- Le **domaine côtier** peut être zoné de la façon suivante (du plus proche au plus loin des terres émergées) (figure 31) :

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**.

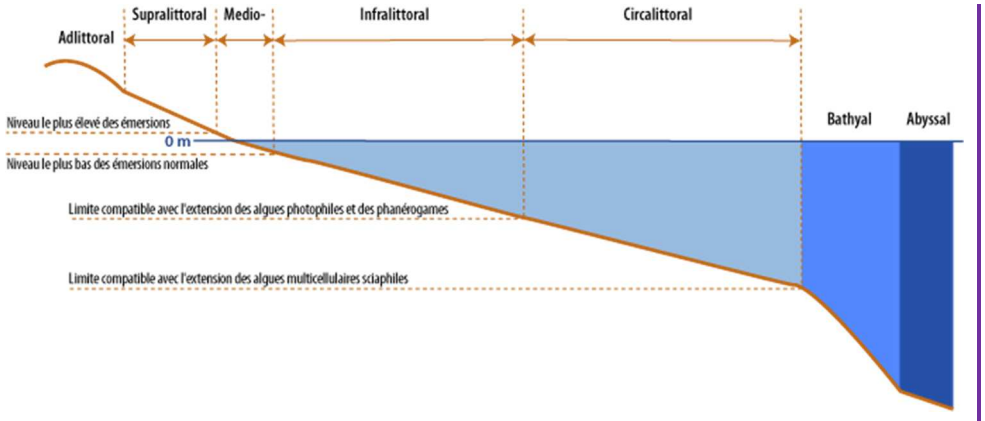


FIGURE a. **Zonation des domaines littoral et néritique**. Source à préciser.

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 impact évidemment la **sédimentation** :

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

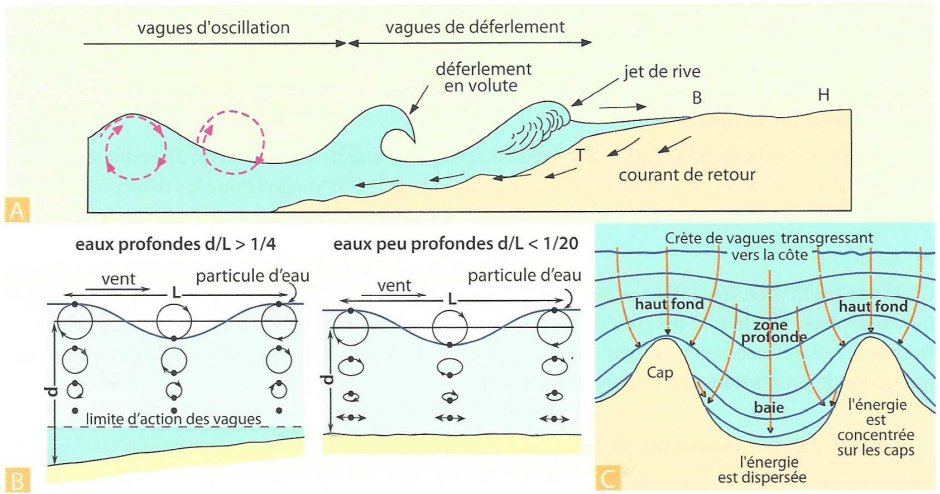
  - La **houle** : ***mouvement ondulatoire d'ensemble de la surface de la mer formé par des vents globaux dus à une dépression atmosphérique***.

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. froids), 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**).

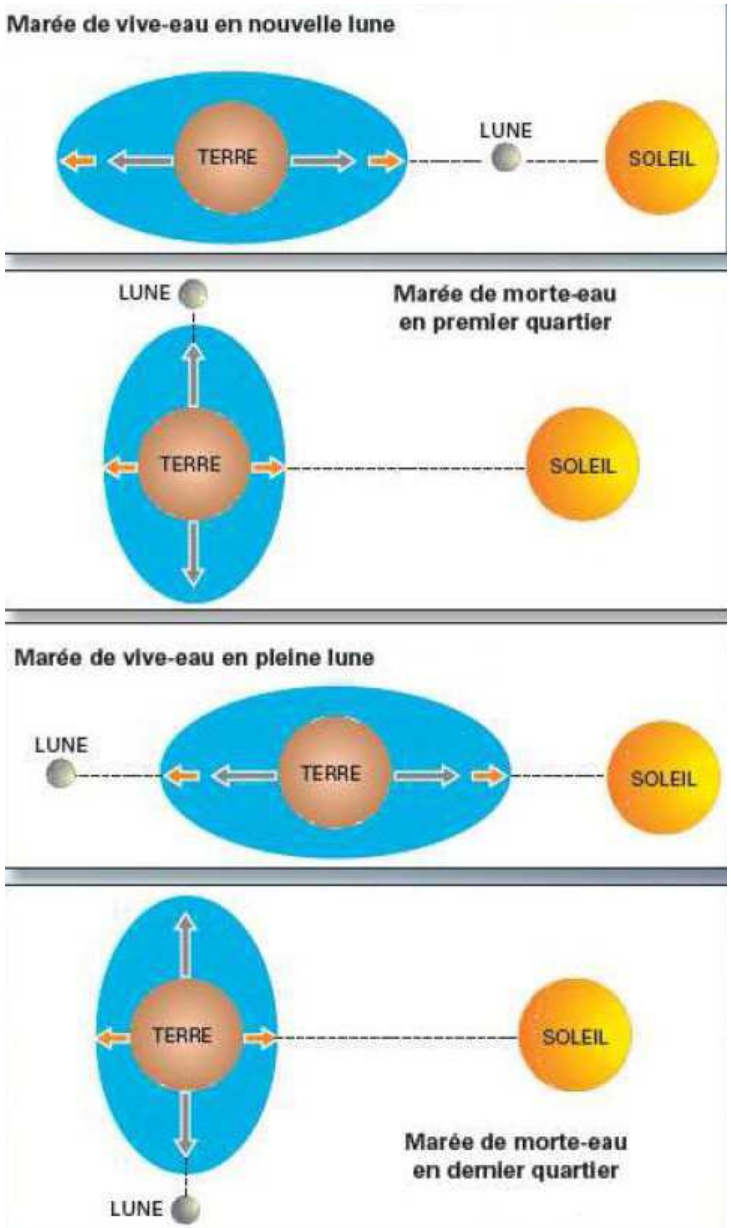


FIGURE 33. Les marées et l'effet du positionnement des astres sur leur intensité.
D'après RENARD *et al.* (2018)

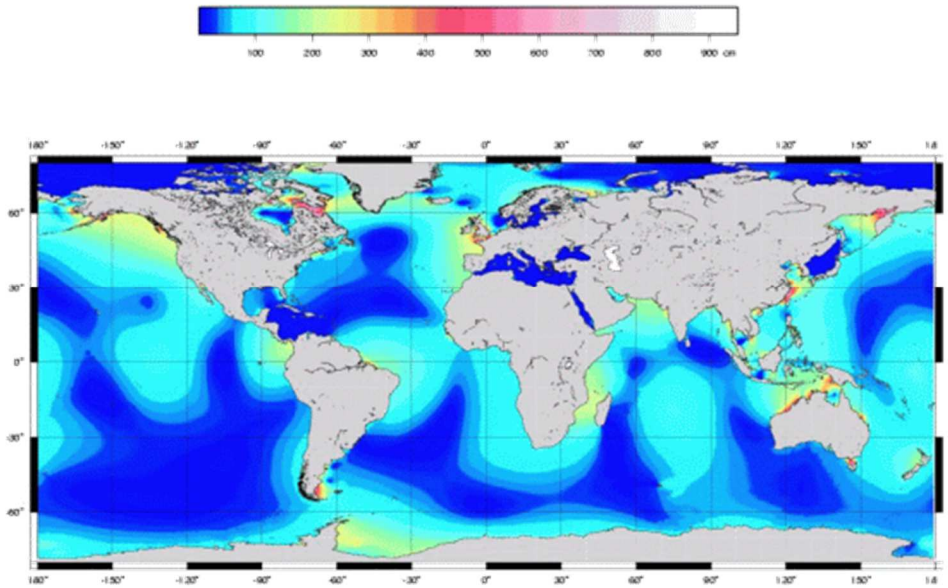


FIGURE 34. Marnage moyen dans le monde (en cm)
http://www.shom.fr/les-activites/activites-scientifiques/maree-et-courants/marees/marnage-et-types-de-marees/
(consultation mars 2019)

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 ***certains 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 détritique néritique et hémipélagique : un contrôle par le flux sédimentaire, la pente, la distance au littoral et l'hydrodynamisme

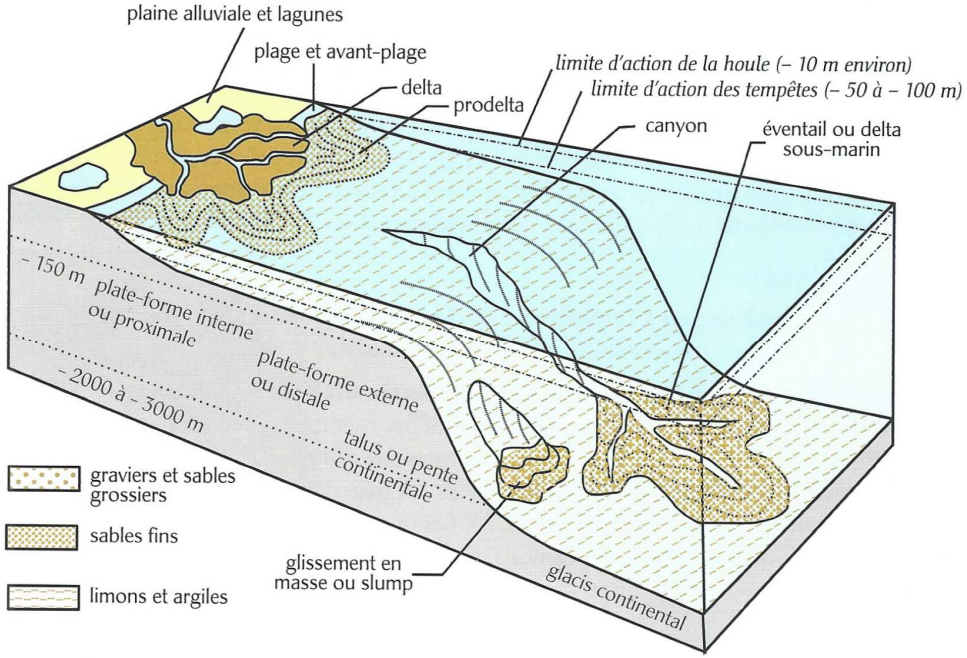


FIGURE 36. Principaux environnements de dépôt de la sédimentation détritique néritique et hémipélagique. D'après BEAUX *et al.* (2011).

- La **sédimentation détritique 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)

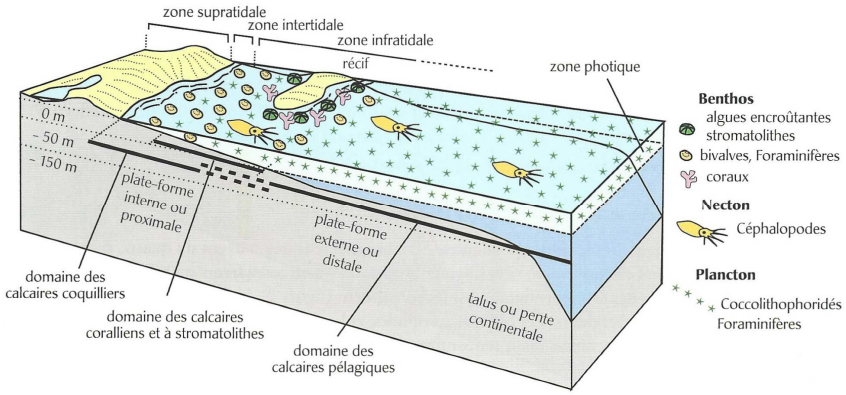


FIGURE 37. Principaux environnements de dépôt de la sédimentation carbonatée (néritique et hémipélagique). D'après BEAUX *et al.* (2011).

> ***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 repréciser 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***.

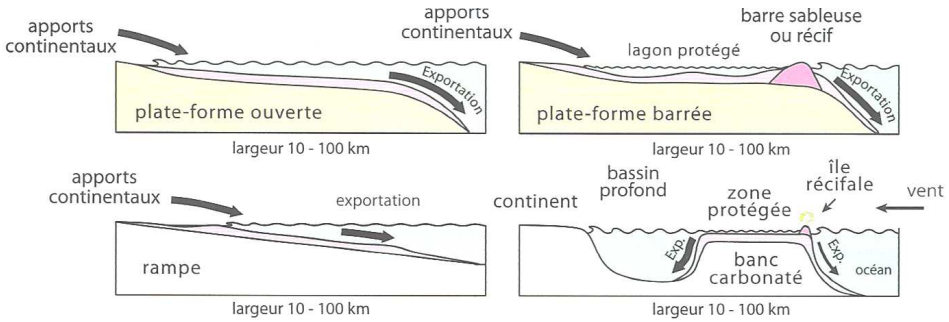


FIGURE 38. Principales modalités de dépôt de la sédimentation carbonatée (néritique et hémipélagique). D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

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

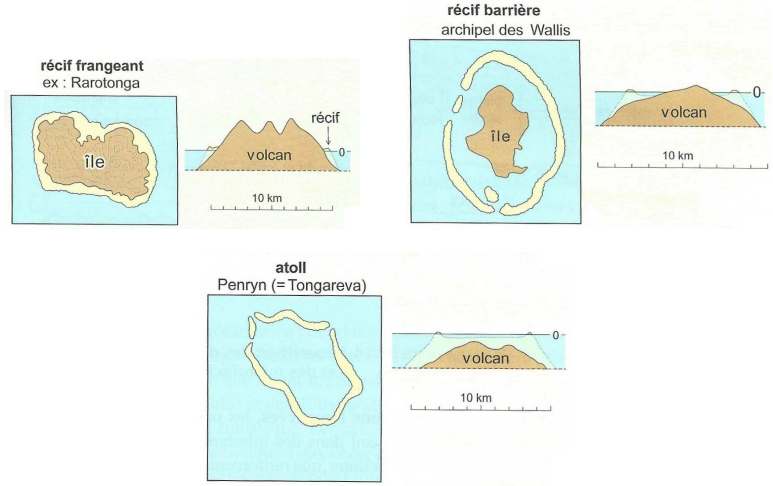


FIGURE 39. Typologie des récifs coralliens en milieu océanique distal [pour information]. D'après RENARD *et al.* (2018).

- 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'**attol** pour ***désigner un récif situé autour d'une île océanique immergée***.

δ. 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** dûs 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.

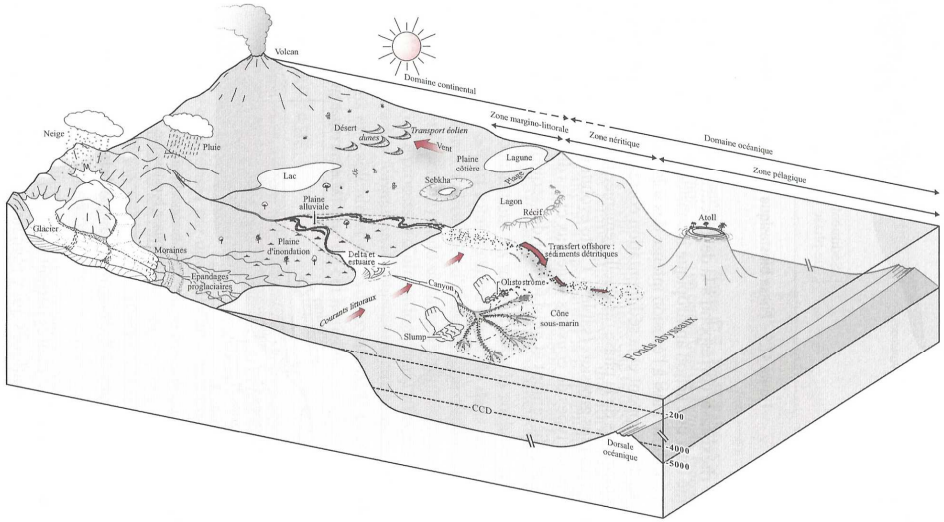


FIGURE 40. La diversité des environnements sédimentaires : vue d'ensemble. D'après EMMANUEL *et al.* (2007).

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 paraglaciaires avec les moraines puis les complexes fluvio-glaciaires 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 Formation de complexes dunaires (dunes, barkhanes)	
Lac	Particules généralement fines et éléments dissous Restes organiques	Dépôts lacustres avec alternance carbonatée (précipitation) et argilo-siliceuse (détritique) + MO = Varves	
Fleuves et rivières	Granulométrie variable Transport de particules, d'éléments dissous et de déchets organiques. Nombreuses figures sédimentaires	Dépôts fluviatiles Chenaux, barres, levées et brèches de débordement…	
Plaine d'inondation /alluviale	Particules moyennes (sables) aux argiles (parfois) riches en MO d'origine végétale	Levées de débordement avec litages plans à oblique, rides. Tourbe à charbons. Dans les bassins d'inondation, possibilité de développements pédogénétiques (carbonatés ou anhydritique)	
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	Dépôts estuariens vaseux Dépôts deltaïques Alternances sablo-argileuses à taux de sédimentation élevé et à forte composante organique = fort potentiel en hydrocarbures	
Lagune	Bassins avec connexion plus ou moins importante avec la mer franche	Sédimentation évaporitique	Océanique
Lagon	Milieu marin à faible tranche d'eau Milieu énergétique calme Organismes benthiques	Sédimentation bioclastique calcaire	
Récif	Organismes bioconstructeurs carbonatés (coraux, mollusques, algues, bactéries…) dans des conditions environnementales particulières (température, salinité, turbidité, agitation, oxygénation…)	Construction récifale (frangeant, barrière et atoll) bioherme ou biostrome	
Plateau continental	Fortes accumulations d'organismes benthiques et de sédiments détritiques grossiers	Sédimentation néritique carbonatée Dépôts soumis à l'action des vagues et des courants	
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)	Sédimentation gravitaire et hémipélagique	
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 gravitaire	
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 autrigéniques (nodules polymétalliques)	Sédimentation pélagique	
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 fluviatile

- 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 déclivité** 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 déclivité**, y compris au sein de **reliefs importants**.
  - Les **processus de circulation des eaux douces** (qui dépendant 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.

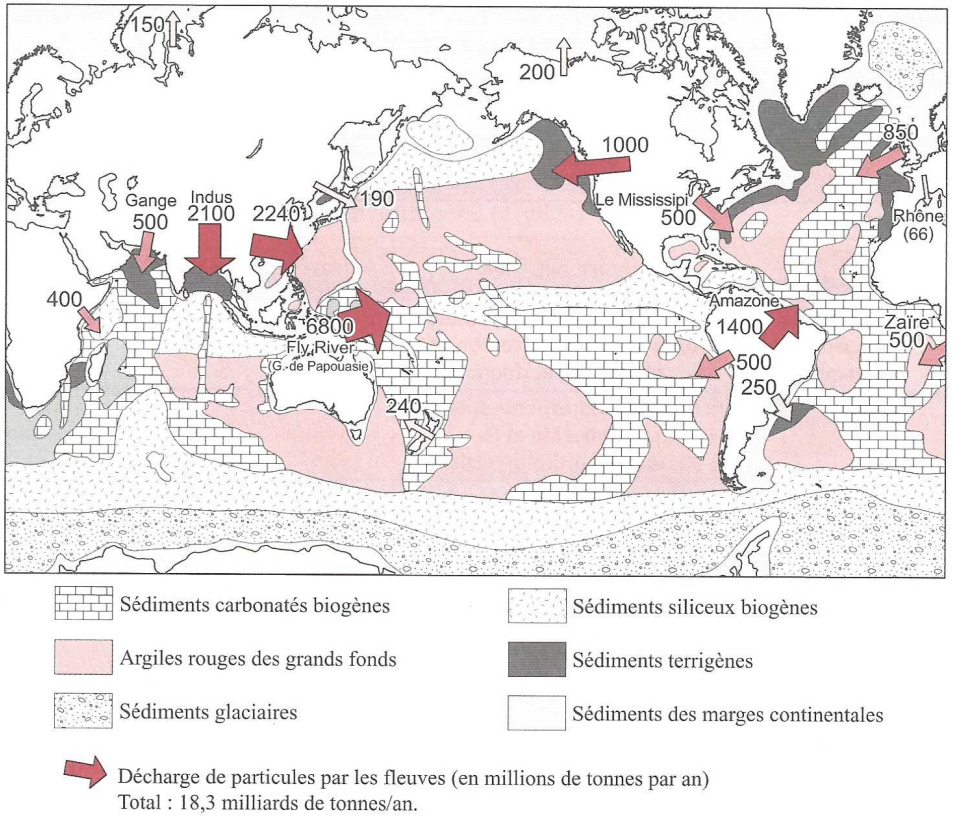


FIGURE 41. <u>Sédiments océaniques dominants : répartition de la sédimentation pélagique actuelle</u>. D'après EMMANUEL *et al.* (2007).
[À savoir expliquer… idéalement à savoir refaire en simplifié…]

- On notera :
  - Une **<u>zonation méridienne</u>** des **dépôts**, surtout due à la **proximité des continents** (**forts dépôts détritiques**) et à la **profondeur** (présence de **carbonates** aux **profondeurs modérées**)
  - Une **<u>zonation latitudinale</u>**, 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).

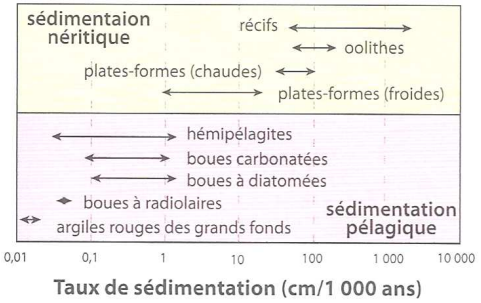


FIGURE 42. <u>Taux de sédimentation néritiques *vs.* pélagiques</u>.
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

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.

α. L'apport détritique : un apport essentiellement fluviatile, 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 <u>zonation méridienne</u>) ;
  - **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 <u>zonation latitudinale</u>).

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 :
  - **1**/ Dans les **eaux chaudes** (figure 44), situées **entre les latitudes moyennes** et **l'équateur**, où les **ions carbonates** sont très **disponibles à la biopréciptation**.

L'apparent paradoxe de la forte biopréciptation 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 **biopréciptation** ! 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** !

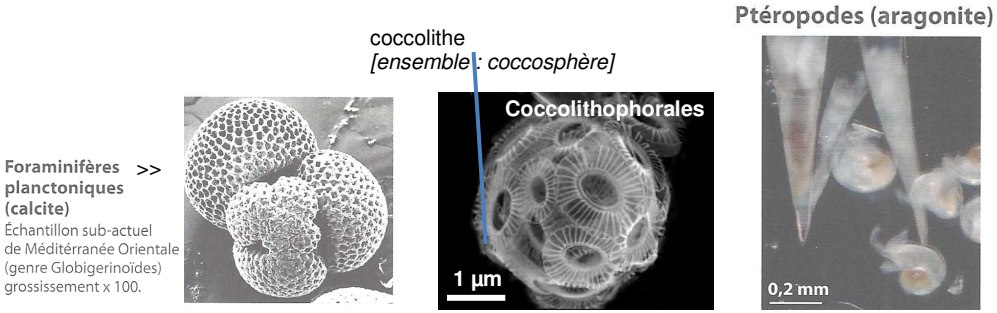
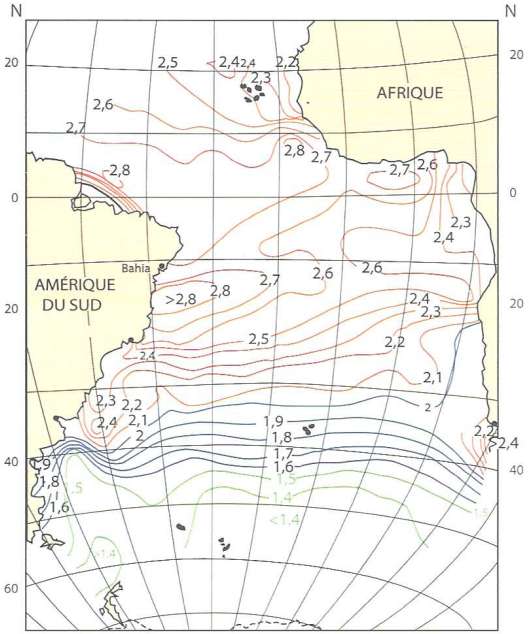


FIGURE 43. Quelques organismes pélagiques biopréciptant les carbonates.
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013) et INSU (CNRS).



Degré de saturation (Ω) par rapport au carbonate de calcium des eaux de surface

Toutes les eaux océaniques de surface sont sursaturées par rapport au $CaCO_3$ (aragonite et calcite).
La sursaturation facilite les processus de formation de tests et coquilles par les organismes, elle est plus forte dans les eaux tropicales et tempérées où vivent les principaux producteurs de carbonate (coraux et cocco-lithophoridés) tandis que les eaux subpolaires à saturation faible sont le domaine des radiolaires qui fabriquent un test siliceux.

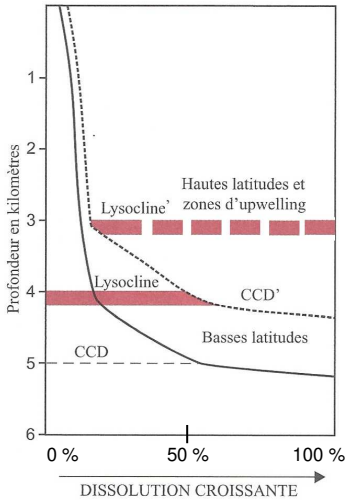
FIGURE 44. Saturation des eaux atlantiques en $CaCO_3$.
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

- **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 :
  - Dans les **plaines abyssales** proches des **marges continentales**
  - Au **niveau des dorsales** où la **lithosphère océanique remonte**.

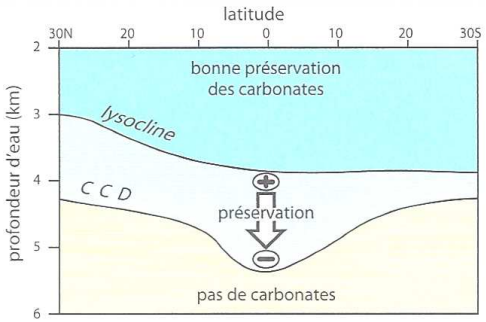
***Lysocline et CCD (*Calcite Compensation Depth*)**

- **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)



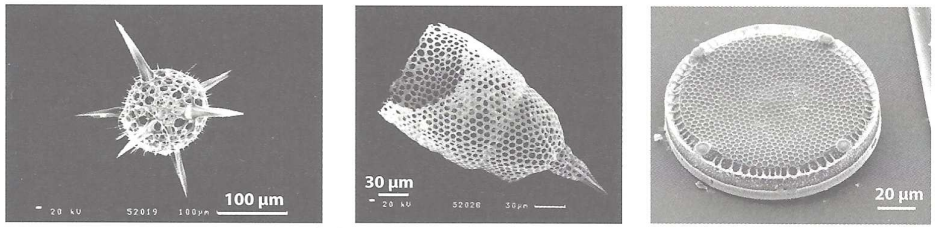
(b) Variation de la profondeur de la lysocline et surtout de la CCD en fonction de la latitude.

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 SiO_2** (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** :
    - Les **zones péripolaires** (ceintures péripolaires)
    - 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 conséquence, 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 :
    - le **franchissement de la CCD** empêche la **préservation des carbonates**,
    - alors que les **tests siliceux** sont plutôt **dissous rapidement à faible profondeur** mais au contraire **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).

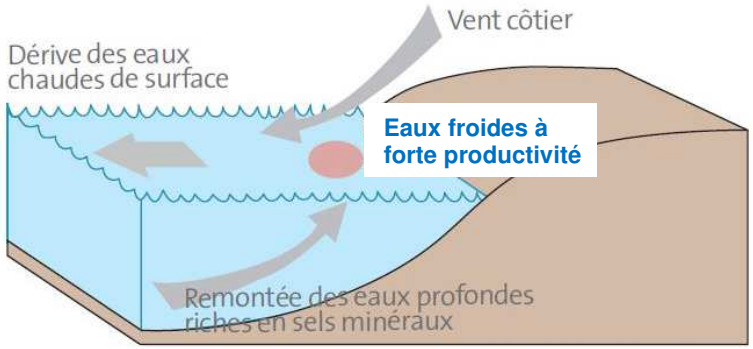
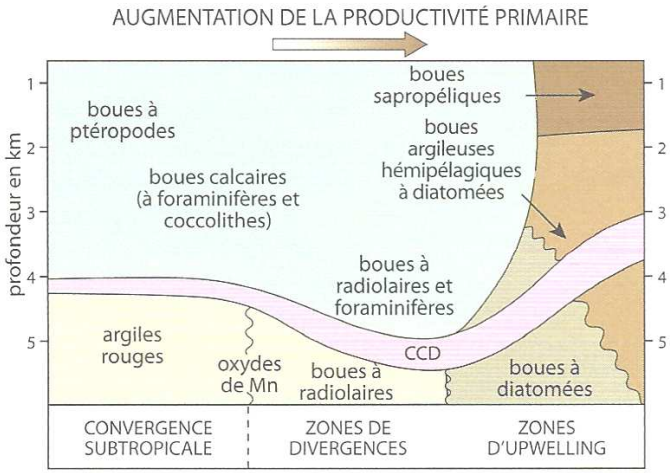


FIGURE 47. Le principe d'un *upwelling* côtier.
https://education.francetv.fr/matiere/geographie/cm2/article/l-upwelling-thalassa-des-mots-a-la-mer
(consultation mars 2019)

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



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).

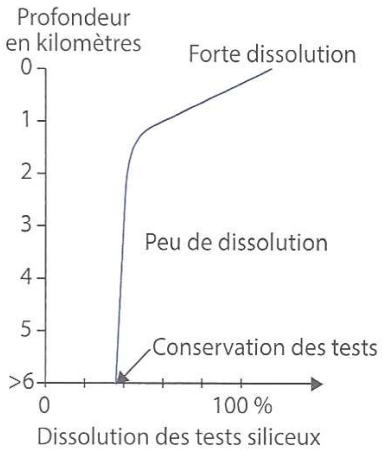


FIGURE 49. Profondeur et préservation des tests siliceux.
D'après BORDI *et al.* (2018).

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.

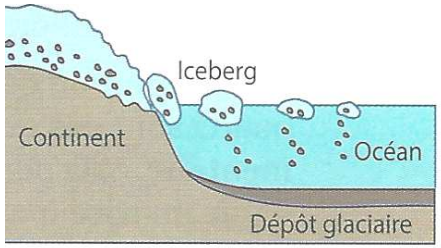


FIGURE 50. La sédimentation détritique océanique glaciaire en lien avec le transport par les icebergs et leur dépôt par gravité suite à la fonte.
D'après BORDI *et al.* (2018).

ε. Les argiles des grands fonds (« argiles rouges ») : des apports variés (fluviatile, 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 **certains sédiments biogènes remaniés** (figure 51).

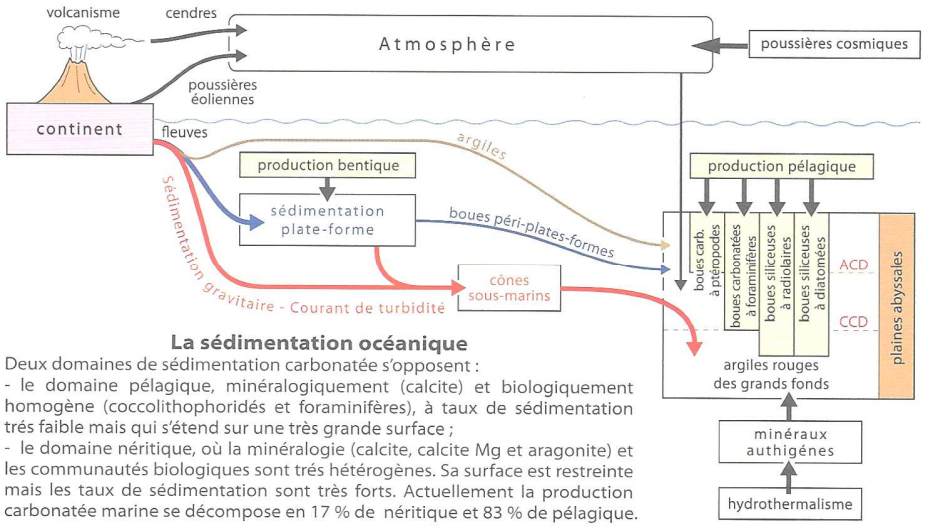


FIGURE 51. La sédimentation détritique océanique glaciaire en lien avec le transport par les icebergs et leur dépôt par gravité suite à la fonte.
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

e. Bilan

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

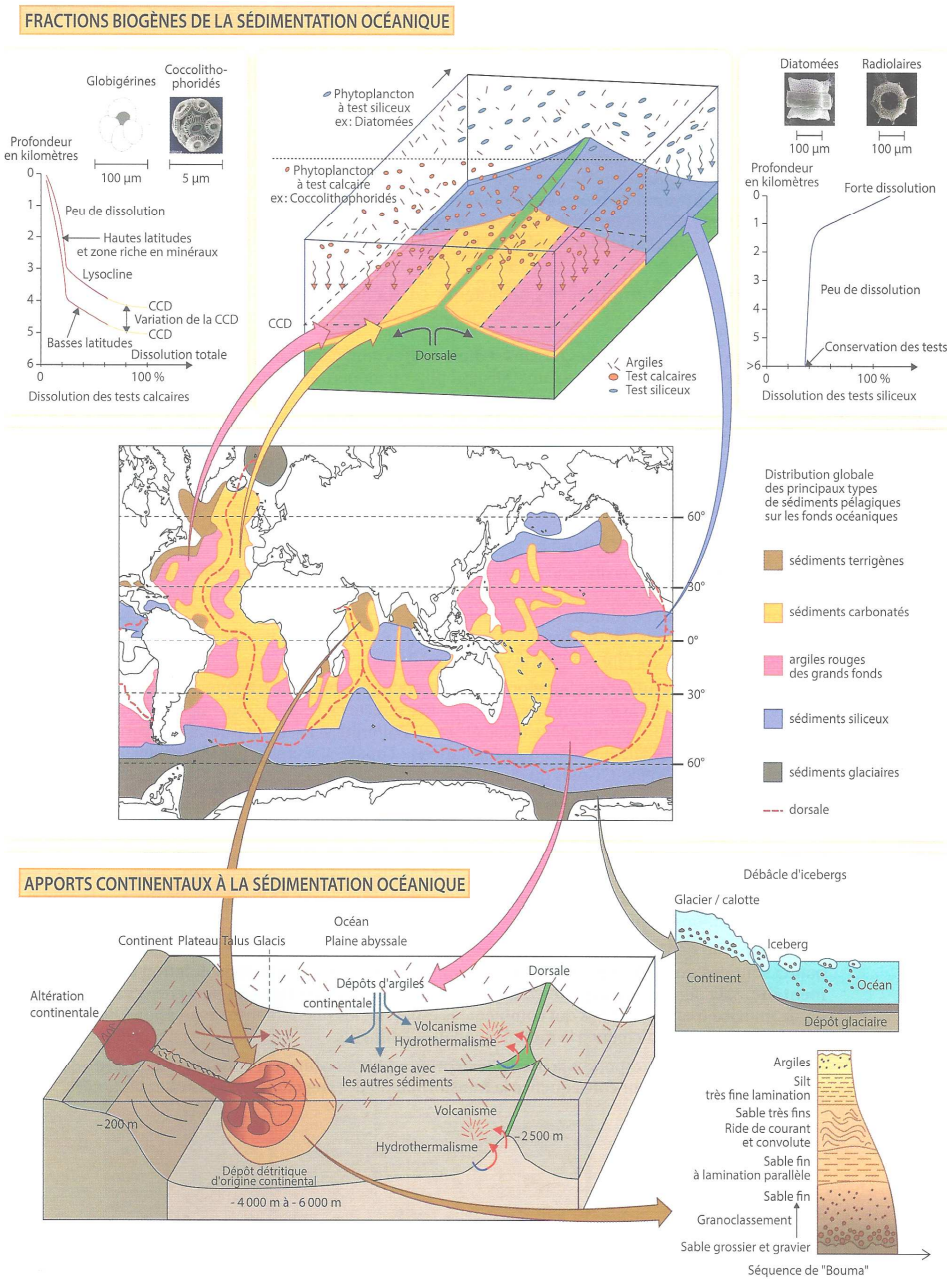


FIGURE 52. Vue d'ensemble de la sédimentation océanique.
D'après BORDI *et al.* (2018).

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…).

D. Le phénomène sédimentaire, un processus qui peut concentrer localement des ressources exploitables par l'Homme

Capacités exigibles	✓ **Présenter** la ressource comme un gisement exploitable et économiquement rentable. ✓ **Montrer** la diversité des ressources et l'inégalité des disponibilités locales ✓ **Distinguer** les problématiques (prospection, extraction, transport coût…) associées à une ressource locale abondante et à une ressource plus rare, nécessairement importée.

1. Les ressources : des gisements d'un matériau géologique exploitable et économiquement rentable

- On peut définir une **ressource géologique** comme étant un ***matériau géologique utile pour l'homme, exploitable et économiquement rentable***.
- **Explicitons** cette **définition** :
  - **Matériau géologique** : ***roche ou sédiment*** ;
  - **Utile** : ***utilisé par l'homme dans ses activités*** ;
  - **Exploitable** : ***accessible ou rendu accessible par des techniques humaines permettant son extraction*** ;
  - **Économiquement rentable** : ***le coût généré par l'extraction et le transport est moindre par rapport au bénéfice financier réalisé***.

Le lieu où se concentre une ressource géologique et qui peut être potentiellement exploité ou est exploité s'appelle un **gisement**.

- Il existe des **ressources renouvelables** (***cycliquement produites ou régénérées à échelle de temps humaine par les processus naturels : eau douce, vents, soleil…***) et surtout des **ressources non renouvelables** (***produites au cours des temps géologiques et en quantité finie***), c'est-à-dire **épuisables**.
- On s'intéressera ici surtout aux **ressources sédimentaires**.

2. Des matériaux de nature variée : panorama des ressources sédimentaires

- Les **ressources sédimentaires** sont variées :
  - **Minerais métalliques** : ***gisements de matières métalliques***.
    (!) La **transformation chimique** du **matériau** pour **purifier l'élément recherché** est souvent **nécessaire**.
    Ex. bauxite (gisement d'aluminium)
  - **Matériaux de construction** : ***sédiments et roches utilisés dans les constructions***.
    Ex. sable et graviers, chaux (calcaire calciné CaO, servant à fabriquer le ciment), calcaires (ex. craie de type tuffeau)…
  - **Matériaux industriels** : ***sédiments et roches utilisés dans la production de produits industriels***.
    Ex. sable → verre ; kaolin → papier, céramique…

- **Matières organiques énergétiques** (dites fossiles, car **épuisables**) : ***matériaux issus de la sédimentation carbonée et surtout exploités à des fins énergétiques***.
  Ex. charbon, pétrole, gaz naturel…
  (!) En réalité, le **pétrole** est aussi un **matériau industriel très utilisé**, notamment dans la **production des matières plastiques**.

3. Des matériaux inégalement répartis, concentrés localement en lien avec des processus sédimentaires historiques, et nécessitant un transport anthropique

- Les **matériaux présents** en un **lieu donné** dépendant de **l'histoire géologique et sédimentaire** de la **région** concernée.
- On peut ainsi noter que les **ressources** sont **inégalement réparties** sur le globe (exemple du pétrole à la figure 53).

Les **modalités de mise en place du pétrole** seront précisées plus loin (II.C).

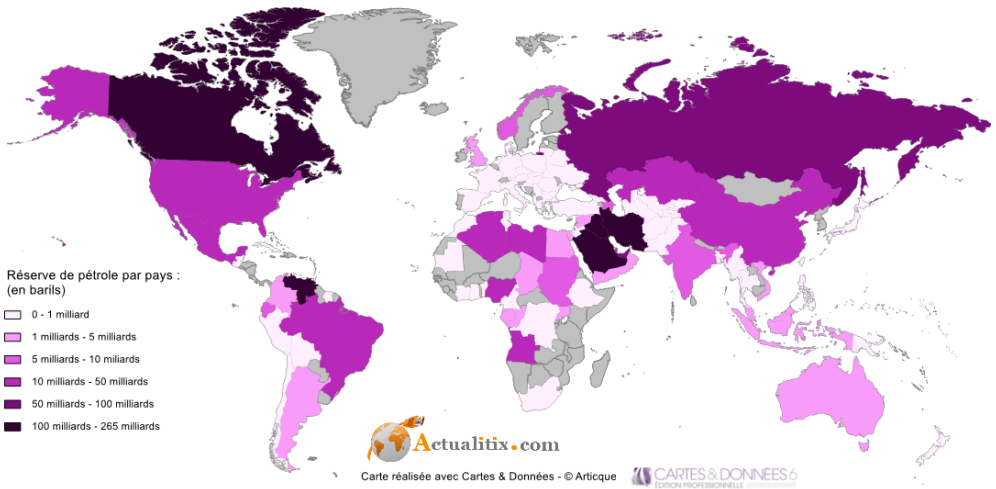


FIGURE 53. Réserves mondiales de pétrole par pays.
Actualitix.com (consultation mars 2019)

- Dans le cas de **ressources locales**, ***consommés à proximité immédiate de leur lieu d'extraction***, le **transport** est **faible** mais toujours **nécessaire**.
- Dans le cas de **ressources importées**, ***la ressource pouvant être consommée à l'échelle planétaire*** comme dans le cas du **pétrole** (figure 54), un **transport important** est nécessaire entre le **lieu d'extraction**, parfois le **lieu de transformation** (ex. raffinage du pétrole) et enfin le **lieu d'utilisation** (véhicules du monde, industries…).

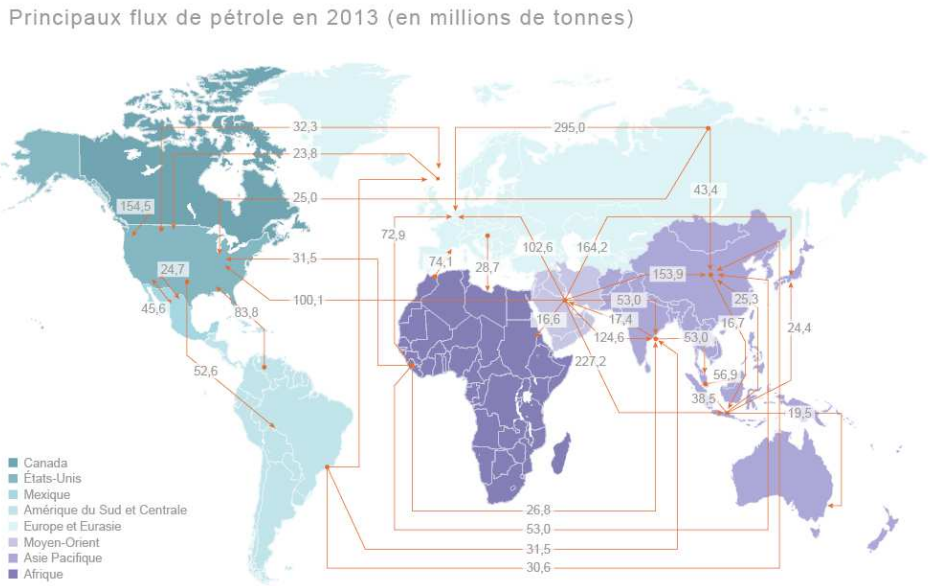


FIGURE 54. Flux de pétrole à l'échelle mondiale.
https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/transport-du-petrole
(consultation mars 2019)

4. Des ressources dont les temps de formation en font souvent des entités finies et non renouvelables, tendant à l'épuisement

a. L'épuisement progressif des ressources

- Les **matériaux géologiques** ayant été **accumulés** et **concentrés** au cours de **temps géologiques**, parfois sur de **longues périodes** de **plusieurs millions** à **plusieurs dizaines de millions d'années**, sont évidemment en **quantité finie**.

  Ex. dans le cas des **hydrocarbures**, on estime à **60 Ma** le **temps de formation** d'un **gisement**.

- Leur **exploitation**, si elle répond aux **besoins actuels**, aboutit à un **épuisement de la ressource** qui **compromet** la capacité des **générations futures** à répondre à leurs **propres besoins**.

  Ex. les **réserves mondiales de pétrole** sont estimées à **1200,7 milliards de barils de pétrole**… sachant qu'en **2017**, la **consommation quotidienne mondiale** était de **97,4 millions de barils par jour** soit **35 milliards de barils par an** …
  ⇒ 1200 / 35 = il resterait **34 années d'exploitation du pétrole mondial** (année 2055)… *sous réserve de ne pas découvrir de nouveaux gisements faramineux (ce qui reste peu probable ou alors à l'exploitabilité difficile)… et en tablant sur une consommation qui demeurerait constante !*

b. Une recherche perpétuelle de nouveaux gisements : la prospection

- **L'une des solutions** est de ***rechercher de nouveaux gisements*** : c'est ce qu'on appelle la **prospection géologique** (**minière**, **pétrolière**…).
- Le souci, c'est que :
  - La **finitude de la ressource** n'est pas contrecarrée pour autant,
  - Souvent, les **gisements découverts** sont souvent soit de plus en plus **petits**, soit de plus en plus **difficiles** et **coûteux** à exploiter.

La **prospection** utilise des **techniques variées** (souvent combinées) :
- **cartographie**,
- **diagraphies** (***mesure d'un paramètre physique d'une formation géologique***),
- **sismique-réflexion** (***étude de la propagation d'ondes sismiques artificielles dans le sous-sol permettant d'en comprendre l'organisation en couches sédimentaires***),
- **forages**…

L'objectif est de **reconstituer l'organisation du sous-sol** et d'en inférer la **présence d'une ressource utile**, même si aucune méthode n'est sûre à 100 %.

c. Une nécessité de contrôler l'utilisation de la ressource : les 3 R (réduire, réutiliser, recycler)

- Les **3R** constituent une ***stratégie de gestion des produits en fin de vie et des déchets applicables à toute ressource*** ; ils signifient :
  - **Réduire** : ***diminuer l'usage et les besoins*** ;
  - **Réutiliser** : ***donner un second usage à certains produits plutôt que d'en faire des déchets*** (assez **difficile dans le cas d'une ressource énergétique**, on le notera…)
  - **Recycler** : ***récupérer les matériaux et les réutiliser pour produire de nouveaux biens*** (*idem* pour les **ressources énergétiques : pas simple**…).
- Pour autant, avec **l'augmentation exponentielle de la population mondiale** et des **besoins afférents**, on voit mal **comment cette stratégie suffirait**…

d. Vers la substitution : le remplacement d'une ressource limitée par une ressource plus disponible

- Une **autre solution** peut être d'essayer de ***trouver des alternatives à l'emploi de ressources non renouvelables en les remplaçant par des ressources renouvelables ou d'autres ressources non renouvelables plus abondantes*** : c'est la **substitution**.
  Ex. emploi d'**énergies renouvelables** dans la **production d'énergie**…

5. Le cas de l'exploitation de la matière organique carbonée

- La **formation de matière organique sédimentaire** est traitée dans la partie I.C.

a. L'exploitation du charbon : une exploitation minière

- Le **charbon** est exploité par des **mines**, c'est-à-dire des ***sites continentaux creusés par l'homme dans le but d'en extraire une ressource géologique***.
- Selon les **gisements**, la mine peut être **à ciel ouvert** (ex. Chine, Allemagne) ou **sous terre**, nécessitant de nombreuses **galeries souterraines** (ex. Nord le France) (figure 55).
- Les ***formations sédimentaires non charbonneuses sont excavées et jetées de côté*** : on les appelle des **résidus miniers** ou **stériles**. ***Leur accumulation peut former des monticules*** comme les **terrils** (figure 56) visibles dans le Nord de la France.

Un peu d'histoire locale : quelques chiffres sur le charbonnage dans le Nord de la France

Durant la **période d'exploitation** (du XVIIe siècle aux années 1990) :
- **852 puits** ont été creusés, pour environ **100 000 km de galeries**,
- **326 terrils** ont été érigés
- et **2,4 milliards de tonnes** de charbon ont été extraites.

L'arrêt de l'exploitation est lié à sa **faible rentabilité**, d'autres **ressources énergétiques** coûtant par ailleurs **moins cher** et étant **moins polluantes** (pétrole, gaz, uranium, énergies renouvelables…).

D'après O. Chassaing

Figure 55. Galerie reconstituée au centre historique minier de Lewarde (Nord) montrant des wagonnets utilisés dans le déplacement du charbon ou des stériles.
© Centre historique minier, Lewarde.

Figure 56. Terril d'Haillicourt (Pas-de-Calais).
http://www.bakpoki.com/terril-haillicourt/ (consultation mars 2019)

b. L'exploitation des hydrocarbures (notamment le pétrole) : une exploitation par forages

- Les **hydrocarbures** sont, pour les géologues, des ***composés hydrogénocarbonés liquides ou gazeux formés par accumulation et piégeage de matière organique fossile***.
- Leur **nature gazeuse** ou **liquide** ne les rend exploitables que par des **forages**.

- En général, ***les hydrocarbures se forment dans une roche sédimentaire*** nommée **roche-mère**, dont ***ils s'échappent pour se concentrer dans une roche poreuse sus-jacente*** nommée **roche réservoir** où ils sont généralement ***bloqués dans leur remontée par une couche sus-jacente imperméable*** (**roche de couverture**).

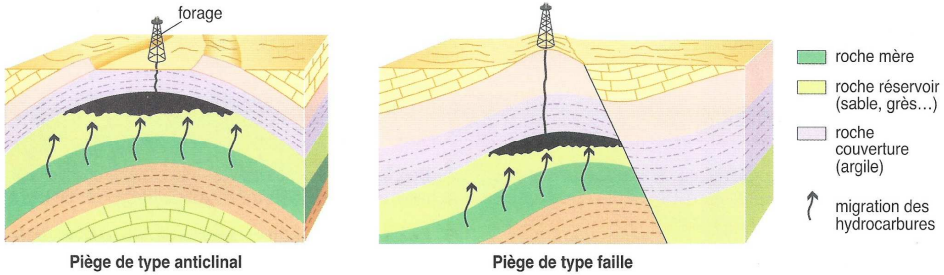


FIGURE 57. Les hydrocarbures, des fluides piégés dans les roches.
D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2010).

- **L'extraction des hydrocarbures** se fait par **forage** et **pompage** : du début, ***le fluide sous pression remonte de lui-même*** (**extraction primaire**) mais, par la suite, ***un système de pompage s'accompagnant d'injections (d'eau, d'air ou de CO_2)*** est nécessaire (**extraction secondaire**).

- L'extraction peut se réaliser en **milieu continental** mais aussi en **domaine océanique**, y compris avec des **plateformes *offshore*** parfois capables d'aller chercher les **hydrocarbures** à plus de 2000 m sous l'océan (figure 58).

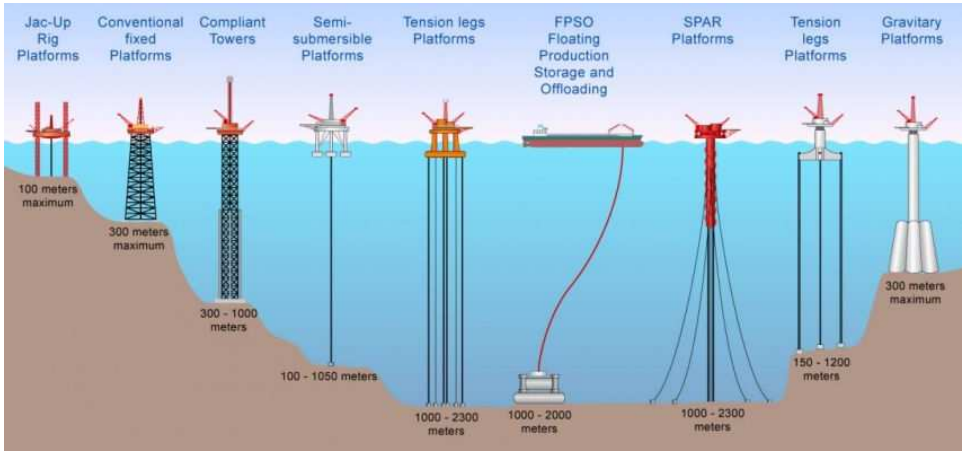


FIGURE 58. L'extraction des hydrocarbures par des plateformes pétrolières.
http://303tec3a.eklablog.com/le-petrole-a118926464 (consultation mars 2019)

Bilan (adapté du programme)	✓ Le **processus sédimentaire** induit le **tri mécanique** et/ou **géochimique** d'éléments. Ceux-ci peuvent être **concentrés** et constituer des **ressources**.

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 CO_2 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 particulaires 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** *sens large*
		< 2 µm	Argiles	Argile(s)	**Argilite = Pélite** *sens strict*	

* 63 µm = 1/16e 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 59) ***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**).

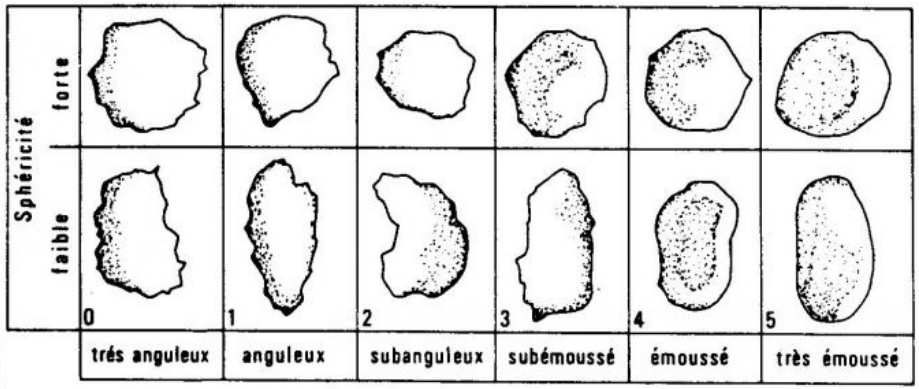


FIGURE 59. Exemple de classification morphoscopique.
https://www4.ac-nancy-metz.fr/base-geol/fiche.php?dossier=198&p=4actirea
(consultation mars 2019)

- ***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 débris ont subi un faible transport** et ont été **déposées 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 **lœss**, 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 60).

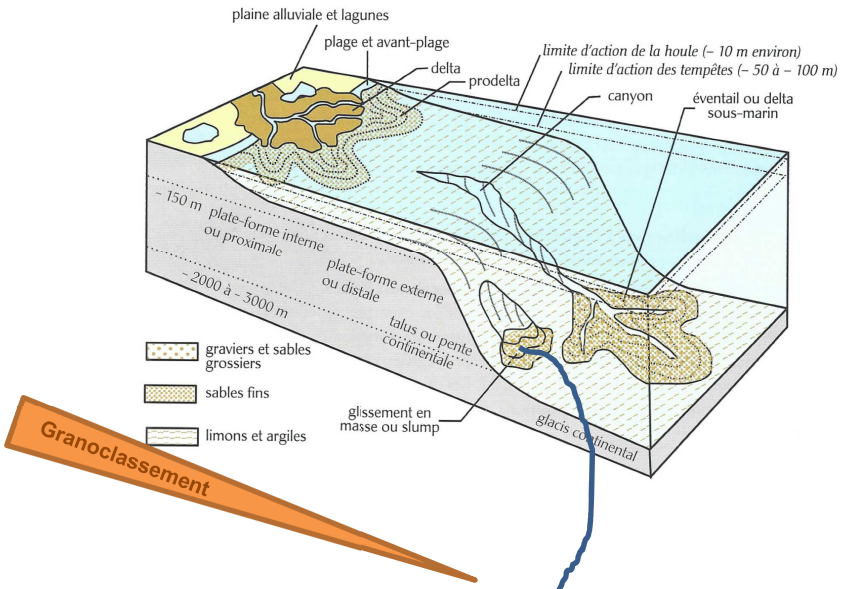
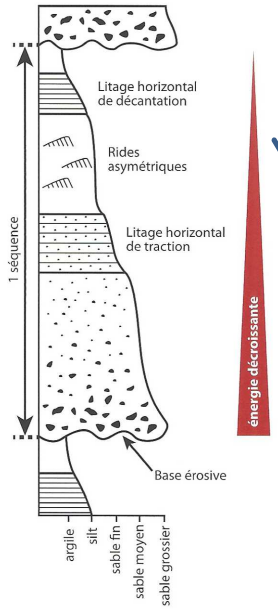


FIGURE [36]. Principaux environnements de dépôt de la sédimentation détritique marine (rappels). D'après BEAUX *et al.* (2011).



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 60. 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***.

γ. Une absence de granoclassement des dépôts glaciaires

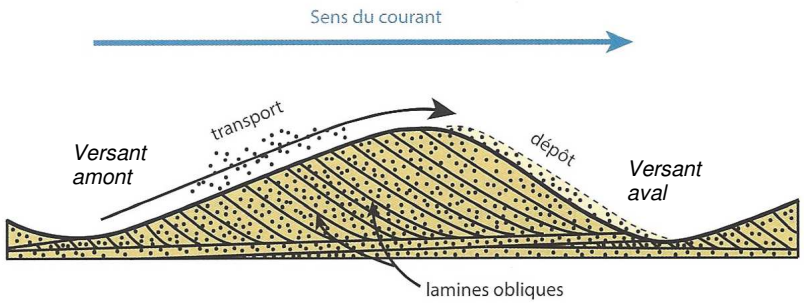
- D'une manière générale, les **dépôts glaciaires**, qu'ils soient **continentaux** ou **océaniques**, ne sont **pas granoclassés**.

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***.

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

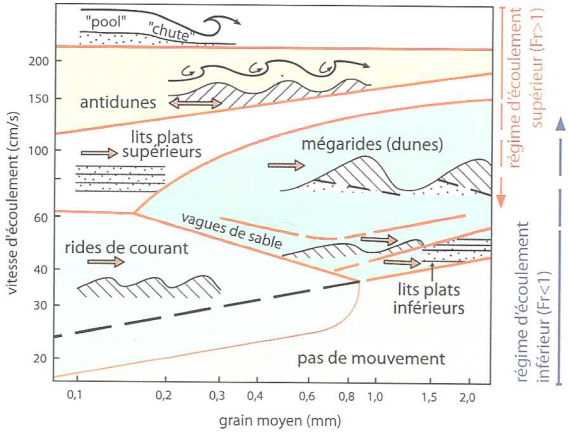
- Les **rides asymétriques** (figure 61) sont des ***rides de courants asymétriques à litage oblique et parallèle où le versant amont (face au courant) est le plus grand*** ; elles traduisent fondamentalement un **écoulement unidirectionnel** (ex. courant fluviatile…).



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

FIGURE 61. Organisation et fonctionnement d'une ride asymétrique. D'après JAUJARD (2015).

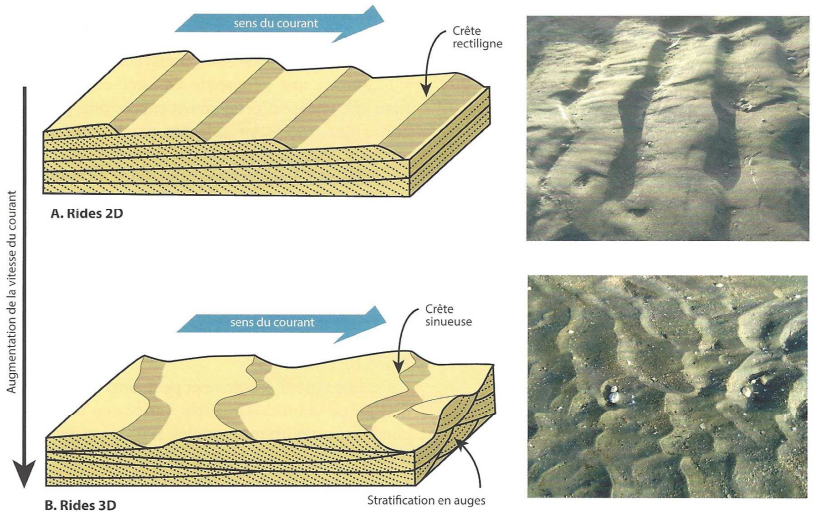
- ***Le type de rides formées et l'orientation des lamines sont fonction de la taille des grains et de la vitesse moyenne d'écoulement***, ce dont rend compte le **diagramme d'ALLEN** (figure 62).
- On notera que :
  - Les **régimes d'écoulements faible (dits « inférieurs »)** induisent des **dunes asymétriques** 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 62. 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 sinueuses (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 63. 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 63) :
  - 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 **lamines entrecroisées *(= en arêtes de poisson)*** (figure 64).
  L'explication de ces structures géométriques, en réalité en lien avec plusieurs cycles successifs de marée, n'est pas évidente.

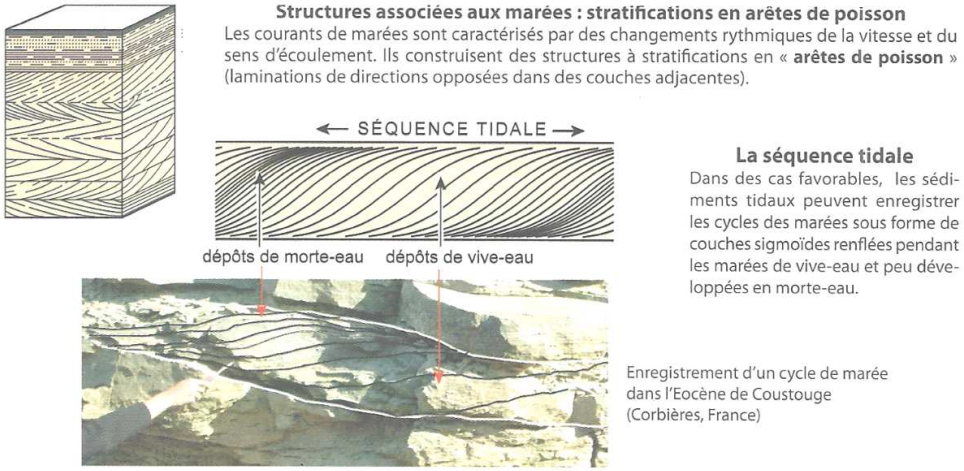
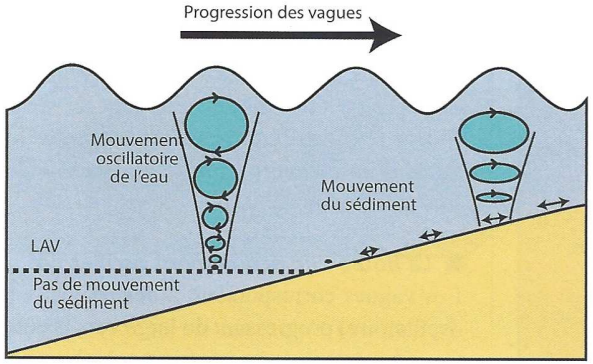
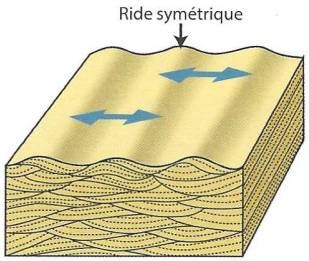


FIGURE 64. Stratifications entrecroisées (d'origine tidale). D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

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 65).





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

FIGURE 65. 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 66) qui est une ***superposition oblique de dépôts alluvionnaires granoclassés verticalement***.

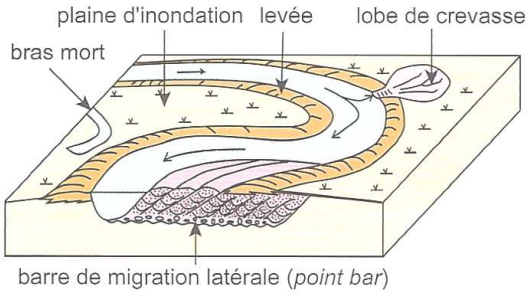
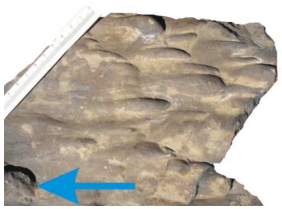


FIGURE 66. Figure sédimentaire de méandre : la barre de migration latérale.
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

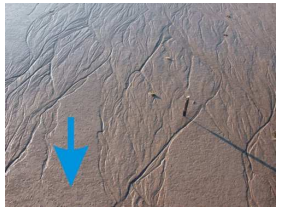
d. D'autres indicateurs mécaniques : les figures d'érosion et d'impact

- On peut trouver en **surface du sédiment** (figure 67) :
  - Des **figures d'érosion** comme :
    - Les **figures en croissant** (*crescent marks*) qui sont des ***marques dues à la déflection 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 dessication**, ***craquelures polygonales typiques de sédiments argileux ayant subi une intense déshydratation*** ;
  - Des **empreintes de cristaux**…

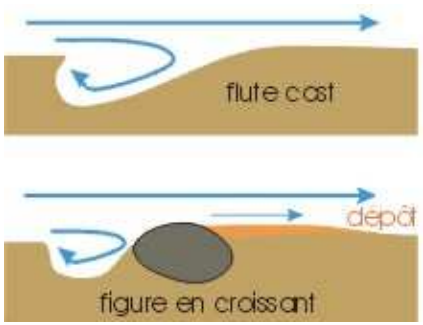
Crescent marks

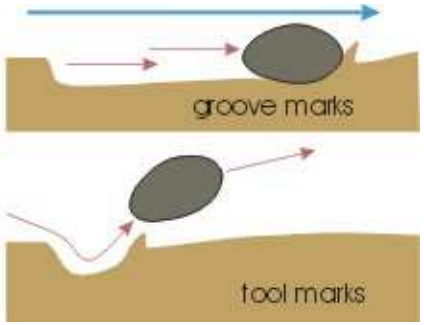


Flute casts

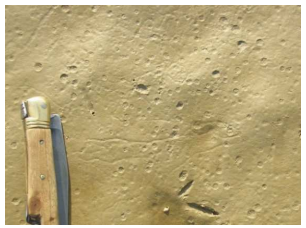


Rill marks

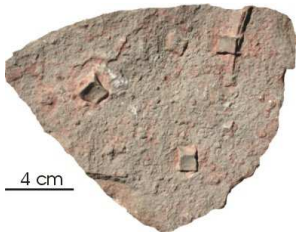




Fentes de dessication



Gouttes de pluie



Traces de cristaux (halite) dans un grès

FIGURE 67. 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 68).

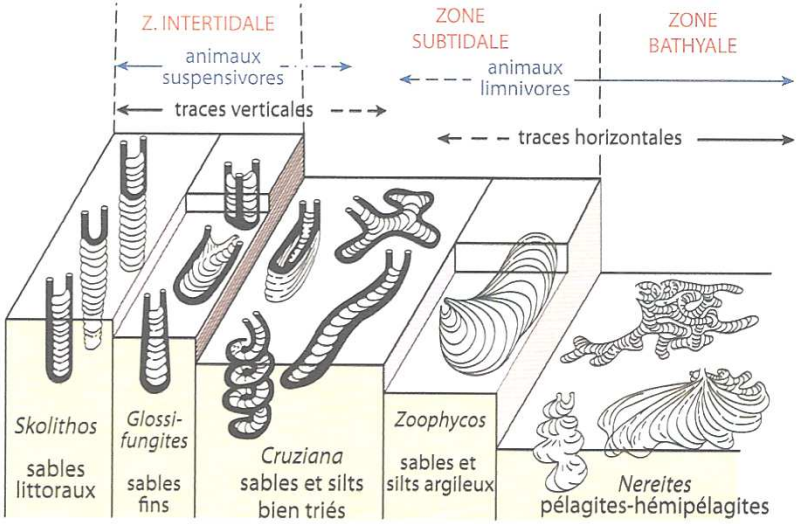


FIGURE 68. Quelques ichnofaciès indicateurs de la bathymétrie.
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

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

- Voir la figure 69.

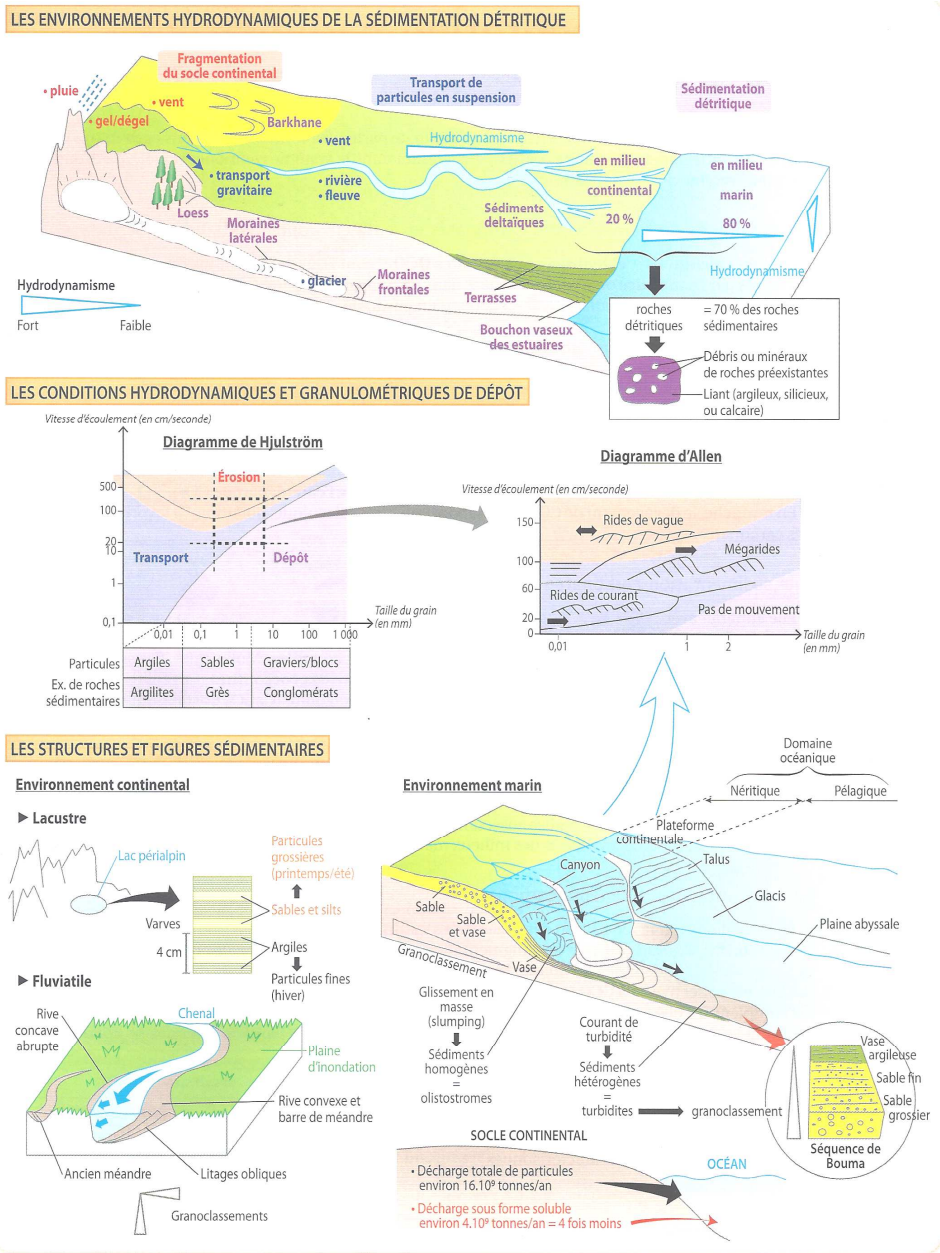


FIGURE 69. La sédimentation détritique : une vue d'ensemble.
D'après BORDI *et al.* (2018)

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 70) 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 **CO_2**).

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.

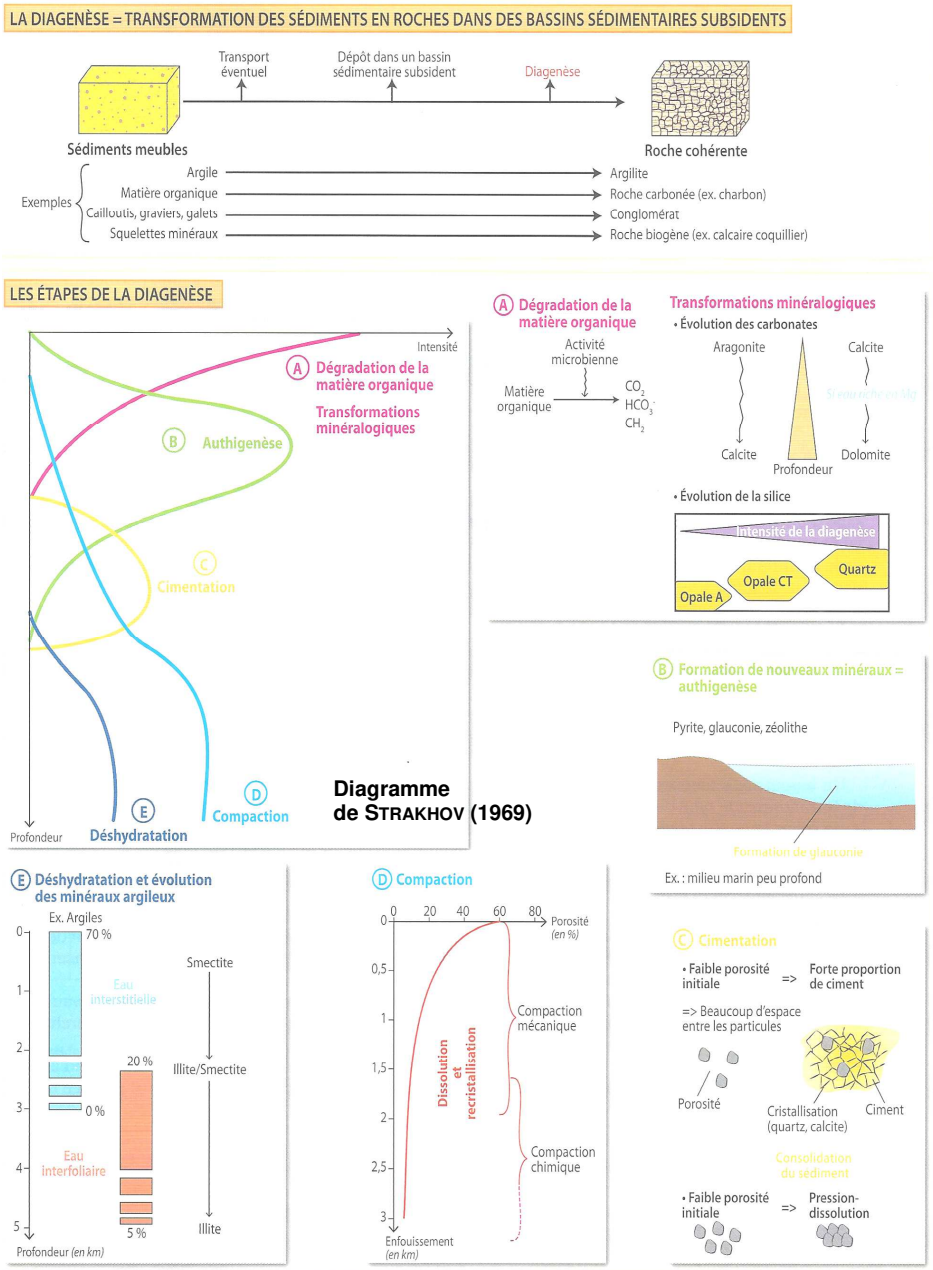


FIGURE 70. La diagenèse (détritique) : une vue d'ensemble.
D'après BORDI *et al.* (2018)

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

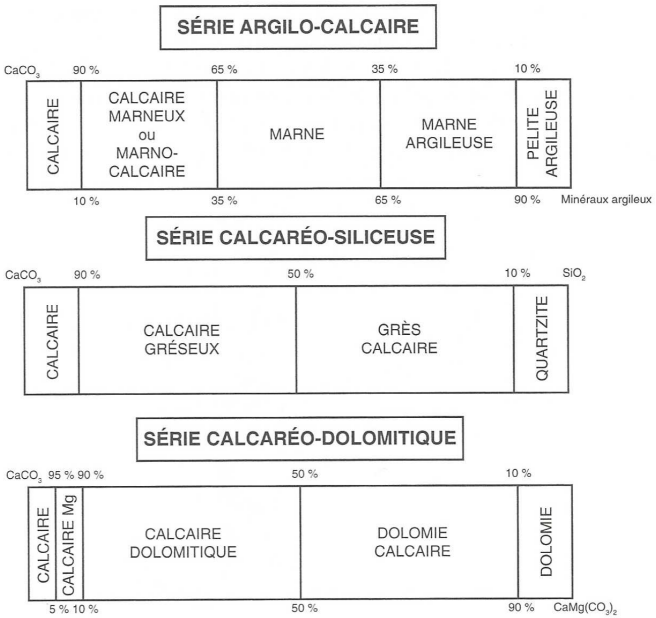


FIGURE 71. <u>Séries continues de roches sédimentaires contenant deux phases</u>.
D'après EMMANUEL *et al.* (2007).

- On appelle **roches carbonatées** les ***roches dont la base constitutive est le carbonate de calcium $CaCO_3$ (calcite ou aragonite)***.
- Les ***roches qui en comprennent une majorité*** s'appellent des **calcaires**.
- Les **roches carbonatées** sont **rarement pures** et peuvent contenir (figure 71) :
  - Une **phase argileuse**.

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

  - Une **phase sableuse (siliceuse)**.
  - Une **phase dolomitique** ; la **dolomite** est un ***minéral de formule ($CaMg(CO_3)_2$)***.

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

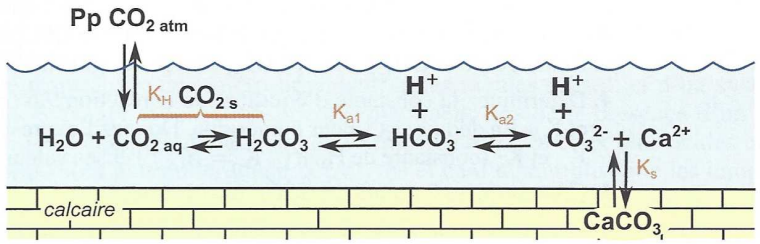
α. Un équilibre entre dioxyde de carbone / ions hydrogénocarbonates et carbonates

- **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 :

$$Ca^{2+} + 2\,HCO_3^- \underset{\text{dissolution}}{\overset{\text{précipitation}}{\rightleftharpoons}} Ca\,CO_3 + CO_2 + H_2O.$$

- Dans le détail, cette **réaction** implique **plusieurs réactions** dont la **formation d'ions bicarbonates (HCO_3^-)** et **d'acide carbonique H_2CO_3** (figure 72).

Ces aspects sont repris dans le chapitre 25 sur le cycle du carbone.



Les divers équilibres du système des carbonates.

FIGURE 72. <u>Les réactions chimiques en jeu dans le système des carbonates</u>.
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 **stalagtites** 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 scléractiniaires	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 $CaCO_3$ est fréquemment bioprécipité ou biopiégé 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 CO_2 atmosphérique : un acidifiant défavorisant la précipitation

- Comme nous pouvons le voir sur la figure 72, le **CO_2** dissous dans l'eau, en équilibre avec le **CO_2 atmosphérique**, favorise la **dissolution** des **carbonates** en favorisant **l'acidification** du milieu aquatique.

On ne présente plus le célébrissime 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 CO_2**. 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)

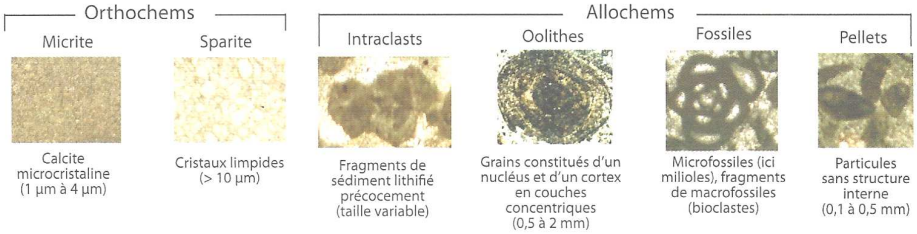
- Les **deux classifications** sont en réalité **complémentaires** et souvent utilisées en **association**.

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

- 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 **ooïdes**, ***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

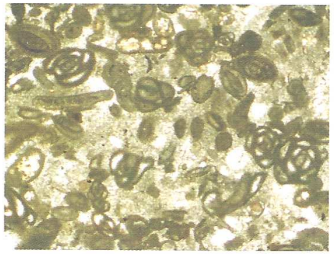
		CALCAIRES & DOLOMIES PRIMAIRES				
		> 10 % Allochems		< 10 % Allochems		Bioherme
		Sparite > Micrite	Micrite > Sparite	1 à 10 % Allochems	< 1 % Allochems	
> 25 % Intraclastes		Intrasparite	Intramicrite	Micrite à intraclastes	Micrite	Biolithite
> 25 % Oolithes		Oosparite	Oomicrite	Micrite oolitique		
Rapport Fossiles sur Pellets	R > 3	Biosparite	Biomicrite	Micrite fossilifère		
	3 > R > 1	Biopelsparite	Biopelmicrite			
	R < 1	Pelsparite	Pelmicrite	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)

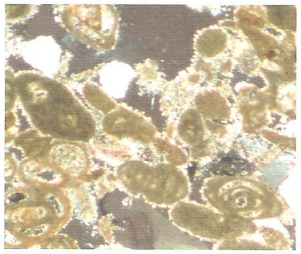
Eléments figurés dominants	Matrice dominante (micrite)	Ciment dominant (sparite)	Construction
bioclastes	**biomicrite**	**biosparite**	**biolithite**
oolithes	**oomicrite**	**oosparite**	
péloïdes	**pelmicrite**	**pelsparite**	

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].

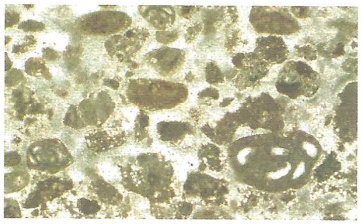


Packestone/wackestone à milioles et pellets
Lutétien moyen du Bassin de Paris

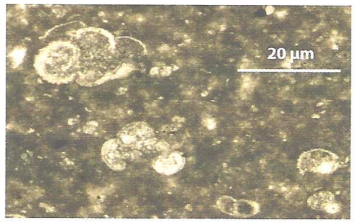


Grainstone à milioles et pellets
Lutétien moyen du Bassin de Paris

DISPOSITION DES GRAINS	FRÉQUENCE DES GRAINS	PRÉSENCE DE BOUE CARBONATÉE	ABSENCE DE BOUE CARBONATÉE
JOINTIFS	> 10 %	PACKESTONE	GRAINSTONE
NON JOINTIFS		WACKESTONE	
	< 10 %	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 73. Classification de DUNHAM (1963).
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

TABLEAU VI. Classification de DUNHAM (1963) simplifiée.
D'après DENŒUD *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		**Packestone**
		Grains non jointifs	Fréquence des grains > 10 %	**Wackestone**
			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 packestone) si les grains sont jointifs et *floatstones* (plutôt que wackestones) lorsque les grains ne sont pas jointifs.

- La **classification de DUNHAM (1963)** (figure 73 + 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 utilsiés :
  - 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.

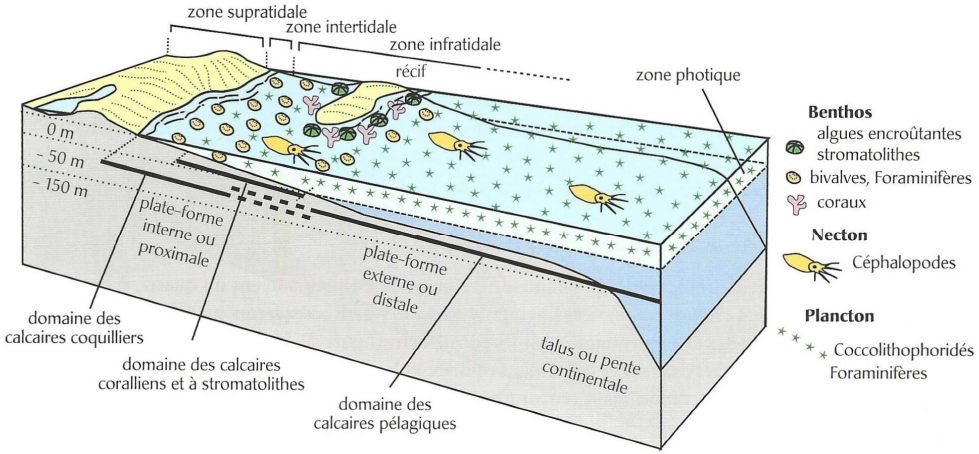
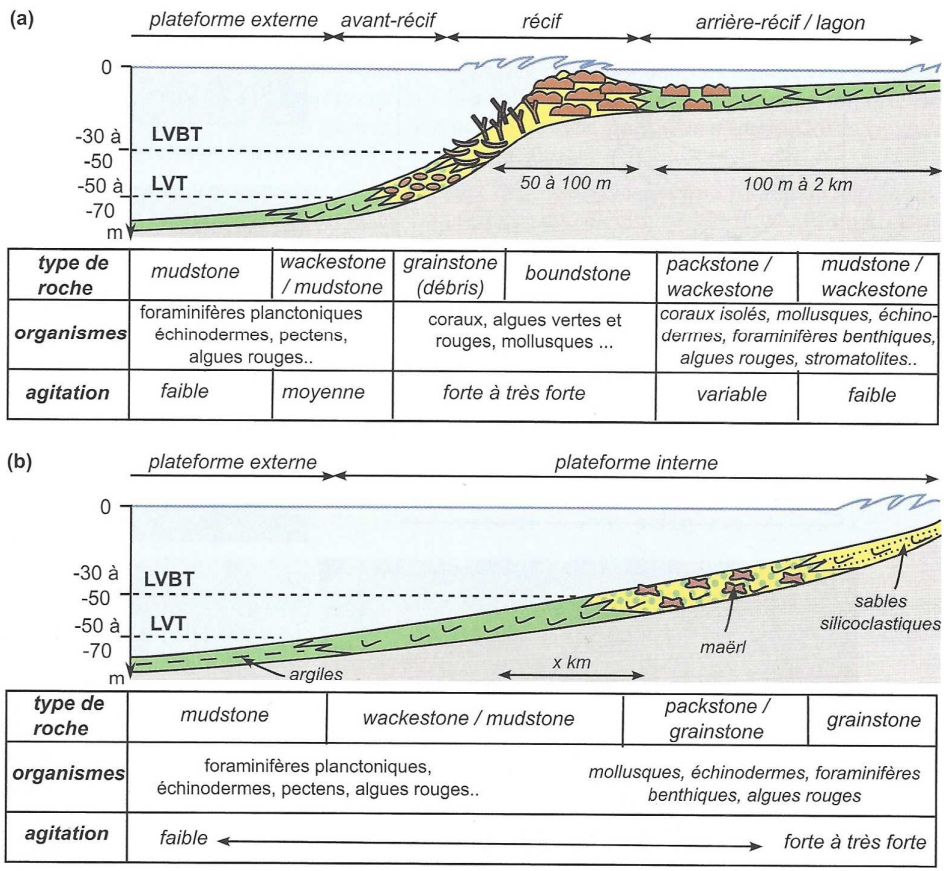


FIGURE [37]. Principaux environnements de dépôt de la sédimentation carbonatée.
D'après BEAUX *et al.* (2011).

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 73) :
  - On note une **zonation par la profondeur** dans le cas d'une **plateforme ouverte**, en lien avec **l'hydrodynamisme qui décroît** 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***).



Les différents environnements sédimentaires de plates-formes : **(a)** modèle de plate-forme barrée en mer chaude ; **(b)** modèle de plate-forme ouverte en mer tempérée.
La classification des roches carbonatées selon Dunham (1re 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 74. 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

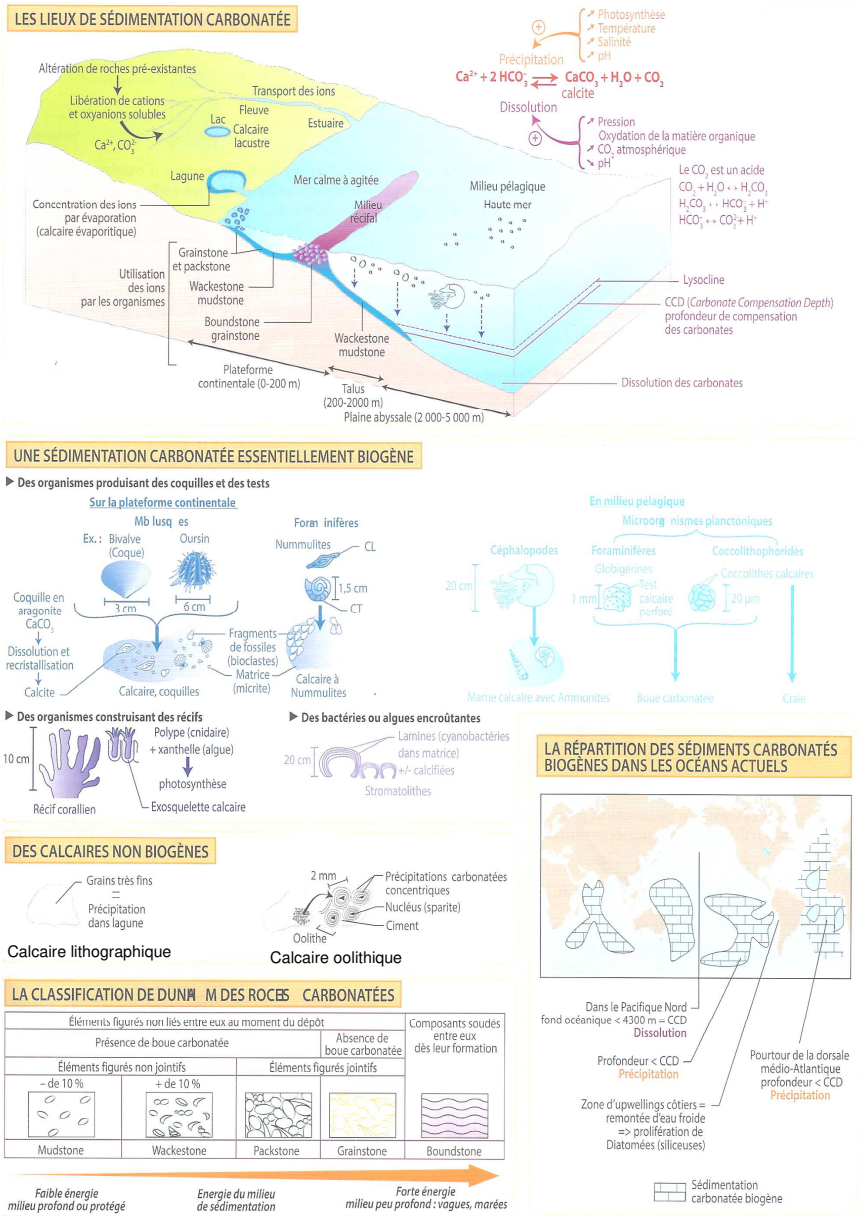


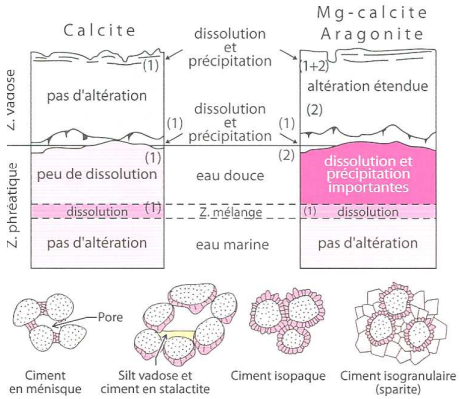
FIGURE 75. La sédimentation carbonatée : vue d'ensemble.
D'après BORDI *et al.* (2018).

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/recristalisation) 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.



La diagenèse des carbonates néritiques
L'aragonite et la calcite magnésienne sont métastables et se transforment en calcite au cours de la diagenèse précoce car les carbonates néritiques se trouvent rapidement au contact d'une nappe phréatique d'eau douce. La calcite Mg disparait en premier. Les transformations sont plus importantes dans la zone phréatique que dans la zone vadose (au-dessus de l'interface air-eau) ; elles sont commandées soit par la pCO_2 (1), soit par les degrés de solubilité des minéraux (2).

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.

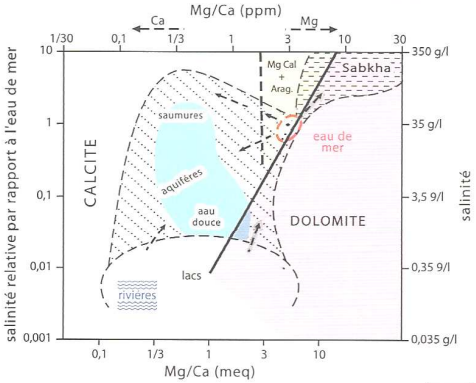
Dans le domaine pélagique, la diagenèse précoce est réduite du fait de l'absence de carbonates métastables (production calcitique) et d'eau douce dans le milieu interstitiel. L'évolution diagénétique, principalement par compaction, peut donc se résumer à la succession : **boues —> craies —> calcaires**.

FIGURE 76. 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 Mg^{2+}*** (figure 77).
- Notons que les **ions Mg^{2+}**, fortement **hydratés**, **ne précipitent pas directement** à partir de l'eau de mer (même si **certains organismes** peuvent **biopréciptiter** de la dolomite).

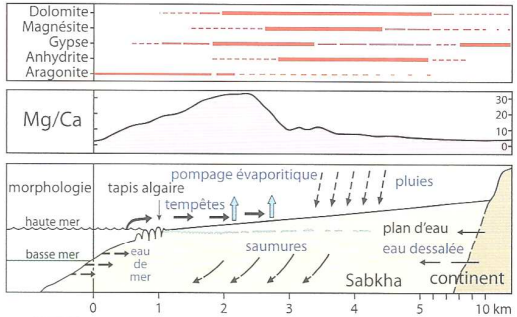
La dolomite ne précipite pas directement à partir de l'eau de mer car la forte hydratation de l'ion Mg rend difficile son incorporation dans un cristal. Elle se forme donc au dépend d'un précurseur calcitique ou aragonitique selon la formule : $2\ CaCO_3 + Mg^{2+}$ --> $CaMg\ (CO_3)^2 + Ca^{2+}$
Cette réaction, qui est commandée par le rapport Mg/Ca du milieu, peut être précoce sous forme de protodolomite à petits cristaux ($Ca_{55}Mg_{45}(CO_3)_{100}$, diagenèse syn-sédimentaire) et faire croire à une origine primaire. Des dolomites tardives, à gros cristaux, se forment au cours de l'enfouissement.

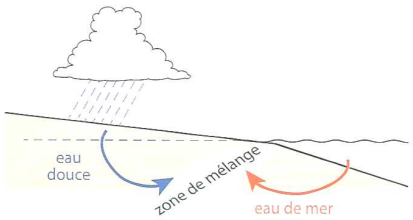


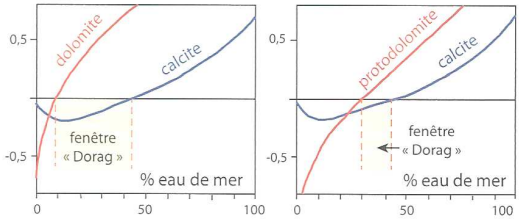
Le domaine de formation des carbonates en fonction de la salinité et du Mg/Ca des eaux
L'eau de mer correspond aux conditions de formation de l'aragonite et de la calcite Mg, et dans une moindre mesure de la dolomite. Aux faibles salinités, la dolomite peut se former pour des Mg/Ca proches de 1, aux 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 sursalure : 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 model 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 77. 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.

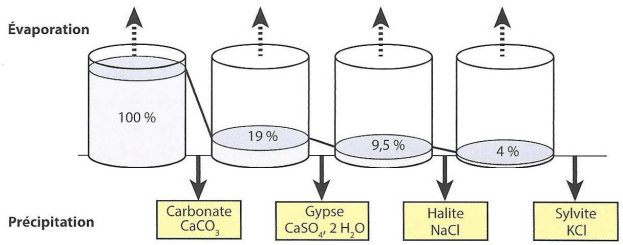
- Notons enfin que, ***en surface, la dolomite est instable et les eaux douces (par exemple météoriques) ont tendance à altérer chimiquement la dolomite et emporter les ions Mg^{2+}, avec pour conséquence la formation de calcite résiduelle*** : c'est la **dédolomitisation**.

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 78) 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**.



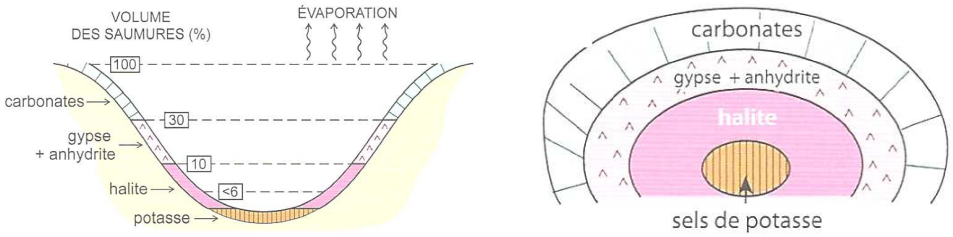
Séquence de cristallisation des évaporites (d'après Caron *et coll.*, 2003).
Lors de l'évaporation progressive de l'eau de mer (en bleu), les sels dissous précipitent successivement. La proportion d'eau restante est indiquée en pourcentage.

FIGURE 78. 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** (figure 79).



Vue en coupe **Vue aérienne**

FIGURE 79. 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 80) :
  - 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**.

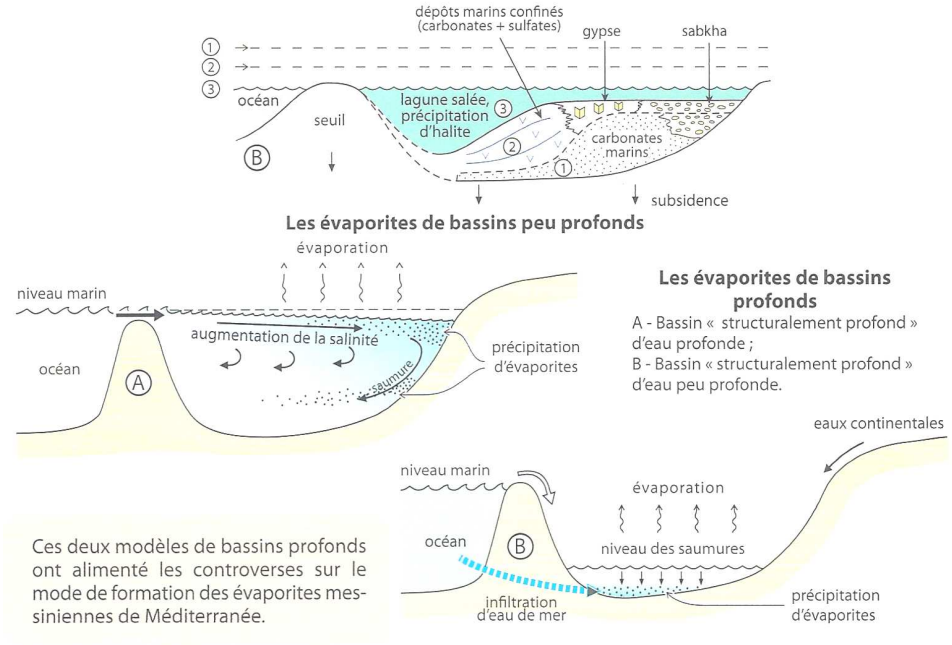


FIGURE 80. Typologie sommaire des bassins évaporitiques.
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

C. Le devenir sédimentaire de la matière organique non oxydée : la lignée carbonée

- On s'intéresse ici au **devenir de la matière organique** préservée de l'oxydation qui subit un **enfouissement** et se transforme en **roche organique**.

1. Les principaux milieux et conditions de dépôt nécessaires à la préservation de matière organique

a. La nécessite d'une production primaire (= photosynthétique) importante

- La **photosynthèse** est le **mécanisme central de production** de **matière organique** dans les **écosystèmes continentaux** et **océaniques** :

$$\xrightarrow{\text{Lumière}} \quad CO_2 + H_2O \leftrightarrows CH_2O + O_2$$

- La **productivité primaire** correspond à la ***quantité de matière organique formée par photosynthèse par unité de temps (et de surface)***.

b. Des milieux qui concentrent et accumulent la matière organique

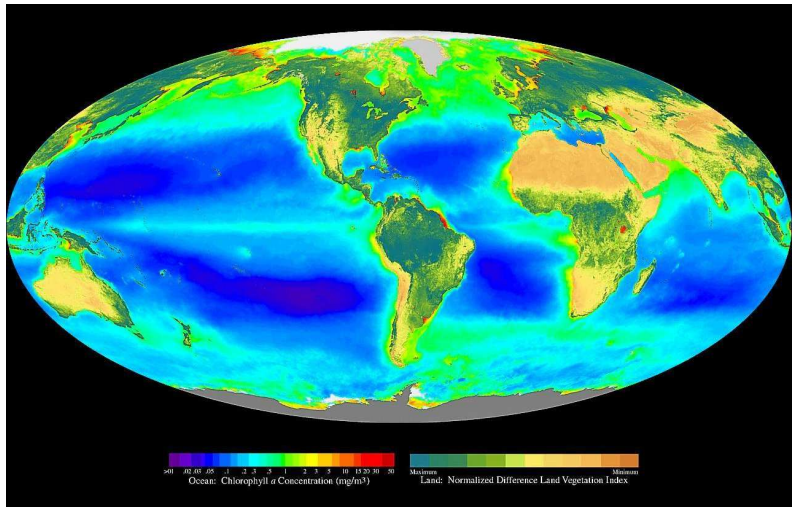


FIGURE 81. Zones de production primaire dans le monde.
Océans : concentration en chlorophylle a / Continents : index de végétation
Document *Wikipédia*.

La productivité primaire des océans est estimée à partir de diverses techniques comme les mesures par satellite des variations de concentration de la chlorophylle.
Cette productivité, maximale au niveau de certaines régions côtières, décroît fortement vers les bassins océaniques.
Parmi les facteurs qui favorisent la production de biomasse au niveau des côtes, on peut retenir :
– l'apport de nutriments par les fleuves ;
– la remontée d'eaux profondes, froides, bien oxygénées et riches en substances nutritives (phénomène d'upwelling qui caractérise certaines côtes).

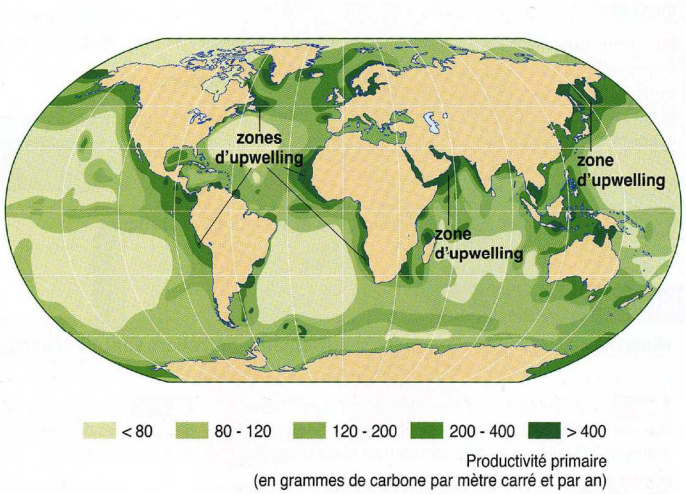
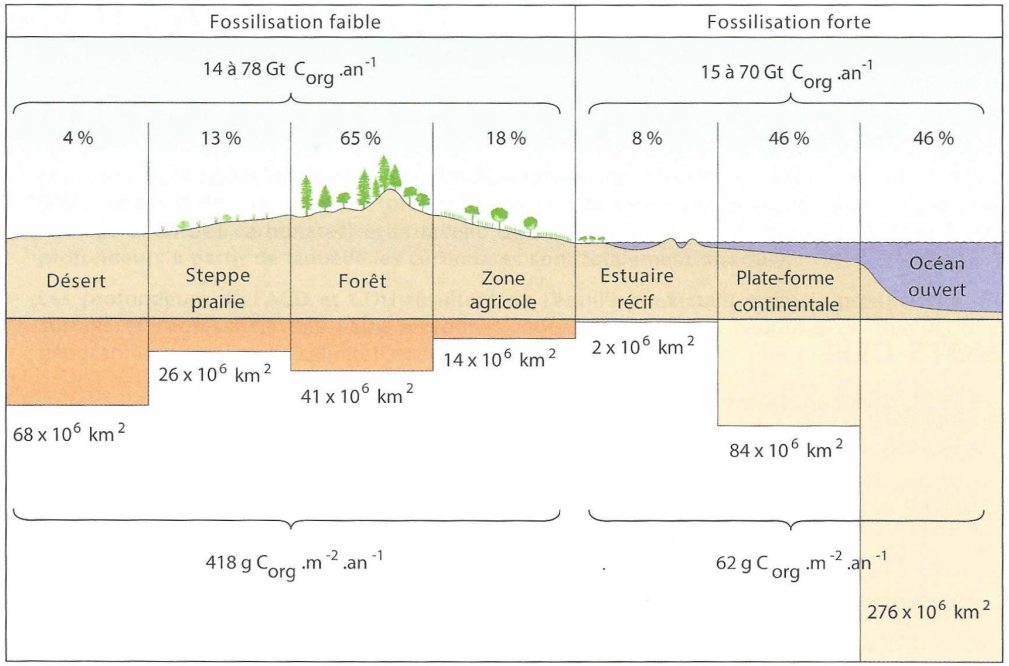


FIGURE 82. Productivité primaire océanique.
D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2010)

- La **matière organique** est principalement **concentrée** (figures 81-82) :
  1/ Au niveau **continental** :
  - Dans les **zones tempérées** et surtout **équatoriales** de type **forestier**

  2/ Au niveau **océanique** :
  - Sur les **marges continentales** en lien avec la **productivité côtière**
  - Et encore plus dans les **zones d'*upwellings*** où les **Diatomées** sont responsables de **l'essentiel de la production primaire**.

- Notons que la **productivité océanique** est **plus faible que la productivité continentale** (418 g C_{org} • m^{-2} • an^{-1} contre 62 g C_{org} • m^{-2} • an^{-1}) (figure 83) mais, comme leur **superficie** est **plus élevée**, leur **production primaire totale** est **équivalente**.
- De plus, comme nous allons le voir (point c), la **fossilisation** est **moindre** en **milieu continental** qu'en milieu océanique



Comparaison de la production primaire en domaine continental et marin.

Si la production primaire organique est assez comparable en domaine marin et continental, il apparaît que les écosystèmes terrestres sont 6 à 7 fois plus productifs que ceux océaniques (418 contre 62 g C.m².an⁻¹). Cette différence est liée à la superficie des différents domaines de production.

FIGURE 83. Productivité primaire continentale *vs.* océanique.
D'après RENARD *et al.* (2018)

c. La conservation de matière organique, une possibilité dans les milieux anoxiques

α. L'oxydation (notamment respiratoire) de la matière organique, ennemi de sa préservation : la nécessité de conditions réductrices anoxiques

- En **milieu aérobie** classique, la **matière organique** est **consommée** (par **respiration**) par les **organismes** – mais se dégrade aussi **spontanément** de manière plus lente – selon la **réaction** :

$$CH_2O + O_2 \leftrightarrows CO_2 + H_2O$$

β. Des milieux réducteurs et anoxiques où la matière organique est préservée dans les sédiments

- On considère qu'environ **1 % de la matière organique** produite annuellement est **préservée** dans les **sédiments**.
- Cela suppose **trois conditions** :
  - Une **productivité primaire élevée** dépassant la **dégradation de matière organique** ;
  - Des **zones d'accumulation** où les **conditions sont réductrices** dans la **tranche d'eau au contact du sédiment**, grâce à des conditions **hypoxiques** (***faible concentration en dioxygène***) ou **anoxiques** (***absence de dioxygène*** – par exemple suite à **enfouissement sous d'autres sédiments**) ;

De telles **conditions hypoxiques ou anoxiques** ne se rencontrent guère qu'en **milieu aquatique**.

Ainsi, dans les **sols** où **circule l'air** (riche en **dioxygène**), la **préservation de matière organique** allant jusqu'à la fossilisation est très **rare**. Les **sols gorgés d'eau** (dans les **marécages**) peuvent toutefois former des **tourbières**, ***sols gorgés d'eau à accumulation organique importante***.

  - Une **faible biodégradabilité des molécules** : les **molécules simples** (oses, acides aminés…) et les **polyosides** (amidon, cellulose) sont plus **facilement dégradées** et donc plus **difficilement préservées** que les **lignines**, la **subérine**, la **sporopollénine** ou encore les **acides humiques**.

γ. Une préservation de matière organique facilitée dans les sédiments fins (peu poreux)

- On notera que la **matière organique** s'accumule **préférentiellement** dans les **sédiments fins**, notamment les **argiles** (tableau VII), probablement en lien avec une plus **faible porosité** qui en **réduit l'échappement** et **l'oxydation**.

TABLEAU VII. Teneurs de sédiments détritiques en C organique.
D'après PEYCRU *et al.* (2008)

TENEURS EN CARBONE ORGANIQUE TOTAL (COT) DE QUELQUES SÉDIMENTS.

Carbone organique total (COT) en %	Granulométrie décroissante		
	Sables	Silts	Argiles
Plates-formes	0,73	1,35	2,86
Talus	0,27	0,37	0,42
Plaines abyssales	0,62	0,92	1,16

Les silts sont des particules détritiques de granulométrie intermédiaire entre les sables et les argiles. La granulométrie apparaît comme un facteur important puisque dans tous les environnements, les sédiments les plus fins ont les teneurs les plus élevées en matière organique.

On appelle **carbone organique total (COT)** la ***proportion de carbone organique présente dans une formation géologique*** (on utilise aussi la notion en hydrologie).

d. Des environnements où la matière organique accumulée peut être préservée de l'oxydation

- Rappelons que les **dépôts organiques ayant une chance d'être préservés** se font en **milieu aquatique**, qu'il soit **continental** ou **océanique**.

α. En milieu continental : des débris végétaux souvent enfouis dans des sédiments détritiques dans certains lacs (contexte limnique) ou deltas (voire lagunes) (contexte paralique)

- En **milieu continental**, on trouve des **dépôts sédimentaires de matière organique** essentiellement composés de **débris végétaux de Plantes vasculaires**.
- Leur **préservation** est alors surtout permise par un **arrêt de leur oxydation** suite à leur **enfouissement** dans des **sédiments détritiques**, typiquement **argileux**.
- Les **milieux propices** à une telle **sédimentation carbonée** sont (figure 84) :
  - Certains **lacs** formant des **bassins limniques** (figure 85), ***domaines lacustres marécageux à forte accumulation de matière organique régulièrement enfouie dans des sédiments détritiques***.
    Ex. actuel : lacs (ou berges fluviales) marécageux
    Ex. historique : Bassins houillers carbonifères du centre de la France (Saint-Étienne, Montceau-les-Mines)

Les **tourbières**, ***sols gorgés d'eaux typiques de marécages où se trouvent des eaux pauvres en dioxygène (facteur de préservation de la matière organique)***, se rencontrent généralement dans de telles zones.

  - Certains ***deltas ou lagunes à forte accumulation de matière organique régulièrement enfouie dans des sédiments détritiques*** qu'on nomme **bassins paraliques**.
    Ex. actuel : mangroves tropicales
    Ex. historique : Bassins houillers carbonifères du nord de la France et de Belgique

Charbons autochones et allochtones

Les **charbons** peuvent être formés par des **débris plutôt restés sur leur lieu de dépôt** ou au contraire ayant été **transportés par voie fluviatile** avant accumulation.
- Les ***dépôts carbonés subissant un faible transport et demeurant en grande partie sur place***, sont qualifiés de **dépôts autochtones** (à l'origine de **charbons autochtones**).
- Les ***dépôts carbonés subissant un certain transport*** sont qualifiés de **dépôts allochtones** (à l'origine de **charbons allochtones**).

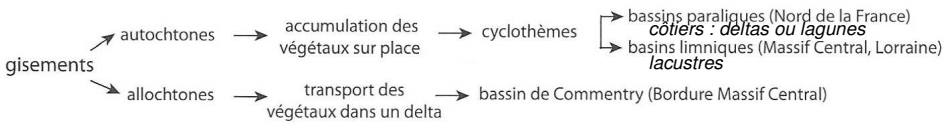
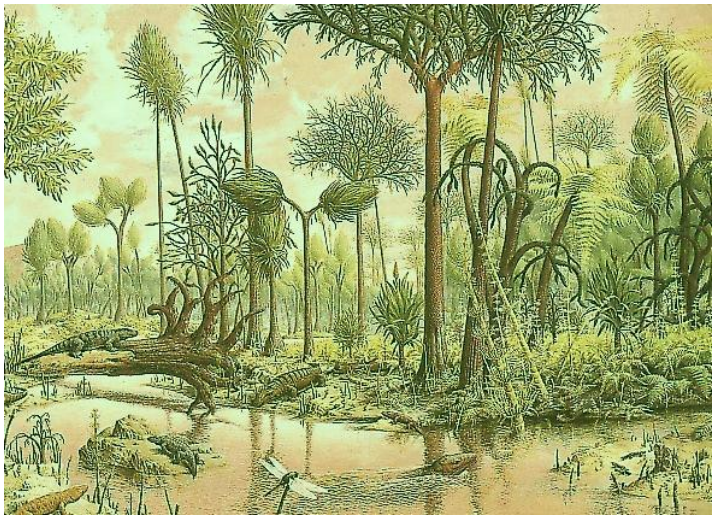


FIGURE 84. Gisements de charbons avec exemples français.
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013)



⮝ **FIGURE 85. Exemple de paysage carbonifère marécageux propice à l'accumulation de C organique.**
http://www.fossiliraptor.be/carboniferesuperieur.htm (consultation mars 2019)

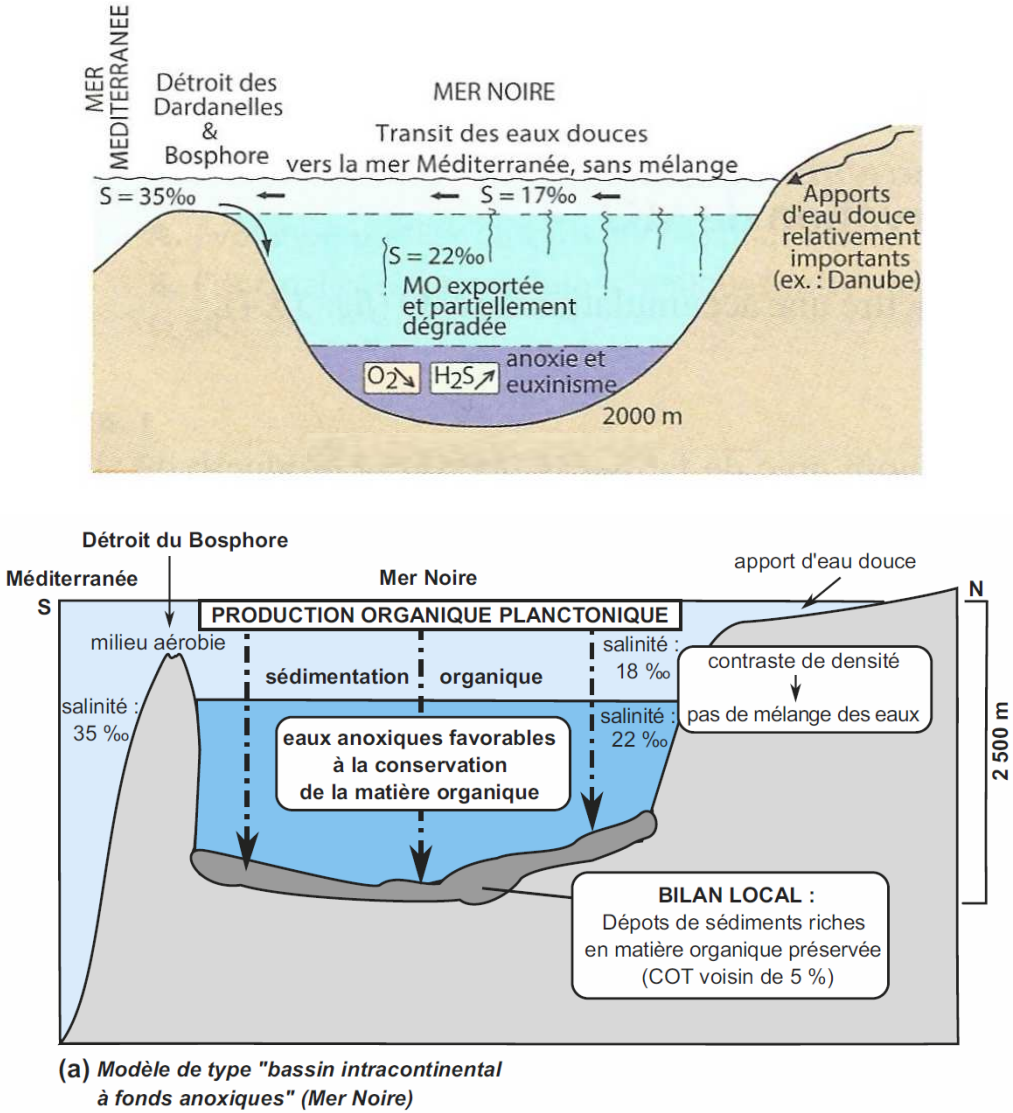
β. En milieu océanique et maritime : la préservation de matière organique planctonique dans des milieux favorisant l'anoxie

- On peut citer **trois contextes particuliers** correspondant à **trois modèles principaux**.

i. Les bassins maritimes intracontinentaux à fonds anoxiques : le modèle euxinique (exemple actuel : Mer noire)

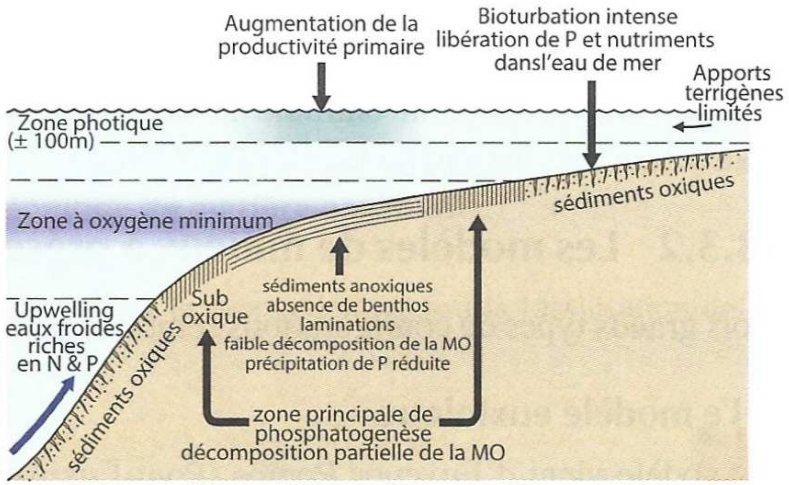
- Le **modèle euxinique** fait référence à des ***bassins continentaux, souvent d'origine orogénique (= liés à la formation d'une chaîne de montagne), en lien avec le domaine maritime mais à communication faible avec l'océan, d'où un faible brassage des eaux***.
  Ex. actuel : Mer noire
  Ex. historique : Méditerranée orientale au quaternaire
- Les **eaux** y sont **stratifiées** par **densité** ; par exemple en **Mer noire**, les eaux **peu salées (environ 17 ‰) de surface** (alimentées en **eaux douces** par de grands **fleuves** comme le Danube) se mélangent peu avec les **eaux salées (23 ‰) profondes** (à partir de – 200 m) originaires de la **Méditerranée** passant par le détroit du Bosphore (figure 86). Des **sédiments carbonés** (**COT** de l'ordre de **5 %** !) se déposent alors sur le **fond de la Mer noire**, cette couche **faiblement brassée** étant **anoxique** et propice à la **conservation de la matière organique**.

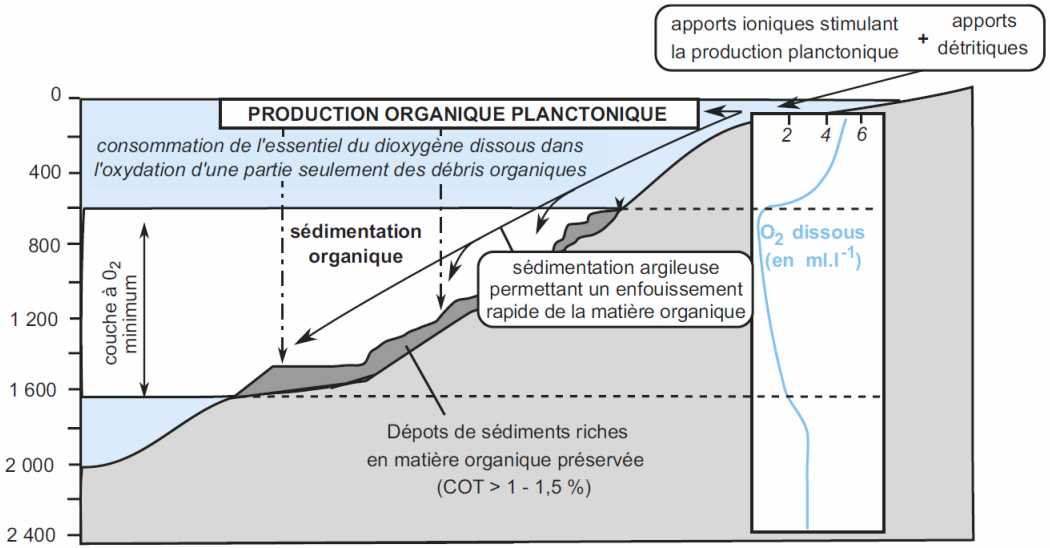
On appelle **euxinisme** ***la formation de sulfure de dihydrogène H_2S dans les eaux profondes de certains lacs ou mers fermées***. Il s'y développe alors des **Bactéries sulfureuses**.



⮝ **FIGURE 86. Le modèle euxinique : deux visions.**
D'après RENARD *et al.* (2018) et PEYCRU *et al.* (2008).

ii. Les zones océaniques ouvertes à fond anoxique : le modèle à zone à oxygène minimum (ZOM)



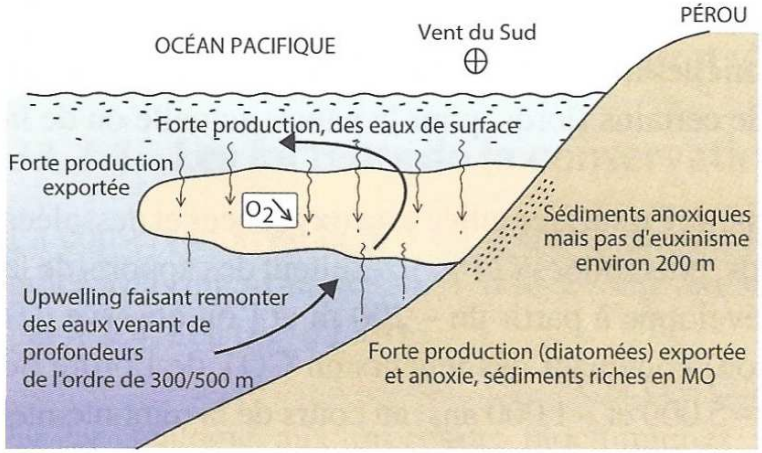


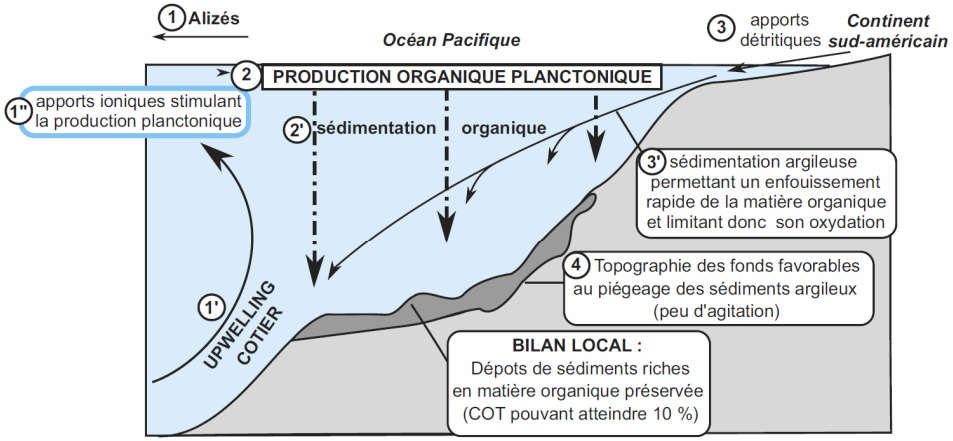
(b) ***Modèle à « couche d'oxygène minimum » (Golfe du Mexique, prolongement du delta du Mahakam - Bornéo -)***

FIGURE 87. Le modèle à couche d'oxygène minimum : deux visions.
D'après RENARD *et al.* (2018) et PEYCRU *et al.* (2008).

- Certains ***domaines océaniques ouverts présentent une couche très appauvrie en dioxygène (ZOM : zone à oxygène minimum) où le dioxygène a été décomposée par la décomposition préalable de particules organiques sans être renouvelé (par absence de contacts avec l'air et de circulations océanique importantes)*** ; c'est le **modèle à zone à oxygène minium** (figure 87).
  Ex. actuel : Golfe du Mexique
- Les **dépôts organiques** qui s'y accumulent sont donc **plutôt préservés** (**COT** de l'ordre de 1,5 %), en attente d'un **enfouissement détritique**.

iii. Les zones océaniques d'*upwellings* (le modèle d'*upwelling*)





(c) ***Modèle à « upwelling côtier » (côtes péruviennes)***

FIGURE 88. Le modèle d'*upwelling* : deux visions.
D'après RENARD *et al.* (2018) et PEYCRU *et al.* (2008).

- Rappelons qu'on appelle ***upwellings*** (revoir la figure 47) les ***remontées d'eaux froides (et riches en nitrates d'où une forte productivité primaire puis, en conséquence, secondaire) venant des profondeurs lorsque de forts vents poussent au large les eaux de surface***.
  Ex. actuels : Marge du Pérou, marge de la Namibie, marge arabique
- Malgré des **conditions oxydantes régnant sur le fond**, ces zones combinent **deux facteurs importants** expliquant la **forte production carbonée** (figure 88) :
  - Une **très forte productivité primaire**, **dépassant** cinétiquement l'**oxydation** ;
  - Un **apport détritique important** favorisant le **piégeage des particules carbonées non encore oxydées** sur le **fond**.
- Ce sont les **zones actuelles les plus efficaces** en termes d'**accumulation sédimentaire de C organique** : on atteint des **COT** en moyenne de **10 %** et allant jusqu'à **15 à 20 %** dans les sédiments formés !

2. Les roches carbonées et leurs modalités de formation

- On peut appeler **roches carbonées** ***l'ensemble des roches, solides, liquides voire gazeuses, riches en carbone résultant de la transformation sédimentaire et diagénétique de dépôts organiques***.
- Celles-ci se forment dans les **environnements d'importante accumulation organique** cités au point précédent.

a. Des roches solides formées à partir de dépôts organiques embryophytiques continentaux : les charbons

α. Les charbons, roches solides comprenant une fraction organique (les macéraux) et une fraction inorganique (les cendres)

- On appelle **charbon** (figure 89) une ***roche solide dont la teneur en carbone est supérieure à 50 % formée à partir de débris végétaux (le plus souvent des Embryophytes)***.
- Un **charbon** comprend typiquement :
  - Une **fraction organique** correspondant à des ***restes végétaux plus ou moins dégradés où se trouvent des molécules carbonées appauvries en volatils O, H et N nommées macéraux*** : **huminite** et **vitrinite** (dérivant de **lignines**), **exinites** (dérivant de **spores**, **pollens**, **résines**...)..
  - Une **fraction inorganique** qu'on appelle **cendres**, comprenant ***essentiellement des minéraux détritiques (quartz, argiles, carbonates…)***.

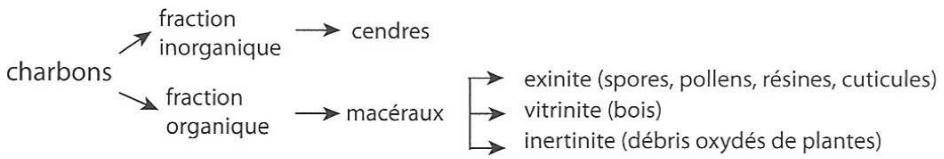


FIGURE 89. Composition des charbons.
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013)

β. Une classification des charbons basée sur la teneur en carbone

TABLEAU VIII. Diversité des charbons au sens large.
D'après BORDI *et al.* (2018).

Aspect à l'œil nu	Brun avec débris de mousses	Brun-noir, ressemble à du bois	Noir avec un aspect mat ou brillant, tache les doigts	Noir et brillant, ne tache pas les doigts	Noir, non friable, brillant
Teneur en carbone (%)	Environ 55	70 à 75	Environ 85	92 à 95	100
Nom	Tourbe	Lignite	Houille	Anthracite	Graphite

→ Métamorphisme
Diagenèse croissante

- En se basant sur la **teneur en carbone** – qui correspond au **niveau de différenciation** de la **roche** –, on distingue (tableau VIII) :
  Entre chaque type de roche, il existe évidemment des **types intermédiaires**.
  - La **tourbe**, ***roche légère et brune, riche en débris végétaux (surtout des Sphaignes), uniquement connue par des dépôts actuels [50-55 % de carbone environ]***.
  - La **lignite**, ***roche brun foncé et terne, roche en débris ligneux bien reconnaissables [70-75 % de carbone]***.
  - La **houille au sens large** = **charbon au sens strict**, ***roche noire, mate ou brillante, tachant les doigts avec une proportion variable de matières volatiles [environ 85 % de carbone]***.
    Éviter de parler de « **bitume** » qui fait référence à autre chose (voir plus loin)
  - L'**anthracite**, ***roche sombre et brillante ne tachant pas les doigts comprenant 92-95 % de carbone***.
  - Le **graphite**, ***roche noire et brillante et comprenant du carbone pur, formée dans un contexte métamorphique***.

γ. La houillification (carbonisation / carbonification) : un enfouissement progressif de MO s'accompagnant d'une augmentation de la teneur en carbone

- Les **charbons** se forment au cours des temps géologiques (figure) par **enfouissement progressif** de **matière organique** en **conditions anoxiques**, ce qui engendre :
  - Une **compaction progressive** du matériau ;
  - Un **chauffage modéré**, pouvant dépasser **100 °C** et flirter avec le **métamorphisme*** pour les termes ultimes ;

*On rappelle qu'on nomme **métamorphisme** la ***modification minéraologique d'une roche (à chimie constante) par des modifications des conditions de température, pression et/ou hydratation***.

  - Un **dégazage de molécules volatiles** riches en **O, H et N**.
- Il s'ensuit un **enrichissement progressif en carbone** qui **reste dans la roche** (figure 90).

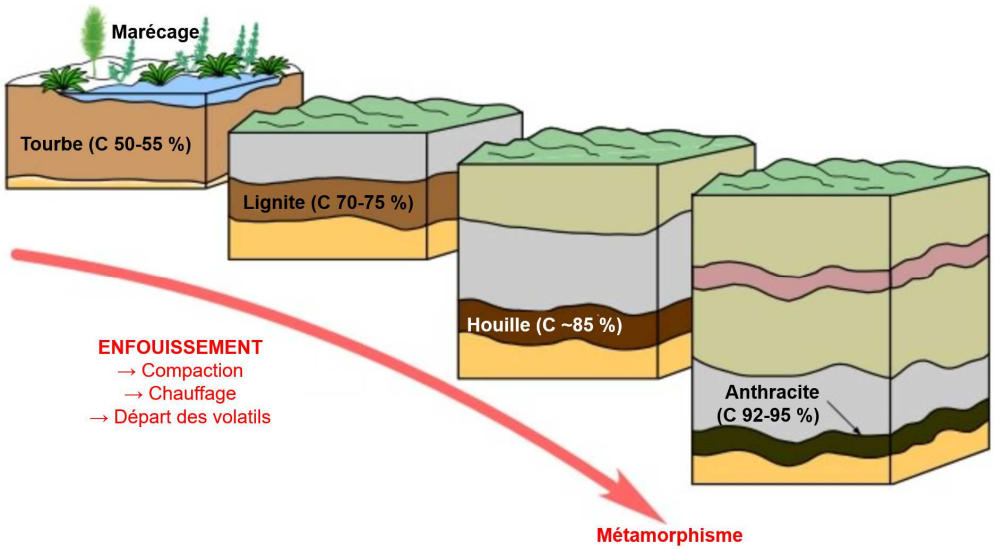


FIGURE 90. Formation des charbons. D'après P-A. BOULQUE, modifié http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/combustibles.fossiles.html (mars 2019)

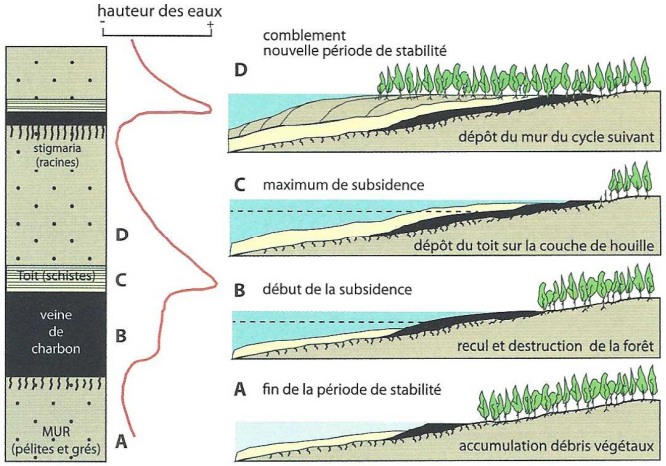
- On peut appeler **houillification** la ***formation progressive de charbon depuis l'accumulation de débris végétaux dans des zones marécageuses jusqu'à leur transformation en charbons différenciés***.

On peut aussi parle de **carbonification** ou **carbonisation** mais… certains auteurs incluent dans ces deux termes **d'autres processus** comme la **pyrolyse carbonée** (***chauffage intense de sédiments carbonés***) purement métamorphique ou encore la **carbonisation hydrothermale** (***transformation de sédiments carbonés par l'hydrothermalisme***).

- Ce **processus** comprend :
  - Des **phases précoces** = ***formation de tourbes et lignites*** :
    → **humification** (***transformation des composés organiques en acides humiques***)
    → **gélification** (***agglutination colloïdale des matières humiques***)
    Il faut **environ 10 000 ans** pour former de la **tourbe** et **plusieurs millions d'années** pour former de la **lignite**…
  - Des **phases tardives** = **houillification au sens strict** = ***formations des houilles et termes plus différenciés, se déroulant à l'échelle des temps géologiques***.
    Les **charbons vrais les plus récents** ont au moins **20 millions d'années**…
    et la plupart se sont **formés entre 60 et 290 millions d'années** !

δ. La possibilité d'alternances cycliques de sédimentation carbonée et de comblement détritique en lien la variation du niveau de l'eau : les cyclothèmes

- On appelle **cyclothèmes houillers** des ***alternances de dépôts carbonés et de dépôts détritiques induits par des modifications du niveau marin (contexte paralique) ou lacustre (contexte limnique – plus rare) qui induit des périodes d'accumulation végétale et des périodes de comblement détritique*** (figure 91).



Cyclothèmes houillers Bassin paralique du Nord de la France

Les cyclothèmes (A,B,C), qui étaient interprétés classiquement en termes de pulsions de subsidence, sont réinterprétés dans le cadre de la stratigraphie séquentielle (fiche 83) en faisant jouer un rôle à l'eustatisme.
La fréquence des cyclothèmes évoque un contrôle orbito-climatique de type Milankovitch (glacio-eustatisme).

FIGURE 91. Cyclothèmes houillers. D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013)

La conséquence de **cette modalité de dépôts** est que **le charbon formé ne s'accumule pas en masse** mais **en veines alternant avec des couches stériles** (ex. bassins houillers du nord de la France), plus **difficiles** à **exploiter**.

b. Des roches fluides formées à partir de dépôts planctoniques généralement océaniques : les hydrocarbures

α. La notion d'hydrocarbures : roches liquides et gaz composés de carbone et d'hydrogène

- On appelle **hydrocarbures** des ***composés organiques ne comprenant que du carbone et de l'hydrogène (formule C_nH_m), même si d'autres atomes sont généralement présents***.
- On y inclut :
  - Le **pétrole**, une ***roche liquide d'origine naturelle, une huile minérale composée d'une multitude de composés organiques, essentiellement des hydrocarbures***.
  - Le **gaz naturel**, ***composé d'hydrocarbures gazeux***.
- On y **associe** aussi souvent :
  - Les **bitumes naturels**, ***roches composées largement d'hydrocarbures solides***.
  - Les **asphaltes**, ***roches sédimentaires solides comprenant une petite proportion d'hydrocarbures solides bitumineux (7-18 %)***.

Les **schistes bitumineux** sont des ***roches argiles, carbonatées ou marneuses litées (parfois métamorphisées) où se trouvent des niveaux de bitume, d'hydrocarbures liquides (huile de schiste) et de gaz naturel (gaz de schiste)***.
Enjeu contemporain, leur **exploitation** est **complexe**, nécessite la **fracturation des roches** et l'emploi de **nombreux produits chimiques**, avec de **réelles conséquences sur l'environnement** en termes de **pollution**.

β. À l'origine : une accumulation de matière organique généralement planctonique sur un fond anoxique et son enfouissement dans des sédiments détritiques

- La **matière organique** peut s'accumuler selon le **modèle euxinique**, le **modèle à couche minimum d'oxygène** ou dans les **zones d'upwellings**, comme nous l'avons précisé plus haut.
- L'origine des **débris carbonés** est généralement **planctonique**, notamment **phytoplanctonique**.
- Ceux-ci sont alors **enfouis dans des sédiments détritiques**.

γ. Une formation en trois étapes à partir d'une roche mère riche en dépôts carbonés qui subissent un chauffage par enfouissement : diagenèse, catagenèse, métagenèse

- La ***roche, généralement poreuse, contentant les dépôts organiques et à partir de laquelle se forment les hydrocarbures*** porte le nom de **roche-mère**.
- C'est essentiellement **l'augmentation de température** avec **l'enfouissement** qui explique la **formation des hydrocarbures** que l'on peut décomposer en **trois étapes** (figure 92 + tableau IX) :
  - La **diagenèse** est, dans ce contexte, la ***formation de :***
    - ***kérogène (roche organique solide précurseur des hydrocarbures),***
    - ***protopétrole (liquide carbonique précurseur d'hydrocarbures)***,
    - ***méthane CH_4.***

    Il y a **départ important d'oxygène** (le **rapport O/C diminue**). Cette étape se réalise pour des **profondeurs** allant jusqu'à **2000 m** et des **températures** allant jusqu'à **60 °C**.
  - La **catagenèse** est la ***formation d'hydrocarbures liquides (huile) et gazeux***.

    Il y a **départ d'hydrogène** (le **rapport H/C diminue**). Cette étape se réalise pour des **profondeurs** de 1000 à 4000 m et des **températures** allant jusqu'à **150 °C**.
  - La **métagenèse** est la ***disparition des liquides, ne subsistant que des gaz et des roches ultra carbonées (anthracite et graphite)***.

    Le **rapport H/C diminue encore**. Cette étape se réalise pour des **profondeurs** au-delà de **4000 m** et des **températures** au-delà de **150 °C**.

C'est donc **l'étape catagénétique** qui est **intéressante pour les pétroliers** et… ne doit **pas être dépassée**.
La ***zone de profondeur où l'on trouve justement les hydrocarbures liquides (c'est-à-dire le fameux pétrole)*** s'appelle « **fenêtre à huile** ».

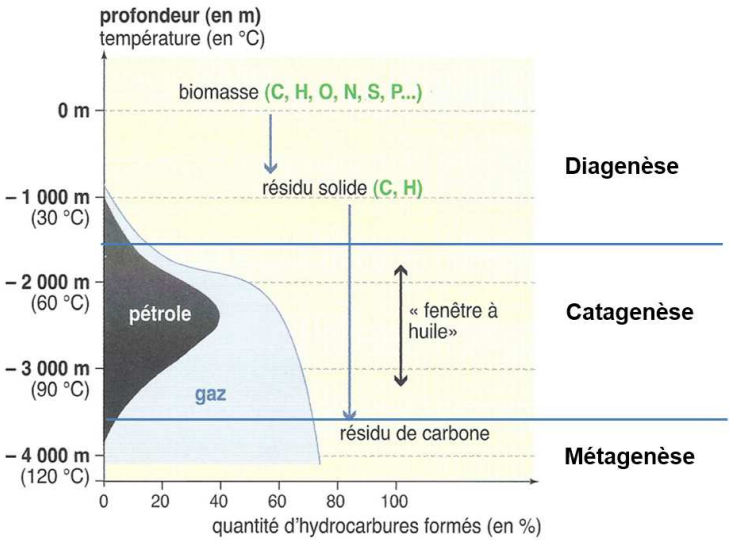


FIGURE 92. Diagenèse / Catagenèse / Métagenèse et fenêtre à huile.
D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2010)

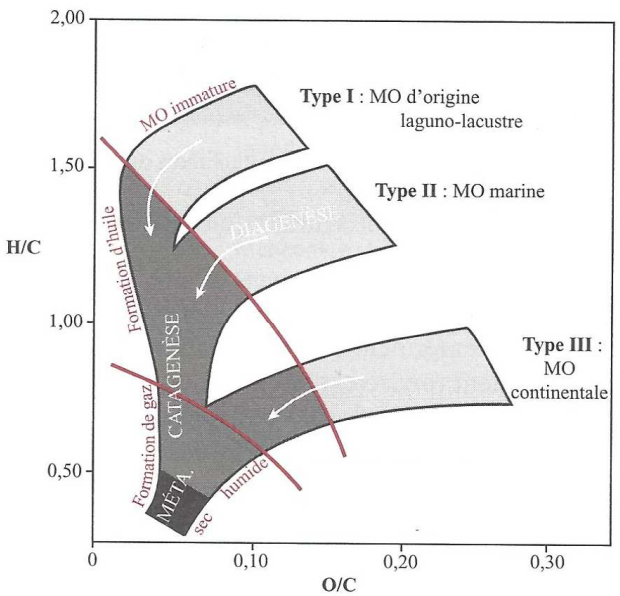
TABLEAU IX. Genèse des pétroles : vue d'ensemble.
D'après EMMANUEL *et al.* (2007).

Étape	Évolution chimique	Transformation
1 – **Diagenèse** : 0 à 2 000 m de prof. $T°_{max}$ = 60 °C.	O/C diminue	La MO se transforme en **kérogène**, protopétrole et CH_4 biochimique.
2 – **Catagenèse** : 1 000 à 4 000 m de prof. $T°_{max}$ = 150 °C	H/C diminue	Le kérogène se transforme en **hydrocarbure** (huile et gaz)
3 – **Métagenèse** : au-delà de 4 000 m et de 150 °C.	H/C continue à diminuer	Ne subsiste que des gaz secs et du carbone résiduel (**anthracite** puis **graphite**).

δ. Une formation d'hydrocarbures dans trois grands contextes : le diagramme de VAN KREVELEN (1950)

- Comme la **matière organique est à 99 %** composée des **atomes C, H, O, N et S**, et particulièrement des **trois atomes O, C et H**, la mesure des **rapports H/C et O/C** permet de **caractériser la transformation de cette matière organique** en **matière carbonée enrichie**, avec entre autres **perte progressive des atomes O et H**.
- Ce fut l'idée génial du chimiste néerlandais Dirk VAN KREVELEN (1914-2001) qui proposa, en 1950, un ***diagramme H/C en fonction d'O/C rendant compte de l'évolution des dépôts organiques au cours de la formation des roches carbonées*** : c'est le **diagramme de VAN KREVELEN** (figure 93).
- Sur ce diagramme, on distingue **trois principaux contextes** :
  - Le **type I** correspond à ***l'évolution de la matière organique lacustre (surtout phytoplanctonique)*** ; c'est un cas rare.

- Le **type II** correspond à ***l'évolution de la matière organique marine (phytoplanctonique, zooplanctonique et bactérienne)*** ; c'est la source principale de pétrole.
- Le **type III** correspond à des ***dépôts de débris végétaux continentaux générant surtout du charbon et des gaz (très peu ou pas d'huile)***.

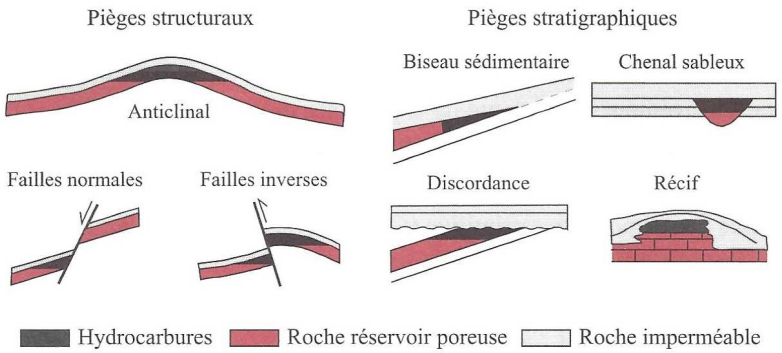


Évolution de la MO au cours de l'enfouissement des roches (diagramme de Van Krevelen).

FIGURE 93. Diagramme de VAN KREVELEN (1950).
D'après EMMANUEL *et al.* (2007)

ε. Un piégeage des hydrocarbures dans des roches réservoirs sous un toit imperméable (roches de couverture)

- Les **hydrocarbures** formés dans une **roche-mère** migrent ensuite dans une **roche-réservoir**, généralement poreuse, par capillarité. Ils sont **bloqués par un toit imperméable** (**roche de couverture**), souvent une couche argileuse.
- Les **hydrocarbures** peuvent être **piégés** (figure 94) :
  - Soit de **manière tectonique**, c'est-à-dire que ***c'est une déformation (faille, pli) qui délimite le réservoir***.
  - Soit de **manière stratigraphique**, c'est-à-dire que ***c'est seulement une modification du dépôt sédimentaire qui délimite le réservoir***.



Exemples de pièges à hydrocarbures (structuraux et stratigraphiques).

FIGURE 94. Diagramme de VAN KREVELEN (1950).
D'après EMMANUEL *et al.* (2007)

Bilan (adapté du programme)	✓ Le **dépôt** des **particules en suspension** est à l'origine de **roches détritiques**. ✓ Les **ions en solution** sont à l'origine des **roches sédimentaires** d'origine **biochimique** ou **chimique**. ✓ La **matière organique** peut être **conservée** et **transformée** en **roches carbonées**.

Bilan

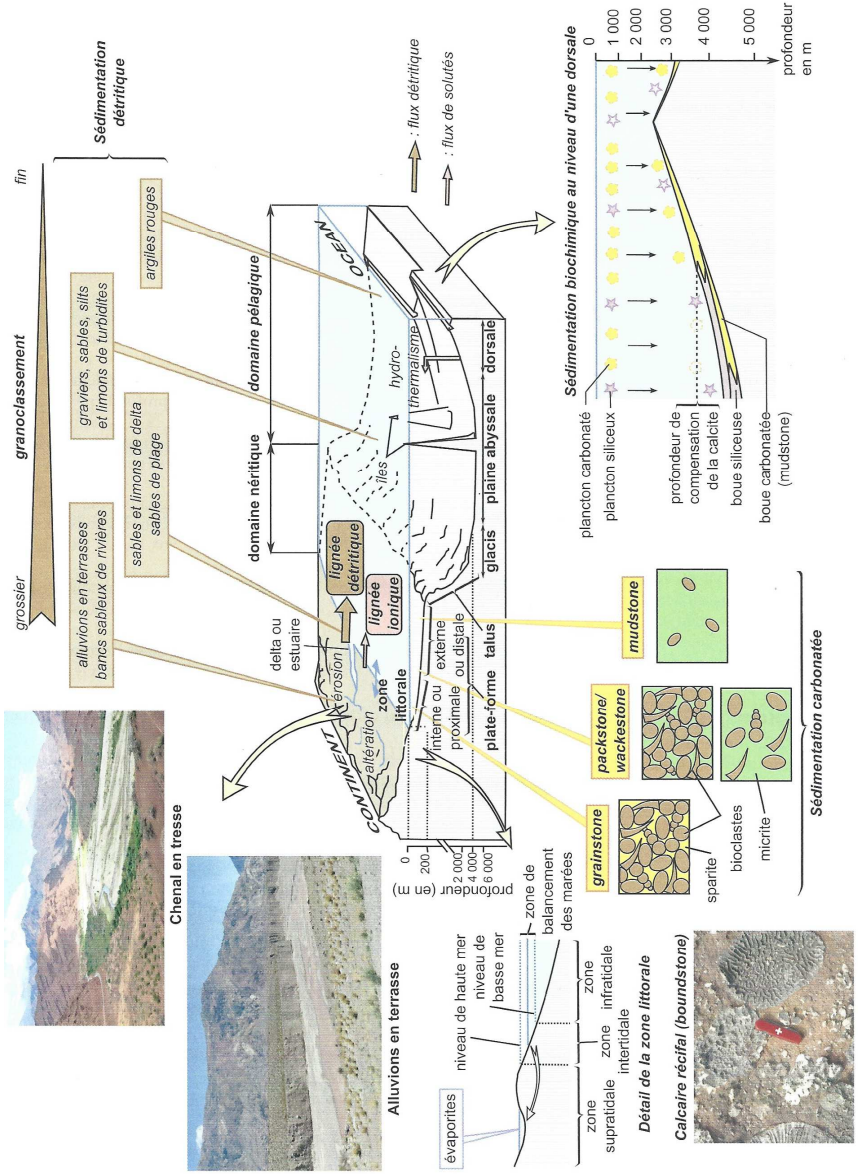


FIGURE 94. La sédimentation : vue d'ensemble (hors sédimentation carbonée).
D'après PEYCRU *et al.* (2015)

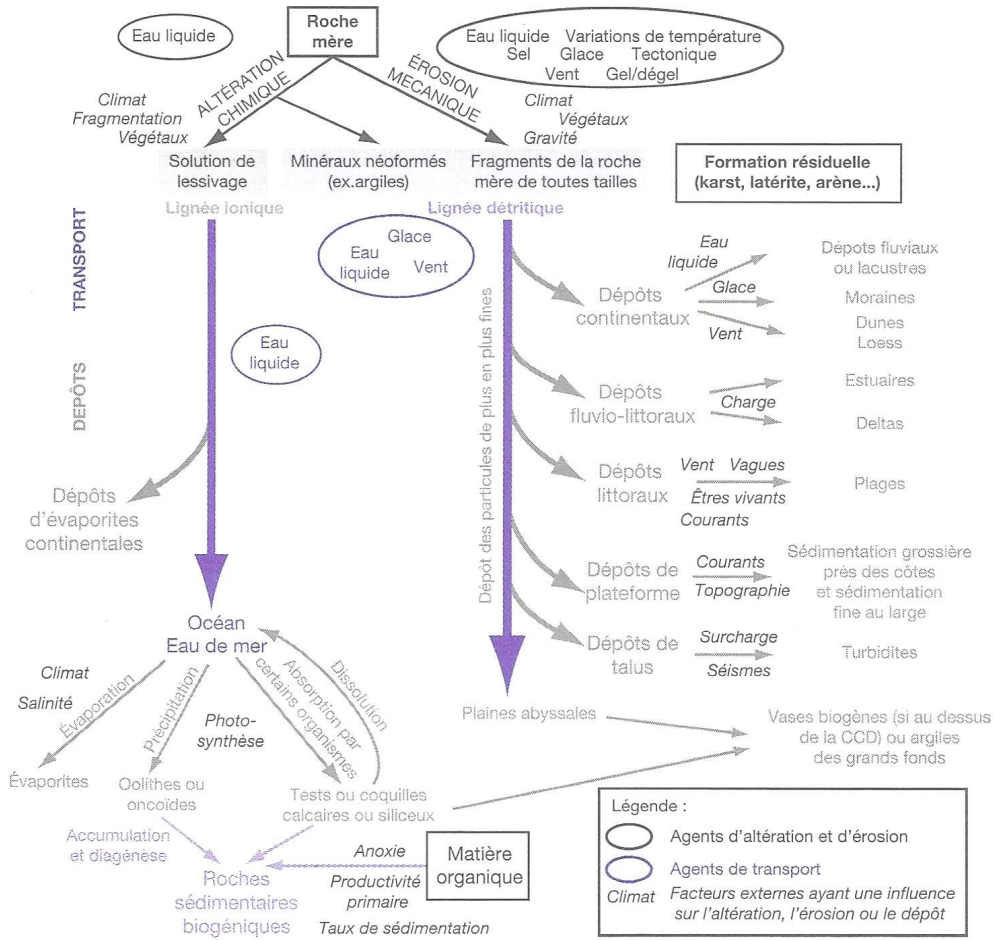


FIGURE 95. Vue d'ensemble du phénomène sédimentaire.
D'après DENOEUD *et al.* (2013)

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes

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**

- *Ressources*
° **Réservoir** de **pétrole**

- *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]

- *Sédimentation carbonée*
[° **Contextes** de **dépôts océaniques**]
° Typologie des **charbons**
° **Formation** du **charbon**
° **Diagenèse** / **catagenèse** / **métagenèse**
[° Diagramme de **van Krevelen** ?]

*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*. 2e édition (1e édition 2010), Dunod, Paris.
Auboin, J., J. Dercourt & B. Labesse (1970). *Manuel de travaux pratiques de cartographie. 1er cycle et maîtrise.* Dunod, Paris.
Auboin, J., R. Brousse & J.-P. Lehman (1978). *Précis de géologie. 2. Paléontologie, stratigraphie*. Dunod (Bordas), Paris, 3e édition (1e édition 1967).
Babin, C. (1991). *Principes de paléontologie*. Armand Colin, Paris.
Bard, J.-P. (1990). *Microtextures des roches magmatiques et métamorphiques*. Masson, Paris, 2e édition (1e édition 1980).
Beaux, J.-F. & A. Mamecier (2012). *Les sciences de la Terre.* Nathan, Paris, 2e édition (1e édition 2010).
Beaux, J.-F., J.-F. Fogelgesang, P. Agard & V. Boutin, 2011. *Atlas de Géologie Pétrologie. BCPST 1re et 2e 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. Boudjemaï, H. Clauce, O. Guipponi & Y. Krauss (2018). *Mémento Géologie BCPST 1re et 2e 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. Wozniak (2003) (2e édition, 1989). *Comprendre et enseigner la planète Terre.* Ophrys, Gap – Paris, 303 pages.
Chamley, H. (2000). *Bases de sédimentologie*. Dunod, Paris, 2 édition (1e édition 1987).
Campy, M. & J.-J. Macaire (2003). *Géologie de la surface*. Dunod, Paris, 2e édition (1e 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, 6e édition.
Chapus, J.-L. (2006) (2e). *Initiation à la géomorphologie*. « Universités Géographie », Ellipses, Paris, 172 pages.
Cojan, I. & M. Renard (2006). *Sédimentologie*. Dunod, Paris, 2e édition (1e 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, 2e édition (1e édition 1999).
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, 5e édition (1e 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.
DAUTEL, O. (dir.), A. PROUST, M. ALGRAIN, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, F. SAINTPIERRE, M. VABRE & C. BOGGIO (2017). *Biologie Géologie BCPST 1re année.* Vuibert, Paris.
DENŒUD, J., T. FERROIR, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2011). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1e 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 2e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
DERCOURT, J. (2002). *Géologie et géodynamique de la France. Outre-mer et européenne.* « Sciences Sup », Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 1997), 330 pages.
DERCOURT, J., J. PAQUET, P. THOMAS & C. LANGLOIS (2006). *Géologie. Objets, méthodes et modèles.* Dunod, Paris, 12e édition (1e édition 1974).
EMMANUEL, L., M. DE RAFÉLIS & A. PASCO (2007). *Maxi fiches Géologie.* Dunod, Paris, 228 pages + VIII.
DUCHAUFOUR, P. (2001). *Introduction à la science du sol. Sol, végétation, environnement.* Dunod, Paris, 6 édition (1e édition 1984, *Abrégé de pédologie*).
FOUCAULT, A. & J.-F. RAOULT (2005). *Dictionnaire de Géologie.* Dunod, Paris, 6e édition (1e édition 1980).
FOUCAULT, A., J.-F. RAOULT, F. CECCA & B. PLATEVOET (2014). *Dictionnaire de Géologie.* Dunod, Paris, 8e édition (1e édition 1980).
GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1re année BCPST-véto.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
JAUJARD, 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. GUTJAHR, 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 (3e 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.
PEYCRU, P. (dir.), J.-M. DUPIN, J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, C. VAN DER REST, F. CARIOU, C. PERRIER & B. AUGÈRE (2008). *Géologie tout-en-un 1re et 2e années BCPST.* Dunod, Paris.
PEYCRU, P., J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, C. BECK, F. CARIOU, J.-M. DUPIN, J.-L. SCHNEIDER, M. TARDY & C. VAN DER REST (2015). *Géologie tout-en-un BCPST 1er et 2e années.* Dunod, Paris.
POMEROL, C., Y. LAGABRIELLE, M. RENARD & S. GUILLOT (2011). *Éléments de géologie.* Dunod, Paris, 14e édition (1e 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. 16e édition du « Pomerol ».* 1e 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, 2e édition (1e édition 1999).
TROMPETTE, R. (2003). *La Terre. Une planète singulière.* Belin, Paris.

Plan du chapitre

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 1

I. Un transport des sédiments par des agents physiques précédant leur dépôt (sédimentation) dans des bassins sédimentaires 2
A. Les sédiments, des entités subissant un transport par des agents physiques 2
1. Cas des ions en solution : un transport par l'eau 2
2. Cas des particules de roches (sédiments détritiques) : un transport par des agents variés 2
a. Un possible déplacement à courte distance par la gravité 2
b. Un déplacement possible par la glace en environnement glaciaire : cas des moraines 3
c. Un déplacement possible par le vent 3
α. Le vent, un agent abrasif (déflation + corrasion) 3
β. Le vent, agent de transport producteur de structures sédimentaires 3
i. Les dunes, édifices sableux continentaux généralement mobiles 3
ii. Les poussières éoliennes (poussières océaniques, poussières volcaniques, lœss) 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 5
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 déclivité : les bassins sédimentaires 6
1. Les bassins sédimentaires, zones de subsidence 6
a. Notion de bassin sédimentaire 6
b. Des bassins initialement formés par subsidence tectonique 6
c. Une subsidence qui peut s'accroître sous le poids des sédiments 6
d. Des dépôts affectés par les variations absolues du niveau marin (eustatisme) 6
2. Les bassins sédimentaires, des formations très liées au contexte géodynamique 6
a. Préalable : la diversité des contextes géodynamiques 7
b. Les bassins associés aux zones de convergence 7
α. Des bassins flexuraux (= molassiques = d'avant-pays) dans les chaînes de montagne 7
β. Des prismes d'accrétion au niveau des zones de subduction 7
c. Les bassins associés aux zones de divergence 7
α. Des rifts continentaux 7
β. Les plaines abyssales 7
γ. Les marges passives 7
d. Les bassins en *pull-apart*, liés aux failles décrochantes (= coulissantes) 7
e. Les bassins intracontinentaux associés aux zones stables (« atectoniques ») 7
f. Remarque : variation du taux de subsidence en fonction du contexte géodynamique 7
3. Des environnements de dépôt continentaux et océaniques 8
a. Les lieux de dépôts continentaux 8
α. La sédimentation fluviatile (rivières et fleuves) : le dépôt d'alluvions 8
i. Notions de fleuve et de rivière 8

ii. Notions de bassin versant (et de sous-bassin versant) et de nappe phréatique 8
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) 8
iv. Des dépôts sédimentaires qui varient en fonction des reliefs 9
➢ Des dépôts de pente dans les hauts reliefs (montagnes) : les cônes alluviaux 9
➢ Une chenalisation variable (rectiligne, à méandres ou en tresses) dans les zones planes à faible pente (vallées planes, plaines alluviales) 9
v. Le lit d'un cours d'eau et les terrasses alluviales 10
β. La sédimentation lacustre : des dépôts granoclassés et d'éventuelles varves 11
γ. La sédimentation glaciaire et périglaciaire 12
i. Trois grands types de glaciers : les glaciers de type alpin, les calottes et les calottes polaires (= inlandsis) 12
ii. La production de moraines, de *dropstones* et de roches moutonnées par tous les glaciers 13
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 13
iv. En domaine périglaciaire : des dépôts éoliens fréquents (de type lœss) et les pergélisols polaires 13
δ. La sédimentation désertique : la genèse de dunes éoliennes mobiles de sable 13
b. Les embouchures : le domaine fluvio-marin 13
α. Deux types d'embouchures surtout déterminés par l'importance des marées : les deltas et les estuaires 13
β. Une sédimentation contrôlée par les paramètres hydrodynamiques fluviaux (débit) et maritimes (houle, vagues, marées, courants marins) ainsi que le flux sédimentaire 14
c. Les lagunes, espaces littoraux de sédimentation plutôt évaporitique à remplissage maritime faible 14
d. Les environnements de dépôts océaniques (incl. marges continentales) 14
α. Présentation du cadre géologique et sédimentaire océanique 14
i. Quelques notions préliminaires : continent, marge continentale, océan, mer 14
ii. Zonation bathymétrique océanique globale : cas d'une marge passive 15
iii. Zonation sédimentaire océanique : néritique, hémipélagique, pélagique 15
iv. Zonation hydrodynamique du domaine littoral 16
v. L'hydrodynamisme en domaine océanique et littoral : houle, vagues, marées et courants (océaniques et fluviaux) 17
vi. Les effets de la rupture de pente sur la sédimentation : formation du glacis par des courants de turbidité 19
β. Une sédimentation détritique néritique et hémipélagique : un contrôle par le flux sédimentaire, la pente, la distance au littoral et l'hydrodynamisme 19
γ. Une sédimentation carbonatée (biogène) néritique, hémipélagique et des îles océaniques : une sédimentation très largement biogène 19
i. La sédimentation de plateforme (domaine néritique, voire hémipélagique) 19
ii. La sédimentation récifale autour des îles océaniques actuelles ou submergées 20
δ. Une sédimentation océanique profonde (pélagique) variée : terrigène, carbonatée, siliceuse biogène 20
e. Bilan : vue d'ensemble des lieux de sédimentation 20
C. Des dépôts répartis dans le monde de manière assez contrôlée : vue d'ensemble de la sédimentation mondiale 21
1. Des continents avec une sédimentation plutôt faible et surtout caractérisés par des sols 21
a. Les continents, des lieux d'érosion et de faible sédimentation dont la répartition est surtout contrôlée par le contexte tectonique et l'activité fluviatile 21
b. Les continents, des domaines recouverts de sols en lien avec les conditions climatiques et la végétation : une zonation latitudinale et altitudinale 21
2. Des océans dont la sédimentation pélagique (= profonde) dégage des grandes tendances sédimentaires 22
a. Vue d'ensemble de la sédimentation océanique profonde à double zonation : méridienne et latitudinale 22
b. Une sédimentation océanique profonde lente 22
c. Origine et contrôle de la nature de la sédimentation océanique profonde 22
α. L'apport détritique : un apport essentiellement fluviatile, proche des continents (zonation méridienne), et fort en zone tropicale (zonation latitudinale) 22
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) 22
γ. Les boues siliceuses : un dépôt d'eaux froides ou à haute productivité (une ceinture équatoriale et deux ceintures péripolaires) 24
δ. Les sédiments glaciaires : une sédimentation détritique liée aux inlandsis et calottes 25
ε. Les argiles des grands fonds (« argiles rouges ») : des apports variés (fluviatile, éolien, volcanique, hydrothermale et cosmique) dans les zones de faibles productivité biologique 25
d. Un couplage entre sédimentation néritique et pélagique 25
e. Bilan 25
D. Le phénomène sédimentaire, un processus qui peut concentrer localement des ressources exploitables par l'Homme 26
1. Les ressources : des gisements d'un matériau géologique exploitable et économiquement rentable 26
2. Des matériaux de nature variée : panorama des ressources sédimentaires 26
3. Des matériaux inégalement répartis, concentrés localement en lien avec des processus sédimentaires historiques, et nécessitant un transport anthropique 27
4. Des ressources dont les temps de formation en font souvent des entités finies et non renouvelables, tendant à l'épuisement 27
a. L'épuisement progressif des ressources 27
b. Une recherche perpétuelle de nouveaux gisements : la prospection 28
c. Une nécessité de contrôler l'utilisation de la ressource : les 3 R (réduire, réutiliser, recycler) 28
d. Vers la substitution : le remplacement d'une ressource limitée par une ressource plus disponible 28
5. Le cas de l'exploitation de la matière organique carbonée 28
a. L'exploitation du charbon : une exploitation minière 28
b. L'exploitation des hydrocarbures (notamment le pétrole) : une exploitation par forages 28

II. Les types de dépôts sédimentaires et les modalités de formation des roches sédimentaires : un panorama 29
A. Le devenir des particules fragmentaires de roches : la lignée détritique 29
1. Les particules fragmentaires de roches : les sédiments détritiques 29
a. Des débris de taille variable : la classification granulométrique (rudites, arénites, lutites) 29
b. Des roches initiales de nature variable : la classification chimique (sédiments silicoclastiques = terrigènes [cas dominant], calcoclastiques, bioclastiques et volcanoclastiques) 30
2. Des sédiments qui peuvent enregistrer leurs conditions de transport et de dépôt 30
a. La forme et l'aspect de surface des grains : une conséquence mécanique de la distance et du mode de transport 30
α. La morphologie des grains : morphoscopie et exoscopie 30
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 30
γ. Cas du transport par le vent : des particules peu sphériques et très choquées 30
δ. Cas du transport par la glace : des particules souvent anguleuses et irrégulières 30
b. Un lien entre énergie du milieu et distance de transport : le tri granulométrique (= granoclassement) 30
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 30

β. Dans les écoulements gravitaires (notamment les courants de turbidité) : un granoclassement vertical (cas de la séquence de Bouma) et horizontal 30
γ. Une absence de granoclassement des dépôts glaciaires 31
c. Un lien entre hydrodynamisme et répartition géométrique des dépôts : les rides de courants (*ripple marks*) 31
α. En présence de courants unidirectionnels : des rides asymétriques ou des antidunes à litage oblique 31
β. Un impact de l'énergie de l'écoulement : rides 2D (stratifications parallèles) vs. rides 3D (stratifications en auge) 32
γ. Sous l'effet des marées : des rides asymétriques à litage entrecroisé (= en arêtes de poisson) 32
δ. Sous l'effet des vagues : des rides symétriques 32
ε. Dans les chenaux à méandre : une barre de migration latérale 33
d. D'autres indicateurs mécaniques : les figures d'érosion et d'impact 33
e. Les traces d'activité biologique comme les fossiles et les ichnofossiles 34
3. Bilan : vue d'ensemble de la sédimentation détritique 34
4. La transformation des sédiments en roches détritiques : quelques données sur la diagenèse détritique (diagramme de STRAKHOV, 1969) 35
a. La dégradation de matière organique 35
b. La formation de nouveaux minéraux (authigenèse) 35
c. La cimentation 35
d. La compaction (mécanique et chimique) 35
e. La déshydratation 35
B. Le devenir des ions : la lignée ionique (chimique et biochimique) 36
1. La lignée biogène siliceuse 36
2. La lignée carbonatée (très largement biogène) 36
a. Panorama de la diversité chimique des roches carbonatées 36
b. Le système carbonates et la (bio)précipitation du carbonate de calcium 36
α. Un équilibre entre dioxyde de carbone / ions hydrogénocarbonates et carbonates 36
β. Une très faible précipitation chimique et une très large bioprécipitation 37
γ. Quelques facteurs agissant sur le système carbonates 37
i. Le dioxyde de carbone CO_2 atmosphérique : un acidifiant défavorisant la précipitation 37
ii. L'acidification, facteur défavorable à la précipitation 37
iii. La température, facteur défavorable à la précipitation chimique… mais favorable à la bioprécipitation ! 37
iv. La hausse de profondeur, facteur défavorable à la précipitation (notions de lysocline et de CCD) 38
v. Les êtres vivants : un effet variable mais une contribution globale décisive à la précipitation biochimique 38
c. La classification des roches carbonatées : classifications de FOLK (1959) et DUNHAM (1962) 38
α. Une classification fondée sur la nature des éléments figurés et de la phase de liaison (Folk, 1959) 38
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 39
d. Les environnements de dépôts carbonatés 40
α. La sédimentation carbonatée récifale et de plateforme : une sédimentation surtout benthique en eaux chaudes largement contrôlée par l'hydrodynamisme 40
β. La sédimentation carbonatée pélagique, une sédimentation surtout planctonique en eaux chaudes et au-dessus de la CCD 40
e. Bilan : vue d'ensemble de la sédimentation carbonatée 41
f. La diagenèse carbonatée 41
α. Des processus semblables à la diagenèse détritique : un enfouissement qui induit notamment une compaction, une cimentation et des recristallisations 41
β. La possibilité d'une dolomitisation ou d'une dédolomitisation 41
3. La lignée évaporitique : la formation d'évaporites (= roches salines) 42
α. Des roches variées formées séquentiellement par cristallisation à partir d'eau à forte salinité subissant une évaporation progressive et intense : la séquence évaporitique 42
β. Des contextes de dépôt à forte salinité 43
C. Le devenir sédimentaire de la matière organique non oxydée : la lignée carbonée 43
1. Les principaux milieux et conditions de dépôt nécessaires à la préservation de matière organique 43
a. La nécessite d'une production primaire (= photosynthétique) importante 43
b. Des milieux qui concentrent et accumulent la matière organique 43
c. La conservation de matière organique, une possibilité dans les milieux anoxiques 44
α. L'oxydation (notamment respiratoire) de la matière organique, ennemi de sa préservation : la nécessité de conditions réductrices anoxiques 44
β. Des milieux réducteurs et anoxiques où la matière organique est préservée dans les sédiments 45
γ. Une préservation de matière organique facilitée dans les sédiments fins (peu poreux) 45
d. Des environnements où la matière organique accumulée peut être préservée de l'oxydation 45
α. En milieu continental : des débris végétaux souvent enfouis dans des sédiments détritiques dans certains lacs (contexte limnique) ou deltas (voire lagunes) (contexte paralique) 45
β. En milieu océanique et maritime : la préservation de matière organique planctonique dans des milieux favorisant l'anoxie 46
i. Les bassins maritimes intracontinentaux à fonds anoxiques : le modèle euxinique (exemple actuel : Mer noire) 46
ii. Les zones océaniques ouvertes à fond anoxique : le modèle à zone à oxygène minimum (ZOM) 47
iii. Les zones océaniques d'*upwellings* (le modèle d'*upwelling*) 47
2. Les roches carbonées et leurs modalités de formation 48
a. Des roches solides formées à partir de dépôts organiques embryophytiques continentaux : les charbons 48
α. Les charbons, roches solides comprenant une fraction organique (les macéraux) et une fraction inorganique (les cendres) 48
β. Une classification des charbons basée sur la teneur en carbone 48
γ. La houillification (carbonisation / carbonification) : un enfouissement progressif de MO s'accompagnant d'une augmentation de la teneur en carbone 48
δ. La possibilité d'alternances cycliques de sédimentation carbonée et de comblement détritique en lien la variation du niveau de l'eau : les cyclothèmes 49
b. Des roches fluides formées à partir de dépôts planctoniques généralement océaniques : les hydrocarbures 49
α. La notion d'hydrocarbures : roches liquides et gaz composés de carbone et d'hydrogène 49
β. À l'origine : une accumulation de matière organique généralement planctonique sur un fond anoxique et son enfouissement dans des sédiments détritiques 50
γ. Une formation en trois étapes à partir d'une roche mère riche en dépôts carbonés qui subissent un chauffage par enfouissement : diagenèse, catagenèse, métagenèse 50
δ. Une formation d'hydrocarbures dans trois grands contextes : le diagramme de VAN KREVELEN (1950) 50
ε. Un piégeage des hydrocarbures dans des roches réservoirs sous un toit imperméable (roches de couverture) 51

Bilan 52
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 53
Références 53
Plan du chapitre 54
Plan simplifié du chapitre 57
Plan très simplifié du chapitre 57

Plan simplifié du chapitre

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 1

I. Un transport des sédiments par des agents physiques précédant leur dépôt (sédimentation) dans des bassins sédimentaires 2
A. Les sédiments, des entités subissant un transport par des agents physiques 2
1. Cas des ions en solution : un transport par l'eau 2
2. Cas des particules de roches (sédiments détritiques) : un transport par des agents variés 2
B. Des dépôts qui s'effectuent dans des zones en déclivité : les bassins sédimentaires 6
1. Les bassins sédimentaires, zones de subsidence 6
2. Les bassins sédimentaires, des formations très liées au contexte géodynamique 6
3. Des environnements de dépôt continentaux et océaniques 8
C. Des dépôts répartis dans le monde de manière assez contrôlée : vue d'ensemble de la sédimentation mondiale 21
1. Des continents avec une sédimentation plutôt faible et surtout caractérisés par des sols 21
2. Des océans dont la sédimentation pélagique (= profonde) dégage des grandes tendances sédimentaires 22
D. Le phénomène sédimentaire, un processus qui peut concentrer localement des ressources exploitables par l'Homme 26
1. Les ressources : des gisements d'un matériau géologique exploitable et économiquement rentable 26
2. Des matériaux de nature variée : panorama des ressources sédimentaires 26
3. Des matériaux inégalement répartis, concentrés localement en lien avec des processus sédimentaires historiques, et nécessitant un transport anthropique 27
4. Des ressources dont les temps de formation en font souvent des entités finies et non renouvelables, tendant à l'épuisement 27
5. Le cas de l'exploitation de la matière organique carbonée 28

II. Les types de dépôts sédimentaires et les modalités de formation des roches sédimentaires : un panorama 29
A. Le devenir des particules fragmentaires de roches : la lignée détritique 29
1. Les particules fragmentaires de roches : les sédiments détritiques 29
2. Des sédiments qui peuvent enregistrer leurs conditions de transport et de dépôt 30
3. Bilan : vue d'ensemble de la sédimentation détritique 34
4. La transformation des sédiments en roches détritiques : quelques données sur la diagenèse détritique (diagramme de STRAKHOV, 1969) 35
B. Le devenir des ions : la lignée ionique (chimique et biochimique) 36
1. La lignée biogène siliceuse 36
2. La lignée carbonatée (très largement biogène) 36
3. La lignée évaporitique : la formation d'évaporites (= roches salines) 42
C. Le devenir sédimentaire de la matière organique non oxydée : la lignée carbonée 43
1. Les principaux milieux et conditions de dépôt nécessaires à la préservation de matière organique 43
2. Les roches carbonées et leurs modalités de formation 48

Bilan 52
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 53
Références 53
Plan du chapitre 54
Plan simplifié du chapitre 57
Plan très simplifié du chapitre 57

Plan très simplifié du chapitre

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 1

I. Un transport des sédiments par des agents physiques précédant leur dépôt (sédimentation) dans des bassins sédimentaires 2
A. Les sédiments, des entités subissant un transport par des agents physiques 2
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 21
D. Le phénomène sédimentaire, un processus qui peut concentrer localement des ressources exploitables par l'Homme 26

II. Les types de dépôts sédimentaires et les modalités de formation des roches sédimentaires : un panorama 29
A. Le devenir des particules fragmentaires de roches : la lignée détritique 29
B. Le devenir des ions : la lignée ionique (chimique et biochimique) 36
C. Le devenir sédimentaire de la matière organique non oxydée : la lignée carbonée 43

Bilan 52
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 53
Références 53
Plan du chapitre 54
Plan simplifié du chapitre 57
Plan très simplifié du chapitre 57

© 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 mars 2019 • Dernière actualisation : octobre 2020.
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.