

# SÉDIMENTATION ET ENVIRONNEMENTS CONTINENTAUX

## MOTS-CLÉS

- ▶ Lacs, bassins limniques, varves.
- ▶ Evaporites, gypse, anhydrite, halite, lagunes, sebkhas, chotts.
- ▶ Cônes alluviaux, plaines d'inondation, chenaux, levées, terrasses.
- ▶ Chenaux rectilignes, chenaux à méandres, point bar, chenaux en tresses.
- ▶ Niveau de base.
- ▶ Estuaires, deltas, bouchon vaseux, slikke, schorre, waddens.

**L**es environnements continentaux sont extrêmement nombreux et variés et il est impossible d'en faire une présentation exhaustive dans le cadre de ce chapitre. La sédimentation glaciaire a été traitée avec la glaciologie au chapitre 26, les sols et la pédologie avec les altérations au chapitre 27 et la sédimentation désertique au chapitre 28 à l'occasion du transport éolien ; nous n'envisagerons donc ici que la sédimentation des domaines lacustre et margino-littoral, fluvatile et fluvio-marin.

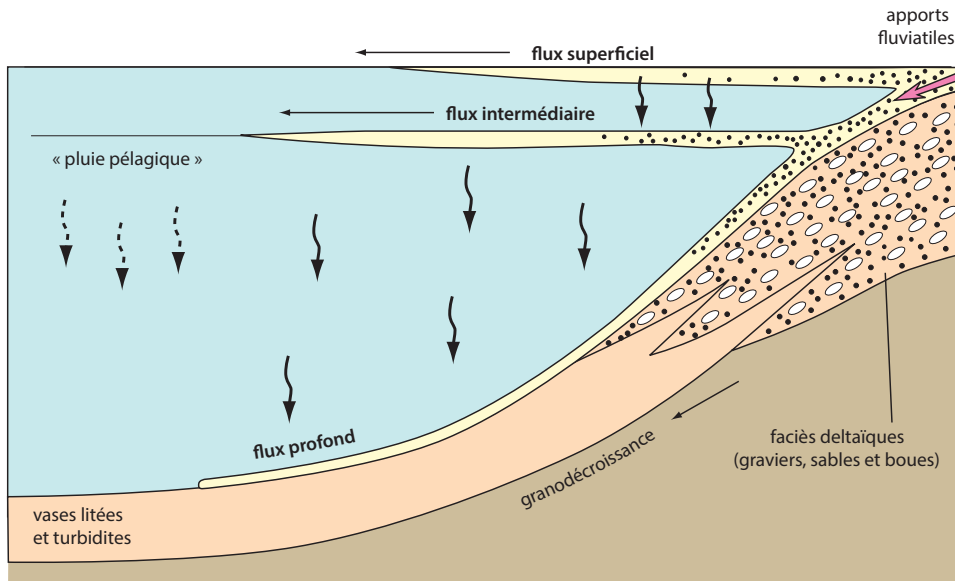
## 29.1 LA SÉDIMENTATION LACUSTRE ET MARGINO-LITTORALE (LAGUNES)

Nous avons vu au chapitre 26 (§ 26.1.4) la difficulté à donner une définition exhaustive du terme « lac ». On peut cependant dire que du point de vue morphologique, deux grands types de lacs existent : les **lacs de dépression** (lacs de cratère par exemple) et les **lacs de barrage** (par une coulée volcanique ou par une moraine glaciaire, *fig. 26.26*). Pour la sédimentation, cet environnement est complexe et susceptible de nombreuses variations. La nature des dépôts dépendra de la nature géologique du bassin-versant, du régime hydrologique (ruissellement *vs.* apports fluviatiles ; lacs fermés *vs.* lacs à exutoire) et du climat (bilan évaporation/précipitation).

### 29.1.1 La sédimentation lacustre détritique

Les matériaux sont apportés par les fleuves qui se jettent ou traversent le lac (fig. 29.1), il s'agit de galets, de sables et des vases qui peuvent présenter un contraste saisonnier à deux termes (**varves**) : dépôts fins et clairs en été (précipitation de carbonates), dépôts plus grossiers et sombres en hiver (argiles riches en matière organique). L'étude de ces varves permet des reconstitutions paléoclimatiques fines.

Voir fig. 26.34C



**Figure 29.1** Sédimentation détritique dans un lac de climat tempéré à stratification thermique, en fonction d'apports fluviaux.

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

#### Encart 29.1 – Importance des apports sédimentaires lacustres

Dans le lac Lemman, le delta du Rhône (20 km de long) a progressé, depuis l'époque romaine, de 2 km sur une largeur de 4 km. La Dranse a édifié un second delta entre Thonon et Évian. De même, les lacs actuels de Thonon et de Brienz résultent de la division d'un grand lac allongé par un delta lacustre sur lequel est implantée la ville d'Interlaken (Suisse).

Les eaux des lacs sont très souvent stratifiées du point de vue de la température et de la densité avec des inversions possibles en fonction des saisons. Les différences de densité entre les différentes masses d'eau et celles des flux entrants (température et charge sédimentaire) peuvent conduire à des écoulements de surface, intermédiaires ou de fond dont la charge sédimentaire se mélange à la production « in situ » carbonatée, siliceuse ou organique (fig. 29.1).

### 29.1.2 La sédimentation chimique lacustre et margino-littorale : minéraux et roches évaporitiques

Lorsque les fleuves tributaires et les exutoires sont réduits ou absents (**lacs endoréiques**) et que le climat chaud (désertique) favorise l'évaporation, on peut observer une précipitation chimique lacustre constituant les **dépôts évaporitiques ou salins** des chotts et des lacs salés (*fig. 29.6*). Ce type de dépôts se rencontre en domaines peu profonds souvent en contexte géodynamique de rifting continental (mer Morte) ou de fermeture d'espace marin (Méditerranée au Miocène). Les précipitations se font à partir de fluides variés (marins, continentaux, hydrothermaux) et sont souvent en continuité avec la sédimentation carbonatée (dolomitisation) ou siliceuse. Quels que soient le contexte et l'origine des fluides, la précipitation des sels suppose une **réduction du volume d'eau** afin que les éléments chimiques atteignent leur **produit de solubilité** (*fig. 29.4A*).



Voir fig. 34.10

#### Encart 29.2 – Une précipitation auto-entretenu

De très nombreux minéraux évaporitiques sont hydratés (6 molécules d'eau dans la formule de la **carnallite**,  $\text{KCl-MgCl}_2, 6\text{H}_2\text{O}$  par exemple) ; leur précipitation participe ainsi à la réduction du volume d'eau au même titre que l'évaporation. Il y a donc une sorte d'auto-entretien du phénomène évaporatoire par la cristallisation des minéraux évaporitiques.



Voir encart 28.11

En fait, la sédimentation d'évaporites peut résulter soit d'une **précipitation subaquatique** dans des bassins de taille et de profondeur variables (lacs ou lagunes), soit d'une **précipitation subaérienne** à l'intérieur du sédiment (**sebkhas** côtières de lacs ou de mer, *fig. 34.11*) ou dans des marais salants très peu profonds ou desséchés. Ainsi que nous l'avons déjà signalé, il n'est pas toujours facile de distinguer les précipitations *in situ* dans ces lacs *des altérations additives pédogénétiques* (*fig. 27.12*) et de la diagenèse précoce. Bien qu'ils se rattachent principalement au domaine marin, nous évoquerons en fin de chapitre (voir § 29.1.3) le problème de la formation des grandes masses d'évaporites fossiles.

#### a) La précipitation évaporitique subaquatique

##### ► Les lacs et les bassins fermés

Les faciès s'organisent concentriquement (dispositif en « œil », *fig. 29.2A*) avec les sels les moins solubles (carbonates) à la périphérie et les plus solubles (sels de potasse) au centre. Dans ce cas, l'origine des sels est le lessivage continental et l'apport se fait par les eaux souterraines, le ruissellement et éventuellement des tributaires permanents ou temporaires. Pour les lacs permanents, on distingue classiquement, en fonction de la composition des eaux, **trois lignées chimiques (carbonatée, sulfato-chlorurée ou sodique)** qui peuvent toutes par évaporation aboutir à la précipitation d'évaporites. De ce fait les séquences évaporitiques continentales sont très fluctuantes d'une région à l'autre en fonction de la qualité des eaux, du contexte géologique et du climat. Du point de vue minéralogique, on rencontre dans ces lacs les mêmes espèces principales qu'en domaine marin : le **gypse** ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ), l'**anhydrite** ( $\text{CaSO}_4$ ), l'**halite** ( $\text{NaCl}$ ), la **sylvite** ( $\text{KCl}$ ) et la **carnallite** ( $\text{KCl-MgCl}_2, 6\text{H}_2\text{O}$ ) mais aussi des **formes typiques du domaine continental** comme l'**epsomite** ( $\text{MgSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$ ) et l'**astrakhanite** ( $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2, 2\text{H}_2\text{O}$ ).

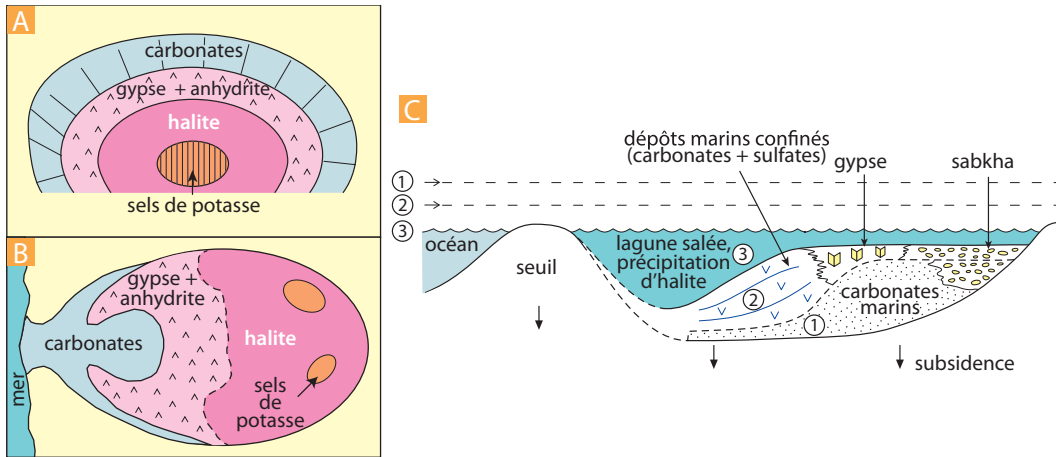


Figure 29.2 Les évaporites sub-aquatiques.

- A. Répartition en carte des faciès évaporitiques (dispositif dit en « œil ») dans le cas d'un bassin fermé.
  - B. Répartition en carte des faciès (dispositif dit en « en goutte d'eau ») dans le cas d'un bassin marin à seuil.
  - C. Coupe d'un bassin à seuil et évolution des faciès lors d'une baisse du niveau marin.
- Dans les bassins à seuil, l'origine des sels est mixte mais la composante marine est souvent prépondérante. L'eau de mer étant sous-saturée par rapport aux principaux ions constitutifs des évaporites, leur précipitation suppose donc une réduction du volume d'eau amenant leur concentration à un niveau supérieur à celui de leur produit de solubilité.

### Encart 29.3 – Exemples actuels et fossiles

La mer Caspienne, la mer d'Aral (Asie), la mer Morte (Moyen-Orient), le Grand Lac Salé (États-Unis), le lac Tchad (Afrique) et le lac Eyre (Australie) représentent les exemples actuels les plus classiques. La mer Morte constitue le lac le plus salé du monde (280 g/litre), il s'y dépose outre le gypse, des chlorures et bromures de sodium, de potassium et de magnésium,

Il existe peu de lacs à **sédimentation calcaire** dans la nature actuelle : lac Eyre en Australie, Pan d'Etosha en Namibie (Sud-Ouest Africain, fig. 29.3). Dans les séries fossiles, on peut citer

les lacs oligocènes des fossés tectoniques d'Alsace et de Limagne (calcaires d'Algues en « chou-fleur », calcaires à tubes de Phrygane (insecte dont la larve aquatique s'entoure d'un fourreau calcaire), marnes à *Cypris* (Ostracode), calcaire bitumineux à *Helix ramondi*. Dans le Bassin de Paris, les calcaires de Brie et de Beauce sont des calcaires lacustres à Limnées et Planorbes. En fait, certains des calcaires dits lacustres, tel le calcaire de Saint-Ouen (Bartonian), renferment des foraminifères, et sont en réalité laguno-lacustres et se rattachent plus au type suivant.



**Figure 29.3** Le lac carbonaté du Pan d'Etosha (Namibie).

- A.** La bordure du lac lors d'une phase de mise en eau.
- B.** Springbox (*Antidorcas marsupialis*) sur le Pan d'Etosha.
- C.** Traces d'éléphants et fentes de dessiccation dans les argiles magnésiennes.
- D.** Cristaux d'halite à la surface du Pan. (Photos : A. Person).

Les précipitations conduisent à la formation de carbonates, de gypse, d'halite, d'argiles magnésiennes (attapulgites et sépiolites), de smectites sodiques et même de silicates sodiques (analcime).

► *Les lagunes margino-littorales*

Il s'agit de bassins semi-isolés gardant une connexion plus ou moins importante avec la mer franche (bassins à seuils). Les faciès s'organisent alors suivant une polarité centrée sur la passe reliant le bassin à la mer, les sels les moins solubles sont au voisinage de la passe, les plus solubles, à l'opposé, au fond de la lagune (dispositif en « goutte d'eau », *fig. 29.2B*).

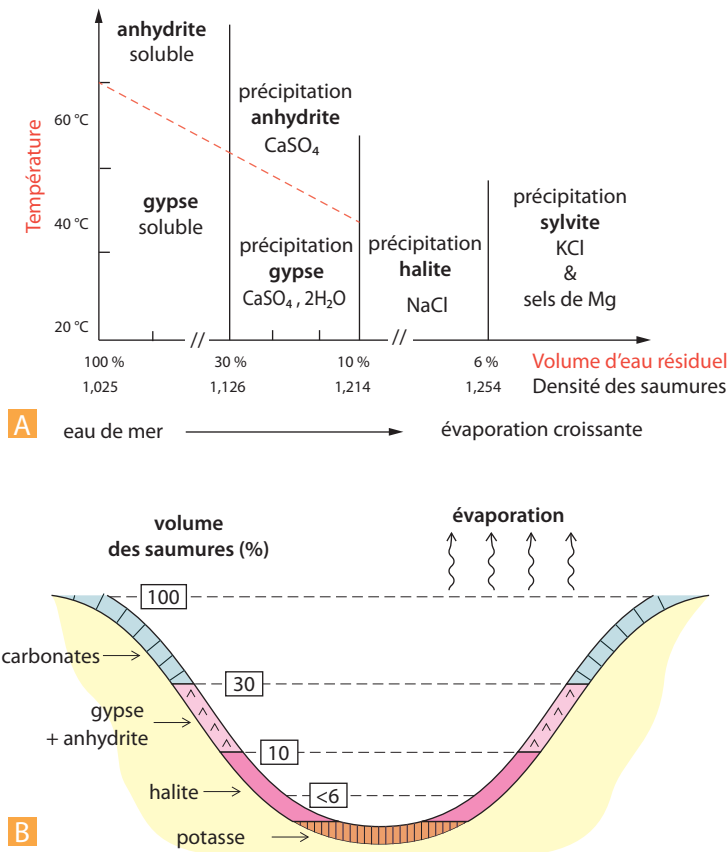
Voir chap. 23,  
tab. 23.1

La composition moyenne de l'eau de mer conduit par évaporation à la précipitation d'environ 78 % de NaCl, 18 % de sels de potasse (chlorures et sulfates complexes de K et Mg), 3,5 % de sulfates de Ca et 0,3 % de carbonates plus quelques constituants mineurs (bromures, fluorures et borates). Le **sulfate de calcium** est la première forme à précipiter lorsque le volume est réduit à environ 30 % du volume initial (*fig. 29.4*). Il peut exister à la fois sous forme hydratée (**gypse** :  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et sous forme anhydre (**anhydrite** :  $\text{CaSO}_4$ ).

Dans une solution pure de  $\text{CaSO}_4$ , l'anhydrite ne précipite que pour des températures supérieures à 60°C mais en présence d'autres sels, sa température de précipitation peut descendre jusqu'à 25-30 °C en fonction de la concentration saline. En fait, dans les conditions naturelles, le gypse est la forme la plus courante des évaporites marines (*fig. 29.4*) tandis que l'anhydrite se développe surtout dans le domaine supratidal et continental (la température du sédiment des sebkhas du golfe Persique est de l'ordre de 80 °C).

L'**halite** (NaCl), en association avec les sulfates et chlorures de magnésium, précipite lorsque le volume d'eau est réduit à environ 10 % du volume initial. Lorsqu'il ne reste plus que 6 % du volume initial survient la précipitation de la **polyhalite** ( $K_2MgCa_2(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$ ) et de la **sylvite** (KCl).

Dans ce type de bassin, le renouvellement des saumures par les arrivées d'eaux de mer favorise les sels, les moins solubles. De ce fait dans la séquence évaporitique, les stades carbonates et sulfates de calcium sont plus longs que les stades halite et sels de potasse (qui ne sont souvent même jamais atteints).



**Figure 29.4** Domaines de précipitation des différents minéraux évaporitiques en fonction de la température et du degré d'évaporation de l'eau de mer.

Le volume des séries évaporitiques fossiles et la prédominance des sels les moins solubles dans ces formations impliquent d'une part une subsidence continue et d'autre part des évaporations incomplètes et une recharge, au moins périodique, du système évaporatoire par de l'eau de mer ou par des saumures continentales. De fait, les séries évaporitiques ont le plus souvent un **aspect cyclique** et sont constituées d'un empilement de séquences d'évaporation (complètes ou non) où alternent des sels plus ou moins solubles.

## Encart 29.4 – Le gypse ludien du Bassin de Paris

Les évaporites fossiles, qui sont facilement solubilisées par les eaux de surface ou interstitielles, peuvent être à l'origine, après transport sous forme soluble, de nouveaux dépôts d'évaporites dans des lacs ou des sols. Ainsi les gypses ludiens du centre du bassin de Paris ont été au centre d'une polémique qui dura plus d'un siècle entre partisans d'une origine marine (évaporation d'eau de mer dans une lagune) et

partisans d'une origine continentale (précipitation dans un lac des sulfates dissous à partir du Permo-Trias de l'est de la France et apportés par les eaux continentales). L'origine continentale est maintenant admise par la majorité des auteurs à la suite des apports de la géochimie des isotopes stables ( $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{34}\text{S}$ ) et des éléments traces (Sr, Na et Mg).



Voir fig. 34.6

La précipitation chimique de silice est fréquente dans les lacs temporaires du fait des modifications de pH. Ainsi dans les lacs du sud de l'Australie, l'activité photosynthétique saisonnière induit des pH supérieurs à 10, le quartz et les argiles sont alors partiellement solubilisés et les eaux deviennent sursaturées par rapport à l'**opal-A** qui précipite, lors de l'évaporation et d'une diminution du pH, en gel de **crystalite** pour donner des **cherts** (silex). Dans les lacs d'Afrique de l'Est, les eaux très alcalines (carbonates de sodium) mobilisent la silice à partir des formations volcaniques. Leur teneur en  $\text{SiO}_2$  devient très élevée (supérieure à 2 500 ppm), l'afflux d'eau fait précipiter, par baisse du pH, la silice sous forme de **magadiite** (du lac Magadi au Kenya), silicate de sodium hydraté métastable [ $\text{NaSi}_7\text{O}_{13}(\text{OH})_3 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$ ], qui évolue rapidement en cherts.

## Encart 29.5 – Le Kara-Boghaz, un laboratoire naturel

Le Kara-Boghaz, golfe isolé (200 km sur 130 km, profondeur 10 m environ) sur la côte Est de la mer Caspienne, est un cas particulier très étudié. Il ne reçoit aucun cours d'eau et ne communique avec la mer Caspienne que par un détroit large de 200 m et profond de 6 m. Des sels, essentiellement la **mirabilite** ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) mais aussi l'**epsomite** et l'**astrakhanite**, se déposent sur les rives et au fond du golfe surtout en été à cause de l'évaporation intense et en hiver, quand l'eau est très froide, parce que les sels sont moins solubles dans l'eau froide que dans l'eau chaude.

## b) La précipitation évaporitique subaérienne

Elle se développe au niveau des plaines côtières (**sabkhas**) en bordure de lac ou de mer. On estime que ce dernier cas correspond sans doute au mode principal de formation d'évaporites marines dans la nature actuelle. L'exemple le plus connu est celui de la Côte de Pirates (Trucial Coast) du golfe Persique mais on connaît aussi des sabkhas au Texas ou sur la côte sud de la Méditerranée (Tunisie, Égypte). Il s'agit d'environnements intertidaux supérieurs et surtout supratidaux à l'hydrologie complexe (rares invasions marines, pompage évaporitique et participation d'eaux continentales, fig. 34.11).

Les lacs temporaires (playas, chotts) sont partiellement à sec la plupart du temps avec un marais salant résiduel au centre. De très nombreux lacs sont donc entourés de sebkhas continentales constituées de sédiments sableux ou boueux (fig. 29.3C) dans lesquels s'intercalent de fines croûtes de sels (constituées de **protodolomite** du côté le plus externe et de **gypse** et d'**halite** dans la partie interne, fig. 29.3D et 29.6). Les séquences montrent de fréquentes fentes de dessiccation, des traces de bioturbation et des fantômes de racines et traduisent aussi l'évolution de la nappe aquifère à l'intérieur des sédiments. La sédimentation est donc très sensible aux variations du régime hydraulique du lac et aux fluctuations mineures du climat.

La précipitation (**évaaporites nodulaires ou lenticulaires**) se fait à l'intérieur des sédiments (sables et boues silico-carbonatées qui peuvent être d'origine marine, éolienne ou fluviale) à partir des eaux interstitielles au cours de leur remontée vers la surface par pompage évaporitique. Les saumures deviennent saturées par rapport au sulfate de calcium, rarement par rapport à l'halite.

La dimension de la **séquence évaporitique subaérienne** dépend de l'extension de la nappe d'eau souterraine mais il est évident qu'à niveau lacustre ou marin constant, la séquence évaporitique de sabkha ne peut se développer que sur une épaisseur de l'ordre du mètre (quelques mètres au maximum). Cependant, en faisant jouer de façon conjuguée la subsidence et les variations du niveau lacustre ou marin, les évaporites de sabkhas peuvent se développer sur des épaisseurs importantes sous forme de dépôts cycliques.

Dans les sols des régions arides, lorsque l'évaporation des eaux interstitielles l'emporte sur la pluviométrie, il peut y avoir des précipitations de gypse (**roses des sables**) ou de chlorures. Les **caliches** et les **calcrètes** (fig. 27.12 et 29.5) sont des croûtes, de même origine, principalement carbonatée, mais qui peuvent occasionnellement contenir du gypse et de la silice. La précipitation de silice est connue dans certains sols actuels (Australie, Afrique du Sud et du Nord) ou fossiles (Éocène du Bassin de Paris, fig. 27.11). Ces croûtes siliceuses ou **silcrètes** se développent sous climat aride et semi-aride quand des eaux souterraines alcalines atteignent un pH supérieur à 9 (voir altérations additives, chap. 27).



Figure 29.5 Néoformations au Pan d'Etosha (Namibie).

- A. Interpénétration des produits de sédimentation et d'altération additive : calcrète englobant un stromatolithe.
- B. Néoformation de quartz mise en relief par déflation éolienne. (Photos A. Person.)

### c) Importance des roches évaporitiques

Le **gypse** est une roche tendre (dureté 2), les variétés plus dures, susceptibles d'un beau poli, sont appelées **albâtres**. Il est légèrement soluble dans l'eau pure (2,5 g par litre : eau séléniteuse). Par chauffage à 120/130 °C, le gypse se transforme en plâtre :



### Encart 29.6 – Le plâtre de Paris

Le plâtre de Paris (fabriqué à partir des gypses ludiens), particulièrement apprécié à cause de sa prise rapide et de sa résistance, a connu un renom mondial. Les abords de la Butte Montmartre (Place Blanche, couleur liée aux pertes de plâtre et de gypse par les charettes) et le XIX<sup>e</sup> arrondissement de Paris (Rue des carrières d'Amérique) ont gardé, dans la toponymie des rues, le souvenir de ces exploitations et exportations lointaines. Le plâtre mélangé à de la gélatine et coloré donne le stuc, imitation du marbre.

**Le sel gemme (ou halite)**, roche de dureté 2, de densité 2,2, fusible à 800 °C, est très soluble dans l'eau (350 g par litre) ce qui explique la rareté des affleurements de sel gemme, localisés uniquement dans les régions désertiques : montagnes de sel du Sud-Algérien et de l'île de Kischim (golfe Persique), rochers de sel de Cardona (Espagne). Les formations de sel gemme sont particulièrement abondantes dans le Permien (Stassfurt en Allemagne au nord du Harz), le Trias (Lorraine, Jura), l'Oligocène (Alsace) et le Miocène (Messinien : gisement de Wieliczka en Galicie et de Realmonte en Sicile, *fig. 29.8*). Leur puissance peut dépasser 1 000 m. Le sel gemme est surtout employé en économie domestique (8 kg par habitant par an), dans les industries alimentaires et chimiques, et pour le salage des routes en hiver. Le **sylvite** et la **carnallite**, fréquemment associés au sel gemme qu'ils rendent déliquescents, sont utilisés comme engrais.

Les évaporites peuvent être aussi une source importante de métaux, notamment de lithium dont la demande, par l'industrie des batteries, a considérablement augmenté. Le salar d'Atacama (Chili) représente 27 % des réserves mondiales pour cet élément (*fig. 29.6*).



**Figure 29.6** Évaporites continentales.

**A.** Le salar d'Atacama (Chili) : exploitation des dépôts évaporitiques pour l'extraction du lithium. (*Photo Y. Lagabrielle.*)

**B.** Le Chott El Djerid (Tunisie) : aspect de la croûte de gypse et d'halite. Les structures en « teepes » sont dues aux croissances cristallines. (*Photo M. Renard.*)

Par leur **plasticité** rendue effective par le gradient géothermique et le poids des sédiments (le sel gemme à 120 °C sous 300 kg file lentement dans une presse), les roches salines sont un facteur d'instabilité. Elles ont tendance à fluer vers la surface en donnant naissance à de curieux phénomènes tectoniques (dômes de sel, plis diapirs, décollements, « couche savon » des chevauchements et charriages). C'est la **tectonique salifère** ou **halocinèse**.

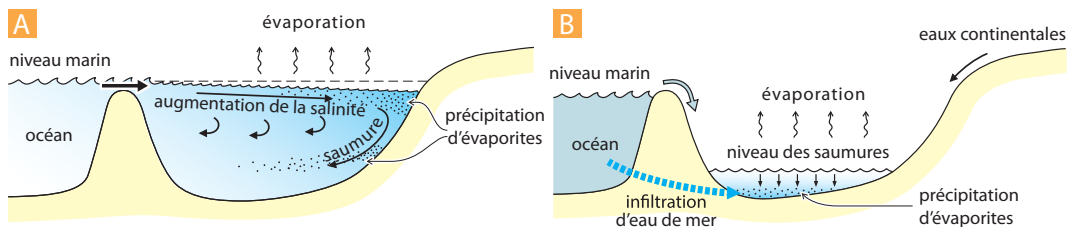
### 29.1.3 L'origine des grandes séries évaporitiques

À partir des **modèles peu profonds**, continentaux, marins ou mixtes, il est difficile d'expliquer la grande épaisseur et la grande homogénéité latérale des séries évaporitiques ( $2,4 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  de sels précipités au Permien dans la mer du Zechstein soit 10 % du réservoir océanique ; accumulation de plus de 1 000 m d'évaporites en certains points de la Méditerranée au cours du Messinien, *fig. 29.8*). Les taux de subsidence importants nécessaires pour rendre compte de ces accumulations sont peu compatibles avec les paysages sans reliefs que supposent les modèles peu profonds. Des modèles évaporatoires en **contextes géodynamiques de bassins profonds** ont donc été envisagés notamment pour rendre compte des arrivées relativement brutales de séquences évaporitiques au sein de certaines séries marines pélagiques (cas du Messinien par exemple). Il en existe deux grandes familles (*fig. 29.7*) :

#### a) Les modèles de bassin profond et d'eau profonde

Du fait d'une restriction des communications (eustatisme, tectonique), la circulation profonde d'un bassin profond (sur croûte continentale ou océanique) se trouve remplacée par une circulation de surface.

Des conditions euxiniques s'installent (dépôts de marnes bitumineuses, *fig. 33.4*). Les eaux de surfaces, qui deviennent plus denses et plus salées du fait de l'évaporation, plongent dans la partie la plus interne du bassin tandis que le gypse et l'halite commencent à précipiter à partir des eaux de surface. Les évaporites miocènes du soubassement de la mer Rouge (3 à 4 km d'épaisseur pour un affleurement d'environ 100 km de large) pourraient être un exemple de ce type.



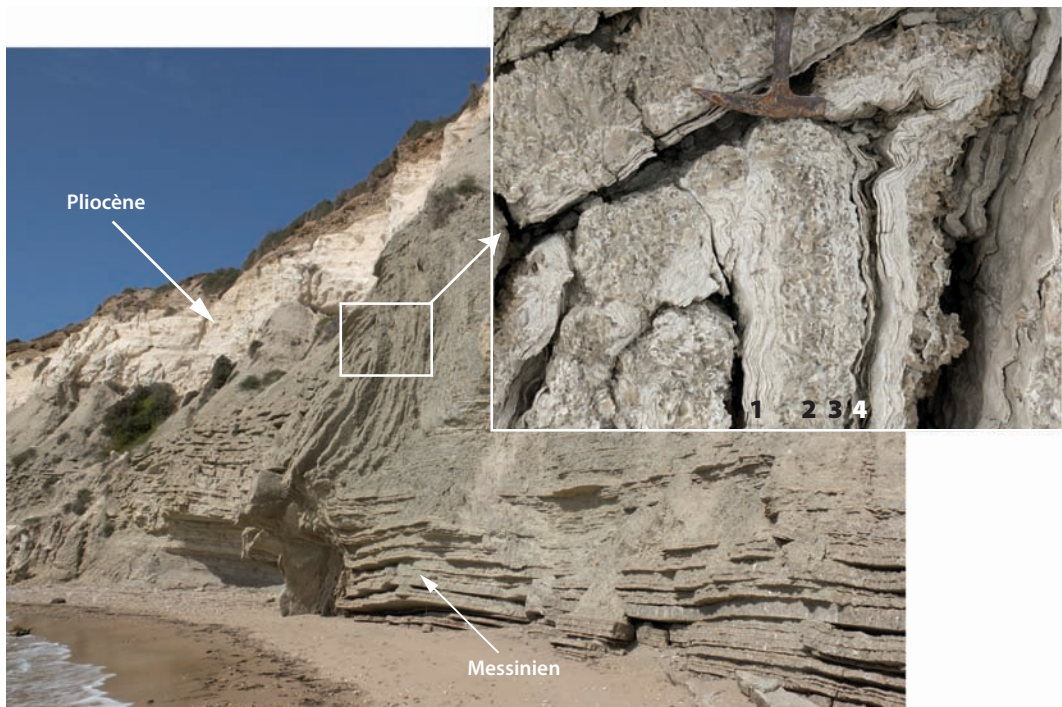
**Figure 29.7** Les bassins évaporitiques profonds.

- A. Bassin structuralement profond et d'eau profonde.
- B. Bassin structuralement profond et d'eau peu profonde.

#### b) Les modèles de bassin profond et d'eau peu profonde

Dans ce cas, un bassin « structuralement profond » s'est isolé de la mer, il en résulte un assèchement sur place et un développement de faciès évaporitiques d'eau peu profonde ou de sebkhas. Des débordements périodiques de la mer par-dessus le seuil et des infiltrations assurent le renouvellement des saumures. La distribution des faciès est proche du dispositif en « œil » des bassins fermés peu profonds (*fig. 29.2A*). Pour un grand nombre d'auteurs, les évaporites messiniennes (Miocène, *fig. 29.8*) du fond de la Méditerranée résulteraient d'un tel processus à la suite de la fermeture du détroit de Gibraltar (*fig. 29.7*).

On doit enfin signaler l'existence, ou la persistance, de saumures hyperconcentrées au fond de certaines fosses sous-marines en mer Rouge (fosses Atlantis) ou en Méditerranée à l'ouest de la Crête (fosses Discovery, Atalante, Urania et Bannock). Ces saumures particulièrement riches en Mg (presque 100 fois la teneur de l'eau de mer) ne se mélangent pas à l'eau de mer. Dans le cas de la Méditerranée, ces saumures, qui pourraient représenter une relique de la crise messinienne, ont livré des traces d'ADN et des produits de métaboliques laissant supposer la présence d'archéobactéries « hypersalinophiles ».



**Figure 29.8** Séquences évaporitiques dans le Messinien supérieur de Sicile.

Séquences alternantes composées de lamines calcaro-gypseuses à grains fins (1), de gypse à gros cristaux (2), de gypse nodulaire (3) et de silts calcaro-argileux (4). Plage d'Eraclea Minoa (région d'Agrigente), cette plage est le GSSP de la limite Messinien-Pliocène. (Photo M. de Rafélis.)

### 29.1.4 La sédimentation lacustre organique (biogène)

La matière organique lacustre (plantes herbacées et plancton) peut évoluer par processus de carbonisation soit vers les hydrocarbures (**gaz des marais**) et le **kérogène**, soit vers les **tourbes**. À cette origine on peut rattacher en France, la **houille des bassins limniques** du Massif central (Carbonifère), les **lignites tertiaires** dans le bassin d'Aix-en-Provence (Fuveau), les **schistes ampéliteux** à empreintes de feuilles et de poissons du lac paléocène de Menat (Puy-de-Dôme) et dans les Landes, les **tourbes** quaternaires.



Voir chap. 33

Parfois les frustules de Diatomées peuvent donner naissance à des silicifications ou des dépôts de diatomites (**tripoli**) fréquents dans les lacs actuels ou quaternaires de régions volcaniques, telle la **randanite** du lac de Randanne, aujourd'hui asséché (Puy-de-Dôme).

La pollution des lacs de pays industrialisés par les phosphates favorise la prolifération d'algues et cyanobactéries toxiques ce qui perturbe gravement leur équilibre écologique et provoque leur **eutrophisation**, pollution due à l'excès de nutriments.

## 29.2 LA SÉDIMENTATION FLUVIATILE

Les cours d'eau sont les principaux agents de transports des sédiments détritiques mais toute la charge sédimentaire n'atteint pas l'océan, une partie se sédimente sur le continent, soit au pied des grands reliefs sous forme de larges **cônes alluviaux** (fig. 29.9), soit dans les plaines alluviales des parties distales des fleuves sous la forme des **complexes chenaux-levées** au niveau des **plaines d'inondation** (fig. 29.10) et des **terrasses**.



Voir fig. 26.10 et 26.15

La sédimentation fluviale est relativement restreinte mais il faut souligner l'importance des crues exceptionnelles sur le transit particulière des cours d'eau. C'est ainsi que certaines crues peuvent exporter, en quelques heures, des volumes de suspensions 100 fois supérieurs au transport annuel moyen.

Voir chap. 28

### 29.2.1 Les dépôts des cônes alluviaux

Ce sont des corps sédimentaires en formes d'éventails constitués de l'accumulation de sédiments grossiers au pied des reliefs au niveau d'une rupture de pente (fig. 29.9). La coalescence de ces corps constitue le **piémont**. Ils se forment en général dans un contexte de tectonique active (montagnes en surrection en bordure d'une zone subsidente). L'accumulation d'un tel matériel grossier résulte de la diminution de la puissance de l'écoulement par réduction de son épaisseur et de sa vitesse au moment de son étalement à partir du débouché (apex) du chenal torrentiel montagneux.

Voir chap. 26.1.3

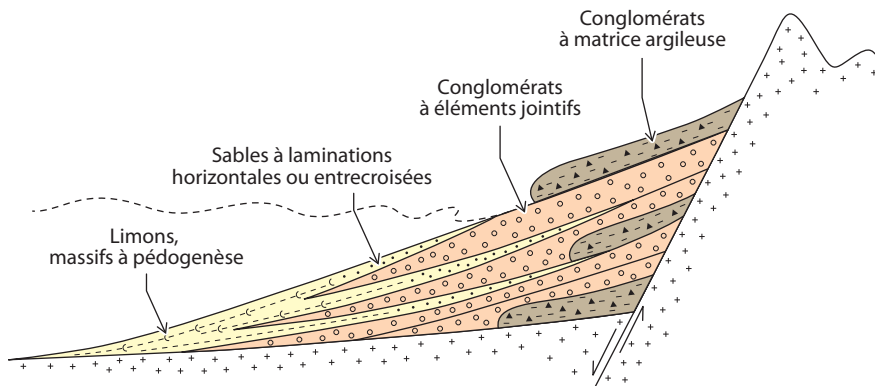


Figure 29.9 Coupe schématique d'un cône alluvial.

On observe une alternance de dépôts grossiers correspondant à des coulées de débris et des faciès plus fins à lamination déposés pendant les débordements de crues.

#### Encart 29.7 – Les coulées de boue

Les coulées de boue (chap. 26.4.2) à cause de leur densité élevée ont de fantastiques possibilités de transport (comme en témoignent les blocs de plusieurs tonnes apportés dans le parc de l'établissement thermal de Saint-Gervais, en 1892, par le torrent boueux issu d'une poche d'eau du glacier de Tête-Rousse) et de destruction (camping du Grand-Bornand (Savoie) enseveli en 1987 sous une coulée boueuse de la Borne). Les régions tropicales sont particulièrement touchées par les coulées boueuses dues aux pluies diluviennes (cyclones). Les Philippines ont connu des catastrophes en 1991

(7 000 morts en raison des coulées boueuses et des inondations) et en 2004 (plus de 1 000 morts en raison du passage de 3 cyclones en moins de 15 jours). Ici l'instabilité naturelle des terrains est très largement augmentée par une déforestation irraisonnée, principalement menée dans les années 1960-1970 mais qui continue de nos jours. Ce problème concerne aussi d'autres régions (Indonésie, Haïti) ainsi, il y a eu aussi plusieurs milliers de morts et 2,8 millions de sinistrés en Amérique centrale, après le passage de l'ouragan Mitch, en novembre 1998.

La pente des cônes est assez régulière (3 à 6°), les pentes les plus fortes s'observent en climat sec, il semble même que les très fortes précipitations empêchent le développement des cônes. La taille des édifices varie de quelques centaines de mètres à quelques centaines de kilomètres. Les sédiments sont mal triés, immatures et la forte granulométrie diminue rapidement en s'éloignant de l'apex ; leur composition est uniquement fonction de la source locale. Les dépôts en couches plus ou moins

parallèles, s'accablent pendant les crues (partie aval du cône) ou résultent de coulées de débris ou de boue (partie amont).

### 29.2.2 Les dépôts de chenaux, de berges (levées) et de plaine alluviale

Ils correspondent aux dépôts des lits de cours d'eau. En fonction de la sinuosité, on distingue les chenaux rectilignes, en méandres, en tresses et anastomosés. La figure 29.10A présente la position des bancs sableux dans les différents types. Les **chenaux rectilignes** sont rares, les bancs sont régulièrement répartis selon une longueur d'onde ( $l$ ) qui représente 2 à 4 fois la largeur du chenal ( $l$ ) et tendent à migrer vers l'aval. Quand le courant est dévié le tracé devient sinueux puis évolue vers le type suivant. Dans les **chenaux à méandres**, les bancs mobiles du chenal sinueux se transforment en barre de méandres (**point bar**) fixes qui présentent une accrétion latérale en fonction du déplacement des méandres ( $l/l$  est alors compris entre 7 et 10). Les **chenaux en tresses** sont caractérisés par un chenal principal à l'intérieur duquel des chenaux accessoires décrivent un motif complexe autour de petits îlots. Lorsque les chenaux se divisent et se réunissent dans la plaine alluviale, on parle de rivière anastomosée.

Voir fig. 26.10

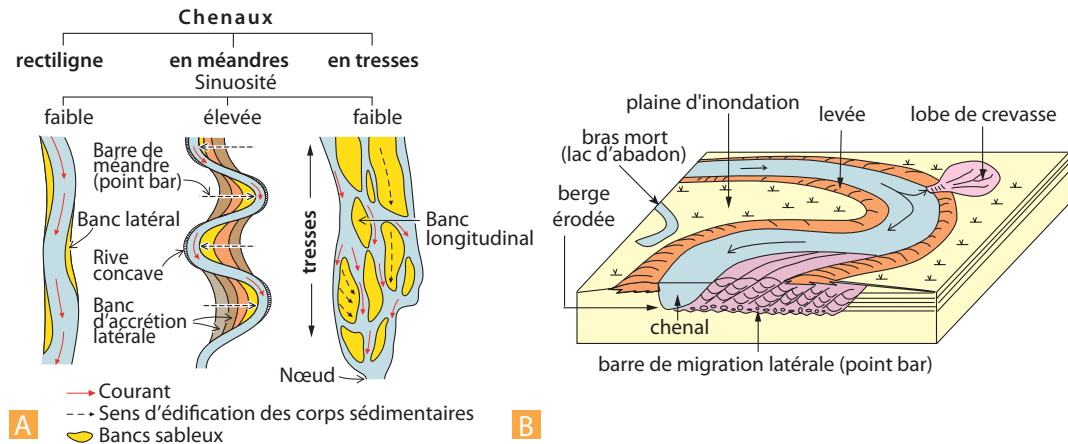


Figure 29.10 La sédimentation fluviale.

**A.** Les principaux types de chenaux et les bancs sableux associés. À décharge constante, les rivières en tresses se développent sur des pentes plus raides que celles des rivières en méandres. À pente constante, une augmentation de la charge ou de la largeur produit la même évolution (voir chap. 26).

**B.** Représentation schématique des différents types de dépôts des milieux fluviaux (exemple d'un cours à méandre).

Les dépôts peuvent être classés en trois catégories (fig. 29.10B) :

- les dépôts des chenaux constitués de dépôts discontinus, grossiers puis sableux qui comblent le chenal ;
- les dépôts de berge correspondant aux **levées** qui bordent le chenal et aux dépôts de crevasses lors des ruptures des levées. Les levées s'édifient par accumulation de sédiments lors des crues de débordement. La granulométrie et l'épaisseur sédimentaire diminuent très rapidement en s'éloignant du chenal ainsi les **levées croissent plus vite que le reste de la plaine d'inondation et permettent au chenal de s'élever au-dessus du lit initial** ;
- les dépôts de plaine d'inondation constitués de sédiments fins (limons, argiles laminées) déposés lors des crues exceptionnelles quand le cours d'eau déborde ses levées. Les taux de sédimentation sont très faibles (1 à 2 cm par crue). La végétation peut s'implanter sur ces dépôts qui sont souvent perturbés par la pédogenèse. Des sols hydromorphes se développent en périodes de crue tandis

qu'en en période d'étiage, l'abaissement et le battement de la nappe phréatique conduit à sols à nodules calcaires, à la marmorisation (oxydation du fer) et aux fentes de dessiccation.

La figure 29.11 présente deux séquences fluviatiles idéales pour un chenal à méandres et pour un chenal en tresses.

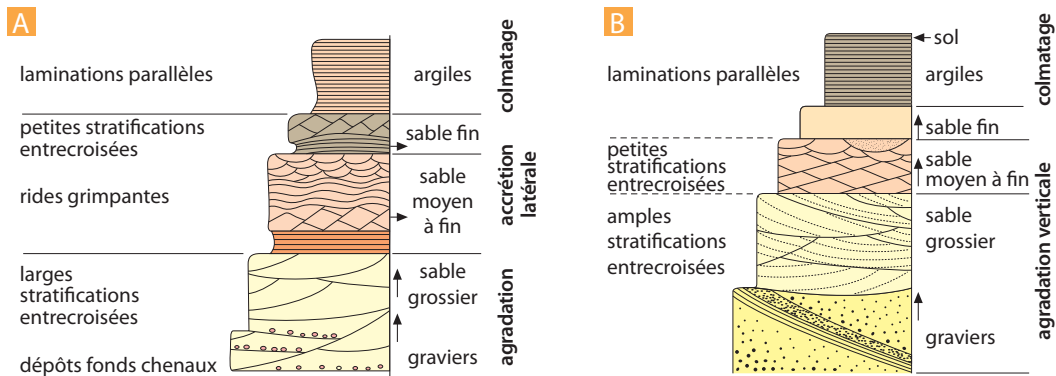


Figure 29.11 Les séquences fluviatiles.

**A.** Séquence idéale de comblement d'un chenal en méandres avec une partie inférieure correspondant aux dépôts du chenal d'étiage et une partie supérieure à la migration latérale des barres de méandres lors des crues.

**B.** Séquence idéale de comblement d'un chenal en tresse (cas d'un comblement par aggradation verticale lors de crues successives).

Le Crétacé supérieur et Paléocène inférieur du Bassin d'Aix-en-Provence ou des Corbières au sud de Lézignan (Aude) donnent de beaux exemples de ses environnements avec des dépôts de chenaux, de plaines alluviales pédogénisées (sols calcaires à pontes de Dinosaures), de marais lacustres à sols hydromorphes et de calcaires lacustres (*fig. 29.12*).

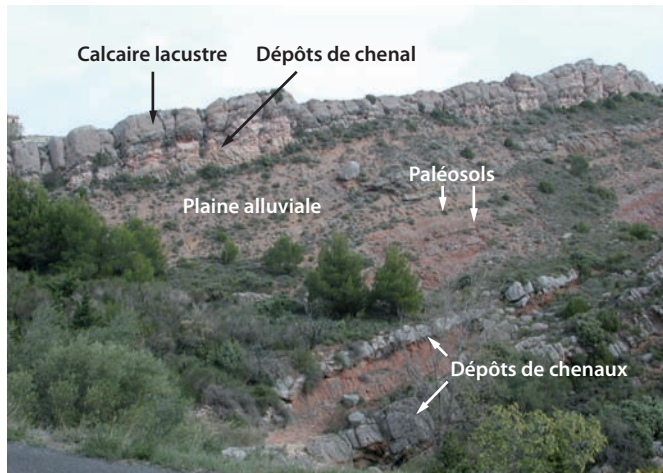


Figure 29.12 La série continentale d'Albas (Corbières).

Affleurement du Danien inférieur présentant les sédiments pétilieux rouges de la plaine alluviale en environnement palustre d'un bord de lac, entrecoupés de niveaux indurés de paléosols calcaires et de dépôts grossiers (voir *fig. 28.22 C*) de chenaux. La barre supérieure correspond à un calcaire lacustre traduisant la transgression du lac. (Photo : M. Renard).

### 29.2.3 Le concept de niveau de base

Voir chap. 14.7.1  
et 26

La notion de **niveau de base** est à l'origine un concept géomorphologique : c'est le niveau en dessous duquel un cours d'eau ne peut plus creuser. Si pour un fleuve en domaine littoral, on peut assez facilement l'assimiler au niveau marin, cela devient plus complexe à l'intérieur des terres et le niveau de base peut être aussi bien le niveau d'un confluent, d'un lac ou d'une dépression endoréique pour une rivière.

Voir chap. 35.8

En **stratigraphie séquentielle**, on le définit comme une surface en dessous de laquelle il y a sédimentation et au-dessus de laquelle il y a érosion (fig. 29.13), ce qui permet de l'assimiler, un peu abusivement, systématiquement au niveau marin. Grâce à cette liaison du niveau de base au niveau marin relatif, les séquences et cortèges sédimentaires définis en milieu marin peuvent être corrélés à ceux définis en milieu continental.

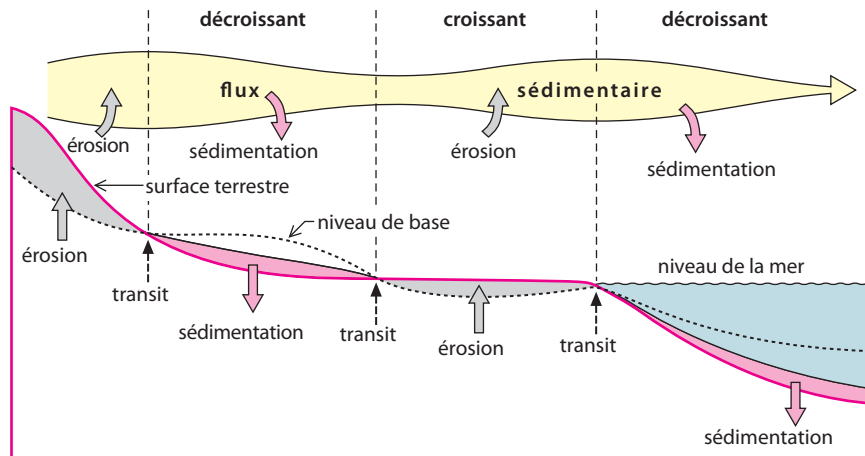


Figure 29.13 Le concept de niveau de base et ses relations au flux sédimentaire fluvial.

## 29.3 LE DOMAINE FLUVIO-MARIN : ESTUAIRES ET DELTAS

À leur arrivée dans un lac ou dans la mer, c'est-à-dire lorsqu'ils atteignent leur niveau de base les cours d'eau présentent deux types d'embouchures :

**Les estuaires** dans les mers à courants côtiers et à courants de marée importants (*aestus* = marée). Beaucoup d'estuaires résultent de l'envahissement par la mer de la basse vallée fluviale lors de la remontée eustatique holocène, **rias** méditerranéennes ou **abers** bretons par exemple, véritables bras de mer à marée haute, immenses vasières à marée basse.

**Les deltas** dans les lacs et les mers à marées de faible amplitude, ou encore lorsque la charge du cours d'eau est très importante.

La distinction n'a rien d'absolu, il existe des intermédiaires, et l'on observe parfois une évolution d'un type vers l'autre en fonction des variations du niveau marin et de l'importance de la charge. C'est ainsi que la Gironde (estuaire de la Garonne et de la Dordogne) a tendance à se transformer en delta.

### 29.3.1 Les estuaires

Les fleuves apportent à la mer des quantités importantes de sables, de boues, voire de galets lorsque leur régime est torrentiel (Var). À leur embouchure, par suite de la diminution de la vitesse du courant,

à cause de l'onde de marée (barre, mascaret) et de la différence de densité entre les eaux douces et marines, les sables et silts en suspension se déposent. La différence de charge ionique entre eau douce et eau de mer provoque la floculation des particules les plus fines en suspension colloïdale (argiles). Cette sédimentation encombre l'estuaire des grands fleuves (**bouchon vaseux**), dans lequel on entretient un chenal navigable à grands frais.

### Encart 29.8 – La vase

Elle se présente comme un sédiment visqueux et homogène de couleur variée, en générale noire, grise ou bleue à cause du fer et de la matière organique ; une de ses propriétés est la **thixotropie**, possibilité de se liquéfier brutalement sous l'effet d'une agitation mécanique. La plupart des « **sables mouvants** » sont, de fait, des vases thixotropiques. La vase comporte une **phase minérale inerte**, constituée surtout par des pélites et du sable fins quartzeux ou calcaire (de 20 à 50 %, on a une vase sableuse), venus du fleuve et de la mer et

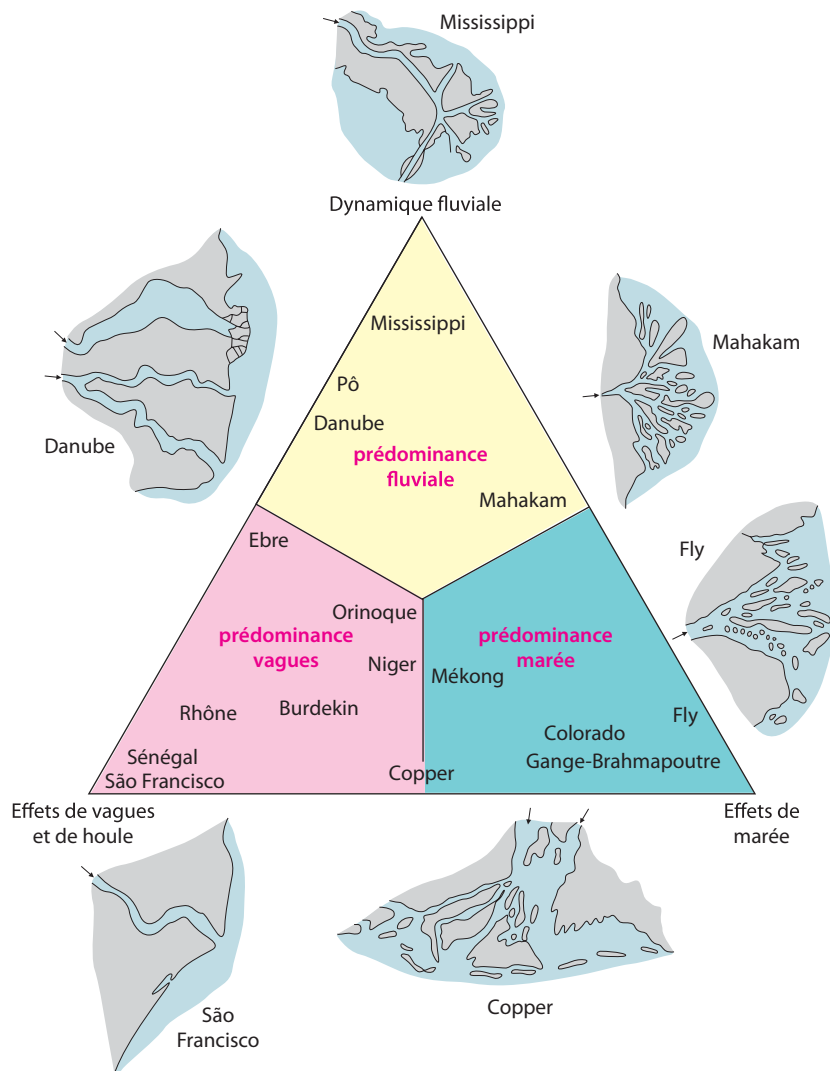
une **phase active colloïdale** qui sert de liant à la précédente. Cette phase est composée de matières organiques (5 à 10 %) continentale (pollens, humus), marine ou estuarienne (Diatomées, Algues) et de fer (3 % à 6 % suivant le type de climat et d'altération) sous forme d'hydroxydes et de sulfures (pyrite). Enfin, le milieu interstitiel liquide joue un très grand rôle, en particulier par les bactéries qui interviennent activement dans la sédimentation du fer, si bien qu'on a pu parler d'une physiologie de la vase.

De part et d'autre d'un chenal médian toujours en eau même à marée basse, la vase se sédimente sur les berges en pente douce qui prennent un profil convexe vers le ciel et forment une **slikke**. La slikke est séparée par une micro-falaise d'une étendue de vase consolidée et colonisée par des plantes halophiles (salicornes, spartines) puis par des graminées. C'est le **schorre** (encore appelé herbu ou pré-salé) qui n'est recouvert qu'aux marées exceptionnelles. L'ensemble des chenaux, slikkes et schorres constituent les **waddens** (terme néerlandais). Le colmatage des estuaires à débit modeste doit plus à la sédimentation marine (50 tonnes par marée dans la baie de la Somme) qu'aux apports fluviaux.

### 29.3.2 Les deltas

Un delta est une terminaison d'un cours d'eau dans la mer ou dans un lac, qui se divise en plusieurs bras dans une zone où la sédimentation est importante. D'après Galloway, les différents deltas peuvent être regroupés en trois types suivant (fig. 29.14) :

- **la prédominance de la marée** qui induit des embouchures évasées du type estuarien avec d'importants **replats de marée (tidal flats)** et **barres sableuses** rectilignes dans l'embouchure (*tidal bars*) ;
- **la prédominance des effets de houle** qui engendre une dérive littorale de part et d'autre de l'embouchure. Il s'édifie alors des **cordons littoraux** parallèles à la côte qui emprisonnent des étangs et des lagunes ;
- **la prédominance de la dynamique fluviale** qui engendre un **delta digité** (type patte d'oiseau ou *bird foot*) avec développement de **chenaux** en éventail bordés de **levées** ; la sédimentation et la subsidence y sont considérables (11 000 m pour le Mississippi au cours du Quaternaire).



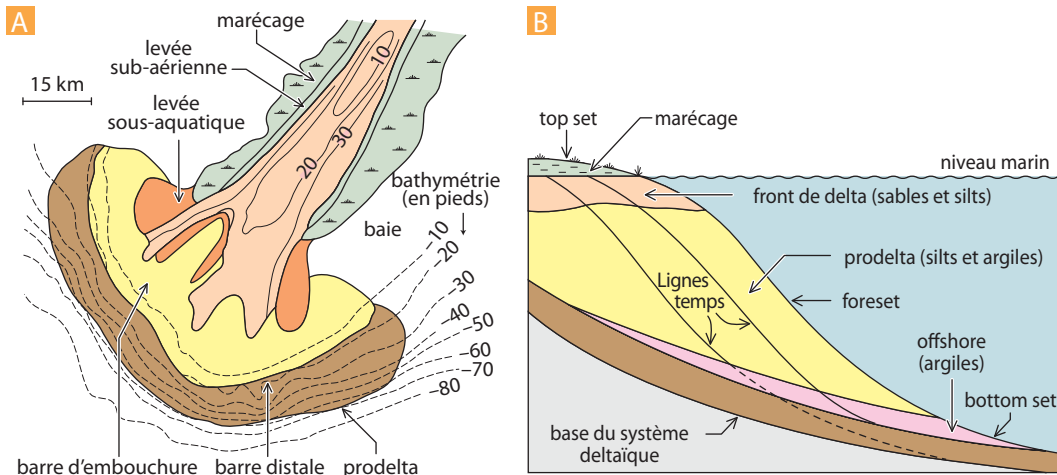
**Figure 29.14** Les différents types de deltas en fonction du processus sédimentaire dominant : les principaux fleuves sont positionnés sur le graphique.

Morphologiquement, un delta comprend de l'amont (partie proximale) à l'aval (partie distale) (fig. 29.15A) :

- **une plaine deltaïque subaérienne** qui s'arrête à la ligne de côte où elle se prolonge par l'estran ;
- **un delta front (ou front de delta)**, zone bordière peu profonde qui peut aller jusqu'à 50 km en mer ;
- **un talus deltaïque ou prodelta**, affecté d'une pente de 1 à 10°, qui se raccorde au plateau continental.

En coupe, le delta est constitué (fig. 29.15B) de :

- topsets à dépôts de marécages argileux et de tourbières dans leur partie sub-aérienne et de silts et d'argiles du front de delta associés à des dépôts de chenaux et de levées dans leur partie sous-aquatique ;
- foresets constitués des sables et argiles du prodelta et de sables grossiers au débouché des chenaux tributaires ;
- bottomsets correspondant à la décantation des argiles.



**Figure 29.15** L'environnement du front de delta.

**A.** Carte des différentes aires de sédimentation d'un environnement de front de delta. (schéma d'après l'exemple du delta actuel du Mississippi).

**B.** Coupe dans le delta montrant la progradation des différents environnements vers la mer (on notera que les lignes temps recourent les différents faciès).

### Encart 29.9 – Deltas et pétrole

Les dépôts deltaïques présentent un fort potentiel en hydrocarbures (Niger, Gulf Coast) qui a pour origine :

- les alternances très épaisses de sables et argiles, disposition favorable à la formation de réservoirs ;
- les apports importants de sels nutritifs par les fleuves qui engendrent une très forte productivité biologique (elle peut atteindre 2,5 kg de

carbone par m<sup>3</sup> et par an, soit 2 fois plus que dans les forêts tropicales, 10 fois plus que dans les prairies humides et 50 fois plus qu'en mer sur le plateau continental) ;

- le taux de sédimentation élevé qui permet le piégeage et la préservation la matière organique en milieu anaérobie, et favorise son évolution en kérogène.

 Voir chap. 33

Les grands deltas, très stables, comblent des golfes entiers et atteignent des épaisseurs considérables : le delta du Pô avance de 70 m par an ; celui du Mississippi comprend 11 000 m de sédiments quaternaires et augmente son volume de 2 millions de tonnes annuelles et celui du Gange se projette de plus de 1 000 km dans l'océan Indien. Ces accumulations entraînent une subsidence et un tassement de la masse sédimentaire.

### À retenir

- Les environnements continentaux sont extrêmement variés. Au niveau des lacs, la sédimentation est influencée par la nature géologique du bassin-versant, le régime hydrologique (ruissellement vs apports fluviaux ; lacs fermés vs. lacs à exutoire) et le climat (bilan évaporation/précipitation). La sédimentation détritico lacustre conduit à des dépôts saisonniers : les varves.
- Lorsque les fleuves tributaires et les exutoires sont réduits ou absents (lacs endoréiques) et que le climat favorise l'évaporation, on observe une précipitation chimique lacustre constituant les dépôts évaporitiques ou salins des chotts, sebkhas et des lacs salés.

## Partie VII ■ Sédimentologie : roches et environnements sédimentaires

- En fonction de la composition des eaux, on distingue trois lignées chimiques (carbonatée, sulfato-chlorurée ou sodique) qui peuvent toutes par évaporation aboutir à la précipitation de minéraux ubiquistes (marins et continentaux : gypse, anhydrite, halite, sylvite et carnallite) ou typique du domaine continental (epsomite et astrakhanite).
- Toute la charge sédimentaire fluviale n'atteint pas l'océan, une partie, la plus grossière, s'accumule au pied des grands reliefs sous formes de cônes alluviaux tandis que la plus fine constitue des complexes chenaux-levés au niveau des plaines d'inondation. En fonction de la sinuosité, on distingue les chenaux rectilignes, en méandres, en tresses et anastomosés.
- Le domaine fluvio-marin comprend les estuaires (régions à courants de marées importants) et les deltas (régions à courants de marées faibles et à apports fluviaux importants). Il existe trois grands types de morphologie pour les deltas qui dépendent du régime hydrodynamique dominant (marée, houle, dynamique fluviale).