

ST-E-2 LA SÉDIMENTATION DES PARTICULES ET DES SOLUTÉS & ST-E-3 LA DIAGENÈSE

ST-E LE PHÉNOMÈNE SÉDIMENTAIRE



Savoirs visés

Dans un bassin sédimentaire, la répartition des sédiments dépend de l'espace potentiellement disponible (accommodation) entre le niveau de la mer et le fond du bassin. La variation du niveau marin absolu (eustatisme) ou du niveau de base (substitut du niveau marin en domaine continental) gère les variations d'espace disponible pour la sédimentation, en lien avec les effets de la subsidence et du flux sédimentaire.

Les dépôts de particules en suspension sédiments (détritiques) sont liés aux conditions hydrodynamiques des milieux et se produisent dans des environnements variés. Les sédiments présentent des structures et des figures sédimentaires diverses, à différentes échelles, traduisant les régimes hydrodynamiques. La sédimentation des solutés est précédée d'une bio-précipitation ou d'une précipitation chimique.

La sédimentation carbonatée résulte pour l'essentiel de l'activité d'êtres vivants : organismes produisant des tests et des coquilles ou bactéries provoquant des précipitations. Elle se produit surtout en domaine marin de plateforme et caractérise aussi les environnements récifaux. La sédimentation carbonatée pélagique est le fait de micro-organismes planctoniques (foraminifères planctoniques, Coccolithophoridés).

Les dépôts ne s'observent pas au-delà d'une certaine profondeur, qui définit la profondeur de compensation des carbonates (PCC) variable d'une zone océanique à une autre et fluctuante à l'échelle des temps géologiques.

La silice dissoute dans l'eau de mer peut être utilisée par des micro-organismes planctoniques (Radiolaires, Diatomées), ce qui alimente la sédimentation de boues siliceuses, non limitée par la profondeur et inégalement distribuée. La précipitation de solutés en domaine lagunaire ou littoral, peut engendrer des évaporites (gypse-anhydrite, halite, sylvite) par concentration des solutions.

Au cours de l'enfouissement, les sédiments sont transformés en roches sédimentaires (diagenèse). Ces transformations sont marquées par des mécanismes physiques de compaction et par des mécanismes chimiques de précipitation.

Capacités exigibles

- Exploiter des données montrant le lien entre le contexte géodynamique et le type de bassin.
- Exploiter des données issues de documents complémentaires (cartes, données géophysiques et sédimentologiques) permettant de comprendre l'origine et l'histoire géodynamique (subsidence) d'un bassin sédimentaire intra cratonique (le Bassin parisien).
- Exploiter une carte montrant des formations superficielles (moraines, formations fluviatiles, ...).
- Analyser des structures toutes figures sédimentaires à partir de données expérimentales (diagramme d'Allen) et d'observations actuelles pour en identifier l'origine et la dynamique de mise en place.
- À partir de données cartographiques, relier la distribution de dépôts détritiques, au niveau d'un delta et d'un estuaire, et la dynamique de l'hydrosphère.
- Identifier macroscopiquement et de manière raisonnée diverses roches : conglomérats, grès, argilites, marnes.
- Identifier macroscopiquement et de manière raisonnée diverses roches : calcaires, marnes, bauxites.
- Analyser les caractères d'une roche carbonatée pour en déduire l'origine et les conditions de formation, en utilisant la classification de Dunham.
- Relier le profil transect (proximal-distal) d'une plateforme carbonatée et la succession des faciès (lagon, récif, avant-récif, large) en liaison avec l'hydrodynamisme (cf. classification de Dunham).
- Identifier l'origine et les facteurs de contrôle de la sédimentation carbonatée et siliceuse à partir de l'étude de la sédimentation pélagique (en se limitant à la lysocline et à la PCC de la calcite).
- Identifier les principaux micro-organismes impliqués dans la production carbonatée pélagique (foraminifères planctoniques, Coccolithophoridés) et dans la production siliceuse pélagique (diatomées, radiolaires).
- Relier la localisation et les caractères d'une séquence évaporitique avec les conditions chimiques de précipitation de sels.
- Identifier macroscopiquement et de manière raisonnée diverses roches : halite, gypse-anhydrite.
- Exploiter des observations pétrologiques de roches et photographies de lames minces et des données relatives aux transformations diagénétiques (cimentation).

INTRODUCTION

- altération + érosion → particules + solutés
 - **particules = lignée détritique**
 - **solutés = lignée ionique**
- Transport → **bassins sédimentaires** → sédimentation (particules détritiques) ou précipitation (ions en solution)
- Quels sont les environnements qui permettent l'accumulation des sédiments et quels sont les facteurs qui la gouvernent ?
- Quels sont les processus qui guident la sédimentation et sont à l'origine de la diversité des dépôts ?



Canyon de Chelly (Arizona) (S. Dalaine)



Eau de retenue à Tignes (barrage; Val d'Isère) (S. Dalaine)



Haut Atlas marocain (S. Dalaine)

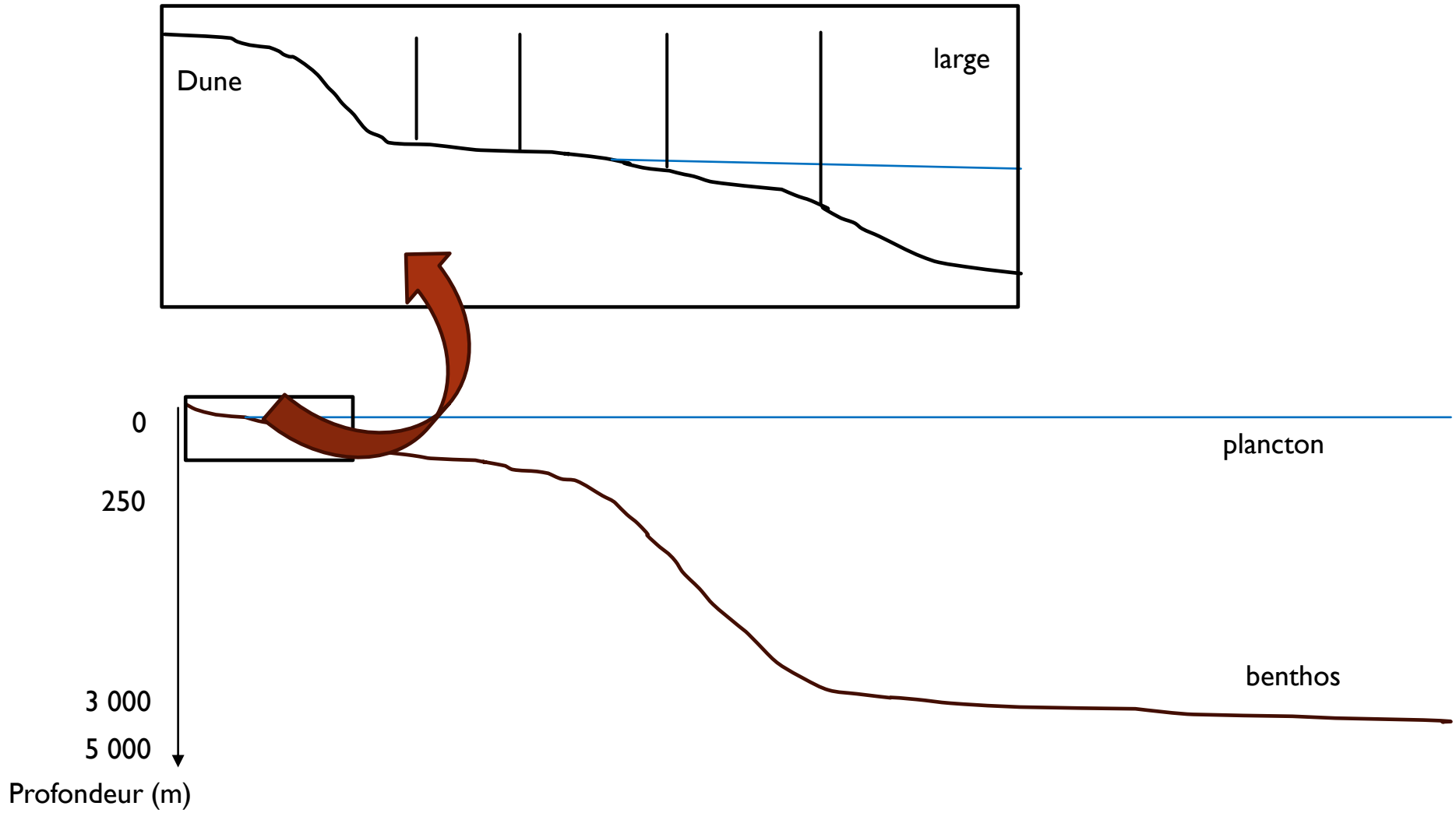
VOCABULAIRE

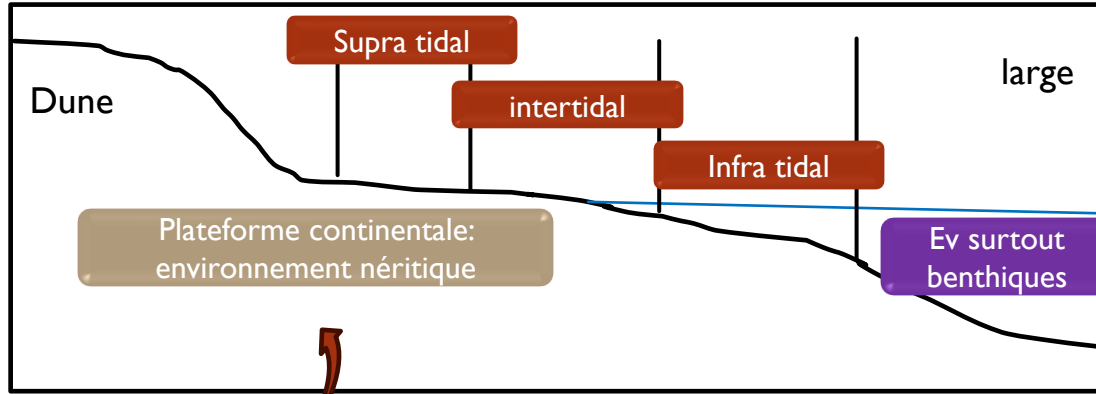
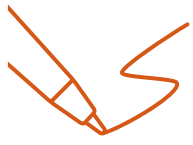
Pour caractériser le processus **hydrodynamique** des marées :

- **supra tidal** : au-dessus de la zone de balancement des marées = entre plage et arrière-plage
- **intertidal** : au niveau de la zone de balancement des marées
- **infra tidal** : en dessous de la zone de balancement des marées = avant côte puis large

Pour caractériser les êtres vivants :

- **benthique** : qualifie un être vivant (fixé ou non) qui vit sur les fonds aquatiques (appartient au benthos)
- **pélagique** : qualifie un être vivant qui nage ou flotte (appartient au plancton)

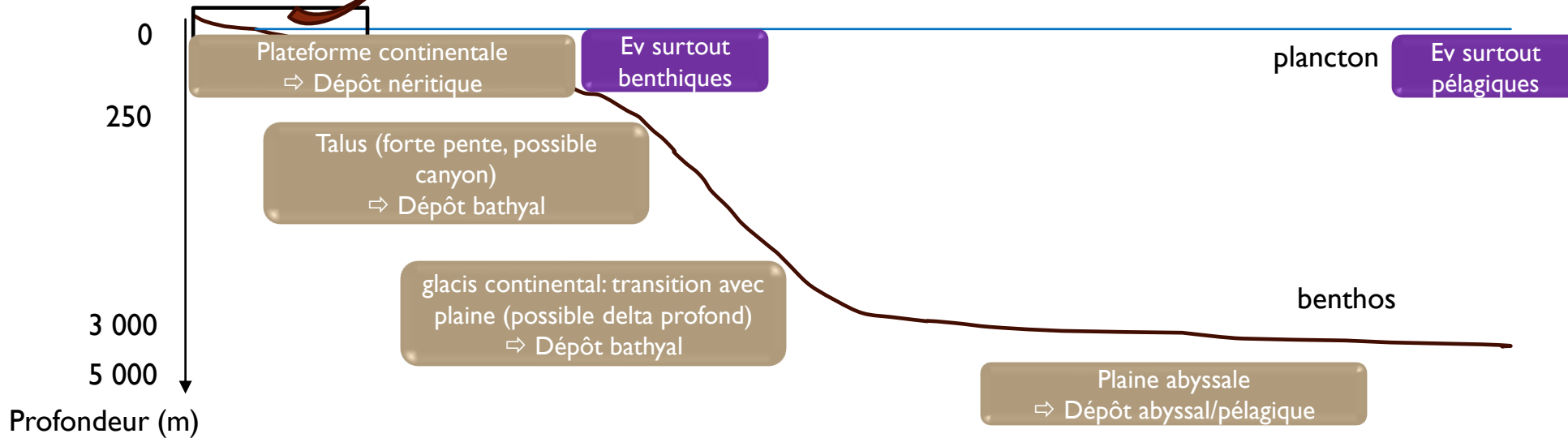


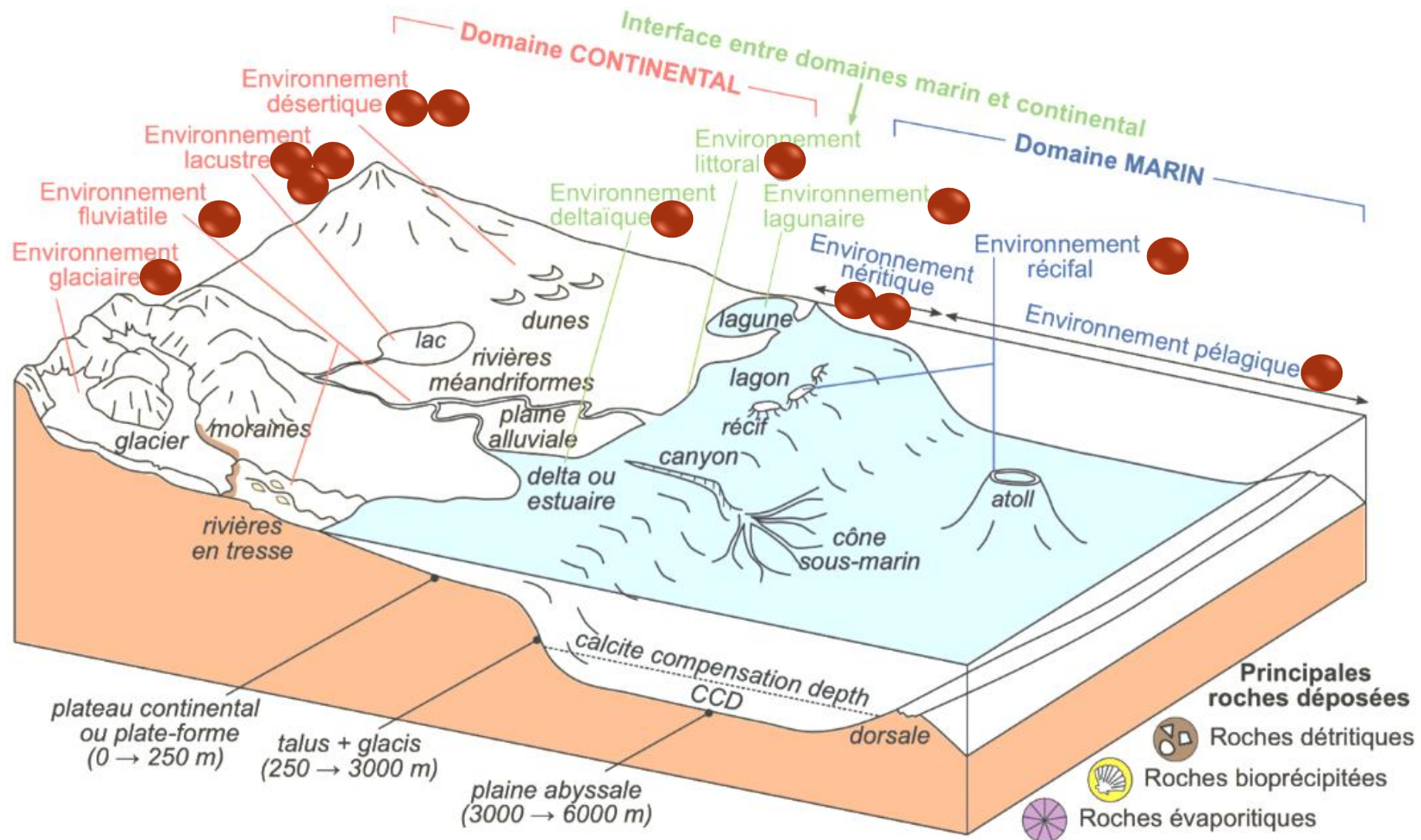


Hydrodynamique des marées

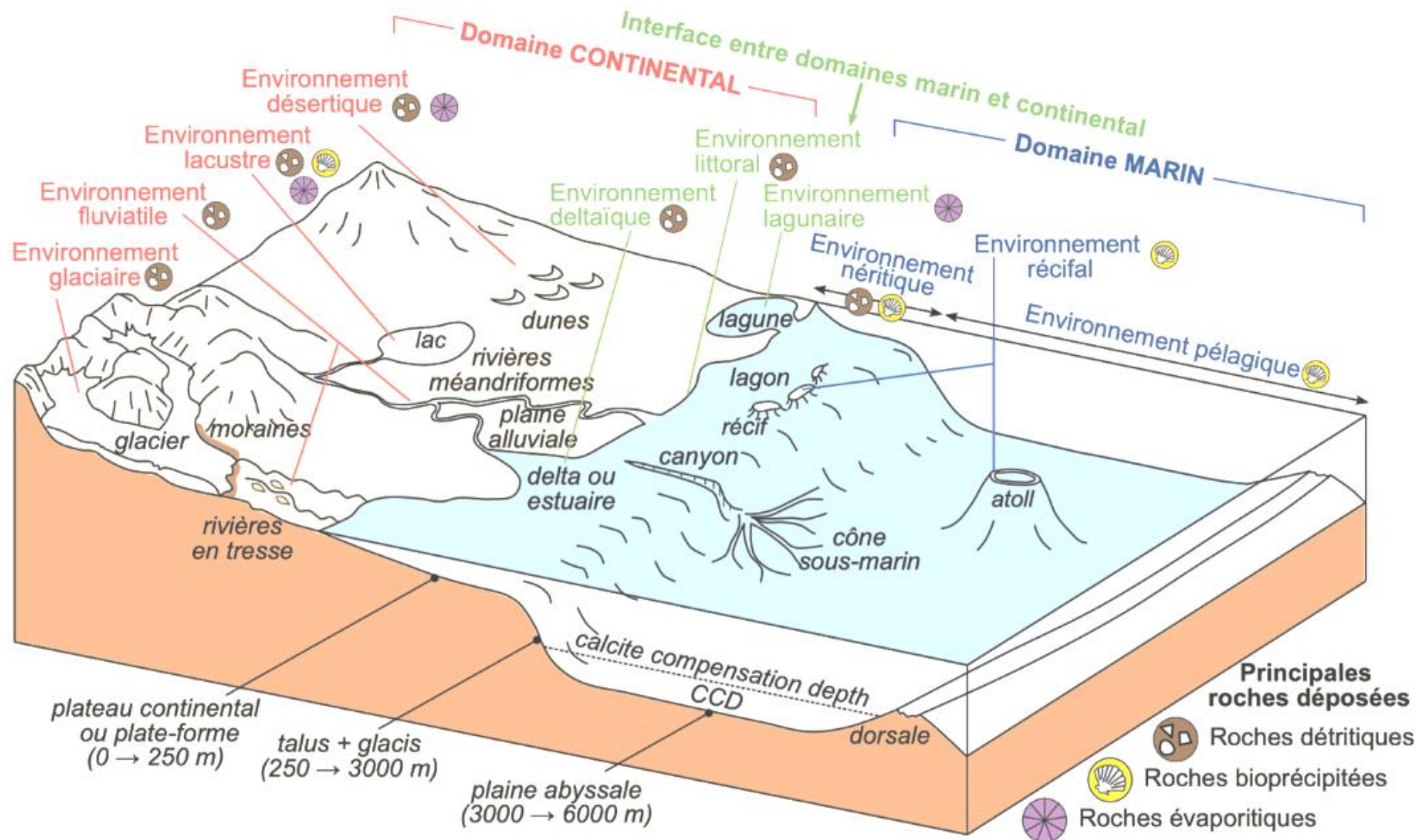
Province de marge passive
Environnement de dépôt

Qualificatif des êtres vivants





Diversité des environnements sédimentaires et caractéristiques des roches associées.



Diversité des environnements sédimentaires et caractéristiques des roches associées.

Environnement de dépôt		Principales roches formées	Figures sédimentaires ou organismes caractéristiques
Continental	Glaciaire	Détritiques mal triées (moraines)	
	Fluviale	Détritiques +/- granoclassées (limons aux conglomérats)	Rides, lamines, stratifications entrecroisées
	Lacustre	Détritiques (argiles à sables fins), évaporitiques, carbonatées fines, varves; bioprécipitées	Lits plans, rides de vagues, gastéropodes lacustres
	Désertique	Détritiques (silts à sables), évaporitiques	Mégarides
Interface continent/océan	Lagunaire	Évaporitiques	
	Littoral	Détritiques (sables à conglomérats)	Rides de courants (dominance marée) Rides de vagues (dominance houle)
	Deltaïque (embouchure de fleuve)	Détritiques (sables à conglomérats)	Litage oblique
Marin	Néritique	Carbonatées (bioprécipitées) Détritiques (argiles à sables)	Benthos (mollusques, échinodermes, algues, ...) bactéries (stromatolithes)
	Récifal	Carbonatées (bioprécipitées)	Organismes constructeurs (coraux, rudistes, ...)
	Pélagique	Carbonatées / siliceuses Détritiques (argiles majoritaires)	Plancton (zoo et phytoplancton) Necton



Je suis le necton: je nage et ne me laisse pas dériver

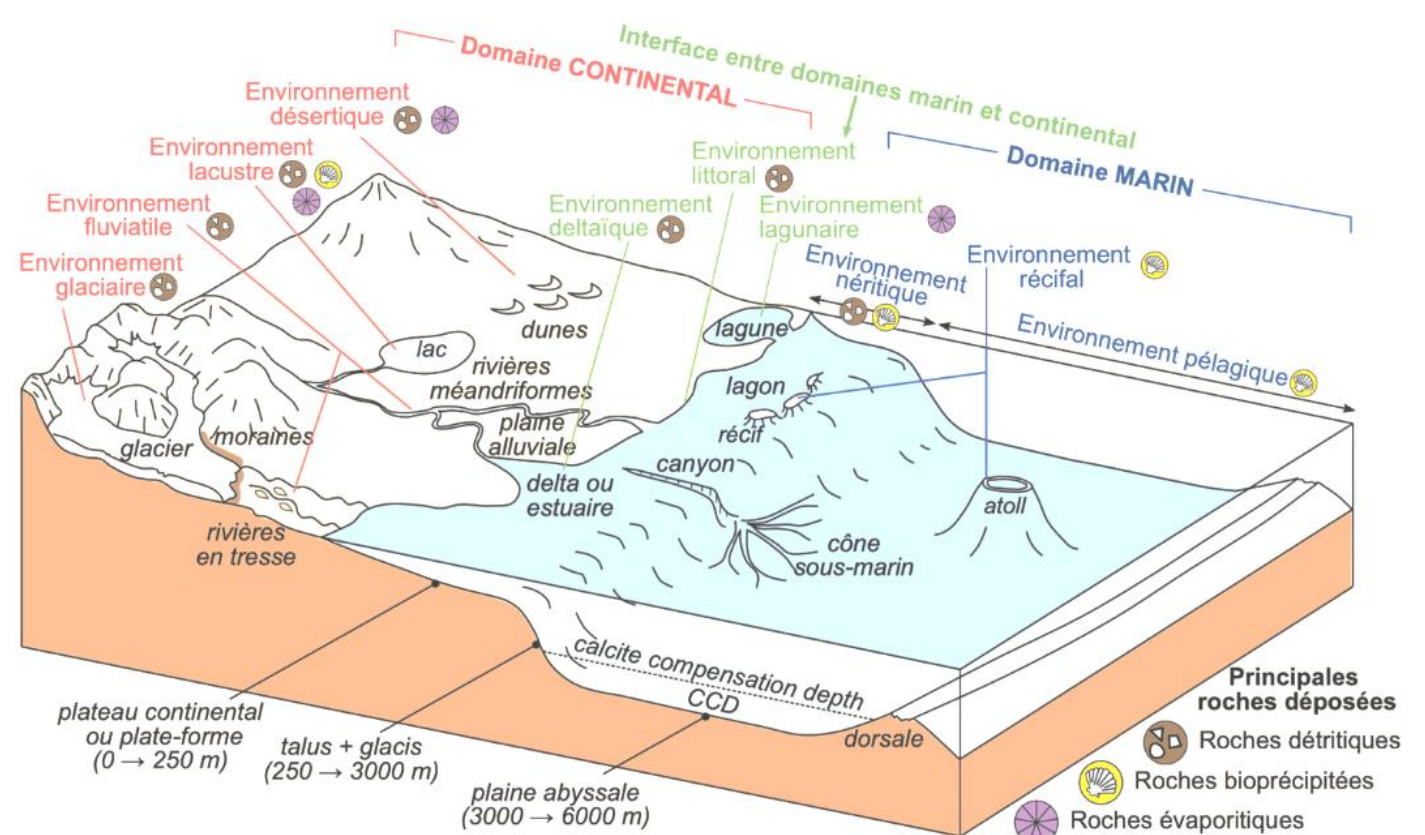
I. LA SEDIMENTATION DES SOLUTES ET PARTICULES S'OPERE DANS DES BASSINS SEDIMENTAIRES

A. LE CONTEXTE GEODYNAMIQUE CONDITIONNE LE TYPE DE BASSIN

- Environnement de dépôt = **arrêt du transport** des particules et des solutés

⇒ Sédimentation

- sur les **continents** (environnements glaciaires, fluviaux, lacustres, désertiques...)
- dans les **mers et océans** (environnements néritiques, récifaux, pélagiques...)
- à leur **interface** (environnements deltaïques ou estuariens, lagunaires, littoraux...).



Diversité des environnements sédimentaires et caractéristiques des roches associées.

I. LA SEDIMENTATION DES SOLUTES ET PARTICULES S'OPERE DANS DES BASSINS SEDIMENTAIRES

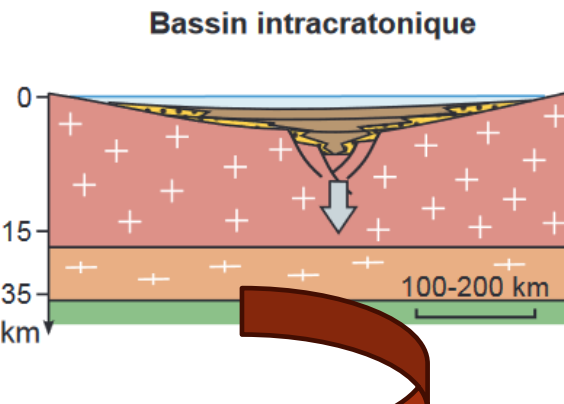
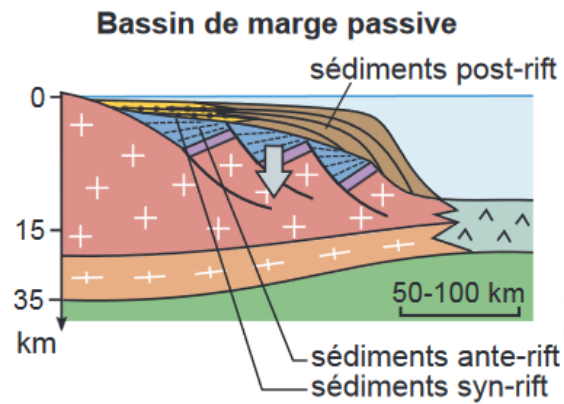
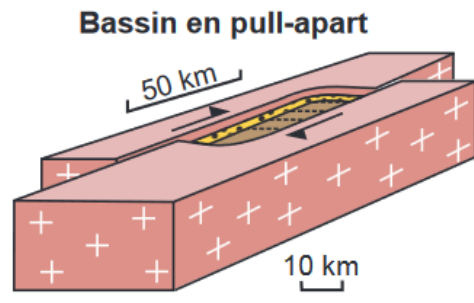
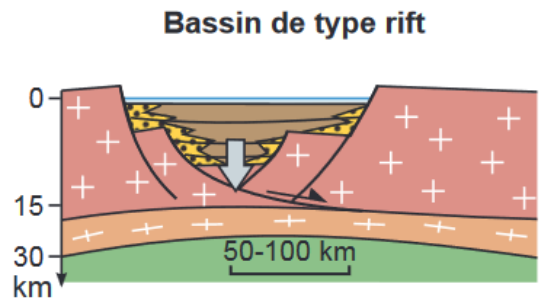
A. LE CONTEXTE GEODYNAMIQUE CONDITIONNE LE TYPE DE BASSIN



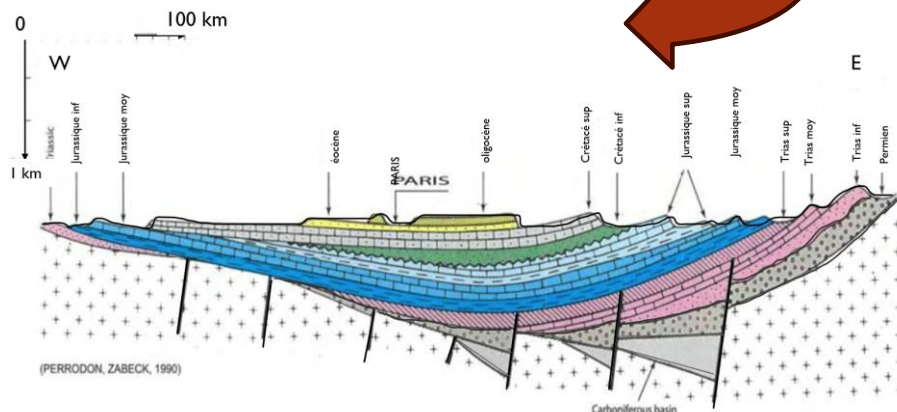
- **Bassins sédimentaires** = dépressions avec accumulation des sédiments terrigènes
- Divers contextes géodynamiques:
 - bassins intracontinentaux ou intraocéanique, ou encore entre continent et océan
 - différents régimes
 - ✓ **Divergence:**
Ex: bassin intracratonique (Bassin parisien);
Ex: rift d'effondrement (fossé rhéna)
 - ✓ **Convergence:**
Ex: fosse océanique avec prisme d'accrétion (Nankai Japon)
Ex: bassin d'avant pays (bassin molassique suisse)
 - ✓ **Coulissage**
Ex: bassin en pull-apart (bassin houiller, mer Morte)

Type	Contexte géodynamique	Nature de la lithosphère	Type de bassin	Exemples
À la frontière de plaques	convergence	océanique et continentale	subduction : fosses, prismes d'accrétion, bassins d'avant-arc et d'arrière-arc	fosse de Nankai (Japon)
		continentale	collision : bassins flexuraux (d'avant-pays)	bassin molassique suisse
	coulissage	continentale	bassins de décrochement : pull-apart	mer Morte
À la frontière de plaque ou intraplaque	divergence	continentale	rifts ou fossés d'effondrement	rift africain Fossé rhéna
Intraplaque	héritage de divergence (en général)	continentale	marges passives ; bassins intracratoniques ou plates-formes épicontinentales	marges atlantiques Bassin de Paris
	divergence	océanique	bassins océaniques	bassins de l'Atlantique

Différents types de bassins sédimentaires (dans Dunod, ed. 2021)



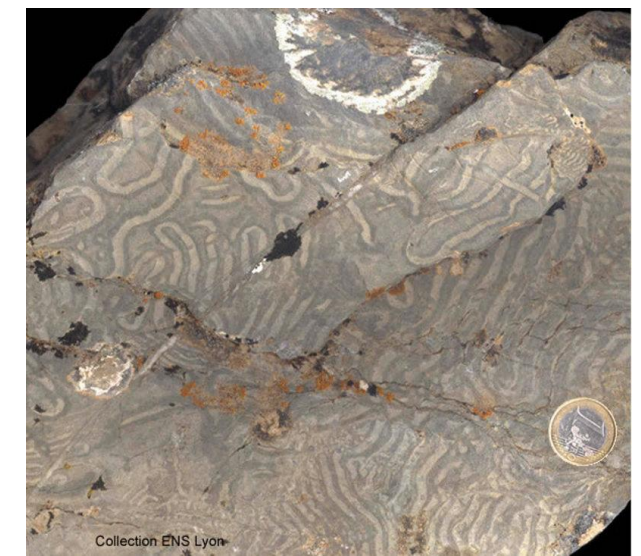
- sédiments détritiques grossiers
- sédiments détritiques fins, chimiques et biochimiques
- croûte supérieure cassante
- croûte inférieure ductile
- croûte océanique
- manteau lithosphérique
- jeu des failles
- subsidence



Le Bassin parisien : un **bassin intracratonique** (cf TP- B)



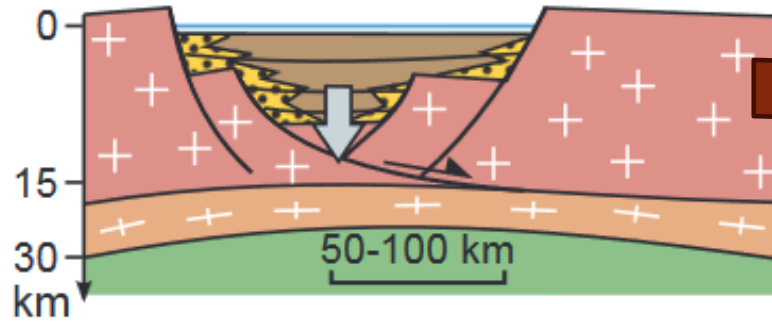
Crévoux (près d'Embrun) (S. Dalaine)



Échantillon d'un flysch crétacé à Helminthoïdes provenant de Crévoux, près d'Embrun (05). Source - © 2003 Collection ENS de Lyon

Dans les Alpes occidentales françaises (région d'Embrun et plus au sud), le flysch crétacé à helminthoïdes se caractérise par des pistes serpentiformes. On ne connaît pas l'animal responsable de ces pistes malgré leur très grande abondance.

Bassin de type rift



Bassin en pull-apart

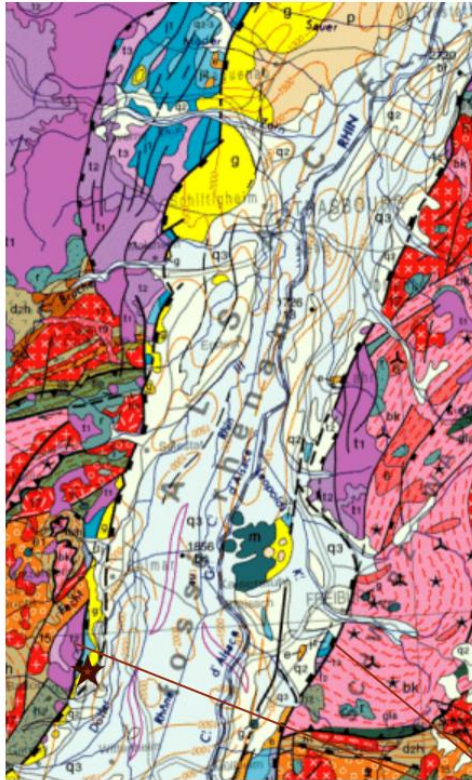
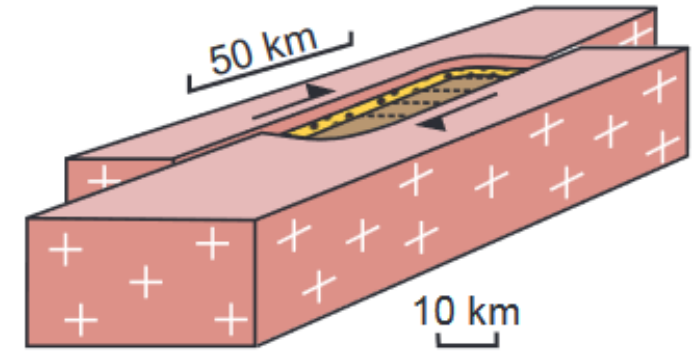


Figure 10 : le fossé rhénan (carte de France au 1/106, planet-terre.ens-lyon.fr/) Faille normale affectant les dépôts de la carrière du Strangenberg. La faille décale vers le bas le compartiment de gauche, par rapport au compartiment de droite selon un plan de faille assez pentu.

**Failles normales
conjuguées**

Fossé rhénan (cf ST-D slide 18)

QUESTION 01

Le bassin houiller (h3) de Saint-Étienne est le plus grand bassin houiller du Massif central. C'est un bassin

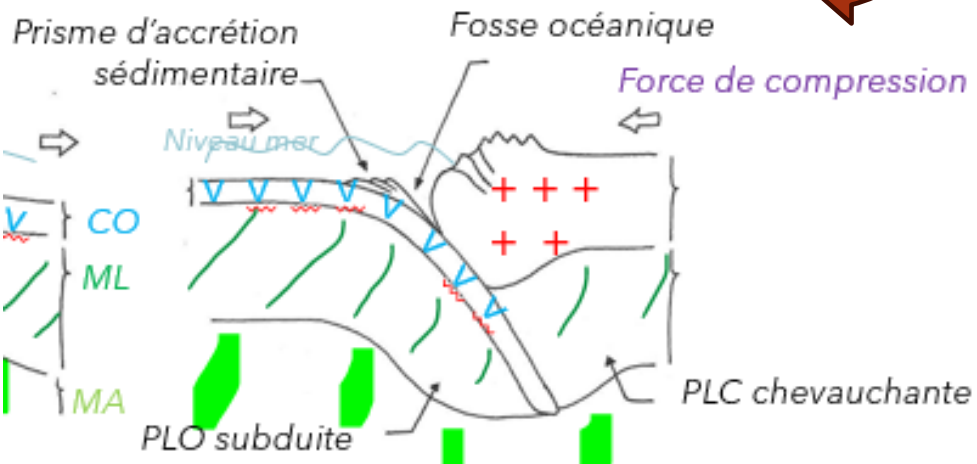
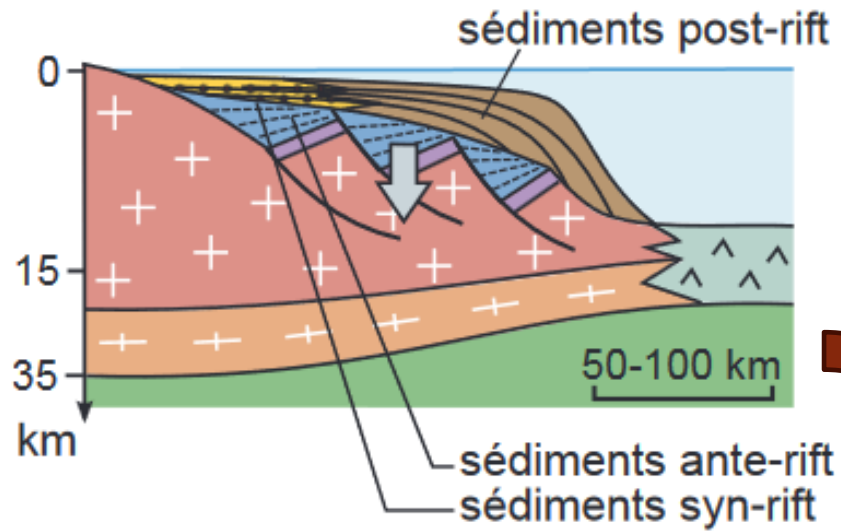
flexural d'avant chaîne	en pull-apart en relation avec un décrochement dextre	épicontinental associé à l'effondrement de la chaîne alpine
----------------------------	---	---

S. Dalaine
genially
Education

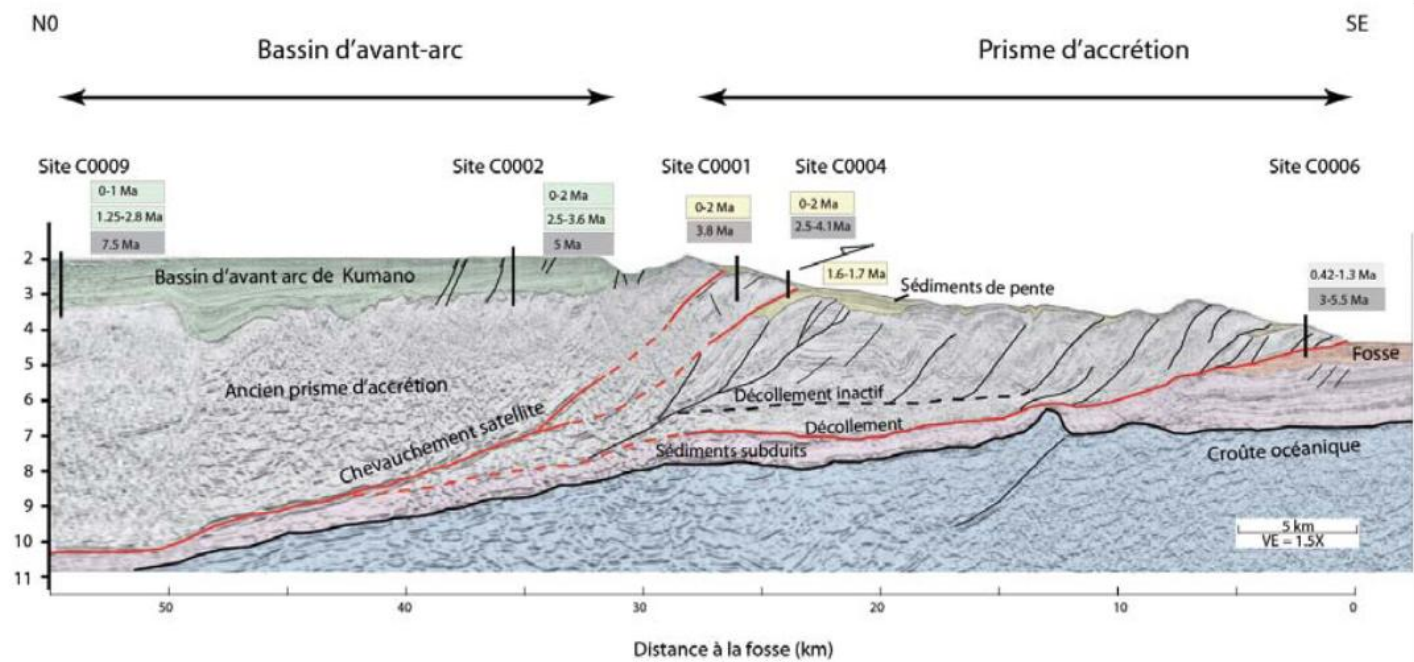
Bassin houiller en pull apart cf Genially rhéologie (S.Dalaine)

graben

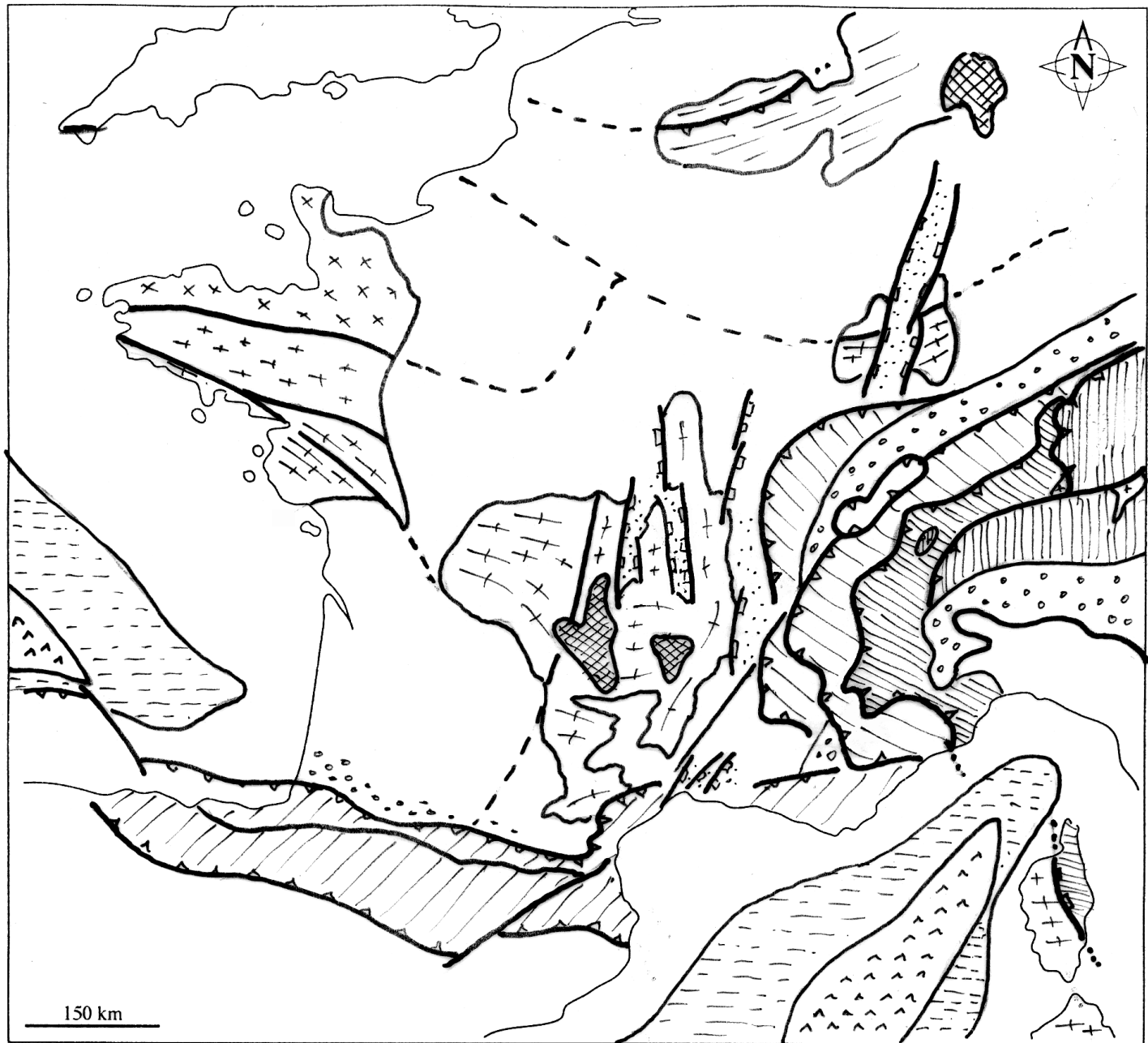
Bassin de marge passive
















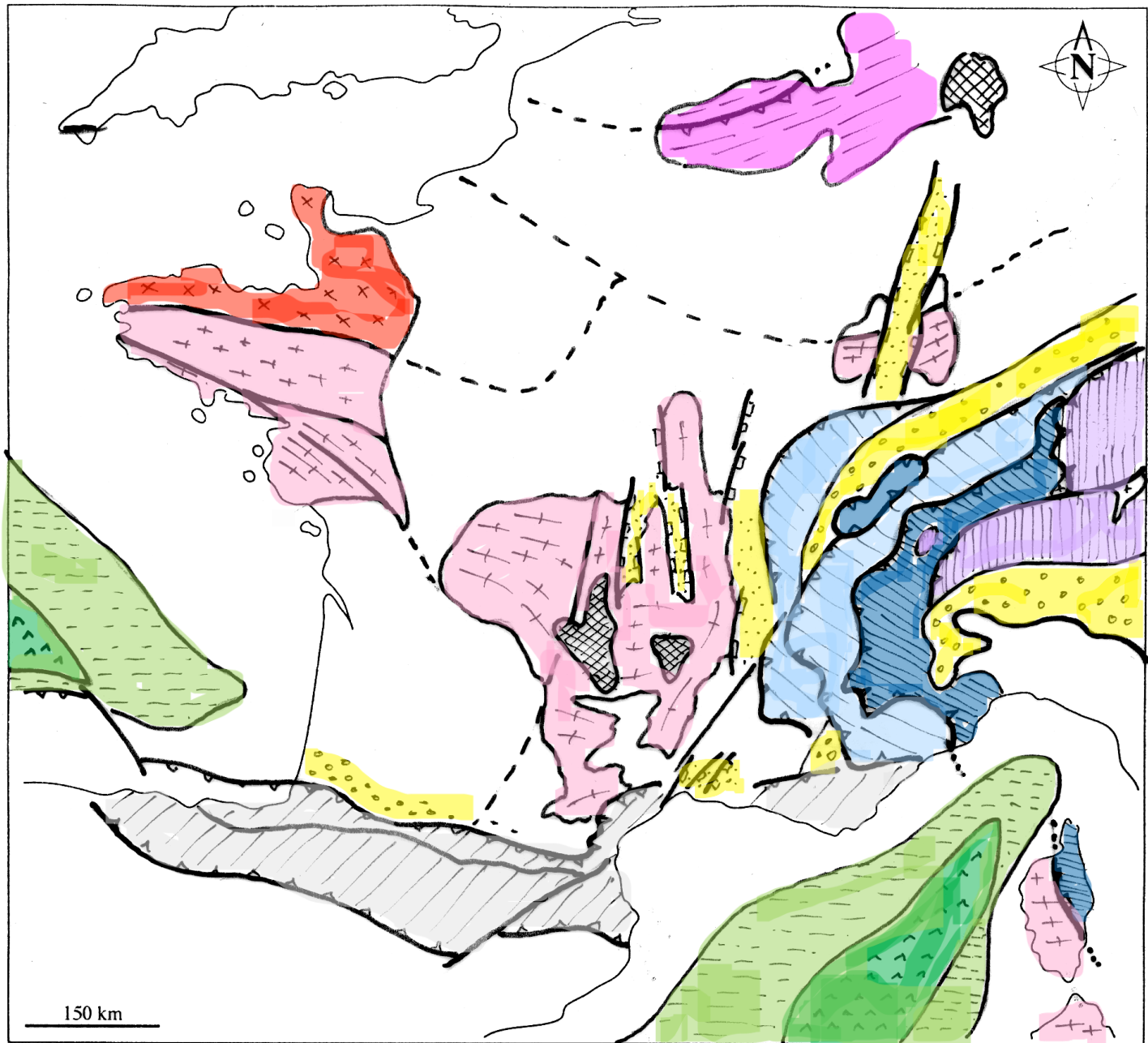
Le prisme d'accrétion sédimentaire : convergence entre une LO et une LC (cf ST-C slide 125)
















Profil sismique interprété du prisme d'accrétion de Nankai (d'après Moore et al., 2009)



- | | | | |
|---|------------------------|---|---|
|  | Volcanisme quaternaire |  | Chaîne pyrénéo-provençale |
|  | Fossés Oligocène |  | Zones externes } Chaîne sud hercynienne |
|  | Bassins d'avant-pays |  | Zones internes } Chaîne sud hercynienne |
|  | Zones externes } Alpes |  | Noyau armoricain |
|  | Zones internes } Alpes |  | Chaîne Nord Hercynienne |
|  | Unités alpines } Alpes |  | Croûte océanique |
| | |  | Transition océan-continent |



- Cf BCPST2**
-  Volcanisme quaternaire
 -  Fossés Oligocène
 -  Bassins d'avant-pays
 -  Zones externes
 -  Zones internes
 -  Unités alpines
 -  Chaîne pyrénéo-provençale
 -  Zones externes
 -  Zones internes
 -  Noyau armoricain
 -  Chaîne Nord Hercynienne
 -  Croûte océanique
 -  Transition océan-continent
- } Chaîne sud hercynienne
 } Alpes

B. DIFFERENTS PARAMETRES CONTROLENT LA SEDIMENTATION DANS LES BASSINS

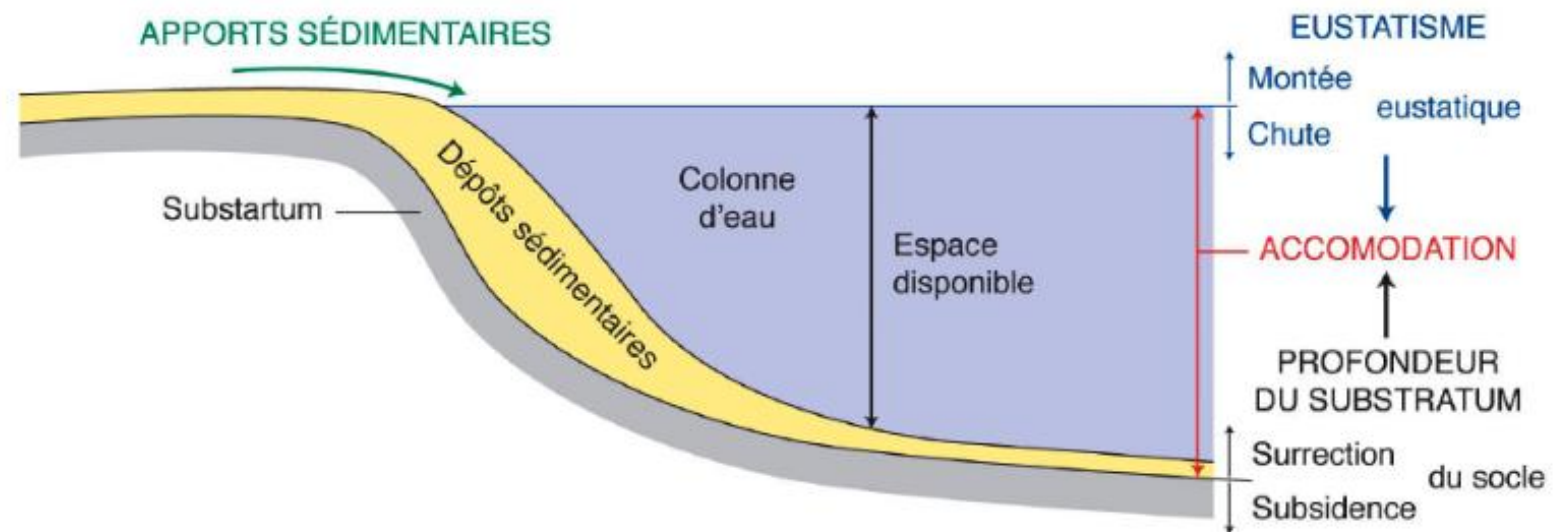


I. Notion d'espace disponible ou accommodation

- Remplissage du bassin contrôlé par deux facteurs principaux :

- Quantité d'apport sédimentaire
- Accommodation = place disponible pour les dépôts sédimentaires
 - ✓ **Eustatisme**: variation absolue du niveau marin
 - ✓ **Profondeur du substratum** du bassin

⇒ *Surrection vs subsidence*



Schématisation des paramètres contrôlant l'espace disponible dans un bassin sédimentaire. (dans Segarra et al., Ellipses, ed. 2021)

B. DIFFERENTS PARAMETRES CONTROLENT LA SEDIMENTATION DANS LES BASSINS

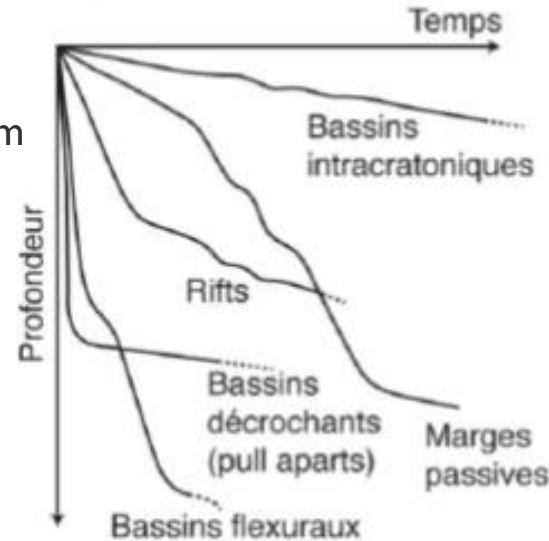
2. La subsidence, l'eustatisme et les apports sédimentaires contrôlent l'espace disponible

2.1. Subsidence

■ **Subsidence** = enfoncement du substratum

- **subsidence tectonique**
- poids des sédiments
- poids de la colonne d'eau

A. Courbes de subsidence totale théorique pour les différents types de bassins



B. Exemples et ordres de grandeurs des vitesses de subsidence et des temps de subsidence des différents types de bassins

Types de bassins	Vitesse de subsidence moyenne (m/Ma)	Temps de subsidence moyen (Ma)	Exemples français
Bassins décrochants	> 500	10	
Bassins d'avant pays	100-400	20-50	
Riffs	100	10-100	
Marges passives	50	100	
Bassins intracratoniques	20-50	100-150	

Caractérisation des bassins sédimentaires en fonction des modalités de subsidence. (dans Segarra et al., Ellipses ed. 2021)

B. DIFFERENTS PARAMETRES CONTROLENT LA SEDIMENTATION DANS LES BASSINS

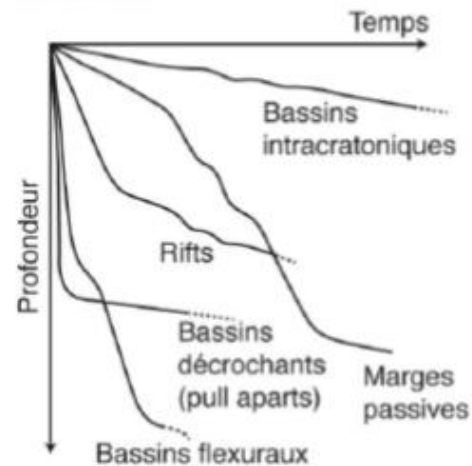


2. La subsidence, l'eustatisme et les apports sédimentaires contrôlent l'espace disponible

2.1. Subsidence

- Bassins en contexte de **divergence** → subsidence initiale due à l'amincissement de la croûte suivi d'un rééquilibrage thermique.
 - Rifts: rapides, durée de vie courte
 - Bassin intracratoniques; lents et peu profonds
 - Bassins en contexte de **marges passives** → lithosphère continentale amincie → océanisation → **subsidence thermique : lents et profonds**
- Bassins en contexte de **coulissage** → entre deux décrochements (transtension)
 - **pull apart: forte subsidence** initiale due à cette transtension, très rapides
- Bassins en contexte de **convergence** → ni subsidence initiale ni thermique.
 - Bassins **flexuraux** de la plaque plongeante: **vitesse de subsidence importante**
 - ✓ zones de subduction = fosse → prismes d'accrétion
 - ✓ zones de collision → bassins d'avant pays
 - ✓ Dimensions de ces bassins dépendent de la résistance de la plaque plongeante (plus résistance forte de la plaque plongeante, plus bassin peu profond mais large).

A. Courbes de subsidence totale théorique pour les différents types de bassins



B. Exemples et ordres de grandeurs des vitesses de subsidence et des temps de subsidence des différents types de bassins

Types de bassins	Vitesse de subsidence moyenne (m/Ma)	Temps de subsidence moyen (Ma)	Exemples français
Bassins décrochants	> 500	10	Lerz, Laval, Châteaulin, bordant le sillon houiller...
Bassins d'avant pays	100-400	20-50	Bassin molassique suisse, Valensole...
Rifts	100	10-100	Fossé Rhénan, les Limagnes, Alès...
Marges passives	50	100	Golfe du Lion marge armoricaine...
Bassins intracratoniques	20-50	100-150	Bassin de Paris

Caractérisation des bassins sédimentaires en fonction des modalités de subsidence. (dans Segarra et al., Ellipses ed. 2021)

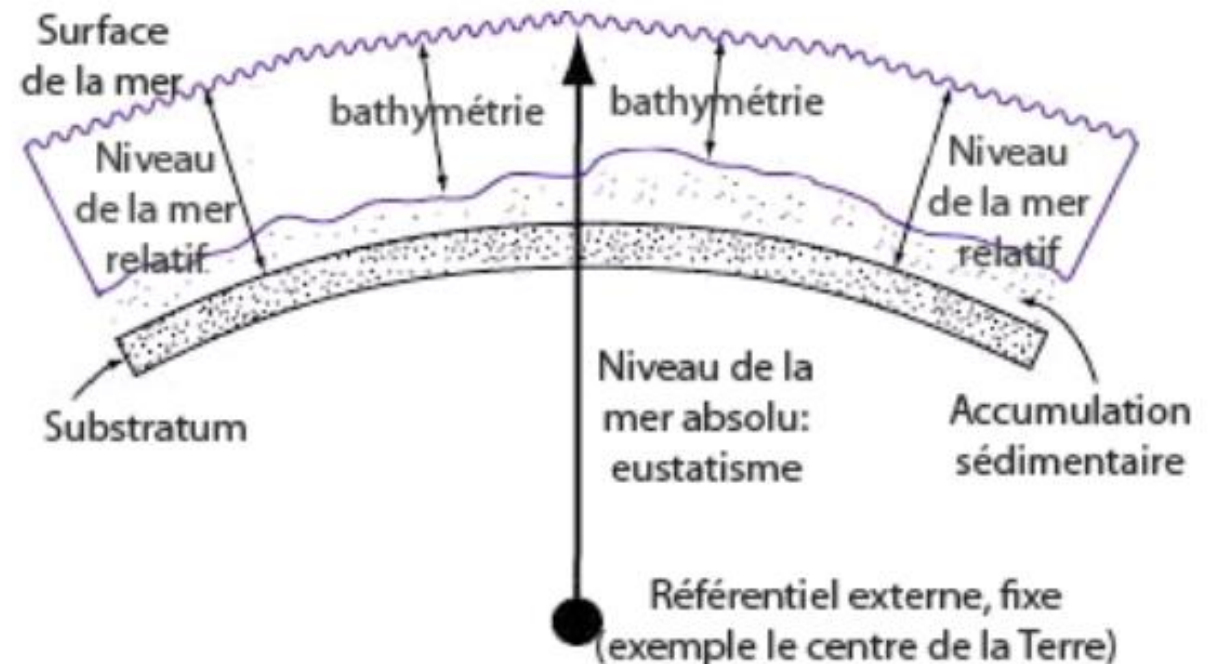
B. DIFFERENTS PARAMETRES CONTROLENT LA SEDIMENTATION DANS LES BASSINS

2. La subsidence, l'eustatisme et les apports sédimentaires contrôlent l'espace disponible



2.2. Variations relative et absolue du niveau marin

- **L'eustatisme = niveau absolu de la mer**
 - distance entre la surface de la mer et un **référentiel externe fixe** comme par exemple le centre de la Terre
 - ✓ alternances de périodes glaciaires (baisse du niveau marin) – interglaciaires (hausse du niveau marin)
 - ✓ cycles de Wegener: mégacontinent → baisse du niveau marin / activité intense des dorsales → hausse du niveau marin
- **Niveau marin relatif = niveau marin estimé à partir d'un point de référence interne du substratum**
 - Effet de la déformation du socle (subsidence ou surrection)
 - Effet de l'eustatisme
- **Bathymétrie = hauteur de la colonne d'eau en un point donné**
 - Effet des apports sédimentaires
 - Effets de la déformation du socle
 - Effets de l'eustatisme



Notions de bathymétrie, niveau marin relatif et eustatisme.

B. DIFFERENTS PARAMETRES CONTROLENT LA SEDIMENTATION DANS LES BASSINS

2. La subsidence, l'eustatisme et les apports sédimentaires contrôlent l'espace disponible



2.2. Variations relative et absolue du niveau marin

- **Transgression marine** : migration de la ligne de rivage vers la côte
- **Régression marine**: migration de la ligne de rivage vers le large

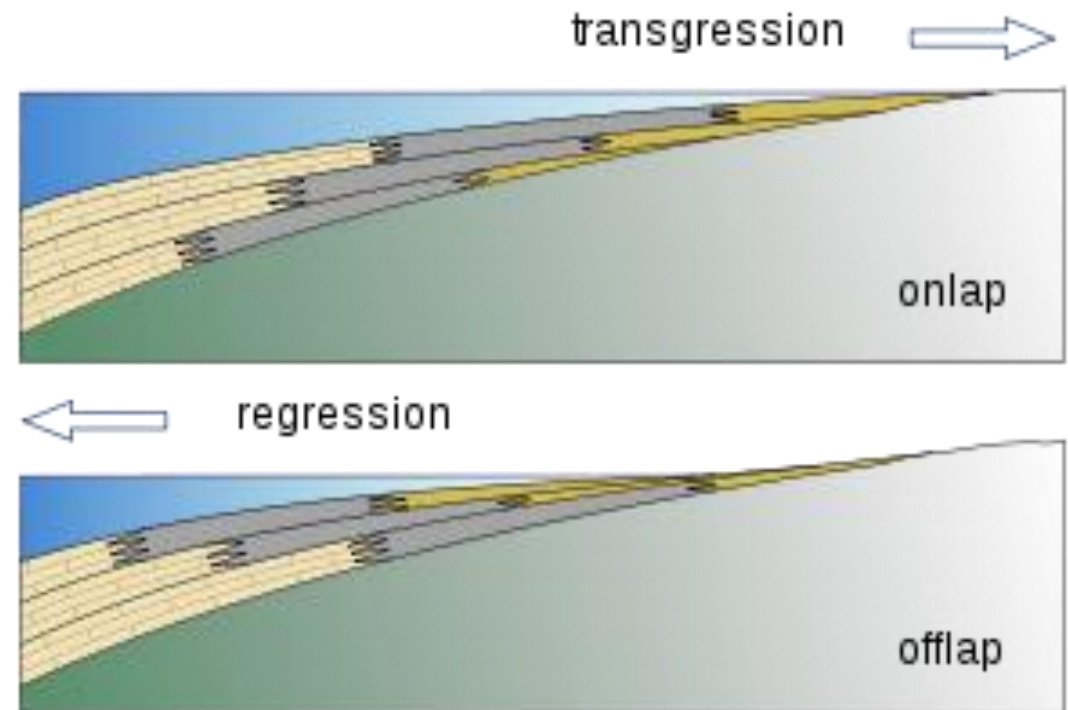


diagramme illustrant les faciès sédimentaires durant les transgressions et les régressions marines (source : Wikipédia)

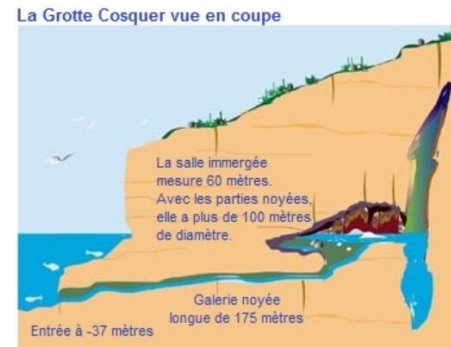
B. DIFFERENTS PARAMETRES CONTROLENT LA SEDIMENTATION DANS LES BASSINS

2. La subsidence, l'eustatisme et les apports sédimentaires contrôlent l'espace disponible



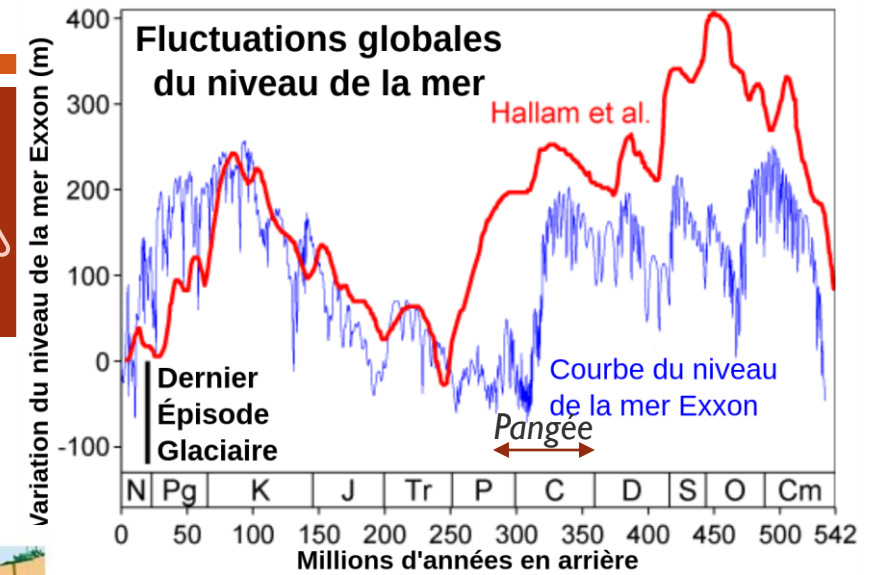
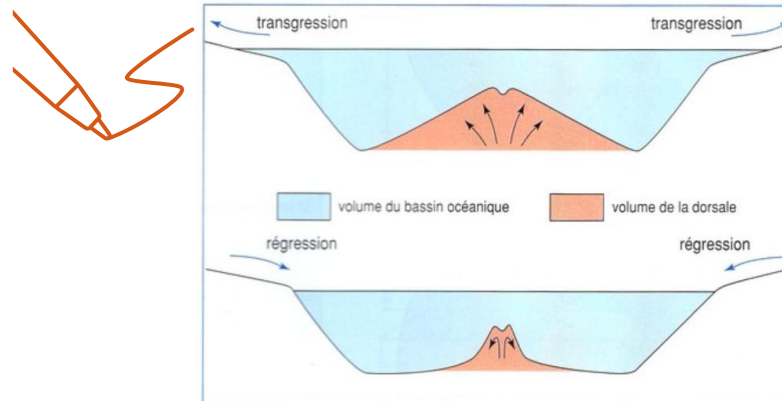
2.2. Variations relative et absolue du niveau marin

- **Variations à grandes longueurs d'ondes** (centaines de millions d'années) contrôlées par la tectonique = tectono-eustatisme
 - cycles de Wilson
 - ✓ *supercontinent* → *chute eustatique*
 - ✓ *Fragmentation du supercontinent* → *océans jeunes et peu profonds* → *montée eustatique*
 - ✓ 300 mètres en *plusieurs centaines de millions d'années*
- Variations à moyenne longueur d'ondes (**dizaine de millions d'années**)
 - **dorsales océaniques** : si **activité augmente** → volume augmente → **montée eustatique**
- Variations à moyenne longueur d'ondes (**dizaines à centaines de milliers d'années**)
 - **variations de la quantité d'eau dans les bassins océaniques** → **glacio-eustatisme**
 - ✓ *période glaciaire* → *chute eustatique*.



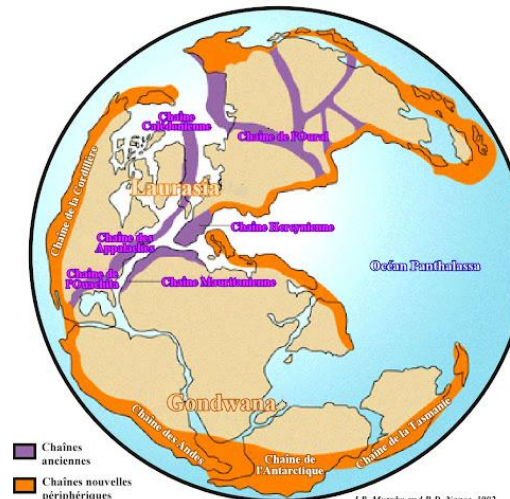
http://eric.lacouture.free.fr/lycee/termS_spe/TermS_spe_2002/cours_termS_spe_ch3.htm

Source : Bac S 2008 Antilles



Variations globales, par rapport au niveau actuel, des océans depuis 600 millions d'années (source : Wikipédia)

Supercontinent Pangée



J.B. Murphy and R.D. Nance, 1992

B. DIFFERENTS PARAMETRES CONTROLENT LA SEDIMENTATION DANS LES BASSINS

2. La subsidence, l'eustatisme et les apports sédimentaires contrôlent l'espace disponible



2.3. Variations des apports sédimentaires

- Apports sédimentaires dépendent:
 - **Apports détritiques**
 - ✓ Fonction du **relief (contrôlé par la tectonique)**
 - ✓ Fonction du **climat**
 - **Apports de solutés (biogéniques et chimiques)**
 - ✓ Fonction de **T°C**
 - ✓ Fonction de **profondeur**
 - ✓ Fonction des **activités biologiques**



Conglomérat de type poudingue (Wikipédia)



Conglomérat de type brèche (Wikipédia)



Grès de Fontainebleau (S. Dalaine)



Calcaire à *Ditrupe* et *Nummulithe* (S. Dalaine)



Gypse fer de lance (évaporite) (S. Dalaine)







Calcaire oolithique et bioclastique du Bathonien (svt-ac besançon)

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE

A. CLASSIFICATION DES ROCHES DETRITIQUES TERRIGENES



- Deux tailles importantes à retenir : 0,063 mm (63 μ m) et 2 mm

Classes granulométriques	Taille en mm	Éléments	Roches non consolidées (= sédiment)	Roches consolidées (= roche sédimentaire)
Rudites	> 256 mm	Bloc	Cailloutis	Conglomérat (poudingue/brèche) 
	4 à 246 mm	Galet		
	2 à 4 mm	Gravier	Graviers	Microconglomérats
Arénites	63 μ m à 2 mm	Grain de sable (grossier, moyen, fin)	Sables	Grès (grossier, fin) 
Lutites	2 à 63 μ m	Particule silteuse	Silts	Siltite  <small>Wikipédia</small>
	< 2 μ m	Argile (granulométrique)	Argiles	Argilite 

Décroissance de la taille des particules et de la vitesse du courant

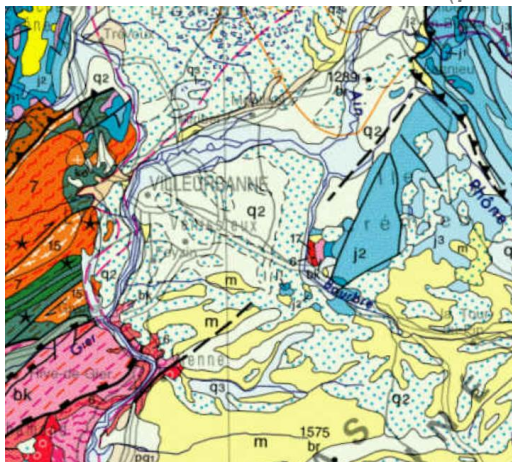
Bassin de Lodève (S. Dalaine)


II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE

B. EN DOMAINE CONTINENTAL : DIVERSITE DES FORMATIONS ET MECANISMES MIS EN JEU

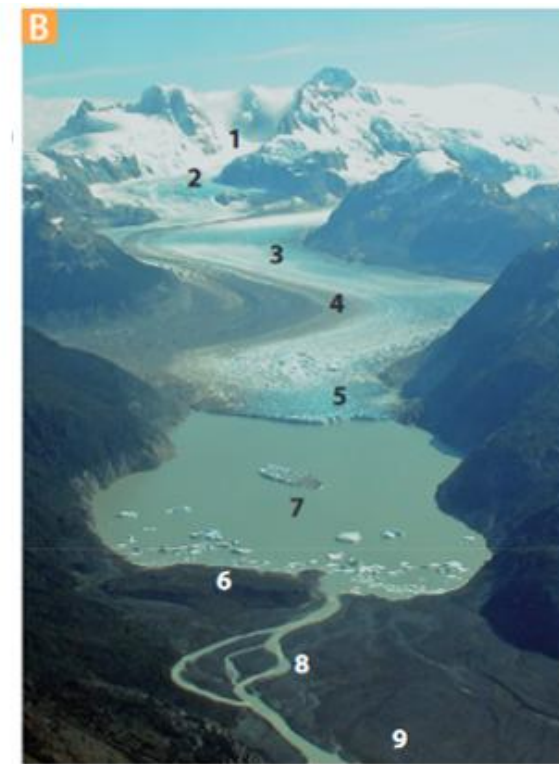
I. Dépôts glaciaires

- Deux types de glaciers: alpin et inlandsis
- Glacier alpin:
 - Suivi de la pente topographique (extension jusqu'à qqs 10 km)
 - Zone d'accumulation: quantité de neige stockée > neige fondue
 - Zone d'ablation: quantité de neige stockée < neige fondue
 - ✓ Déficit de zone d'ablation compensé par déplacement du glacier (10 à 100 m/an)
 - ✓ Érosion mécanique: fissure, strie, vallée en U ou en auge,
 - ✓ moraines (frontales, médianes, latérales), blocs erratiques



 Dépôts glaciaires moraines

Faciès glaciaire dans la région lyonnaise (cf STA)



Modelé d'un glacier alpin

- 1: Cirque collecteur
- 2: Zone de séracs
- 3: Langue ou diffuseur
- 4: Moraine latérale
- 5: Zone d'ablation
- 6: Moraine frontale
- 7: Lac proglaciaire (vélage de la langue glaciaire)
- 8: Torrent glaciaire
- 9: Plaine d'épandage proglaciaire



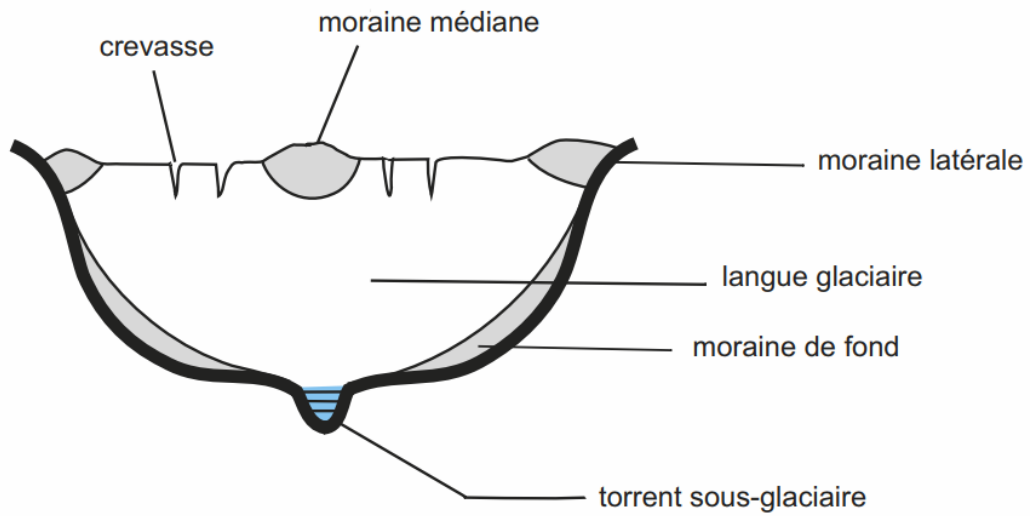
Strie sur roche (Ecosse) (S. Dalaine)



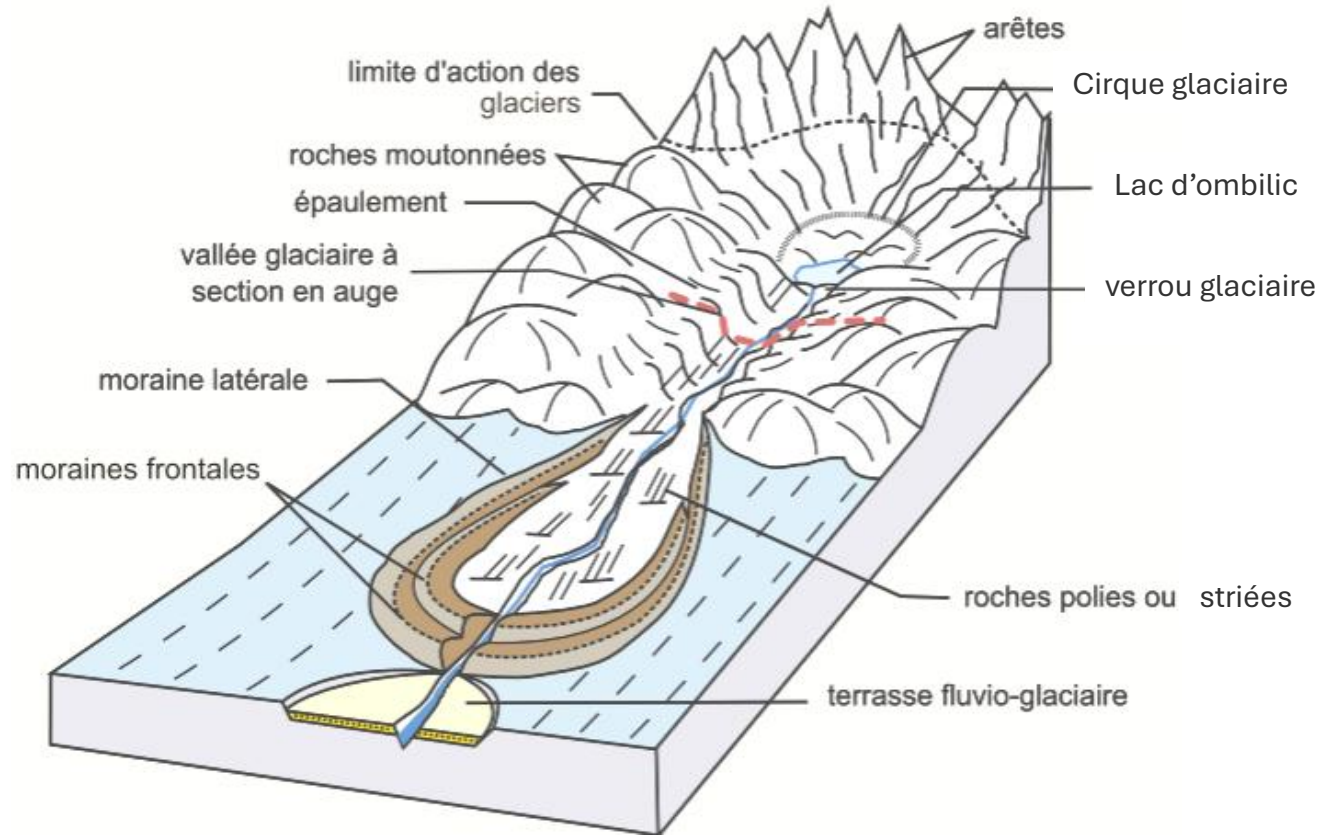
Strie sur roche (Ecosse) (S. Dalaine)



Le gros caillou (bloc erratique) à Lyon (Wikipédia)



Une vallée glaciaire en coupe



Modèle glaciaire

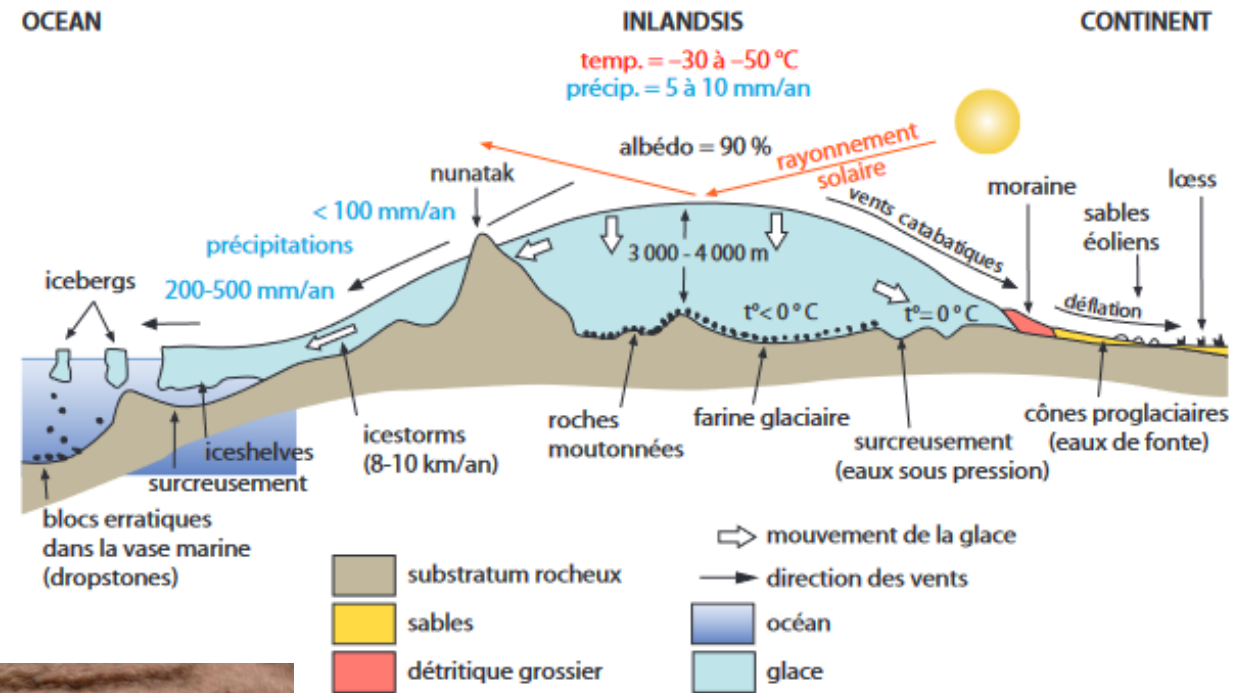
II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE

B. EN DOMAINE CONTINENTAL : DIVERSITE DES FORMATIONS ET MECANISMES MIS EN JEU

I. Dépôts glaciaires

Vent catabatique: qui descend la pente

- Glaciers de type inlandsis
 - Développement pérenne en période de glaciation → calottes glaciaires
 - Aucune contrainte topographique
 - Migration de manière centrifuge sous son poids → érosion du substratum
- ✓ roches moutonnées
- ✓ **grandes vallées glaciaires en auge**
- ✓ Vallées envahies par eaux sous-marines: **fjords**
- ✓ **Eau liquide à base de calotte** (due à \nearrow de pression sous poids du glacier)
- ✓ Inlandsis → **icebergs** → relâchement de particules détritiques → **dropstones** (paléoclimats)



Source - © 2008 Pierre Thomas
 Dropstone dans des sédiments glacio-lacustres quaternaires du bord du lac Général Carrera-Buenos Aires (Patagonie chilienne), vue rapprochée
 Un dropstone (ou bloc de délestage) est, par définition, un bloc isolé de taille variable abandonné, par la fonte d'un iceberg ou d'une plaque de glace flottante portant des blocs rocheux, sur/dans les sédiments fins des fonds marins ou lacustres. Ici, ce bloc est inclus dans des sédiments lacustres de granulométrie variable. On distingue des sables, des micro-conglomérats et des silts.

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE

B. EN DOMAINE CONTINENTAL : DIVERSITE DES FORMATIONS ET MECANISMES MIS EN JEU

2. Dépôts fluviaux

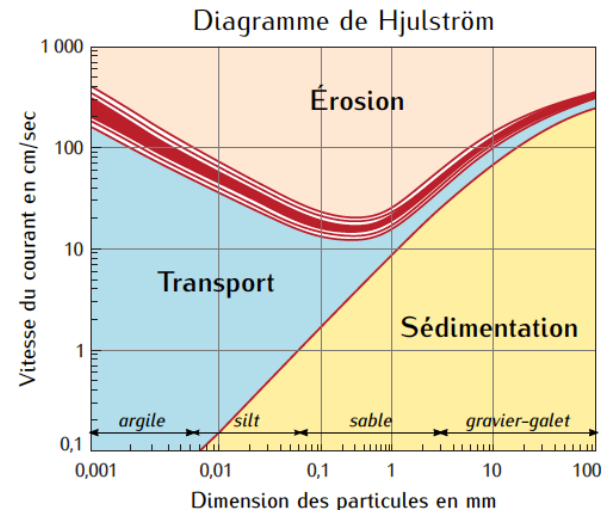
- Rappel Hjulström: érosion, transport et sédimentation en lien avec hydrodynamisme et taille des particules détritiques
 - ⇒ En amont du cours d'eau: plutôt érosion des montagnes
 - ⇒ En aval du cours d'eau: plutôt sédimentation dans les plaines



Pleurs de vigne en février (poussée racinaire cf SV-B2) (S. Dalaine)



Savennières (bord de Loire près d'Angers) (S. Dalaine)



Mont Gerbier de Jonc (sources de la Loire) (S. Dalaine)



Banc de sable à Saint Gemmes sur Loire (S. Dalaine)

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE

B. EN DOMAINE CONTINENTAL : DIVERSITE DES FORMATIONS ET MECANISMES MIS EN JEU

2. Dépôts fluviaux



Chenal (n.m.): structure érosive à concavité vers le haut qui se forme quand la vitesse du courant augmente brutalement (lors d'une crue saisonnière par exemple).

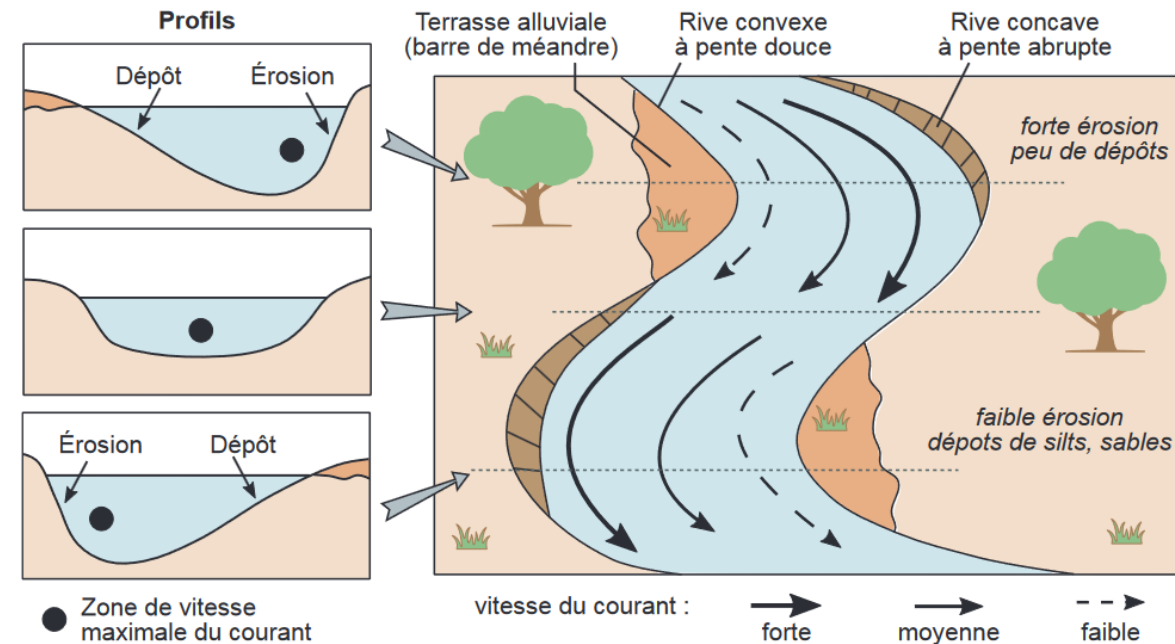


2.1. Rivières méandriformes

- Plutôt en topographie faible
- Cours d'eau méandriforme: **chenal unique et sinuosité forte**
- Variation de vitesse du courant au sein d'un méandre
 - ⇒ **rives concaves** de la rivière (extérieur du méandre) → vitesse de courant plus forte → **berge en érosion**
 - ⇒ **rives convexes** de la rivière (intérieur du méandre) → vitesse de courant plus faible → **dépôt avec granoclasement et progradation latérale**
- Au fur et à mesure du transport: particules détritiques altérées (émoussées), enrichissement progressif en grains de quartz → **plages littorales sableuses riches en quartz**
- **Migration spatiale** du méandre au cours du temps → paléoméandre

Méandre ardéchois

(<https://www.flickr.com/photos/10653408@N00/231685861/>)



Influence de la vitesse du courant sur la morphologie fluviale (Dunod, ed.2021, p.794)



Méandre fossile de Doulcon (ac-nancy-metz)

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE

B. EN DOMAINE CONTINENTAL : DIVERSITE DES FORMATIONS ET MECANISMES MIS EN JEU

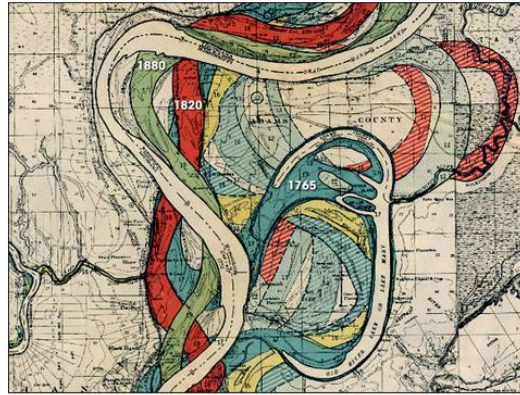
2. Dépôts fluviaux

2.1. Rivières méandriformes/ vs en tresse

- Rivière méandriforme → stratification entrecroisée si déplacement latéral du fleuve
- Rivière en tresse → stratification entrecroisée systématique



Vue aérienne des bras anastomosés du fleuve Waimakariri dans les plaines de Canterbury en Nouvelle-Zélande (Wikipédia)



Système méandriforme du Mississippi
<https://earthobservatory.nasa.gov/images/6887/mississippi-meanders>

Régime hydrodynamique fort

Régime hydrodynamique faible

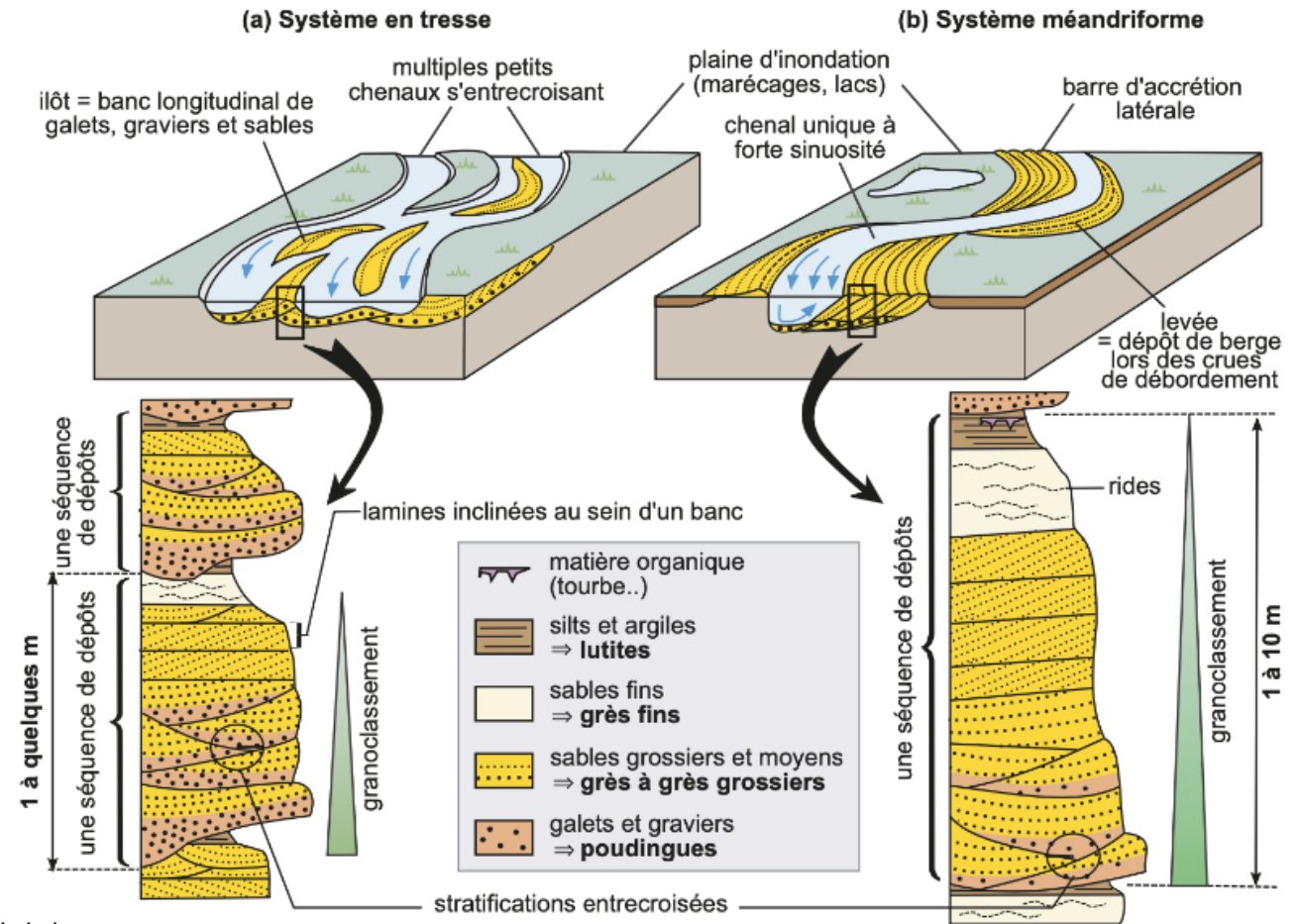


Figure 26.4 Morphologie des systèmes fluviaux en tresse (a) et méandriformes (b) et séquences types des dépôts associés.

Alluvion (n.f.): dépôts (graviers, galets, sables, limons) provenant d'un transport par les eaux fluviales.

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE

B. EN DOMAINE CONTINENTAL : DIVERSITE DE FORMATIONS ET MECANISMES MIS EN JEU

2. Dépôts fluviaux

2.2. Terrasses fluviales (ou alluviales)

- **Alternances** entre des périodes ① où une rivière alluvionne plus qu'elle n'érode et des périodes ② où cette rivière érode plus qu'elle ne dépose d'alluvions

- Cas ① : alluvions > érosion (Crues)

- ✓ Période glaciaire: bas niveau marin

- ⇒ Érosion du lit par les fleuves

- ✓ période glaciaire au printemps: débit élevé

- ⇒ Dépôt de graviers, galets

- Cas ② : érosion (vallée en V) > alluvions

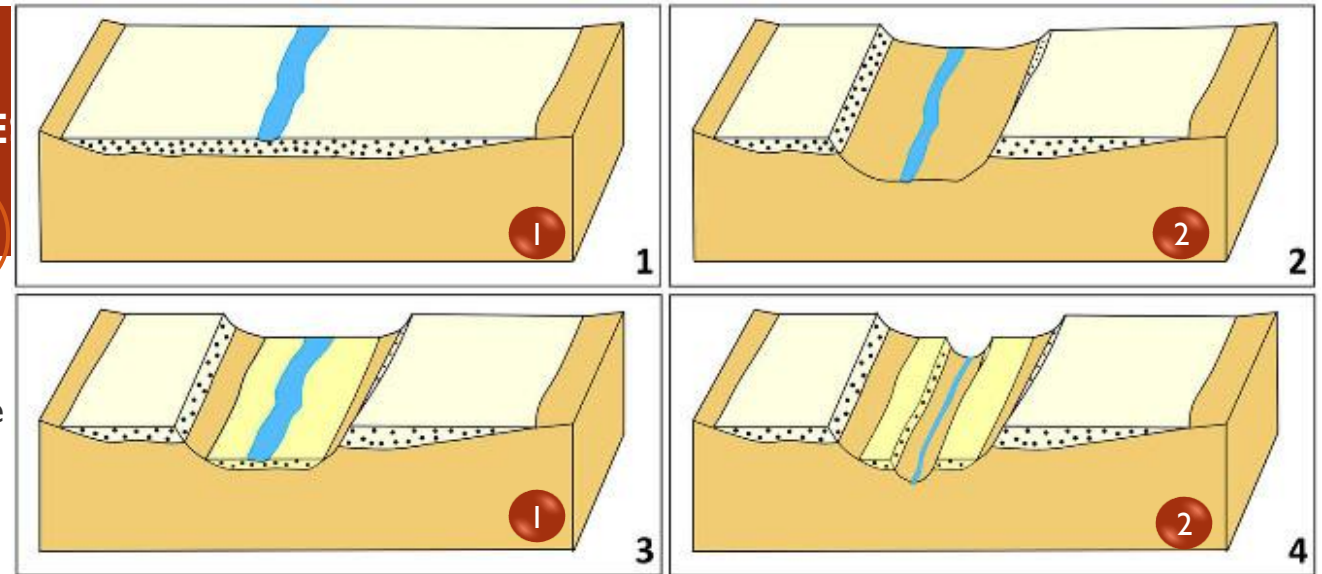
- ✓ Ex : période interglaciaire , débit de printemps faible

- ⇒ rivière creuse substratum et charge détritifique faible (sables, limons)

- Si succession périodes glaciaires vs interglaciaires

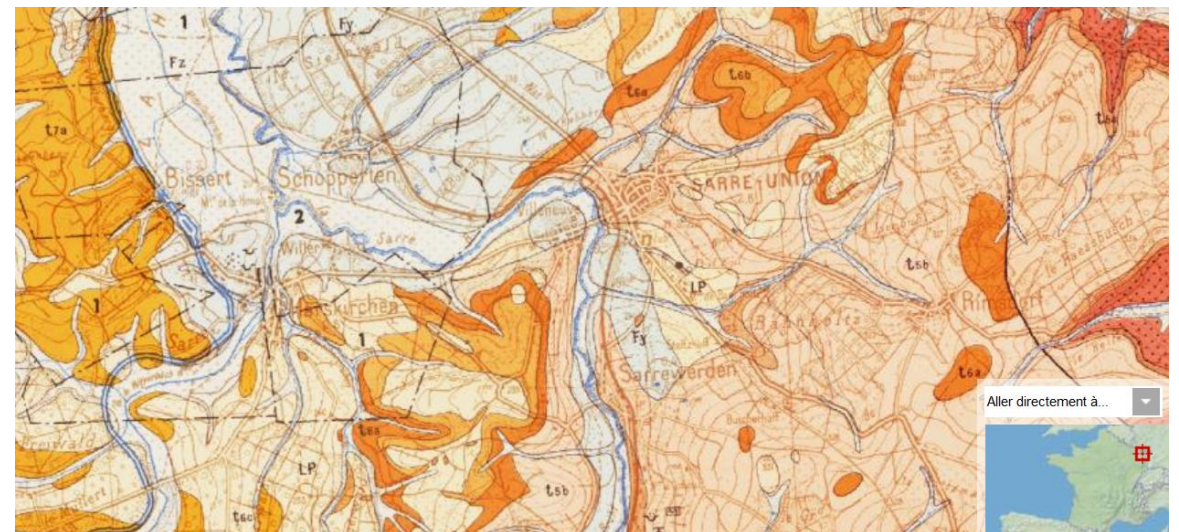
- ⇒ **Terrasses étagées et emboîtées**

- ✓ Ex: Fz et Fy sur la carte au 1/50 000^e de Sarreguemines (BRGM)



Source - © 2021 Pierre Thomas

Schémas classiques représentant la formation de terrasses alluviales étagées et emboîtées



Carte au 1/50 000^e de Sarreguemines (BRGM site Infoterre)

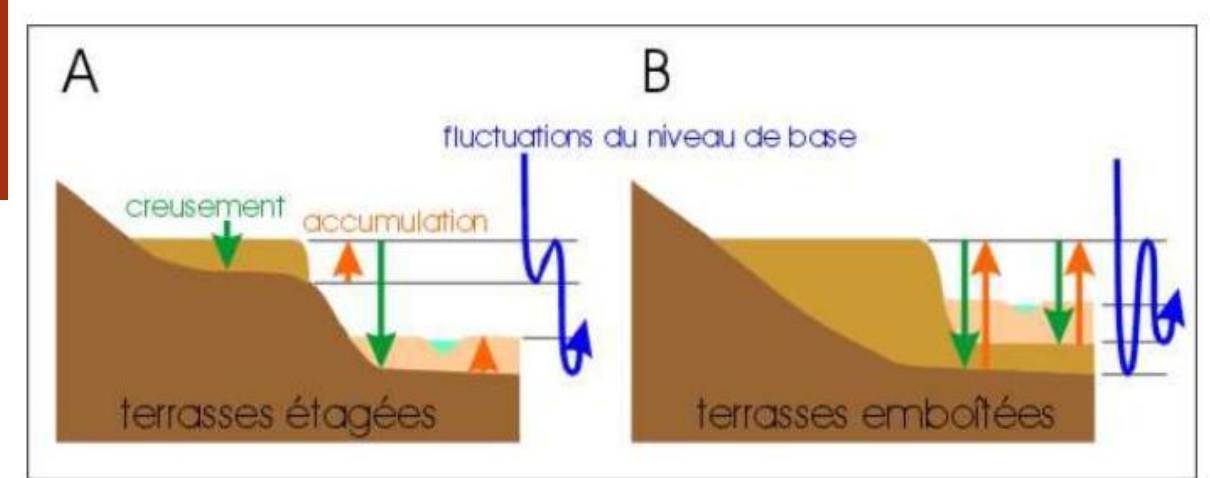
II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE B. EN DOMAINE CONTINENTAL : DIVERSITE DES FORMATIONS ET MECANISMES MIS EN JEU

2. Dépôts fluviaux

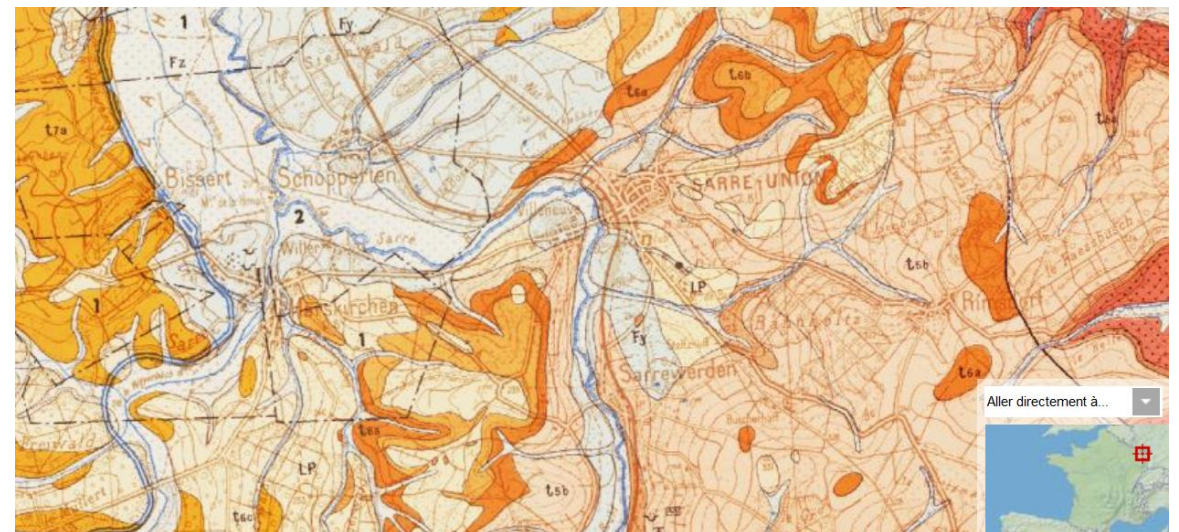
2.2. Terrasses fluviales (ou alluviales)

- Terrasse la plus basse toujours la plus récente
- Deux types de disposition:
 - **Terrasses emboîtées** : la première chute du niveau de base est très forte ; par la suite, les chutes sont moindres et n'entament que la terrasse précédente (on ne voit pas le socle entre deux terrasses)
 - **Terrasses étagées** : les chutes du niveau de base sont de plus en plus fortes, on voit le socle entre deux terrasses

En surface: aucune distinction possible (sauf si substratum visible entre 2 terrasses)



Terrasses étagées et emboîtées (source Aurélie Denis)

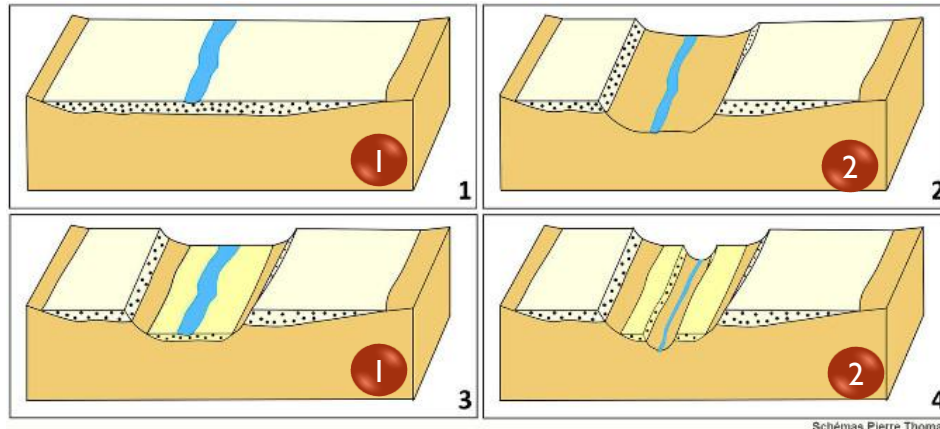


Carte au 1/50 000^e de Sarreguemines (BRGM site Infoterre)

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE B. EN DOMAINE CONTINENTAL : DIVERSITE DES FORMATIONS ET MECANISMES MIS EN JEU 2. Dépôts fluviaux

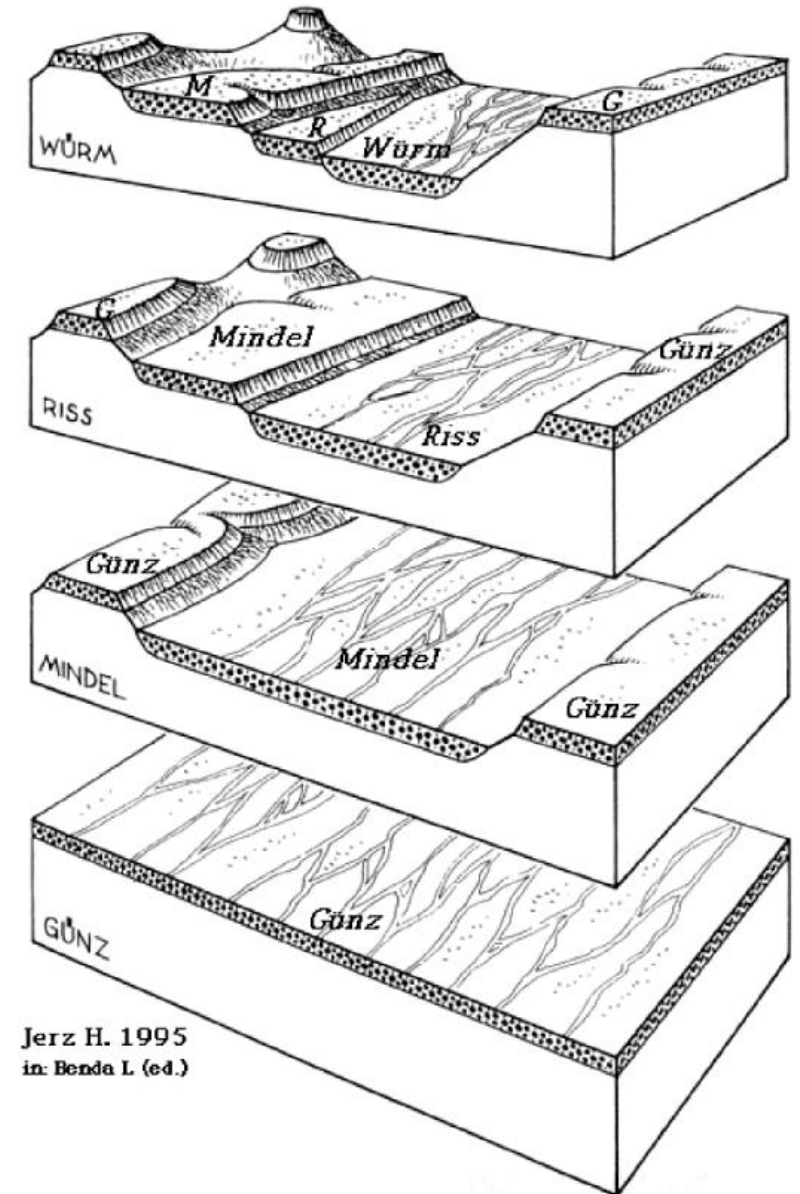
2.2. Terrasses fluviales (ou alluviales)

- **Etude des terrasses du Rhin** → mise en évidence de **4 épisodes glaciaires** au cours du quaternaire
 - Günz
 - Mindel
 - Riss
 - Würm
- **terrasses = dépôt d'alluvions** se forment quand le niveau de la rivière est élevé donc en période **glaciaire**



Schémas Pierre Thomas

Source - © 2021 Pierre Thomas
ENCPCB - BCPST1 - STÉPHANIE DALAJNE
Schémas classiques représentant la formations de terrasses alluviales étagées et emboîtées



Jerz H. 1995
in: Benda L. (ed.)

Formation de terrasses alluviales - mise en évidence de 4 épisodes glaciaires en Europe : Günz, Mindel, Riss et Würm

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE

B. EN DOMAINE CONTINENTAL : DIVERSITE DES FORMATIONS ET MECANISMES MIS EN JEU

2. Dépôts fluviatiles

2.3. Cas des sédiments fluvioglaciaires (varves)

- **Printemps** → fonte de la langue glaciaire → \nearrow débit des cours d'eau → \nearrow **pouvoir érosif**
 - dépôt de matériel sableux de couleur **claire** dans les lacs périglaciaires
- **Hiver** → neige stockée au niveau du glacier → \searrow débit → \searrow taille et quantité de particules détritiques transportées
 - **dépôts argileux** décantant lentement riches en matière organique (végétaux morts en hiver accumulés en été) → **teinte foncée**



Varves (Charcier, Jura) (source Marie Labrousse)



Varves en amont du barrage de Tignes (Val d'Isère) (S. Dalaine) 35

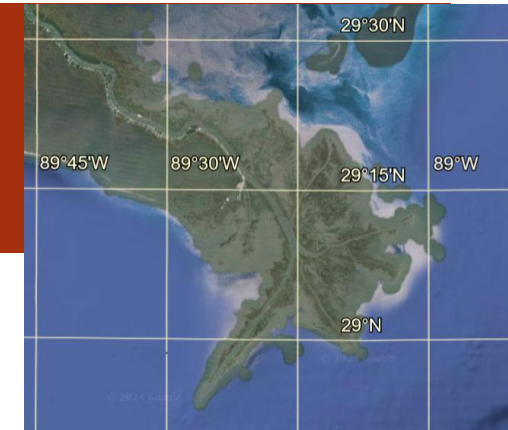
II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE C. EN DOMAINE LITTORAL

I. Observation de deltas et estuaires

- Distribution des sédiments dépend de **deux paramètres**:
 - **Charge détritique du fleuve**
 - **Énergie des courants marins littoraux**



Delta du Nil

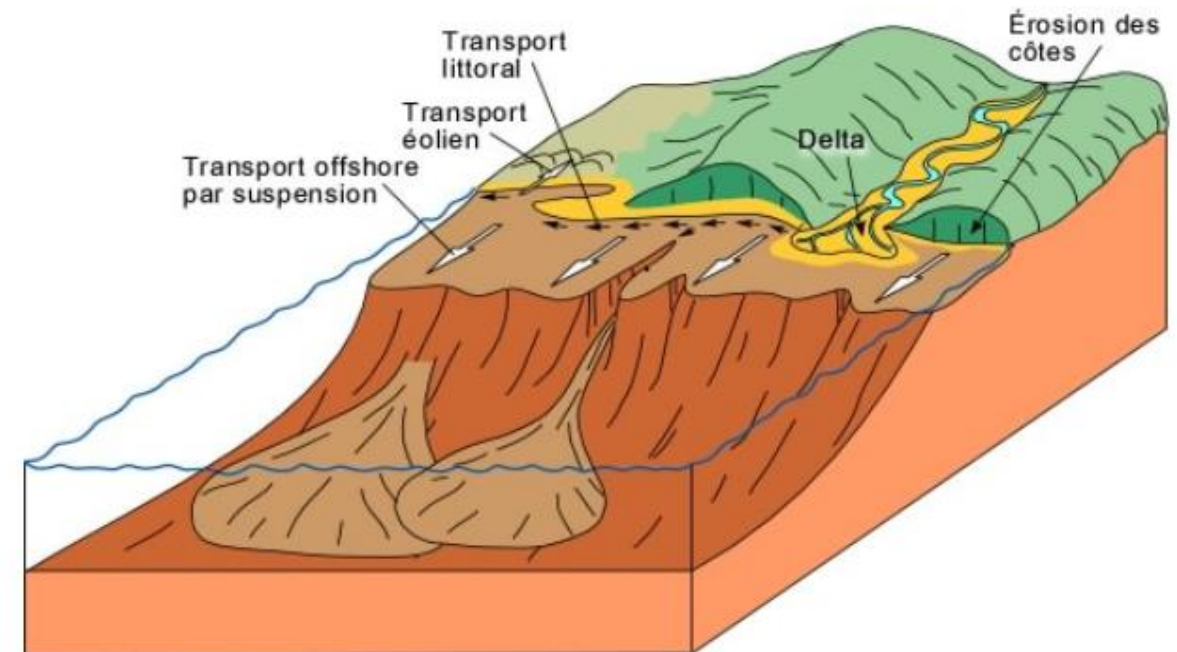


Delta du Mississipi

I.1. Etude des deltas

- **Deltas : charge détritique forte (fort débit) + faibles courants de marée (éléments détritiques non balayés)**
- **Sédiments chenalisés** → transportés souvent avec **vitesse assez élevée**
- Lors de l'arrivée dans mer → perte d'énergie du **courant** → **dispersion des sédiments s'étalant sur un delta = une zone d'accumulation triangulaire en plan** (d'où terme de delta)

✓ Ex: delta du Rhône, du Gange, du Mississipi



Organisation d'un delta (u-laval.ca)

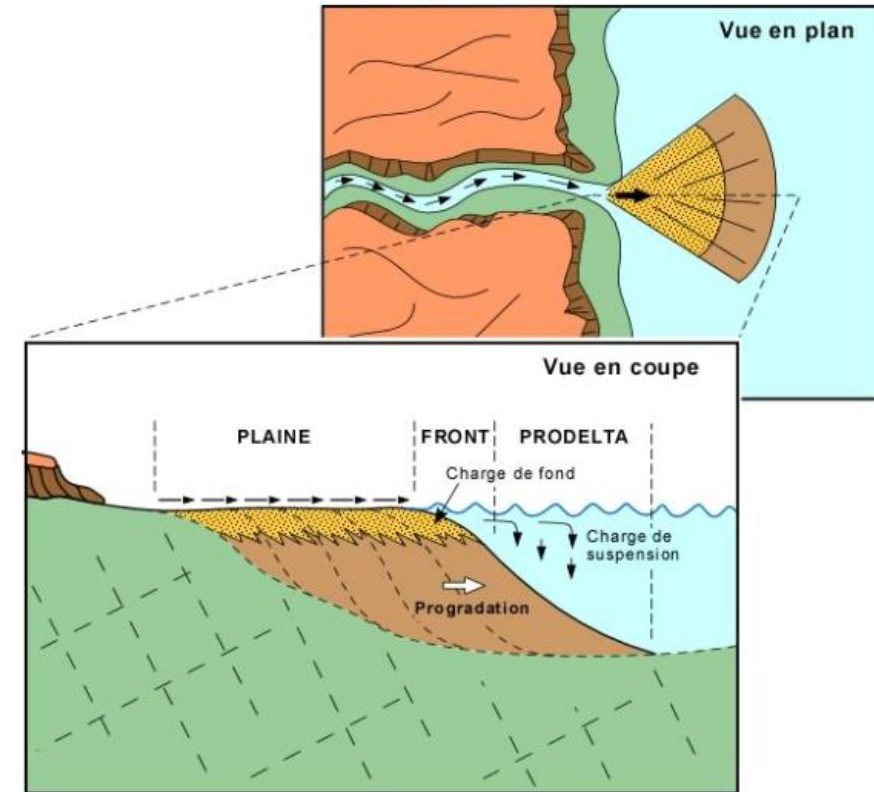
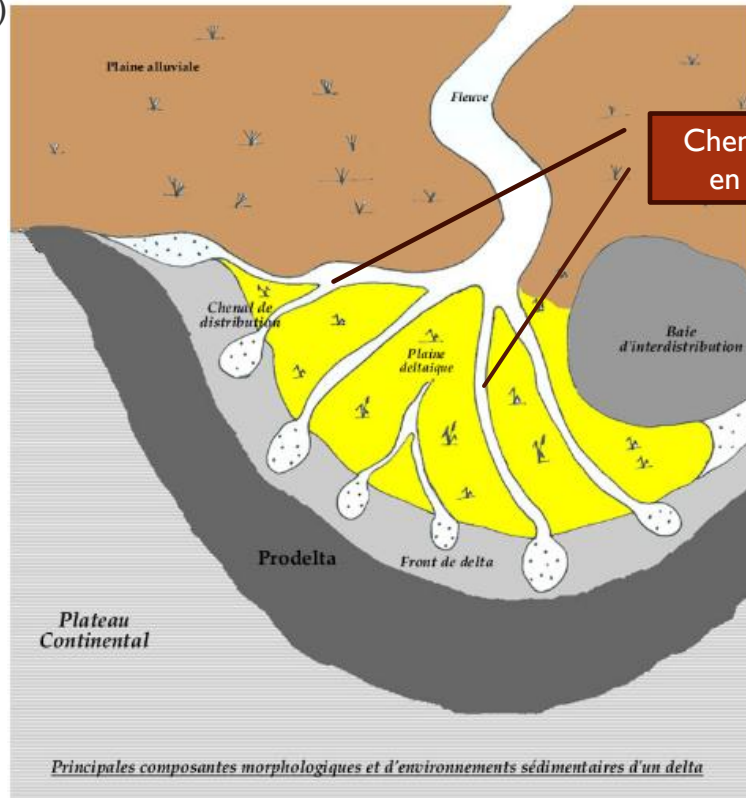
II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE C. EN DOMAINE LITTORAL

I. Observation de deltas et estuaires

I.1. Etude des deltas

- Deltas présents au niveau des lacs et des mers à **faibles courants de marée**
- **Sédiments chenalisés** → transportés souvent avec **vitesse assez élevée débit et charges sédimentaires importantes**
- ⇒ **Delta prograde** vers mer (cas (b))

- Delta est organisé en trois domaines :
 - **plaine deltaïque** = zone marécageuse (tourbière ou mangrove) → chenaux méandriformes → particules les plus grossières encore présentes dans le fleuve + débordement de particules fines → dépôts y sont horizontaux.
 - **front du delta** = zone d'affrontement des eaux fluviales et marines → cette zone fluctue → particules les plus grossières encore présentes (sable le plus souvent) y sédimentent
 - **prodelta** = entièrement marin → accumulation des particules plus fines (silts et argiles le plus souvent)



Delta du Mississippi et organisation d'un delta (u-laval.ca)

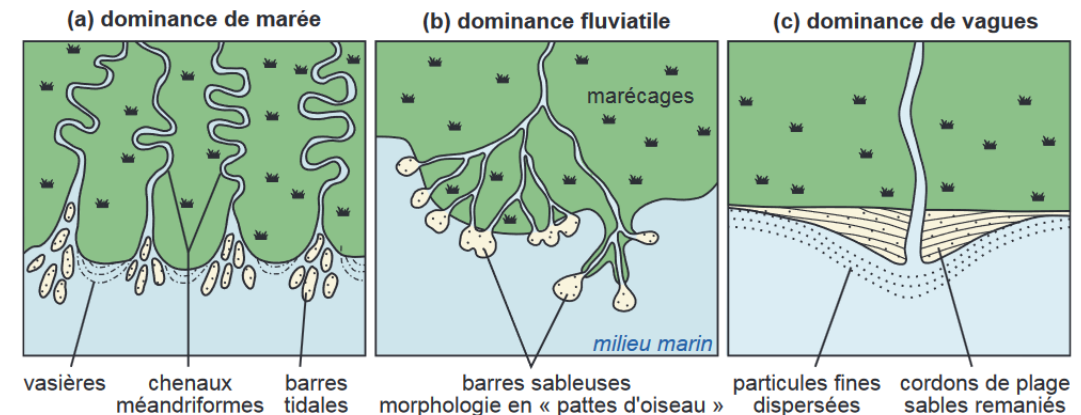


Figure 26.5 Différentes morphologies de deltas selon les effets dominants de marée (ex. de la Gironde ou des abers bretons), fluviales (ex. du Mississippi) ou des vagues (ex. du Nil).

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE C. EN DOMAINE LITTORAL

I. Observation de deltas et estuaires

floculation (n.f.): rassemblement de particules (sous forme de flocons)

I.2. Etude des estuaires (*aestus*: marée)

- Estuaires: mers à courants côtiers et à courants de marées importants (exemple de la Loire) + fleuve avec faible charge détritique (faible débit)

⇒ mer gagne sur le continent

✓ Ex: Gironde, Baie de Somme, Tamise, Saint Laurent

- Estuaires : peu chargés en matériel détritique grossier car vitesse du courant faible → sables et silts sédimentent au niveau de l'embouchure

- Différence de charge ionique entre eau douce et eau de mer → floculation des particules les plus fines (argiles)

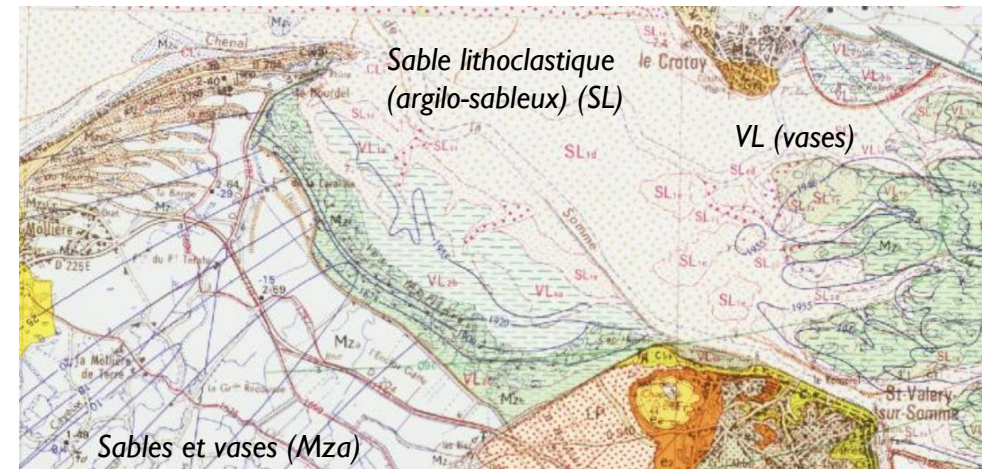
⇒ argiles chargées - s'associent avec Na^+ ou Ca^{2+}

⇒ Bouchon vaseux



Estuaire de Saint-Valéry sur Somme (Google Earth)

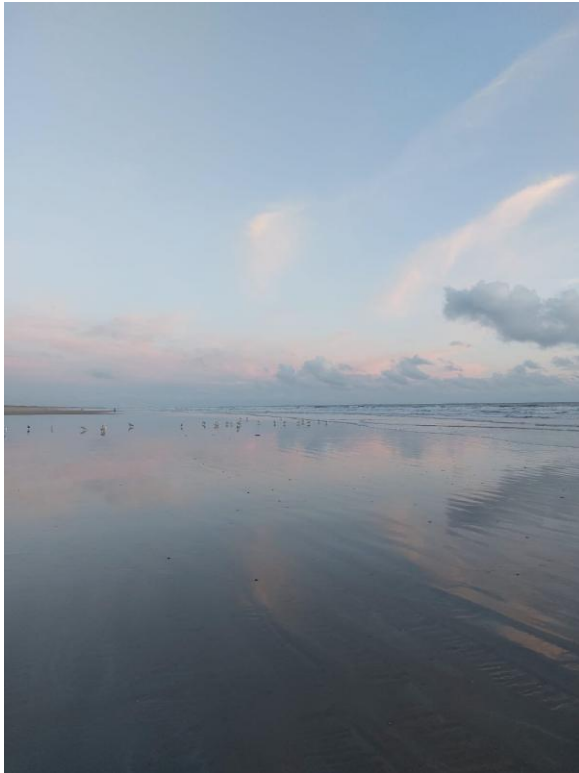
Sable fin et argile de Saint-Valéry sur Somme (S. Dalaine)



Carte au 1/50 000^e de Saint-Valéry sur Somme (BRGM)

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE C. EN DOMAINE LITTORAL

2. L'hydrodynamisme et la taille des particules conditionnent le type de figures sédimentaires



*Plage de Saint-Gilles-Croix-de-Vie
(Maxime Picard BCPST 2023)*

Rides symétriques vs
asymétriques:
comment les
interpréter?



Plage de Bretignolles-sur-Mer (S. Dalaine)

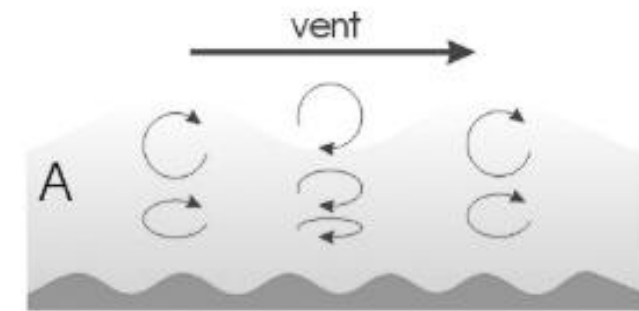
II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE C. EN DOMAINE LITTORAL

2. L'hydrodynamisme et la taille des particules conditionnent le type de figures sédimentaires

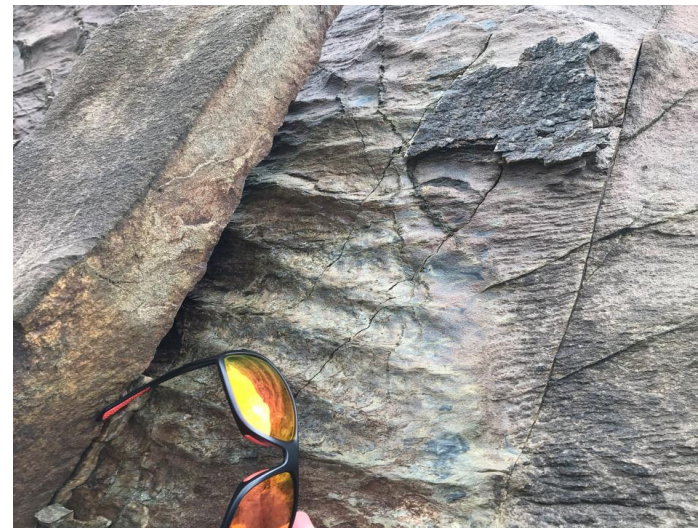


2.1. Conséquences des mouvements bidirectionnels

- Cas de la houle = **ride de vague**
- **Orbites circulaires de filets d'eau**
 - ⇒ Mouvement de va et vient sur substratum
 - ⇒ **Structures symétriques**



Structure sédimentaire résultant de la houle: les rides de vague



Plage de Bretignolles-sur-Mer (S. Dalaine)

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE

C. EN DOMAINE LITTORAL

2. L'hydrodynamisme et la taille des particules conditionnent le type de figures sédimentaires



2.1. Conséquences des mouvements unidirectionnels

- Cas de la marée = **ride de plage** = **ripple marks**

- **Dépôts asymétriques**

- **Période longue** (environ 6h) → temps suffisant pour empreinte sédimentaire

- ⇒ Rides: longueurs d'onde < 0,6 m

- ⇒ Mégarides (dunes hydrauliques) : longueurs d'onde entre 0,5 et 10 m

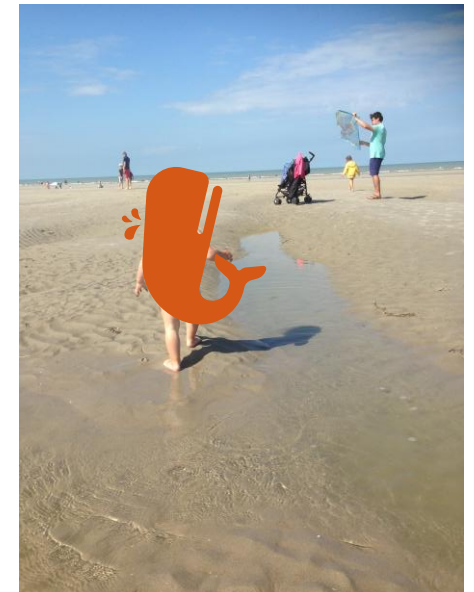
- ✓ Ex: baie de Somme



Structure sédimentaire résultant du courant : les rides de plage



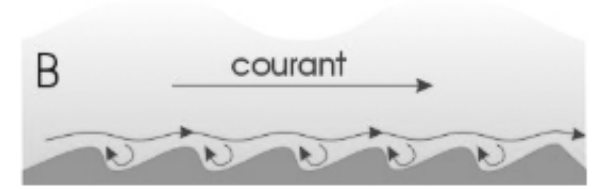
Mégarides dans le chenal de la Somme, à marée basse (www2.ulg.b)



Mégarides dans le chenal de la Somme, à marée basse (S. Dalaine)

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE C. EN DOMAINE LITTORAL

2. L'hydrodynamisme et la taille des particules conditionnent le type de figures sédimentaires



Structure sédimentaire résultant du courant : les rides de plage

2.1. Conséquences des mouvements unidirectionnels

- Cas de la marée = ride de plage = ripple marks
- Particules tractées sur face en amont et sédiments déposés sur face en aval par perte d'énergie
 - ⇒ Identification du sens du courant
 - ⇒ Identification de vitesse du courant (selon diamètre moy des particules) = diagramme d'Allen
- ✓ Ex: particules de 0,4 mm avec $15 \text{ cm.s}^{-1} < \text{vitesse courant} < 45 \text{ cm.s}^{-1} \rightarrow \text{rides}$ (longueur d'onde cm à dm)
- ✓ Ex: particules de 0,4 mm avec $45 \text{ cm.s}^{-1} > \text{vitesse courant} \rightarrow \text{mégarides}$ (longueur d'onde dm à m)

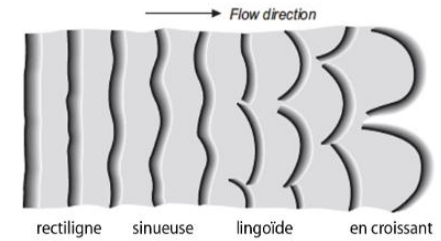
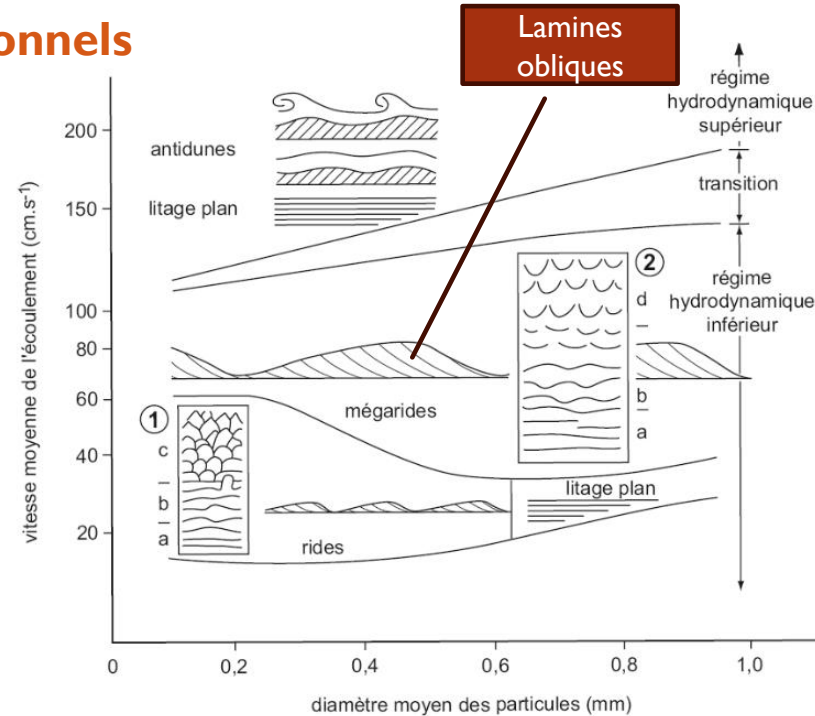


Diagramme d'Allen : structures sédimentaires en fonction de la vitesse de l'écoulement et de la taille des particules (in CAPES 09)

Principe d'actualisme

Paléoplage, ripple marks (Arizona)
(S. Dalaine)



Sens du paléocourant

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE C. EN DOMAINE LITTORAL

2. L'hydrodynamisme et la taille des particules conditionnent le type de figures sédimentaires



Structure sédimentaire résultant du courant : les rides de plage

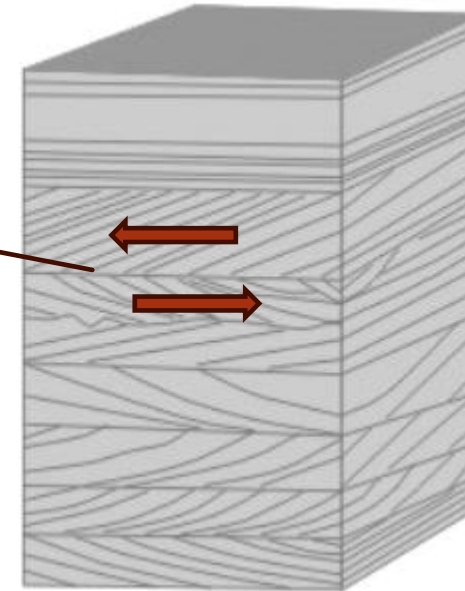
2.1. Conséquences des mouvements unidirectionnels

- Cas de la marée = **zone tidale**
 - Inversion périodique des courants de marée
 - Stratification en arêtes de poisson
 - ✓ Ex: grès de Moodies vallée du Sheba Creek (Afrique du Sud)

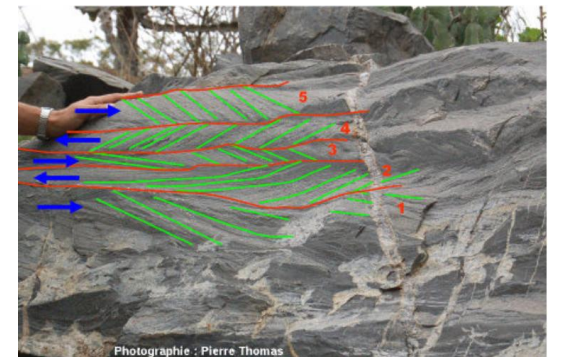
Surface de réactivation =
changement de
direction du courant

Sens du
paléocourant

20 cm



Stratification en **arêtes de poisson**
sous l'effet des **marées**



Source - © 2008 Pierre Thomas
Stratifications en arêtes de poisson dans des
grès du groupe de Moodies (3,22 Ga), vallée du
Sheba Creek, région de Barberton (Afrique du Sud)

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE

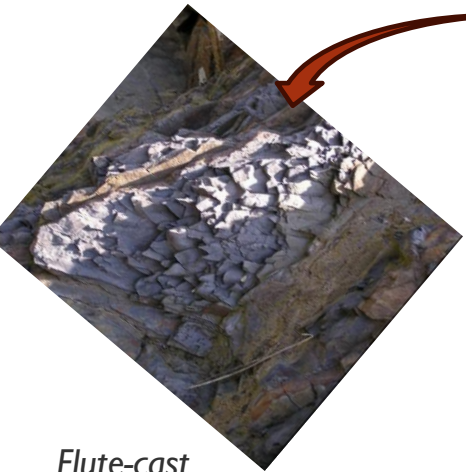
D. EN DOMAINE MARIN PROXIMAL : L'EXEMPLE DES TURBIDITES

- Sédimentation **gravitaire discontinue dans le temps**

⇒ **Durée très brève** des dépôts

- ✓ Ex: **turbidites: unité géologique** composée d'une succession de roches sédimentaires mises en place à la suite d'un écoulement (**avalanche**) de sédiments le long du talus sous-marin, entaillant le talus formant des canyons.

- ✓ Dépôts organisés, **granoclassés en séquence de Bouma**



Flute-cast

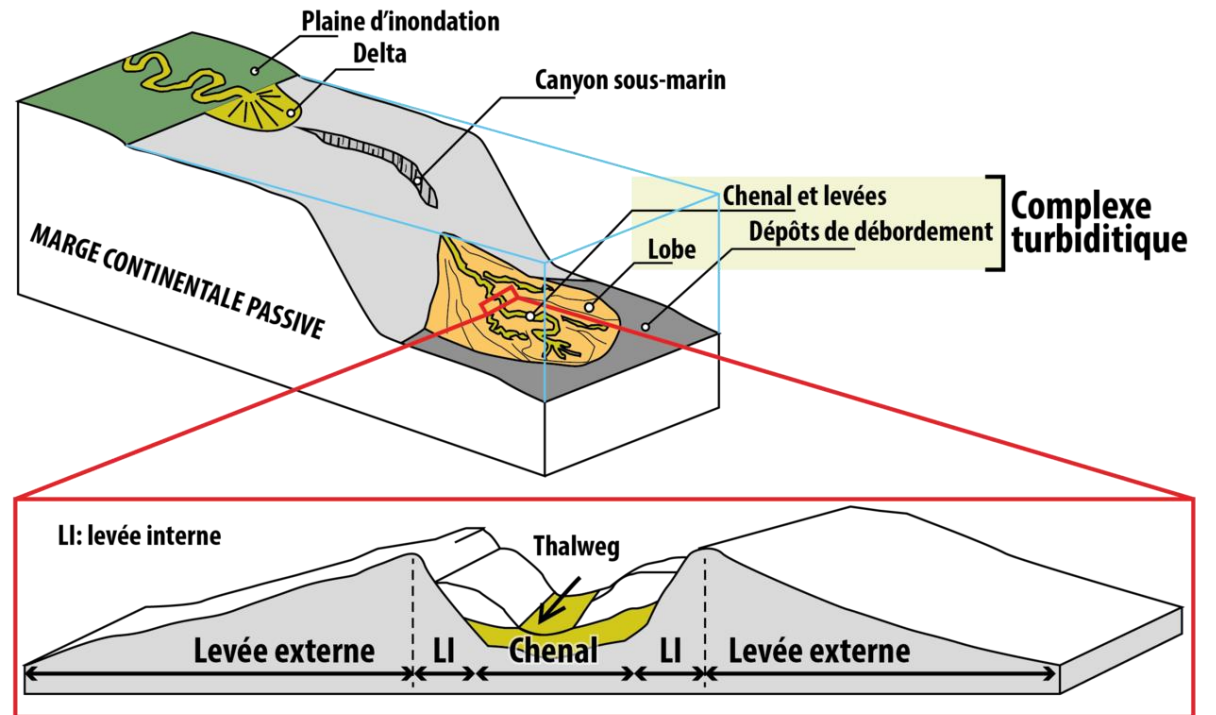


Argiles et silts

Sables fins, lités

Sables moyens

Sables grossiers



Complexe turbiditique à l'embouchure d'un canyon sous-marin. (source Wikipédia)

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE

D. EN DOMAINE MARIN PROXIMAL : L'EXEMPLE DES TURBIDITES

■ Sédimentation gravitaire discontinue dans le temps

⇒ **Durée très brève** des dépôts

✓ *Ex: turbidites: unité géologique* composée d'une succession de roches sédimentaires mises en place à la suite d'un écoulement (**avalanche**) de sédiments le long du talus sous-marin, entaillant le talus formant des canyons.

✓ Dépôts organisés, **granoclassés en séquence de Bouma**

Régime de faible turbulence

Régime hydrodynamique intermédiaire

Régime hydrodynamique très turbulent



Argiles et silts

Sables fins, lités

Sables moyens

Sables grossiers

1 à 10 m

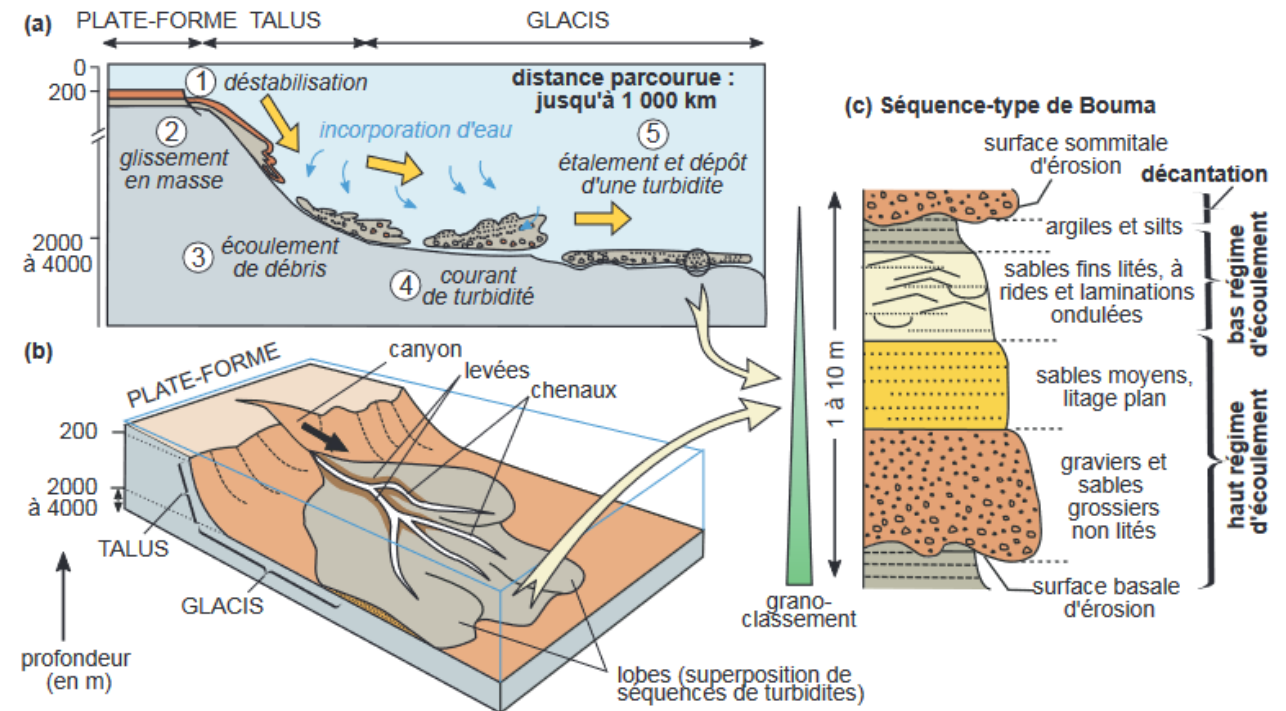
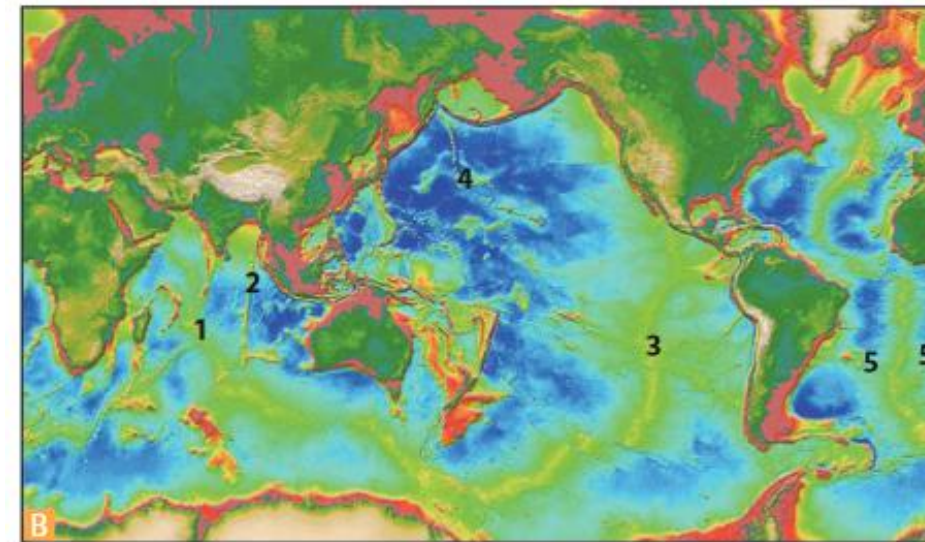
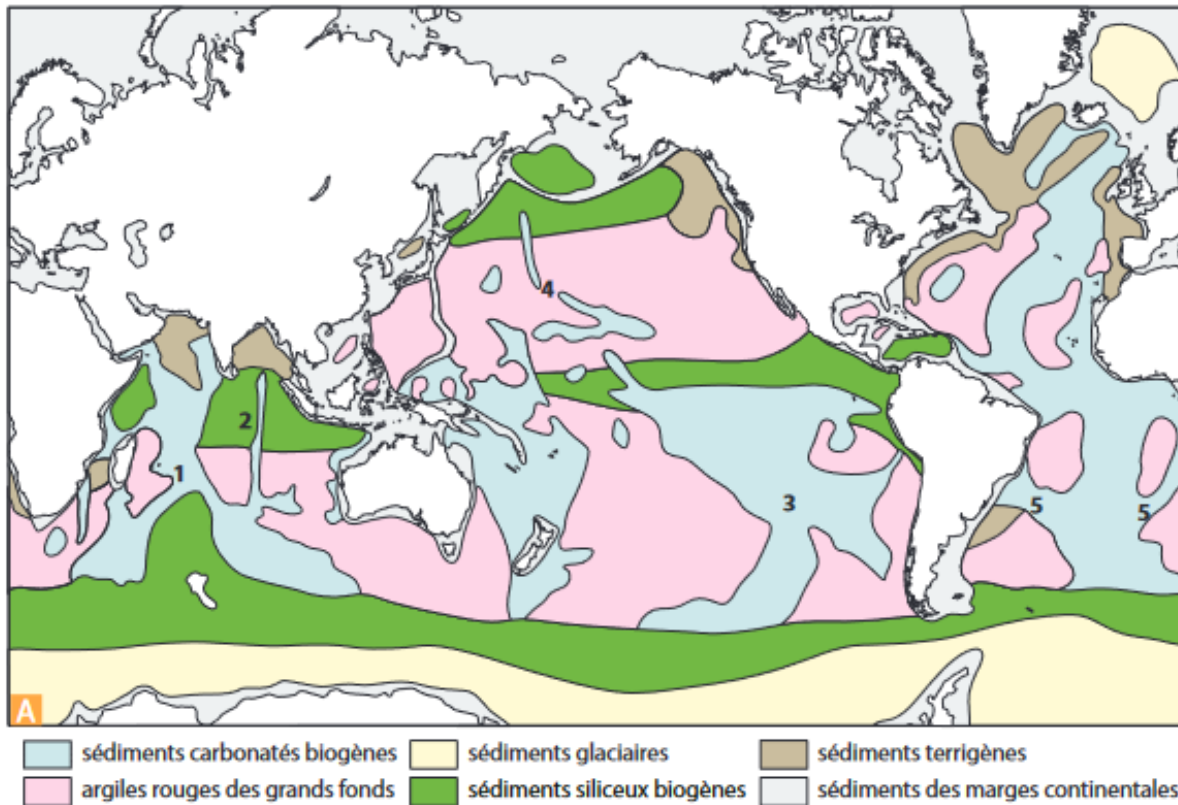


Figure 26.6 (a) Mécanismes et conséquences d'une avalanche sous-marine (ou écoulement gravitaire). (b) Creusement de canyon et formation de cône sous-marin par des courants de turbidité. (c) Organisation verticale d'une séquence-type de Bouma montrant un granoclassement et des figures basales ou sommitales d'érosion.

Complexe turbiditique à l'embouchure d'un canyon sous-marin. (Source Dunod, ed.2021)

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE

D. EN DOMAINE MARIN DISTAL : LA SÉDIMENTATION DÉTRITIQUE ABYSSALE



- 1 - Point triple des dorsales indiennes et ride de Carlsberg.
- 2 - Ride de 90° Est.
- 3 - Point triple des dorsales pacifiques et de la dorsale du Chili.
- 4 - Alignement Hawaii - Chaîne de l'Empereur
- 5 - Rides du Rio Grande et de Walvis.

Figure 32.8 Comparaison de la topographie et de la sédimentation océanique (explications dans le texte).

A. Carte de répartition des principaux types de sédiments dans les océans actuels (modifié d'après Davies et Gorsline, 1976 et Jenkyns, 1986).

B. Carte topographique (bathymétrique) des fonds marins.

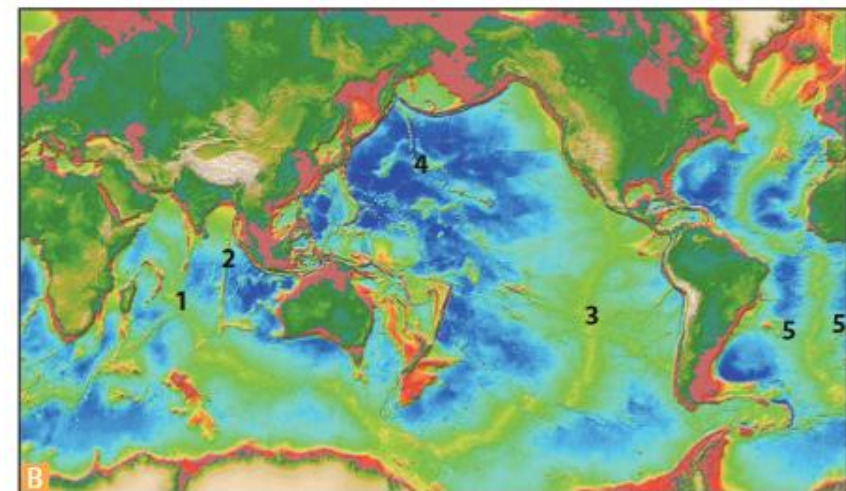
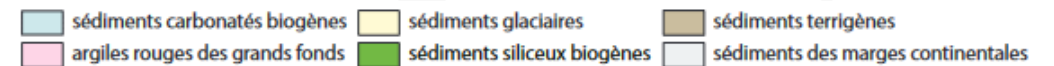
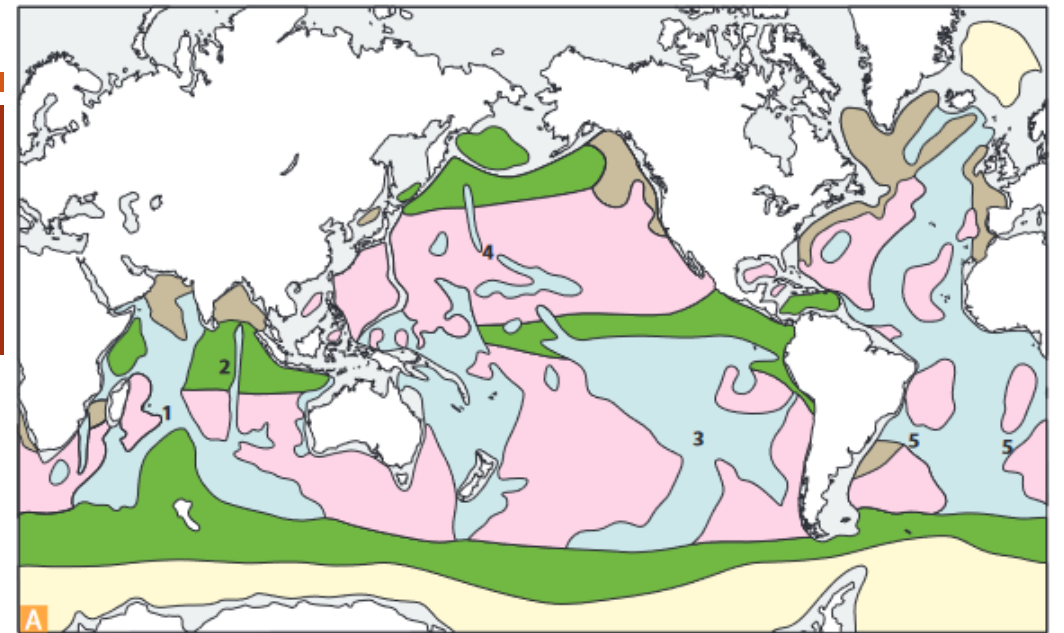
Carte de répartition des principaux types de sédiments (dans Renard, 2018)

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE

D. EN DOMAINE MARIN DISTAL : LA SÉDIMENTATION DÉTRITIQUE ABYSSALE



- **Sédiments de marge** → à proximité des continents plus spécifiquement aux débouchés des grands fleuves mondiaux
- **Sédiments glaciaires** → au large des continents en position polaire, recouverts de glace
 - ✓ Ex: Antarctique et Groenland
- **Argiles rouges** → grandes profondeurs (**plus de 5 000 m**)
 - sédimentation d'argile détritique provenant de l'érosion des continents : leur agglomération permet leur sédimentation à de telles profondeurs
 - néoformées à partir d'éléments libérés par l'hydrothermalisme au niveau des dorsales ou des points chauds
 - **vitesse de sédimentation est très faible** (2.10^{-4} mm/an)
 - Effet dilution par d'autres apports (carbonatés ou siliceux principalement) à plus faible profondeur, elles sont diluées
- **Sédiments siliceux biogènes** localisés en **trois ceintures**
 - ✓ Ex: deux polaires et une équatoriale
- **Sédiments carbonatés biogènes** → **zones les moins profondes de l'océan**
 - ✓ Ex: dorsale, îles volcaniques...



- 1 - Point triple des dorsales indiennes et ride de Carlsberg.
- 2 - Ride de 90° Est.
- 3 - Point triple des dorsales pacifiques et de la dorsale du Chili.
- 4 - Alignement Hawaii - Chaîne de l'Empereur
- 5 - Rides du Rio Grande et de Walvis.

Figure 32.8 Comparaison de la topographie et de la sédimentation océanique (explications dans le texte).

A. Carte de répartition des principaux types de sédiments dans les océans actuels (modifié d'après Davies et Gorsline, 1976 et Jenkyns, 1986).

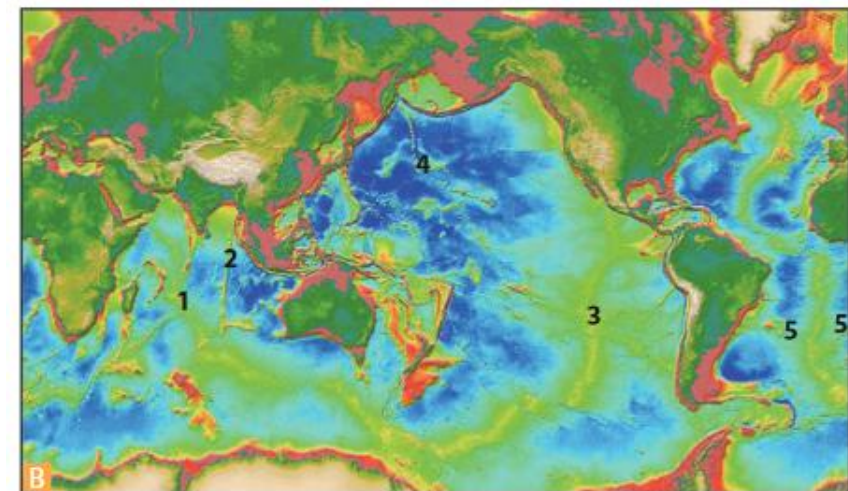
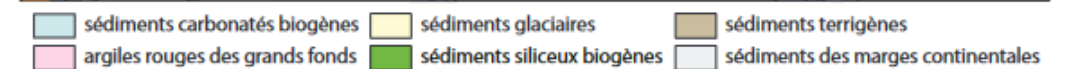
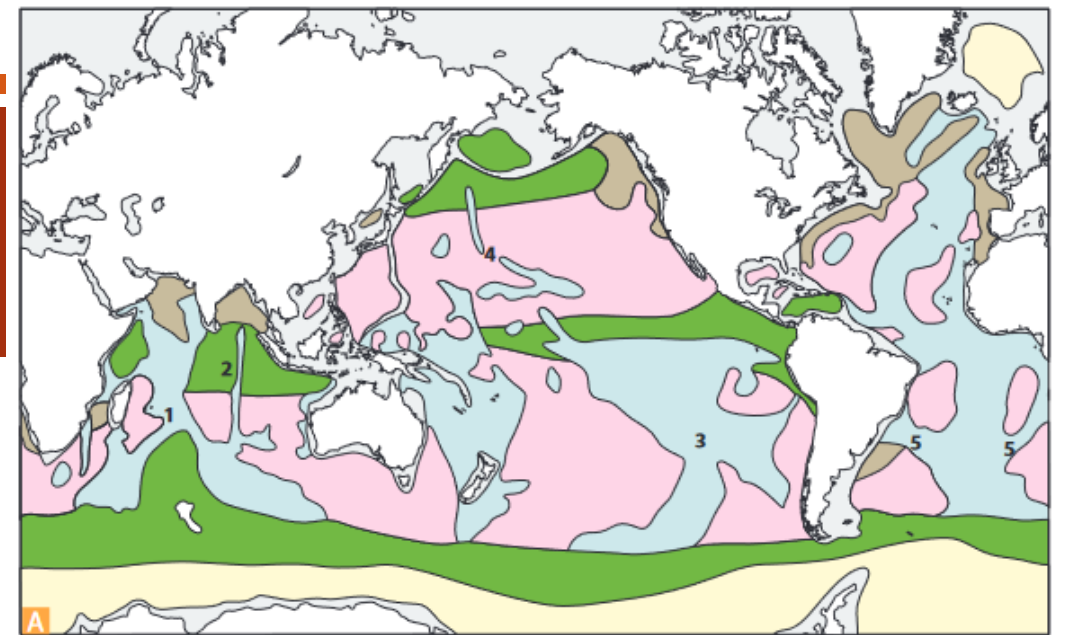
B. Carte topographique (bathymétrique) des fonds marins.

II. LA SEDIMENTATION DETRITIQUE TERRIGENE

D. EN DOMAINE MARIN DISTAL : LA SÉDIMENTATION DÉTRITIQUE ABYSSALE



- **Trois paramètres** contrôlent répartition générale des sédiments :
 - **Distance à la côte** (= source = lieu des apports détritiques)
 - **Profondeur du plancher océanique** (position différente des argiles rouges et des carbonates)
 - **Latitude** = climat (ceintures siliceuse et dépôts glaciaires).



- 1 - Point triple des dorsales indiennes et ride de Carlsberg.
- 2 - Ride de 90° Est.
- 3 - Point triple des dorsales pacifiques et de la dorsale du Chili.
- 4 - Alignement Hawaii - Chaîne de l'Empereur
- 5 - Rides du Rio Grande et de Walvis.

Figure 32.8 Comparaison de la topographie et de la sédimentation océanique (explications dans le texte).

A. Carte de répartition des principaux types de sédiments dans les océans actuels (modifié d'après Davies et Gorsline, 1976 et Jenkyns, 1986).

B. Carte topographique (bathymétrique) des fonds marins.

III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

- Différentes **formes cristallines** du carbonate de calcium CaCO_3 :

- **Calcite** (CaCO_3) → réseau cristallin de type rhomboédrique
- **Aragonite** (CaCO_3) → réseau cristallin de type orthorhombique
- **Dolomite** $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ → réseau cristallin de type rhomboédrique



Calcite

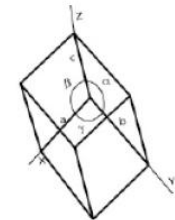


Aragonite



Dolomite

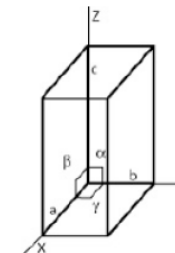
Rhomboédrique



$$a=b=c$$
$$\alpha=\beta=\gamma \text{ tous } \neq 90^\circ$$

Calcite,
Corindon, ...

Orthorhombique



$$a \neq b \neq c$$
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Olivine, Opx,
Aragonite,
Stibnite, ...

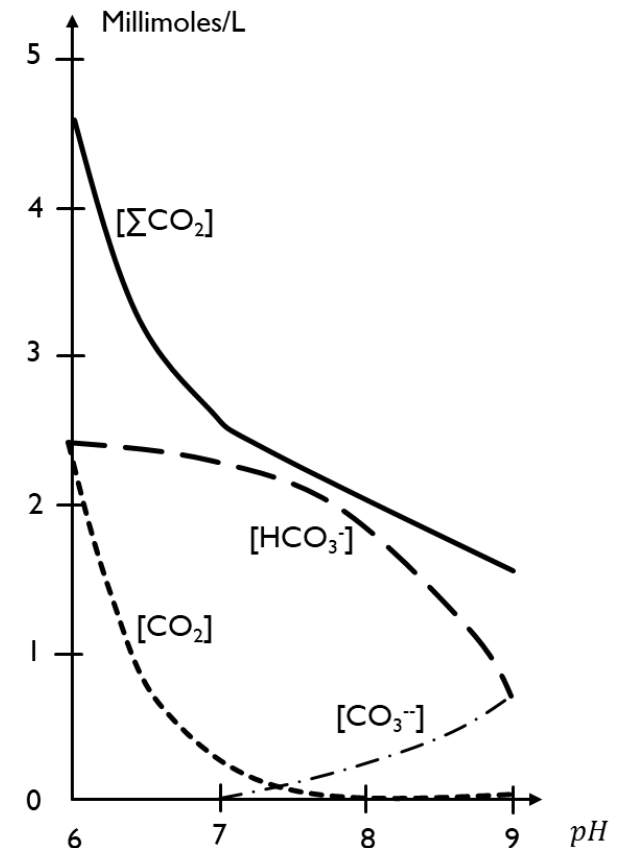
III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

I. Les conditions de la précipitation des carbonates

I.1. Rôle de l'équilibre CO_2 – bicarbonates (hydrogénocarbonates) - carbonates

- $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
 - Importance du pH (conditionne les taux des différentes formes du CO_2)
 - Importance de la respiration et de la photosynthèse
 - Importance de la teneur en CO_2 : à l'échelle des temps géologiques, la teneur en CO_2 des océans est en relation avec l'évolution de sa teneur atmosphérique



Variations des teneurs des différentes formes du CO_2 (gaz carbonique libre, bicarbonates, carbonates et gaz carbonique total) en fonction du pH, à 20°C et à la pression atmosphérique, dans une eau de mer de chlorinité 19‰ (d'après Sverdrup et al. 1993)

III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

1. Les conditions de la précipitation des carbonates

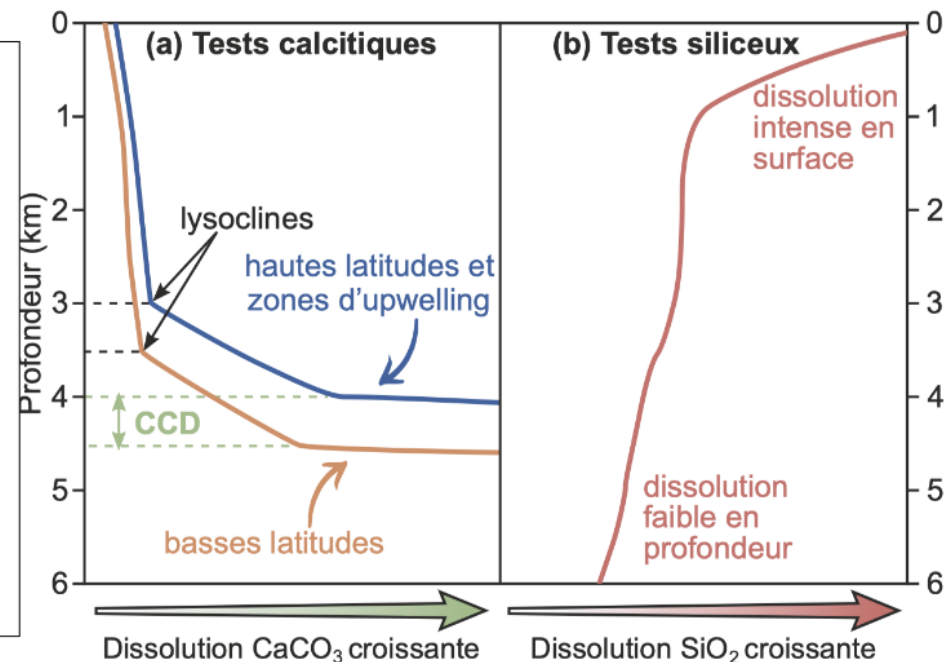


1.2. Importance de la saturation des océans en CaCO_3

- $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- **Au-dessus de la CCD** (Calcite Compensation Depth): océan sursaturé en CaCO_3
 - ⇒ Précipitation des carbonates
- **Au-dessous de la CCD** (Calcite Compensation Depth): océan sous-saturé en CaCO_3
 - ⇒ dissolution des carbonates
- A faible latitude (équateur): $T^\circ\text{C}$ plus chaude → moins de CO_2 dissous → favorise sens 1
 - ⇒ CCD plus profonde à faible latitude
- A haute latitude/ zone upwelling : $T^\circ\text{C}$ plus froide → plus de CO_2 dissous → favorise sens 2
 - ⇒ CCD moins profonde
- **Lysocline = profondeur** à partir de laquelle **dissolution des carbonates augmente brutalement**

La lysocline est la profondeur à partir de laquelle la dissolution des carbonates augmente brutalement

La profondeur de compensation de la calcite (ou CCD, calcite compensation depth), est la limite au-delà de laquelle tout le CaCO_3 est dissous



L'opale siliceuse, peu stable dans des conditions de faible pression et forte température, se dissout plus fortement en surface qu'en profondeur

Évolution de la dissolution des tests calcitiques (a) et siliceux (b) en fonction de la profondeur des eaux océaniques

III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

1. Les conditions de la précipitation des carbonates



1.2. Importance de la saturation des océans en CaCO₃

- $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
 - 1
 - 2
- A faible latitude (équateur): T°C plus chaude → moins de CO₂ dissous → favorise sens 1
⇒ CCD plus profonde à faible latitude (5 km)
- A haute latitude/ zone upwelling : T°C plus froide → plus de CO₂ dissous → favorise sens 2
⇒ CCD moins profonde (3,5 km)



La profondeur de compensation des carbonates (PCC = CCD) est variable d'une zone océanique à une autre.

La répartition des sédiments pélagiques anciens montre que la profondeur de compensation des carbonates a fluctué au cours des temps géologiques en raison de modifications de la température des océans (eaux plus froides lors des périodes glaciaires du Quaternaire par exemple, favorisant la solubilisation des carbonates et inversement lors des périodes interglaciaires) et de leur teneur en CO₂ dissous (une accélération de l'activité des dorsales conduit à une augmentation de la teneur en CO₂).

Évolution de la dissolution des tests calcitiques (a) et siliceux (b) en fonction de la profondeur des eaux océaniques

III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

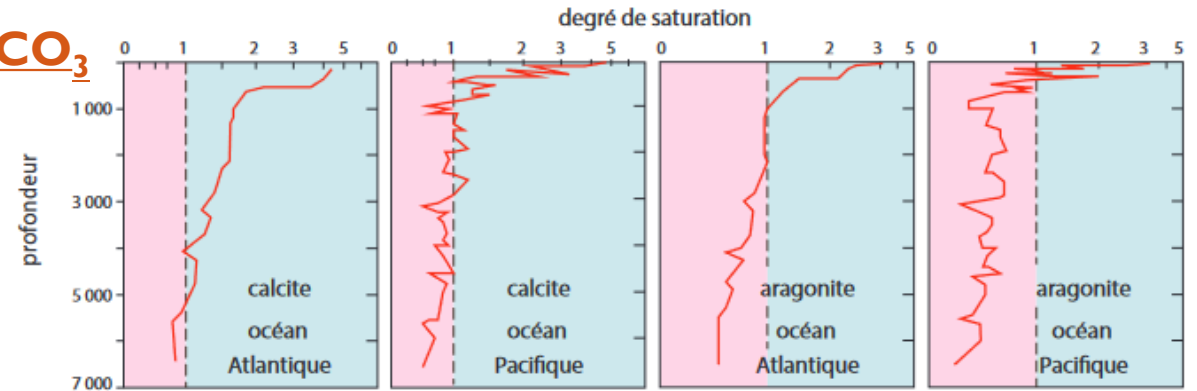
A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

I. Les conditions de la précipitation des carbonates

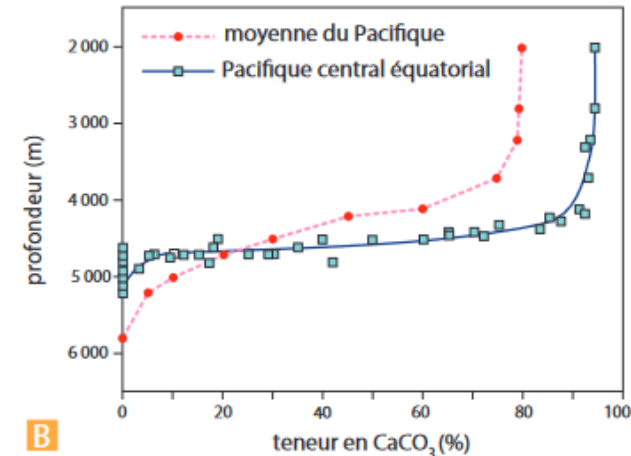


I.2. Importance de la saturation des océans en CaCO_3

- $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- Eaux (Pacifique et Atlantique) **sursaturées en surface** → formation des **tests des organismes marins** (pélagiques)
 - ⇒ Taux de dissolution nul en surface et de 100% à 5 000 m pour la calcite dans l'Atlantique
- Calcite (CCD) Atlantique vs Pacifique:
 - plus grande productivité planctonique → CCD plus profonde
 - Pacifique: eaux + vieilles, + chargées en CO_2 (plusieurs dizaines à plusieurs centaines d'années en profondeur par la circulation thermohaline) → favorise sens 2 → CCD moins profonde
- Aragonite vs Calcite pour un même océan:
 - Aragonite plus facilement dissoute que calcite ($\text{ACD} < \text{CCD}$)



A



B

Figure 32.1

A. Évolution du degré de saturation de l'eau de mer en CaCO_3 .

B. Évolution de la teneur en CaCO_3 des sédiments dans l'océan Pacifique.

Saturation en CaCO_3 des océans en fonction de la profondeur (dans Renard)

III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

I. Les conditions de la précipitation des carbonates

I.2. Importance de la saturation des océans en CaCO_3

- $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- Axe de dorsale: faible subsidence thermique = faible bathymétrie → précipitation des carbonates (sens 1)
- Eloignement de la dorsale: subsidence thermique → passage sous la CCD
 - ⇒ Fin de la sédimentation carbonatée (sens 2)
 - ⇒ Uniquement présence des argiles rouges et boues à radiolaires (tests siliceux)
 - ✓ Faible dissolution de silice en profondeur
 - ✓ Boues argileuses ne « s'expriment » qu'en absence des boues calcaires et siliceuses
- Faible latitude = équateur → forte productivité phytoplanctonique (sens 1 favorisé) + eau plus chaude (CO_2 moins dissous) → sens 1 favorisé
 - ⇒ CCD plus profonde

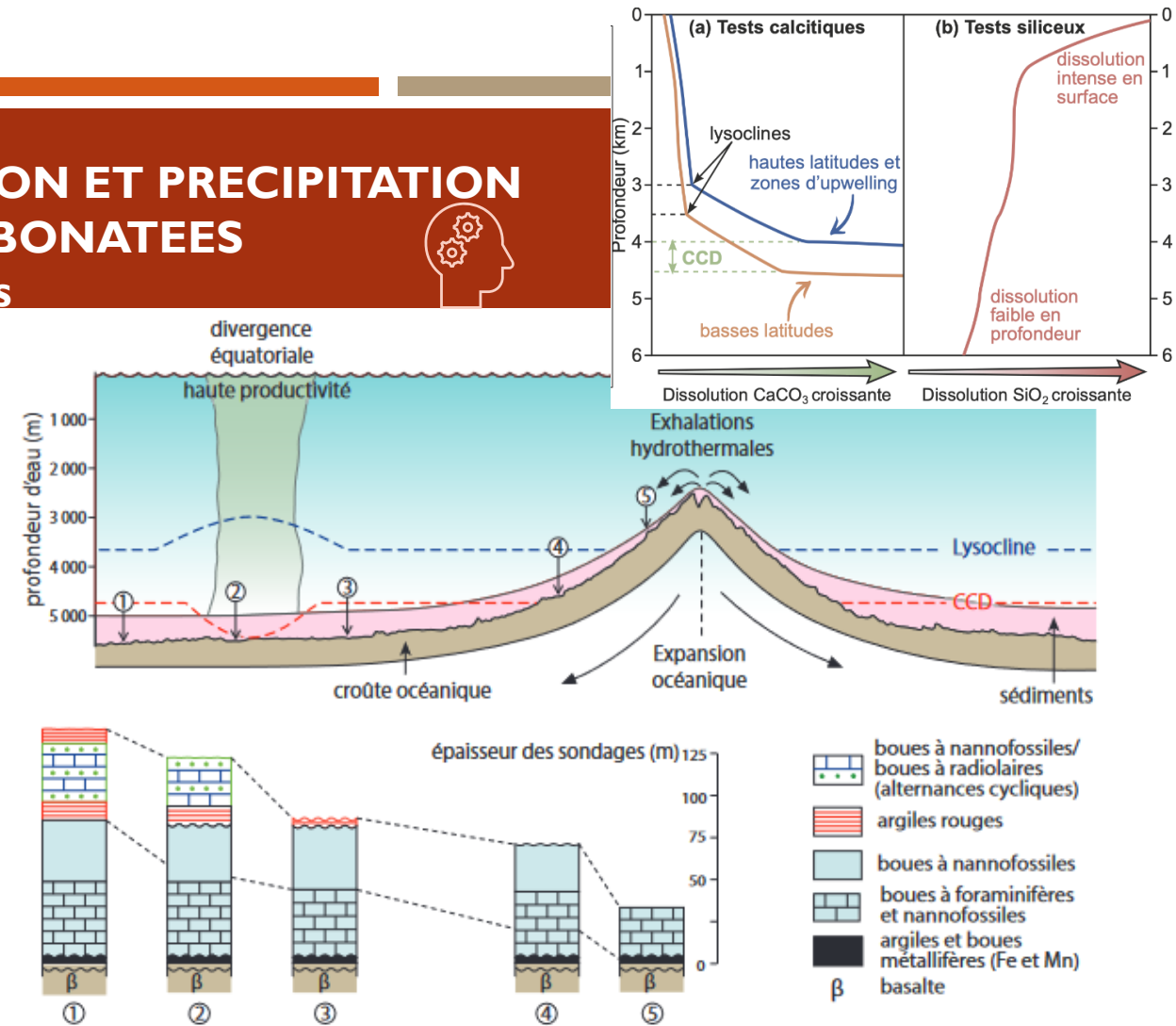


Figure 32.11 Évolution des dépôts sédimentaires océaniques en fonction de la mobilité de la lithosphère.

Au site 5, au-dessus du seuil de compensation des carbonates (CCD), se déposent des boues à foraminifères et nannofossiles calcaires. Au site 4, le passage sous la lysocline du fait de la subsidence induit une raréfaction des foraminifères (boues à nannofossiles). Les argiles rouges se déposent au site 3 sous la CCD. Le passage dans la zone de haute productivité équatoriale (site 2) se marque par un approfondissement de la CCD et par un retour des faciès biogènes carbonatés ou siliceux (radiolaires). Le retour des argiles rouges au site 1 indique la sortie de la zone équatoriale et la remontée de la CCD (voir fig. 7.8).

III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

I. Les conditions de la précipitation des carbonates



I.3. Importance des êtres vivants pour la précipitation des carbonates

- $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- CO_2 moins soluble dans eaux chaudes → précipitation dans des eaux chaudes et agitées
- **Essentiel de la précipitation de carbonates facilitée par l'activité biologique:**
 - **précipitation chimique indirecte:** photosynthèse (absorbe CO_2 favorise sens 1)
 - ✓ Ex: stromatolithes actuels et fossiles (3,5 Ga): treillis de Cyanobactéries associées à des algues en surface (piège particules sédimentaires + cimentation carbonatée) → en dessous couches solides: laminite cyanobactérienne
 - **Production de coquilles ou tests carbonatés par des organismes** → biominéralisation
 - ✓ espèces contrôlent le type de cristal qui précipite (calcite, aragonite ou parfois les deux)

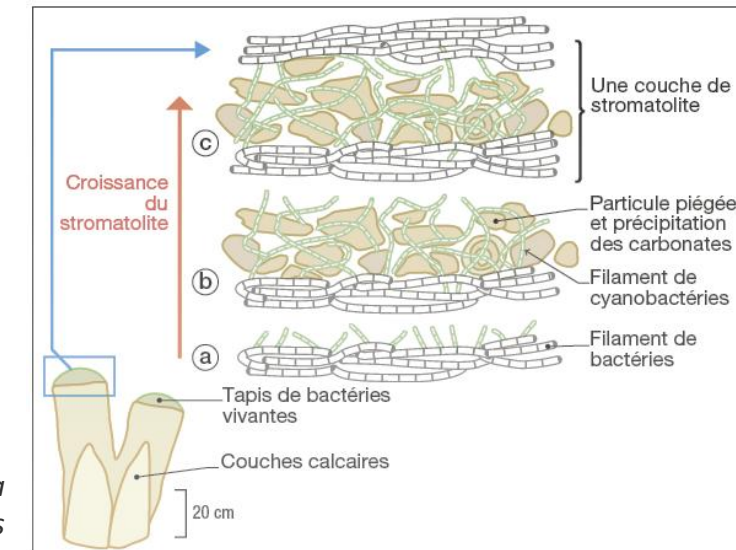


Colonnes stromatolithiques datant du Protérozoïque (2 Ga)
Source - © 2006 P.A. Bourque, Univ. Laval (Québec)

Processus chimiques à l'origine de la croissance des stromatolithes
Les éléments a et b présentent la croissance verticale des filaments de cyanobactéries le jour, avec piégeage de sédiments et précipitation des carbonates.



Stromatolithes dans la baie des requins (Australie)



c présente la croissance horizontale des filaments d'autres bactéries la nuit et fixation des particules (d'après planet-terre.ens-lyon.fr)

III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

2. La sédimentation carbonatée néritique : sédimentation de plate-forme

2.1. Les stromatolithes

- **Stromatolithes vivant dans des ruisseaux du massif du Jura**



Secteur à stromatolithes dissymétriques, dont la croissance a été rendue directionnelle par le courant du ruisseau qui coule du coin supérieur gauche de l'image vers le coin inférieur droit



*Concrétion stromatolithique émergeant du ruisseau du Dard et commençant à être colonisée par des herbes
La structure en lamines concentriques se voit très bien sur ce zoom. Source: Pierre Thomas 2015*

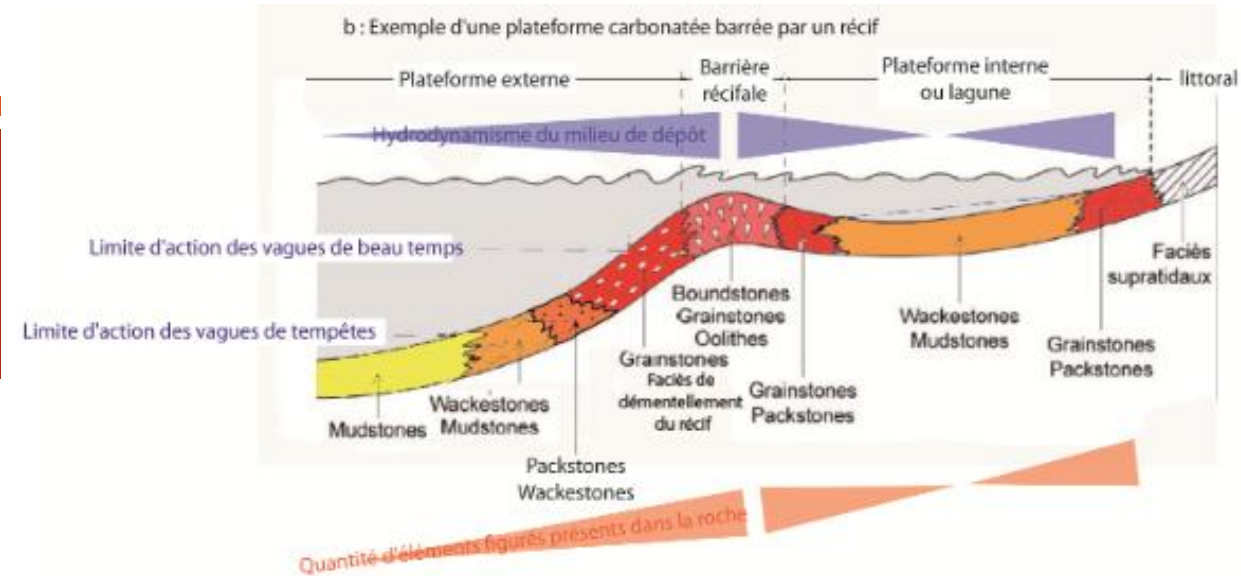
III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

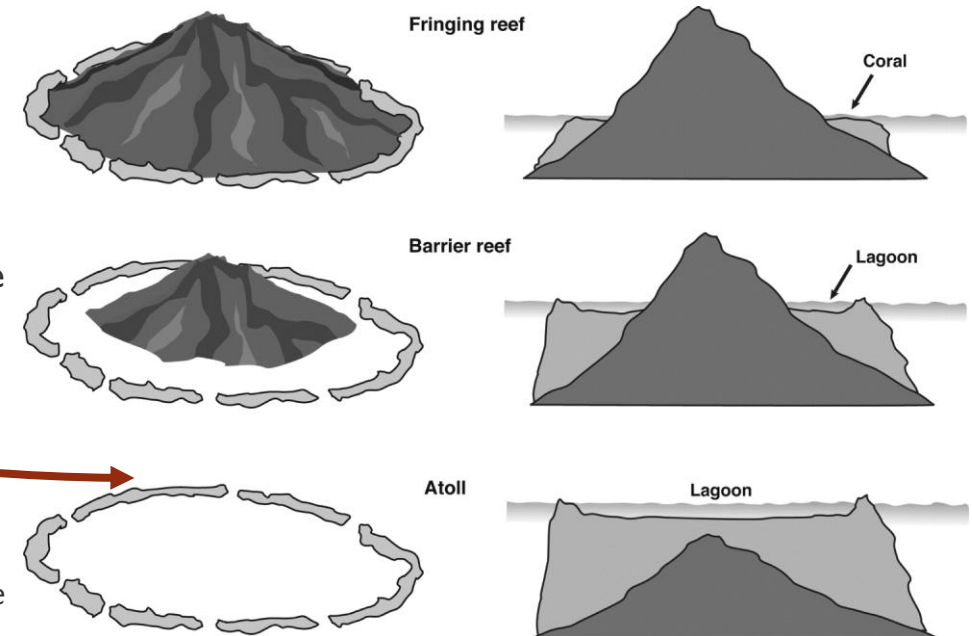
2. La sédimentation carbonatée néritique : sédimentation de plateforme

2.2. Les récifs des coraux

- Conditions de vie des coraux
 - **environnement chaud** ($T^{\circ}\text{C}$ entre 18 et 36°C)
 - salinité comprise entre 22 et 40 ‰
 - ⇒ **symbiose** avec des **algues photosynthétiques (zooxanthelles par ex)** → **production de calcite**
 - ⇒ Profondeur de développement limitée **< à 15m.**
- Deux types de récifs
 - **Plateformes** au sens strict
 - ✓ Ex: *plateau de Floride*
 - **Hauts fonds ou bancs carbonatés** = plateformes isolées au sein de l'océan profond, coupées des apports continentaux :
 - ✓ Ex: *Grand banc des Bahamas*
- Dans les deux cas, de part et d'autre du récif :
 - **Boues calcaires dans les zones internes** → **milieu non agité**
 - **Oolithes ($0,2\text{ mm} < \varnothing < 1\text{ mm}$)** au niveau des marges → **milieu agité**
 - ✓ = **grains sphériques** formés d'un **nucléus** de nature quelconque (quartz, fragment de coquille etc...) et de **couches concentriques** en nombre variable.



Récif corallien de plateforme



Du récif frangeant autour de l'île volcanique à l'atoll : la subsidence proposée par Darwin en 1842

III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

2. La sédimentation carbonatée néritique : sédimentation de plate-forme

2.2. Les récifs des coraux

- Les récifs fossiles :
- ✓ Exemple de l'Urgonien : faciès du Crétacé inférieur → ville d'Orgon (Alpilles près de Cavailon)
- Calcaires urgoniens = **récifs formés de rudistes** (les plus fréquents au Crétacé)
- actuellement sur la plate-forme du Mexique



Photographie : Romain Bouchet Bert-Manoz

Détail de la fontaine à rudistes du Castellet (Var) Gros plan sur des Hippurites sp. Source - © 2008 Romain Bouchet Bert-Manoz

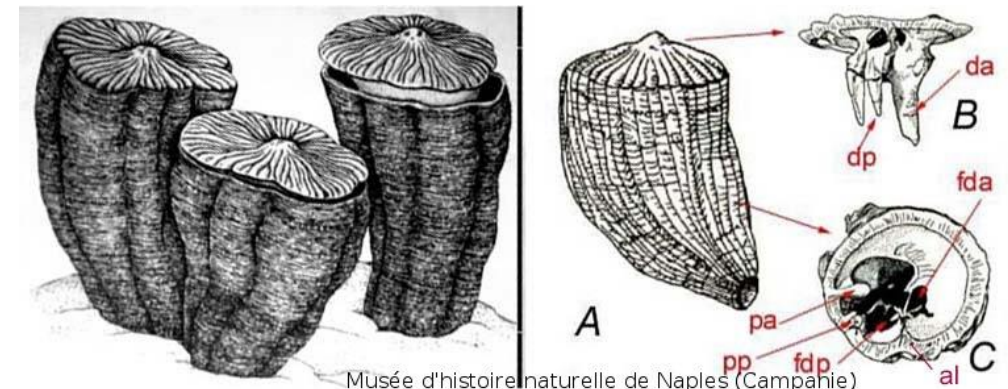


Calcaire urgonien du Grand Veymont (Vercors) (S. Dalaine)

Reconstitution d'Hippurites sp.

Source - © 2008 Musée central d'histoire naturelle de Naples, modifié

À gauche, reconstitution de 3 Hippurites sp. en position de vie. À droite, schémas d'une Hippurite sp. et de la structure de ses valves. A : animal entier. La valve droite, fixée dans le substratum, a la forme d'un « cornet de glace ». La valve gauche forme un opercule. B : schéma de la valve gauche. da = dent antérieure, db = dent postérieure C : schéma de la valve droite vue de dessus. pa = pilier antérieur, pp = pilier postérieur, fda = fosse (sillon) de la dent antérieure, fdp = sillon de la dent postérieure, al = arête ligamentaire.



Musée d'histoire naturelle de Naples (Campanie)

III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

2. La sédimentation carbonatée néritique : sédimentation de plate-forme

2.3. Accumulation de squelettes

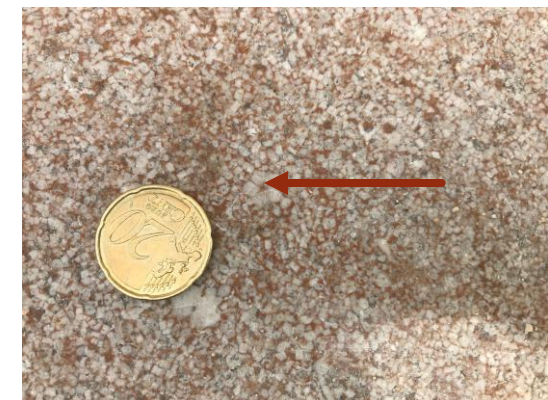
- Nombreuses roches = accumulation de squelettes organiques
 - **producteurs benthiques** (du grec benthos = le fond) qui vivent sur le fond de l'océan
 - calcite ou aragonite
 - Gastéropodes
 - ✓ Ex: Cérithes (calcaire du lutétien)
 - Céphalopodes
 - ✓ Ex: Ammonites (disparues à la crise KT, le Nautilus et les Bélemnites)
 - Brachiopodes
 - Echinodermes : oursins, crinoïdes par exemple
 - ✓ Ex: calcaire à entroques (socle de statue de Buffon entrée du jardin des plantes)



Les calcaires à gryphées, ammonites et autres fossiles du Sinémurien (Jurassique inférieur)(Source: Pierre Thomas)



Calcaire à cérithes (lutétien)



Calcaire à entroques : socle de la statue de Lamarck (MNHN) S. Dalaine

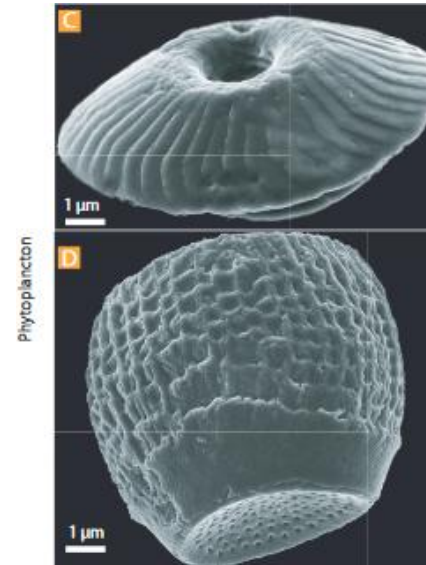
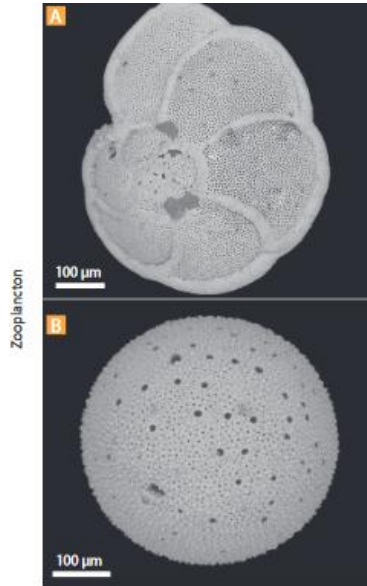
III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

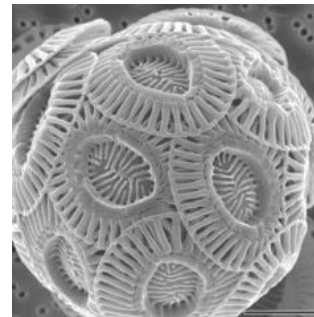
3. La sédimentation carbonatée pélagique : importance de la CCD

sédimentation pélagique : dépôt lent, à travers la colonne d'eau, de particules biochimiquement produites en surface

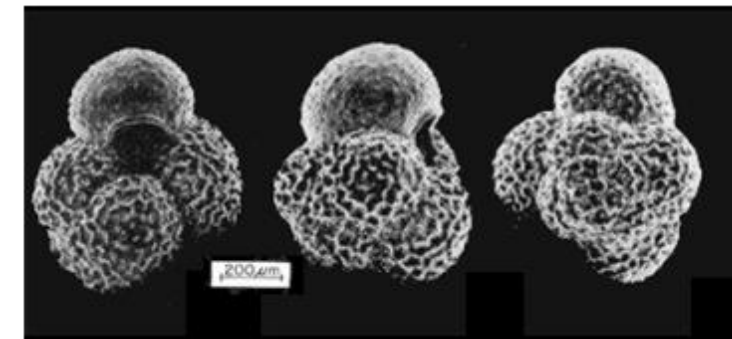
- Organismes formant des **tests calcaires** à l'origine de la sédimentation pélagique:
- Foraminifères :**
 - **Unicellulaires (taille 10 µm à 8 cm)**
 - Presque exclusivement marins
 - **Présents dans toutes les mers du globe** (cf fossile biostratigraphique avec datation ¹⁴C)
 - Très sensibles aux conditions environnementales (T°C, salinité ...) → reconstitution de paléoenvironnements
 - **Squelette appelé: test** → reconnaissance des espèces
 - Surtout **planctoniques: phytoplancton et zooplancton**
 - ✓ 38 000 espèces fossiles
 - ✓ 10 000 à 20 000 espèces actuelles



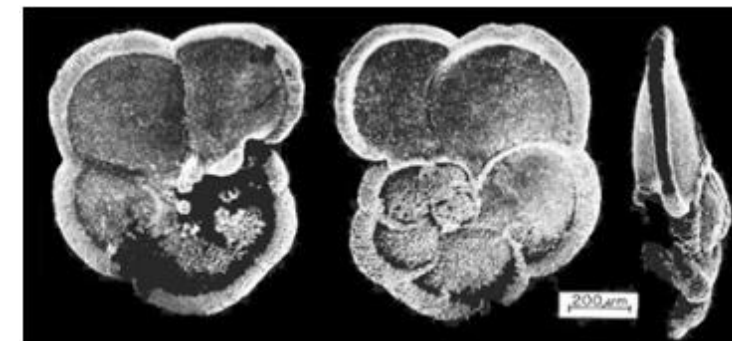
Foraminifères planctoniques à tests carbonatés au MEB (Photos G. Roussele, A et M. de Rafélis)



Les coccolithophoridés, présents sur Terre depuis plus de 200 Millions d'années, sont des algues unicellulaires exclusivement marines. Ici *Emiliania huxleyi* présente dans toutes les mers hors zone équatoriale.



Globigerina rubescens: espèce essentiellement tropicale et subtropicale



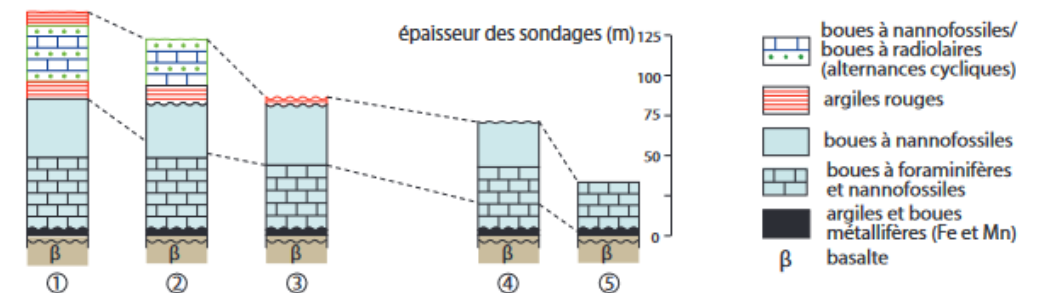
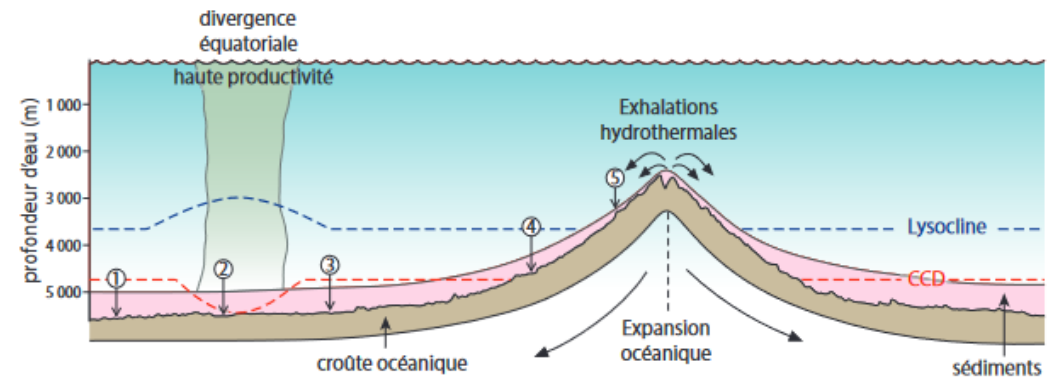
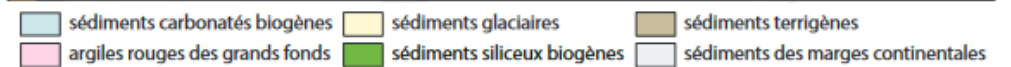
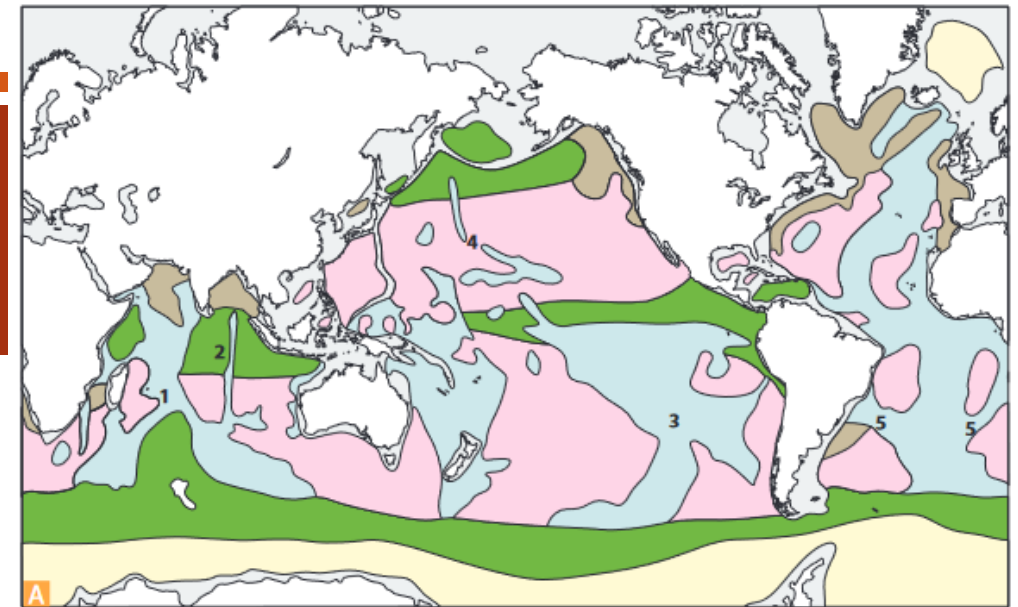
Globorotalia menardii menardii: espèce tropicale et subtropicale commune

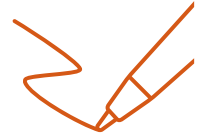
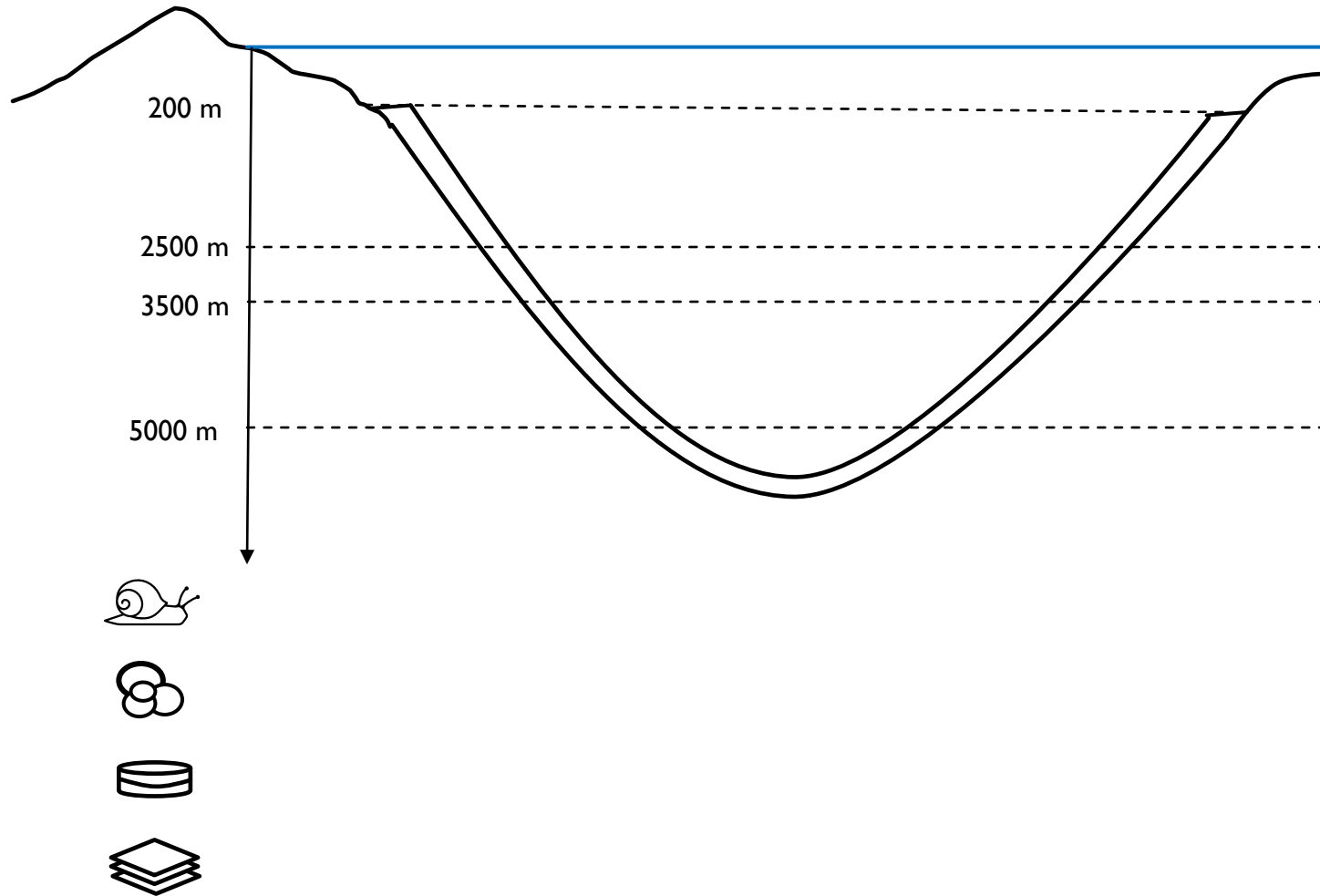
III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

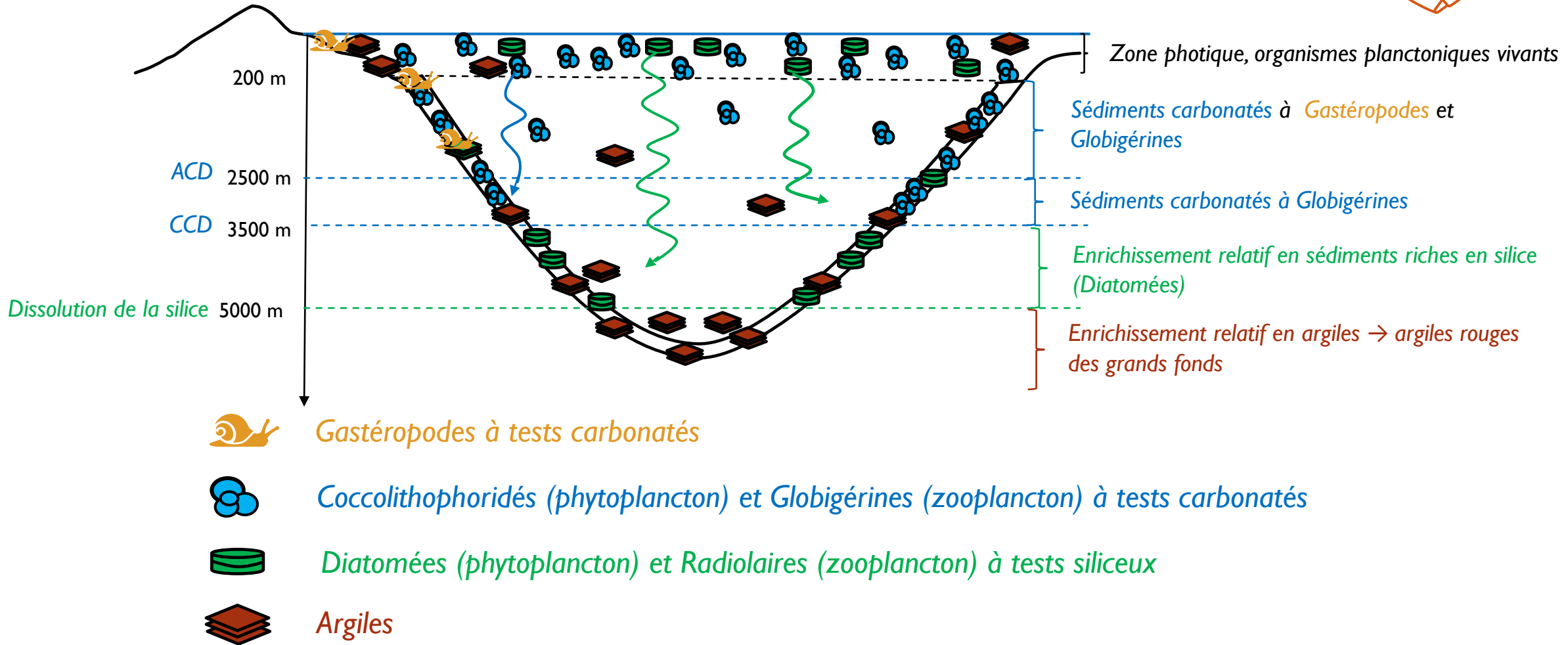
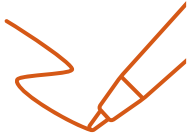
3. La sédimentation carbonatée pélagique : importance de la CCD

- Répartition actuelle des dépôts océaniques profonds :
- Dépend de **ACD** et **CCD** :
 - Au-dessus de l'ACD (2500m) → **boues carbonatées à Gastéropodes**
 - Entre ACD et CCD (4500m) → **boues carbonatées à Foraminifères** (boues à Globigérines ou à Coccolithophoridés)
 - En-dessous de la **CCD** → calcite totalement dissoute → reste les **boues siliceuses**
- ✓ A plus grande profondeur : **silice également dissoute** → domaine des **argiles des grands fonds** (origine éolienne, fluviale et cosmique)
- Dépend de la T°C: solubilité de CO₂ ↗ quand T°C ↘
- Dépend des apports terrigènes





Influence de la bathymétrie sur la nature de la sédimentation pélagique



Influence de la bathymétrie sur la nature de la sédimentation pélagique (S. Dalaine d'après M. Labrousse)

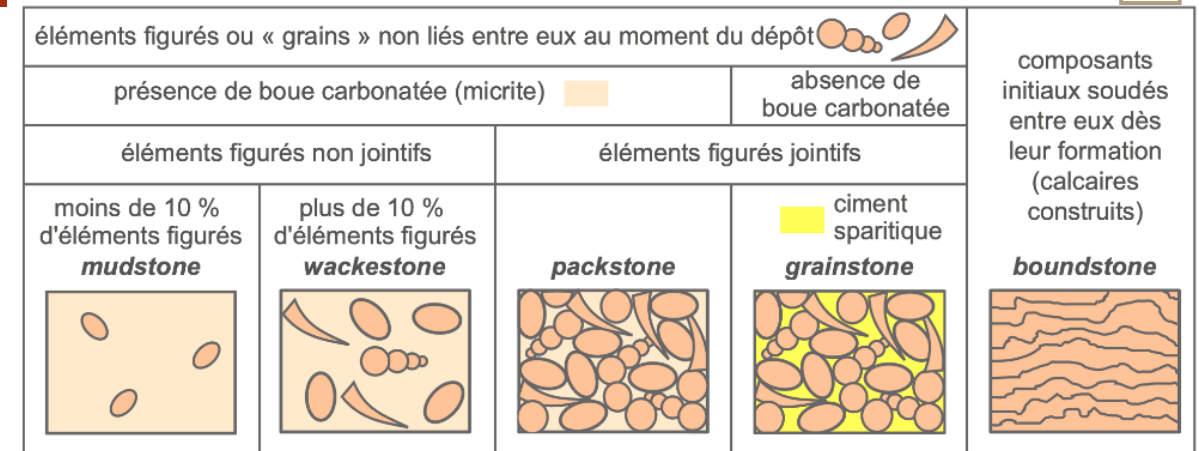
III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

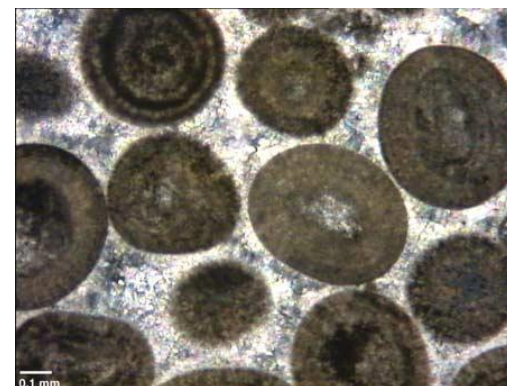
4. La classification des roches carbonatées témoigne de l'hydrodynamisme



- Roches carbonatées = **ciment ou matrice + éléments figurés** (chimiques, biogéniques, détritiques)
- **Classification de Dunham (1963) = proportions** du ciment (matrice) vs éléments figurés **texture** du sédiment
- **Hydrodynamisme → texture**
 - ✓ *Ex: hydrodynamisme important → nombreux dépôts d'éléments figurés*
- Différence entre **matrice** et **ciment**:
 - **Matrice (= micrite)** = sombre en LPA= particules très fines déposées au moment de la sédimentation → **faible hydrodynamisme**
 - **Ciment (=sparite)** = **gros cristaux** = clair en LPA= formé postérieurement aux dépôts (donc diagénétique) → **fort hydrodynamisme** (ne permettant pas le dépôt de micrite)
- Intérêt de classification de **Dunham**: identifier l'**hydrodynamisme** de l'environnement de dépôt
 - ✓ *Classification de Folk (1959): basée sur les ciments micritique vs sparitique*



Classification des roches carbonatées selon Dunham



Sparite oolithique en LPA → Grainstone



Micrite en LPA avec >10% éléments figurés → Wackestone

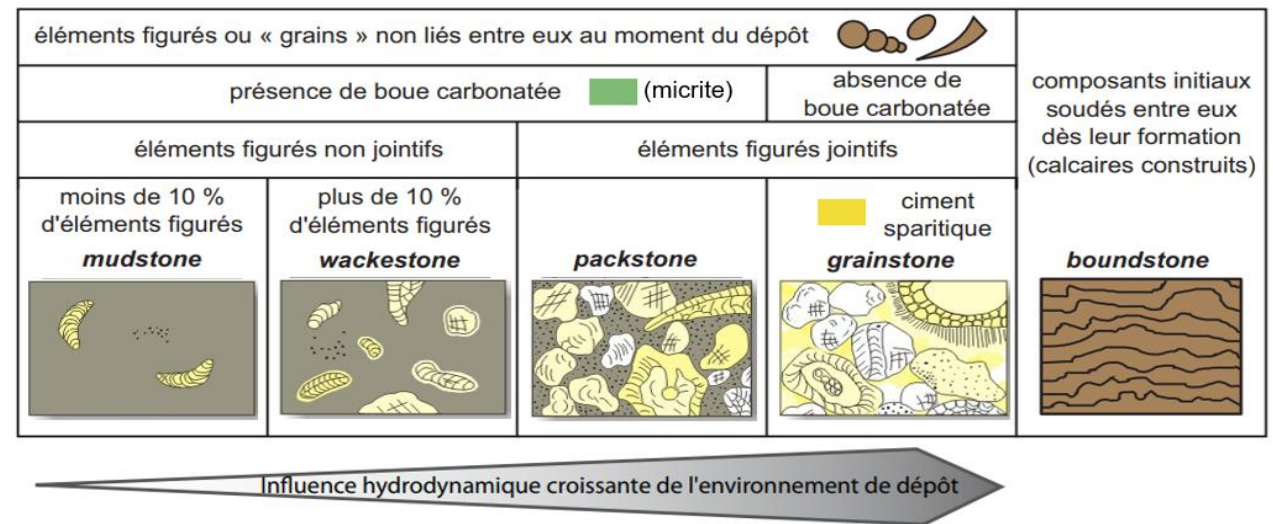
III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

4. La classification des roches carbonatées témoigne de l'hydrodynamisme



- **Classification de Dunham (1963) = proportions** du ciment (matrice) vs éléments figurés **texture** du sédiment
 - **Mudstones = boue carbonatée (matrice micritique) + <10% éléments figurés** → hydrodynamisme très faible
 - **Wackestones = boue carbonatée (micrite) + >10% éléments figurés** → hydrodynamisme faible
 - **Packstones = boue carbonatée + éléments figurés jointifs (donc nombreux)** → hydrodynamisme modéré
 - **Grainstones = ciment sparitique diagenétique (dépôts de micrite impossible car fort hydrodynamisme) + nombreux éléments figurés** → hydrodynamisme fort
 - **Boundstones: calcaires coraliens construits** → eau chaud et agitée → hydrodynamisme fort



Classification des roches carbonatées selon Dunham

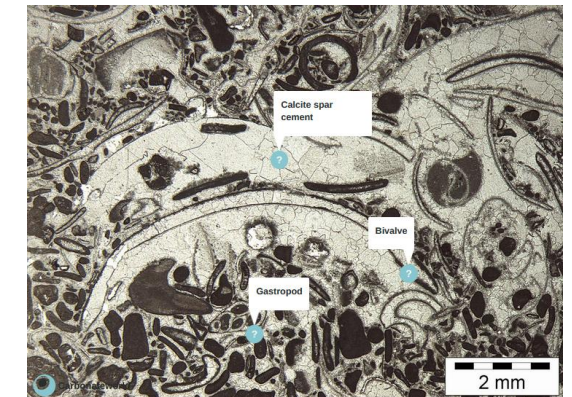
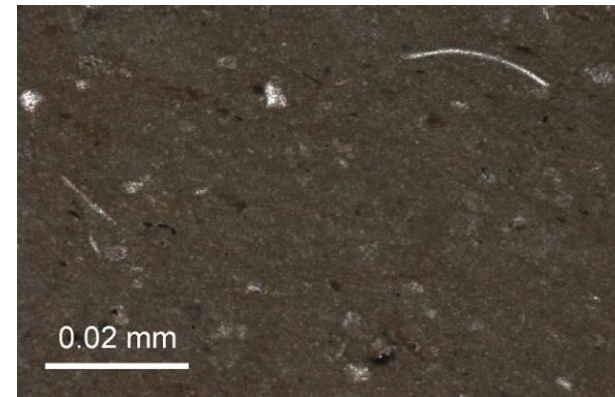
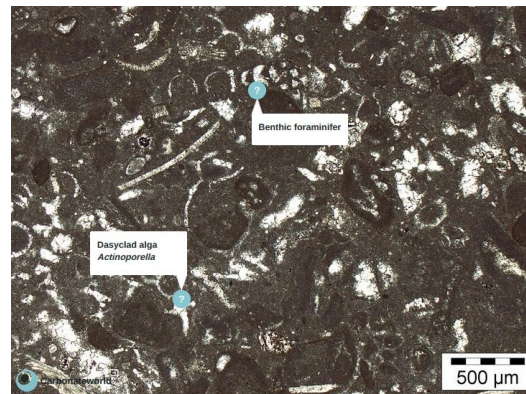
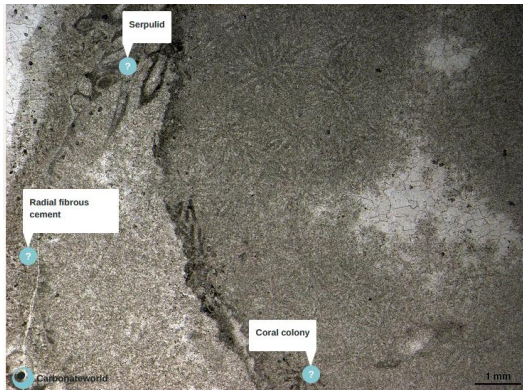
III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

4. La classification des roches carbonatées témoigne de l'hydrodynamisme



Reclasser ces images suivant un hydrodynamisme croissant

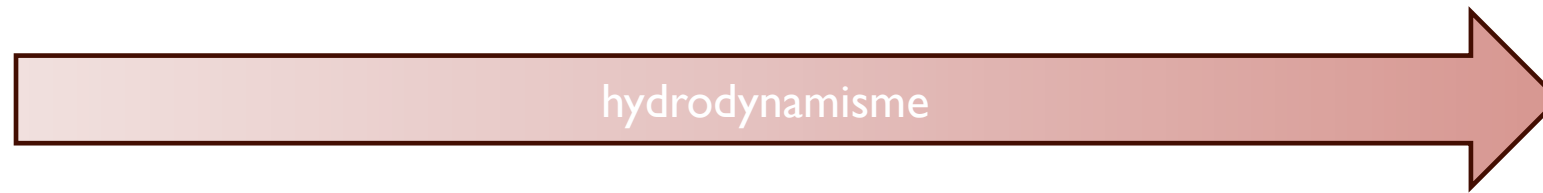


Images extraites de <https://carbonateworld.com/carbonate-atlas/carbonate-rock-classification/components/>

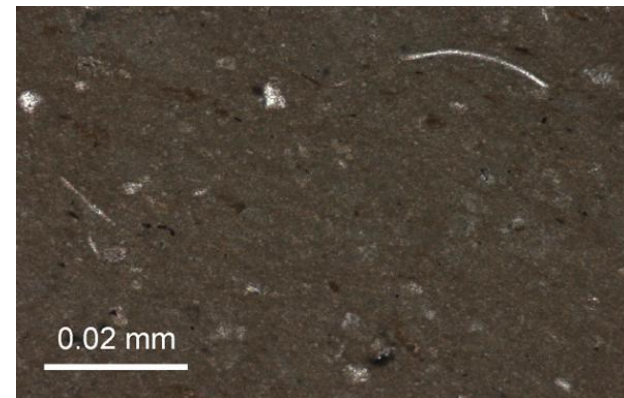
III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

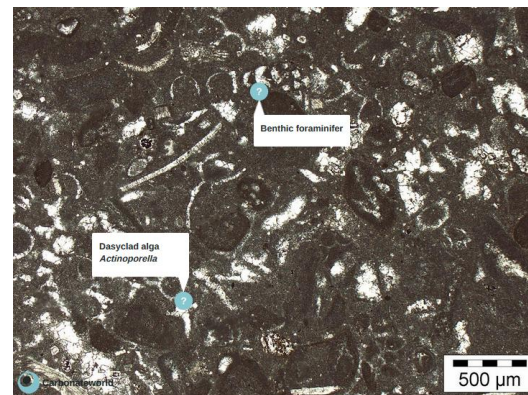
4. La classification des roches carbonatées témoigne de l'hydrodynamisme



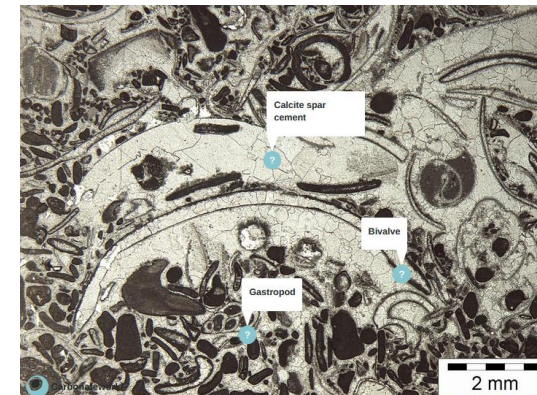
Reclasser ces images suivant un hydrodynamisme croissant



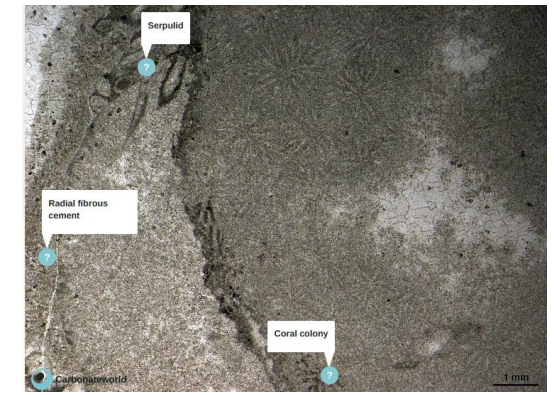
Mudstone à matrice foncée (micrite)



Packstone à matrice foncée (micrite)



Grainstone à ciment clair (sparite)



Boundstone (calcaire construit)

Images extraites de <https://carbonateworld.com/carbonate-atlas/carbonate-rock-classification/components/>

III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

A. LA BIOPRECIPITATION DES ROCHES CARBONATEES

4. La classification des roches carbonatées témoigne de l'hydrodynamisme

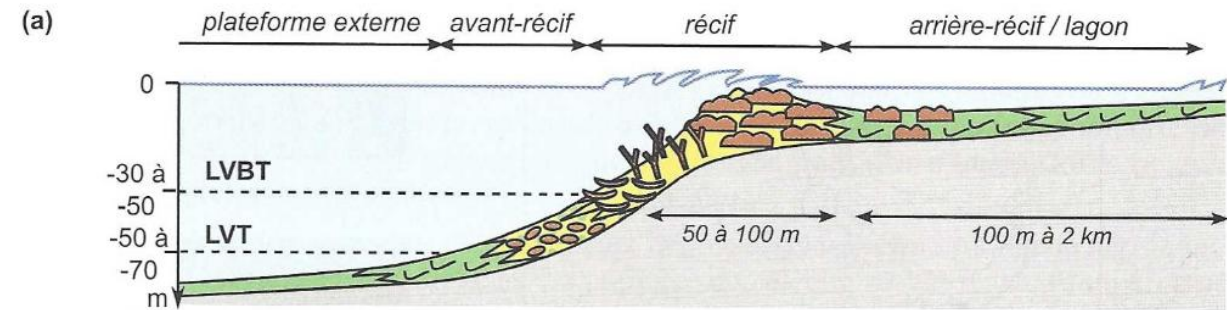


- **Classification de Dunham (1963)** et répartition des microfaciès carbonatés dans le cas d'une plateforme barrée par un récif

éléments figurés ou « grains » non liés entre eux au moment du dépôt				composants initiaux soudés entre eux dès leur formation (calcaires construits)
présence de boue carbonatée (micrite)		absence de boue carbonatée		
éléments figurés non jointifs		éléments figurés jointifs		boundstone
moins de 10 % d'éléments figurés mudstone 	plus de 10 % d'éléments figurés wackestone 	packstone 	grainstone ciment sparitique 	

Influence hydrodynamique croissante de l'environnement de dépôt

Classification des roches carbonatées selon Dunham

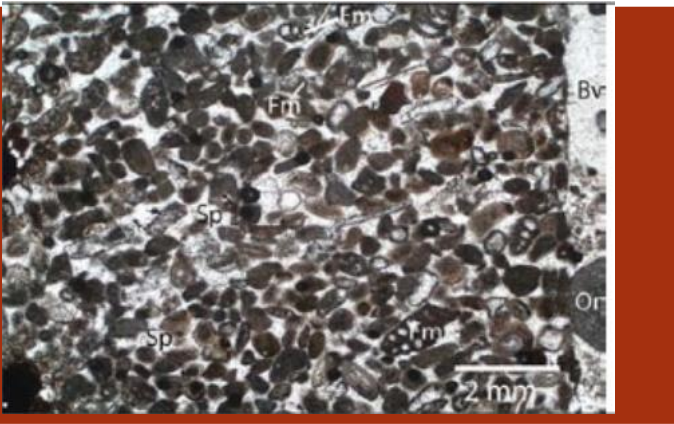
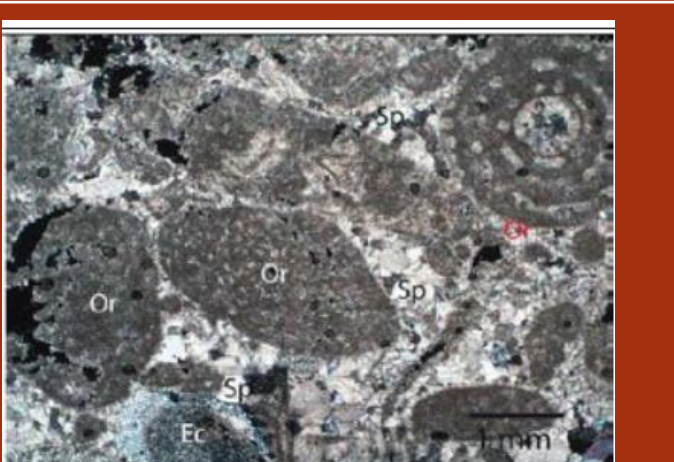
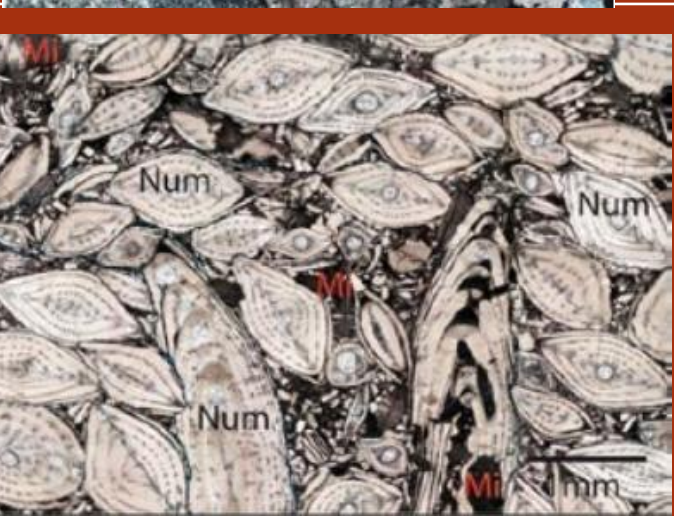


type de roche	mudstone	wackestone / mudstone	grainstone (débris)	boundstone	packstone / wackestone	mudstone / wackestone
organismes	foraminifères planctoniques échinodermes, pectens, algues rouges..		coraux, algues vertes et rouges, mollusques ...		coraux isolés, mollusques, échino- dermes, foraminifères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

Répartition des microfaciès carbonatés dans le cas d'une plateforme barrée par un récif

LVBT: limite des vagues de beau temps

LVT: limite de vagues de tempête

Photo		Texture	Famille	Nom et classification utilisée
LPNA		<p>Ciment sparitique indiqué</p> <p>Nbreux éléments figurés, jointifs →</p> <p>Hydrodynamisme fort</p> <p>Éléments figurés de types foraminifères benthiques</p>	Sparite	Grainstone dans la classification de Dunham
LPA		<p>Ciment clair en LPA → sparite</p> <p>Nbreux éléments figurés, jointifs →</p> <p>Hydrodynamisme fort</p> <p>Éléments figurés de type Orbitoline</p>	Sparite	Grainstone dans la classification de Dunham
LPNA		<p>Matrice identifiée de type micrite →</p> <p>Hydrodynamisme modéré</p> <p>Éléments figurés nombreux et jointifs de type Nummulithes →</p> <p>Hydrodynamisme fort</p> <p>→ Hydrodynamisme modéré</p>	Micrite	Packstone dans la classification de Dunham

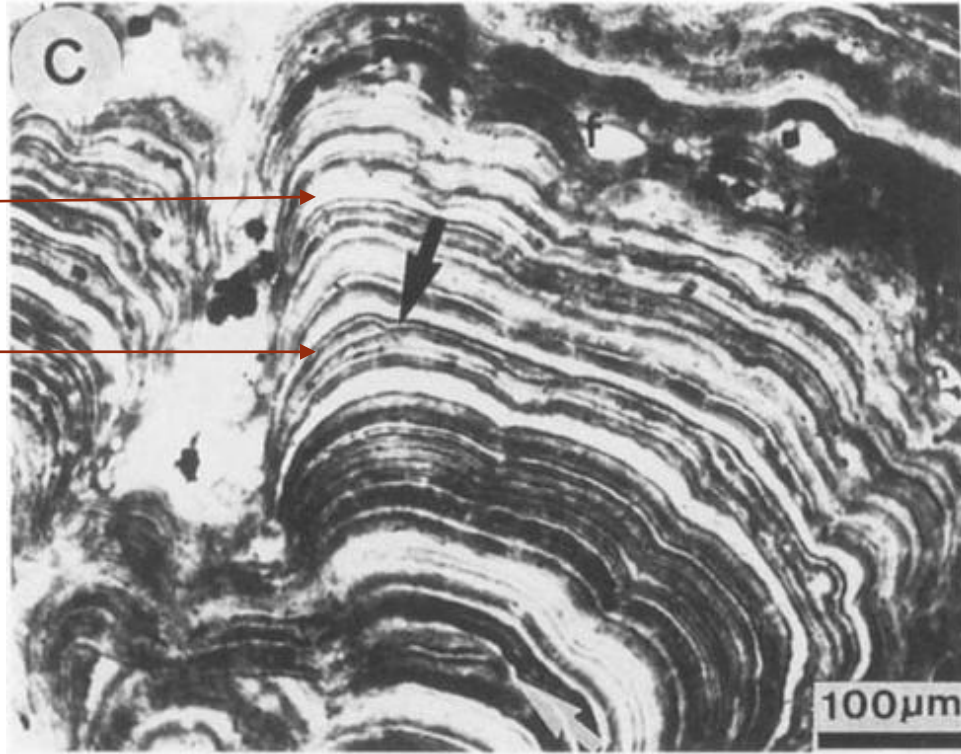
Lamination
concentrique autour
d'un nucléus

nucléus

Ciment sparitique:
gros cristaux de
calcite



- Ciment sparitique → **hydrodynamisme fort**
- Éléments figurés de type oolites
⇒ Environnement aquatique chaud, agité et peu profond
- Grainstone en classification de Dunham



Lamine claire

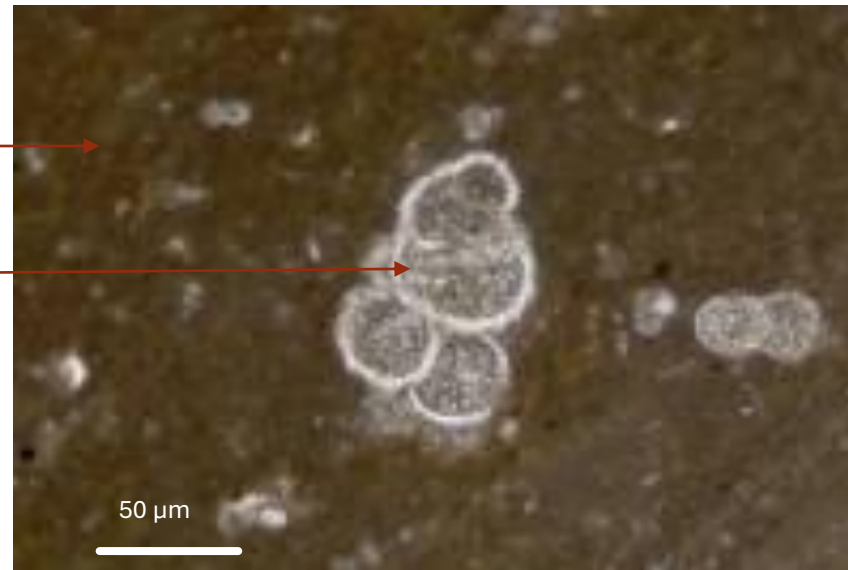
Lamine foncée

Croissance saisonnière
de lamines riches en
carbonates de calcium
précipitées sous l'action
d'organismes microbiens
de types cyanobactéries

- Composants soudés entre eux dès leur formation → calcaires construits
- ⇒ Environnement aquatique de type récif corallien
- Boundstone en classification de Dunham

Matrice sombre au
LPA: micrite, petits
cristaux de calcite

Foraminifère
(Globigérine)

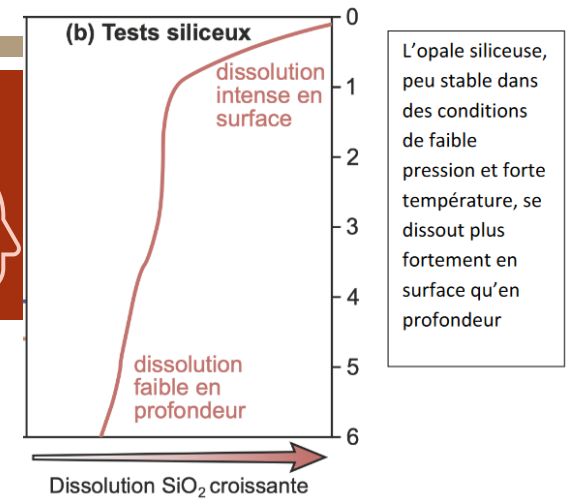


- Matrice micritique → **hydrodynamisme faible**
- Éléments figurés de type globigérines < 10 %
⇒ Environnement aquatique peu agité (très faible hydrodynamisme)
- Mudstone en classification de Dunham

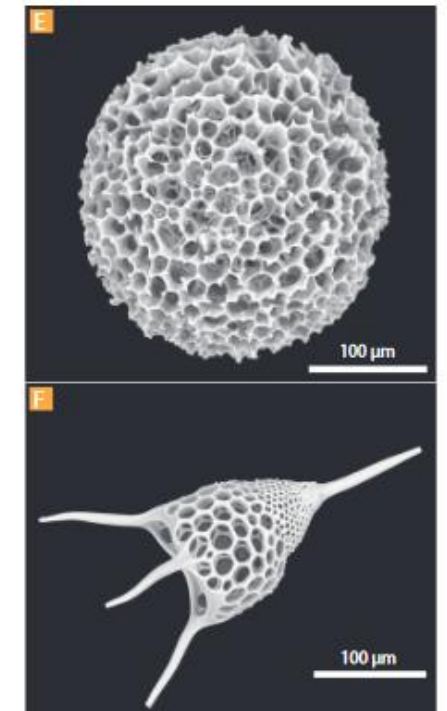
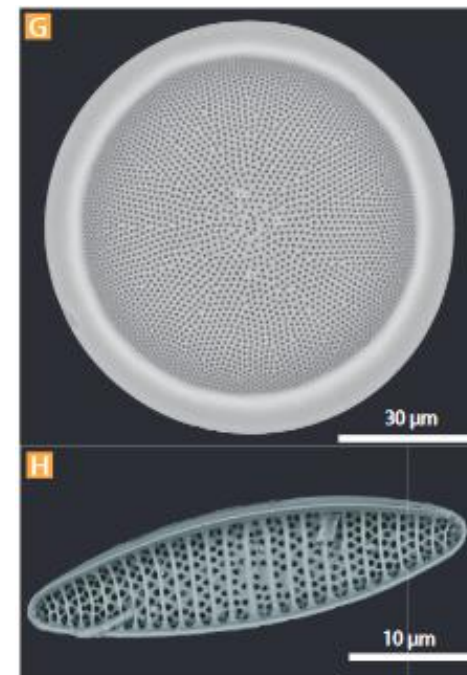
III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

B. LA BIOPRECIPITAION DES ROCHES SILICEUSES

I. Les conditions de la précipitation de la silice



- Précipitation de la silice **sous forme amorphe** (sans réseau cristallin bien organisé) → **opale**
- Quelle que soit la profondeur: océan **toujours sous-saturé en silice**.
 - ⇒ Seule la **BIOMINÉRALISATION** de la silice existe
- **Sous-saturation plus forte dans les 500 premiers mètres** car présence d'organismes produisant des **tests siliceux** qui pompent activement silice dissoute utilisée pour produire leur test.
 - ⇒ Tests **spontanément tendance à se dissoudre**
- Principaux unicellulaires : **radiolaires** et les **diatomées**



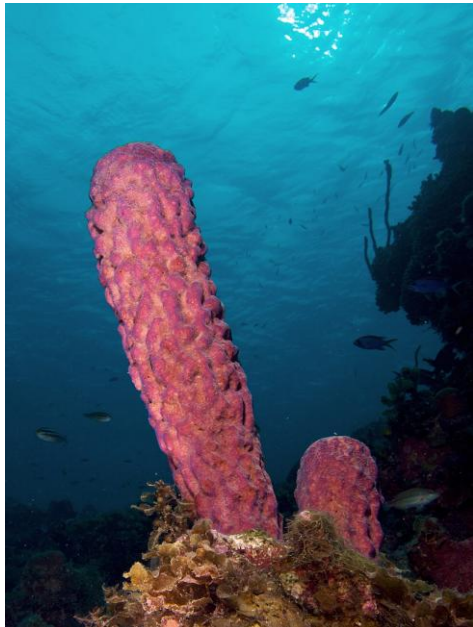
Foraminifères planctoniques à tests siliceux phytoplancton (G,H) **diatomées**, et zooplancton (E, F) **radiolaires** au MEB (Photos G. Rousselle, A et M. de Rafélis)

III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

B. LA BIOPRECIPITAION DES ROCHES SILICEUSES

2. La sédimentation siliceuse

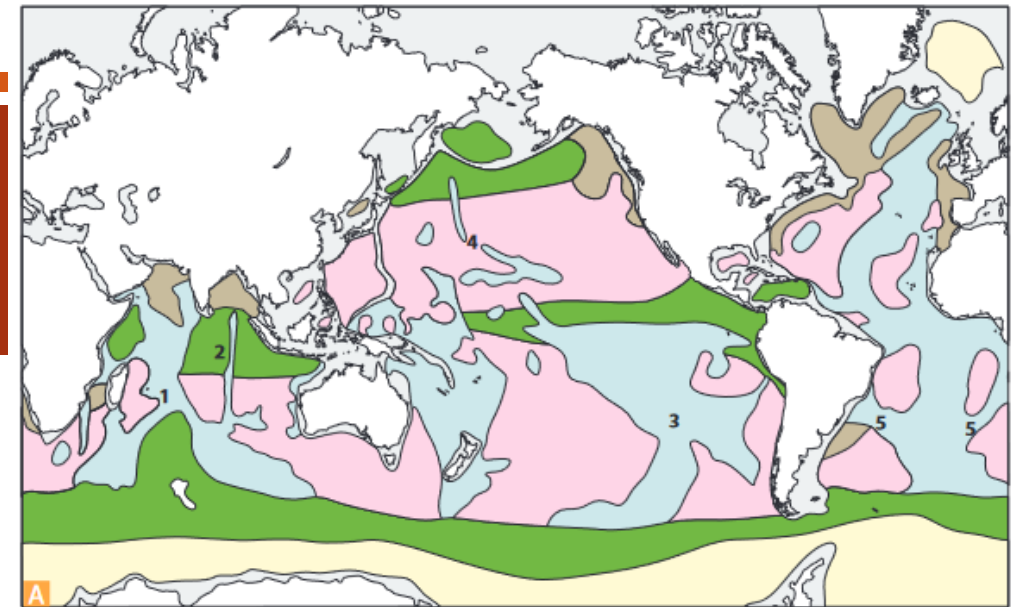
- En domaine néritique
 - Certains **Spongiaires** → squelettes siliceux
 - Traces siliceuses sous forme de **rognons de silex** dans les formations carbonatées.



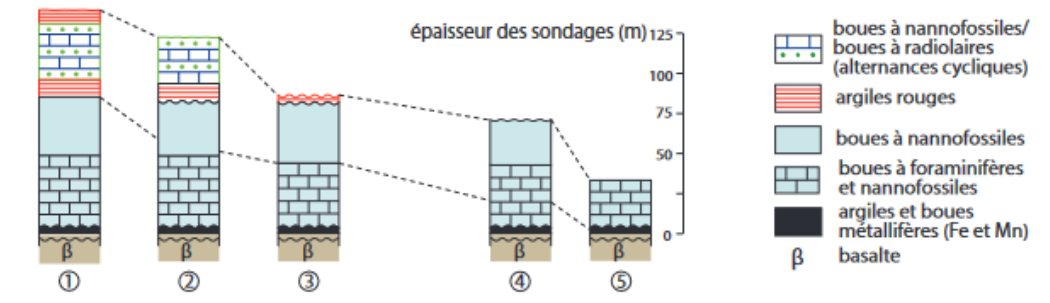
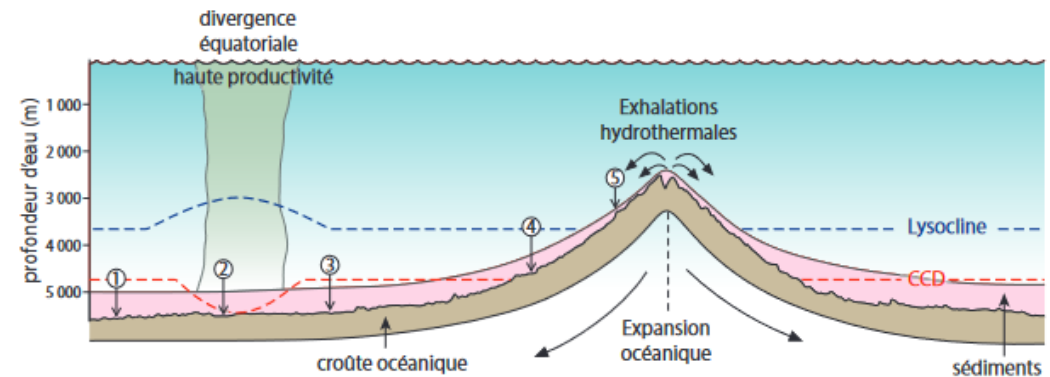
Une éponge tubulaire violette. Photo prise au large d'Haïti. (Wikipédia)
ENCPB- BCPST I - STÉPHANIE DALAINE



Eponges Siliceuses du Crétacé supérieur, Turonien du Sud de l'Indre & Loire 37. France. <http://www.bajocien14.com/article-eponges-siliceuses-121083260.html>



sédiments carbonatés biogènes
 sédiments glaciaires
 sédiments terrigènes
 argiles rouges des grands fonds
 sédiments siliceux biogènes
 sédiments des marges continentales



boues à nanfossiles/
 boues à radiolaires
 (alternances cycliques)
 argiles rouges
 boues à nanfossiles
 boues à foraminifères
 et nanfossiles
 argiles et boues
 métallifères (Fe et Mn)
 β basalte

III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

B. LA BIOPRECIPITAION DES ROCHES SILICEUSES

2. La sédimentation siliceuse



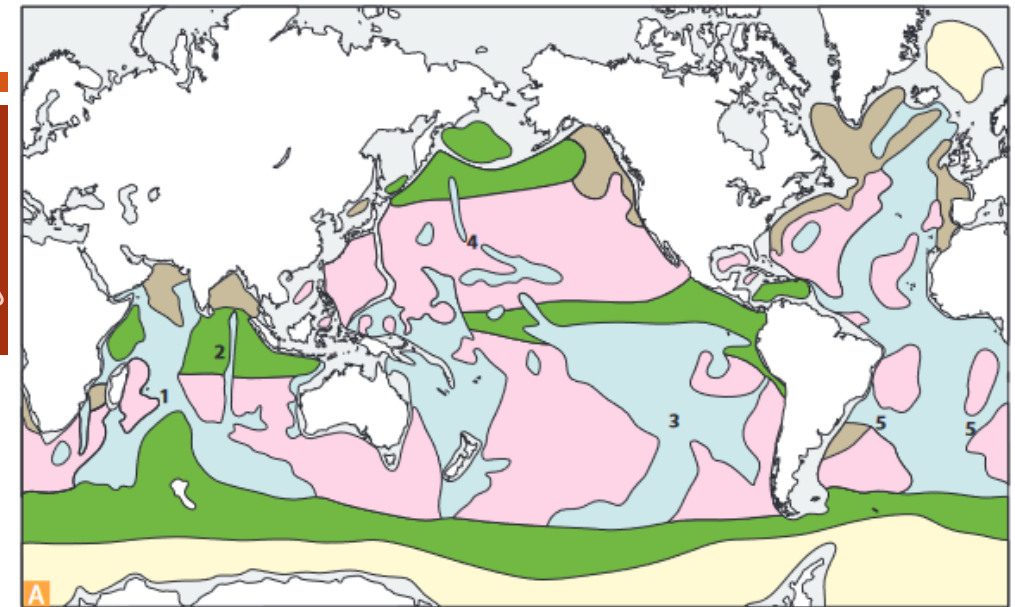
- En domaine pélagique:
- Accumulation de tests **Diatomées (phytoplanctoniques)** / **Radiolaires (zooplanctoniques)**
- Répartition ubiquiste mais **sédimentation siliceuse en trois ceintures latitudinales** → **contrôle climatique**

➤ Ceinture équatoriale: Radiolaires

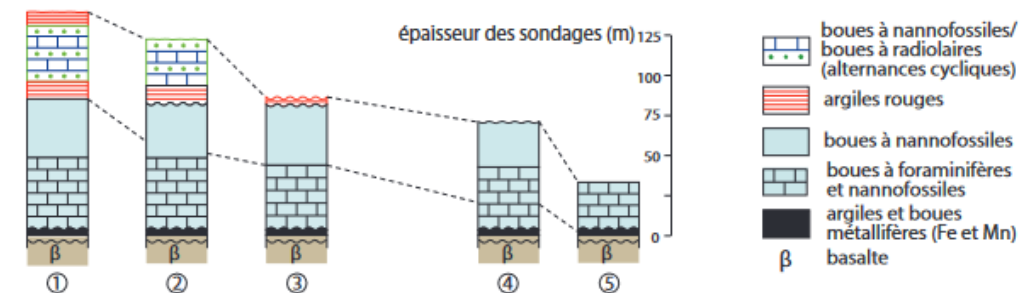
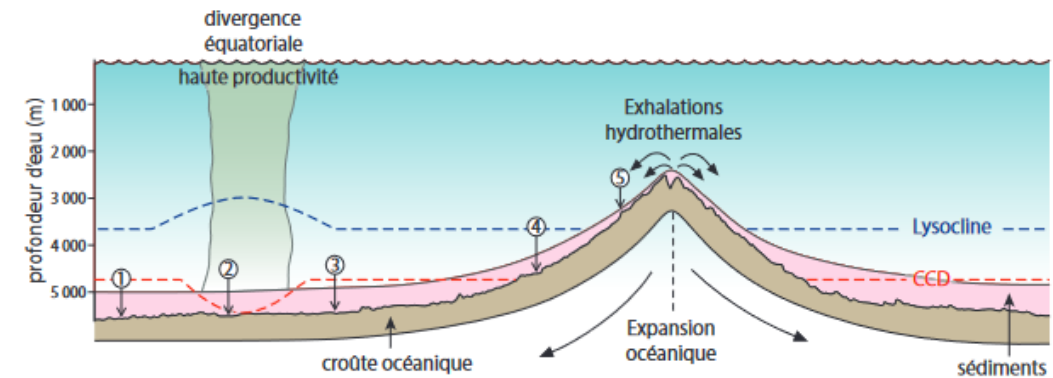
- ⇒ **remontées d'eaux profondes** (quelques centaines de mètres) ou **upwellings** → nutriments → **forte productivité de surface.**
- ✓ *Absence de ceinture dans l'Atlantique moins riche en CO₂ dissout → conservation des carbonates (CCD plus profonde) → apports siliceux sont dilués par les apports carbonatés*

➤ Ceintures polaires: diatomées → tests de silice.

- ⇒ **Forte productivité de surface favorisée par la richesse des eaux en nutriments + eaux froides** → **dissolution des carbonates.**
- ✓ *Dans l'Atlantique la ceinture polaire nord à **diatomées** pas visible car sédimentation siliceuse diluée par d'importants apports détritiques.*



■ sédiments carbonatés biogènes
 ■ sédiments glaciaires
 ■ sédiments terrigènes
■ argiles rouges des grands fonds
 ■ sédiments siliceux biogènes
■ sédiments des marges continentales



III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

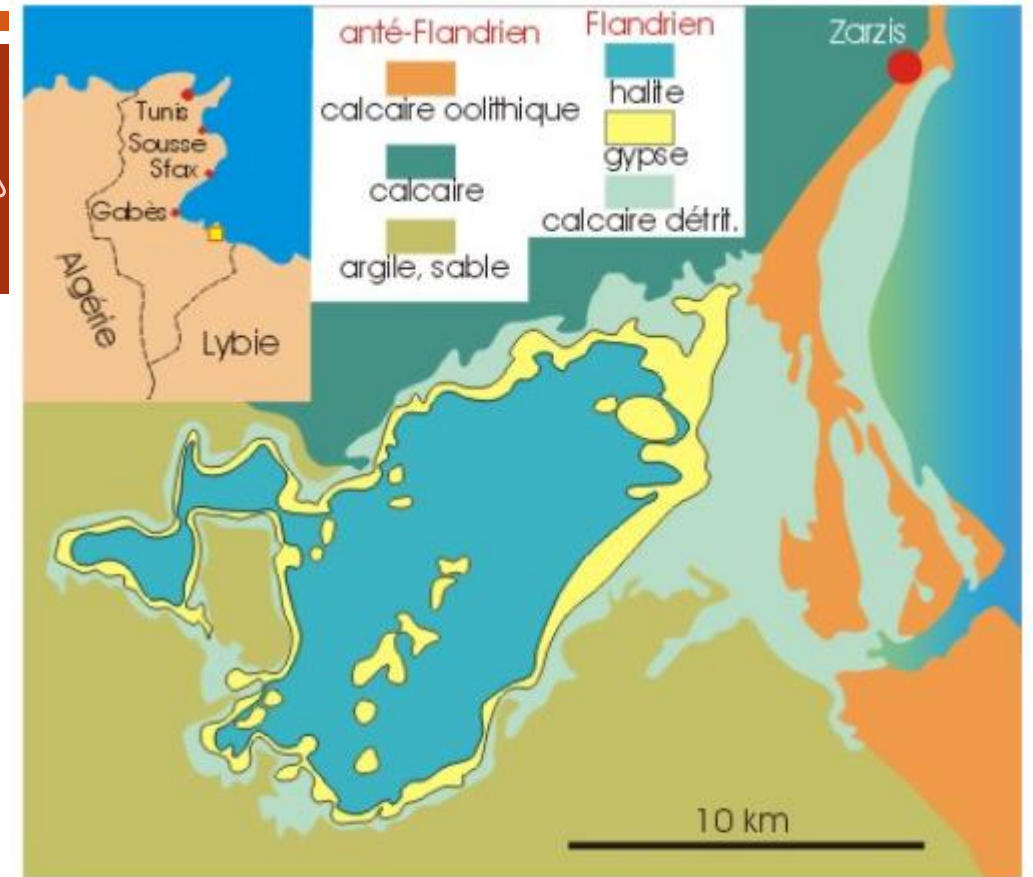
C. LA PRECIPITATION CHIMIQUE DES EVAPORITES

I. Un exemple de bassin évaporitique : le golfe persique (une Sabkha)



- **Dépression** en arrière de barre carbonatée à oolithes (environ 1 mètre sous le niveau de la mer) → **lagune souvent isolée** de la mer
- Conditions climatiques **arides** → bilan **hydrique de la lagune est négatif** :
 - ⇒ **Augmentation de sa salinité**
 - ⇒ Solution devient **sursaturée** pour une espèce chimique donnée
 - ⇒ **Précipitation chimique de type évaporitique**
- Répartition des sédiments = **concentrique**
 - **Carbonates à la base**
 - **Puis gypse**
 - **Puis halite**
 - ⇒ **Produit de solubilité du gypse doit être inférieur à celui de la halite**

succession des dépôts évaporitiques



III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

C. LA PRECIPITATION CHIMIQUE DES EVAPORITES

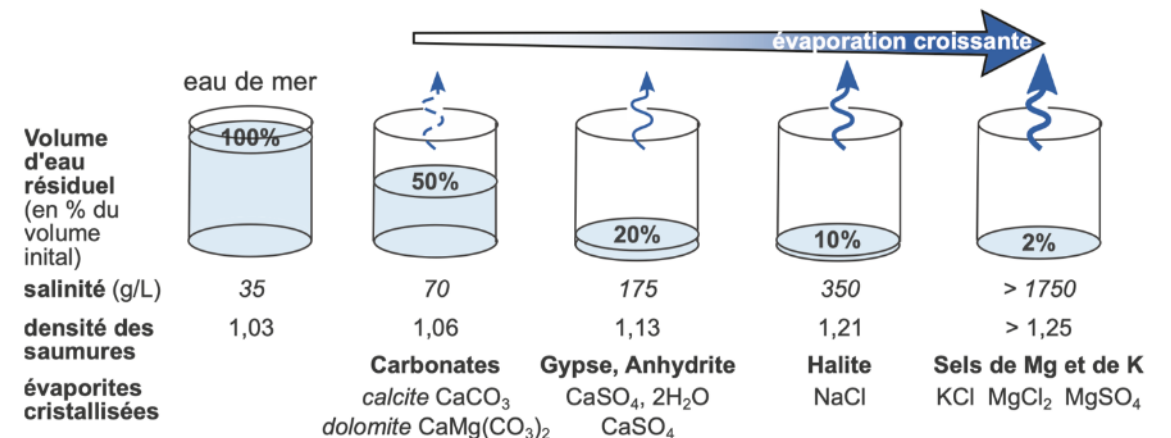
2. Le fonctionnement des bassins évaporitiques

2.1. Principe de fonctionnement

- **3 facteurs importants :**
 - **Restriction du bassin** déterminée par une **barrière tectonique, volcanique ou sédimentaire** (barre récifale).
 - **Degré d'aridité climatique** : obtenue aussi bien en zone aride chaude qu'en région froide.
 - **Piégeage des solutions concentrées** (pertes d'eau dues à évaporation > apports d'eau douce –pluie, fleuve- et non compensées par apports d'eau salée)
- carbonates = lers à précipiter par actions biologiques (directes ou indirectes) → pas considérés comme faisant partie au sens strict de la série évaporitique
- Succession évaporitique:
 1. Gypse
 2. Halite (sel gemme) (NaCl)
 3. Mg et KCl

Évaporites marines		Évaporites non-marines	
halite	NaCl	halite	NaCl
sylvite	KCl	sylvite	KCl
carnalite	KMgCl ₃ , 6H ₂ O	anhydrite	CaSO ₄
kaïnite	KMgClSO ₃ , 3H ₂ O	epsomite	MgSO ₄ , 7H ₂ O
anhydrite	CaSO ₄	trona	Na ₂ CO ₃ ·NaHCO ₃ , 2H ₂ O
gypse	CaSO ₄ , 2H ₂ O	mirabilite	Na ₂ SO ₄ , 10H ₂ O
polyhalite	K ₂ MgCa ₂ (SO ₄) ₄ , 2H ₂ O	thenardite	Na ₂ SO ₄
bischofite	MgCl ₂ , 6H ₂ O	bloedite	Na ₂ SO ₄ ·MgSO ₄ , 4H ₂ O
kieserite	MgSO ₄ , H ₂ O	gaylussite	Na ₂ CO ₃ ·CaCO ₃ , 5H ₂ O
		glauberite	CaSO ₄ ·Na ₂ SO ₄

Les différentes espèces minérales des dépôts évaporitiques marins et continentaux (dans Cojan et Renard, Dunod, 2006)



Ordre d'apparition (de gauche à droite) des différents termes de la série évaporitique par évaporation d'eau de mer

III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

C. LA PRECIPITATION CHIMIQUE DES EVAPORITES

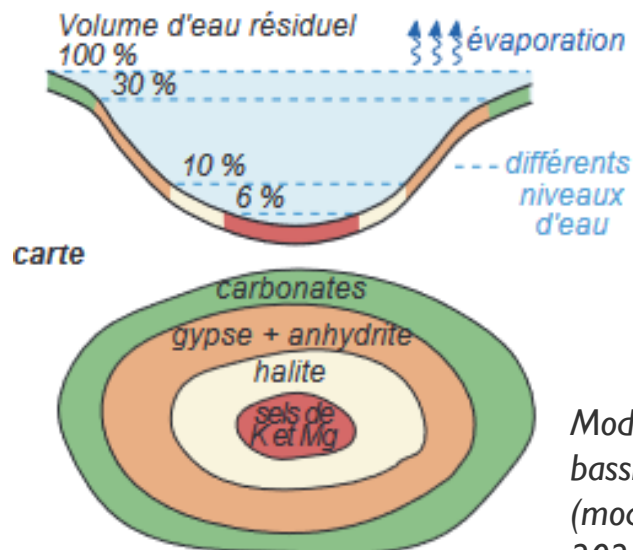
2. Le fonctionnement des bassins évaporitiques

2.2. Modèles de bassins

- Evaporites continentales : **bassin fermé**
 - dépôt de lacs en climat aride ou semi-aride
 - minéralogie variable (fonction de la géologie régionale)
 - répartition horizontale **concentrique**

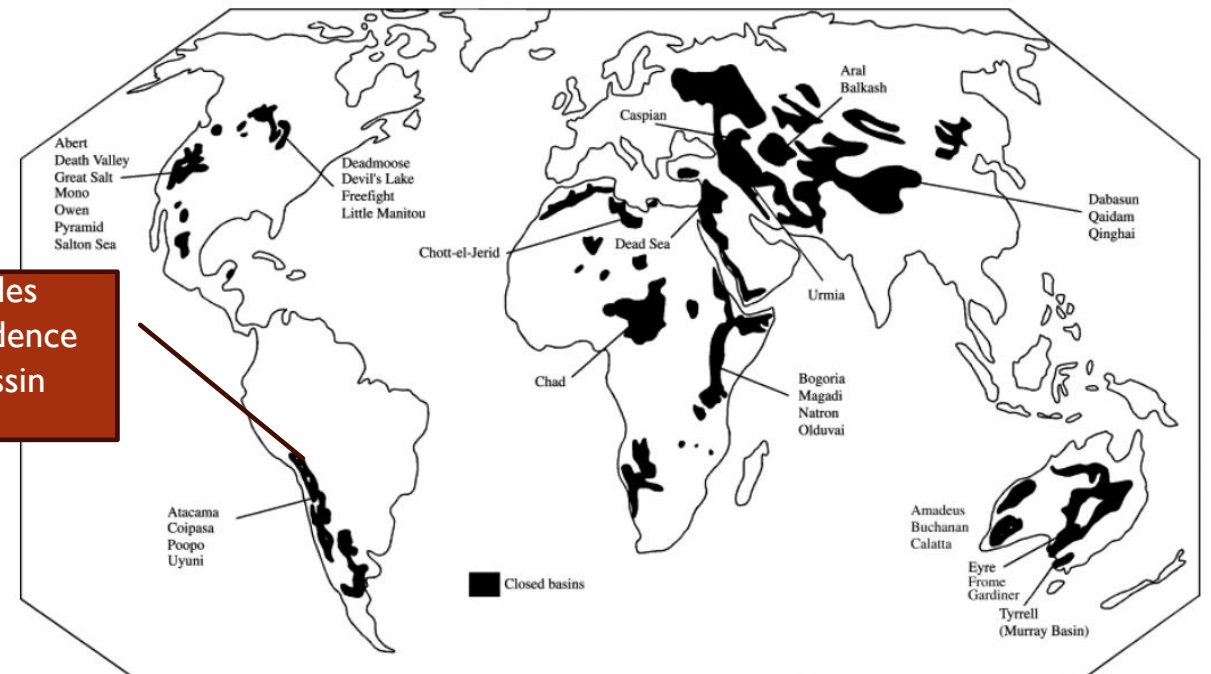


Lagune verte et stratovolcan de Licancabur Bolivie, (Wikipédia)



Souvent près des montagnes subsidence tectonique (bassin flexural)

Modèles de sédimentation dans des bassins fermés de type lac continental (modèle en œil de bœuf). (Dunod, ed. 2021)



Répartition des évaporites continentales

III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

C. LA PRECIPITATION CHIMIQUE DES EVAPORITES

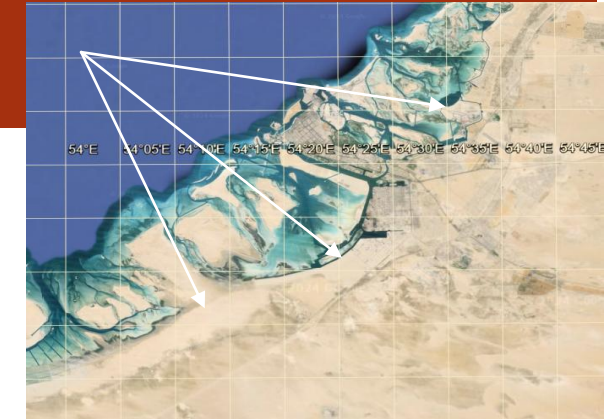
2. Le fonctionnement des bassins évaporitiques

2.2. Modèles de bassins

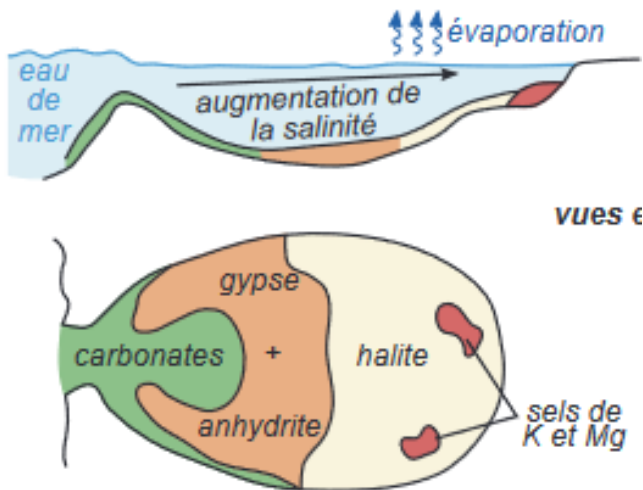
- Evaporites marines : **bassin ouvert**
 - lagunes, sebkhas
 - inondations marines périodiques
 - apports souterrains à partir de la nappe phréatique marine



Roses des sables : le gypse précipite directement autour des grains de sable par assèchement de celui-ci

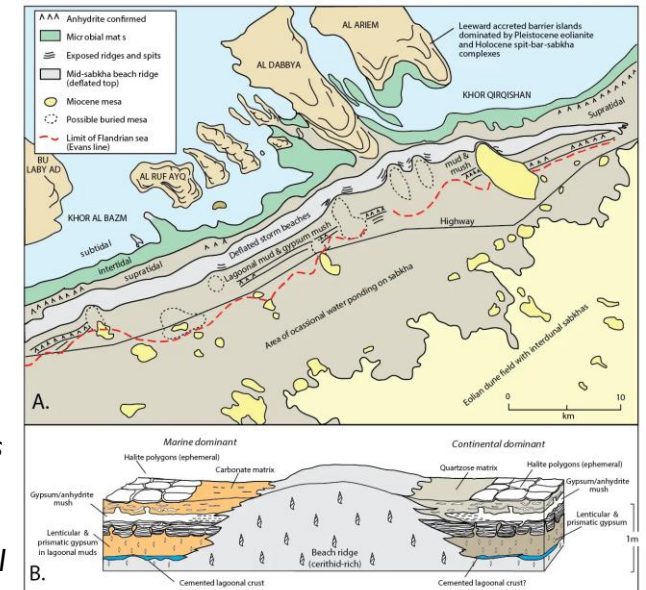


Sabkhat d'Abu Dhabi (Emirats Arabes Unis)



Modèles de sédimentation dans des bassins ouverts de type lagune (modèle de bassin à seuil). (Dunod, ed. 2021)

Sabkha d'Abou Dhabi. A) Faciès Sabkha situé à l'ouest d'Abu Dhabi montrant des crêtes de plage enfermées dans des sédiments sabkha à proximité de Bu Labyad - Al Du'yybaya (d'après Kirkham, 1997). B) Coupe transversale de Sabkha basée sur les faciès présents à proximité des crêtes de plage au sud de la péninsule d'Al Du'yybaya et de la paroi du canal Mussafah (d'après Warren et Kendall, 1985).

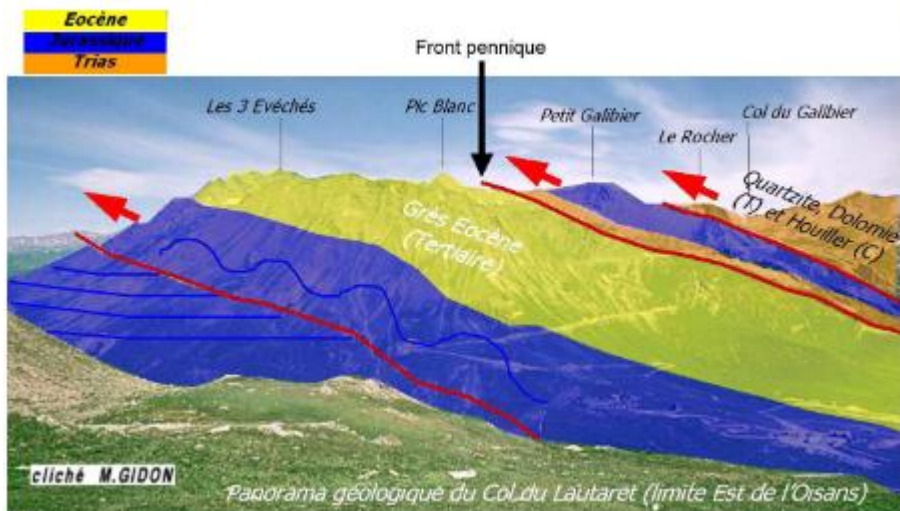


III. LA SEDIMENTATION PAR BIOPRECIPITATION ET PRECIPITATION

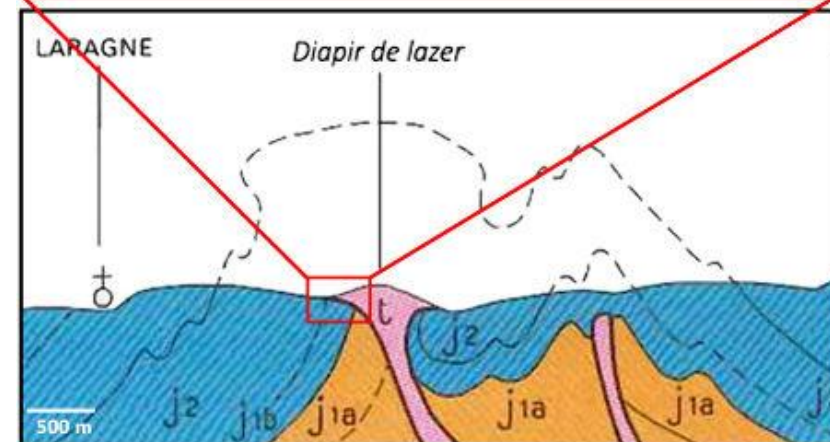
C. LA PRECIPITATION CHIMIQUE DES EVAPORITES

3. Intérêt des évaporites

- Economique : pour leur **valeur propre** et pour leur capacité à former des **pièges à pétrole**
- Tectonique : intervention dans des **niveaux de décollement** (Trias dans les Alpes → couche savon)
- **paléogéographie** : ils peuvent constituer des **marqueur climatiques** (mais ne signifie pas que le climat était nécessairement chaud!!!)



Couche savon du gypse triasique participant aux chevauchements



Le diapir de gypse triasique de Lazer, Hautes Alpes Source - © 2016 Pierre Thomas - BRGM

IV. LA TRANSFORMATION DES DEPOTS SEDIMENTAIRES EN ROCHE : LA DIAGENESE

- La **diagénèse** est définie de manière restrictive comme **l'ensemble des processus** qui affectent un **dépôt sédimentaire** et le transforment progressivement en **roche sédimentaire consolidée**
 - **Processus physiques**
 - **Processus chimiques**



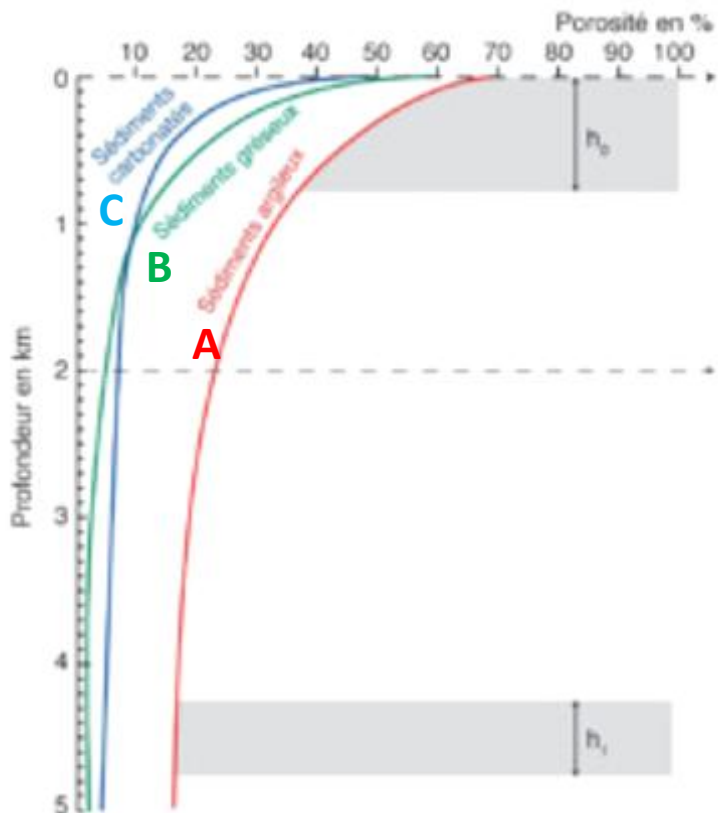
Aspect d'un sédiment sableux actuel (A) et d'une roche sédimentaire consolidée de même classe granulométrique et de même nature : un grès (B). (dans Segarra et al., Ellipses, ed. 2021)

IV. LA TRANSFORMATION DES DEPOTS SEDIMENTAIRES EN ROCHE : LA DIAGENESE

A. REMANIEMENTS PHYSIQUES LORS DE LA DIAGENESE

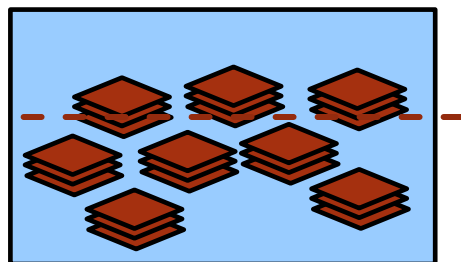
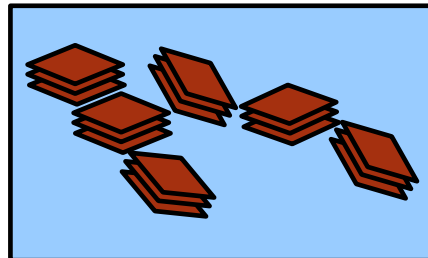


- Remaniements physiques lors de diagenèse = **réarrangement des particules** sédimentaires entre elles, via:
 - **organismes fouisseurs** (partie superficielle des sédiments)
 - **poids** de la colonne lithologique sus-jacente
 - ⇒ ↘ Porosité avec profondeur car ↗ compaction
 - ✓ **Porosité = volume des vides / volume total**
 - ✓ **Perméabilité** = capacité d'une roche à **laisser circuler librement un fluide sous l'effet d'un gradient** de pression → Pour qu'une roche soit perméable il faut que sa porosité soit connectée (que l'espace disponible forme un réseau continu).



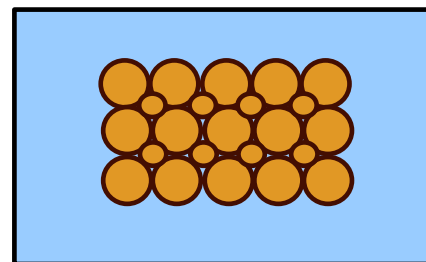
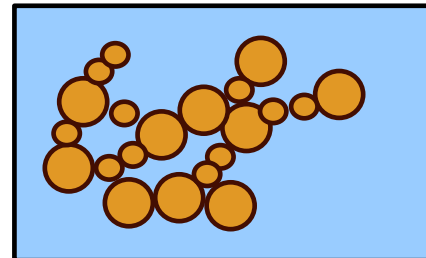
Evolution de la porosité avec la profondeur lors de la diagenèse pour différentes lithologies (courbe A : sédiments argileux ; courbe B : sédiments gréseux, courbes C : sédiments carbonatés) (dans Segarra et al., Ellipses, ed. 2021)

1. Cas des argiles



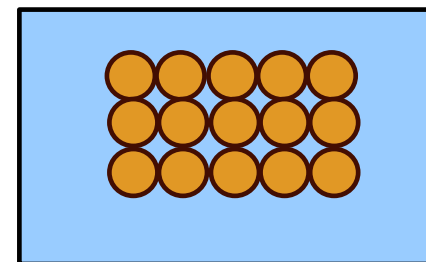
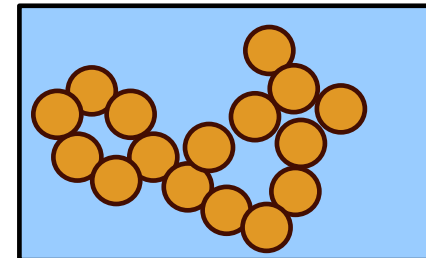
Forte porosité ~ 20%

2. Cas des calcaires ou grès mal triés



Très faible porosité

3. Cas des calcaires ou grès bien triés



Faible porosité



Minéraux argileux



Espace entre les particules = porosité



Particules autres que des argiles



Plan de schistosité

Évolution de l'organisation des sédiments lors de l'enfouissement (S. Dalaine d'après J. Segarra)

IV. LA TRANSFORMATION DES DEPOTS SEDIMENTAIRES EN ROCHE : LA DIAGENESE

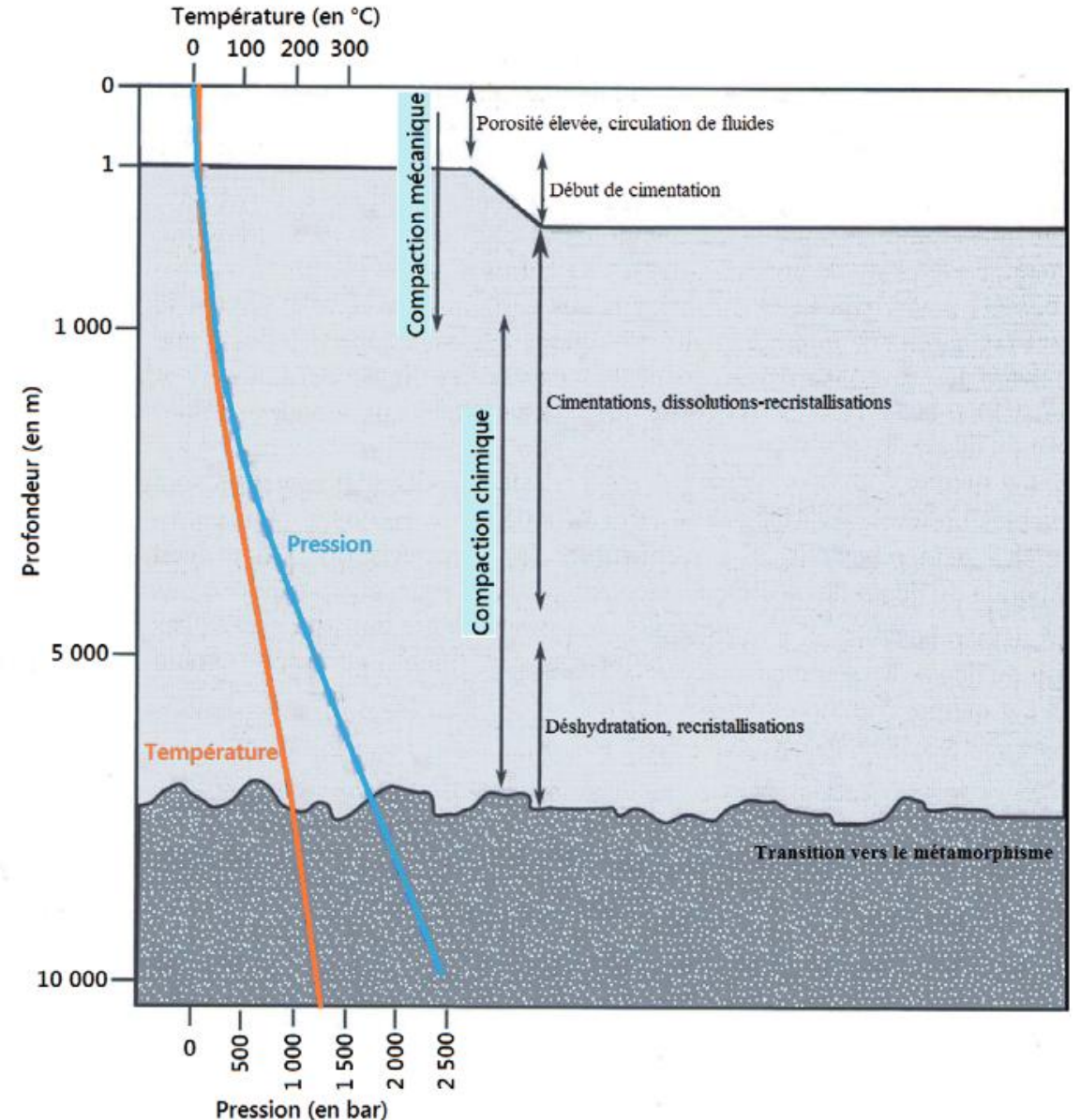
B. MODIFICATIONS CHIMIQUES LORS DE LA DIAGENESE

I. Trois processus chimiques sont mis en jeu lors de la diagenèse

- Trois grands types de réactions interviennent lors des modifications chimiques durant la diagenèse.



1. **Précipitations ou cristallisations** de nouveaux minéraux s'effectuent au sein de la roche → **cimentation**
2. **Dissolutions** affectent des minéraux présents
3. **Recristallisations minéralogiques**



Les différentes étapes de la diagenèse (Vuibert, ed. 2021)

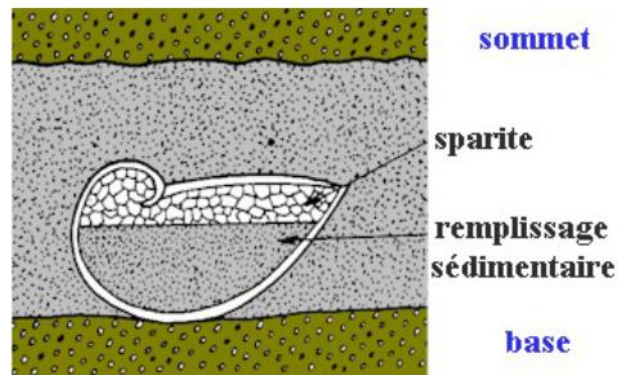
IV. LA TRANSFORMATION DES DEPOTS SEDIMENTAIRES EN ROCHE : LA DIAGENESE

B. MODIFICATIONS CHIMIQUES LORS DE LA DIAGENESE

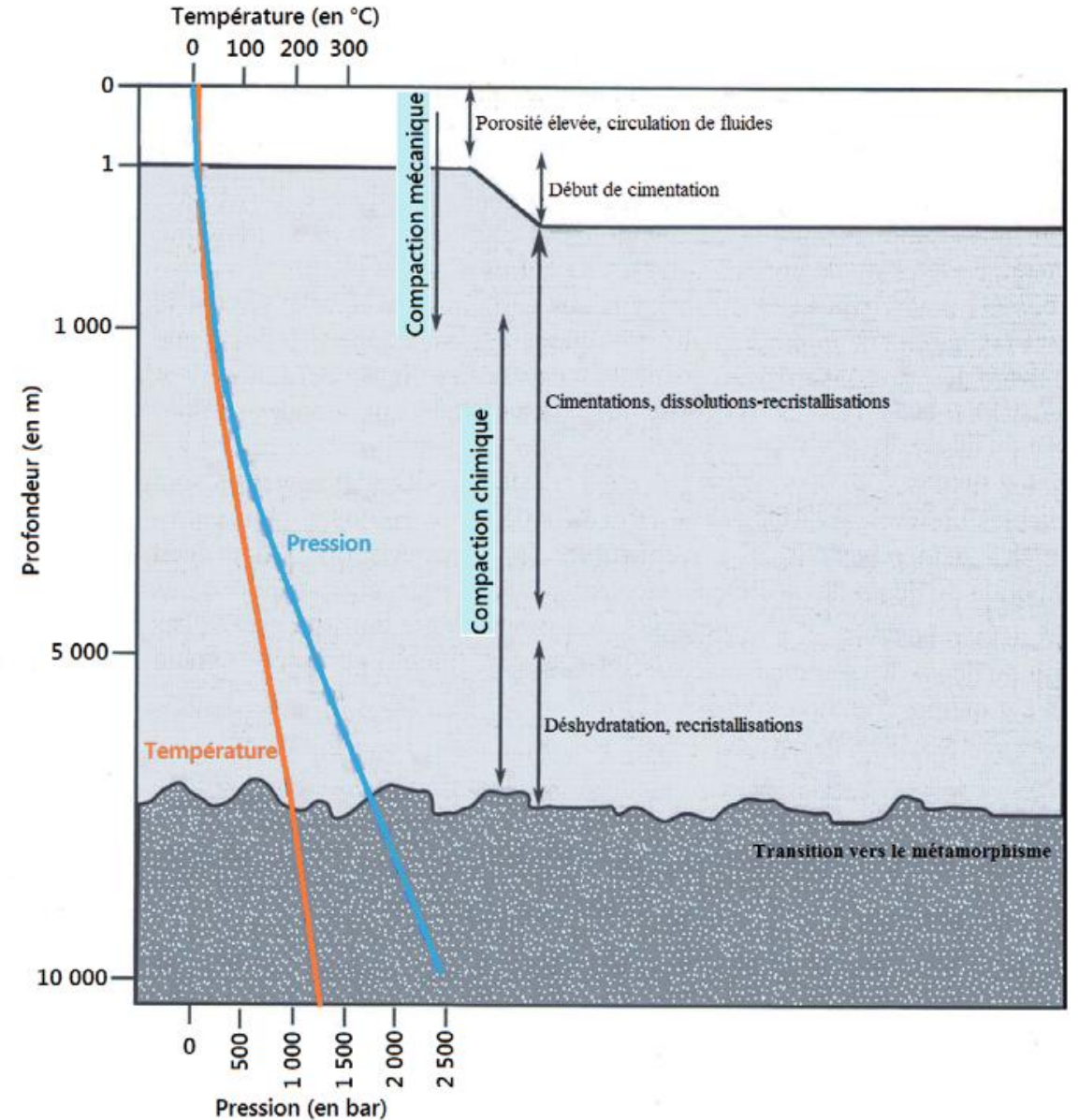
I. Trois processus chimiques sont mis en jeu lors de la diagenèse

- I. **Précipitations ou cristallisations** de nouveaux minéraux nécessitent 3 paramètres :
- **sursaturation** du fluide pour cette espèce minérale
 - Présence d'un **nucleus** pour initier la cristallisation
 - **Espace et temps** qui permettront la croissance minérale
- ⇒ ↘ porosité = **cimentation**
- ✓ **Ciment carbonaté**
 - ✓ **Ciment siliceux**
 - ✓ **Ciment argileux**

Certaines particularités du remplissage des coquilles comme celles des brachiopodes fournissent de bons indices. La boue qui pénètre dans ces coquilles laisse fréquemment un vide à la partie supérieure convexe. Ce vide est, au cours de la diagenèse, le siège de précipitation d'une forme de calcite, la sparite.



Remplissage d'une coquille fossile et polarité



Les différentes étapes de la diagenèse (Vuibert, ed. 2021)

IV. LA TRANSFORMATION DES DEPOTS SEDIMENTAIRES EN ROCHE : LA DIAGENESE

B. MODIFICATIONS CHIMIQUES LORS DE LA DIAGENESE

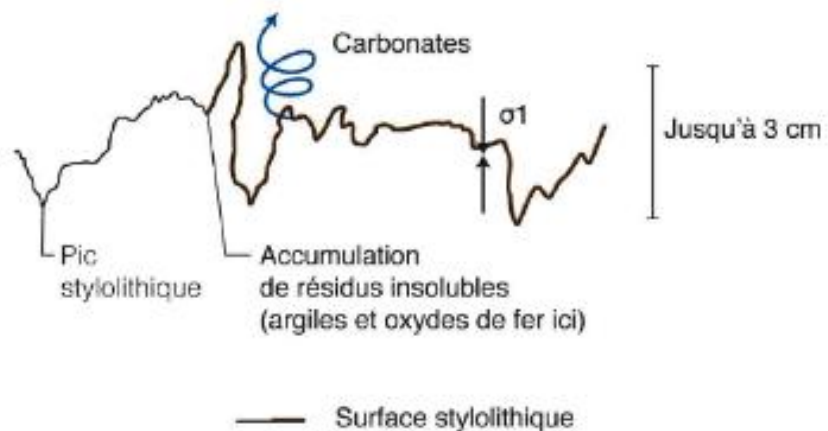
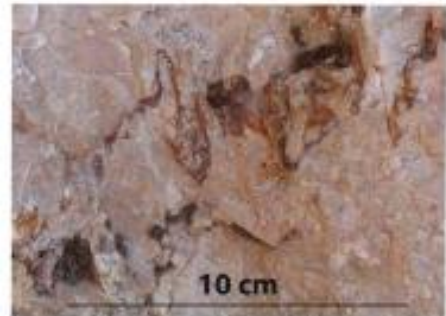
I. Trois processus chimiques sont mis en jeu lors de la diagenèse

2. Dissolutions affectent des minéraux

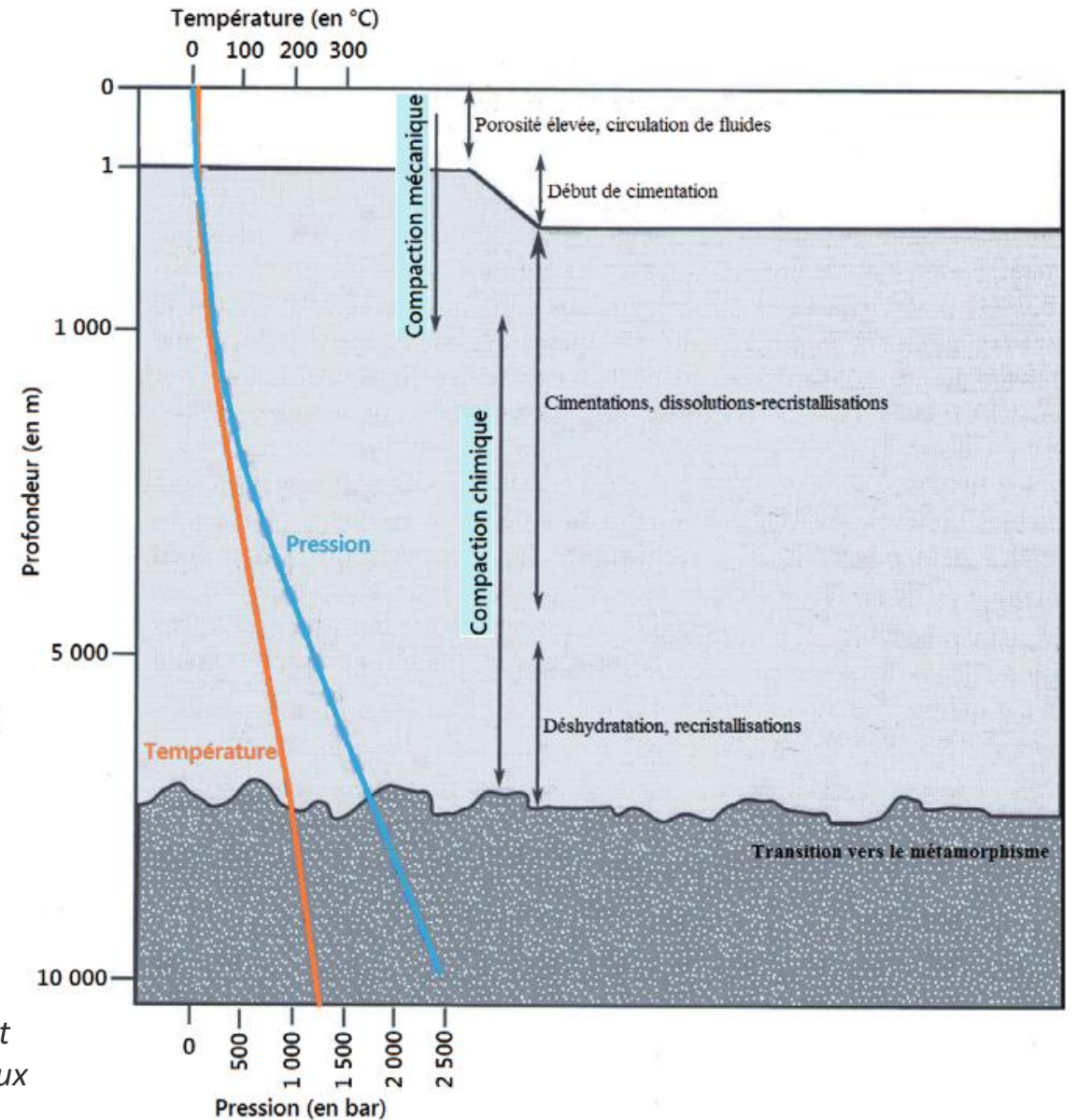
- Uniquement si fluide entourant le minéral sous saturé pour l'espèce + si évacuation des ions libérés par dissolution
- ⇒ porosité dite secondaire car non héritée de la phase de dépôt



A. Stylolithe dans un carbonate



Effet d'une contrainte (force exercée sur une surface élémentaire d'un objet et pouvant entraîner sa déformation, cf ST-D) sur la dissolution aux joints de grains c'est-à-dire aux points de contacts entre deux particules : c'est la **pression de dissolution**.



Les différentes étapes de la diagenèse (Vuibert, ed. 2021)

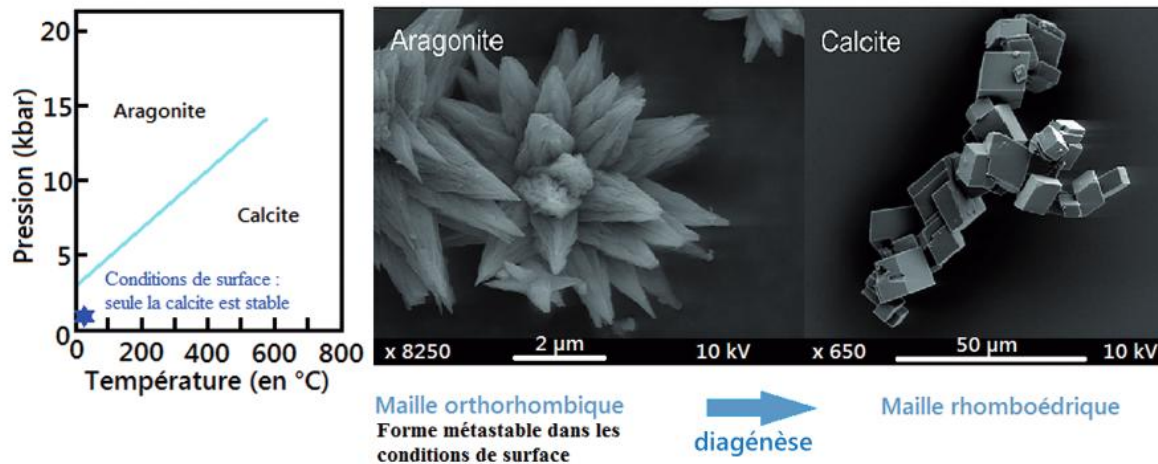
IV. LA TRANSFORMATION DES DEPOTS SEDIMENTAIRES EN ROCHE : LA DIAGENESE

B. MODIFICATIONS CHIMIQUES LORS DE LA DIAGENESE

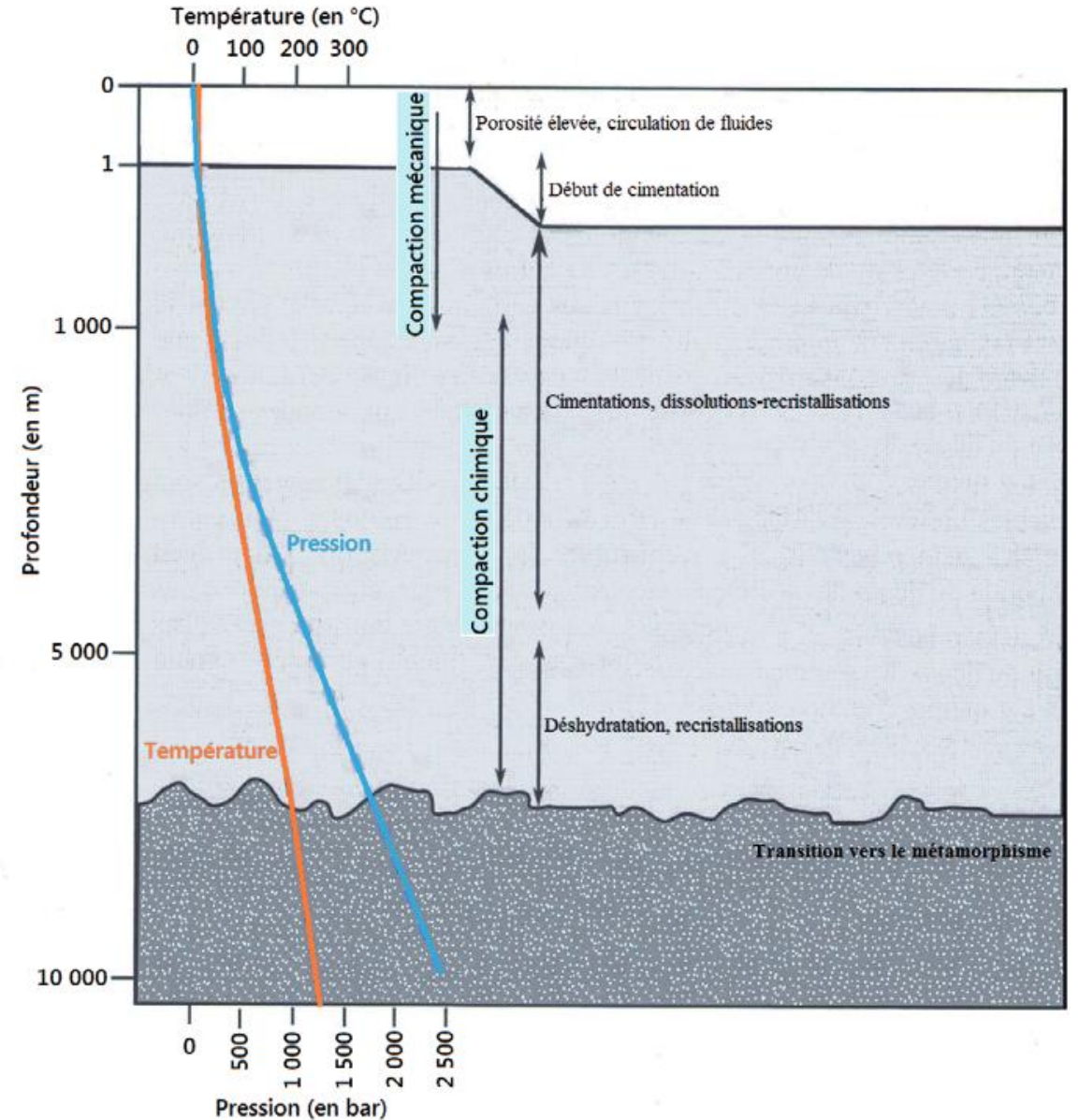
I. Trois processus chimiques sont mis en jeu lors de la diagenèse

3. Recristallisations minéralogiques

- Formation de minéraux plus stables
- Formation de minéraux de **même composition chimique**
 - ✓ Ex: Recristallisation de calcite à partir de dissolution de aragonite
 - ✓ **Aragonite** (maille cristalline rhomboédrique) métastable transformation spontanée et très lente en **calcite** (maille cristalline orthorhombique)



Un exemple de transformation minéralogique de la diagenèse (Vuibert, ed. 2021 p.342)



Les différentes étapes de la diagenèse (Vuibert, ed. 2021)

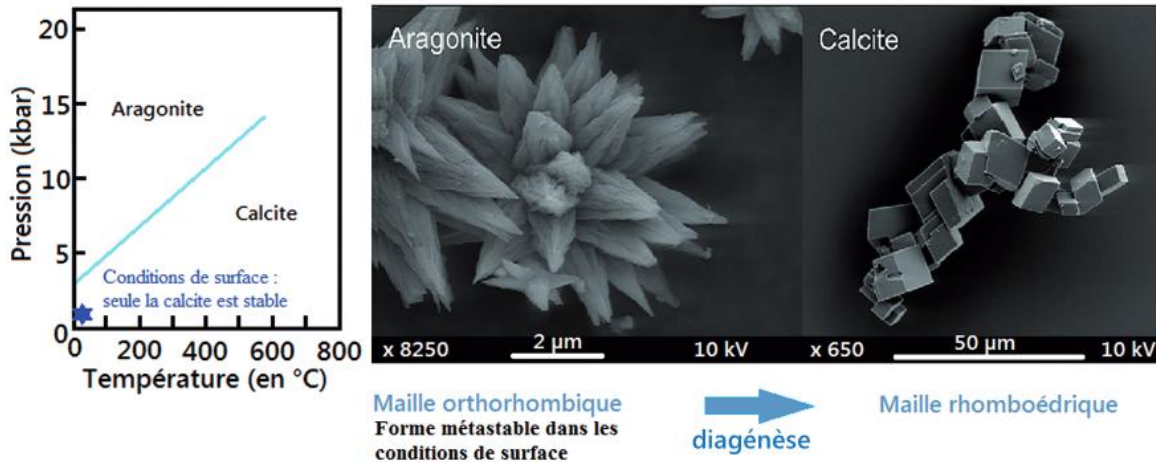
IV. LA TRANSFORMATION DES DEPOTS SEDIMENTAIRES EN ROCHE : LA DIAGENESE

B. MODIFICATIONS CHIMIQUES LORS DE LA DIAGENESE

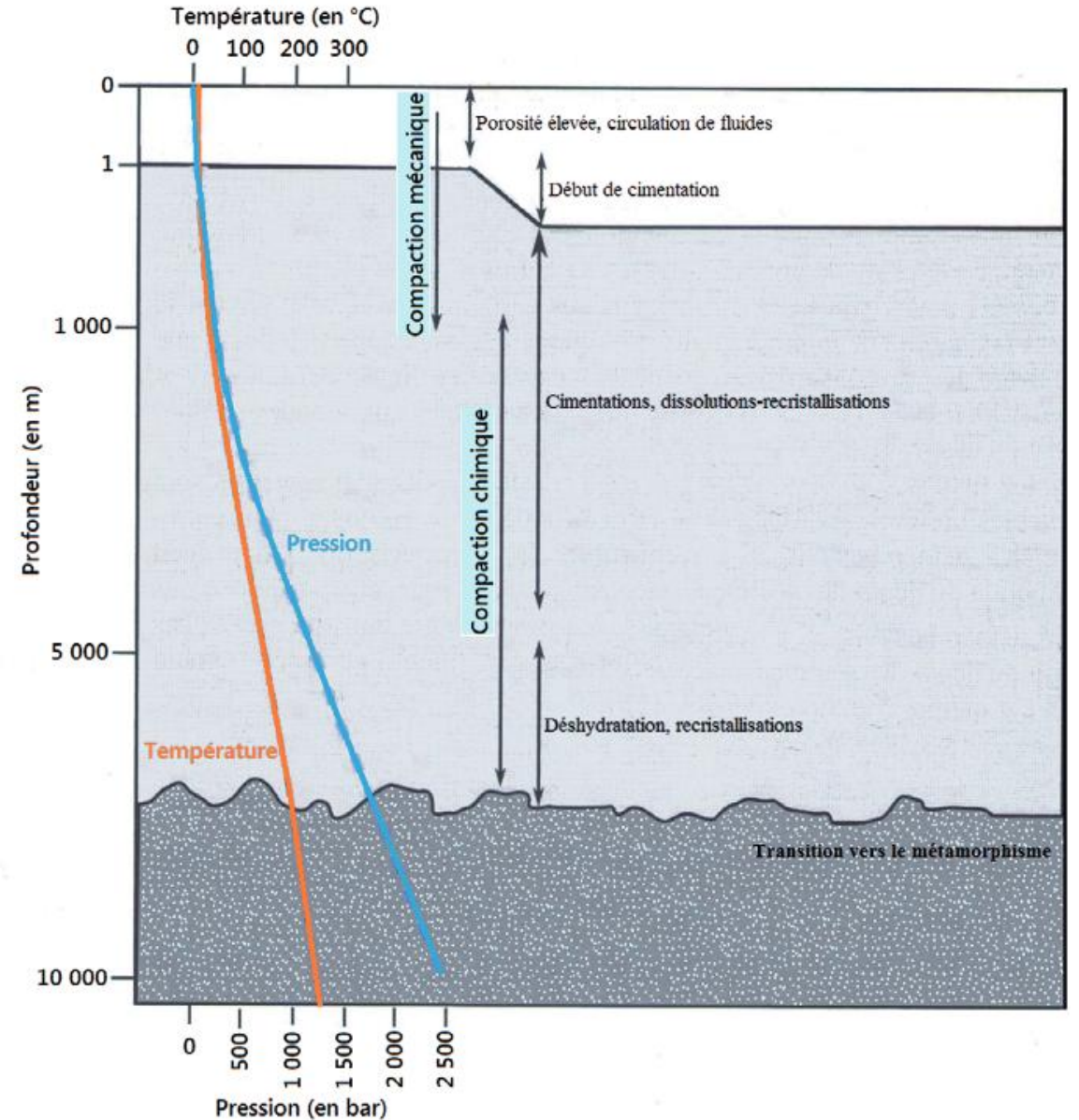
I. Trois processus chimiques sont mis en jeu lors de la diagenèse

3. Recristallisations minéralogiques

- Formation de minéraux plus stables
- Formation de minéraux de **même composition chimique**
 - ✓ Ex: Recristallisation de calcite à partir de dissolution de aragonite
 - ✓ **Aragonite** (maille cristalline rhomboédrique) métastable transformation spontanée et très lente en **calcite** (maille cristalline orthorhombique)



Un exemple de transformation minéralogique de la diagenèse (Vuibert, ed. 2021 p.342)



Les différentes étapes de la diagenèse (Vuibert, ed. 2021)

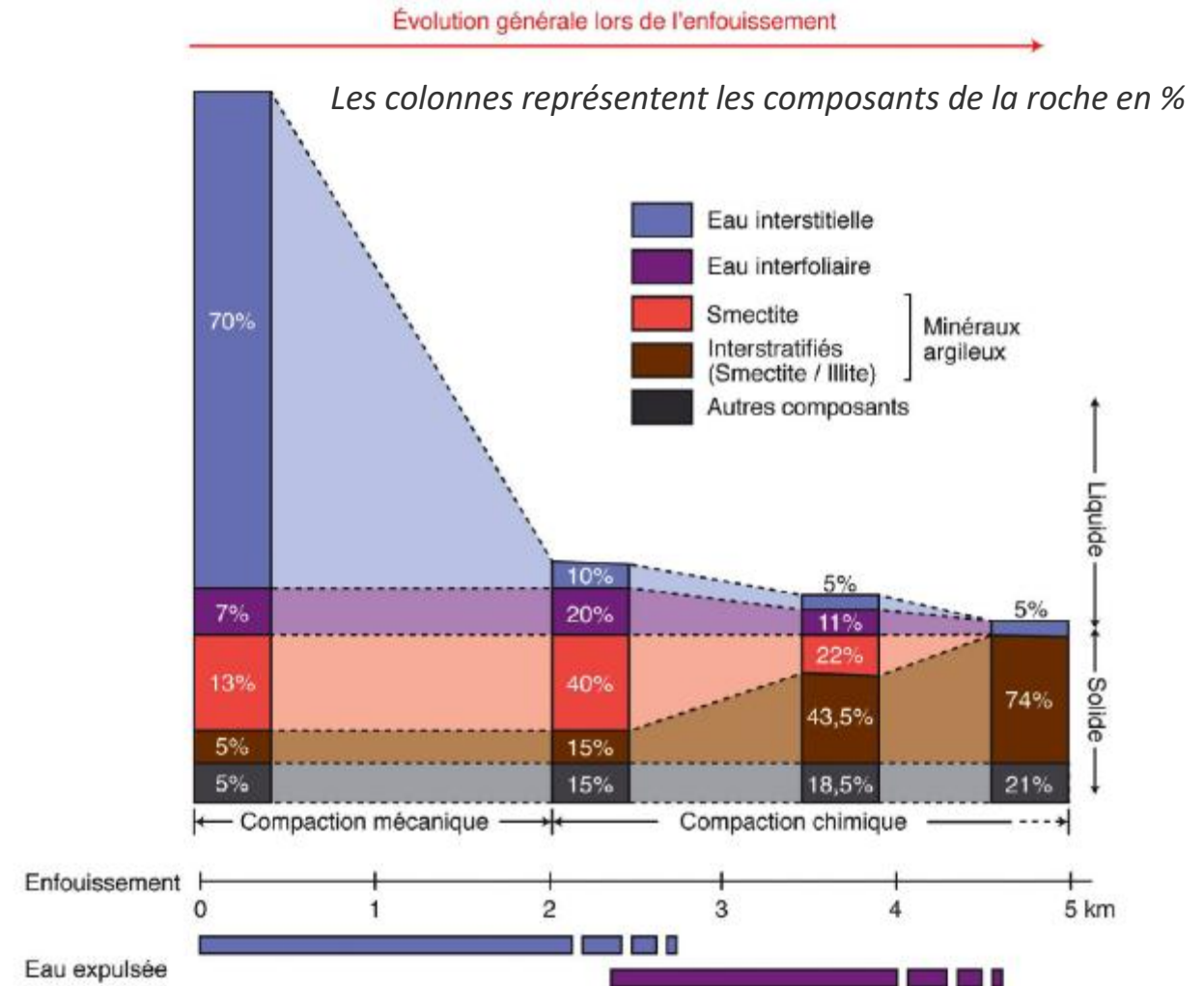
IV. LA TRANSFORMATION DES DEPOTS SEDIMENTAIRES EN ROCHE : LA DIAGENESE

B. MODIFICATIONS CHIMIQUES LORS DE LA DIAGENESE

I. Trois processus chimiques sont mis en jeu lors de la diagenèse

3. Déshydratation par compaction mécanique

- **Cas des sédiments argileux:** compaction → expulsion d'eau contenue au sein des minéraux
- ⇒ **Evolution des smectites vers les illites moins hydratées**



Evolution minéralogique des argiles au cours de la diagenèse et diminution des quantités d'eau interstitielle et interfoliaire. (dans Segarra et al., Ellipses, ed. 2021)

IV. LA TRANSFORMATION DES DEPOTS SEDIMENTAIRES EN ROCHE : LA DIAGENESE

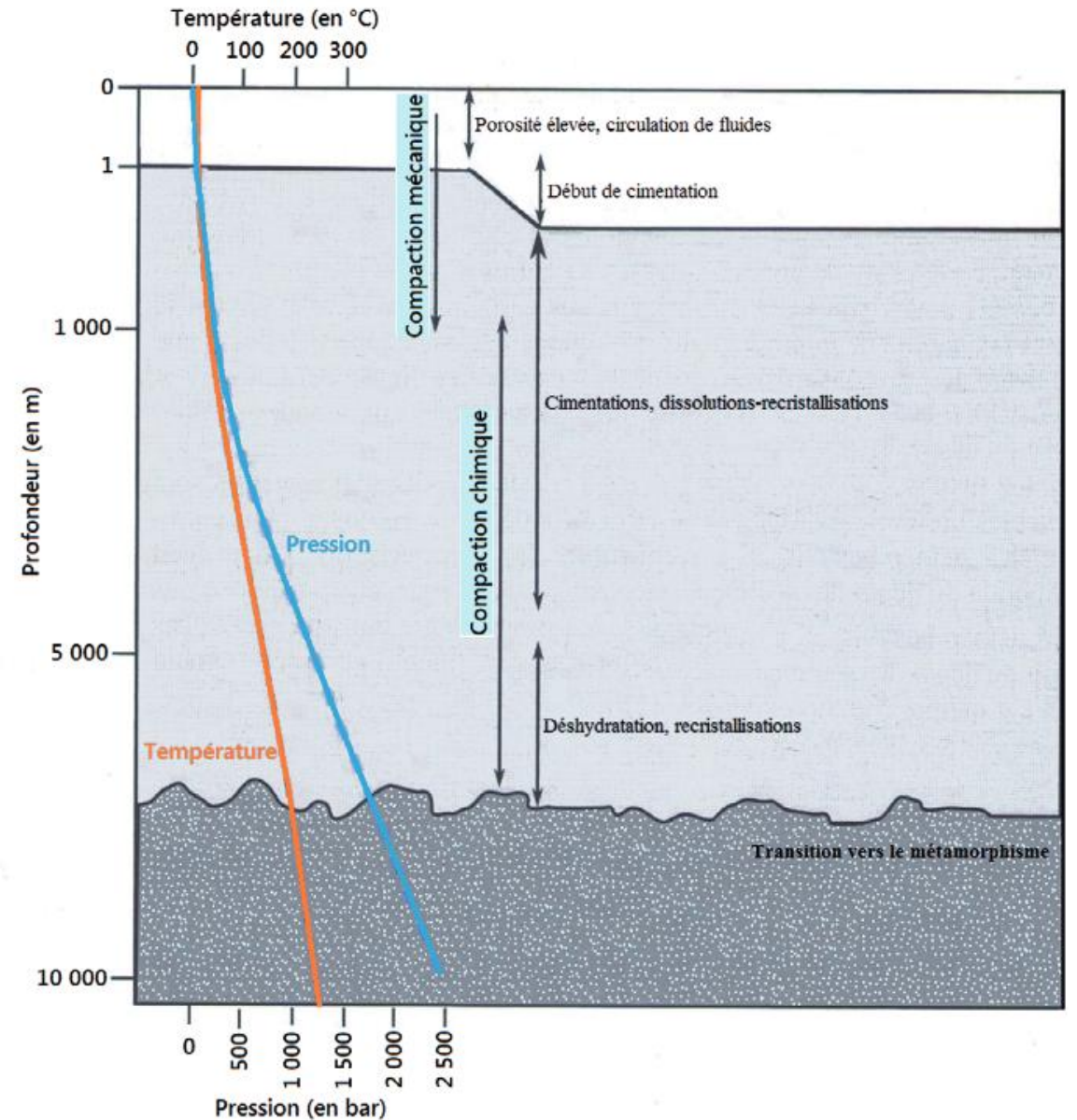
B. MODIFICATIONS CHIMIQUES LORS DE LA DIAGENESE

2. Rôles de l'activité biologique

- Si profondeur $>2,5$ km (gradient géothermique moyen de $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$) La \rightarrow $T^{\circ}\text{C } 80^{\circ}\text{C}$ \rightarrow **sédiment considéré comme stérilisé**
- **Bactéries** dans partie superficielle du sédiment \rightarrow **agent de minéralisation** de la matière organique sédimentaire par respiration ou fermentation
 - \Rightarrow CO_2 dissout dans fluide interstitiel
 - \Rightarrow dissolution des carbonates
- Plus en profondeur (absence de renouvellement du fluide) \rightarrow conditions anaérobies.
 - \Rightarrow **Archéobactéries** (chimioautotrophes)
 - \rightarrow méthane \rightarrow **conditions réductrices**
 - \rightarrow **précipitation de certains minéraux comme la pyrite (FeS_2)**.



Pyrite de la mine de Huanzala (Pérou) (Wikipédia)

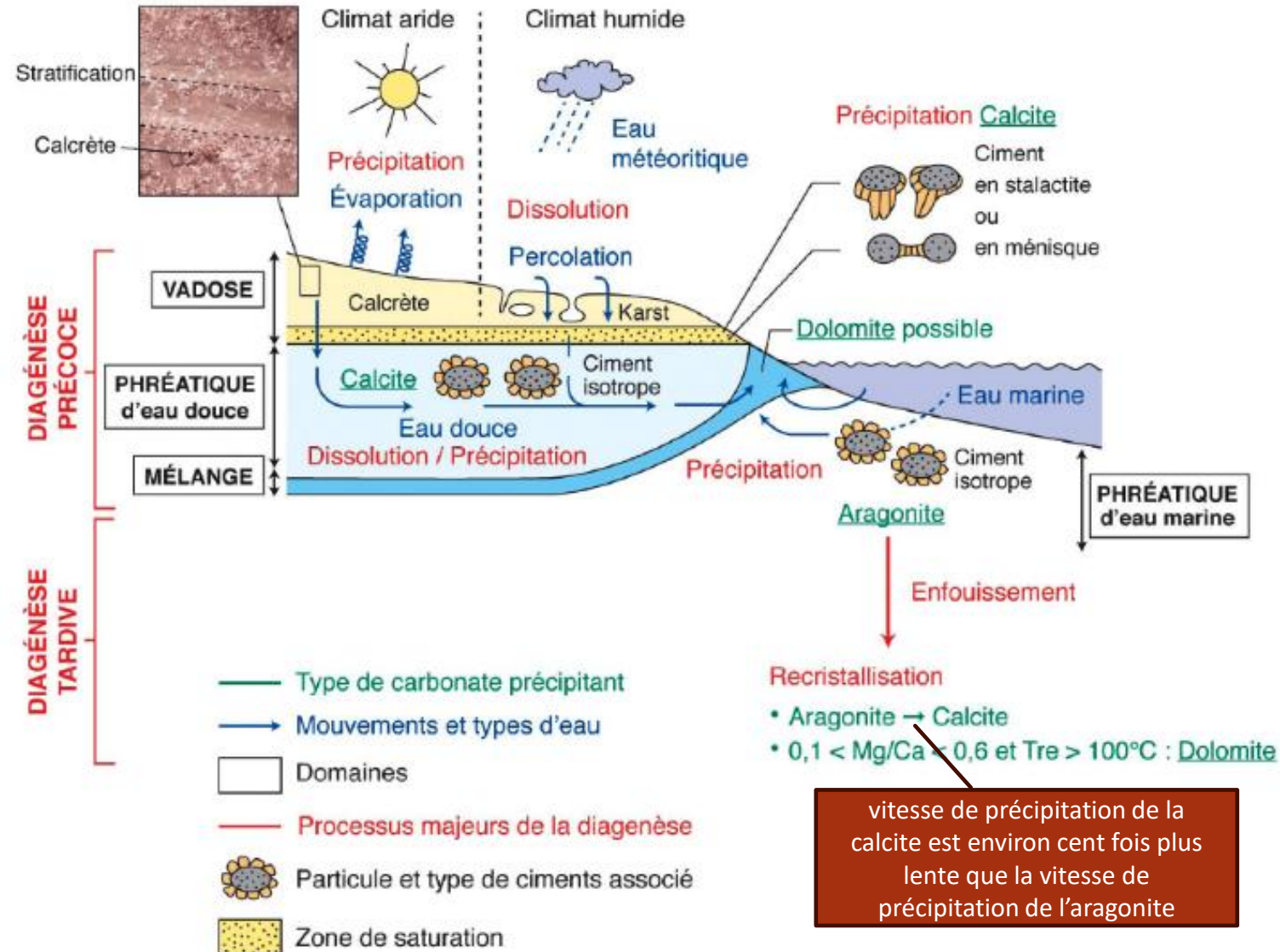


Les différentes étapes de la diagenèse (Vuibert, ed. 2021)

IV. LA TRANSFORMATION DES DEPOTS SEDIMENTAIRES EN ROCHE : LA DIAGENESE

3. Bilan : exemple de la diagenèse des carbonates

- La diagenèse précoce = faible profondeur de sédiments
- 4 environnements différents:
 - Zone de vadose (transit de l'eau vers milieu inf)
 - ✓ Climat sec (évaporation → précipitation = calcrète)
 - ✓ Climat humide (dissolution → reliefs karstiques)
 - Zone phréatique d'eau douce (nappe phréatique, renouvellement d'eau → dissolution/cristallisation d'un ciment)
 - Zone phréatique d'eau marine (nappe sursaturée en carbonates → cimentation forte avec aragonite plus rapide que calcite)
 - Zone de mélange: possible précipitation de dolomite



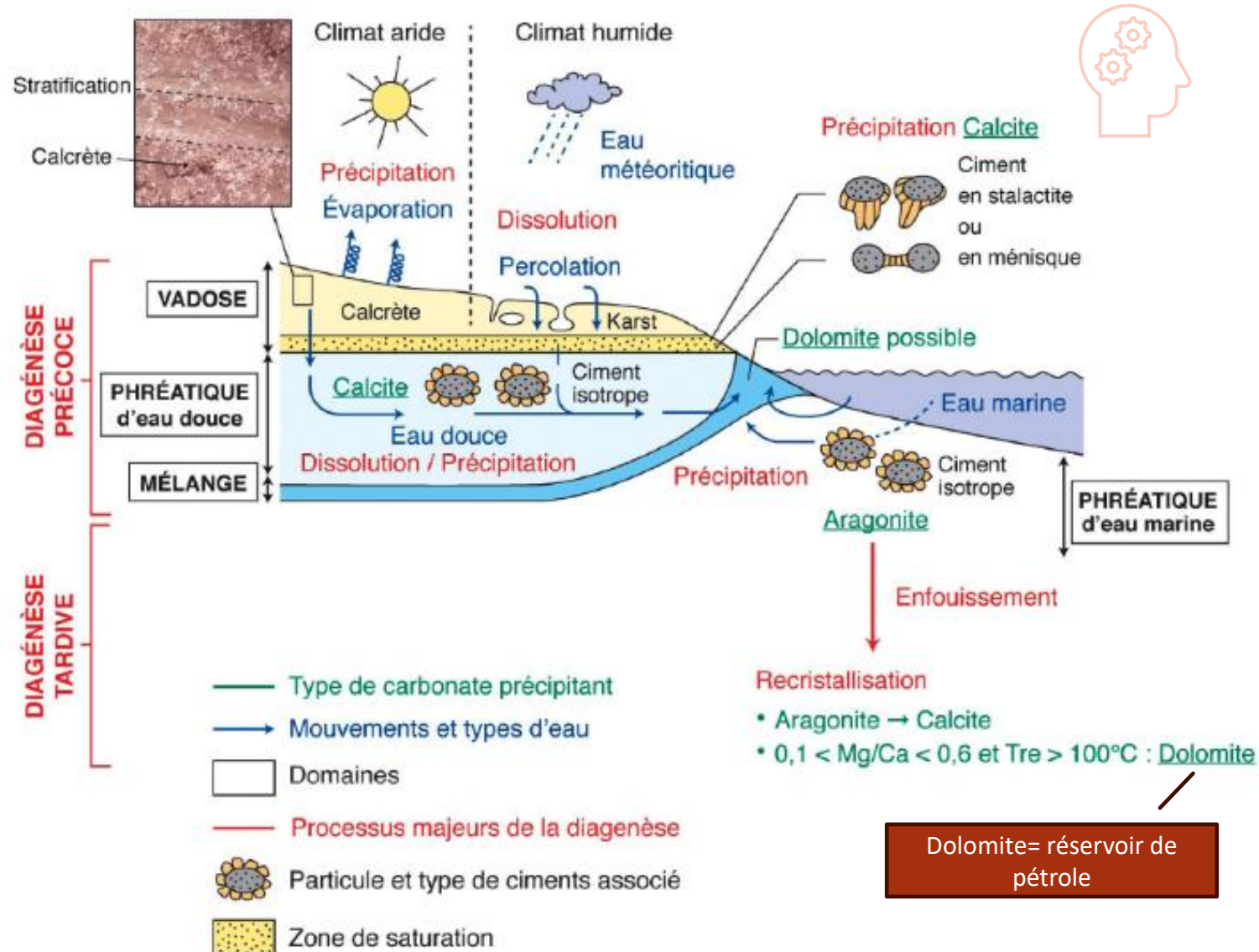
vitesse de précipitation de la calcite est environ cent fois plus lente que la vitesse de précipitation de l'aragonite

Bilan schématique des processus chimiques impliqués lors de la diagenèse des carbonates (A titre de document)(dans Segarra et al., Ellipses, ed. 2021)

IV. LA TRANSFORMATION DES DEPOTS SEDIMENTAIRES EN ROCHE : LA DIAGENESE

3. Bilan : exemple de la diagenèse des carbonates

- La diagenèse tardive = forte profondeur de sédiments
 - **Dissolution** des formes métastables dissoutes (aragonite et calcite magnésienne)
 - **Recristallisation** de forme stable = **calcite**
- ✓ Remarque : si $0,1 < Mg / Ca < 0,6$ et $T^{\circ}C > 100$ °C → recristallisation de dolomite aux dépends de la calcite
- ✓ volume molaire de dolomite < volume molaire de calcite → porosité secondaire → niveaux de dolomite = bons réservoirs pétroliers



- **Roches sédimentaires = détritiques, carbonatées ou évaporitiques** (carbonées non traitées) proviennent d'un **recyclage de matière**
- **Processus d'altération (chimique et physique) + processus d'érosion + transport diversité des** → **modèles de paysages**
- **Matériaux transportés: particules + ions**
- **Importance de l'activité des év dans la sédimentation carbonatée (siliceuse)**
- **Après dépôts: processus diagénétiques mécanismes chimiques de précipitation, dissolution, recristallisation et mécanismes physiques de compaction**

