

# VIII. Les grands environnements de dépôt des carbonates

## 1. INTRODUCTION

Comme dans les autres domaines de la sédimentologie, un fondement essentiel de l'interprétation des paléoenvironnements carbonatés se trouve dans l'étude approfondie des modèles actuels. Le but du présent chapitre est d'introduire brièvement les grands environnements de dépôt des carbonates. Dans une première approche d'ensemble, deux grands domaines s'individualisent de part et d'autre du trait morphologique important:

Le domaine continental et le domaine marin.

## 2. LE DOMAINE CONTINENTAL

Le domaine continental se caractérise par des dépôts souvent très localisés. Bien que ce domaine ne présente en général que peu de sédiments carbonatés, on citera les dépôts lacustres, fluviaux, glaciaires (moraines,...), désertiques, karstiques, de grottes. Il est en outre soumis à l'action des phénomènes météoriques, ce qui est à l'origine d'importantes transformations diagénétiques.

### 2.1. Carbonates lacustres

Les carbonates lacustres (eaux douces et salées) sont le résultat de précipitations inorganiques ou d'accumulations algo-microbiennes ou coquillières.

- **Les précipitations inorganiques** : peuvent être liées à une soustraction de CO<sub>2</sub> (photosynthèse,...), à un mécanisme d'évaporation ou encore au mélange d'eaux à pH différents (lac/rivière, par exemple). L'équation suivante est une notation simplifiée de l'équilibre des carbonates:



- Le rapport Mg/Ca détermine le minéral précipité: Mg/C inférieur à 2 précipitation de calcite ("LMC") (ex. Lac de Constance); Mg/Ca de 2 à 7 calcite magnésienne ("HMC") (Lac Balaton); Mg/Ca de 7 à 12 HMC et dolomite par transformation de HMC; Mg/Ca > 12 aragonite.

- Les carbonates algo-microbiens sont le résultat de:

- la biocorrosion d'un substrat carbonaté par des cyanophycées, des chlorophycées, des rhodophycées, voire des champignons ou des lichens, donnant naissance à des sédiments carbonatés de la taille des silts;
- des phénomènes de piégeage de sédiments et de précipitation par des mousses et des stromatolithes; la formation d'oncoïdes (cyanophycées et algues vertes non squelettiques) avec incorporation de coquilles et débris carbonatés;
- des accumulations d'oogones de charophytes (gyrogonites).

- Les accumulations de coquilles (gastéropodes, lamellibranches) sont du même type qu'en milieu marin (mais avec des genres différents!!). Elles ne forment jamais qu'une faible proportion des carbonates lacustres.

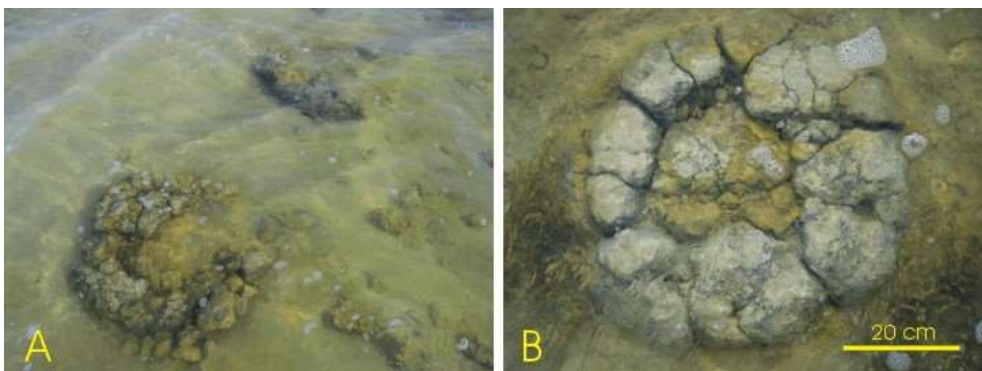


**Formation de "tours" par précipitation de  $\text{CaCO}_3$  dans un sédiment boueux, autour de cheminées hydrothermales. Lac Mono, Lee Vining, Californie.**



**A: Calcaire de Ventenac (Eocène, Minerve); un niveau de lignite interrompt la sédimentation lacustre.**

**B: oncolithe fluviale (Eocène, Coustouge).**



**Stromatolithes lacustres. A: vue générale; B: détail. Lac Thetis, Cervantès, Australie.**

## 2.2. Tufs et travertins

Au débouché de certaines sources, ou plus rarement en rivière, se forment des précipitations de calcite. Ces accumulations peuvent être constituées de lamines denses et régulières (travertin) ou de matériau très poreux et irrégulier (tuf) Un bel exemple de tuf est visible en Lorraine belge: la "Cranière" de Lahage. Il semble admis que les processus de précipitation inorganiques dominent dans le cas des travertins (perte de CO<sub>2</sub>) tandis que les tufs se forment par précipitation de calcite sur des mousses ou des algues.



**Cranière de Lahage; A: vue générale du dépôt; B: production actuelle de travertin.**

### 2.3. Grottes

Les concrétions aragonitiques de grottes (speleothems) peuvent être identifiées, même après leur transformation en calcite, par leur morphologie (planchers, stalactites, stalagmites, pisoïdes) et par l'alternance de lamines de fibres peu allongées et de fibres très allongées, atteignant plusieurs centimètres.

### 2.4. Caliches, calcretes

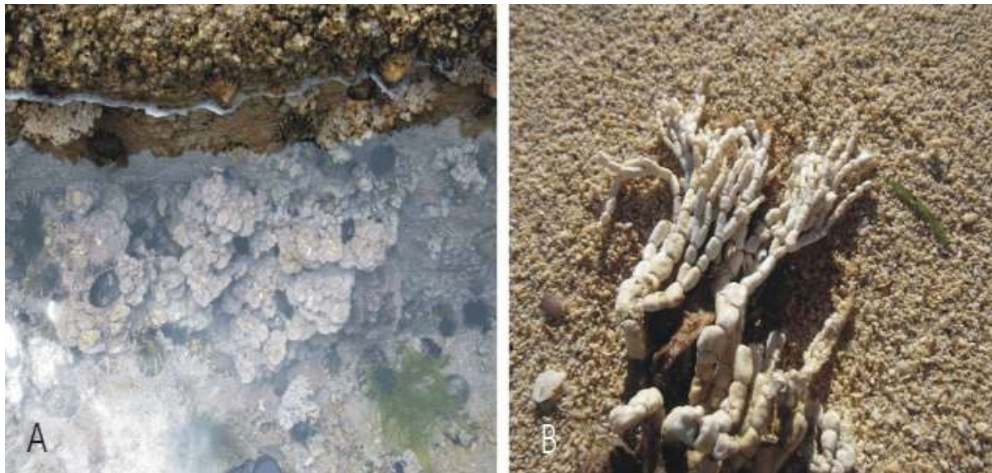
On appelle caliche ou calcrete un paléosol en environnement carbonaté. L'identification des paléosols est importante dans l'analyse des bassins sédimentaires: leur présence témoigne en effet d'une émergence de longue durée. Une série de critères permet leur mise en évidence. Il faut garder cependant à l'esprit qu'en général, la présence d'un seul de ces critères n'est pas une preuve définitive d'émergence ou de pédogenèse. N'oublions pas aussi que les témoins d'émergence sont rarement conservés dans l'enregistrement sédimentaire: ils sont souvent remaniés par la transgression marine qui suit l'épisode continental.

## 3. LE DOMAINE MARIN

On y distingue essentiellement un milieu de **plate-forme** et un milieu de **bassin** séparés par un **talus incliné**. La différenciation de ces environnements est morphologique, mais d'un point de vue bathymétrique, on peut dire que la profondeur varie de 0 à environ 200 m sur la plate-forme; le bassin étant caractérisé par des profondeurs beaucoup plus importantes. La morphologie des plates-formes est sujette à variation, de même que la nature et la géométrie des corps sédimentaires qui s'y déposent. Une nette distinction sédimentologique peut être effectuée entre plates-formes carbonatées tropicales et plates-formes carbonatées tempérées. Lees & Buller (1972) opposent un modèle CHLOROZOAN à un modèle FORAMOL (Fig. VIII.1).

### 3.1. Plates-formes carbonatées tempérées

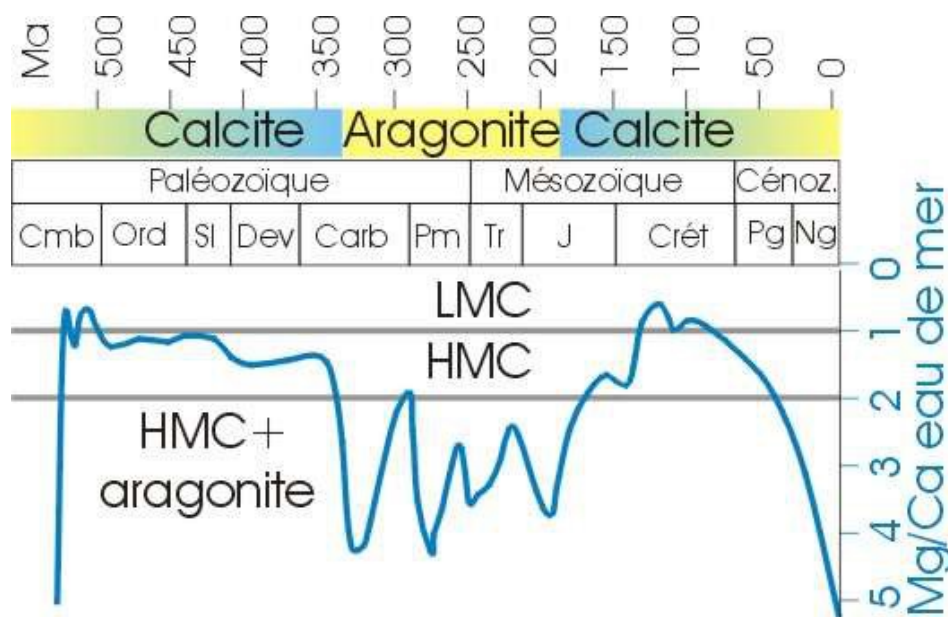
Ces dernières sont moins connues que leurs homologues tropicales. Certaines de ces plates-formes (sud de l'Australie, ouest de l'Irlande) couvrent pourtant des milliers de km<sup>2</sup> de fonds marins. Même si certains organismes constructeurs sont présents (vers, algues rouges, bryozoaires), ils ne forment pas de récifs aussi spectaculaires que les récifs tropicaux. La sédimentologie de ces plates-formes tempérées, en l'absence de vastes structures récifales, s'apparente au fonctionnement des **systèmes détritiques** avec une répartition simple des sédiments en fonction de l'énergie du milieu. Ces sédiments carbonatés tempérés passent d'ailleurs souvent en transition graduelle aux sédiments mixtes et aux sédiments détritiques. D'après Lees & Buller (1972), les principaux groupes d'organismes représentés dans les sédiments carbonatés tempérés sont: les mollusques, les foraminifères benthiques, les échinodermes, les bryozoaires, les barnacles, les ostracodes, les spicules (calcaires) d'éponges, les tubes de vers et les coraux ahermatypiques pour les animaux, les algues rouges (Lithothamnium) pour les plantes. Les foraminifères et les mollusques étant généralement dominants, cette association est appelée "foramol". *En eau tropicale, cette association s'enrichit notablement en coraux et/ou algues vertes calcaires (ex: Halimeda), tandis que la contribution des bryozoaires et barnacles diminue considérablement: on a ainsi l'association "chlorozoan" (chlorophytes + zoanthaires).*



**A: concrétions calcaires dues à des Lithothamnium dans une mare côtière (Ile Grande, Bretagne). B: Halimeda (Poé, Lagon de Bourail, Nouvelle-Calédonie).**

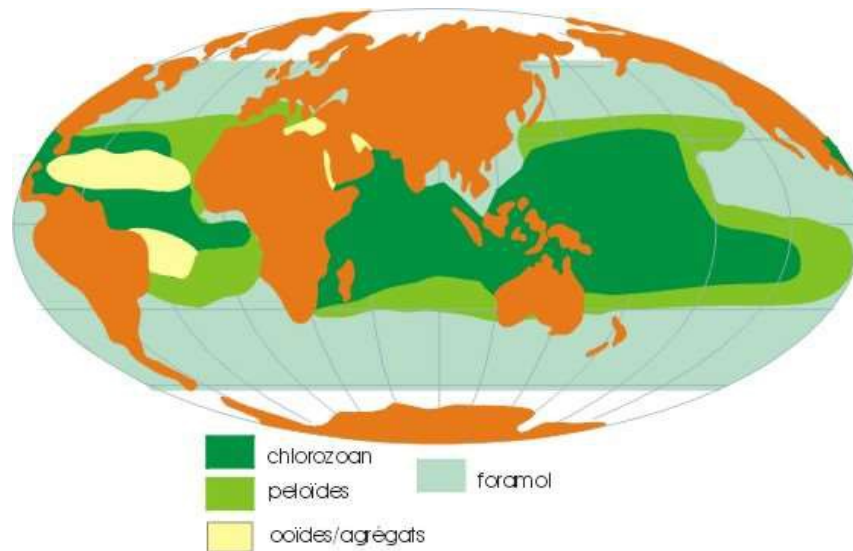
En ce qui concerne les grains non squelettiques (peloïdes, ooïdes, agrégats,...), ils semblent être largement liés à l'association chlorozoan, sauf peut-être pour les péloïdes qui peuvent déborder sur l'association foramol. La boue calcaire ou micrite est constituée d'aragonite et de

calcite magnésienne dans le domaine tropical, tandis qu'en domaine tempéré, l'aragonite devient beaucoup plus rare. **La cimentation est faible** en milieu tempéré. Signalons que dans l'océan actuel, le carbonate de précipitation chimique est l'aragonite (Fig. VIII.1) (suite à un rapport Mg/Ca élevé, cf. "Diagenèse"). Ceci ne veut évidemment pas dire que toute boue calcaire d'origine marine est aragonitique puisque la dégradation des tests des organismes fournit une part importante des sédiments fins et que ces tests peuvent être calcitiques.



**Figure VIII.1: variation du type de carbonate "chimique" précipité dans l'océan au cours du temps.**

Concernant la répartition des deux associations, il semble que chlorozoan soit limitée aux latitudes inférieures à 30° (Fig. VIII.2), tandis que foramol puisse s'étendre entre 60° et l'équateur. Une étude plus fine des facteurs limitant chlorozoan montre que c'est en conjuguant une température océanique minimale supérieure à 14-15°C et une température moyenne annuelle supérieure à 23°C que l'on cerne le mieux l'aire de répartition. Il ne faut pas oublier évidemment que sous la zone photique, l'association chlorozoan disparaît.



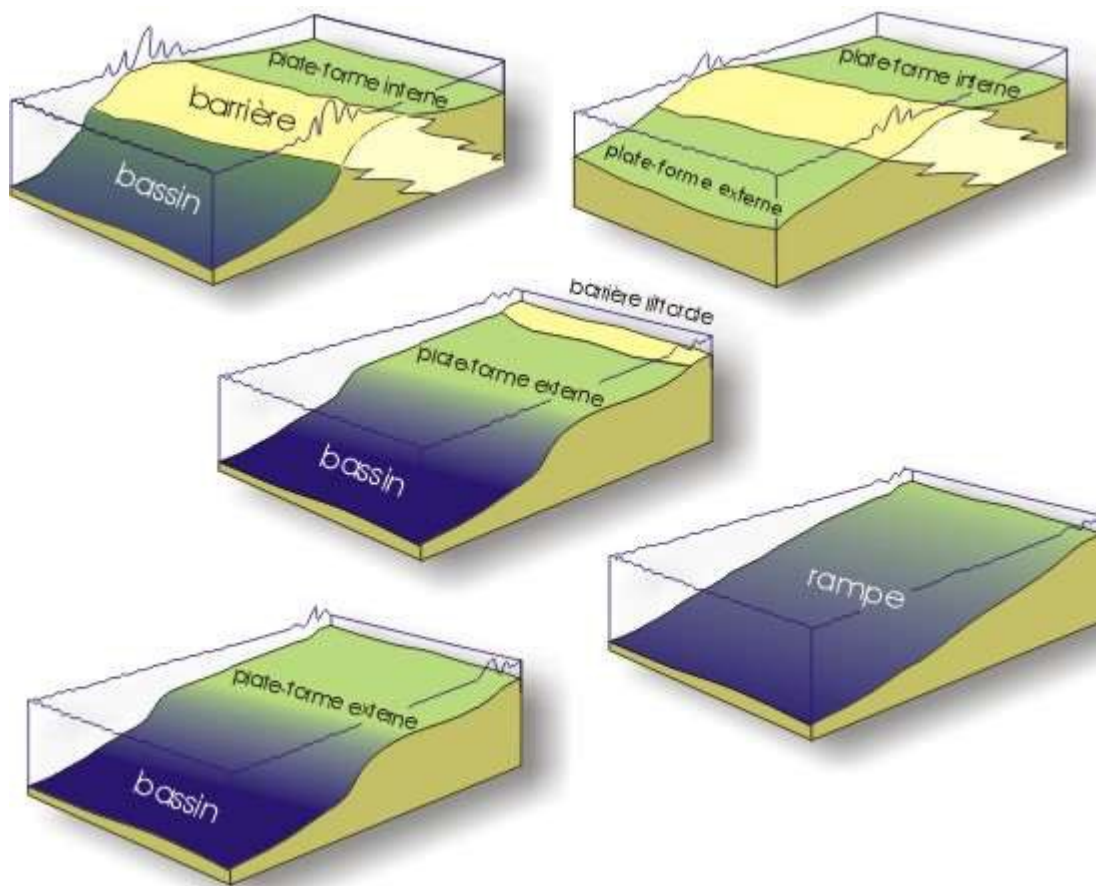
**Figure VIII.2:**répartition des assemblages "foramol" et "chlorozoan" dans l'océan mondial et comparaison avec la répartition de grains caractéristiques.

## 3.2. Plates-formes carbonatées tropicales

### 3.2.1. Les facteurs du milieu

L'action différentielle de certains facteurs de l'environnement sur les plates-formes carbonatées permet de définir un certain nombre de sous-environnements (Fig. VIII.5). Ces facteurs particuliers sont **la morphologie, l'hydrodynamisme, le chimisme (salinité, oxygénation) et la pénétration de la lumière**. Les multiples possibilités de variation de ces facteurs expliquent la diversité des plates-formes carbonatées. Il ne faut donc pas raisonner à partir d'un modèle figé.

- **La morphologie de la plate-forme:** elle est contrôlée essentiellement par l'existence, l'absence ou la localisation variable d'une barrière ou d'un haut-fond plus ou moins continu (Fig. VIII.3). Cette barrière revêt une géométrie et une nature variable et complexe. L'existence d'un relief a une influence directe sur le niveau d'énergie, le chimisme des eaux (salinité, oxygénation) et l'activité biologique: il entraîne la distinction entre un milieu de **plate-forme interne** et un milieu de **plate-forme externe** ou de bassin. En l'absence de rupture de pente nette, la profondeur augmente de façon progressive depuis le littoral jusqu'au bassin: on parle alors **de rampe**.



**Figure VIII.3: morphologie des rampes et plates-formes carbonatées.**





**Vue d'avion d'une barrière récifale, Tontouta, Nouvelle-Calédonie.**

Il est à noter que le vocabulaire anglais est plus précis: les "carbonate platforms" regroupent à la fois les "ramps" (sans rupture de pente) et les "shelves" (avec rupture de pente). En français, nous ne disposons que du terme plate-forme que l'on doit donc opposer à rampe. On peut éventuellement regrouper rampe et plate-forme s.s. au sein des "plates-formes s.l."...

PLATE-FORME AVEC BARRIERE	RAMPE
rupture de pente	pas de rupture de pente
présence d'une barrière continue	pas de barrière continue
énergie forte près de la barrière, diminue vers le rivage	énergie forte près du rivage, formation de bancs ("shoals")
barrière=surtout framestones	bioconstructions=surtout bafflestones, bindstones
turbidites, blocs exotiques provenant de la barrière	peu de turbidites, pas d'olistolithes, tempestites
sédiments lagunaires cycliques de grande extension géographique	sédiments restreints peu étendus, non cycliques.

Tableau VIII.2: éléments diagnostiques permettant de distinguer entre rampe et plate-forme s.s.

- **Les facteurs dynamiques:** ils comprennent vents, courants de vagues et de marées. Leur résultat est surtout un tri granulométrique comme dans les systèmes détritiques. La granulométrie des sédiments et certains types de figures sédimentaires donnent donc des informations importantes quant au niveau d'énergie du milieu, souvent en relation avec la profondeur et le degré de protection.

- **Le chimisme des eaux:** la sursalure, le manque d'oxygénation des eaux entraînent de profondes modifications dans le contenu faunistique, ce qui peut conduire à distinguer:

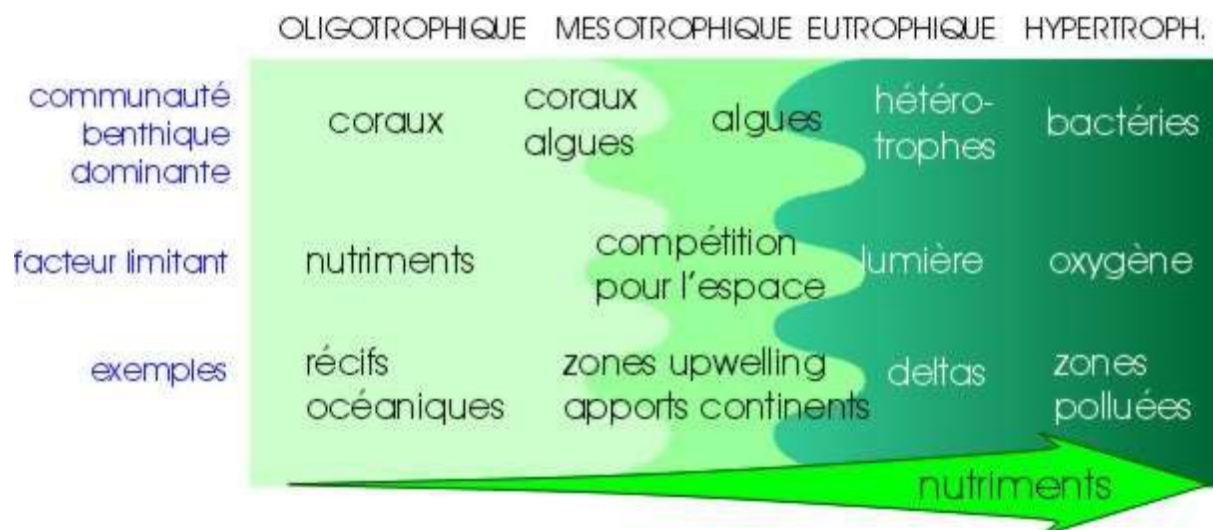
- **un milieu ouvert:** la circulation des eaux marines n'est pas entravée;
- **un milieu restreint:** la circulation des eaux marines est entravée (par exemple par une barrière récifale) et en conséquence leur qualité subit des modifications plus ou moins importantes. Ces distinctions peuvent même exister en l'absence d'une barrière, par exemple dans le cas d'une plate-forme très étendue et peu profonde.

- Le contenu en nutriments des eaux est aussi un paramètre très important. Ce paramètre permet de distinguer des environnements oligotrophique, mésotrophique, eutrophique et hypertrophique (Fig. VIII.4).

En milieu oligotrophique, relativement pauvre en nutriments, les processus de recyclage de la nourriture sont essentiels et les organismes capables d'utiliser plusieurs sources d'énergie sont favorisé (exemple: les coraux hermatypiques qui outre leur caractère hétérotrophe, profitent de la photosynthèse de leurs algues symbiotiques); le facteur limitant dans ce type d'environnement est l'apport de nutriments.

En milieu mésotrophique, l'apport de nutriments est plus important et d'autres organismes interviennent: algues, faune benthique plus riche; le facteur limitant est la compétition pour l'espace disponible.

En milieu eutrophique, l'apport en nutriment est suffisant pour que se développe largement le phytoplancton; le facteur limitant est la lumière et la profondeur de la zone photique et enfin, en milieu hypertrophique, le développement de phytoplancton et l'accumulation de la matière organique sont tels que la dégradation de cette matière consomme une bonne part de l'oxygène du sédiment, limitant la vie benthique; dans ce dernier cas, le facteur important est la teneur résiduelle en oxygène.



**Figure VIII.4: communautés organiques et nutriments dans les eaux tropicales.**

- **L'influence de la lumière:** la pénétration de la lumière permet également de distinguer deux domaines entre lesquels les conditions biologiques varieront considérablement:

un domaine photique et un domaine aphotique. L'absorption de la lumière par l'eau est sélective: les infrarouges sont absorbés dans le premier mètre, tandis que les longueurs d'ondes plus courtes (bleu) pénètrent relativement profondément dans l'océan (plus de 100m). Les différents organismes n'utilisant pas les mêmes longueurs d'onde en fonction de leur pigment (algues rouges et algues vertes, par exemple), l'étendue de la zone photique est variable suivant les communautés considérées.

Il est évident que certains facteurs ne sont pas indépendants les uns des autres et que l'édification d'un accident topographique continu (barrière, banc, récif, seuil) aura une incidence sur le chimisme des eaux et sur leur dynamique. Dès ce moment, la plate-forme interne sera à circulation restreinte. Si la barrière est de nature algaire (algues vertes, cyanobactéries) ou récifale (coraux, algues rouges), elle ne pourra s'établir que dans le domaine photique. Même si les eaux sont peu turbides et claires, les profondeurs d'implantation n'excéderont pas quelques dizaines de mètres.

### **3.2.2. Les grands environnements de dépôt**

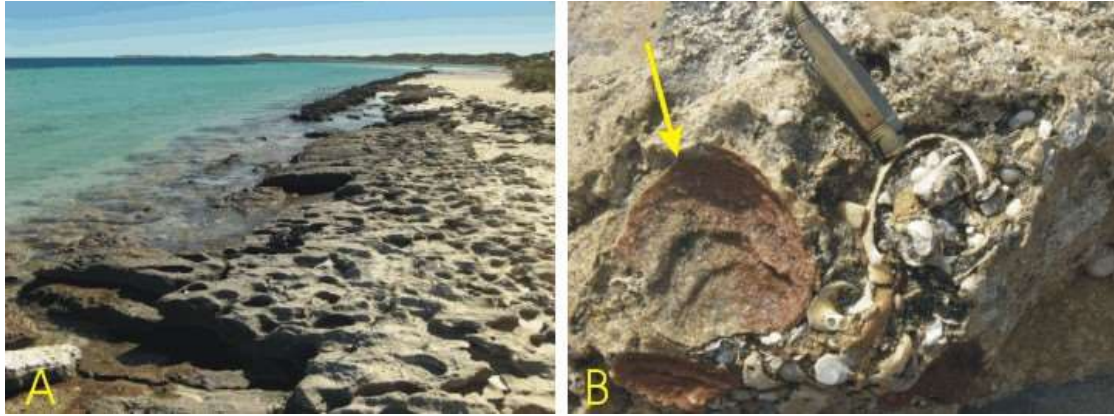
L'action des facteurs du milieu est à l'origine de la différenciation des environnements au sein des plates-formes. Pour les mers où la marée est sensible, on distingue sur la plate-forme interne (Fig. VIII.5):

- **Un milieu supratidal:** il est très épisodiquement envahi par les hautes marées de vives eaux ou les ouragans. Les dépôts que l'on y trouve sont plus ou moins développés en fonction du profil de la côte. Différents types de milieux particuliers s'inscrivent dans ce domaine, tels que: sebkha, marais côtiers,.... Leur nature est fortement influencée par le climat (par exemple: climat aride=possibilité de sabkha, climat humide=marais). En zone tropicale, le développement important de la végétation génère de grandes quantités de matière organique incorporée au sédiment. La présence à la fois d'eaux douces et salées en font un milieu particulièrement favorable à la diagenèse précoce;



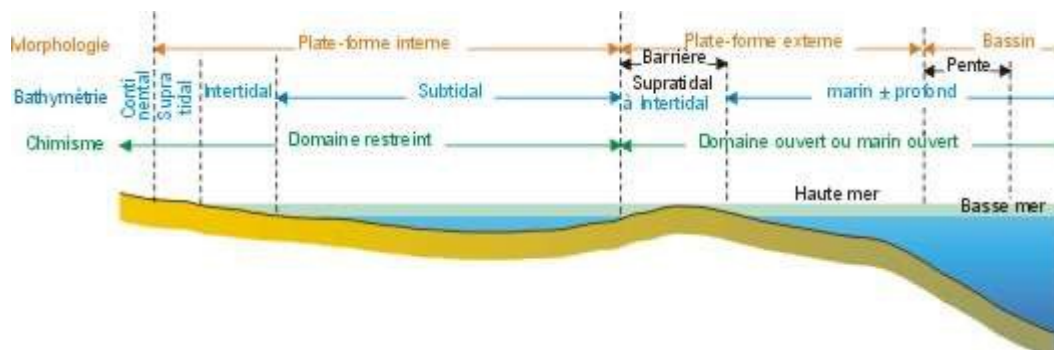
**A: sebkha en milieu supratidal sous climat aride (El Melah, Tunisie); les bords rebroussés des polygones métriques sont dus à la croissance d'évaporites dans le sédiment; B: mangrove à palétuviers en milieu intertidal sous climat tropical; observer les pneumatophores (flèche), permettant aux racines de respirer (Carnarvon, Australie).**

- Un milieu intertidal:** correspondant à la zone de balancement des marées. Les périodes d'exondation et d'ennoyage se marquent par des dépôts et des faciès typiques (birdseyes, etc.), parfois rythmiques. L'énergie des dépôts y est souvent élevée; toutefois, suivant l'ampleur des marées, la direction des vents et des courants, la présence ou non d'une barrière, les sédiments seront grossiers ou fins. C'est un milieu où la vie est généralement abondante, mais où les conditions écologiques sont extrêmement difficiles du fait des alternances entre émergence et immersion, des variations de température, d'insolation, de salinité, de pH, de chimisme des eaux. Seuls des organismes spécialement adaptés peuvent y survivre. L'influence du climat est toujours importante, par exemple en ce qui concerne le développement des tapis alga-microbiens, localisés dans l'intertidal en climat aride, dans le supratidal en climat plus humide. C'est dans ce milieu intertidal que l'on rencontre les plages, chenaux de marée, levées, mangroves, etc. C'est aussi avec le milieu supratidal un environnement privilégié de la diagenèse précoce. Une des formations les plus remarquables de la zone intertidale est le "beachrock" ou "grès de plage" qui résulte de l'induration rapide des sédiments par précipitation de ciment carbonaté entre les grains;



**A: Beach-rock le long de la plage de Coral Bay. B: détail d'un beach-rock montrant l'incorporation de coquilles et de fragments de grès (flèche), Australie.**

- Un milieu subtidal:** dans ce milieu, l'énergie est variable en fonction de la profondeur. La diversité des faciès, liée au gradient hydrodynamique, reste importante. La faune et la flore y sont plus ou moins variées en fonction du degré de restriction. Des organismes comme les éponges et les échinodermes deviennent plus abondants. On observe également l'apparition de quelques formes pélagiques. Au point de vue chimique, aux faciès carbonatés et évaporitiques peuvent s'ajouter des faciès enrichis en silice, phosphates, oxydes de fer,... La barrière isole ensuite la plate-forme interne de la plate-forme externe où l'environnement est beaucoup plus stable et homogène, en liaison avec le milieu océanique. Les organismes pélagiques deviennent prépondérants et les sédiments sont généralement fins, situés sous la zone d'action des vagues. La teneur des eaux en nutriments contrôle la productivité organique.



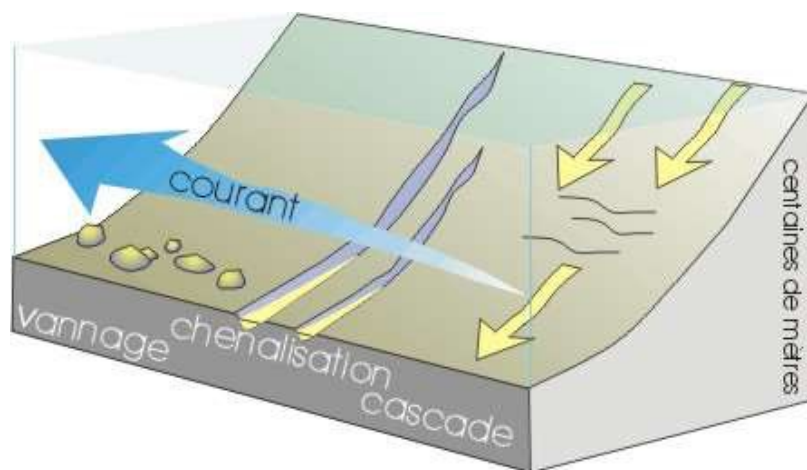
**Figure VIII.5: répartition des environnements sur une plate-forme avec barrière.**

### 3.3. Le talus

L'étude détaillée des talus est loin d'être achevée. Outre les plongées profondes, ce domaine exige l'emploi de méthodes sismiques lourdes. Le talus possède une pente moyenne de 0,7 à 1,3 m par km et s'étage d'environ 130 m à environ 2000 m, c'est-à-dire sous la zone photique et sous la zone d'action des vagues.

Une sédimentation décline complexe caractérise les talus: cascade de sédiments, mise en place de turbidites par glissements liés à la gravité, à des cisaillements mécaniques ou à des contraintes tectoniques, séismes, chute de blocs, olistholithes,... (Fig. VIII.6).

Le talus est de ce fait essentiellement une zone de transit des sédiments. A la base des talus, les dépôts sont étalés sous la forme de lobes profonds, coincés contre la base du talus et s'épandant vers les fonds océaniques (cf. sédiments détritiques). Leur superficie est parfois considérable, avec chenaux d'épandages, interfluves, ravinements intraformationnels et slumps.



**Figure VIII.6:** différents types de transfert de sédiment sur le talus en fonction d'une vitesse croissante des courants océaniques: à droite, cascade de sédiments; au centre, formation de canyons et écoulements gravitaires chenalisés; à gauche: vannage des sédiments et accumulation de blocs.

D'après T. Mulder et le membres de la mission océanographique  
CARAMBAR (2010).

### 3.4. Le bassin

La température des eaux y est pratiquement constante et comprise entre  $-1^{\circ}$  et  $4^{\circ}\text{C}$ . Au point de vue biologique, on y observe une dominance des organismes pélagiques. Le benthos est réduit, sauf pour certaines communautés spécialisées: certains types de crinoïdes, récifs profonds à *Lophelia*. On note l'absence totale d'algues, naturellement.

Par rapport aux eaux baignant les plates-formes, en général bien oxygénées par l'agitation due aux vagues et la production photosynthétique d'oxygène, les eaux plus profondes peuvent présenter des phénomènes de sous-oxygénation. Un élément important est la présence de la zone d'oxygène minimale (ZOM), résultant de la consommation d'oxygène par la respiration des organismes et surtout par la décomposition de la matière organique. Cette ZOM se développe dans l'océan actuel entre -500 et -1200 m environ. Les fonds baignés par des eaux sous-oxygénées se caractérisent par des sédiments anoxiques (sombres et non bioturbés). Rappelons qu'au contraire, la présence d'eaux arctiques ou antarctiques de fond, froides, denses et salées, contribue à l'oxygénation des fonds océaniques.

En ce qui concerne l'équilibre des carbonates, le degré de saturation de la calcite est inversement proportionnel à la profondeur, quel que soit le type d'océan concerné.

L'augmentation de la pression et l'abaissement de la température augmentent le taux de solubilité du  $\text{CaCO}_3$ , d'où une tendance à la décalcification générale des sédiments à partir d'une profondeur critique appelée lysocline (on note une très brusque diminution du  $\text{CaCO}_3$  vers -4000 à -5000 m). Dans les sédiments, la lysocline peut être définie par le passage d'un faciès à organismes carbonatés bien préservés à un faciès à organismes partiellement dissous (Fig. VIII.7). Inversement, le contenu en  $\text{SiO}_2$  et phosphates augmente progressivement avec la profondeur. Des concentrations en Fe et Mn, sous l'influence de mécanismes bactériens, sont également possibles.

Il faut remarquer que la dissolution des tests carbonatés est sélective et dépend de paramètres comme la minéralogie (par résistance croissante: aragonite-calcite Mg-calcite), la taille, la présence éventuelle d'enduits organiques, la présence de courants de fond froids qui favorisent la dissolution. Cette particularité permet de subdiviser la lysocline en plusieurs zones caractérisées par la nature des tests préservés (exemple: de bas en haut: lysocline des coccolites, lysocline des foraminifères).



En conséquence, les sédiments océaniques profonds ne peuvent être constitués de boues carbonatées qu'au-dessus de la lysocline. Il s'agit alors essentiellement de débris d'organismes planctoniques: coccolithes, foraminifères (globigérines), ptéropodes. Au-dessous ou à des latitudes non favorables, s'observent des boues à radiolaires et diatomées (eupélagique) et des boues terrigènes (hémipélagique) auxquelles s'ajoutent des turbidites (Fig. V.1). Il semble qu'un autre facteur important de la formation de carbonates profonds soit la précipitation de ciments (calcite Mg et surtout calcite) dans des zones à sédimentation très ralentie

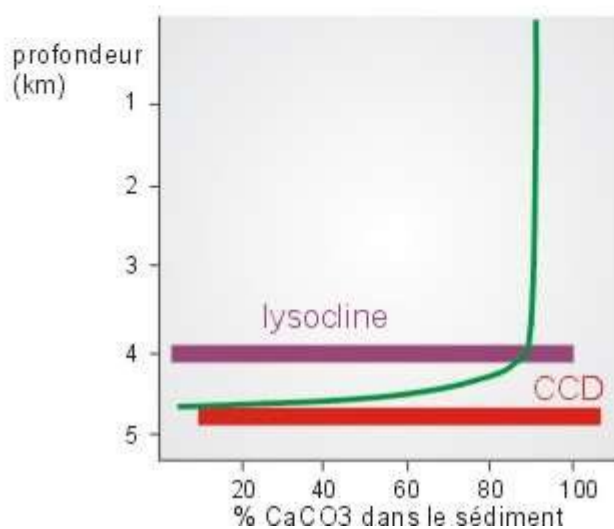


Figure VIII.7: profondeur de la CCD dans l'océan mondial et relation entre lysocline et CCD.