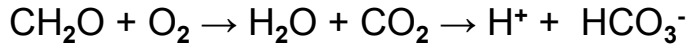


# La matière organique

En conditions anaérobies, la dégradation des glucides libère des ions ce qui diminue le pH et inhibe la précipitation des carbonates.



Par ailleurs, la production d'anions provoque une sursaturation ce qui favorise la précipitation de carbonates.

Dans la nature ambiante et compte tenu des conditions de P, T° et saturation, le milieu devient préférentiellement plus acide par dégradation de la MO et donc la dissolution des carbonates solides (exple: corrosion des tests carbonatés des foraminifères planctoniques).

A l'inverse, on peut précipiter des carbonates dans un milieu plus basique par libération d'anions OH- dans des réactions faisant intervenir le Fe. Exple formation des nodules de calcaire dans les marnes riches en MO.

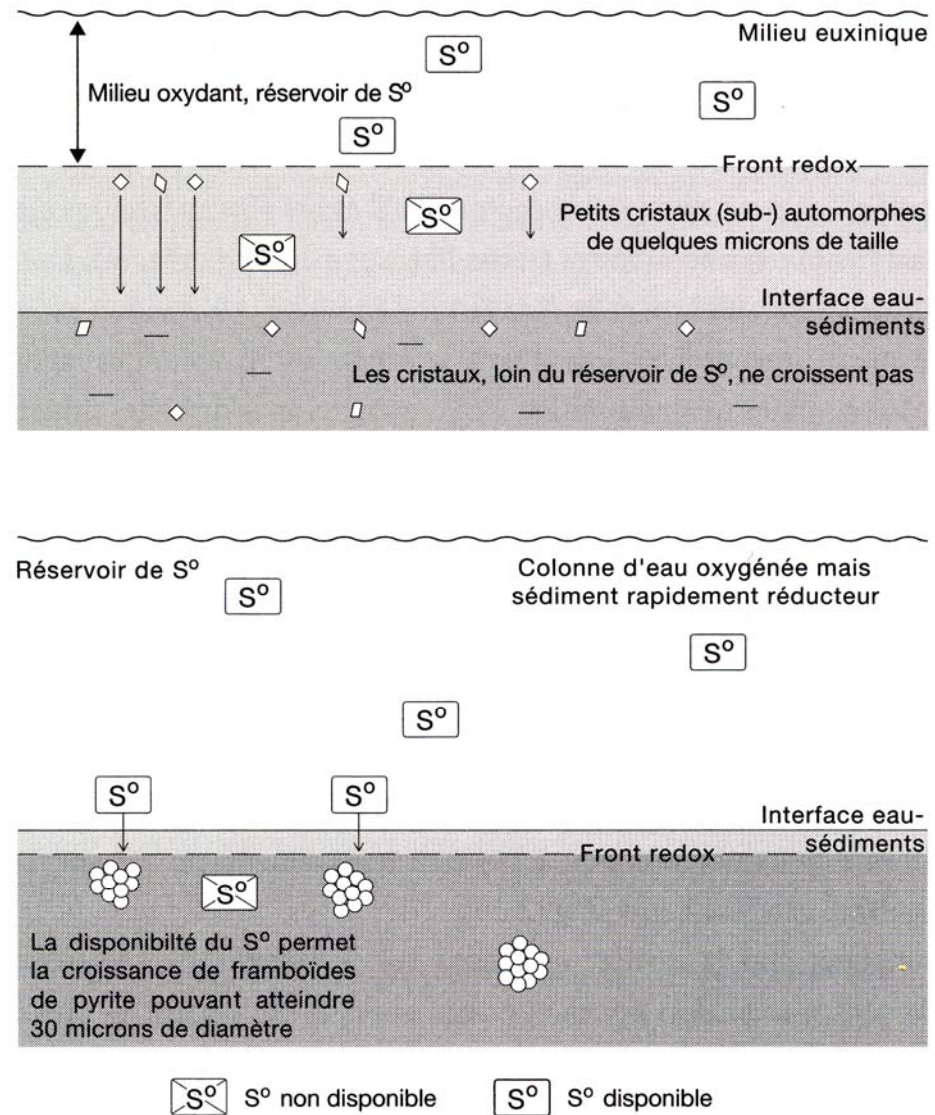
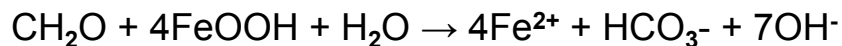
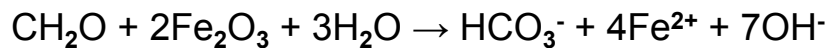


Figure 2.19. Schéma de formation de la pyrite framboïdale ou automorphe dans les eaux en fonction de la position du front redox

# La matière organique

## Les phosphates

La biomasse phytoplanctonique et bactérienne libère du phosphore (présent dans les constituants cellulaires) pendant la décomposition dans les sédiments. Le P reste sous forme dissoute en conditions réductrices et peut migrer par les eaux interstitielles au cours de la diagenèse précoce.

Dans les milieux euxiniques et réducteurs, le P peut regagner la colonne d'eau et remonter vers les eaux de surface où il participera à la productivité (productivité soutenue par le recyclage du P avec des eaux de fond anoxiques !!).

Dans les environnements moins réducteurs, le P libéré par décomposition de la MO peut précipiter à l'interface eau/sédiment où dans le sédiment pour former des grains phosphatés. La concentration des particules phosphatées par des mécanismes sédimentologiques (remobilisation dans les milieux agités et dépôt) donnent naissance à des phosphorites.

## Les éléments associés à la MO

Le **Baryum** (Ba) est accumulé sous forme de barytine ( $\text{BaSO}_4$ ) dans les cellules du phytoplancton. La barytine est protégée de l'eau de mer à l'intérieur de la structure organique, incorporée dans le sédiment la barytine est protégée de la dissolution car les eaux interstitielles sont peu agressives.

Il est démontré dans les environnements récents que la teneur en Ba est proportionnelle au flux de MO qui se dépose sur le fond marin. La teneur en Ba permet de calculer le flux de MO et donc d'estimer la paléoproduktivité. Ce n'est pas le cas des sédiments réducteurs où la sulfato-réduction intervient et libère le Ba en solution où il peut migrer dans les eaux interstitielles soit regagner la colonne d'eau soit précipiter à l'interface eau/sédiment.

Le Ba se retrouve dans les sédiments à l'aplomb des zones de productivité faibles à modérées. Pour des productivités fortes, les sédiments sont le siège de conditions réductrices défavorables à sa préservation.

# La matière organique

## Les éléments associés à la MO

Les **métaux** sensibles aux conditions redox sont solubles sous formes réduites ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ) et insolubles sous formes oxydés ( $\text{Fe}^{3+}$  et  $\text{Mn}^{4+}$ ). D'autres métaux comme l'U, le V et le Mo ont un comportement inverse qui se répercute sur la composition chimique des sédiments marins.

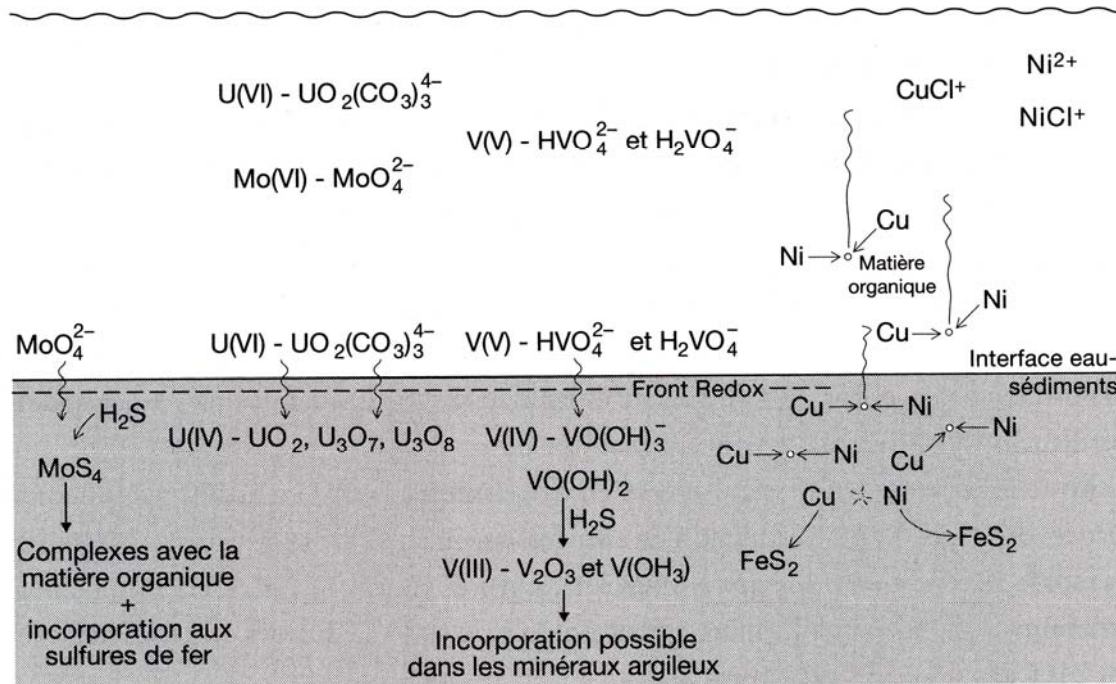


Figure 3.4. Représentation schématique du comportement de certains éléments traces sensibles aux conditions redox et/ou au flux de matière organique

Uranium (U), vanadium (V) & molybdène (Mo) ont un comportement conservatifs dans l'eau de mer normalement oxygénée, mais changent de valence et deviennent insolubles en conditions réductrices. Ce changement de valence est facilité par la présence d' $\text{H}_2\text{S}$  dans le cas de Mo. Cuivre (Cu) et nickel (Ni) sont incorporés dans des complexes avec la matière organique en cours de sédimentation à travers la colonne d'eau. Une fois sédimentée, la matière organique est généralement reminéralisée, et Ni et Cu ainsi libérés sont le plus souvent incorporés aux sulfures de fer, la pyrite le plus fréquemment.

Pour une eau de mer normalement oxygénée, le fer et le manganèse sont oxydés et se déposent à l'interface eau/sédiment et peuvent être incorporés dans le sédiment.

Si des conditions réductrices se développent dans le sédiment, les oxydes et oxyhydroxides de fer et de Mn sont réduits.

Le fer migre pour précipiter sous forme de pyrite.

Le Mn solubilisé n'est pas incorporé aux sulfures et sera relâché vers la colonne d'eau si le front redox se situe à l'interface eau/sédiment. A l'inverse, si le front redox se situe dans le sédiment, le Mn pourra précipiter sous forme de carbonate (rhodocrosite) si les conditions de pH le permettent.

# La matière organique

Les éléments comme l'U, le V et le Mo forment des oxyanions solubles dans l'eau de mer normalement oxygénée. Pour des conditions réductrices présentes dans les eaux interstitielles et si le front redox se situe à l'interface eau/sédiment, un gradient géochimique se forme entre la colonne d'eau et les eaux interstitielles qui ne contiennent plus ces éléments sous forme solubles car ces éléments sont réduits et forment de nouveaux oxyanions insolubles.

Un transfert de ces éléments en solution de la colonne d'eau vers les eaux interstitielles provoque la réduction et la précipitation de ces éléments dès qu'ils franchissent le front redox ce qui maintient le gradient et permet un pompage en V, U et Mo (système plus complexe pour le Mo mais globalement identique au V et U) et donc un enrichissement de ces métaux dans le sédiment.

Dans le cas de milieux euxiniques où le front redox gagne la colonne d'eau, le phénomène est encore plus important.

A l'inverse, il n'y a pas d'enrichissement en ces éléments dans le sédiment si le front redox est plus enfoui dans la pile sédimentaire.

D'autres éléments comme le Ni, le Cu, le Co et le Zn sont apportés au sédiment via des complexes organo-métalliques et de complexes chlorurés. Au + le flux de MO est important, au + ces éléments seront enrichis dans le sédiment.

Si la dégradation de la MO se fait en conditions réductrices, le Ni et le Cu principalement sont libérés des complexes et incorporés dans les sulfures de fer. Si la dégradation de la MO se fait dans des conditions oxydantes, alors les métaux sont solubilisés et ne sont pas incorporés au sédiment. Le Cu et le Ni sont des marqueurs de productivité.

Les R sédimentaires marines, à grains fins et peu carbonatées présentent un **rapport C/S = 2,7**. Cette relation indique qu'une roche qui présente un excès de S ( $C/S < 2,7$ ) reflète des conditions propices à la formation des sulfures de fer et/ou l'incorporation de S réduit à la MO → résultat de conditions euxiniques. Un déficit en S ( $C/S > 2,7$ ) est le reflet d'un milieu impropre à la formation de sulfures, malgré la présence de MO, témoin de conditions pauvres en sulfates → eaux douces ou saumâtres.

# La matière organique

## Sédimentologie de la MO

### 1. Répartition de la matière organique dans les sédiments marins récents

Des campagnes océanographiques (années 1960-1970) ont permis d'avoir une idée des concentrations en Corg dans les différents domaines de l'océan et ce par type de lithologie:

- Silts et argiles des marges continentales ont des teneurs moyennes (en masse) en Corg les plus élevées (jusqu'à 1%)
- Carbonates et sables ne dépassent pas 0,3 % en Corg
- En domaine océanique profond, quelque soit la lithologie, on a des teneurs qui ne dépassent pas 0,25 %.

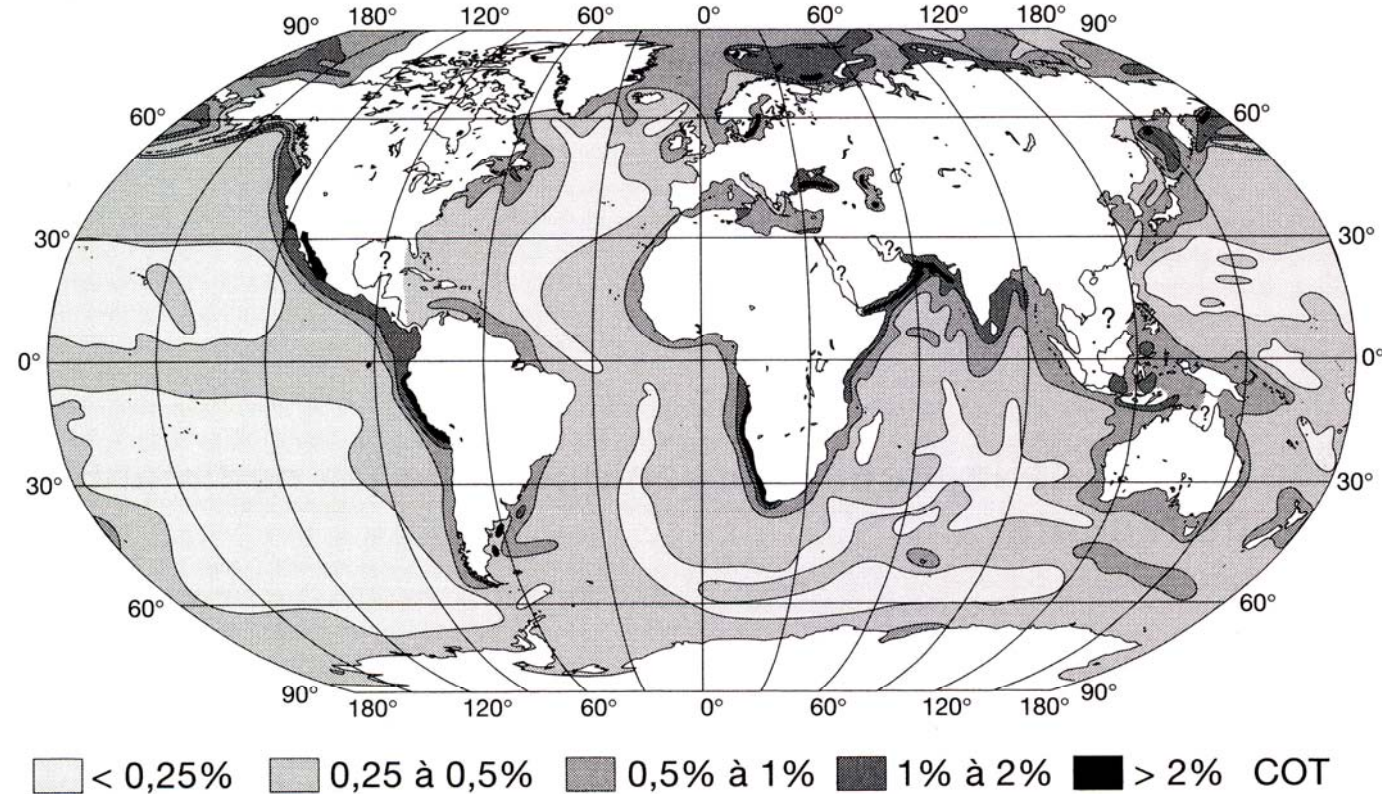


Figure 4.1. Carte de la répartition des teneurs en carbone organique (% COT) des sédiments marins superficiels

Comparer cette carte à celle de la productivité primaire (figure 1.19).

(compilation d'après diverses sources)

Ce sont les domaines marins peu profonds qui contiennent le plus de MO et compte tenu des épaisseurs de sédiments accumulés, il s'agit là de la zone où l'essentiel de la MO est piégée.

## Sédimentologie de la MO

### 2. Facteurs sédimentaires influençant la concentration en MO dans les sédiments marins et lacustres

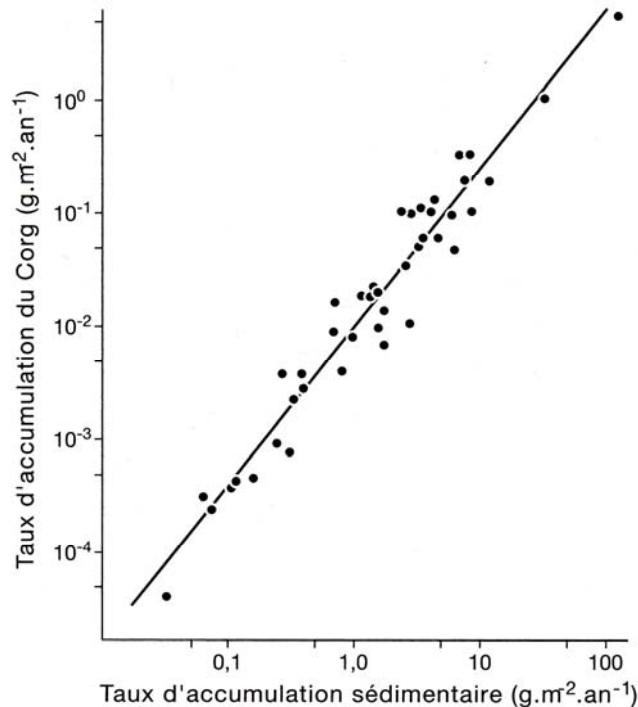
A) Le taux de sédimentation ou l'épaisseur de sédiments accumulés par unité de temps est corrélable à la quantité de MO dans les sédiments marins récents ou anciens.

La formule de calcul du taux d'accumulation massique (TAM) d'un constituant X du sédiment est:

$$\text{TAM (X)} = (\%X) \times \text{DS} \times \text{TS}$$

où DS est la densité sèche du sédiment brut en  $\text{g/cm}^3$

où TS est le taux de sédimentation exprimée en  $\text{cm/ka}$  ou  $\text{m/Ma}$



Droite de corrélation positive entre le taux d'accumulation de sédiments et celui d'accumulation du Corg dans les environnements marins actuels et récents (d'après Heath, 1977 in Tyson, 1985).

Les taux d'accumulation élevés accélèrent le transit de la MO au travers des différentes zones de dégradation aérobie et anaérobie et donc le degré de dégradation est réduit.

# La matière organique

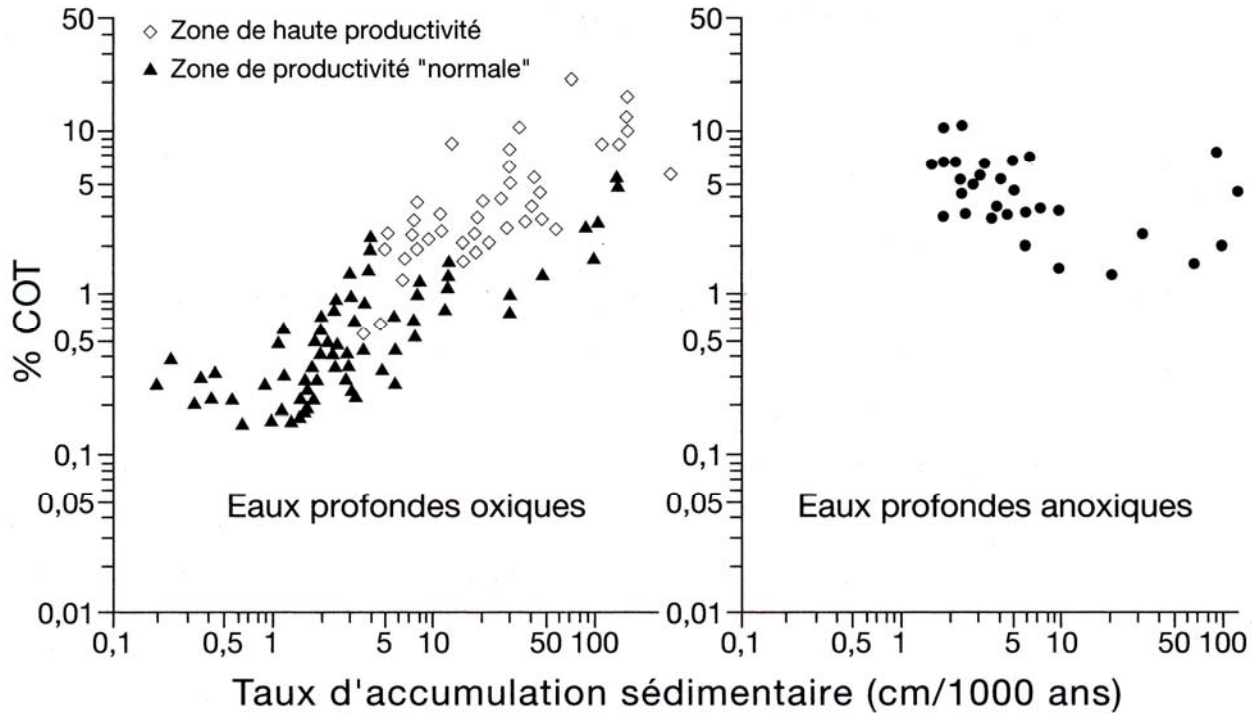


Figure 4.3. Variation des teneurs en carbone organique (% COT) des sédiments marins actuels en fonction des taux d'accumulation sédimentaire (en  $\text{cm}\cdot\text{ka}^{-1}$ )

À gauche, sont reportés les environnements marins aux eaux de fond bien oxygénées, à droite les environnements aux eaux anoxiques, c'est-à-dire dépourvues d'oxygène.

(d'après Stein, 1986 et Huc, 1982 *in* Tyson, 1995)

Le TS n'a pas d'influence lorsque des conditions anoxiques de fond règnent (puisque la dégradation est plus lente qu'en conditions oxiques) et quand la quantité de MO terrigène (provenant du continent) est très faible.

# La matière organique

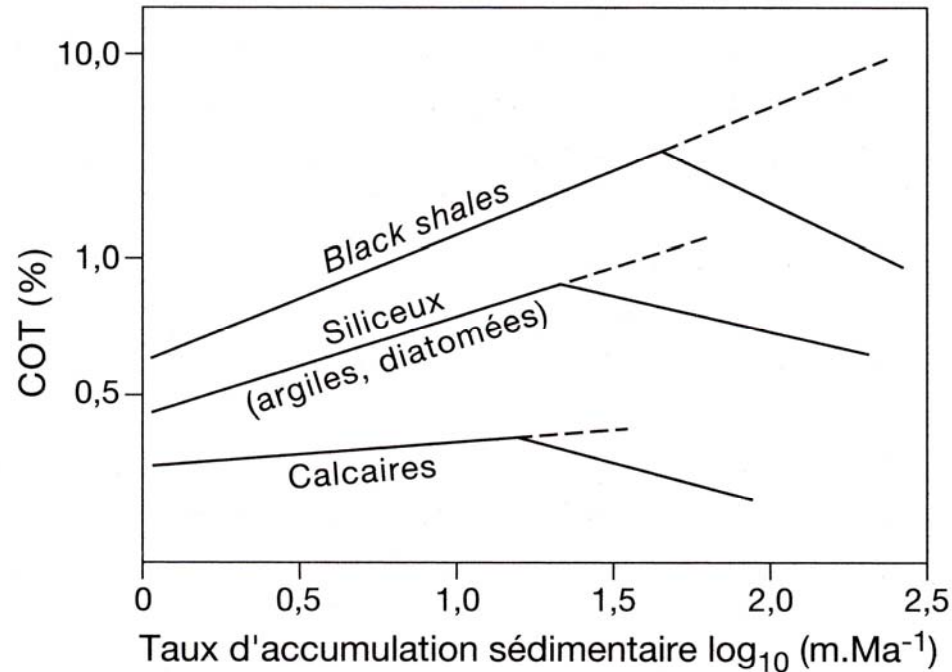


Figure 4.4. Évolution de la concentration en carbone organique total (exprimée en %) pour différentes lithologies en fonction des taux d'accumulation sédimentaire (en log<sub>10</sub> m.Ma<sup>-1</sup>)

On constate que pour les forts taux de sédimentation, l'effet de dilution l'emporte et que la teneur en carbone organique diminue.

(d'après Ibach, 1982 in Tyson, 1995)

Un TS très élevé se corrèle négativement avec le COT car le flux de particules excède celui de MO ce qui provoque une diminution de la teneur en MO dans le sédiment. Cet effet de dilution est fonction de la lithologie: pour les blackshales, certains auteurs mentionnent des TS de 40 -100 m/Ma. Ces relations bien établies pour le Quaternaire sont difficiles à estimer pour l'ancien compte tenu du pouvoir de résolution temporel des outils stratigraphiques disponibles et du bruitage par la compaction.



# La matière organique

## B) Le tri granulométrique et le rôle des minéraux

La répartition des particules organiques dans la Mer Noire est fonction des zones de productivité primaire, des zones d'anoxie mais également de la granulométrie de la MO. La MO de densité faible (fine granulométrie) a tendance à s'incorporer aux sédiments fins ce qui explique l'augmentation du % de MO en fonction de la taille des particules sédimentaires:

Cas des Viking Shales du Canada (d'après Hunt, 1963) où

les Silts contiennent en moyenne 1,79 % de MO

les Argiles (entre 2-4  $\mu\text{m}$ ) contiennent en moyenne 2,08 % de MO

les Argiles (<2  $\mu\text{m}$ ) contiennent en moyenne 6,50 % de MO

Les sables contiennent 4 fois moins de MO que les argiles les plus fines. On constate donc une grande affinité de la MO pour les argiles.

## C) La resédimentation

La redistribution de la MO par les courants gravitaires (courants de turbidité) qui déplacent les sédiments y compris les particules organiques vers les parties profondes des bassins et contribuent au dépôt de couches riches en MO.

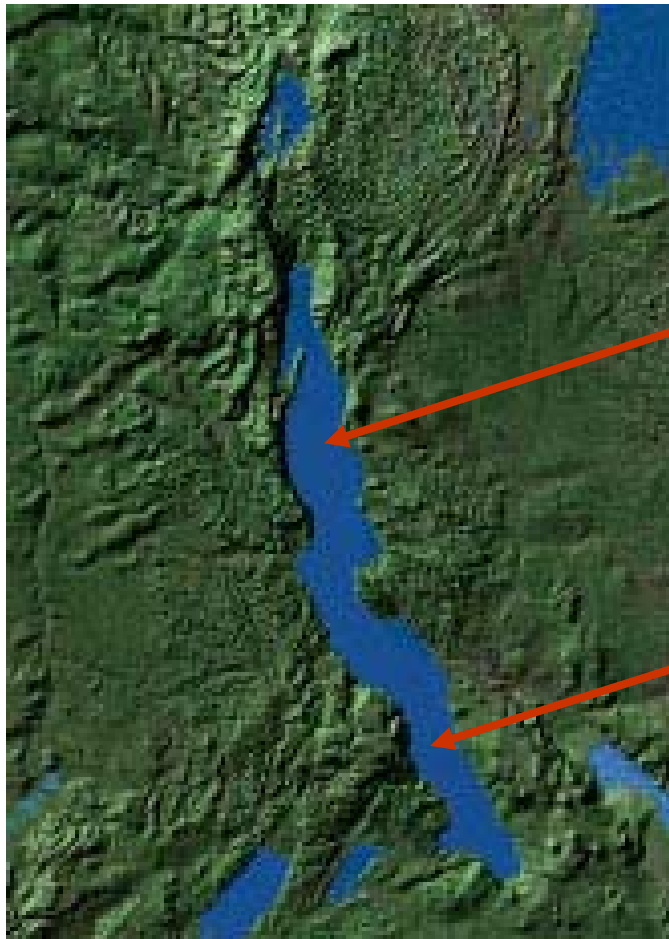
Cas du lac Tanganyika et de la marge angolaise



# La matière organique

Le lac Tanganyika (grand lac Est-Africain) est caractérisé par une pente littorale très forte et une stratification des eaux conditionnée par l'existence d'eaux chaudes en surface (épilimnion) et plus froides en profondeur (hypolimnion).

Les conditions climatiques locales favorisent la productivité planctonique et donc l'accumulation de MO sur le fond. La sédimentation anoxique de fond (1200-1400 m) est perturbée régulièrement par l'arrivée de coulées turbides en provenance des bordures oxygénées (250-750 m) du bassin dont la MO est nettement plus altérée que la MO qui sédimente au centre du lac.



profondeur de  
1250 m

profondeur de  
1400 m

A l'inverse sur la bordure de la marge angolaise, des courants de turbidité apportent dans le milieu abyssal oxygéné des sédiments riches en MO déposés à de plus faibles profondeurs dans la zone à minimum d'oxygène. Ces sédiments sont ensuite recouverts par des argiles hémipélagiques qui protègent la MO partiellement dégradée.

# La matière organique

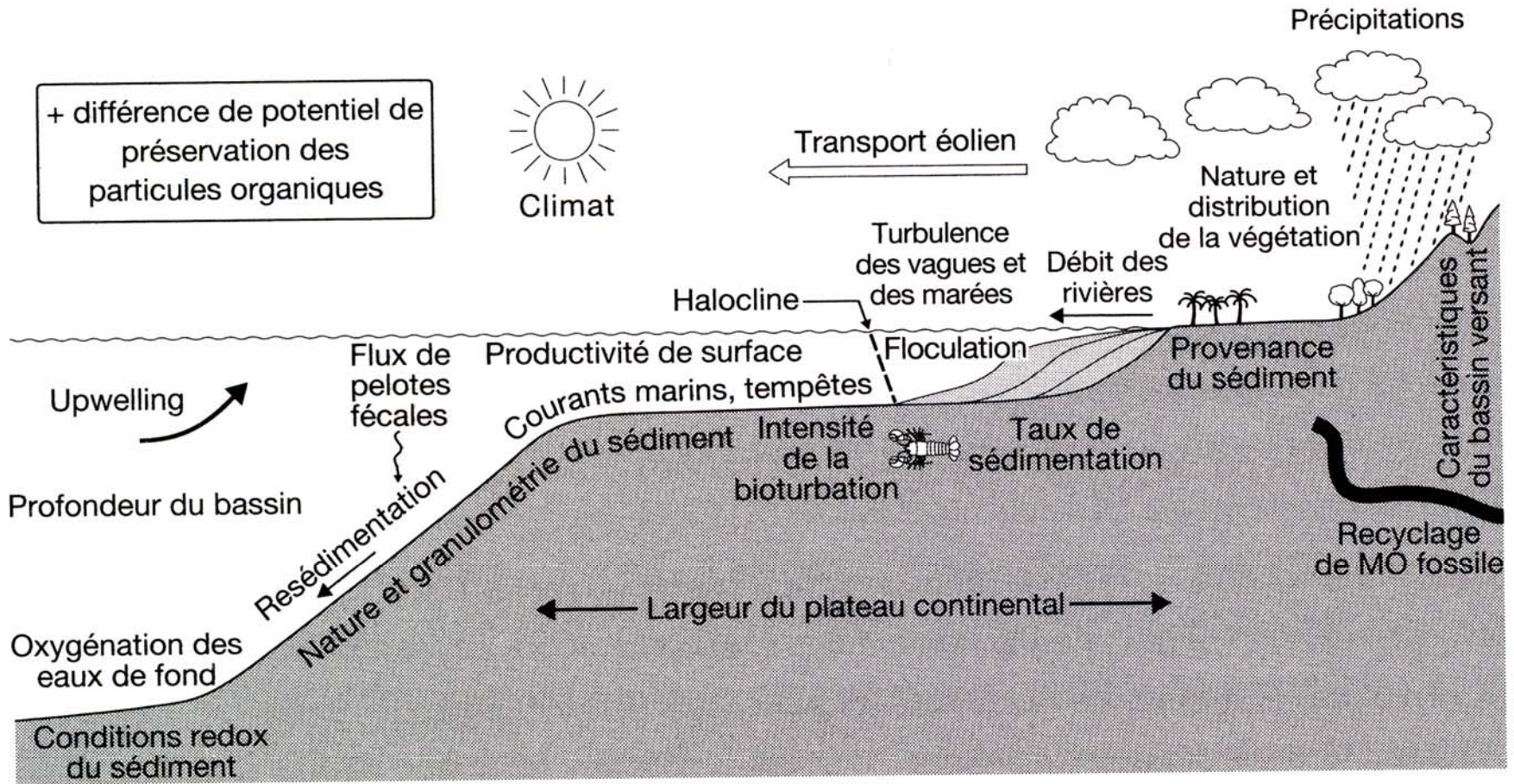


Figure 4.6. Paramètres influençant la sédimentation des particules organiques

(d'après Tyson, 1993 in Tyson, 1995)

Figure synthétisant les différents facteurs qui influencent la sédimentation des particules organiques.

# La matière organique

## Les roches carbonées

La MO dans une roche est quantifiée par le % massique de COT. Rappelons que la MO se compose outre le C d'autres éléments en concentration plus faible comme l'H, l'O, le S et l'N. Une roche qui contient 1% de COT contient en réalité entre 1,2 et 1,9 % de MO!!

Les roches carbonées - riches en MO – comprennent les charbons, les sapropélites et les schistes bitumineux ou laminites organiques.

Les charbons correspondent à l'évolution physico-chimique de débris de végétaux supérieurs au cours de l'enfouissement ou houillification (voir classification des charbons).

On distingue les « **charbons chandelles** » ou [**cannel-coals**] provenant de l'accumulation de spores.

Les **charbons d'algues ou sapropélites** contiennent essentiellement des algues microscopiques et se forment en milieu marin ou lacustre. Il s'agit de roches à grain fin, compactes, à cassures conchoïdales ou se débitant en lamelles.



Les bogheads (du nom d'une localité d'Ecosse) sont constituées par une algue Chlorophycée, très commune dans l'actuel et dont les accumulations sont connues depuis le Cambrien. Il existe des noms locaux comme la coorongite (Australie), la torbanite (Ecosse), la n'hangellite (Mzambique), la balckachite ou balkashite (Kazhakstan), l'olénikite et la cheremchite (Sibérie) et la marahuite (Brésil) ainsi que la kukersite (Ordovicien Supérieur d'Estonie).



La tasmanite composée d'algues Chlorophycées *Tasmanites punctatus* retrouvées au Dévonien du Canada, dans le Jurassique d'Alaska et dans le Permien inférieur de Tasmanie (Australie).



La choungite ou shungite (Chounga en Karélie) est observée en Russie et en Sibérie dans les terrains du Protérozoïque sous forme de lits peu épais de quelques mm à quelques cm.

# La matière organique

Les **laminites organiques** ou schistes bitumineux (bien que ces roches ne soient ni schisteux ni bitumineux) sont laminées et enrichies en MO pour produire de l'huile par distillation. Elles correspondent à une succession de lits inframillimétriques alternativement organique et minérale déposée parfois de façon périodique (structure varvée).

Les argiles feuilletées sombres et riches en MO appelées black shales par les anglo-saxons. Les roches mères pétrolières comme les argiles noires du Kimméridgien de la mer du Nord ou les black shales du Crétacé inférieur de l'Atlantique.

Les black shales sont appelés également hot shales quand leurs teneurs en U est forte.

On parle également au Paléozoïque Inférieur d'ampélites (schistes argileux riches en MO et en pyrite)

## La rythmicité et la cyclicité des dépôts organiques

Les **varves** sont des doublets de lamines alternativement claires et sombres, déposées en eau calme pendant une année et définis initialement dans les lacs périglaciaires. Les varves (définis dans des lacs glaciaires) sont des dépôts de fond dont l'alternance correspond à des modifications saisonnières des flux sédimentaires. La couche claire est formée de matériaux grossiers (silts ou sables) correspondant à la décharge fluviale de printemps lors de la fonte des neiges. Les tests carbonatés ou siliceux de plancton peuvent s'ajouter à cette lamine minérale. La lamine foncée qui se dépose à l'automne et en hiver, lorsque les apports détritiques se réduisent, en particulier lorsque la surface du lac est gelée, et que le refroidissement des eaux conduit à un retournement de la stratification des eaux. La plongée des eaux froides, plus denses sous les couches d'eaux plus chaudes, conduit à la décantation des particules fines (argiles et MO) qui se trouvaient jusque là dans un état colloïdal dans la couche d'eau superficielle (épilimnion).

L'épaisseur des varves est très variables et dépend de l'importance des apports détritiques. Selon les lacs, l'épaisseur d'un doublet peut varier de quelques millimètres à 4 cm, la couche sombre étant généralement moins épaisse que la couche claire.

# La matière organique

## The Jupiter Effect at Kimmeridge Bay - Obliquity Cycles

Effect of gravitational pull of Jupiter etc on Earth's obliquity (axial tilt)  
145 million years ago. Autissiodorensis Zone of the Kimmeridge Clay.  
Ian West examines bituminous shales repeating at 38 thousand years,  
separated by non-bituminous mudstone. Ian West and Tonya West (c) 2005.

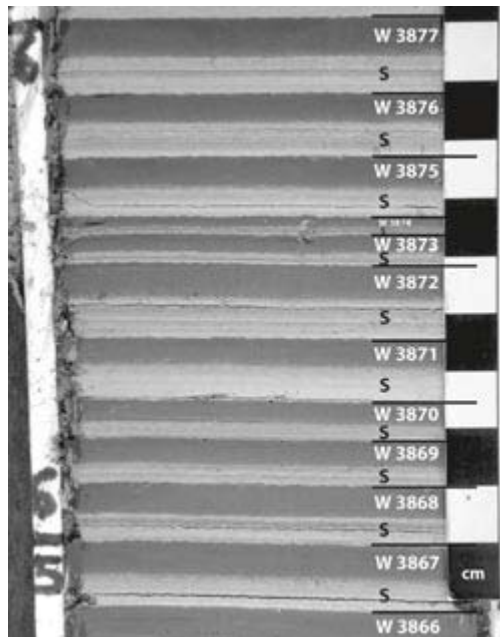
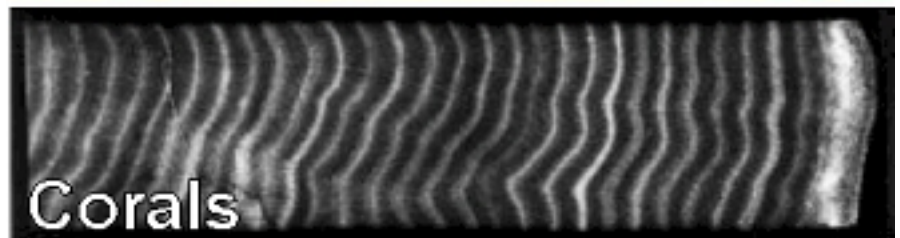
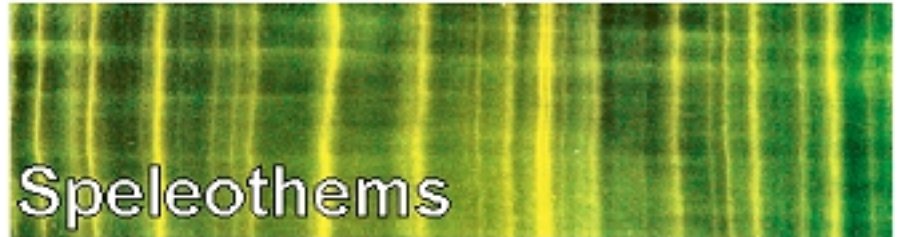
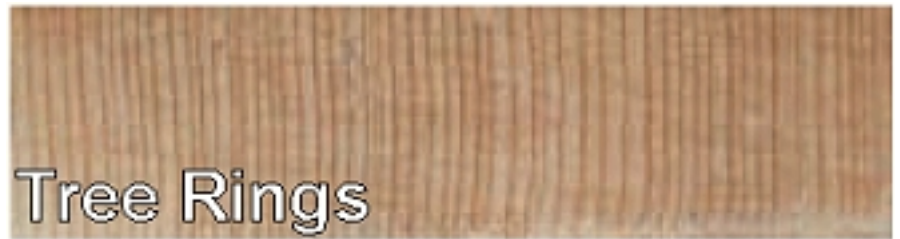
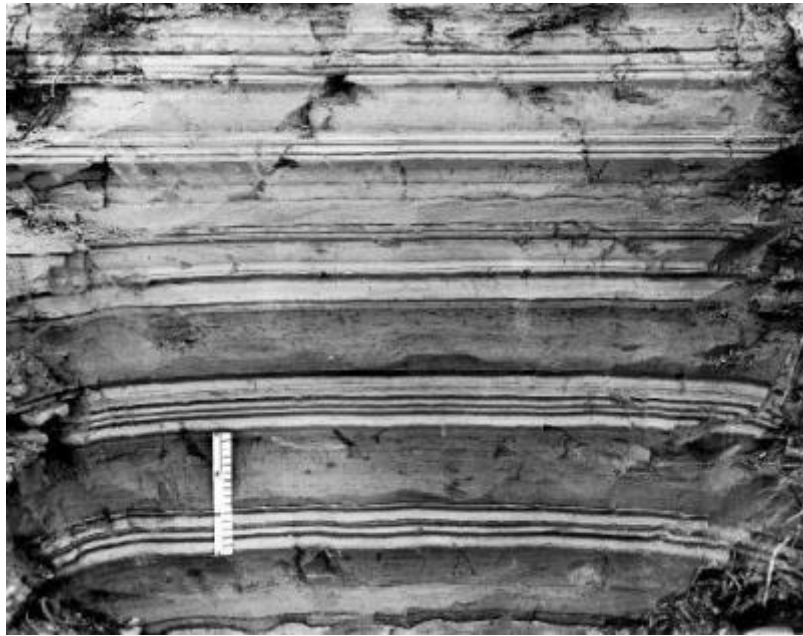


# La matière organique



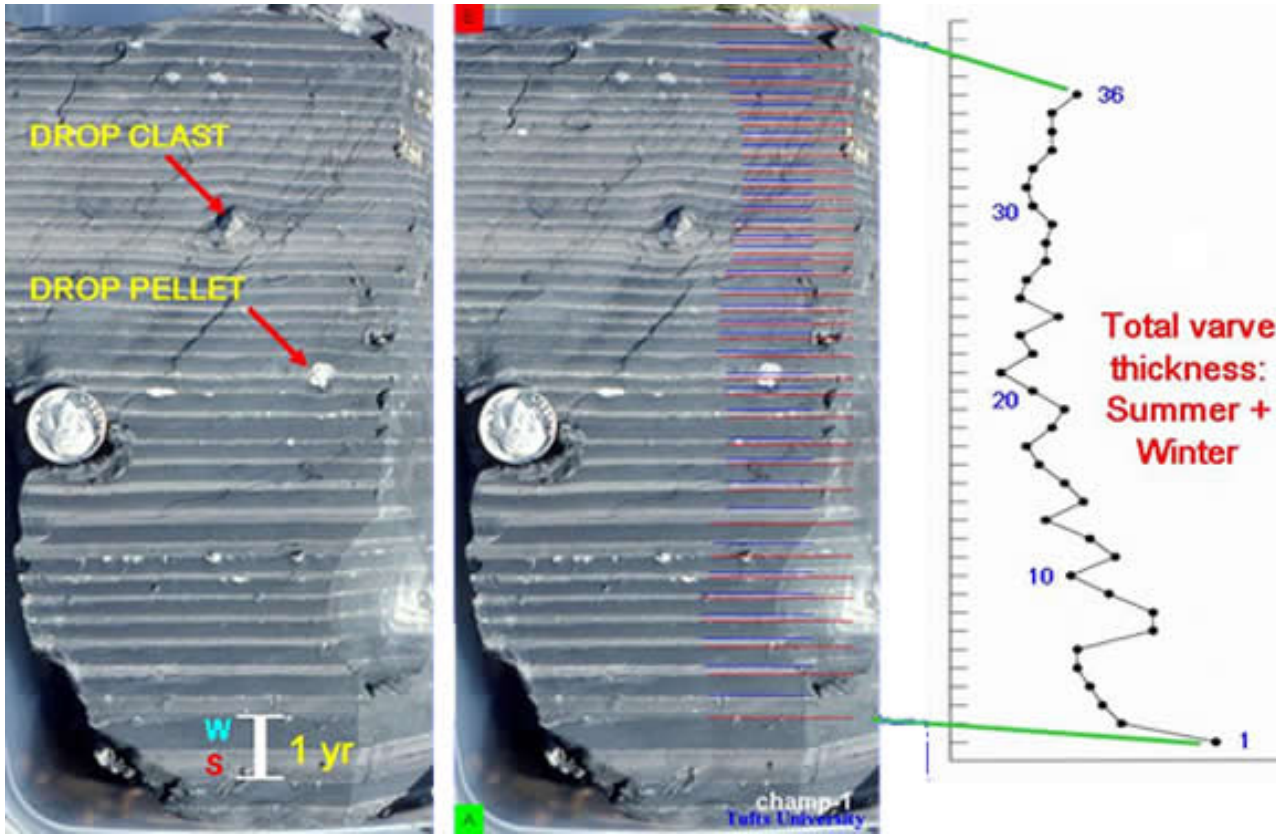
**The Washing Ledge Dolomite Bed, *Aulacostephanus autissiodorensis* Zone, Lower Kimmeridge Clay, Kimmeridge Bay. 19 February 2006. With central bituminous shale band and with rectangular jointing and surface yellowing (oxidation).  
*Ian West & Tonya West (c) 2006.***

# La matière organique

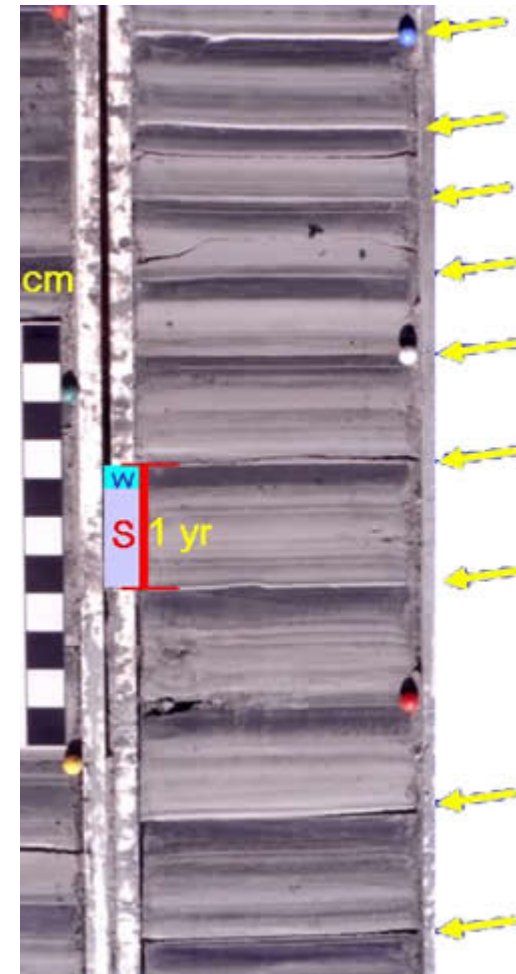




# La matière organique



Varves, Passumpsic Valley, East Barnet, VT  
Les lamines claires sont très épaisses comparées aux lamines sombres.



Chronologie appliquée aux varves  
Dried block of varved clay, Boquet R., Willsboro, New York  
Indication d'une année enregistrée en doublet de lamines:  
lamine claire = (S)ummer  
Lamine foncée = (W)inter  
Mesures de l'épaisseur totale de doublets de lamines pour l'enregistrement illustré ci-dessus

# La matière organique

Les **cyclothèmes charbonneux** sont les premières séries sédimentaires pour lesquelles une cyclicité ou rythmicité a été reconnue dès la fin du 18<sup>e</sup> siècle dans les charbonnages anglais. La succession de séries contenant des veines de charbons séparées par des passées comprenant des fossiles d'organismes marins militaient en faveur d'une rythmicité de la sédimentation.

Le concept de cyclothème est proposé par un géologue américain pour caractériser la succession de bancs déposés pendant un cycle transgressif-régressif observé dans les couches du Carbonifère supérieur des USA (Pennsylvanien). La succession des bancs, la lithologie et leurs épaisseurs sont essentiellement de nature allocyclique (càd contrôlée par des paramètres extérieurs comme le climat, l'eustatisme ou la tectonique). La superposition de séquences élémentaires ou cyclothèmes charbonneux est illustrée sur le graphe de droite.

La succession peut s'expliquer soit par une subsidence rythmique, soit par des variations climato-eustatiques (plus vraisemblable) et aboutissant à la migration des paysages mais surtout à la destruction rapide de la végétation et à son ennoiment lors de la phase transgressive.

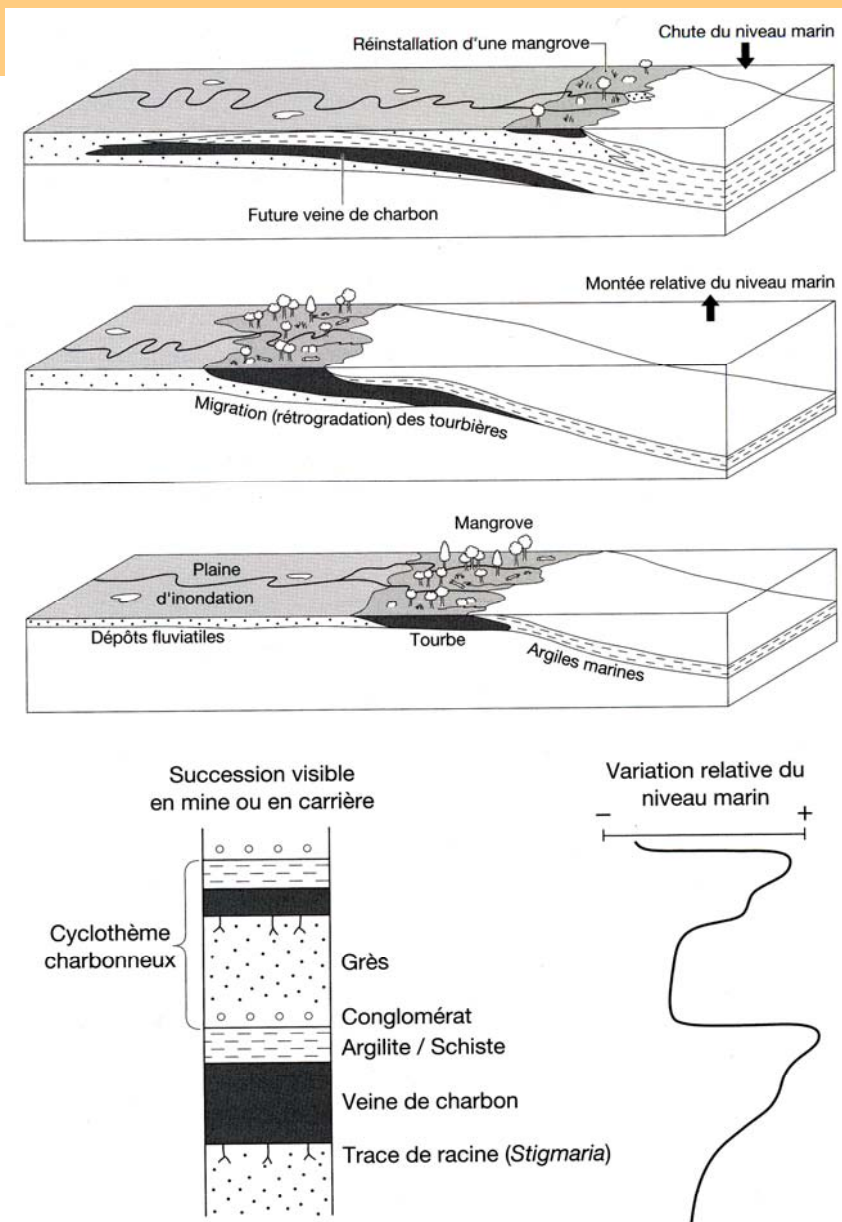


Figure 4.13. Cyclothème charbonneux et modèle de leur mise en place dans un environnement margino-littoral

La transgression continue et lente permet la rétrogradation de la mangrove et donc la migration des faciès de tourbières, alors que la régression brutale entraîne une progradation rapide des environnements et la disparition momentanée des tourbières.

# La matière organique

L'analyse des séries du Carbonifère aux USA a montré que des cycles de durée respectives de 396 ka, 118 et 44 ka sont estimés et correspondent relativement bien aux variations des paramètres orbitaux de la Terre (ou cycles de Milankovitch).

Ce contrôle ne permet cependant pas d'expliquer toutes les séries de cyclothèmes charbonneux et on suggère aujourd'hui que le cyclothème est largement influencé par le contexte sédimentaire dans lequel il se forme comme le montre l'exemple des différents cyclothèmes observés dans un environnement fluviodeltaïque.

En contexte fluvial, le contrôle autocyclique de la sédimentation sera beaucoup plus marqué que dans un contexte littoral marqué par les variations du niveau-marin.

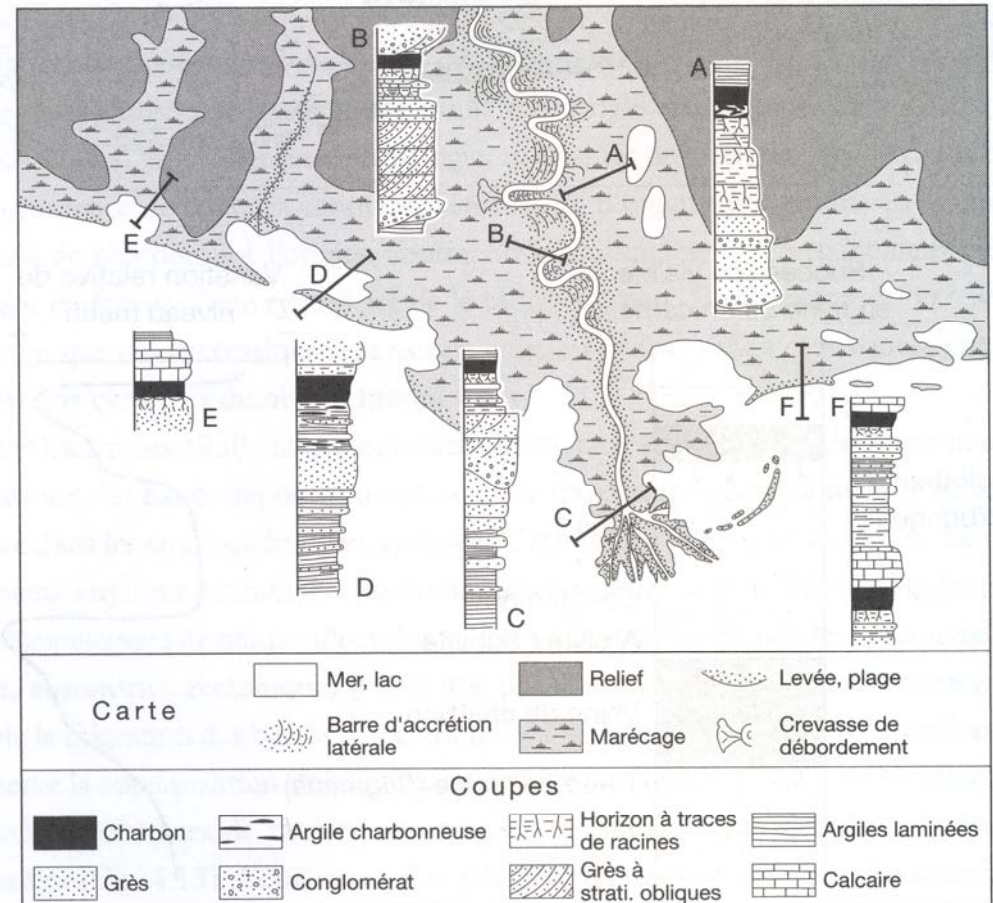


Figure 4.14. Différents types de cyclothèmes charbonneux associés aux environnements fluviodeltaïques

Chaque log, noté A à F, montre la succession des faciès dans une séquence régressive qui comprend à son sommet les niveaux charbonneux.

(d'après Riegel, 1991 in Einsele et al., 1991)

# La matière organique

Graissessac  
Ancienne carrière de charbon  
Ancien front de taille fait plus de 50 m de hauteur  
Cinq couches de charbon sont visibles

Charbon, La Ricamarie



Photographie Pierre Thomas



La " Découverte", non accessible en bus

Photo Bernard Halleux

# La matière organique



The two coal seams visible here are amalgamated a few hundred metres updip from this site.  
The split contains marine sands and silts



Section in the Oread Limestone  
at Atchison, Kansas  
Classic Upper Pennsylvanian  
cyclothem

# La matière organique

Les **alternances calcaire-marne** sont des alternances lithologiques que l'on peut observer sur le terrain ou par forages et qui peuvent s'exprimer également entre des marnes et des black shales pour autant que les séries soient riches en MO. Ces alternances s'observent sur de grandes épaisseurs et correspondent souvent aux cycles de Milankovitch.

Ces alternances peuvent s'expliquer par :

- la fluctuation, lors du dépôt, de l'un des constituants comme la variation de la teneur en carbonate de calcium,
- la combinaison de plusieurs fluctuations qui déterminent le contenu en C (org ou minéral) comme la productivité carbonatée des eaux de surface ou des changements dans la dissolution des carbonates

Des variations de flux de MO dans les alternances calcaire-black shale ou marne-black shale. Variations de la productivité primaire, modifications des apports terrigènes ou des changements des conditions redox de la colonne d'eau ou sur le fond peuvent expliquer de telles alternances.

Un lien existe donc entre le % de  $\text{CaCO}_3$  et le COT dans les alternances où le flux de carbonates varie. Il en résulte des lithologies fort différentes depuis le calcaire blanc bioturbé au black shale noir laminaire.

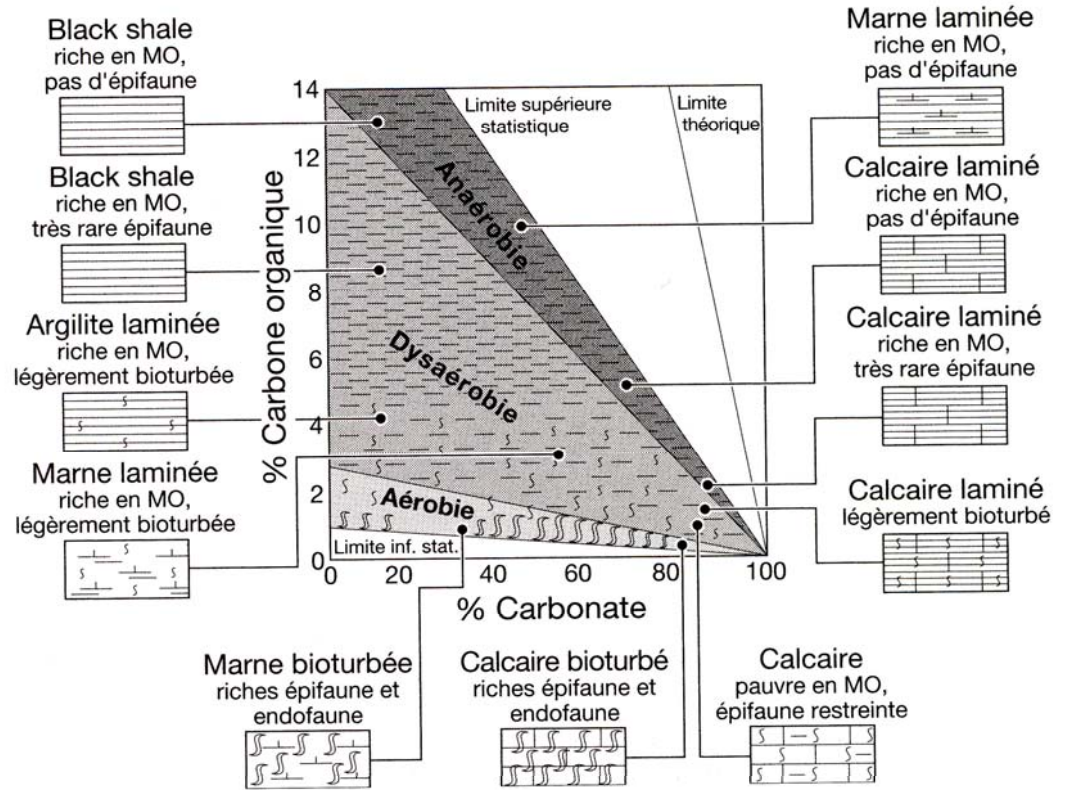


Figure 4.18. Lithologies attendues en fonction des teneurs en  $\text{CaCO}_3$  et en COT dans une roche sédimentaire

(d'après Ricken, 1993)

# La matière organique

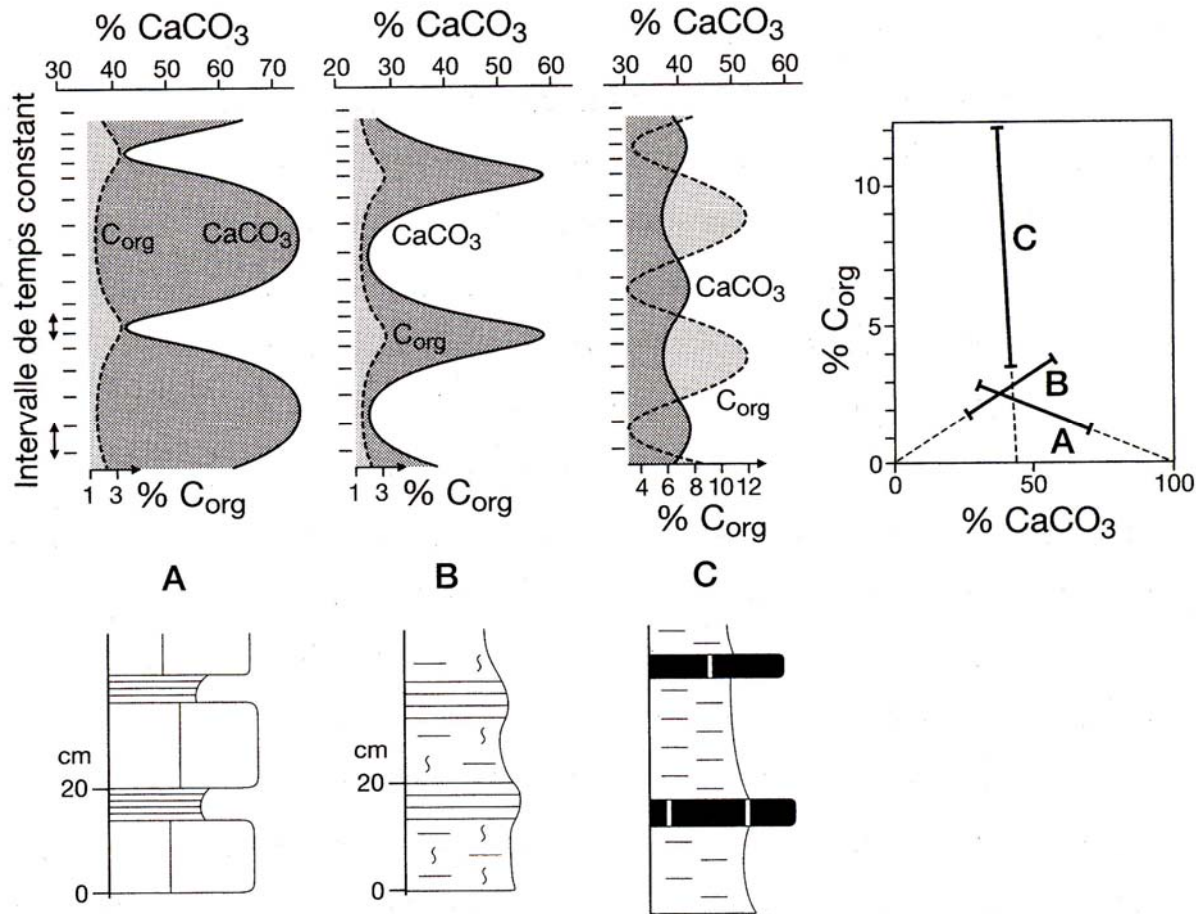


Figure 4.19. Différents types de lithologies alternantes en fonction des variations des teneurs en carbonate (A), en silicoclastique (B) ou en matière organique (C)

Les cyclicités sont exprimées par les courbes des variations des carbonates et du carbone organique (en pourcentage) pour des alternances où le contenu carbonaté est moyen (centré autour de 50 %). Les changements du taux de sédimentation sont représentés à gauche des courbes par les intervalles de temps d'épaisseur variable.

(d'après Ricken, 1993)

## Analyses de publications sur la MO.

1. Les Posidonia Black shales dans le Lias (Toarcien Inférieur) d'Allemagne: influence des variations du niveau-marin sur l'évolution des faciès organiques



Chemical Geology 206 (2004) 199–230

**CHEMICAL  
GEOLOGY**

INCLUDING  
ISOTOPE GEOSCIENCE

www.elsevier.com/locate/chemgeo

## Chemostratigraphy of the Posidonia Black Shale, SW Germany I. Influence of sea-level variation on organic facies evolution

A. Frimmel<sup>a,b</sup>, W. Oschmann<sup>c</sup>, L. Schwark<sup>b,\*</sup>

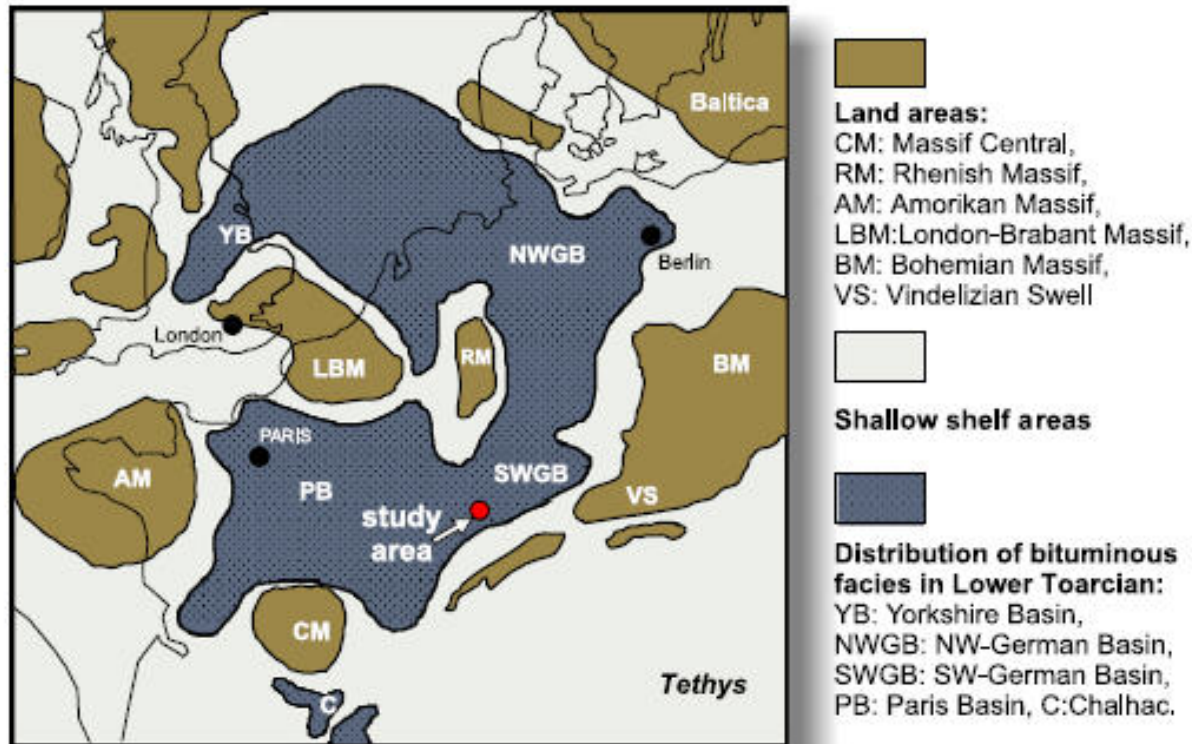


Fig. 1. Simplified paleogeographic map of Liassic continental shelf area between Baltica and Laurentia after Ziegler (1982) showing the location of the study area.



# Posidonia Black Shales

Biostratigraphy (Riegraf et al., 1984)	Lithostratigraphy (Quenstedt, 1843, 1858; Hauff, 1921)	Simplified Lithology	Facies zones and lamination style (Rehl et al., 2001)	Sample # analyzed for biomarkers
---	---	-------------------------	---	--

## Méthode:

Analyses géochimiques sur des éléments et analyses Rock Eval sur 160 échantillons  
 Analyses de biomarqueurs sur plus de 80 échantillons

## Objectifs:

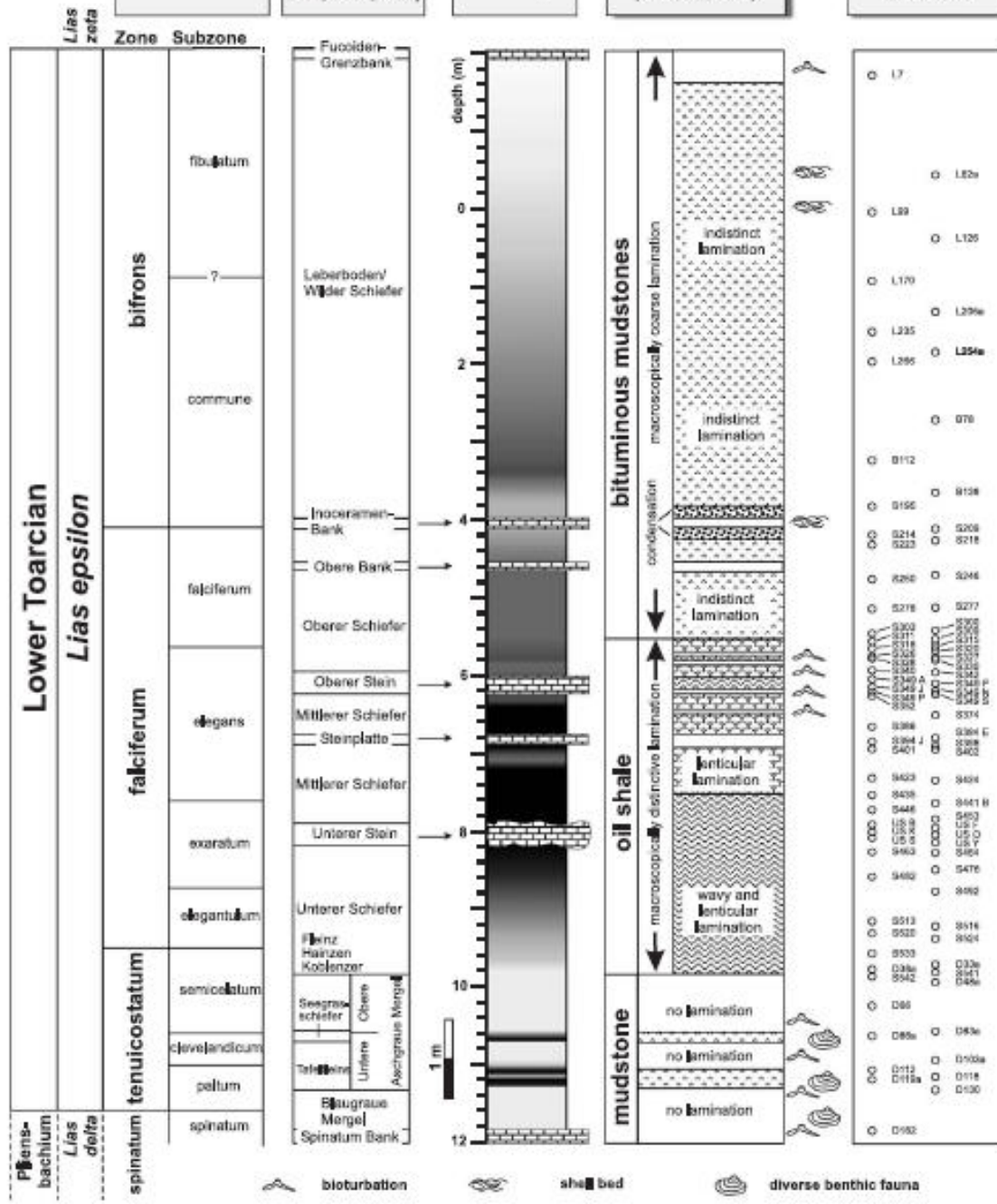
Décrire les changements de l'origine biologique et de l'impact diagénétique sur la MO à partir de conditions redox différentes dans la colonne d'eau et dans le sédiment.

**Colonne stratigraphique:** 14 mètres d'épaisseur.

Démarre dans le Pliensbachien par des sédiments carbonatés de plateforme déposés en eau peu profonde et bien oxygénée.

Le Toarcien Inférieur démarre par des mudstones marneux fortement bioturbés et riches en faunes benthiques macroscopiques.

Deux horizons de black shales sont intercalés dans les marnes de la « tenuicostatum zone ».

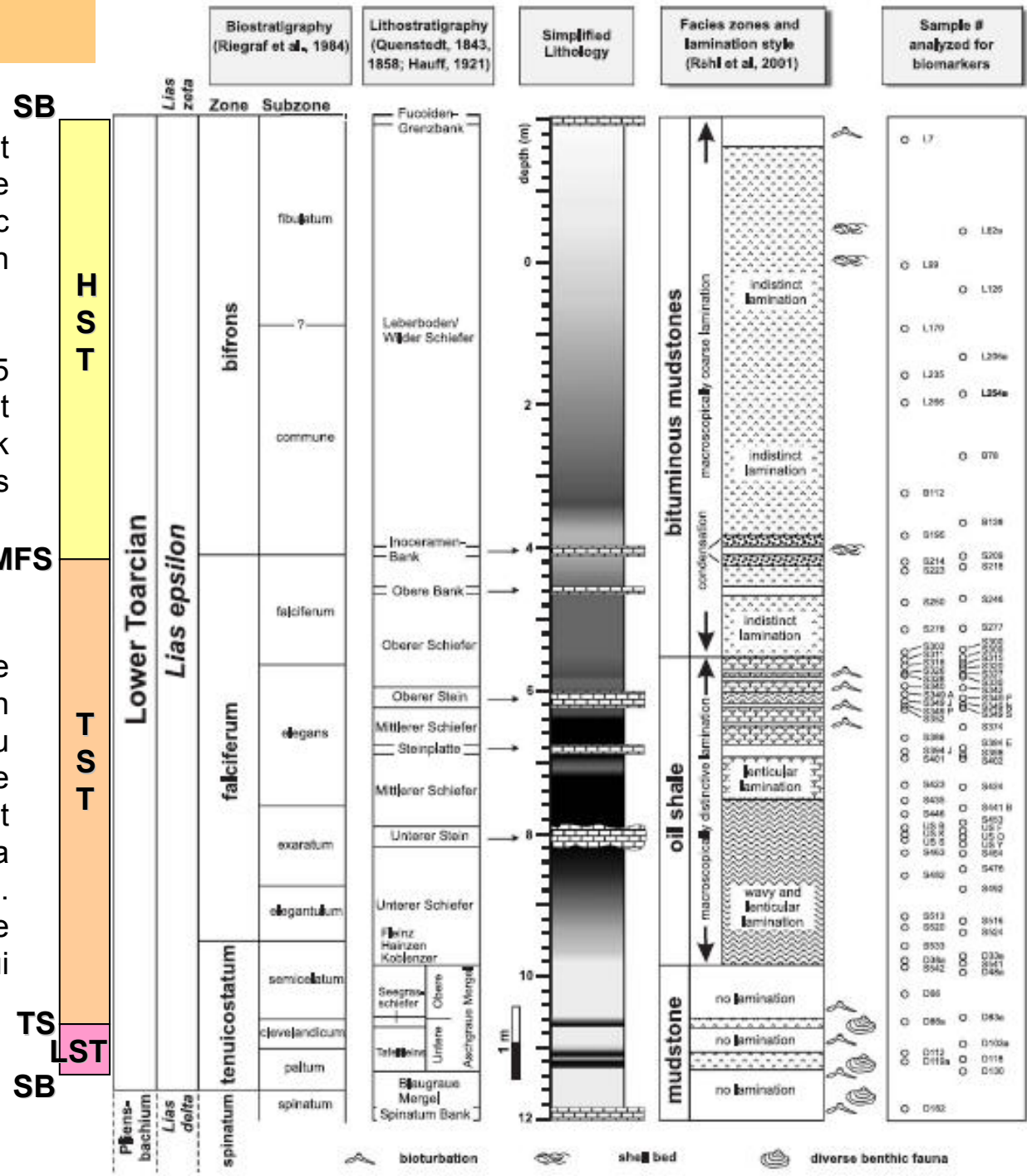


# Posidonia Black Shales

Une transition graduelle se produit vers les shales bitumineux à huile de la « falciferum zone » en relation avec une transgression rapide et un approfondissement du bassin.

Ces shales bitumineux contiennent 5 bancs ou horizons carbonatés et passent graduellement à des black shales riches en MO de la « bifrons zone ».

La stratigraphie séquentielle à l'échelle du 2<sup>nd</sup> ordre montre une évolution progressive depuis un bas niveau marin vers un haut niveau marin. Le contact entre le cortège transgressif et le haut niveau marin correspond à la surface d'inondation maximale (MFS). La surface de transgression se situe entre le cortège de bas niveau et celui transgressif.



# Posidonia Black Shales

## Méthode:

Mesure du TOC, du % de  $\text{CaCO}_3$ . Pyrolyse réalisée sur roche totale avec un ROCK-EVAL II-PLUS analyzer pour déterminer le type de kérogène et la maturité de la MO. Extraction de la MO, séparation chromatographique et analyses

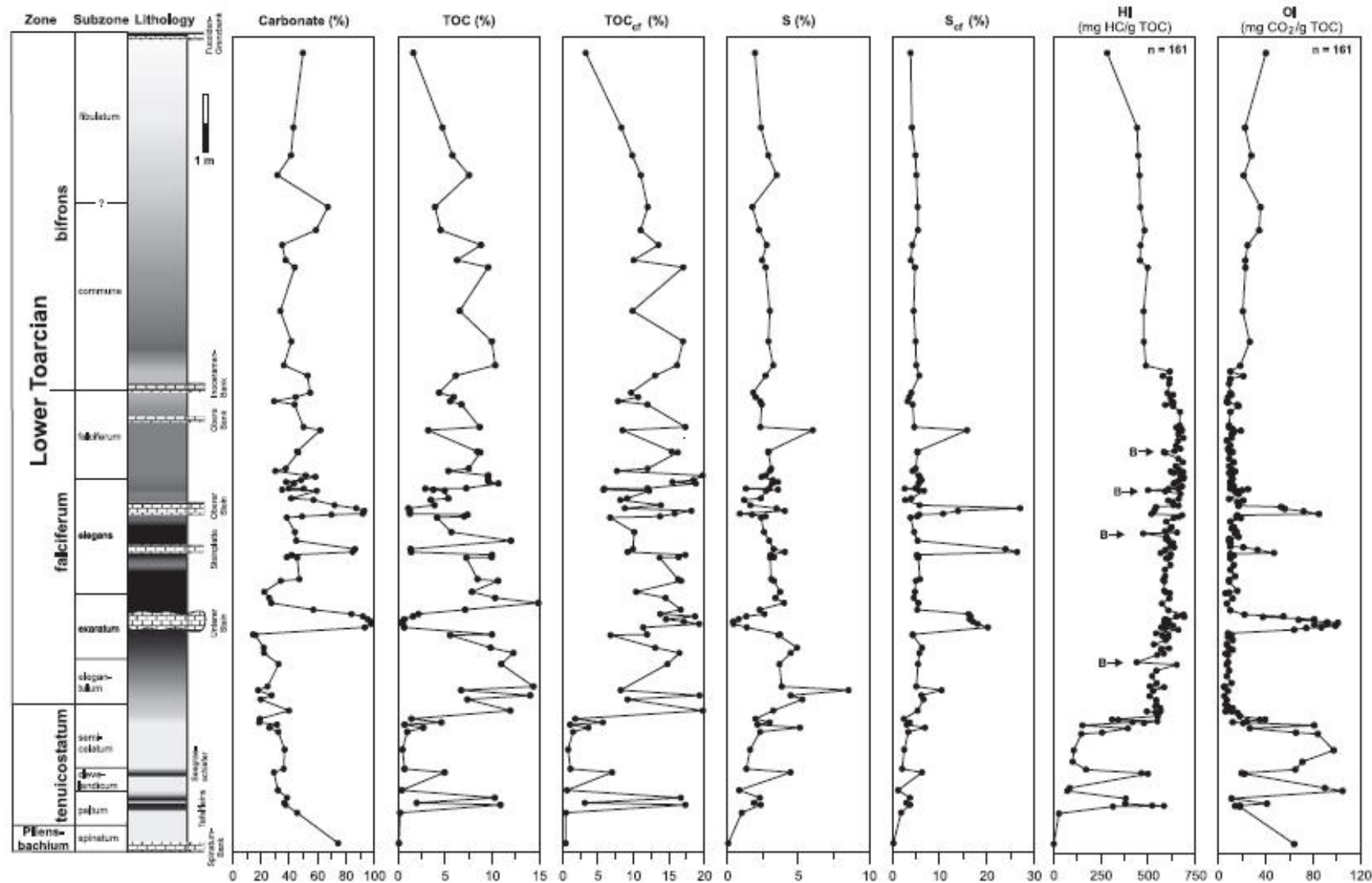


Fig. 3. Stratigraphic variation in carbonate and bulk organic matter. Values for TOC and S on a carbonate-free base are denoted TOC<sub>cf</sub> and S<sub>cf</sub>, respectively.

## Posidonia Black Shales

TOC corrigé et calculé sur une base sans carbonate est sensiblement plus fort (%) et on note une diminution graduelle au cours de la zone à bifrons.

La teneur en soufre est liée à la teneur en TOC car le S est exclusivement lié à la pyrite. La teneur en S corrigée sur base sans carbonate est remarquablement constante à l'exception des trois premiers bancs carbonatés.

Les analyses Rock-Eval révèlent un indice d'oxygène (OI) élevé pour le Pliensbachien, la zone tenuicostatum et pour les trois horizons carbonatés uniquement.

L'indice d'hydrogène (HI) de la MO est très bas (< 200 mg HC/g TOC) pour le Pliensbachien et la zone tenuicostatum. Il augmente dans la zone falciferum (550-650 mg HC/g TOC) et diminue dès que l'on passe à la zone bifrons.

La quantité de MO extractable varie entre 100 et 13 500 ppm. Quand ces valeurs sont normalisées par rapport aux concentrations en TOC, on observe alors des valeurs moyennes de 40–70 mg extract/g TOC avec des pics >100 mg extract/g TOC. La composition moyenne de la MO extraite est approximativement de 25% aliphatic, de 30% aromatic hydrocarbons, de 40% resins, et de 5% d'asphaltenes.

Seule la distribution des hydrocarbures aliphatiques seront analysés.

Les valeurs absolues du rapport pristane/phytane varie entre 1.1 et 2.5, et indique un dépôt dans un environnement oxygéné.

# Posidonia Black Shales

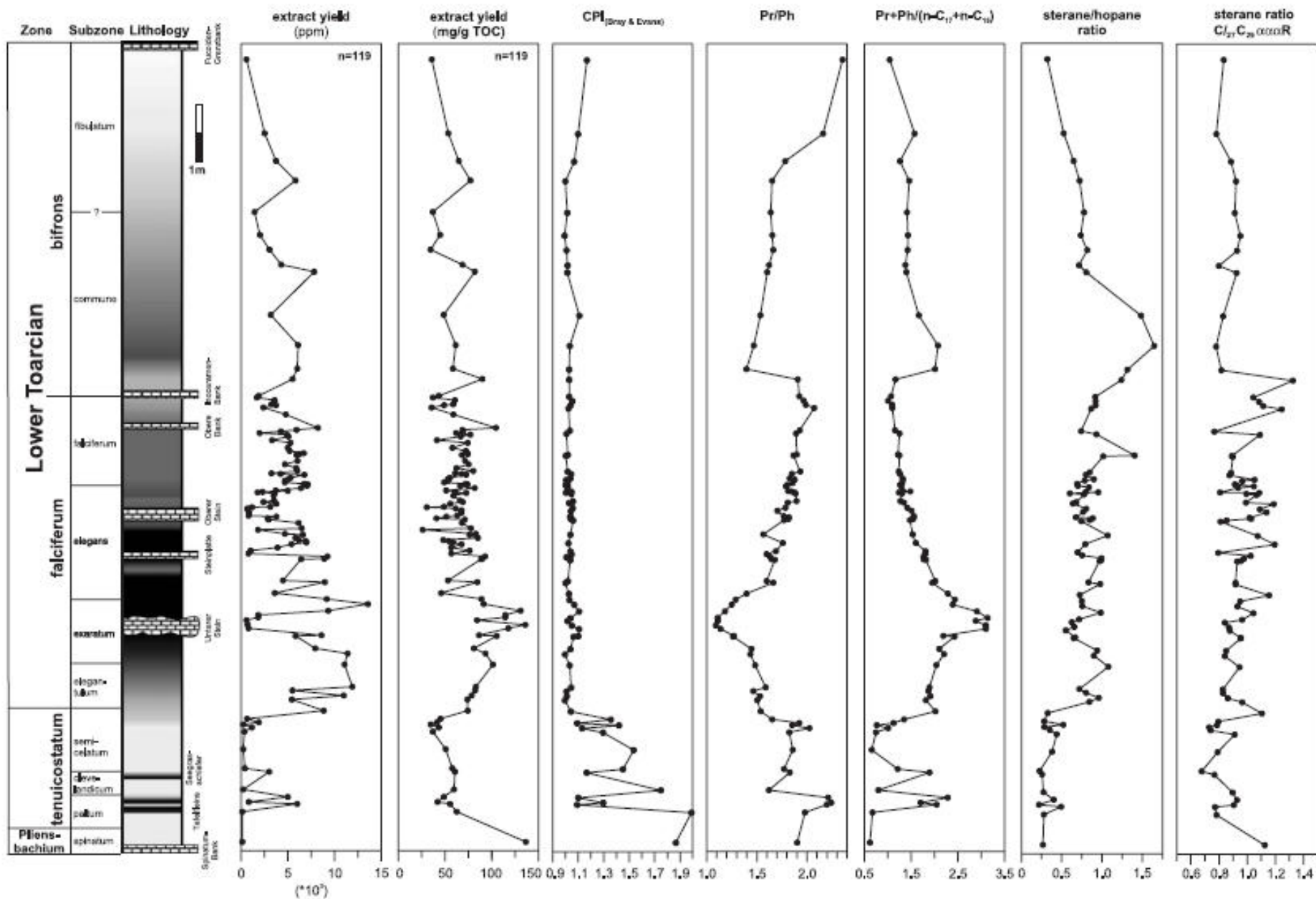


Fig. 4. Extract yields and selected biomarker ratios versus depth.

# Posidonia Black Shales

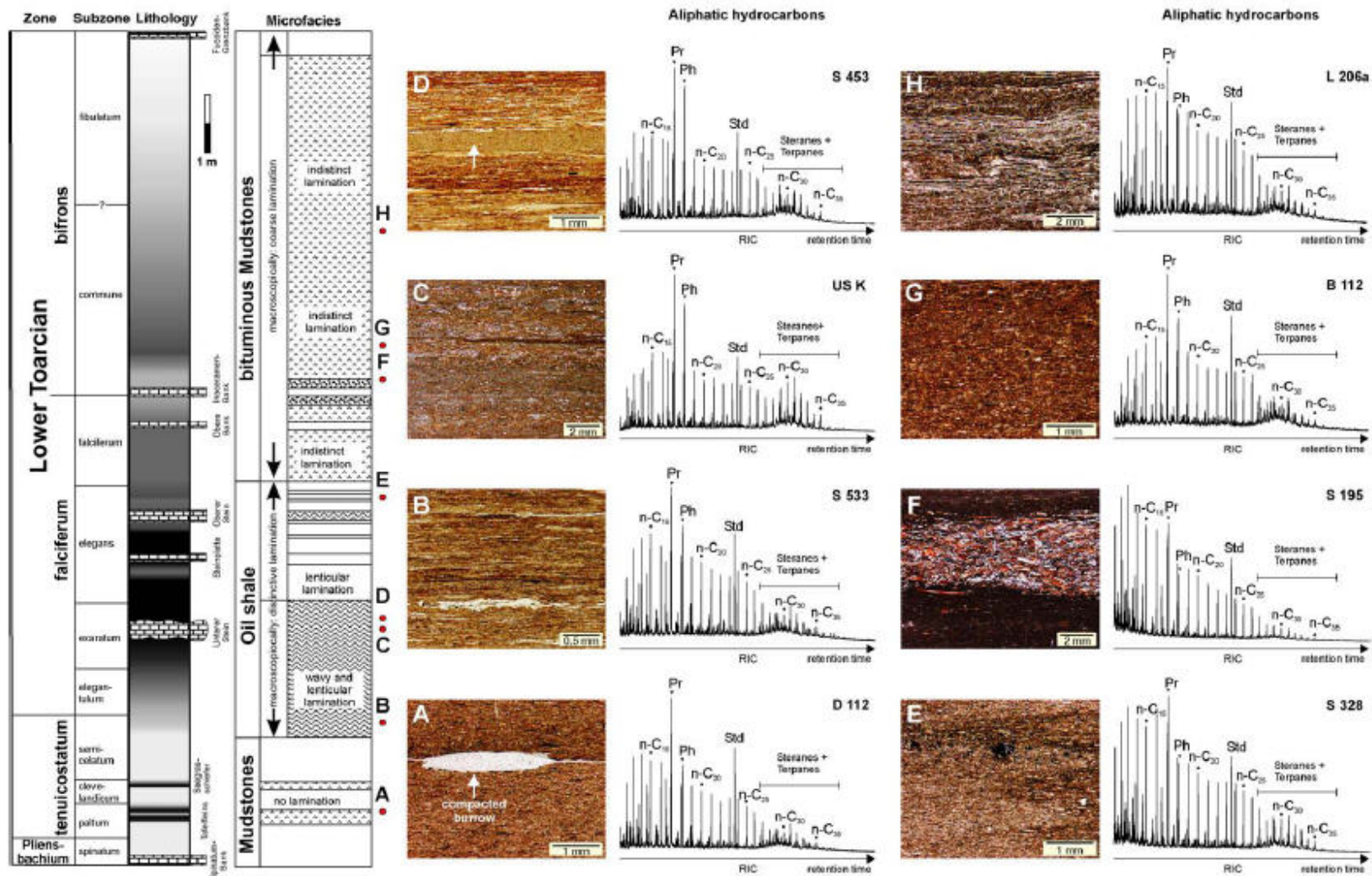


Fig. 5. Comparison of sediment facies and lamination style based on thin-section photomicrographs with chemofacies pattern based on aliphatic hydrocarbon distribution. (A) Sample D112 representing a regressive black shale from the upper *palium* subzone with indistinct lamination. Arrow points to a light colored compacted bioturbation feature created by *Chondrites* or *Planolites* sp. Scale bar is 1 mm. (B) Wavy lamination in *semicelatum* subzone with large flattened pellets and *Bositra buchi* shell fragments. Scale bar is 0.5 mm. (C) Sample US-K from the Unterer Stein of the *exaratum* subzone. Wavy lamination with few fecal pellets. Scale bar is 2 mm. (D) Sample S453 from the *exaratum* subzone, showing a combination of wavy and lenticular lamination. Arrow points to a silt layer with sharp boundaries originating from a distal storm events. Scale bar is 1 mm. (E) Lenticular lamination of Sample S328 within a bioturbated horizon of the *elegans* subzone. Scale bar is 1 mm. (F) Condensation horizon, mainly composed of phosphatic fish debris, in sample S195 above the *Inoceramus* carbonate bank. Scale bar is 2 mm. (G) Indistinct lamination of sample B112 from the *commune* subzone with occurrence of large *Tasmanites* algae, seen as yellow fluorescing bodies. Scale bar is 1 mm. (H) Indistinct lamination of sample L206a caused by closely spaced shell beds of *B. buchi* in the *bifrons* zone. Scale bar is 2 mm.

# Posidonia Black Shales

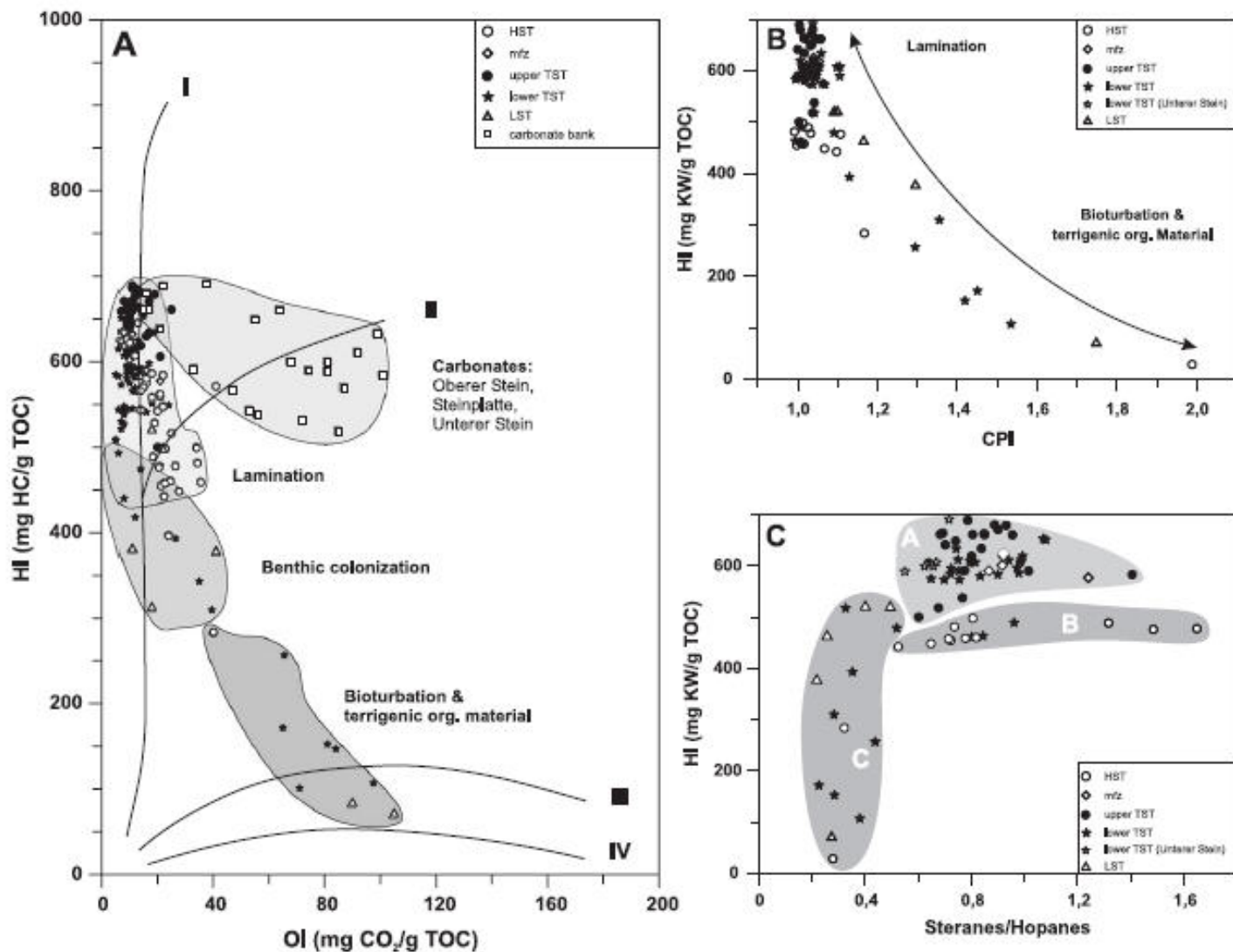


Fig. 7. Identification of organic matter sources displayed by discrimination diagrams: (A) HI/OI diagram, (B) HI versus carbon preference index (CPI), and (C) HI versus sterane/hopane ratio. Discrimination between terrigenous-derived organic matter (high CPI and OI, low HI) and marine phytoplanktonic matter (low CPI and OI, high HI) is achieved. Discrimination between bacterial and algal sources is revealed by sterane/hopane ratios. High relative sterane proportion indicates algal, high hopanoid content bacterial sources. Field A contains fully marine samples of the lower and upper TST and the m/z. Field B contains the samples from the HST with phytoplanktonic remains characterized by lower HI values due to lower settling velocities and more intensive degradation in the water column. Field C groups samples from the LST and lowermost TST showing variable HI values but consistently low hopane/sterane ratios due to terrigenous input and heavy bacterial degradation.

# Posidonia Black Shales

La balance entre la perte par évaporation et l'arrivée d'eau continentale se marque par des flux unidirectionnels entrants ou sortants des eaux de surface et par l'absence de courants de fond.

Pour un bas niveau marin (< 50 m), la colonne d'eau est bien mélangée et dans la ZAV. La chémocline (ou front redox) est situé dans le sédiment ou proche de l'interface eau/sédiment. L'accumulation de MO se produit préférentiellement en été quand l'apport d'eaux continentales dope la quantité de nutriments et transporte la MO terrigène vers le bassin.

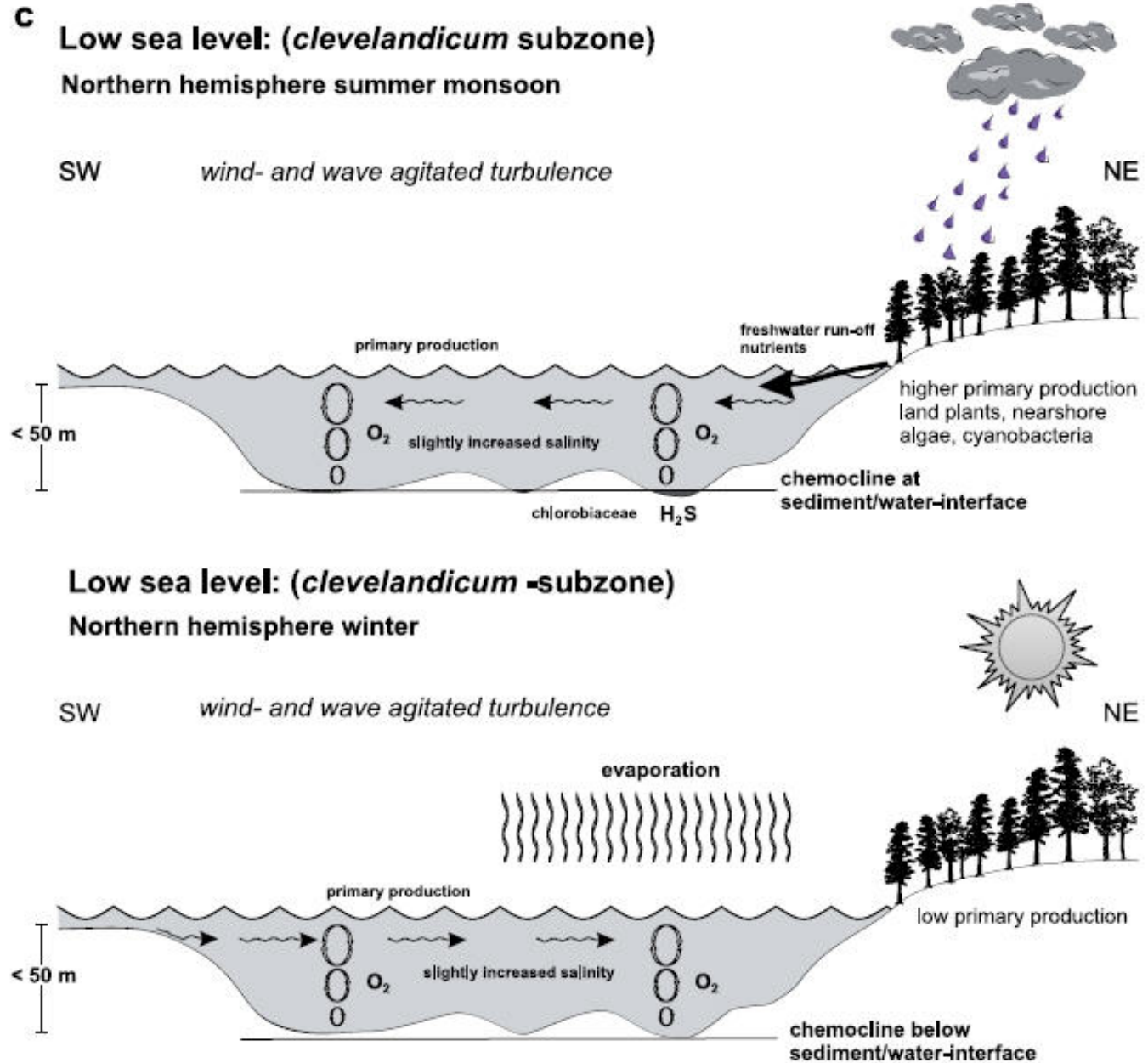


Fig. 11 (continued).



# Posidonia Black Shales

Très peu de MO est préservée suite à la dégradation de la MO dans la colonne d'eau en conditions aérobiques.

Il n'y a que de manière périodique que des conditions anoxiques sont établies dans la colonne d'eau comme l'atteste des biomarqueurs caractéristiques de bactéries vertes photoautotrophiques sulfurées.

La chémocline remonte dans les eaux de fond mais les conditions aérobies reviennent très vite.

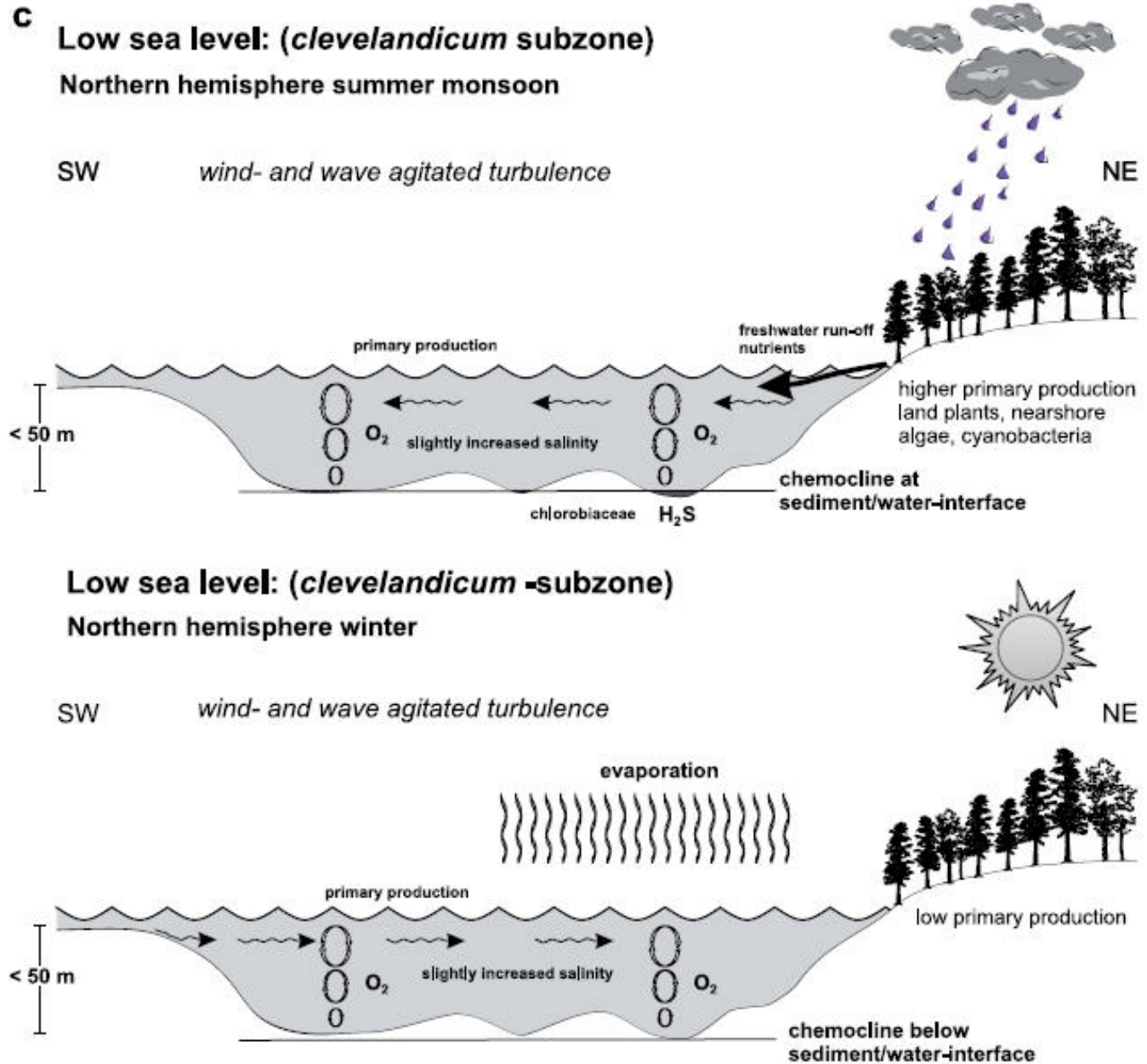


Fig. 11 (continued).

# Posidonia Black Shales

En période de haut niveau marin (> 80 m), il y a des échanges entre les eaux de surface et de fond sur la plateforme. Pendant la période de mousson en été, une forte productivité est enregistrée car beaucoup de nutriments sont disponibles et les eaux chaudes en surface sont riches en algues phytoplanctoniques et favorisent la croissance du zooplancton.

Il se forme une pycnocline et thermocline stable avec des eaux salines froide qui proviennent de la Téthys alors que les eaux de surface pauvres en sel et chaudes sont exportées.

La stratification de la colonne d'eau induit une remontée de la chémocline depuis l'interface eau/sédiment jusque dans la colonne d'eau. A la chémocline et dans la zone photique des bactéries sulfurées photoautotrophiques se développent.

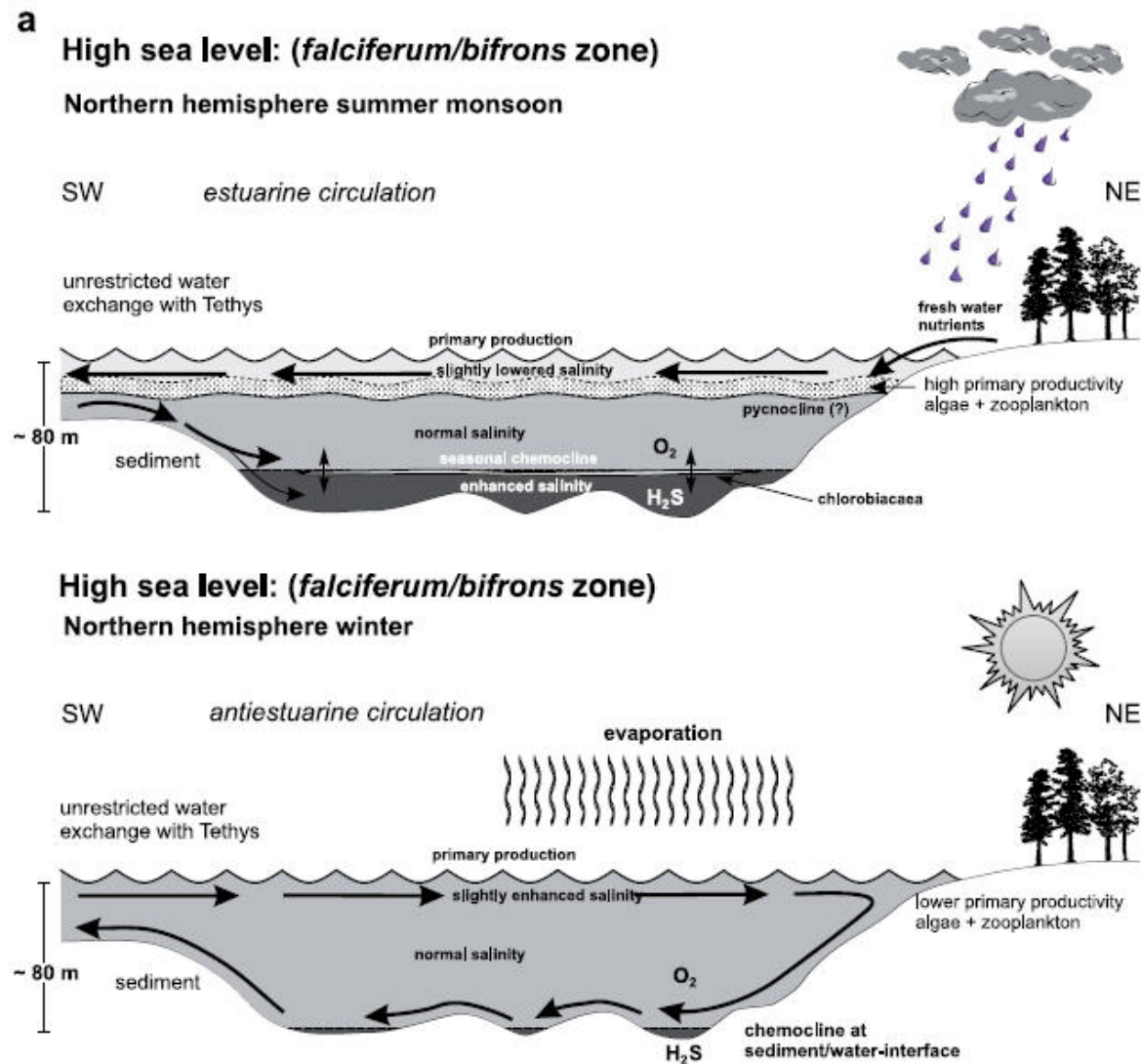


Fig. 11. Depositional models of three representative sea-level stages of the Posidonia Shale constructed for contrasting climate scenarios of monsoonal summer periods and dry winters. Monsoonal periods introduce high productivity via nutrient-rich continental run-off and development of density stratification in an estuarine circulation system. During dry winter, the circulation patterns are reversed to a antiestuarine system with descending nutrient-poor and oxygenated waters leading to a continuum of minor to full degradation of organic matter accumulated during high productivity summer period. (a) High sea level permits partial preservation of summer-produced organic matter and anoxia in deeper basin parts. (b) Intermediate sea level due to restriction of water exchange with the Tethys Ocean promotes excellent preservation of organic matter produced during summer monsoon. (c) Low sea level allows full ventilation of the entire water column and complete destruction of marine surface production and terrigenous influx or organic matter. For a detailed discussion, see text.

# Posidonia Black Shales

Pendant l'hiver, l'évaporation est intense et la faible arrivée d'eaux continentales induit l'entrée d'eaux salines normales en surface qui plongent et crée des courants de fortes densité sur le fond qui vont poussés hors de la plate-forme les eaux pauvres en oxygène et la chémocline va retourner à proximité de l'interface eau/sédiment.

Une proportion de la MO accumulée précédemment sera dégradée au cours de la période d'hiver dysoxique. Cependant, le potentiel de préservation de la MO est relativement grand comparé à la période de bas niveau marin.

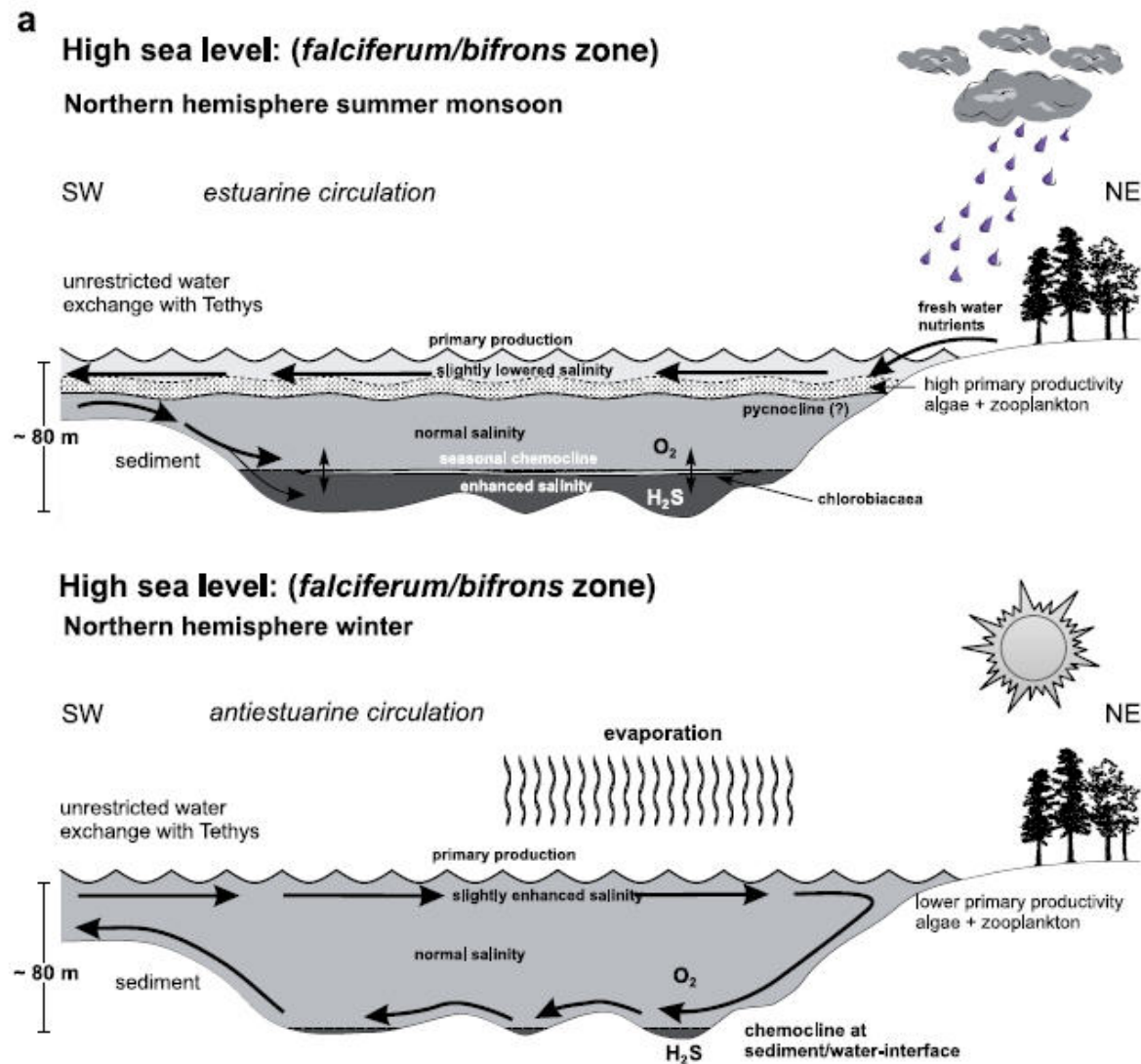


Fig. 11. Depositional models of three representative sea-level stages of the Posidonia Shale constructed for contrasting climate scenarios of monsoonal summer periods and dry winters. Monsoonal periods introduce high productivity via nutrient-rich continental run-off and development of density stratification in an estuarine circulation system. During dry winter, the circulation patterns are reversed to a antiestuarine system with descending nutrient-poor and oxygenated waters leading to a continuum of minor to full degradation of organic matter accumulated during high productivity summer period. (a) High sea level permits partial preservation of summer-produced organic matter and anoxia in deeper basin parts. (b) Intermediate sea level due to restriction of water exchange with the Tethys Ocean promotes excellent preservation of organic matter produced during summer monsoon. (c) Low sea level allows full ventilation of the entire water column and complete destruction of marine surface production and terrigenous influx or organic matter. For a detailed discussion, see text.

# Posidonia Black Shales

La situation intermédiaire en terme de niveau marin (intervalle transgressif) consiste en échanges très réduits entre le bassin et la Téthys.

Le potentiel de préservation de la production phytoplanctonique de surface est très élevé car la colonne d'eau est en permanence anoxique jusqu'à mi-hauteur par stagnation des eaux en été et la forte production primaire.

Un apport important de nutriments par des taux de lessivage et d'altération continentale ce qui provoque des booms algaires massifs et donc la stabilisation de la chémocline avec une couche d'eau douce en surface.

Des cyanobactéries contribuent également à la biomasse marine quand les nutriments sont piégés dans les eaux de fonds.

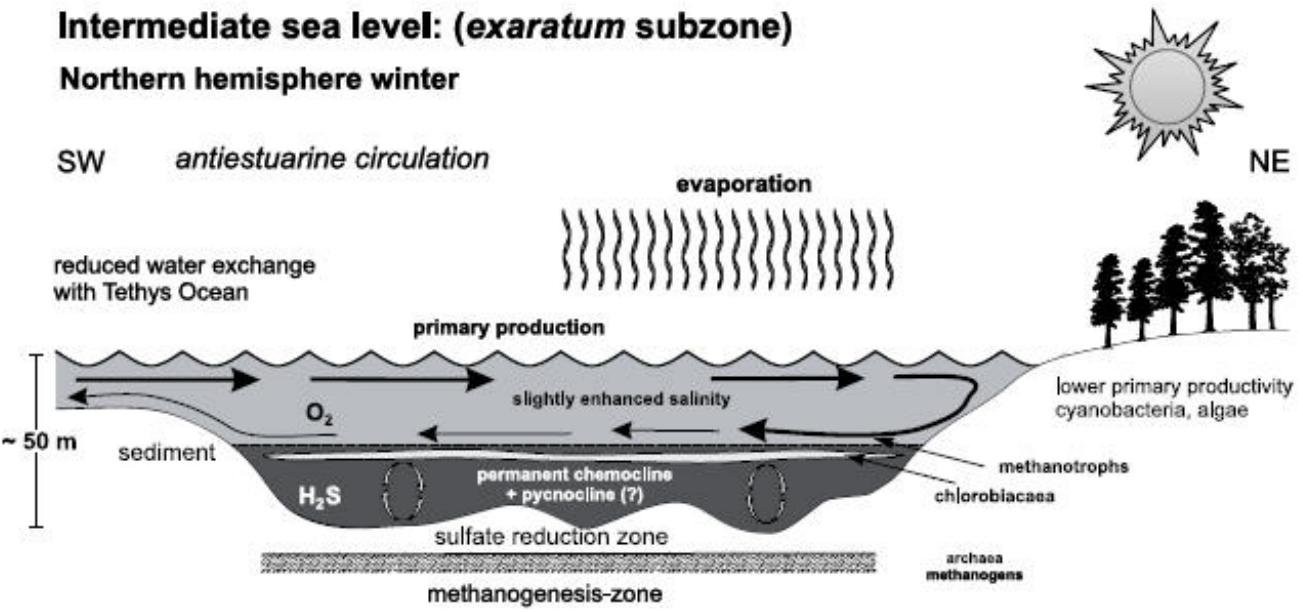
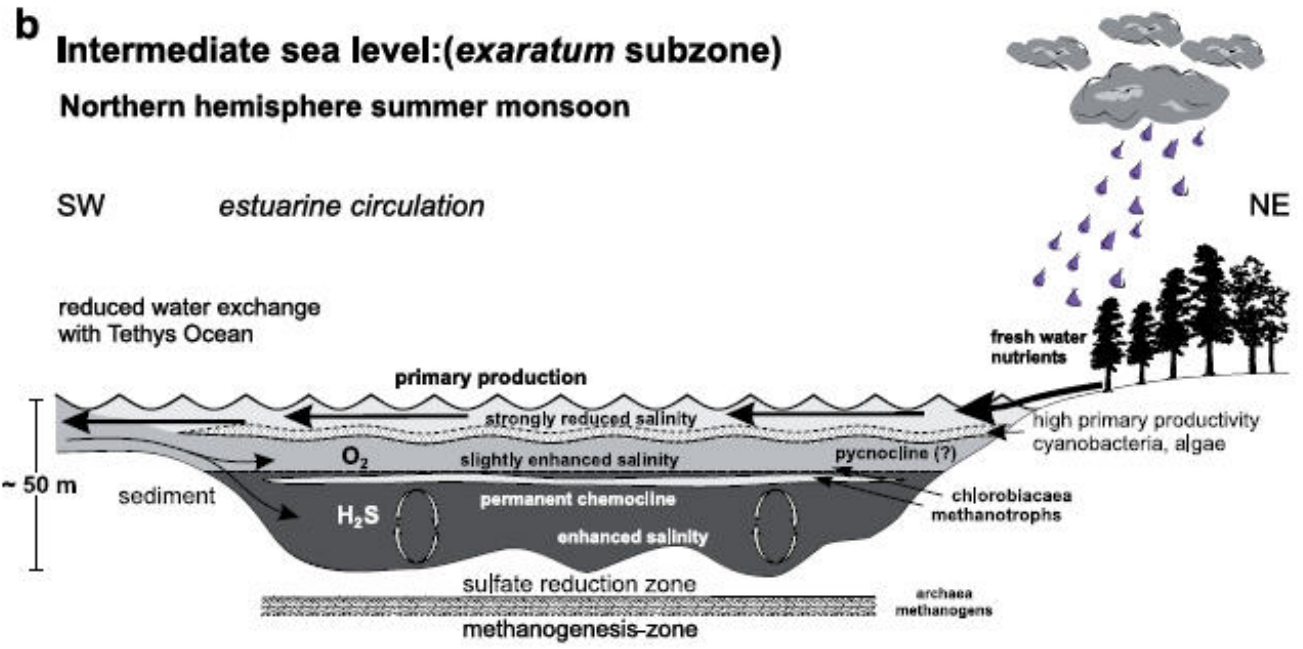


Fig. 11 (continued).

# Posidonia Black Shales

Dans des conditions pauvres en nitrates, les cyanobactéries ont la faculté de fixer l'azote atmosphérique ce qui donne un avantage compétitif.

Les particules de MO et les pellets fécaux qui tombent dans la colonne d'eau sont peu soumises aux conditions de dégradation compte tenu de la faible épaisseur de la couche oxygène.

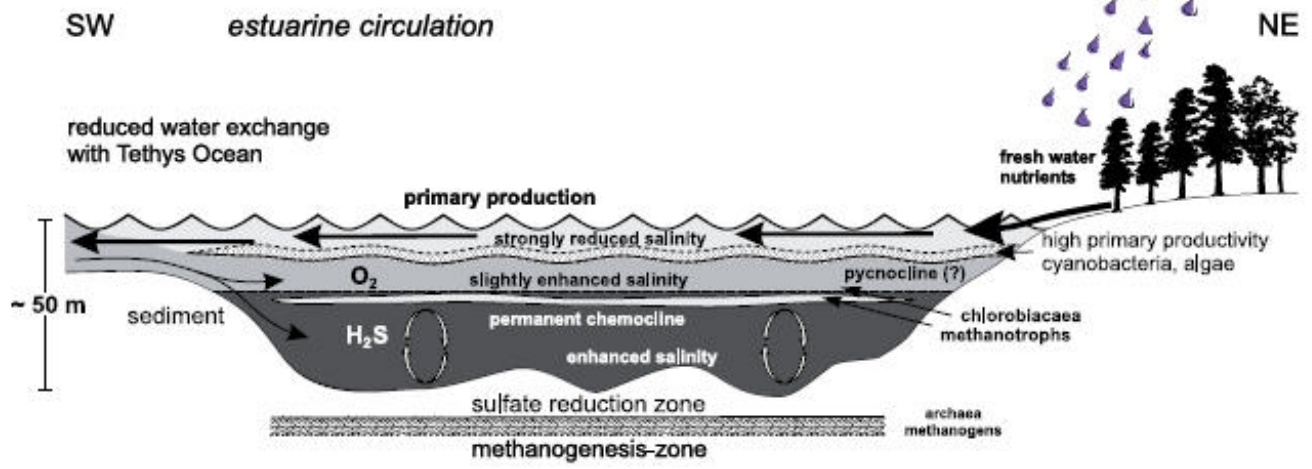
Une association diversifiée de bactéries est observée comme l'indique les biomarqueurs (acyclic isoprenoids, especially pentamethylcosene and squalene).

Ceci permet l'incorporation de C léger dérivé de bactéries dans les carbonates précipités durant la diagenèse précoce.

La période de niveau marin intermédiaire garantit donc les meilleures conditions de préservation de la MO.

## b Intermediate sea level: (exaratum subzone)

### Northern hemisphere summer monsoon



## Intermediate sea level: (exaratum subzone)

### Northern hemisphere winter

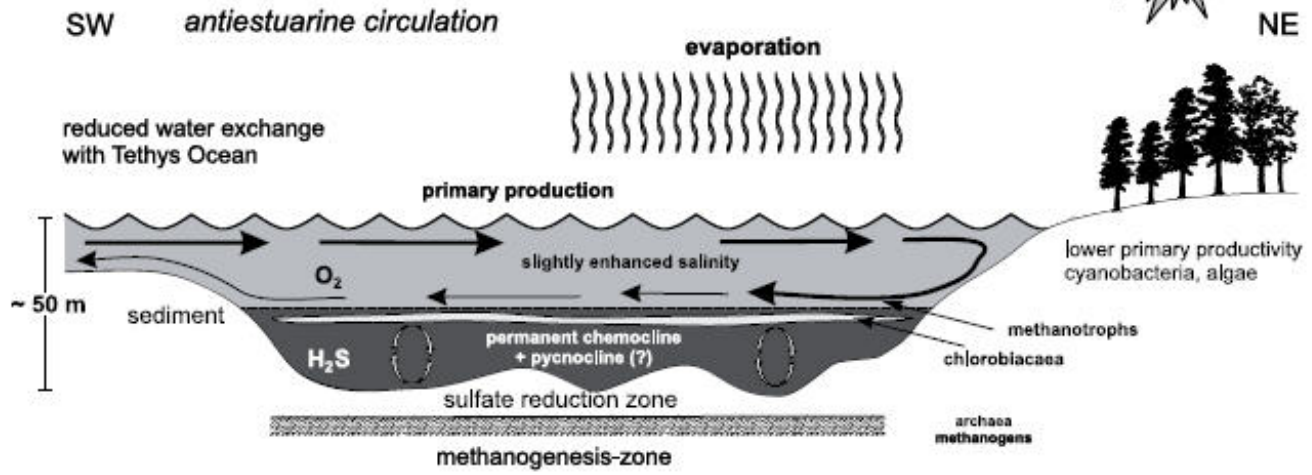


Fig. 11 (continued).