جامعة مولاي إسماعيل
UNIVERSITÉ MOULAY ISMAÏL

كلية العلوم
FACULTÉ DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE GEOLOGIE

FILIÈRE SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

****

ENVIRONNEMENTS SEDIMENTAIRES

ESTUAIRES ET DELTAS

****

Module : Sédimentologie

Professeur Mostafa BERKHLI

****

Année Universitaires 2019– 2020

LES ESTUAIRES

PLAN

I - INTRODUCTION

II - LES ESTUAIRES

A – TYPES ET ORIGINE

B – CARACTÈRES HYDRODYNAMIQUES

1 - Fleuve

2 - Marée

a - Marée dynamique

b - Marée saline

c – Courants d'Estuaire

C – DYNAMIQUE ET FACIÈS SÉDIMENTAIRES

1 - Transite sableux

2 - Transite de suspensions

3 - Faciès sédimentaires

a - Domaine fluvial

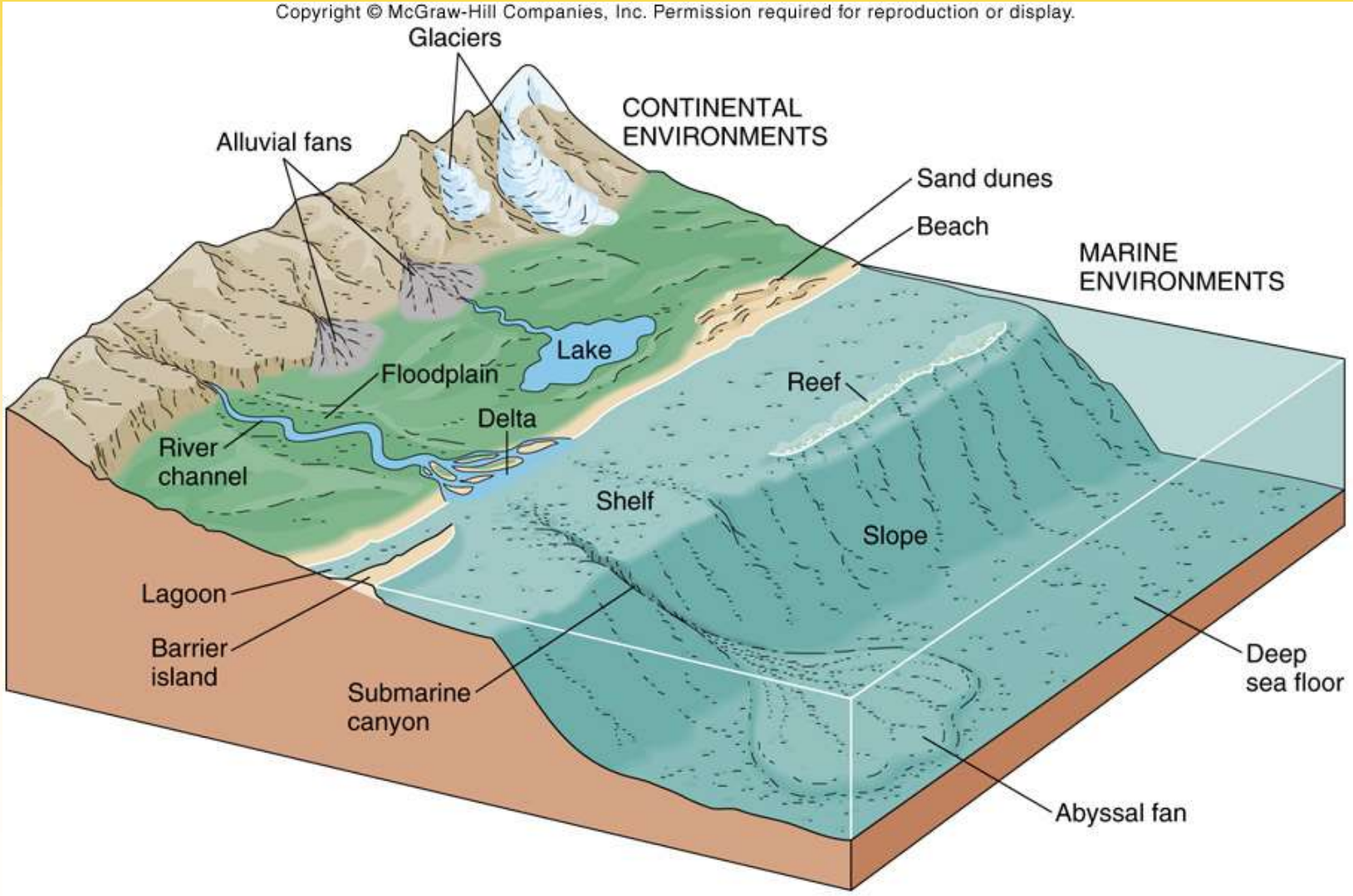
b - Domaine d'Estuaire amont

c - Domaine d'Estuaire aval

d - Embouchure

D – CONCLUSION

I. INTRODUCTION



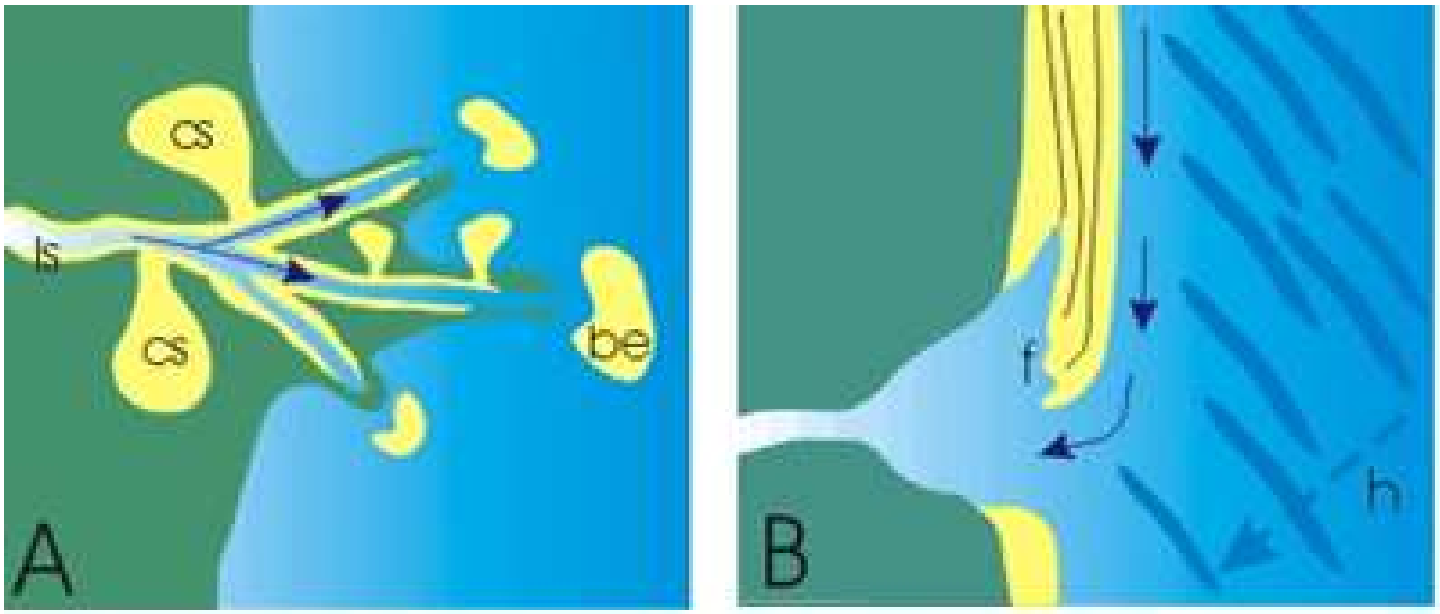


Fig. 1. A : Delta, B : Estuaire

II - LES ESTUAIRES

Les estuaires de fleuves correspondent à la partie des **fleuves** où se fait sentir la **marée**. Ils sont caractéristiques des zones tempérées telles que par exemple, la Loire, la Gironde, la Seine en France, St-Laurent au Canada et l'Amazone en Amérique du Sud.

A – TYPES ET ORIGINE

1. Estuaire de plaine côtière simple (vallée de rivière inondée)
2. Fjord (vallée glaciaire inondée)
3. Estuaire à barrière construite (lagune)
4. Estuaire tectonique

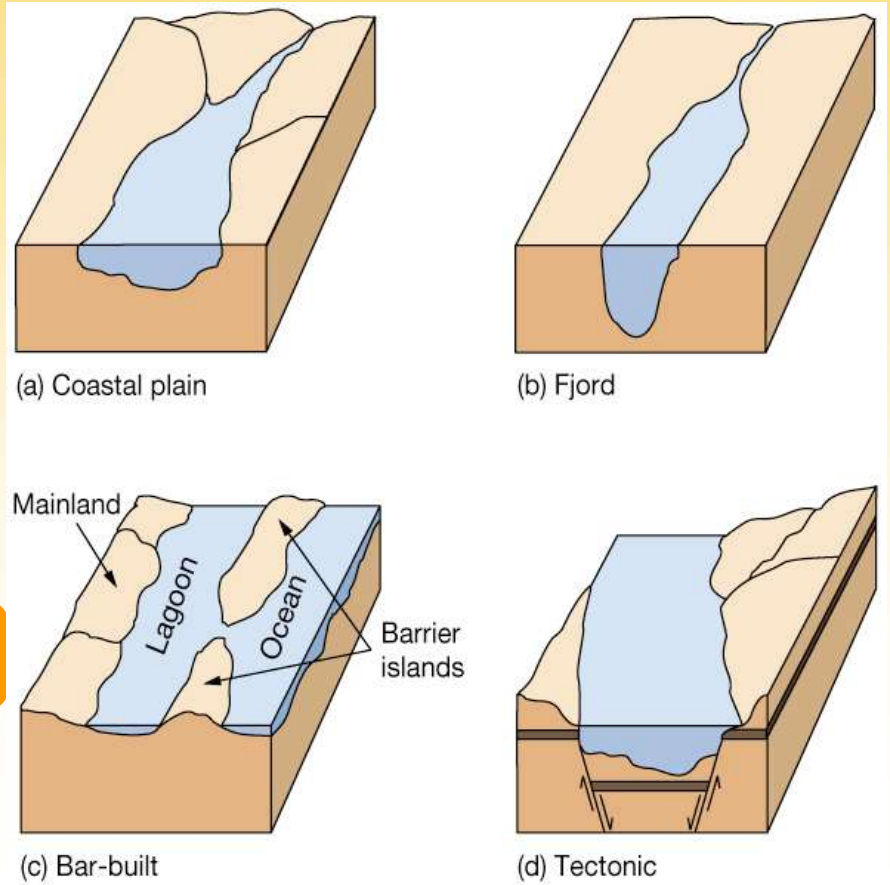


Fig. 2.Principaux types d'Estuaires basés sur leurs caractéristiques physiques

B - CARACTÈRES HYDRODYNAMIQUES

1 - Fleuve

Il présente un caractère purement fluvial jusqu'à l'**amont** de l'estuaire.

L'**hydrodynamisme** est étroitement associé aux **courants fluviaux**.

2 - La marée

a. *La marée dynamique*

• Elle représente la **pénétration de l'onde de marée**, et elle est caractérisée par son **amplitude** ou marnage.
• Le **marnage** est plus important en mer, et il **s'amortit** dans les **estuaires** (Fig.3).
• Cette marée varie suivant le **coefficient dynamique** et la limite maximale atteinte, dépendants des fleuves, par exemple:
• pour la Seine = 140km;
• A St Laurent = 500km.

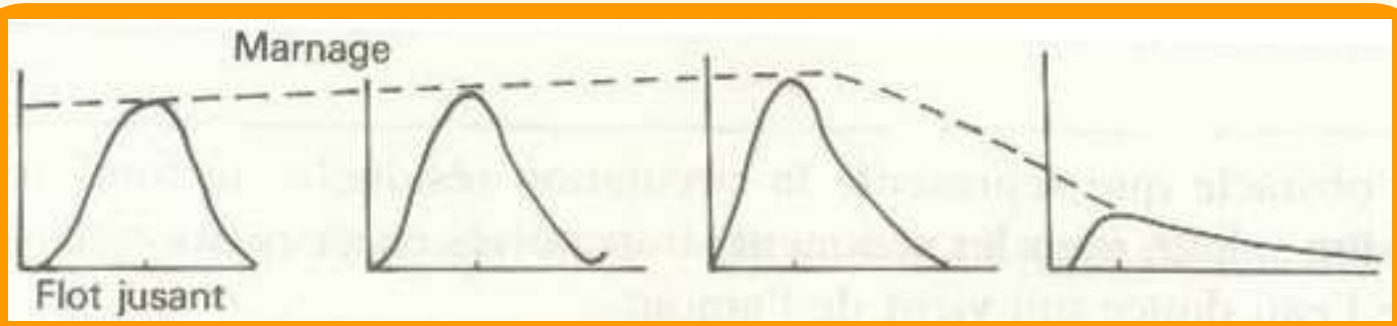


Fig. 3. Marnage dans un estuaire. Il s'amortie de l'aval vers l'amont.

Remarque: le coefficient de la marée

Il est défini comme suit :

$$C = (H - N_0)/U$$

avec:

H : la hauteur d'eau de pleine mer

N_0 : niveau moyen (localité de mesure, à Brest 4,13 m)

U : unité de hauteur propre à la localité (à Brest 3,05 m)

• Cette expression se rapporte à **l'unité**, il faut donc multiplier le résultat par **100** pour retrouver la valeur d'usage en **centièmes**.

• Il est exprimé en **centièmes**;

• Il prend une valeur comprise entre **20** et **120.**

b. *La marée saline*

• Elle correspond à la pénétration des **eaux marines salées** dans le courant **fluviomarin**.

• Elle est plus **limitée** dans **l'espace** que la marée dynamique, et elle **s'amortit rapidement** dans les **eaux douces**; généralement son influence est la **moitié** de celle de la marée dynamique, par exemple:

- Pour la Seine, il y a une influence saline jusqu'à 70 km.
- Pour la Gironde, elle est de 75 km.

• Les **volumes** d'eau introduits sont **considérables**, de 1 à 2 milliards de m^3 par **marée** introduite par quelques heures.

• Le **débit** est de l'ordre de 150 000 m^3/s, qui est 100 à 150 fois plus grand que celui du débit moyen du fleuve.

• Ces **eaux salées** ont un volume oscillant qui monte et qui descend, et par conséquence il y aura mélange d'eau et donc une **eau saumâtre** avec:

- Une salinité qui varie de 0 à 35‰ ;
- Un pH qui varie de 5,6 à 8,3 ;
- Des variations d'oxygène et de température.

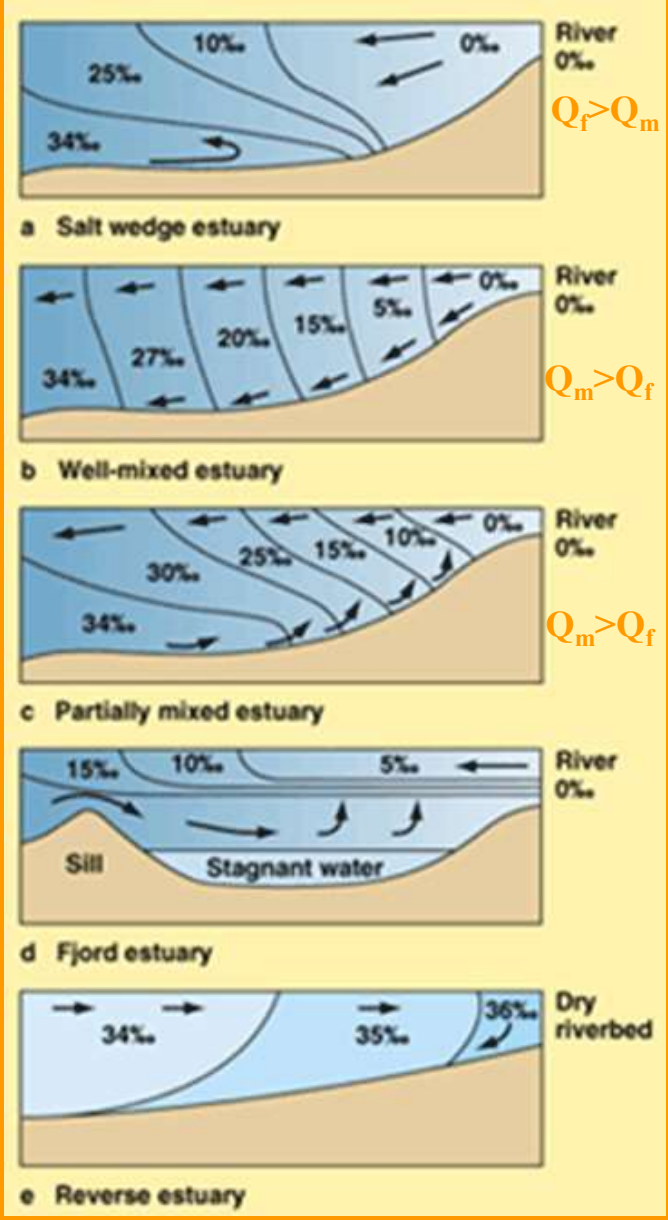
L'affrontement entre **l'eau fluviale** (douce) et **marine** (salée) varie selon un coefficient **R** ($R=Q_f/Q_m$) qui correspond au débit du fleuve sur le débit de marée (Fig.4):

• Si R est fort c-à-d $Q_f>Q_m$, on aura l'apparition d'un **coin salé**. L'interface peut être irrégulière avec des rides de turbulences selon les courants de marée ou de la houle. Si la turbulence est faible l'interface sera régulière.

• Si R est faible c-à-d $Q_m>Q_f$, les eaux seront **diluées**, et **l'estuaire** apparaît **homogène** verticalement. On aura un mélange progressif et donc un **estuaire mélangé**.

• Selon les **saisons** on pourra passer pour un même estuaire d'une période **homogène** à une période de **coin salé** (Fig.4):

- En période de **crue**, R est élevé: **Estuaire stratifié** (à **coin salé**) ;
- En période **d'étiage**, R est plus faible: **Estuaire homogène**.



Lit de rivière asséché

Fig. 4. Mélange d'eau estuarienne en fonction du coefficient $R = Q_f/Q_m$.

c. *Courants estuariens*

• A **l'aval** les courants marins sont dominants avec leurs deux composantes, **flot** et **jusant.**

• Ces **courants** sont essentiellement **élevés** en période de **vive eau** (1 à 3 m/s).

• Ils **varient** avec le **coefficient** et le **débit** du fleuve ce qui provoque des **courants de densité** différents entre une **eau douce** et une **eau saline**.

• Calcul des **écoulements** et de la **vitesse résiduelle** (Fig. 5)

Sf = écoulement du flot

Sj = écoulement du jusant

Vr = (Sf - Sj)/ T, vitesse résiduelle

/ Sj / x 100 : (/Sf / + / Sj /), % de l'écoulement

• Répartition des vitesses résiduelles Vr dans un estuaire (Fig.5).

- Allen (1970) a établit un contrôlographe, en observant **la VR** en différents points de **l'estuaire**.

- Il a constaté que cette **VR varie horizontalement** et **verticalement** et que globalement **la résultante des courants est nulle**.

- Les **VR** sont représentées sous forme de **vecteurs** selon le schéma suivant (Fig.5).

- **L'écoulement résiduel** se déplace vers **l'aval**, en **surface**, et vers **l'amont** en **profondeur**.

- Le long d'une **surface nodale** ces **VR** sont **nulles**.

- Cette surface coupe le **fond** en un point appelé **point nodal**.

- Tout le système se déplace par **translation** selon les **crues** ou les **marées**.

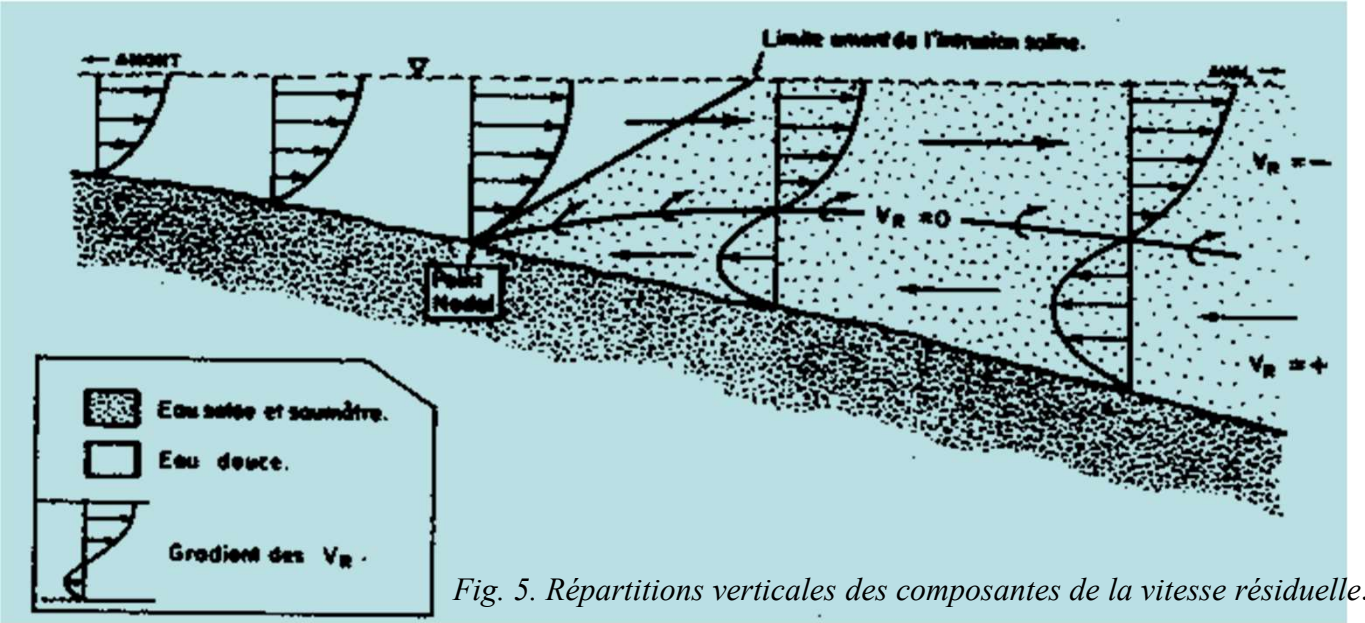


Fig. 5. Répartitions verticales des composantes de la vitesse résiduelle.

C - DYNAMIQUE ET FACIÈS SÉDIMENTAIRES

1 - Transite sableux

- Il est **faible** et **limité** à la **partie supérieure** et **moyenne de l'estuaire**.
- Dans la partie **aval** de l'estuaire, il y a apparition de **bancs** et de **cordons sableux** dus à des apports considérables au niveau des **embouchures** associés aux courants de **flots** et aux **dérives littorales**.
- Le **trie** de ce matériel est dû à la **forte agitation**.

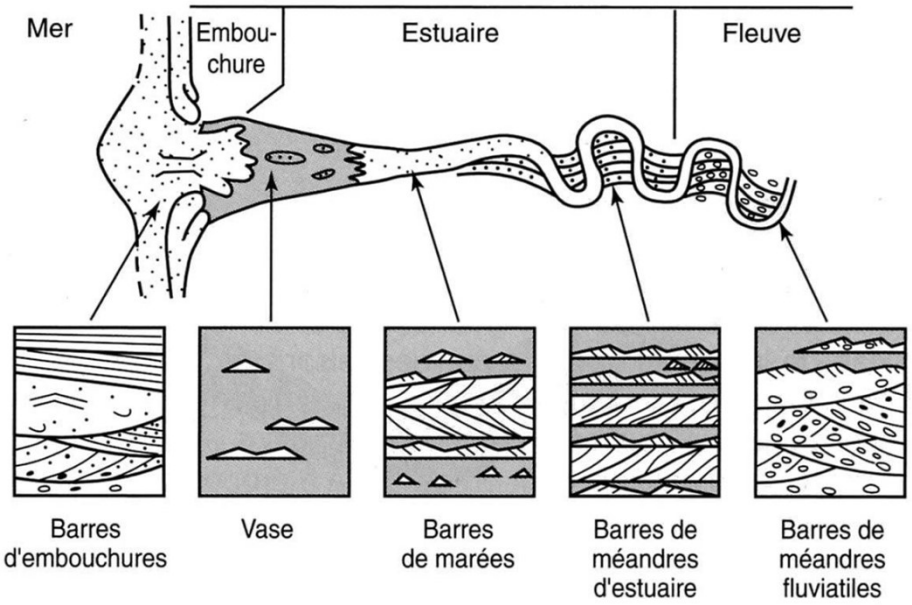


Fig.7. Répartition de faciès sédimentaires le long du Système estuarien.

2 - Transite des suspensions

❑ Il correspond au transport d'**argile**, **silt** et **sablons** dont la taille est **<150µ**, associés à de la **MO**, formant un **flocon** par des **eaux estuariennes turbides** plus turbulent que les eaux fluviatiles.

❑ La **dynamique** est commandée par la **VR**:

- Lorsque **Vr=0**, on aura une **concentration maximale** de matériel formant un **bouchon vaseux** (1 à 10 g/l) qui **oscille** avec les **marées** et les **crues**.

- En période de **crue**, le **bouchon** se déplace **vers la mer**, et en période d'**étiage** vers **l'amont** (Fig. 6).

❑ La **crème de vase** ne se forme qu'en **mortes eaux**, quand les **courants atténués** et la durée accrue des étales favorisent le **dépôt des sédiments du bouchon vaseux**.

- Les **turbidités** y sont de l'ordre de **100-150 g/l**, voire localement de **300-400 g/l**, sur une épaisseur de 1 à 3 m et une longueur de 20 km. Son "poids" est estimé à 100 000 tonnes.

- La **crème de vase** se déplace **très peu** au cours de la **marée**. Au-dessus, subsiste un bouchon vaseux très discret et réduit (Fig.6).

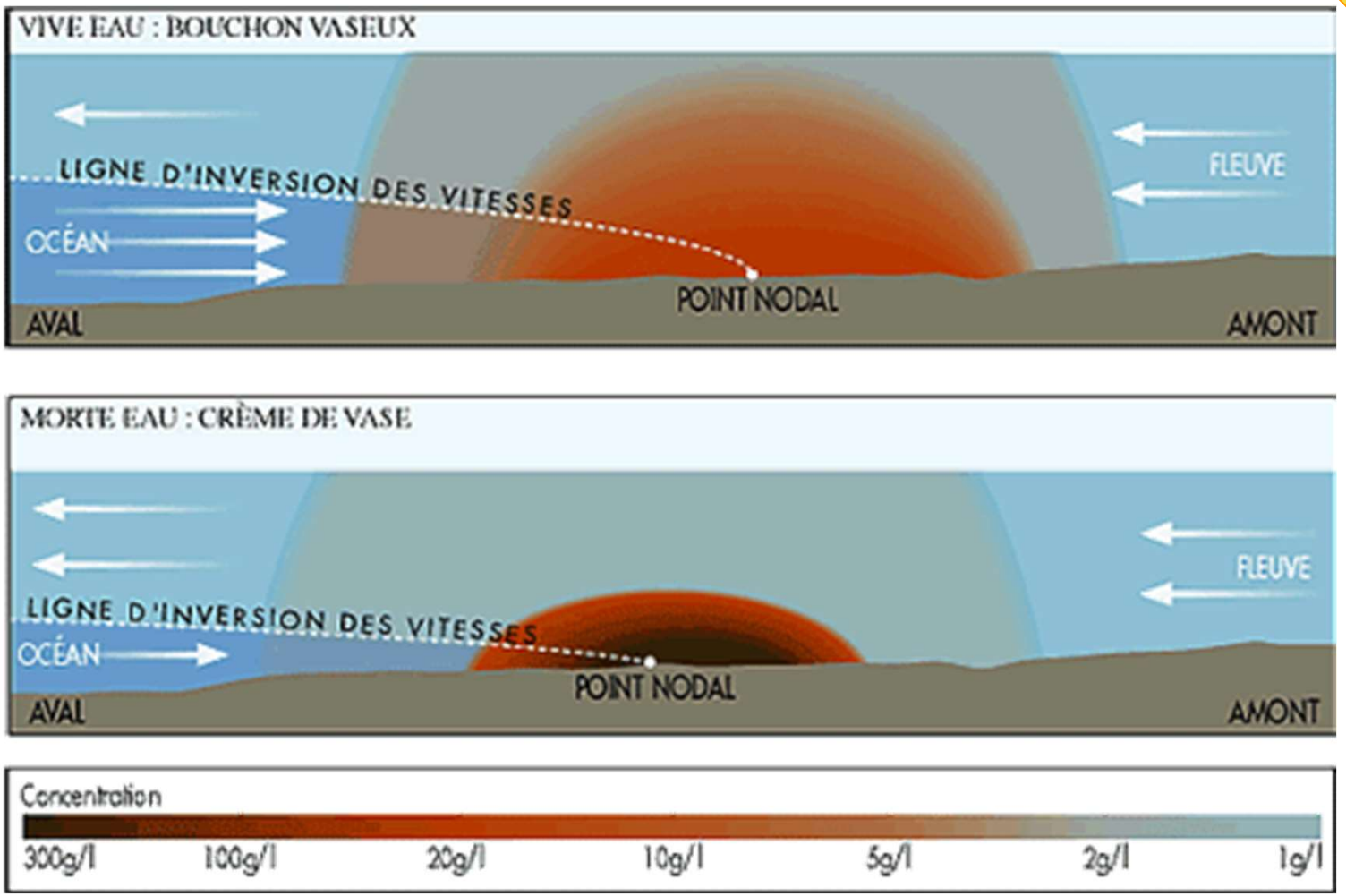


Fig. 6. Formation de bouchon vaseux et crème de vase.

❑ L'alternance **bouchon vaseux - crème de vase** est un facteur de sédimentation rapide dans l'estuaire.

- Quand les **coefficients** de marée **augmentent**, les courants remettent en **suspension les sédiments** immobilisés dans la **crème de vase** qui vont alimenter le **bouchon vaseux**.

- Quand les **coefficients décroissent**, l'inverse se produit.

- Cette "respiration" est essentielle dans l'évolution sédimentaire de l'estuaire et pour la **qualité de ses eaux**.

3 - Faciès sédimentaires

Quatre domaines sont à distinguer *(cas de la Gironde)* (Fig. 7):

a. Domaine fluvial

Il est limité au bec d'Ambés. La rivière est de type à **méandres**. Au niveau du **chenal** on a des **dépôts grossiers** puis **sableux** en période de crue et **vaseux** en période d'étiage. La **plaine d'inondation** est constituée de silt riche en **matière organique**.

b. Domaine estuarien amont

Il correspond à un **estuaire à méandres** à chenaux riches en **sable** et pauvres en **particules fines**, correspondant à des dépôts d'étiage associés à la remontée du **bouchon vaseux**. Ces **barres** sont considérées comme des zones de **stockage** de particules **sableuses** venant de l'**amont** essentiellement **fluviatile**. Elles correspondent donc à une sorte de **delta** dans **l'estuaire**.

c. Domaine estuarien aval

En Gironde, il fait 25 km de long.

- ❑ Toutes les **barres** ont **disparues** et on ne voit que **deux chenaux** séparés par **une barre sableuse longitudinale**, avec un chenal de **flot** et un autre de **jusant**.
- ❑ Les **sédiments** deviennent localement **vaseux.**
- ❑ Le **chenal de flot** est **plus sableux** avec des intercalations de **silt** et de **vase** sous forme de **laminites**.
- ❑ Le **chenal de jusant** est exclusivement à **vase**, **silt** et **argile**.
- ❑ La **barre** médiane influencée par le **flot** est constituée de **sable** et de **galets de boues** avec des **slikkes sablo-vaseuses** à **vaseuses.**
- ❑ On est en milieu **saumâtre,** vers l'aval **l'influence marine** se fait sentir de plus en plus.

d. Domaine d'embouchure

Il est caractérisé par :

- des courants de **marée** et de la **houle**, et
- la formation de **cordons littoraux** bordant le rivage avec l'apparition de **flèche littorale**
- Dans les **zones abritées**, il y a apparition de **dépôts sablo-vaseux** et généralement **peu** de **dépôts grossiers** de type **gravier**.
- Vers le **large**, les **dépôts s'affinent** sur le plateau continental et forment ce qu'on appelle des "**Vasières**".

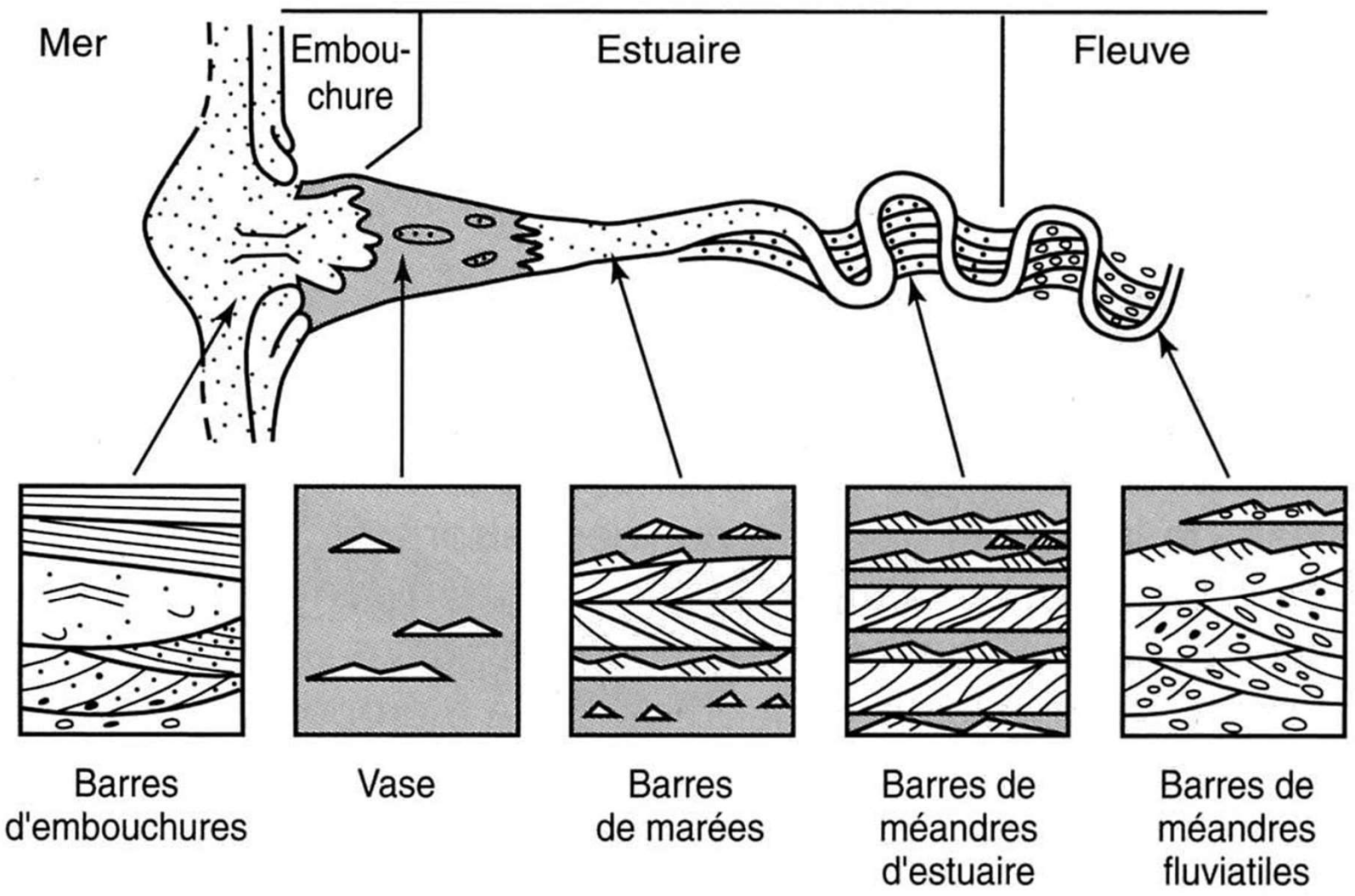


Fig.7. Répartition de faciès sédimentaires le long du Système estuarien.

Séquence estuarienne

La formation de **séquence estuarienne** due à un colmatage du milieu, est composée de **sables** à la base puis des **sables vaseux** et des **vases sableux** et enfin des **vases** à **MO** (Fig.8).

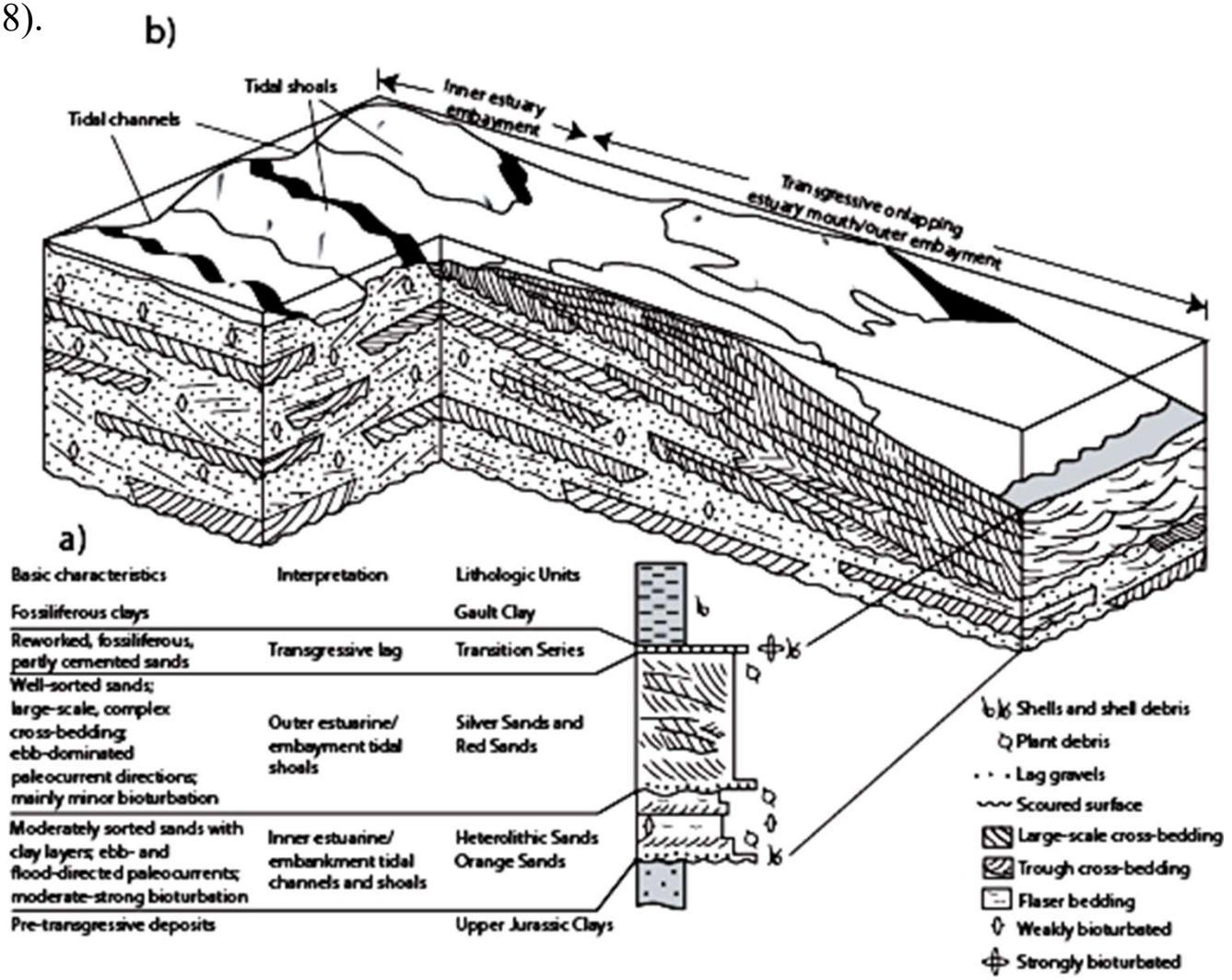


Fig.8. Système de dépôt d'un estuaire transgressif à dominance tidale (b) et sequence type (a).

D - CONCLUSION

D'une manière générale **l'étude des estuaires** est très importante pour l'étude des **ports** et de la **pollution** étant donné que les accumulations sédimentaires et les **matériaux pollués** ont tendance à s'accumuler dans ces zones sensibles.



LES DELTAS

PLAN

A - MORPHOLOGIE DES DELTAS

1 - Facteurs agissant sur la morphologie des deltas

2 - Morphologie

3 - Les différents types de deltas

a - Classification génétique

b - Classification morphologique

B - LES SÉQUENCES DELTAÏQUES

C - FACTEURS SÉDIMENTAIRES AGISSANT DANS LES BASSINS DELTAÏQUES

1 - La subsidence et l'accumulation sédimentaire

2 - L'eustatisme

D - EVOLUTION D'UN DELTA AU COURS DU TEMPS

E – ELEMENTS DIAGNOSTIQUES DES DELTAS

F - CONCLUSION

A - MORPHOLOGIE DES DELTAS

1 - Facteurs agissant sur la morphologie

Pour qu'un delta existe, il faut:

- Un **bassin versant** qui fournit les sédiments à partir du continent ;
- Un **court d'eau** qui les transporte ;
- Un **bassin récepteur** qui les stocke.

Tous les **facteurs** (tectonique, climat) agissant sur ces trois composantes ont une influence sur **l'appareil deltaïque** qui en résulte, et en particulier sur sa **morphologie**.

Par ailleurs, d'autres **facteurs** interviennent dans le **bassin récepteur**, parmi lesquels

- les vagues, les marées, les courants océaniques,
- la configuration du plateau continental, celle du talus et du bassin,
- le taux de subsidence, etc.

2 - Morphologie

Un système deltaïque est composé par (Fig.8):

Les dimensions de ces différentes entités sont fonction:

- des apports fluviaux,
- de l'intensité de l'action marine,
- du gradient de pente de la plate-forme supportant le delta.

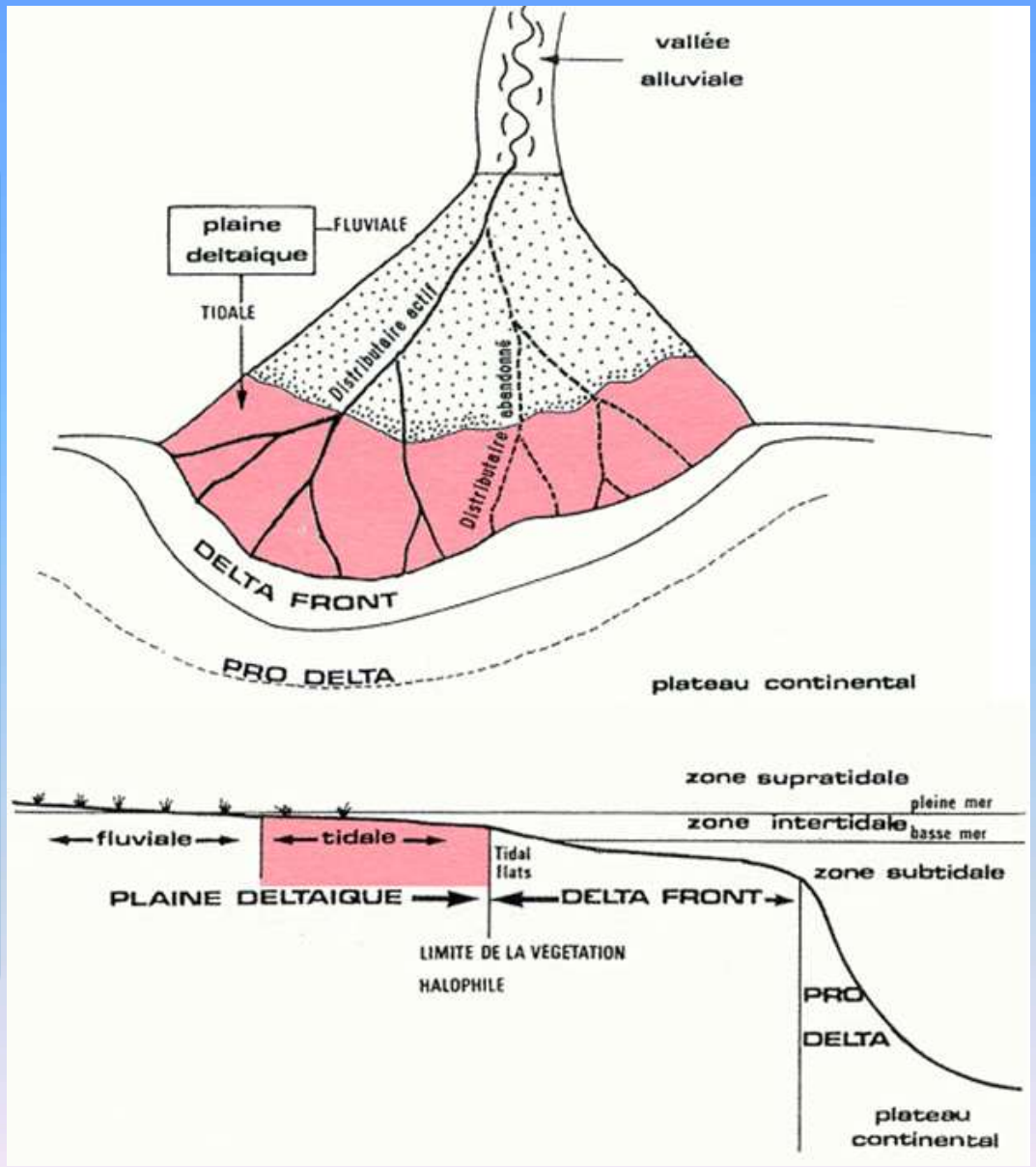


Fig. 8 – Schéma morphologique général d'un delta

3 - Les différents types de deltas

La **morphologie** d'un delta résulte de la confrontation entre les **actions fluviatiles**, d'une part, et les **actions marines**, d'autre part.

a. *Classification génétique*

- Deltas à prédominance **fluviale** avec un **chenal distributaire** bordé de levées, et accumulations importantes de **sables** à l'embouchure.
- Deltas à prédominance de **marées**, à embouchures **évasées** de type estuarien avec d'importants **replats de marée** et des **barres sableuses rectilignes** dans l'embouchure.
- Deltas à prédominance de **houles**, à **cordons littoraux parallèles à** la côte.

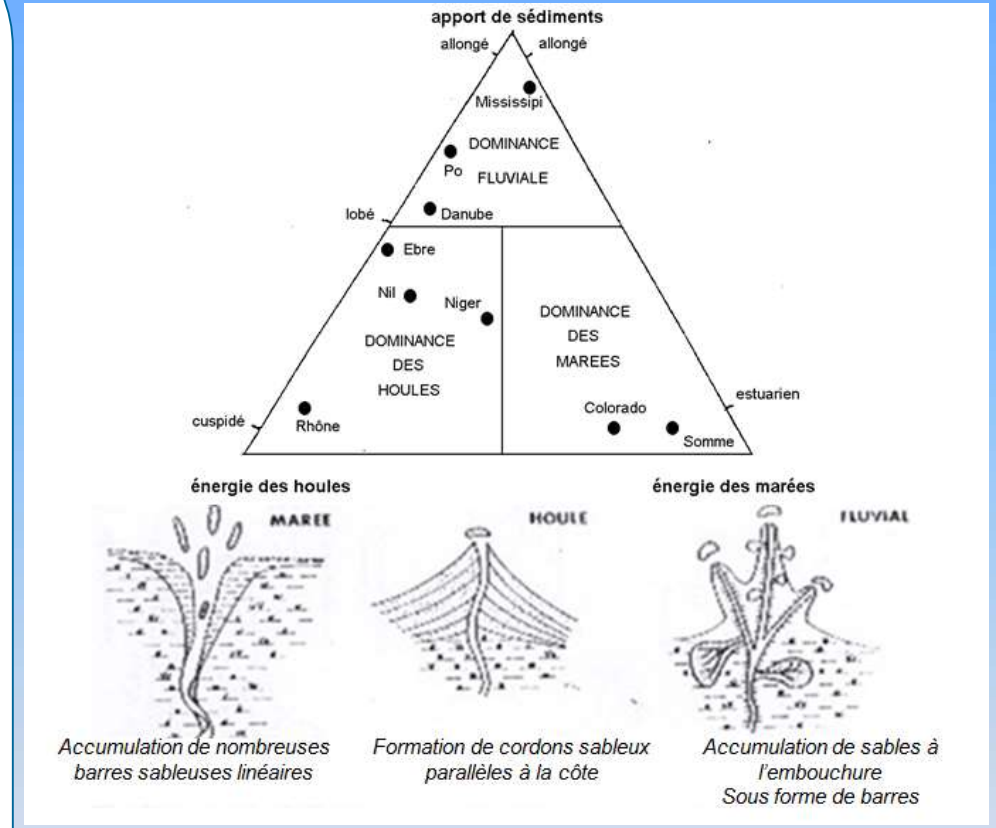


Fig. 9 – Classification génétique de deltas



Delta à prédominance **fluviale**



Delta à prédominance de **houles**



Fly Delta à prédominance de **marées**

b. *Classification morphologique*

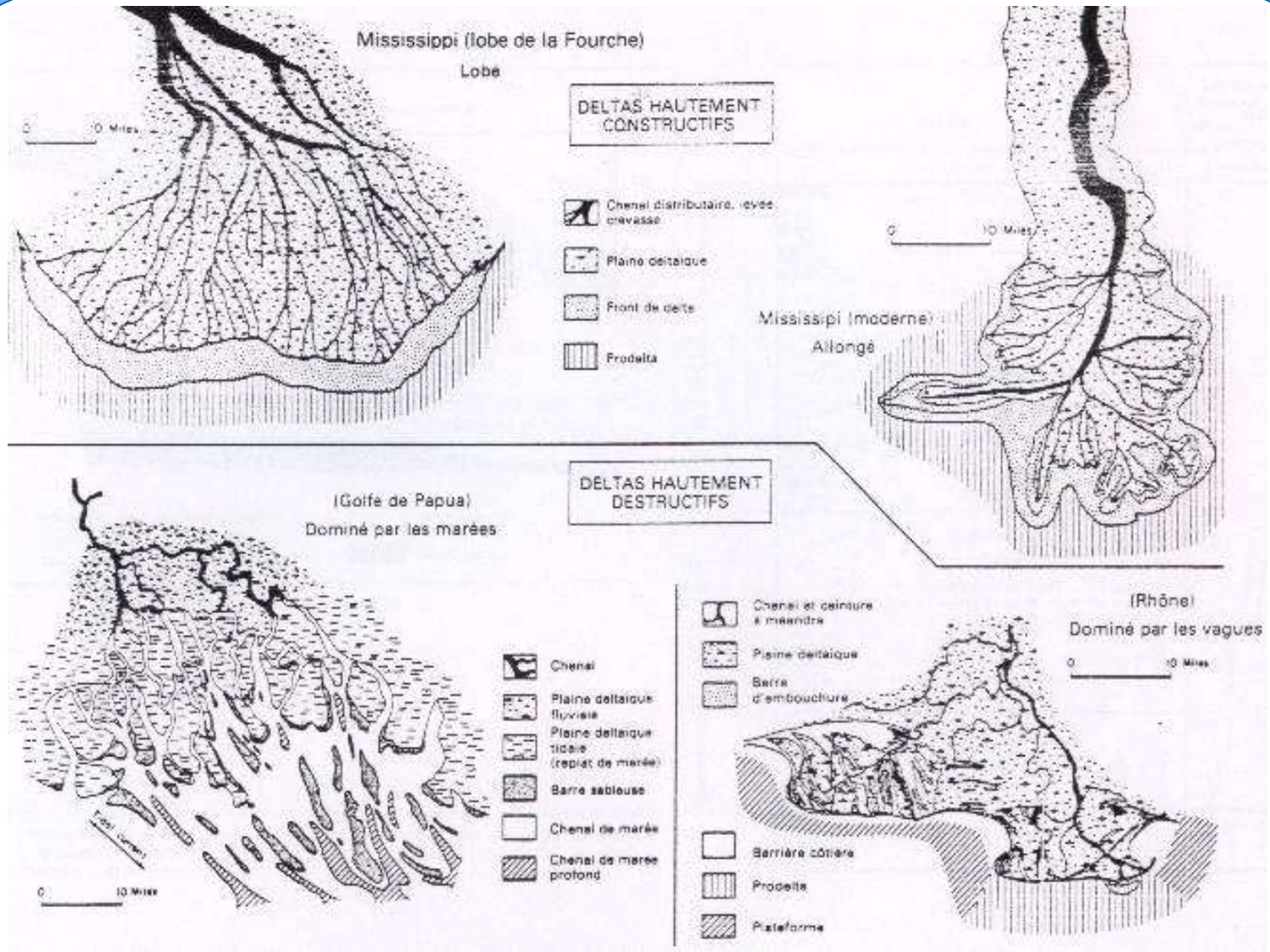


Fig. 10 - Types deltaïques de base



Delta hautement constructif de Mississippi



Delta hautement destructif de Papua



Delta hautement destructif de Rhône

B - SÉQUENCES DELTAÏQUES

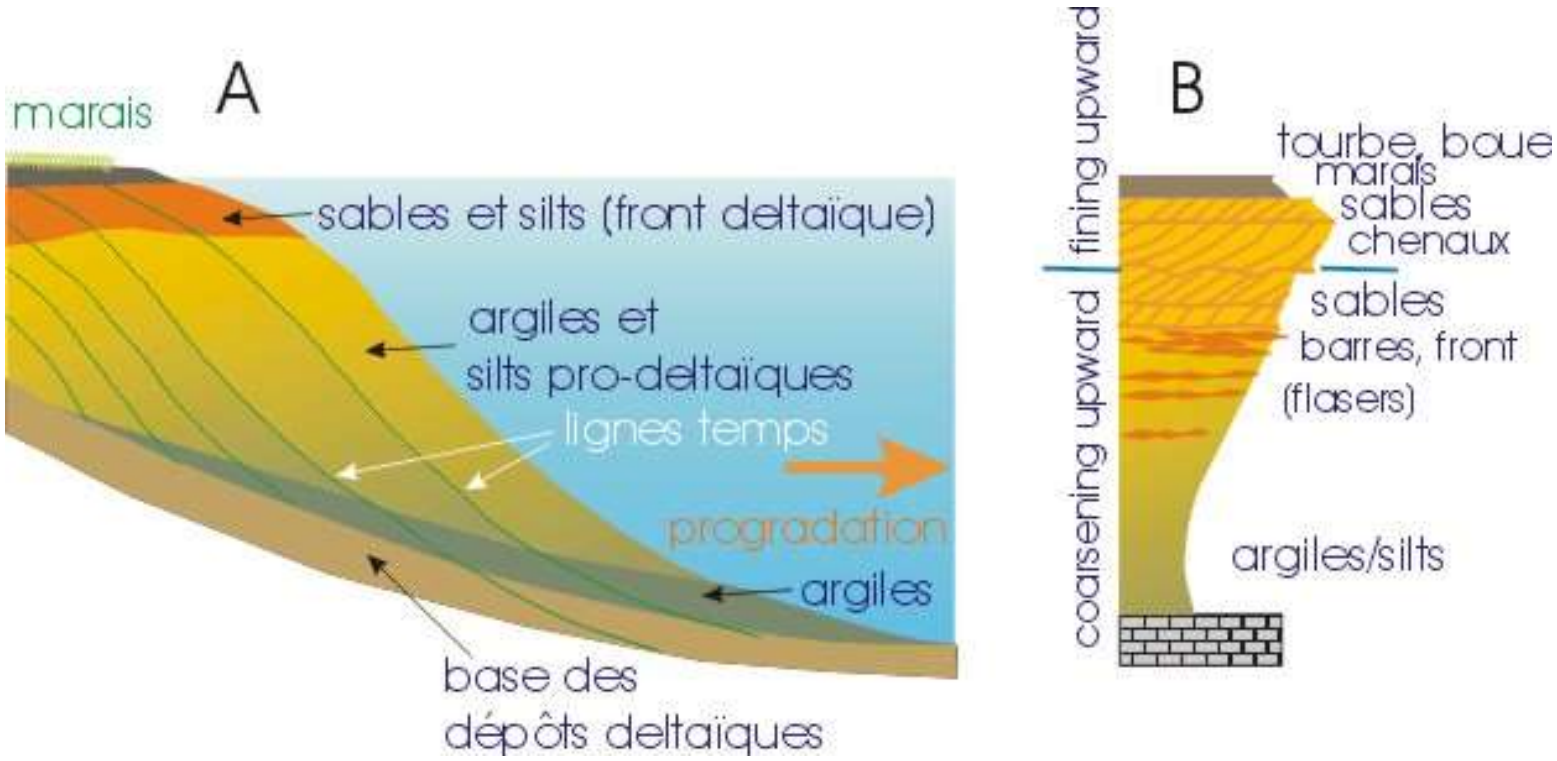


Fig. 11 - A: coupe simplifiée dans un delta. B: séquence sédimentaire produite par la progradation d'un delta

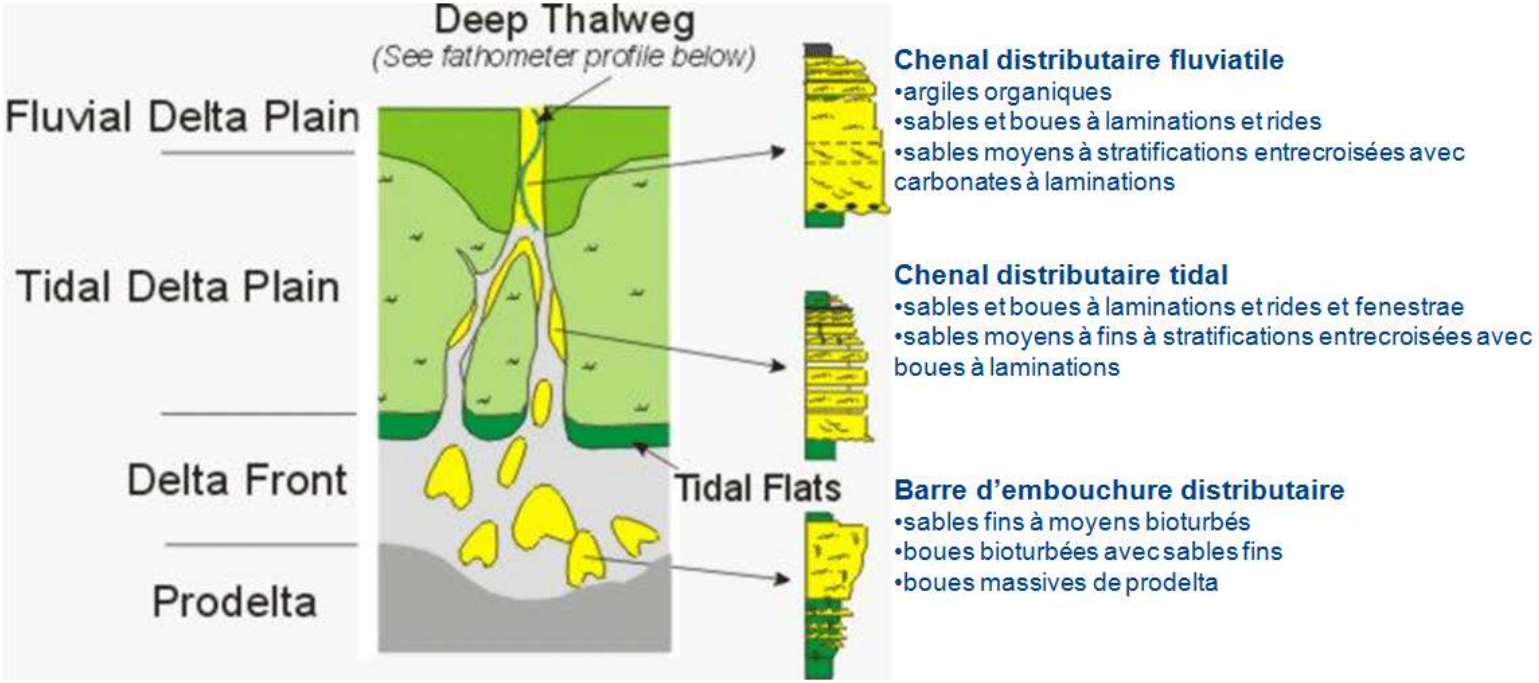


Fig. 12. Distribution de faciès en fonction de zones morphologiques d'un delta

C - FACTEURS DE CONTROLE

1 - La subsidence et l'accumulation sédimentaire

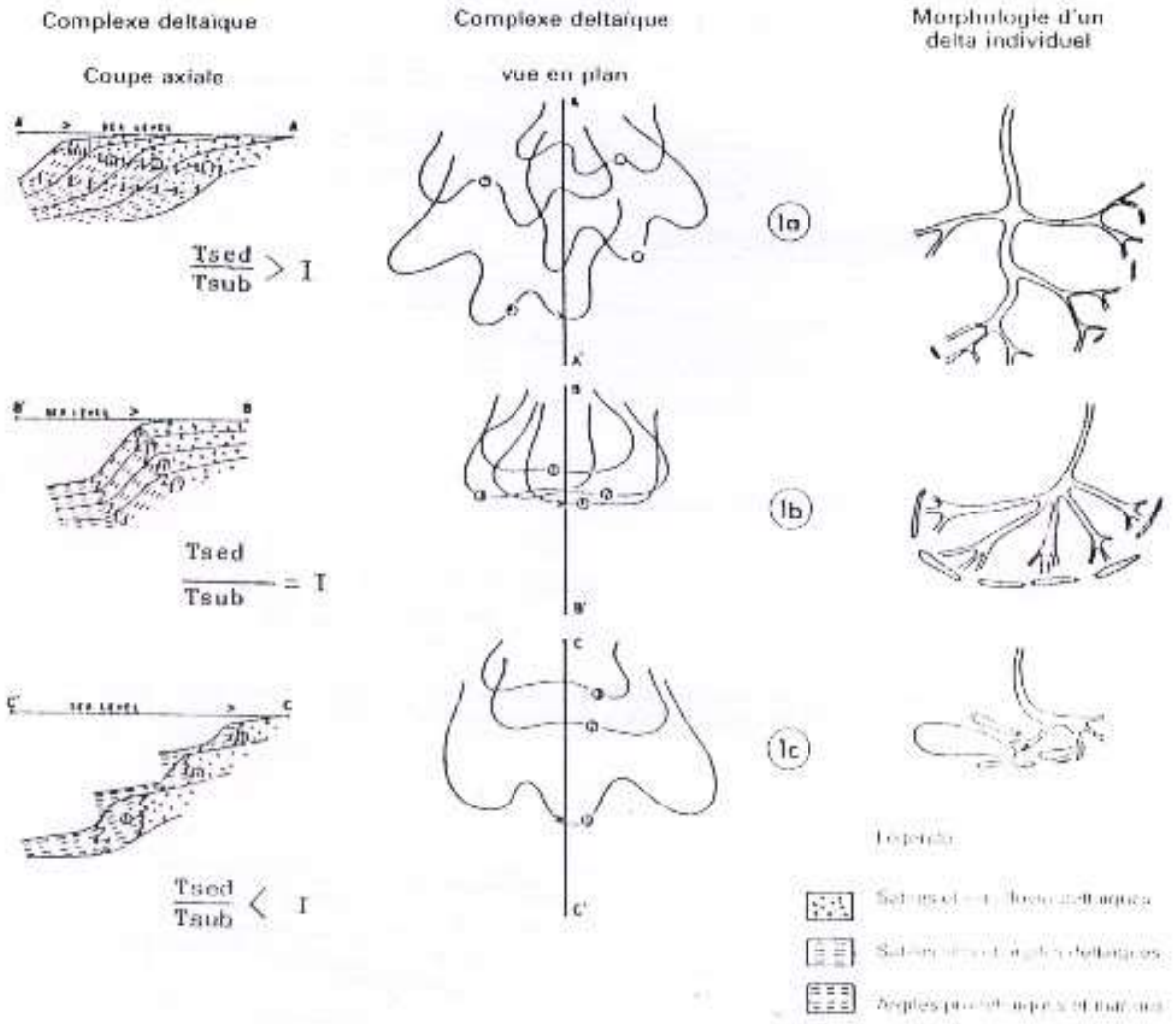


Fig. 13 – Diagramme conceptuel illustrant les variations des caractéristiques des deltas

2 - L'eustatisme

Les deltas sont caractérisés par:

- une **durée de vie** relativement courte pendant laquelle ils progradrent rapidement.
- Une telle **progradation** est fortement contrôlée par:
  - les **variations eustatiques**;
  - la **subsidence**.

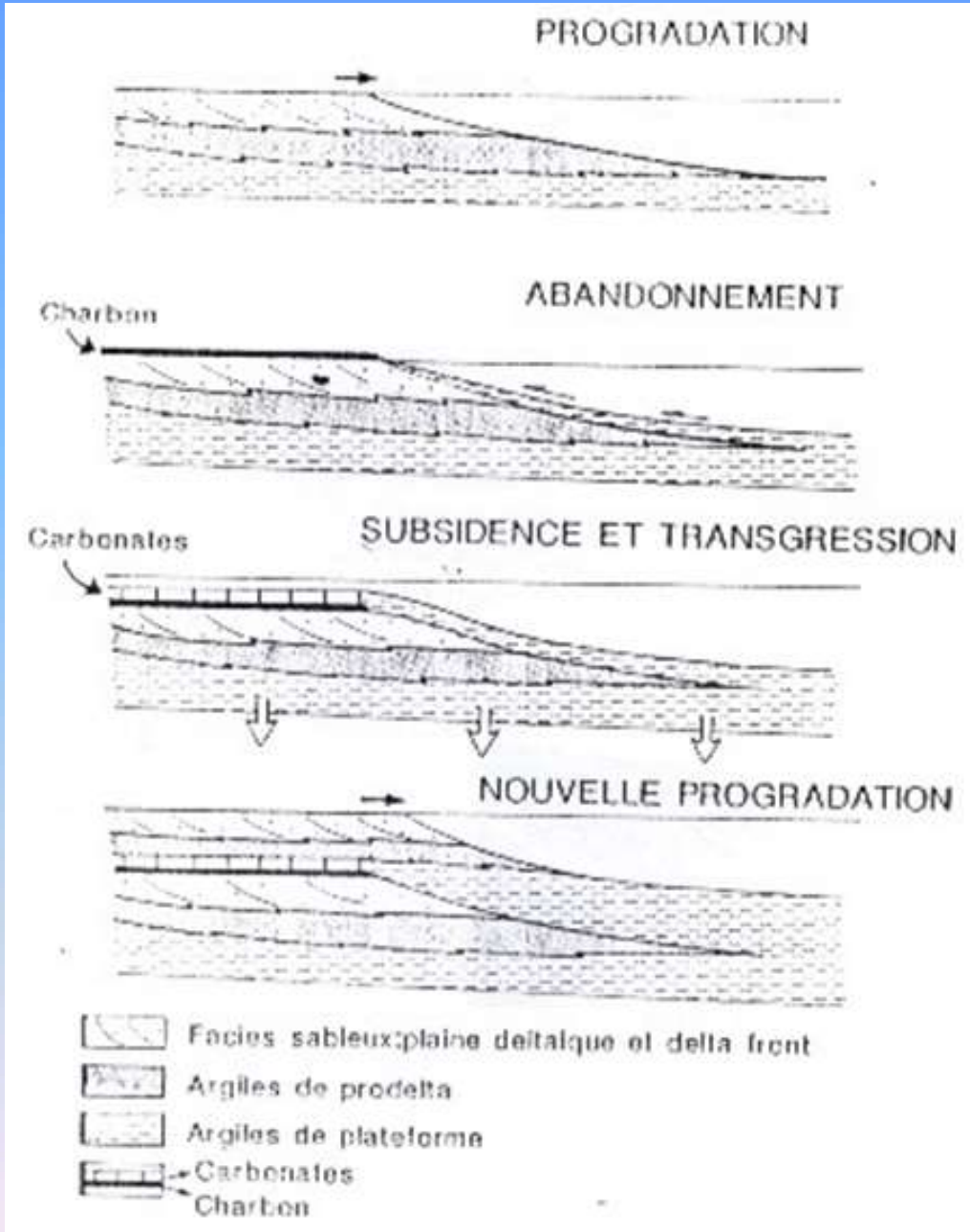


Fig. 14 – Superposition de séquences deltaïques séparées par des niveaux transgressifs au gré des cycles de progradation et d'abandon sur une plate-forme subsidente.

Ces ensembles sont généralement séparés par des **discordances régionales** d'origine **tectoniques** ou **eustatiques**, souvent accompagnées de dépôts transgressifs qui formeront la base d'un nouvel ensemble deltaïque régressif (Fig.15).

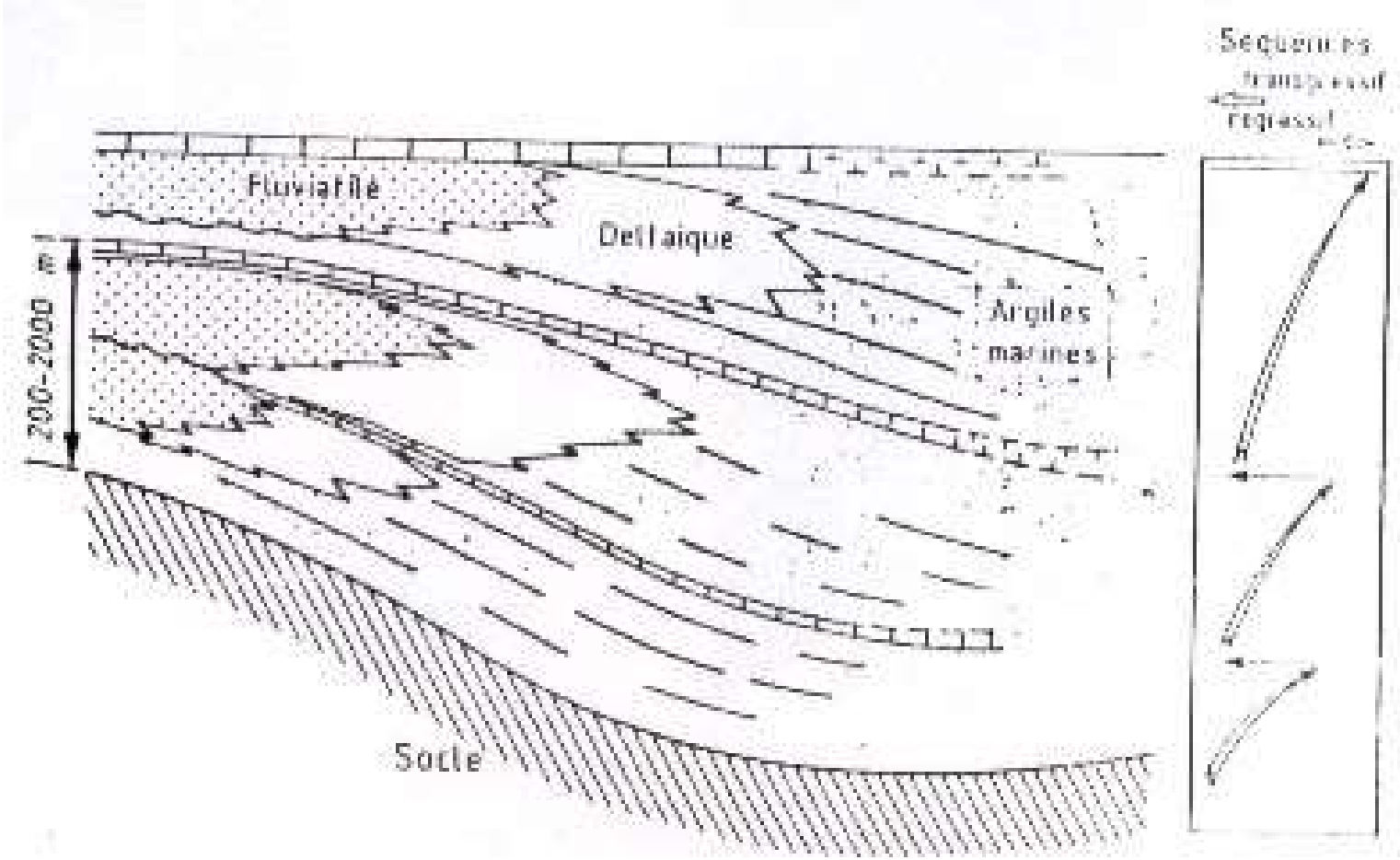


Fig. 15 – Exemple de grandes unités deltaïques dans un bassin sédimentaire. Ces unités, qui sont formées par l'empilement de nombreux cycles deltaïques individuels, sont à l'échelle des séquences de dépôt décrites par Vail (1977). Ces unités représentent des périodes de progradation du talus et sont séparées par des discordances régionales dues à des variations relatives du niveau marin.

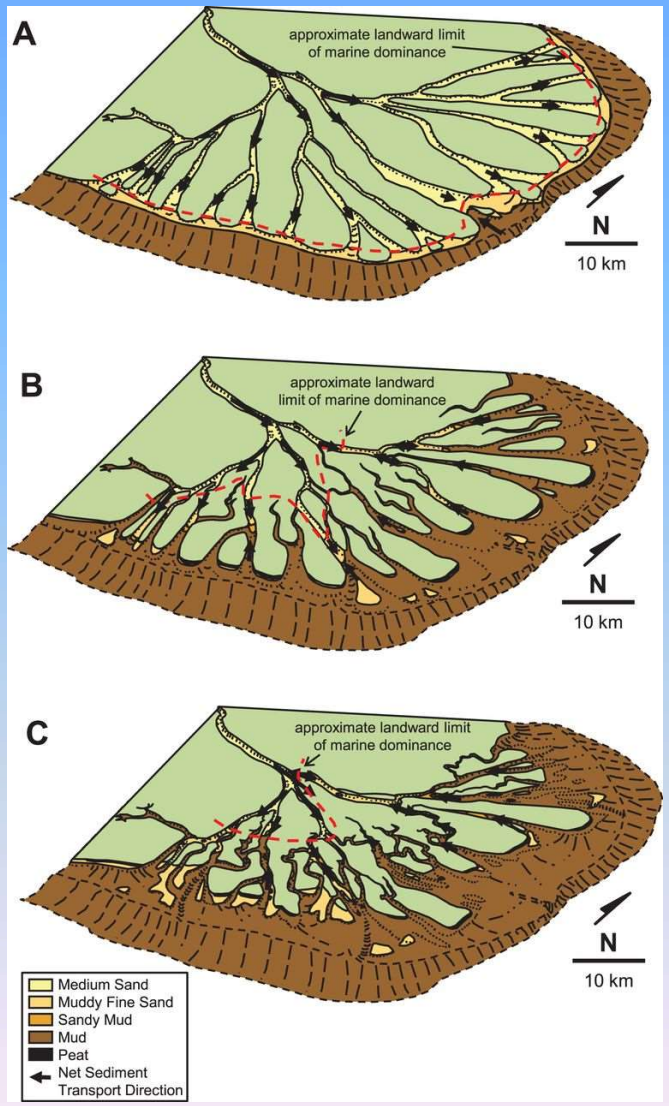
D - EVOLUTION D'UN DELTA AU COURS DU TEMPS

Cas du Delta du MAHAKAM

Il s'est développé depuis la transgression Holocène, l'épaisseur maximale des dépôts est d'environ 50 m.

- De 7000 à 5000 BP (A), il n'y avait qu'**un seul** ou quelques **débouchés** et le **débit fluvial** devait être **plus important** qu'actuellement où il est divisé en une **dizaine d'embouchures.** Le modèle était alors probablement **dominé** par les **actions fluviatiles.**
- De 5000 BP à l'actuel (B, C), le nombre de **distributaires** a **augmenté** par bifurcations successives et l'influence des **marées** est devenue **plus importante**.

Cet exemple montre que **la forme d'un delta** peut changer au cours du temps par suite de l'évolution des régimes respectifs du **fleuve** et du **bassin récepteur.**



E – ELEMENTS DIAGNOSTIQUES DES DELTAS

- Contexte: marge passive;
- Associés à des dépôts fluviatiles et à des sédiments littoraux.
- Forme triangulaire en plan et en forme de coin en coupe,
- Superficie , des milliers de km^2 pour une puissance parfois pluri-kilométrique;
- Séquences de type granocroissance;
- Les sables montrent des stratifications entrecroisées;
- Les levées et la plaine deltaïque sont constituées de boues laminaires à bioturbées, riches en MO (charbon) ;
- Les boues pro-deltaïques contiennent des niveaux sableux occasionnels correspondant à des crues fluviales;
- Slumps et déformations syn-sédimentaires sont fréquents suite à l'inclinaison du front deltaïque.

F - CONCLUSION

Les deltas ont joué, pendant tous les temps, un rôle important dans **l'histoire humaine**. L'existence conjointe de **terres alluviales fertiles** et des débouchés de rivières ont fourni l'assise à deux activités humaines importantes: **l'agriculture** et le **commerce**.

Les deltas qui se sont avérés extrêmement riches en **hydrocarbures** sont devenus des sources importantes d'**énergie** et assurent un rôle **économique** très important dans la civilisation actuelle.



Madina Az-Zahra, Cordoba, Andalousie

Vestige d'une civilisation Arabo-musulmane disparue