

4TPV236U Géologie et environnements du SW de la France

avril 2023

Estuaires : morphologie et dynamique sédimentaire de l'Estuaire de la Gironde

Aldo Sottolichio, Laboratoire EPOC



Estuaire

« Plan d'eau côtier partiellement confiné, en connexion libre avec la mer, et dans lequel l'eau de mer est diluée de façon mesurable par l'eau douce dérivée des ruissellements terrestres »
(Pritchard, 1967)

Vallées fluviales transgressées et ennoyées

Interaction entre la marée, la houle et les écoulements fluviaux

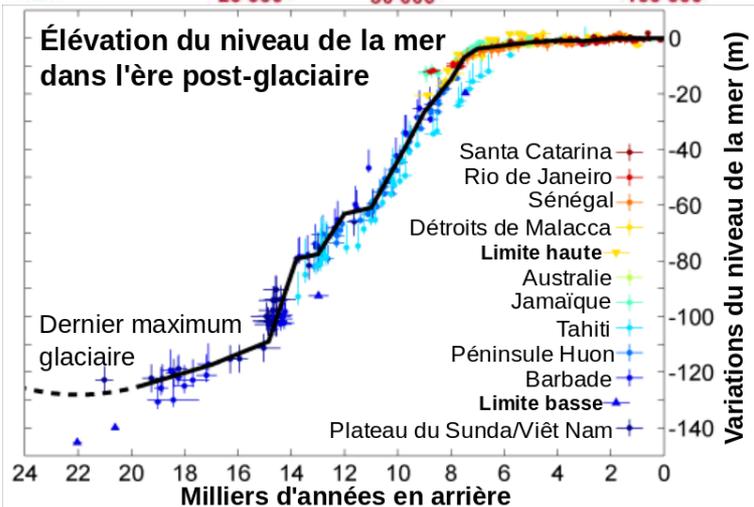
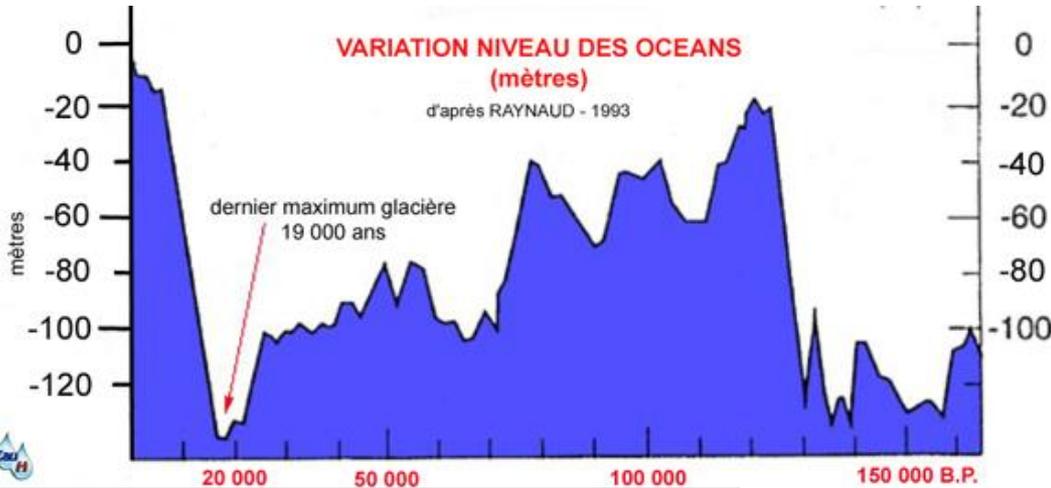
Vallée ennoyée: morphologie quelconque : « ria »

Côtes rocheuses et/ou apports fluviatiles faibles

-18 000 ans



-5 000 ans



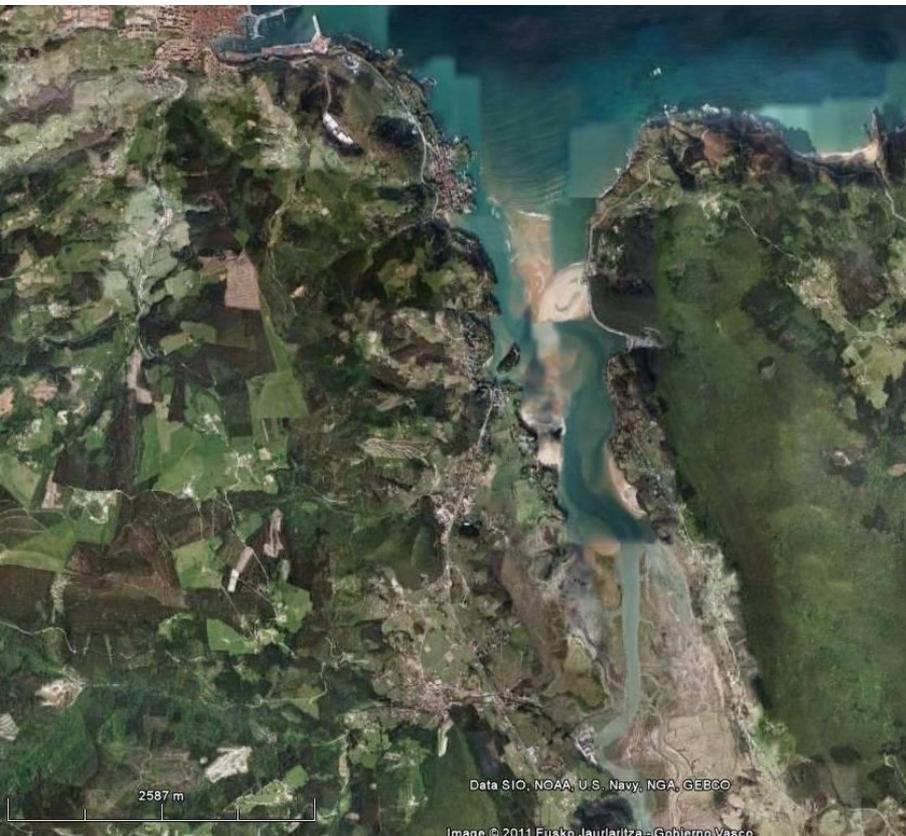
Vallée ennoyée: morphologie quelconque : « ria »
Côtes rocheuses et/ou apports fluviatiles faibles

Aber Wrach, Finistère Nord



Vallée ennoyée: morphologie a priori quelconque : « ria »
Côtes rocheuses et/ou apports fluviatiles faibles

Urdabai, Pays Basque espagnol



Vallée ennoyée: morphologie a priori quelconque : « ria »

Côtes rocheuses et/ou apports fluviaux faibles

Si apports importants : régularisation de la morphologie

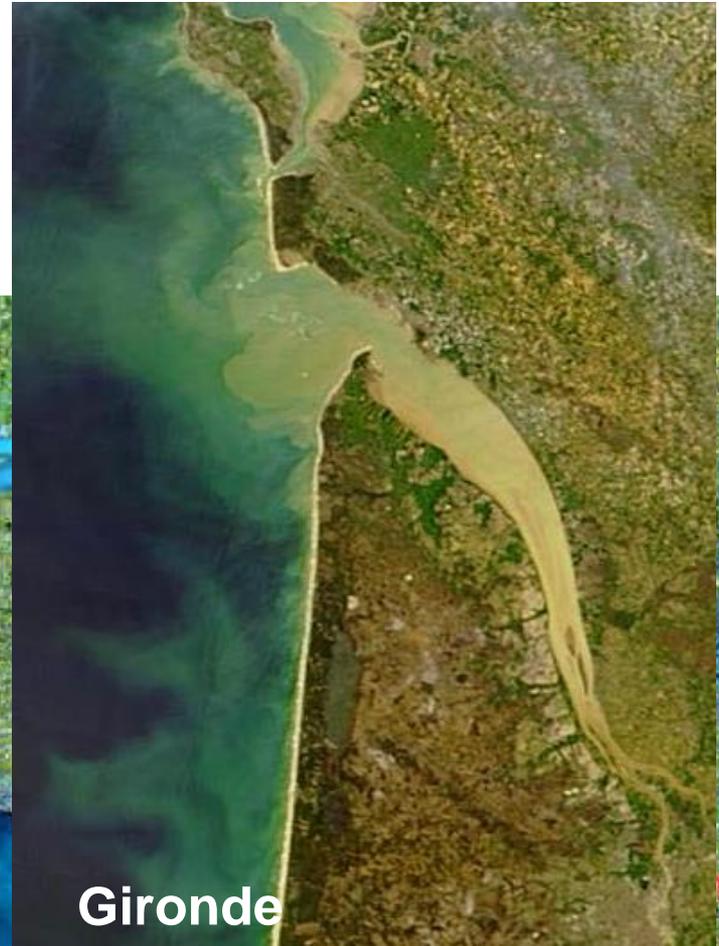
Forme en « entonnoir » caractéristique



Seine



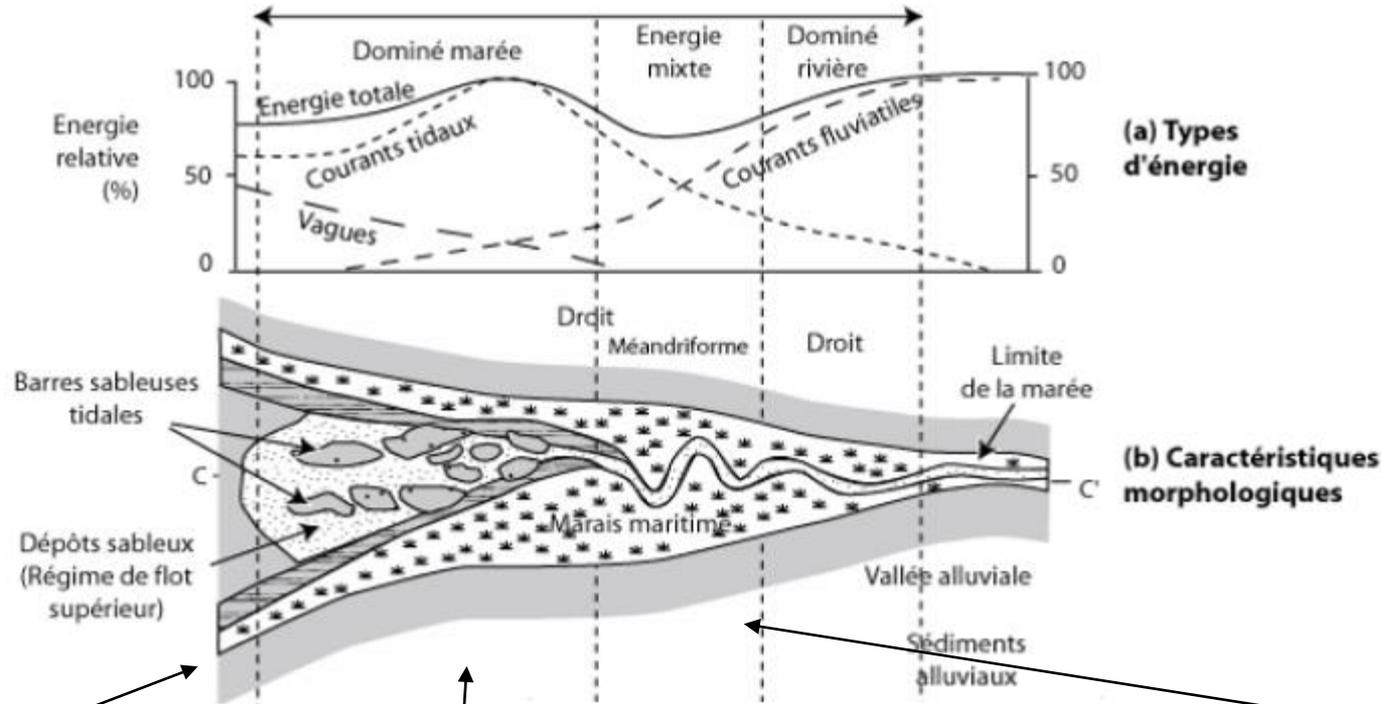
Loire



Gironde



Estuaire dominé par la marée, au stade « évolué »



Embouchure: bancs sableux

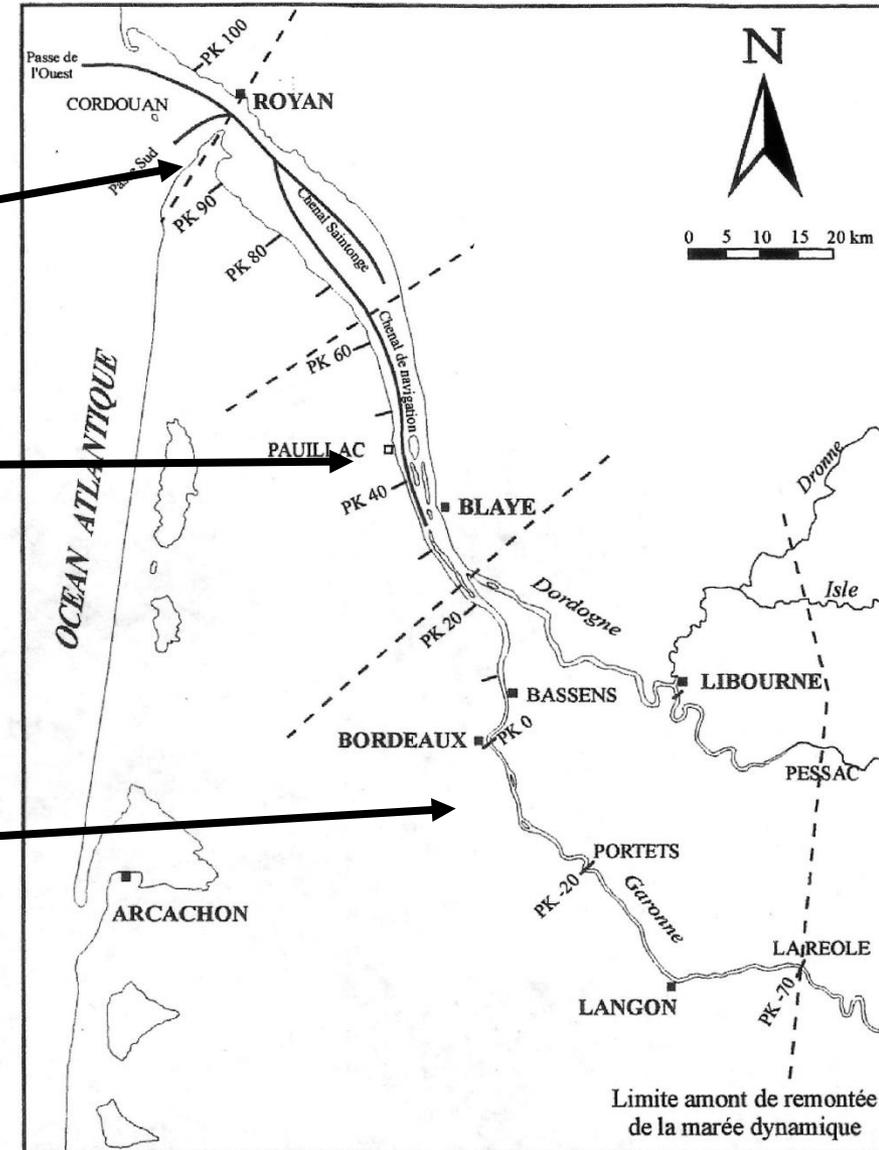
Zone médiane: chenaux multiples plus rectilignes, îles et bancs sableux longitudinaux, platiers tidaux plus développés

Zone amont: estuaire fluvial, chenal simple à méandres, barres de méandre, platiers tidaux peu développés

Embouchure: bancs sableux formant un delta de flot et un delta de jusant

Zone médiane: chenaux multiples plus rectilignes, îles et bancs sableux longitudinaux, platiers tidaux plus développés

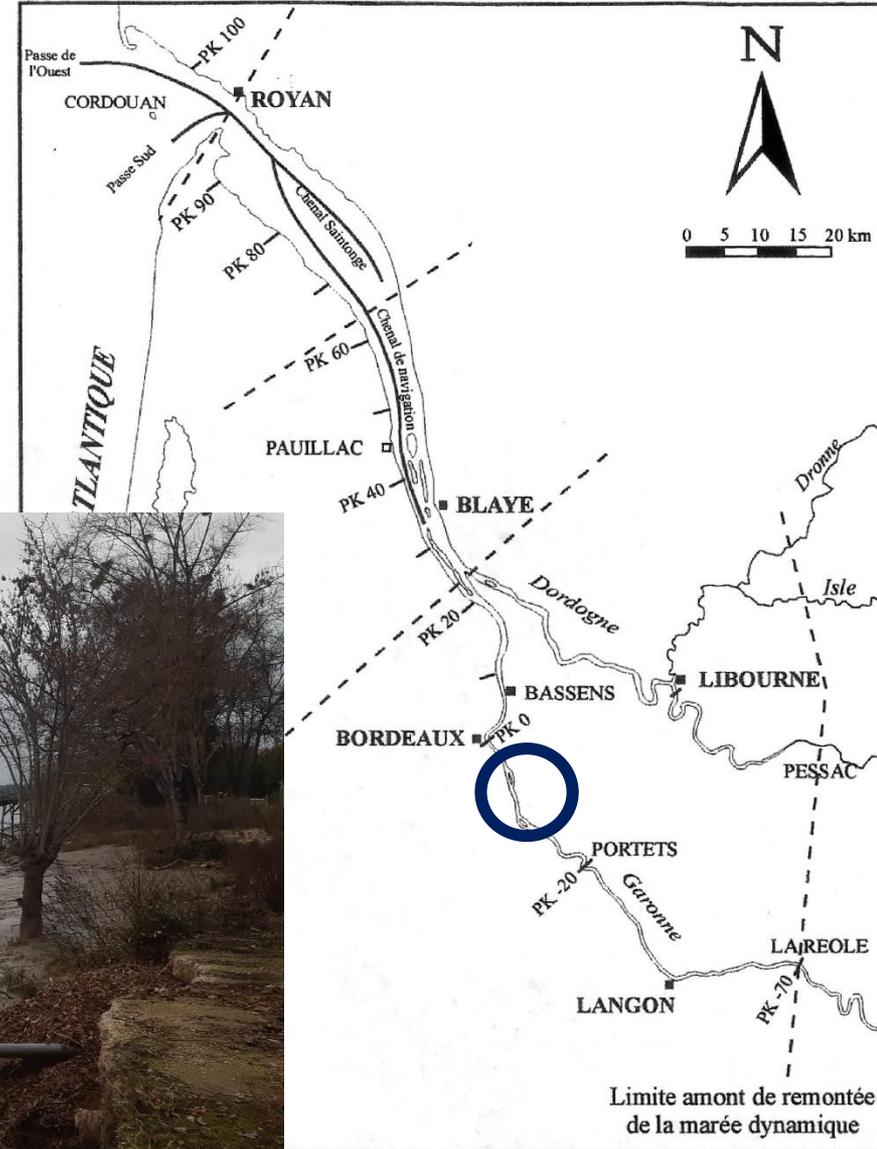
Zone amont: estuaire fluvial, chenal simple à méandres, barres de méandre, platiers tidaux peu développés



Embouchure: bancs sableux formant un delta de flot et un delta de jusant

Zone médiane: chenaux multiples plus rectilignes, îles et bancs sableux longitudinaux, platiers tidaux plus développés

Zone simple



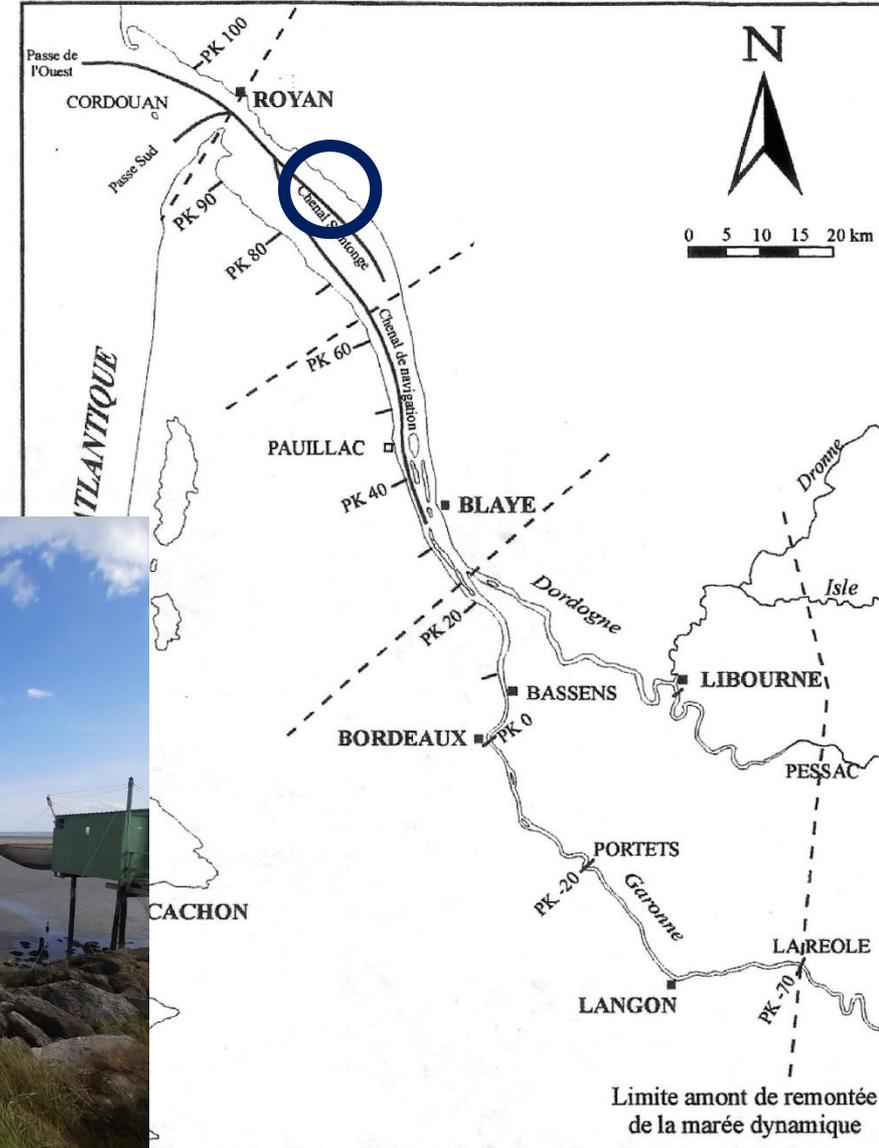
Embouchure: bancs sableux formant un delta de flot et un delta de jusant

Zone médiane: chenaux multiples plus rectilignes, îles et bancs sableux longitudinaux, platiers tidaux plus

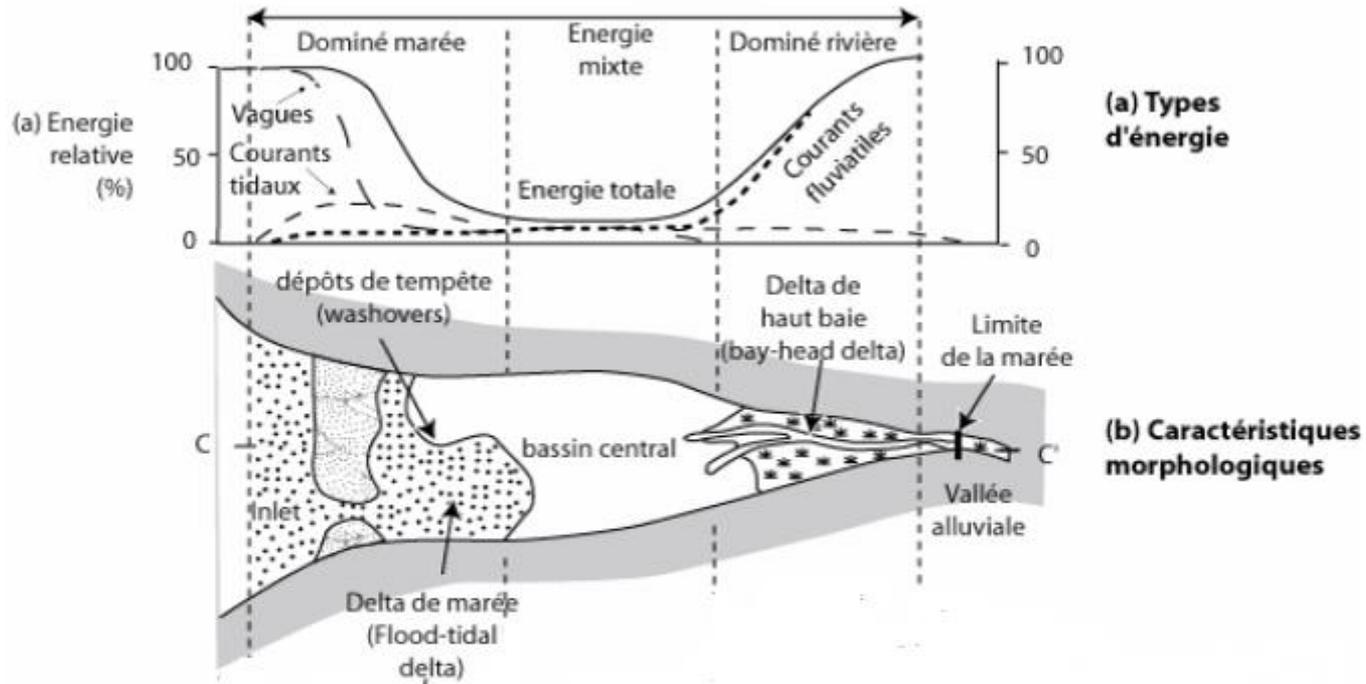


Embouchure: bancs sableux formant un delta de flot et un delta de jusant

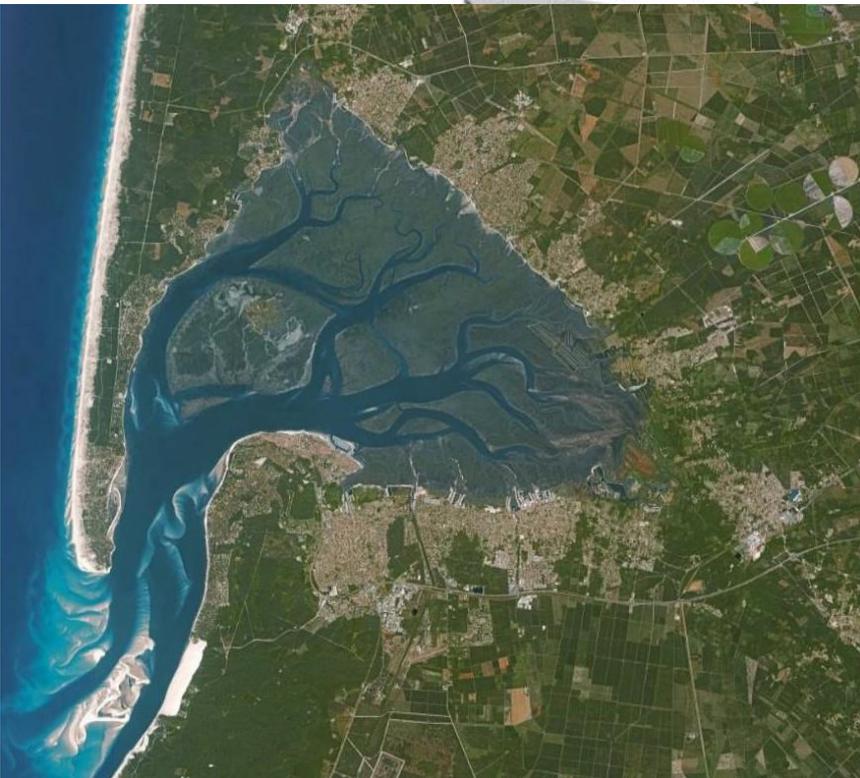
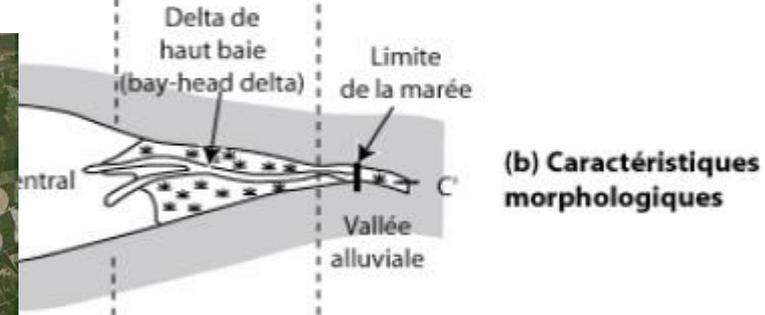
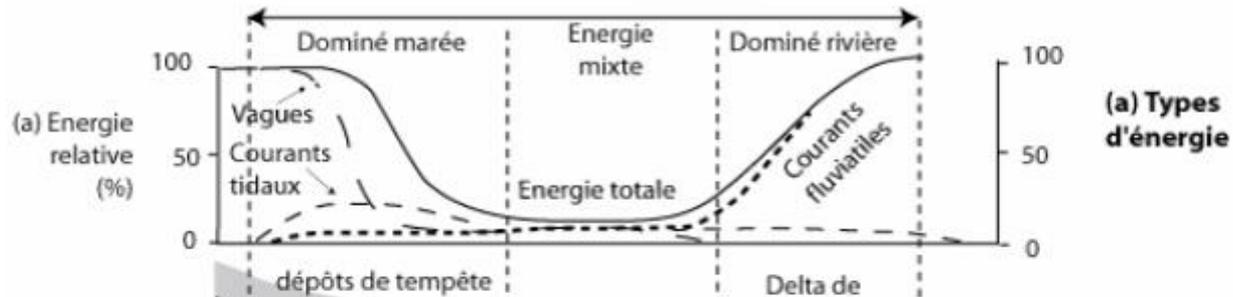
Zone médiane: chenaux multiples plus rectilignes, îles et bancs sableux longitudinaux, platiers tidaux plus



Estuaire dominé par les vagues



Estuaire dominé par les vagues



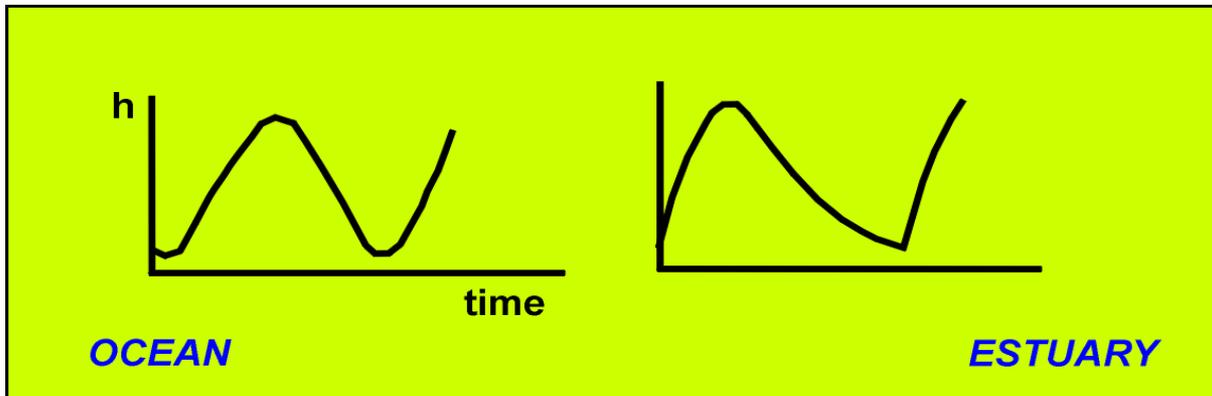
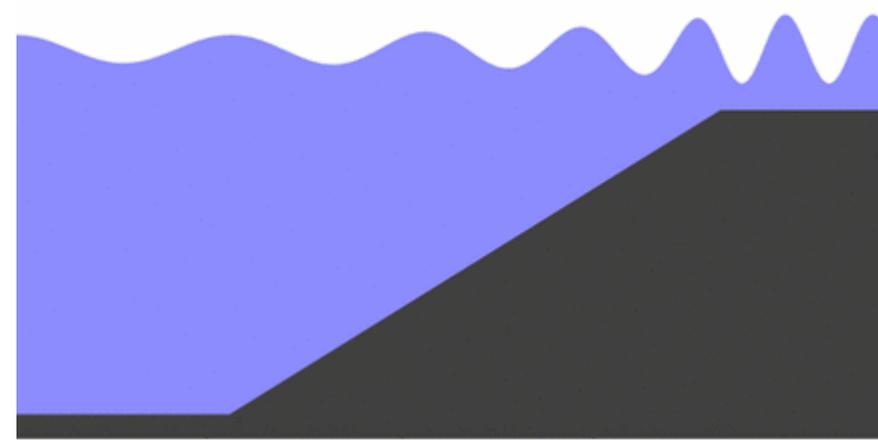
Bassin d'Arcachon

3.1 Propagation de l'onde de marée

Pas d'influence directe des astres

La célérité dépend de la profondeur locale
A la côte : amplification et ralentissement
de l'onde

1 cycle : 12h25mn



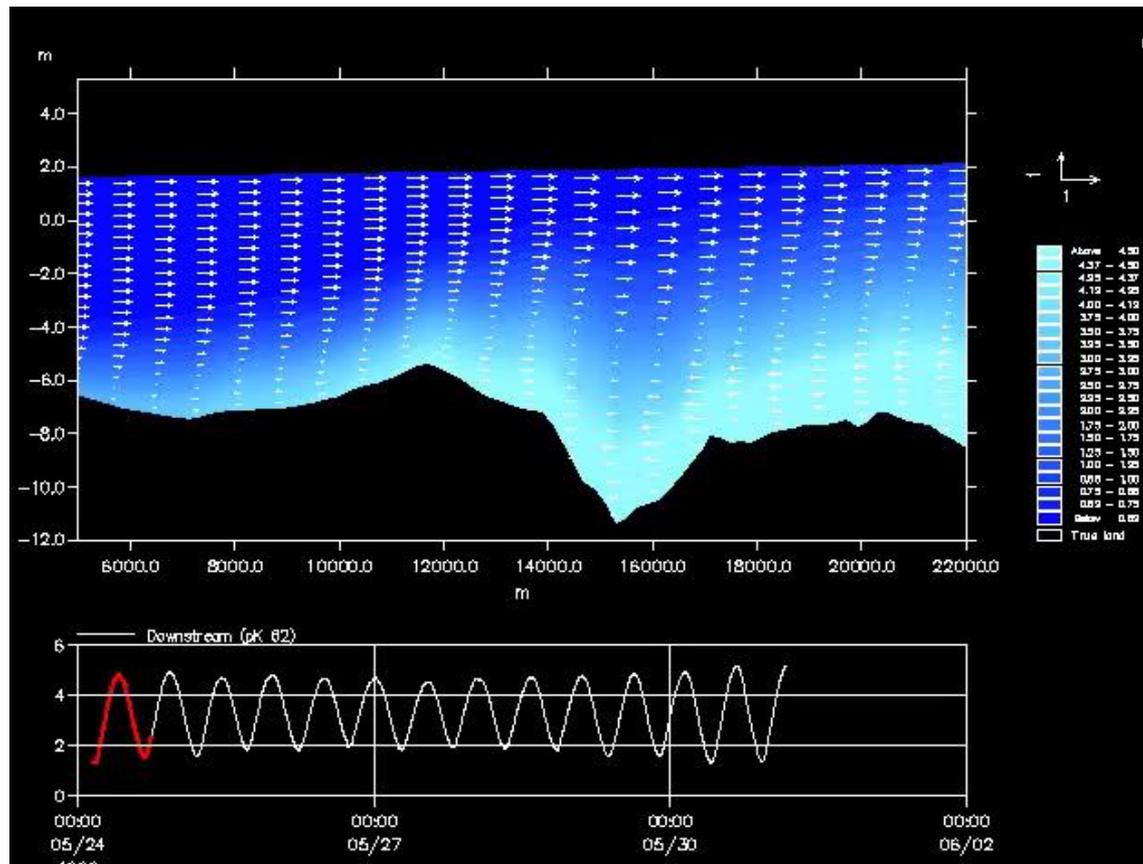
Au large :
marée symétrique

Dans l'estuaire: marée déformée, la
pleine mer se propage plus vite
que la basse mer

À marée montante : courants de FLOT

À marée descendante : courante de JUSANT

MARNAGE : différence de hauteur entre Pleine Mer et Basse Mer



3.2 Gradients de salinité

Rencontre eaux douces-eaux salées

Ecoulement de l'eau douce en surface

Pénétration de l'eau salée en profondeur

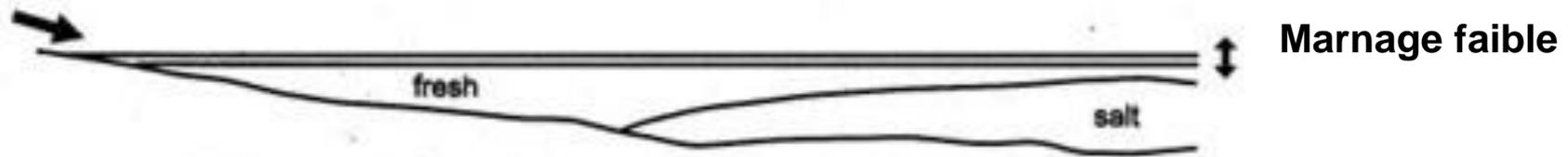
**Moteur de l'Hydrologie et circulation et des transports
sédimentaires**

2 volumes d'eau à comparer :

**volume d'eau introduit par le flot (=prisme de marée)
et débit fluvial**

On distingue trois types d'estuaires

3.2 Gradients de salinité

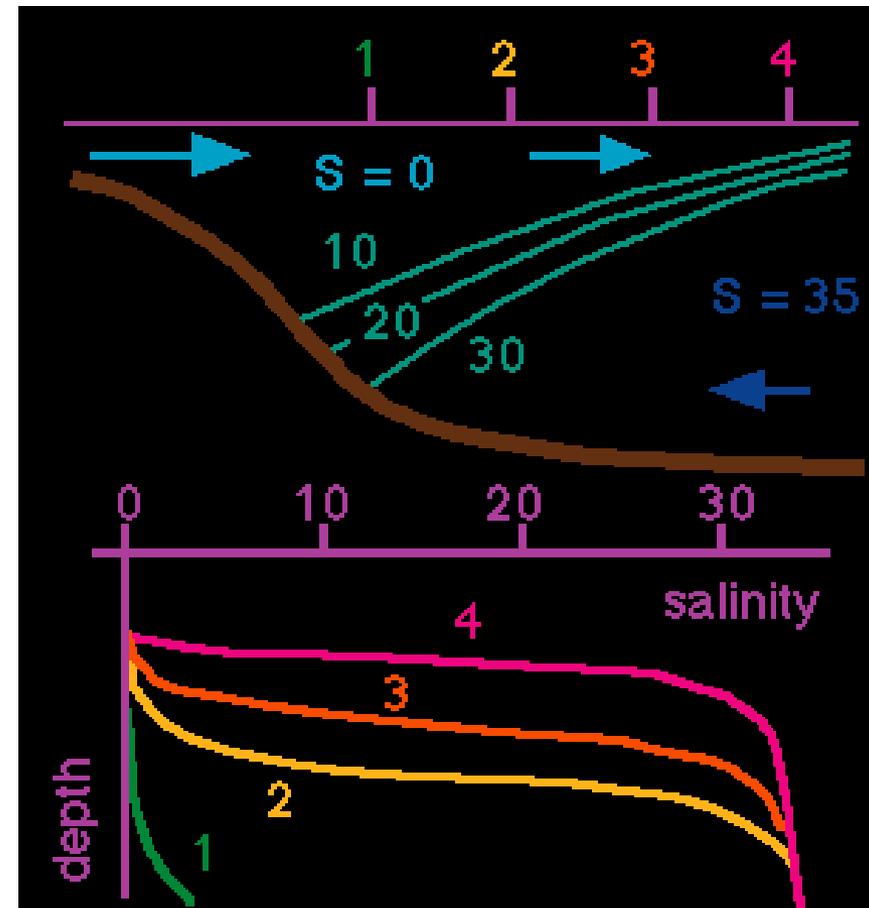


Estuaires à coin salé (très stratifiés)

Débit du fleuve \gg prisme de marée
(marnage faible)

Peu de turbulence, peu de mélange
des masses d'eaux

Stratification verticale maximale,
zone de transition très mince



3.2 Gradients de salinité

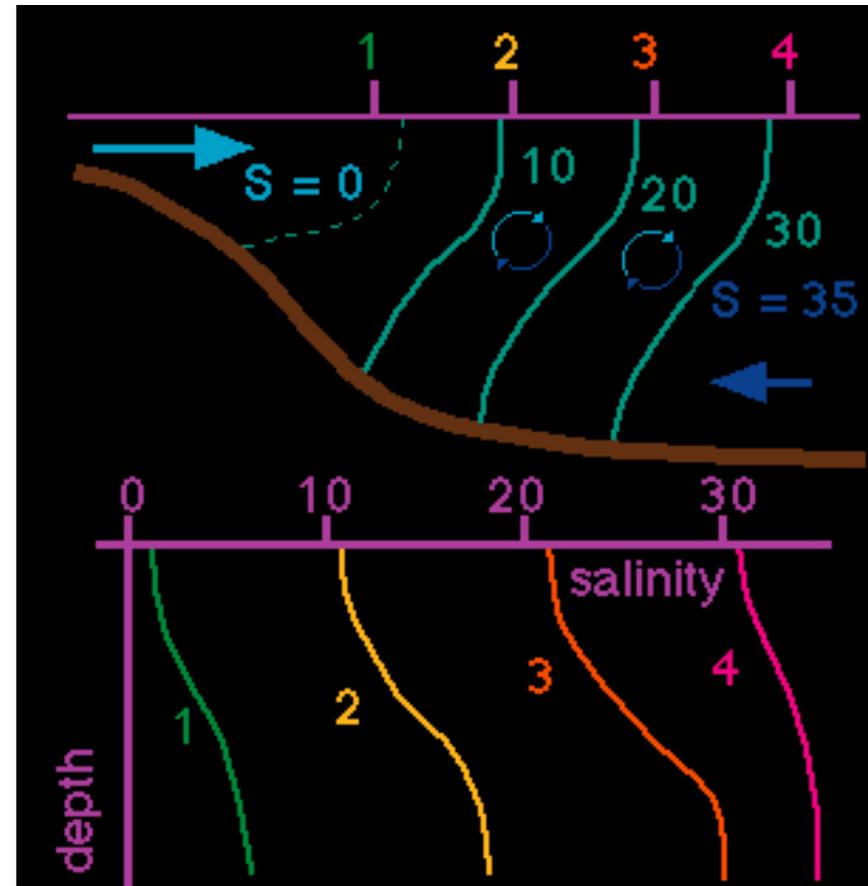


Estuaires partiellement mélangés

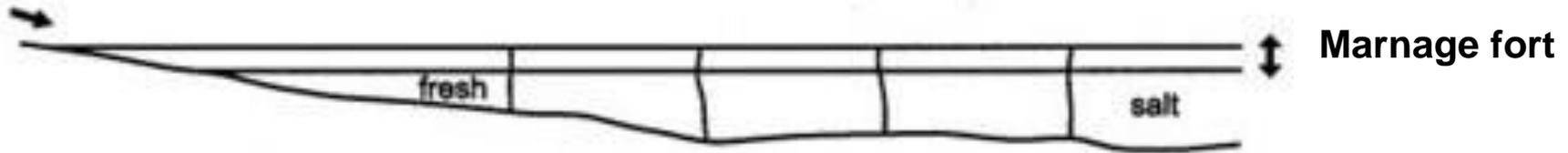
Courants de marée plus forts (marnage plus important)

Turbulence induisant un mélange plus important

Zone de transition plus épaisse



3.2 Gradients de salinité

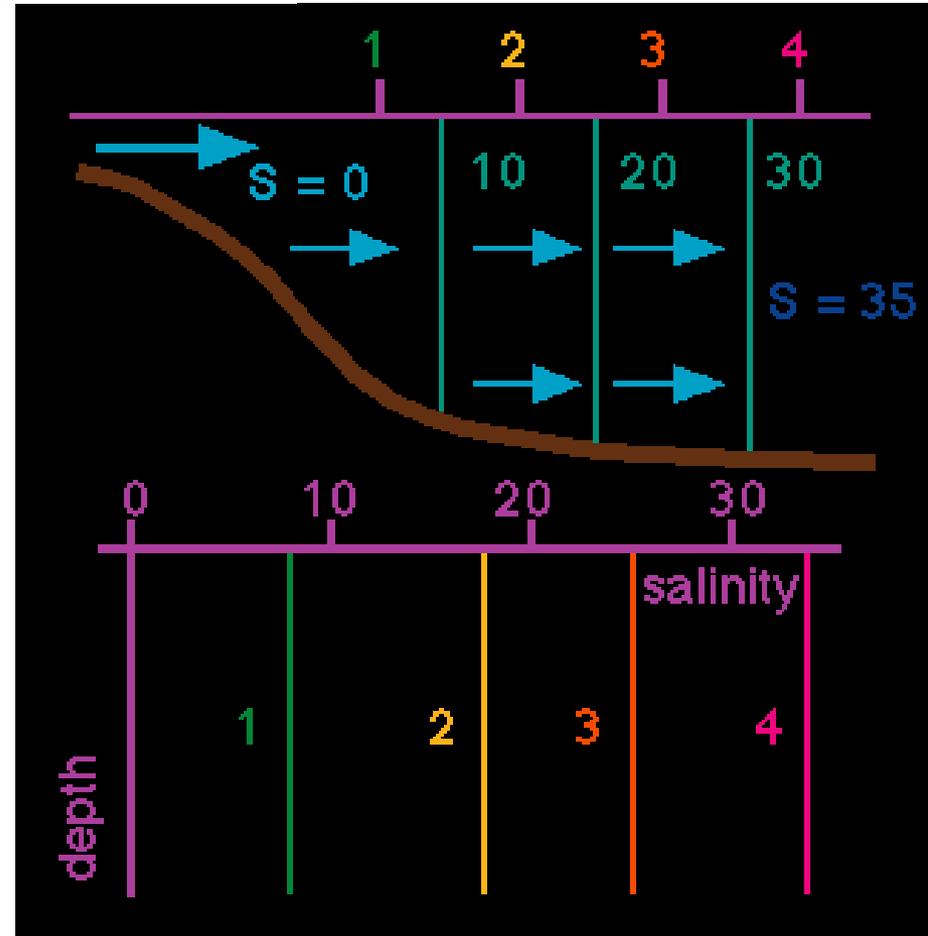


Estuaires bien mélangés

Débit du fleuve << prisme de marée (marnage fort)

Forte turbulence, homogénéisation de la colonne d'eau

Pas de gradient vertical

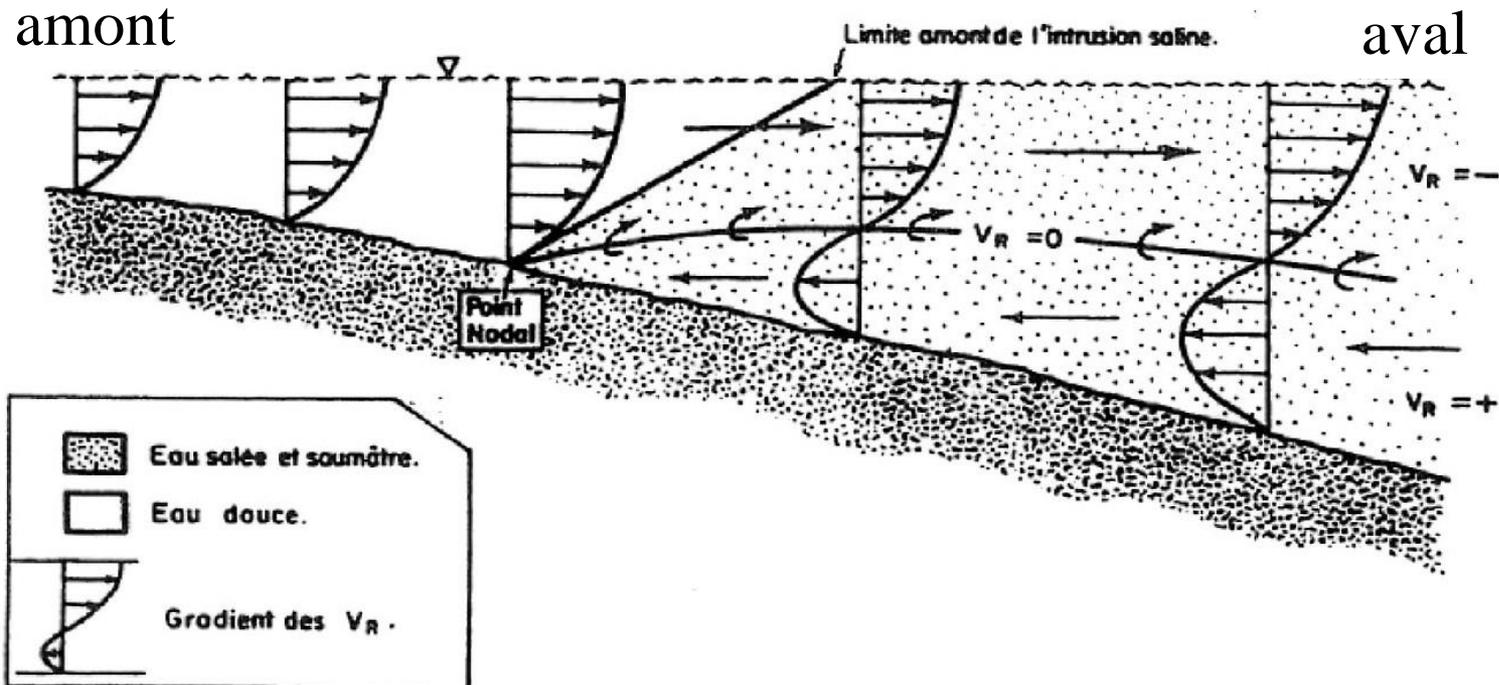


3.3 Circulation résiduelle

Écoulement de flot et de jusant inégaux dans la colonne d'eau.

Au bout d'un cycle de marée, il y a un écoulement net vers l'amont ou vers l'aval : circulation résiduelle

Approche par la distribution des Vitesses Résiduelles eulériennes (V_R)



Actuellement :

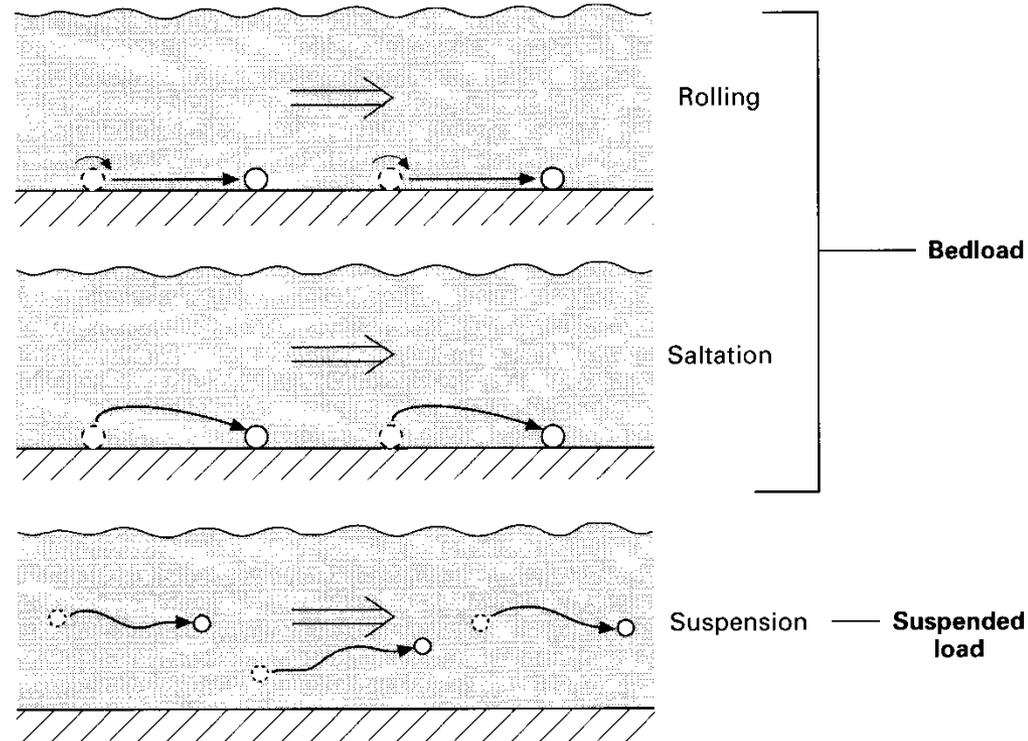
Peu ou pas d'apport de sable par les fleuves.

Les apports sont surtout des sédiments fins (silts et argiles)

Sédiments sableux transportés
sur le fond
(bed-load, traction-saltation)

Silts et argiles (sédiments fins) :
transportés en suspension
turbulence > vitesse de chute

Propriétés cohésives



Sédiments fins – Flocculation et bouchon vaseux

La salinité augmente les forces interparticulaires : flocculation

La stabilité des floccs augmente dans les estuaires

Effets des courants de marée :

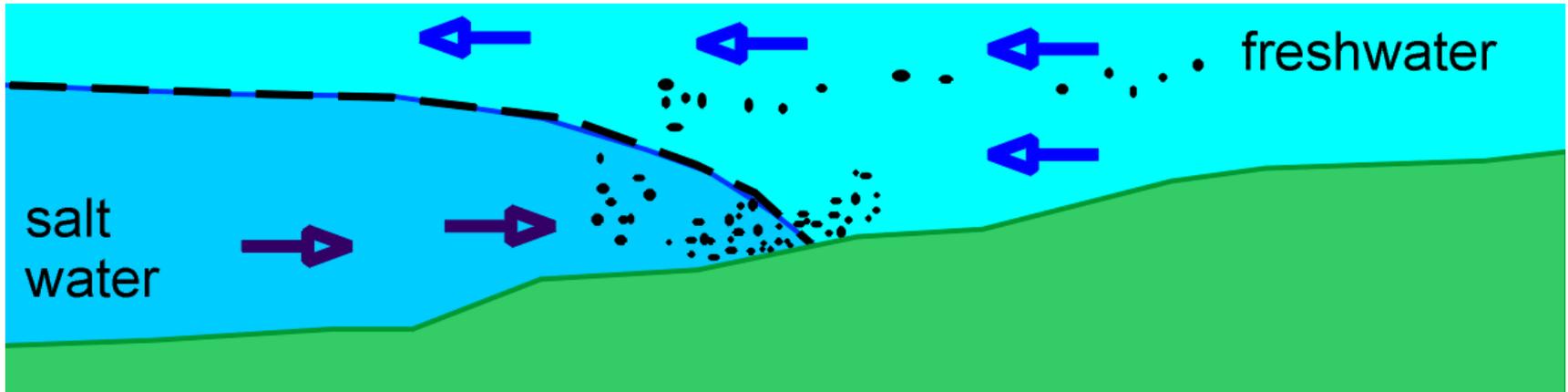
Le courant remet en suspension le sédiment déposé, et le transporte vers l'amont (en flot) ou vers l'aval (en jusant)

Au moment des étales (pleine mer ou basse mer) la diminution des courants favorise la chute et le dépôt des floccs

La circulation de densité et le dépôt des floccs ralentissent l'évacuation des suspensions vers la mer

Accumulation dans l'estuaire: le « bouchon vaseux », jusqu'à 4 g.l⁻¹.

Sédiments fins – mécanisme de formation du bouchon vaseux



Décantation au cours du transport vers l'aval

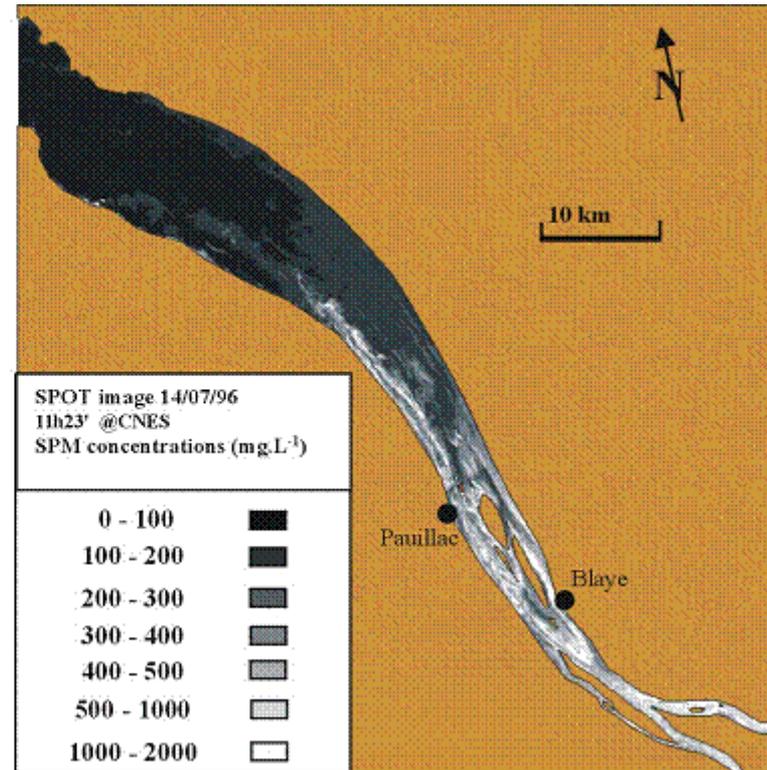
Remontée vers l'amont avec le coin salé

Piégeage autour du point nodal de densité

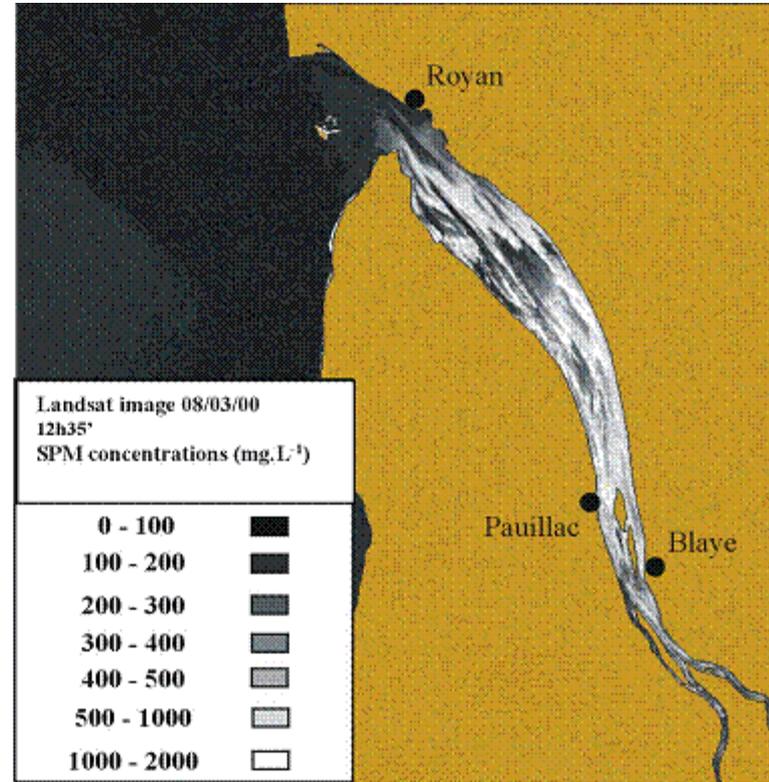
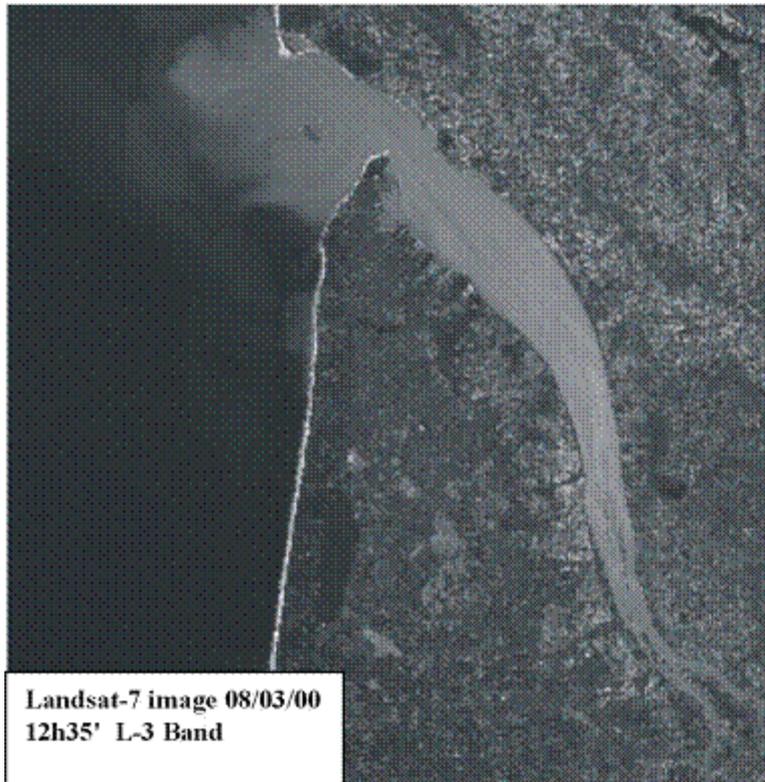
Le bouchon vaseux se déplace le long de l'estuaire selon 2 échelles de temps

- selon le cycle de marée semi-diurne (effet des courants de flot et de jusant)
- selon la variation saisonnière du débit fluvial (effet du déplacement de l'intrusion saline)

faible débit fluvial (juin-octobre) : bouchon vaseux en amont (dans les fleuves)



fort débit fluvial (novembre-mars) : bouchon vaseux en aval



Une partie du bouchon vaseux pourra être expulsée vers l'océan lors de crues, et de préférence en vive-eaux (car il y aura plus de remise en suspension de sédiment).

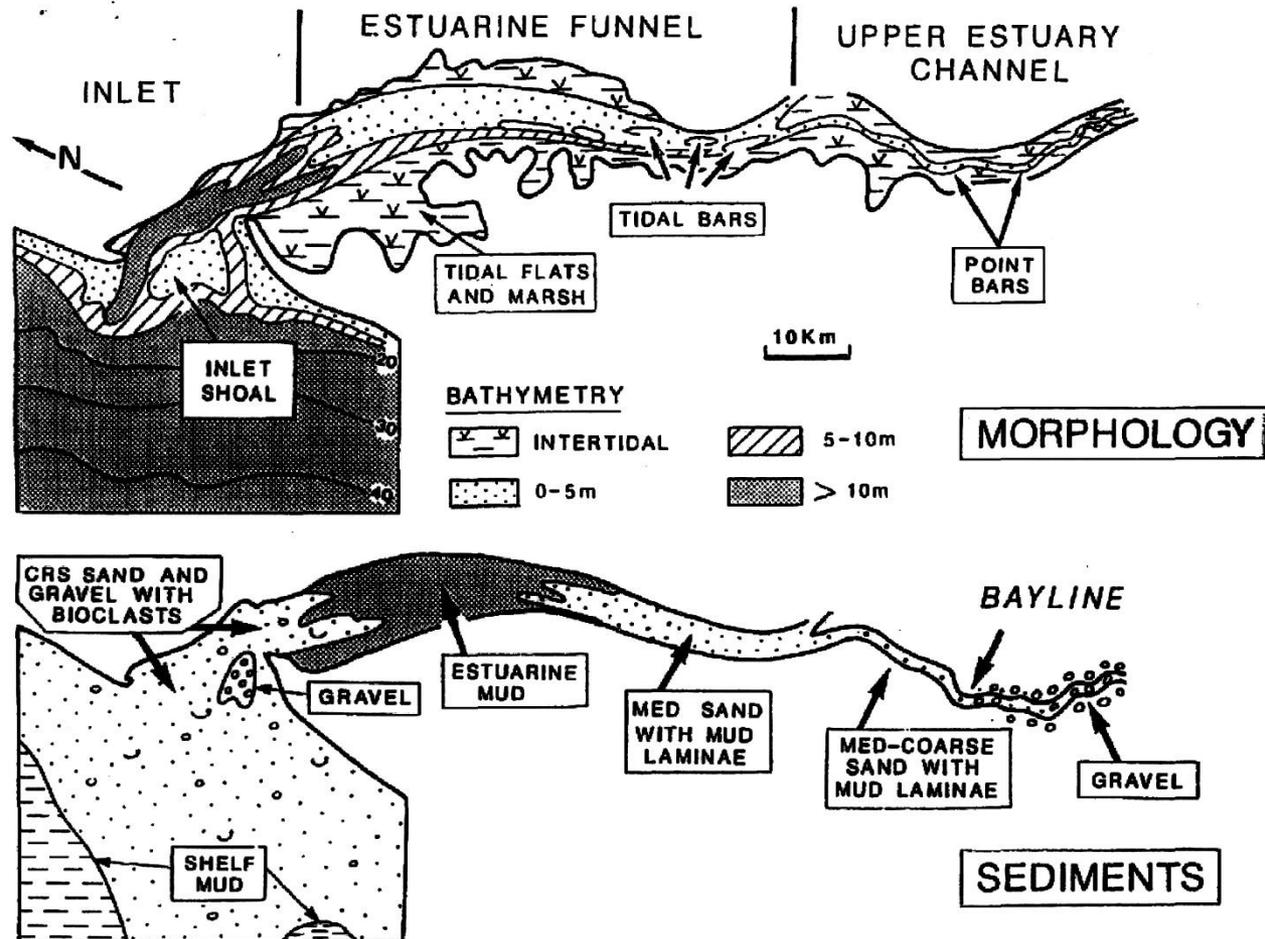
Les faciès estuariens

Dépôt dans l'estuaire de l'embouchure au point nodal de marée

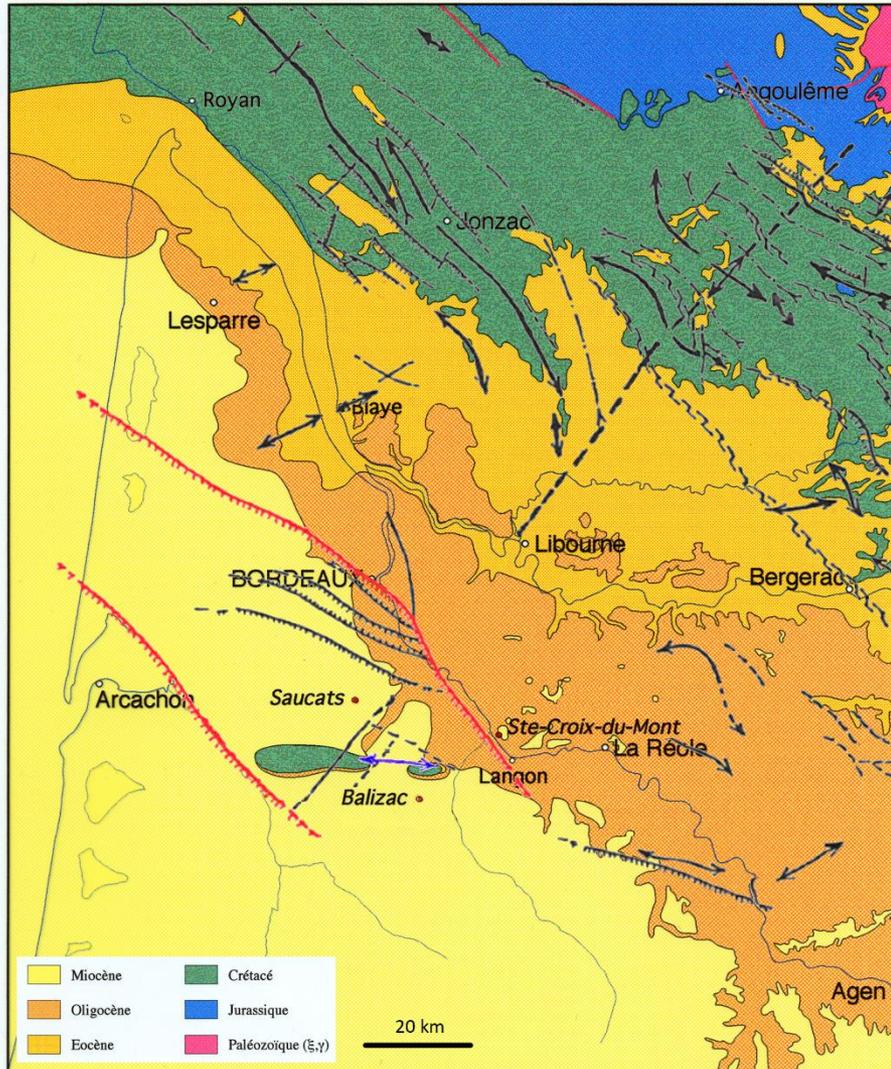
D'un point de vue sédimentologique, on parle de « bayline »

Limite très importante, actuellement aux environs de Cadillac

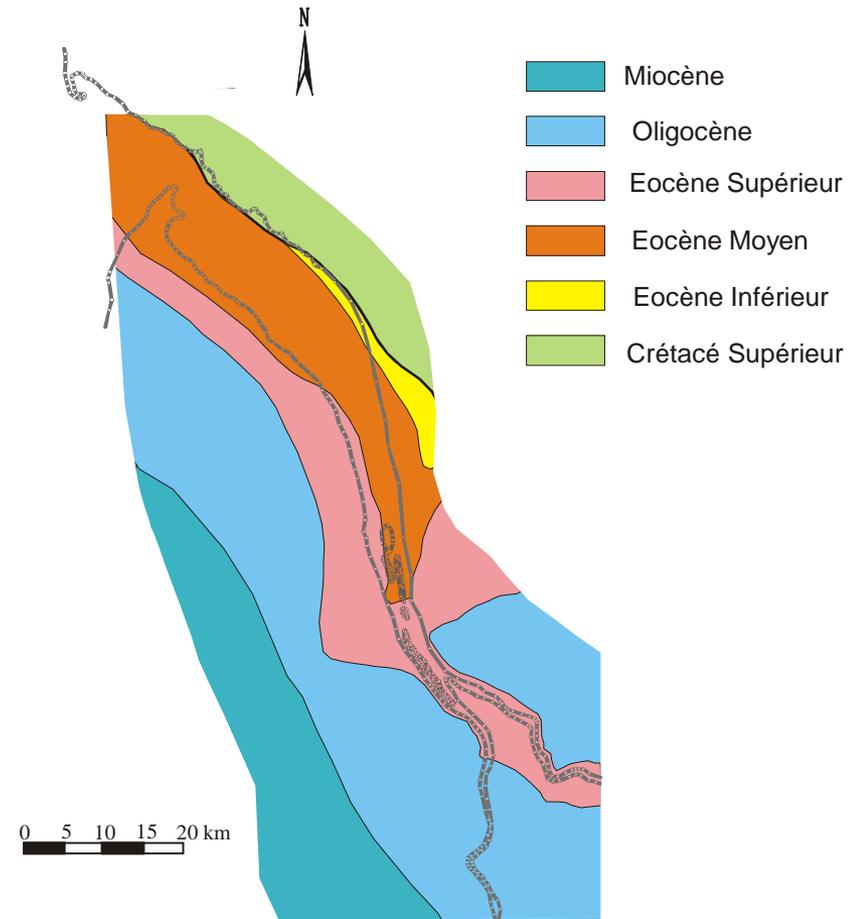
En amont, dépôt fluviatiles, à l'aval, dépôts estuariens



Carte géologique simplifiée du fond rocheux (L. Londeix, 2018)



Allen et al., 1970



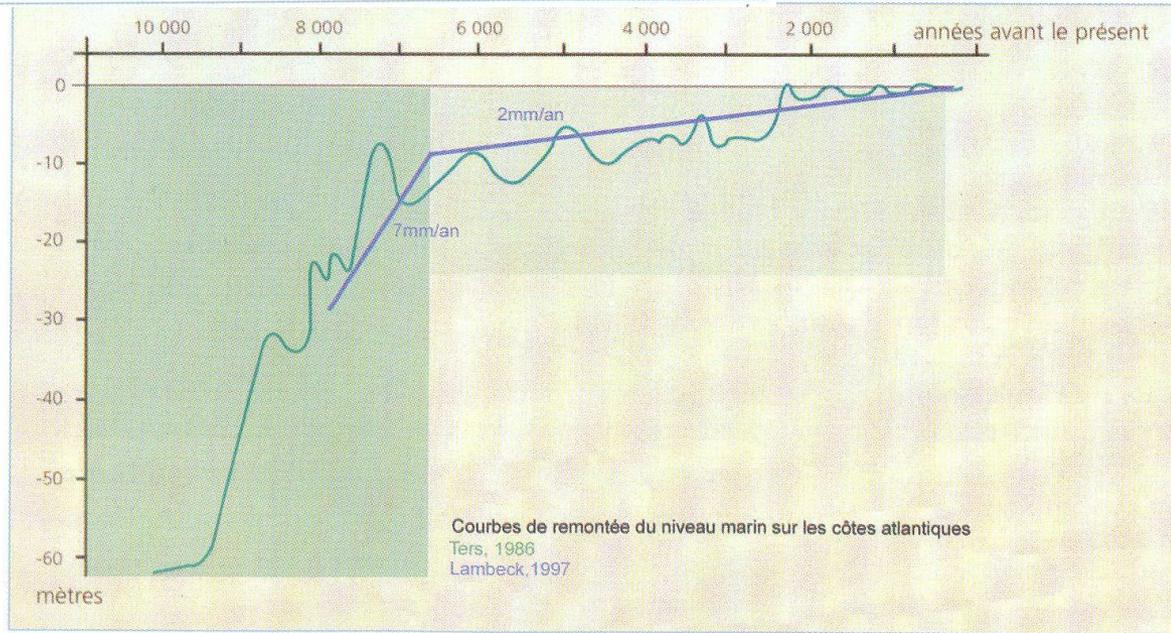
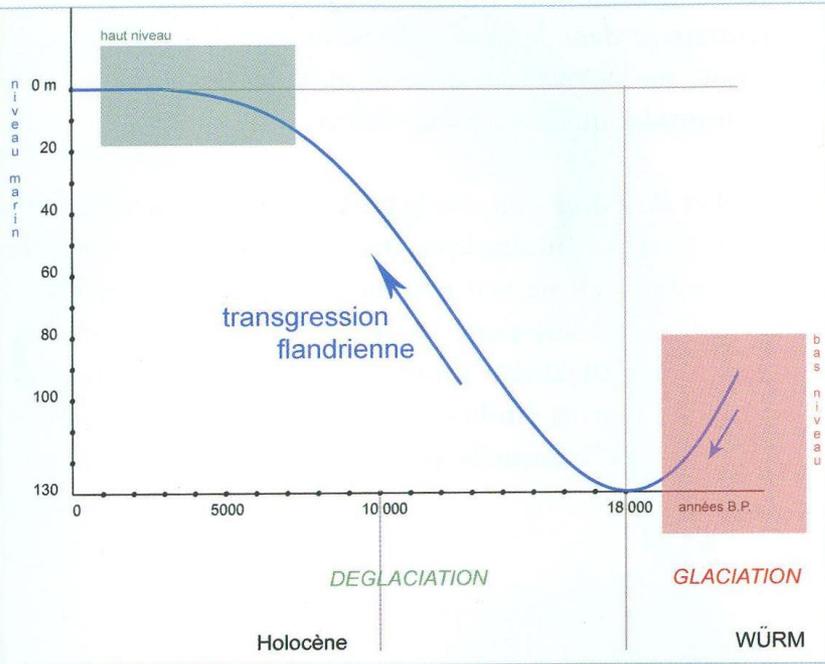
L'estuaire est une « Vallée incisée »

Creusement ou incision en période de bas niveau marin (glaciaire)

Ennoiemment et remplissage en période de haut niveau marin (interglaciaire)

Dernière phase de creusement: Würm

Dernier ennoiemment: transgression flandrienne



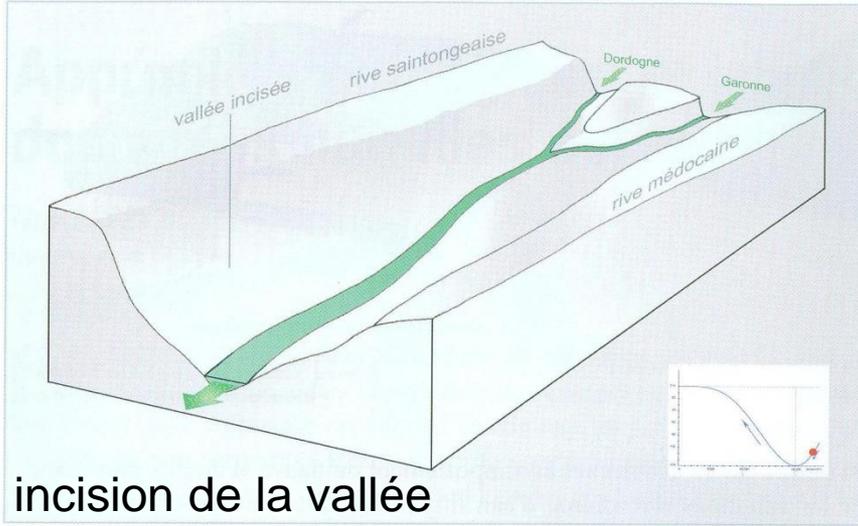
Définitions

Caractères morphologiques

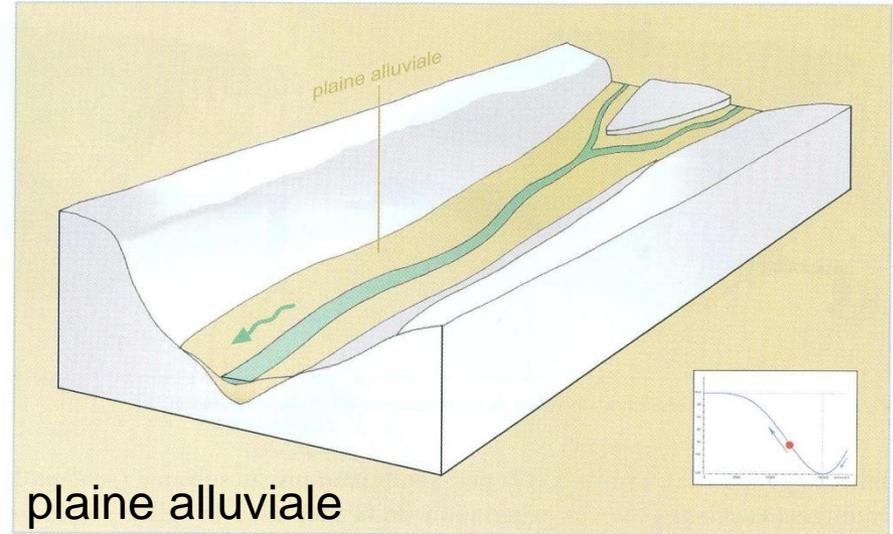
Hydrologie et circulation

Processus sédimentaires

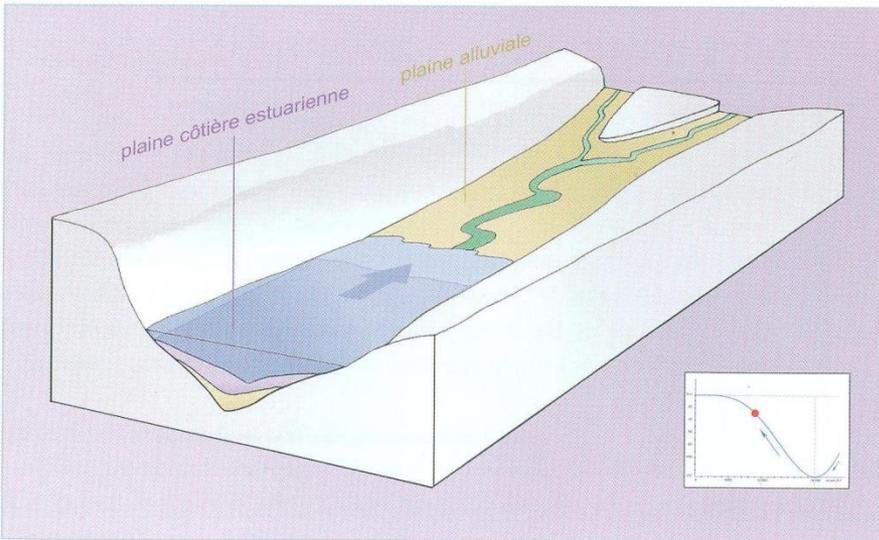
Evolution de la Gironde



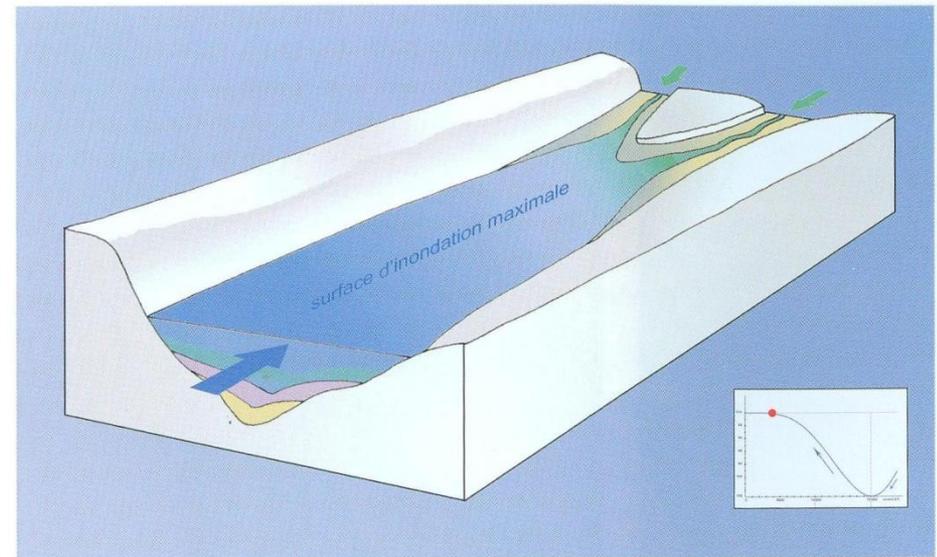
incision de la vallée



plaine alluviale



naissance de l'estuaire

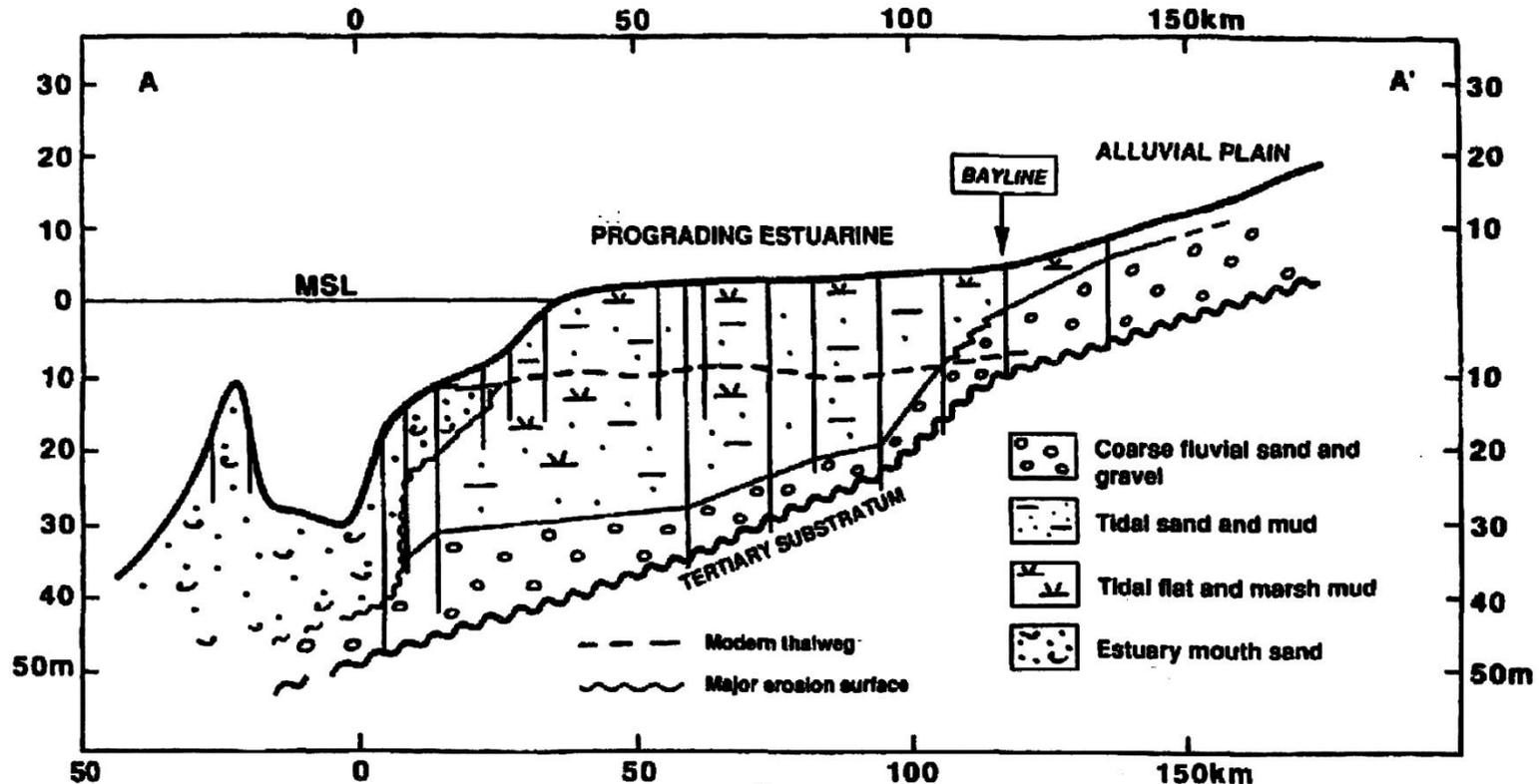


inondation maximale

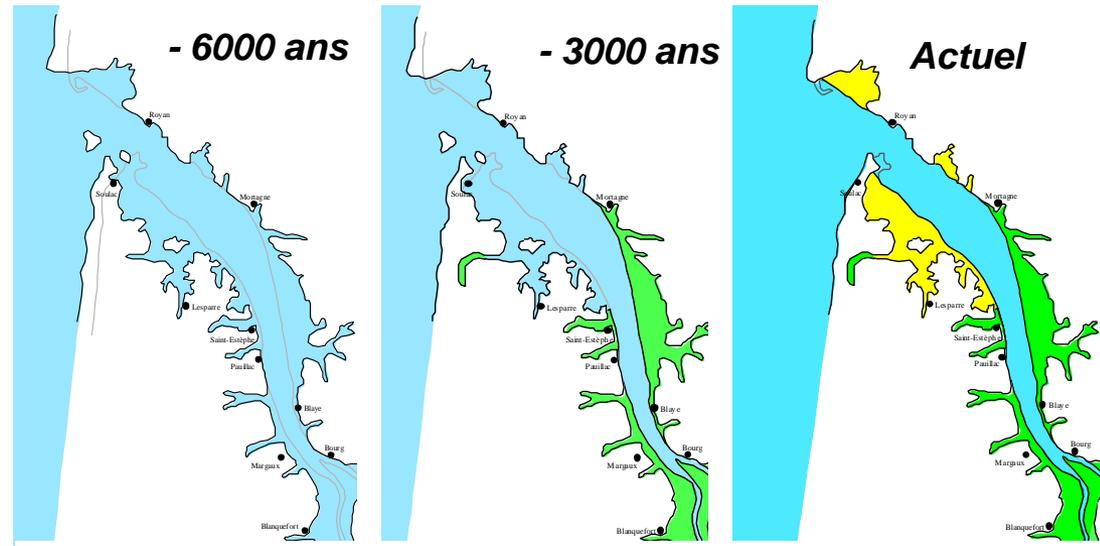
Remplissage flandrien:

45 m au niveau de l'embouchure, 10 m au niveau de la « bayline »

Les sédiments reposent sur le substratum par l'intermédiaire d'une surface d'érosion majeure



Remplissage des marais



- 6000 ans : l'estuaire est une vallée fluviale transgressée, une « ria » sans marais

De 6000 à 5000 BP : les marais amont se combent. Les dépôts progradent.

De 5000 BP au XVIIème siècle, les zones d'accumulation se déplacent vers l'aval

Depuis 2000 BP, l'espace d'accomodation dans l'estuaire est fortement réduit

TD - Estuaire de la Gironde

Hydrologie et dynamique sédimentaire

Aldo Sottolichio
Laboratoire EPOC

Plan

1 - Rappel sur les écoulements turbulents

2 - Le courant dans une colonne d'eau estuarienne

3 - Détermination de la vitesse résiduelle

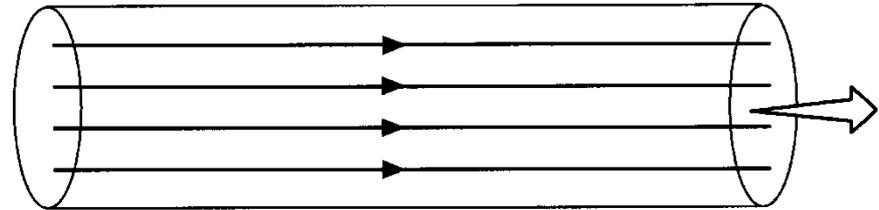
4 - Dynamique de sédiments en suspension

5 - Relation bouchon vaseux-crème de vase

6 - Techniques d'étude de l'hydrodynamique sédimentaire

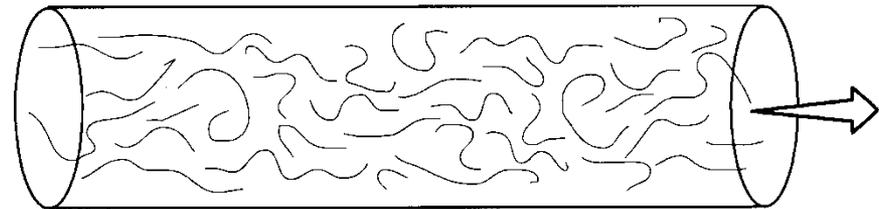
1 - Notions de turbulence dans les écoulements naturels

L'écoulement moyen se fait de gauche à droite.
Il est en tout point "ordonné" :
flux laminaire (possible à vitesse suffisamment faible)



L'écoulement des particules d'eau en tout point est cette fois "désordonné" :
flux turbulent,
(généralement à vitesse élevée)

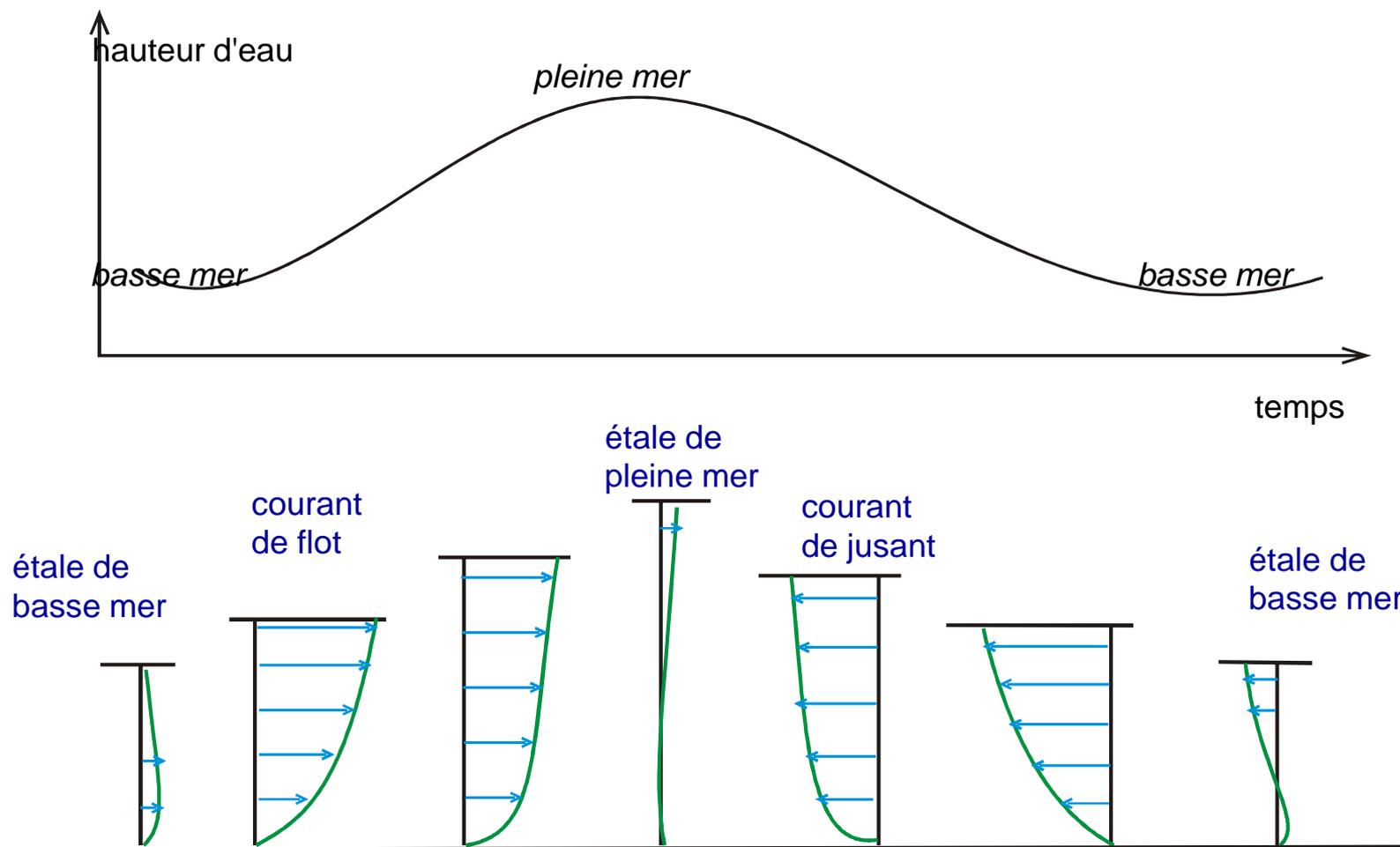
Malgré la turbulence, l'écoulement moyen se fait toujours de gauche à droite.



Il existe une distinction à faire entre le courant instantané et le "courant moyen" sur une période temps

2 - Le courant dans une tranche d'eau estuarienne

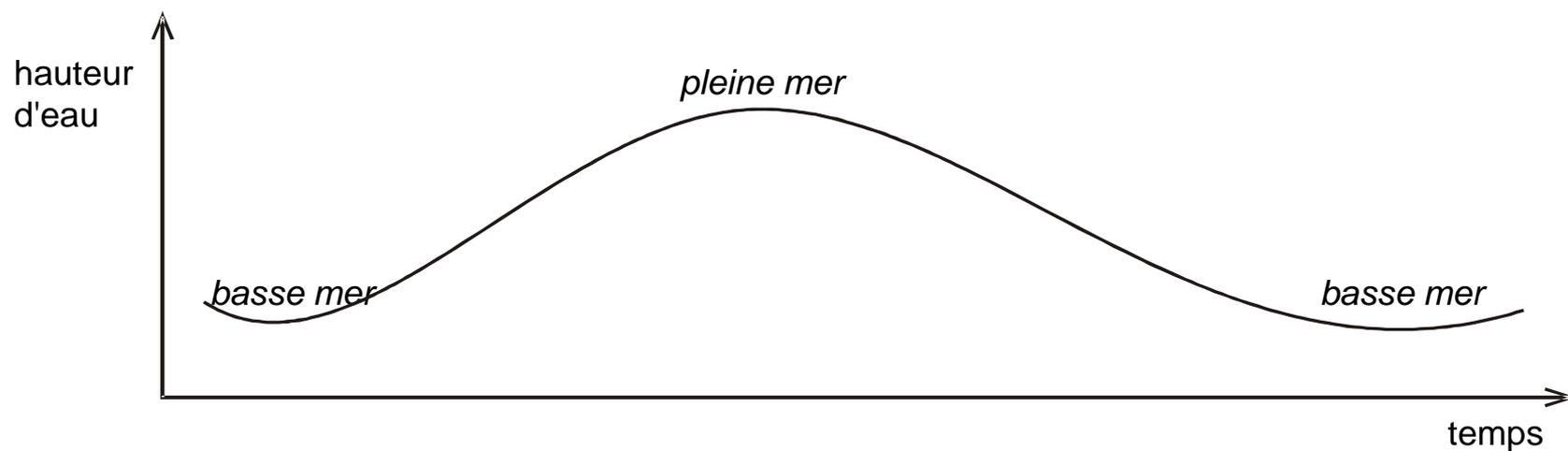
Evolution des courants pendant un cycle de marée



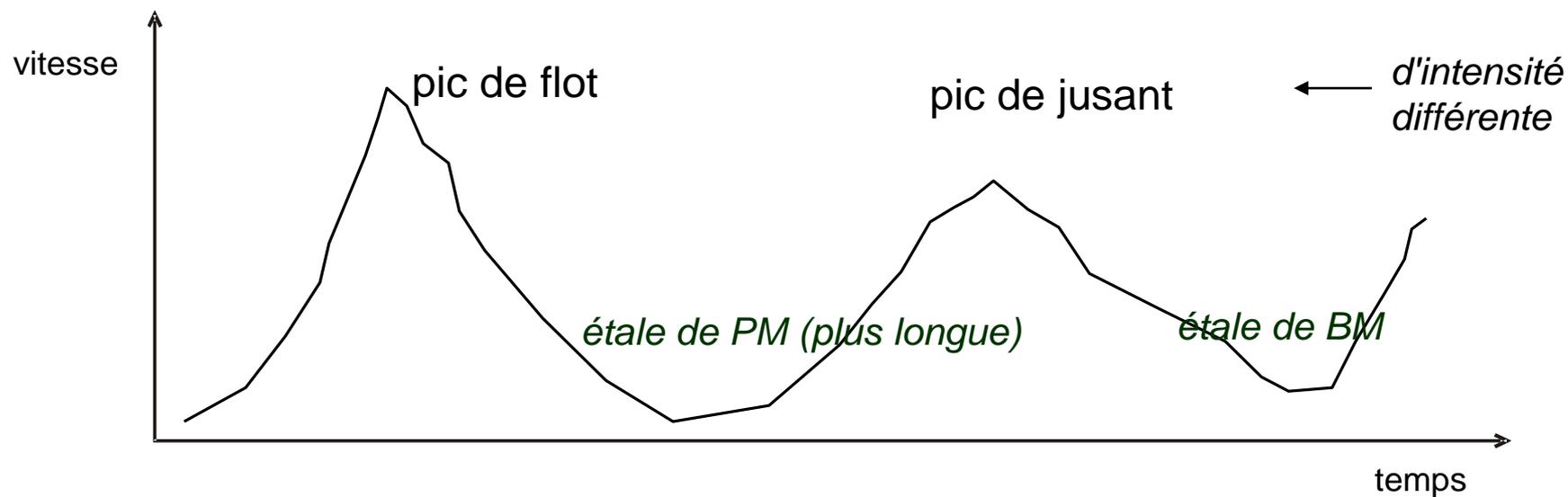
En réalité, le profil "log" existe uniquement en dehors des étales.
Attention : les profils de flot et de jusant ne sont pas symétriques.

2 - Le courant dans une tranche d'eau estuarienne

Evolution des courants pendant un cycle de marée



Si on prend u à un niveau z (par ex. à 1m au-dessus du fond) :



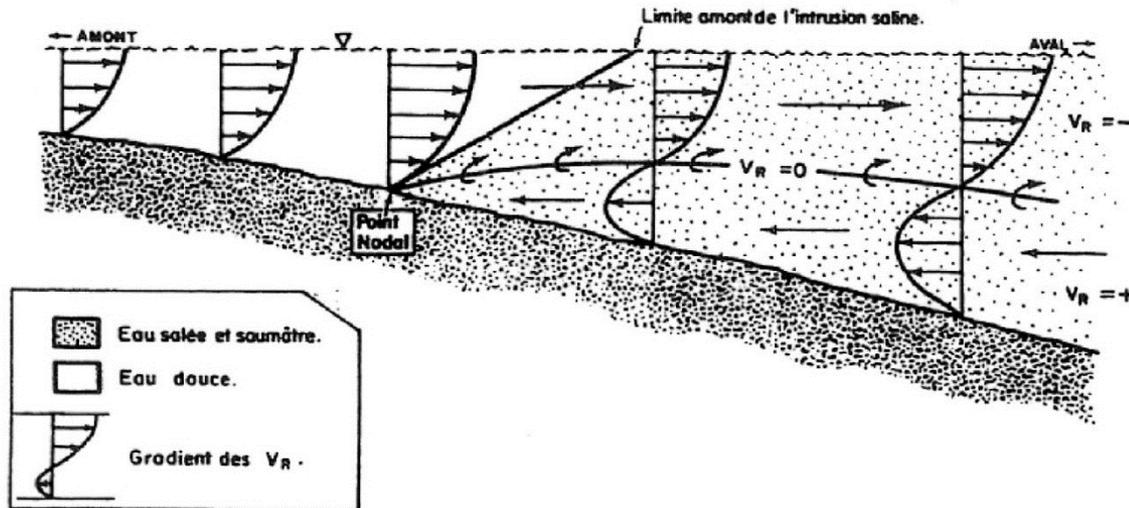
3 - Détermination des vitesses résiduelles

Evolution des courants pendant un cycle de marée

L'écoulement de flot et de jusant ne sont pas égaux dans la colonne d'eau : au bout d'un cycle de marée, il y aura eu un écoulement net soit vers l'amont, soit vers l'aval : circulation résiduelle.

La circulation résiduelle peut être définie comme la circulation résultante, après filtrage de la marée. Elle peut être approchée par la Vitesse Résiduelle (V_R).

écoulement "fluvial"

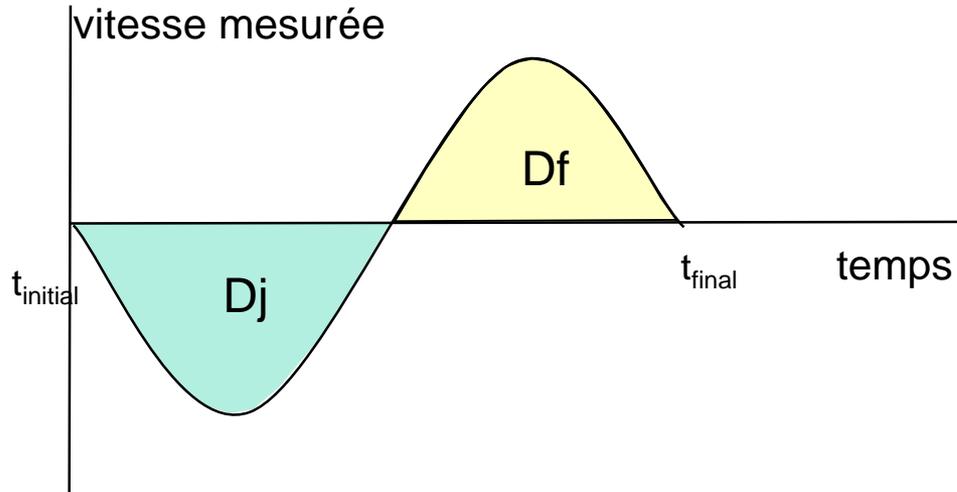


*écoulement vers l'aval
en surface*

*écoulement vers l'amont
près du fond*

3 - Détermination des vitesses résiduelles

Estimation de la vitesse résiduelle V_r



Les surfaces D_f et D_j représentent des distances (=vitesse x temps)

D_j : distance théorique parcourue par une particule en Jusant

D_f : distance théorique parcourue par une particule en Flot

1 - Calcul de la "distance résiduelle" D_r

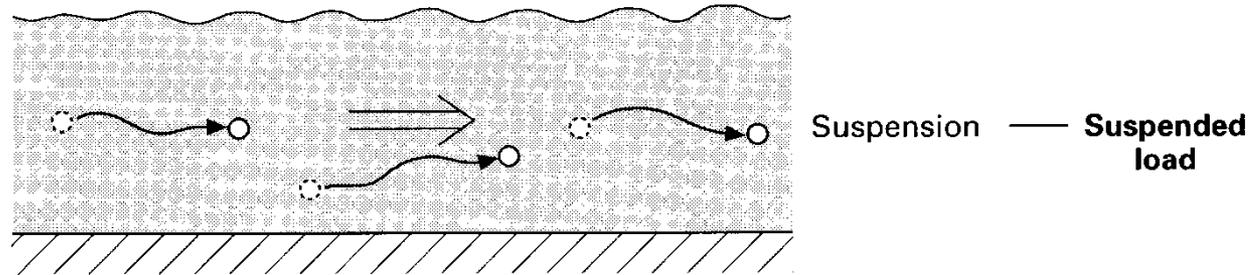
$$D_r = D_f - D_j = \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt$$

cf « méthode des trapèzes »

2 - Calcul de la V_r
$$V_r = \frac{D_r}{t_{final} - t_{initial}}$$

ATTENTION : $t_{final} - t_{initial}$ doit être pris égal à un cycle de marée : 12h25mn

4 - Dynamique des sédiments en suspension



Le transport des sédiments fins se fait essentiellement en suspension.

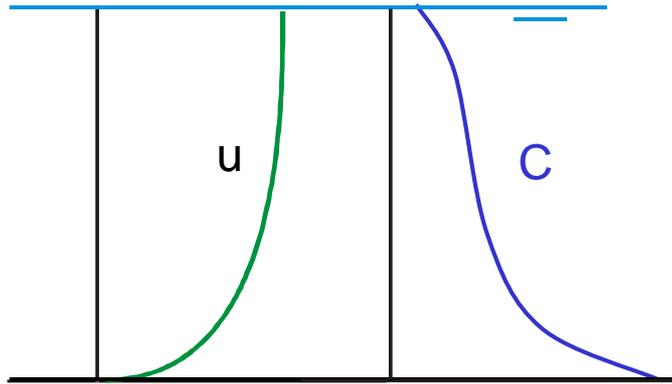
Les particules sont maintenues en suspension tant que la turbulence est supérieure à la vitesse de chute.

La turbulence induit également le "mélange vertical" de la colonne d'eau

La quantité des sédiments transportés est exprimée en concentration massique (g/l). On dit souvent "concentration en matières en suspension" ou MES.

4 - Dynamique des sédiments en suspension

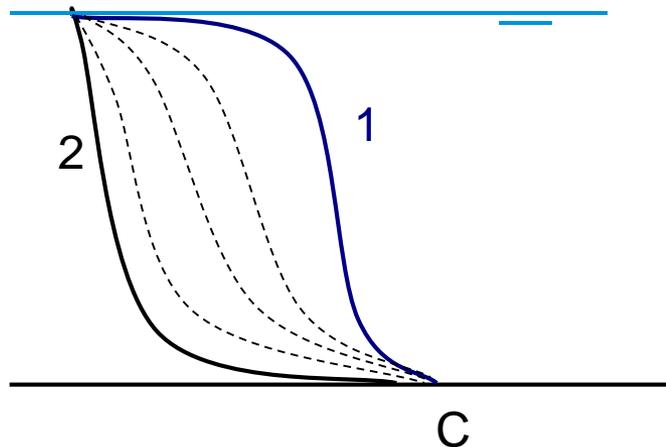
Distribution théorique des sédiments en suspension dans une colonne d'eau



Il existe un gradient de concentration croissant vers le fond.

C'est cohérent avec le fait que

- les particules proviennent de l'érosion du fond (et ne viennent pas depuis la surface !)
- par leur poids, les particules ont tendance à s'accumuler près du fond



En fonction du rapport Vitesse de chute / Turbulence, il y aura plusieurs distributions possibles entre

1 - une distribution homogène : rapport faible, donc tendance au "mélange"

et

2 - une distribution hétérogène : rapport élevé, donc tendance à l'accumulation près du fond

5 - Relation bouchon vaseux-crème de vase

Le cycle de marée semi-diurne crée des cycles érosion-dépôt.

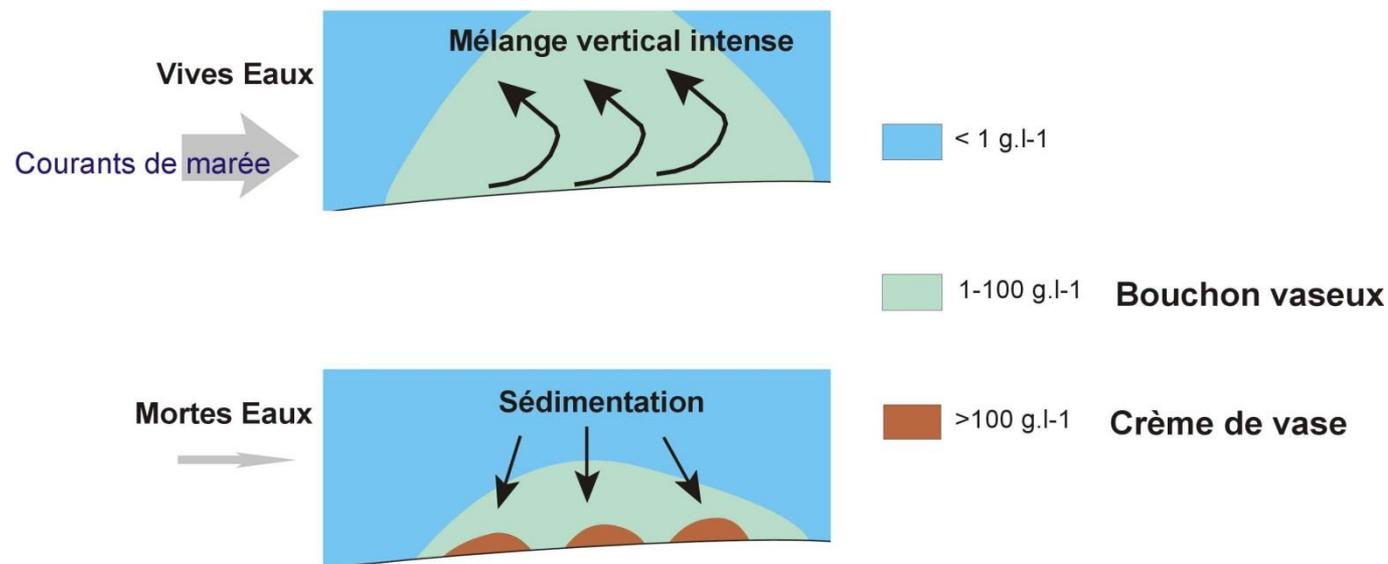
Dans le bouchon vaseux, les concentrations dépassent 1 g/l et plus

Cycle de marée bi-hebdomadaire :

En vives-eaux, les vitesses sont les plus élevées :

érosion maximum, mélange maximum (le bouchon vaseux est le plus dense)

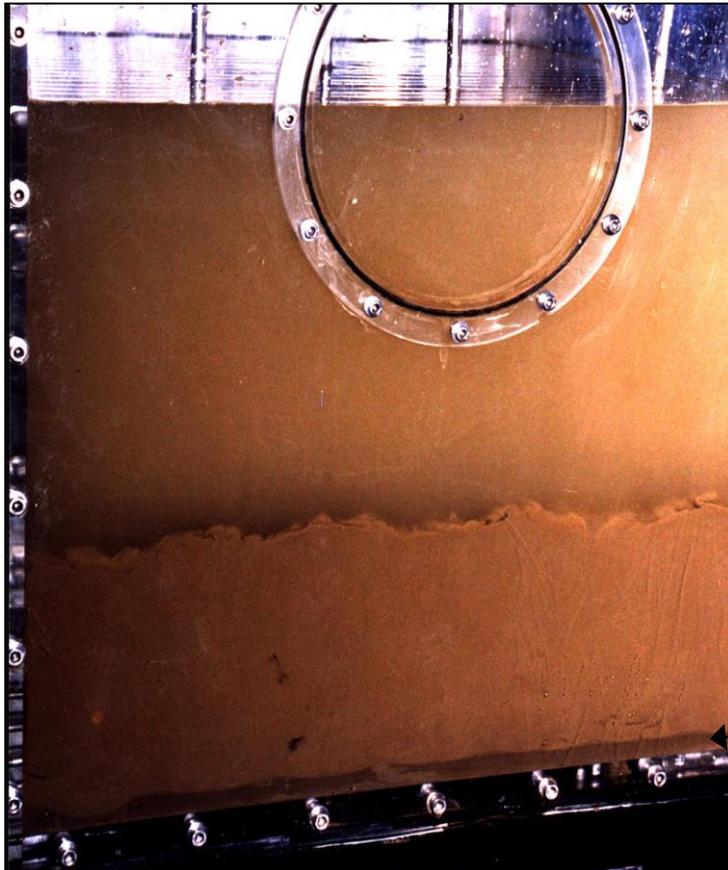
En mortes-eaux, les vitesses sont plus faibles : tendance au dépôt, le bouchon vaseux devient moins concentré => apparition au fond de la "crème de vase"



5 - Relation bouchon vaseux-crème de vase

Sur le fond, il se forme une couche de "vase fluide" appelée crème de vase : concentration de l'ordre de 100 g/l et plus.

aspect en laboratoire



eau turbide, $C \leq 1$ g/l

crème de vase,
 $C \approx 100$ g/l

← lit de vase (= le "fond")
 $C \approx 500$ g/l

5 - Relation bouchon vaseux-crème de vase

La crème de vase est responsable de l'envasement rapide des chenaux

=> besoin de dragages d'entretien pour maintenir les profondeurs navigables du chenal principal

Drague Pierre Lefort
du Port Autonome
de Bordeaux



6 - Techniques d'étude de l'hydrodynamique sédimentaire en estuaire

Plusieurs stratégies de mesures existent, de plus en plus précises et sophistiquées (en particulier sondes acoustiques)

La plus classique : mesure en station fixe depuis un bateau pendant un cycle de marée (environ 13h)



6 - Techniques d'étude de l'hydrodynamique sédimentaire en estuaire

Pour le courant : utilisation d'un courantographe (par ex. à hélice)

- Descente par paliers, en général tous les mètres
- Le plus souvent : 3 niveaux (1 m sous la surface, milieu, et 1 m au-dessus du fond)
- Palier de 1 à 5 mn pour filtrer la turbulence

- Détermination de la vitesse horizontale

- Direction fournie par un compas, mais parfois estimée visuellement (flot ou jusant)

- Descente toutes les heures



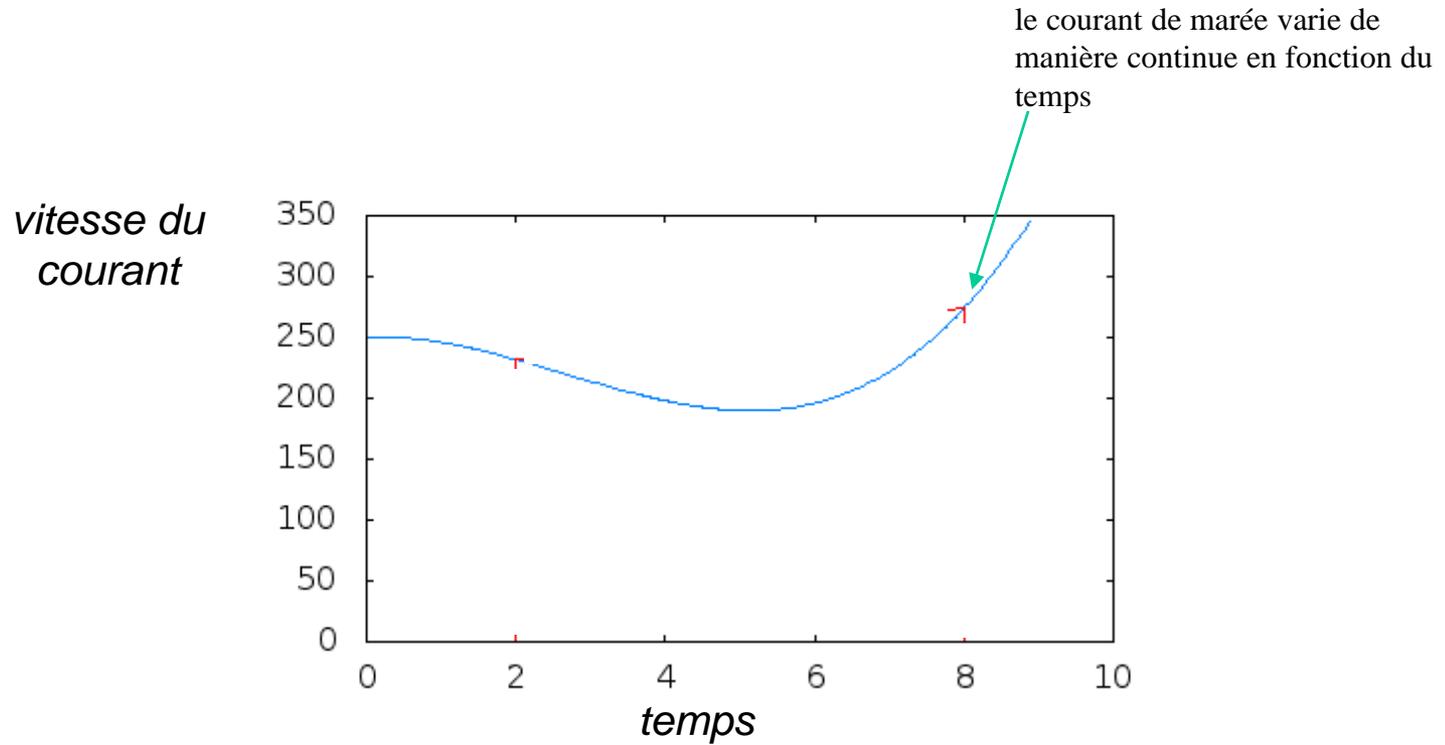
6 - Techniques d'étude de l'hydrodynamique sédimentaire en estuaire

Pour les MES : détermination par filtration d'eau



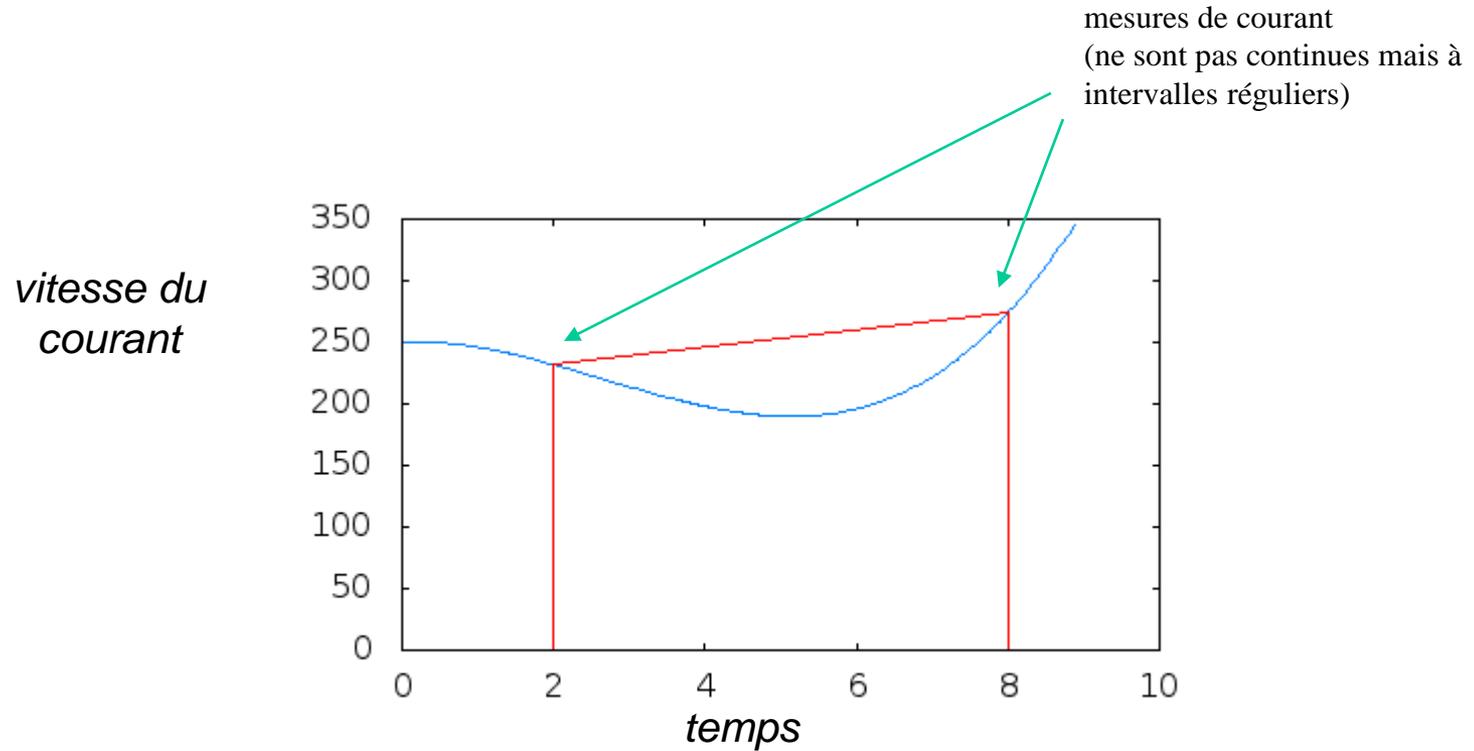
- Prélèvements avec une bouteille spécifique ("*bouteille Niskin*"), qui permet de prélever de l'eau en profondeur.
- Filtration d'un volume connu, puis détermination par pesées de la masse retenue dans le filtre
- Généralement à 3 niveaux de la colonne d'eau, toutes les heures si possible (idem courants)

Méthode des trapèzes



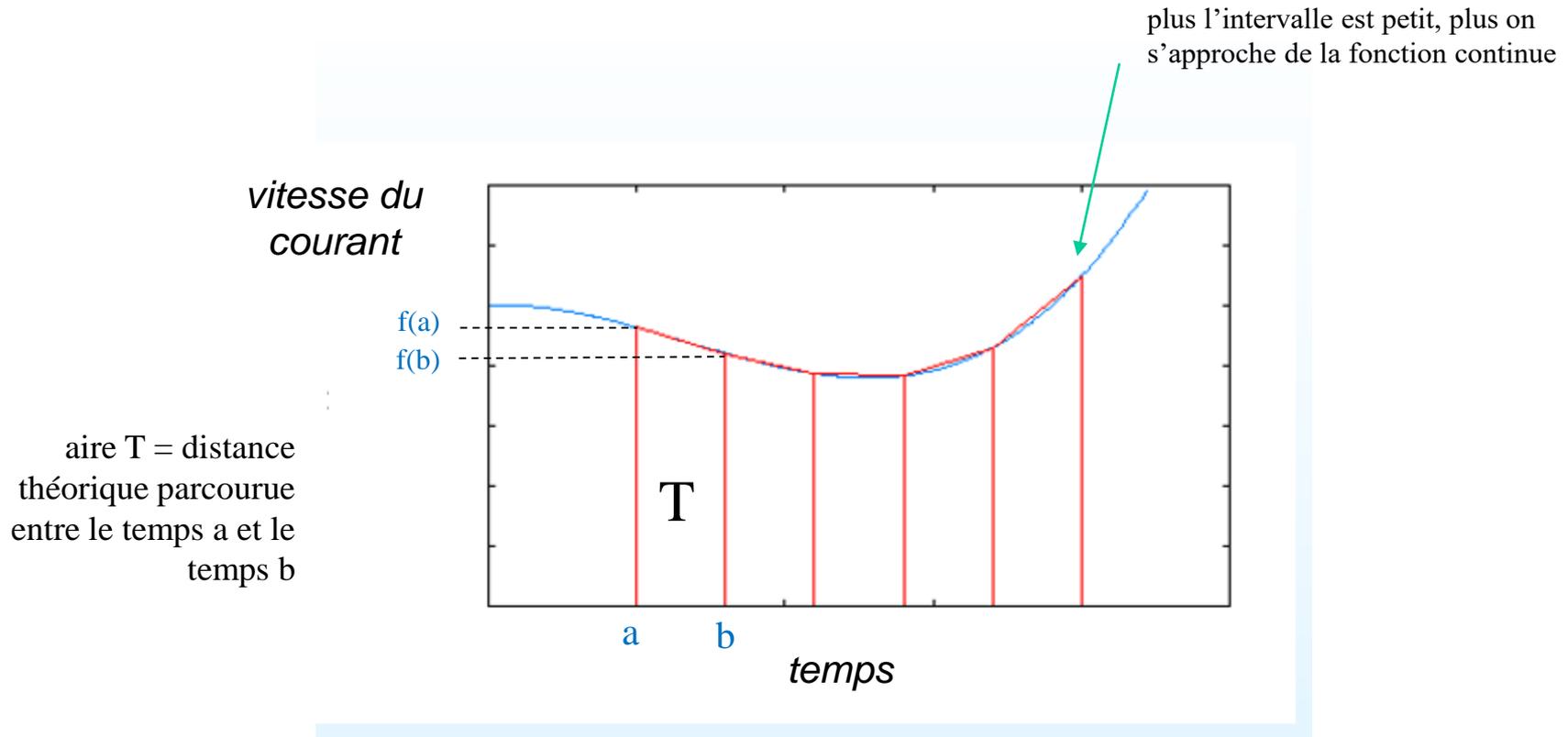
Par Mkwadee sur Wikipedia anglais, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=54729903>

Méthode des trapèzes



Par Mkwadee sur Wikipedia anglais, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=54729903>

Méthode des trapèzes



Par Mkwadee sur Wikipedia anglais, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=54729903>

Le principe est d'assimiler la région sous la courbe représentative d'une fonction f définie sur un segment $[a, b]$ à un trapèze et d'en calculer l'aire T :

$$T = (b - a) \frac{f(a) + f(b)}{2}.$$