

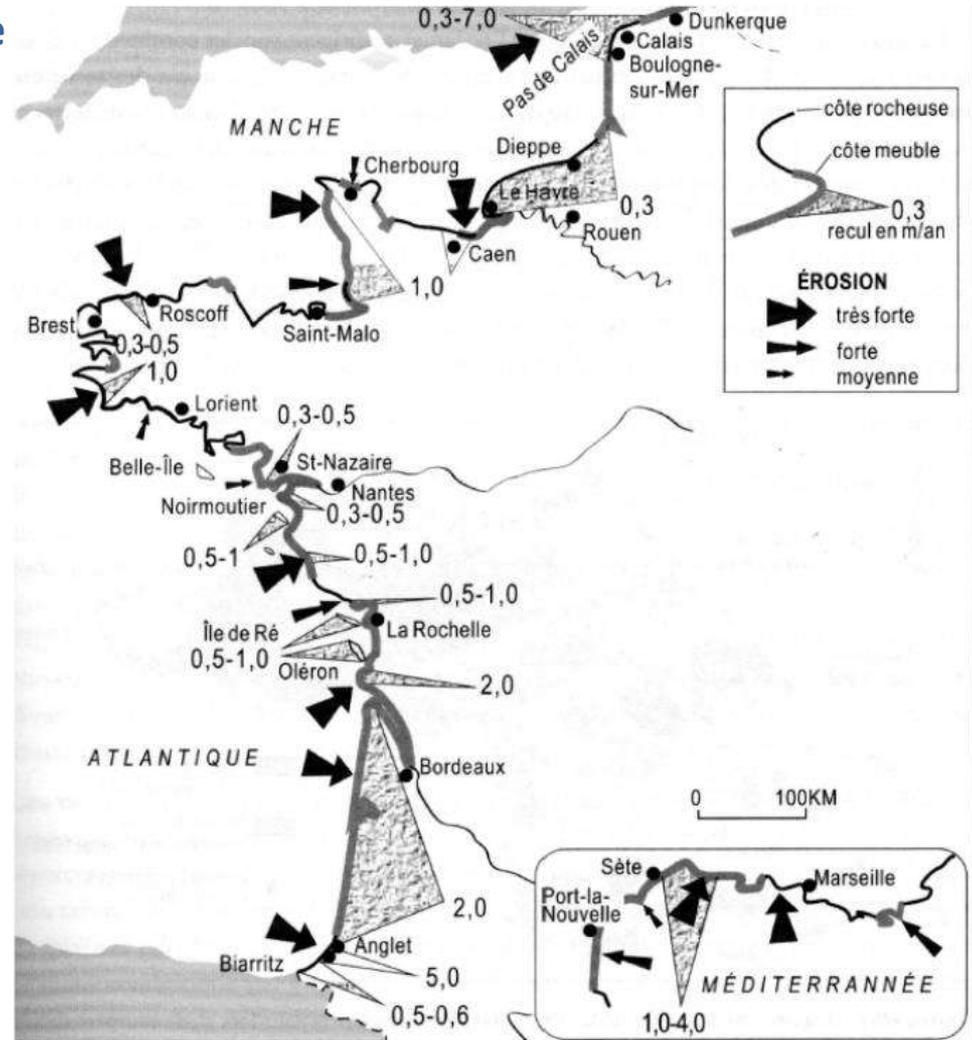


La dynamique littorale : Des forçages à la morphodynamique



Florian Ganthy
Docteur en Physique de l'Environnement
Ifremer Arcachon
florian.ganthy@ifremer.fr

- L'érosion littorale : une tendance générale



D'après Chamley, 2002

Généralités Introductives

Facteurs physiques

Marée

Vent

Facteurs anthropiques

Aménagements littoraux

Variation du niveau marin

Clapot Houle

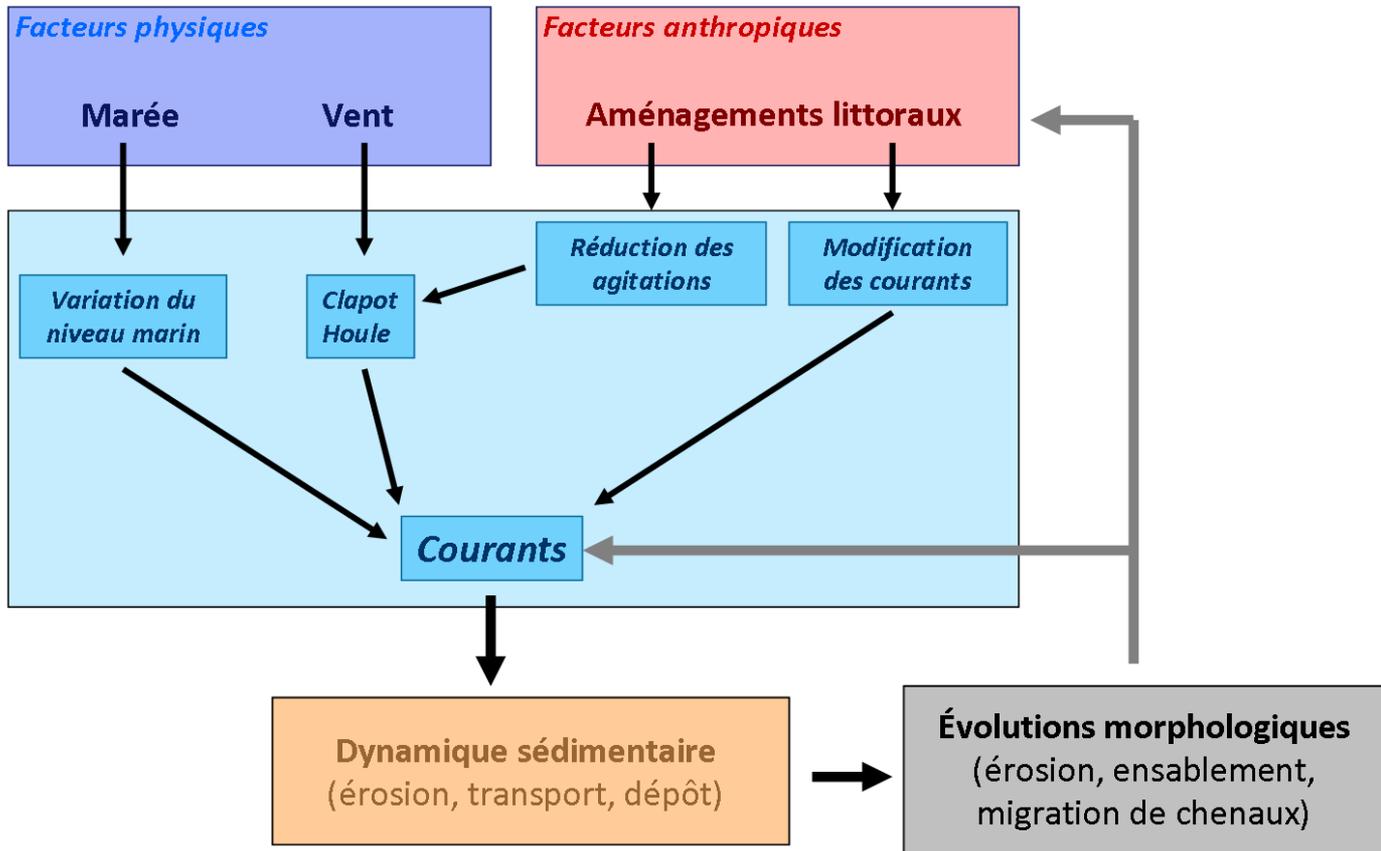
Réduction des agitations

Modification des courants

Courants

Dynamique sédimentaire
(érosion, transport, dépôt)

Évolutions morphologiques
(érosion, ensablement,
migration de chenaux)



→ La marée est le forçage dominant en milieux semi-fermés (estuaires, lagune...)

→ Les vagues sont le forçage dominant en milieux ouverts

- **La dynamique sédimentaire**
- **La marée**
- **Les vagues**
- **Les surcotes**
- **Exemple d'interactions entre marée et vagues**

Généralités sur la dynamique sédimentaire

- Un sédiment est un dépôt meuble laissé par les eaux, le vent ou les autres agents d'érosion (*définition Larousse*)

- Ensemble de particules à même d'être érodées, transportées, déposées par les eaux, le vent...

- En océanographie, on distingue 2 types de sédiments:

- Les sédiments non cohésifs

Sédiments ne présentant pas de forces de liaisons entre les grains (galets, graviers, sables), en général principalement constitués de particules minérale.

→ Dynamique simple

= F(diamètre, densité)

- Les sédiments cohésifs

Sédiments présentant des forces de liaisons (Van der Waals) entre les grains : constitués d'argiles, de matière organique.

→ Dynamique complexe

= F(diamètre particules, nature, densité, charge, état, ...)

- Un sédiment est un dépôt meuble laissé par les eaux, le vent ou les autres agents d'érosion (*définition Larousse*)

- Ensemble de particules à même d'être érodées, transportées, déposées par les eaux, le vent...

- En océanographie, on distingue 2 types de sédiments:

- Les sédiments non cohésifs

Sédiments ne présentant pas de forces de liaisons entre les grains (galets, graviers, sables), en général principalement constitués de nature minérale.

→ Dynamique simple

= F(diamètre, densité)

- Les sédiments cohésifs

Sédiments présentant des forces de liaisons (Van der Waals) entre les grains : constitués d'argiles, de matière organique.

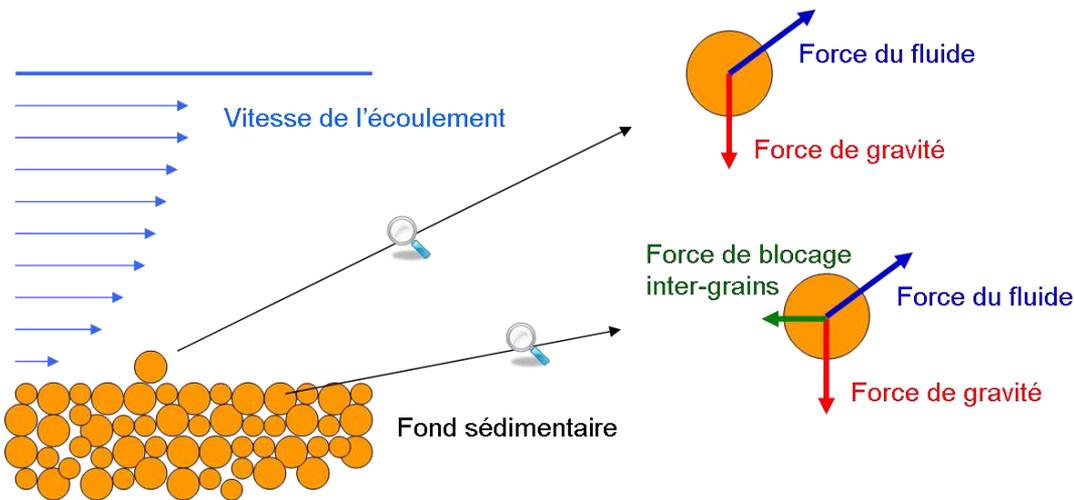
→ Dynamique complexe

= F(diamètre particules, nature, densité, charge, état, ...)

- 3 types de processus : érosion, transport, dépôt (*sédimentation*)

Érosion = mise en mouvement des particules

→ Au-delà d'une certaine vitesse de l'écoulement (vitesse critique) les particules sont mises en mouvement



Formulation simplifiée (Soulsby, 1997)

$$\bar{U}_{cr} = 7 \cdot \left(\frac{h}{d} \right)^{1/7} \cdot [g \cdot (s-1) \cdot d \cdot q]^{1/2}$$

$$s = \frac{\rho_{grain}}{\rho_{eau}}$$

$$q = \frac{0.3}{1 + 1.2 \cdot D_*} + 0.055 \cdot [1 - e^{(-0.02 \cdot D_*)}]$$

$$D_* = \left[\frac{g \cdot (s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} \cdot d$$

h : hauteur d'eau (m)

d : diamètre (m)

g : accélération pesanteur (9.81 m.s⁻²)

ρ_{eau} : masse volumique de l'eau de mer (1025 kg.m⁻³)

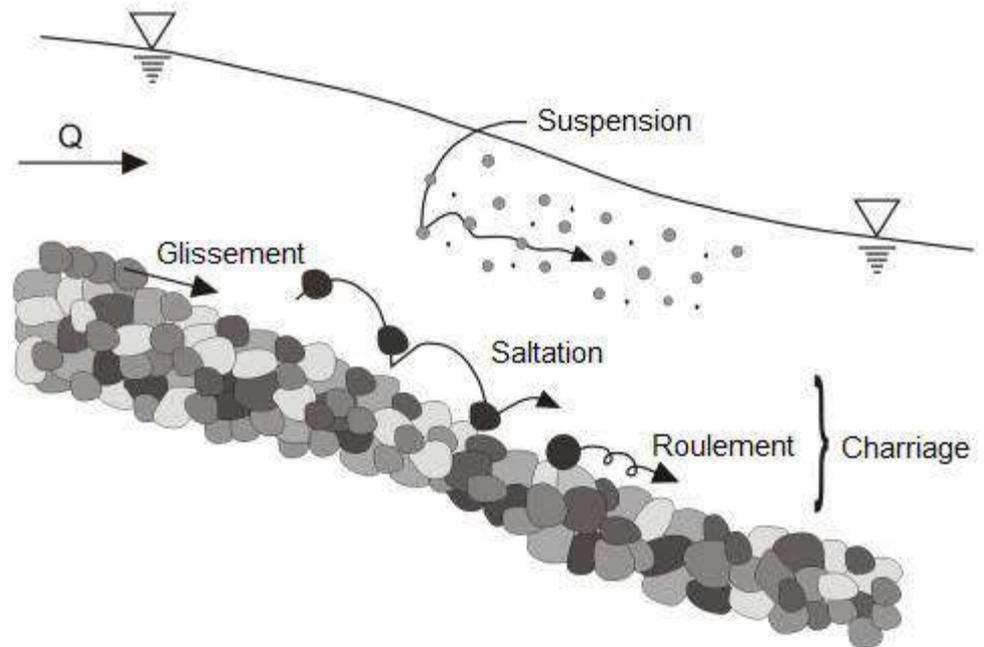
ρ_{grain} : masse volumique des grains (2650 kg.m⁻³ pour du quartz)

ν : viscosité cinématique de l'eau (10⁻⁶ m².s⁻¹)

- 3 types de processus : érosion, transport, dépôt (*sédimentation*)

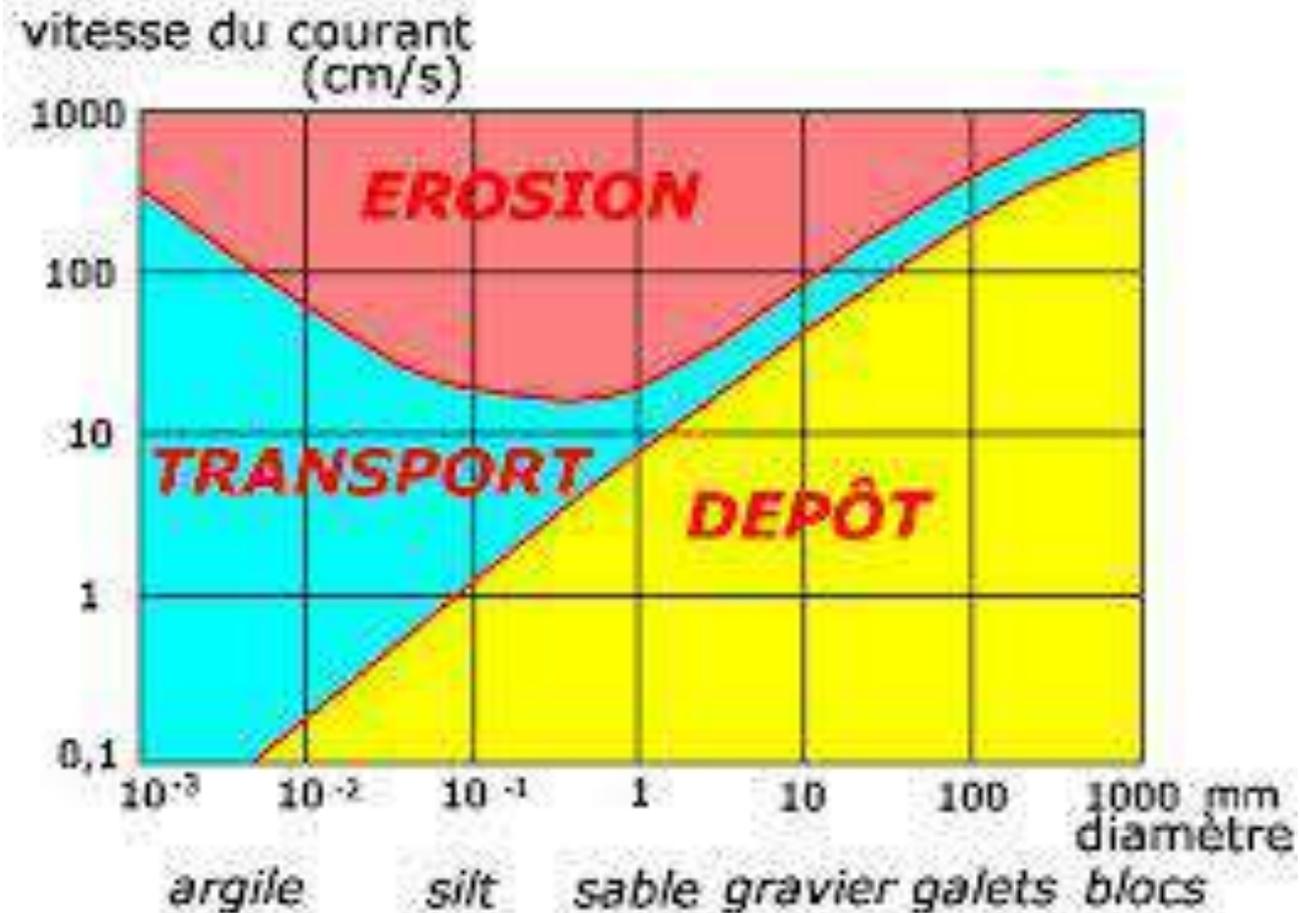
Transport = mouvement des particules (tant que $U > U_{cr}$)

Différents types de transport



Dépôt = quand $U < U_{cr}$

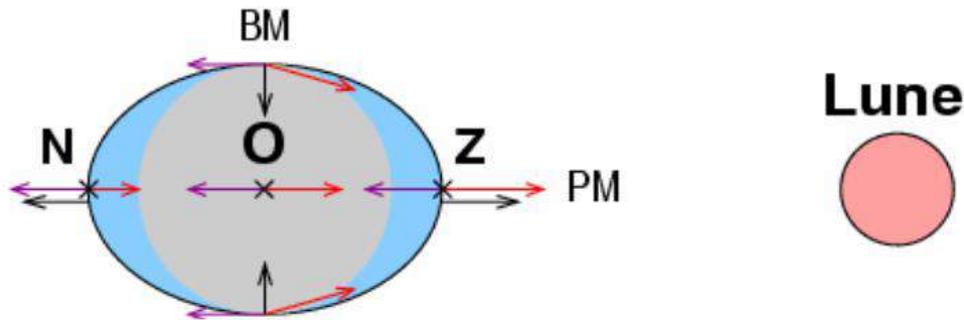
- 3 types de processus : érosion, transport, dépôt (*sédimentation*)





La marée

- La marée est un effet de l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil sur les océans
 - Rôles combinés de **l'attraction gravitationnelle** et de **la force centrifuge**



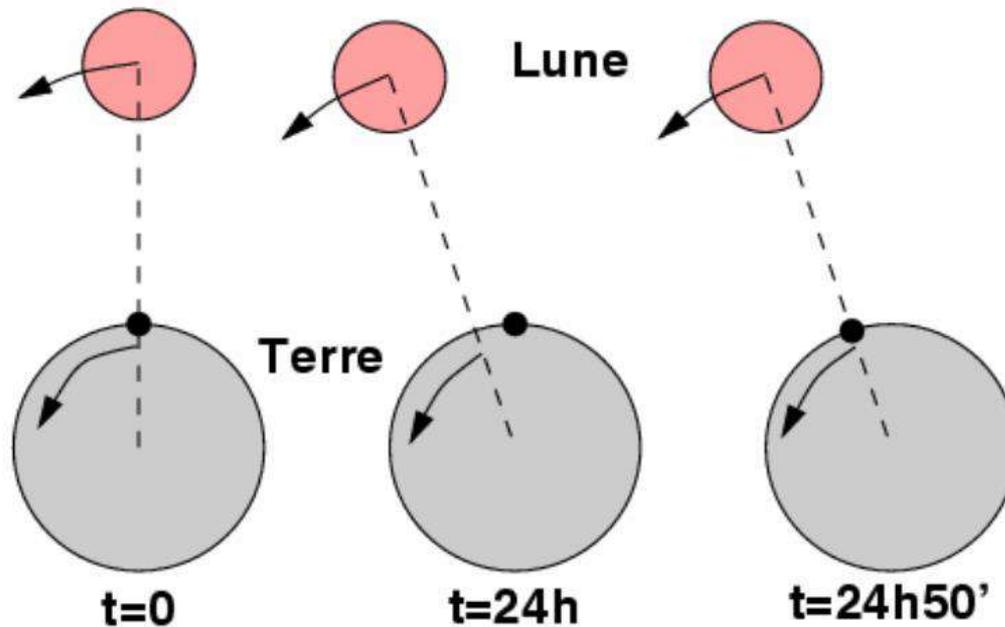
La résultante des deux forces dépend de la position sur Terre, elle est :

- nulle au centre de la Terre (point O)
- dirigée vers la Lune au zénith (point Z)
- dirigée à l'opposé de la Lune au nadir (point N)
- dirigée +/- vers le centre de la Terre pour les points situés perpendiculairement à l'axe ZN

Lorsque la résultante est dirigée vers le centre de la Terre, la surface des océans baisse créant une **basse-mer (BM)**, à l'inverse, lorsque la force est dirigée vers le ciel la surface des océans monte, créant une **pleine-mer (PM)**.

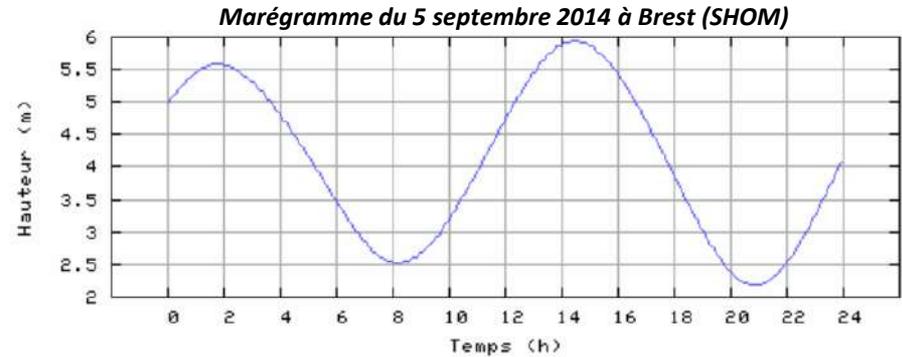
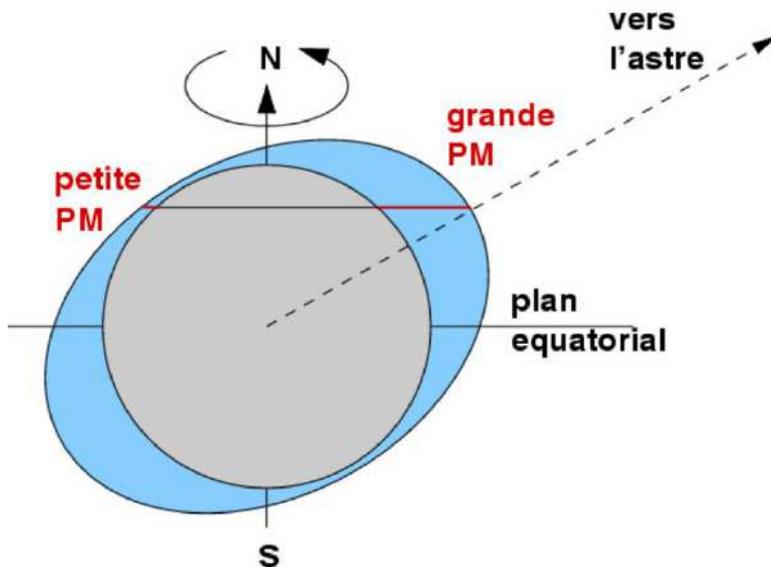
→ *L'effet principal de la Lune est de créer une marée semi-diurne (12h25) due à la rotation de la Terre sur elle-même (24h).*

- Le cycle semi-diurne est de 12h25 créant un retard de 50 minutes par jour, pourquoi ?



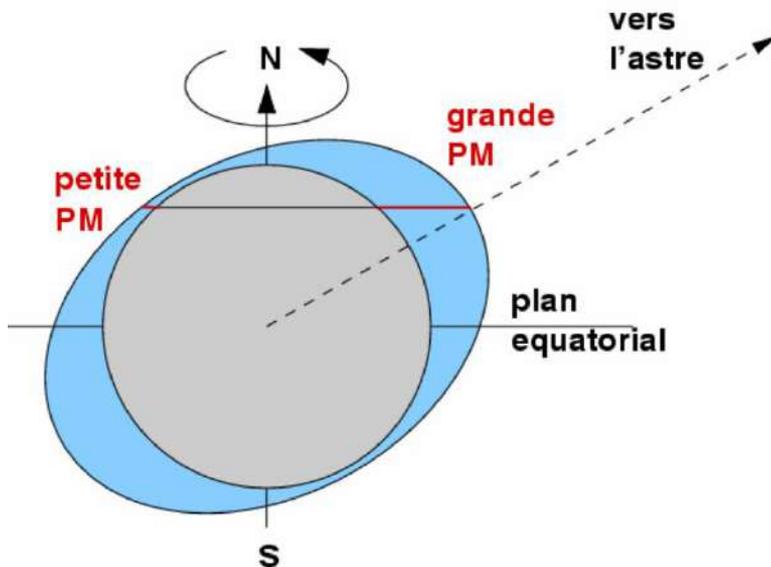
→ Pendant que la Terre effectue un tour sur elle-même, la Lune tourne également autour de la Terre (de $1/28^{\text{ème}}$ de tour). La Lune se retrouve donc au-dessus du même point un peu plus tard, soit en 24h50'28''.

- Comment apparaît la composante diurne ?

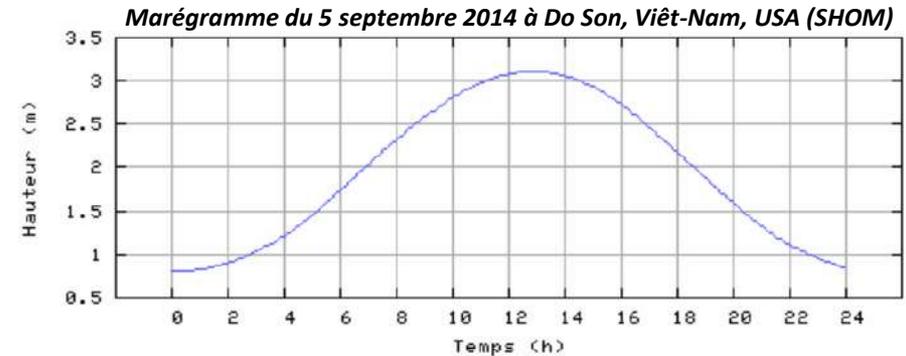
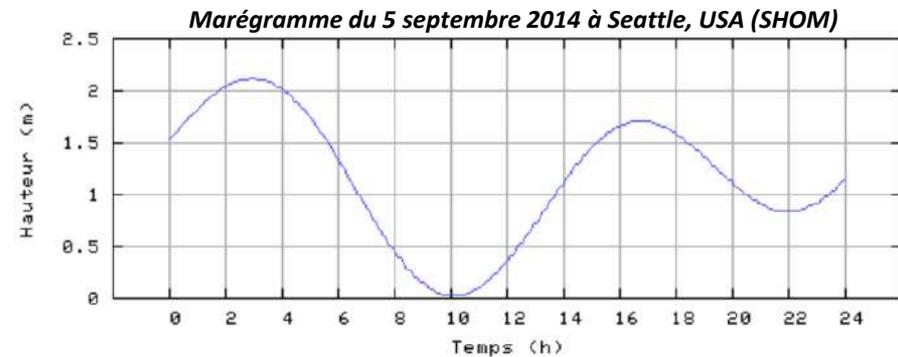
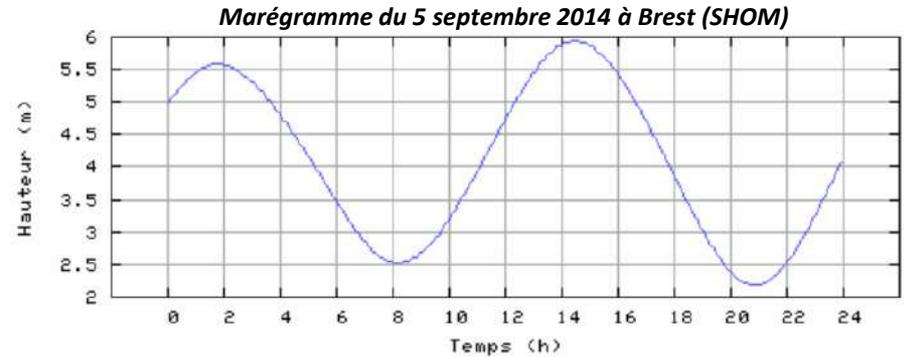


La Lune n'est en général pas dans le plan équatorial, le renflement des océans n'est donc pas symétrique. Les pleines-mer et basses-mer sont donc alternativement fortes et faible, créant donc une composante diurne à la marée.

- Comment apparaît la composante diurne ?



La composante diurne n'est pas identique partout. Il existe des endroits où la marée est essentiellement diurne, et d'autres où elle est tantôt diurne, tantôt semi-diurne.

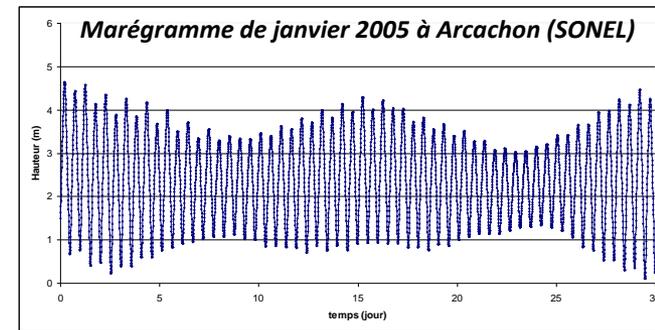
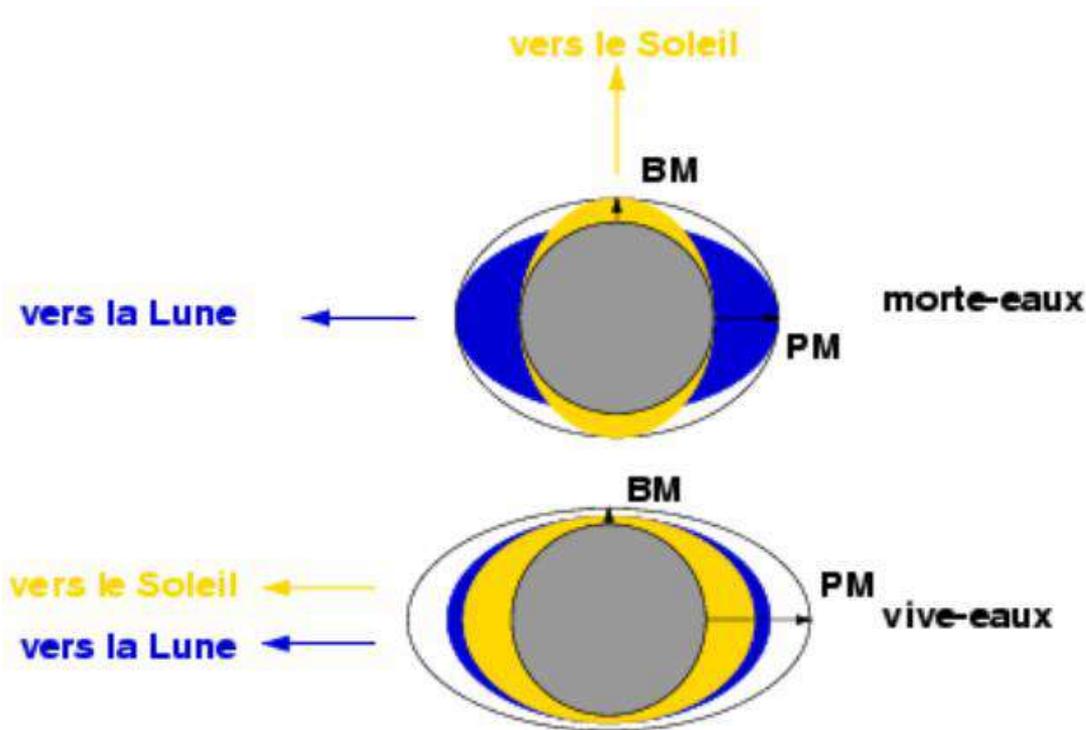


- La marée est-elle d'origine lunaire ou solaire ?
 - Les deux astres jouent un rôle à peu près équivalent et leurs effets s'ajoutent.
 - La période de la composante semi-diurne solaire est en revanche exactement de 12h

- La marée est-elle d'origine lunaire ou solaire ?

- Les deux astres jouent un rôle à peu près équivalent et leurs effets s'ajoutent.
- La période de la composante semi-diurne solaire est en revanche exactement de 12h

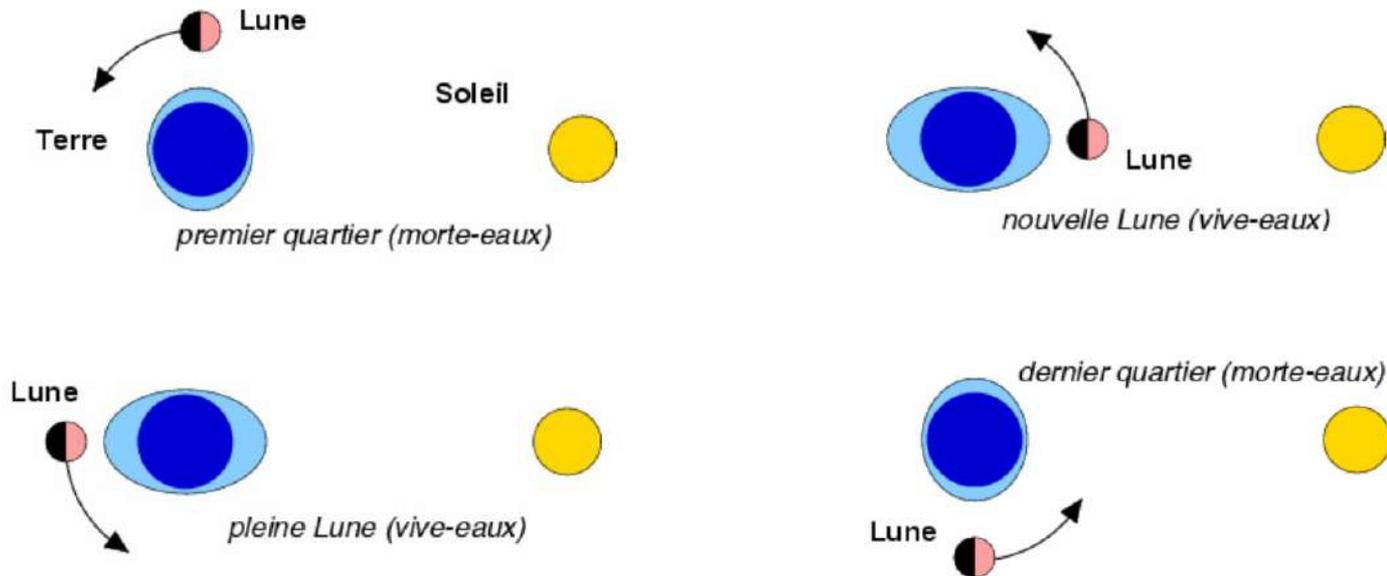
- Pourquoi y a-t-il alternance des vives et des mortes eaux ?



→ Le Soleil module l'effet de la Lune

- Pourquoi le cycle des vives-eaux est-il de 14 jours ?

La Lune tourne autour de la Terre en 28 jours, par conséquent l'oscillation a une période de 14 jours.



→ Ce cycle ne se répète pas à l'identique. Ainsi les coefficients de marées sont plus forts à l'équinoxe et plus faibles aux solstices. Ces modulations plus lentes sont dues à la variation d'autres paramètres orbitaux.

→ Il existe cependant un cycle de 18 ans (saros), proche multiple de nombreux paramètres orbitaux au bout duquel la marée se répète presque à l'identique.

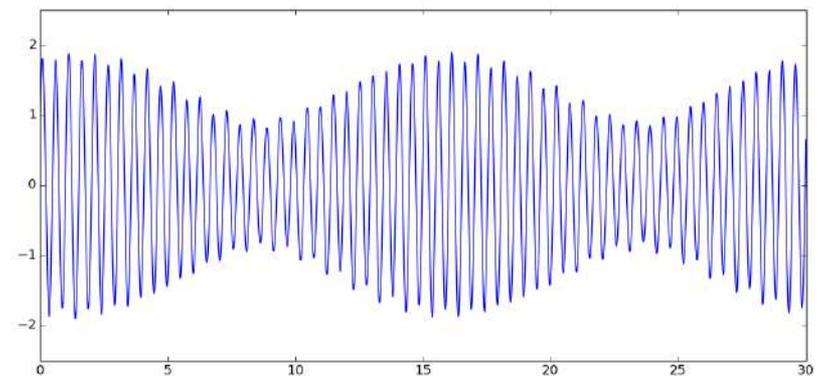
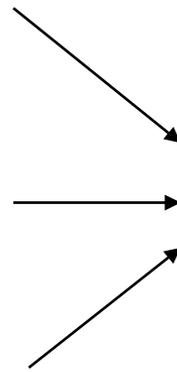
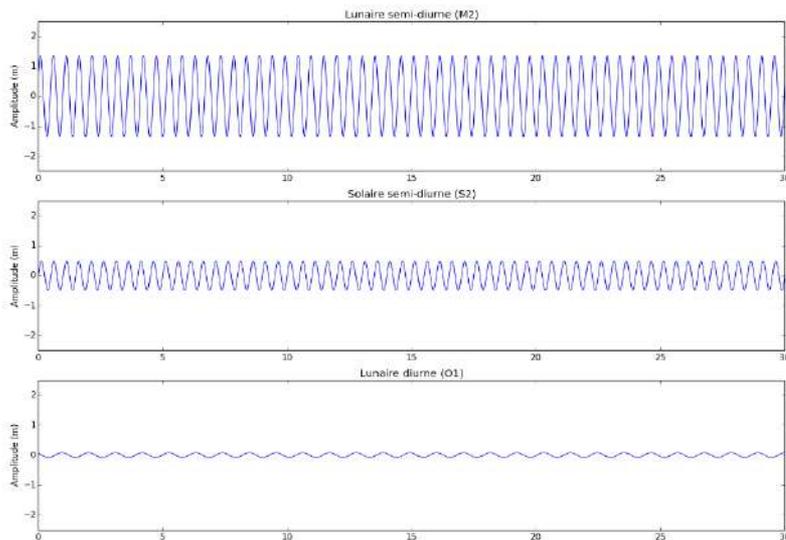
- Méthode de calcul par constituants harmoniques

- L'onde de marée en un point peut être décomposées en une série de constituants harmoniques sinusoïdaux, correspondants aux effets astronomiques des astres.
- Chaque constituant est caractérisé par un nom, une amplitude (A , en m), une phase (P , en radians) et une fréquence angulaire (W , en radians/seconde)

- La hauteur d'eau (H , en m) peut ainsi être calculée :

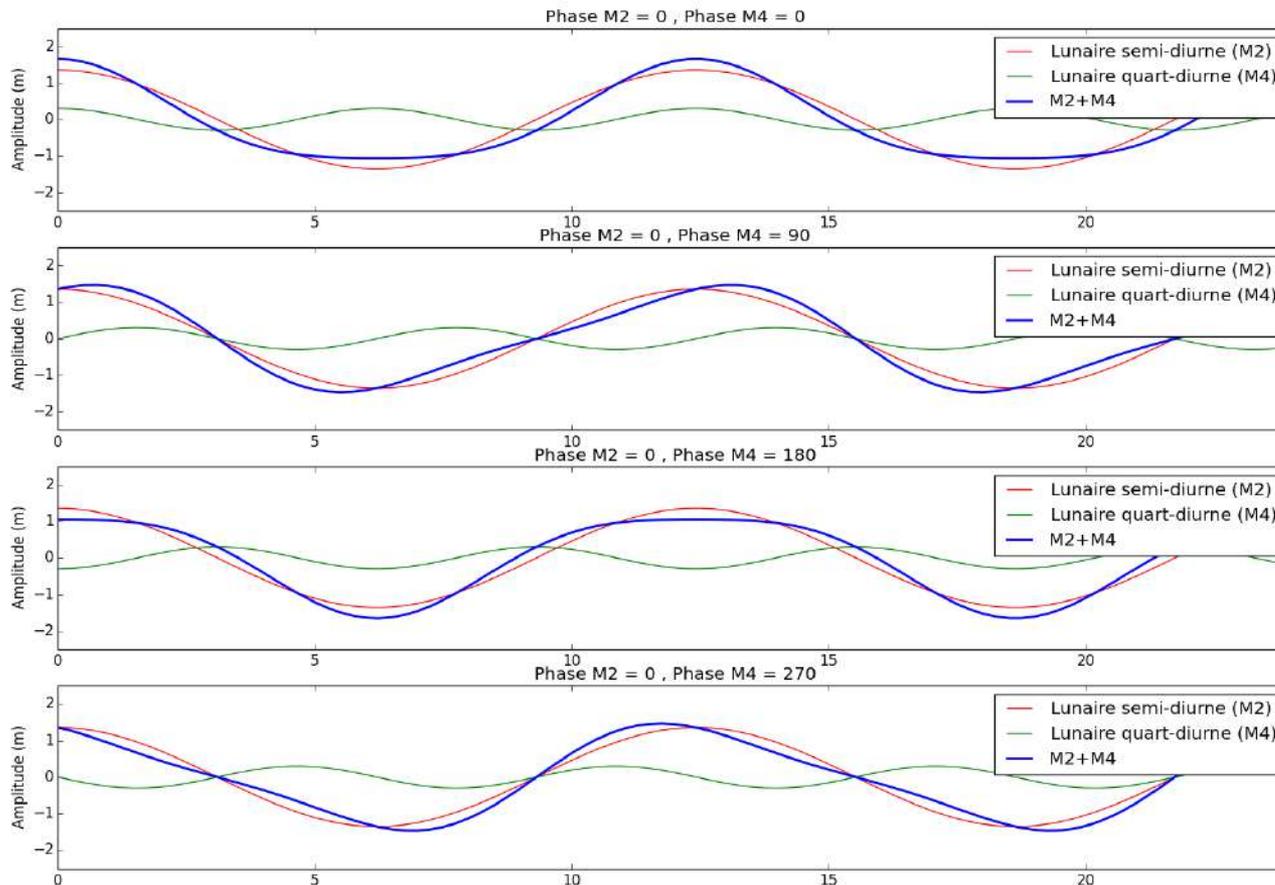
$$H(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \cos(W_i \cdot t - P_i)$$

Où : i est le constituant et t , le temps (en sec)



- Près des côtes des composantes haute fréquence apparaissent du fait des interactions des constituants entre eux

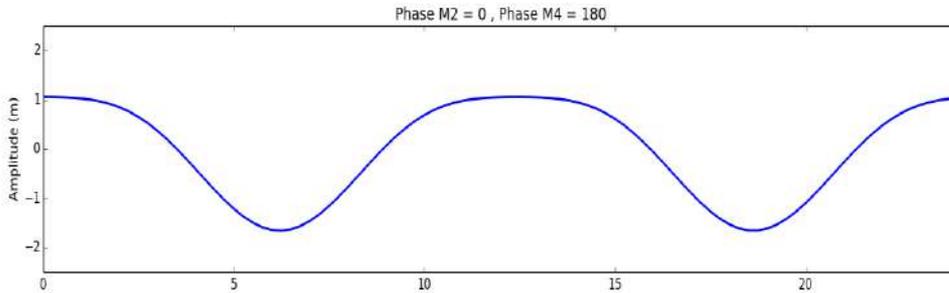
- Ces interactions peuvent rendre la marée asymétrique :



→ L'asymétrie des hauteurs d'eau induit une asymétrie des vitesses de courant, et donc a un impact important sur le transport sédimentaire...

- Effets de l'asymétrie sur le transport sédimentaire estuarien

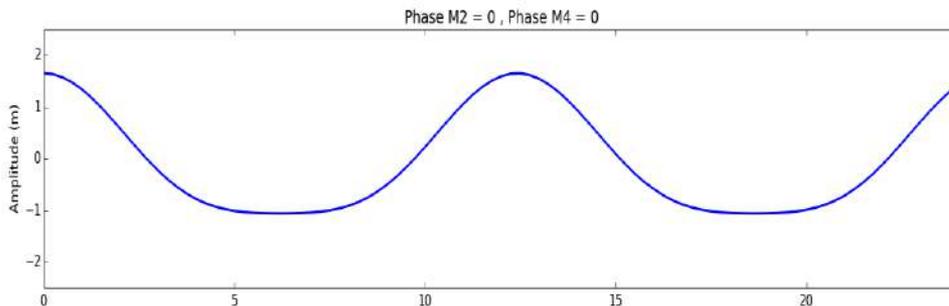
Effets de l'asymétrie de durée des pleines/basses mers:



« Tenue du plein »

Dépôt sédimentaire favorisé sur les parties hautes des estrans (temps long sans courants permettant le dépôt) → ex. Estuaire de Seine

→ Conduit à long terme à une accrétion des estrans et zones « hautes »



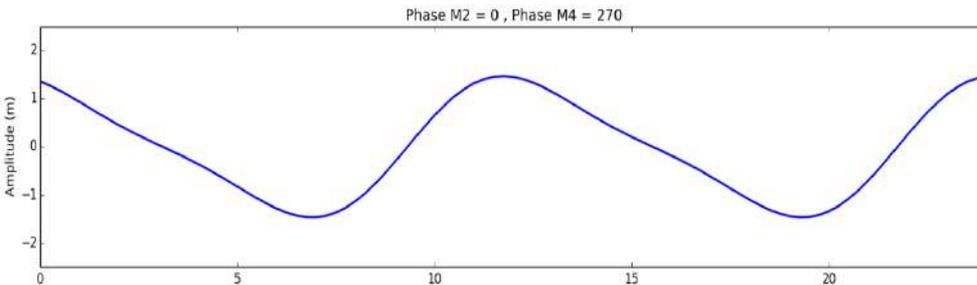
« Tenue du vide »

Dépôt sédimentaire favorisé dans les chenaux (sédiments déposés à la basse mer sont remis en suspension au flot suivant) → cas rare

→ Pas d'effets significatifs sur le long terme

- Effets de l'asymétrie sur le transport sédimentaire estuarien

Effets de l'asymétrie des durées et vitesses de flot/jusant:



« Dominance du flot »

Transport sédimentaire vers l'amont (importation de sédiment) favorisé par les fortes vitesses au flot.

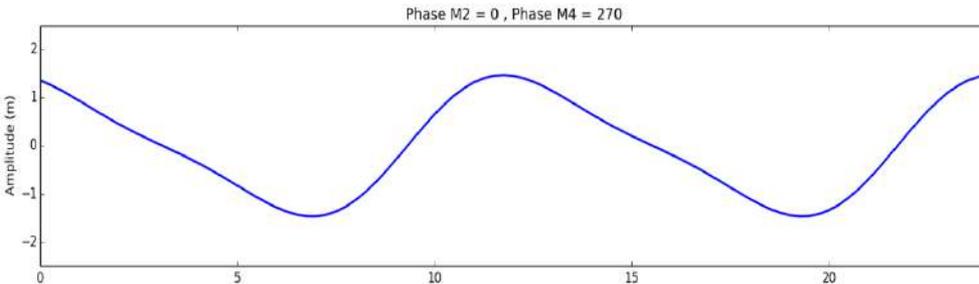
→ Conduit à long terme à une accrétion des platiers et zones « hautes »

Le mascaret est un cas extrême d'asymétrie de la marée...



- Effets de l'asymétrie sur le transport sédimentaire estuarien

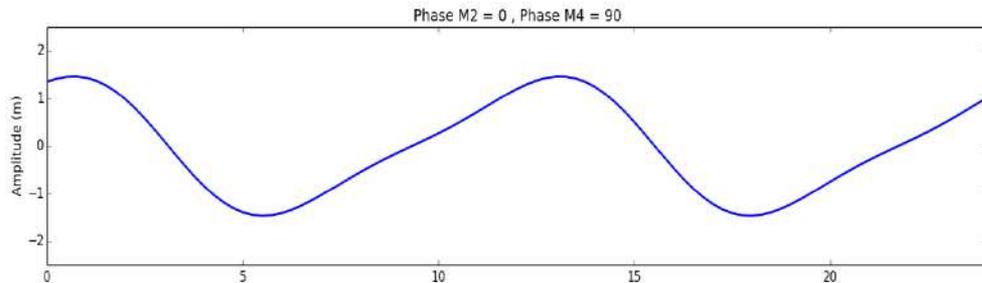
Effets de l'asymétrie des durées et vitesses de flot/jusant:



« Dominance du flot »

Transport sédimentaire vers l'amont
(importation de sédiment) favorisé par les fortes vitesses au flot.

→ Conduit à long terme à une accrétion des platiers et zones « hautes »



« Dominance du jusant »

Transport sédimentaire vers l'aval
(exportation de sédiment) favorisé par les fortes vitesses au jusant.

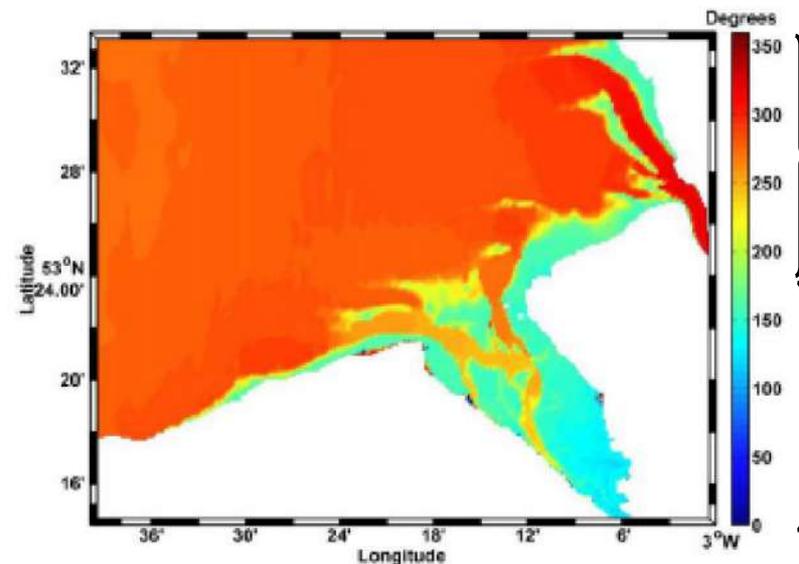
→ Conduit à long terme à une érosion estuarienne

- Effets de l'asymétrie sur le transport sédimentaire estuarien

Effets de l'asymétrie des durées et vitesses de flot/jusant:

→ Pour un même système (estuaire/baie/lagune) l'asymétrie des durées et vitesses de flot/jusant n'est pas homogène dans l'espace

Dee estuary (UK)

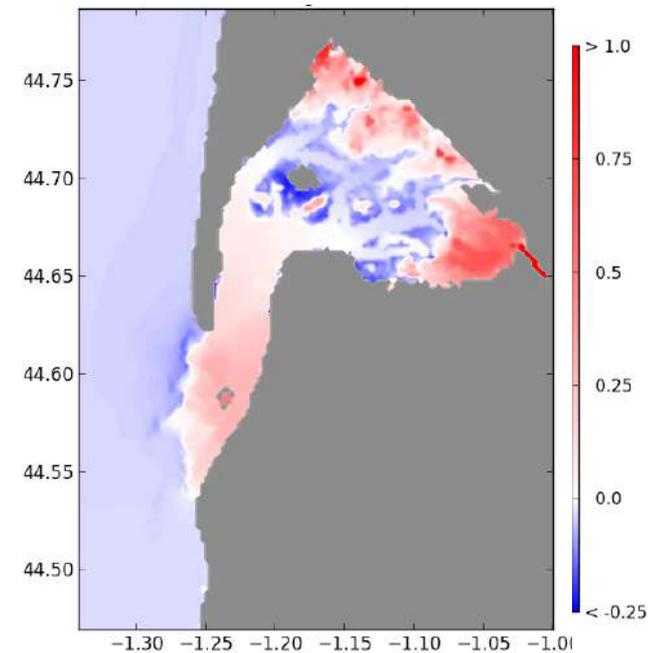


Dominance du jusant (transport vers l'aval/exportation de sédiments vers l'océan)

Dominance du flot (transport vers l'amont/importation de sédiments)

(d'après Moore et al., 2009)

Bassin d'Arcachon



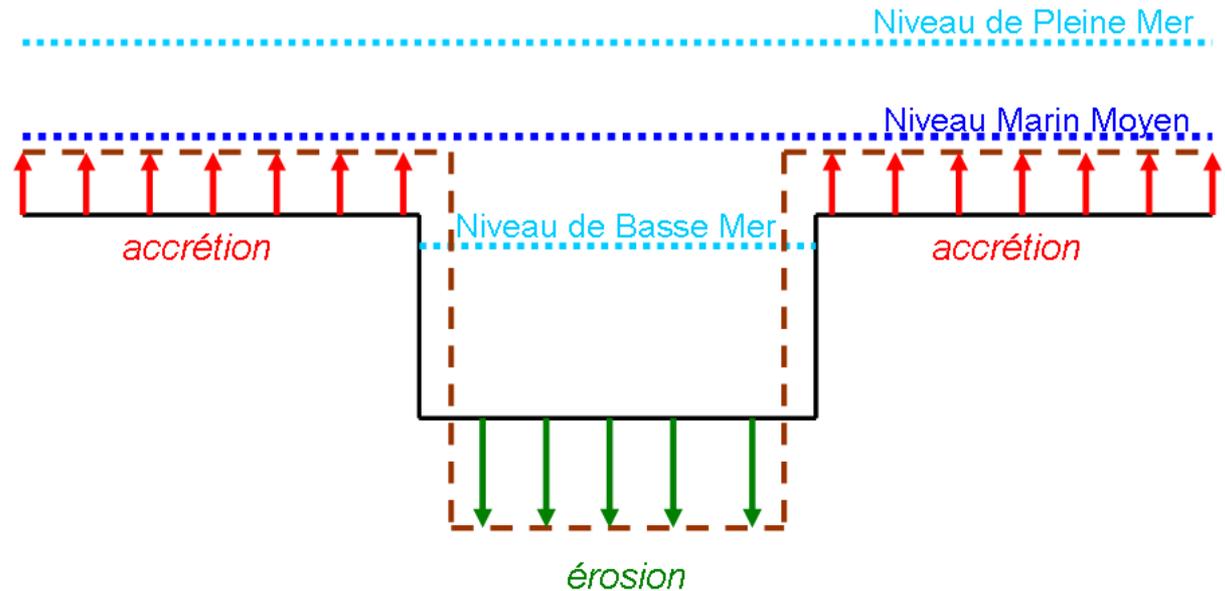
(d'après Ganthy et al., 2017)

- Effets de l'asymétrie sur le transport sédimentaire estuarien

Effets de l'asymétrie des durées et vitesses de flot/jusant:

→ Pour un même système (estuaire/baie/lagune) l'asymétrie des durées et vitesses de flot/jusant n'est pas homogène dans l'espace

→ Les chenaux se creusent, les estrans s'accrètent...

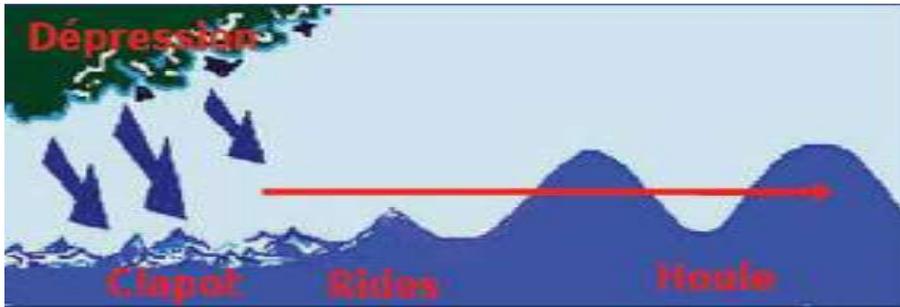




Les vagues

- Les vagues sont un mouvement oscillatoire des couches superficielles de l'eau

Elles sont générées par la friction induite par le vent soufflant à la surface de l'eau

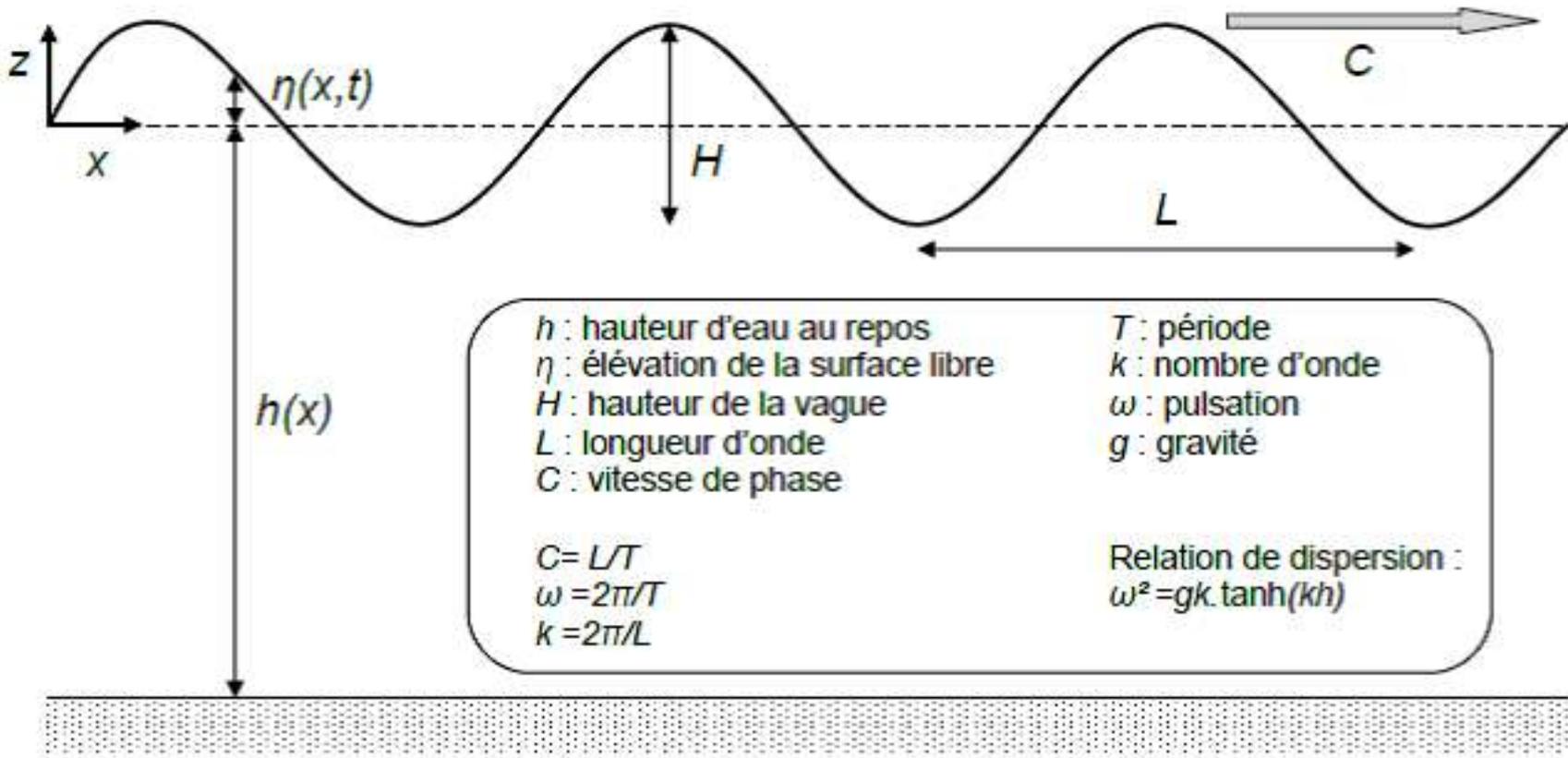


On distingue 3 types de vagues :

- **Le clapot** : état de mer caractérisé par des petites vagues dont l'onde a une période comprise entre 1 et 4 secondes
- **La mer de vent** : ensemble des vagues générées par un vent local
- **La houle** : vagues de période supérieure à 4 secondes se propageant en l'absence du vent qui les a formé

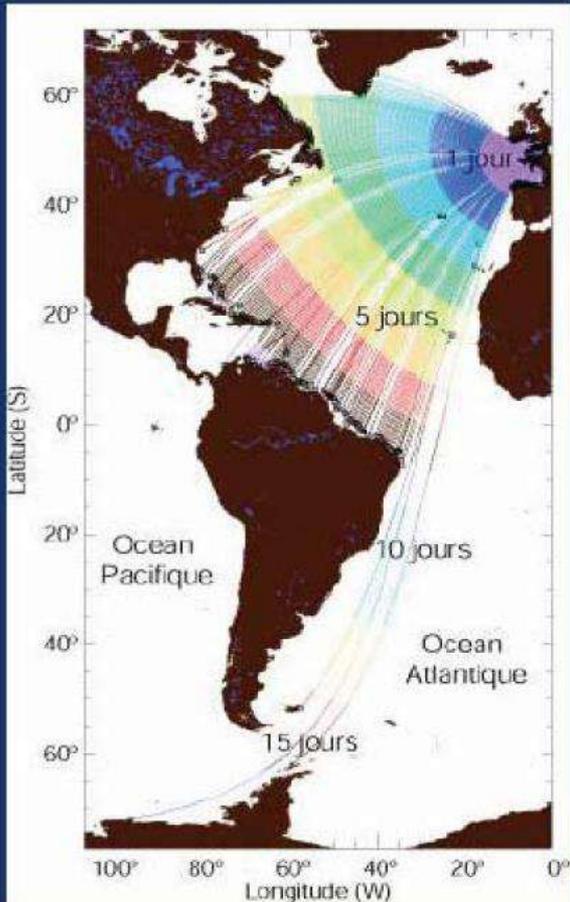
La hauteur des vagues générées dépend du fetch (distance sur laquelle le vent s'applique), de la force du vent et de la durée pendant laquelle il souffle.

- Une houle est une onde sinusoïdale définie par différents paramètres :



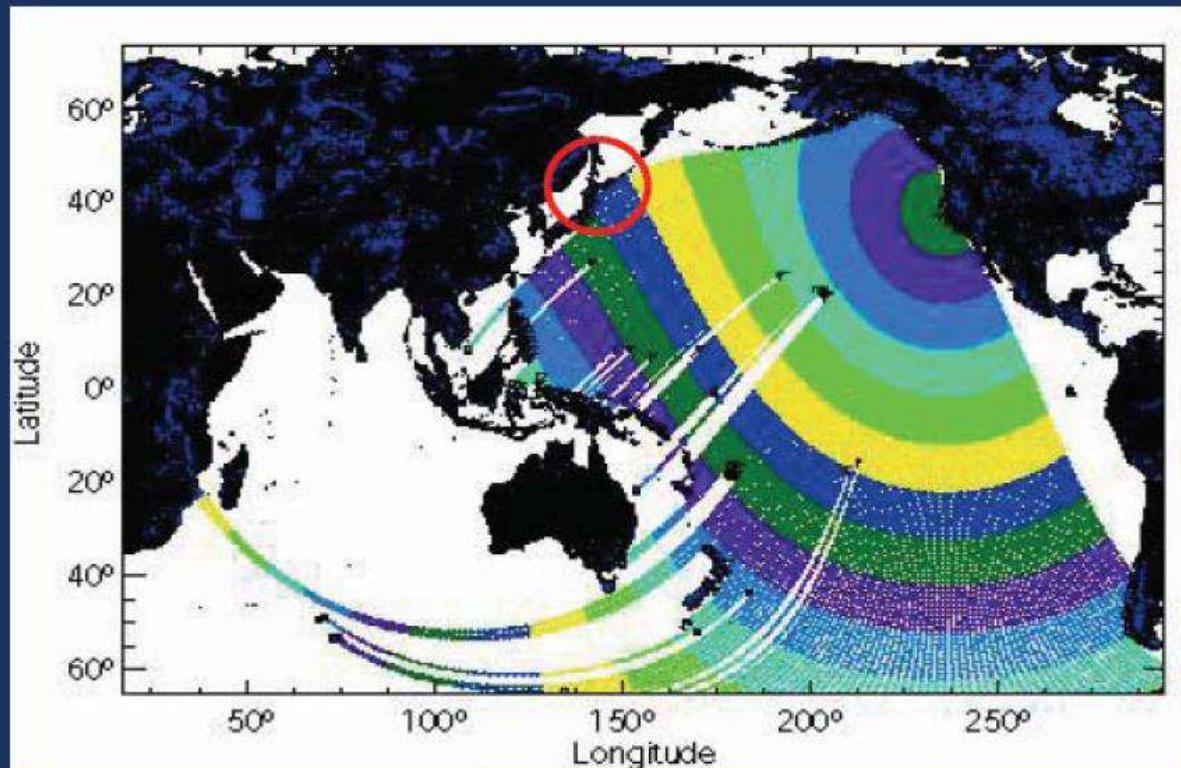
- Propagation de la houle à grande échelle (houle non contrainte par la hauteur d'eau)

Propagation sur des arcs de grand cercle



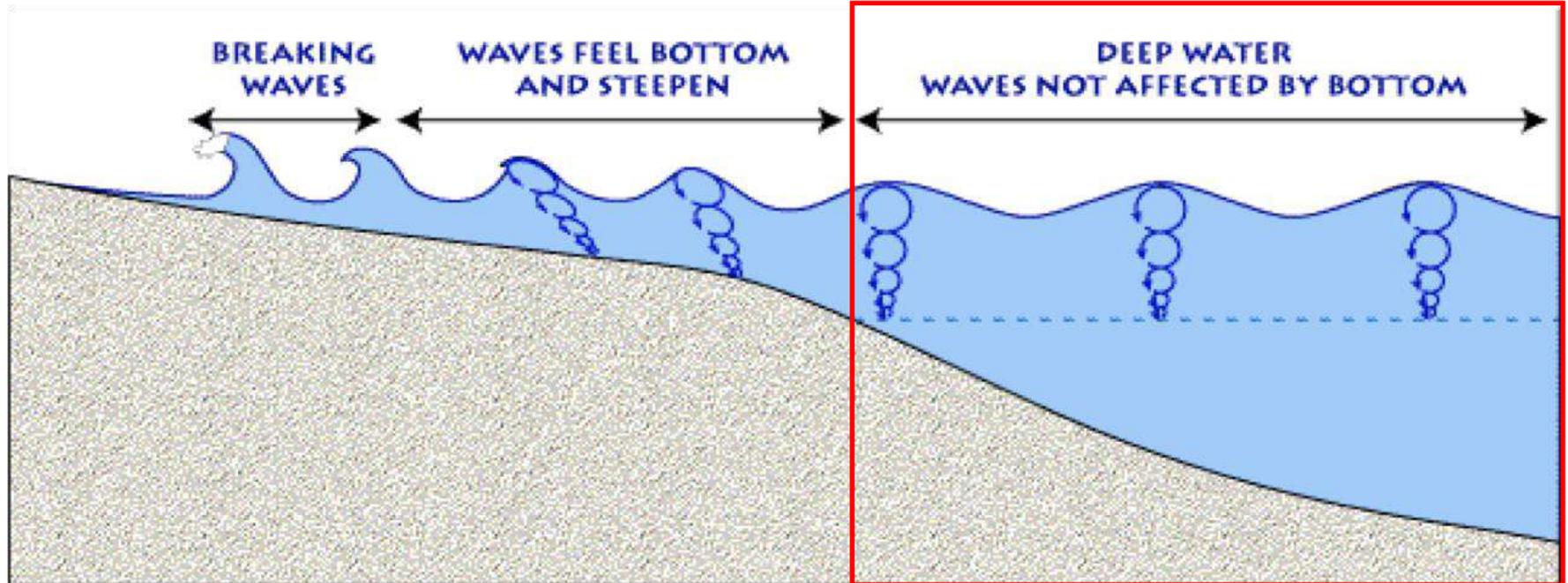
Dissipation intrinsèque réduite:
durée de vie théorique d'une vague = 900 jours

$$T_{\text{vie}} = \frac{L^2}{8\pi^2\nu} \simeq 0.71L^2 \text{ avec } \nu \text{ viscosité moyenne de l'eau}$$



Chaque couleur correspond à la propagation sur une journée

- Mouvement des particules d'eau

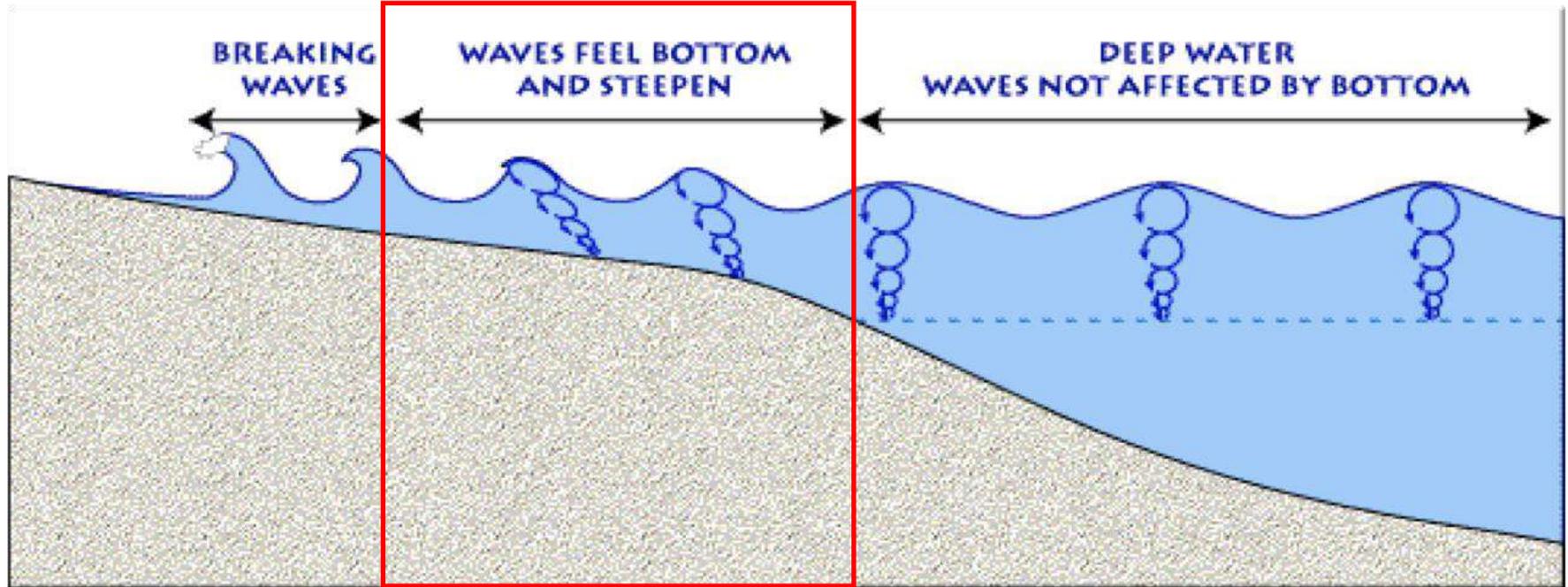


Pas d'impact du fond quand $h \ll L$:

Les particules d'eau se déplacent en cercles de plus en plus petit depuis la surface vers le fond

→ Une houle se propageant en haute mer (pas d'impact du fond) ne produit pas de transport de matière. Chaque particule d'eau retrouve sa position initiale après le passage de l'onde

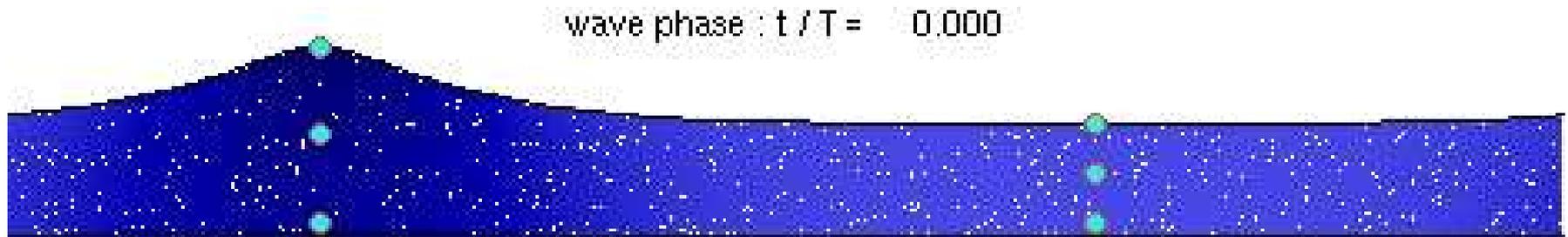
- Mouvement des particules d'eau



Impact du fond quand $h \geq L$: Les particules d'eau se déplacent en ellipses, la hauteur des vagues (H) augmente, la longueur d'onde (L) diminue, mais la période (T) reste la même : la vitesse (C) diminue. C'est la levée ou shoaling

→ Une houle se propageant à la côte produit un transport de matière : c'est la dérive de Stocks

- **Mouvements des particules d'eau : la dérive de Stocks**

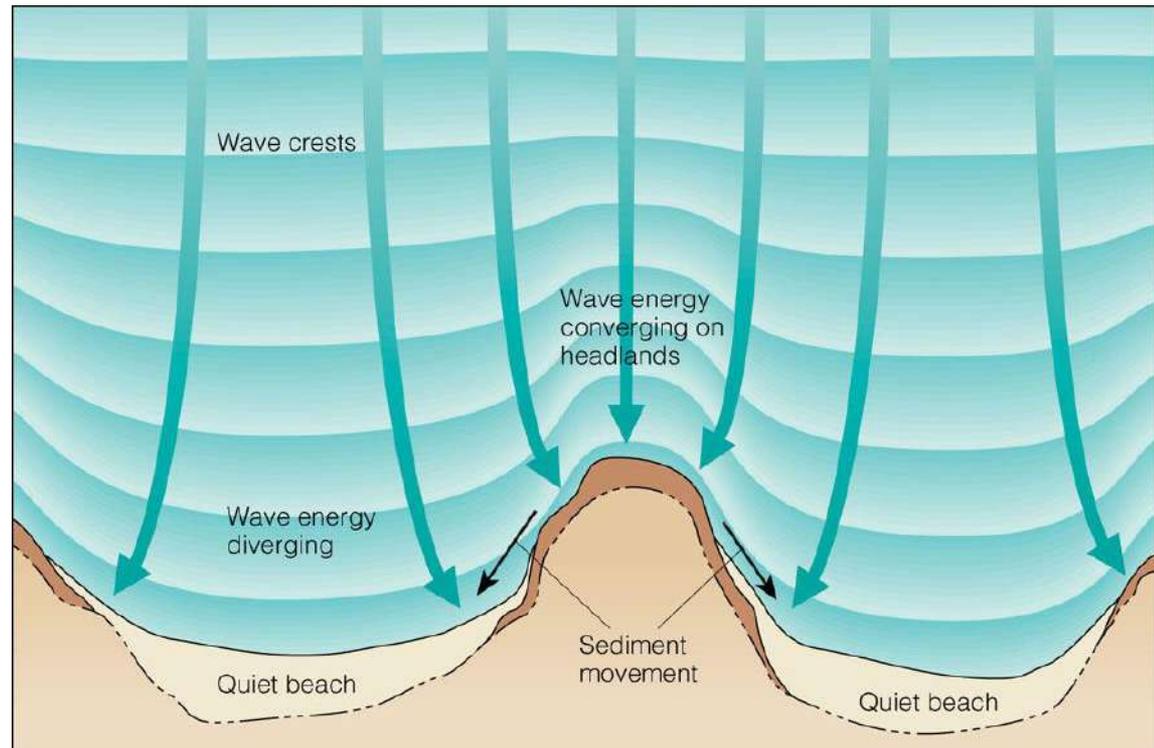
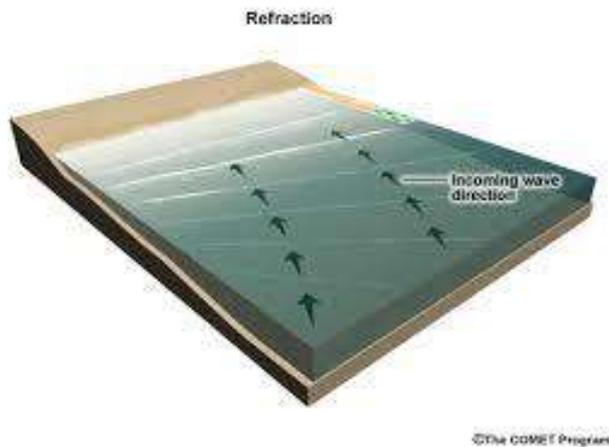


→ La dérive de Stock implique un transport des particules d'eau dans le sens de propagation des vagues

→ Impact sur le transport sédimentaire

• La réfraction

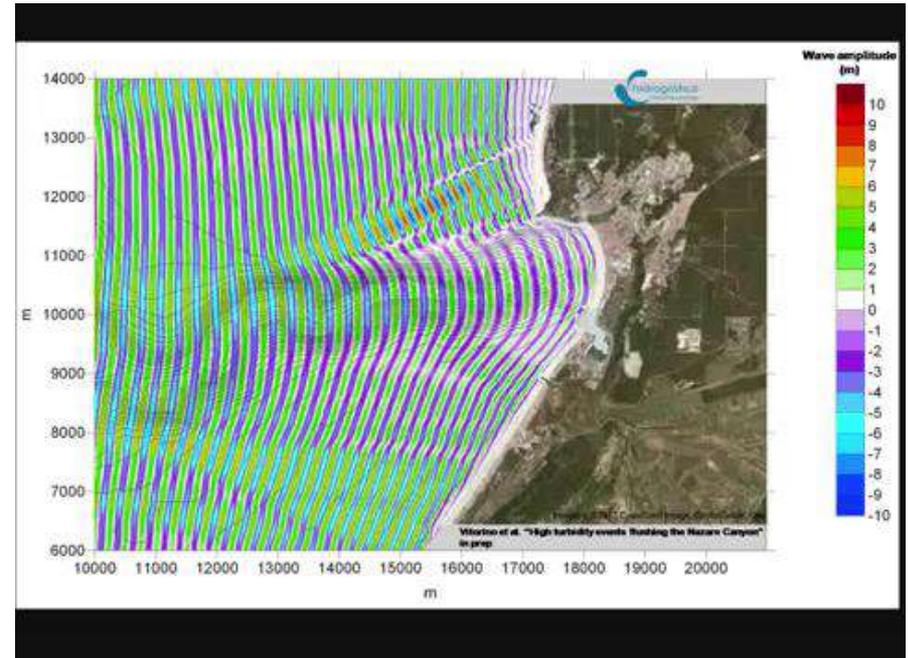
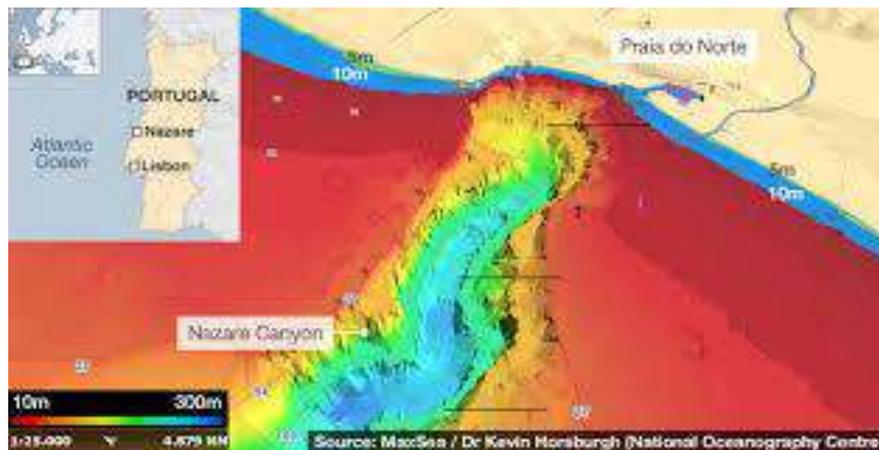
Lorsque la profondeur diminue, la vitesse des vagues diminue également. Elles tendent ainsi à suivre les contours de même profondeur



→ Les vagues convergent donc au niveau des caps/pointes, et divergent dans les baies

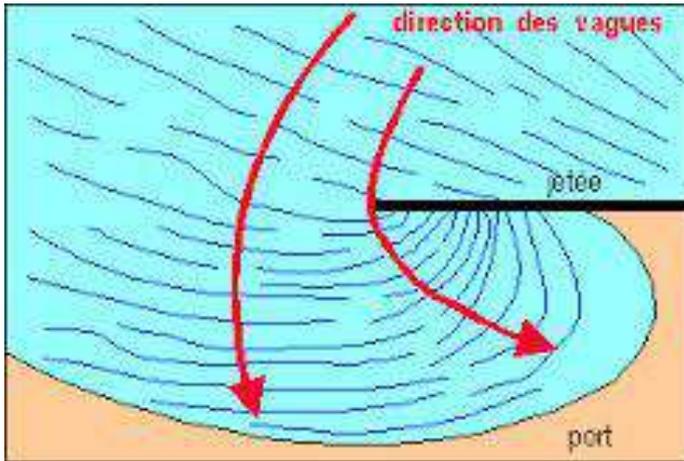
→ Les sédiments sont transportés des zones de forte énergie vers les zones de plus faible énergie

- La réfraction : Exemple du canyon et du cap de Nazaré (Portugal)



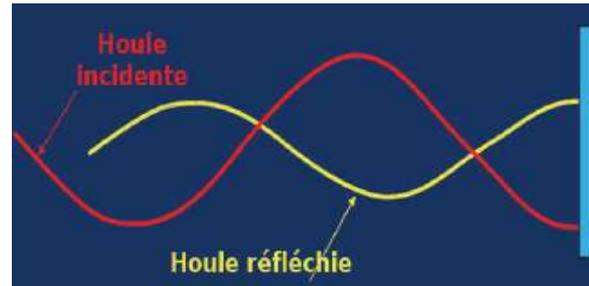
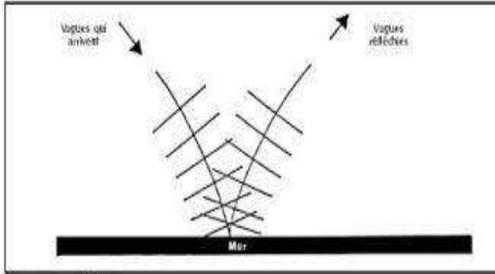
→ Même configuration à Hossegor...

- La diffraction



→ La diffraction a un effet plus local et plus intense que la réfraction

• La réflexion

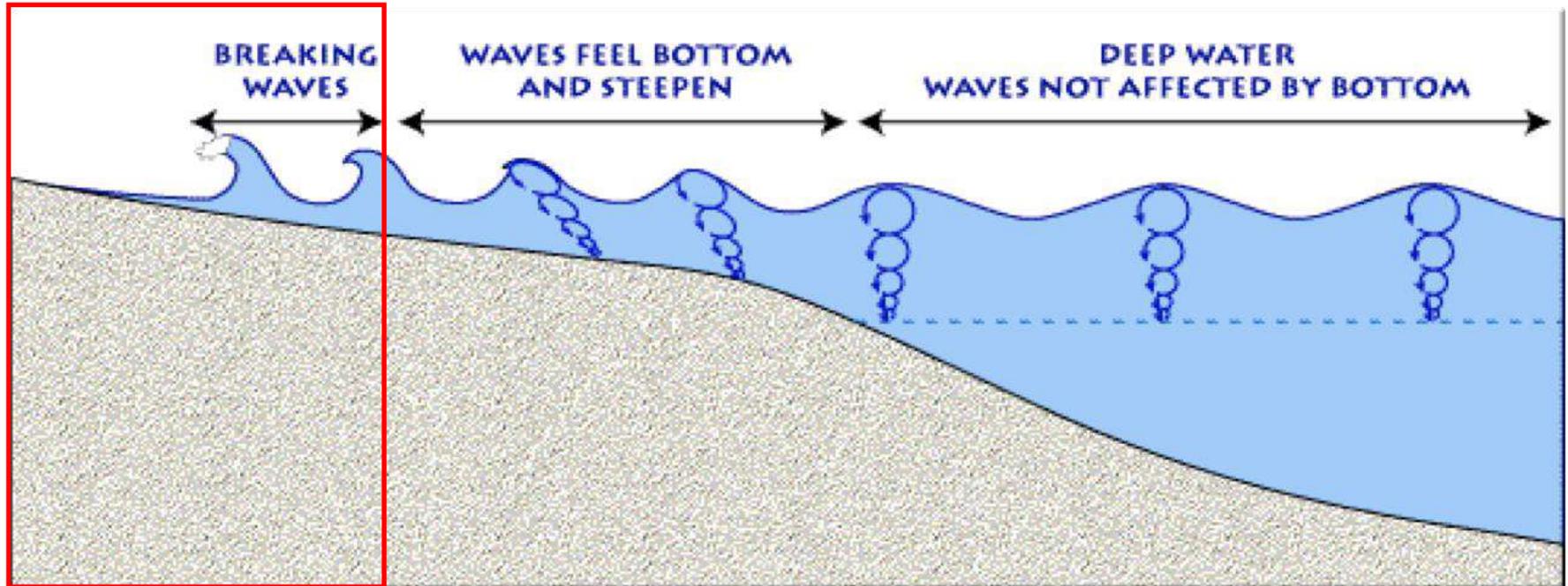


→ La réflexion varie avec:

- la texture
 - la forme
 - la pente
 - la période de la houle incidente
- } des obstacles

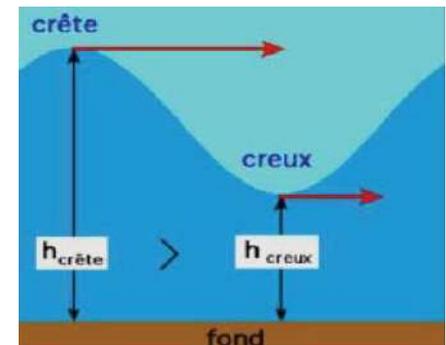


- Mouvement des particules d'eau



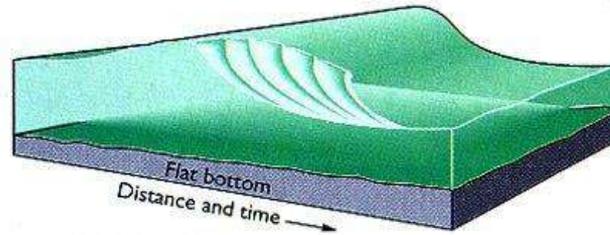
Déferlement quand $H/h < 0.78$: La vitesse de crête devient supérieure à la vitesse du creux, la vague est déstabilisée

→ Le déferlement a un rôle très important pour le transport sédimentaire

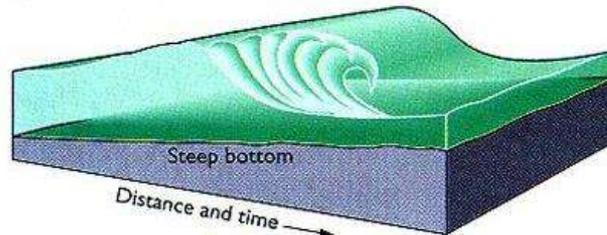


- 3 types de déferlement en fonction de la pente du fond

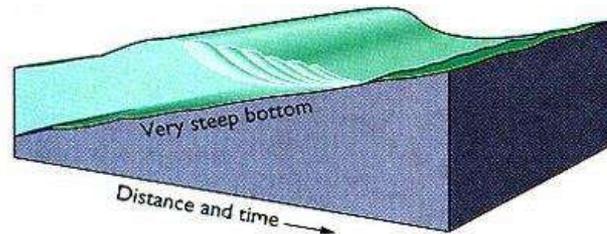
Déferlement glissant :
pente faible



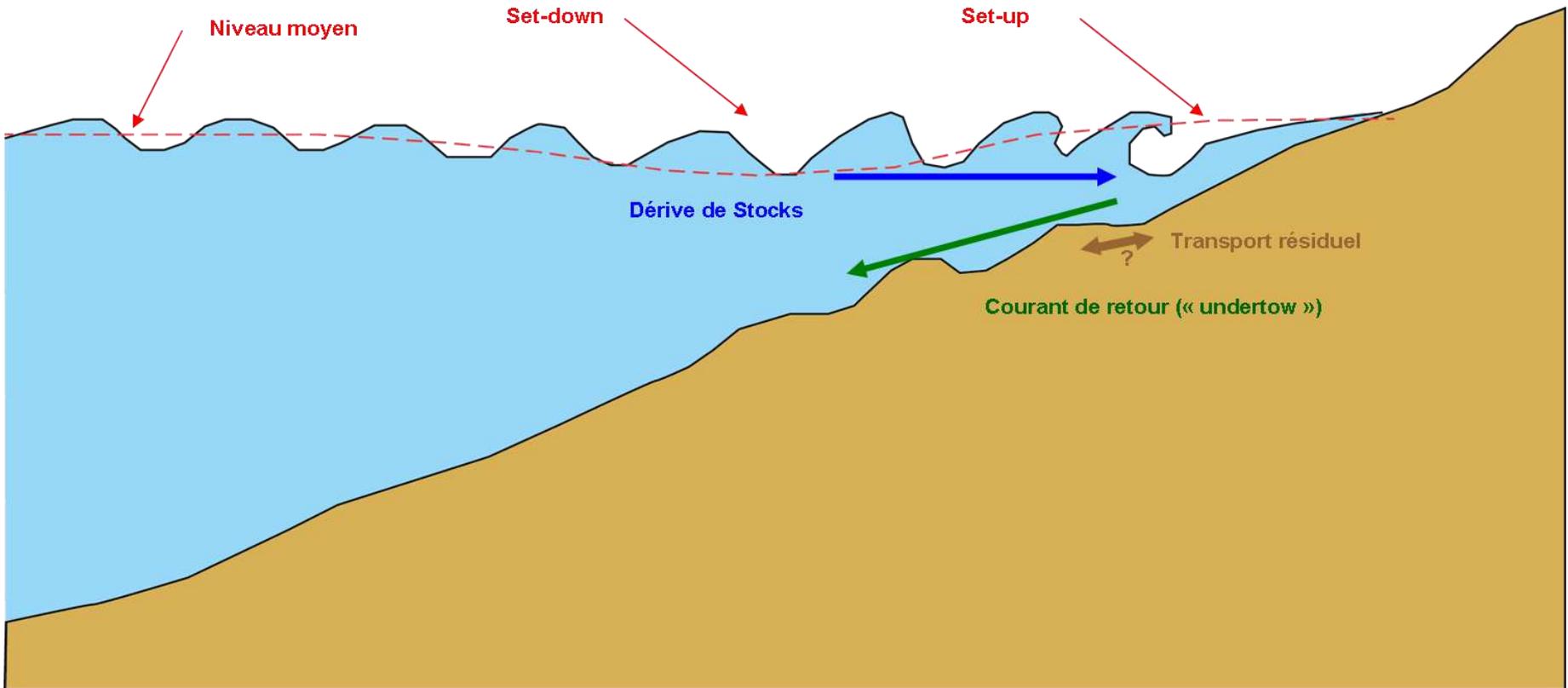
Déferlement plongeant :
pente moyenne



Déferlement gonflant :
forte pente



- Circulation résiduelle : équilibre entre dérive de Stocks et courant de retour



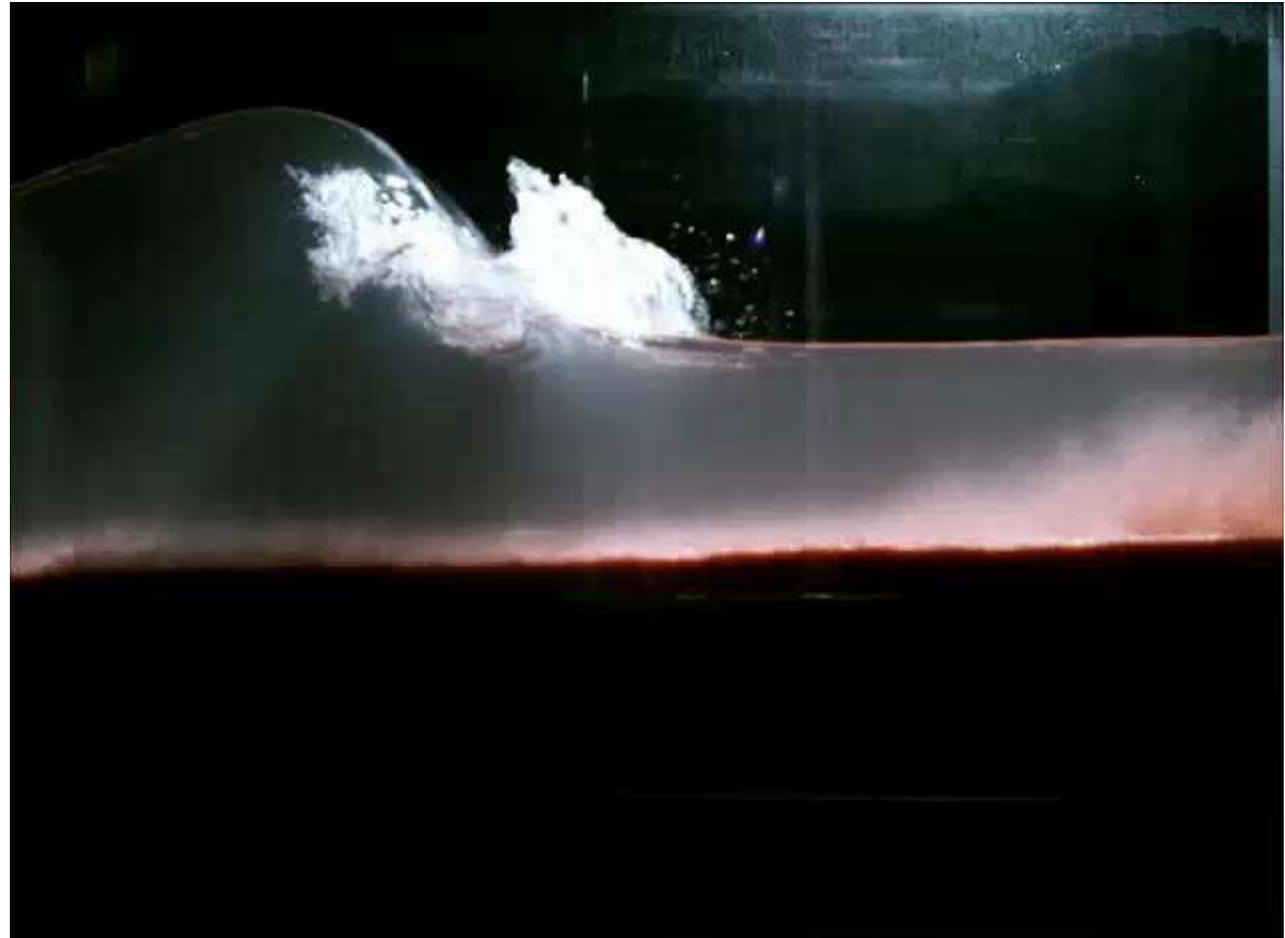
- Mouvement de particules alternativement vers la côte et vers le large

→ Effets du passage de vagues non déferlées sur le fond sédimentaire (canal à houle, LEGI – Grenoble)



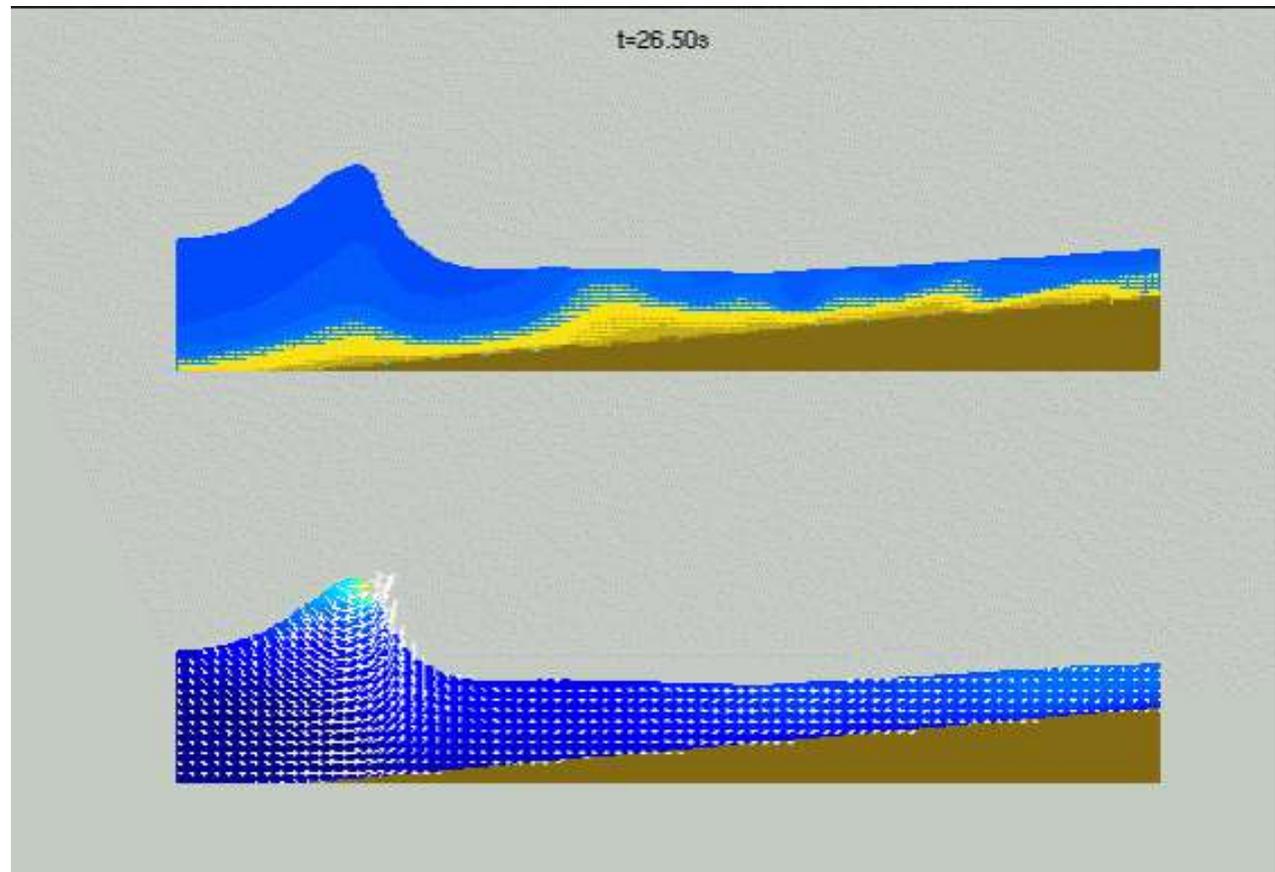
- **Mouvement de particules alternativement vers la côte et vers le large**

→ Effets du déferlement sur le fond sédimentaire (canal à houle, LEGI – Grenoble)

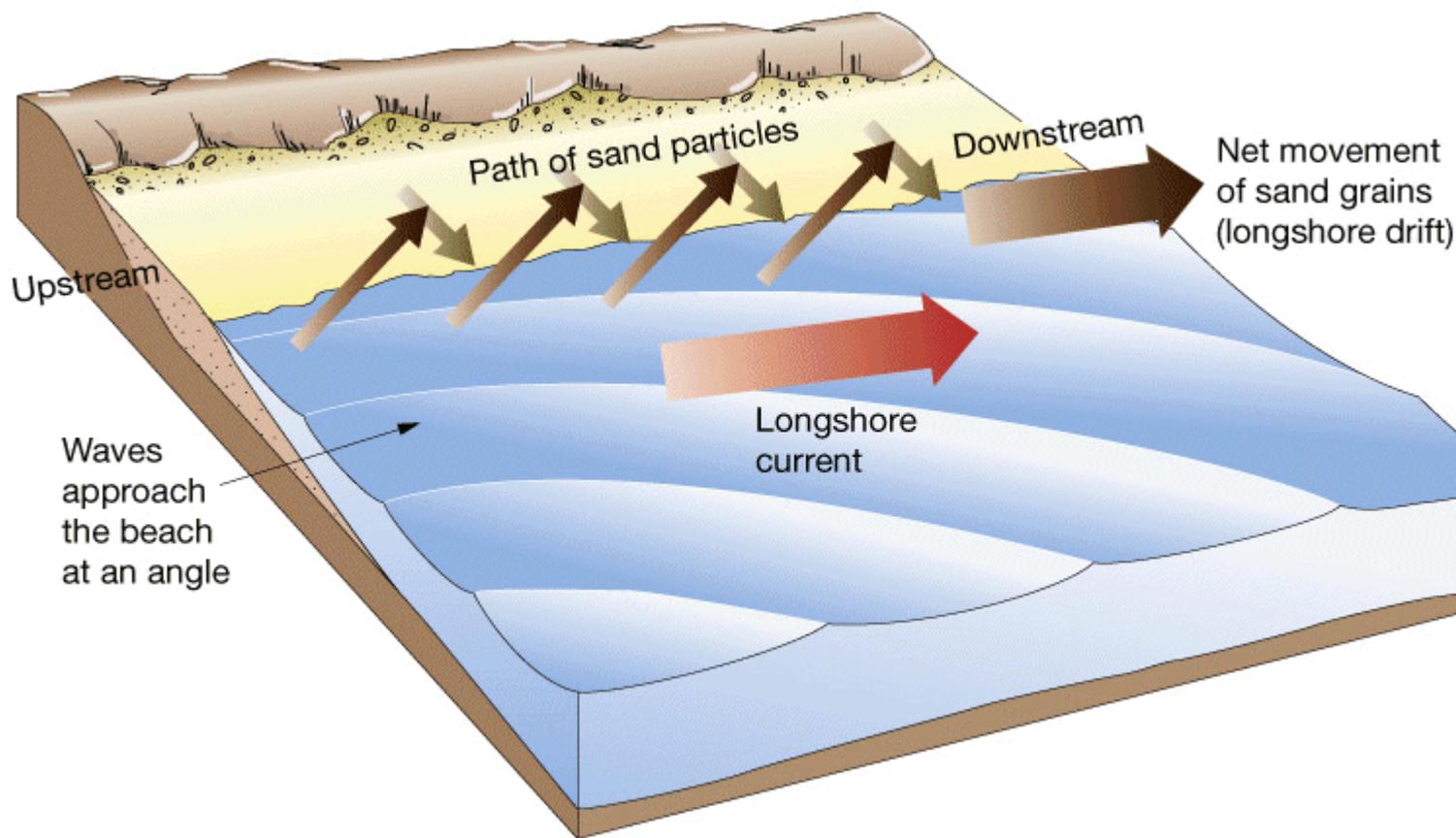


- Mouvement de particules alternativement vers la côte et vers le large

→ Effets du déferlement sur le fond sédimentaire (modélisation numérique)

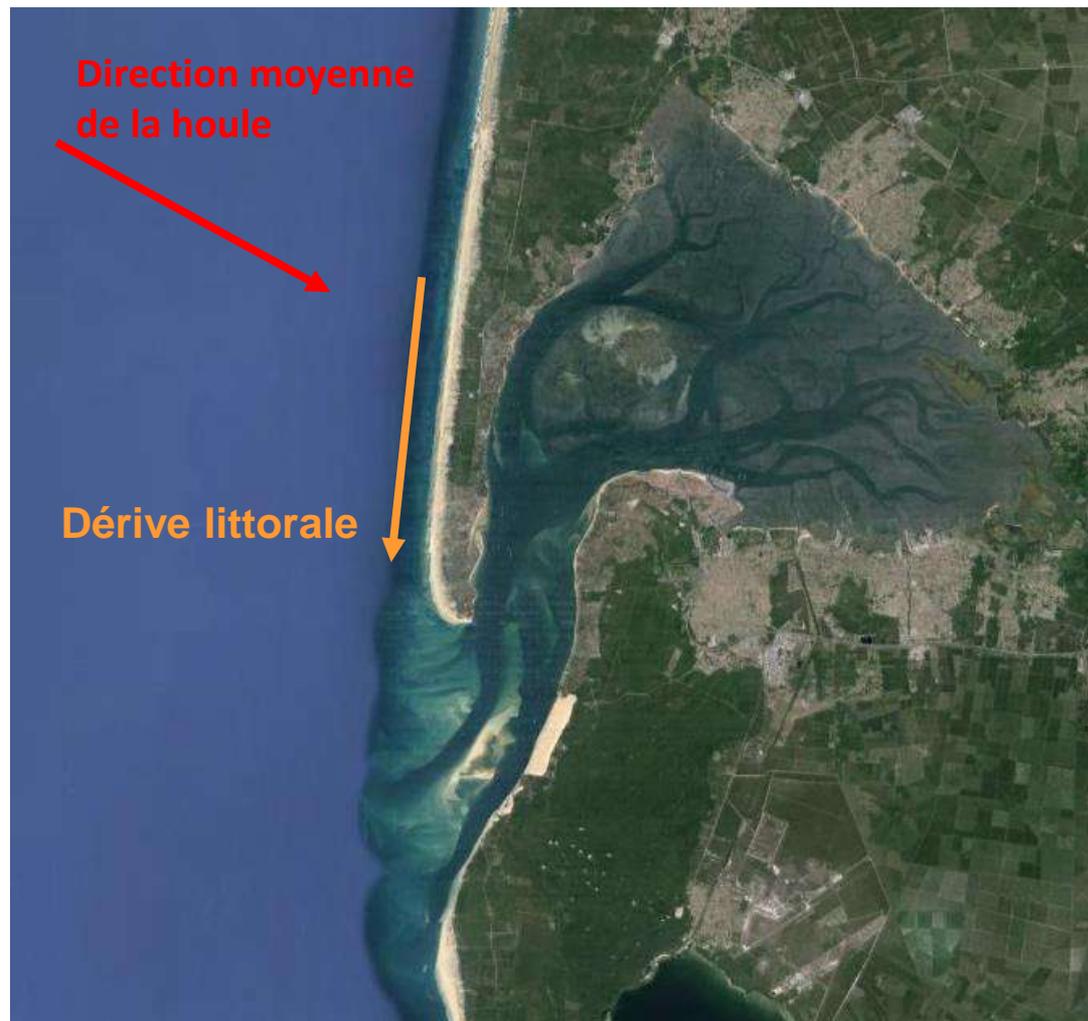


- La dérive littorale



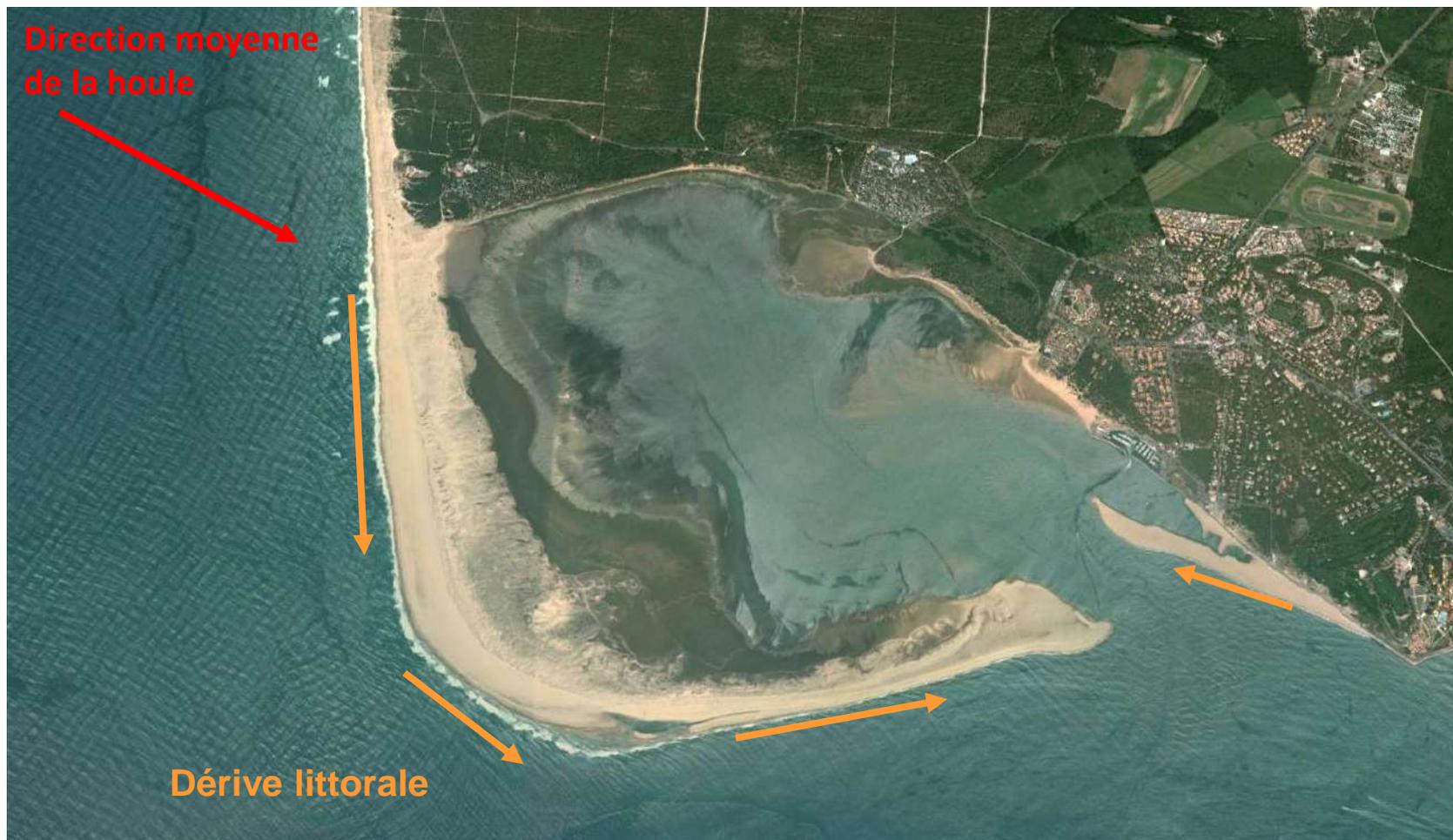
- La dérive littorale : création de flèches sableuses

La flèche sableuse du Cap Ferret



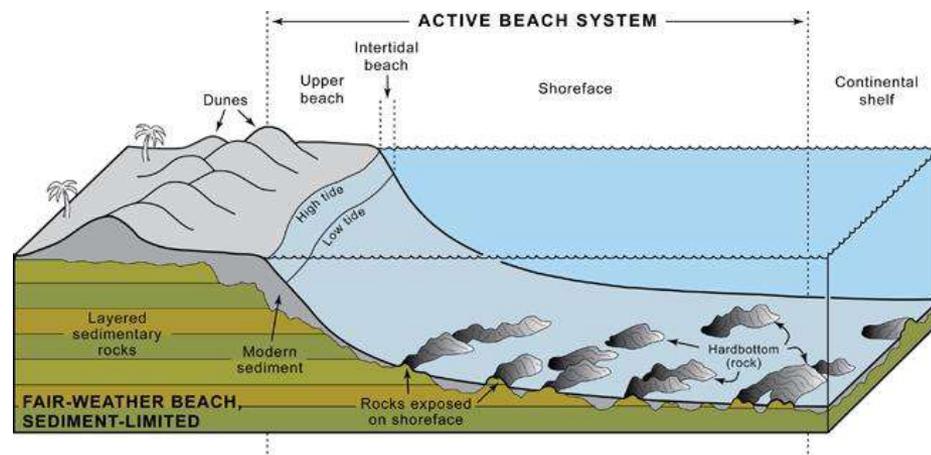
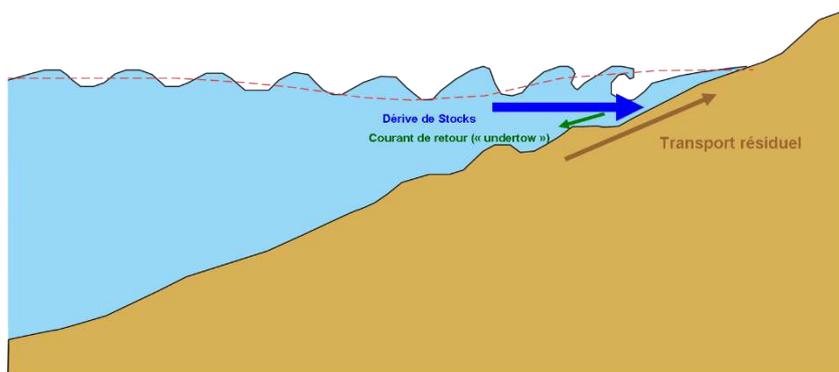
- La dérive littorale : création de flèches sableuses

La flèche sableuse de La Coubre



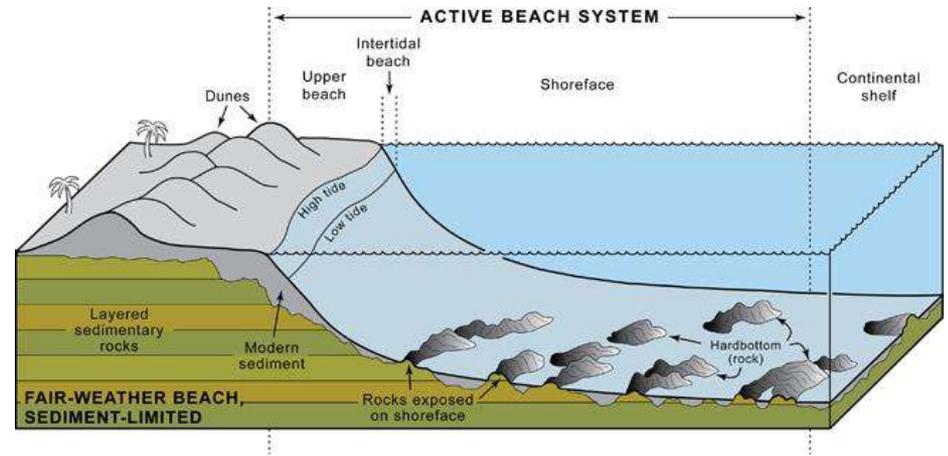
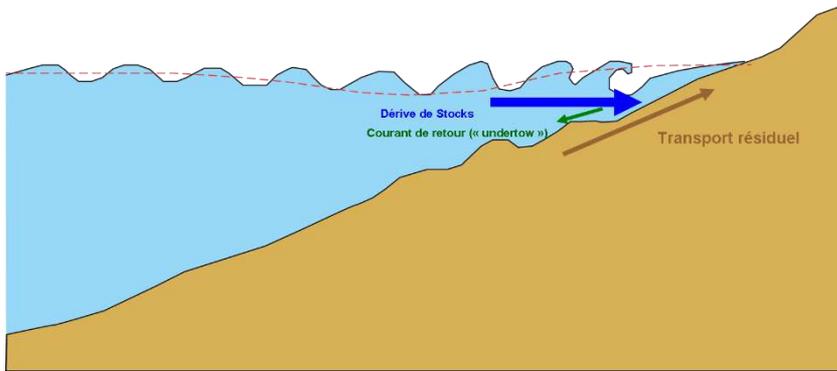
- Variations saisonnières : Effet des tempêtes

- Houle faible (beau temps)

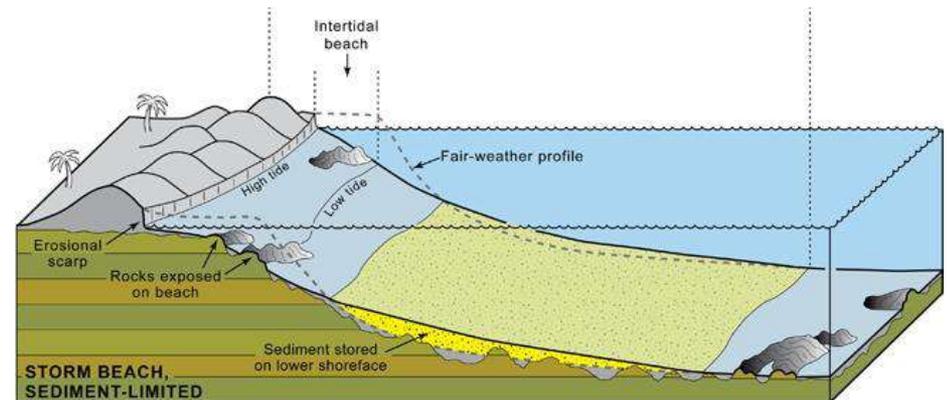
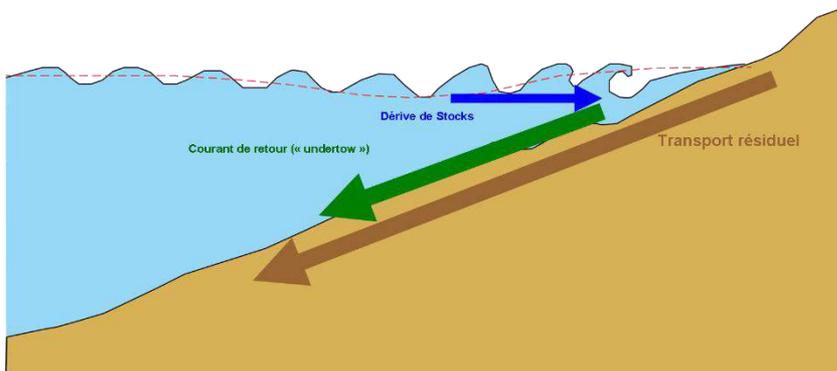


- Variations saisonnières : Effet des tempêtes

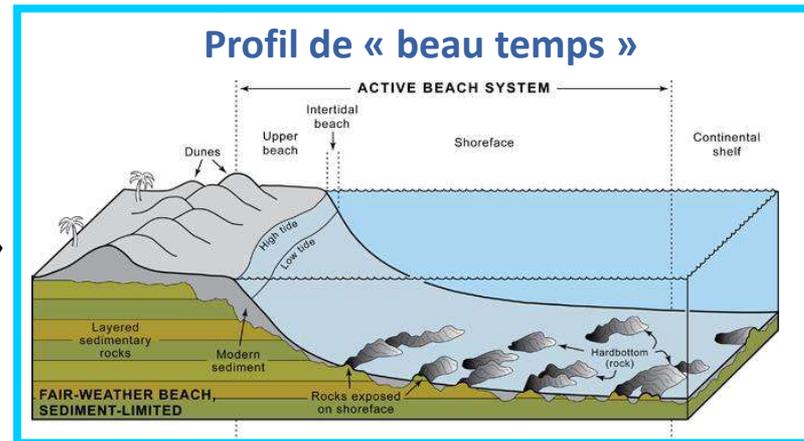
- Houle faible (beau temps)



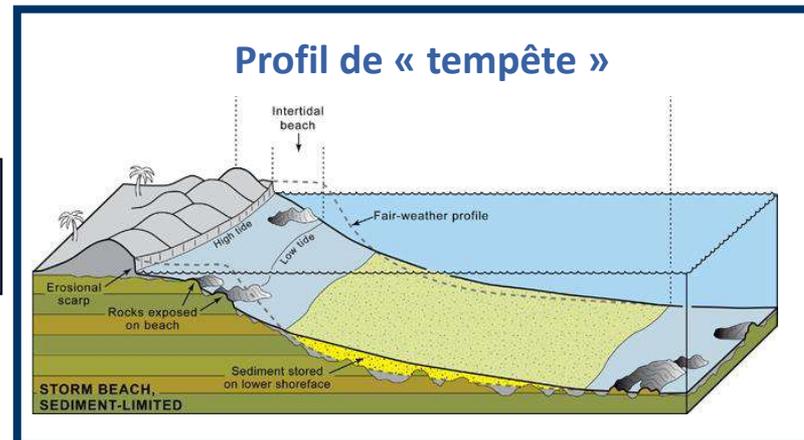
- Houle forte (tempête)



- Variations saisonnières : Échelles de temps passage de changement du profil de plage

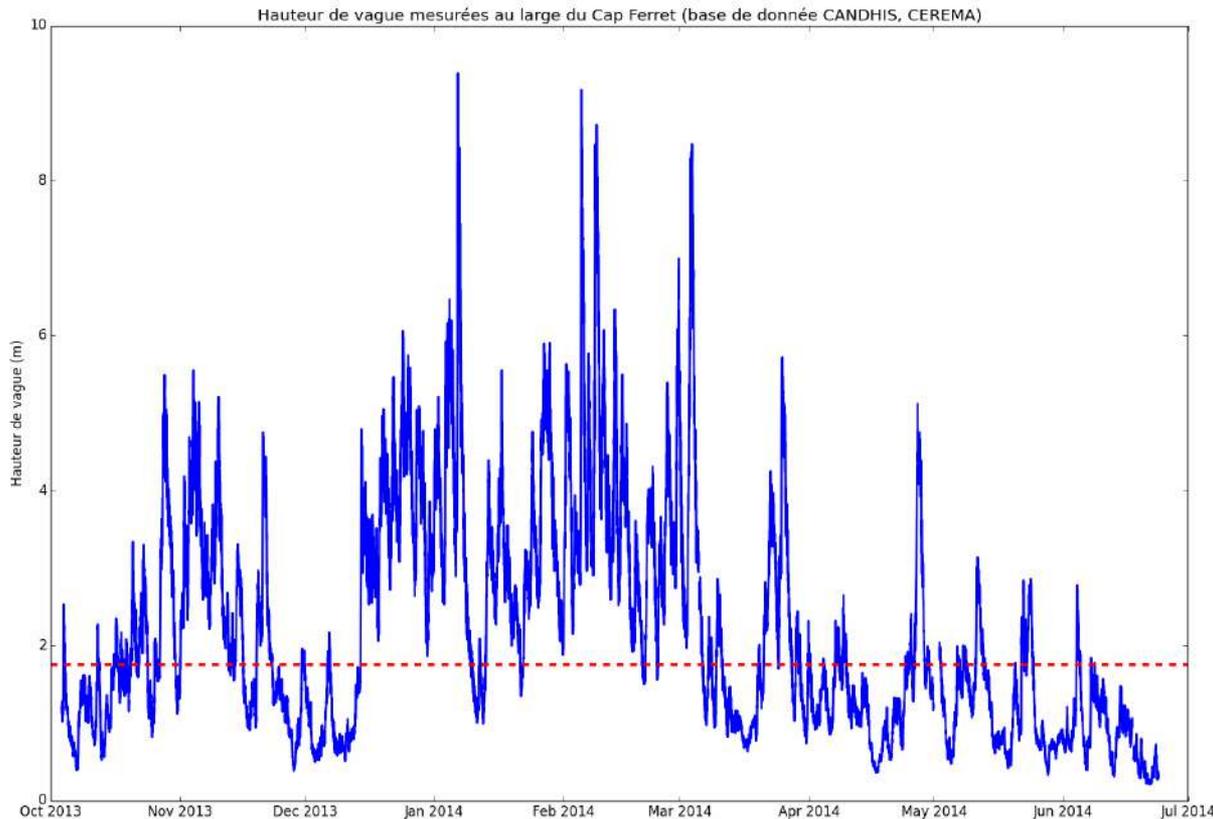


~15/20 jours



~12/24 heures

- Variations saisonnières : Tempêtes 2013-2014

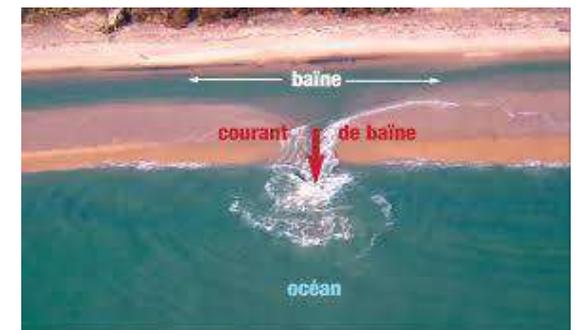
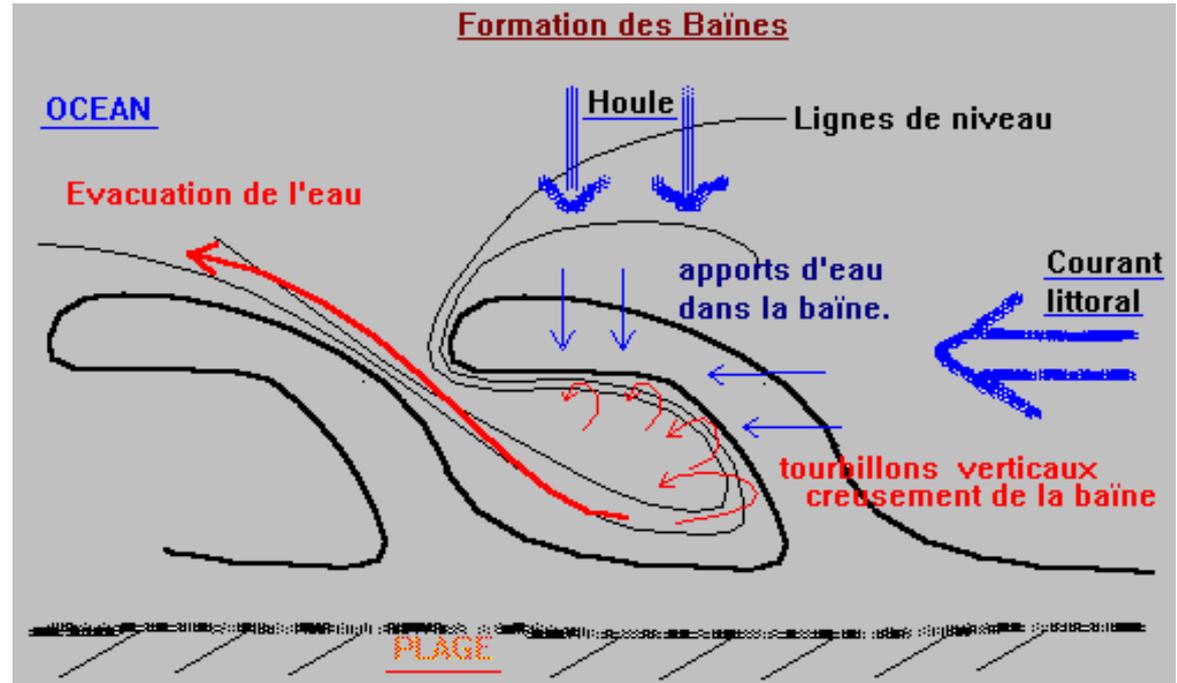
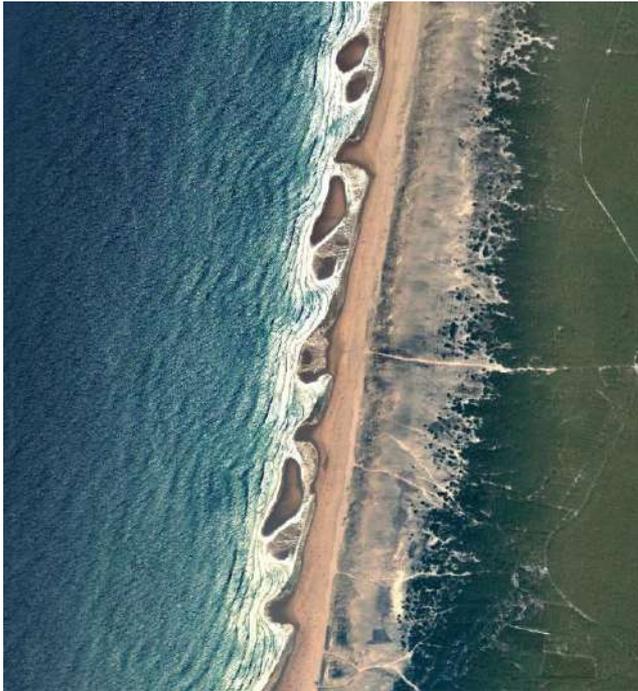


- Nombreuses tempêtes d'intensité importante

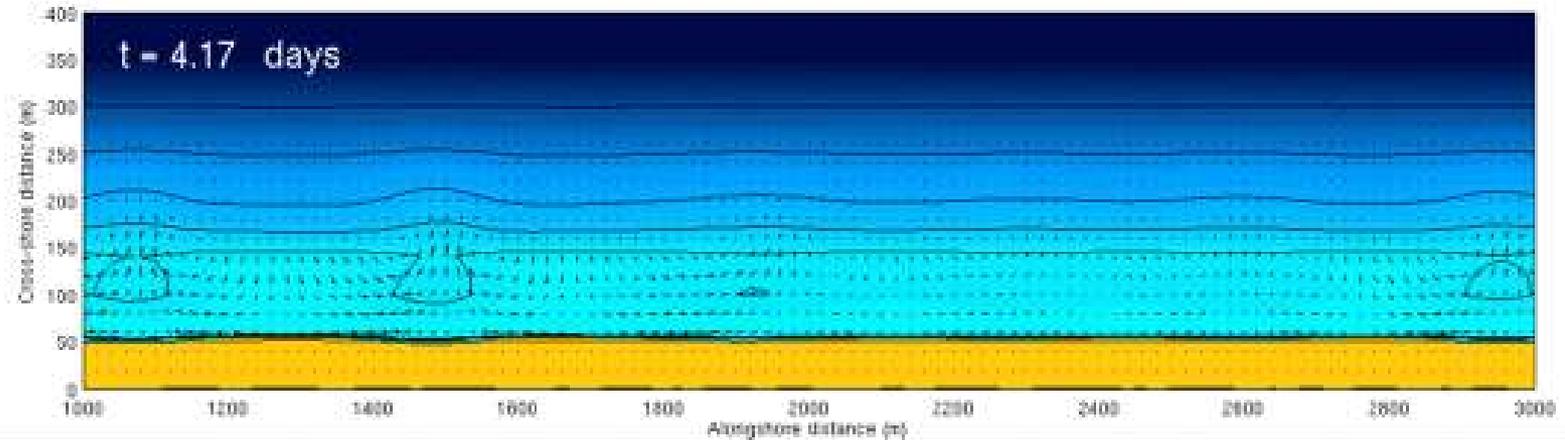
- Forte houle même durant les (rares) périodes de beau temps

→ Les plages n'ont pas eu le temps de se reconstituer entre chaque tempête ou fortes houles.

- Variations saisonnières : Développement des systèmes barre-baïne (par houle faible)



- Variations saisonnières : Développement des systèmes barre-baïne (par houle faible)

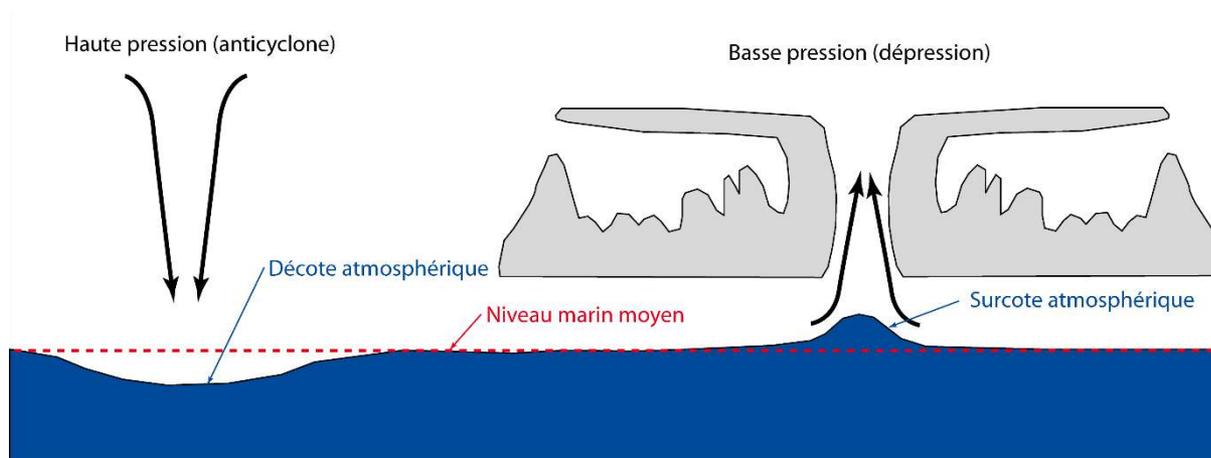


**Modélisation hydro-sédimentaire de formation de barre/baïnes
(Bruno Castelle, <http://www.epoc.u-bordeaux.fr/indiv/Castelle/>)**

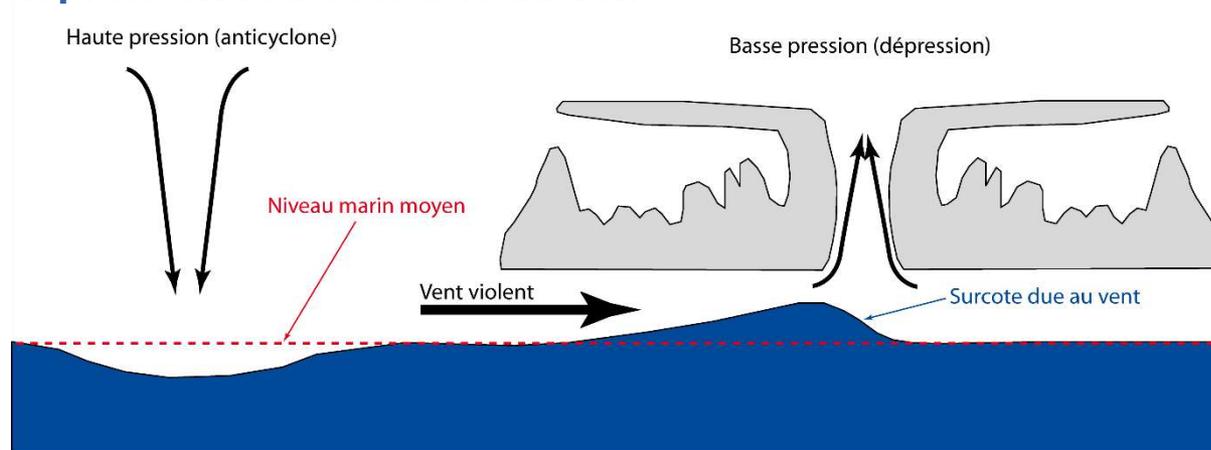


D'où viennent les surcotes ?

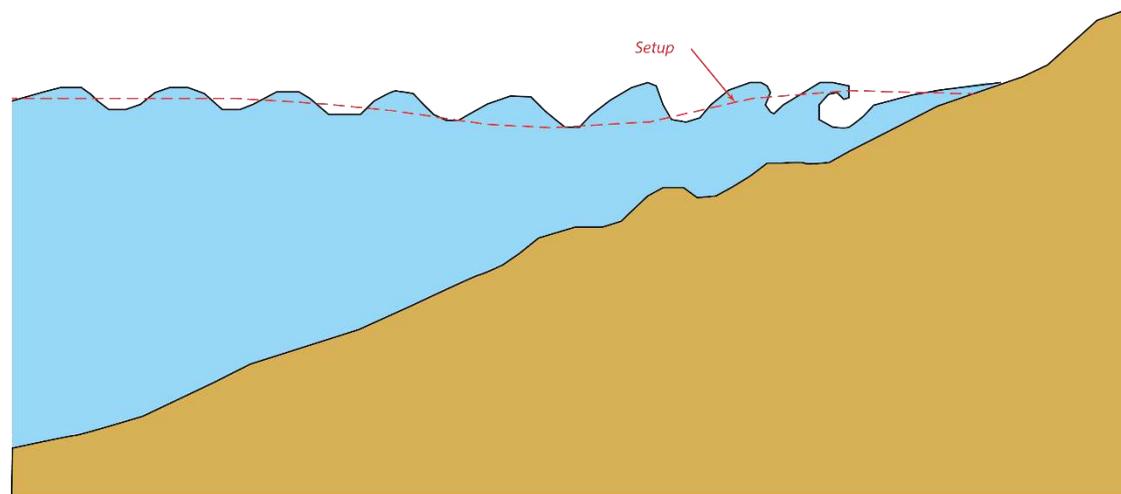
- Effets de la dépression : surcote atmosphérique (principe du baromètre inverse)



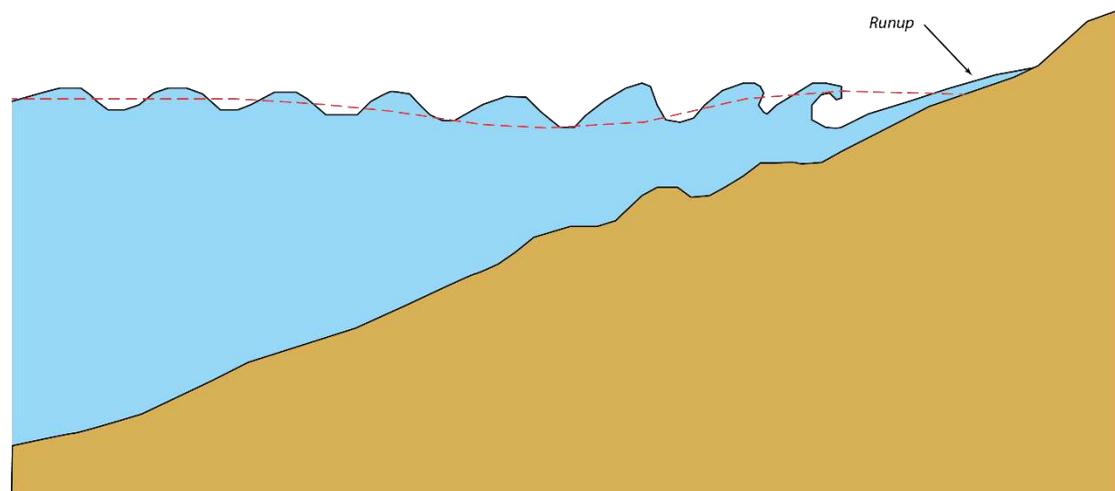
- Effets de la dépression : surcote due au vent



- Effets des vagues : le *setup*

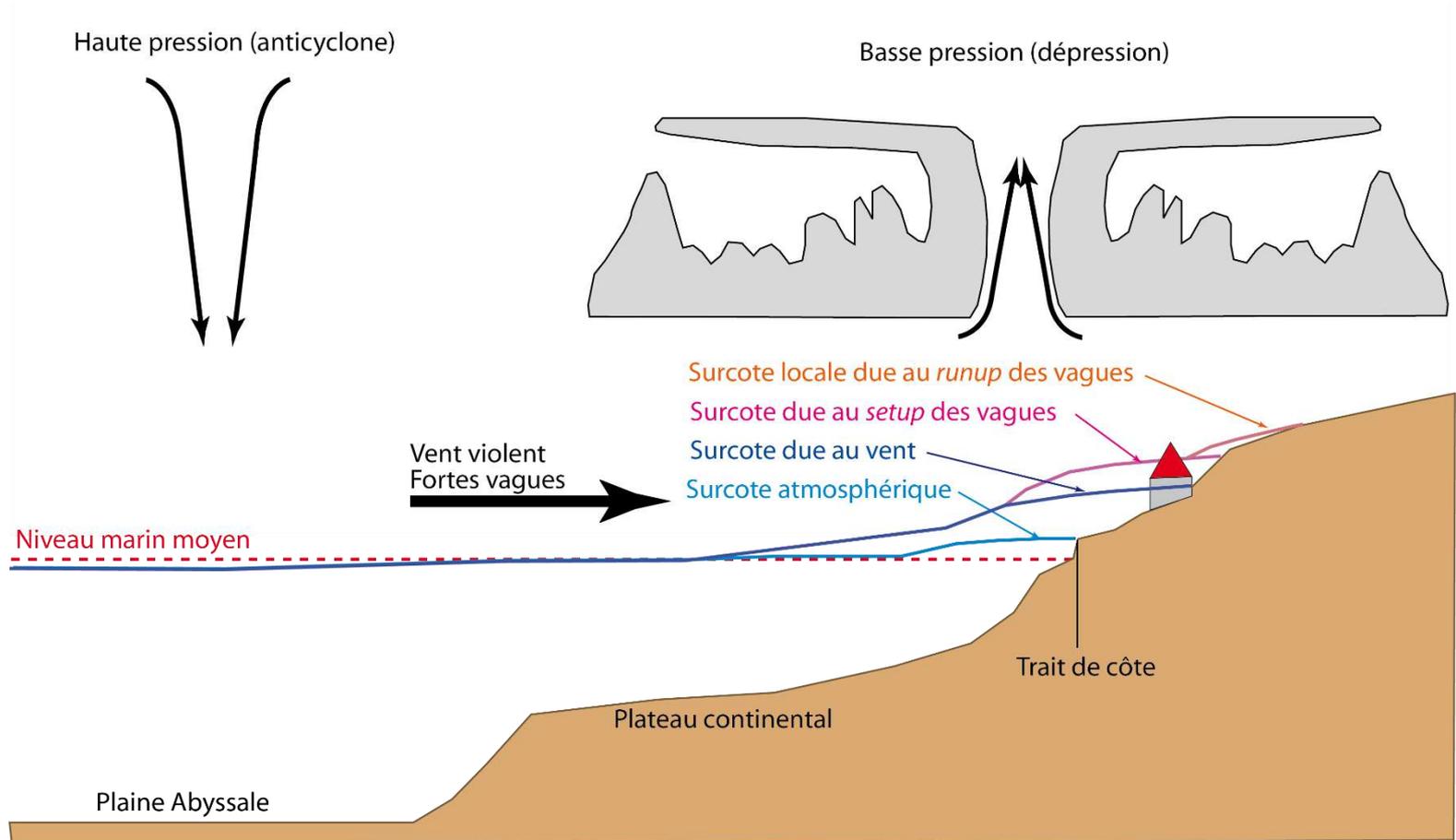


- Effets des vagues : le *runup*



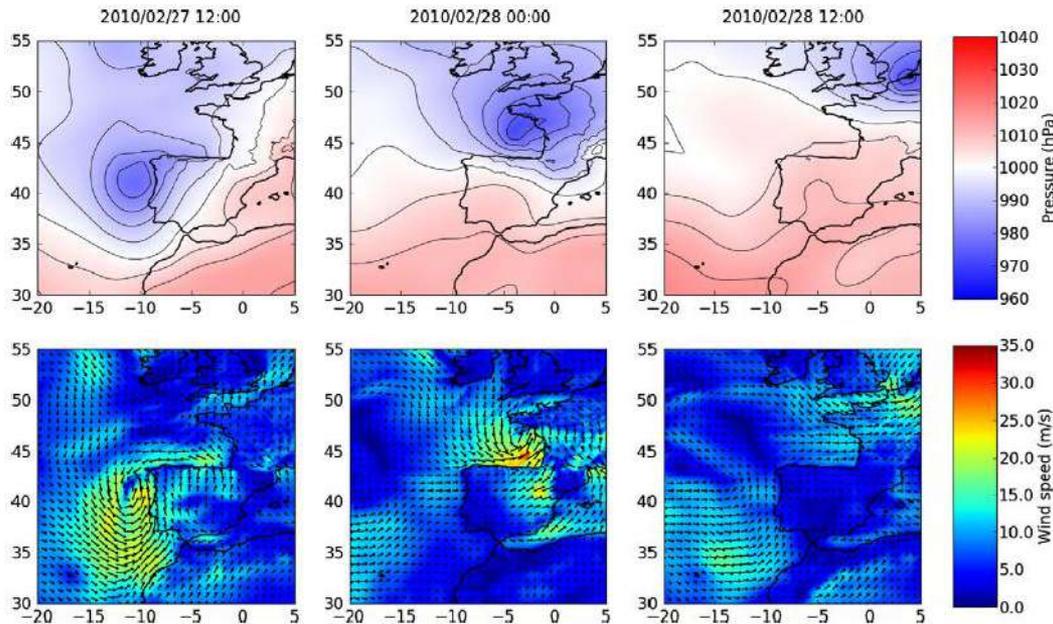
- Surcote totale

→ Les surcotes atmosphériques et dues au vent sont amplifiées à la côte par les faibles profondeurs



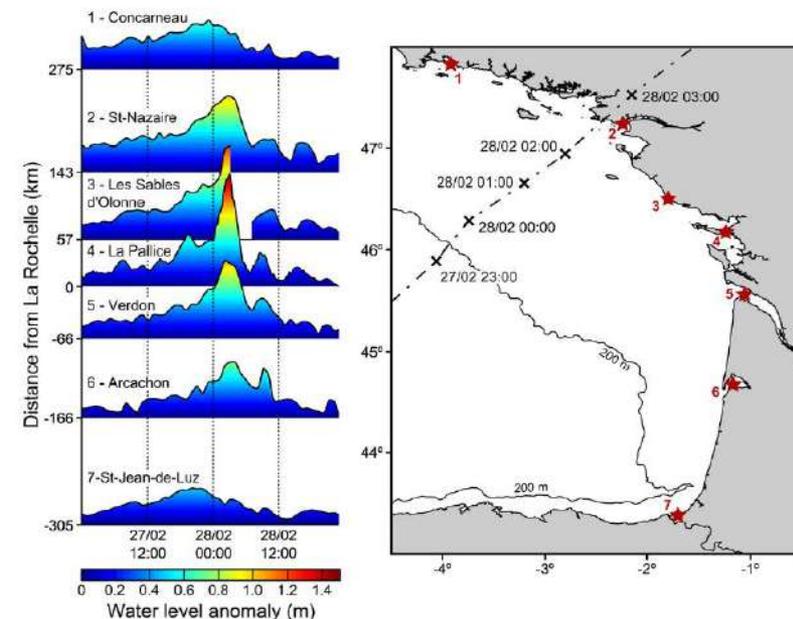
- Exemple : tempête Xynthia (27-28 février 2010)

(d'après Bertin et al., 2012a)



← Cartes de pression atmosphérique et vitesse du vent au passage de la tempête

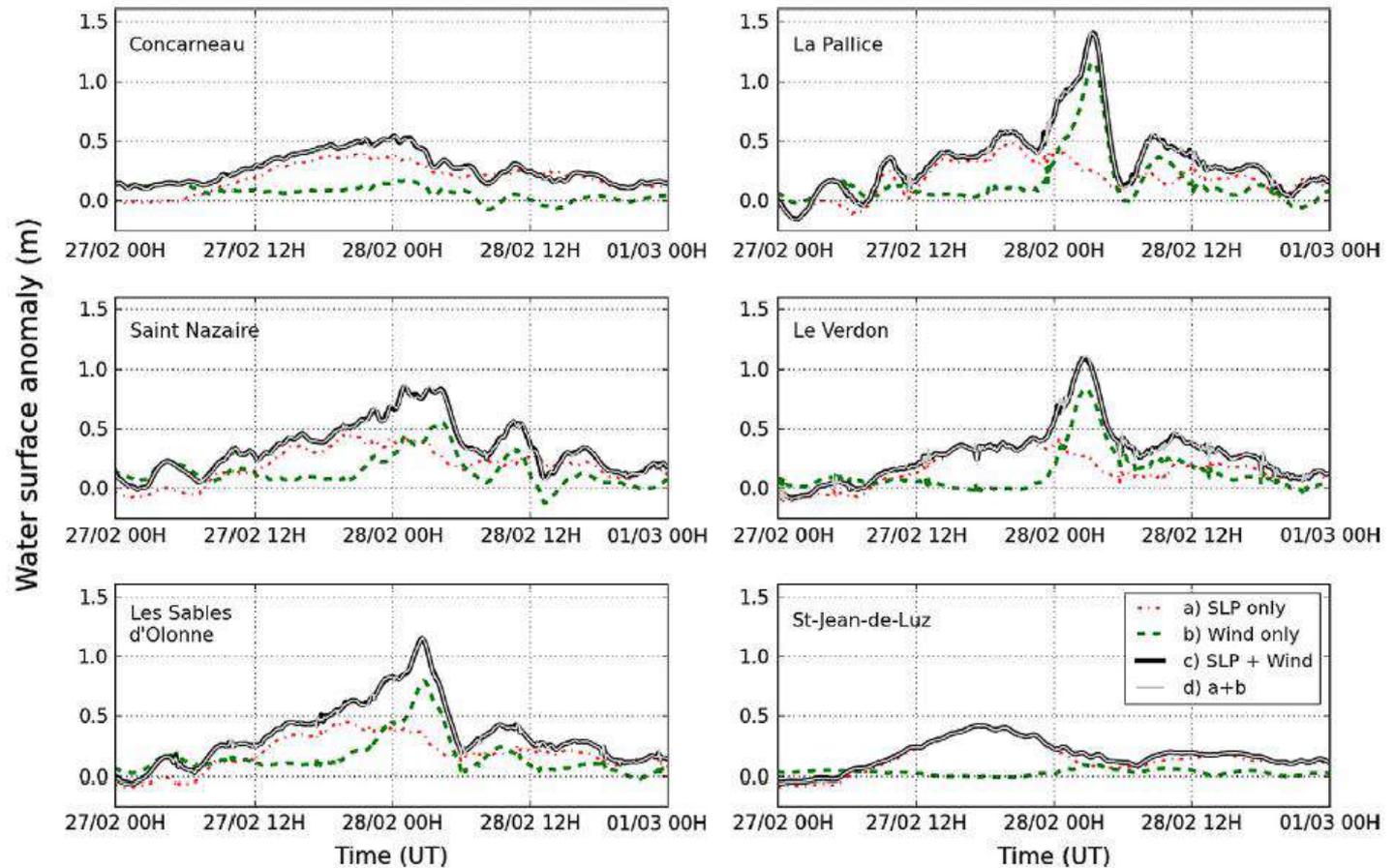
Surcotes mesurées par différents marégraphes au passage de la tempête →



- Exemple : tempête Xynthia (27-28 février 2010)

(d'après Bertin et al., 2012a)

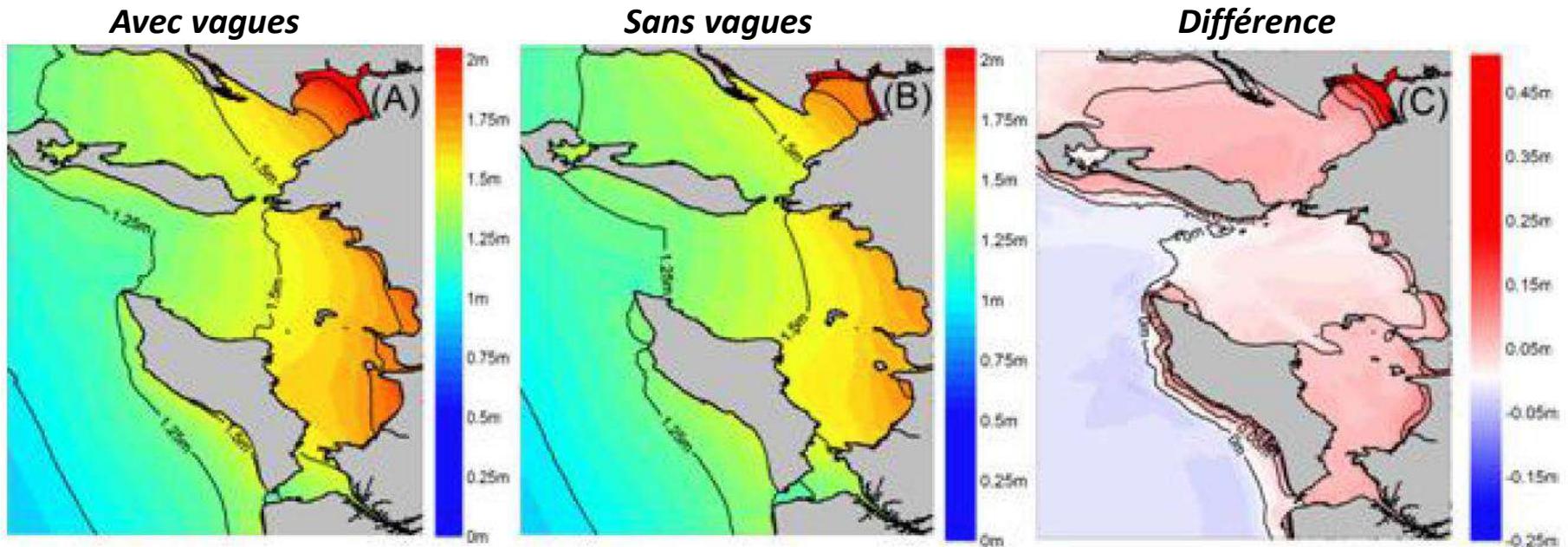
Contributions relatives de la pression et du vent (modélisation numérique) :



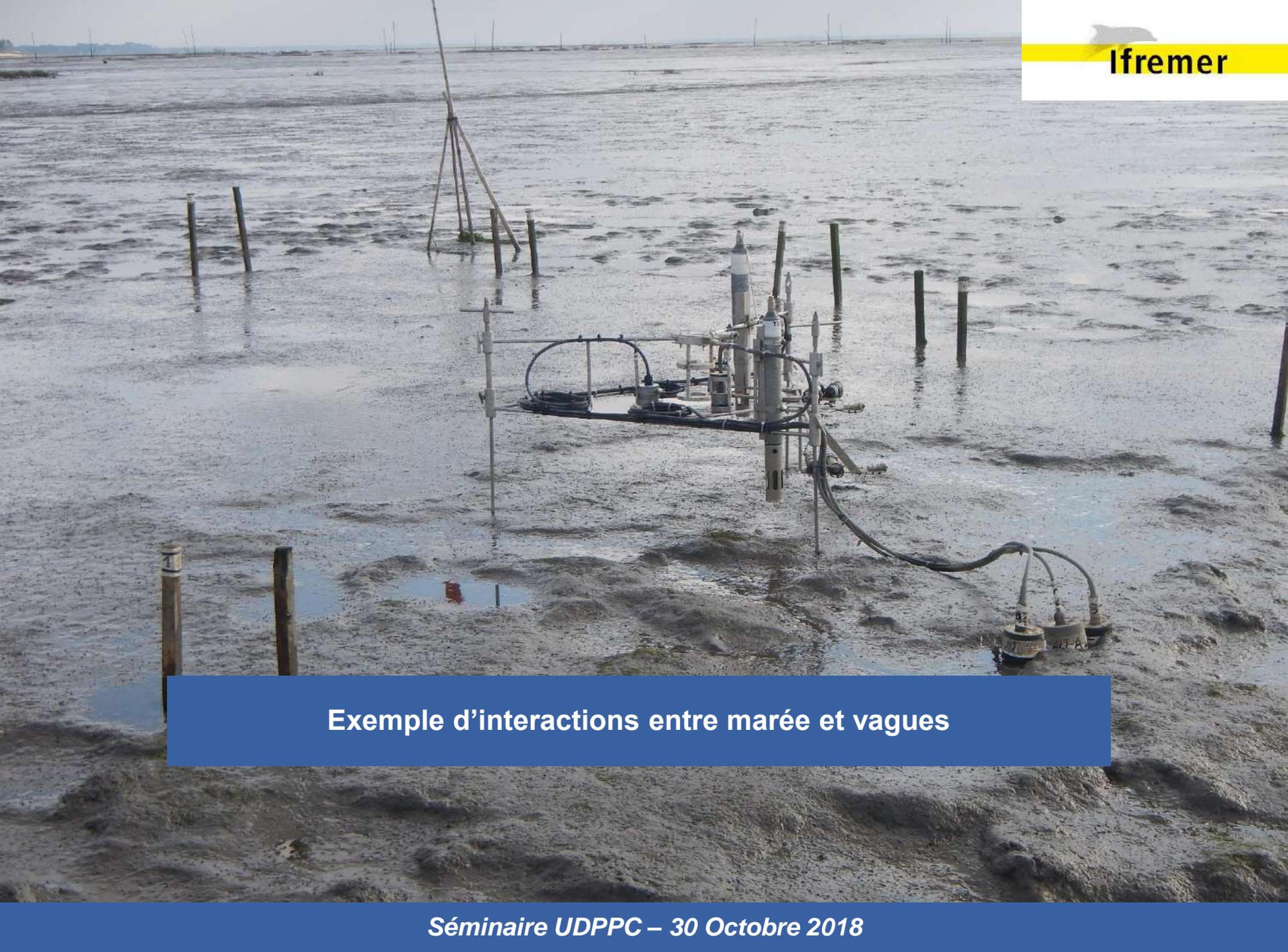
- Exemple : tempête Xynthia (27-28 février 2010)

(d'après Bertin et al., 2012b)

Contributions du *setup* induit par les vagues (modélisation numérique) :

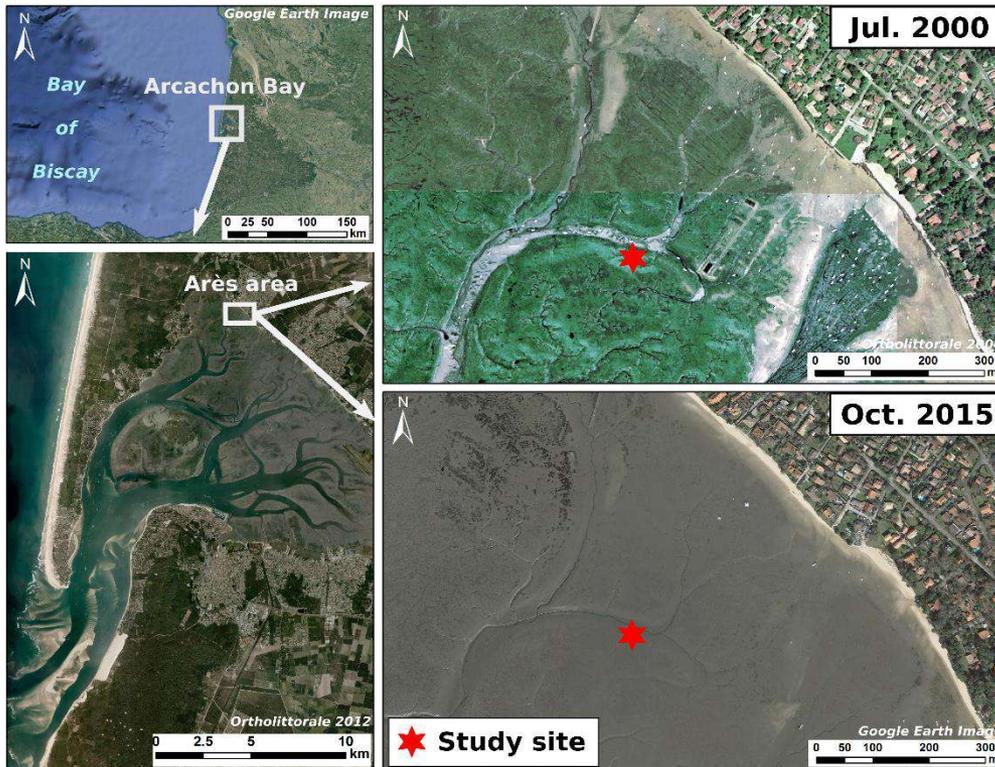


→ Le *setup* induit par les vagues atteint localement 0.4 m au niveaux des littoraux directement exposés à la tempête



Exemple d'interactions entre marée et vagues

- Effets de l'asymétrie sur le transport sédimentaire estuarien: ex. Bassin d'Arcachon

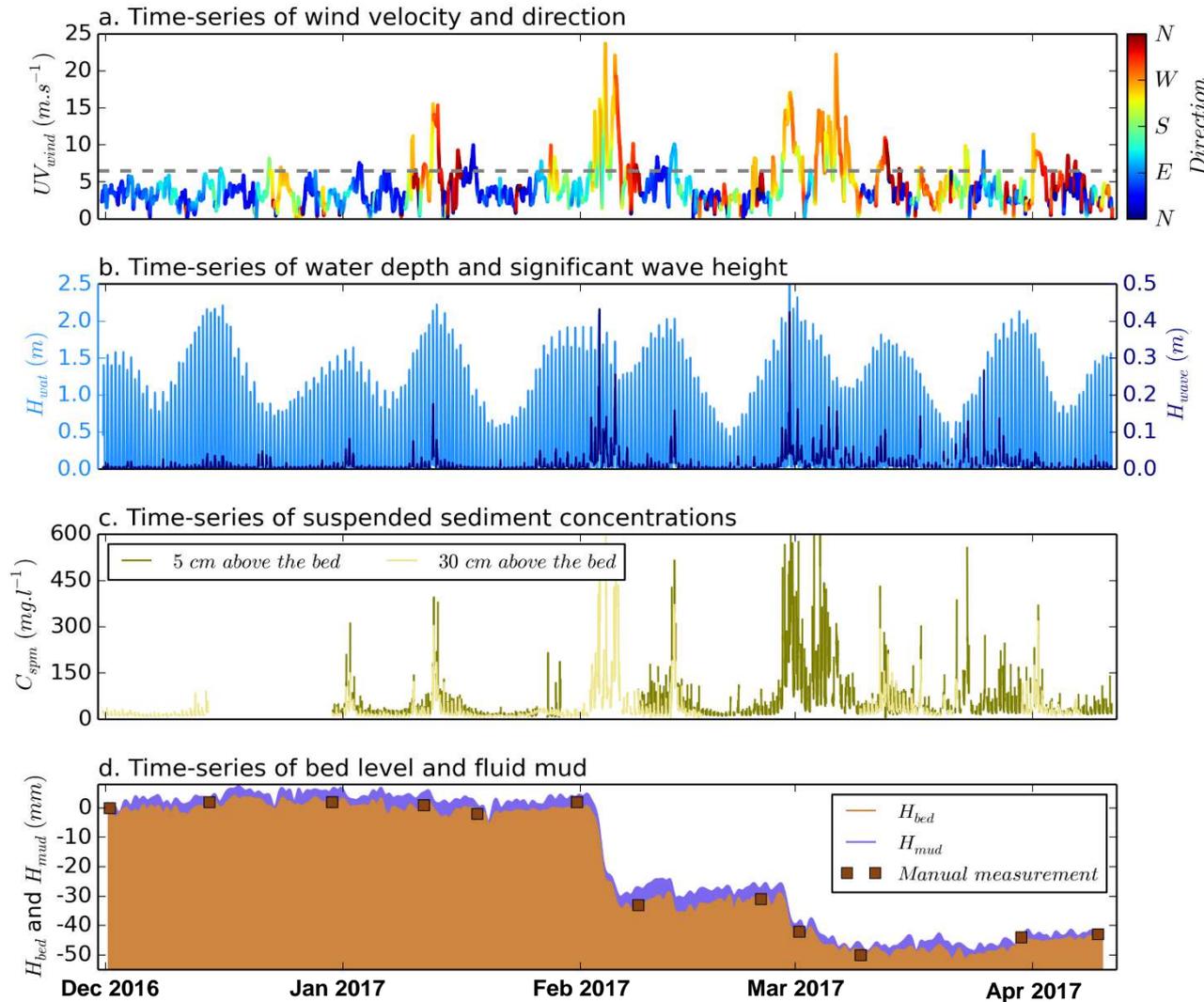


→ Mesures réalisées sur un estran de la partie Nord du Bassin d'Arcachon



(Ganthy et al., 2018)

Exemple d'interactions entre marée et vagues



- Deux tempêtes majeures (vent > 20 m.s⁻¹)

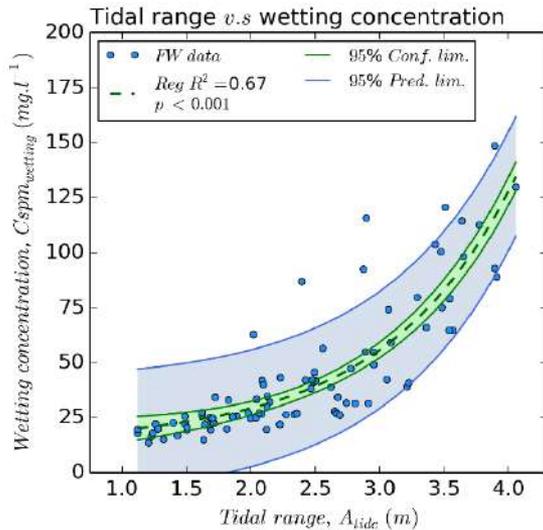
- Vagues jusqu'à 0.5 m

- Concentration dépassant les 600 mg.l⁻¹ (10 fois le niveau moyen)

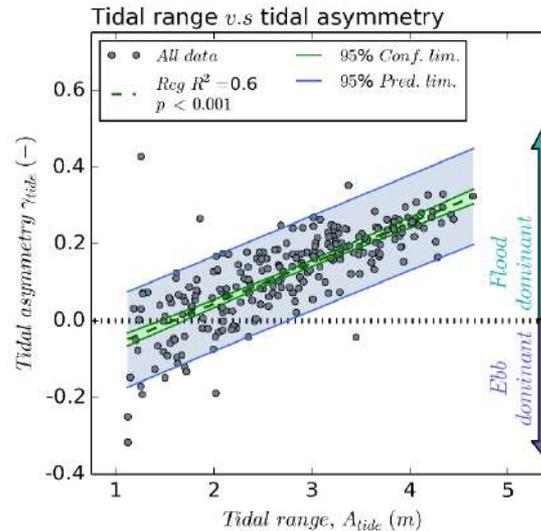
- Période calme : tendance à l'accrétion
- Tempête : forte érosion

(Ganthy et al., 2018)

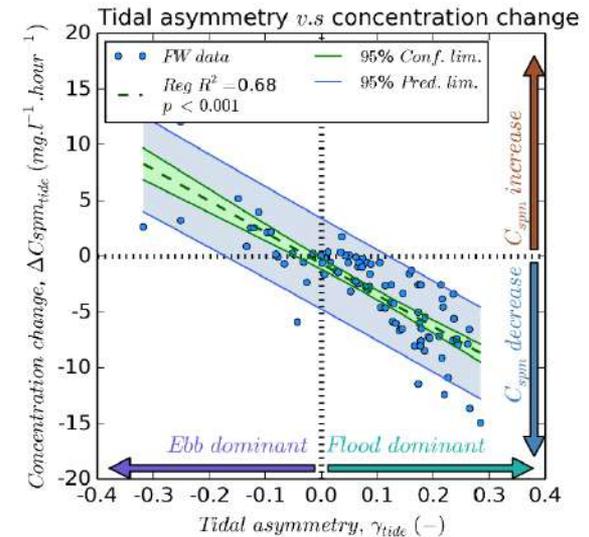
• Effets des marées



→ Les concentrations de sédiments en suspension augmentent lorsque le marnage augmente : plus d'apports



→ La dominance du flot augmente lorsque le marnage augmente, ce qui explique l'augmentation des apports sédimentaires

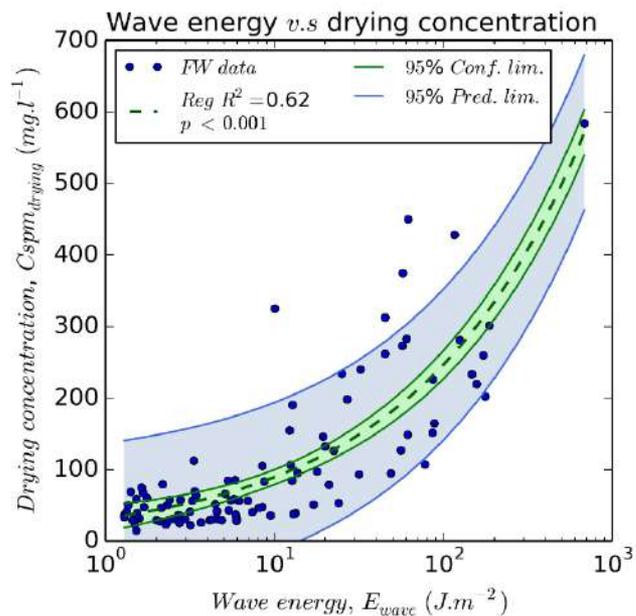


→ Plus de dépôt lorsque la dominance du flot augmente

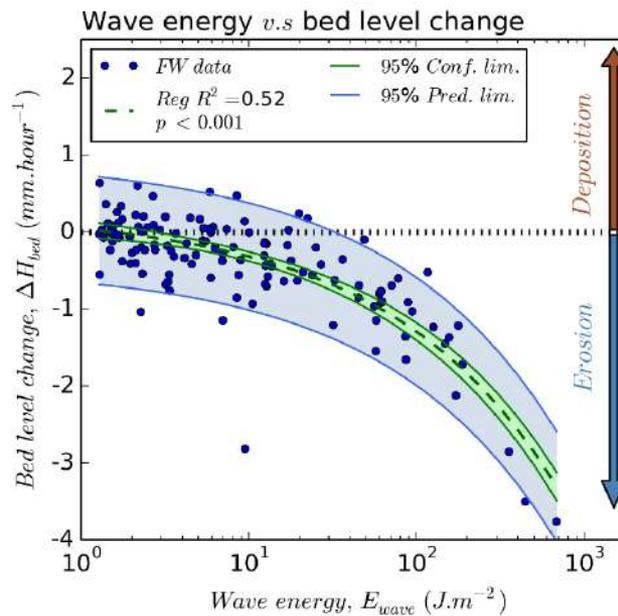


Les marées de vives-eaux tendent à apporter plus sédiments ; ces sédiments ont tendance à se déposer conduisant à de l'accrétion

• Effets des vagues



→ Les concentrations de sédiments en suspension augmentent avec l'énergie des vagues

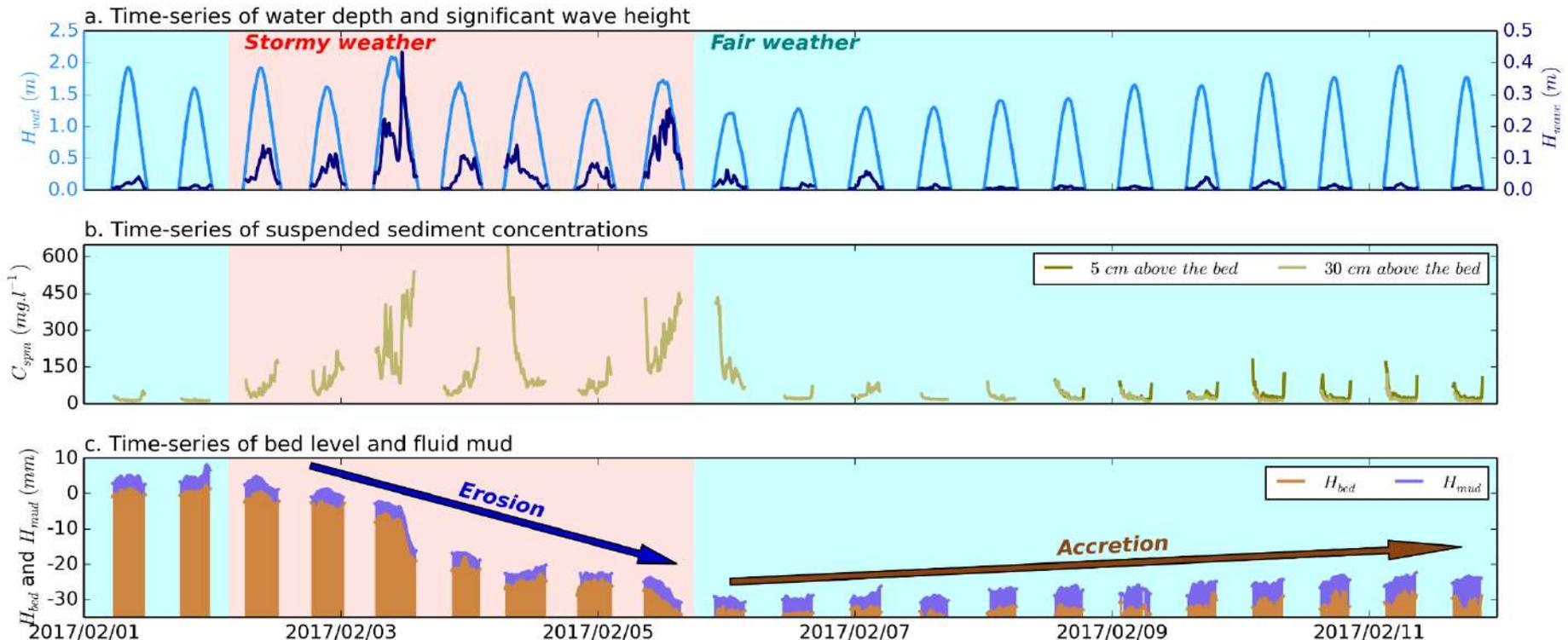


→ L'érosion augmente avec l'énergie des vagues



Les vagues conduisent à de l'érosion locale

• Effets combinés des marées et des vagues



➔ Les processus liés à la marée jouent sur le moyen-terme (mois, années) tandis que les processus liés aux vagues jouent sur le court-terme (jour).

➔ La dynamique long-terme dépend de l'alternance entre périodes calmes et tempêtes (fréquence, durée, intensité, ...).

Merci de votre attention



Articles scientifiques :

- Bertin, X., Bruneau, N., Breilh, J.-F., Fortunato, A.B., et Karpytchev, M., **2012a**. Importance of wave age and resonance in storm surges : The case Xynthia, Bay of Biscay. *Ocean Modelling*, **42:16-30**.
- Bertin, X., Li, K., Roland, A., Breilh, J.-F., et Chaumillon, E., **2012b**. Contribution des vagues dans la surcote associée à la tempête Xynthia, février **2012**. *Paralia CFL Eds, XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Cherbourg, 12-14 juin 2012*.
- Chamley, H., **2002**. Environnements géologiques et activités humaines. *Vuibert Eds*.
- Moore, R.D., Wolf, J., Souza, A.J., Flint, S.S., **2009**. Morphological evolution of the Dee Estuary, Eastern Irish Sea, UK: A tidal asymmetry approach. *Geomorphology*, **103:588-596**.
- Soulsby, R., **1997**. Dynamics of marine sand. Thomas *Telford Publications Eds., 245 pp*.

Rapport/Autre :

- Le Hir, P., **2006**. Aide mémoire de dynamique sédimentaire. *Rapport Ifremer*.

Internet :

<http://www.ifremer.fr/lpo/cours/maree/>

http://www.ifremer.fr/lpo/cours/vagues_ondes/

<http://www.shom.fr/les-services-en-ligne/predictions-de-maree/presentation/>

<http://www.shom.fr/les-activites/activites-scientifiques/oceanographie/houle-vagues-et-littoral/>

http://stream2.cma.gov.cn/pub/comet/CoastalWeather/marine3/comet/marine/mod3_wlc_propdis/print.htm#1