

# Vagues et système terre

du vent aux microséismes  
en passant par la dynamique littorale:  
*géophysique et applications*

Ing. Ch. Arm. Fabrice Ardhuin (Dr., HDR)

Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

remise du "Prix Christian le Provost océanographe" - Plérin, 23 octobre 2009

photo: Fabrice Lecornu, Ifremer

# Que fait un océanographe?

Ce que j'ai fait depuis 1997 ...

- **observer et comprendre** des phénomènes naturels  
(courants dans un canyon sous marin, formation de rides par les vagues, dérive à la surface de la mer, évolution de la houle et de la forme des plages...)
- **construire** des modèles prédictifs de ces phénomènes...  
(caractéristiques des vagues, niveaux d'eau dans les ports)  
la compréhension détaillée n'est pas indispensable ...  
mais il faut arriver à un certain niveau de complexité, passer de l'analyse réductionniste à l'intégration de tous les facteurs naturels
- **appliquer** des modèles prédictifs dans un but précis:  
(prévoir la date et le lieu d'arrivée de la pollution du pétrolier Prestige-Nassau sur les côtes françaises, la hauteur des vagues pour un débarquement au Liban, la position de l'épave de l'avion du vol Rio-Paris...)  
il faut maîtriser les **incertitudes** et comprendre le **contexte** de l'application

*Et comme je ne peux pas vous parler de tout  
(tant pis pour les rides des sable, les plages, la mesure des courants depuis l'espace),  
voici une petite sélection :*

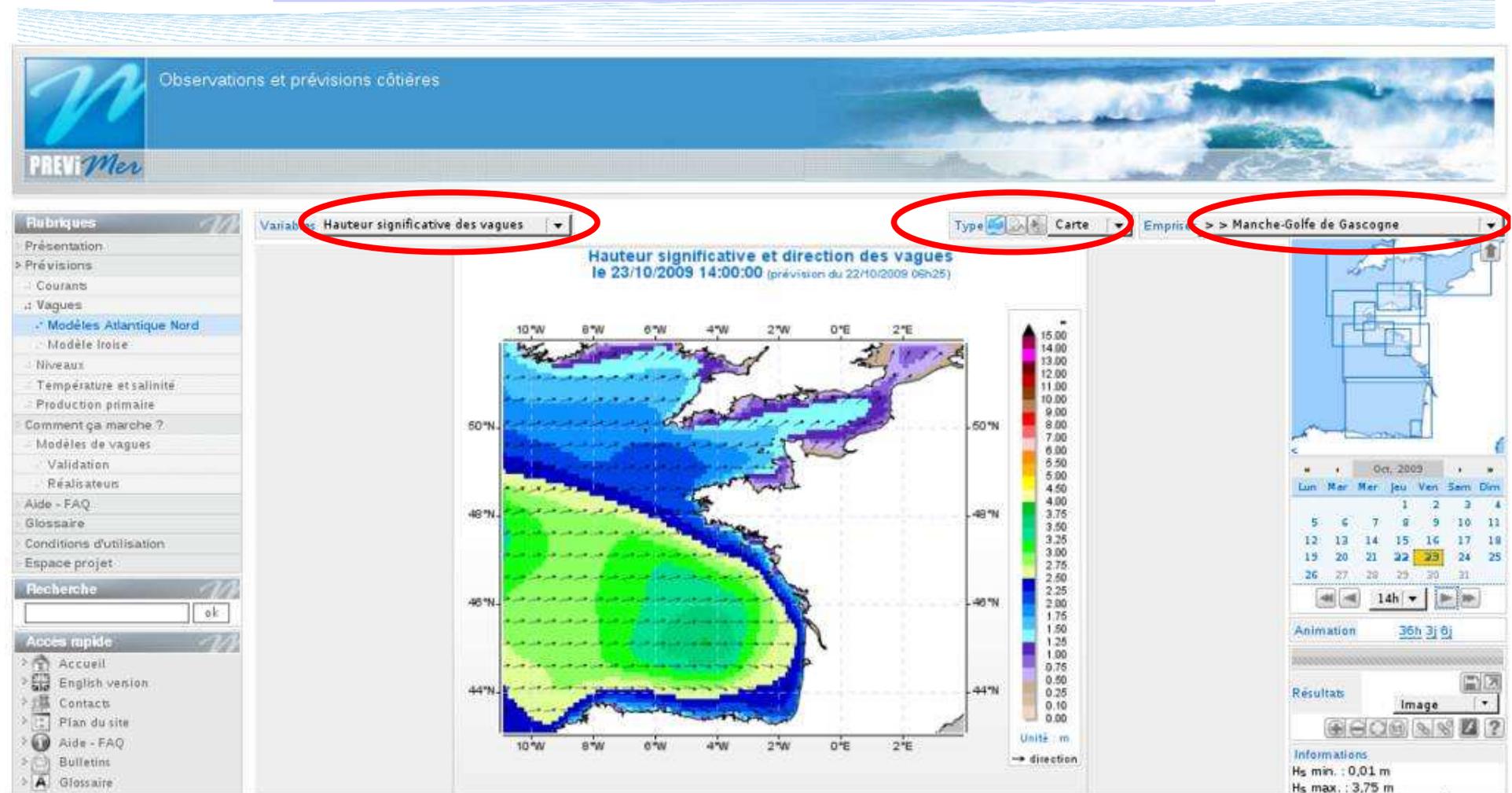
## Au programme aujourd'hui ....

- Quelles vagues sur ma plage? Le projet Prévimer
- Pourquoi les vagues ?
- Cuisine océanographique:  
la dérive à la surface de la mer
- La prévision des vagues: un siècle d'histoire
- Nouvelles applications et perspectives

*L'étude des vagues ça peut être de l'océanographie, mais bien d'autres choses encore...*

# Dès aujourd'hui: de nouvelles prévisions

<http://www.previmer.org/previsions/vagues/>



Remise du prix "Christian le Provost Océanographe"

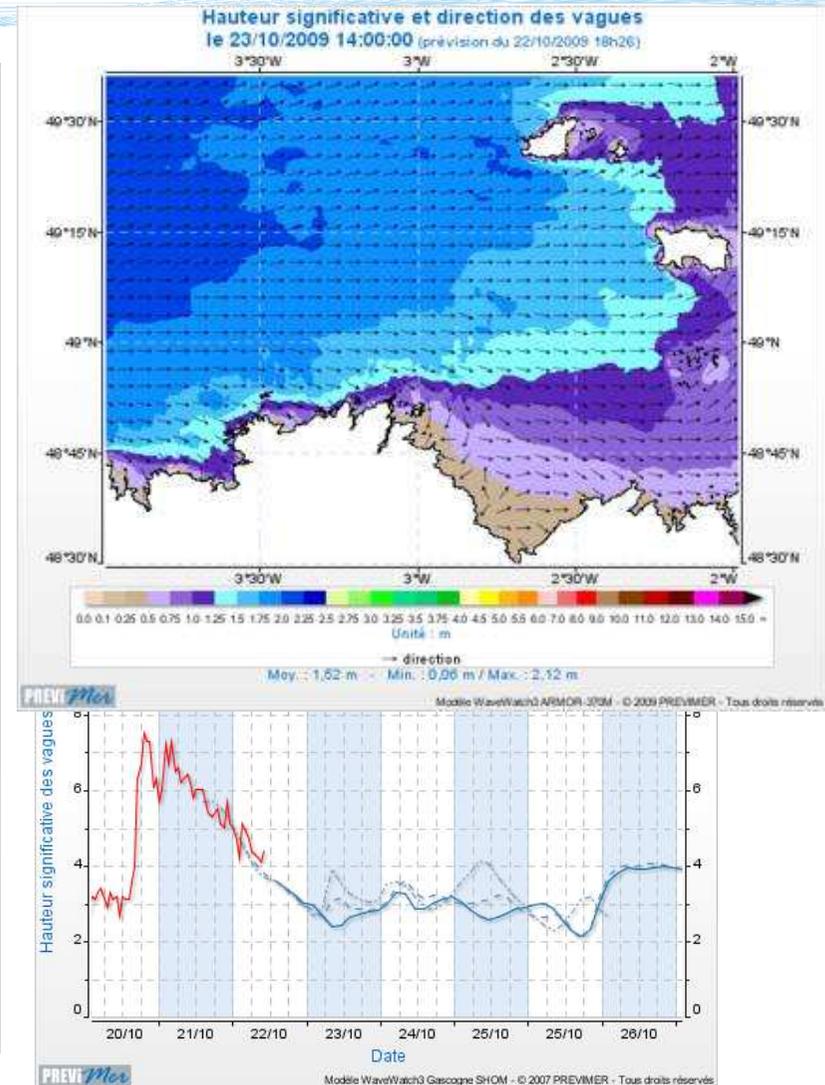
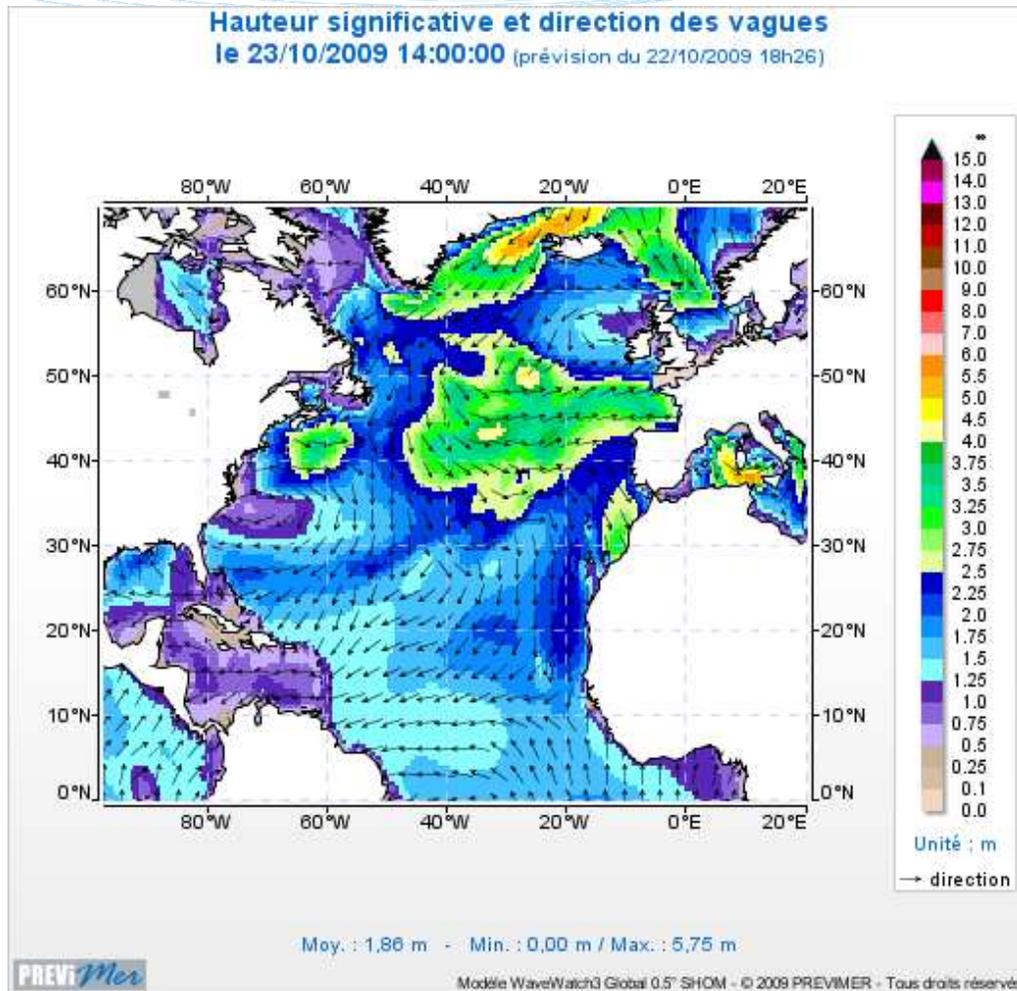
4 / 27



Fabrice Ardhuin @ SHOM

# Dès aujourd'hui: de nouvelles prévisions

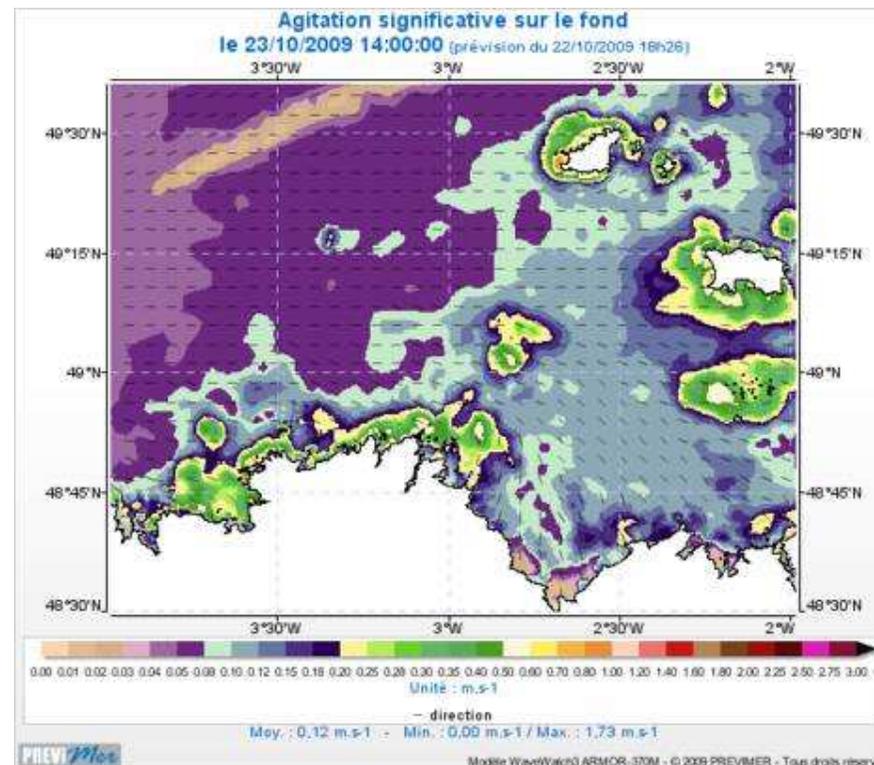
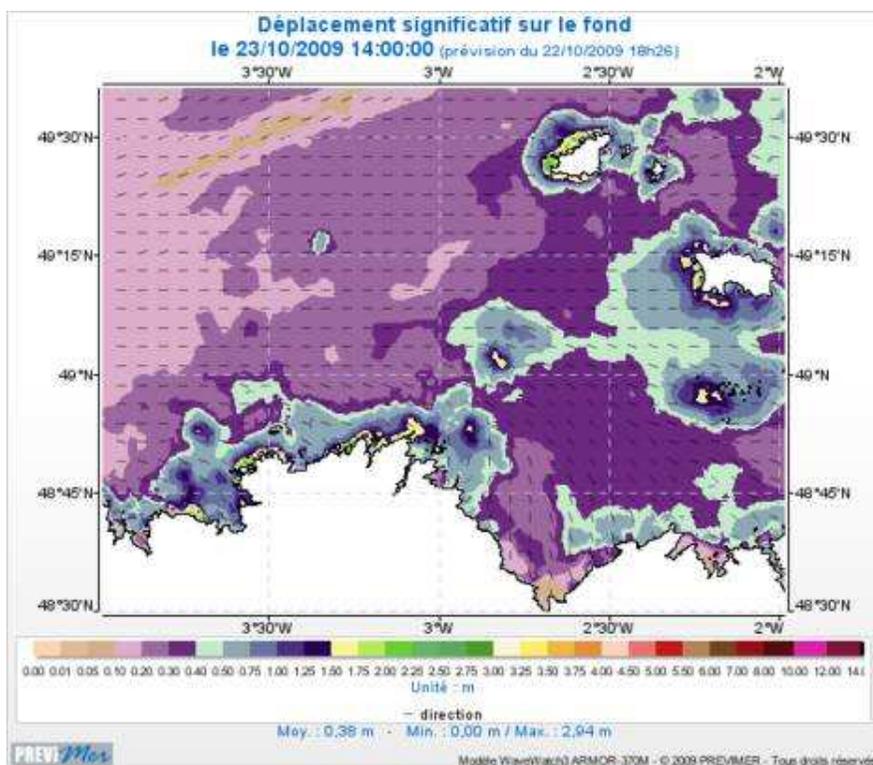
<http://www.previmer.org/previsions/vagues/>



# Dès aujourd'hui: de nouvelles prévisions

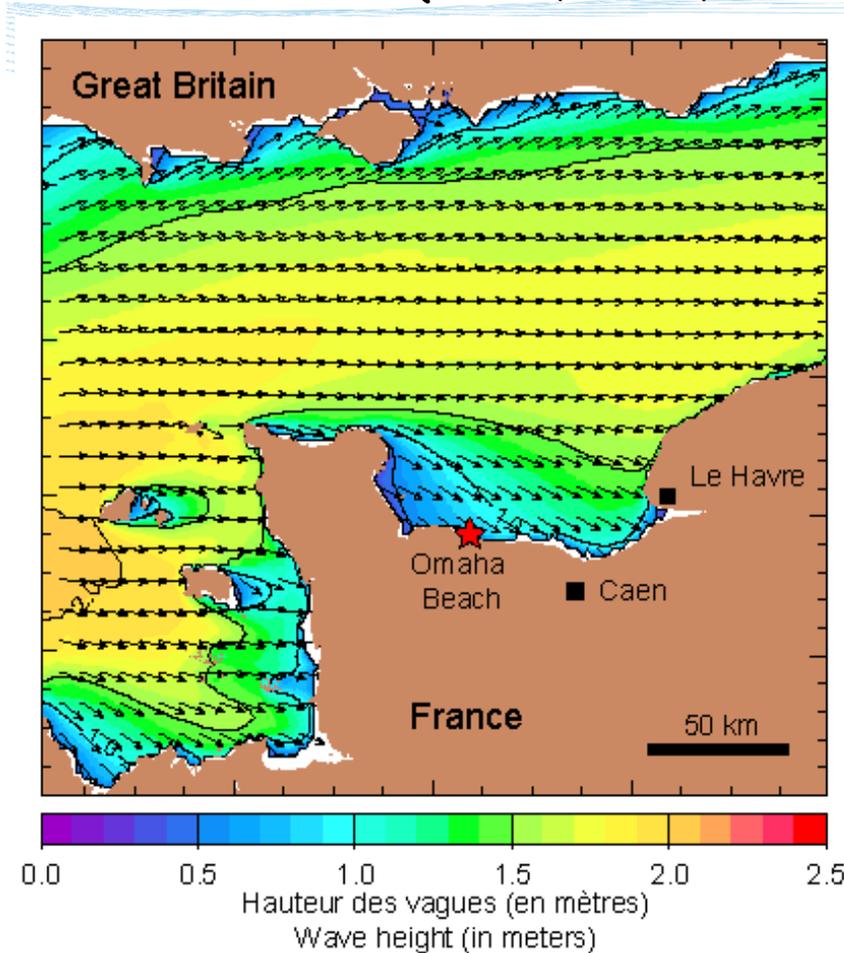
<http://www.previmer.org/previsions/vagues/>

- l'agitation sur le fond



# Pour qui étudier les vagues: hier à aujourd'hui

- la défense (1854, 1913, 1942, 1944 ...)



Hauteur des vagues  
le 6 juin 1944



- les ports et le transport maritime
- les exploitants d'énergies marines
- les professionnels de la mer
- les gestionnaires du littoral
- les sportifs nautiques  
(surf, kayak, plongée ...)

# Pourquoi encore étudier les vagues?

L'état de la mer est un lien unique au sein du Système Terre entre

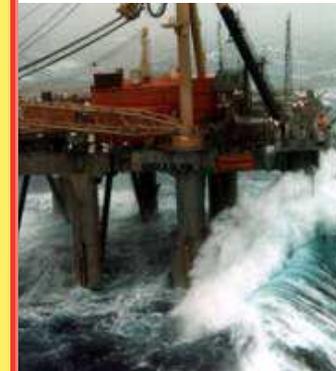
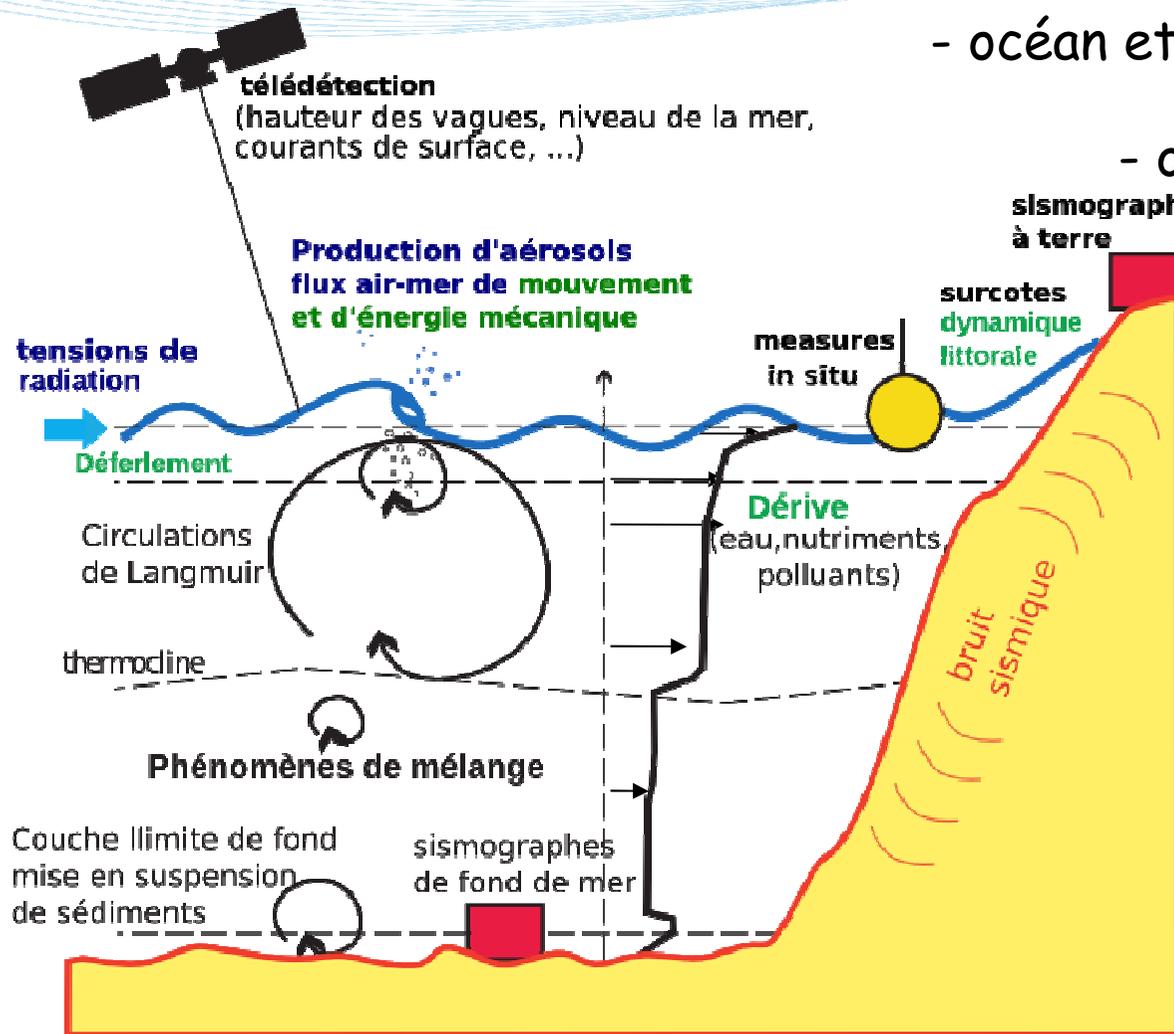
- océan et atmosphère

- océan et continents

- océan et terre solide

+ télédétection

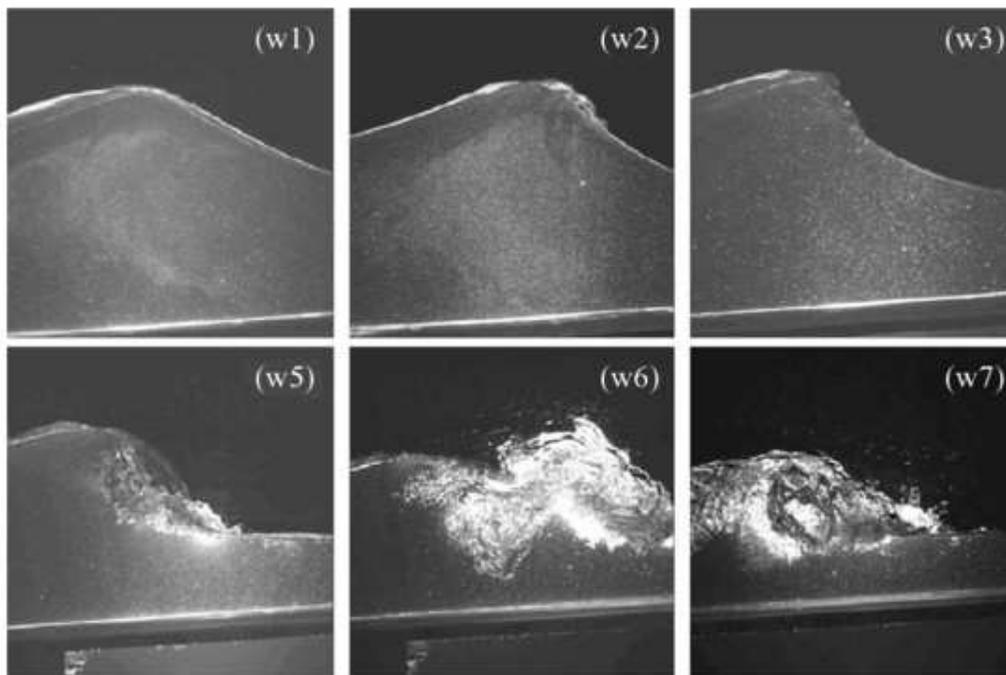
+ génie océanique



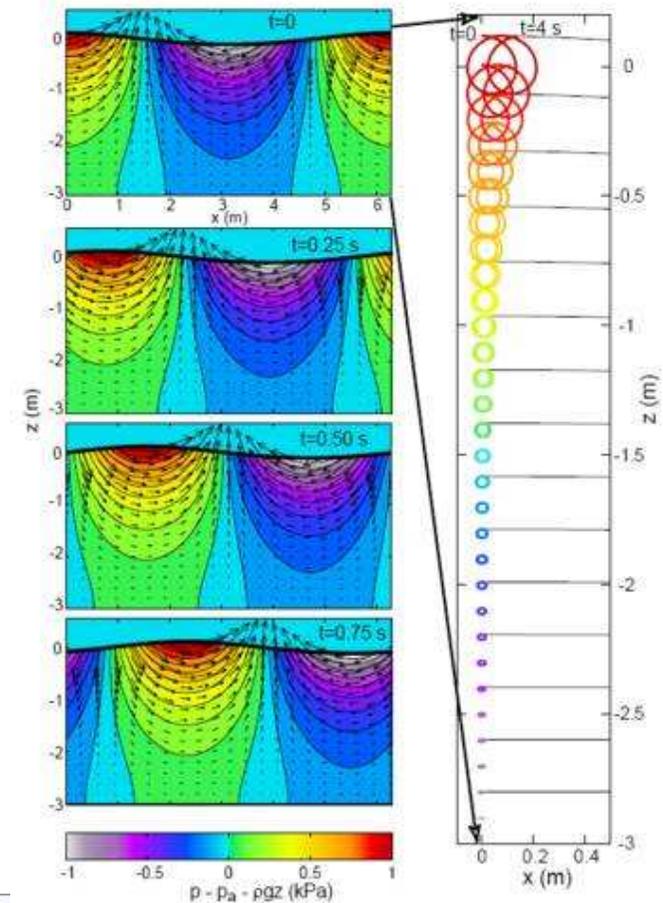
# Cuisine océanographique: la dérive à la surface de la mer

## 1. les ingrédients...

Les vagues, par le déferlement,  
sont la cause principale du mélange  
près de la surface (tiré de Kimmoun et Branger 2007)



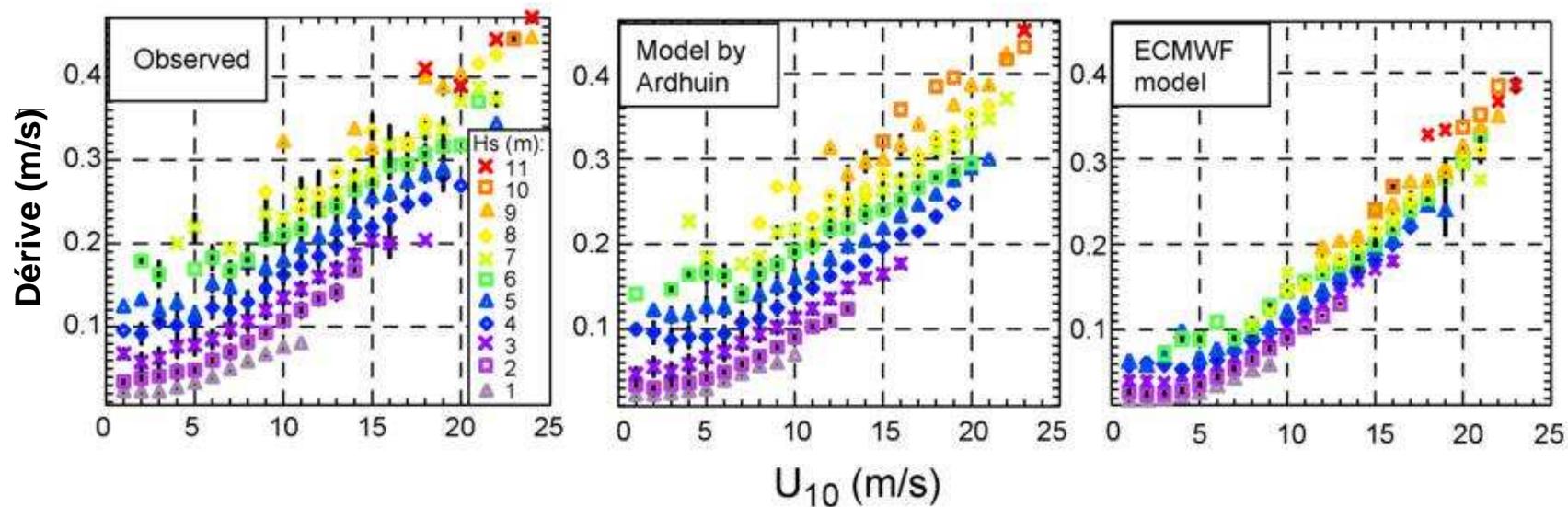
$U_s$  : Dérive de Stokes  
(induite par les vagues)  
exemple monochromatique



# Cuisine océanographique: la dérive à la surface de la mer

## 2. faire son marché ...

La dérive induite par les vagues est liée à la vitesse du vent ...  
mais pas seulement. On peut la calculer avec un modèle compliqué assez  
précis (Ardhuin et al. 2009) ...



... mais il y a aussi une loi empirique simple qui donne la dérive en fonction  
du vent et de la hauteur des vagues (Ardhuin et al. 2009).

# Cuisine océanographique: la dérive à la surface de la mer

## 3. mélanger le tout ...

On sort le mixer-équations

$$\begin{aligned}\frac{\partial \hat{\mathbf{u}}}{\partial t} &= -f \mathbf{e}_z \times (\hat{\mathbf{u}} + \mathbf{U}_s) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \hat{\mathbf{u}}}{\partial z} \right) \left( -\mathbf{T}^{ds}(z) \right) \\ \frac{\partial B}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left( K_B \frac{\partial B}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial E}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left( K_E \frac{\partial E}{\partial z} \right) + K \left( \frac{\partial \hat{\mathbf{u}}}{\partial z} \right)^2 + K_B \left( \frac{\partial B}{\partial z} \right) - \frac{Cq^3}{l}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}K \frac{\partial \hat{\mathbf{u}}}{\partial z} \Big|_{z=0} &= u_*^2 \\ K_B \frac{\partial B}{\partial z} \Big|_{z=0} &= Q \\ K_E \frac{\partial E}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \Phi_{oc}\end{aligned}$$

Exemple de paramétrage E-I:

$$l = \frac{\kappa(z_0 - z)}{1 + \kappa(z_0 - z)/h}$$

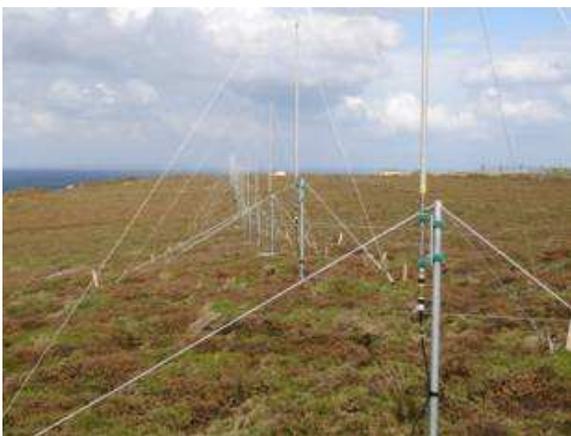
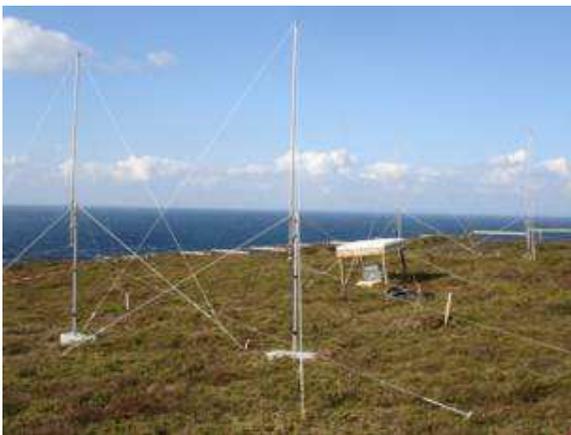
$z_0 \sim H_s$  mer du vent

$$\begin{aligned}\mathbf{U}_s(z) &= 2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \mathbf{u}_\theta k \sigma e^{2kz} E(k, \theta) dk d\theta \\ &= \frac{2}{g} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \mathbf{u}_\theta \sigma^3 e^{2kz} E(k, \theta) dk d\theta\end{aligned}$$

# Cuisine océanographique: la dérive à la surface de la mer

## 4. goûter ...

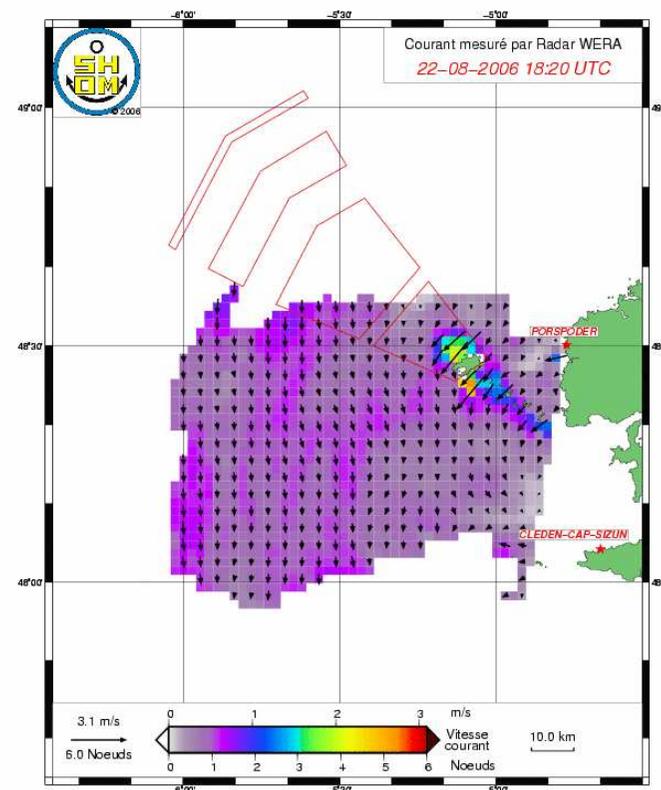
Mesure des courants de dérive  
en mer d'Iroise avec deux radars



le radar côtier est  
un instrument parfait  
pour suivre la dérive

...

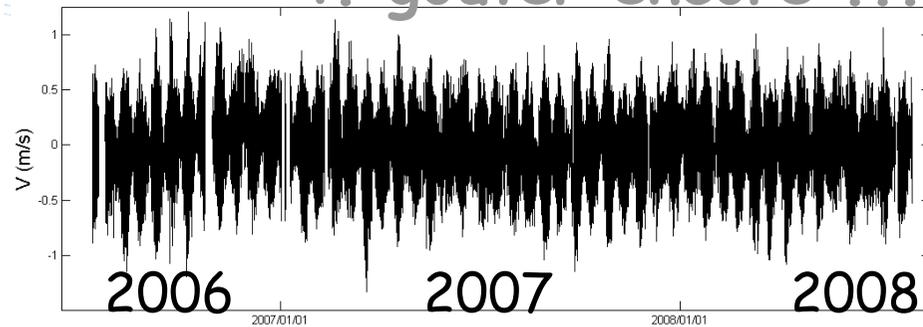
le principe de mesure  
utilise la vitesse des  
vagues.



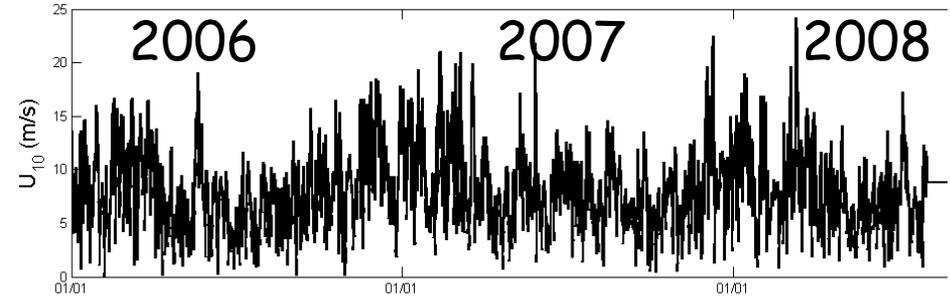
Traitement assuré par Actimar SA,  
depuis Juillet 2006  
<ftp://vigicote.vigicote@ftp2.shom.fr>

# Cuisine océanographique: la dérive à la surface de la mer

## 4. goûter encore ...

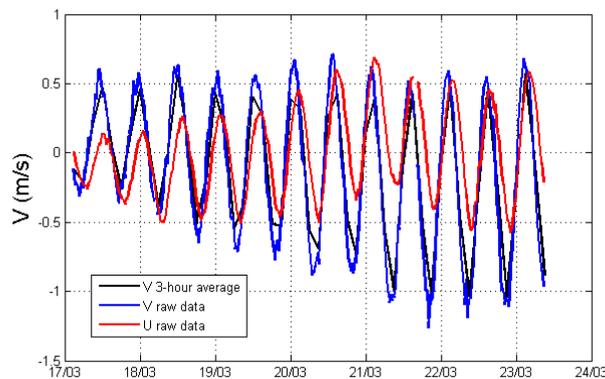


Courant

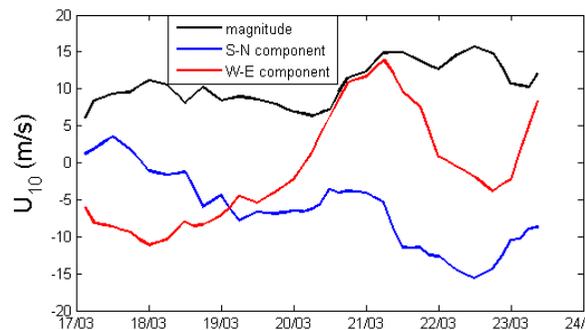


et vent ↴

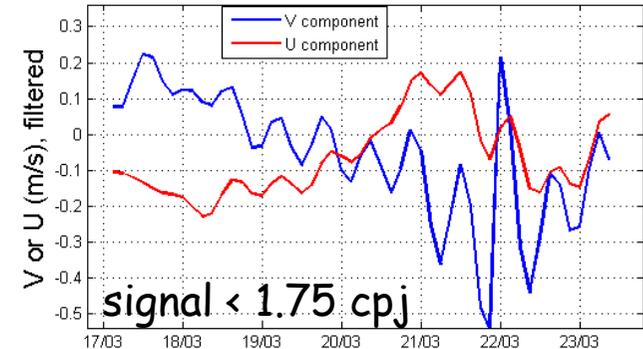
Courant dominé par la marée en général ... mais pas toujours:  
20-23 mars 2008: courants inertiels  $\approx$  courant de marée (coeff. 85-95)



Signal complet



Vent

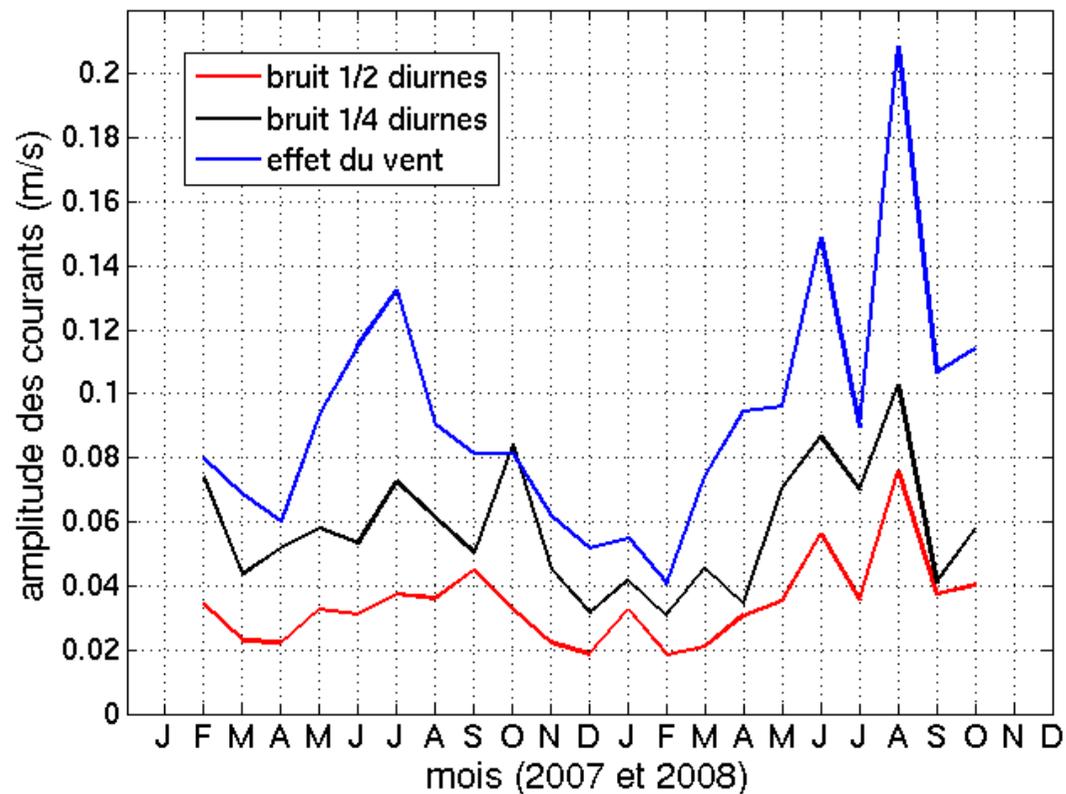


Courants inertiels

# Cuisine océanographique: la dérive à la surface de la mer

## 4. goûter toujours ...

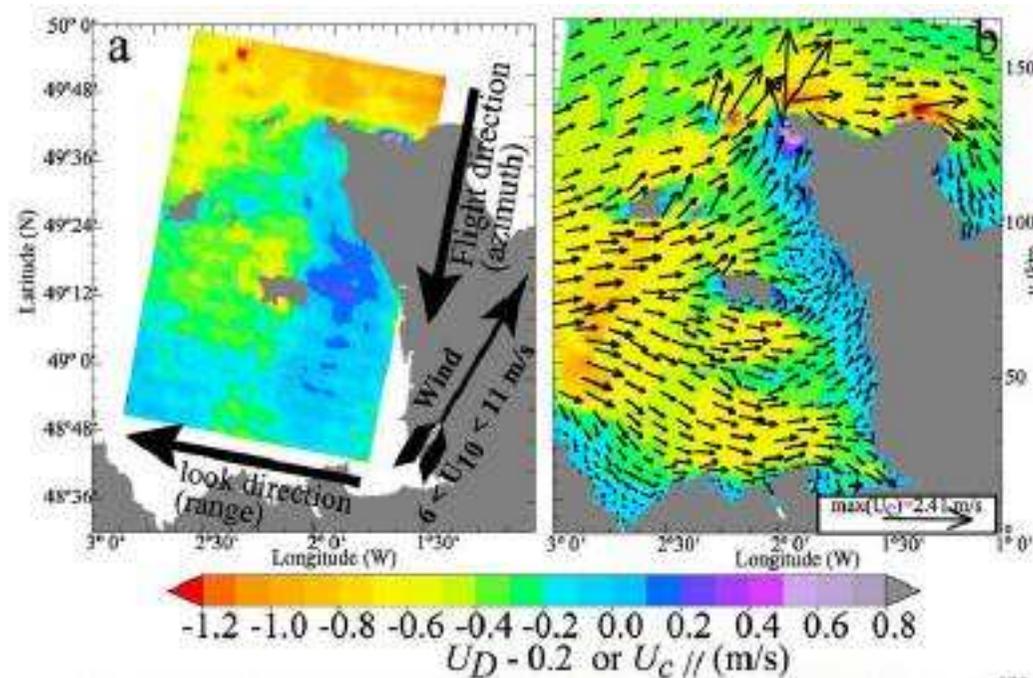
Au passage on voit des choses intéressantes sur la marée interne, et le cycle saisonnier du courant associé au vent (plus fort en été)



# Cuisine océanographique: la dérive à la surface de la mer

## 4. goûter toujours ...

De nouvelles techniques de mesure



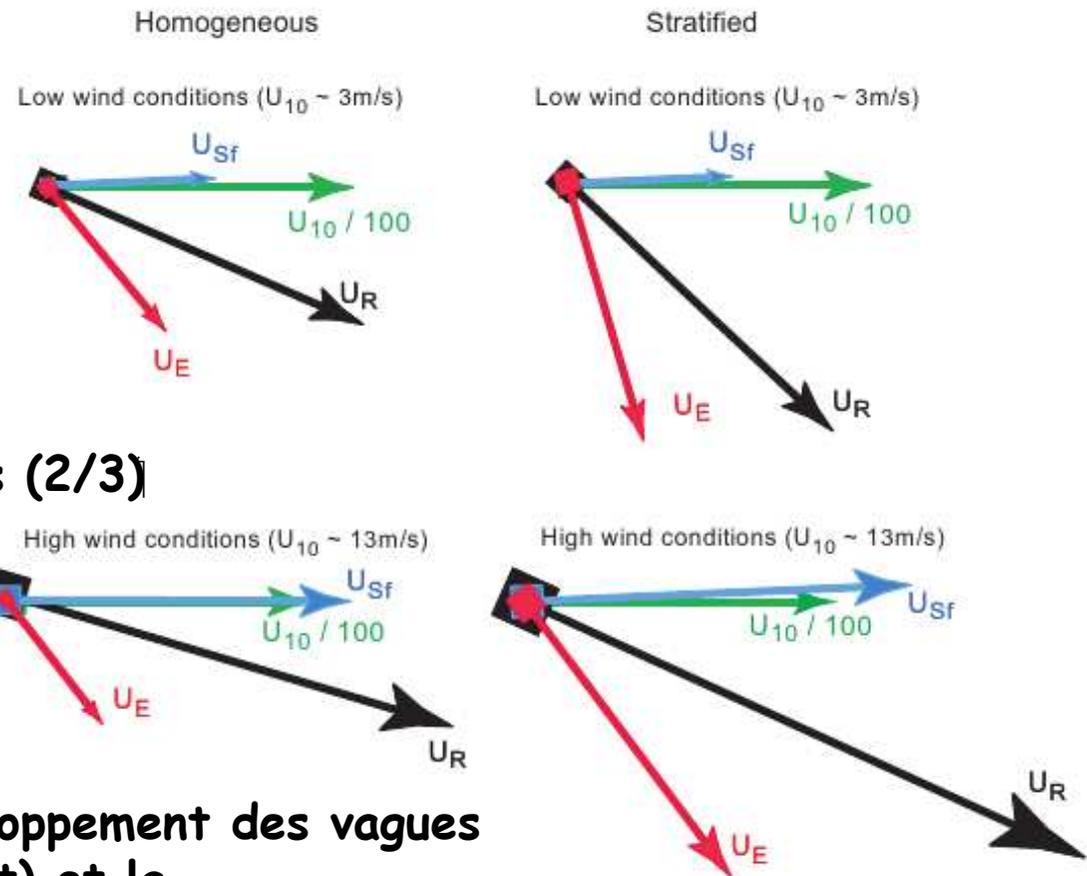
# Cuisine océanographique: la dérive à la surface de la mer

## 4. goûter ... (vous aurez compris c'est le plus important!)

Nous avons donc  
"mis à jour" la vieille  
théorie d'Ekman (1905):

La dérive combine  
une dérive induite par les vagues (2/3)  
et un  
courant d'ensemble (1/3)

Les proportions de ces deux  
ingrédients varient avec le développement des vagues  
(mélange associé au déferlement) et la  
stratification.



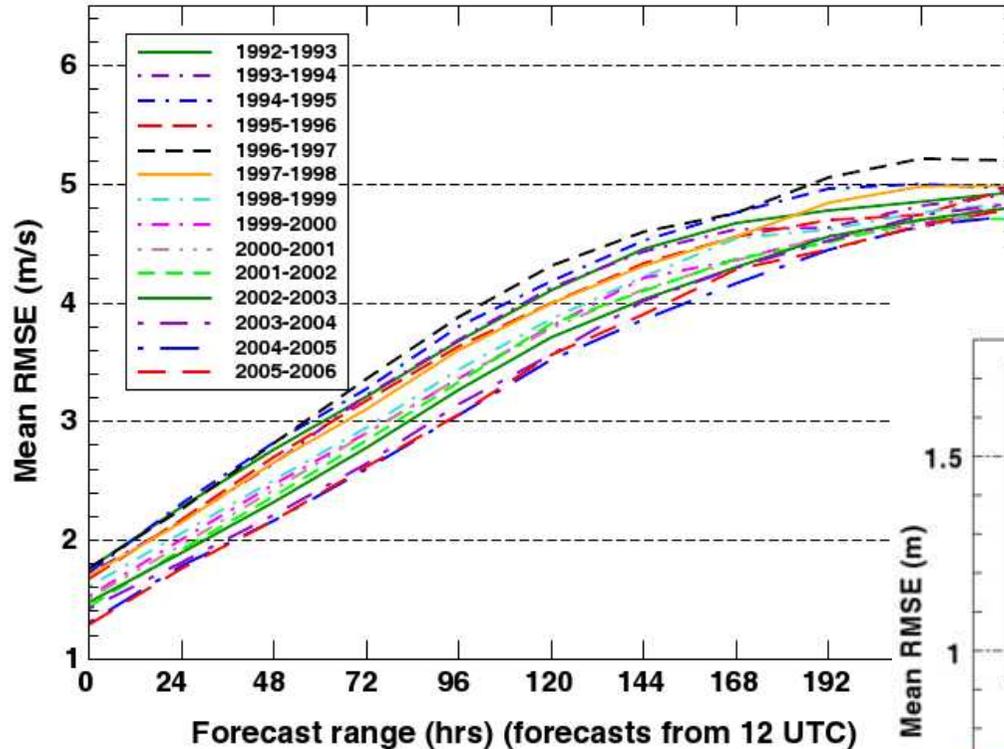
# La prévision des vagues: un siècle d'histoire

- préhistoire: 1854 et la guerre de Crimée ...
- le début de l'histoire:
  - janvier 1913, forte houle à Casablanca
  - 1921: création du service de prévision des houles au Maroc  
(méthode du Dr Gain, de la division météo marine du SHOM)
- l'ère moderne:
  - 1942: premier débarquement d'envergure en Afrique du Nord  
Les meilleurs océanographes ont participé à l'élaboration des méthodes de prévision  
(H. Sverdrup, W. Munk - c'était sa thèse - N. Barber et F. Ursell)
  - 1956: le premier logiciel moderne de prévision,  
avec la méthode "DSA" (R. Gelci et al., 1957)
  - 1988: Mis au point du "Wave Model" (WAM) (Hasselmann et al.)

# La prévision des vagues: un siècle d'histoire

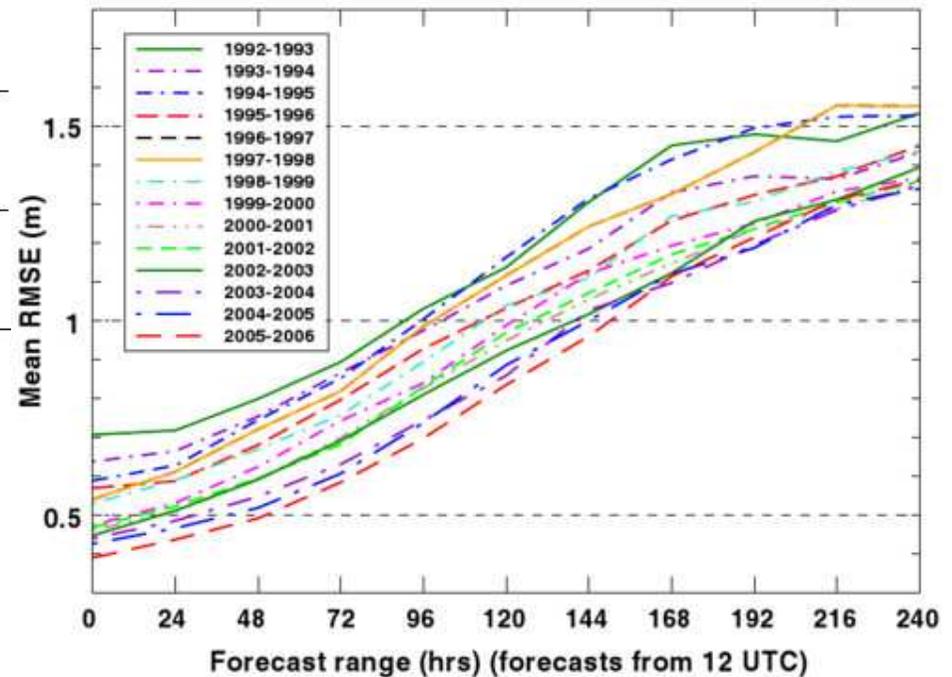
- Les progrès continuent: performance des modèles actuels

Wind speed comparison with buoy data  
from October to March



Mais ces améliorations ne sont pas les mêmes partout: pas terrible en Manche.

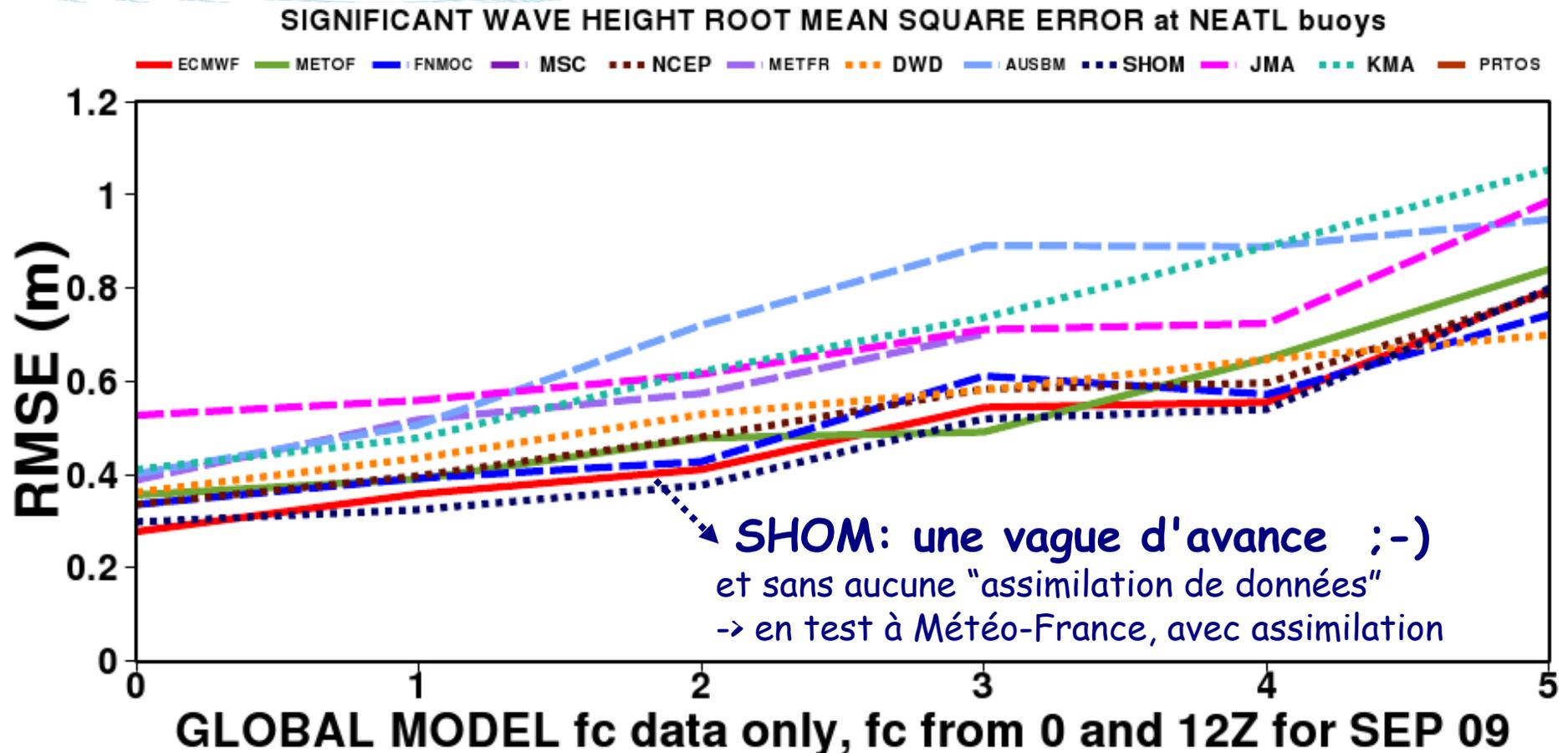
Wave height comparison with buoy data  
from October to March



Et on ne comprend toujours pas le détail de la génération et dissipation des vagues ...

# La prévision des vagues: un siècle d'histoire

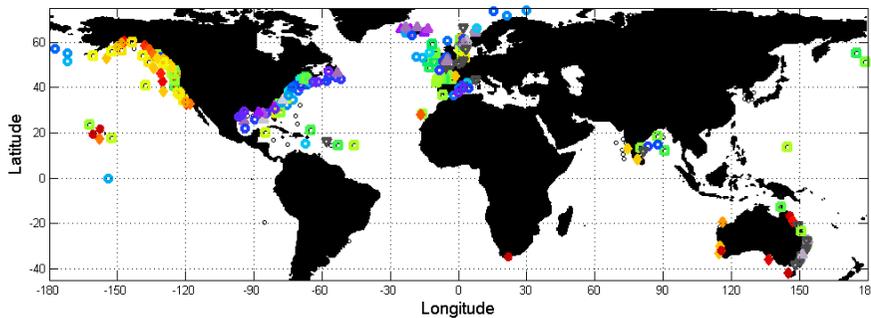
## Au SHOM depuis 2005: aller plus loin



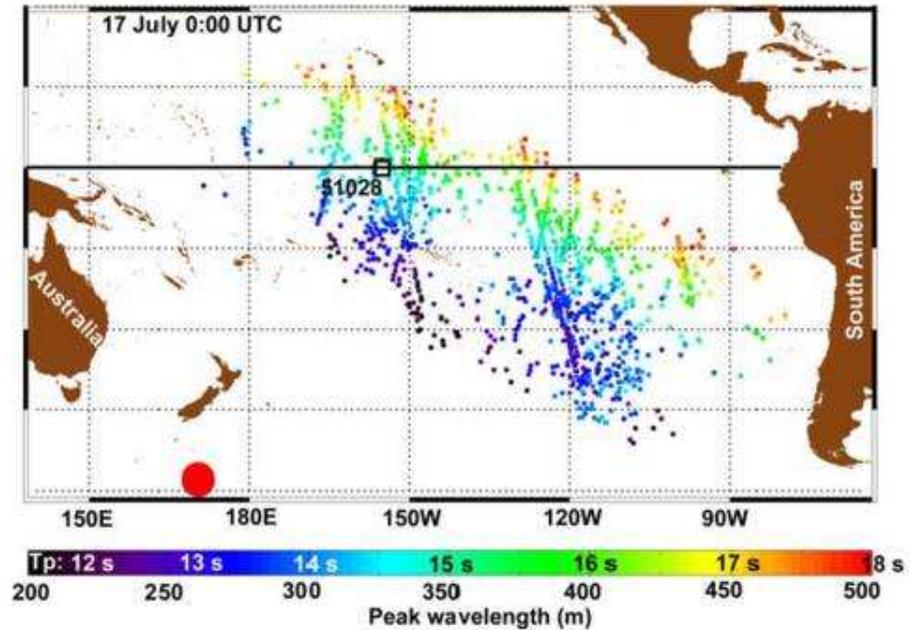
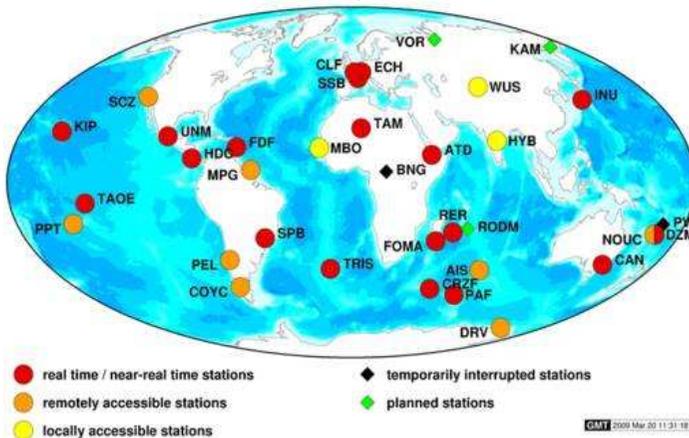
# La prévision des vagues: un siècle d'histoire

## Regards croisés sur les houles longues

- observation par satellite →
- mesure in situ



- bruit sismique



*Un champ de houle vu par le SAR d'ENVISAT  
(Collard et al. 2009)*

... pour combiner tout cela il faut un modèle

# La prévision des vagues: un siècle d'histoire 40 ans après Munk: on a mesuré la dissipation

## PROPAGATION OF OCEAN SWELL ACROSS THE PACIFIC

By F. E. SNODGRASS, G. W. GROVES, K. F. HASSELMANN,  
G. R. MILLER, W. H. MUNK AND W. H. POWERS  
*Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, La Jolla*

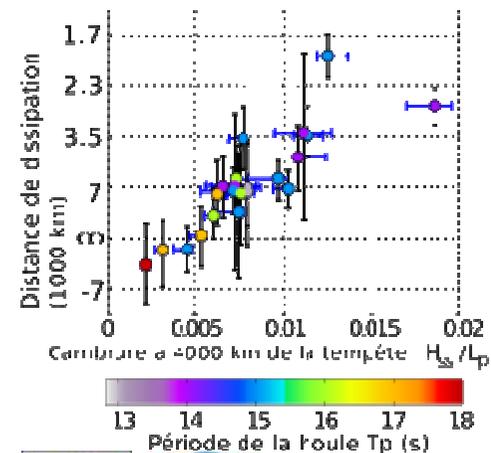
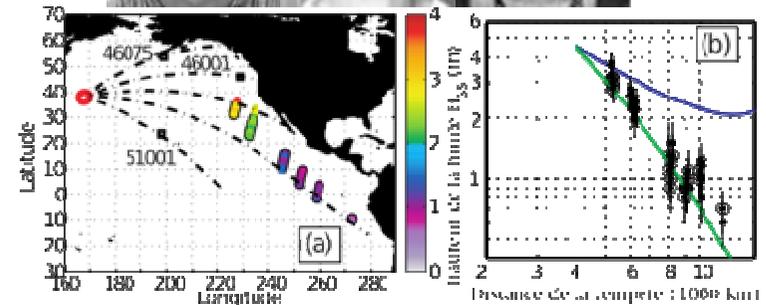
(Communicated by G. E. R. Deacon, F.R.S.—Received 3 February 1965)

- ... spectra between stations indicate negligible attenuation for frequencies below 70 mc/s (less than 0.02 dB/deg between New Zealand and Alaska), and 0.15 dB/deg at 80 mc/s, with a considerable scatter from event to event. At higher frequencies the events disappear into a background spectrum which is remarkably uniform over the Pacific, and presumably the result of global high winds along the entire storm belt of the South Pacific. The attenuation in the near zone of the storm (within a distance comparable to the storm diameter) is estimated at 0.2 dB/deg at 70 mc/s and 0.4 dB/deg at 80 mc/s.



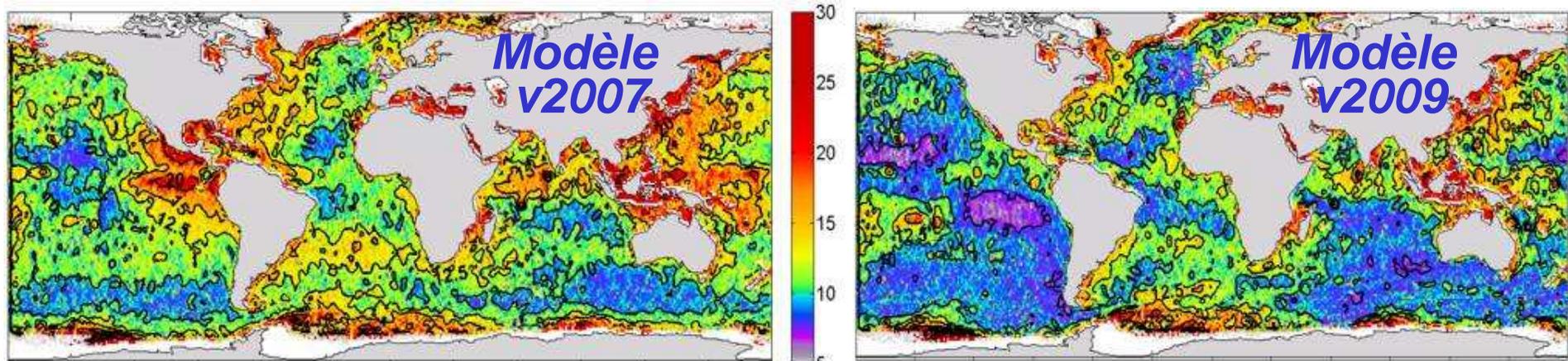
## Observation of swell dissipation across oceans

Fabrice Ardhuin,<sup>1</sup> Bertrand Chapron,<sup>2</sup> and Fabrice Collard<sup>3</sup>



# La prévision des vagues: un siècle d'histoire

## De l'observation au « paramétrage »



Erreur moyenne normalisée (en %) pour Hs  
(r.m.s. modèle-altimètres)

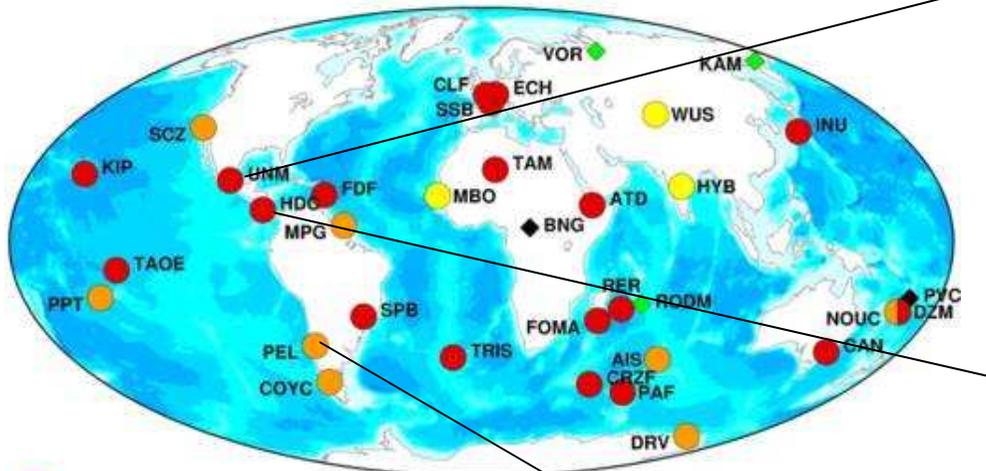
Il reste du travail:

- prise en compte des icebergs
- prise en compte des courants
  - effet de stabilité air/mer
- Zones côtières?? (vents? Directions des vagues ?)

# La prévision des vagues: un siècle d'histoire

## Observation des houles longues: microséismes

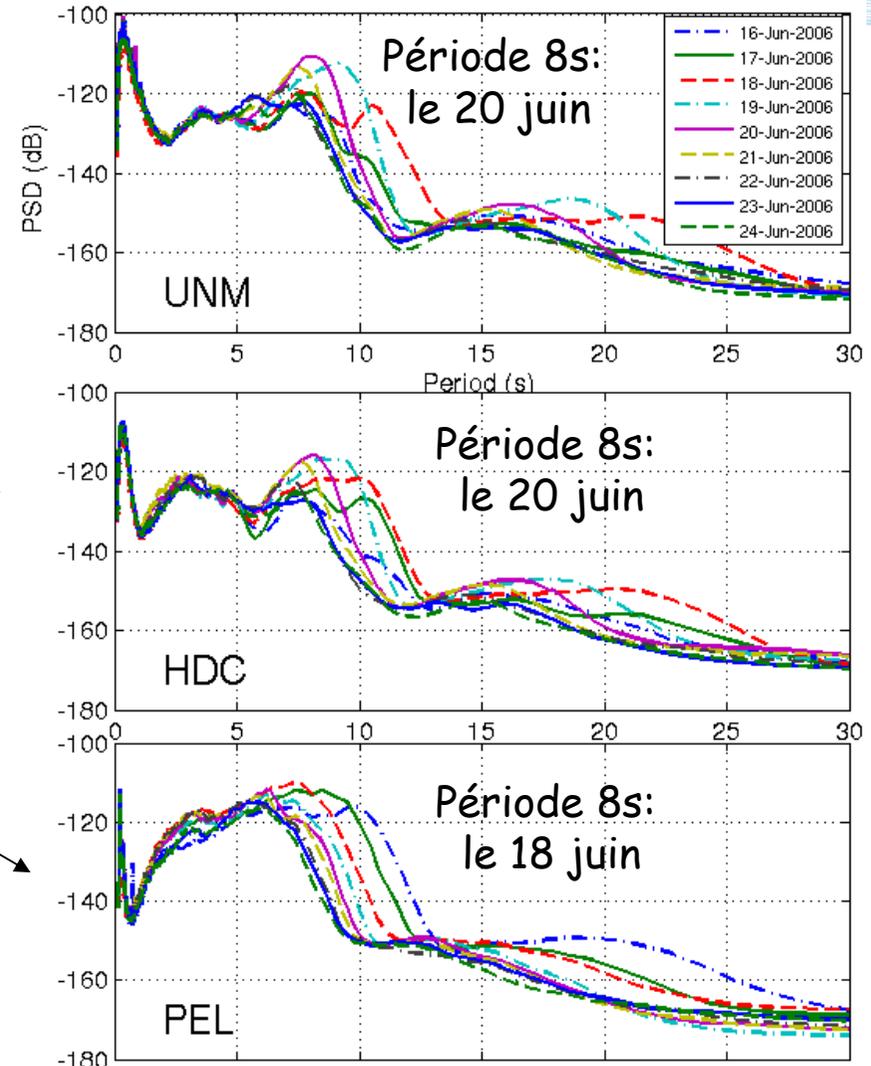
Le réseau Géoscope de l'IPGP:  
futur: profileurs argo? (MERMAIDS)



- Houle de période 16 s  
→ ondes sismiques de 8s
- Hauteur des vagues 1m  
→ déplacement sismique 1 micron

(travail mené avec E. Stutzmann, IPGP,  
et bientôt financé par le

European Research Council



# La prévision des vagues: un siècle d'histoire

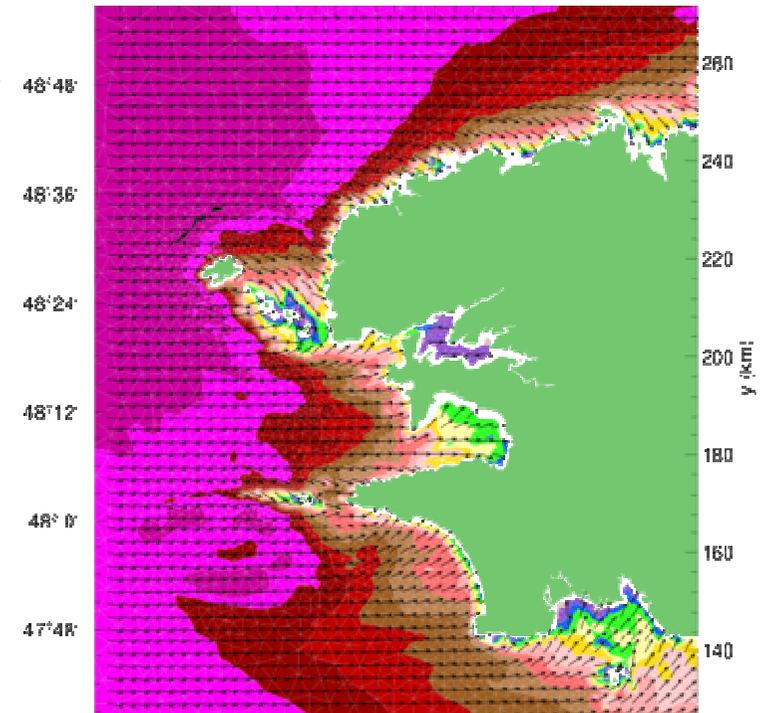
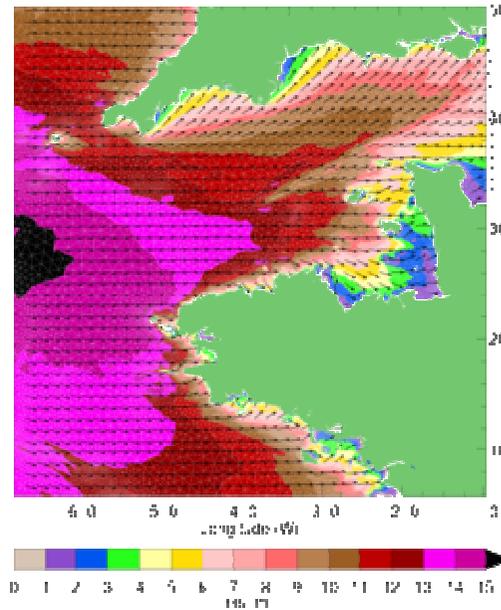
## Les houles longues sont associées aux fortes tempêtes

### Tempête de mars 2008

(Cariolet et al., soumis à Norois)

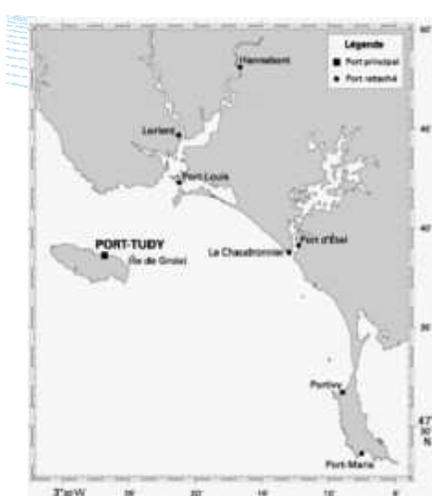


ci-contre: blocs arrachés sur la falaise de Bannec (archipel de Molène)

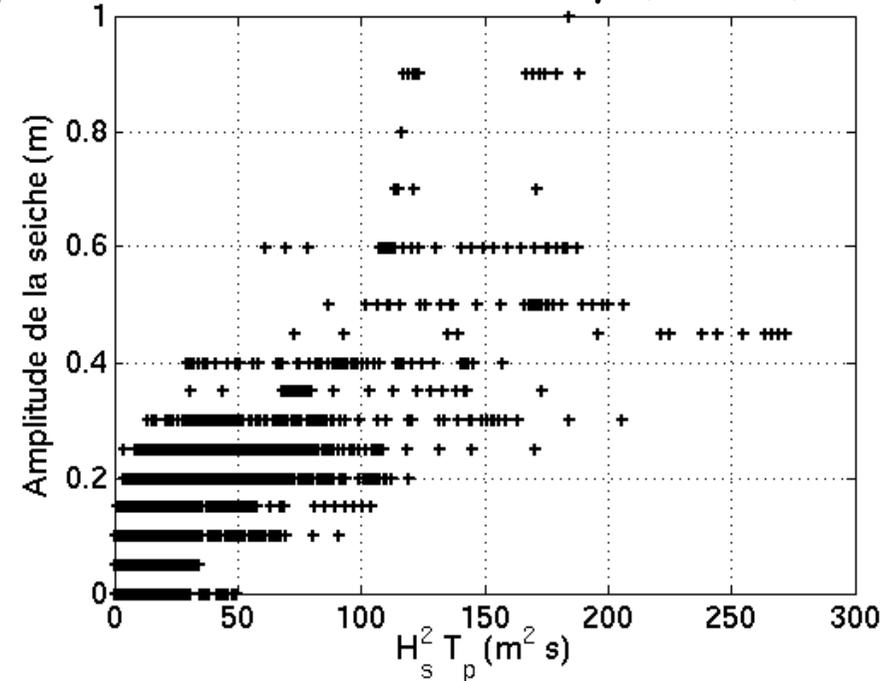
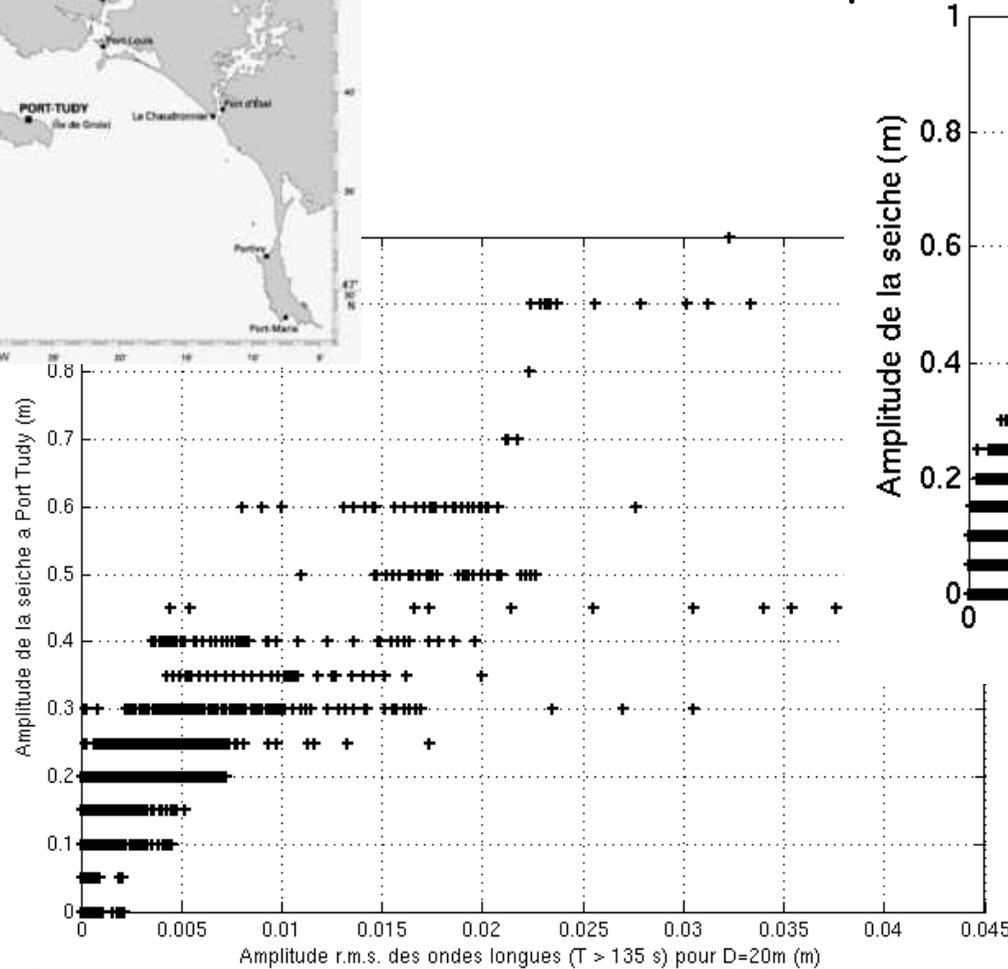


# La prévision des vagues: un siècle d'histoire

## Les houles longues donnent des ondes longues



Exemple de seiche à Port Tudy (Groix)

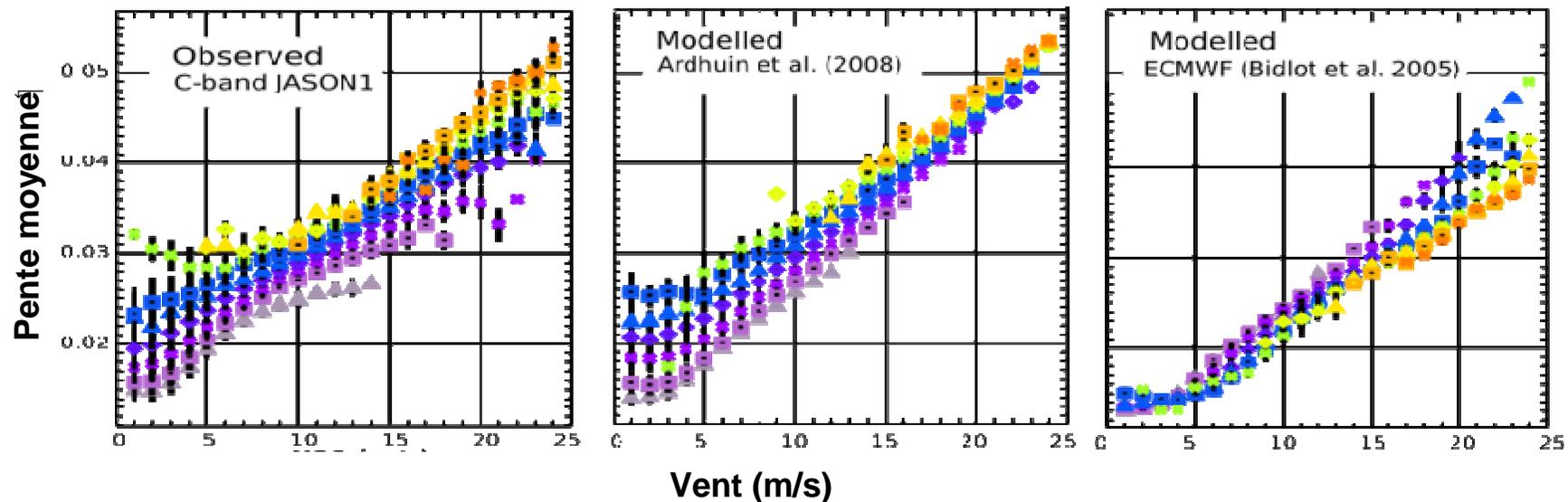


Phénomène important pour les niveaux d'eau extrêmes et le risque de submersion

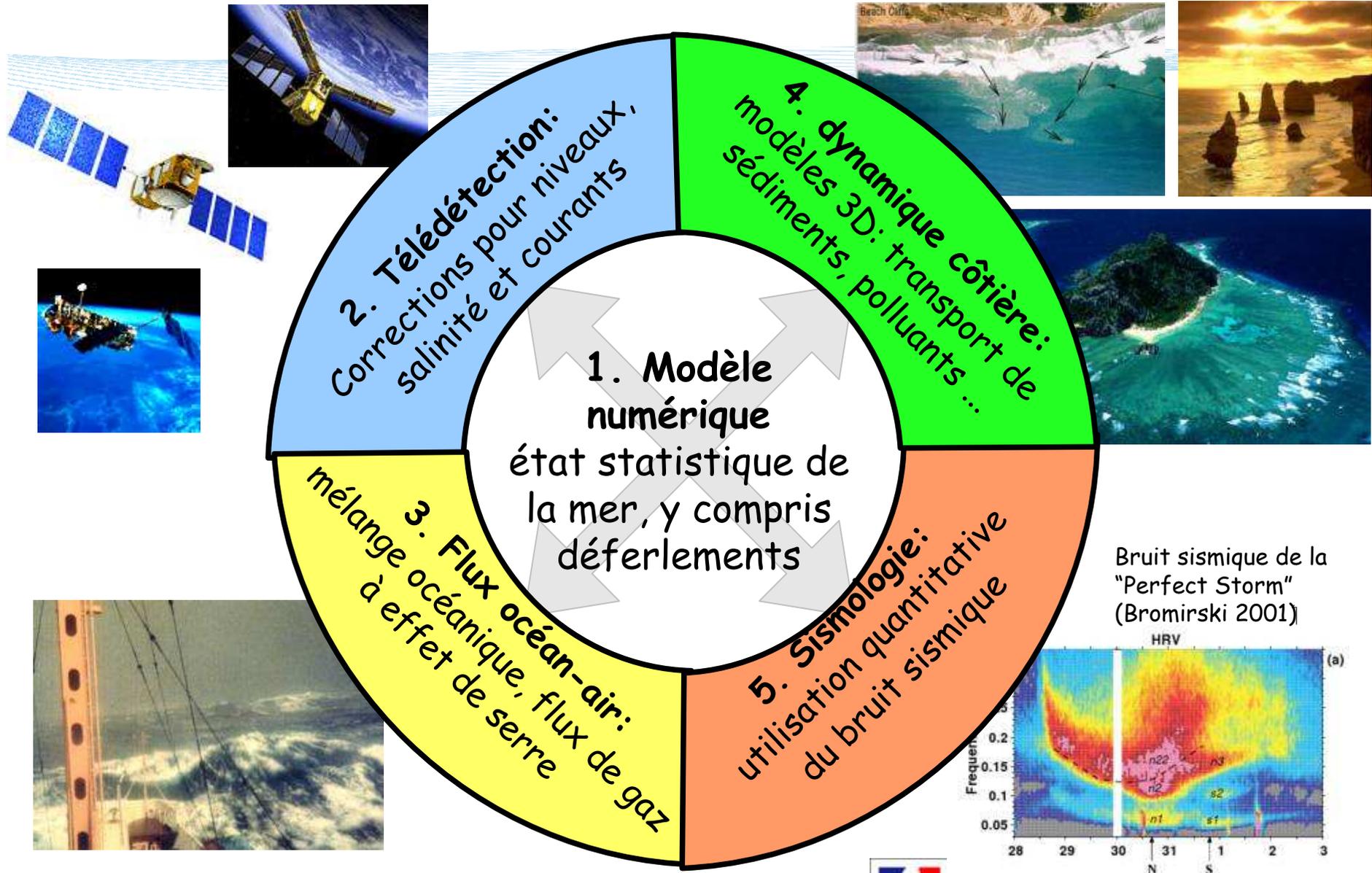
(Données marégraphiques analysées par E. Devaux)

# Nouvelles applications et perspectives

Améliorations de la représentation des vagues:  
compréhension des phénomènes océaniques,  
mesure par télédétection



# Vagues et applications: demain



## ... pour conclure ...

Merci à tous les collègues, du SHOM et d'ailleurs ...  
merci au jury du prix "Christian le Provost Océanographe"

Brest est la capitale mondiale de la recherche sur les vagues, et ce n'est que le début grâce ...

- au soutien de la Marine Nationale et de la DGA,
- à l'aide du CETMEF
- au soutien de l'U.S. Office of Naval Research (ONR)
- au soutien du Conseil Européen de la Recherche (ERC)
- au soutien du Conseil Régional de Bretagne (CPER)
- au futur satellite CFOSAT (CNES - CNSA)

De la dynamique  
littorale à l'observation de l'océan,



le futur sera agité



La capacité de calculer 1 an de temps réel en 13h (modèle fin) ou 1h30 (modèle grossier) sur l'ensemble du globe:

Près d'une centaine de simulations ont permis de mettre au point le modèle le plus précis

