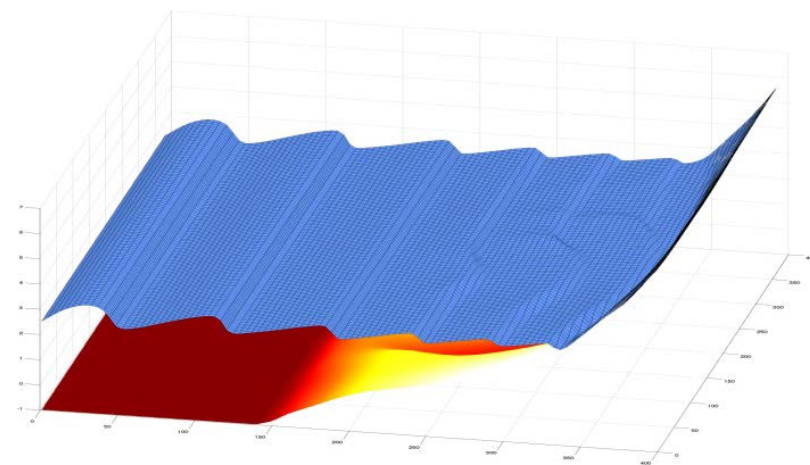


Modélisation de l'hydrodynamique en zone de surf

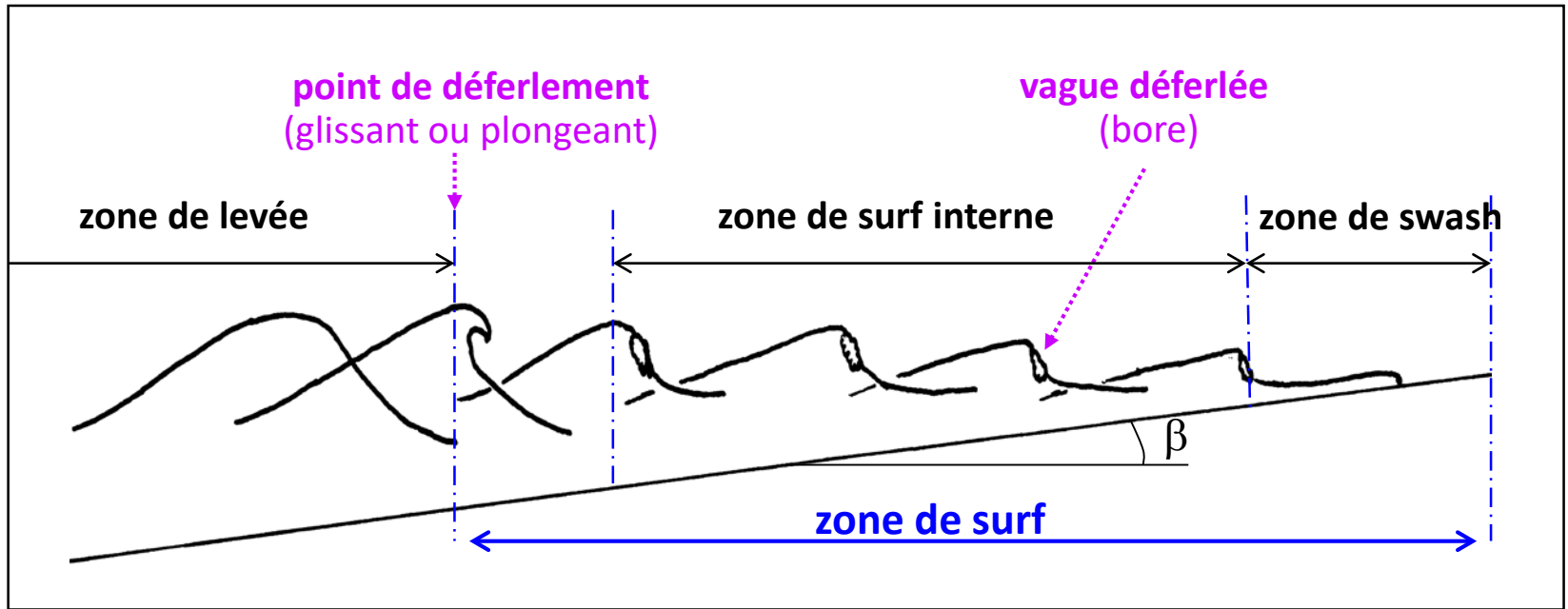


Philippe Bonneton

EPOC, équipe METHYS, Bordeaux Univ., CNRS



modèles de vague à résolution de phase



point de déferlement



bores



La zone affectée par le déferlement contrôle les échanges hydro-sédimentaires entre la côte et le large



Morphodynamique des environnements sableux



plages sableuses



embouchures tidales

Processus liés au déferlement → impact, franchissement et submersion



Digue Socoa



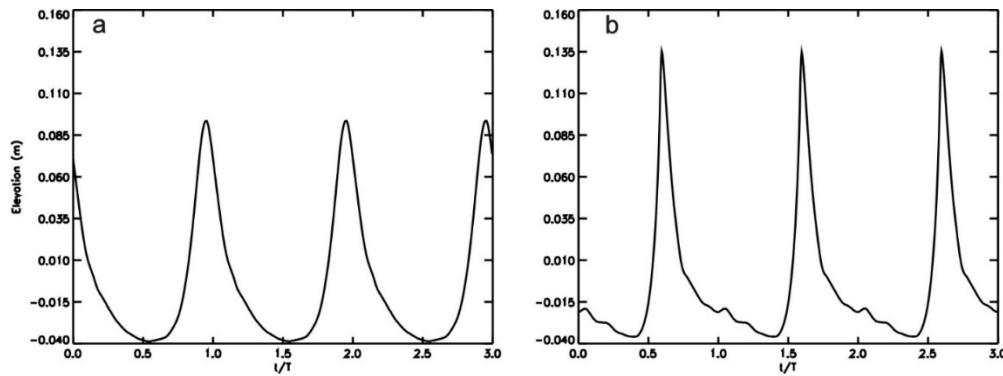
Argeles (december 1997)

Pour ces différentes applications il est essentiel d'avoir une bonne compréhension et modélisation des processus hydrodynamiques dans la zone de surf

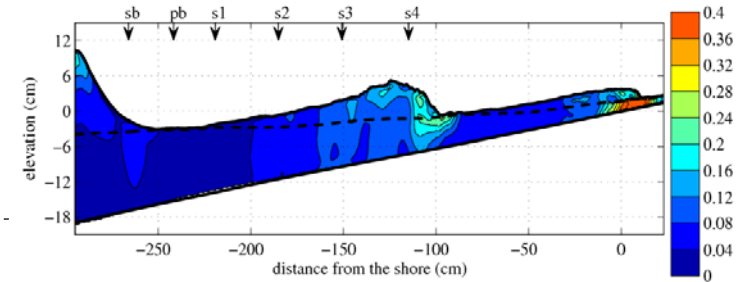


Non-linéarités et fronts d'onde

levée



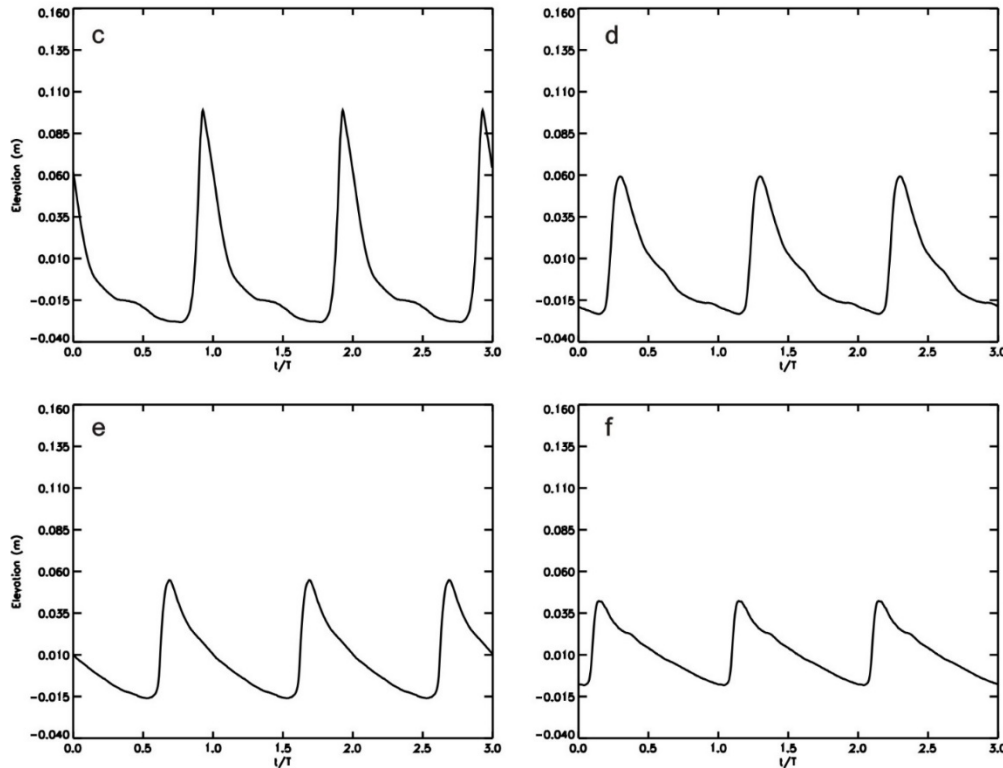
➤ dissipation d'énergie

*Kimmoun et Branger 2005*

➤ très fortes non-linéarités

➤ ondes en dents de scie

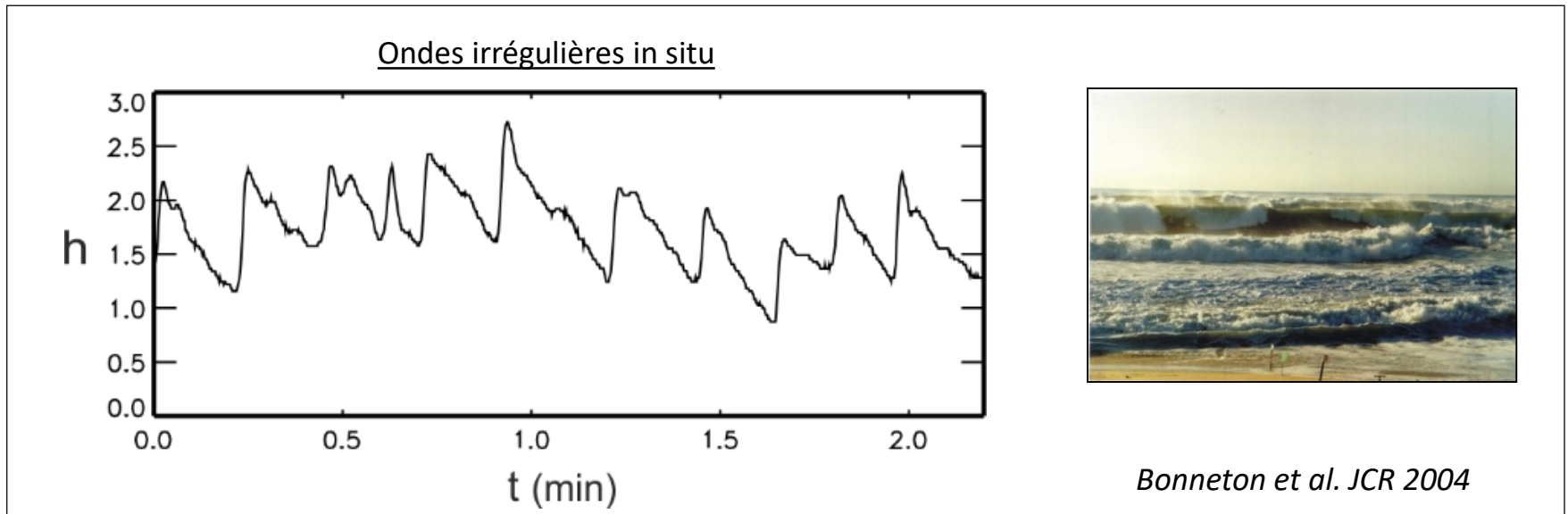
surf



Vagues périodiques sur plage à pente constante, Cox 1995

Non-linéarités et fronts d'onde

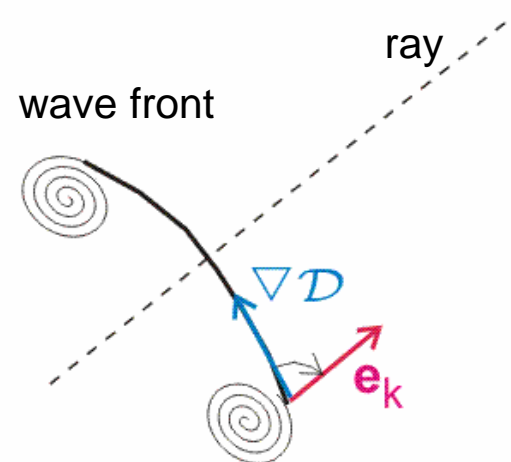
→ Ondes en dents de scie



Forme universelle caractéristique des ondes pour lesquelles les processus non-linéaires sont très largement prépondérant devant la dispersion

→ ex.: acoustique non-linéaire

Déferlement différentiel et vorticité



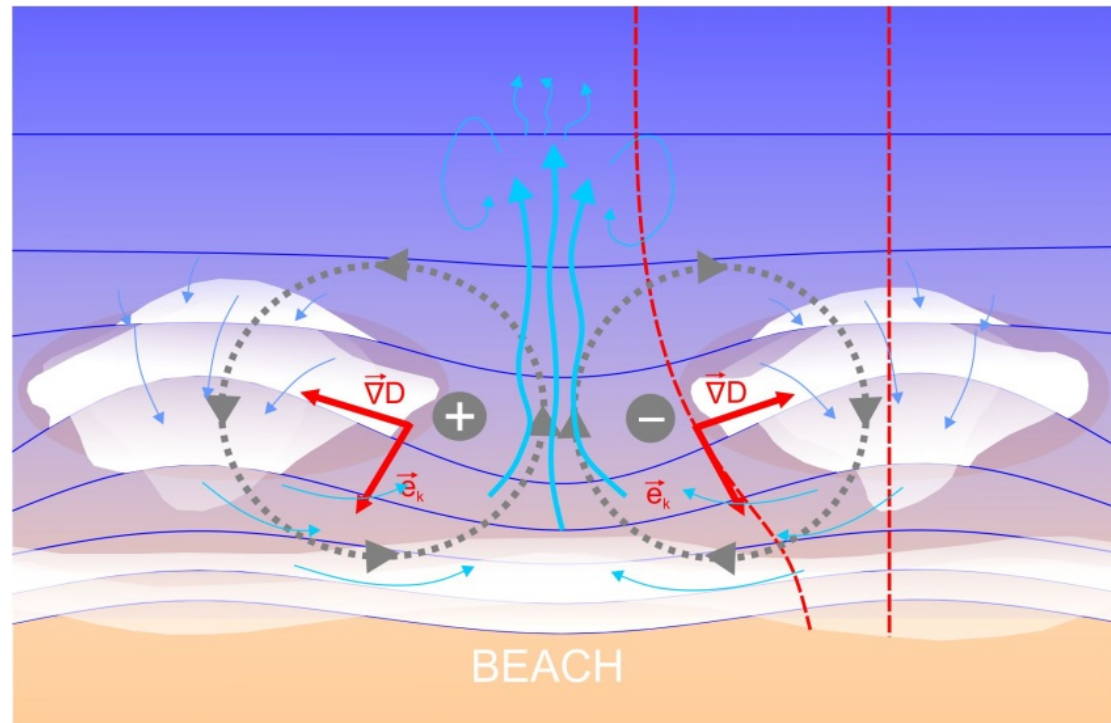
Peregrine 1999, Bonneton et al. 2010, Clark et al. 2012

$$\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\omega} \bar{\mathbf{u}} + \overline{\tilde{\omega} \tilde{\mathbf{u}}}) = \nabla \mathcal{D} \wedge \mathbf{e}_k$$

Bonneton et al. 2010



Courant d'arrachement

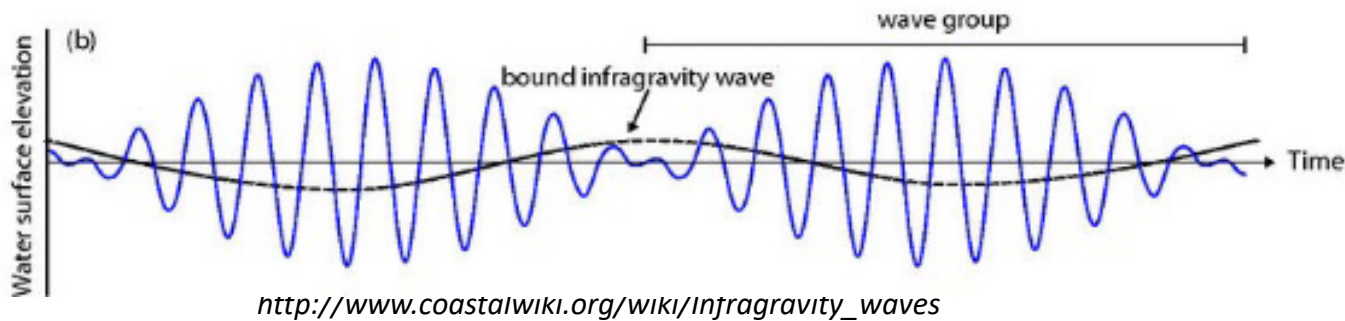


Castelle et al. 2013

Ondes infra-gravitaires

- Ondes de gravité de surface $T \sim 25-250$ s
- 2 mécanismes principaux de génération

→ Ondes liées aux groupes d'onde



→ Modulation du point de déferlement

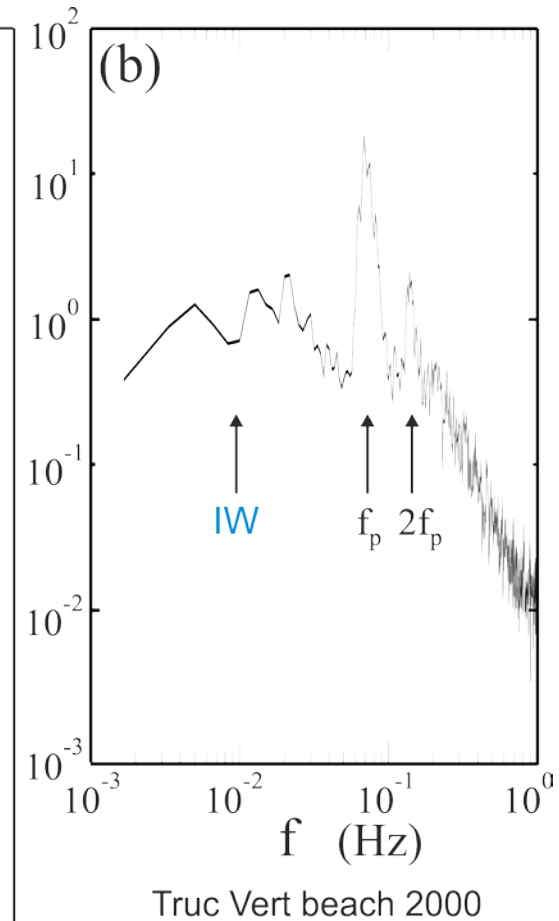
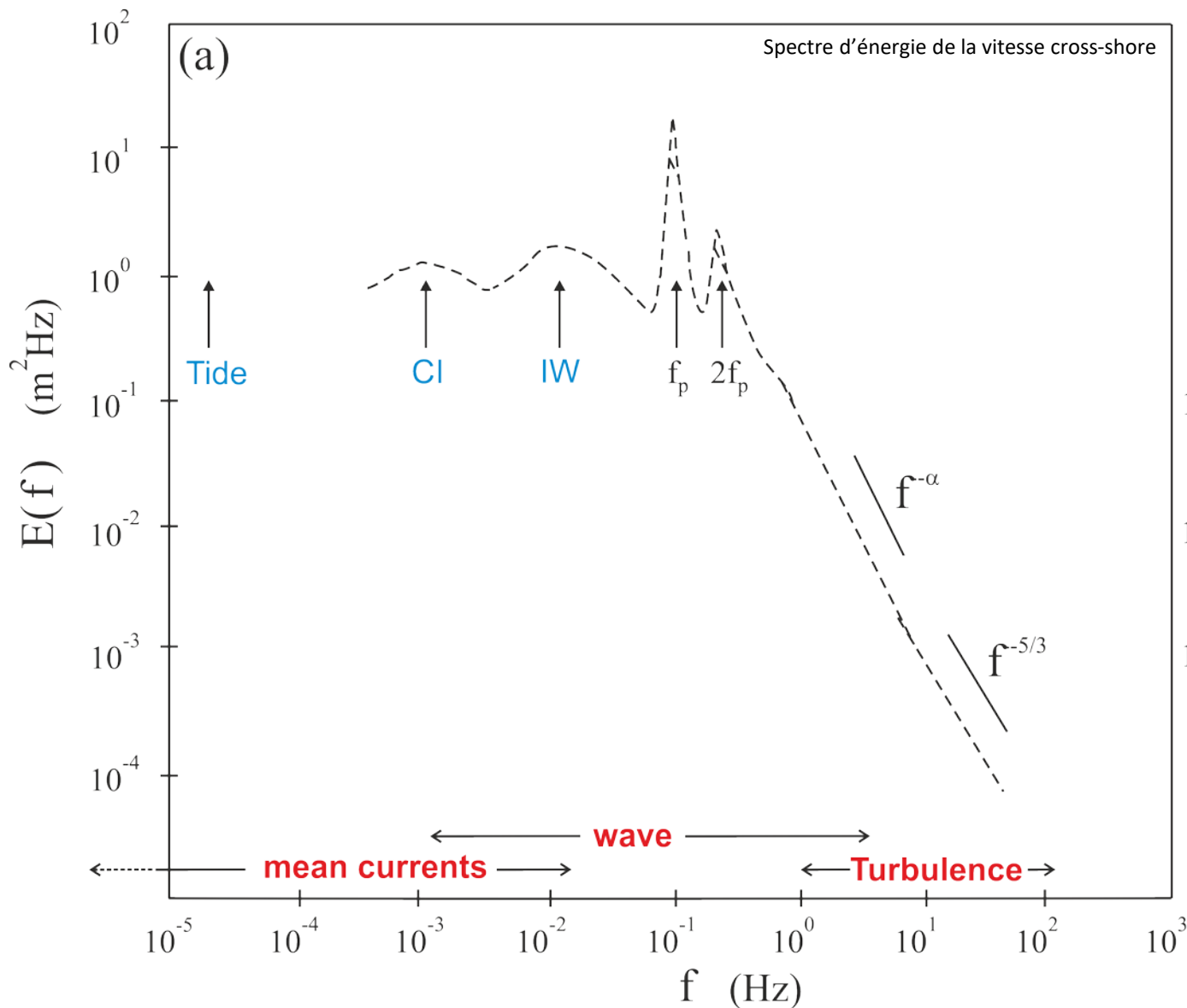
- Rôle très important dans la zone affectée par le déferlement et plus particulièrement en zone de swash

Article de synthèse : Bertin et al., *Earth Science Reviews* 2018

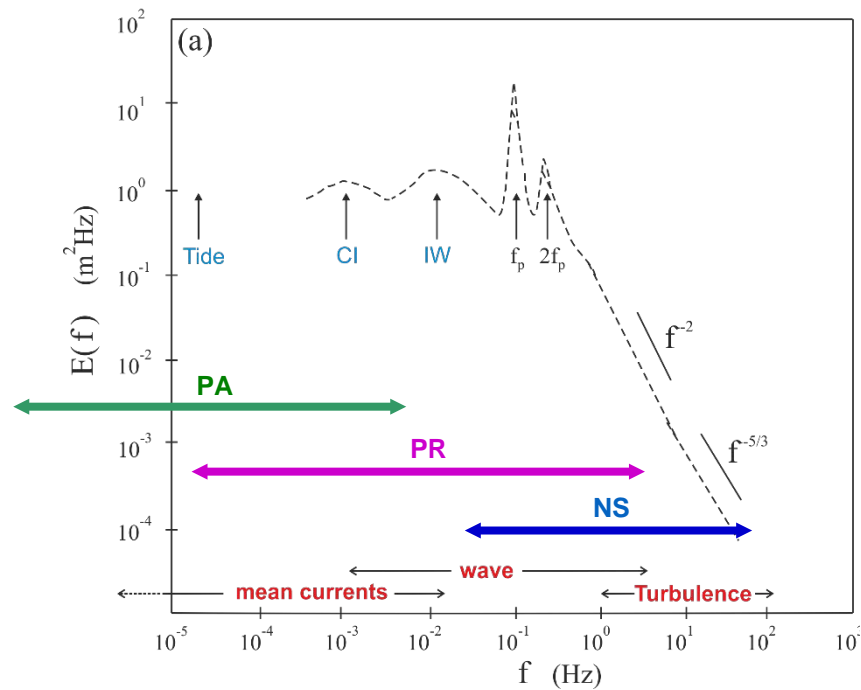
- ❑ Introduction
- ❑ Stratégies de modélisation
- ❑ Modèles à résolution de phase
- ❑ Modèle SGN et processus dissipatifs
- ❑ Conclusion

- ❑ Introduction
- ❑ **Stratégies de modélisation**
- ❑ Modèles à résolution de phase
- ❑ Modèle SGN et processus dissipatifs
- ❑ Conclusion

Spectre d'énergie en zone de surf



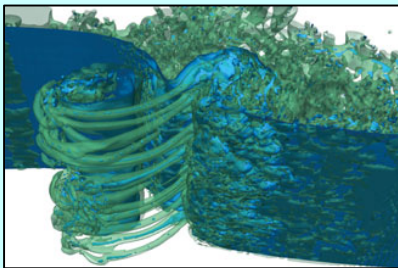
Stratégie de modélisation



small scales

large scales

Two-phase flow NS



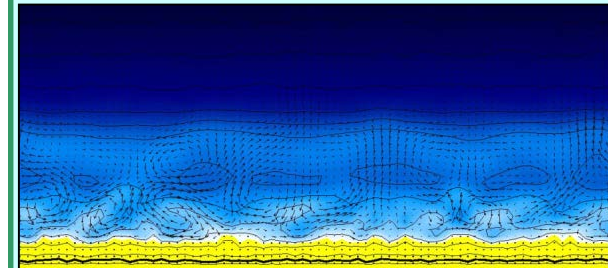
Lubin and Glockner 2015

Phase-Resolving



Cienfuegos et al. 2006

Phase-Averaged



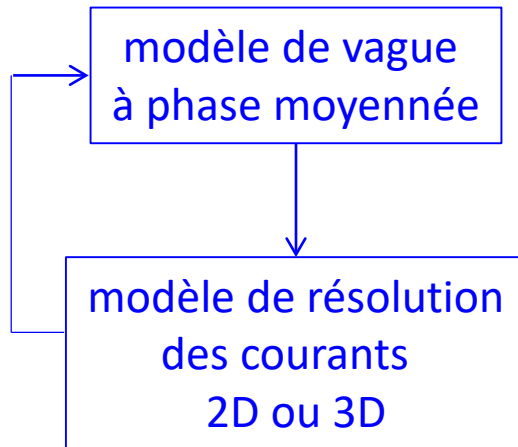
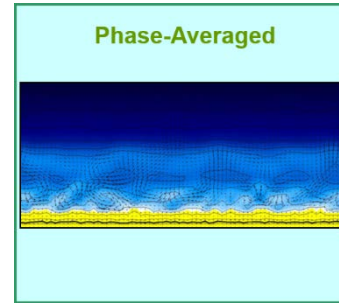
Castelle et al. 2006

séparation en terme d'échelles temporelles entre

les mouvements lents (marée, courants induits par les vagues, ...)

et les mouvements rapides (vagues, ondes infagravitaires, ...)

→ hypothèse naturelle hors de la zone affectée par le déferlement



→ modèles spectraux (SWAN, WWIII, TOMAWAC, ...)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot ((\vec{C}_g + \vec{U})N) + \frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta} = \sum_i \frac{S_i}{\sigma}$$

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

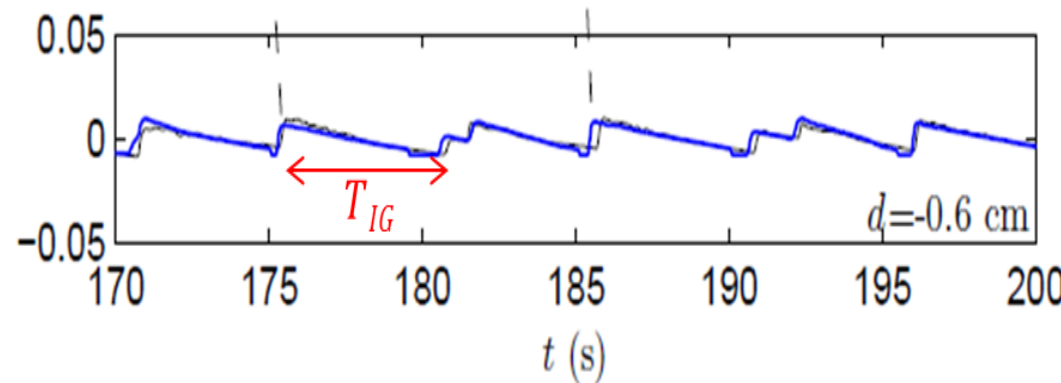
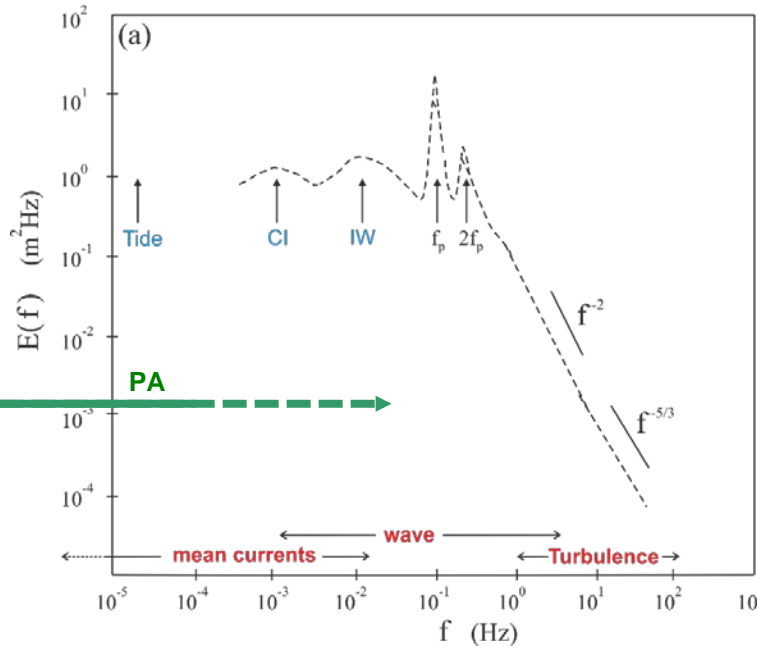
ex.: Roelvink and Reniers 2012, Ardhuin et al. 2017

→ bonne description de la circulation littorale et côtière induite par les vagues à grande échelle

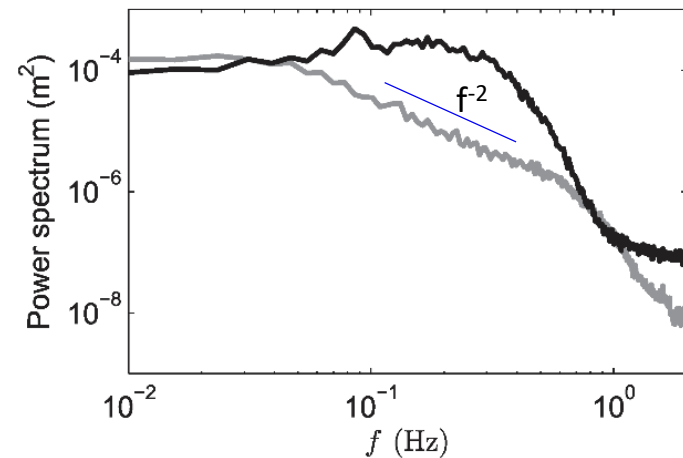
Zone de surf : Dynamique très fortement non-linéaire

→ hypothèse de séparation d'échelles ?

→ ex. : ondes infra-gravitaires / houle



Van Dongeren et al. 2007, Tissier et al. 2017



de Bakker et al. 2015

Zone de surf : Dynamique très fortement non-linéaire

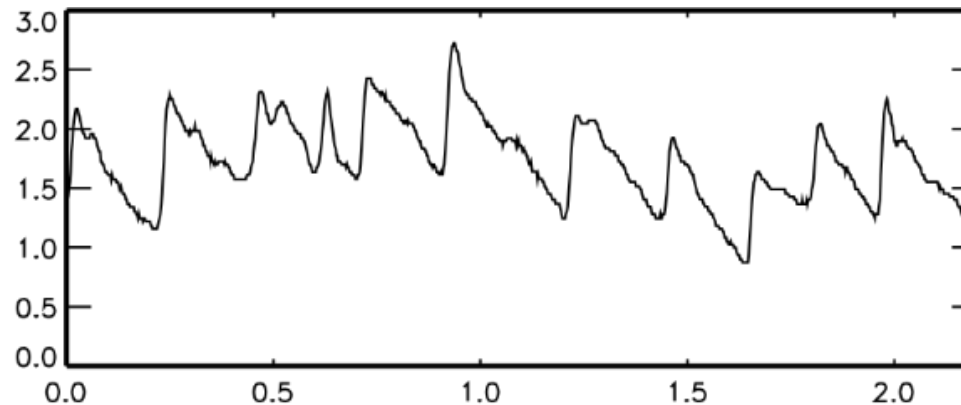
Modélisation spectrale

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot ((\vec{C}_g + \vec{U})N) + \frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta} = \sum_i \frac{S_i}{\sigma}$$

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

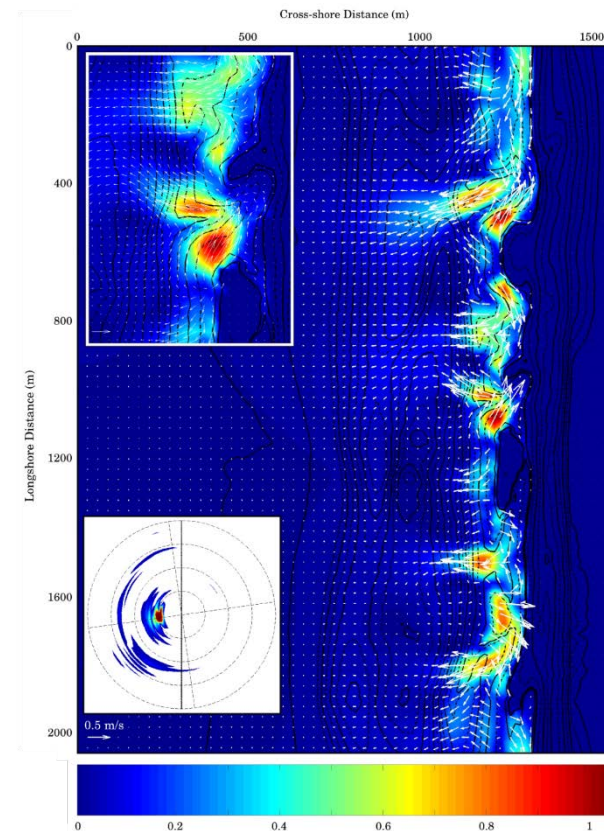
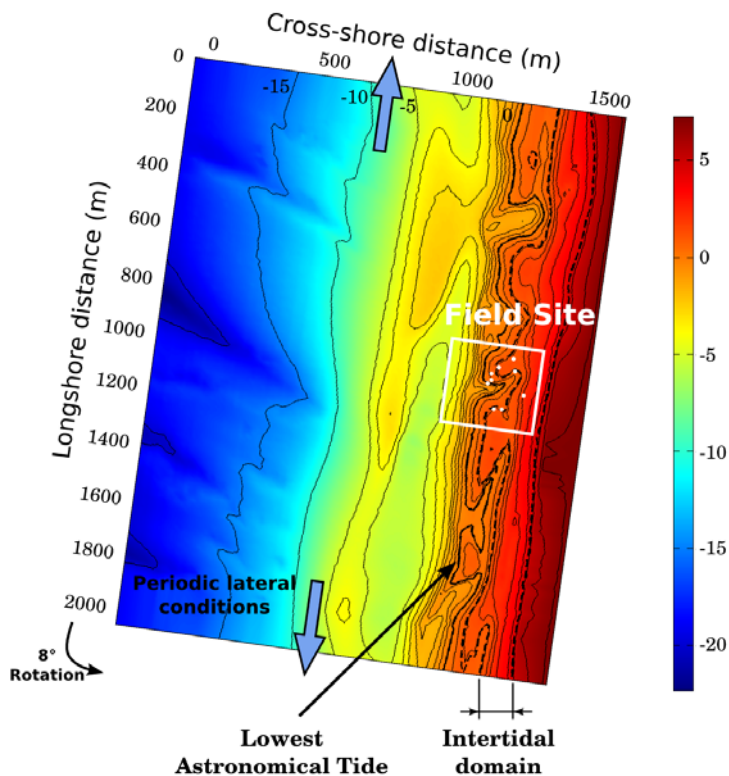
$$S_b = \mathcal{D}_b \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}}$$

\mathcal{D}_b donnée par
Battjes and Janssen 1978



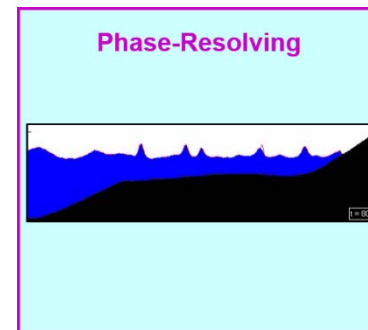
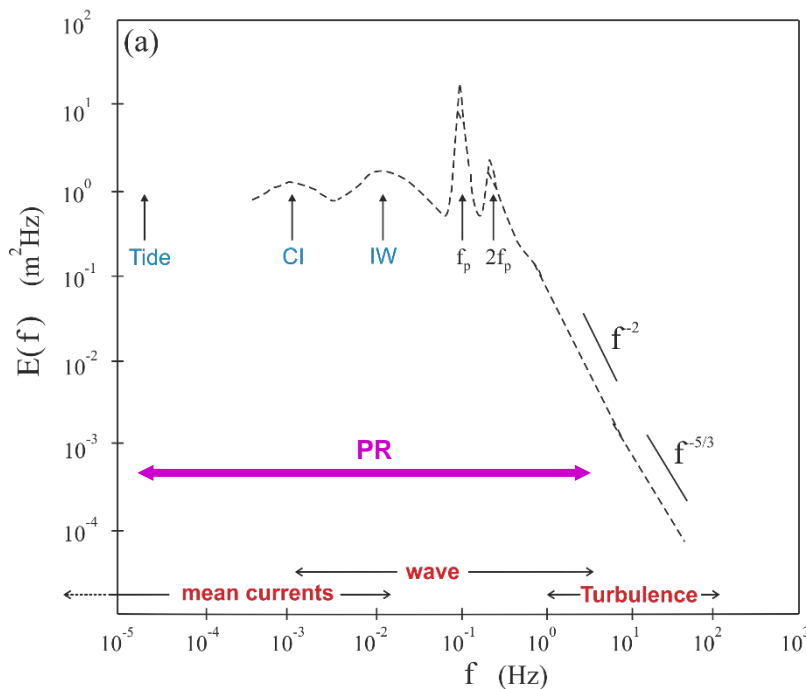
Seule approche adaptée pour

- temps longs : morphodynamique des littoraux
 - grande échelle : échanges hydro-sédimentaires côte / large
- codes : 2DBeach, ROMS, CROCO, ...



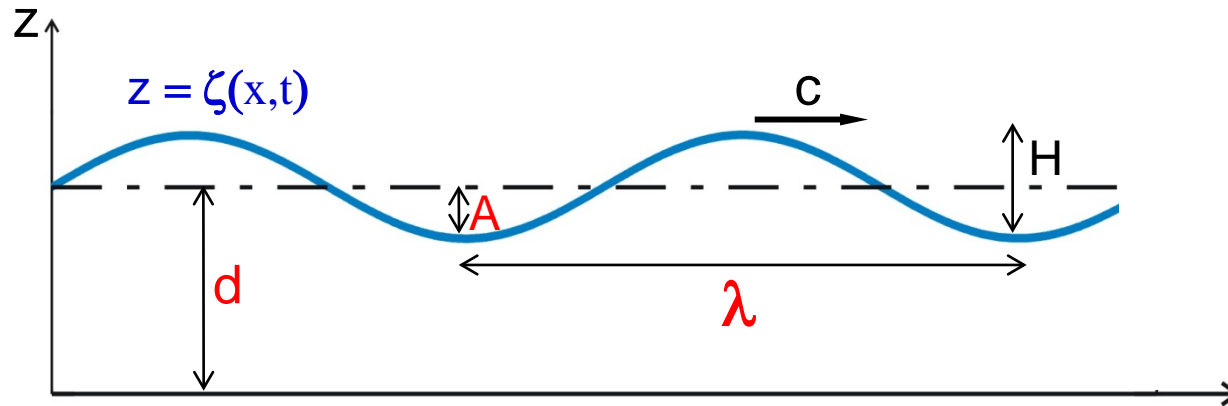
Bruneau et al. 2011

- dynamique instationnaire des vagues en zone de surf et de swash
 - impact, franchissement et submersion
- **modélisation à résolution de phase**



- ❑ Introduction
- ❑ Stratégies de modélisation
- ❑ **Modèles à résolution de phase**
- ❑ Modèle SGN et processus dissipatifs
- ❑ Conclusion

Zone affectée par le déferlement



$$\mu = \left(\frac{d}{\lambda/2\pi} \right)^2 = (kd)^2$$

$$\varepsilon = \frac{A}{d}$$

➤ $\varepsilon = O(1)$

➤ $\mu \ll 1$

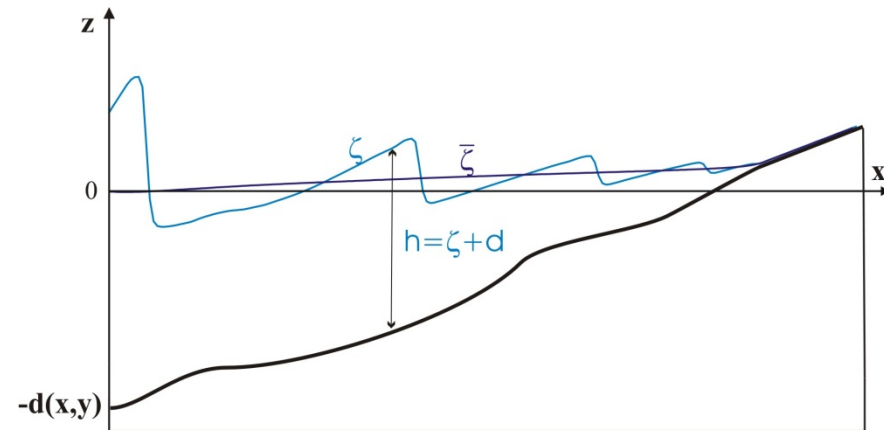
Equations d'Euler 3D à surface libre

→ développement asymptotique par rapport à μ

Equations 2DH adimensionnées

$$\partial_t \zeta + \nabla \cdot (h \mathbf{u}) = 0$$

$$\partial_t \mathbf{u} + \varepsilon (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla \zeta = \mu \mathcal{D} + O(\mu^2)$$



Equations 1D fond plat

$$\begin{aligned}\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \epsilon u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} &= \mu \mathcal{D}\end{aligned}$$

$$\mathcal{D} = \frac{1}{3h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \epsilon u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \epsilon \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) \right)$$

□ ordre 0 : **équations de Saint Venant**

→ non-dispersives et totalement non-linéaires

Equations 1D fond plat

$$\begin{aligned}\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \epsilon u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} &= \mu \mathcal{D}\end{aligned}$$

$$\mathcal{D} = \frac{1}{3h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \epsilon u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \epsilon \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) \right)$$

□ ordre 0 : **équations de Saint Venant**

→ non-dispersives et totalement non-linéaires

□ $O(\mu)$ et $\epsilon=O(\mu)$: **équations de Boussinesq**

$$\mathcal{D} = \frac{1}{3} \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t}$$

→ faiblement dispersives et faiblement non-linéaires

□ $O(\mu)$ et $\epsilon=O(1)$: **équations Serre ou Green Naghdi (SGN)**

→ faiblement dispersives et totalement non-linéaires

Prise en compte des non-linéarités

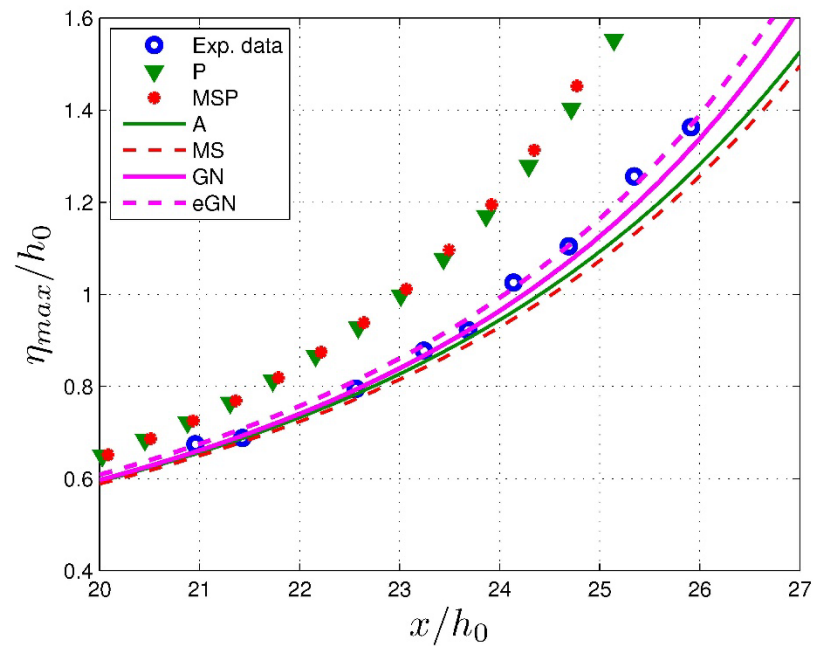
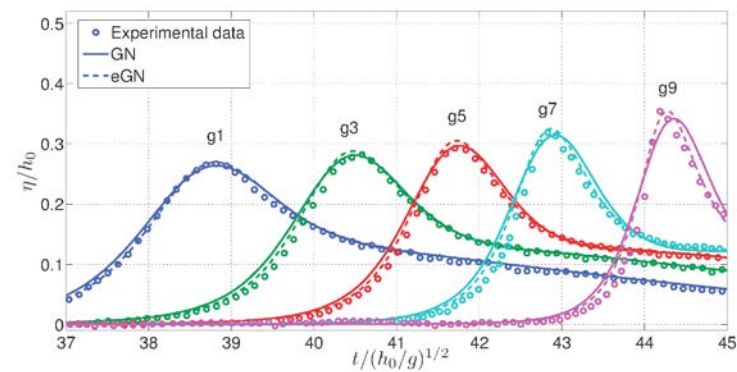
Filippini et al. JCP 2016

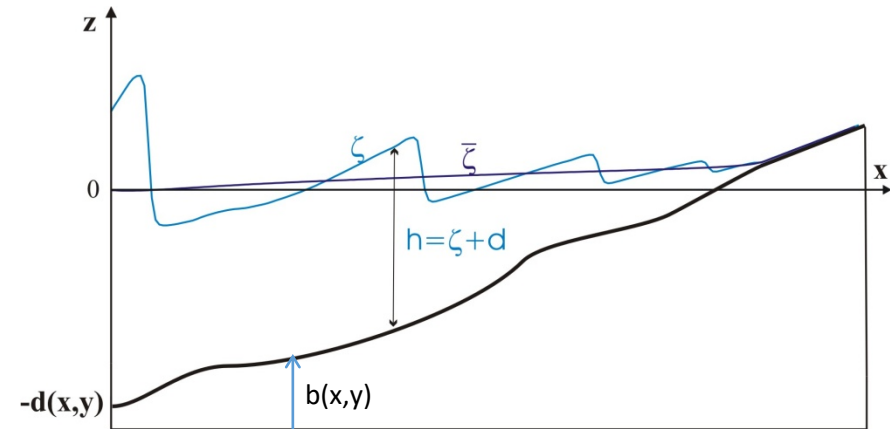
Figure 1.18: Nonlinear shoaling. Comparison between the computed wave peak evolutions in space and laboratory data from Grilli *et al.* [1994] for the models discussed.

Equations 2D fond variables

$$\partial_t \zeta + \nabla \cdot (h \mathbf{u}) = 0$$

$$\partial_t \mathbf{u} + \varepsilon (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla \zeta = \mu \mathcal{D} + O(\mu^2)$$

Lannes and Bonneton (2009)



$$\mathcal{D} = -\mathcal{T}[h, b] \mathbf{u}_t - \varepsilon \mathcal{Q}[h, b](\mathbf{u})$$

where the linear operator $\mathcal{T}[h, b]$ is defined as

$$\mathcal{T}[h, b]W = -\frac{1}{3h} \nabla (h^3 \nabla \cdot W) + \frac{1}{2h} [\nabla (h^2 \nabla b \cdot W) - h^2 \nabla b \nabla \cdot W] + \nabla b \nabla b \cdot W$$

and the quadratic term $\mathcal{Q}[h, b](\mathbf{u})$ is given by

$$\begin{aligned} \mathcal{Q}[h, b](\mathbf{u}) = & -\frac{1}{3h} \nabla (h^3 ((\mathbf{u} \cdot \nabla)(\nabla \cdot \mathbf{u}) - (\nabla \cdot \mathbf{u})^2)) \\ & + \frac{1}{2h} [\nabla (h^2 (\mathbf{u} \cdot \nabla)^2 b) - h^2 ((\mathbf{u} \cdot \nabla)(\nabla \cdot \mathbf{u}) - (\nabla \cdot \mathbf{u})^2) \nabla b] + ((\mathbf{u} \cdot \nabla)^2 b) \nabla b \end{aligned}$$

Méthodes de resolution hybrides

$$\partial_t \zeta + \nabla \cdot (h\mathbf{u}) = 0$$

$$\partial_t (h\mathbf{u}) + \nabla \cdot (h\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) + gh\nabla\zeta = \mathcal{D}$$

étape hyperbolique

$$(I + \alpha T)\mathcal{D} = T(gh\nabla\zeta) - Q(\mathbf{u})$$

étape elliptique

Etape hyperbolique SV → domaine de recherche tres actif en math appli : nombreuses méthodes numériques performantes

- gestion de la ligne d'eau, positivité de h
- schémas numériques équilibrés (*well-balanced*) en présence de fortes variations de pente bathymétrique
- Méthodes VF et EF d'ordre élevé sur maillage non-structuré

Méthodes de resolution hybrides

$$\partial_t \zeta + \nabla \cdot (h\mathbf{u}) = 0$$

étape hyperbolique

$$\partial_t (h\mathbf{u}) + \nabla \cdot (h\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) + gh\nabla\zeta = \mathcal{D}$$

$$(I + \alpha T)\mathcal{D} = T(gh\nabla\zeta) - Q(\mathbf{u})$$

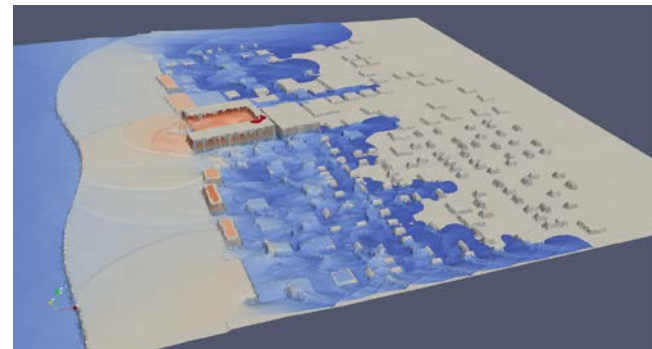
étape elliptique

- *Bonneton et al., JCP 2011 ; Tissier et al., CE2012* → VF/DF sur maillage structuré
- *Duran and Marche CCP 2015* → DG-FE/DG-FE, maillage non-structuré ; code **WAVEBOX**
- *Filippini, Ricchiuto et al., JCP 2016* → VF/FE ou FE/FE, maillage non-structuré ; code **SLOWS**
- *Popinet JCP 2015* → Méthode multi-grille, maillage adaptatif ; code **BASILISK**

➤ modèle de vague communautaire **UHAINA**

EPOC, IMB, INRIA Bx, IMAG

→ Sébastien De Brye et al., **JNGCGC 2018**



- ❑ Introduction
- ❑ Stratégies de modélisation
- ❑ Modèles à résolution de phase
- ❑ **Modèle SGN et processus dissipatifs**
- ❑ Conclusion

Approche classique pour les équations de type Boussinesq

- *Zelt 1991* : inspirée du concept de viscosité turbulente pour RANS
→ ajout d'un terme ad hoc de diffusion turbulente dans l'équation de la qdm

$$\partial_t \zeta + \nabla \cdot (h\mathbf{u}) = \mathcal{D}_h$$

$$\partial_t(h\mathbf{u}) + \nabla \cdot (h\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) + gh\nabla\zeta = \mathcal{D} + \mathcal{D}_{hu}$$

$$\mathcal{D}_{hu} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{hu} \frac{\partial(h\mathbf{u})}{\partial x} \right)$$

$$\mathcal{D}_h = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial h}{\partial x} \right)$$

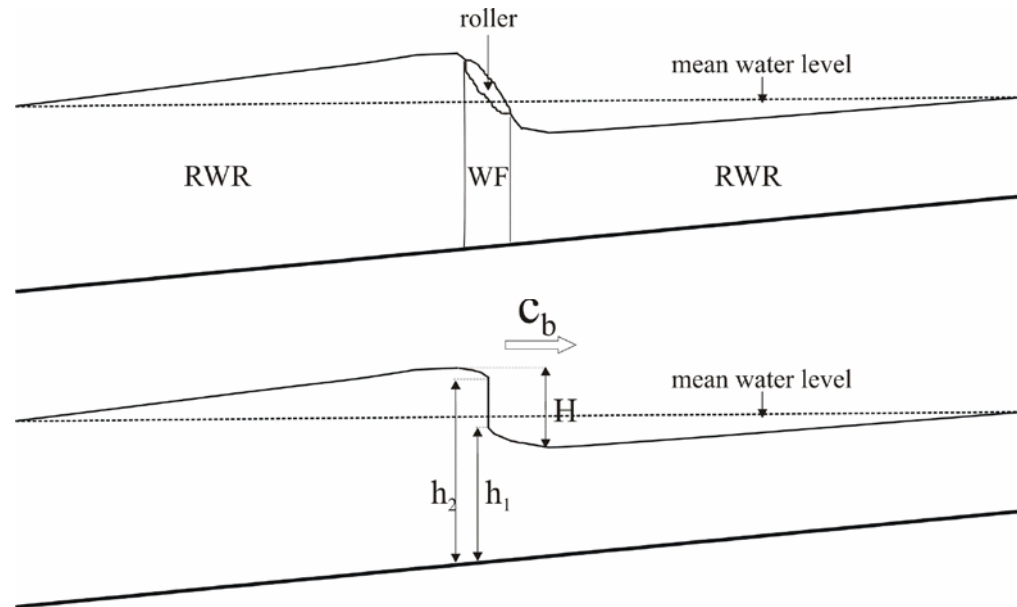
- *Kennedy et al. 2000* → application aux équations SGN, (code FUNWAVE)
- *Cienfuegos, Barthélémy, Bonneton, 2010* → ajout de coefficients de mélange turbulent aux 2 équations : masse et qdm

Approche classique pour les équations de type Boussinesq

→ manque de bases physique et mathématique

- nécessite la calibration de nombreux paramètres ajustables
- difficultés pour gérer des bathymétries complexes, le franchissement et les lignes d'eau multiples

Vagues déferlées dans la zone de surf interne



$$\partial_t \zeta + \nabla \cdot (hu) = 0$$

$$\partial_t(hu) + \nabla \cdot (hu \otimes u) + gh \nabla \zeta = 0$$

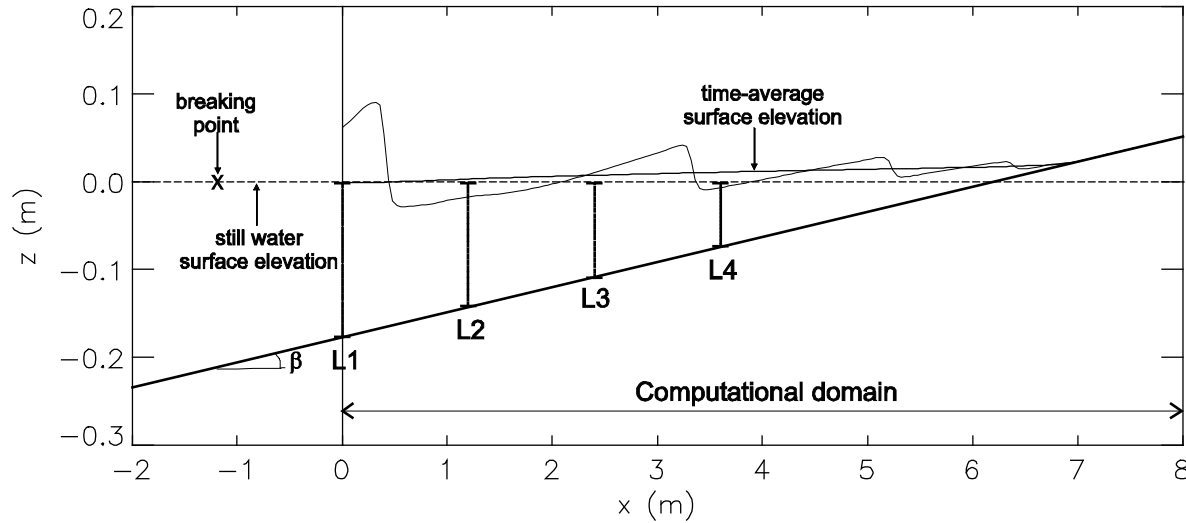
$$-c_b[h] + [hu] = 0$$

$$-c_b[hu] + [hu^2 + \frac{1}{2}gh^2] = 0$$

Eq. SV avec chocs → méthodes numériques à capture de choc

→ dissipation d'énergie des vagues : pas de paramétrisation ad hoc

$$D_b = \frac{g}{4} \left(\frac{g(h_2 + h_1)}{2h_1 h_2} \right)^{1/2} (h_2 - h_1)^3$$

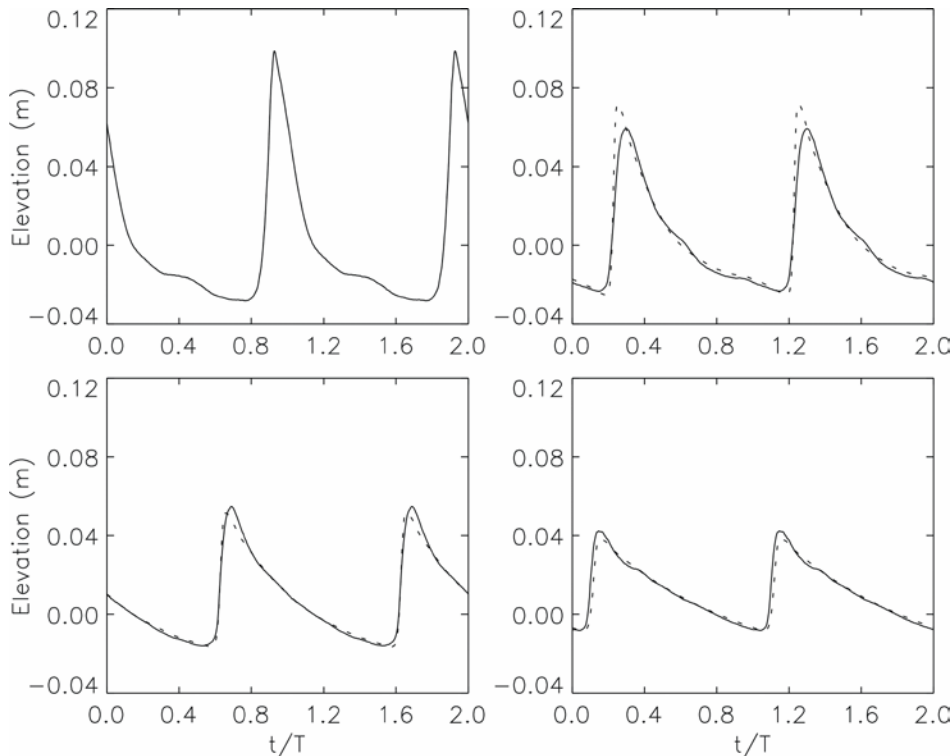


**Cox's (1995) spilling
breaking experiment**

$H_0=0.115$ m, $T=2.2$ s, $\beta=1/35$

Numerical parameters

$\Delta x=0.04$ m, $\Delta t=0.01$ s, $f_r=0.015$



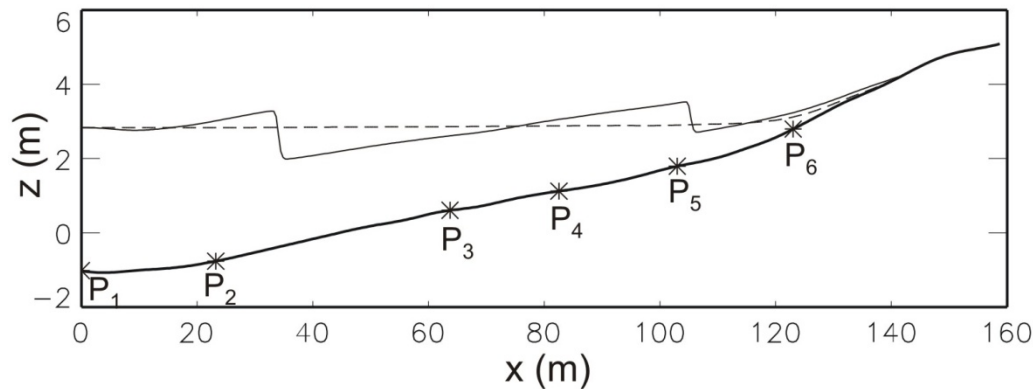
- ✓ dissipation d'énergie
- ✓ distorsion non-linéaire
- ✓ ondes en dents de scie

Bonneton (2007)

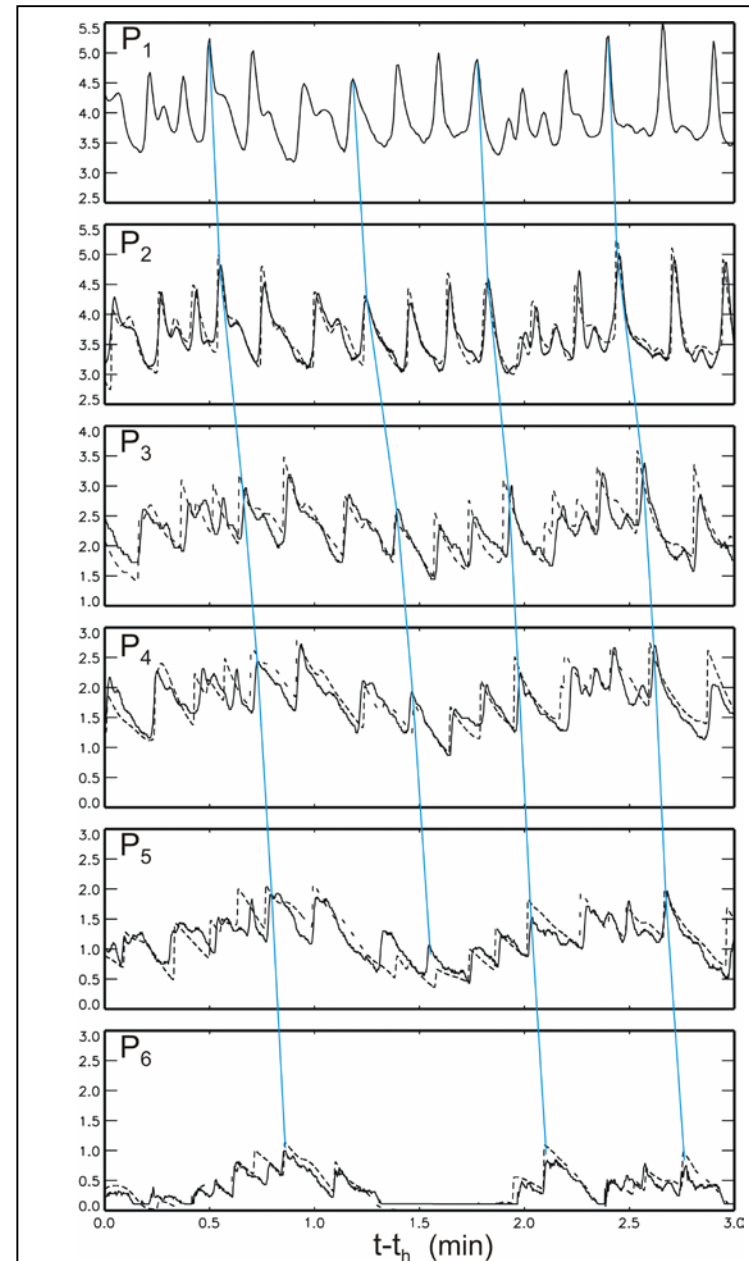
Comparison with field data

Truc Vert Beach 2001

- ◆ Offshore wave conditions: $\theta \approx 0^\circ$, $H_s=3$ m, $T_s=12$ s
- ◆ Maximum surf zone width: 500 m

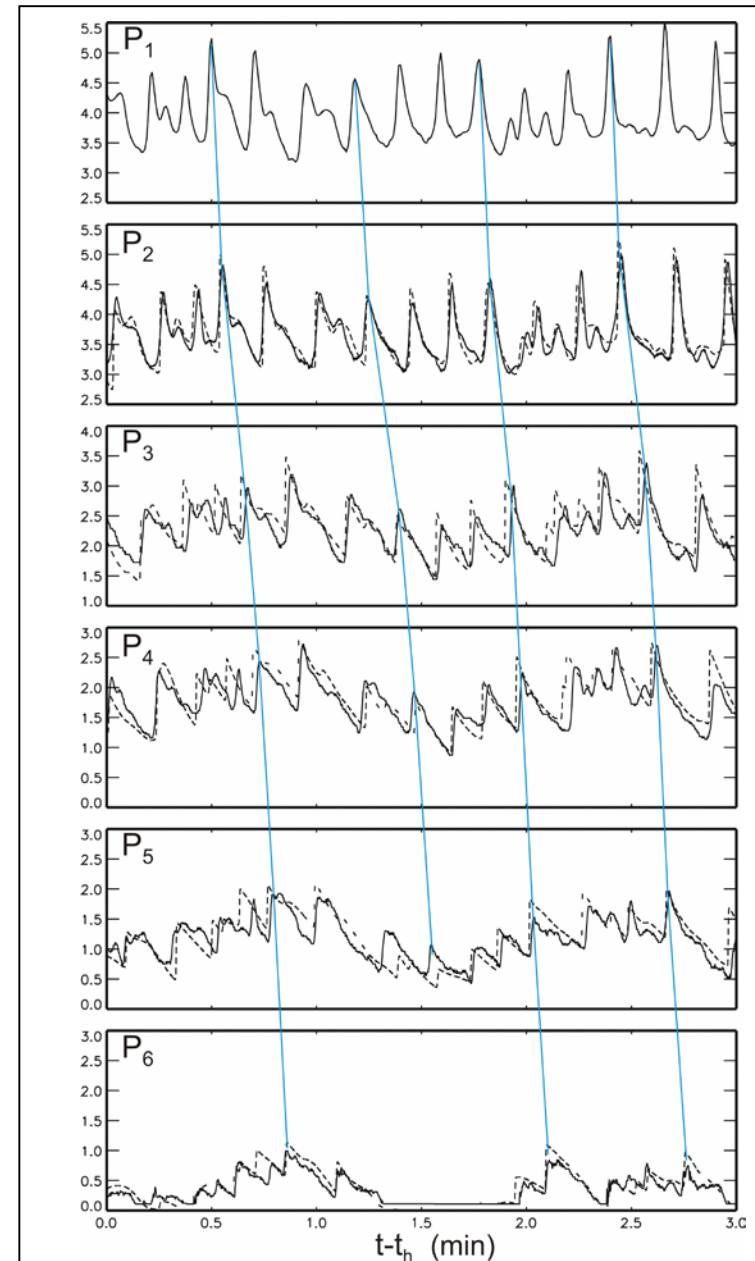


Bottom topography and pressure sensor locations

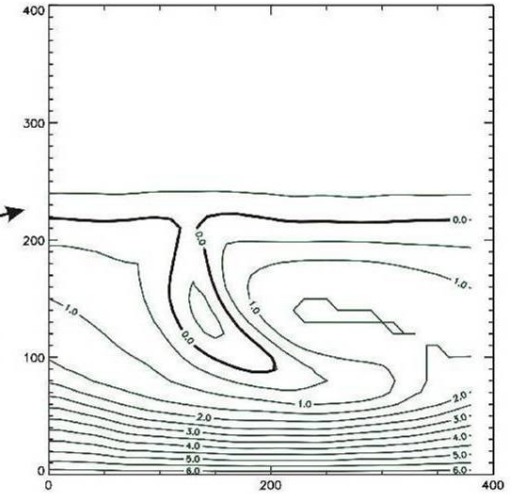
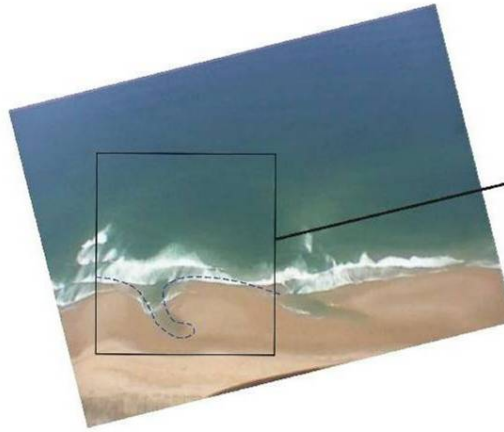


Bonneton et al. JCR 2004

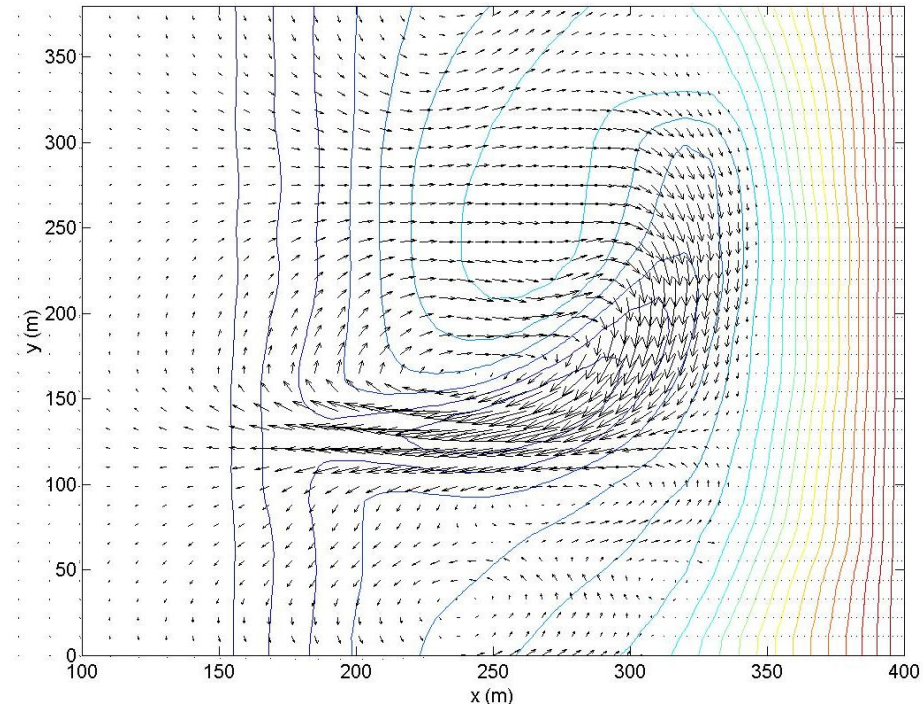
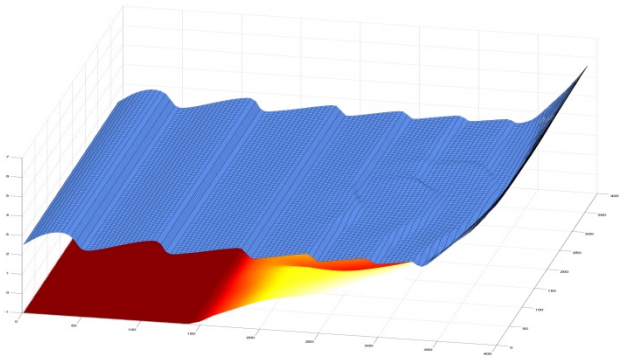
- ✓ dissipation d'énergie
- ✓ distorsion non-linéaire
- ✓ ondes en dents de scie
- ✓ ondes infra-gravitaires



- ✓ dissipation d'énergie
- ✓ distorsion non-linéaire
- ✓ ondes en dents de scie
- ✓ ondes infra-gravitaires



- ✓ déferlement différentiel et vorticité



Modélisation des vagues de la zone de levée jusqu'aux zones de surf et de swash

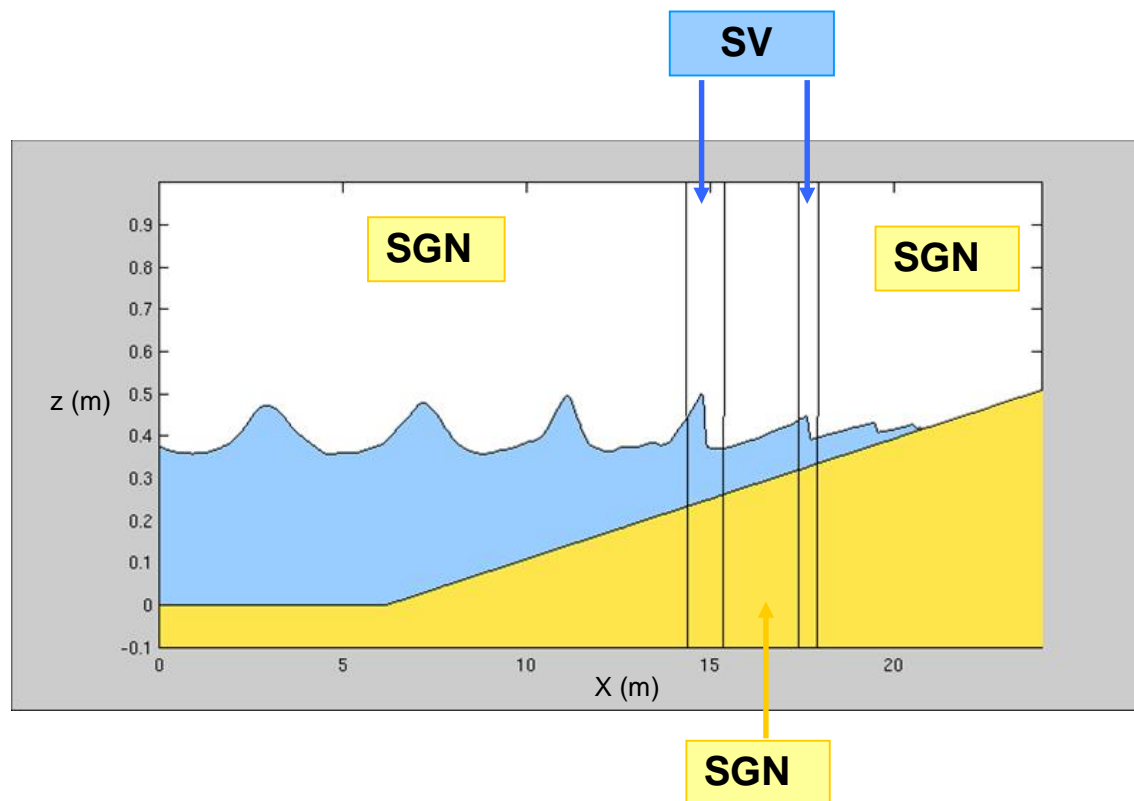
$$\begin{aligned} \partial_t \zeta + \nabla \cdot (h \mathbf{u}) &= 0 \\ \partial_t \mathbf{u} + \varepsilon (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla \zeta &= \cancel{\mu \mathcal{D}} \end{aligned}$$

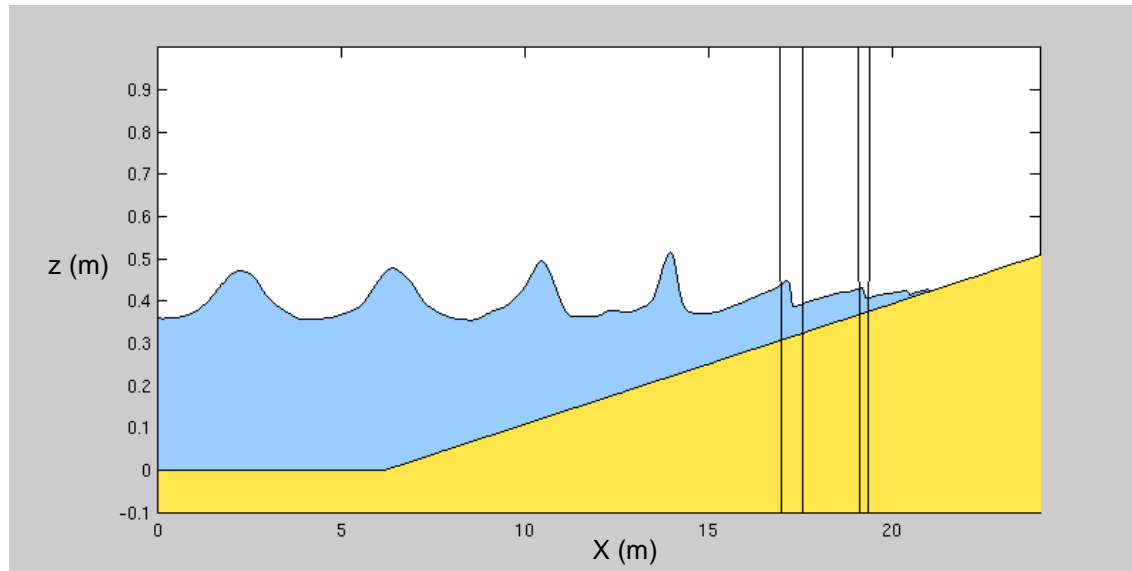
Vagues non-déferlantes

→ équations SGN

Vagues déferlées

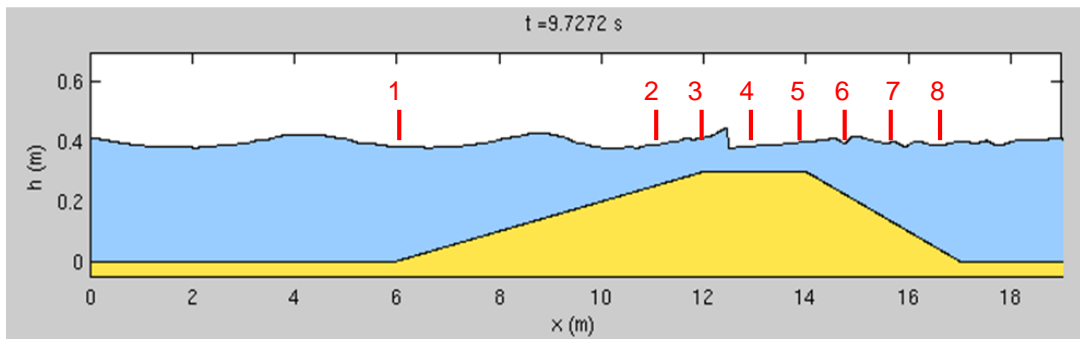
→ équations SV avec choc





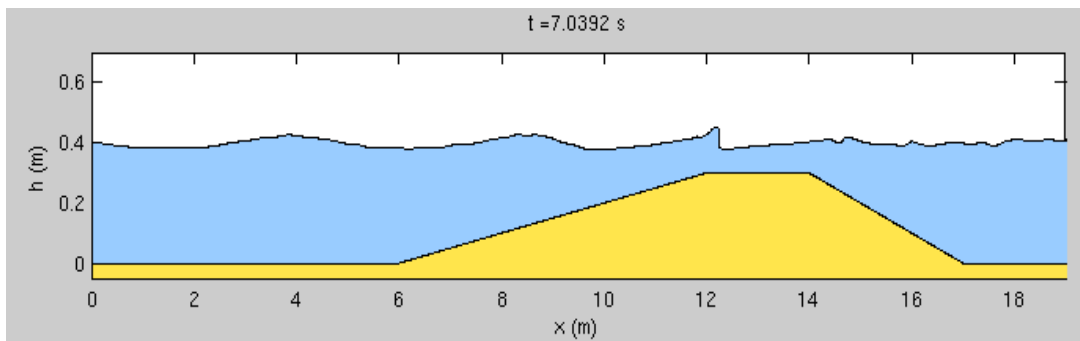
Periodic waves breaking over a bar

Beji and Battjes (1993) experiments

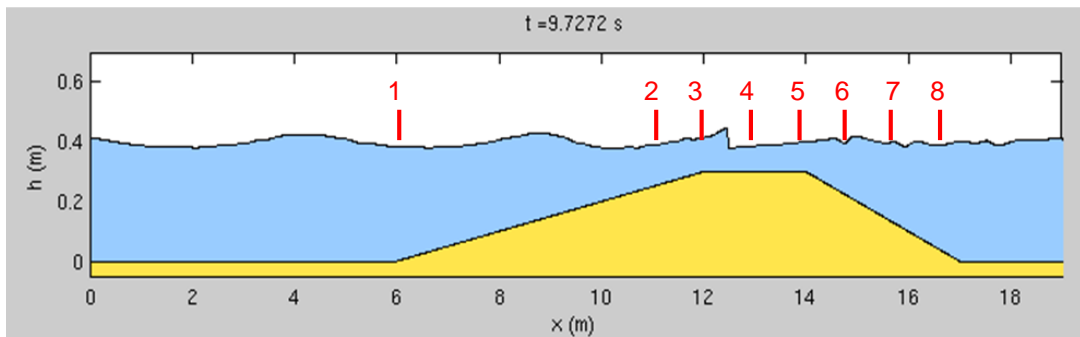


Periodic waves breaking over a bar

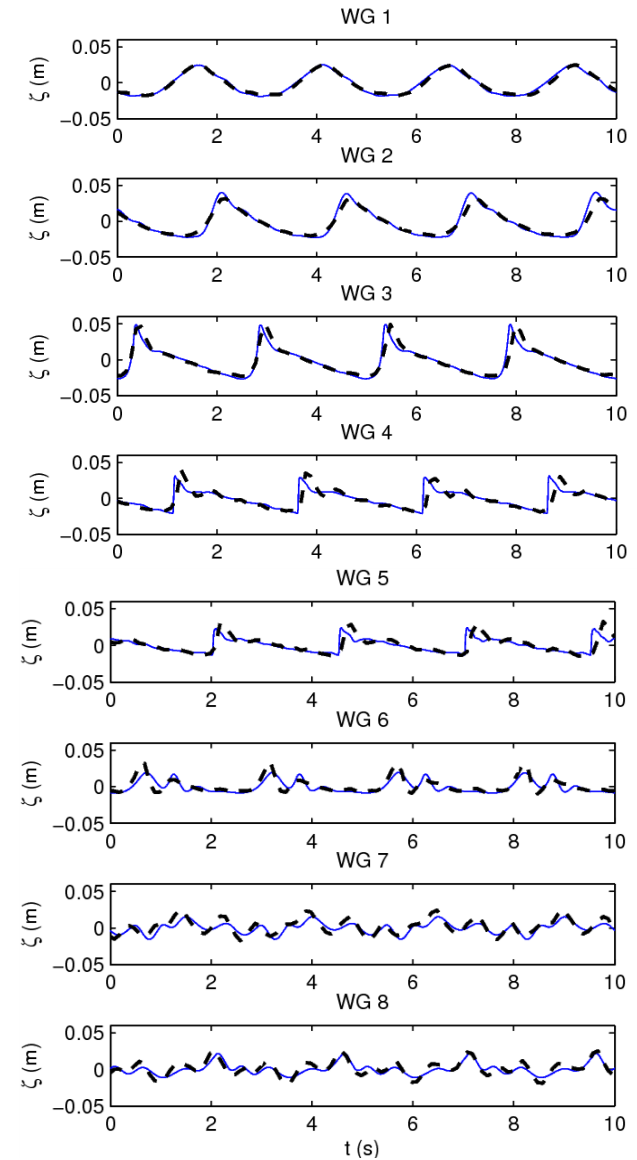
Beji and Battjes (1993) experiments



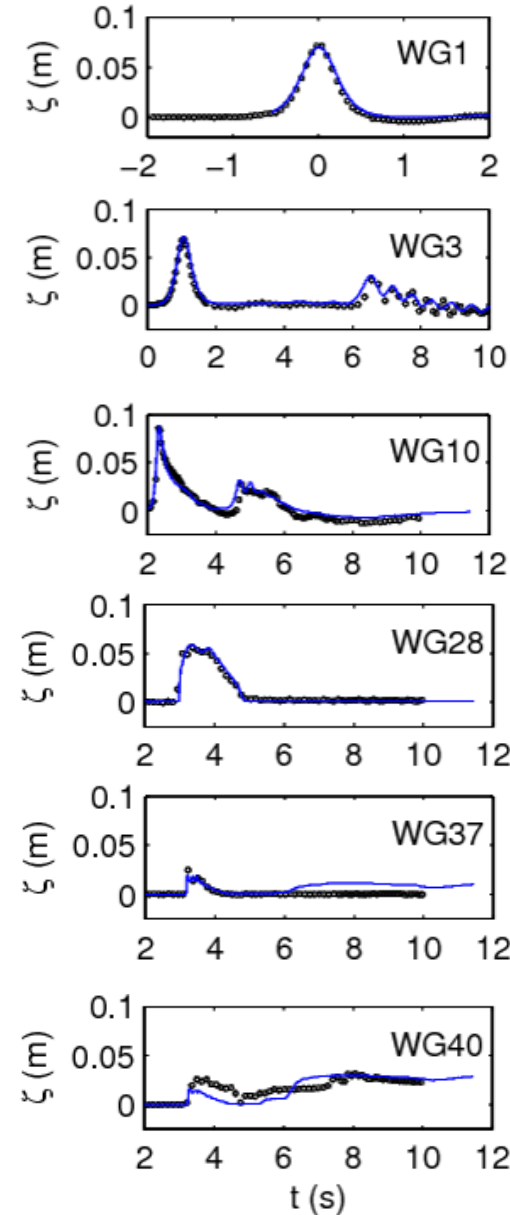
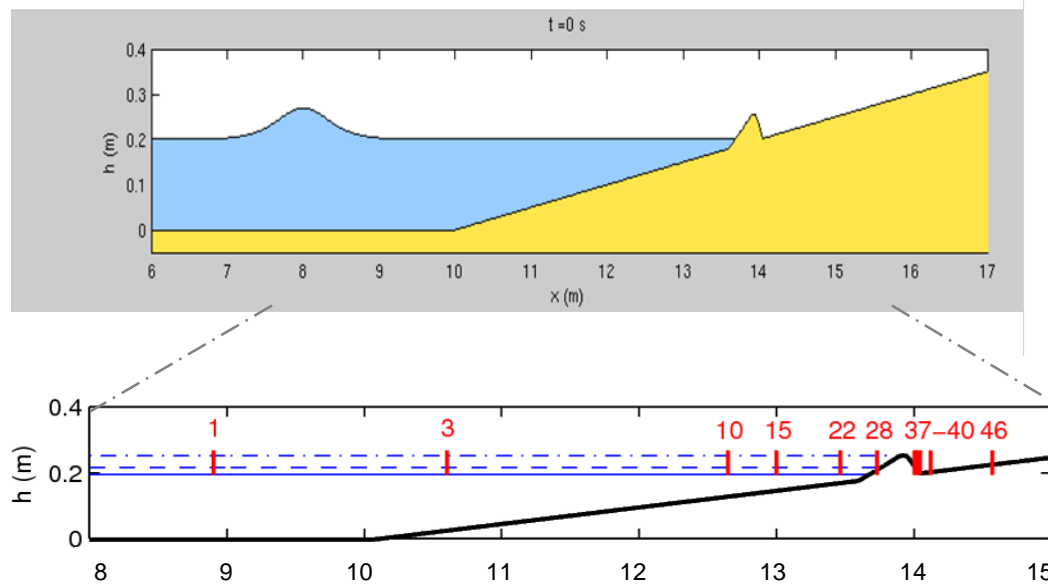
Periodic waves breaking over a bar

Beji and Battjes (1993) experiments

----- Laboratory data
 ———— Model prediction



Wave overtopping and multiple shorelines

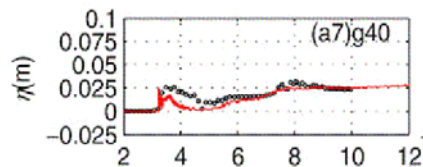
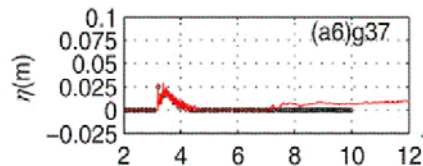
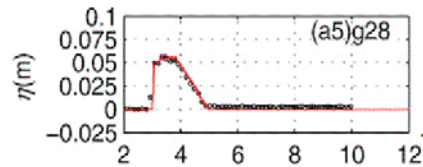
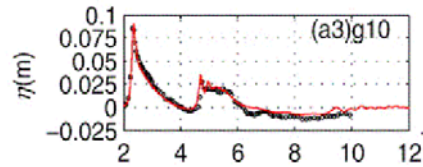
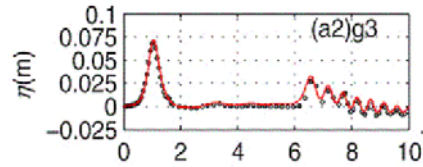
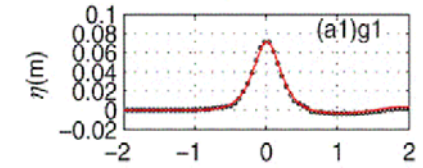
Solitary waves overtopping a seawall (*Hsiao and Lin, 2010*)

Wave overtopping and multiple shorelines

Modèle VOF, RANS

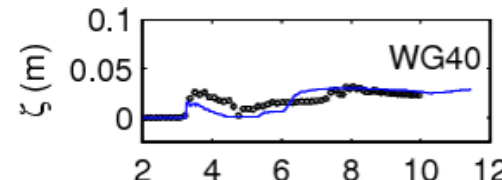
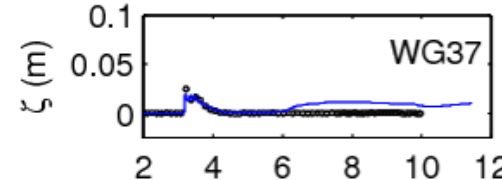
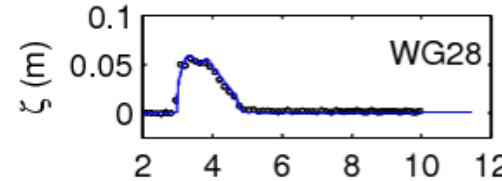
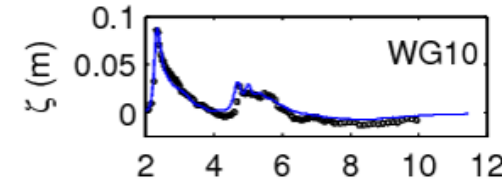
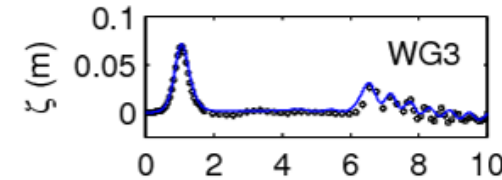
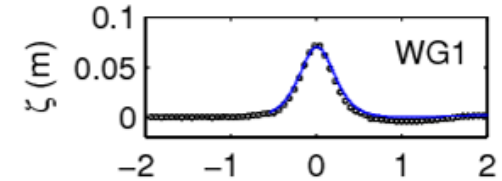
Hsiao et Lin (2010)

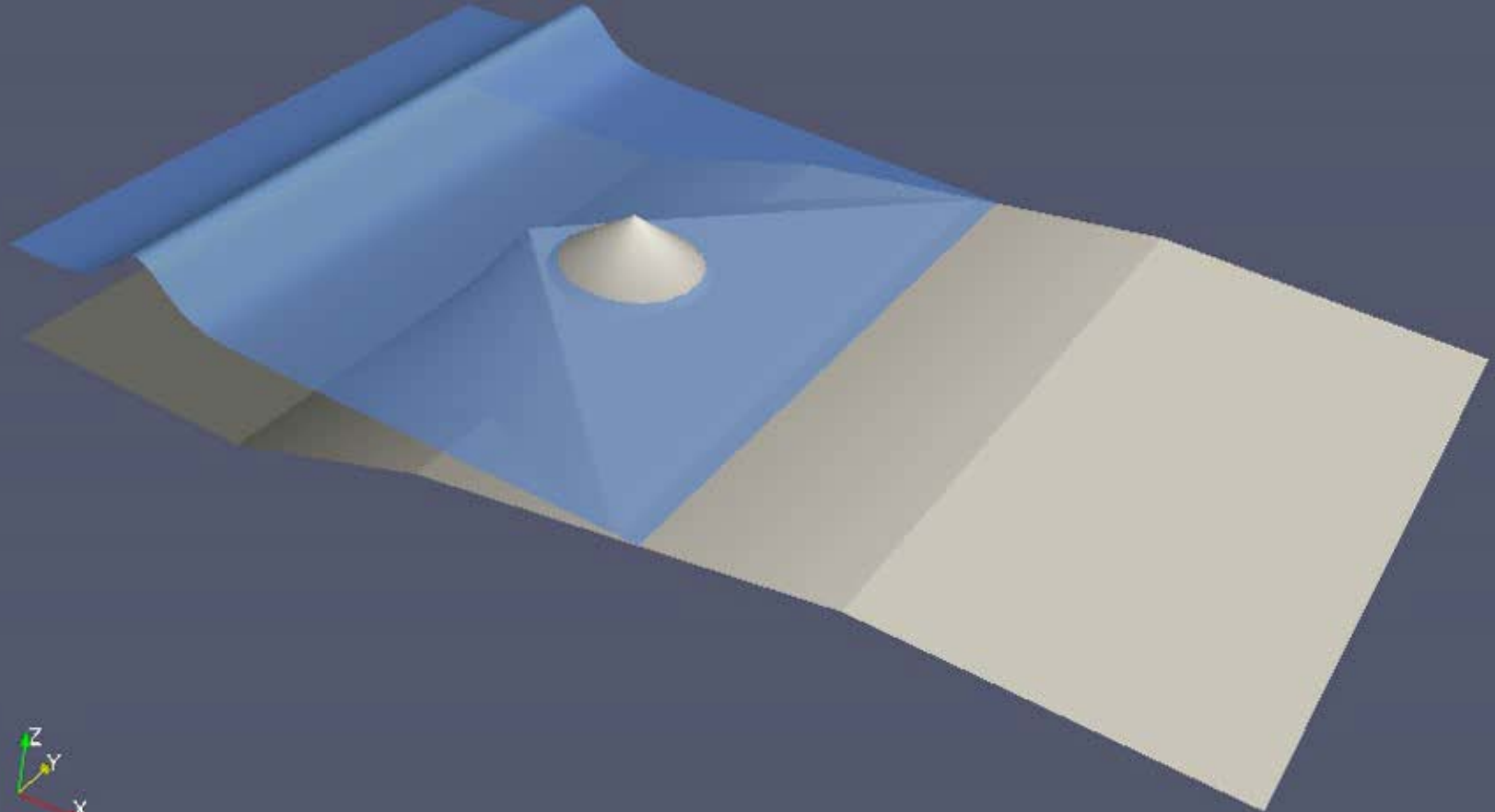
COBRAS model



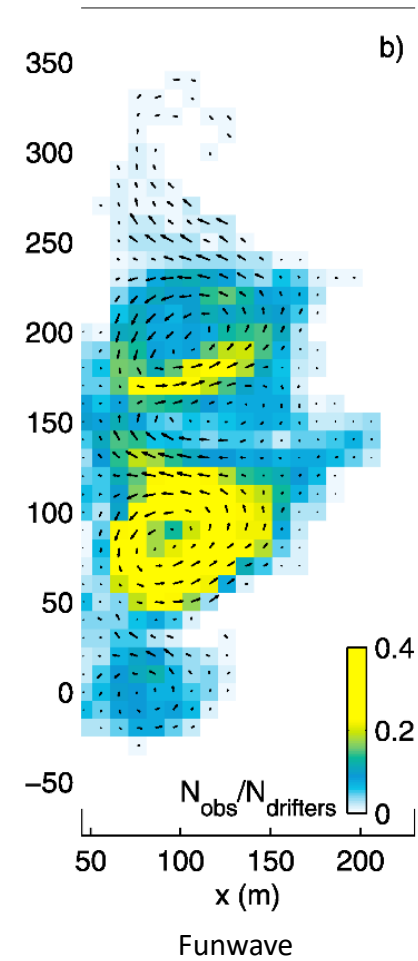
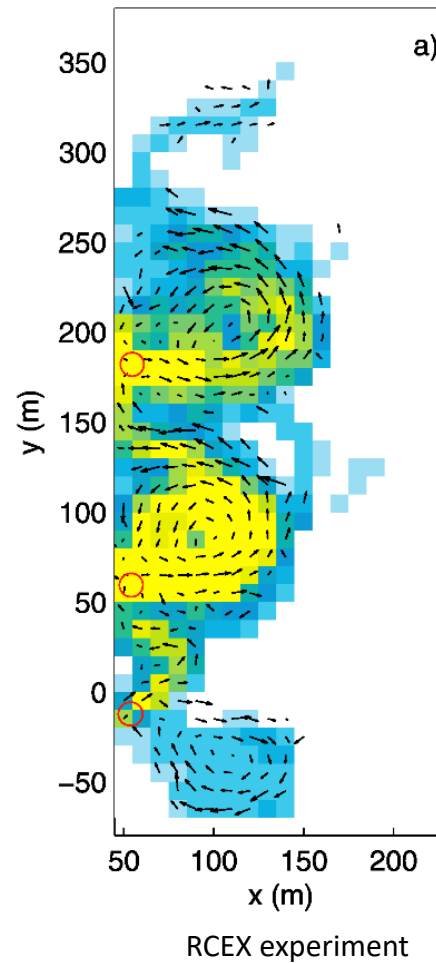
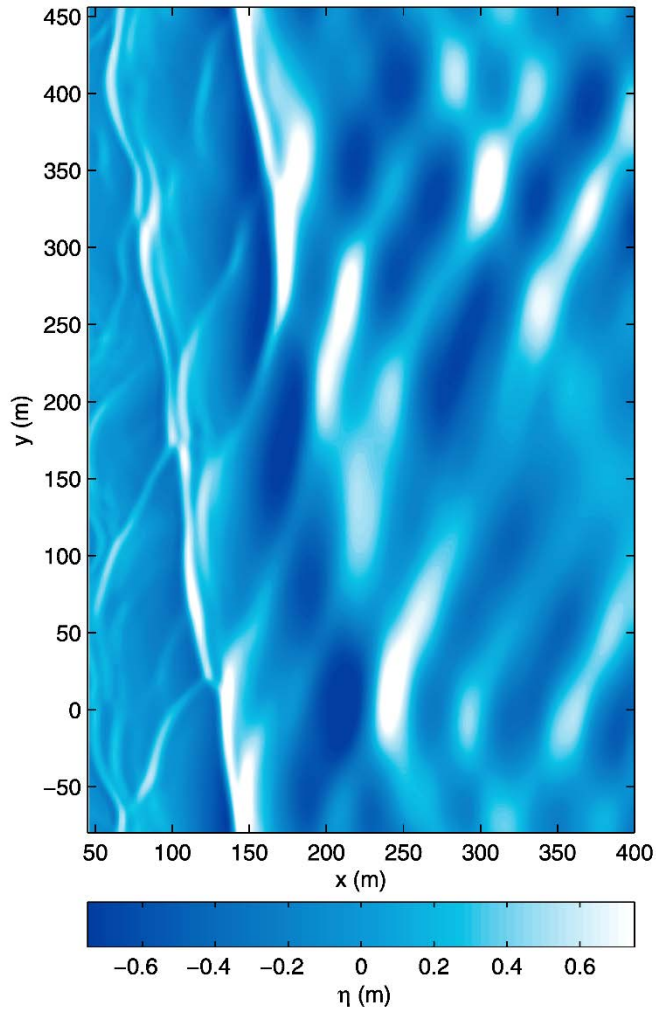
Modèle SGN

Tissier et al. CE 2012

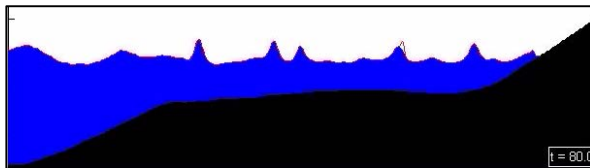
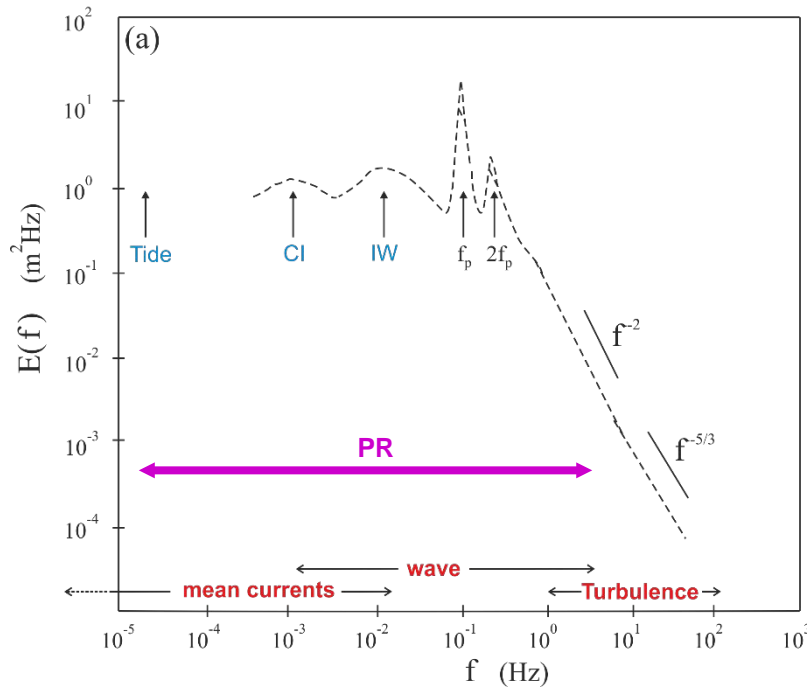




Courants d'arrachement et vorticité



Modélisation de l'hydrodynamique en zone de surf → modèles à résolution de phase

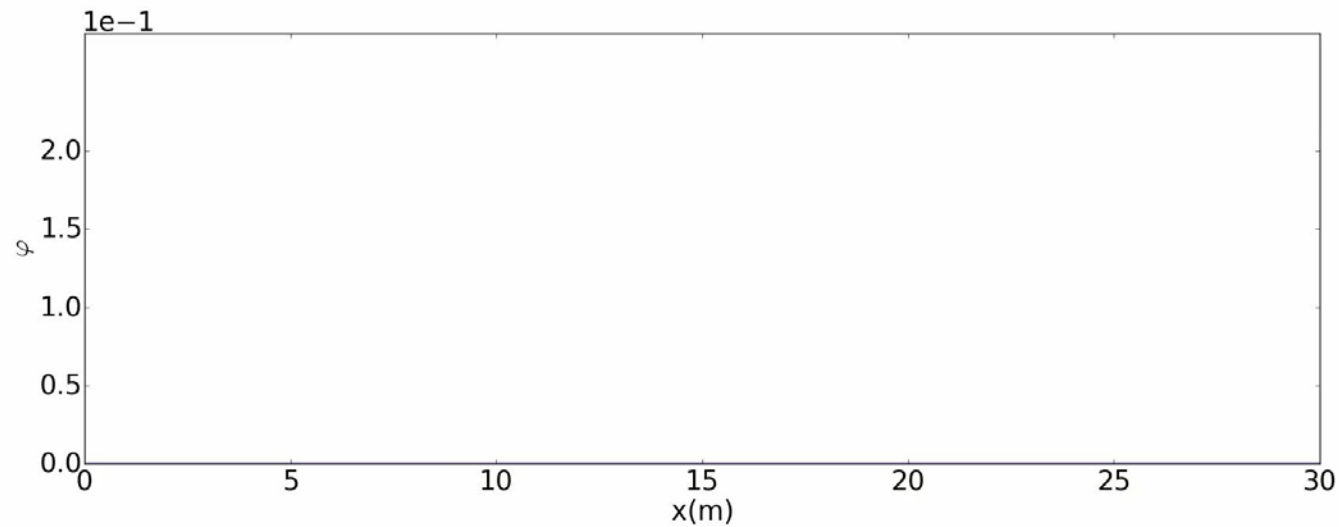
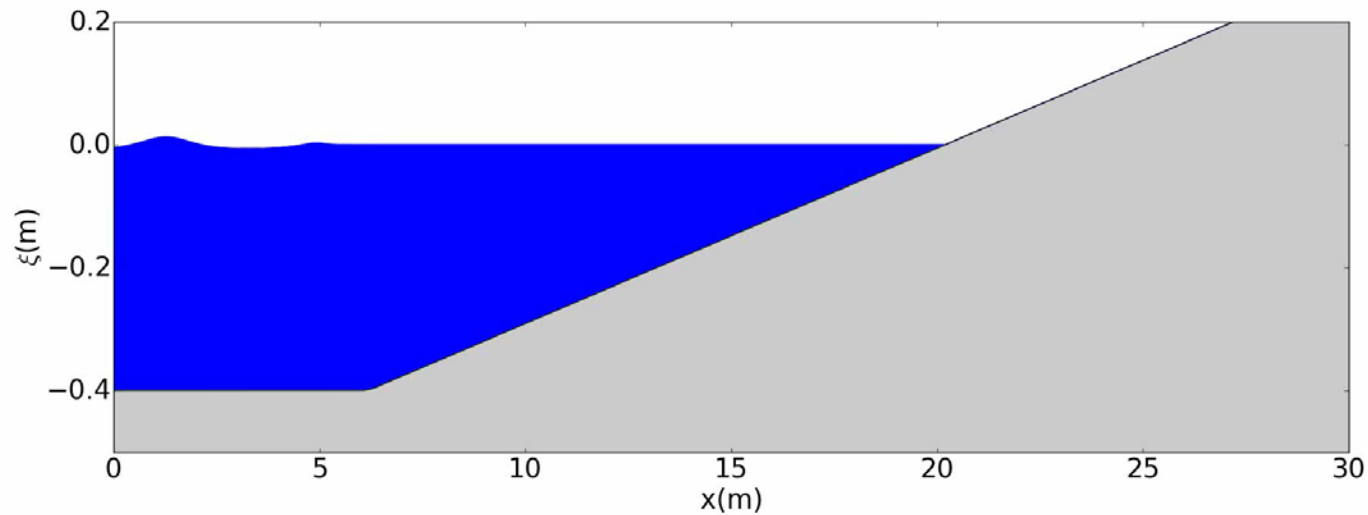


- ✓ dissipation d'énergie
- ✓ distorsion non-linéaire
- ✓ ondes infra-gravitaires
- ✓ vorticité verticale et circulation
- bathymétrie complexe
- lignes d'eau multiples
- franchissement

Mieux modéliser la dynamique des fronts déferlés

- **asymétrie verticale** → transport sédimentaire
- **vorticité horizontale** (rouleau de déferlement)

→ *Richard et Gavriluk JFM 2013*



Mieux modéliser la dynamique des fronts déferlés

- **asymétrie verticale**
- **vorticité horizontale** (rouleau de déferlement)
- **dynamique de la vorticité : horizontale/verticale**

Mesures in situ hautes fréquences des vagues et de la circulation

- **vagues : reconstruction non-linéaire, mesures directes acoustiques ou Lidar**
- **circulation et vorticité : méthodes vidéo PIV, radar**

Merci de votre attention

