

Modélisation de la surface océanique en vue de la télédétection micro-ondes

C-A Guérin, Université du Sud-Toulon-Var

LSEET/MIO

9 Novembre 2011

- **Le spectre**

- Répartition de l'énergie des vagues à travers les échelles
- Statistique d'ordre 2 de la surface
- Section efficace moyenne de rétrodiffusion (NRCS) avec les modèles EM simples (Kirchhoff, SSA, TSM, etc)

- **Les vagues**

- NRCS avec les modèles EM évolués
- Aspects non-linéaires et non-gaussiens
- Variabilité temporelle de l'écho radar ("fouillis de mer")

- **Le déferlement**

- NRCS et émissivité par vent fort
- Explication des rapports de polarisation

Quelles échelles pour la télédétection ? **Toutes !**

Première partie I

Les Spectres

Quel type de spectre ?

Trois spectres possibles dûs à l'aspect spatio-temporel

- Spectre en fréquence : $S(\omega)$ (bouées)
- **Spectre de vecteur d'onde** : (photos, images radar)

$$S(\mathbf{k}) = D(k, \theta) S(k)$$

- Spectre spatio-temporel : $S(\mathbf{k}, \omega)$ (Doppler, séries temporelles d'images radar)
- Le spectre est supposé "en équilibre" (pas d'évolution dans le temps)
=> petite zône
- Spectre océanographique (non centro-symétrique) \neq spectre mathématique (spectre symétrisé)

Que faut-il connaître du spectre ?

Moments pairs :

$$M_{2n} = \int S(\mathbf{k}) |k|^{2n} d\mathbf{k} = \text{Var}(\eta^{(n)})$$

- **Hauteur** : $H_s = 4\sqrt{M_0}$ (grandes vagues)
- **Pente** : $mss = M_2$ (toutes les vagues, 50% mss à 50 cm)
- **Courbure** : $msc = M_4$ (vagues courtes)

En télédétection micro-ondes ($\lambda_{EM} \leq 30$ cm), les vagues longues (> 1 m) ne sont “vues” qu’à travers ces paramètres globaux. Il suffit de connaître :

- H_s , mss, msc
- Le spectre des **vagues courtes**

Et les moments **impairs** ? => modèles non-gaussiens

Comment déterminer un spectre ?

- Mesure temporelle d'une hauteur d'eau (bouée, flotteurs, bateau, capteurs de pression)
- Mesure optique (scintillement, laser)
- Imagerie optique (stéréophoto, détection de contour)
- Mesure radar (SER micro-onde)
- Modèles physiques et équations primitives

- **Phillips 1958** (Arguments dimensionnels)

$$S(\omega) \sim \omega^{-5} \Leftrightarrow S(k) \sim k^{-4}$$

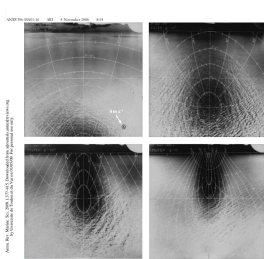
- **Pierson-Moskowitz, 1964** (mer pleinement développée)
Mesures d'accéléromètres en Atlantique-Nord+ auto-similarité

$$S_{PM}(\omega) = \alpha \omega^{-5} \exp(-1.25 \omega_p^4 / \omega^4), \quad \omega_p = 0.877 \frac{g}{U_{19.5}}$$

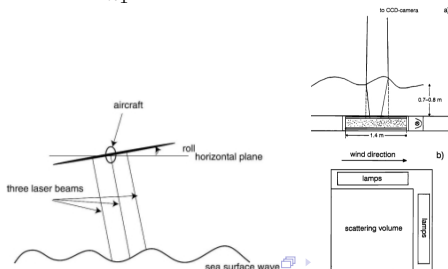
- JONSWAP (1968), **Hasselmann 1973**, fetch limité, modification du pic
- **Donelan, 1985** (mesures de lac et soufflerie)
 - JONSWAP $\times \omega / \omega_p \Rightarrow S(\omega) \sim \omega^{-4} \Leftrightarrow S(k) \sim k^{-3.5}$
 - Spectre océanographique directionnel $D(k, \theta)$

Les contraintes optiques

- Mss totale et “slick” contrainte par les mesures de de **Cox & Munk, 1951**
- Mesure laser du spectre des vagues gravité-capillarité par **Jähne et Riemer, 1990**
- Mss partielle contrainte par les mesures laser de segments (**Vandemark, 2004**)



$$\delta m_{SS} = \int_{k_1}^{k_2} k^2 2\pi k S(k) dk$$



- **Apel, 1994**

- Donelan pour ondes longues
- Jähne et Riemer pour les vagues courtes

- **Spectre unifié d'Elfouhaily, 1997** (“spectre d'lfremer”)

- Donelan pour ondes longues
- Pic de courbure à 1.7 cm
- Cox et Munk “clean” et “slick”
- Jähne et Riemer pour les vagues courtes
- Fonction angulaire en $\cos(2\theta)$

- **Kudryavtsev-Makin-Chapron, 1999**

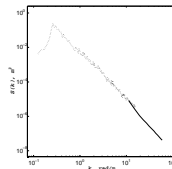
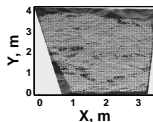
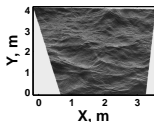
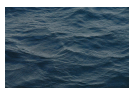
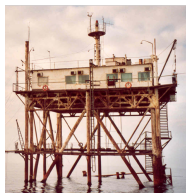
- idem Elfouhaily pour les ondes longues
- Mécanisme de génération des vagues de capillarité parasites
- Pic de courbure à 8 mm
- Compatible avec Jähne et Riemer et Cox et Munk.
- Fonction angulaire
- Utile pour la SER en bande Ka

- De plus en plus de jeux de données satellites disponibles (actif/passif, bandes L,C,X,Ku,Ka, pola V/H).
- Approche multifréquence pour contraindre les spectres.
- Donne accès à $S(\mathbf{k})$ autour de la fréquence de résonance et aux pentes et courbures filtrées.
- **Dépend du modèle EM sous-jacent** (KA, TSM, WCA,...)

Une technique prometteuse

La stéréovision

Equipe de Sébastopol (V. Dulov, M. Kosnik) et Ifremer Brest, coll. LATMOS, LSEET



Avantages

in situ

Pas de modèle

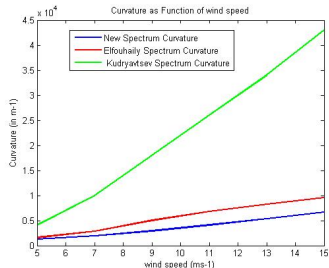
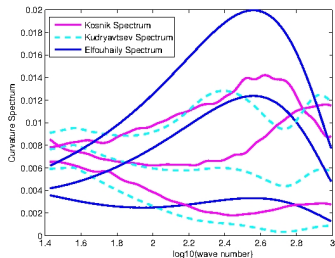
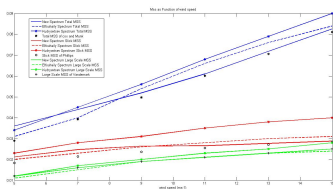
Inconvénients

Petite gamme d'échelles

Signal très bruité et lacunaire

Les spectres se parlent-ils ?

Hs	OK
mss	Bof
msc	La cacophonie
pic de courbure	variable
directivité	variable
courbure $k^4 S(k)$	très variable



- Les spectres observés sont multiparamètres (pas seulement le vent!)
=> dispersion des valeurs
- La statistique est instationnaire en temps et en espace => variabilité non prise en compte
- Statistiques d'ordre supérieur inconnue (bispectre, trispectre, etc).

Deuxième partie II

Les Surfaces

- **Surface figée :**

$$\eta(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum \sqrt{S(\mathbf{k}_n)} e^{i(\mathbf{k}_n \cdot \mathbf{r} - \varphi_n)}$$

- **Surface évoluant dans le temps :**

$$\eta(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum a_n e^{i(\mathbf{k}_n \cdot \mathbf{r} - \omega_n t - \varphi_n)} + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum b_n e^{i(\mathbf{k}_n \cdot \mathbf{r} + \omega_n t - \varphi'_n)}$$

où

$$\omega_n = \sqrt{g |k_n| + \gamma |k_n|^3}, \quad a_n^2 + b_n^2 = S(\mathbf{k}_n)$$

- Génération efficace par FFT
- Surface gaussienne



Skewness (asymétrie) et Kurtosis (aplatissement) :

$$\lambda_3 = \frac{\langle \eta^3 \rangle}{(\langle \eta^2 \rangle)^{3/2}} \neq 0, \quad \lambda_4 = \frac{\langle \eta^4 \rangle}{(\langle \eta^2 \rangle)^2} \neq 3$$

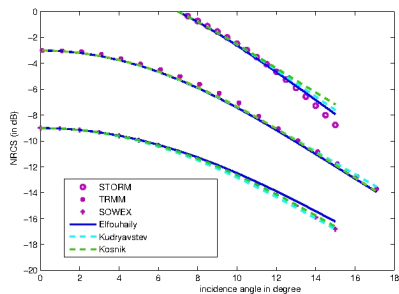
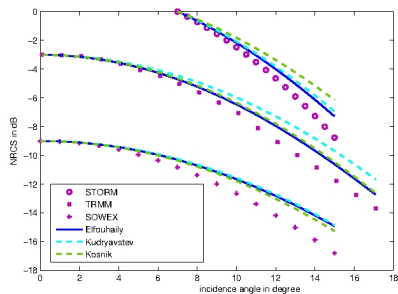
Skewness et kurtosis des hauteurs et des pentes à prendre en compte !

Important pour

- l'asymétrie vent/contre-vent
- le biais altimétrique
- le comportement nadir de la SER
- la signature Doppler de la surface

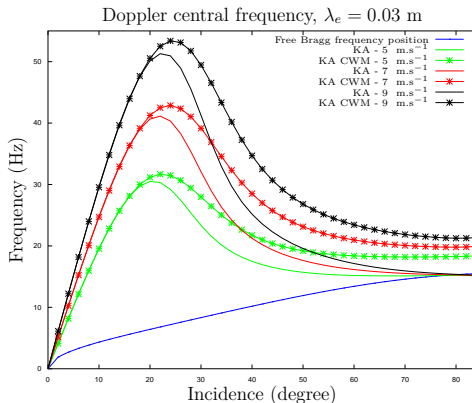
Surfaces non-linéaires

Effet du kurtosis sur les données nadir



Effet des non-linéarités sur le spectre Doppler

Décalage Doppler moyen en fonction de l'angle d'incidence (bande X)



- Développement perturbatif
Hasselmann (1962) et Longuet-Higgins (1963) :

$$\eta = \eta_1 + \eta_1 \star \eta_1 + \dots, \quad \eta_1(\mathbf{r}) = \sum \hat{\eta}(\mathbf{k}_n) e^{i\mathbf{k}_n \cdot \mathbf{r}}$$

où

$$\eta_1 \star \eta_1(\mathbf{r}, t) = \sum \sum B(\mathbf{k}_n, \mathbf{k}_m) \hat{\eta}(\mathbf{k}_n) \hat{\eta}(\mathbf{k}_m) e^{i((\mathbf{k}_n + \mathbf{k}_m) \cdot \mathbf{r})}$$

Problème :

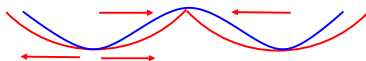
- Longues vagues uniquement
- Lourd numériquement
- Interactions à deux vagues
- Méthodes hamiltoniennes et développement d'opérateurs
(West, 1987, Dommermuth, 1987, Creamer, 1989)

Surfaces faiblement non-linéaires

Modèles Lagrangiens



Ships and boats on a choppy sea, J. Pendlebury, 1857



Modèle “Choppy wave” (Pierson 1962,..., Nougier 2009)

- Déformation horizontale d'une surface linéaire par transformée de Riesz
- Simple analytiquement, statistiques explicites
- Efficace numériquement (FFT)
- Robuste aux petites vagues
- Compatible avec l'ordre 2 de Longuet-Higgins

Modèles théoriques et numériques :

- Résolution rigoureuse des équations d'Euler ou Navier-Stokes
- Très lourd numériquement
- Peu d'échelles
- Pas de formulation statistique
- Servent à valider les modèles analytiques (même si les comparaisons ne sont pas évidentes)

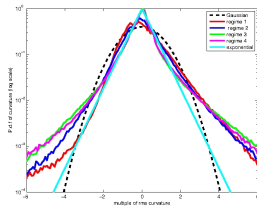
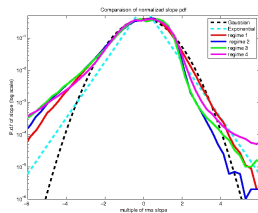
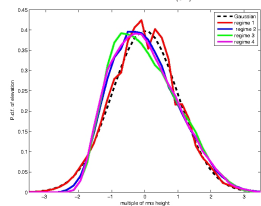
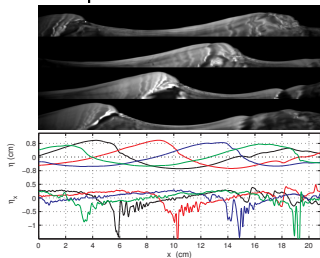
Alors que faire ?

- Approche expérimentale nécessaire
- Caractérisation statistique avec les techniques d'imagerie (topographie avec stéréo, profils avec détection de contours)

Surfaces fortement non-linéaires

Reconstruction de contour

Caulliez et Guérin, 2012 : caractérisation expérimentale des vagues de gravité-capillarité



- Fortes cambrures
- micro-déferlement
- intermittence

- Profils 1D
- échelles limitées (1 mm-20 cm)
- Traitement d'images

Troisième partie III

Le déferlement

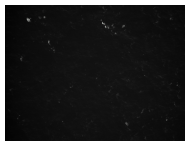
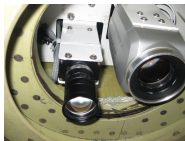
Téledétection active :

- Modèles de surfaces et EM ne sont plus valides
- Forte variabilité de la SER
- Rapports de polarisation V/H très bas (“sea spikes”)

Téledétection passive :

- Forte influence de l'écume sur l'émissivité

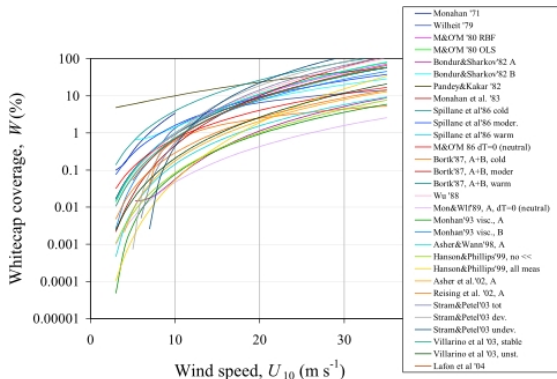
Phénomènes TRES compliqué à décrire => approche empirique et statistique (ANR SIMODE, LSEET/LATMOS/LOS)



Comment décrire le déferlement ?

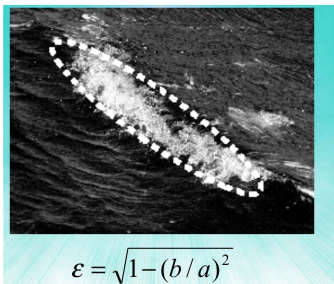
- Couverture d'écume
- Géométrie des moutons (forme, distribution en échelles, etc)
- Cinématique des fronts déferlants
- Epaisseur de couche, distributions de bulles (labo)
- Couche "homogénéisée" au sens EM

Paramètre de base, mais insuffisant (**Angelova, 2006**)



Travaux d'après séquences photos (Mironov 2009)

- Forme (ellipses)
- Distribution des longueurs de front (loi exponentielle)
- Auto-similarité (excentricité constante)
- Durée des événements (loi exponentielle)
- Nombre d'événements par unité de surface



- Phillips 1985 : $\Lambda(c)$ =densité de longueur de fronts (par unité de surface) se déplaçant à la vitesse c
- Modèle pour la contribution du déferlement à la SER (heuristique)
- Estimation d'après des séquences vidéo (Melville 2002, Gemmrich 2008)

Conclusion

Les enjeux actuels de la modélisation océanique

- Spectres
 - Paramètres pertinents (intrinsèques ou géophysiques?)
 - Statistiques d'ordre supérieur (bispectres, trispectres, etc)
- Modélisation de la surface
 - Modélisation robuste et efficace d'une surface non-linéaire multi-échelles
 - Modélisation de l'intermittence et de l'inhomogénéité spatio-temporelle
- Déferlement
 - Description statistique du déferlement
 - Modèle de SER en polarisation H.
 - Contribution à l'émissivité
 - Faut-il tenir compte de la structure fine de l'écume (bulles) ?