

Modélisation des mesures à distance de la surface océanique dans le domaine micro-onde et optique

- **Nombreux capteurs**
 - IR, Couleur, radiométrie passive et mesures actives (L, C, Ku, Ka)
 - Large gamme d'incidence (actif, passif)
 - Différentes polarisations (actif, passif)
 - Information Doppler (actif)
- **Cadres d'interprétation**
 - Modélisation approchée à partir de solutions asymptotiques (petites perturbations en élévation et pentes, phase stationnaire, ...)
 - Modèles empiriques

Modélisation des mesures passives

Approche heuristique (intuitive)

- Excès d'émissivité de la surface océanique = expansion de l'aire totale de la surface = mesure de la variance des pentes
- Correction électromagnétique = correction de courbure et/ou de rugosité par rapport aux 'facettes' échantillonnées par la longueur d'onde électromagnétique

Modélisation des mesures passives

Approche plus théorique (Irisov, 1997)

$$P = \int (\mathbf{n} \cdot [\mathbf{E}^* \times \mathbf{H}]) \, d\sigma = \int |\mathbf{J}_E^* \times \mathbf{J}_H| \, dx$$

Avec

$$\mathbf{J}_E = \mathbf{m} \times \mathbf{E} \quad \mathbf{J}_H = \mathbf{m} \times \mathbf{H}$$

Et

$$\mathbf{m} = \hat{\mathbf{z}} - \nabla \xi$$

Modélisation des mesures passives

Approche petite perturbation en élévation

$$\begin{aligned}
 J(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) = 4\pi^2 & \left[M_0 \delta(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0) + \int M_1(\mathbf{k}_1) \eta(\mathbf{k}_1) \delta(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_1) d\mathbf{k}_1 \right. \\
 & \left. + \int \int M_2(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) \eta(\mathbf{k}_1) \eta(\mathbf{k}_2) \delta(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2 + \dots \right]
 \end{aligned}$$

Approche en série selon les pentes

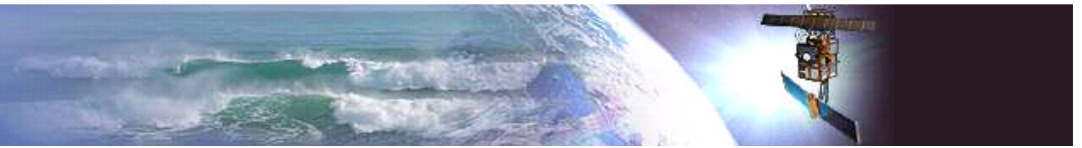
$$\begin{aligned}
 J(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) = & \int \exp(-i(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{x} + iq_0 \xi) d\mathbf{x} \\
 & \times \left[N_0 + \int N_1(\mathbf{k}_1) \eta(\mathbf{k}_1) \exp(i\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{x}) d\mathbf{k}_1 \right. \\
 & \left. + \int \int N_2(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) \eta(\mathbf{k}_1) \eta(\mathbf{k}_2) \exp(i(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{x}) d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2 + \dots \right]
 \end{aligned}$$

Modélisation des mesures passives

Développement similaire de la puissance absorbée

$$P(k_0) = (4\pi^2)^2 \left[\tilde{P}_0 + \int \tilde{P}_1(k_1) k_1 \eta(k_1) dk_1 + \int \int \tilde{P}_2(k_1, k_2) k_1 \eta(k_1) k_2 \eta(k_2) dk_1 dk_2 + \dots \right]$$

- Le premier terme est nul, et on retrouve bien un terme proportionnel à une variance des pentes.
- La détermination des fonctions régulières $P(k)$, quelque soit la méthode utilisée, peut être obtenue à partir d'une approche en petite perturbation classique (méthode SPM)
- Par identification, cela donne les définitions des noyaux pour les développements en fonction des pentes (méthode SSA)

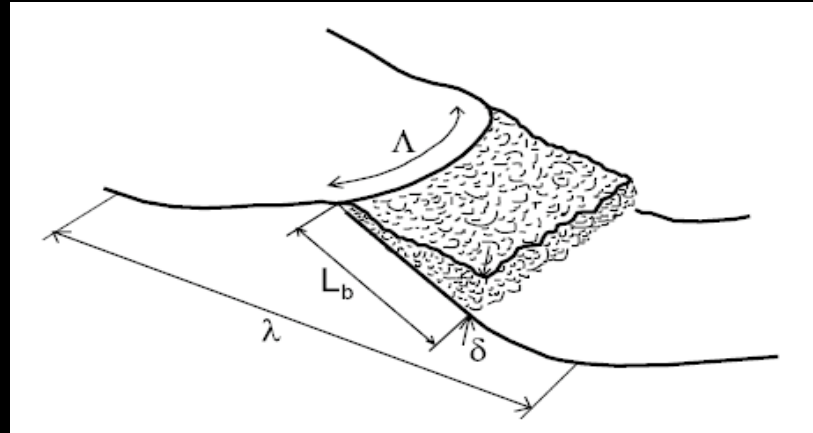


Modélisation des mesures passives

Limitation physique

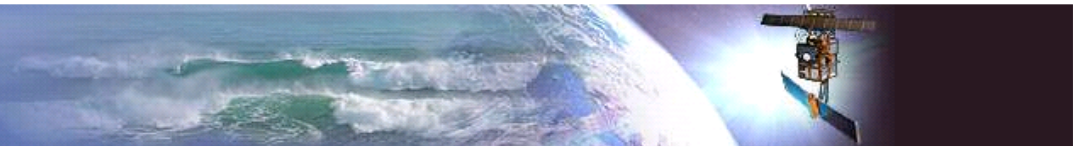
- Le flux d'énergie (vent) = expansion de l'aire totale de la surface
- Au delà d'une certaine limite, dissipation d'énergie avec apparition de déferlements et écume
- Croissance de l'aire et de l'épaisseur des zones de déferlements

Modélisation des mesures passives



Modélisation semi-empirique (Reul et Chapron, 2003)

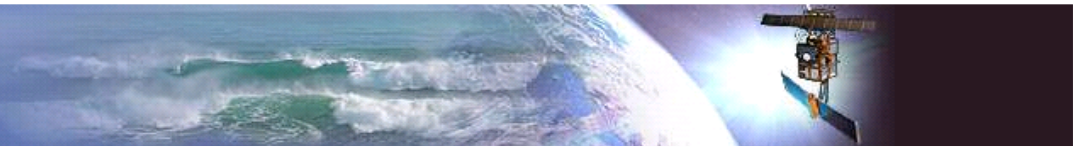
- Déferlements auto-similaires à partir de la distribution des fronts
- Evolution temporelle simplifiée (croissance rapide linéaire puis décroissance plus lente sur plusieurs périodes)
- Croissance de l'aire et de l'épaisseur (sensibilité de la fréquence)



Modélisation des mesures actives

Approche heuristique (intuitive)

- Aux faibles incidences, réflectivité maximale, très proche des principe de l'optique géométrique
- Aux angles d'incidence modérés à forts, des différences de signatures en polarisation caractérisent les corrections d'une approche d'optique géométrique



$$\mathbf{K}_0 = (\mathbf{k}_0, -q_0) \quad \mathbf{K} = (\mathbf{k}, q)$$

$$\mathbf{p}_v^{\uparrow\downarrow}(\mathbf{k}) = \frac{k\hat{z} \mp q\hat{k}}{K} \quad \mathbf{p}_h^{\uparrow\downarrow}(\mathbf{k}) = \hat{z} \times \hat{k}$$

$$\mathbf{E}_s(\mathbf{R}) = \int \frac{d\mathbf{k}}{q} \mathbb{S}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} + iqz} \mathbf{E}_0$$

$$\mathbb{S}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_v^{\downarrow}(\mathbf{k}_0) \\ \mathbf{p}_h^{\downarrow}(\mathbf{k}_0) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} S^{vv}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) & S^{vh}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) \\ S^{hv}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) & S^{hh}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_v^{\uparrow}(\mathbf{k}) \\ \mathbf{p}_h^{\uparrow}(\mathbf{k}) \end{bmatrix}$$

Modélisation des mesures actives

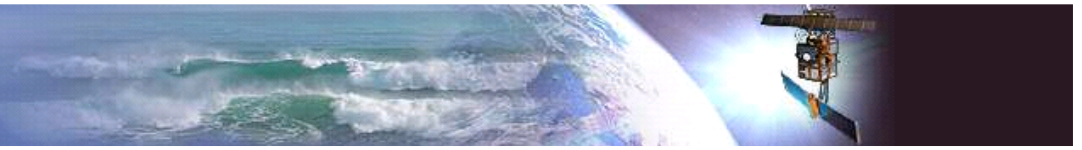
Approche théorique

-

$$Q = K - K_0$$

- Une forme de solution générique peut s'écrire

$$S^{pq}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) = \frac{1}{Q_z} \int_{\mathbf{r}} N^{pq}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0; \eta(\mathbf{r})) e^{iQ_z \eta(\mathbf{r})} e^{i\mathbf{Q}_H \cdot \mathbf{r}} d\mathbf{r}$$



Modélisation des mesures actives

Cas asymptotiques

- Kirchhoff

$$S(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) = \frac{\mathbb{K}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0)}{Q_z} \int_{\mathcal{r}} e^{iQ_z \eta(\mathbf{r})} e^{i\mathbf{Q}_H \cdot \mathbf{r}} d\mathbf{r}$$

- Solutions en petites perturbations

$$S(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) = \frac{\mathbb{B}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0)}{Q_z} \delta(\mathbf{Q}_H) - i\mathbb{B}(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) \eta(\mathbf{Q}_H) \\ - Q_z \int_{\xi} \mathbb{B}_2(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0, \xi) \hat{\eta}(\mathbf{k} - \xi) \hat{\eta}(\xi - \mathbf{k}_0) d\xi + \dots$$



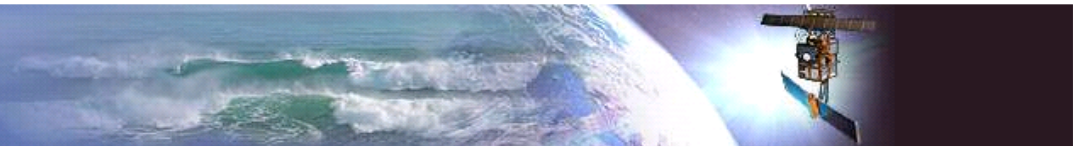
Modélisation des mesures actives

Famille de solutions mixtes (Guérin et al., 2010)

- Correction de la solution Kirchhoff de la forme

$$\mathbb{S} = \frac{1}{Q_z} \int \frac{d\mathbf{r}}{(2\pi)^2} \left(\mathbb{K} + \frac{i}{Q_z} \mathbb{T}(\nabla)[\eta] \right) e^{-i\mathbf{Q}_H \cdot \mathbf{r}} e^{-iQ_z \eta}$$

- avec \mathbb{T} un noyau tensoriel comprenant une correction de courbure = sensibilité des signatures de polarisation



Modélisation des mesures actives

Implémentation pratique (Mouche et al., 2007)

- Si les corrections de la solution Kirchhoff sont petites

$$S(k, k_0) = N_0(k, k_0) \int_r e^{-iQ_z \Phi(k, k_0; \eta(r))} e^{-iQ_H \cdot r} dr$$

- Une surface 'effective', plus ou moins modifiée selon la polarisation, permet des calculs approchés rapides
- L'intégrale de Kirchhoff agit comme filtre passe-bande, centré sur le nombre d'onde de Bragg, et le degré de polarisation reste dominé par les niveaux de courbure de ces échelles
- La signature de polarisation est alors dépendante de l'orientation relative du vent et du radar



Modélisation des mesures actives

Implémentation pratique (Mouche et al., 2008)

- Si les corrections de la solution Kirchhoff sont petites

$$S(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) = N_0(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0) \int_{\mathcal{r}} e^{-iQ_z \Phi(\mathbf{k}, \mathbf{k}_0; \eta(\mathbf{r}, t))} e^{-i\mathbf{Q}_H \cdot \mathbf{r}} d\mathbf{r}$$

- La surface 'effective', est plus ou moins modifiée selon la polarisation, et permet d'interpréter les résidus de phase associés aux évolutions temporelles de cette surface effective
- La signature Doppler sera plus forte en polarisation horizontale
- Les signatures Doppler seront également différentes selon les visées contre et sous le vent



Modélisation des mesures actives

Mesures aux incidences faibles

- Solution de type Kirchhoff

$$\sigma^{pq} = \left| \frac{K(\vec{k}, \vec{k}_0)}{Q_z} \right|^2 \int \langle e^{-iQ_z[\eta(\vec{r}) - \eta(\vec{r} + \Delta\vec{r})]} \rangle e^{-i\vec{Q}_H \cdot \Delta\vec{r}} d\Delta\vec{r}$$

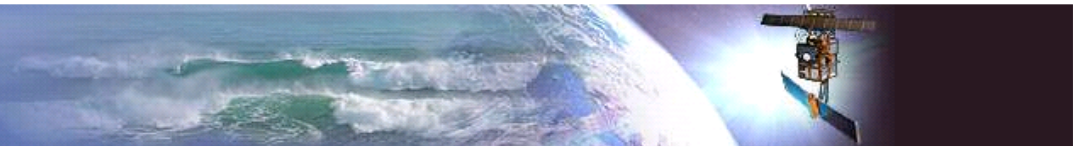
- Cas non-Gaussien

$$\langle e^{iQ_z(\eta - \eta')} \rangle = e^{-Q_z^2(\rho(0) - \rho(r)) - i(Q_z)^3 \Sigma(r)/6 + (Q_z)^4 \Upsilon(r)/24}$$

Avec pour limites

$$\Sigma(r) \xrightarrow{r \rightarrow 0} \Sigma(0)r^3$$

$$\Upsilon(r) \xrightarrow{r \rightarrow 0} \Upsilon(0)r^4$$



Modélisation des mesures actives

Mesures aux incidences faibles

- Exemple statistiques non-Gaussiennes

$$\langle e^{iQ_z(\eta-\eta')} \rangle = e^{-Q_z^2(\rho_s(0)-\rho_s(r)) + \int q(\vec{k}) \{ \langle e^{iQ_z(\eta_{bk}-\eta'_{bk})} \rangle - 1 \} d\vec{k}}$$

- La surface se caractérise par des 'bursts' distribués selon les échelles par des lois de Poisson
- Autre cas non-Gaussien particulier : loi binomiale (Kudryavtsev et al., 2003)

Modélisation des mesures actives

Mesures aux incidences faibles

- Correction de courbure

$$\rho(\vec{r}) = \rho_0(0) - \frac{1}{2} {}^t \vec{r} m_{SS} \vec{r} + \frac{1}{24} {}^t (\vec{r} \cdot \vec{r}) \chi (\vec{r} \cdot \vec{r}) + \dots$$

- La correction de courbure peut s'interpréter comme une correction d'ordre 4 non-Gaussien (élancement)

$$\tilde{\kappa}_4 = \frac{1}{24} \left[\kappa_4 + \frac{\chi}{Q_z^2 m_{SS}^2} \right]$$

- Toutefois, cette correction est maintenant dépendante de la fréquence électromagnétique
- En utilisant plusieurs fréquences, cas de la plupart des altimètres, une estimation des variances des pentes et courbures est possible



Complémentarité des mesures actives et passives

- Faibles angles d'incidence
 - Mesures passives sensibles aux courbures et déferlements distribués selon les échelles
 - Mesures actives sensibles aux variances des pentes avec une correction (dépendante de la fréquence) de courbure
 - Liens étroits entre variance des pentes et apparition des déferlements = exploitation des mesures altimétriques
- Forts angles d'incidence
 - Mesures passives sensibles aux variances des pentes et aux déferlements (faible directionnalité)
 - Mesures actives sensibles aux courbures des petites échelles et aux déferlements (forte directionnalité)

Travaux futurs

- **Travaux expérimentaux**
 - Meilleure caractérisation de la sensibilité des mesures passives et actives aux déferlements (taille, écume et bulles, ...), pour les différents angles d'observations et polarisation
 - Utilisation des systèmes vidéo pour déterminer les propriétés géométriques et cinématiques de la surface océanique et exploiter des mesures simultanées radar pour une meilleure interprétation des signatures Doppler
- **Travaux théoriques**
 - Unification des approches entre passif et actif
 - Détermination des statistiques d'ordre supérieurs afin de chercher à exploiter les mesures de variabilités des observations (section efficace et température de brillance)