





# Étude de la rétrodiffusion des surfaces d'eau en bande Ka à faible incidence

Olivier Boisot

MIO - CNES - CLS

Soutenance de thèse de doctorat de Physique  
28 septembre 2015

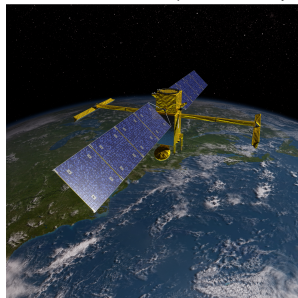


**SWOT** : **S**urface **W**ater **O**cean **T**opography (collaboration  / 

- Objectifs :

- couverture spatiale globale des hauteurs d'eau + haute résolution
- **altimétrie large fauchée + bande Ka**
- mesures altimétriques pour l'**hydrologie continentale** (lacs, fleuves,...) et les **zones côtières**

- Instrument principal : **KaRIn (Ka Radar Interferometer)**



**SAR interférométrique en bande Ka à faible incidence**

( $f_0=35,75$  GHz /  $\lambda_0=8,3$  mm)

( $\theta=2,6^\circ$ )

**imagerie radar**  
2D  
(cartographie)

**mesure de hauteur**  
d'eau  
(topographie)

**amélioration :**

- **taille des systèmes embarqués**
- **précision des mesures**

**contraste inversé**  
terre/mer  
(zone brillante)

## Contexte

Le modèle GO4

Étude de la rétrodiffusion bande Ka

Étude temporelle du signal rétrodiffusé

Conclusion et perspectives

La mission SWOT

Besoins scientifiques

Apports de la thèse

### ■ Trace au sol du satellite SWOT



## Bande Ka (~ 36 GHz)

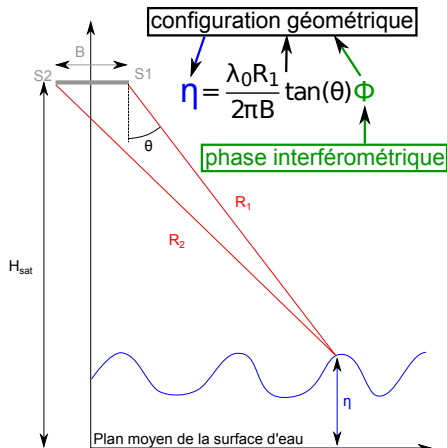
- Peu de **données** dans la littérature
- Une seule mission altimétrique en bande Ka : **AltiKa**
- Besoin de **dimensionnement** des instruments et de **modèles**

### Que cherche-t-on à modéliser ?

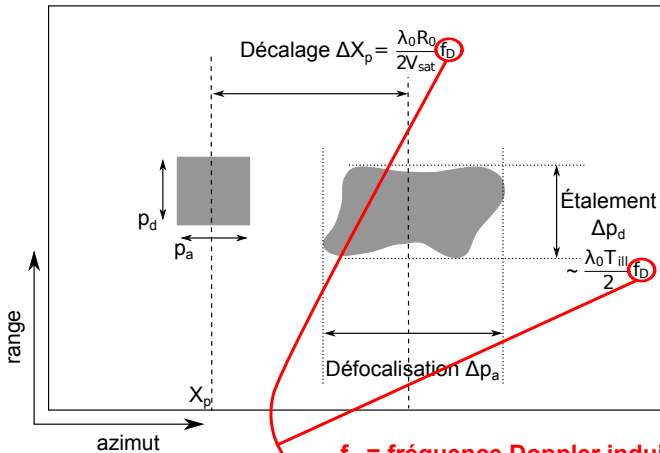
#### Le champ complexe rétrodiffusé

- ⇒ **Amplitude** → Section Efficace Radar Normalisée (**SERN** ↔  $\sigma^0$ )
- ⇒ **Phase** → phase de diffusion ( $\varphi_d$ )

## Interférométrie



Problème → surfaces d'eau en mouvement ! → SAR



$f_D$  = fréquence Doppler induit par le mouvement des vagues

## Pourquoi modéliser le champ complexe rétrodiffusé ?

→ La SERN

⇒ caractérisation de l'état de mer :  $H_s$ ,  $mss$

⇒ évaluer la puissance du signal reçu (SNR)

→ La phase de diffusion  $\varphi_d$

⇒ évolution temporelle → **décalage Doppler**  $f_D$

→ erreurs sur la phase interférométrique

(→ erreurs de hauteur)

↪ Développement d'un modèle de rétrodiffusion à faible incidence

↪ Étude de la rétrodiffusion bande Ka en environnement contrôlé et **vérification des modèles**

↪ Étude des **propriétés temporelles** du signal rétrodiffusé

### RÉFÉRENCE : Modèle de l'Optique Physique (PO)

$$\sigma_{PO}^0(\theta, \phi) \propto \int_{\mathbb{R}^2} e^{i\vec{Q}_H \cdot \vec{r}} \left( e^{-Q_z^2[\rho(\vec{0}) - \rho(\vec{r})]} - e^{-Q_z^2 \rho(\vec{0})} \right) d\vec{r}$$

- Intégrale de surface
- Besoin d'un spectre de mer (autocorrélation spatiale  $\rho(\vec{r})$ )
- $\sigma_{PO}^0(\theta) < 20^\circ$

### Modèle de l'Optique Géométrique (GO)

$$\sigma_{GO}^{0iso}(\theta) = \frac{|\mathcal{R}|^2}{mss \cos^4(\theta)} e^{-\frac{\tan^2(\theta)}{mss}}$$

- Distribution gaussienne des pentes de la surface
- Modèle asymptotique qui ne dépend pas de  $\lambda_0$
- Domaine de validité restreint

Besoin d'un modèle opérationnel à peu de paramètres

⇒ Amélioration du modèle GO avec 1 paramètre de plus

## Modèle GO

- modèle asymptotique (développement quadratique de  $\rho$ )
- Petites échelles des vagues non "vues" par le radar : **mss filtrée**  
 (spectre de mer haute fréquence tronqué)
- ↔ **améliore le modèle GO mais n'est pas suffisant !**

## Idées du développement GO4

- Développement quartique de  $\rho$
- Introduction d'un paramètre homogène à une **courbure effective** des vagues et **sensible à  $\lambda_0$**  : **msc<sub>e</sub>** tout en conservant la **mss totale**
- ⇒ Prise en compte la partie **haute fréquence** du spectre de mer + **déviaton non-gaussienne** de la statistique des pentes ( $\lambda_4$ )



## MODÈLE GO4 ISOTROPE

$$\sigma_{GO4}^{Iso}(\theta) = \underbrace{\sigma_{GO}^{Iso}(\theta)}_{\text{GO +}} \left[ 1 + \left( \frac{\overset{\text{courbure effective}}{m_{sc_e}}}{16K_0^2 m_{ss}^2 \cos^2 \theta} + \frac{\overset{\text{correction de kurtosis}}{\lambda_4}}{6} \right) \left( \frac{\tan^4 \theta}{m_{ss}^2} - 4 \frac{\tan^2 \theta}{m_{ss}} + 2 \right) \right]$$

The diagram includes several annotations:
 

- A red arrow points from the text "courbure effective" to the term  $\frac{m_{sc_e}}{16K_0^2 m_{ss}^2 \cos^2 \theta}$ .
- A blue arrow points from the text "correction de kurtosis" to the term  $\frac{\lambda_4}{6}$ .
- Green arrows point from the text "GO +" to the term  $\sigma_{GO}^{Iso}(\theta)$  and from "mss totale" to the term  $m_{ss}$ .
- Red arrows point from the text "terme de diffusion correctif" to the large square bracket  $[ \dots ]$ .

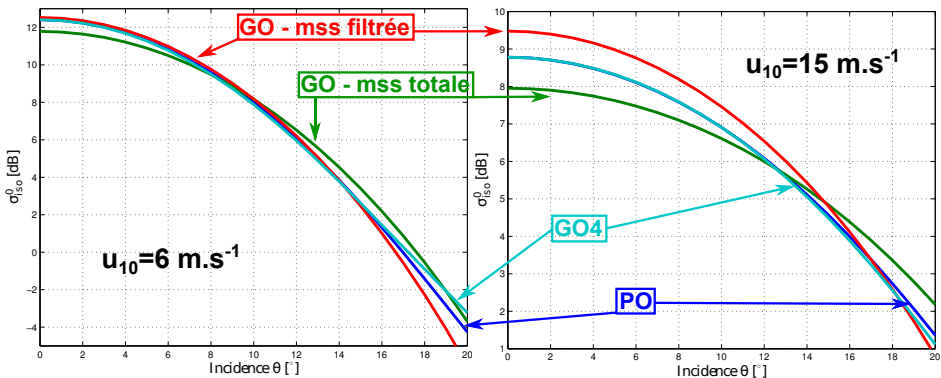
⇒ Existe aussi en version **directionnelle** : 5 paramètres  
(2 pentes + 3 courbures)

Contexte  
Le modèle GO4

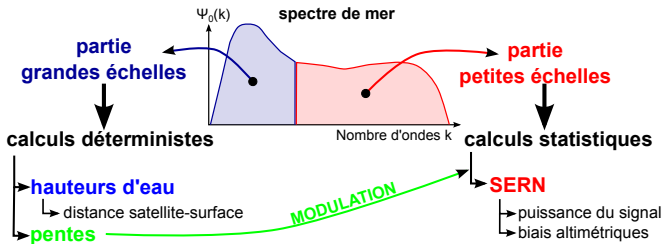
Étude de la rétrodiffusion bande Ka  
Étude temporelle du signal rétrodiffusé  
Conclusion et perspectives

Modèles de rétrodiffusion  
Modèle GO4 isotrope  
Applications du modèle GO4

■ Diagramme de diffusion en incidence en bande Ka (36 GHz)

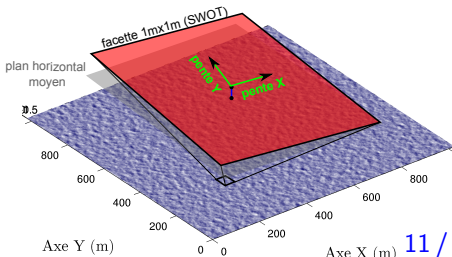


■ Application à la simulation deux-échelles  $\Rightarrow$  simuler images radar



$\rightarrow$  Modèle opérationnel simple : 2(5) paramètres

$\rightarrow$  Précision du modèle PO



- Estimation de paramètres de surfaces océaniques ( $m_{ss}$ ,  $m_{sc_e}$ )

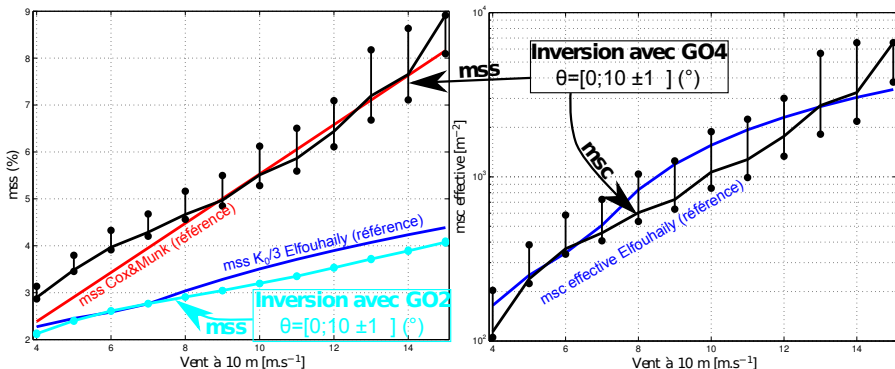
Modèle à 2 paramètres ( $m_{ss}, m_{sc_e}$ )  $\Rightarrow$  estimation sur la **forme** du diagramme de diffusion en incidence expérimentale

**Avantage :**  $\rightarrow$  Estimation d'une  **$m_{ss}$  totale** et non filtrée par le radar  
 $\rightarrow$  Permet de **s'affranchir de la calibration** des données

**Inconvénient :**  $\rightarrow$  Besoin de données de SERN en incidence

■ Exemple de paramètres ( $mss$ ,  $m_{sc_e}$ ) estimés en bande Ku

- Données de SERN de la mission TRMM
- Bande Ku :  $f_0=13,8$  GHz
- Mesures en incidences :  $[-18^\circ ; +18^\circ]$  pas de  $0,7^\circ$



### Besoins scientifiques

↪ **valider** les modèles de rétrodiffusion en bande Ka pour des surfaces d'eau continentales/océaniques

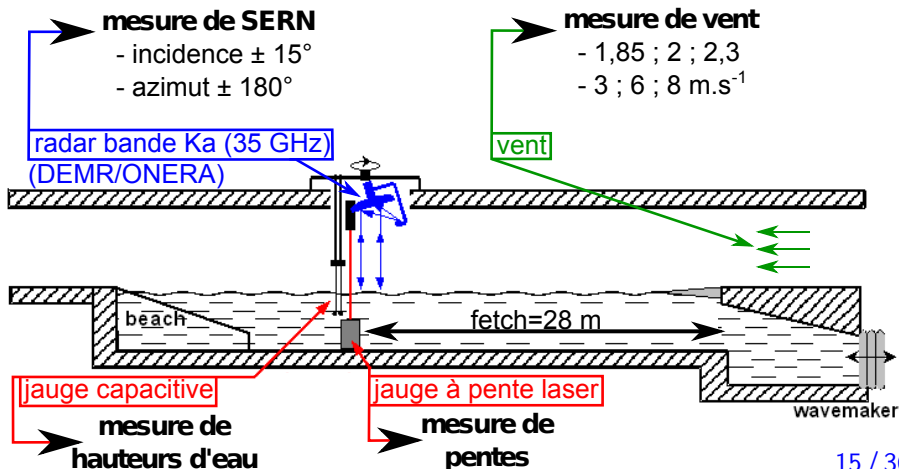
### ■ Problèmes

- $\lambda_0 \leq 1 \text{ cm} \Rightarrow$  vagues de capillarité  $\Rightarrow$  partie du spectre mal connue
- universalité des modèles de diffusion sur océan ?
- PO nécessite un spectre de nombre d'ondes

⇒ Mesures de données de rétrodiffusions bande Ka en soufflerie

⇒ Étude des données et vérification/validation des modèles

- Schéma de l'expérience dans la grande soufflerie de l'institut OSU/Pythéas de Marseille-Luminy (2012)



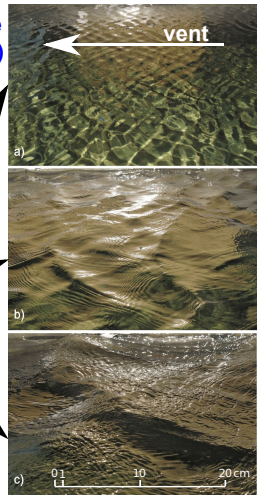
■ Régimes de vagues

**régime de gravité-capillarité  
 (apparition de vagues  
 capillaires parasites)**

vent [m.s <sup>-1</sup> ]	fréquence de pic [Hz]	H <sub>s</sub> [cm]	mss [%]
1,85	4,9	0,3	0,4
<b>2</b>	<b>4,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>
2,3	3,6	0,7	1,1
<b>3</b>	<b>2,9</b>	<b>1,1</b>	<b>1,4</b>
6	1,9	3,1	3,2
<b>8</b>	<b>1,8</b>	<b>4,4</b>	<b>5,1</b>

**régime de capillarité  
 (vagues structurées)**

**régime gravitaire dominant  
 (+ vagues aléatoires)**





### ■ 1<sup>er</sup> problème

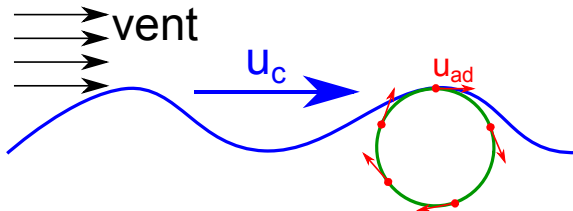
Comment inverser un spectre directionnel de nombre d'ondes à partir de mesures de hauteurs ponctuelles en fréquence + pentes directionnelles ?

⇒ **relation de dispersion des vagues de capillarité-gravité**

### ■ 2<sup>e</sup> problème

Influence des courants dans la relation de dispersion ? :

- le courant de dérive moyen ( $u_c$ ) → **supposé uniforme dans la direction du vent**
- le courant induit par la vitesse orbitale des vagues dominantes ( $u_{ad}$ )



## ■ Forme du spectre de nombre d'onde

### Spectre de nombre d'onde 2D

$$\Psi(\vec{k}) = \Psi(k, \phi_k) = \frac{1}{k} \Psi_0(k) Y(k, \phi_k)$$

$\Psi_0$  → partie omnidirectionnelle

$Y$  → fonction d'étalement

Conditions d'expériences (bassin) ⇒ vagues directives :

### Fonction d'étalement

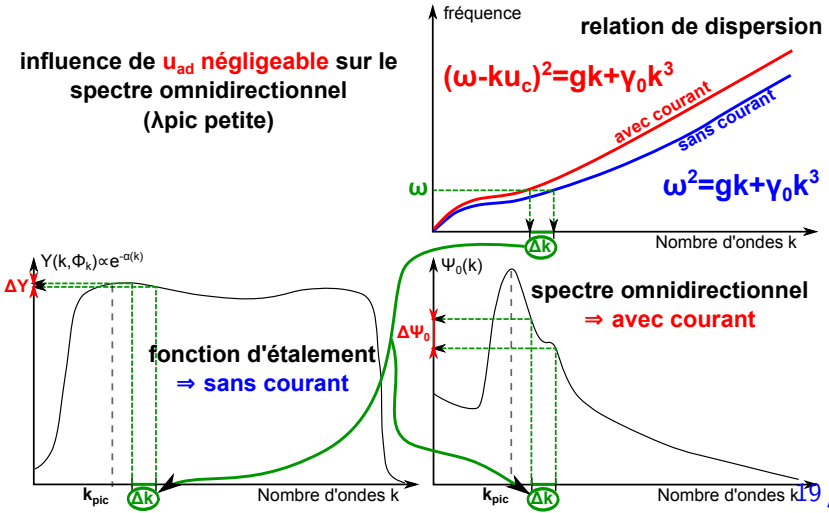
$$Y(k, \phi_k) \propto e^{-\alpha(k) \sin^2 \phi_k}$$

$\alpha$  → paramètre de directionnalité des vagues

+  $\alpha$  est grand ⇒ + champ de vagues est directif

■ Influence du courant sur le spectre de nombre d'ondes

influence de  $u_{ad}$  **négligeable** sur le spectre omnidirectionnel ( $\lambda_{pic}$  petite)



## ■ Estimation du courant de dérive

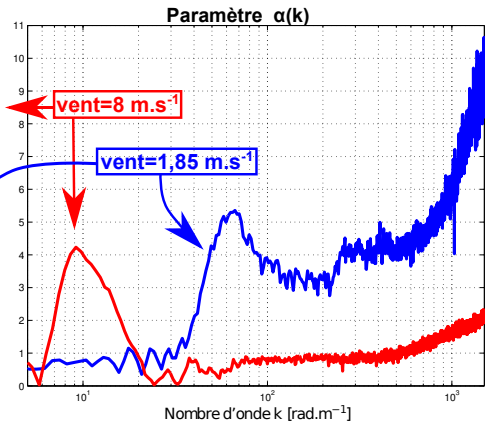
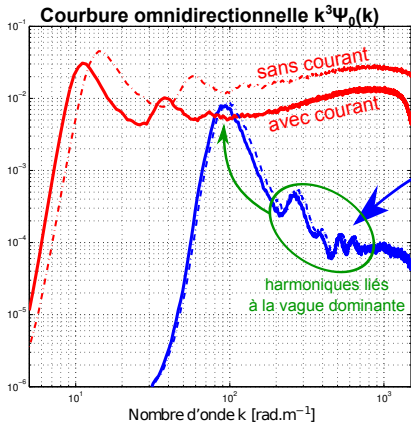
⇒  $u_c$  estimé à posteriori :

mss expérimentales = mss spectre de nombre d'ondes

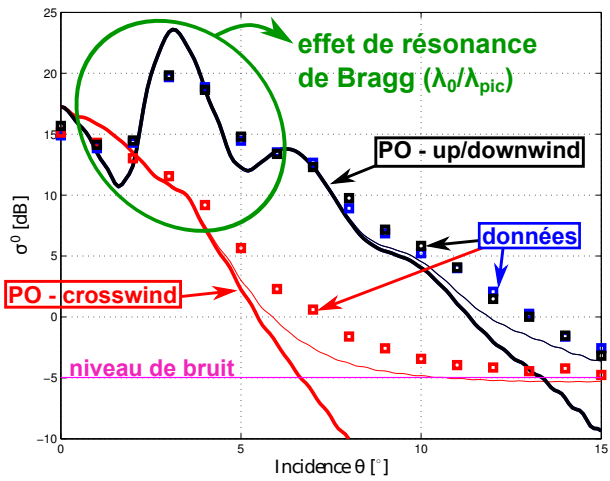
## ■ Tests de cohérence

⇒ Recalculution des paramètres statistiques :  $H_s$ , mss directionnelles

■ Résultats de l'inversion du spectre de nombre d'ondes 2D

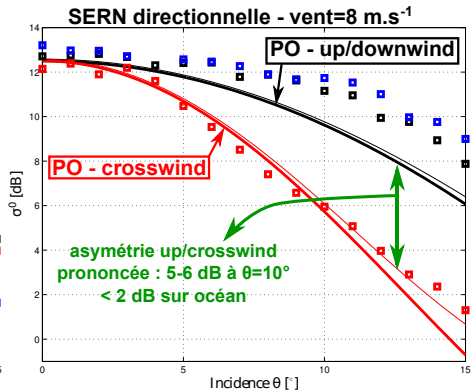
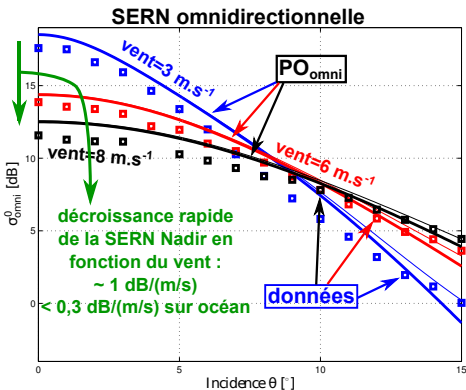


■ Résultats à petits vents - SERN directionnelle / vent=1,85 m.s<sup>-1</sup>



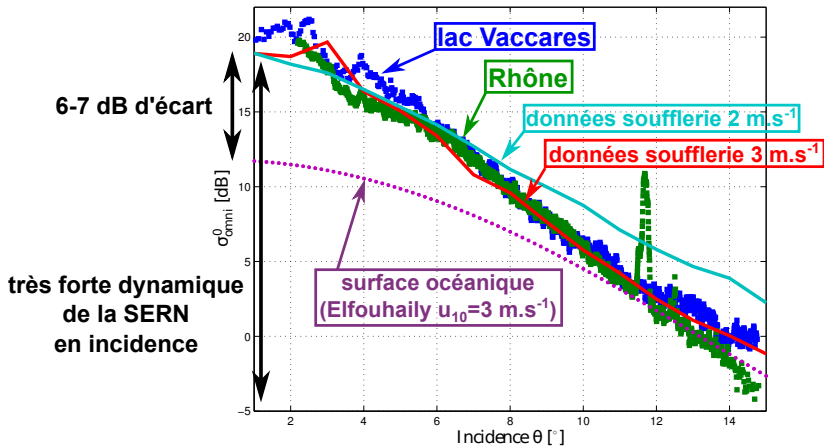
PO  $\Rightarrow$  VALIDE  
GO4  $\Rightarrow$  NON VALIDE

■ Résultats pour les plus grands vents



⇒ PO/GO4 VALIDES pour les plus grands vents

- Comparaison avec des données aéroportées (ONERA - campagne DRIVE-BUSARD)





## Besoins scientifiques

↪ **Caractériser l'impact de surfaces d'eau en mouvement** sur le signal rétrodiffusé et dans la mesure SAR interférométrique

### ■ Problèmes liés au SAR

- Processus de moyennage de vues successives
  - **cohérentes** pour le processus de synthèse d'ouverture
  - **indépendantes** pour la réduction du bruit (speckle)
- Déformation des pixels SAR
  - **décalage azimut**  $\Delta X_p \propto f_D$
  - **étalement range**  $\Delta p_d \propto f_D$

⇒ **Temps de corrélation du signal rétrodiffusé**

⇒ **Phase de diffusion** → **décalage Doppler induit par les vagues**

■ Fonction d'autocorrélation spatio-temporelle du signal rétrodiffusé

Modèle de l'Optique Physique

$$C_{PO}(\theta, \phi, t) \propto \int_{\mathbb{R}^2} e^{i \vec{Q}_H \cdot \vec{r}} \left[ e^{-Q_z^2 (\rho(\vec{0}, 0) - \rho(\vec{r}, t))} - e^{-Q_z^2 \rho(\vec{0}, 0)} \right] d\vec{r}$$

avec  $\rho(\vec{r}, t)$  la fonction d'autocorrélation spatio-**temporelle** de la surface

Modèle de l'Optique Géométrique

$$C_{GO}(\theta, \phi, t) = \sigma_{GO}^0(\theta, \phi) e^{-2K_0^2 \sigma_{\eta'}^2 t^2 \cos^2 \theta}$$

où  $\sigma_{\eta'}^2$  représente la **variance de la vitesse verticale des vagues**

## ■ Temps de corrélation du signal rétrodiffusé

### Définition du temps de corrélation

$$\tau_c \text{ définit tel que : } \frac{C(\tau_c)}{C(0)} = e^{-1}$$

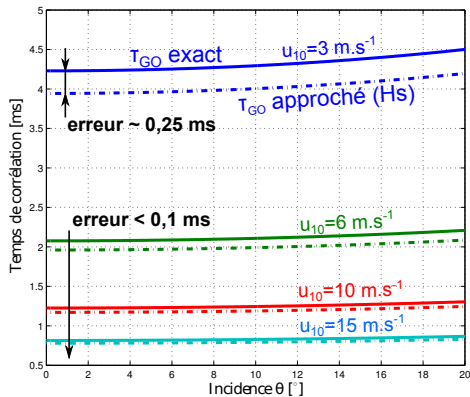
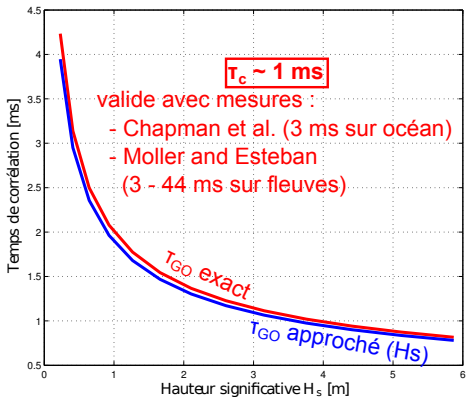
- Avec le modèle PO  $\rightarrow$  *résolution numérique* :  $\tau_{PO}(\theta)$
- Avec le modèle GO  $\rightarrow$  *solution analytique* :

$$\tau_{GO}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2}K_0 |\cos(\theta)| \sigma_{\eta'}} \text{ et } \boxed{\tau_{GO}(\theta) = \tau_{PO}(\theta)} \text{ (même si } \sigma_{GO}^0 \neq \sigma_{PO}^0 \text{)}$$

## ■ Expression approchée du temps de corrélation

$$\Rightarrow \tau_{GO}(\theta) \simeq \frac{\sqrt{2}}{K_0 |\cos(\theta)| \sqrt{H_s}}$$

■ Temps de corrélation du signal rétrodiffusé en bande Ka



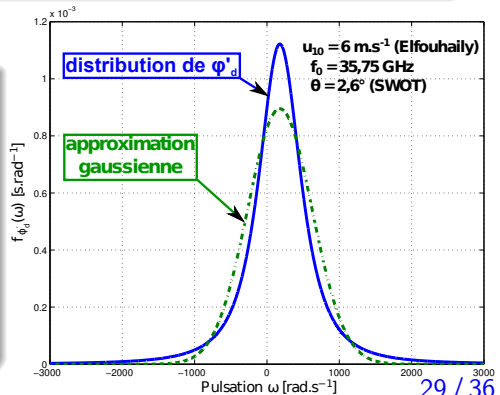
## Fréquence Doppler du signal

$$f_D(t) = -\frac{1}{2\pi} \partial_t \varphi_d(t) \text{ où : } \varphi_d(t) = \arctan \left[ \frac{\text{Im}(S_{PO}(t))}{\text{Re}(S_{PO}(t))} \right]$$

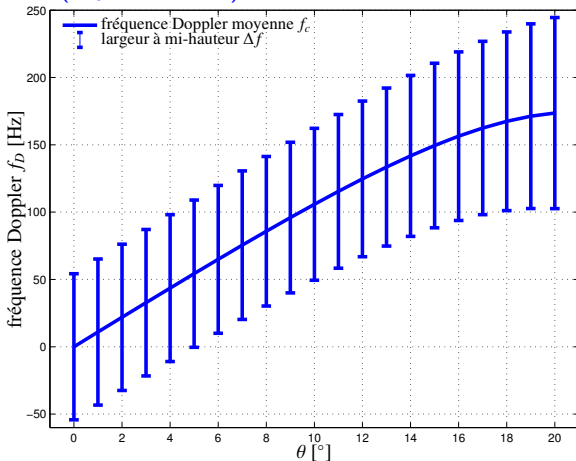
pdf de la dérivée temporelle de la phase de diffusion

$$f_{\varphi'_d}(\omega) = \frac{a}{[1 + 4a^2(\omega + b)^2]^{3/2}}$$

- $a$ ,  $b$  paramètres calculés avec PO + corrélation surface
- distribution à **queue lourde**
- **variance infinie**



■ Évolution du Doppler des vagues en fonction de l'incidence de tir  
( $u_{10} = 6 \text{ m.s}^{-1}$ )



$$0 \leq f_c \leq 170 \text{ Hz}$$

$$110 \leq \Delta f \leq 140 \text{ Hz}$$

Décalage azimut  
Étalement range (SWOT)

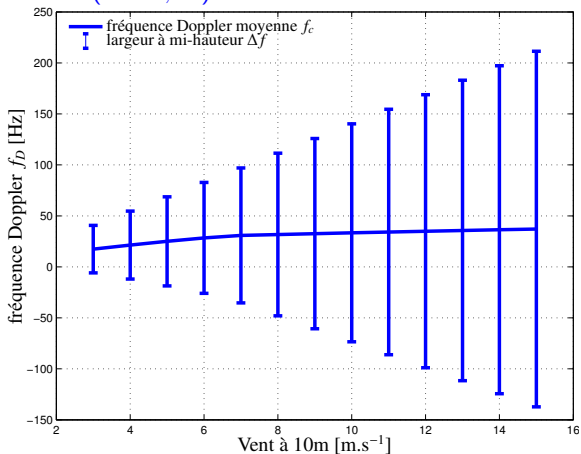
$$u_{10} = 6 \text{ m.s}^{-1} ; \theta = 2,6^\circ$$

$$\Rightarrow f_D = 28,4 \text{ Hz}$$

$$\Rightarrow \Delta X_p \simeq 14,6 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \Delta p_d \simeq 0,24 \text{ mm}$$

■ Évolution du Doppler des vagues en fonction de l'état de mer  
( $\theta = 2,6^\circ$ )



$$20 \leq f_c \leq 40 \text{ Hz}$$

$$50 \leq \Delta f \leq 350 \text{ Hz}$$

## ■ La synthèse SAR non focalisée - mode LR de SWOT

### Critères d'application de la synthèse SAR non focalisée

1. Assurer le moyennage des  $N_p$  vues successives **cohérentes** entre elles. Pour SWOT  $N_p=9$

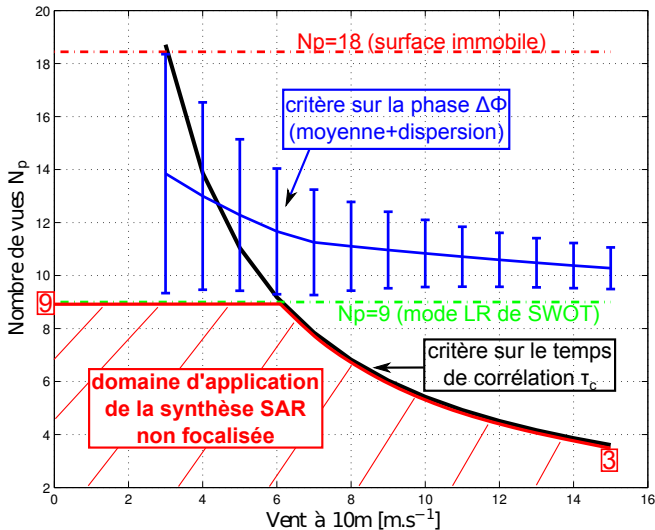
$$N_p \Delta t \leq \tau_c \Rightarrow \boxed{N_p \leq \tau_c f_a} \text{ avec } f_a = 1/\Delta t \text{ la PRF du système}$$

2. Condition sur la variation de la phase de diffusion :

$$\Delta\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[ \frac{V_{sat}^2}{R_0} t^2 + \lambda_0 f_D t \right] \leq \frac{\pi}{4}$$

$$\Rightarrow N_p \leq N(\lambda_0, R_0, V_{sat}, f_D)$$





- Modèles de rétrodiffusions
  - ⇒ Développement d'un modèle opérationnel (2 à 5 paramètres) conservant la précision du modèle PO : le **modèle GO4**
  - ⇒ Applicable à la simulation deux-échelles permet d'inverser des paramètres de surface ( $m_{ss}$ ,  $m_{sc_e}$ )
- La rétrodiffusion en bande Ka
  - ⇒ Méthode d'inversion du spectre directionnel de nombre d'ondes
  - ⇒ Caractérisation absolue et dynamique du diagramme de diffusion (calibration, évolution en incidence et azimut)
  - ⇒ Validation des modèles de rétrodiffusion à faible incidence (PO - GO4)
- L'étude temporelle du signal rétrodiffusé
  - ⇒ Expression analytique simple du temps de corrélation du signal rétrodiffusé
  - ⇒ Expression de la distribution du décalage Doppler induit par les vagues

- ⇒ Poursuivre l'étude sur la phase de diffusion
  - estimer la phase de diffusion à l'échelle de la cellule radar ( $\neq$  surface  $\infty$ ) pour évaluer les performances du système
  - caractériser l'évolution temporelle de la phase interférométrique de diffusion (estimation d'erreurs)
- ⇒ Implémenter les différents résultats (modèles) dans des simulations complexes pour l'évaluation de performances

MERCI DE VOTRE ATTENTION

