



Diffusion électromagnétique bistatique par la surface maritime en utilisant le modèle SSA

Ahmad AWADA

Ali Khenchaf

Arnaud Coatanhay

Laboratoire E3I2-EA 3876

ENSIETA-FRANCE



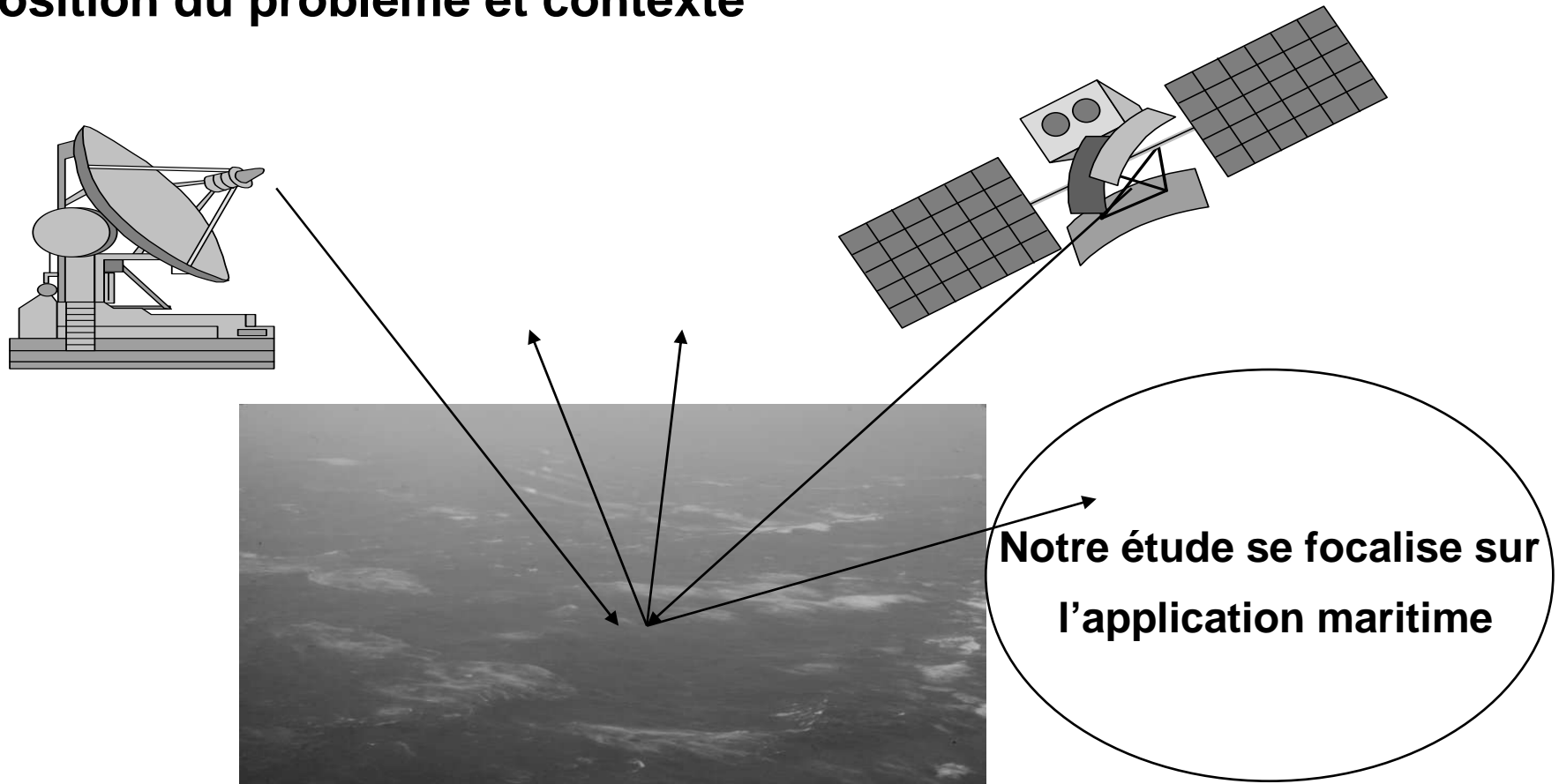
Position du problème et contexte

Récemment les systèmes de radar bistatic et multistatic fonctionnant à partir des plateformes aéroportées ou bien spatiales ont gagné un importance pour ses avantages dans la télédétection des surfaces de terre et d'océan

Pourquoi ?

Les systèmes bistatic offrent certains avantages de diversité spatiale et certain niveau de furtivité non offerts par les systèmes monostatiques.

> Position du problème et contexte



- ✓ **La diffusion des signaux EM par la surface rugueuse d'un milieu naturel (terre, mer, forêt, ...) représente un outil important de télédétection**

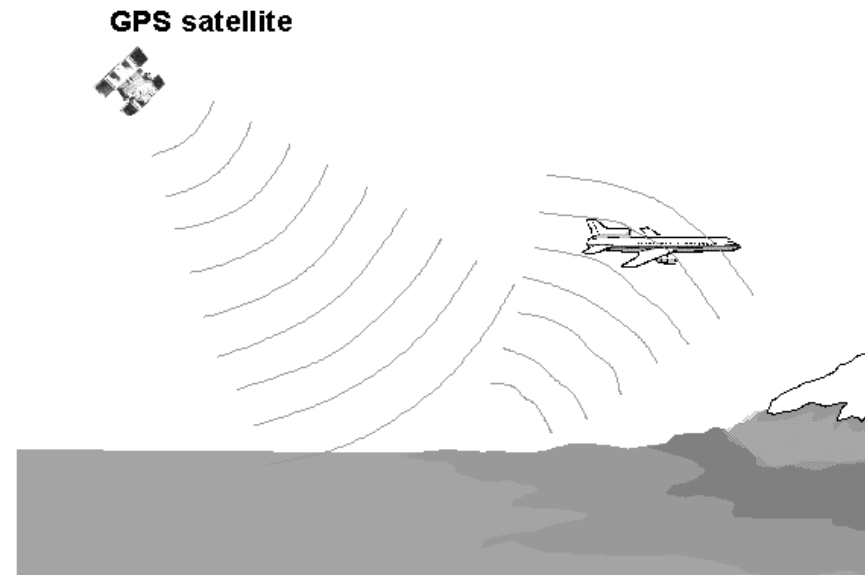


Position du problème et contexte

✓ **Extraction des caractéristiques physique et géométrique d'un milieu naturel : Surface océanique**

✓ **Connaissance des conditions météorologiques au dessus de la surface de la mer : Vitesse et direction du vent**

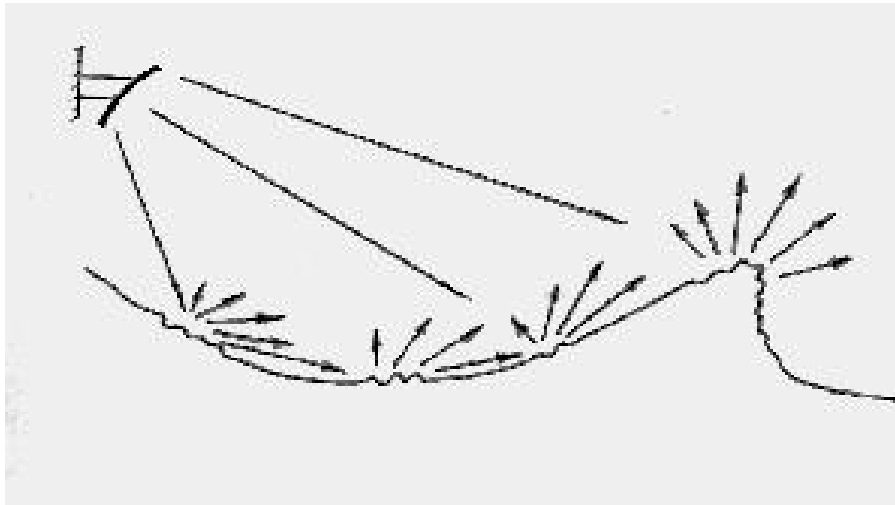
Exemple d'application : Système GPS



➤ **La réflexion des signaux GPS par la surface océanique possède un potentiel d'utilisation dans la télédétection océanographique**



Position du problème et contexte

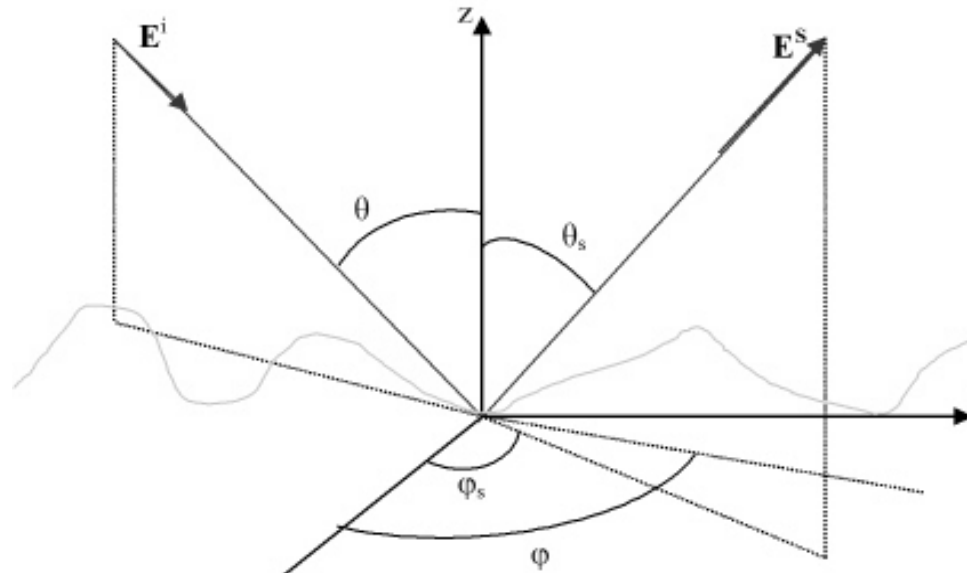


**En plus de
la modélisation de la
surface de mer**

Ces applications de télédétection nécessitent le développement des modèles précis pour calculer les coefficients de diffusion bistatique de la surface de mer

> Position du problème et contexte

✓ Méthodologie



Configuration du problème de diffusion en bistatique

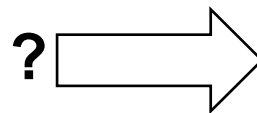
Représentation spectrale du modèle d'Elfouhaily

+

**Small Slope Approximation
SSA**

$$\vec{E}^s = [S] \vec{E}^i$$

Matrice de diffusion ?





Plan

1. Modélisation de la surface océanique

- ✓ **Caractéristiques physiques**
- ✓ **Caractéristiques géométriques**
 - Représentation spectrale ou
 - Fonction de corrélation

2. Modèles de diffusion

- ✓ **Kirchhoff approximation : KA**
- ✓ **Small perturbation method : SPM**
- ✓ **Two Scale Model :TSM**
- ✓ **Small Slope Approximation : SSA**

➤ **Résultats numériques et analyses**

- **cas monostatique**
- **Comparaison avec TSM**
- **Bistatic case (co- et cross-polarization)**
- **Étude en bande L**

➤ **Conclusions et perspectives**

> Modélisation de la surface de mer :

➤ Caractéristiques physiques

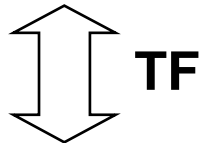
- ✓ Perméabilité magnétique relative : $(\mu_r = 1)$
- ✓ Permittivité électrique relative : $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$

➤ Caractéristiques géométriques

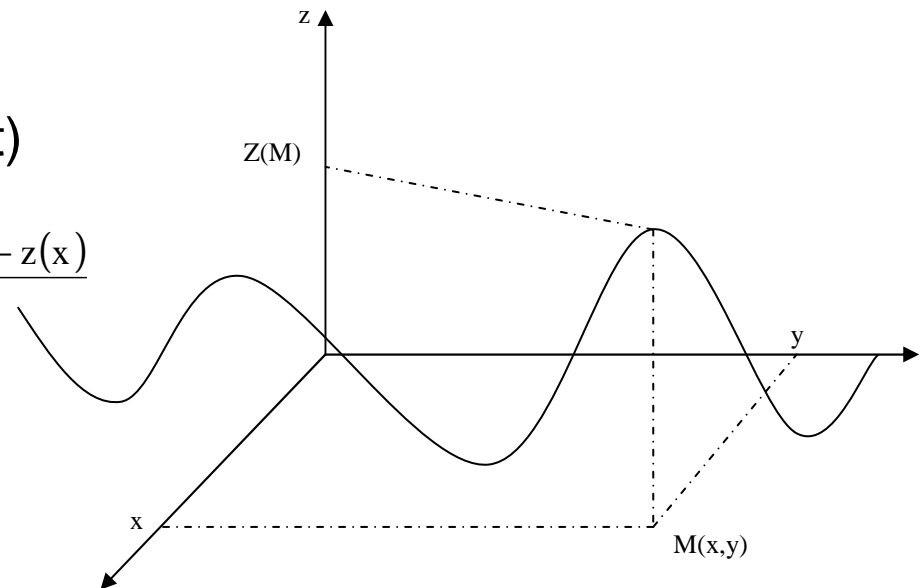
- ✓ Distribution des hauteurs : $z = z(x,y,t)$

- ✓ distribution des pentes: $Z_x = \lim_{\Delta x \rightarrow \infty} \frac{z(x + \Delta x) - z(x)}{\Delta x}$

- ✓ Fonction de corrélation : $\rho(R) = \frac{\langle z(r)z(r+R) \rangle}{\sigma^2}$

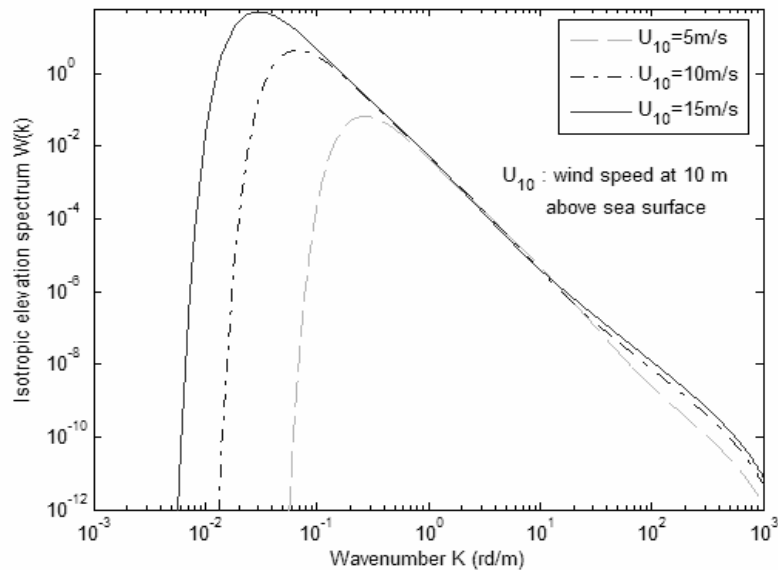


Representation spectrale

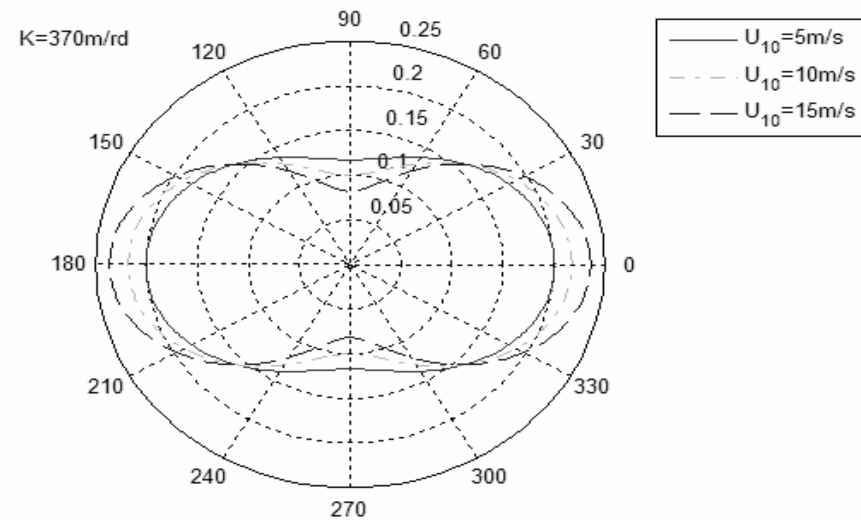


Modélisation de la surface de mer : Spectre d'Elfouhaily

Spectral representation



Spectre isotrope



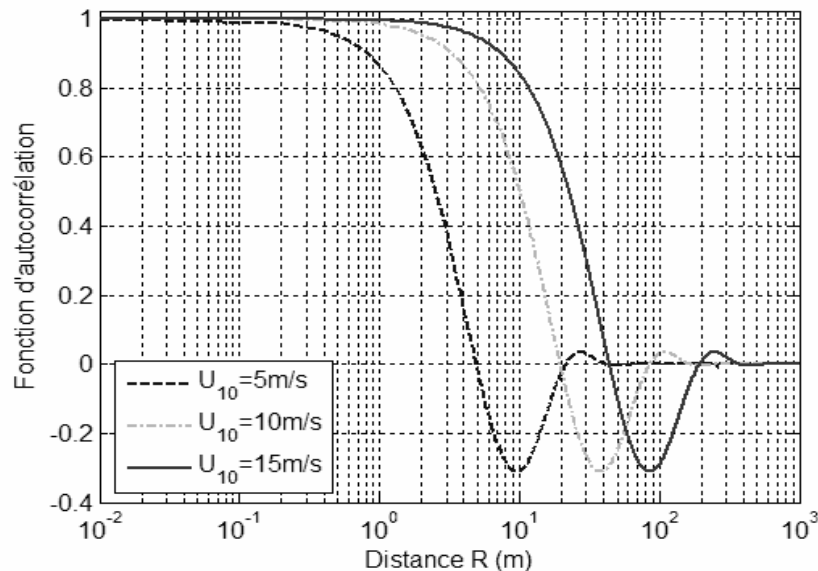
Fonction angulaire

- ✓ Le régime de gravité est fortement dépendant par la vitesse de vent contrairement au régime de capillarité
- ✓ Les vagues deviennent plus directionnelles avec l'augmentation du vent

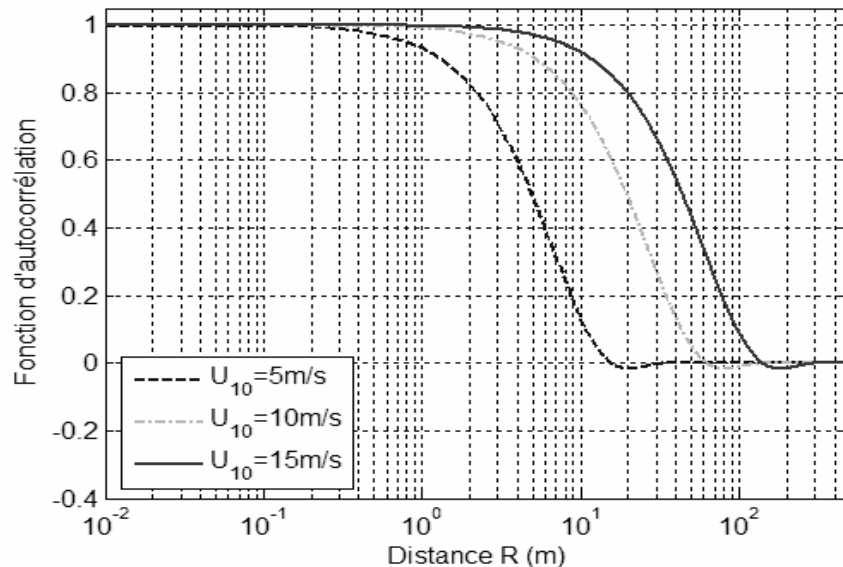


Modélisation de la surface de mer : Spectre d'Elfouhaily

Fonction de corrélation



Direction upwind

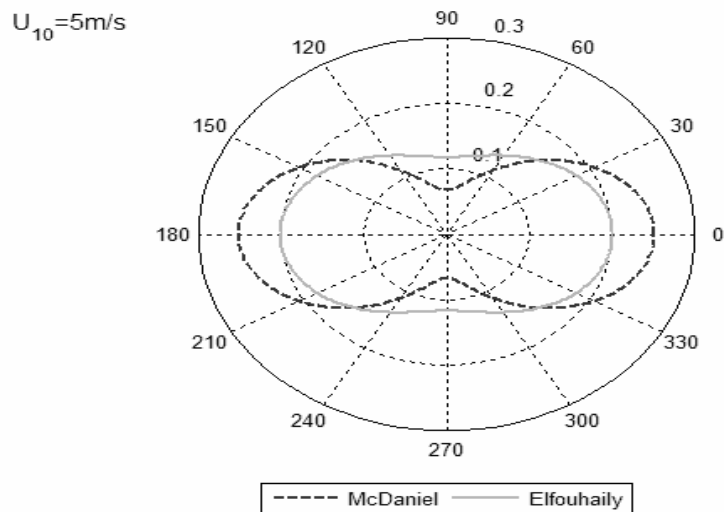


Direction crosswind

- ✓ La fonction d'autocorrélation de la mer n'est pas gaussienne ni exponentielle et bien caractérisée par sa région négative
- ✓ Cette zone joue un rôle important dans certains cas de diffusion en bande L

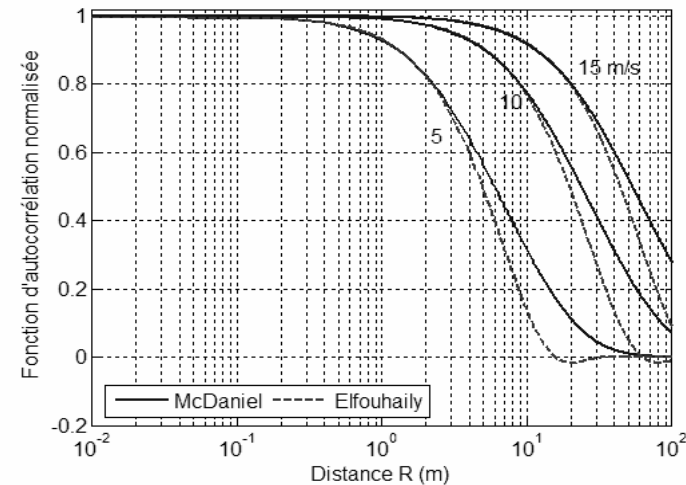
> **Modélisation de la surface de mer : Combinaison de deux spectres**

- **La fonction angulaire d'Elfouhaily présente une anomalie en direction travers du vent.**



Fonction angulaire

Comparaison des deux spectres



Fonction de corrélation

- ✓ **Pour cela la proposition est de combiner la partie monodirectionnelle du spectre d'Elfouhaily et la fonction angulaire proposée par McDaniel**

> Modèles de diffusion :

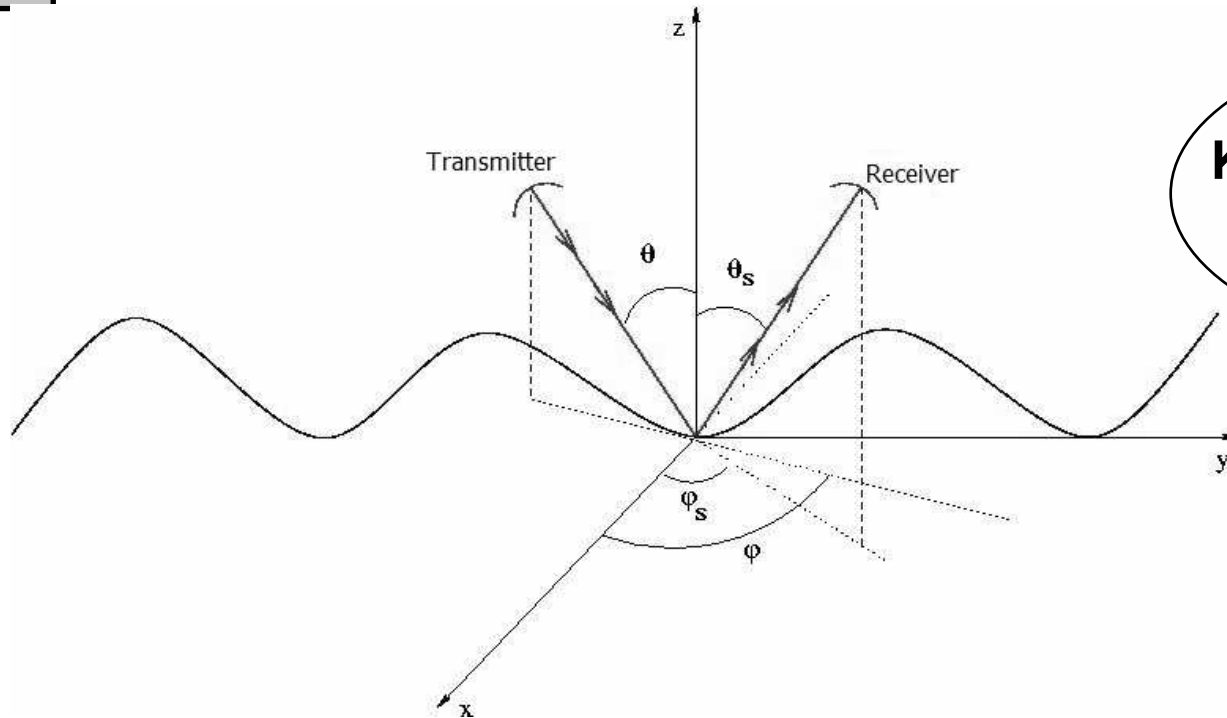
Les techniques numériques sont prohibitives en temps de calcul

- ✓ **Les modèles asymptotiques (approximations) prennent le relais :**
 - **L'optique géométrique de Kirchhoff Approximation : KA-GO (spéculaire)**
 - **Small Perturbation Method : SPM (Composante diffuse)**
 - **Two Scale Model TSM (KA-GO + SPM)**

TSM provoque un paramètre de division de la rugosité de la surface : K_d
 - **Small Slope Approximation : SSA**

SSA Unifie KA et SPM sans l'introduction du paramètre K_d

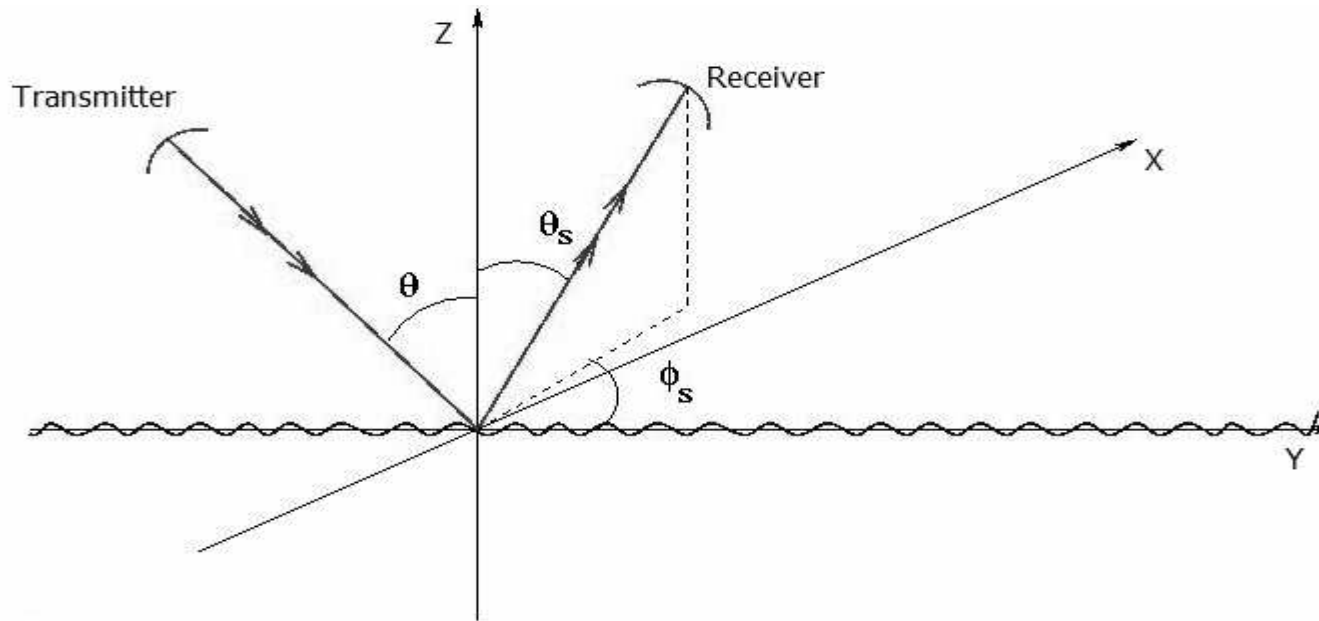
> Modèles de diffusion : KA-GO



KA: Approximation du Plan tangent

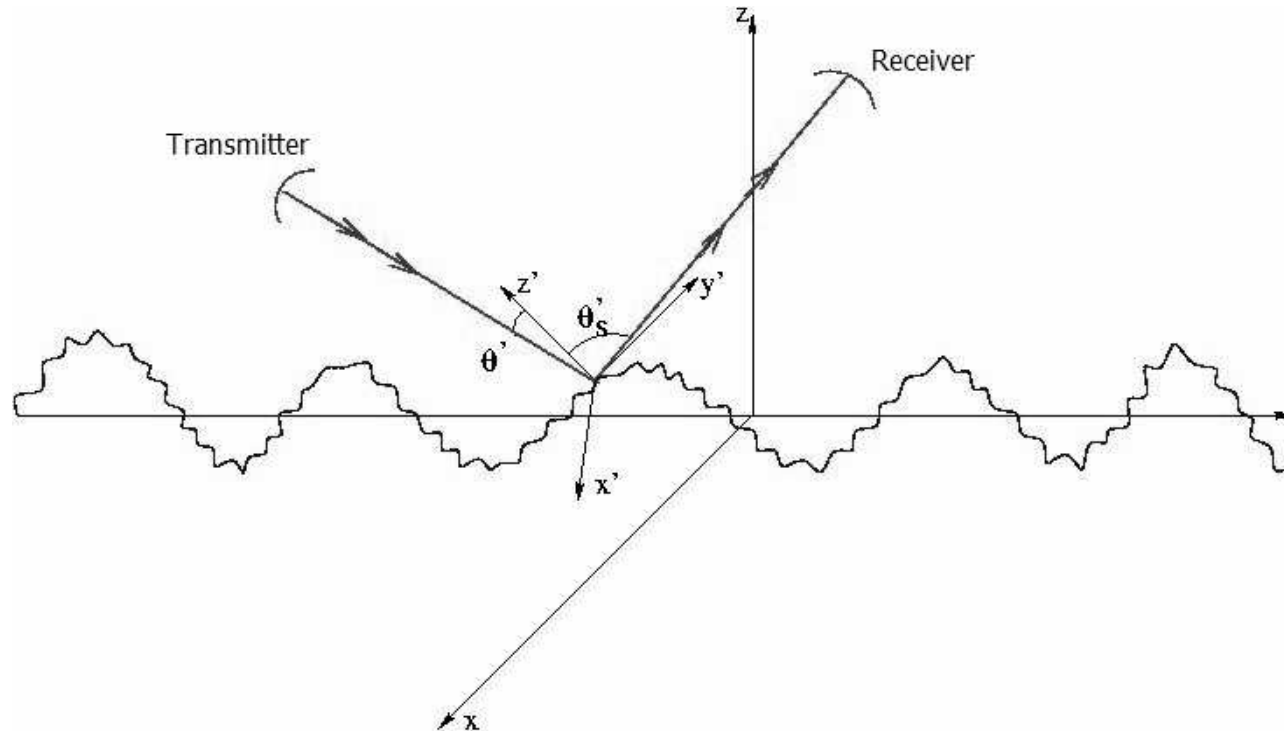
- ✓ KA-GO estime la composante spéculaire
- ✓ Ce modèle tient compte de la distribution des pentes des vagues de gravité

> Modèles de diffusion : Small Perturbation Method (SPM)



- ✓ SPM permet d'évaluer la composante diffuse
- ✓ Contribution des vagues de capillarité

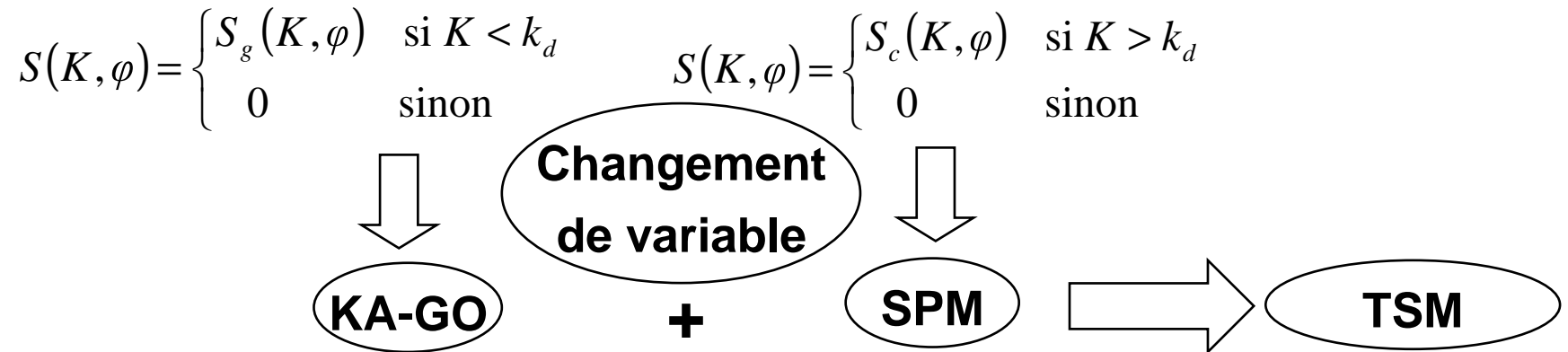
> Scattering models: Two Scale model (TSM)



- ✓ TSM combine KA et SPM en intrduisant le paramètre K_d
- ✓ TSM capable de calculer les composantes spéculaire et diffuse

> Modèles de diffusion : Two Scale model (TSM)

TSM exige la division de la surface de la surface en deux structures :



TSM possède un domaine d'application plus large que KA-GO and SPM



Modèles de diffusion : Small Slope Approximation (SSA)

- **SSA unifie SPM et KA dans un seul processus de traitement**
- **SSA est applicable indépendamment de la longueur d'onde émise**
- **L'amplitude de diffusion calculée avec SSA est une expansion régulière selon les pentes de la surface diffusante**
- **Le domaine de validité de SSA implique que l'écart type des pentes soit inférieures aux pentes des faisceaux incident et diffusé**

> Modèles de diffusion : Small Slope Approximation (SSA)

En SSA l'amplitude de diffusion s'écrit sous la forme suivante :

$$S(k, k_0) = \int \frac{1}{(2\pi^2)} \exp[-i(k - k_0) \cdot r + (q + q_0)h(r)] \Phi(k, k_0; \xi; h(r)) d\xi$$

Le terme fonctionnel Φ peut être développé en utilisant une série de Taylor autour de $h(\xi) = 0$, avec $h(\xi)$ est la TF $h(r)$

$$\begin{aligned} \Phi(k, k_0; \xi; h(r)) = & \Phi_0 + \int \Phi_1(\xi_1) h(\xi_1) \exp(i\xi \cdot r) d\xi_1 \\ & + \int \Phi_2(\xi_1, \xi_2) h(\xi_1) h(\xi_2) \exp[i(\xi_1 + \xi_2) \cdot r] d\xi_1 d\xi_2 + \dots \end{aligned}$$

Pour trouver les termes Φ_n l'expansion de SSA obtenue est identifiée avec la série du modèle des petites perturbations SPM

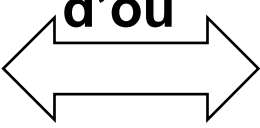


Models of scattering problem : Small Slope Approximation (SSA)

- ✓ **L'expression du coefficient de diffusion en premier ordre par rapport à la pente de la surface s'écrit :**

$$\sigma_{\alpha\alpha_0}(k, k_0) = \frac{1}{\pi} \left| \frac{2q_k q_0}{q_k + q_0} B_{\alpha\alpha_0}(k, k_0) \right|^2 \exp[-(q_k + q_0)^2 \times \rho(0)] \int \left\{ \exp[(q_k + q_0)^2 \rho(r)] - 1 \right\} \exp[-i(k - k_0)r] dr$$

$\alpha, \alpha_0 = 1, 2$ 1: correspond polarisation verticale et 2 à l'horizontale

$\rho(r)$ est la fonction de corrélation de la surface  La dépendance avec la représentation spectrale seulement



Models of scattering problem : theoretical comparison

SSA

- SSA est un modèle de diffusion unifié
- ✓ Combine KA and SPM sans l'introduction du paramètre de diffusion
- ❖ Seule la représentation spectrale est demandée
- Temps de calcul considérable dans certains cas

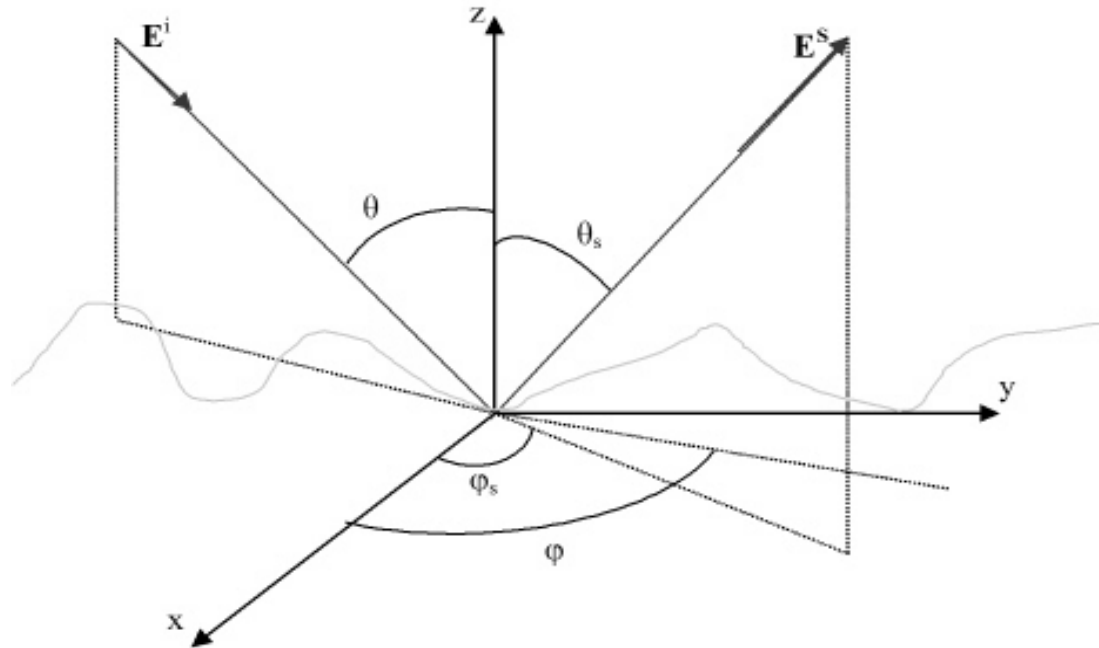
TSM

- TSM est un modèle de diffusion composite
- ✓ Combine KA et SPM en introduisant le paramètre de division k_d
- ❖ Distribution des pentes et représentation spectrale sont nécessaires
- Temps de calcul réduit



Résultats numériques : Simulations et discussions

✓ Configuration générale du problème : en bistatique



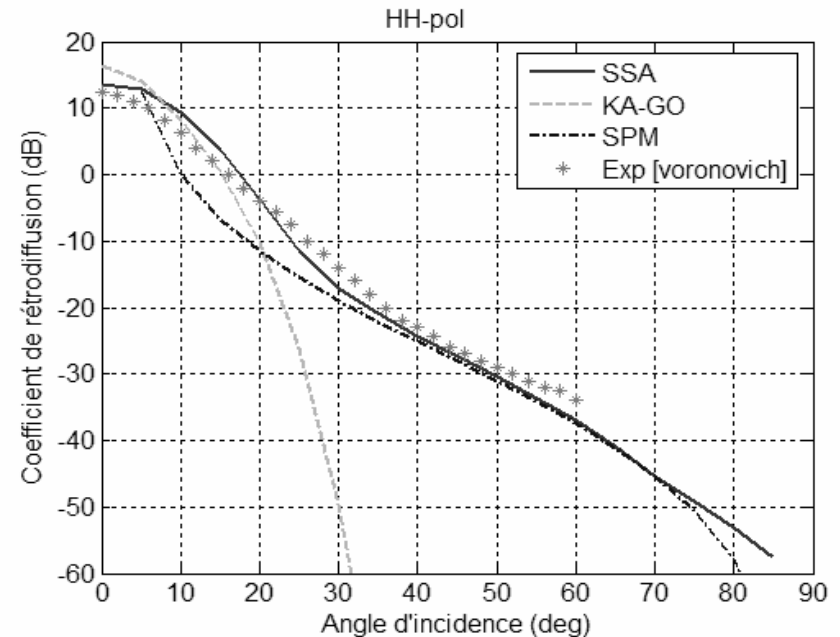
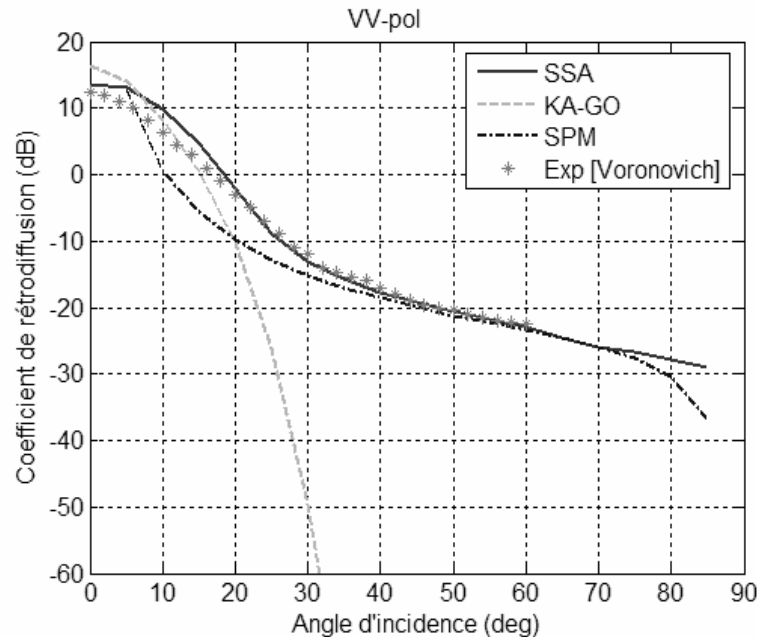
➤ Cas particuliers :

- **Monostatic (Backscattering) :** $\theta = \theta_s, \quad \varphi_s = \varphi + \pi$
- **Forward Scattering :** $\theta = \theta_s, \quad \varphi_s = \varphi$



Résultats numériques : Cas monostatique (fct de l'angle d'incidence)

F= 14 GHZ, Vitesse du vent=5 m/s, Upwind

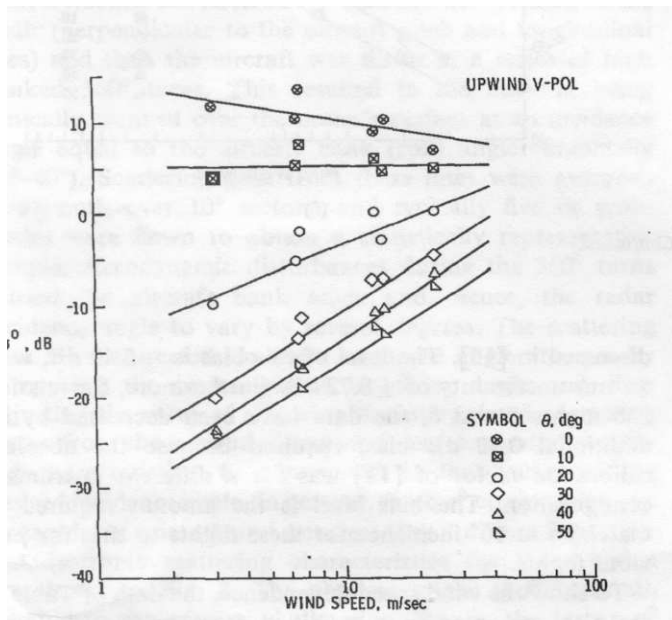


- ✓ **SSA présente une transition entre les courbes de KA-GO et SPM dans la zone angulaire 15°-35°là où aucune de ces deux méthodes n'est précise.**
- ✓ **Une bonne concordance entre les résultats de SSA et expérimentaux**

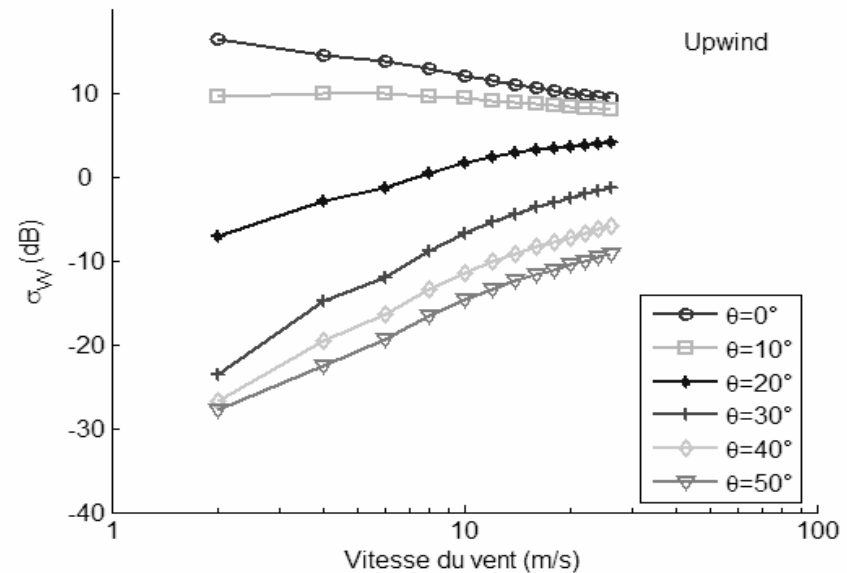


Résultats numériques : Cas monostatique (fct vitesse du vent)

F= 14 GHZ, VV-pol, Upwind



Exp [Jones]

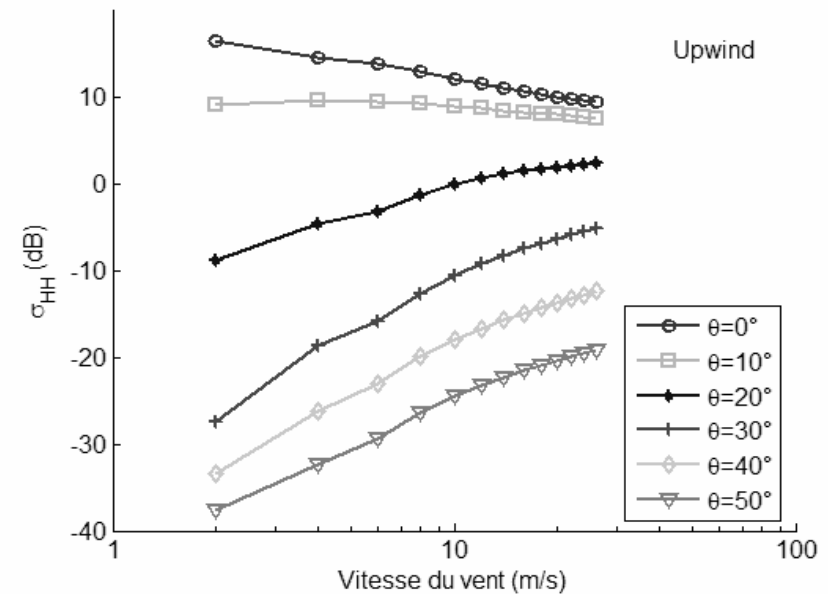
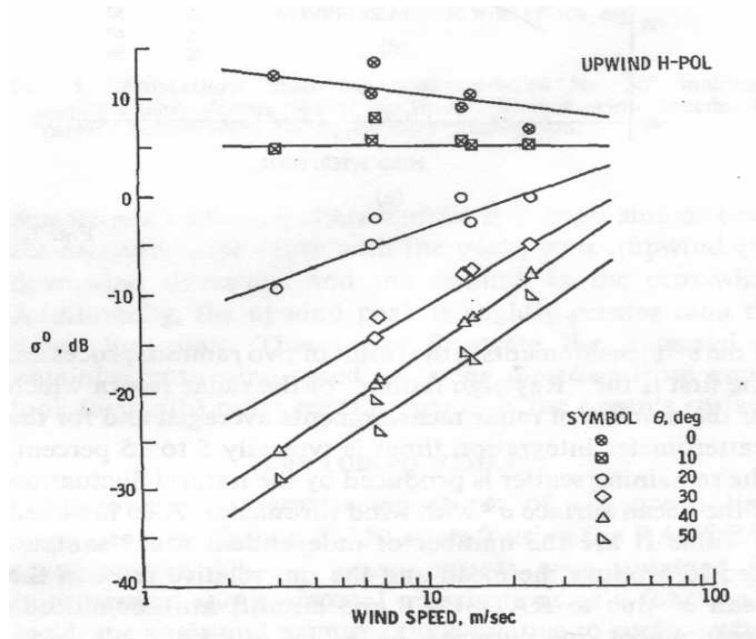


SSA

- ✓ Validation avec des données expérimentales en fonction de la vitesse du vent en polarisation VV

> Résultats numériques : Cas monostatique (fct vitesse du vent)

F= 14 GHZ, HH-pol, Upwind



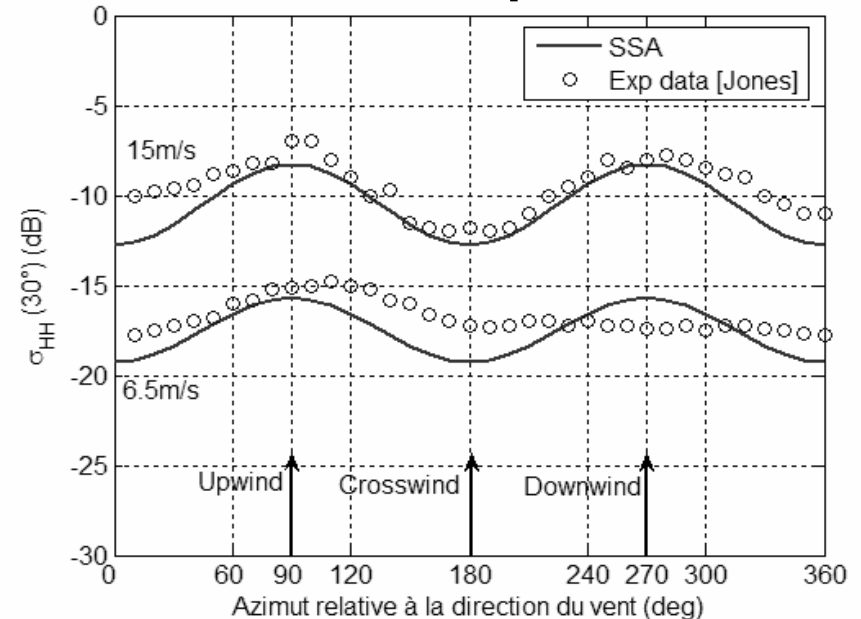
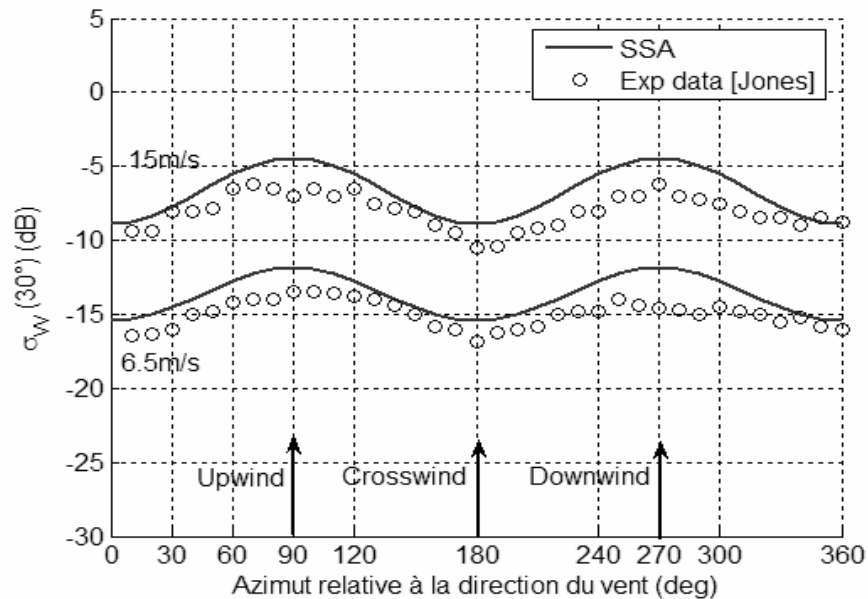
- ✓ Validation expérimentale en fonction de la vitesse du vent en polarisation HH
- ✓ Globalement les coefficients augmentent avec la vitesse du vent

> Résultats numériques : Cas monostatique (fct direction du vent)

VV-pol

F= 14 GHZ

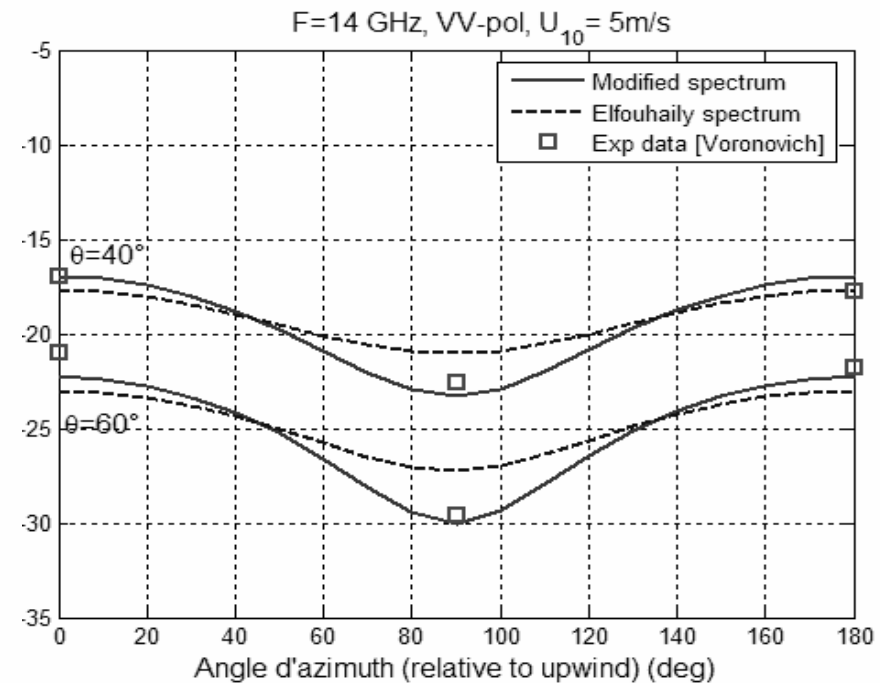
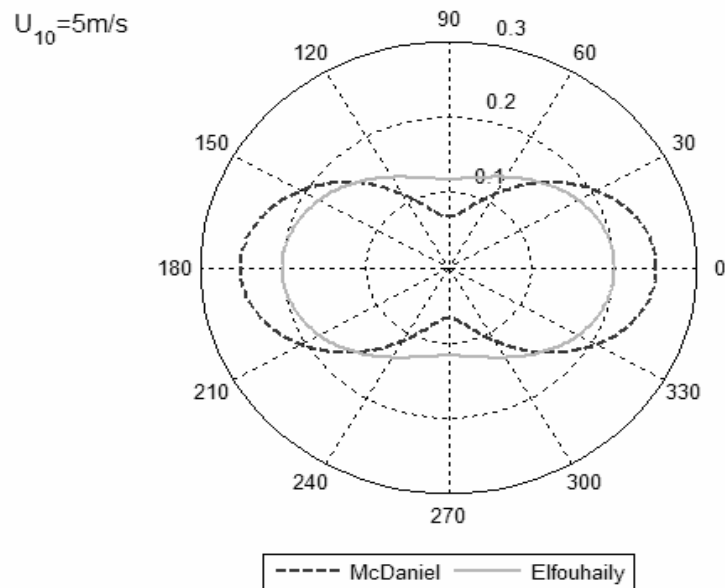
HH-pol



- ✓ Globalement on constate une similarité et une concordance importantes
- ✓ Le spectre d'Elfouhaily n'est pas capable de distinguer le cas upwind du cas downwind

> Résultats numériques : Cas monostatique (fct direction du vent)

➤ Résultats avec la combinaison de deux spectres Elfouhaily et McDaniel

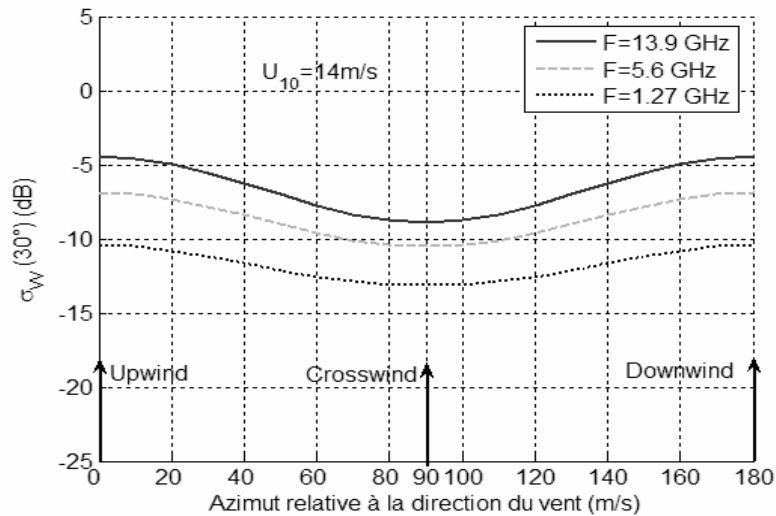


✓ En utilisant la combinaison de deux spectres on obtient une amélioration nette dans la direction cross wind d'une grandeur moyenne de 3 dB

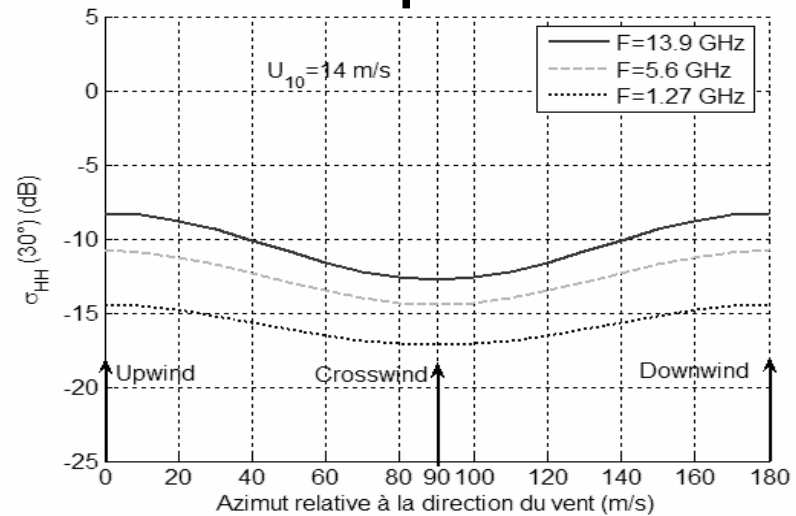
> Résultats numériques : Cas monostatique (fct direction du vent)

Vitesse du vent = 14 m/s

VV-pol



HH-pol



- ✓ Avec la diminution de la fréquence les coefficients de rétrodiffusion deviennent moins sensible à la direction du vent (Bande L)

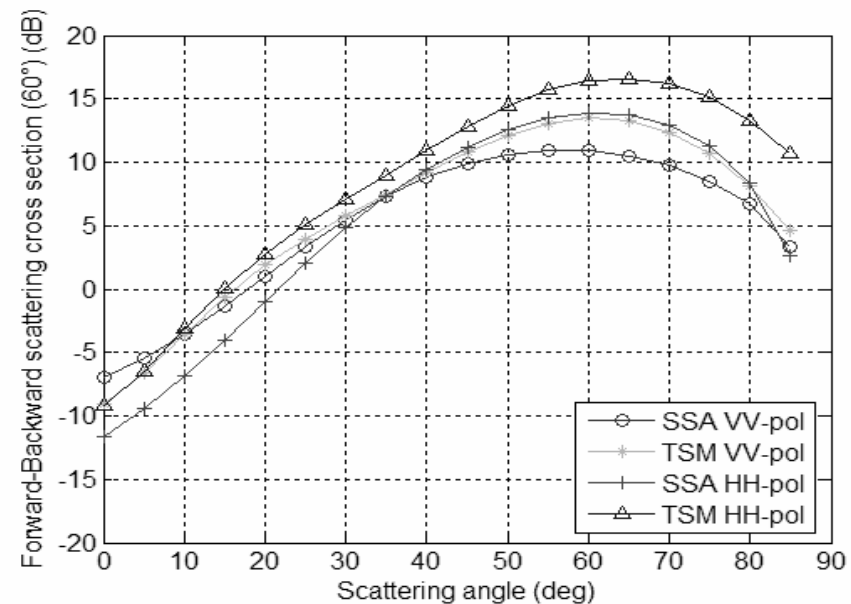
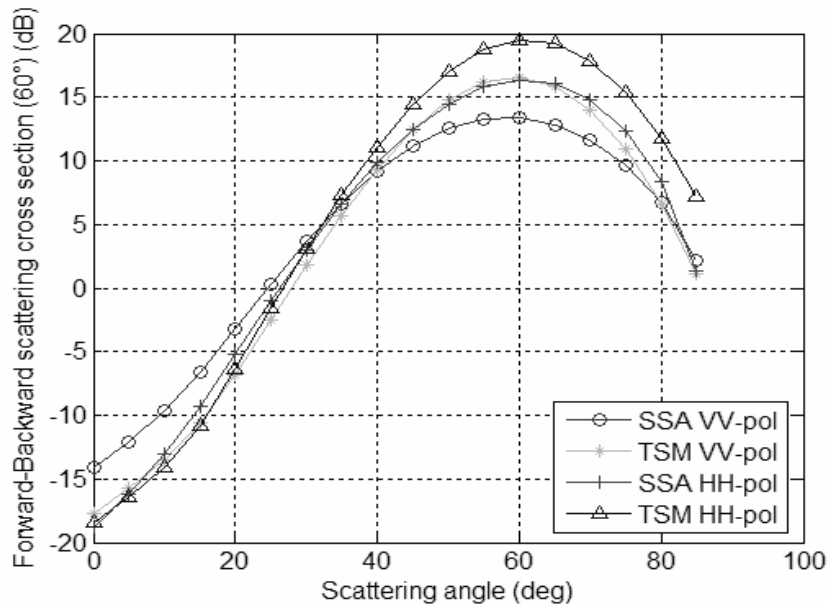


Résultats numériques : Propagation avant (SSA et TSM)

F=5.5 GHz, $\theta = 60^\circ$

Wind speed=5m/s

Wind speed=15m/s



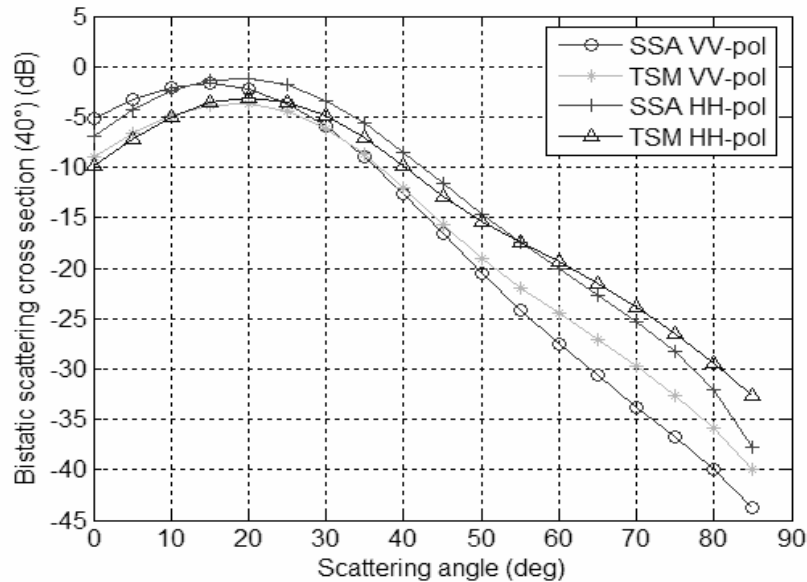
- ✓ Le maximum d'énergie est obtenu autour de la direction spéculaire 60°
- ✓ Les deux modèles divergent seulement pour des angles diffusés élevés en particulier en polarisation HH pour une grande vitesse du vent



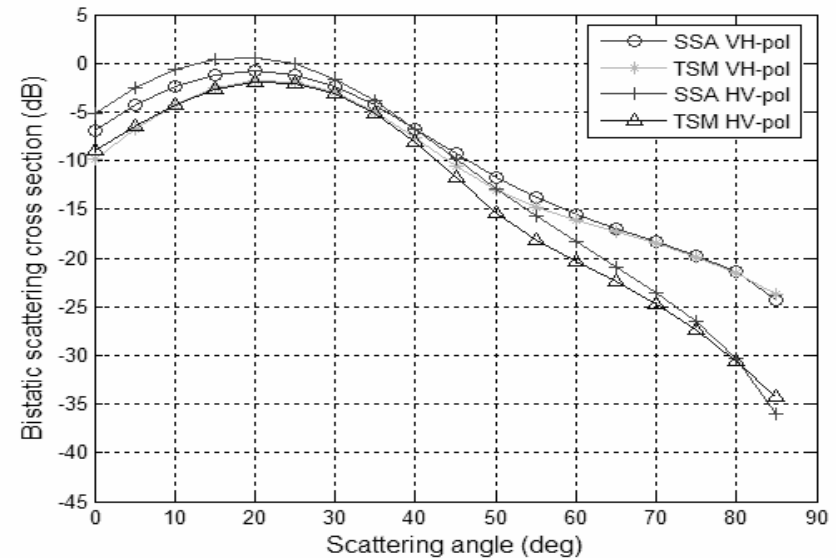
Résultats numériques : Configuration Bistatique (SSA et TSM)

$F=14\text{GHZ}$, $\text{teta}=40^\circ$, $\text{phi}=0^\circ$, $\text{phis}=45^\circ$, Wind speed= 5m/s

Co-polarization



Cross-polarization

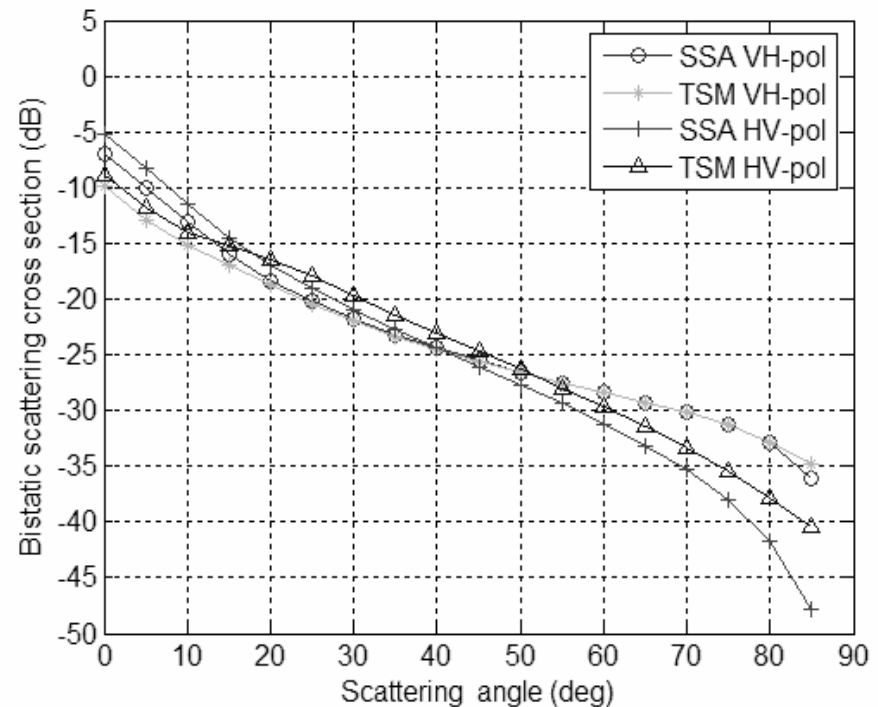
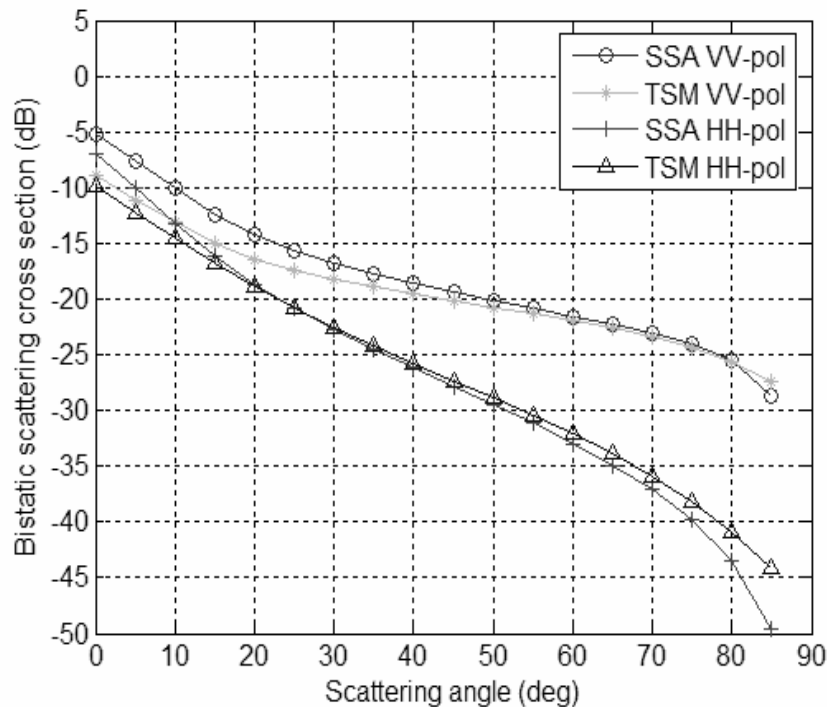


- ✓ En polarisation identique SSA est supérieure à TSM pour des angles moyens
le comportement est l'inverse pour les angles élevés
- ✓ En polarisation croisée l'accord est important en particulier pour les angles élevés



Résultats numériques : Configuration Bistatique (SSA et TSM)

F=14GHZ, teta=40°, phi=0°, phis=135°, Wind speed=5m /s



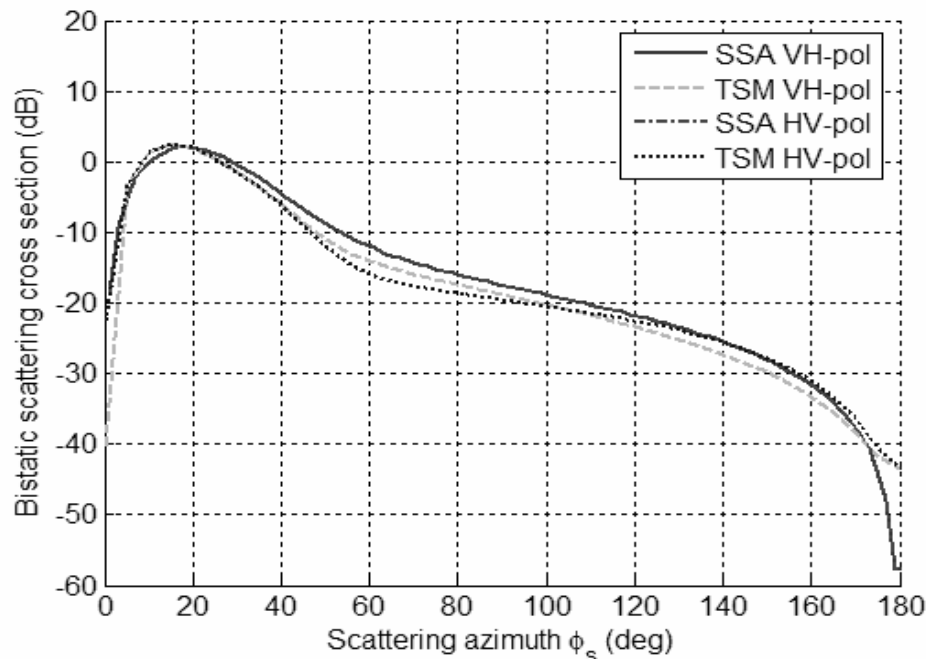
- ✓ Dans la zone de l'incidence normale la différence entre eux est de grandeur de 2-3 dB
- ✓ Il existe une importante similitude entre les deux modèles dans cette configuration



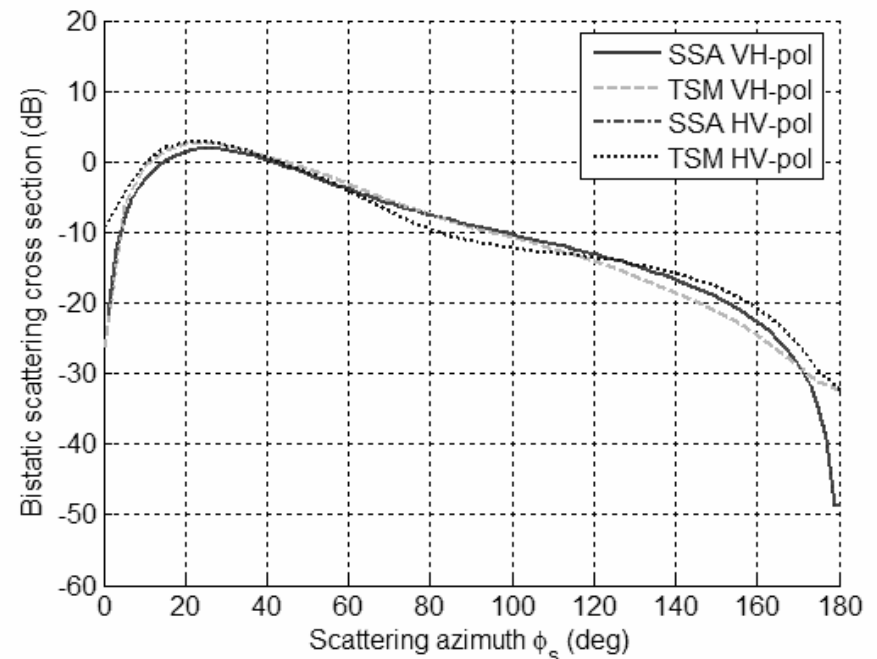
Résultats numériques : Configuration Bistatique (en fct de l'azimut de diffusion)

F=14GHZ, $\theta=40^\circ$, $\theta_s=40^\circ$, $\phi=0^\circ$

vitesse du vent = 5m/s



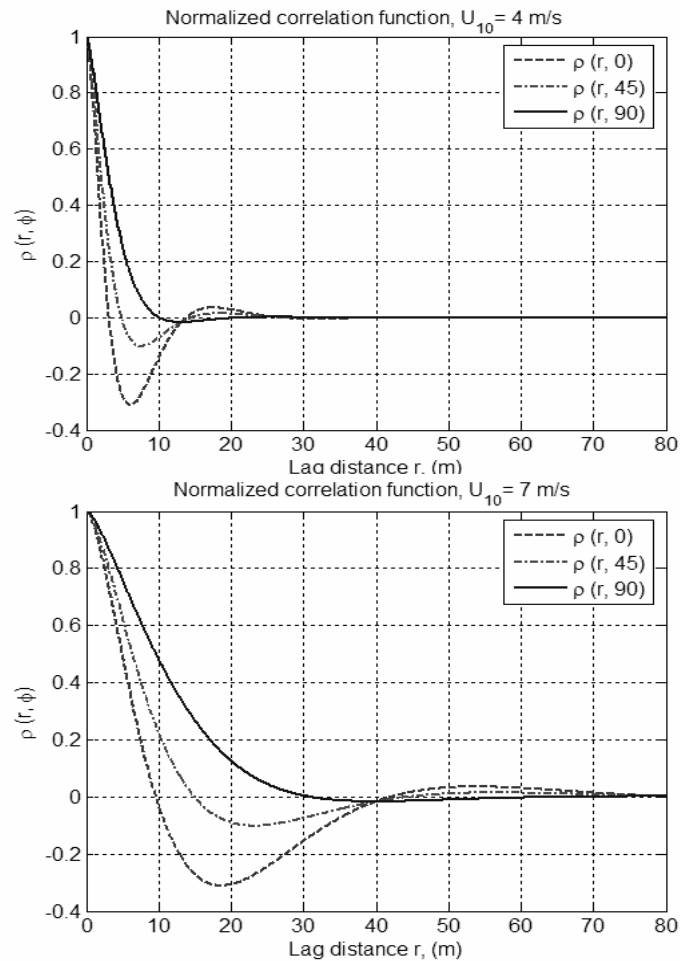
vitesse du vent = 15m/s



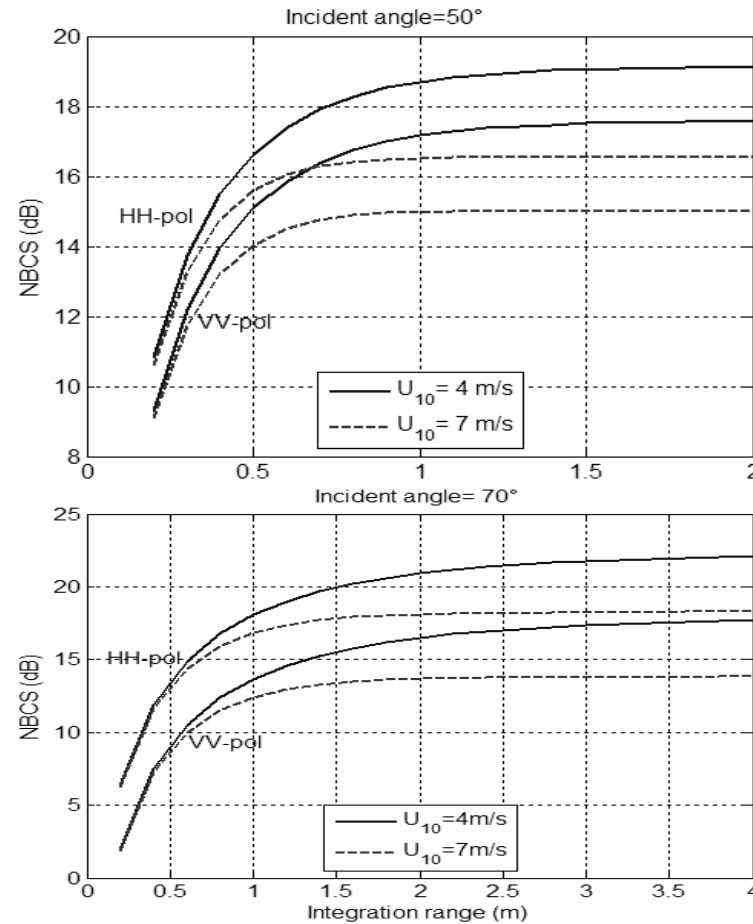
- ✓ La concordance est importante entre les deux modèles sauf dans les zones de rétrodiffusion et de diffusion spéculaire
- ✓ Dans le modèle SSA les coefficients en polarisation HV et VH sont égaux

> Résultats numériques : Etude en bande L (Fréquence du GPS)

Fonction de corrélation (Elfouhaily)



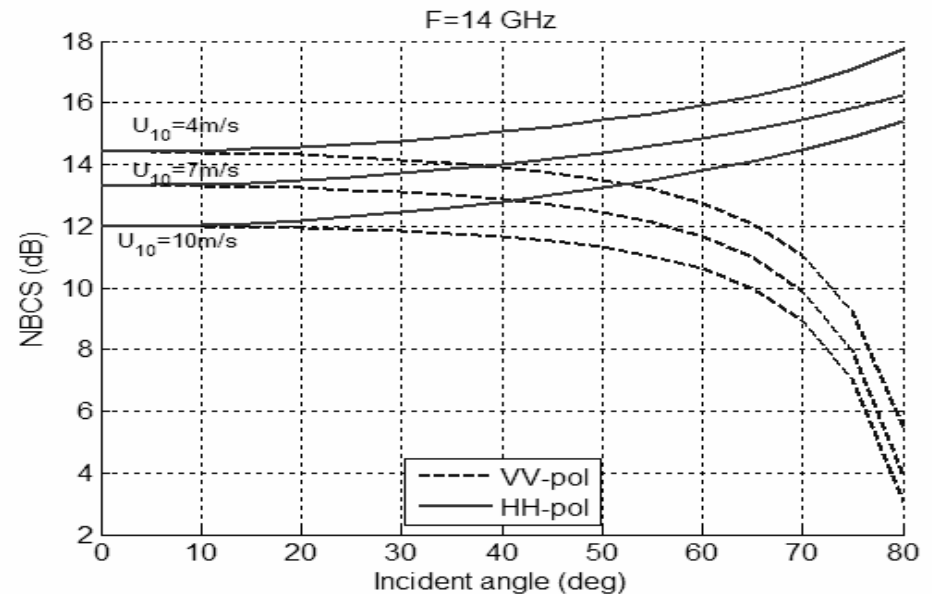
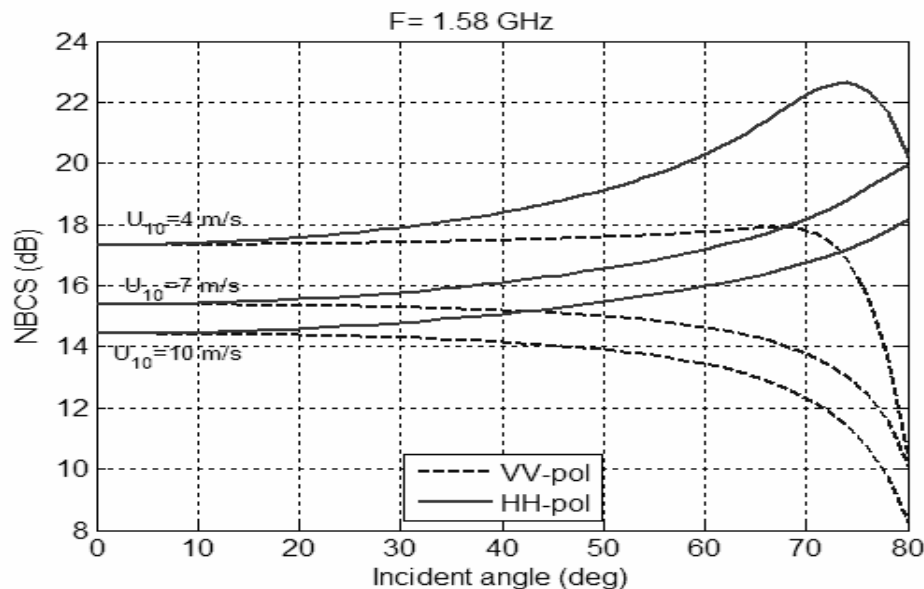
Convergence en spéculaire (F=1.58GHz)





Résultats numériques : Etude en bande L (Fréquence du GPS)

Diffusion en direction spéculaire , $F= 1.58 \text{ GHz}$



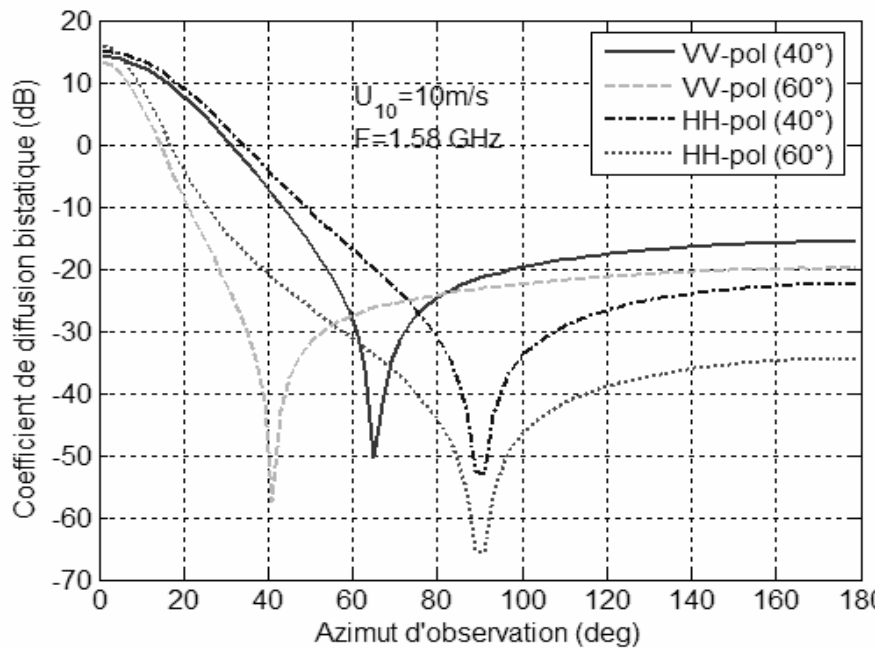
- ✓ Pour $F=1.58 \text{ GHz}$ et pour un vent de 4 m/s on remarque un rebroussement à partir de 70° en HH ce qui n'est pas le cas pour les autres vitesse ainsi pour $F=14 \text{ GHz}$
- ✓ L'intégration dans la région négative de la fct de corrélation cause ce phénomène



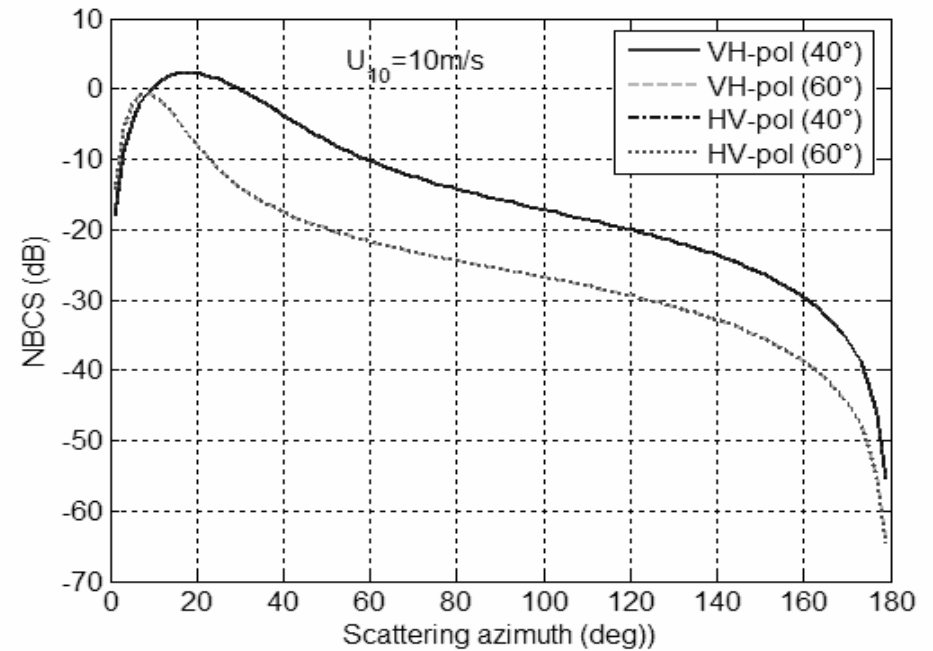
Résultats numériques : Etude en bande L (Fréquence du GPS)

Configuration bistatique générale , $F= 1.58 \text{ GHz}$

Co-polarization



Cross-polarization



- ✓ Le pic en coefficients VV et HH ne signifie pas un phénomène physique
- ✓ En polarisation VV l'endroit du pic dépend de l'angle d'incidence pas en HH



Conclusion et perspectives

- ✓ **Modélisation de la surface de mer (spectre d'Elfouhaily + McDaniel)**
- ✓ **Application du modèle SSA à la diffusion par la mer en bistatique**
- ✓ **Comparison numérique entre SSA et TSM en bistatique**
- ✓ **Obtention des résultats en polarisation croisée en bistatique**
- ✓ **Application de cette étude en Bande L (Fréquence du GPS)**
- **Perspectives**
 - ✓ **Validation expérimentale des résultats obtenus en bistatique**
 - ✓ **Adaptation dans des applications pratiques: Remote sensing, GPS, Radar**