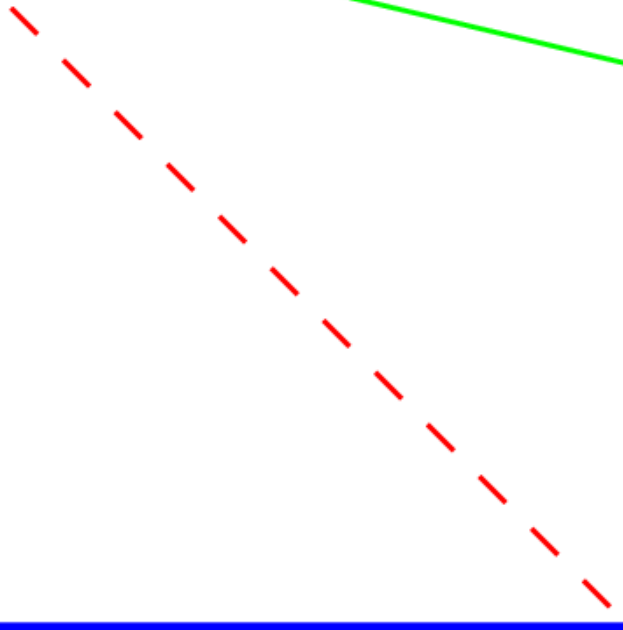
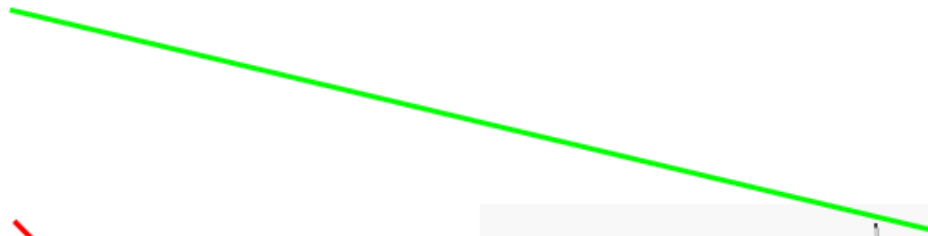


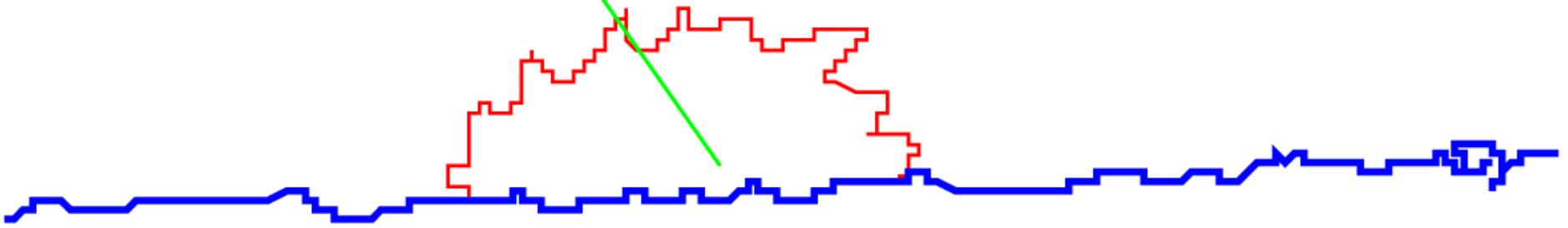
# > Diffusion électromagnétique par la surface maritime:

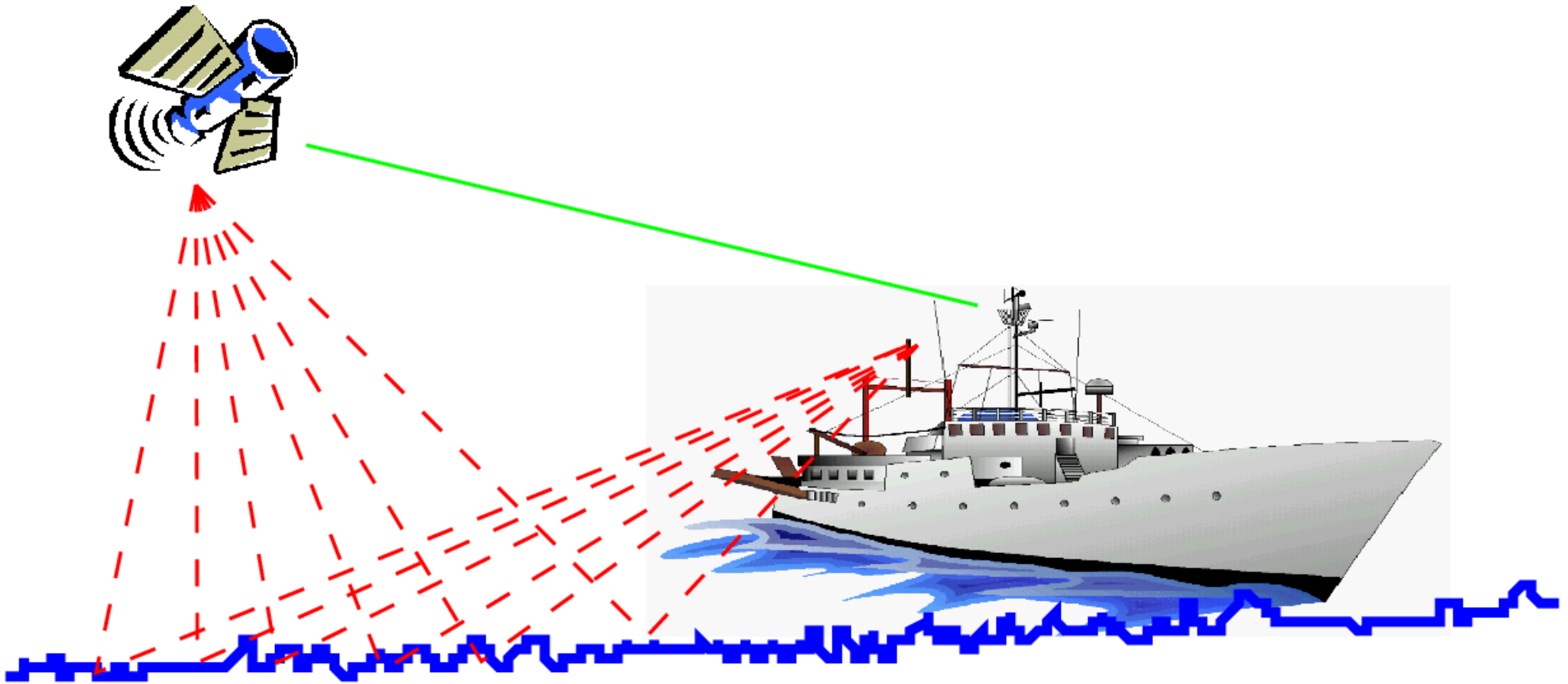
## Modélisation physique



**E3I2**  
Laboratoire Extraction et Exploitation de  
l'Information en Environnements Incertains (E3I2)  
**ENSIETA**  
2, rue François Verny  
29806 Brest Cedex 09

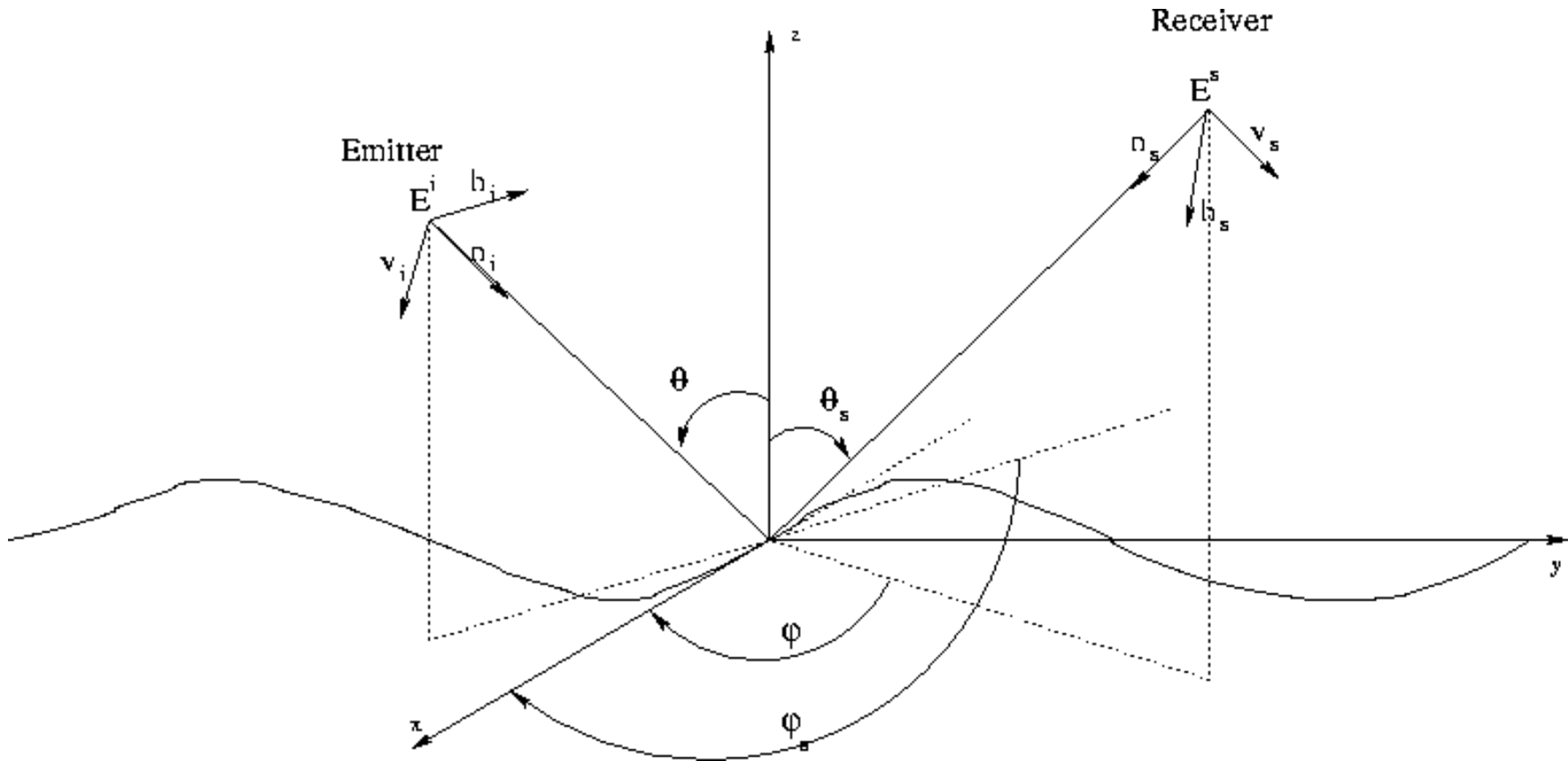








# Part I: Modélisation électromagnétique classique de la diffusion par une surface rugueuse





$$\vec{E}^s = \begin{bmatrix} E_{v_r}^s \\ E_{h_r}^s \end{bmatrix} = [S] \vec{E}^i = \frac{e^{-jkR}}{R} \begin{bmatrix} S_{v_s v} & S_{v_s h} \\ S_{h_s v} & S_{h_s h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_v^i \\ E_h^i \end{bmatrix}$$

$$\sigma_{pq} = 4\pi R^2 \left| S_{pq} \right|$$

## **Les approches numériques**

- **Finite Difference Time-Domain (FDTD)**
- **Finite-Element Method (FEM)**

### **Points Communs:**

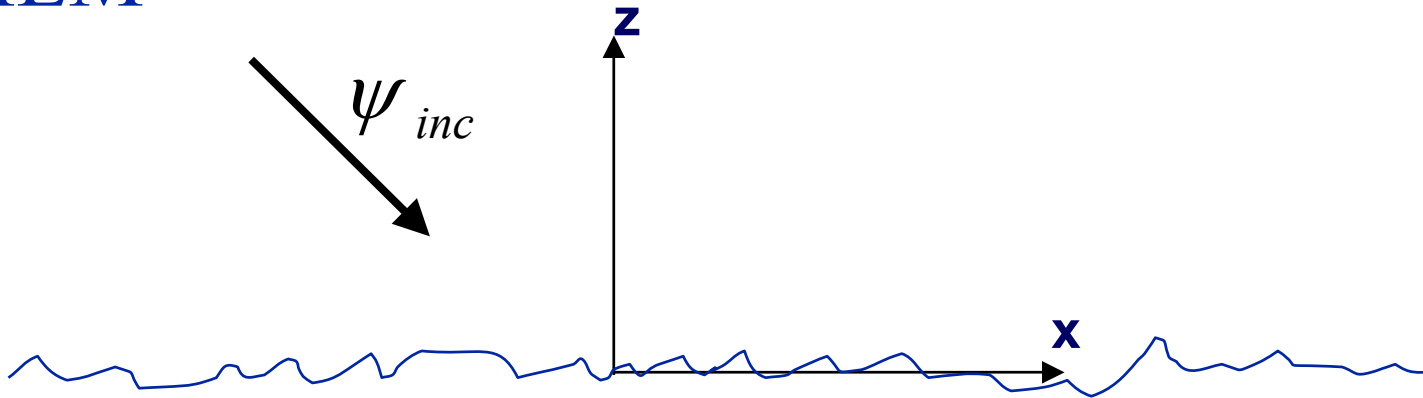
- **Nécessite un maillage**
- **Lourds en calculs**
- **Ne convient pas à une surface rugueuse aléatoire**

## **Les approches intégrales**

- **Integral Equation Method (IEM)**
- **Method of Moment (MoM)**

**Avantage:**

- **Réduction du problème à une dimension**
- **Moins lourds que précédemment**
- **Géométrie de la surface intervient de façon plus naturelle**

**>** IEM

$$\psi(x, z) = \psi_{inc}(x, z) + \psi_s(x, z)$$

$$(\Delta + k^2) \cdot \psi(x, z) = 0$$

> IEM

$$(\Delta + k^2) \cdot g(\vec{r}, \vec{r}') = -\delta(\vec{r} - \vec{r}')$$

$$g(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k|\vec{r} - \vec{r}'|)$$

Identité de Green:

$$\begin{aligned} & \iint_{V_0} [\psi(\vec{r}) \Delta g(\vec{r}, \vec{r}') - g(\vec{r}, \vec{r}') \Delta \psi(\vec{r})] d\vec{r} = \\ & - \int_S [\psi(\vec{r}) \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') - g(\vec{r}, \vec{r}') \nabla \psi(\vec{r})] d\vec{s} \\ & + \int_{S_\infty} [\psi(\vec{r}) \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') - g(\vec{r}, \vec{r}') \nabla \psi(\vec{r})] d\vec{s} \end{aligned}$$

**>** IEM

**Pour une surface parfaitement conductrice:**

$$\psi(\vec{r}) = 0$$

$$\psi_{inc}(\vec{r}') - \int_S [g(\vec{r}, \vec{r}') \nabla \psi(\vec{r})] d\vec{s} = \psi(\vec{r}')$$

**>** MoM

**Equation générique 1D:**

$$\int_a^b g(x, x') f(x') dx' = c(x)$$

$$f(x') = \sum_{n=1}^N b_n f_n(x')$$

$$\sum_{n=1}^N b_n \int_a^b g(x, x') f_n(x') dx' = c(x)$$

**>** MoM

**Fonction de pondération:**

$$\int_a^b c(x) w_m(x) dx = \sum_{n=1}^N b_n \int_a^b w_m(x) \int_a^b g(x, x') f_n(x') dx' dx$$

$$\sum_{n=1}^N G_{mn} b_n = c_m$$

> MoM

$$c_m = \int_a^b c(x) w_m(x) dx$$

$$G_{mn} = \int_a^b w_m(x) \int_a^b g(x, x') f_n(x') dx' dx$$

## **Les approches intégrales**

**Surface maritime:**

**Ces approches nécessitent la connaissance exacte de la surface rugueuse. Pour un processus aléatoire, on doit donc effectuer une réalisation conforme au lois probabilistes gérant ce processus aléatoire. Puis, faire les calculs numériques pour cette réalisation.**

## **Les approches approximatives**

- **Small Perturbation Method (SPM)**
- **SPM-Rayleigh**
- **Kirchhoff Approximation (KA)**
- **Fonctions d'ombre**
- **Two Scale Methods (TSM)**
- **Small Slope Approximation (SSA)**

## > Small Perturbation Method (SPM)

$$\psi(x, z) = \psi_{inc}(x, z) + \psi_s(x, z)$$

$$(\Delta + k^2) \cdot \psi(x, z) = 0$$

$$\psi^{inc} = \psi^{inc} \Big|_{z=0} + h \cdot \psi_z^{inc} \Big|_{z=0} + \dots$$

$$\psi^s = \psi_0^s + \psi_1^s + \psi_2^s + \dots \qquad \psi_n^s = O(h^n)$$

## > Small Perturbation Method (SPM)

$$\psi(z = h) = 0$$

$$\psi_0^s \Big|_{z=0} = -\psi^{inc} \Big|_{z=0}$$

$$\psi_1^s \Big|_{z=0} = -h \left( \psi_z^{inc} \Big|_{z=0} + \psi_{0,z}^s \Big|_{z=0} \right)$$

## > Small Perturbation Method (SPM)

$$\psi^s(\vec{r}') = \int_S [\psi(\vec{r}) \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') - g(\vec{r}, \vec{r}') \nabla \psi(\vec{r})] d\vec{s}$$

$$\psi_1^s(\vec{r}') = \int_S \left[ h(\vec{r}) (\psi_z^{inc} + \psi_{0,z}^{inc}) \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}')}{\partial z} \right] d\vec{s}$$

## > SPM-Rayleigh

$$\psi^{inc} = e^{ik_{ix}x - ik_{iz}z}$$

$$\psi(z = h) = 0$$

$$\psi^s = \psi_0^s + \psi_1^s + \psi_2^s + \dots$$

$$\psi^s = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ik_x x - ik_z z} \cdot \psi^s(k_x) dk_x$$

## > SPM-Rayleigh

$$e^{ik_x x - ik_z h(x)} + \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ik_x x - ik_z h(x)} \cdot \psi^s(k_x) dk_x = 0$$

Développement en série entière de:  $e^{ik_z h(x)}$

Avec:  $\psi^s(k_x) = \psi_0^s(k_x) + \psi_1^s(k_x) + \psi_2^s(k_x) + \dots$

$$e^{ik_x x} \left[ 1 - ik_{iz} h(x) - \frac{k_{iz}^2 h^2(x)}{2} + \dots \right] + \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ik_x x} \left[ 1 - ik_{iz} h(x) - \frac{k_{iz}^2 h^2(x)}{2} + \dots \right] \left[ \psi_0^s(k_x) + \psi_1^s(k_x) + \psi_2^s(k_x) + \dots \right] dk_x = 0$$

## > SPM-Rayleigh

A l'ordre 0:

$$e^{ik_x x} + \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ik_x x} \psi_0^s(k_x) dk_x = 0$$

$$\psi_0^s(k_x) = -\delta(k_x - k_{ix})$$

## > SPM-Rayleigh

A l'ordre 1:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{ik_x x} \psi_1^s(k_x) dk_x = 2ik_{iz} h(x) e^{ik_x x} = 2ik_{iz} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_x) e^{ik_x x + ik_x x} dk_x$$

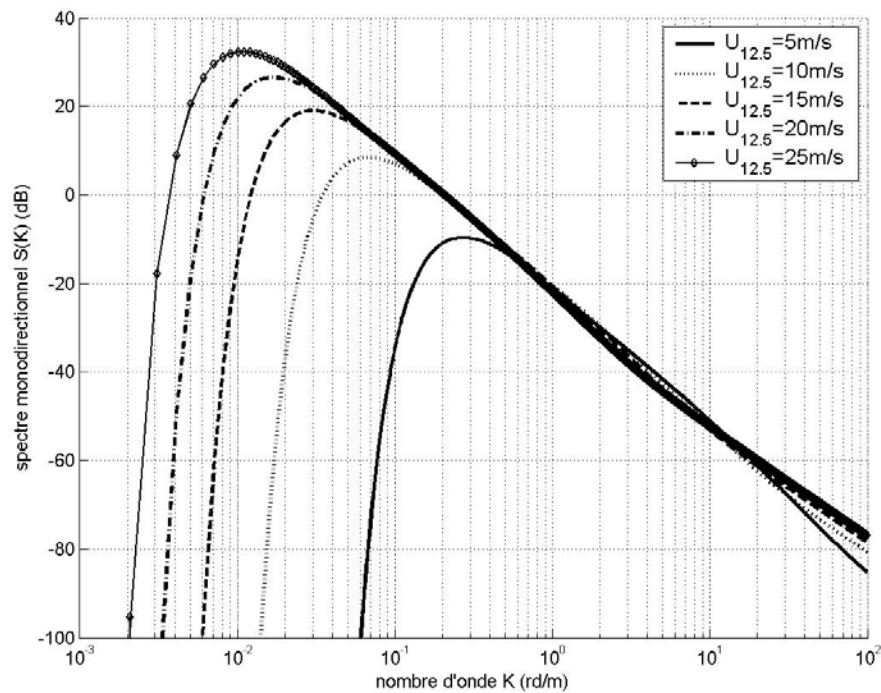
$$\psi_1^s(k_x) = 2ik_{iz} F(k_x - k_{iz})$$

## **SPM-Rayleigh**

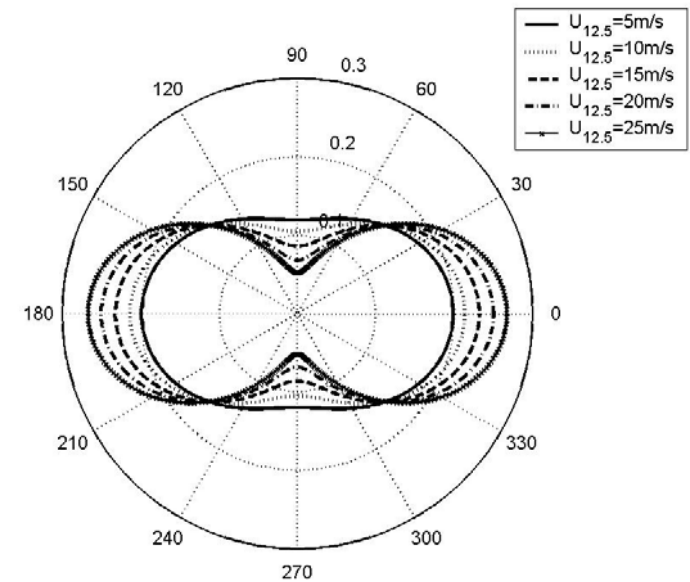
- **A l'ordre 1: La diffusion exprimée par SPM-Rayleigh a une composante cohérente nulle.**
- **Nécessité de connaître le spectre de la surface rugueuse**
- **Pour avoir une composante cohérente non nulle, il faut au moins aller jusqu'à l'ordre 2.**

# > SPM-Rayleigh

- **Elfouhaily model** (omnidirectional spectrum)



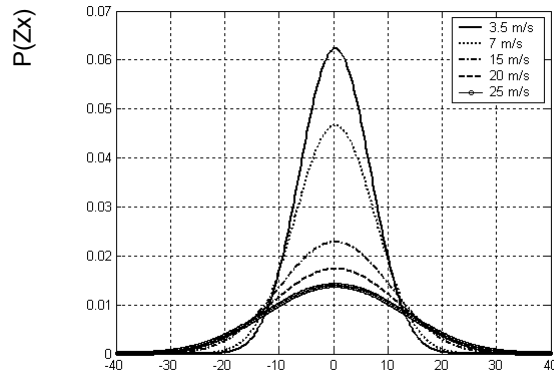
- **Elfouhaily Model** (angular function)



## **Kirchhoff Approximation (KA)**

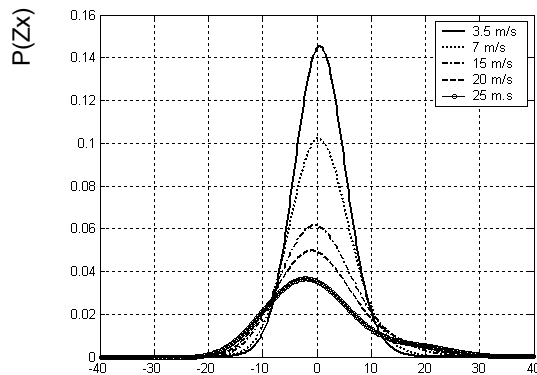
- **Approximation de la surface rugueuse par des plans tangent**
- **Nécessité de connaître la distribution des pentes de la surface**
- **La longueur d'onde incidente doit être faible devant les courbures de la surface rugueuse**
- **L'approximation de Kirchhoff exprime bien la composante cohérente de la diffusion**

# > Kirchhoff Approximation (KA)

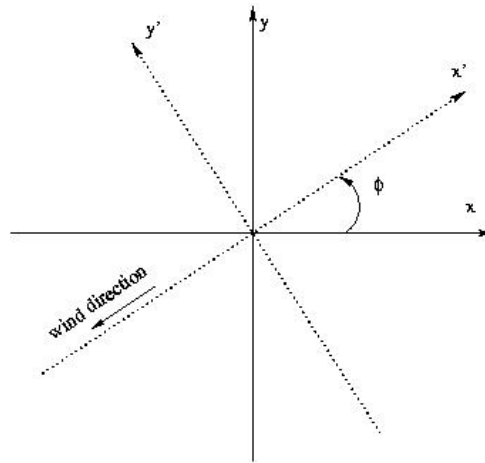


Slopes in x direction

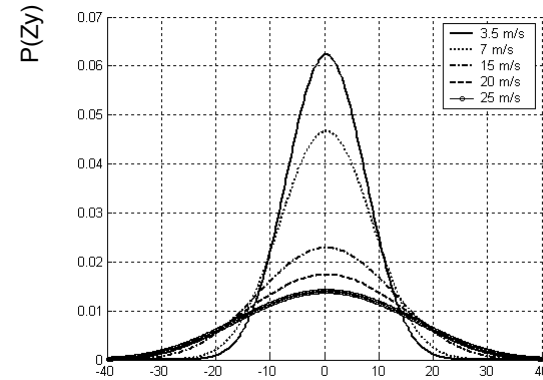
Up wind



• Gaussian model

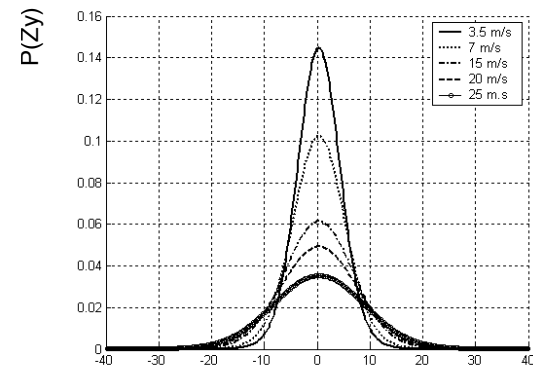


• Cox & Munk model

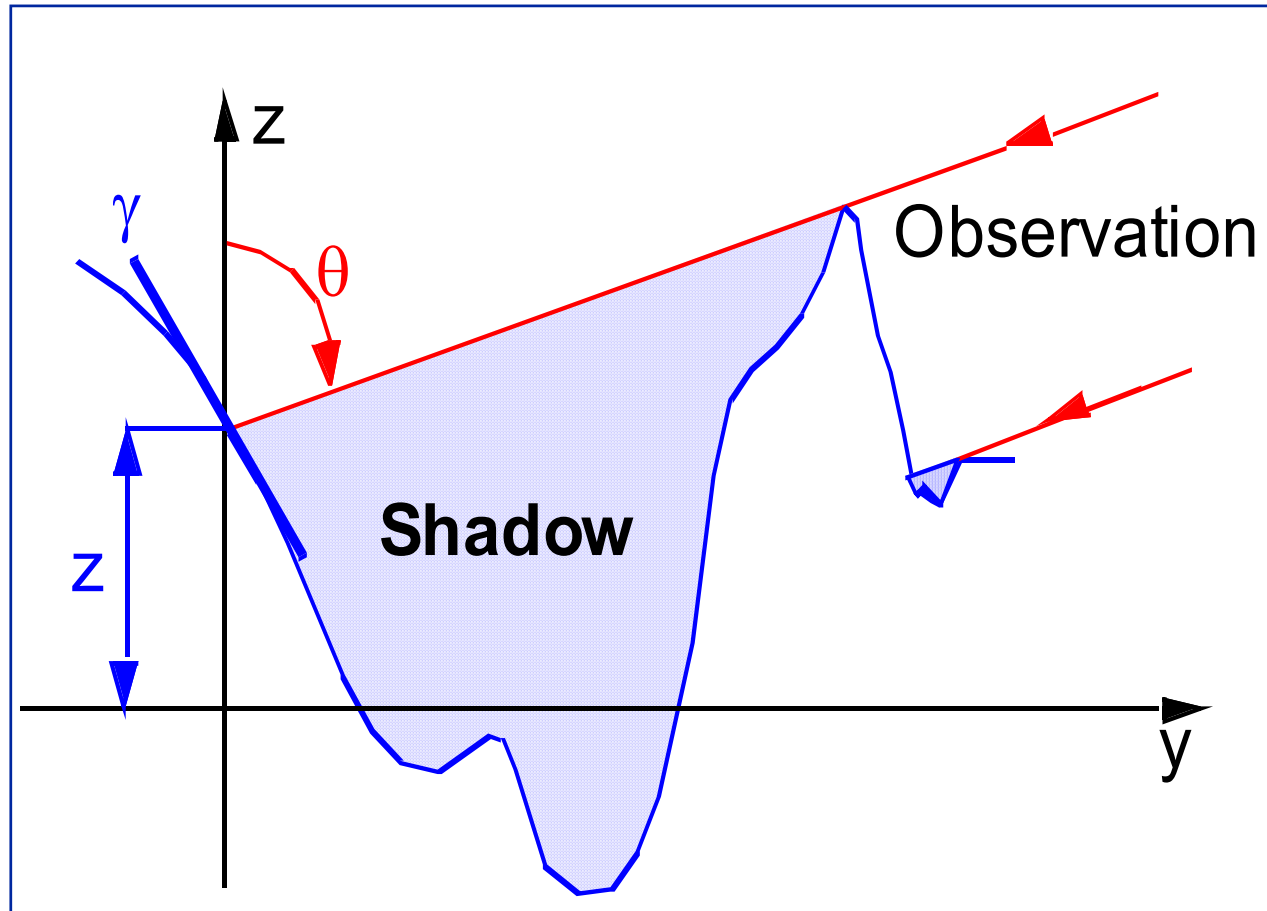


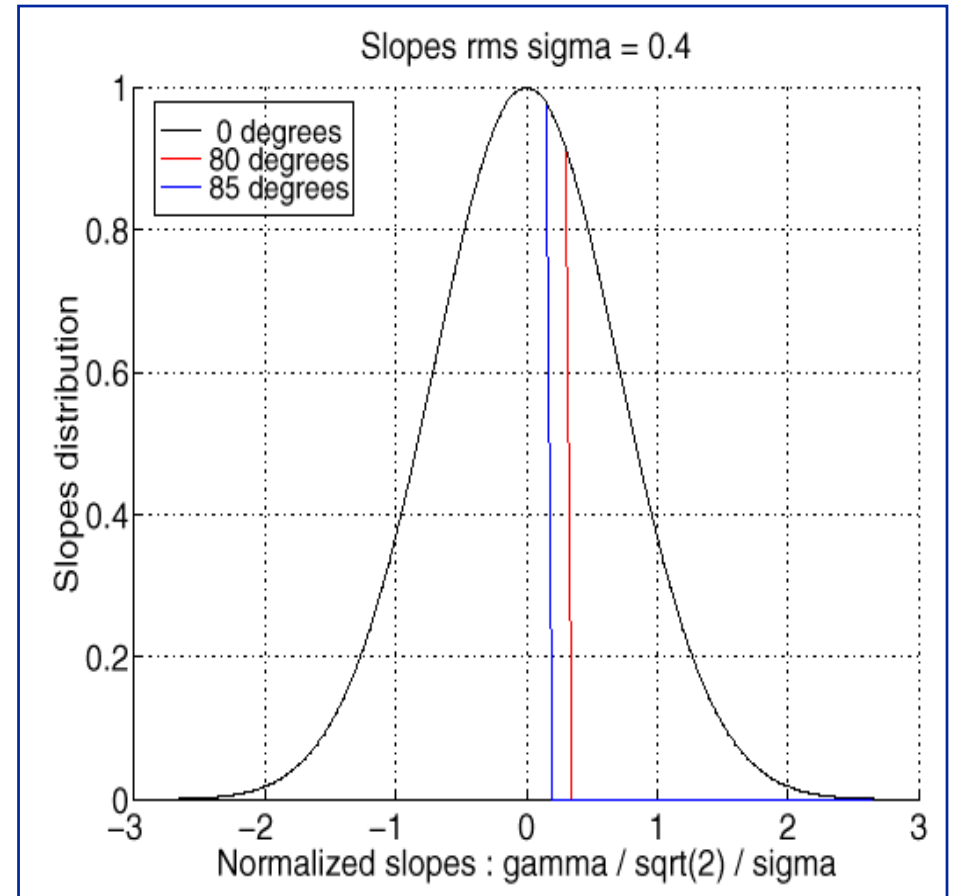
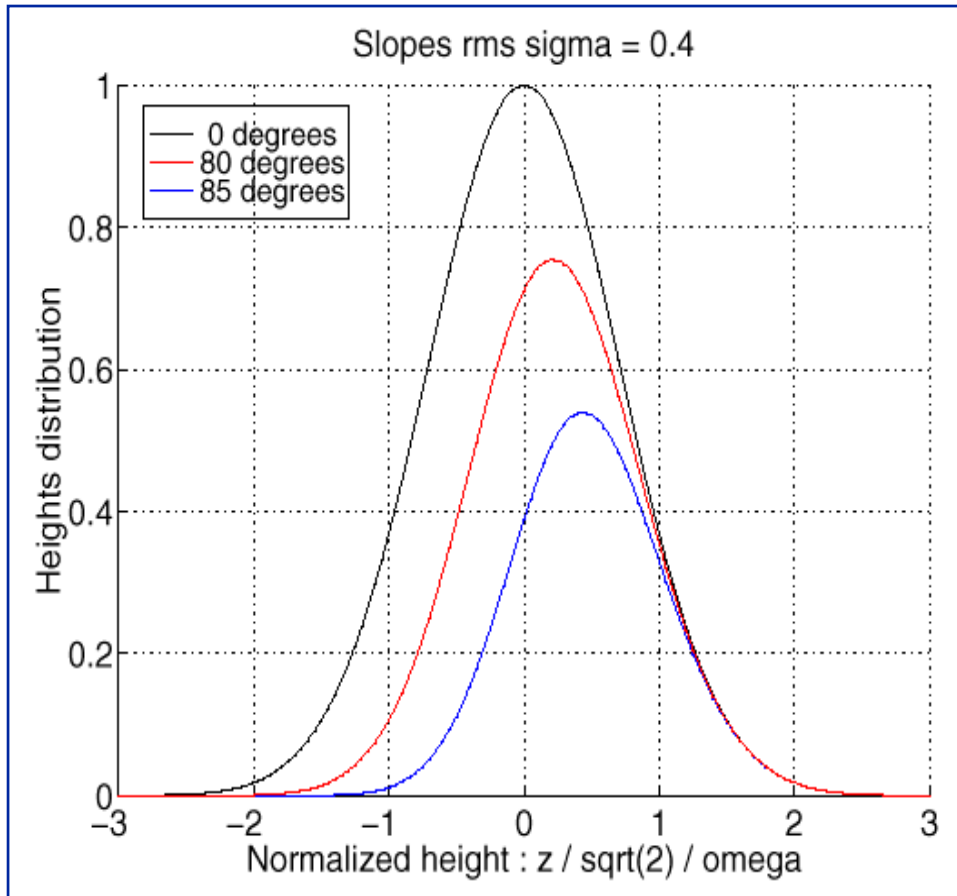
Slopes in y direction

Cross wind



# > Les fonctions d'ombre





## **Two Scale Method (TSM)**

- **Intérêt de mixer le calcul par SPM et KA. Le premier exprime bien la composante diffuse et l'autre la composante cohérente**
- **Toutes les approches qui mixent ces deux calculs peuvent être appelées TSM**
- **Différentes TSM impliquent des propriétés et des précisions différentes**

## **TSM1: méthode UCL**

- **On sépare par filtrage 2 échelles pour la surface rugueuse**
- **On calcul la SER par l'approximation de Kirchhoff pour les grandes variation**
- **On calcul la SER par l'approximation de petite perturbations d'ordre 1 pour les petites variations**
- **On somme les deux contributions**

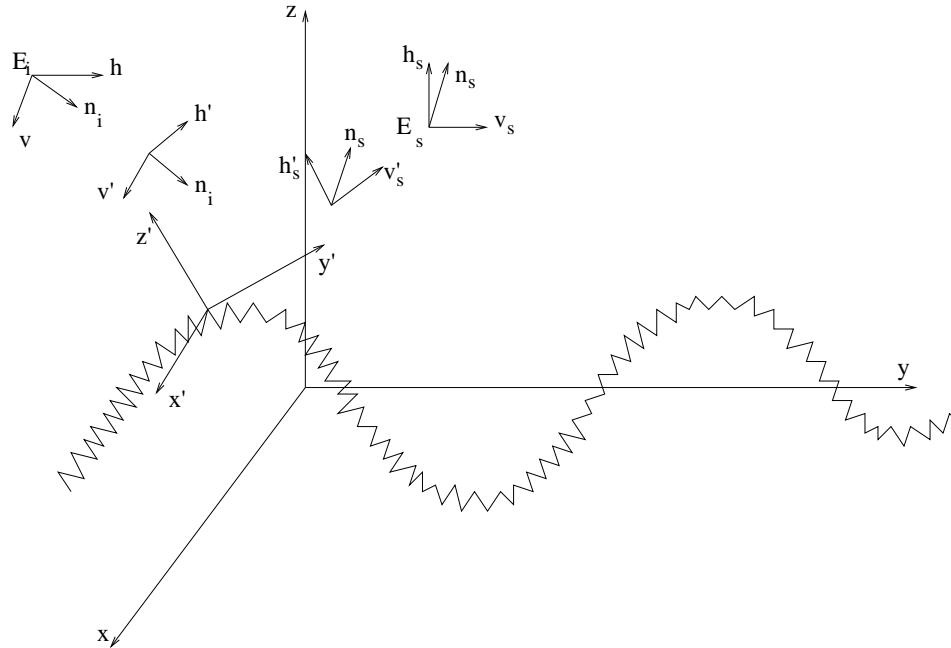
## > TSM2: méthode Jackson

$$\sigma(\theta) = f(y) \cdot \sigma_{SPM}(\theta) + [1 - f(y)] \cdot \sigma_{KA}(\theta)$$

$$y = \frac{(\tan^{-1} s - \theta_r)}{\Delta \theta}$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^x}$$

## > TSM3: méthode Fucks-Khenchaf



$$[S] = \begin{bmatrix} v'_s \cdot v_s & h'_s \cdot v_s \\ v'_s \cdot h_s & h'_s \cdot h_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{v'_s v} & S_{v'_s h} \\ S_{h'_s v} & S_{h'_s h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v' \cdot v & h' \cdot v \\ v' \cdot h & h' \cdot h \end{bmatrix}$$

## > TSM3: méthode Fucks-Khenchaf

### ✓ Local reference

$$E^i = E_{v',v'}^i + E_{h',h'}^i = [(a \cdot v')v' + (a \cdot h')h']E_0$$

$$\begin{bmatrix} E_{v'}^s \\ E_{h'}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{v'v'} & S_{v'h'} \\ S_{h'v'} & S_{h'h'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{v'}^i \\ E_{h'}^i \end{bmatrix}$$

### ✓ Scattered field

$$E^s = \begin{bmatrix} E_v^s \\ E_h^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_s \cdot v'_s & v_s \cdot h'_s \\ h_s \cdot v'_s & h_s \cdot h'_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{v'}^s \\ E_{h'}^s \end{bmatrix}$$

$$[S] = \begin{bmatrix} v'_s \cdot v_s & h'_s \cdot v_s \\ v'_s \cdot h_s & h'_s \cdot h_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{v'v'} & S_{v'h'} \\ S_{h'v'} & S_{h'h'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v' \cdot v & h' \cdot v \\ v' \cdot h & h' \cdot h \end{bmatrix}$$

### ✓ Scattering coefficients

$$\begin{aligned} \sigma_{pq}^s = & \langle (p \cdot v'_s)^2 (q \cdot v')^2 \sigma_{v'_s v'} + (p \cdot v'_s)^2 (q \cdot h')^2 \sigma_{v'_s h'} + (p \cdot h'_s)^2 (q \cdot v')^2 \sigma_{h'_s v'} \\ & + (p \cdot h'_s)^2 (q \cdot h')^2 \sigma_{h'_s h'} + (p \cdot h'_s)^2 (q \cdot v')(q \cdot h') \sigma_{h'_s h' v'_s}^1 \\ & + (p \cdot v'_s)(p \cdot h'_s)(q \cdot h')^2 \sigma_{h'_s h' v'_s}^1 + (p \cdot v'_s)(p \cdot h'_s)(q \cdot h')(q \cdot v') \sigma_{h'_s v'_s h'}^1 \\ & + (p \cdot v'_s)(p \cdot h'_s)(q \cdot v')^2 \sigma_{h'_s v'_s v'}^1 + (p \cdot h'_s)^2 (q \cdot v')(q \cdot h') \sigma_{v'_s v'_s h'}^1 \rangle \end{aligned}$$

where

$\theta'$  is a local incidence angle,

$\theta_s$  is a local scattering angle

## **TSM3: méthode Fucks-Khenchaf**

- **Modèle beaucoup plus réaliste que les deux TSM précédentes**
- **TSM3 beaucoup moins sensible aux phénomènes d'ombrage**
- **TSM3 intéressante pour des angles très rasants**
- **TSM3 complètement développée en bistatique et avec les termes de polarisation croisée**

## > Small Slope Approximation (SSA)

$$S_{pp'}(\kappa, \kappa_0) = \int \int \exp(j(\kappa - \kappa_0) \cdot \mathbf{x}' + j(q + q_0)\zeta(\mathbf{x}')) \frac{k \widehat{\mathbf{e}}_p(\kappa) \cdot \mathbf{j}_{p'}(\mathbf{x}')}{(2\pi)^2} \exp(-j\xi \cdot \mathbf{x}') \phi_{pp'}(\kappa, \kappa_0, \xi, \{\zeta\}) d\xi \frac{d\mathbf{x}'}{(2\pi)^2}$$

where  $\phi$  is some functional of elevation  $\zeta$  which can be expanded as

$$\phi(\xi) = \delta(\xi) \tilde{\phi}_0 + \int \delta(\xi - \xi_1) \xi_1 \widehat{\zeta}(\xi_1) \tilde{\phi}_1 d\xi_1 + \int \delta(\xi - \xi_1 - \xi_2) \xi_1 \xi_2 \widehat{\zeta}(\xi_1) \widehat{\zeta}(\xi_2) \tilde{\phi}_2 d\xi_1 d\xi_2 + \dots$$

where  $\tilde{\phi}_n$  are regular functions of  $\kappa, \kappa_0, \xi_1 \dots \xi_n$ .  $\tilde{\phi}_n$  can be determined using a transition to the small perturbation theory. At first order,

$$[S^{(1)}](\kappa, \kappa_0) = \frac{2qq_0}{q + q_0} [B^{(1)}](\kappa, \kappa_0) \mathcal{I}(\kappa, \kappa_0)$$

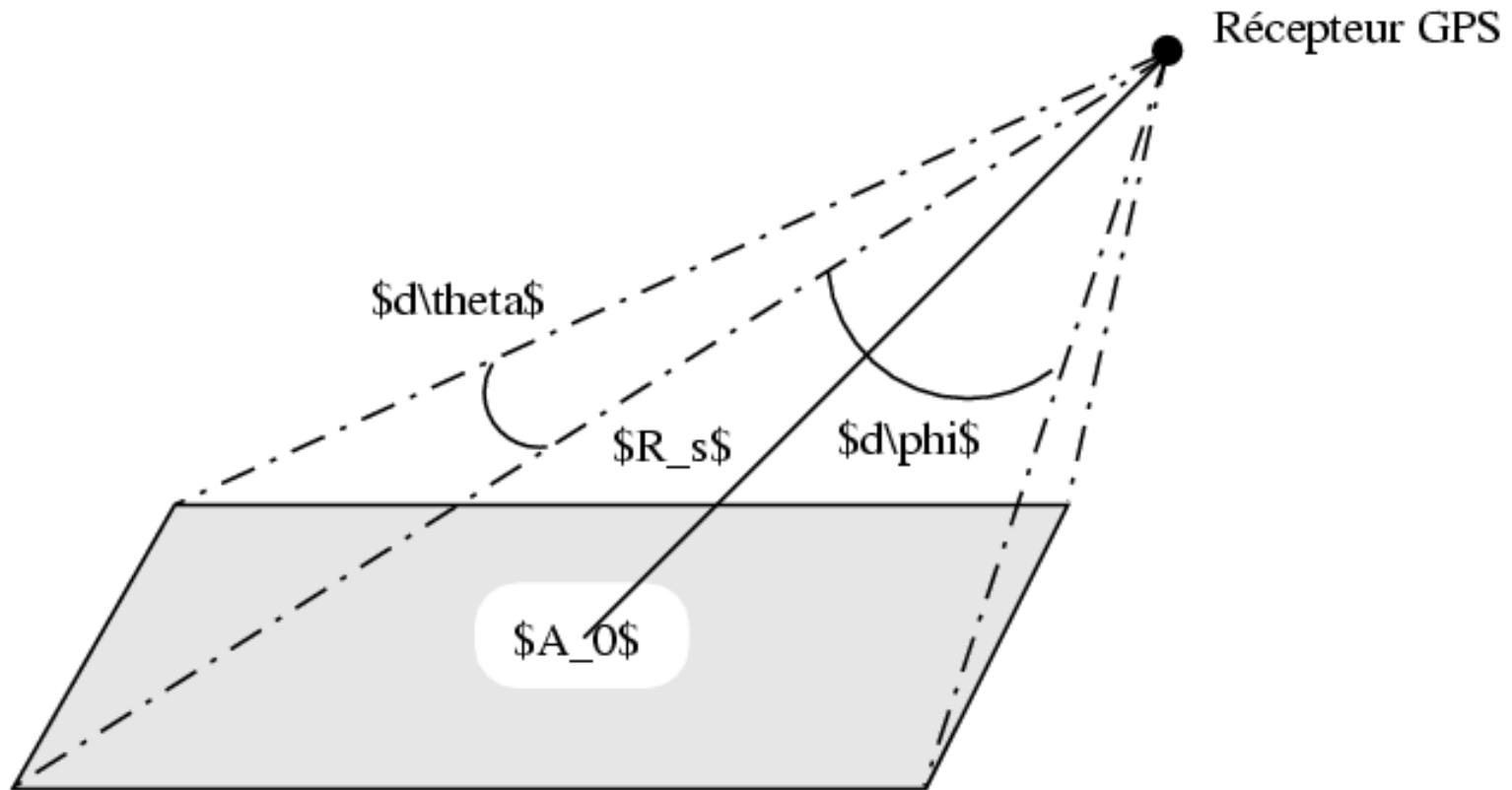
where the matrix  $[B^{(1)}]$  is given by SPM at first order.

## **Small Slope Approximation (SSA)**

- **Plus de séparation arbitraire entre les petites et grandes échelles**
- **Prend en compte la composante cohérente et la composante diffuse**
- **Comme la SPM, elle peut être développée à l'ordre 1, et aux ordres supérieur**
- **Coût calculatoire**
- **Polarisation croisée**
- **Bistatique**



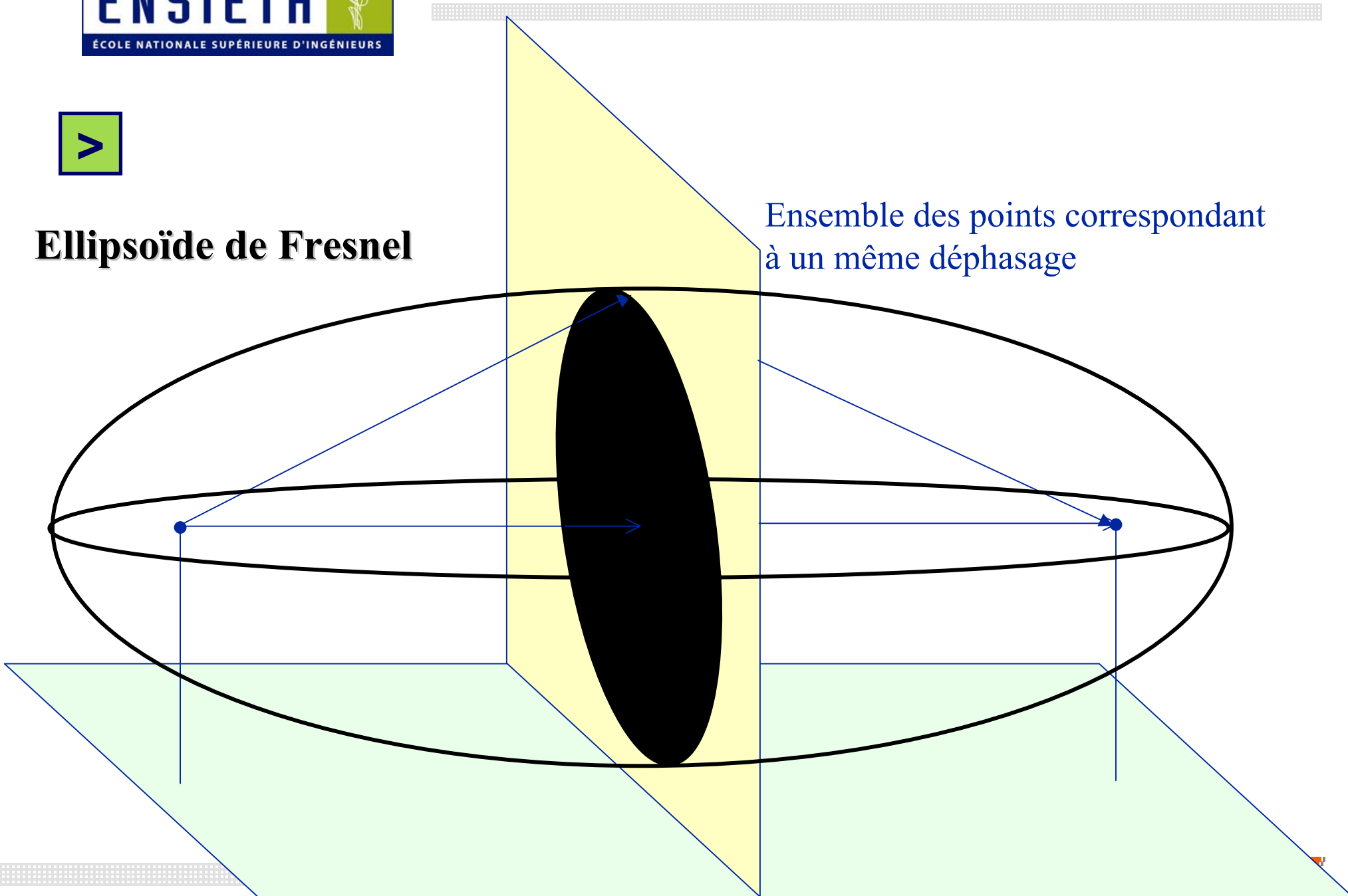
# Part II: Passage de la modélisation électromagnétique à la simulation d'un signal reçu

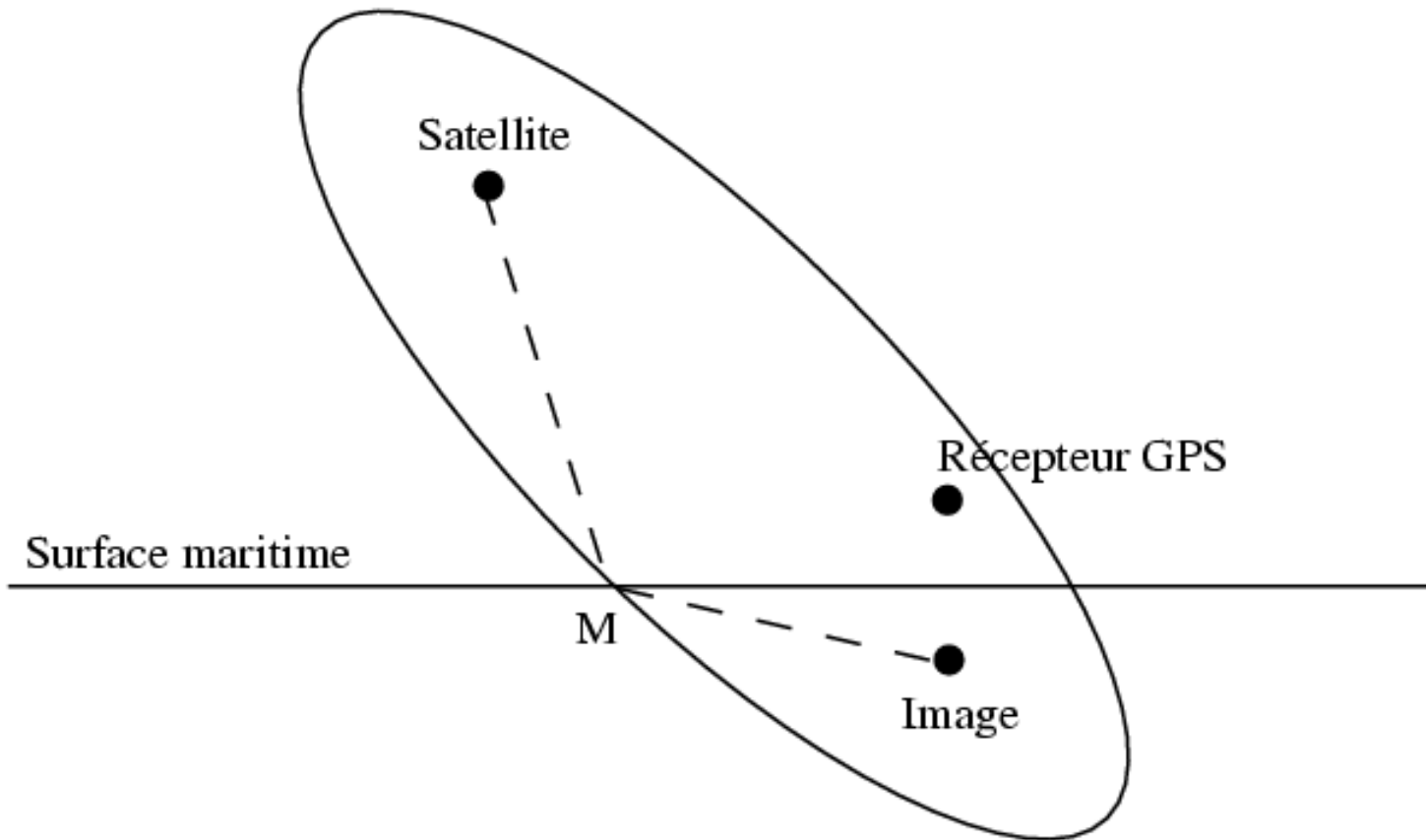


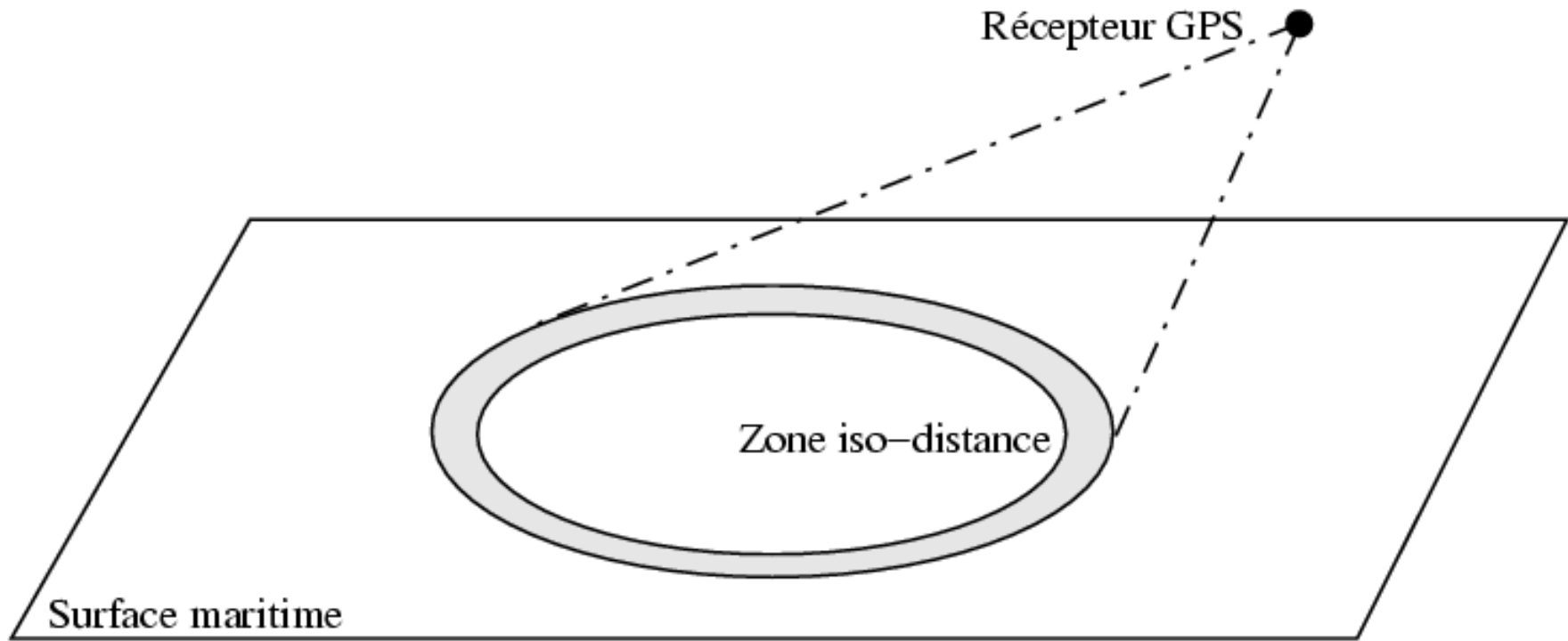


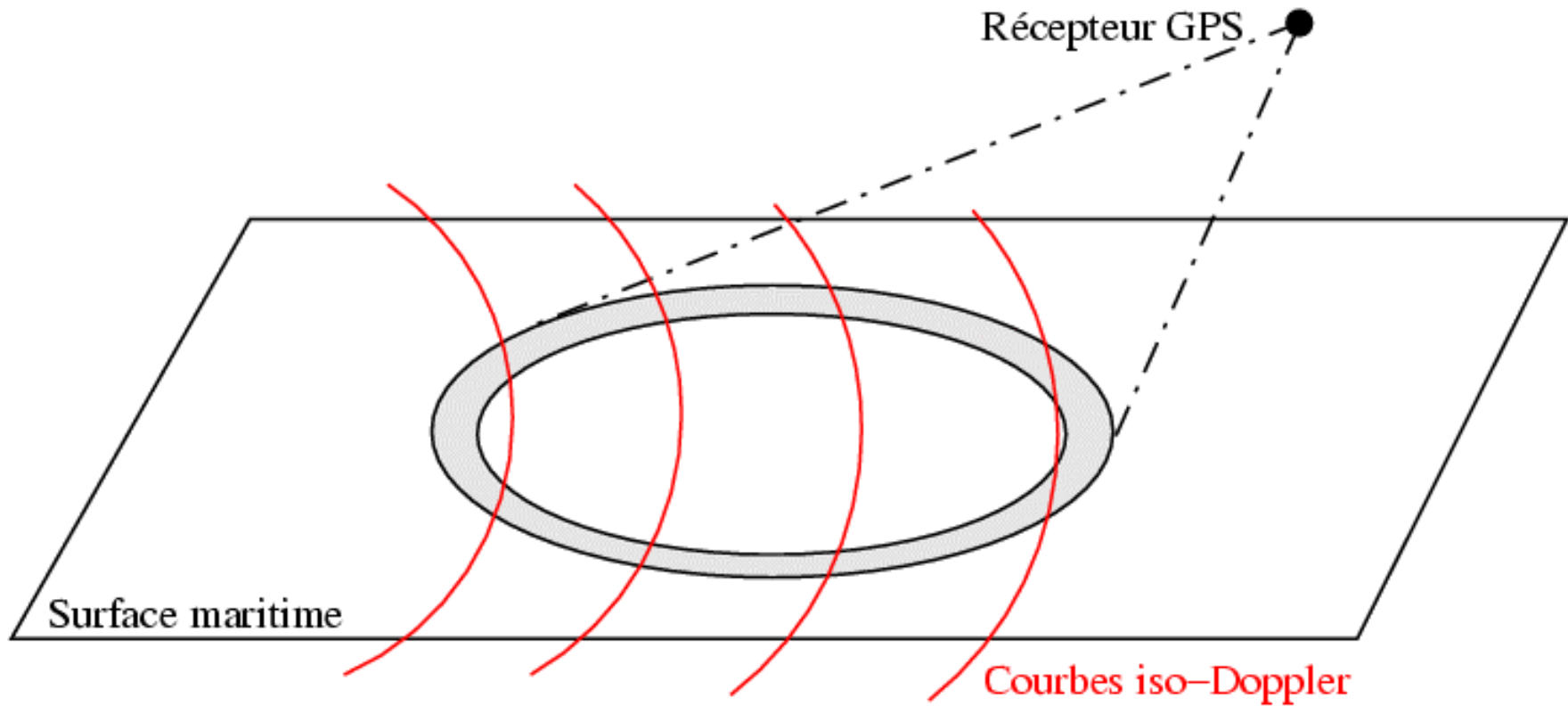
# Ellipsoïde de Fresnel

Ensemble des points correspondant à un même déphasage



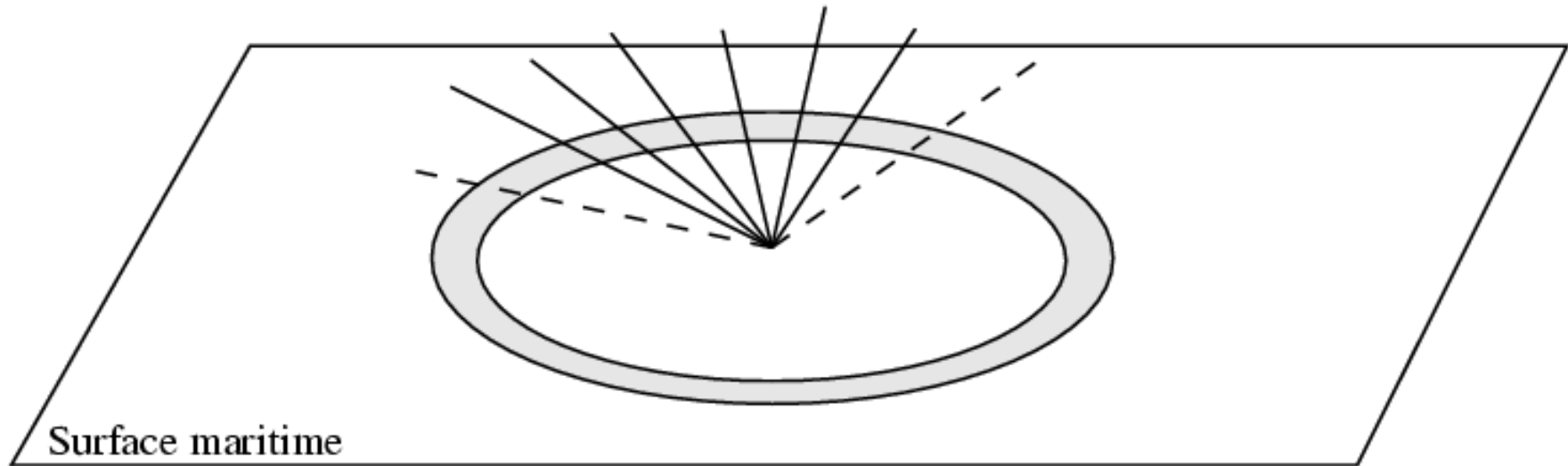








Récepteur GPS ●



## Paramètres de configuration

### Paramètres maritimes

Direction du vent par rapport au nord (en degré)

Etat de mer en fonction de l'échelle Beaufort

### Position du satellite

Élévation du satellite (en degré)

Azimut du satellite (en degré)

### Géométrie

Hauteur de réception (en mètre)

Suivant

## Calcul de la réponse temporelle du milieu maritime

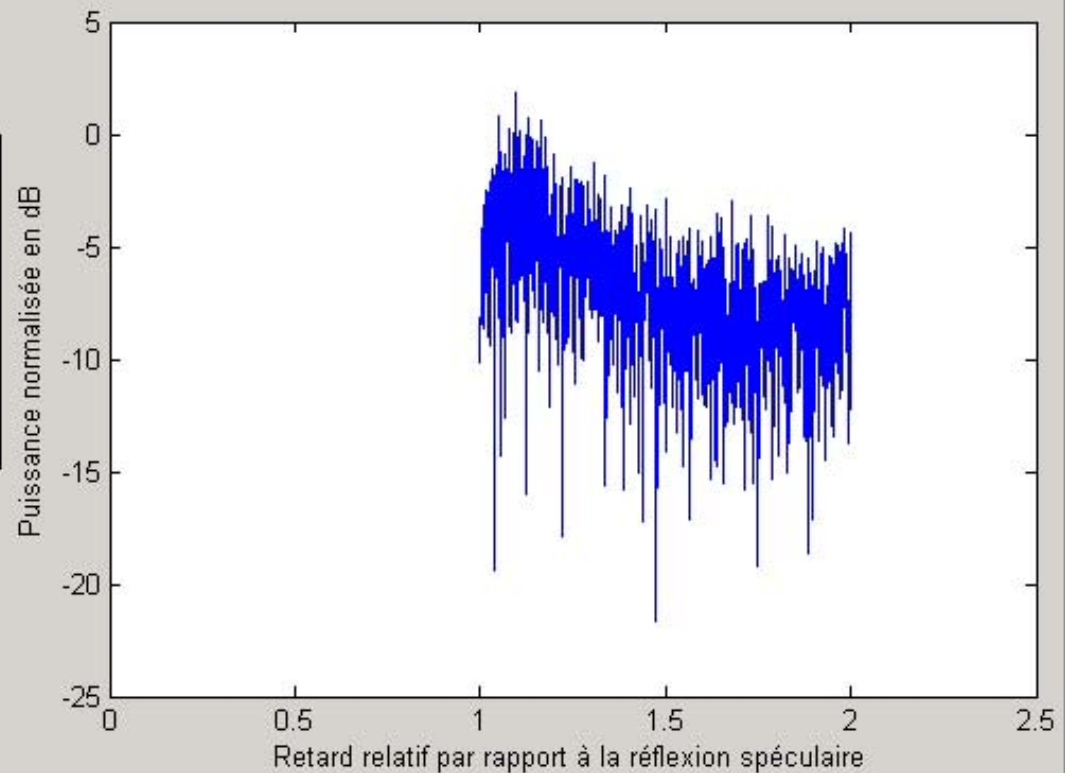
### Paramètres du signal

Durée de la fenetre de temporisation (en unité Delta\_T0)

Nombre de points à considérer

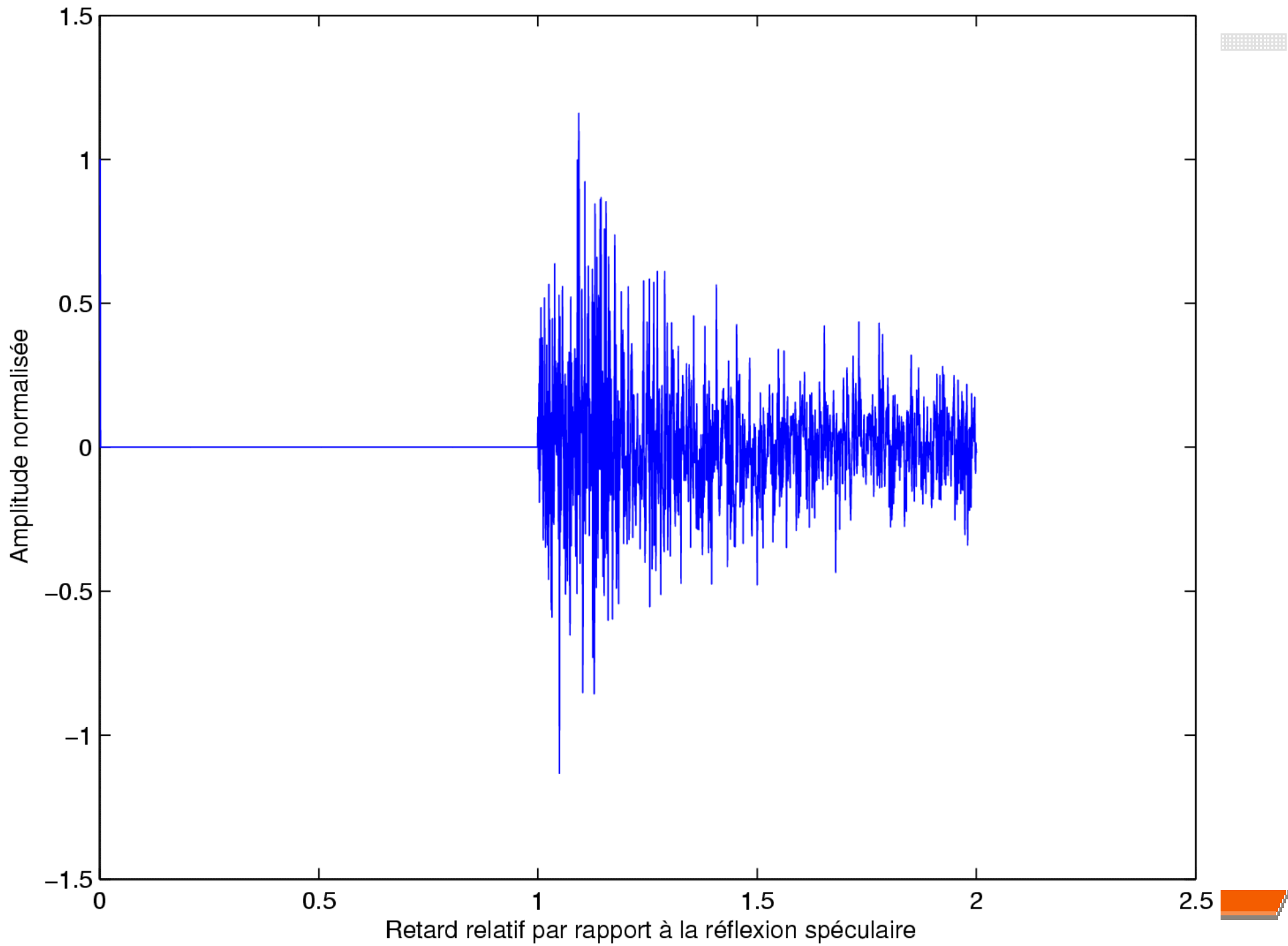
### Modélisation électromagnétique

- Approximation de Kirchhoff
- Méthode des petites perturbations
- Méthode combinée



**Générer la réponse temporelle**

Suivant



## > Faisceaux incidents

- **Décomposition d'un faisceau en ondes planes**

$$E^i(\vec{r}) = \iint f^i(\vec{k}_\rho) \cdot e^{i\vec{k}_\rho \cdot \vec{\rho} - i\gamma z} d\vec{k}_\rho$$

- **Problème de base de polarisation**
- **Décomposition en sous-faisceaux**



# Part III: Amélioration et approches émergentes

## > Déferlement

- **Modèle de Kudryavtsev (2003)**

$$P_{wb}(\zeta_x, \zeta_y) = \frac{1}{2\pi s_{wb}^2} e^{\left(-\frac{\zeta_x^2 + \zeta_y^2}{2s_{wb}^2}\right)}$$

- **Estimation du taux de couverture par des modèles empiriques**
- **Ecume active et passive**

## **Modèles de diffusion**

- **Approche de Meecham et Lysanov (Modèles de diffusion non local)**
- **Coordonnées non orthogonales**
- **Modélisation fractale**
- **Modèle dynamique (Toporkov)**