

CARACTERISATION D'UNE MER RECOUVERTE DE PETROLE PAR ONDES ELECTROMAGNETIQUES

SOMMAIRE

Prélude

I-Présentation de la surface de mer

1-Caractérisation statistique d'une surface de mer

2-Description statistique d'une surface de mer

a-Distribution des hauteurs de la surface

b-Fonction d'autocorrélation des hauteurs

3-Rugosité d'une surface de mer propre et de mer contaminée

II- Caractérisation électromagnétique par le coefficient de diffusion

III-Modèles

1-Modèle basse fréquence

2-Modèle haute fréquence

3-Modèle unifié

IV-Comparaison entre une mer propre et une mer contaminée

Prélude

Objectifs

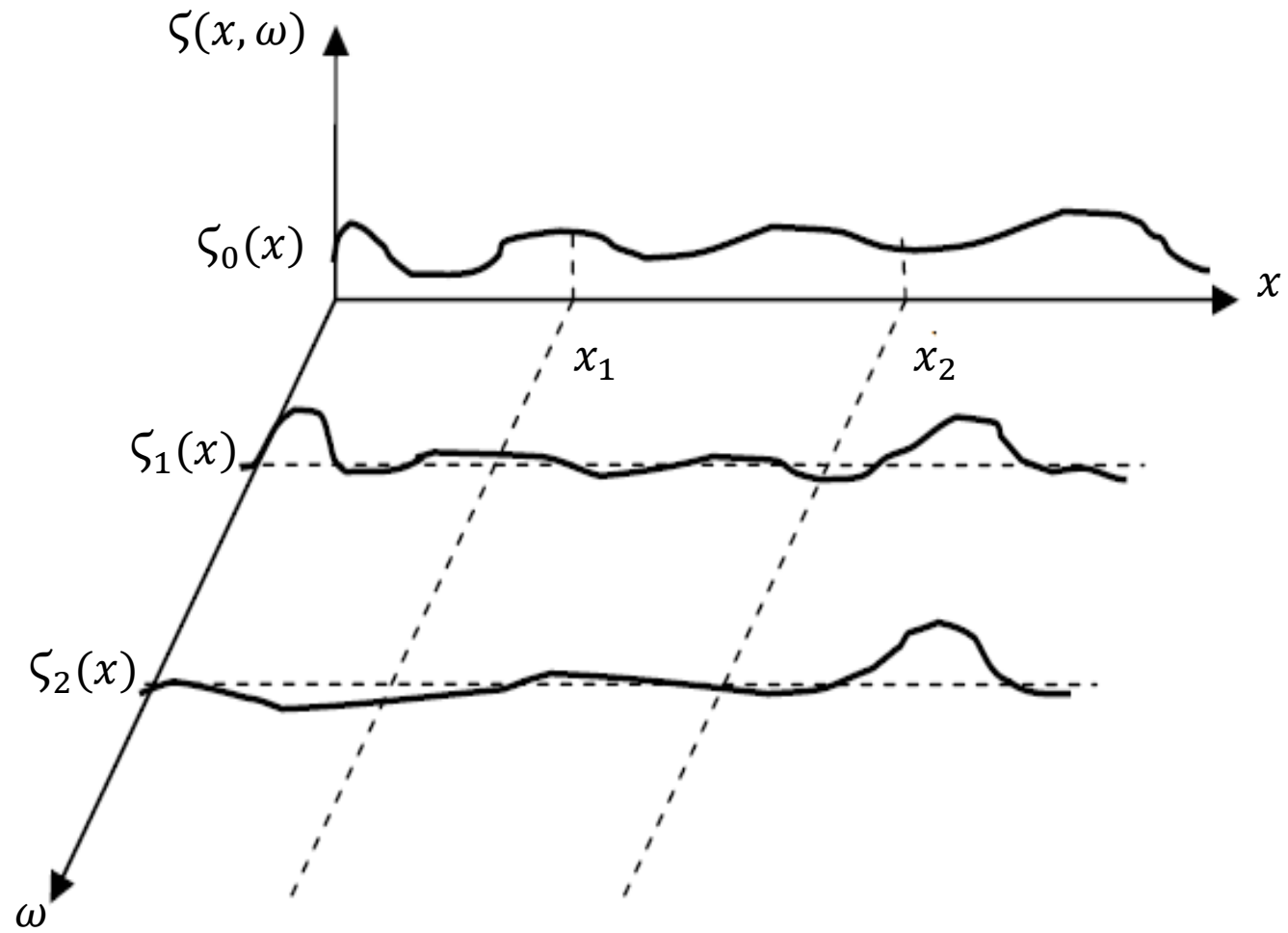
- L'enjeu majeur de notre travail est de faire la distinction entre une mer propre et une mer recouverte de pétrole sur base de données électromagnétiques.
- Déterminer le comportement électromagnétique du milieu en question
- Connaître les réponses électromagnétiques des milieux {mer + pétrole} et mer propre
- Il serait intéressant de pouvoir disposer d'un modèle rapide de simulation électromagnétique d'une nappe de pétrole sur la mer qui, comparé à des mesures en fonction des différents paramètres de terrain, permettrait de détecter une pollution de pétrole, et ceci en temps réel dans l'idéal
- Nous nous attaquerons à un problème bidimensionnel

I-Présentation d'une surface de mer

Toujours dans le cadre de notre approche asymptotique, nous nous attaquerons à un problème bidimensionnel afin de simplifier les notations et les desseins,

1-Caractérisation statistique d'une surface de mer

La surface de mer est une surface rugueuse aléatoire à variation spatio-temporelle donc stochastique. Cette interface rugueuse stochastique est décrite par ses hauteurs ζ . Cette variable aléatoire dépend de deux paramètres: le paramètre spatial, noté x et le paramètre temps, noté t . La variable aléatoire $\zeta(x, t)$ peut être représentée par une famille de fonctions réelles $\{\zeta(x, t, \omega)\}$ où ω représente une épreuve dans un espace de probabilité (Ω) . L'interface considérée sera supposée suivre un processus (stationnaire et) ergodique du second ordre. En fait, la notion d'ergodicité suffit puisque l'ergodicité entraîne la stationnarité. Finalement, la variable aléatoire considérée est $\zeta(x)$ qui constitue une réalisation de la surface.



La surface de mer suit un processus aléatoire

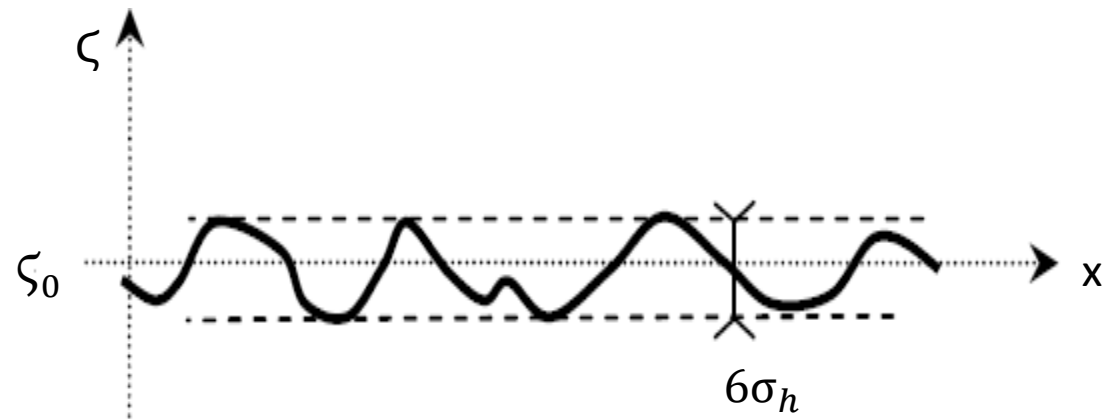
2-Description statistique d'une surface de mer

Généralement les statistiques jusqu'à l'ordre 2 suffisent à décrire la surface. Le processus peut être décrit uniquement par la densité de probabilité de ses hauteurs et la fonction d'autocorrélation spatiale de ses hauteurs (ou spectre).

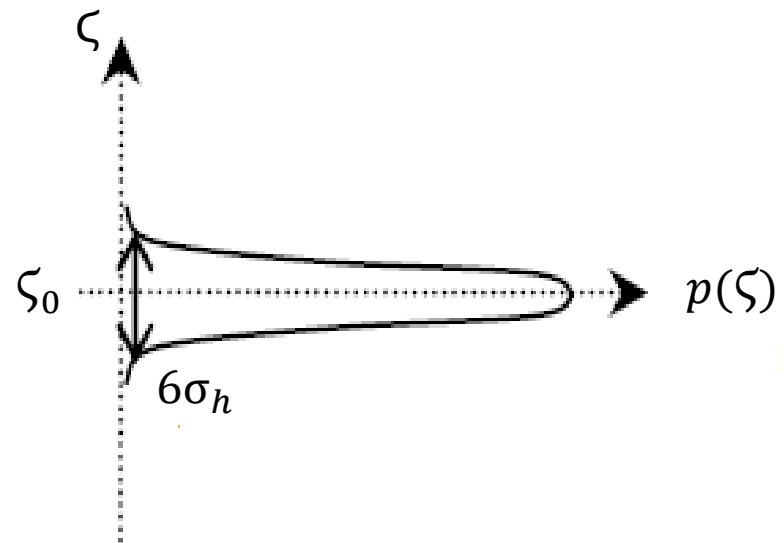
a-Distribution des hauteurs de la surface de mer

La densité de probabilité $p_h(\zeta)$ des hauteurs de la surface rugueuse représente la distribution statistique des hauteurs de la surface. Trois informations importantes sont contenues dans cette densité de probabilité:

- sa valeur moyenne : ici la hauteur moyenne de la surface, ζ_0 ,
- son écart type : ici l'écart type des hauteurs de la surface σ_h ,
- le type de cette densité: gaussienne



La surface de mer est de statistique gaussienne



La distribution des hauteurs de la surface de mer est gaussienne

2-Description statistique d'une surface de mer

La surface de mer est caractérisée par une densité de probabilité gaussienne:

$$p_h(\zeta) = \frac{1}{\sigma_h \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\zeta - \zeta_0}{\sigma_h}\right)^2\right]$$

La densité de probabilité vérifie

$$\langle 1 \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} p_h(\zeta) d\zeta = 1, \quad \text{et} \quad \langle \zeta \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \zeta p_h(\zeta) d\zeta = \zeta_0$$

La hauteur moyenne ζ_0 ou (moment statistique d'ordre un) sera prise nulle, pour plus de commodités. Par conséquent, la variance ou moment statistique d'ordre deux est $\langle \zeta^2 \rangle$ qui s'obtient à l'aide de la densité de probabilité en faisant:

$$\langle \zeta^2 \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \zeta^2 p(\zeta) d\zeta = \sigma_h^2$$

b-Fonction d'autocorrélation (spatiale) et spectre des hauteurs de la surface

La fonction d'autocorrélation (spatiale) entre deux points M_1 et M_2 la surface représente la corrélation statistique entre ces points, en fonction de leur distance horizontale $r_d = r_2 - r_1$. Deux informations importantes sont contenues dans cette fonction:

- sa longueur de corrélation selon \hat{x} et \hat{y} , $L_{c,x}$ et $L_{c,y}$
- le type de cette fonction: en l'occurrence une gaussienne

Elle est définie par:

$$W_h = \langle \zeta(r_1)\zeta(r_2) \rangle = \lim_{X,Y \rightarrow +\infty} \frac{1}{XY} \int_{-X/2}^{+X/2} \int_{-Y/2}^{+Y/2} \zeta(r_1)\zeta(r_2) dx dy$$

où (X,Y) sont les longueurs respectivement selon \hat{x} et \hat{y} de la surface. Pour une surface stationnaire, $W_h(r_1, r_2) \equiv W_h(r_d) = \langle \zeta(r_1)\zeta(r_1 + r_d) \rangle$, avec la propriété $W_h(r_d = 0) = \sigma_h^2$.

Le coefficient d'autocorrélation $C(r_d)$ est égal à la fonction d'autocorrélation normalisée, et s'écrit pour une surface stationnaire:

$$C_h(r_d) = \frac{\langle \zeta(r_1)\zeta(r_1 + r_d) \rangle}{\sigma_h^2}$$

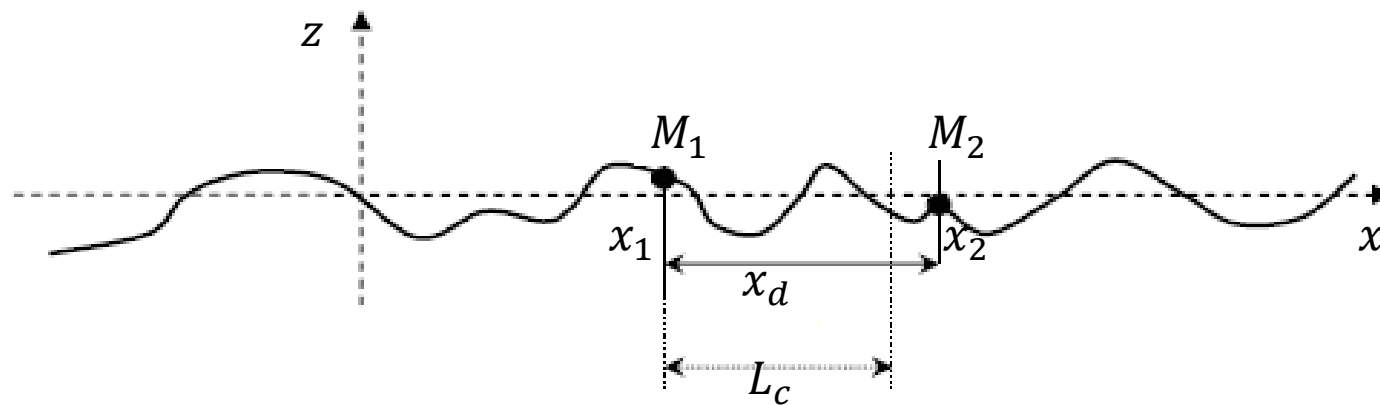
Cette dernière fonction est égale à 1 lorsque $x_d = 0$. La longueur de corrélation L_c est une valeur caractéristique de la fonction d'autocorrélation. C'est elle qui détermine l'échelle de rugosité de la surface. Classiquement, elle correspond à la distance x_d entre deux points de la surface pour lesquels le coefficient d'autocorrélation vaut $1/e$.

En général, au lieu de la fonction d'autocorrélation des hauteurs, on utilise le spectre des hauteurs de la surface, qui n'est autre que la transformée de Fourier spatiale de la fonction d'autocorrélation. La surface de mer étant gaussienne, sa fonction d'autocorrélation et le spectre de ses hauteurs sont donnés respectivement par:

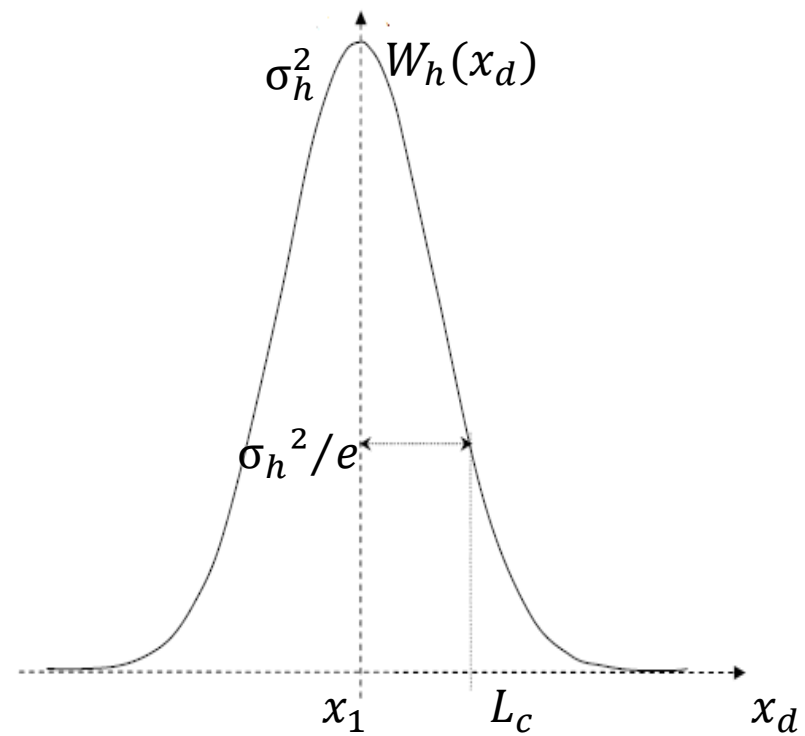
$$W_h(x_d) = \sigma_h^2 \exp\left(-\frac{x_d^2}{L_c^2}\right) \quad \text{et} \quad S_h(k) = \sqrt{\pi} \sigma_h^2 \exp\left(-\frac{L_c^2 k^2}{4}\right)$$

Un autre paramètre statistique important permet de caractériser la surface de mer. Il s'agit de l'écart type des pentes de la surface σ_s défini par:

$$\sigma_s = \sqrt{\langle \zeta'(x)^2 \rangle} = \sqrt{-W_h''(0)} = \sqrt{2} \frac{\sigma_h}{L_c}$$



Surface 1D



Fonction d'autocorrélation des hauteurs

3-Rugosité d'une surface de mer propre et de mer contaminée

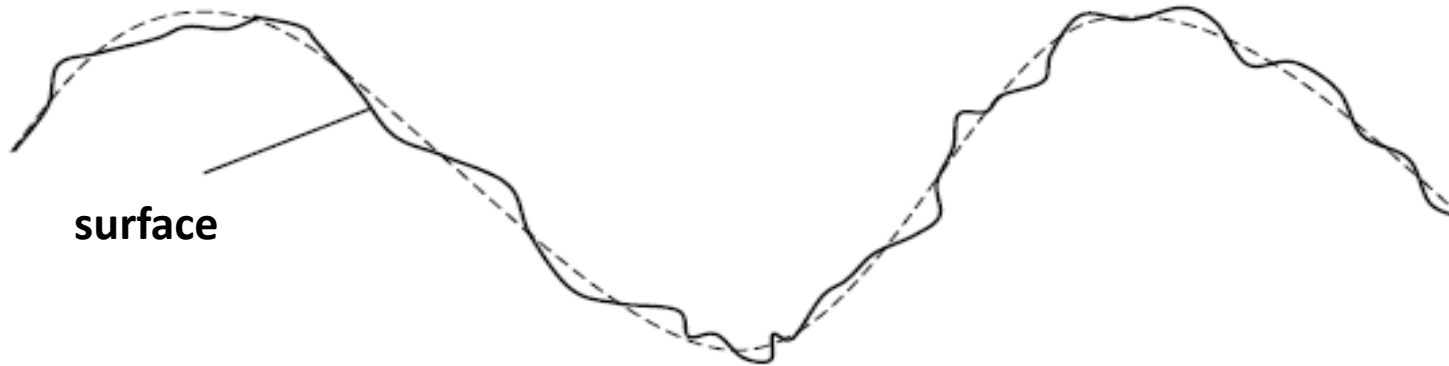
Il est important de noter que pour le cas d'une surface de mer, la description statistique est plus subtile. En effet, une surface de mer possède deux régimes principaux : les régimes de capillarité et de gravité. Le régime de capillarité correspond aux vagues de capillarité, appelées aussi vaguelettes. Elles sont créées par le vent sur une mer calme. Les vagues de capillarité caractérisent la rugosité à courte échelle de la surface de mer, avec pour longueur de corrélation L_{cs} . Le régime de gravité correspond aux vagues du même nom, appelées aussi vagues de houle. Les vagues de gravité caractérisent la rugosité à longue échelle de la surface de mer, avec pour longueur de corrélation L_{cl} . Les vagues de gravité ont un écart type des hauteurs et une longueur de corrélation grands devant ceux des vagues de capillarité. En règle générale, ces deux régimes coexistent pour une surface de mer. Il faut donc les traiter conjointement. Notons pour que le cas qui nous intéressera plus particulièrement par la suite d'une fine couche de pétrole sur la mer (de l'ordre de quelques mm), la surface inférieure est une surface de mer, donc à deux échelles. Or la surface supérieure est une surface de pétrole. Cette couche de pétrole va peser sur la surface de mer, de sorte que la capillarité de la surface de mer est atténuée (l'écart type des hauteurs et surtout des pentes du régime de capillarité diminue). Ainsi, comparativement à une surface de mer seule, une mer recouverte de pétrole voit son régime de capillarité lissé.

Régime de gravité: rugosité à longue échelle L_{cl}



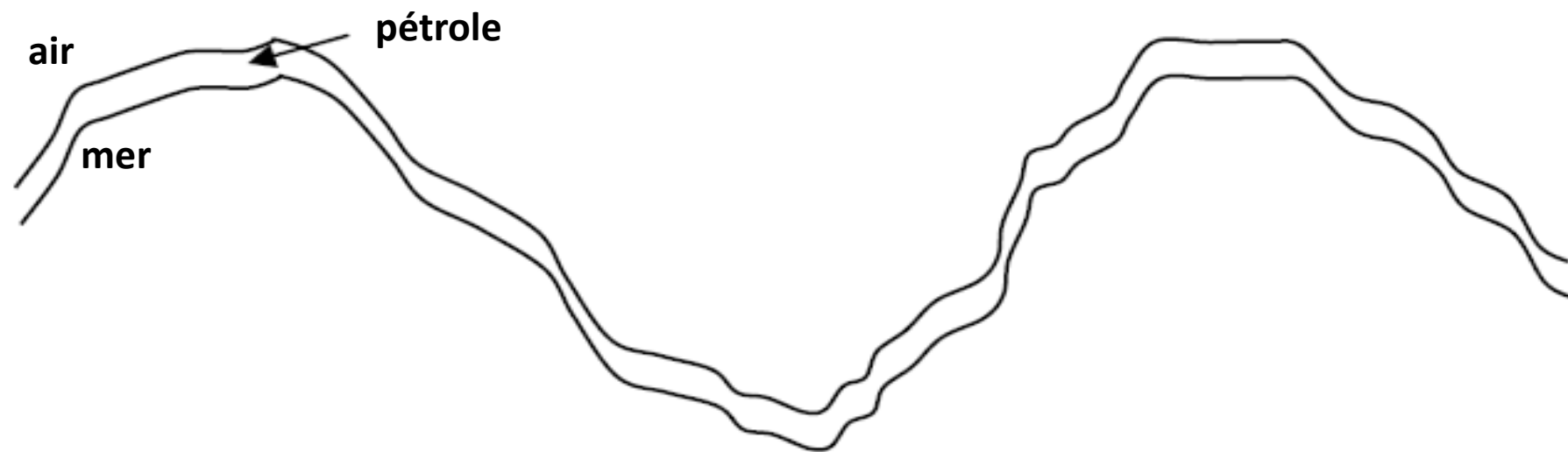
+

Régime de capillarité: rugosité à courte échelle L_{cs}



surface

Contribution des deux régimes d'une surface de mer



Couche de pétrole sur la mer: lissage du régime de capillarité

Critère de rugosité de Rayleigh

Une étude sur une surface rugueuse qui se respecte se doit de définir ce que c'est que la rugosité en elle-même.

La rugosité (d'un point de vue électromagnétique) d'une surface dépend des hauteurs de la surface, et elle est relative à la longueur d'onde incidente: ce n'est donc pas une caractéristique intrinsèque à la surface. En effet, la rugosité est quantifiée par le déphasage entre deux rayons incidents de même angle d'incidence θ_i sur la surface en deux points d'altitudes ζ_1 et ζ_2 . Le paramètre de Rayleigh est en général défini dans la direction spéculaire, cependant il est possible de définir un paramètre de Rayleigh général (pour le cas d'une surface de longueur a priori finie).

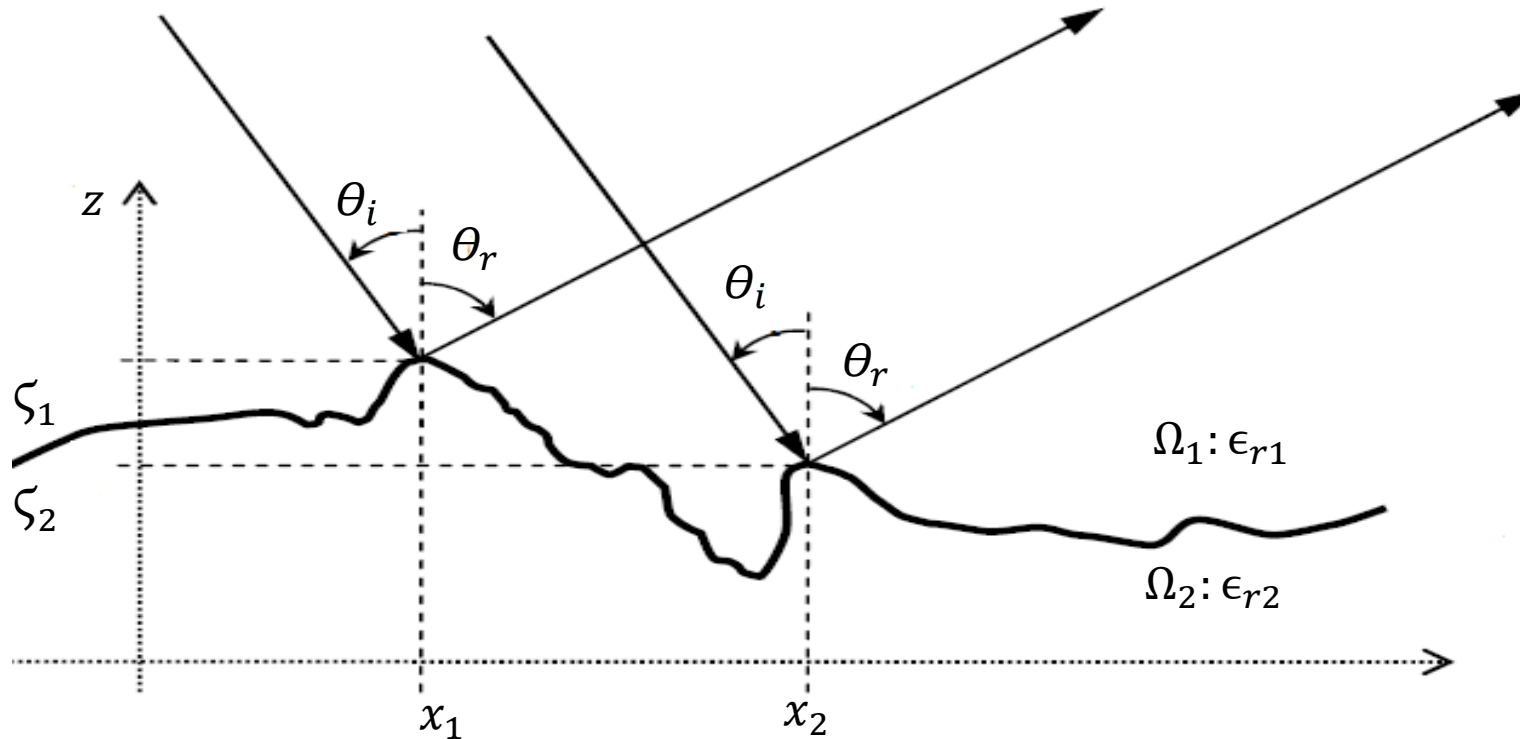
$$R_a^{gal} = k_1 \sigma_h \frac{|\cos\theta_i + \cos\theta_r|}{2}$$

avec:

- R_a^{gal} , le paramètre de Rayleigh en général
- k_1 , le nombre de l'onde incidente
- θ_i , l'angle d'incidence
- θ_r , l'angle d'observation

Le critère de Rayleigh est alors le suivant:

- Si $R_a < \frac{\pi}{4}$, la surface est dite peu rugueuse
- Si $R_a \ll \frac{\pi}{4}$, la surface est dite lisse
- Si $R_a > \frac{\pi}{4}$, la surface est dite rugueuse
- Si $R_a \gg \frac{\pi}{4}$, la surface est dite très rugueuse



II- Caractérisation électromagnétique par le coefficient de diffusion

Le coefficient de diffusion quantifie la puissance électromagnétique diffusée par l'interface rugueuse aléatoire. Ce coefficient permet de connaître la puissance électromagnétique diffusée car il lie la densité de puissance diffusée dans une direction donnée avec la puissance incidente. Il est défini dans la zone du champ lointain $R \rightarrow +\infty$. Il est donné en réflexion et transmission par:

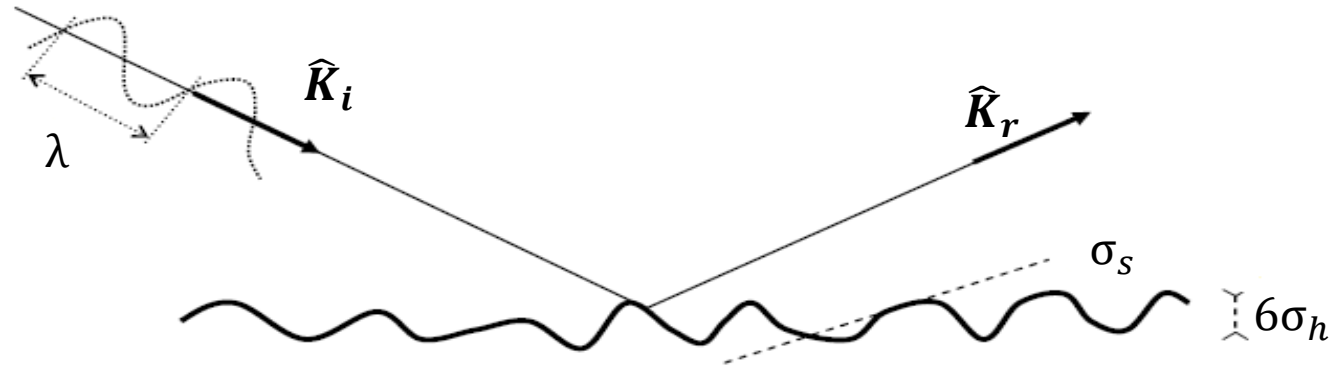
$$\sigma_r(\theta_r, \theta_i) = \lim_{R \rightarrow +\infty} \frac{R^2 ||\langle \Pi_i \rangle||}{P_i} = \lim_{R \rightarrow +\infty} \frac{R ||\langle \Pi_r \rangle||}{L_x \cos \theta_i ||\langle \Pi_i \rangle||}$$
$$\sigma_t(\theta_t, \theta_i) = \lim_{R \rightarrow +\infty} \frac{R^2 ||\langle \Pi_t \rangle||}{P_i} = \lim_{R \rightarrow +\infty} \frac{R ||\langle \Pi_t \rangle||}{L_x \cos \theta_t ||\langle \Pi_i \rangle||}$$

III-Modèles asymptotiques

L'optique géométrique fut la première méthode asymptotique mise au point pour décrire l'interaction d'une onde avec un objet. Cette méthode est applicable si les dimensions de l'objet sont très grandes devant la longueur d'onde électromagnétique, pour que la diffraction puisse être négligée (par diffraction on entend que le phénomène est observé de façon macroscopique) par cet objet.

1-Méthode basse fréquence

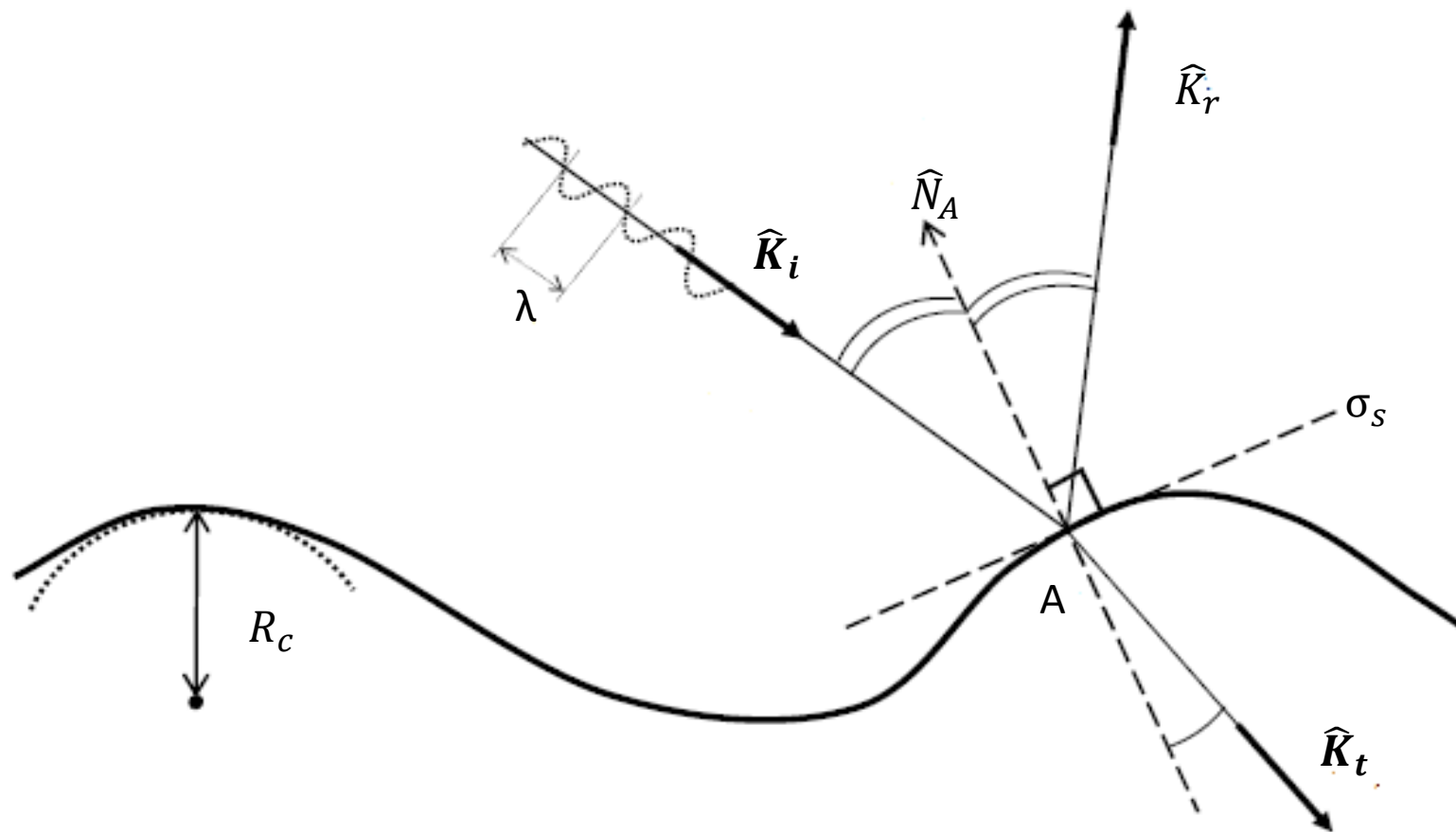
Historiquement, la première méthode développée est une méthode basse fréquence : la méthode des petites perturbations (SPM, Small Perturbation Method), appelée parfois aussi théorie de Bragg. La SPM peut être considérée comme un développement limité du champ diffusé en fonction des hauteurs de la surface.



2-Méthode haute fréquence

La méthode haute fréquence la plus utilisée et la plus connue est la méthode du plan tangent. Appelée plus classiquement approximation de Kirchhoff (AK) ou approximation de l'optique physique, elle suppose que la longueur d'onde est faible devant le rayon de courbure. Elle suppose que la longueur d'onde est faible devant le rayon de courbure R_c de la surface: ($R_c > \lambda$) la surface est localement lisse. Il faut également que la longueur d'onde soit inférieure à la longueur de corrélation de la surface, $L_c > \lambda$. Ainsi, localement et en chaque point de la surface, la surface peut être remplacée par un plan incliné, dont l'inclinaison est égale à la pente de la surface considérée. Alors chaque rayon de l'onde est réfléchi (ou transmis) spéculairement par le plan tangent en chaque point de la surface, et cette méthode ne dépend que du coefficient de réflexion (ou de transmission) de Fresnel pour l'angle local d'incidence considéré.

L'AOG est applicable si la longueur d'onde est très faible devant tout paramètre de la surface, Ainsi pour une surface plane, les paramètres sont L_x et L_y sa longueur et sa largeur. Pour une surface rugueuse, il faut de plus tenir compte de la variation des hauteurs σ_h .



Surface de type AK

3-Méthode unifiée

Les méthodes unifiées ont été créées afin de s'appliquer à la fois en basse et en haute fréquences, et ainsi posséder un domaine de validité indépendant de la longueur d'onde. Ceci implique des hypothèses simplificatrices. Ces méthodes permettent de relier les comportements des faibles pentes et du plan tangent. Elles permettent de traiter des surfaces à deux échelles de rugosité. De ce fait un modèle unifié peut s'appliquer à une surface de mer, décomposée en vagues de courte échelle (vagues de capillarité) et en vagues de longue échelle (vague de gravité). Dans ce modèle, la diffusion est décomposée en deux termes: le premier utilise l'AK réduite à l'AOG pour modéliser la contribution de la grande échelle, et le deuxième utilise la SPM pour modéliser la contribution de la petite échelle. Il faut dans ce cas choisir la longueur d'onde de coupure à partir de laquelle le spectre de la surface est modélisé par la petite échelle ou la grande échelle.

IV-Comparaison expérimentale entre une mer propre et une mer recouverte de pétrole

La cible se trouve dans la zone de Fraunhofer de la source émettrice. L'onde est donc localement plane

Le milieu incident (air) est parfaitement diélectrique et pourra être assimilé au vide

L'eau de mer est un milieu dispersif supposé LHI, stationnaire et non magnétique

-

Cahier des charges

Critères	Niveaux
Angle d'incidence	$\theta_i \leq 60^\circ$
Ecart type des hauteurs	$\sigma_h \geq \lambda/2$
Ecart type des pentes	$\sigma_s \leq 0,5$
Epaisseur de la couche	$\bar{H} \geq 5 \lambda$

Pour des épaisseurs de pétrole de l'ordre de $\bar{H} \in [2,6]$ cm, pour lesquelles les deux surfaces sont supposées décorréliées, ce modèle peut être utilisé pour des diffusiomètres dans la bande de fréquence Ka [26,5 ; 40] GHz. Pour une fréquence de 35 GHz, l'épaisseur moyenne de la couche de pétrole vaut $\bar{H} \in [2,33 ; 7]$ λ . De plus les permittivités relatives du pétrole et de la mer sont respectivement $\epsilon_{r2} \simeq 2 + 0,04i$ et $\epsilon_{r3} \simeq 16 + 25i$.

Les paramètres de simulations sont présentés pour $\theta_r = +\theta_i$ avec $\theta_i \in [0^\circ, 90^\circ]$. Une comparaison est faite entre une mer propre et une mer recouverte de pétrole qui n'ont pas les mêmes caractéristiques statistiques. Comme on l'a vu précédemment, une mer propre est composée de vagues de capillarité et de vagues de gravité. Pour des angles allant de 0° à environ $20^\circ - 30^\circ$, seules les vagues de gravité, correspondant aux fréquences basses du spectre de mer, contribuent au processus de diffusion modélisé par l'AOG. En revanche, au-delà de cet angle limite, les vagues de capillarité correspondant aux fréquences hautes du spectre de mer, contribuent au processus de diffusion. Pour des angles d'incidence supérieurs à 40° , seules les vagues de capillarité contribuent au processus de diffusion, modélisé alors par la méthode des petites perturbations (SPM). Pour une surface de mer contaminée, les vagues de capillarité sont fortement atténuées, ce qui signifie que la contribution des fréquences hautes décroît, impliquant que l'écart type des pentes décroît également. Ainsi, l'AOG peut être utilisé pour des angles d'incidence couvrant un intervalle plus grand couvrant $30^\circ - 40^\circ$.

Alors, pour un même état de mer, l'écart type des pentes σ_s d'une mer recouverte de pétrole est plus faible que celui d'une mer propre. En utilisant une statistique des pentes gaussiennes et en utilisant le modèle de Cox and Munk (modèle indépendant de l'épaisseur de la nappe de pétrole), l'écart type des pentes σ_s est lié à la vitesse du vent u_{12} à 12,5 m au-dessus de la surface de la mer dans la direction du vent par l'expression, respectivement pour une mer propre et une mer recouverte de pétrole:

$$\begin{aligned}\sigma_s^{sea} &= 0,0562\sqrt{u_{12}} \\ \sigma_s^{oil+sea} &= (0,78 \times 10^{-3}u_{12} + 0,005)^{1/2}\end{aligned}$$

Alors en prenant une vitesse du vent $u_{12} = 5 \text{ m/s}$, l'écart type des pentes $\sigma_s^{sea} \simeq 0,126$ pour une mer propre et $\sigma_s^{oil+sea} \simeq 0,094$ pour une mer recouverte de pétrole.

Les simulations de la figure présentent la comparaison entre une mer propre pour $\sigma_s^{sea} = 0,126$ et une mer de pétrole d'épaisseur moyenne $\bar{H} = 6 \lambda$ pour $\sigma_s^{oil+sea} = 0,094$ (correspondant à la même vitesse du vent $u_{12} = 5 \text{ m/s}$).

Soit C le contraste entre une mer propre et une mer de pétrole. Avec σ_{sea} le coefficient de diffusion de la mer propre et $\sigma_{oil+sea}$ le coefficient de diffusion de la mer de pétrole, le contraste est défini par $C = \sigma_{oil+sea} / \sigma_{sea}$. Alors pour un angle d'incidence $\theta_i = 0^\circ$, $C = -8,1 \text{ dB}$: le contraste est significatif et la détection de pétrole est aisée pour un capteur standard. Ce contraste diminue quand θ_i augmente jusqu'à 32° , où le contraste tend vers 1 (0 en dB) : la détection pour θ_i autour de 32° est alors très difficile. Pour des angles d'incidence supérieurs à 32° , ce contraste augmente: la détection de nappe de pétrole pourrait alors être possible. Cependant, les niveaux des coefficients de diffusion deviennent faibles (inférieurs à -50 dB), et seuls des capteurs de bonne sensibilité peuvent détecter de tels niveaux.

