

# MARINE OIL-SPILLS ELECTROMAGNETIC SCATTERING MODEL USING TWO-SCALE MODEL

Mohamed Yassine AYARI, Ali KHENCHAF and Arnaud COATANHAY

Laboratoire E3I2-EA 3876(Extraction et Exploitation de l'Information en Environnements Incertains) Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs des Etudes et Techniques d'Armement (ENSIETA) 2, rue François Verny 29806, Brest Cedex 9, France

Emails: {yassinmo, Ali.Khenchaf, Arnaud.Coatanhay}@ensieta.fr

## SHORT ABSTRACT

Oil-spills may adopt different aspects depending on its physical and chemical characteristics and wind speed. In deed, oil form a layer up the sea surface when wind speed is relatively low then the sea spectrum will be attenuated (damping effect). For a higher wind speed, the oil will be transformed in continuous emulsion with seawater. In this case, the main change from the behaviour of the sea without pollutant is the alteration of permittivity.

In this paper we will focus on the emulsion aspect of the oil slick based on permittivity mixture (oil et water) measurements. Then we present its influence on the electromagnetic scattering using the two-scale model

**Keywords:** Bistatic geometrical configuration, oil-spills, sea surface, permittivity, two-scale model, bistatic scattering

## 1 INTRODUCTION

Les activités humaines sont génératrices de pollution des eaux maritimes du fait de déversements divers et notamment d'hydrocarbures à la suite de rejets, de pertes de cargaison et d'accidents. Cette pollution affecte la surface maritime en modifiant ses caractéristiques physiques et géométriques. Dans les cas où la vitesse du vent dépasse les 15 nœuds et pour un polluant de viscosité et densité proche de celles de l'eau, le mélange se présente sous la forme d'une émulsion continue [1]. Dans cette situation, la permittivité de la surface sera déterminée en fonction du pourcentage de l'hydrocarbure dans l'eau. Dans cet article nous allons mettre en évidence l'effet du polluant sur la permittivité de la surface. La deuxième partie traitera de la diffusion de l'onde électromagnétique par ces surfaces polluées. Les simulations et les analyses seront présentées à la fin de cet article

## 2 PERMITTIVITE ELECTRIQUE

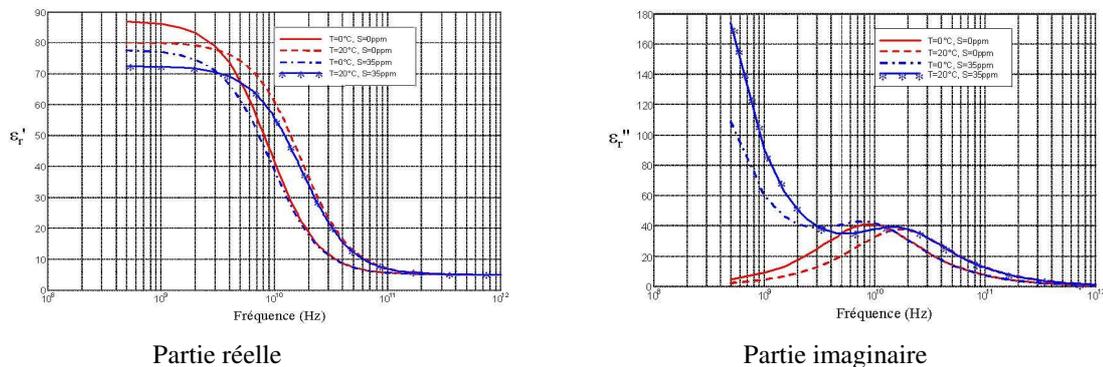
### 2.1 Eau de mer

La surface de la mer considérée comme une surface diélectrique agit sur l'onde électromagnétique par le biais de sa permittivité électrique relative  $\epsilon_r$  [8]

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (1)$$

Plusieurs modèles décrivant cette permittivité en fonction la fréquence électromagnétique et de la salinité et la température de l'eau de mer ont été développé dans la littérature [2-5].

**Fig. 1** souligne la variation de la partie réelle  $\epsilon'_r$  et la partie imaginaire  $\epsilon''_r$  de la constante diélectrique de l'eau de mer décrite par Debye [5] en fonction de la fréquence, pour différentes valeurs de température et de salinité.



**Fig. 1** comportement de la permittivité de l'eau de mer suivant la fréquence

La partie réelle de la constante diélectrique présente trois domaines différents en fonction de la fréquence.

- Une partie sensiblement constante correspond à la zone des basses fréquences. Dans cette partie  $\epsilon_r$  est sensiblement égale à la permittivité statique  $\epsilon_s$ .
- Une zone de transition brusque correspondant à la fréquence de coupure de la partie réelle de la constante diélectrique.
- Enfin une zone pouvant être qualifiée de haute fréquence, insensible à la température et la salinité, elle correspond à la valeur limite de la constante diélectrique.

La partie imaginaire de la constante diélectrique présente trois domaines différents en fonction de la fréquence ainsi que la salinité de l'eau:

- Pour une eau pure,  $\epsilon''_r$  présente une diminution rapide pour des fréquences faibles. Dans ce cas, une augmentation de la température provoque une translation des courbes vers les valeurs plus élevées. Le phénomène est inversé pour l'eau salée qui affiche une croissance plus rapide dans la direction des basses fréquences.
- La zone de transition est stable pour l'eau salée alors qu'elle présente un maximum relatif pour l'eau pure.
- Dans la partie des hautes fréquences, on note une diminution de la partie imaginaire avec un comportement vis-à-vis de la température identique à la première partie.

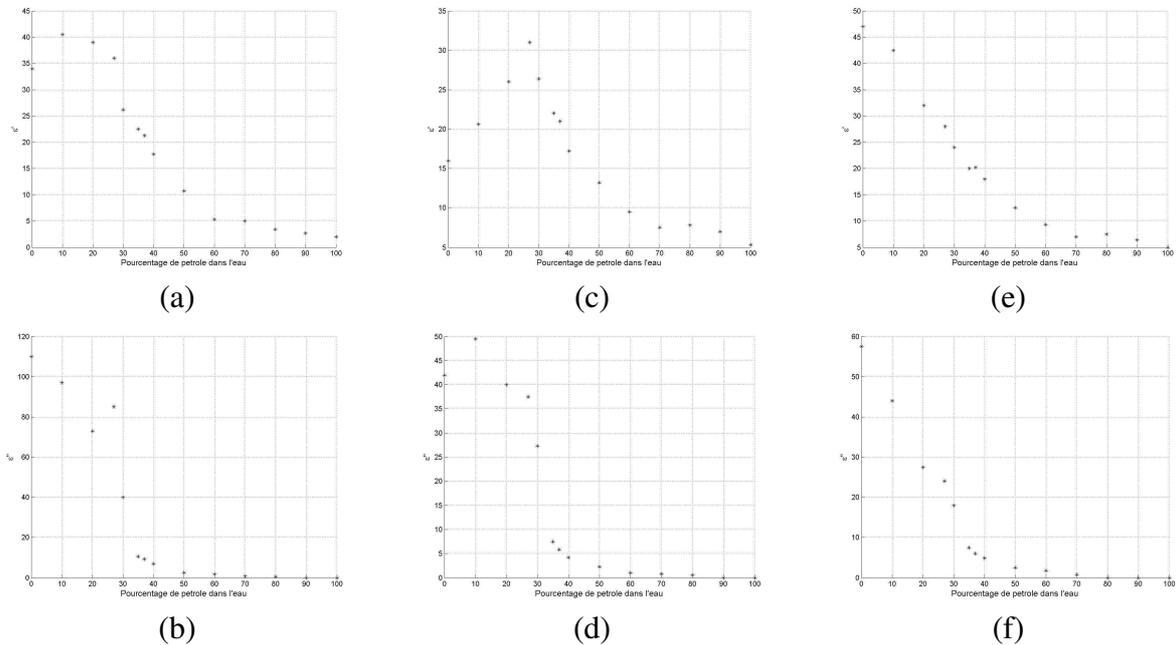
Dans le paragraphe suivant nous allons étudier le comportement de la permittivité électrique via la présence d'un polluant en émulsion.

## 2.2 Mélange eau polluant

Nous ne discuterons pas ici des théories mais nous présentons un ensemble de résultats de mesures de permittivité réalisés par Lamkaouchi [1]. Celles-ci ont été obtenues dans le domaine hyperfréquence sur des mélanges d'eau salée et de pétrole maintenus artificiellement en émulsion par agitation permanente. Les mesures ont été réalisées pour quatre fréquences différentes (3.6, 9.45, 15 et 35 GHz). La température de l'eau est maintenue à 25°C et la salinité est fixée à 100gr/L. Le **Fig. 2** illustre la variation de  $\epsilon'_r$  et  $\epsilon''_r$  en fonction du pourcentage du pétrole dans l'eau.

Un phénomène inattendu est observé à travers ces résultats pour un pourcentage de pétrole compris entre 40% et 25% : la région présente des changements dans le comportement

diélectrique du mélange. En effet, si on mélange un volume  $V_e$  d'eau avec un volume  $V_p$ , au moment du brassage, il y a bien dispersion du pétrole dans l'eau mais il s'ajoute un certain volume d'air  $V_a$ . Ce phénomène est appelé la percolation. On montrera l'effet de ce phénomène sur les coefficients de diffusion électromagnétique dans la partie simulation.

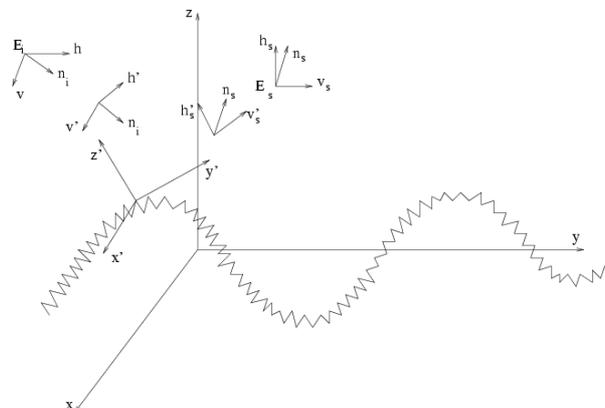


**Fig. 2** permittivité électrique pour mélange (eau et pétrole) en émulsion (a,b)  $f = 3.6\text{GHz}$  (c,d)  $f = 9.45\text{GHz}$  et (e,f)  $f = 11.48\text{GHz}$

Dans le paragraphe suivant nous présenterons le modèle deux échelles utilisé pour l'estimation des coefficients de diffusion électromagnétique de la surface du mélange dans le cas d'une configuration bistatique.

### 3 Calcul de la matrice de diffusion

Ils existent une variété de modèles capables d'estimer les coefficients de diffusion électromagnétique d'une surface rugueuse. Ils se distinguent par leur domaine de validité ainsi que leur degrés de complexité. Nous choisissons le modèle deux échelles qui affiche un large domaine de validité par rapport aux modèles classiques tel que le modèle des petites perturbations et l'approche de Kirchhoff [8-11].



**Fig. 3** configuration bistatique de la diffusion électromagnétique de la surface maritime

Dans ce modèle nous supposons que la surface rugueuse soit décomposée en deux échelles de rugosité (**Fig. 3**) La méthode deux échelles suppose alors que la surface rugueuse est une superposition de deux processus stochastiques indépendants, l'un caractérise la structure grande échelle et l'autre petite échelle. Le principe de ce modèle est de tirer profil des modèles classiques afin de couvrir un domaine de validité plus large. Dans ce cas les spectres définissant les deux structures grande et petite échelle notées respectivement par  $S_g$  et  $S_p$  sont reliés au spectre de surface par

$$\begin{aligned} S_g(K, \phi_k) &= \begin{cases} S(K, \phi_k) & \text{si } K < k_d \\ 0 & \text{si } K > k_d \end{cases} \\ S_p(K, \phi_k) &= \begin{cases} 0 & \text{si } K < k_d \\ S(K, \phi_k) & \text{si } K > k_d \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

où  $k_d$  est le nombre d'onde de coupure deux échelles il est estimé à  $k/3$  [12].

Au niveau des vagues de gravité ( $K < k_d$ ), l'onde électromagnétique diffusée sera estimée en utilisant l'approche de Kirchhoff. Pour les vagues capillaires, les coefficients de diffusion sont calculés dans le repère local en utilisant le modèle des petites perturbations. Ainsi la SER calculée sera adaptée au repère global en moyennant par la distribution des pontes des vagues à grande échelle.

$$[S] = \begin{bmatrix} v'_s \cdot v_s & h'_s \cdot v_s \\ v'_s \cdot h_s & h'_s \cdot h_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{v'_s \cdot v'} & S_{v'_s \cdot h'} \\ S_{h'_s \cdot v'} & S_{h'_s \cdot h'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v' \cdot v & v' \cdot h \\ h' \cdot v & h' \cdot h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{vv}^s & \sigma_{vh}^s \\ \sigma_{hv}^s & \sigma_{hh}^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

où

$$\begin{aligned} \sigma_{pq}^s &= (p \cdot v'_s)^2 (q \cdot v')^2 \sigma_{v'_s v'} + (p \cdot v'_s)^2 (q \cdot h')^2 \sigma_{v'_s h'} + (p \cdot h'_s)^2 (q \cdot v')^2 \sigma_{h'_s v'} \\ &+ (p \cdot h'_s)^2 (q \cdot h')^2 \sigma_{h'_s h'} + (p \cdot h'_s)^2 (q \cdot v')(q \cdot h') \sigma_{h'_s h' v'_s v'} \\ &+ (p \cdot v'_s)(p \cdot h'_s)(q \cdot h')^2 \sigma_{h'_s h' v'_s h'} + (p \cdot v'_s)(p \cdot h'_s)(q \cdot h')(q \cdot v') \sigma_{h'_s v'_s v'_s h'} \\ &+ (p \cdot v'_s)(p \cdot h'_s)(q \cdot v')^2 \sigma_{h'_s v'_s v'_s v'} + (p \cdot h'_s)^2 (q \cdot v')(q \cdot h') \sigma_{v'_s v'_s v'_s h'} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sigma_{ppq'q'}^1 = 16 |k^2 \cos \theta' \cos \theta'_s|^2 \operatorname{Re}(\alpha_{pq} \alpha_{pq}^*) S((k_x + k \sin \theta, k_y)) \quad (5)$$

$\theta'$  est l'angle d'incidence local à l'émission et  $\theta'_s$  est l'angle d'observation local à la réception.

Le modèle deux échelles couvre un domaine de validité plus large que l'approche de Kirchhoff et le modèle des petites perturbations. L'approche de Kirchhoff permet l'évaluation de la composante spéculaire. Quant à la composante diffuse, elle est calculée en utilisant le modèle à deux échelles. Cette approche composite sera utilisée pour mesurer l'impacte du mélange eau et hydrocarbure sur l'onde électromagnétique diffusée.

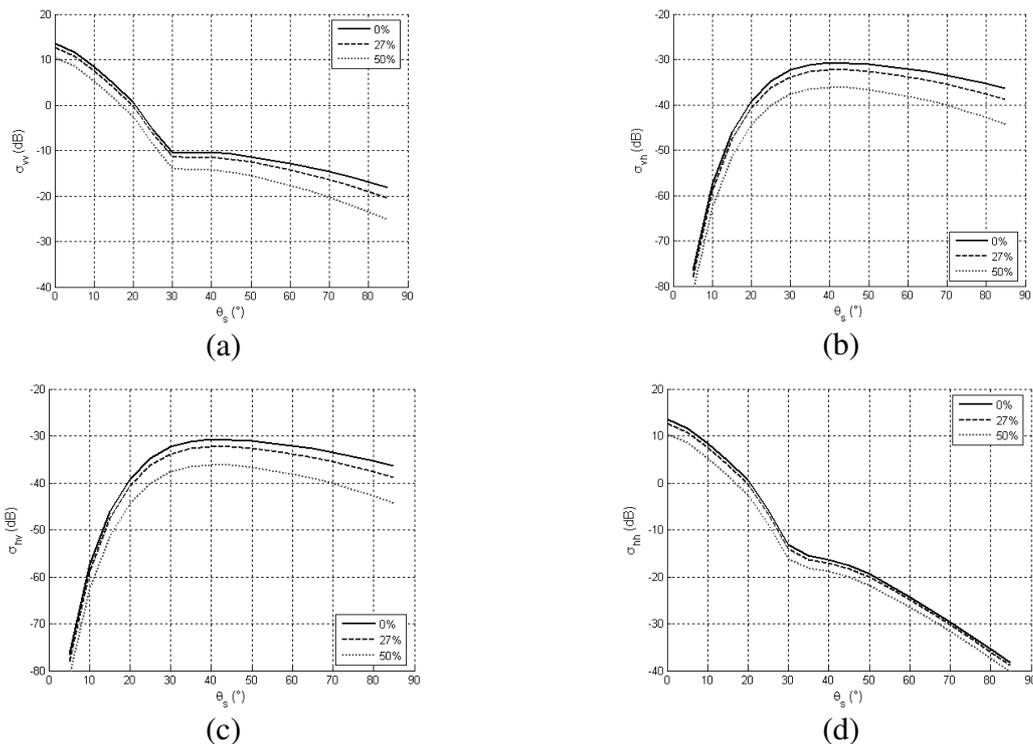
#### 4 Résultats numériques

Dans la première partie nous avons étudié l'effet du pétrole sur la permittivité de la surface de la mer. En utilisant le modèle deux échelles dans cette partie nous présentons les coefficients de diffusions de la surface du mélange pour différentes configurations à différents pourcentages du pétrole dans l'eau. Nous utilisons le spectre d'Elfouhaily [13] pour modéliser

la surface de la mer ainsi que la distribution de Cox & Munk [14]. Dans la configuration où nous nous sommes placé, le spectre de mer considéré (Elfouhaily) est celui de la mer sans polluant.

#### 4.1 Rétrodiffusion

C'est la configuration la plus utilisée dans la littérature. Dans ce cas l'émetteur et le récepteur sont situés au même endroit, en d'autres termes on a le même angle d'incidence à l'émission qu'à la réception ( $\theta = \theta_s$ ) et une différence de  $\pi$  entre l'azimut du récepteur et de l'émetteur. La fréquence d'émission est fixée à 15.48GHz, la vitesse du vent est de 15 m/s à 10 mètres au-dessus de la surface, la température est à 25°C et la salinité est à 100g/l.



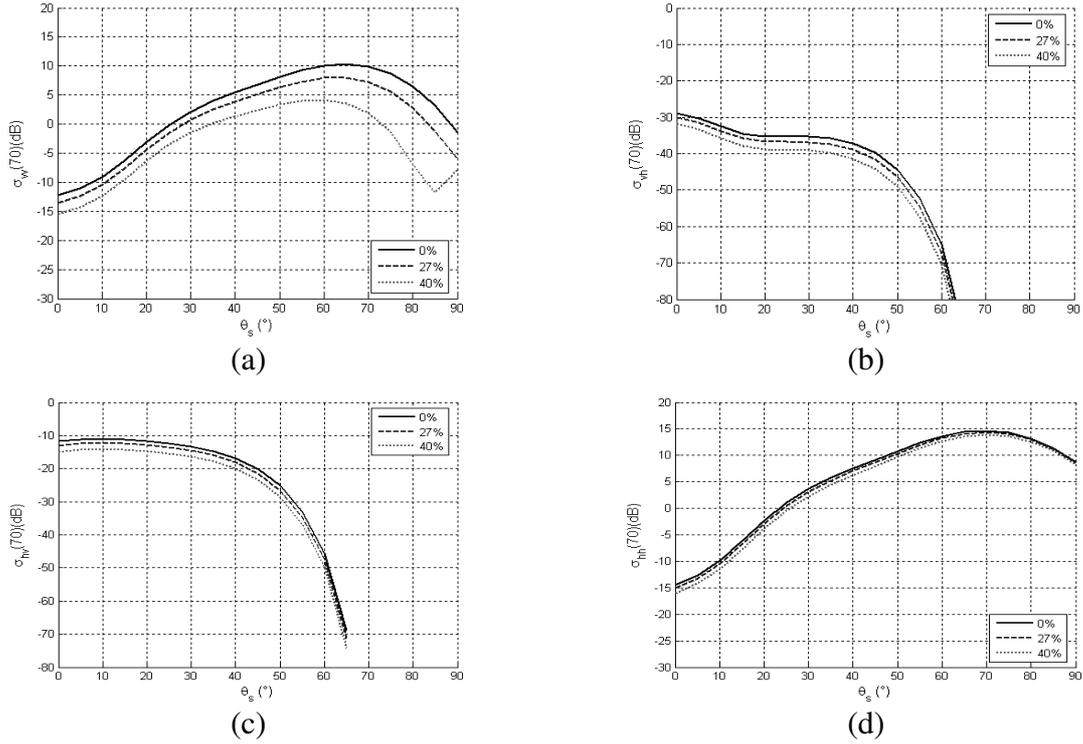
**Fig. 4** coefficients de retrodiffusion du mélange (eau et pétrole) en fonction de l'angle d'incidence à différents pourcentages du pétrole,  $f = 15.48\text{GHz}$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ ,  $S = 100\text{g/l}$ , vent = 15m/s (à 10m)

La **Fig. 4** montre la variation des coefficients de diffusion suivant le pourcentage du pétrole dans l'eau, cette variation est moins prononcée pour la polarisation horizontale ( $\sigma_{hh}$ ) alors qu'elle est plus flagrante pour les autres coefficients au niveau des angles rasant, elle peut atteindre une valeur de 10dB.

#### 4.2 Propagation avant

Ayant fixé l'émetteur ( $\theta = 70^\circ$  et  $\varphi = 0^\circ$ ) dans ce cas de figure le récepteur aura une position dans le plan tel que  $\varphi_s = \varphi + \pi$  et  $\theta_s$  varie de 0 à  $\pi$ . Cette configuration permet de mettre en évidence la composante spéculaire.

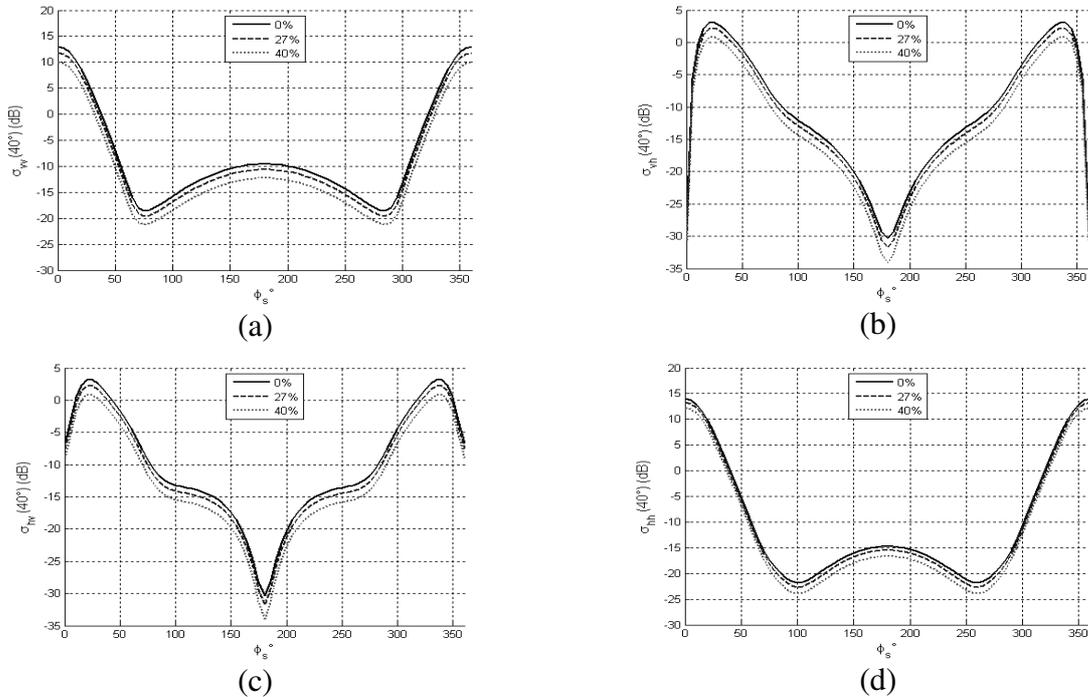
Cette configuration montre que l'influence de la permittivité du mélange sur la diffusion de l'onde électromagnétique est faible (**Fig. 5**). En effet cette variation n'est palpable que pour la polarisation verticale ( $\sigma_{vv}$ ) résultant du phénomène de Brewster. Dans ce qui suit nous allons traiter un cas bistatique général où la composante diffuse domine.



**Fig. 5** coefficients de diffusion en configuration propagation avant du mélange (eau et pétrole) en fonction de l'angle d'incidence à différents pourcentages du pétrole,  $f = 15.48\text{GHz}$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$   $S = 100\text{g/l}$ , vent =  $15\text{m/s}$  (à  $10\text{m}$ )

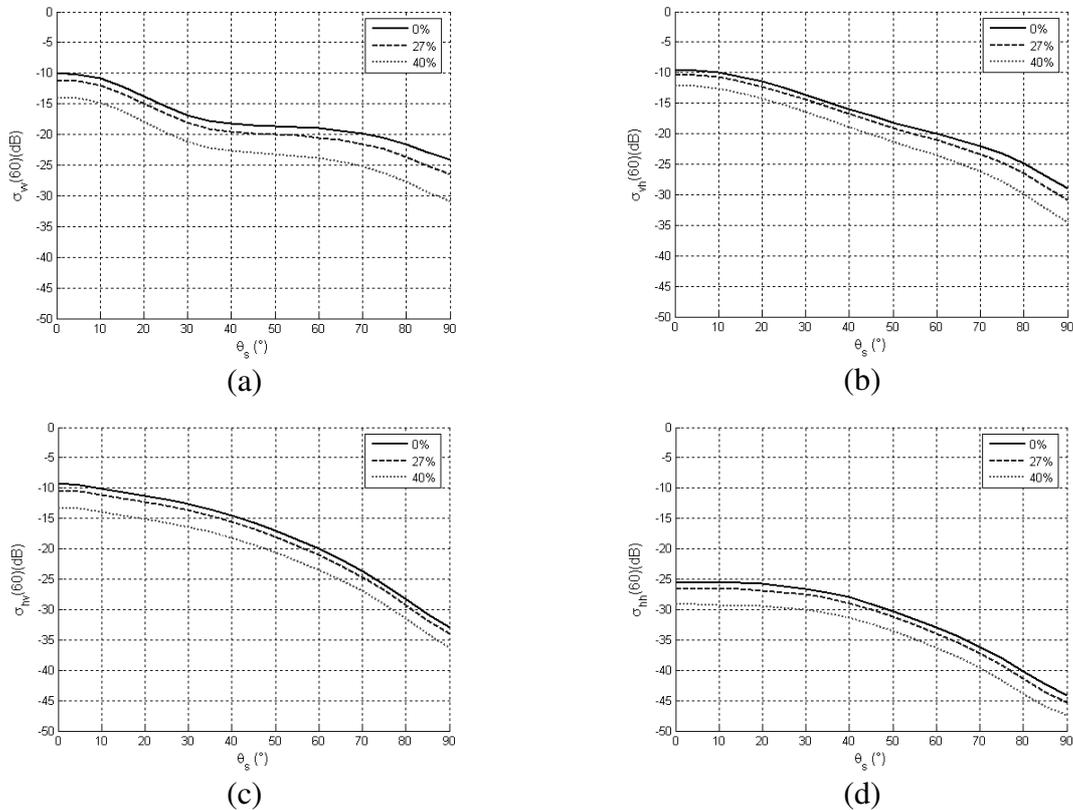
### 4.3 Configuration bistatique

C'est le cas général où l'émetteur et le récepteur n'ont pas nécessairement les mêmes coordonnées [7-11].



**Fig. 6** coefficients de diffusion du mélange (eau et pétrole) en fonction de l'angle d'incidence de l'émetteur à différents pourcentages du pétrole,  $f = 15.48\text{GHz}$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$   $S = 100\text{g/l}$ , vent =  $15\text{m/s}$  (à  $10\text{m}$ )

Nous fixons l'émetteur ( $\theta = 40^\circ$  et  $\varphi = 0^\circ$ ) et nous varions en premier lieu l'azimut du récepteur ( $\varphi_s$  varie de 0 à  $2\pi$ ) alors que l'angle d'observation du récepteur est fixé à  $40^\circ$ . La figure **Fig. 6** illustre le résultat obtenu à l'issue de la simulation, ainsi nous notons que la variation des coefficients de diffusion est accentuée pour un fort pourcentage de pétrole dans l'eau, elle est moins palpable pour la polarisation horizontale.



**Fig. 7** coefficients de diffusion du mélange (eau et pétrole) en fonction de l'angle d'incidence de l'émetteur à différents pourcentages du pétrole,  $f = 15.48\text{GHz}$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$   $S = 100\text{ g/l}$ , vent =  $15\text{m/s}$  (à  $10\text{m}$ )

Dans la deuxième simulation **Fig. 7** nous fixons l'incidence de l'émetteur  $\theta=60^\circ$ , l'azimut du récepteur à  $\pi/2$  et nous faisons varier l'angle d'observation  $\theta_s$  de 0 à  $\pi/2$ . Les variations des coefficients de diffusion suivent le pourcentage du pétrole, elles sont plus prononcées pour le coefficient  $\sigma_{vv}$ .

## 5 Conclusion

Dans ce papier, nous avons présenté nos premiers résultats sur l'influence du polluant (pétrole brut) sur la diffusion électromagnétique par la surface de la mer. Nos simulations sont basées sur les résultats élaborés par Lamkaouchi mesurant la permittivité du mélange en émulsion (eau et pétrole) pour différentes fréquences et à différents pourcentages du polluant. Pour calculer les coefficients de diffusion, nous avons utilisé le modèle deux échelles avec le spectre d'Elfouhaily comme spectre de la mer et la distribution de Cox & Munk pour définir la distribution des pentes de la surface en question.

Les simulations ont révélé que la présence du pétrole affecte en premier lieu les coefficients de diffusion en polarisation verticale ( $\sigma_{vv}$ ). La variation de ces coefficients est accentuée au niveau de la composante diffuse à des angles rasants.

Ces résultats seront utiles quant à la détermination de la configuration optimale pour détecter la présence d'un polluant sur la surface océanique. Reste à déterminer l'influence de ce polluant sur les caractéristiques physiques de la surface de la mer pour des vents faibles et estimer sa répercussion sur la diffusion électromagnétique ce qui constitue principalement l'objet de nos actuelles recherches.

### Référence

- [1] K. Lamkaouchi, « L'eau étalon diélectrique. Etude de lois diélectriques appliquées à l'eau et à des émulsions de pétrole mesurée en micro-ondes » thèse *Université de Bordeaux I* juin 1992.
- [2] K.S. Cole et R.H. Cole « Dispersion and absorption in dielectrics i. alternating current characteristics » *Journal of chemical physics*, 9 :341-351, avril 1941.
- [3] K.S. Cole et R.H. Cole « Dispersion and absorption in dielectrics ii. direct current characteristics » *Journal of chemical physics*, 10 :98-105, february 1942.
- [4] A. Stogryn « Equations for calculating the dielectric properties of saline water » *IEEE Trans.*, 19 :733-736, 1971.
- [5] P. Debye « Polar molecules » *Chemical cathalog company*, New York, 1929.
- [6] C. S. Cox et W. H. Munk « Statistics of the sea surface derived from sun glitter », *J. Mar. Res*, 13, 198-226, 1958.
- [7] T. Elfouhaily, B. Charpon et K. Katsaros: « A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves », *IEEE*, 102, 15781-15796, 1997.
- [8] A. Khenchaf et O. Airiau: « Bistatic radar moving returns from sea surface » *IEIEC Tran. Elct.* E83-C, 1827-1835 2000.
- [9] A. Khenchaf: « Bistatic scattering and depolarization by randomly rough surface: application to the natural rough surface in X-band », *Waves in Random Media*, vol11, 61-87, 2000.
- [10] A. Khenchaf: « Scattering and propagation above any random rough surface at near-grazing angles », *RTO-MP-60*, 32-1 32-7, 2000.
- [11] M. Y. Ayari, A. Khenchaf et A. Coatanhay: « Bistatic electromagnetic scattering by sea surface using Elfouhaily spectrum » Radar 2004.
- [12] J. T. Johnson, R. T. Shin, J. A. Kong, L. Tsang et K. Pak « A numerical study of the composite surface model for ocean backscattering » *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 36: 72-83, 1998.
- [13] T. Elfouhaily, B. Charpon et K. Katsaros: « A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves », *IEEE*, 102, 15781-15796, 1997.
- [14] C. S. Cox et W. H. Munk: « Statistics of the sea surface derived from sun glitter » *J. Mar. Res*, 13, 198-226, 1958.