

Union internationale des télécommunications

**UIT-R**

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

**Recommandation UIT-R P.2146-0**  
(08/2022)

**Diffusion bistatique à la surface de la mer**

**Série P**  
**Propagation des ondes radioélectriques**



Union  
internationale des  
télécommunications

## Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

## Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en œuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

### Séries des Recommandations UIT-R

(Également disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
<b>BO</b>	Diffusion par satellite
<b>BR</b>	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
<b>BS</b>	Service de radiodiffusion sonore
<b>BT</b>	Service de radiodiffusion télévisuelle
<b>F</b>	Service fixe
<b>M</b>	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
<b>P</b>	<b>Propagation des ondes radioélectriques</b>
<b>RA</b>	Radio astronomie
<b>RS</b>	Systèmes de télédétection
<b>S</b>	Service fixe par satellite
<b>SA</b>	Applications spatiales et météorologie
<b>SF</b>	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
<b>SM</b>	Gestion du spectre
<b>SNG</b>	Reportage d'actualités par satellite
<b>TF</b>	Émissions de fréquences étalon et de signaux horaires
<b>V</b>	Vocabulaire et sujets associés

*Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.*

Publication électronique  
Genève, 2023

© UIT 2023

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

## RECOMMANDATION UIT-R P.2146-0

**Diffusion bistatique à la surface de la mer**

(Question UIT-R 208-6/3)

(2022)

**Domaine d'application**

La présente Recommandation fournit une méthode de prévision du coefficient de diffusion bistatique et du coefficient de réflexion cohérente à la surface de la mer. Ce modèle peut être appliqué à tout angle d'élévation, à l'exception de l'incidence rasante, et est applicable aux fréquences jusqu'à 100 GHz, et pour des vitesses du vent comprises entre 0,5 m/s et 25 m/s.

**Mots clés**

Coefficient de diffusion bistatique, diffusion cohérente, diffusion diffuse, vitesse du vent, pente quadratique moyenne au vent et de vent latéral, onde de gravité, onde capillaire, rugosité à grande échelle, irrégularité à petite échelle

**Acronymes/Abréviations**

CEPMMT Centre européen des prévisions météorologiques à moyen terme

ERA5 Réanalyse de 5ème génération du CEPMMT

**Recommandations et Manuel de l'UIT-R connexes**

Recommandation UIT-R P.372

Recommandation UIT-R P.452

Recommandation UIT-R P.527

Recommandation UIT-R P.528

Recommandation UIT-R P.676

Recommandation UIT-R P.680

Recommandation UIT-R P.1144

Recommandation UIT-R P.2148

NOTE – Dans tous les cas, il convient d'utiliser la révision/version la plus récente de la Recommandation en vigueur.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que, pour assurer la bonne planification des systèmes d'observation de la surface de la Terre et des systèmes spatiaux orientés vers le bas, il est nécessaire de disposer de modèles appropriés de prévision du coefficient de diffusion bistatique à la surface de la mer;
- b) que le coefficient de diffusion bistatique peut compter une ou deux des composantes suivantes: une composante correspondant au coefficient de diffusion bistatique cohérente et une composante correspondant au coefficient de diffusion bistatique (non cohérente) diffuse;

- c) que la diffusion bistatique diffuse peut être due à une irrégularité à grande échelle provoquée par une onde de gravité longue et à une irrégularité à petite échelle provoquée par une onde capillaire courte;
- d) que l'onde de gravité longue et l'onde capillaire courte dépendent du vent;
- e) qu'un modèle a été mis au point qui permet de prévoir les coefficients de diffusion bistatique à la surface de la mer nécessaires pour évaluer plusieurs paramètres de propagation, tels que la profondeur de l'évanouissement, le bruit atmosphérique dû aux rayonnements à la surface de la mer et la puissance de brouillage due à la diffusion à la surface de la mer,

*recommande*

que la méthode figurant dans l'Annexe soit utilisée aux fins de prévision du coefficient de diffusion bistatique à la surface de la mer.

## Annexe

### TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR).....	ii
Annexe .....	2
1 Introduction .....	4
2 Étape 0: Paramètres d'entrée.....	6
2.1 Paramètres d'entrée pour la propagation.....	6
2.2 Paramètres d'entrée pour la surface de la mer .....	7
3 Étape 1: Déterminer la permittivité relative complexe de l'eau de mer.....	9
4 Étape 2: Déterminer les paramètres pour l'irrégularité de la surface de la mer.....	9
4.1 Densité spectrale de hauteur à petite échelle de la surface de la mer (onde capillaire) et variance de la hauteur de la surface de la mer .....	9
4.2 Densité de probabilité à grande échelle des pentes de surface (onde de gravité).....	10
5 Étape 3: Déterminer le coefficient de diffusion bistatique cohérente .....	11
6 Étape 4: Déterminer la diffusion bistatique diffuse due à l'irrégularité à grande échelle .....	11
7 Étape 5: Déterminer la dispersion bistatique diffuse due à l'irrégularité à petite échelle .....	12

8	Calculer la somme des composantes du coefficient de diffusion bistatique à la surface de la mer .....	16
8.1	Coefficients de rétrodiffusion à la surface de la mer .....	16
8.2	Coefficients de diffusion bistatique à la surface de la mer dans la direction avant .....	18
	Pièce jointe A à l'Annexe – Calcul des coefficients de diffusion entre les ondes à polarisation circulaire et les ondes à polarisation linéaire .....	22
A.1	Rapport entre l'onde incidente à polarisation circulaire et la puissance diffusée linéaire .....	22
A.2	Rapport entre l'onde incidente linéaire et la puissance diffusée de l'onde à polarisation circulaire .....	23
	Pièce jointe B à l'Annexe – Calcul des coefficients de diffusion entre des ondes à polarisation circulaire.....	24
	Pièce jointe C à l'Annexe – Approximations simples .....	25
	Pièce jointe D à l'Annexe – Modèle spectral de la hauteur de la surface de la mer.....	25
	Pièce jointe E à l'Annexe – Puissance de brouillage d'un signal réfléchi par la surface de la mer vers un récepteur.....	27
E.1	Introduction.....	27
E.2	Puissance cohérente reçue .....	27
E.3	Puissance reçue diffuse.....	28

## 1 Introduction

La présente Recommandation fournit une méthode de prévision du coefficient de diffusion bistatique à la surface de la mer en fonction de la salinité, de la température, de la vitesse du vent, de la direction relative du vent et de l'âge de l'onde inverse à la surface de la mer. Si les données locales relatives à ces paramètres ne sont pas disponibles, il convient d'utiliser les valeurs par défaut correspondantes indiquées dans le Tableau 1. Cette méthode de prévision s'applique à tout angle d'élévation, à l'exception de l'incidence rasante, aux fréquences jusqu'à 100 GHz et pour des vitesses du vent comprises entre 0,5 m/s et 25 m/s.

Le coefficient de diffusion bistatique compte deux composantes: 1) une composante (non cohérente) diffuse, qui est la fraction de la puissance incidente provenant d'une direction d'incidence diffusée dans une direction de réception arbitraire, et 2) une composante cohérente, qui est la fraction de la puissance incidente rétrodiffusée dans la direction d'incidence (c'est-à-dire spéculaire).

Dans la méthode de prévision exposée dans les § 1 à 8, on suppose que la source et le récepteur ont une polarisation rectiligne. Si la source et/ou le récepteur ont une polarisation circulaire, il est possible de calculer les coefficients de diffusion bistatique appropriés à partir des coefficients de diffusion bistatique linéaires en utilisant les méthodes décrites dans les Pièces jointes A, B ou C à la présente Annexe.

On peut utiliser ces méthodes de prévision pour prévoir la puissance de brouillage réfléchi par la surface de la mer entre une source (par exemple un émetteur de liaison descendante) et un récepteur subissant des brouillages préjudiciables (par exemple un récepteur de satellite d'observation de la Terre) à l'aide de la méthode décrite dans la Pièce jointe E.

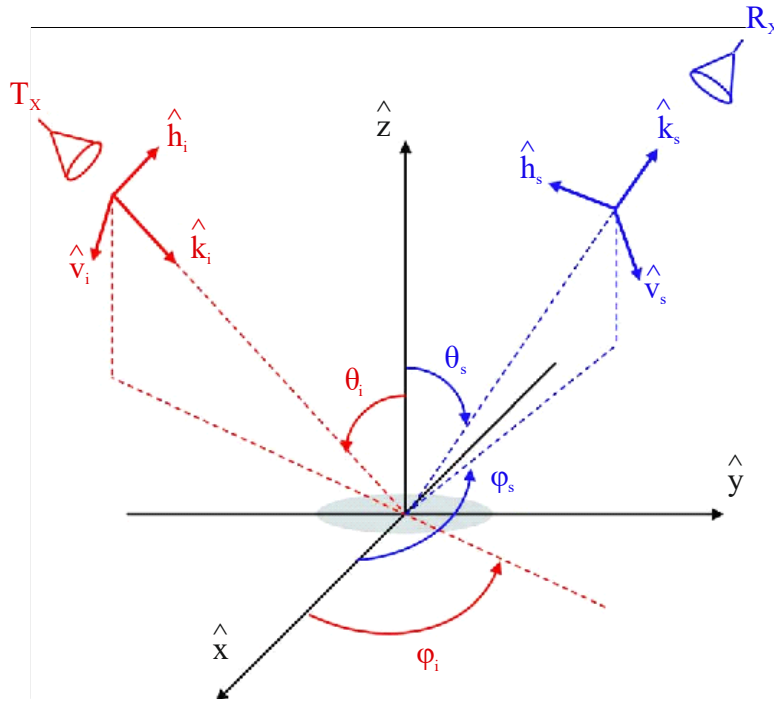
La surface de la mer est généralement une étendue dont l'irrégularité est aléatoire et provoquée par le vent. Le coefficient de diffusion bistatique  $\gamma_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  est la fraction de la puissance diffusée dans une direction  $\hat{k}_s$  avec une polarisation  $\hat{p}_s$  provoquée par une onde incidente illuminant la surface dans la direction  $\hat{k}_i$  avec une polarisation  $\hat{q}_i$  (voir la Fig. 1). La fraction de la puissance est exprimée par unité d'angle solide et par unité de surface. En raison de la nature complexe de l'irrégularité de la surface, on suppose que le coefficient de diffusion bistatique compte deux composantes: une composante cohérente  $\gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  et une composante diffuse (non cohérente)  $\gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ . Ces deux composantes sont ajoutées comme suit:

$$\gamma_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \quad (1)$$

La composante cohérente n'existe que dans la direction spéculaire de la surface ( $\theta_s = \theta_i$ ,  $\varphi_s = \varphi_i$ ).



FIGURE 1  
Configuration géométrique de la diffusion bistatique à la surface de la mer



P2146-01

La Fig. 1 illustre la géométrie considérée dans le modèle de diffusion. Le plan xy est la surface horizontale de la mer et l'axe z positif est la direction zénithale. L'axe x positif est la direction au vent<sup>1</sup> et l'axe y positif est la direction du vent latéral, où l'angle zénithal d'incidence,  $\theta_i$ , et l'angle zénithal de diffusion,  $\theta_s$ , sont mesurés par rapport à l'axe z positif. L'angle d'incidence pris dans un sens horaire,  $\varphi_i$ , et l'angle de diffusion pris dans un sens horaire,  $\varphi_s$ , sont mesurés dans le plan xy dans le sens inverse des aiguilles d'une montre par rapport à la direction au vent.

On considère que la surface de la mer est une surface présentant des irrégularités à deux échelles, à savoir une irrégularité à grande échelle et une irrégularité à petite échelle s'ajoutant à l'irrégularité à grande échelle. L'irrégularité à grande échelle est associée à l'onde de gravité longue tandis que l'irrégularité à petite échelle est associée à l'onde capillaire courte. En conséquence, la composante diffuse (non cohérente) du coefficient de diffusion bistatique  $\gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  est la somme des deux composantes comme indiqué dans l'équation (2):

$$\gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \gamma_{pq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \quad (2)$$

Le premier terme de l'équation (2) est attribué à l'irrégularité à grande échelle de la surface de la mer et le deuxième terme est attribué à l'irrégularité à petite échelle.

Le modèle de prévision des composantes cohérente et diffuse (non cohérente) du coefficient de diffusion bistatique à la surface de la mer peut s'appuyer sur l'organisation illustrée dans la Fig. 2.

<sup>1</sup> La direction au vent est la direction opposée à celle du vent.

## FIGURE 2

**Organisation du modèle de prévision de la diffusion bistatique à la surface de la mer****Étape 0**Détermination des paramètres d'entrée (§ 2)**Étape 1**Détermination de la permittivité relative complexe (§ 3)**Étape 2**Détermination des paramètres d'irrégularité de la surface (§ 4)**Étape 3**Détermination du coefficient de diffusion bistatique cohérente (§ 5)**Étape 4**Détermination de la composante du coefficient de diffusion bistatique diffuse due à une irrégularité à grande échelle (§ 6)**Étape 5**Détermination de la composante du coefficient de diffusion bistatique diffuse due à une irrégularité à petite échelle (§ 7)**Étape 6**Somme des composantes du coefficient de diffusion bistatique (§ 8)

P.2146-02

Le coefficient de diffusion bistatique à la surface de la mer modélisé ici concerne des ondes incidentes à polarisation rectiligne et les ondes diffusées à polarisation rectiligne. Les transformations d'une fonction de polarisation rectiligne en d'autres combinaisons de polarisations pour des ondes incidentes et diffusées sont décrites dans les Pièces jointes A et B:

- La Pièce jointe A porte sur les ondes incidentes à polarisation circulaire et les ondes diffusées à polarisation rectiligne et inversement.
- La Pièce jointe B porte sur les ondes incidentes à polarisation circulaire et les ondes diffusées à polarisation circulaire.
- la Pièce jointe C fournit des approximations simples des coefficients de diffusion bistatique pour les cas décrits dans la Pièce jointe A et la Pièce jointe B.

En outre,

- la Pièce jointe D fournit un modèle de spectres associés à la hauteur de la surface de la mer;
- la Pièce jointe E décrit une méthode permettant de déterminer la puissance du brouillage causé par un signal réfléchi/diffusé à la surface de la mer à un récepteur.

## 2 Étape 0: Paramètres d'entrée

Pour prévoir les valeurs des composantes cohérente et diffuse (non cohérente) du coefficient de diffusion bistatique à la surface de la mer, deux types de paramètres d'entrée sont nécessaires:

- les paramètres d'entrée pour la propagation; et
- les paramètres d'entrée pour la surface de la mer.

### 2.1 Paramètres d'entrée pour la propagation

Les paramètres d'entrée pour la propagation sont les suivants:

- L'angle d'élévation  $\epsilon_i$  et l'angle d'azimut  $\varphi_i$  de l'onde incidente illuminant la surface de la mer. Ces deux angles permettent de déterminer la direction de propagation incidente  $\hat{k}_i$ .
- Le vecteur de polarisation  $\hat{q}_i$  de l'onde illuminant la surface de la mer.



- L'angle d'élévation  $\epsilon_s$  et l'angle d'azimut  $\varphi_s$  de la direction de diffusion  $\hat{k}_s$  le long de laquelle le coefficient de diffusion bistatique est calculé.
- Les vecteurs de polarisation  $\hat{p}_s$  du champ diffusé.
- La fréquence  $f$  à laquelle le coefficient de diffusion bistatique est calculé. La fréquence est exprimée en GHz. La fréquence permet de déterminer le nombre d'ondes radioélectriques  $k$  ( $k = 2\pi f / 0,299792458 \text{ rad/m}$ ).

Étant donné que seules les polarisations rectilignes sont prises en considération dans la présente Annexe, dans les équations  $\hat{q}_i = \hat{v}_i$  ou  $\hat{h}_i$  et  $\hat{p}_s = \hat{v}_s$  ou  $\hat{h}_s$ ,  $v$  représente une polarisation verticale (parallèle) et  $h$  représente une polarisation horizontale (perpendiculaire). Dans la présente Recommandation, on a remplacé les angles d'élévation  $\epsilon_{i,s}$  par les angles zénithaux correspondants  $\theta_{i,s}$ .

$$\theta_{i,s} = \frac{\pi}{2} - \epsilon_{i,s} \quad (3)$$

## 2.2 Paramètres d'entrée pour la surface de la mer

Les paramètres d'entrée pour la surface de la mer nécessaires pour prévoir la diffusion bistatique à la surface de la mer sont indiqués dans le Tableau 1, des valeurs par défaut pouvant être utilisées si les paramètres locaux ne sont pas connus.

TABLEAU 1

Paramètres d'entrée pour la surface de la mer

Paramètre	Description	Valeur par défaut
Salinité de la surface de la mer	Nécessaire pour calculer la permittivité relative complexe de la surface de la mer.	35‰ <sup>2</sup>
Température de la surface de la mer	Nécessaire pour calculer la permittivité relative complexe de la surface de la mer.	0, 15, 30° C
Vitesse du vent $U_{10}$ (m/s)	Vitesse du vent à 10 m au-dessus de la surface de la mer.	Voir le texte ci-après.
Âge d'onde inverse $\Omega$	La mer est entièrement levée lorsque $\Omega$ est proche de 0,85, moyennement agitée lorsque $\Omega$ est proche de 1 et calme lorsque $\Omega > 2$ .	0,85
Nombre d'ondes de la hauteur de l'irrégularité de coupure $\kappa_d$	Nombre d'ondes de la hauteur divisant le spectre associé à la hauteur de la surface de la mer en spectre d'onde de gravité longue et en spectre d'onde capillaire courte.	0,5 $k$ où $k$ est le nombre d'onde (1/m).

<sup>2</sup> Le symbole ‰ signifie «millièmes».

### Vitesse du vent et système de coordonnées

Il convient d'utiliser les valeurs locales des paramètres qui figurent dans le Tableau 1 si celles-ci sont disponibles. La vitesse du vent à 10 m au-dessus de la surface de la mer dépend de l'emplacement géographique et de la saison, et varie dans le temps. Si elles sont disponibles, il convient d'utiliser les données locales relatives à la vitesse du vent à la surface de la mer (amplitude, direction, corrélation spatiale et temporelle) applicable à l'emplacement géographique considéré. Si la corrélation spatiale ou temporelle n'est pas nécessaire, il est possible d'utiliser les cartes mondiales figurant dans la Recommandation UIT-R P.2148.

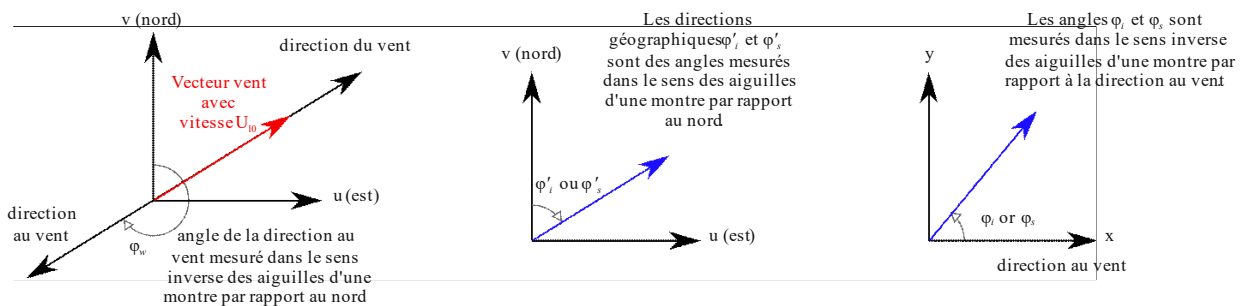
Si les données locales relatives à la vitesse du vent à la surface de la mer ne sont pas disponibles, il est possible de dériver le vecteur vent temporel local à partir de plusieurs sources de données mondiales; par exemple, les composantes d'orientation vers l'est et vers le nord de la vitesse horaire du vent à une hauteur de 10 m au-dessus de la surface de la Terre de 1979 à aujourd'hui sont disponibles dans la banque de données sur le climat du service Copernicus mis en place par le Centre européen des prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT).

Certains ensembles de données (par exemple les données issues de la réanalyse atmosphérique du climat mondial de cinquième génération (ERA5) effectuée par le CEPMMT) fournissent la composante  $v$ , d'orientation vers le nord (vent en direction du nord) de la vitesse du vent, et la composante  $u$ , d'orientation vers l'est (vent en direction de l'est) de la vitesse du vent. Pour une valeur donnée des composantes  $u$  et  $v$ , l'ampleur de la vitesse du vent à une hauteur de 10 m au-dessus de la surface de la Terre,  $U_{10}$ , est défini par  $\sqrt{u^2 + v^2}$ . Comme indiqué dans la Fig. 3, la direction au vent désigne la direction opposée à celle du vent; et l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le nord et la direction au vent,  $\varphi_w$ , est égal à  $270^\circ - \text{atan2}(v, u)$ <sup>3</sup>. Par conséquent, dans la Fig. 3, l'axe positif des  $x$ , qui correspond à la direction au vent, est un angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre de  $270^\circ - \text{atan2}(v, u)$  par rapport au nord; ou, et de manière équivalente, le nord marque un angle mesuré dans le sens inverse des aiguilles d'une montre de  $270^\circ - \text{atan2}(v, u)$  par rapport à la direction au vent.

Si  $\phi'_i$  et  $\phi'_s$  sont les angles d'incidence et de diffusion mesurés dans le sens des aiguilles d'une montre par rapport au nord, alors  $\varphi_i$  et  $\varphi_s$ , les angles d'incidence et de diffusion correspondants, mesurés dans le sens des aiguilles d'une montre, qui figurent dans la Fig. 3 sont définis comme suit:  $\varphi_i = \varphi_w - \phi'_i$  et  $\varphi_s = \varphi_w - \phi'_s$ .

FIGURE 3

#### Vitesse du vent et systèmes de coordonnées



P.2146-03

<sup>3</sup> La fonction  $\text{atan2}(y, x)$  est définie comme l'angle entre l'axe positif des  $x$  et le vecteur depuis l'origine jusqu'au point  $(x, y)$ .

Les paramètres intermédiaires suivants sont calculés à partir des paramètres d'entrée ci-dessus dans le cadre de la méthode:

- permittivité relative complexe de la surface de la mer  $\epsilon_r$ ;
- fonction de densité spectrale de la hauteur de la surface de la mer  $W_s(\kappa, \psi)$ ;
- variance de la hauteur de la surface de la mer  $\sigma^2$ ; et
- pentes quadratiques moyennes au vent et de vent latéral de la surface de la mer  $m_u^2$  et  $m_c^2$ .

### 3 Étape 1: Déterminer la permittivité relative complexe de l'eau de mer

Le modèle de permittivité relative complexe décrit par les équations (14) à (27) de la Recommandation UIT-R P.527-6 est utilisé dans la présente Recommandation pour obtenir la permittivité relative complexe de l'eau de mer  $\epsilon_r$  en termes de salinité de la surface de la mer, de température de la surface de la mer et de fréquence RF. Les valeurs par défaut de salinité et de température de la surface de la mer figurent dans le Tableau 1.

### 4 Étape 2: Déterminer les paramètres pour l'irrégularité de la surface de la mer

L'irrégularité de la surface de la mer est décrite par les paramètres suivants:

- La densité spectrale à petite échelle de la hauteur de la surface, qui est nécessaire pour calculer la composante de diffusion bistatique diffuse due à l'irrégularité à petite échelle (§ 6).
- La hauteur quadratique moyenne totale de la surface de la mer, qui est nécessaire pour calculer la réflectivité cohérente (§ 5).
- La densité de probabilité à grande échelle des pentes de surface, qui est nécessaire pour calculer la composante de coefficient de diffusion bistatique diffuse due à l'irrégularité à grande échelle (§ 7).

#### 4.1 Densité spectrale de hauteur à petite échelle de la surface de la mer (onde capillaire) et variance de la hauteur de la surface de la mer

Le spectre à petite échelle est lié au spectre directionnel de la surface de la mer,  $W(\kappa, \psi)$ , comme suit:

$$W_s(\kappa, \psi) = \begin{cases} 0 & \text{si } \kappa < \kappa_d \\ W(\kappa, \psi) & \text{dans les autres cas} \end{cases} \quad (4)$$

où  $\kappa_d$  correspond au nombre d'onde de la hauteur de coupure à deux échelles et  $(\kappa, \psi)$  désigne les coordonnées polaires des nombres d'onde spatiaux dans la direction au vent et dans la direction de vent latéral qui sont associées aux coordonnées rectangulaires des pentes de la surface. L'expression explicite pour  $W(\kappa, \psi)$  figure dans la Pièce jointe D.

La hauteur quadratique moyenne totale de la surface de la mer,  $\sigma$ , qui est nécessaire pour calculer la réflectivité cohérente, est liée à la vitesse du vent,  $U_{10}$ , comme suit:

$$\sigma^2 = \begin{cases} \sigma_0 + \sigma_1 U_{10} + \sigma_2 U_{10}^2 + \sigma_3 U_{10}^3 + \sigma_4 U_{10}^4 + \sigma_5 U_{10}^5 & \text{si } U_{10} \geq 1 \text{ m/s} \\ 0,001515 U_{10} & \text{si } U_{10} < 1 \text{ m/s} \end{cases} \quad (5)$$

Avec  $\sigma^2$  (la variance de hauteur de la surface) en mètres carrés et  $U_{10}$  (la vitesse du vent à une hauteur de 10 m au-dessus de la surface de la mer) en m/s, et:

$$\sigma_0 = -0,002913931483264$$

$$\sigma_1 = 0,006483314256661$$

$$\sigma_2 = -0,002390537892927$$

$$\sigma_3 = 0,000309146709141$$

$$\sigma_4 = 0,000026373965831$$

$$\sigma_5 = 0,000000350137099$$

#### 4.2 Densité de probabilité à grande échelle des pentes de surface (onde de gravité)

La densité de probabilité à grande échelle des pentes de surface est représentée par une distribution gaussienne à deux variables de moyenne nulle:

$$P(S_u, S_c) = \frac{1}{2\pi m_u m_c} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{S_u^2}{m_u^2} + \frac{S_c^2}{m_c^2}\right)\right\} \quad (6)$$

où  $S_u$  et  $S_c$  sont les pentes dans la direction au vent et de vent latéral au niveau de parcelles de surface où les coefficients de diffusion bistatique locale sont calculés. En outre,  $m_u^2$  et  $m_c^2$  sont les pentes quadratiques moyennes dans la direction au vent et de vent latéral

$$m_u^2 = \sum_{t=0}^7 a_t U_{10}^t \quad (7)$$

$$m_c^2 = \sum_{t=0}^7 b_t U_{10}^t \quad (8)$$

où les coefficients de régression  $a_t$  ( $t = 0, \dots, 7$ ) et  $b_t$  ( $t = 0, \dots, 7$ ) dans les équations (7) et (8) sont liés à la fréquence  $f$  en GHz comme suit:

$$a_t = d_{t,0} + d_{t,1} \log_e f + d_{t,2} (\log_e f)^2 + d_{t,3} (\log_e f)^3 + d_{t,4} (\log_e f)^4 \quad t = 0, \dots, 7 \quad (9)$$

$$b_t = z_{t,0} + z_{t,1} \log_e f + z_{t,2} (\log_e f)^2 + z_{t,3} (\log_e f)^3 + z_{t,4} (\log_e f)^4 \quad t = 0, \dots, 7 \quad (10)$$

Les coefficients  $d_{t,m}$  et  $z_{t,m}$  figurent dans le Tableau 2 et le Tableau 3, respectivement. Les équations (7) et (8) sont valides pour les valeurs  $U_{10}$  comprises entre 0,5 m/s et 25 m/s et les fréquences comprises entre 1 et 100 GHz.

TABLEAU 2

Valeurs des coefficients de régression  $d_{t,m}$  de l'équation (9)

$a_t$	$d_{t,0}$	$d_{t,1}$	$d_{t,2}$	$d_{t,3}$	$d_{t,4}$
$a_0$	-0,001 316 803 829	-0,000 766 377 24	0,000 178 465 995	0,000 163 583 254	-2,722 372 719 5e-05
$a_1$	0,003 381 740 504	0,003 262 226 696	0,001 055 843 558	-0,000 556 018 050	5,638 297 081 0e-05
$a_2$	-8,387 091 908e-06	-0,000 788 099 04	-0,000 849 564 4	0,000 321 034 03	-2,969 409 304 3e-05
$a_3$	-7,172 344 345 1e-05	9,130 847 487e-05	0,000 180 310 43	-6,039 065 778e-05	5,252 298 53e-06
$a_4$	9,781 960 983 7e-06	-5,515 385 070e-06	-1,831 052 853e-05	5,756 933 90e-06	-4,820 426 74e-07
$a_5$	-5,824 151 735 3e-07	1,831 590 630e-07	9,693 536 66e-07	-2,928 018 73e-07	2,384 386 09e-08
$a_6$	1,662 701 734 3e-08	-3,121 665 19e-09	-2,590 444 81e-08	7,608 802 794e-09	-6,063 116 61e-10
$a_7$	-1,853 308 18e-10	2,084 451 182e-11	2,762 769 59e-10	-7,94818760e-11	6,223 677 47e-12

TABLEAU 3

Valeurs des coefficients de régression  $z_{t,m}$  de l'équation (10)

$b_t$	$z_{t,0}$	$z_{t,1}$	$z_{t,2}$	$z_{t,3}$	$z_{t,4}$
$b_0$	-0,000 388 356 64	-0,000 566 882 739	-0,000 187 663 9	0,000 195 168 030 1	-2,564 879 98e-05
$b_1$	0,000 711 554 432 3	0,001 274 333 859	0,001 582 455 599	-0,000 564 251 194	5,158 545 58e-05
$b_2$	0,000 467 115 768	7,665 602 489e-05	-0,000 999 944 82	0,000 304 430 724	-2,608 628 437e-05
$b_3$	-0,000 113 274 18	-7,062 890 94e-05	0,000 204 604 176	-5,704 760 441e-05	4,619 116 82e-06
$b_4$	1,144 869 515e-05	9,917 914 997 6e-06	-2,031 787 86e-05	5,376 554 489e-06	-4,184 881 982e-07
$b_5$	-5,954 866 288 2e-07	-6,127 030 44e-07	1,063 995 76e-06	-2,717 537 12e-07	2,052 809 6e-08
$b_6$	1,566 749 978 4e-08	1,794 015 885e-08	-2,826 461 77e-08	7,033 322 599e-09	-5,186 932 2e-10
$b_7$	-1,651 144 028 4e-10	-2,032 492 61e-10	3,003 151 95e-10	-7,323 652 942e-11	5,294 665 17e-12

### 5 Étape 3: Déterminer le coefficient de diffusion bistatique cohérente

La composante cohérente du coefficient de diffusion bistatique est similaire à la composante polarisation (vv, ou hh) et existe uniquement dans la direction de la réflexion spéculaire:

$$\gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \begin{cases} 4\pi|r_{pp}(\theta_i)|^2 \exp\{-(2k\sigma\cos\theta_i)^2\} & \text{si } \theta_s = \theta_i, \varphi_s = \varphi_i \text{ et } p = q \\ 0 & \text{dans les autres cas} \end{cases} \quad (11)$$

Dans l'expression ci-dessus,  $r_{pp}(\theta_i)$  est le coefficient de réflexion de Fresnel pour la polarisation  $p$  ( $p = v, h$ ):

$$r_{hh}(\theta_i) = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}} \quad (12)$$

$$r_{vv}(\theta_i) = \frac{\varepsilon_r \cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}}{\varepsilon_r \cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}} \quad (13)$$

### 6 Étape 4: Déterminer la diffusion bistatique diffuse due à l'irrégularité à grande échelle

Pour obtenir le coefficient de diffusion bistatique due à l'irrégularité à grande échelle (onde de gravité), il convient d'utiliser les angles d'incidence ( $\theta_i, \varphi_i$ ) et les angles de diffusion ( $\theta_s, \varphi_s$ ) figurant dans le § 2.1 pour calculer les valeurs suivantes.

$$q_x = \sin \theta_s \cos \varphi_s - \sin \theta_i \cos \varphi_i \quad (14)$$

$$q_y = \sin \theta_s \sin \varphi_s - \sin \theta_i \sin \varphi_i \quad (15)$$

$$q_z = \cos \theta_s + \cos \theta_i \quad (16)$$

$$q^2 = q_x^2 + q_y^2 + q_z^2 \quad (17)$$

$$(\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i) = -\sin \theta_s \cos \theta_i \cos(\varphi_s - \varphi_i) - \sin \theta_i \cos \theta_s \quad (18)$$

$$(\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i) = \sin \theta_s \sin(\varphi_s - \varphi_i) \quad (19)$$

$$(\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s) = \sin \theta_i \cos \theta_s \cos(\varphi_s - \varphi_i) + \sin \theta_s \cos \theta_i \quad (20)$$

$$(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s) = -\sin \theta_i \sin(\varphi_s - \varphi_i) \quad (21)$$

$$D_0^2 = (\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)^2 + (\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)^2 \quad (22)$$

Introduire les équations (16) et (17) dans l'équation (23) pour obtenir l'angle d'incidence local  $\theta'_i$  au point de surface contribuant au coefficient de diffusion bistatique:

$$\cos \theta'_i = q |q_z| / (2q_z) \quad (23)$$

Introduire l'équation (23) dans les équations (12) et (13) en utilisant la valeur correcte de la permittivité relative complexe pour obtenir les valeurs  $r'_{hh}$  et  $r'_{vv}$  de la réflexion de Fresnel. Puis, introduire les coefficients de Fresnel locaux  $r'_{hh}$  et  $r'_{vv}$  ainsi que les produits vectoriels scalaires des équations (18) à (21) dans les équations (24) à (27) pour obtenir les facteurs de la polarisation  $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ 's:

Si  $D_0^2 \neq 0$ :

$$U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{(\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{vv}\} / D_0^2 \quad (24)$$

$$U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{-(\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)r'_{vv}\} / D_0^2 \quad (25)$$

$$U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{-(\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{vv}\} / D_0^2 \quad (26)$$

$$U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{(\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{v}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{v}_s)r'_{vv}\} / D_0^2 \quad (27)$$

Si  $D_0^2 = 0$ :

$$U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = r'_{hh} \quad (28)$$

$$U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = 0 \quad (29)$$

$$U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = 0 \quad (30)$$

$$U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = r'_{vv} \quad (31)$$

Introduire les équations (14) à (17) et (24) à (27) dans l'équation (32) pour obtenir les composantes diffuses de la surface de la mer du coefficient de diffusion bistatique  $\gamma_{pq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  due à une onde de gravité longue:

$$\gamma_{pq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2m_u m_c} \left| \frac{q}{q_z} \right|^4 |U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)|^2 \exp \left\{ \frac{-1}{2q_z^2} \left( \left\{ \frac{q_x}{m_u} \right\}^2 + \left\{ \frac{q_y}{m_c} \right\}^2 \right) \right\} \quad (32)$$

où  $m_u$  et  $m_c$  sont les pentes de surface quadratiques moyennes dans la direction au vent et dans la direction de vent latéral données dans les équations (7) et (8) en tant que fonction de la vitesse du vent  $U_{10}$  et de la fréquence  $f$ .

## 7 Étape 5: Déterminer la dispersion bistatique diffuse due à l'irrégularité à petite échelle

La première étape de la méthode utilisée pour obtenir la diffusion bistatique diffuse due à l'irrégularité à petite échelle consiste à fixer les valeurs maximales et minimales de  $S_u$  et  $S_c$ .

$$S_{u,max} = 6 m_u$$

$$S_{u,min} = -\min(6 m_u, \cot \theta_i)$$

$$S_{c,max} = 6 m_c$$

$$S_{c,min} = -6 m_c$$

La région de pente sous-tendue par les valeurs maximales et minimales ci-dessus est divisée en  $64 \times 64$  points au moyen de nœuds de quadrature gaussienne. En un nœud arbitraire  $(t, m)$ , les pentes peuvent être exprimées comme suit:

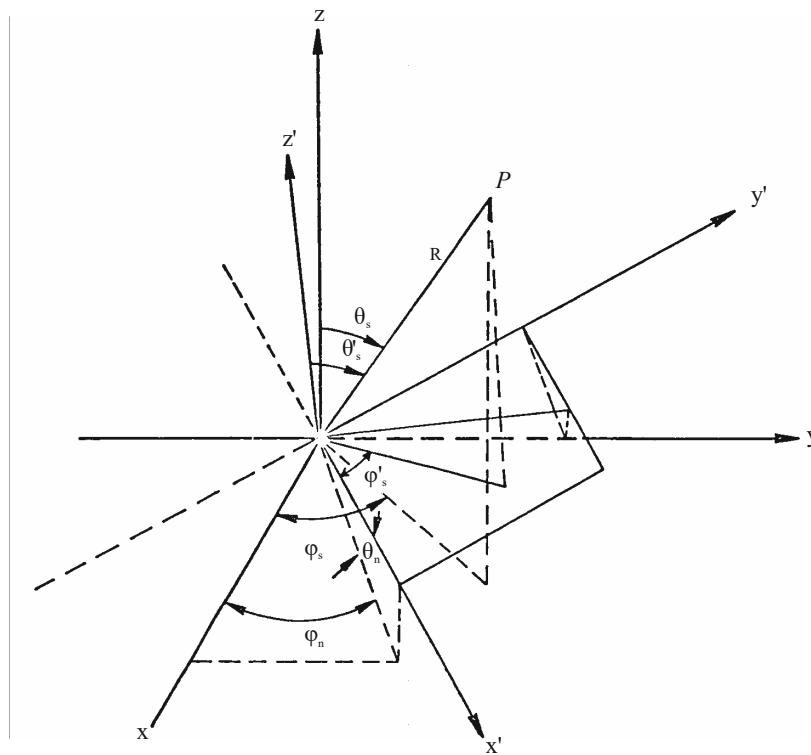
$$S_{u,t} = \frac{1}{2} \{ (S_{u,max} - S_{u,min}) \chi(t) + (S_{u,max} + S_{u,min}) \} \quad (33)$$

$$S_{c,m} = \frac{1}{2} \{ (S_{c,max} - S_{c,min}) \zeta(m) + (S_{c,max} + S_{c,min}) \} \quad (34)$$

Dans les équations (33) et (34),  $\chi(t)$  et  $\zeta(m)$  sont les nœuds de la quadrature gaussienne ( $t, m = 1, \dots, 64$ ) correspondant à la valeur  $X_i$  de la Section 3 de l'Annexe de la Recommandation UIT-R P.1144-11, c'est-à-dire  $\chi(t), \zeta(m) \rightarrow X_i$ . En outre,  $S_{u,t} \rightarrow X'_i$  et  $S_{c,m} \rightarrow Z'_i$ .

FIGURE 4

Angles de diffusion ( $\theta'_s, \varphi'_s$ ) et angles d'inclinaison locaux de la normale de la surface (angle zénithal  $\theta_n$  et angle d'azimut  $\varphi_n$ )



P.2146-04

Au niveau du nœud gaussien supérieur, procéder comme suit:

- Calculer l'angle zénithal  $\theta_n$  et l'angle d'azimut  $\varphi_n$  définissant l'inclinaison de la normale de surface  $\hat{n}$  à grande échelle de la surface de la mer (voir la Fig. 4) en introduisant les équations (32) et (33) dans les équations (35) à (37):

$$\varphi_n = \tan^{-1} \{ S_{c,m} / S_{u,t} \} \quad (35)$$

$$\cos \theta_n = \frac{1}{\sqrt{S_{u,t}^2 + S_{c,m}^2 + 1}} \quad (36)$$

$$\sin \theta_n = \cos \theta_n \{ S_{u,t} \cos \varphi_n + S_{c,m} \sin \varphi_n \} \quad (37)$$



- Obtenir les angles de diffusion locale et d'incidence  $\theta'_s$ , et  $\varphi'_s$ , et  $\theta'_i$ , et  $\varphi'_i$  au niveau de ce point de nœud:

$$\varphi'_s = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin \theta_s \sin(\varphi_s - \varphi_n)}{\sin \theta_s \cos \theta_n \cos(\varphi_s - \varphi_n) + \cos \theta_s \sin \theta_n} \right\} \quad (38)$$

$$\cos \theta'_s = \frac{\{-\sin \theta_s (S_{u,t} \cos \varphi_s + S_{c,m} \sin \varphi_s) + \cos \theta_s\}}{\sqrt{S_{u,t}^2 + S_{c,m}^2 + 1}} \quad (39)$$

$$\sin \theta'_s = \{\sin \theta_s \cos \theta_n \cos(\varphi_s - \varphi_n) + \cos \theta_s \sin \theta_n\} \cos \varphi'_s + \{\sin \theta_s \sin(\varphi_s - \varphi_n)\} \sin \varphi'_s \quad (40)$$

et

$$\varphi'_i = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin \theta_i \sin(\varphi_i - \varphi_n)}{\sin \theta_i \cos \theta_n \cos(\varphi_i - \varphi_n) - \cos \theta_i \sin \theta_n} \right\} \quad (41)$$

$$\cos \theta'_i = \frac{\{\sin \theta_i (S_{u,t} \cos \varphi_i + S_{c,m} \sin \varphi_i) + \cos \theta_i\}}{\sqrt{S_{u,t}^2 + S_{c,m}^2 + 1}} \quad (42)$$

$$\sin \theta'_i = \{\sin \theta_i \cos \theta_n \cos(\varphi_i - \varphi_n) - \cos \theta_i \sin \theta_n\} \cos \varphi'_i + \{\sin \theta_i \sin(\varphi_i - \varphi_n)\} \sin \varphi'_i \quad (43)$$

- Calculer les angles d'incidence et de diffusion locaux permet d'obtenir les composantes de la polarisation horizontale d'incidence et de la polarisation horizontale diffusée:

$$h_{xi} = \sin \theta_i \sin \varphi_i - \cos \theta_i S_{c,m} \quad (44)$$

$$h_{yi} = \cos \theta_i S_{u,t} - \sin \theta_i \cos \varphi_i \quad (45)$$

$$h_{zi} = \sin \theta_i (S_{u,t} \sin \varphi_i - S_{c,m} \cos \varphi_i) \quad (46)$$

$$D_i = \sqrt{h_{xi}^2 + h_{yi}^2 + h_{zi}^2} \quad (47)$$

et

$$h_{xs} = \sin \theta_s \sin \varphi_s + \cos \theta_s S_{c,m} \quad (48)$$

$$h_{ys} = -\{\cos \theta_s S_{u,t} + \sin \theta_s \cos \varphi_s\} \quad (49)$$

$$h_{zs} = \sin \theta_s (S_{u,t} \sin \varphi_s - S_{c,m} \cos \varphi_s) \quad (50)$$

$$D_s = \sqrt{h_{xs}^2 + h_{ys}^2 + h_{zs}^2} \quad (51)$$

- Obtenir les produits vectoriels scalaires suivants dans la direction de l'incidence:

$$(\vartheta'_i \cdot \vartheta_i) = \cos \theta_n \{-\cos \theta_i (S_{u,t} \cos \varphi_i + S_{c,m} \sin \varphi_i) + \sin \theta_i\} / D_i \quad (52)$$

$$(\vartheta'_i \cdot \hat{h}_i) = \cos \theta_n \{-S_{u,t} \sin \varphi_i + S_{c,m} \cos \varphi_i\} / D_i \quad (53)$$

$$(\hat{h}'_i \cdot \vartheta_i) = \frac{-1}{D_i} \{\cos \theta_i (h_{xi} \cos \varphi_i + h_{yi} \sin \varphi_i) + h_{zi} \sin \theta_i\} \quad (54)$$

$$(\hat{h}'_i \cdot \hat{h}_i) = \frac{1}{D_i} \{h_{yi} \cos \varphi_i - h_{xi} \sin \varphi_i\} \quad (55)$$

Et les produits vectoriels scalaires suivants dans la direction de la diffusion:

$$(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s) = \cos \theta_n \{\cos \theta_s (S_{u,t} \cos \varphi_s + S_{c,m} \sin \varphi_s) + \sin \theta_s\} / D_s \quad (56)$$

$$(\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s) = \frac{1}{D_s} \{\cos \theta_s (h_{xs} \cos \varphi_s + h_{ys} \sin \varphi_s) - h_{zs} \sin \theta_s\} \quad (57)$$

$$(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s) = \cos \theta_n \{-S_{u,t} \sin \varphi_s + S_{c,m} \cos \varphi_s\} / D_s \quad (58)$$

$$(\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s) = \frac{1}{D_s} \{h_{ys} \cos \varphi_s - h_{xs} \sin \varphi_s\} \quad (59)$$

- Obtenir les facteurs de polarisation dans le système local  $g'_{pq}$ 's en introduisant les équations (38) et (41) ainsi que la valeur correcte de la permittivité relative complexe dans les équations (60) à (63):

$$g'_{hh} = \frac{(\varepsilon_r - 1)}{\left(\cos \theta'_s + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_s}\right)\left(\cos \theta'_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_i}\right)} \cos(\varphi'_s - \varphi'_i) \quad (60)$$

$$g'_{vh} = \frac{-(\varepsilon_r - 1)\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_s}}{\left(\varepsilon_r \cos \theta'_s + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_s}\right)\left(\cos \theta'_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_i}\right)} \sin(\varphi'_s - \varphi'_i) \quad (61)$$

$$g'_{hv} = \frac{(\varepsilon_r - 1)\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_i}}{\left(\cos \theta'_s + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_s}\right)\left(\varepsilon_r \cos \theta'_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_i}\right)} \sin(\varphi'_s - \varphi'_i) \quad (62)$$

$$g'_{vv} = \frac{(\varepsilon_r - 1)\left(\varepsilon_r \sin \theta'_i \sin \theta'_s - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_s} \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_i} \cos(\varphi'_s - \varphi'_i)\right)}{\left(\varepsilon_r \cos \theta'_s + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_s}\right)\left(\varepsilon_r \cos \theta'_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_i}\right)} \quad (63)$$

- Obtenir les facteurs de polarisation  $G_{pq}$ 's en introduisant les équations (60) à (63), ainsi que les équations (52) à (59) dans les équations (64) à (67):

$$G_{vv} = \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \vartheta_i) + \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \vartheta_i) \quad (64)$$

$$G_{vh} = \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \hat{h}_i) + \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \hat{h}_i) \quad (65)$$

$$G_{hv} = \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \vartheta_i) + \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \vartheta_i) \quad (66)$$

$$G_{hh} = \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \hat{h}_i) + \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \hat{h}_i) \quad (67)$$

La fonction  $\mathcal{U}$  garantit que le nœud gaussien  $(t, m)$  détecte simultanément la direction de l'incidence et la direction de la diffusion:

$$\mathcal{U}(S_{u,t}, \theta_i) = \begin{cases} \max((1 + S_{u,t} \tan \theta_i), 0) & \text{si } 0 \leq \theta'_i \leq \frac{\pi}{2} \text{ et } 0 \leq \theta'_s \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{dans les autres cas} \end{cases} \quad (68)$$

Les opérations susmentionnées doivent être répétées pour couvrir tous les nœuds de la pente.

Pour obtenir le coefficient de diffusion bistatique diffuse à la surface de la mer dû aux ondes courtes, utiliser les formules ci-dessus pour calculer (69) et (70) au niveau de tous les nœuds:

$$P(S_{u,t}, S_{c,m}) = \frac{1}{2\pi m_u m_c} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{S_{u,t}^2}{m_u^2} + \frac{S_{c,m}^2}{m_c^2}\right)\right\} \quad (69)$$

$$\gamma_{pq}^{cap}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = 16\pi(k^2 \cos \theta'_s \cos \theta'_i)^2 |G_{pq}|^2 W_s(\kappa, \varphi_i) \quad (70)$$

L'équation (69) est obtenue à partir de l'équation (6). En outre,  $W_s(\kappa, \varphi_i)$  dans l'équation (70) est la fonction de densité spectrale en ondes courtes donnée dans la Pièce jointe calculée à  $\psi = \varphi_i$ , et pour le nombre d'ondes de la hauteur  $\kappa$  donné par:

$$\kappa = k\sqrt{\sin^2 \theta'_s + \sin^2 \theta'_i - 2 \sin \theta'_s \sin \theta'_i \cos(\varphi'_s - \varphi'_i)} \quad (71)$$

Ensuite, introduire les équations (68) à (71) dans l'équation (72) pour obtenir le coefficient de diffusion bistatique diffuse à la surface de la mer due à l'irrégularité à petite échelle (ondes capillaires courtes):

$$\gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = C \sum_{m=1}^{64} \sum_{t=1}^{64} \gamma_{pq}^{cap}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \mathcal{U}(S_{u,t}, \theta_i) P(S_{u,t}, S_{c,m}) w_{u,t} w_{c,m} \quad (72)$$

Dans l'équation (72),  $w_{u,t}$  et  $w_{c,m}$  sont les poids de quadrature gaussienne donnés dans la Section 3 de l'Annexe de la Recommandation UIT-R P.1144-11. Le facteur  $C$  est une constante obtenue comme suit:

$$C = \frac{1}{4} \{ (S_{u,max} - S_{u,min}) (S_{c,max} - S_{c,min}) \} \quad (73)$$

## 8 Calculer la somme des composantes du coefficient de diffusion bistatique à la surface de la mer

La composante cohérente (11) et les composantes diffuses (32) et (72) des coefficients de diffusion bistatique à la surface de la mer sont additionnées et exploitées lors de l'examen des caractéristiques de ces coefficients dans la direction de la rétrodiffusion et dans la direction avant (spéculaire).

$$\gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \gamma_{pq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \quad (74)$$

### 8.1 Coefficients de rétrodiffusion à la surface de la mer

Les coefficients de rétrodiffusion à la surface de la mer présentent un intérêt, en particulier pour les spécialistes de la télédétection active. Ces coefficients ne possèdent aucune composante cohérente et peuvent être calculés à partir de la somme des équations (32) et (72) en posant  $\hat{k}_s = -\hat{k}_i$  (c'est-à-dire  $\theta_s = \theta_i$ , et  $\varphi_s = \pi + \varphi_i$ ). Les Fig. 5 à 8 illustrent la dépendance des coefficients de rétrodiffusion à la surface de la mer à l'égard de l'angle d'incidence, de la polarisation, de la vitesse du vent et de la direction du vent.

FIGURE 5

Coefficients de rétrodiffusion dans la direction au vent, en fonction de l'angle d'incidence avec différentes valeurs de vitesse du vent (fréquence = 13,6 GHz,  $\Omega = 0,84$ , température = 30° C, salinité = 35‰)

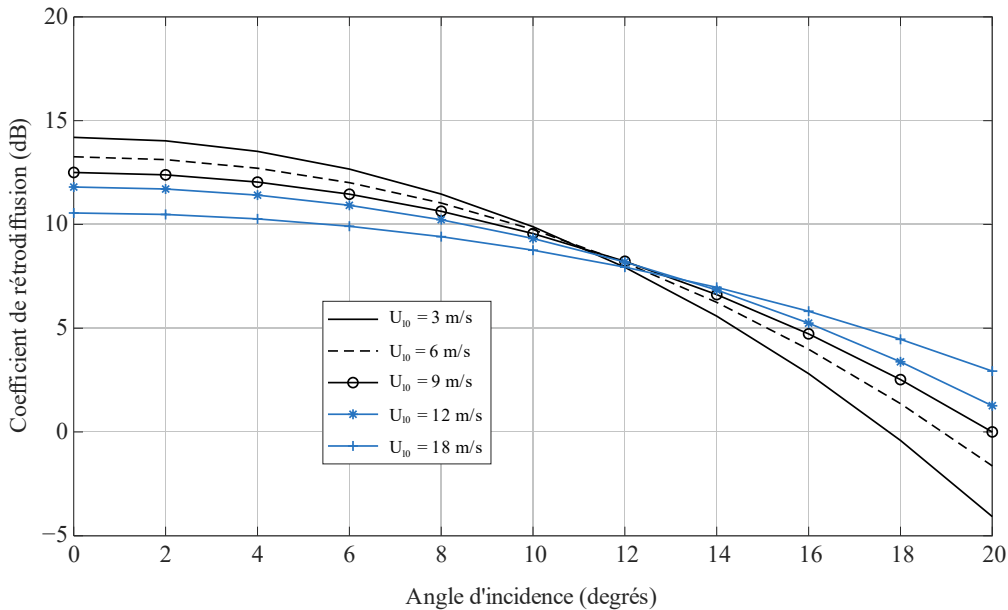
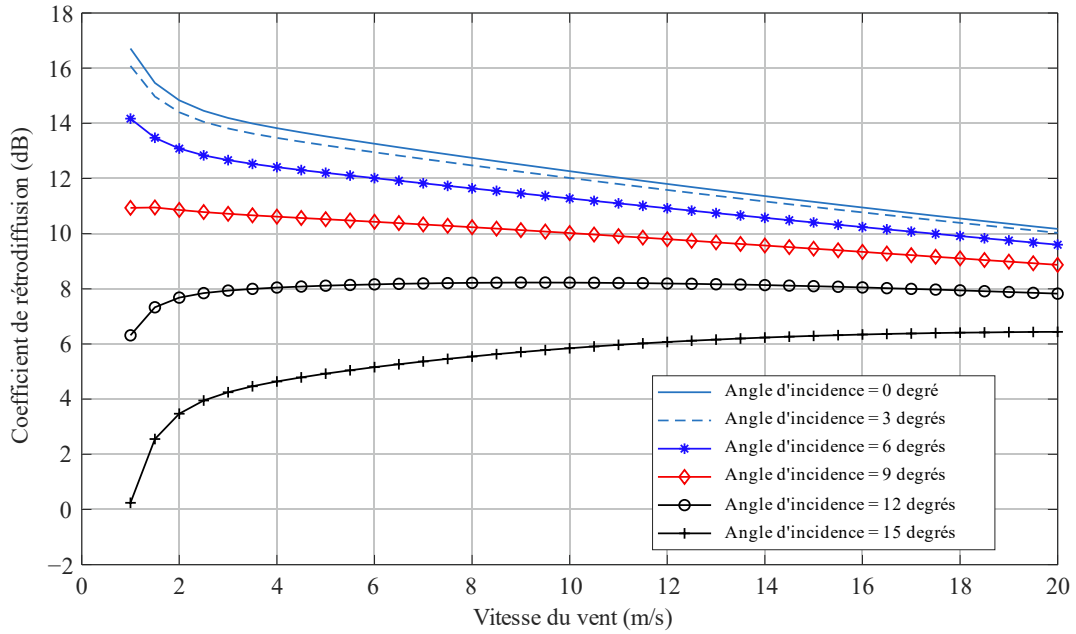


FIGURE 6

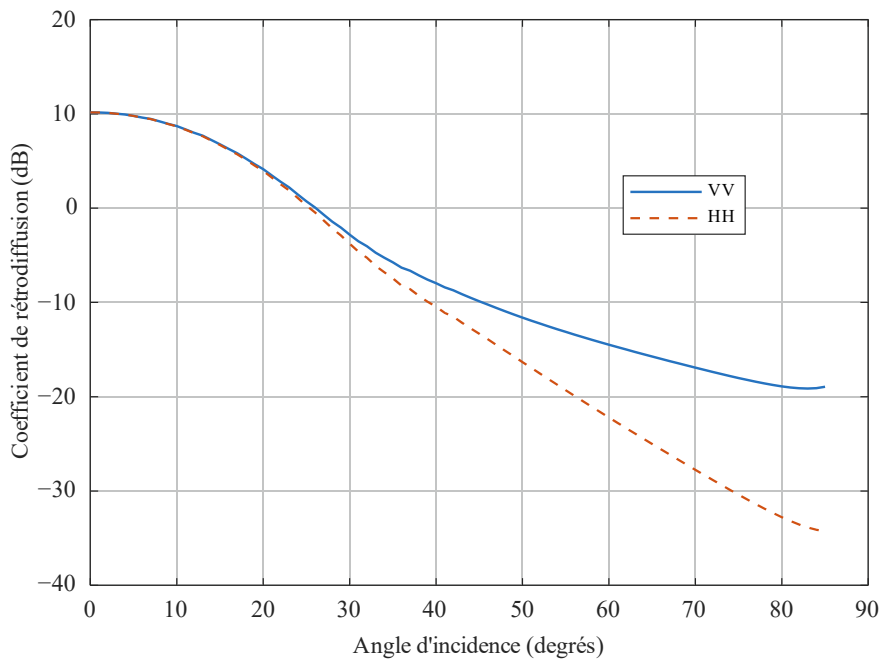
Coefficients de rétrodiffusion en fonction de la vitesse du vent avec différents angles d'incidence  
(fréquence = 13,6 GHz,  $\Omega = 0,84$ , température = 30° C, salinité = 35‰)



P2146-06

FIGURE 7

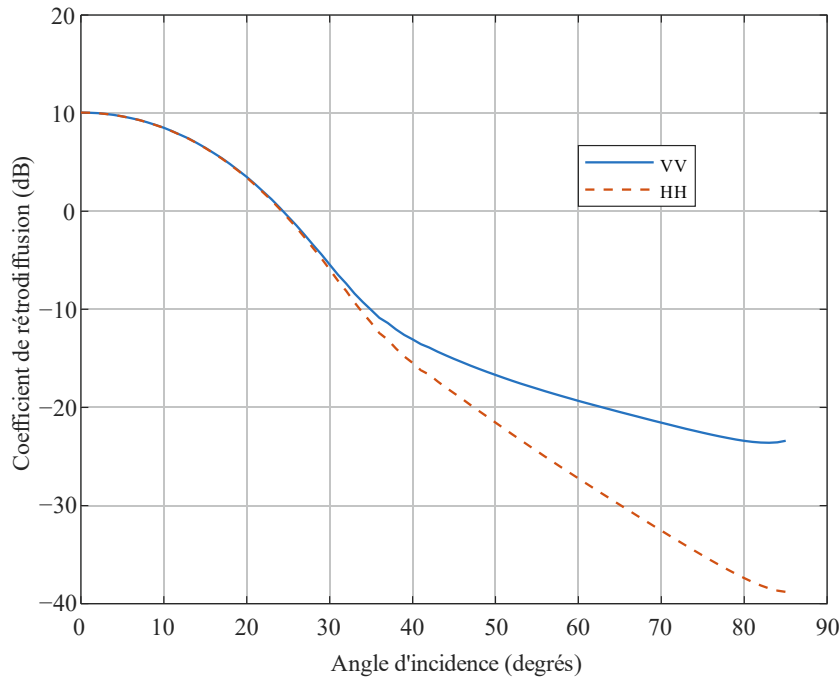
Coefficients de rétrodiffusion au vent en fonction de l'angle d'incidence  
(fréquence = 18,6 GHz,  $\Omega = 0,84$ , température = 30° C,  $U_{10} = 18$  m/s, salinité = 35‰)



P2146-07

FIGURE 8

Coefficients de rétrodiffusion de vent latéral en fonction de l'angle d'incidence  
(fréquence = 18,6 GHz,  $\Omega = 0,84$ , température = 30° C,  $U_{10} = 18$  m/s, salinité = 35‰)



P2146-08

## 8.2 Coefficients de diffusion bistatique à la surface de la mer dans la direction avant

Les coefficients de diffusion bistatique à la surface de la mer dans la direction avant peuvent être utilisés pour évaluer la puissance de brouillage reçue par une antenne de réception. Ces coefficients de diffusion bistatique à la surface de la mer peuvent aussi être utilisés pour calculer la profondeur des évanouissements dus aux réflexions sur la surface de la mer, dont il est question dans la Recommandation UIT-T P.680-3. Ils peuvent être calculés en additionnant la composante cohérente (11) et les composantes diffuses. La composante cohérente sort exclusivement en direction de la réflexion spéculaire ( $\theta_s = \theta_i$ , et  $\varphi_s = \varphi_i$ ). La composante diffuse est définie dans les équations (32) et (72 en posant  $\theta_s = \theta_i \wedge \varphi_s = \varphi_i$ .

Les Fig. 9 à 14 contiennent des exemples de coefficients de diffusion bistatique dans la direction avant. Dans les Fig. 9 et 10, on a réglé l'angle de diffusion (l'angle d'observation de l'antenne de réception) et fait varier l'angle d'incidence (la direction des signaux brouilleurs). Les coefficients de la Fig. 9 sont calculés à 1,227 6 GHz (fréquence L2 du GPS), et ceux de la Fig. 10 sont calculés à 18,6 GHz. Dans chaque figure, les coefficients de diffusion bistatique sont calculés pour deux vitesses du vent différentes:  $U_{10} = 2$  m/s, et  $U_{10} = 25$  m/s.

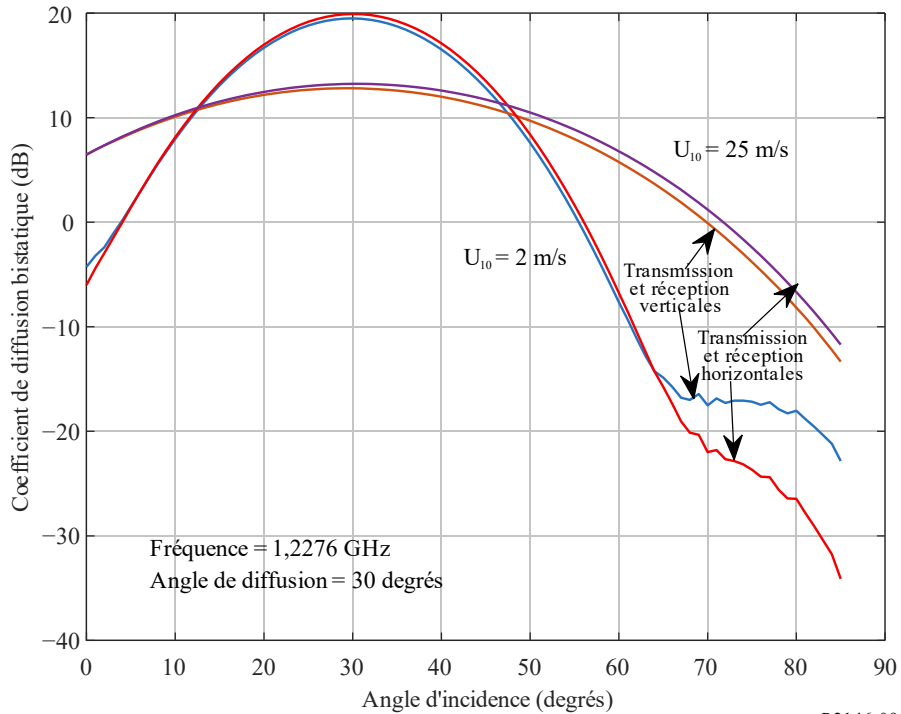
Dans les Fig. 11 à 14, on a réglé l'angle d'incidence (l'angle de la source des brouillages) et fait varier l'angle de diffusion. Les coefficients des Fig. 11 et 13 sont calculés à 1,227 6 GHz, et ceux des Fig. 12 et 14 sont calculés à 18,6 GHz. Ceux des Fig. 11 et 12 sont calculés pour une température de la surface de la mer de 30° C. Ceux des Fig. 13 et 14 sont calculés pour une température de la surface de la mer de 5° C. De plus, dans chacune des Fig. 11 à 14, les coefficients de diffusion bistatique sont calculés pour deux vitesses du vent différentes:  $U_{10} = 2$  m/s, et  $U_{10} = 25$  m/s.

En raison du principe de réciprocité, le réglage de l'angle d'incidence ou de l'angle de diffusion donne des résultats analogues. Par conséquent, la valeur fixe de l'angle de diffusion indiquée dans les Fig. 8 et 9 est différente de celle de l'angle d'incidence des Fig. 11 à 14.

La comparaison des Fig. 11 et 13, et des Fig. 12 et 14 indique que, lorsque la température est supérieure au point de congélation, elle n'a pas d'effet marqué sur le coefficient de diffusion bistatique.

FIGURE 9

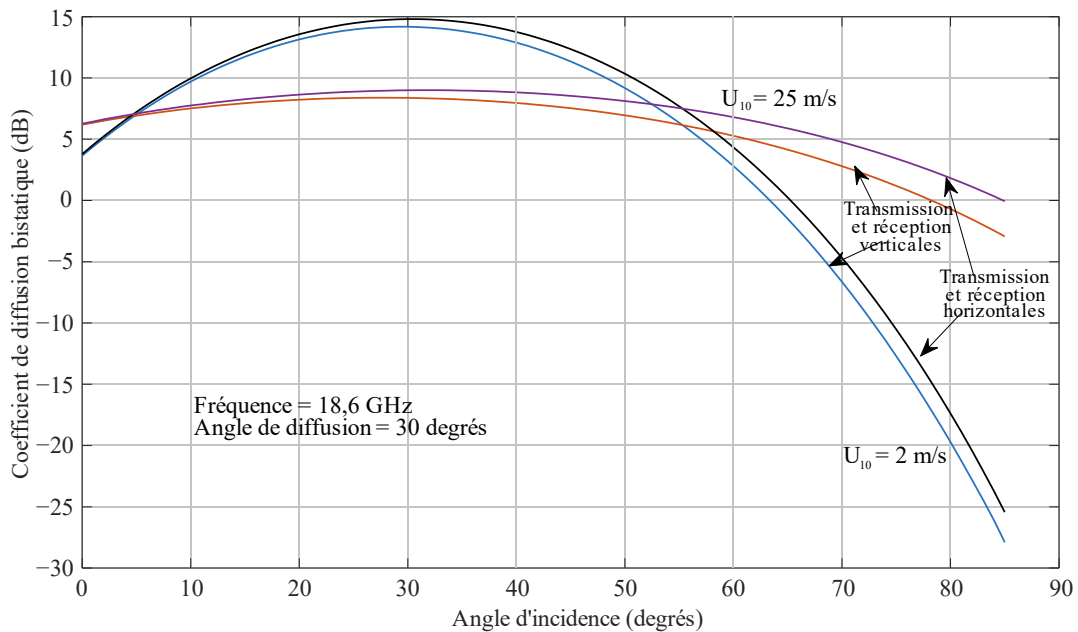
Coefficients de diffusion bistatique dans la direction avant, en fonction de l'angle d'incidence avec différentes valeurs de vitesse du vent ( $\theta_s = 30^\circ$ , fréquence = 1,227 6 GHz,  $\Omega = 0,84$ , température =  $30^\circ$  C, salinité = 35‰)



P2146-09

FIGURE 10

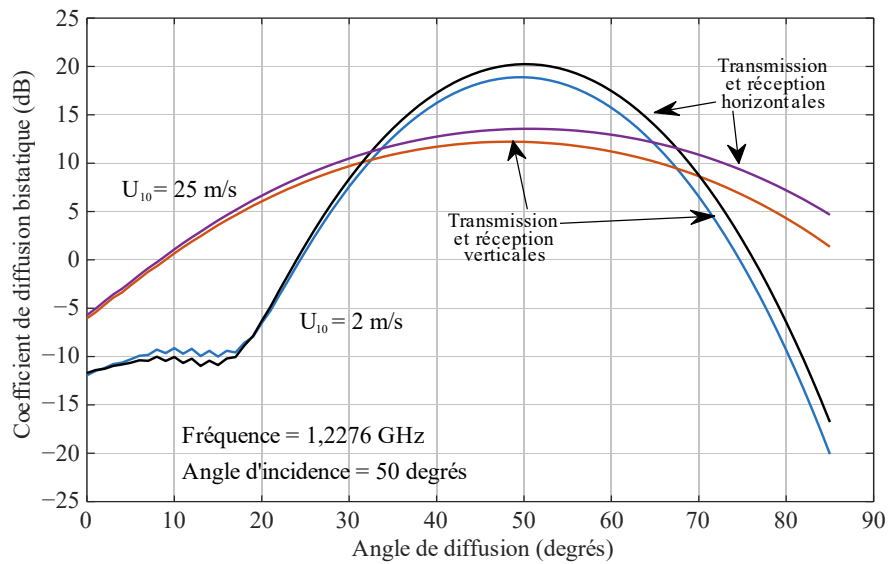
Coefficients de diffusion bistatique dans la direction avant, en fonction de l'angle d'incidence avec différentes valeurs de vitesse du vent ( $\theta_s = 30^\circ$ , fréquence = 18,6 GHz,  $\Omega = 0,84$ , température =  $30^\circ$  C, salinité = 35‰)



P2146-10

FIGURE 11

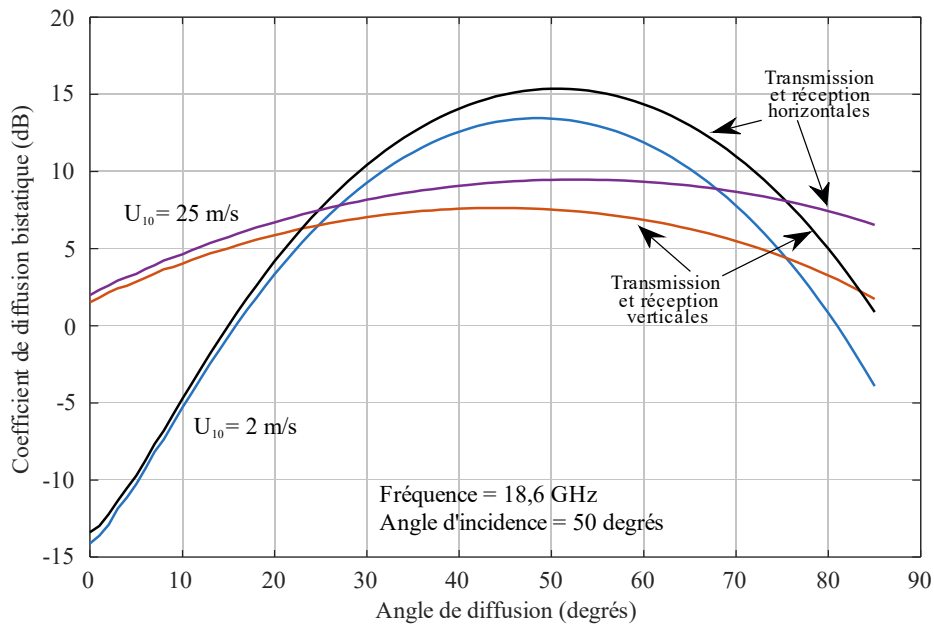
Coefficients de diffusion bistatique dans la direction avant, en fonction de l'angle de diffusion avec différentes valeurs de vitesse du vent ( $\theta_i = 50^\circ$ , fréquence = 1,2276 GHz,  $\Omega = 0,84$ , température = 30 °C, salinité = 35‰)



P2146-11

FIGURE 12

Coefficients de diffusion bistatique dans la direction avant, en fonction de l'angle de diffusion avec différentes valeurs de vitesse du vent ( $\theta_i = 50^\circ$ , fréquence = 18,6 GHz,  $\Omega = 0,84$ , température = 30° C, salinité = 35‰)

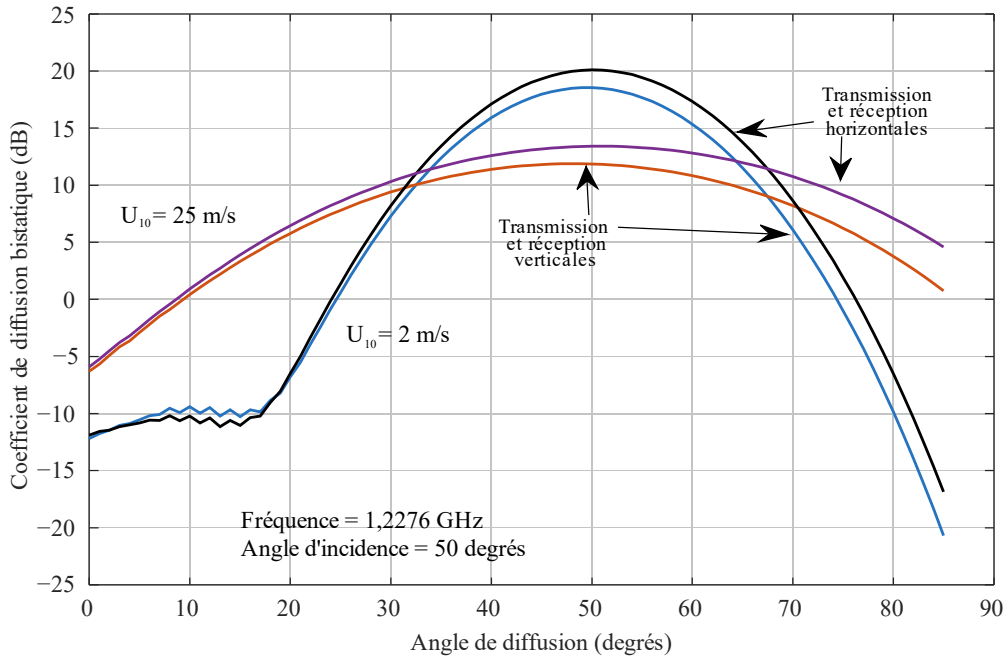


P2146-12



FIGURE 13

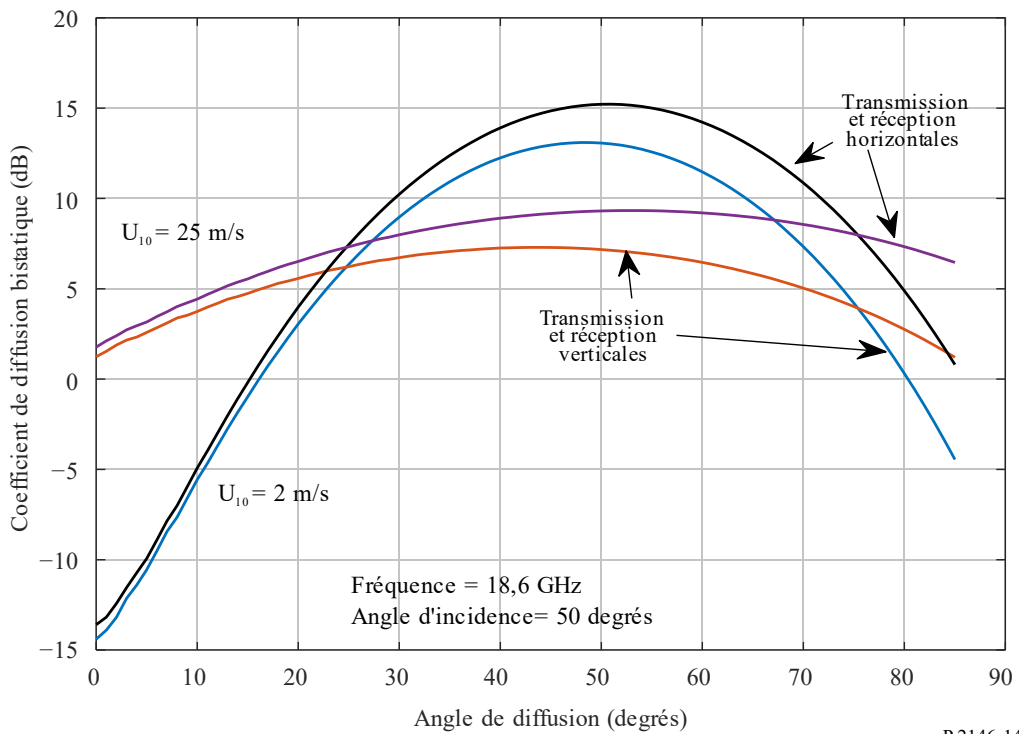
Coefficients de diffusion bistatique dans la direction avant, en fonction de l'angle de diffusion avec différentes valeurs de vitesse du vent ( $\theta_i = 50^\circ$ , fréquence = 1,227 6 GHz,  $\Omega = 0,84$ , température = 5° C, salinité = 35‰)



P.2146-13

FIGURE 14

Coefficients de diffusion bistatique dans la direction avant, en fonction de l'angle de diffusion avec différentes valeurs de vitesse du vent ( $\theta_i = 50^\circ$ , fréquence = 18,6 GHz,  $\Omega = 0,84$ , température = 5° C, salinité = 35‰)



P.2146-14

**Pièce jointe A**  
**à l'Annexe**

**Calcul des coefficients de diffusion entre les ondes à polarisation circulaire  
et les ondes à polarisation linéaire**

La présente Pièce jointe contient les calculs des coefficients de diffusion bistatique entre: a) une onde incidente à polarisation circulaire et une onde diffusée à polarisation linéaire (c'est-à-dire le coefficient  $\gamma_{qc}$ , où  $c$  correspond à la polarisation circulaire dextrogyre,  $R$ , ou à la polarisation circulaire lévogyre,  $L$ , et où  $q$  correspond à la polarisation verticale,  $v$ , ou horizontale,  $h$ ); et b) une onde incidente à polarisation linéaire et une onde diffusée à polarisation circulaire (c'est-à-dire le coefficient  $\gamma_{cq}$ , où  $q$  correspond à la polarisation verticale,  $v$ , ou horizontale,  $h$ , et où  $c$  correspond à la polarisation circulaire dextrogyre,  $R$ , ou à la polarisation circulaire lévogyre,  $L$ ).

**A.1 Rapport entre l'onde incidente à polarisation circulaire et la puissance diffusée linéaire**

Dans ce cas, les composantes du coefficient  $\gamma_{pc}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  de diffusion bistatique cohérente due à la surface de la mer peuvent être obtenues au moyen de l'équation (11), en remplaçant  $r_{pp}(\theta_i)$  par  $r_{pc}(\theta_i)$ , avec:

$$r_{vR}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i) \quad (\text{a.1})$$

$$r_{hR}(\theta_i) = \frac{-j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i) \quad (\text{a.2})$$

$$r_{vL}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i) \quad (\text{a.3})$$

$$r_{hL}(\theta_i) = \frac{j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i) \quad (\text{a.4})$$

$$\text{et } j = \sqrt{-1}.$$

Le coefficient  $\gamma_{pc}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  de diffusion bistatique due à une onde de gravité longue peut être obtenu au moyen de l'équation (32), en remplaçant les facteurs de polarisation  $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  par les facteurs de polarisation  $U_{pc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ , avec:

$$U_{vR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.5})$$

$$U_{hR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.6})$$

$$U_{vL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.7})$$

$$U_{hL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.8})$$

Le coefficient  $\gamma_{pc}^{sh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  de diffusion bistatique due à une onde capillaire courte peut être obtenu au moyen de l'équation (72), en remplaçant les facteurs de polarisation  $G_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  de l'équation (70) par les facteurs de polarisation  $G_{pc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ , avec:

$$G_{vR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.9})$$

$$G_{hR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.10})$$

$$G_{vL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.11})$$

$$G_{hL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.12})$$

## A.2 Rapport entre l'onde incidente linéaire et la puissance diffusée de l'onde à polarisation circulaire

Dans ce cas, les composantes du coefficient  $\gamma_{cq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  de diffusion bistatique cohérente due à la surface de la mer peuvent être obtenues au moyen de l'équation (11), en remplaçant  $r_{pp}(\theta_i)$  par  $r_{cq}(\theta_i)$ , avec:

$$r_{Rv}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i) \quad (\text{a.13})$$

$$r_{Lv}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i) \quad (\text{a.14})$$

$$r_{Rh}(\theta_i) = \frac{j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i) \quad (\text{a.15})$$

$$r_{Lh}(\theta_i) = \frac{-j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i) \quad (\text{a.16})$$

Le coefficient  $\gamma_{cq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  de diffusion bistatique due à une onde de gravité longue peut être obtenu au moyen de l'équation (32), en remplaçant  $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  par  $U_{cq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ , avec:

$$U_{Rv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.17})$$

$$U_{Lv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.18})$$

$$U_{Rh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.19})$$

$$U_{Lh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.20})$$

Le coefficient  $\gamma_{cq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  de diffusion bistatique due à une onde capillaire courte peut être obtenu au moyen de l'équation (72), en remplaçant  $G_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  dans l'équation (70) par  $G_{cq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ , avec:

$$G_{Rv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.21})$$

$$G_{Lv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.22})$$

$$G_{Rh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.23})$$

$$G_{Lh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.24})$$

**Pièce jointe B**  
**à l'Annexe**

**Calcul des coefficients de diffusion entre des ondes à polarisation circulaire**

La présente Pièce jointe contient les calculs des coefficients de diffusion bistatique entre une onde incidente à polarisation circulaire et une onde diffusée à polarisation circulaire (c'est-à-dire le coefficient  $\gamma_{PQ}$ , où  $P$  correspond à la polarisation circulaire dextrogyre,  $R$ , ou à la polarisation circulaire lévogyre,  $L$ , et où  $Q$  correspond à la polarisation circulaire dextrogyre,  $R$ , ou à la polarisation circulaire lévogyre,  $L$ ).

Les composantes du coefficient  $\gamma_{cc}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  de diffusion bistatique due à la surface de la mer peuvent être obtenues au moyen de l'équation (11), en remplaçant  $r_{pp}(\theta_i)$  par  $r_{PQ}(\theta_i)$ , avec:

$$r_{RR}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{r_{vv}(\theta_i) + r_{hh}(\theta_i)\} \quad (\text{b.1})$$

$$r_{RL}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{r_{vv}(\theta_i) - r_{hh}(\theta_i)\} \quad (\text{b.2})$$

$$r_{LR}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{r_{vv}(\theta_i) - r_{hh}(\theta_i)\} \quad (\text{b.3})$$

$$r_{LL}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{r_{vv}(\theta_i) + r_{hh}(\theta_i)\} \quad (\text{b.4})$$

Le coefficient  $\gamma_{PQ}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  de diffusion bistatique due à une onde de gravité longue peut être obtenu au moyen de l'équation (32), en remplaçant  $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  par  $U_{cc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ , avec:

$$U_{RR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j \left( U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (\text{b.5})$$

$$U_{RL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j \left( U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (\text{b.6})$$

$$U_{LR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j \left( U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (\text{b.7})$$

$$U_{LL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j \left( U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (\text{b.8})$$

Le coefficient  $\gamma_{PQ}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  de diffusion bistatique due à une onde capillaire courte peut être obtenu au moyen de l'équation (72), en remplaçant  $G_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$  dans l'équation (70) par  $G_{cc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ , avec:

$$G_{RR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j \left( G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (\text{b.9})$$

$$G_{RL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j \left( G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (\text{b.10})$$

$$G_{LR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j \left( G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (\text{b.11})$$

$$G_{LL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j \left( G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (\text{b.12})$$

**Pièce jointe C  
à l'Annexe**

**Approximations simples**

Pour les angles d'incidence  $\theta_i$  et les angles de diffusion  $\theta_s$  inférieurs à 60 degrés, et pour les angles de diffusion en azimut  $\varphi_s$  compris entre  $\pm 5$  degrés par rapport au plan de diffusion vers l'avant ( $\varphi_s = \varphi_i = 0^\circ$ ), les termes contrapolaires des équations (a.5) à (a.24) pourraient être omis, ce qui conduirait aux simplifications indiquées ci-dessous. Ce faisant, on obtient un taux d'erreur inférieur à 5%. À l'intérieur du plan de diffusion vers l'avant ( $\varphi_s = \varphi_i = 0^\circ$ ), pour les angles d'incidence et de diffusion mentionnés ci-dessus, l'erreur est négligeable.

Onde incidente à polarisation circulaire dextrogyre et puissance diffusée verticale	$\gamma_{vR} = \frac{1}{2} \gamma_{vv}$
Onde incidente à polarisation circulaire dextrogyre et puissance diffusée horizontale	$\gamma_{hR} = \frac{1}{2} \gamma_{hh}$
Onde incidente à polarisation circulaire lévogyre et puissance diffusée verticale	$\gamma_{vL} = \frac{1}{2} \gamma_{vv}$
Onde incidente à polarisation circulaire lévogyre et puissance diffusée horizontale	$\gamma_{hL} = \frac{1}{2} \gamma_{hh}$
Onde incidente à polarisation verticale et puissance diffusée de l'onde à polarisation circulaire dextrogyre	$\gamma_{Rv} = \frac{1}{2} \gamma_{vv}$
Onde incidente à polarisation horizontale et puissance diffusée de l'onde à polarisation circulaire dextrogyre	$\gamma_{Rh} = \frac{1}{2} \gamma_{hh}$
Onde incidente à polarisation verticale et puissance diffusée de l'onde à polarisation circulaire lévogyre	$\gamma_{Lv} = \frac{1}{2} \gamma_{vv}$
Onde incidente à polarisation horizontale et puissance diffusée de l'onde à polarisation circulaire lévogyre	$\gamma_{Lh} = \frac{1}{2} \gamma_{hh}$

**Pièce jointe D  
à l'Annexe**

**Modèle spectral de la hauteur de la surface de la mer**

Le spectre de la hauteur de la surface de la mer est fragmenté en deux spectres: le spectre (de gravité) à grande échelle et le spectre (capillaire) à petite échelle, qui sont désignés par  $W_l(\kappa, \psi)$  et  $W_s(\kappa, \psi)$ , respectivement. Le spectre à grande échelle est mentionné à titre de référence, mais n'est pas directement nécessaire. Le spectre à petite échelle est lié au spectre directionnel de la surface de la mer,  $W(\kappa, \psi)$ , comme suit:

$$W_s(\kappa, \psi) = \begin{cases} 0 & \text{si } \kappa < \kappa_d \\ W(\kappa, \psi) & \text{dans les autres cas} \end{cases} \quad (d.1)$$

où  $\kappa_d$  correspond au nombre d'onde de la hauteur de coupure à deux échelles, et  $(\kappa, \psi)$  désigne les coordonnées polaires des nombres d'ondes de la hauteur, dans la direction au vent et dans la direction

du vent latéral qui sont associées aux coordonnées rectangulaires des pentes de la surface ( $S_w, S_c$ ). Le spectre directionnel  $W(\kappa, \psi)$  est décrit comme suit:

$$W(\kappa, \psi) = \kappa^{-1} S(\kappa) \varphi(\kappa, \psi) \quad (\text{d.2})$$

où  $S(\kappa)$  correspond à la fonction du spectre isotrope (omnidirectionnel), et  $\varphi(\kappa, \psi)$  désigne la fonction d'étalement angulaire. Le spectre isotrope,  $S(\kappa)$ , est décrit comme suit:

$$S(\kappa) = \left( \frac{B_l + B_h}{\kappa^3} \right) G^\gamma \exp \left\{ -1,25 \left( \frac{\kappa_p}{\kappa} \right)^2 \right\} \quad (\text{d.3})$$

et  $B_l$  désigne le spectre d'onde des ondes de gravité longues:

$$B_l = 0,003 \Omega^{0,5} \frac{U_{10}}{\Omega C(\kappa)} \exp \left\{ \frac{-\Omega}{\sqrt{10}} (\sqrt{\kappa/\kappa_p} - 1) \right\} \quad (\text{d.4})$$

$$G = \begin{cases} 1,7 & \text{si } \Omega < 1 \\ 1,7 + 6,0 \log_e(\Omega) & \text{si } 1 \leq \Omega < 5 \\ 2,7 \Omega^{0,57} & \text{si } \Omega \geq 5 \end{cases} \quad (\text{d.5})$$

$$\gamma = \exp \left\{ -(\sqrt{\kappa/\kappa_p} - 1)^2 / 2 \xi^2 \right\} \quad (\text{d.6})$$

$$\xi = \begin{cases} 0,08(1 + 4\Omega^{-3}) & \text{si } \Omega < 5 \\ 0,16 & \text{si } \Omega \geq 5 \end{cases} \quad (\text{d.7})$$

$$C(\kappa) = \sqrt{g \{1 + (\kappa/\kappa_m)^2\}} / \kappa \quad (\text{d.8})$$

$$\kappa_p = g \left\{ \frac{\Omega}{U_{10}} \right\}^2, \quad g = 9,81, \quad \kappa_m = 364,52 \quad (\text{d.9})$$

$B_h$  désigne le spectre d'onde des ondes capillaires courtes:

$$B_h = 0,5 \alpha_m \left( \frac{0,232}{C(\kappa)} \right) \exp \left\{ -0,25 \left( \frac{\kappa}{\kappa_m} - 1 \right)^2 \right\} \quad (\text{d.10})$$

$$\alpha_m = 0,014(u/0,232) \quad (\text{d.11})$$

$$u = U_{10} \sqrt{0,001(0,81 + 0,065 U_{10})} \quad (\text{d.12})$$

et  $\Omega$  désigne l'âge d'onde inverse. La mer est considérée comme étant:

- entièrement levée lorsque les valeurs de  $\Omega$  sont proches de 0,84;
- moyennement agitée lorsque les valeurs de  $\Omega$  sont proches de 1; et
- calme lorsque les valeurs de  $\Omega$  sont supérieures à 2.

$U_{10}$  correspond à la vitesse du vent (généralement comprise entre 3 m/s et 33 m/s), à une hauteur de 10 m au-dessus de la surface de la mer, et  $u$  désigne la vitesse de frottement (c'est-à-dire la vitesse du vent à la surface de la mer). Dans l'équation (d.3),  $\gamma$  correspond à la tension superficielle de l'eau, et dans l'équation (d.5),  $g$  désigne l'accélération de l'eau due à la gravité, en  $\text{m/s}^2$ .

La fonction d'étalement angulaire  $\varphi(\kappa, \psi)$  qui figure dans l'équation (d.2) fournit la dépendance azimutale du spectre directionnel  $W(\kappa, \psi)$ , comme suit:

$$\varphi(\kappa, \psi) = \frac{1}{2\pi} \{1 + \Delta(\kappa) \cos(2\psi)\} \quad (\text{d.13})$$

où  $\psi$  correspond à la direction au vent, et  $\Delta(\kappa)$  désigne l'amplitude de la dépendance angulaire:

$$\Delta(\kappa) = \tanh \left\{ \frac{\log_e(2)}{4} + 4 \left( \frac{\Omega C(\kappa)}{U_{10}} \right)^{2,5} + \frac{0,13u}{0,232} \left( \frac{0,232}{C(\kappa)} \right)^{2,5} \right\} \quad (\text{d.14})$$

Il convient de noter que, dans l'équation (d.4), la valeur de  $C(\kappa)$  est  $\infty$  lorsque  $\kappa$  a une valeur nulle. Cependant, lorsque  $\kappa$  a une valeur nulle,  $S(\kappa)$  a également une valeur nulle. Par conséquent, lorsque  $\kappa = 0$ , on fixe  $S(\kappa) = 0$ , sans effectuer de calculs supplémentaires.

## Pièce jointe E à l'Annexe

### Puissance de brouillage d'un signal réfléchi par la surface de la mer vers un récepteur

#### E.1 Introduction

La puissance de diffusion bistatique  $P_{rp}$  venant de la surface de la mer reçue par une antenne de réception à polarisation linéaire  $p$  est la somme de deux composantes: une composante cohérente  $P_{cp}$ , et une composante diffuse (incohérente)  $P_{dp}$ .

$$P_{rp} = P_{cp} + P_{dp} \quad (\text{e.1})$$

On trouvera dans les paragraphes ci-après les calculs de la puissance reçue, pour: a) le cas de figure général; et b) les approximations relatives au cas particulier d'un émetteur en orbite terrestre géostationnaire et d'un récepteur en orbite terrestre basse.

#### E.2 Puissance cohérente reçue

Pour les polarisations linéaires d'émission (incidence) et de réception (diffusion) identiques,  $p$ , la puissance cohérente reçue,  $P_{cp}$  (W), est calculée comme suit:

$$P_{cp} = \frac{P_{tp} G_{tp} L_{tp}}{4\pi(R_t + R_r)^2} \frac{\lambda^2 G_{rp} L_{rp} L_d}{4\pi} \gamma_{pp}^c \quad (\text{W}) \quad (\text{e.2})$$

où:

- $P_{tp}$ : puissance émise avec une polarisation  $p$  (W)
- $G_{tp}$ : gain de l'antenne d'émission en direction du point de réflexion à la surface de la Terre (linéaire)
- $R_t$ : distance entre l'émetteur et le point de réflexion spéculaire à la surface de la Terre (m)
- $R_r$ : distance entre le point de réflexion spéculaire à la surface de la Terre et l'antenne de réception (m)
- $G_{rp}$ : gain de l'antenne de réception dans la direction du point de réflexion spéculaire à la surface de la Terre (linéaire)
- $L_{tp}$ : affaiblissement atmosphérique (par exemple, affaiblissement par les gaz) le long du trajet entre le brouilleur et le point de réflexion spéculaire. L'affaiblissement par les gaz,  $A_{gas}$  (dB), peut être calculé selon la méthode décrite dans l'Annexe 1 ou l'Annexe 2 de la Recommandation UIT-R P.676-12, auquel cas  $L_{tp} = 10^{-A_{gas}/10}$



$L_{rp}$  : affaiblissement atmosphérique (par exemple, affaiblissement par les gaz) le long du trajet entre le point de réflexion spéculaire et l'antenne de réception. L'affaiblissement par les gaz,  $A_{gas}$  (dB), peut être calculé selon la méthode décrite dans l'Annexe 1 ou l'Annexe 2 de la Recommandation UIT-R P.676-12, auquel cas  $L_{rp} = 10^{-A_{gas}/10}$

$\lambda$  : longueur d'onde (m)

$L_d$  : affaiblissement par divergence dû à la courbure de la Terre, décrit par:

$$L_d = \frac{1}{\left[ \left( 1 + \frac{2R_e}{a \cos \theta} \right) \left( 1 + \frac{2R_e \cos \theta}{a} \right) \right]} \quad (e.3)$$

où:

$a$  : rayon moyen de la Terre (6 371 000 m)

$R_e$  : distance réelle  $R_e = \frac{R_t R_r}{R_t + R_r}$  (m)

$\theta$  : angle zénithal d'incidence.

### E.2.1 Émetteur en orbite terrestre géostationnaire et récepteur en orbite terrestre basse: composante cohérente

Pour la composante de réflexion spéculaire,  $R_t + R_r$  correspond à la distance totale et  $4\pi(R_t + R_r)^2$  est l'affaiblissement par étalement.  $P_{tp}G_{tp}$  correspond à la puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.). Pour un émetteur en orbite terrestre géostationnaire et un récepteur en orbite terrestre basse, l'approximation selon laquelle  $R_t + R_r \cong R_t$  introduit un faible pourcentage d'erreur dans le terme cohérent. Dans ce cas, l'équation (e.2) devient:

$$P_{cp} = \frac{P_{tp}G_{tp}L_{tp}}{(4\pi R_t)^2} \lambda^2 G_{rp} L_{rp} L_d \gamma_{pp}^c \quad (W) \quad (e.4)$$

$\gamma_{pp}^c$  est le coefficient de diffusion bistatique cohérent donné par l'équation (11) pour les ondes incidentes à polarisation linéaire et les ondes diffusées à polarisation linéaire. Les transformations de polarisation décrites dans les Pièces jointes A, B et C peuvent être utilisées pour d'autres combinaisons de polarisation des ondes incidentes et diffusées.

### E.3 Puissance reçue diffuse

La puissance reçue diffuse,  $P_{dp}$  (W), peut être calculée au moyen de l'équation classique associée aux radars bistatiques (à savoir l'équation (73) de la Recommandation UIT-R P.452-16). La puissance diffusée diffuse reçue par une antenne avec une polarisation  $p$  et une polarisation d'émission  $q$  est décrite comme suit:

$$P_{dp} = P_{tq} \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \iint \frac{G_{rp}(\hat{k}_i) G_{tq}(\hat{k}_s)}{r_t^2 r_r^2} L_{tq}(\hat{k}_i) \gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \cos \theta_s L_{rp}(\hat{k}_s) dA \quad (W) \quad (e.5)$$

où:

$P_{tq}$  : puissance d'émission avec une polarisation  $q$  (W)

$\hat{k}_i$  : direction d'incidence au niveau de la zone de diffusion différentielle

$\hat{k}_s$  : direction de diffusion au niveau de la zone de diffusion différentielle

$G_{rp}(\hat{k}_i)$  : gain de l'antenne d'émission dans la direction d'incidence  $\hat{k}_i$  (linéaire)

$G_{tq}(\hat{k}_s)$  : gain de l'antenne de réception dans la direction de réception  $\hat{k}_s$  (linéaire)

$dA$  : zone de diffusion différentielle à la surface (m<sup>2</sup>)

- $r_t$  : distance entre l'émetteur et la zone de diffusion différentielle à la surface de la Terre (m)
- $r_r$  : distance entre la zone de diffusion différentielle à la surface de la Terre et le récepteur (m).

**E.3.1 Émetteur en orbite terrestre géostationnaire et récepteur en orbite terrestre basse: composante de diffusion**

Dans l'approximation ci-après, on considère que le gain de l'antenne d'émission est constant à l'intérieur de l'empreinte de l'antenne de réception (il s'agit d'une hypothèse raisonnable pour un émetteur en orbite terrestre géostationnaire avec une antenne à gain moyen, et un récepteur en orbite terrestre basse avec un gain d'antenne élevé), et que les distances entre l'antenne d'émission et la surface de la Terre, et entre la surface de la Terre et l'antenne de réception ne varient pas significativement à l'intérieur de l'empreinte de l'antenne de réception. Par conséquent, l'approximation de l'équation (e.5) est décrite comme suit:

$$P_{dp} \cong \frac{P_{tq} G_{tq} \lambda^2 L_{tq}(\hat{k}_i) L_{rp}(\hat{k}_s)}{(4\pi R_t)^2} \gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_{s0}, \hat{k}_{i0}) \tag{e.6}$$

où:

- $\hat{k}_{i0}$  : direction d'incidence au niveau de la zone de diffusion différentielle, le long du faisceau principal de l'antenne d'émission
- $\hat{k}_{s0}$  : direction de diffusion au niveau de la zone de diffusion différentielle le long du faisceau principal de l'antenne de réception
- $R_t$  : distance entre l'émetteur et le centre de l'empreinte, à la surface de la Terre, illuminée par l'antenne d'émission (m).

Les transformations de polarisation décrites dans les Pièces jointes A, B et C peuvent être utilisées pour calculer  $\gamma_{pq}^{dif}(\vec{r}_{t0}, \vec{r}_{r0})$ , pour les ondes incidentes et diffusées à polarisation autre que linéaire-linéaire ou circulaire-circulaire.

