



## Rayonnement infrarouge de la surface de mer

### Sea surface infrared radiation

---

*Hongkun Li\**, *Nicolas Pinel\**, *Christophe Bourlier\**

\*LUNAM Université - Université de Nantes - Laboratoire IETR  
 {hongkun.li, nicolas.pinel, christophe.bourlier}@univ-nantes.fr

---

Mots-clés : émissivité infrarouge, réflectivité infrarouge, réflexions multiples, surface de mer  
 infrared emissivity, infrared reflectivity, multiple reflections, sea surfaces

---

#### Résumé

L'émissivité et la réflectivité d'une surface de mer sont des paramètres importants dans le domaine océanique. Pour des angles d'observation rasants, ces quantités dépendent fortement de la rugosité de la surface de la mer qui induit les phénomènes d'ombrage et de réflexions multiples. Cependant, les réflexions multiples sont souvent négligées, ce qui conduit à une perte d'énergie. Cet article a pour but de modéliser analytiquement l'émissivité et la réflectivité d'une surface de mer mono-dimensionnelle (problème 2D) en prenant en compte l'effet de l'ombrage et des réflexions multiples. Le modèle est validé par une méthode de tracé de rayons de Monte-Carlo. De bons accords sont observés. Le critère de conservation de l'énergie est alors examiné. Il est satisfait pour des angles d'observation faibles à modérés lorsque seules l'émissivité directe et la réflectivité avec une réflexion sont considérées. Après la prise en compte de l'émissivité avec une réflexion et de la réflectivité avec deux réflexions, le critère de conservation de l'énergie est encore mieux satisfait.

#### 1. Introduction

Le rayonnement infrarouge d'une surface de mer est déterminé par son émissivité et sa réflectivité. Pour des angles d'observation rasants (proches de l'horizon), ces quantités dépendent fortement de la rugosité de la surface de mer qui induit les phénomènes d'ombrage et de réflexions multiples. Dans la littérature, les réflexions multiples sont souvent négligées, ce qui conduit à une perte d'énergie [1] lorsqu'on examine le critère de conservation de l'énergie.

Cet article a pour but de modéliser analytiquement l'émissivité et la réflectivité d'une surface de mer sous l'approximation de l'optique géométrique (GO) en prenant en compte l'effet de l'ombrage et des réflexions multiples. Des surfaces mono-dimensionnelles (problèmes 2D) sont considérées pour plus de simplicité.

#### 2. Emissivité infrarouge d'une surface de mer

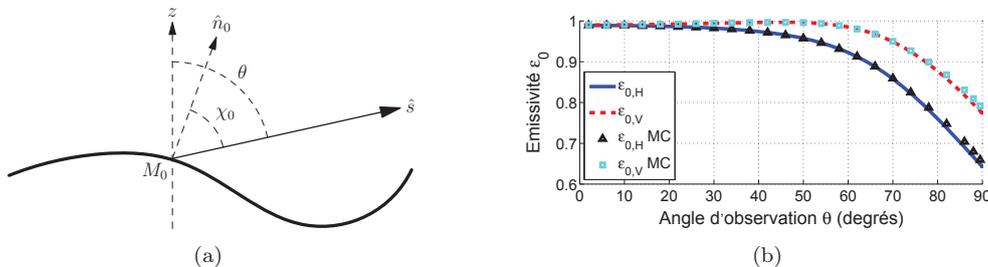
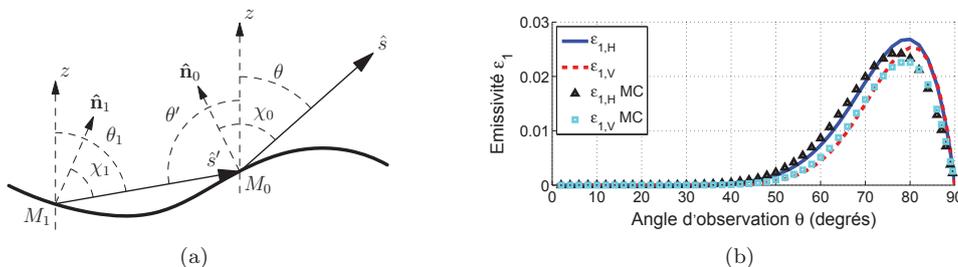
##### 2.1. Emissivité directe $\varepsilon_0$

L'émissivité infrarouge directe  $\varepsilon_0$  d'une surface de mer, qui est illustrée dans la figure 1(a), correspond au rayonnement intrinsèque de la surface se propageant directement vers le récepteur (sans réflexion). Cette section se base sur les travaux de Bourlier *et al.* [2] pour la calculer, en prenant en compte l'effet d'ombrage par la fonction d'illumination de Smith [3].

Les résultats sont présentés et comparés avec ceux d'une méthode de tracé de rayons de Monte-Carlo sur la figure 1(b), pour une vitesse du vent  $u_{12}$  de 10 m/s définie à 12.5 m au-dessus de la mer et pour une longueur d'onde  $\lambda$  de 10  $\mu\text{m}$ . De très bons accords sont observés quel que soit l'angle d'observation  $\theta$ . L'émissivité infrarouge directe  $\varepsilon_0$  est proche de 1 lorsque  $\theta$  est faible ( $\theta < 40^\circ$ ). Elle diminue pour les angles importants.

##### 2.2. Emissivité avec une réflexion $\varepsilon_1$

Des comparaisons avec des mesures ont montré que les modèles sans réflexion sous-estiment l'émissivité infrarouge d'une surface de mer parce que les réflexions par la surface ne sont pas prises en compte. Cette section se base sur nos travaux [4] pour calculer l'émissivité infrarouge avec une réflexion.

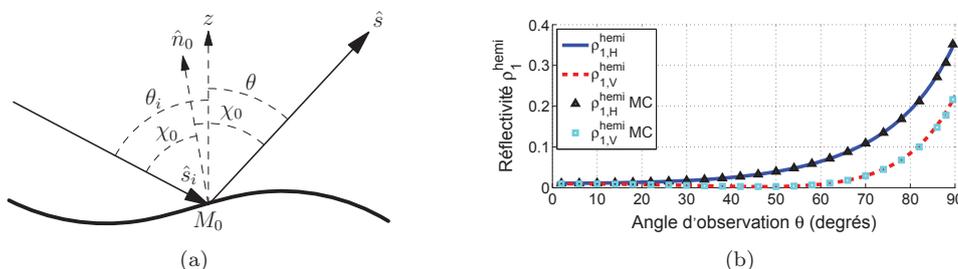

 FIGURE 1 – Emissivité infrarouge sans réflexion  $\varepsilon_0$  (a) et simulation (b) pour  $u_{12} = 10$  m/s et  $\lambda = 10 \mu\text{m}$ .

 FIGURE 2 – Emissivité infrarouge avec une réflexion  $\varepsilon_1$  (a) et simulation (b) pour  $u_{12} = 10$  m/s et  $\lambda = 10 \mu\text{m}$ .

Les résultats associés sont présentés sur la figure 2(b) pour les mêmes paramètres. Les simulations montrent que l'émissivité avec une réflexion  $\varepsilon_1$  contribue aux angles d'observation importants. Le modèle est en bon accord avec la méthode de tracé de rayons de Monte-Carlo, avec une légère surestimation pour  $\theta > 80^\circ$ .

### 3. Réflectivité infrarouge d'une surface de mer

#### 3.1. Réflectivité avec une réflexion $\rho_1$

La réflectivité infrarouge avec une réflexion d'une surface de mer correspond au rayonnement de l'atmosphère réfléchi une fois par la surface dans la direction d'observation  $\theta$  (illustré sur la figure 3(a)).


 FIGURE 3 – Réflectivité infrarouge avec une réflexion  $\rho_1$  (a) et simulation de sa moyenne hémisphérique  $\rho_1^{\text{hemi}}$  (b) pour  $u_{12} = 10$  m/s et  $\lambda = 10 \mu\text{m}$ .

Cette section se base sur le modèle de Bourlier *et al.* [5] pour calculer la réflectivité  $\rho_1$  d'une surface de mer avec une réflexion. La réflectivité moyenne hémisphérique  $\rho_1^{\text{hemi}}$  (moyenne sur l'hémisphère supérieur  $-\pi/2 < \theta_i < \pi/2$ ) est calculée et présentée dans la figure 3(b) pour  $u_{12} = 10$  m/s et  $\lambda = 10 \mu\text{m}$ . De très bons accords sont observés entre le modèle et la méthode de tracé de rayons de Monte-Carlo quel que soit l'angle d'observation  $\theta$ .  $\rho_1^{\text{hemi}}$  est significative pour les  $\theta$  importants ( $\theta > 50^\circ$ ).

#### 3.2. Réflectivité avec deux réflexions $\rho_2$

La réflectivité infrarouge avec deux réflexions  $\rho_2$ , qui est illustrée dans la figure 4(a), correspond au rayonnement de l'atmosphère réfléchi deux fois par la surface dans la direction d'observation  $\theta$ .

Puisqu'il n'y a pas de modèle de réflectivité d'une surface de mer prenant en compte deux réflexions dans la littérature, elle est calculée dans cette section à partir de l'extension du modèle avec une réflexion [5]. La probabilité d'observer deux réflexions par la surface est estimée par la fonction d'illumination bistatique  $S_2^B$  de Lynch et Wagner [6].

La réflectivité moyenne hémisphérique  $\rho_2^{\text{hemi}}$  est présentée sur la figure 4(b) pour  $u_{12} = 10$  m/s et  $\lambda = 10 \mu\text{m}$ . En général, d'assez bons accords sont observés. La forme est bien estimée, mais le niveau est surestimé pour  $\theta > 60^\circ$  à cause de la mauvaise estimation de la fonction d'illumination  $S_2^B$ .

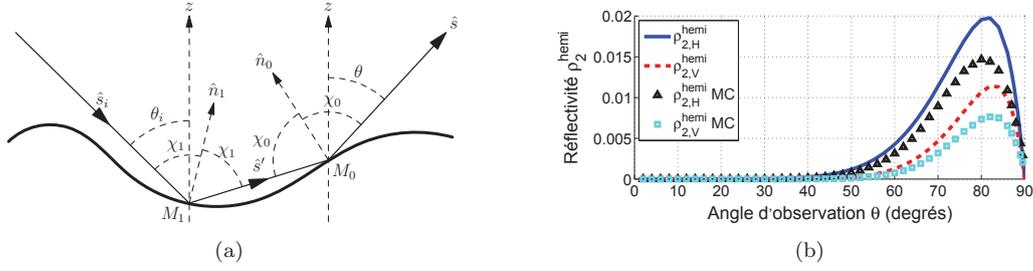


FIGURE 4 – Réflectivité avec deux réflexions  $\rho_2$  (a) et simulation de sa moyenne hémisphérique  $\rho_2^{\text{hemi}}$  (b) pour  $u_{12} = 10$  m/s et  $\lambda = 10$   $\mu\text{m}$ .

#### 4. Conservation de l'énergie

La loi de conservation de l'énergie implique, en équilibre thermique, que la somme de l'énergie absorbée (donc réémise) et l'énergie réfléchi est égale l'énergie reçue. Ainsi :

$$\varepsilon + \rho^{\text{hemi}} = 1. \quad (1)$$

Ce critère est examiné sur la figure 5, pour les mêmes paramètres que précédent. Les résultats sur la figure 5(a) montrent que le critère de conservation de l'énergie est satisfait pour des angles d'observation faibles à modérés ( $\theta < 40^\circ$ ). Pour  $\theta > 40^\circ$ , une perte d'énergie est observée lorsque seules l'émissivité directe  $\varepsilon_0$  et la réflectivité avec une réflexion  $\rho_1^{\text{hemi}}$  sont considérées.

Après la prise en compte de l'émissivité avec une réflexion  $\varepsilon_1$  (figure 5(b)), le critère de conservation de l'énergie est satisfait pour  $\theta < 50^\circ$ . Il est mieux satisfait après la prise en compte de la réflectivité avec deux réflexions  $\rho_2^{\text{hemi}}$  (figure 5(c)). Le maximum de la perte d'énergie est alors d'environ 0.005.

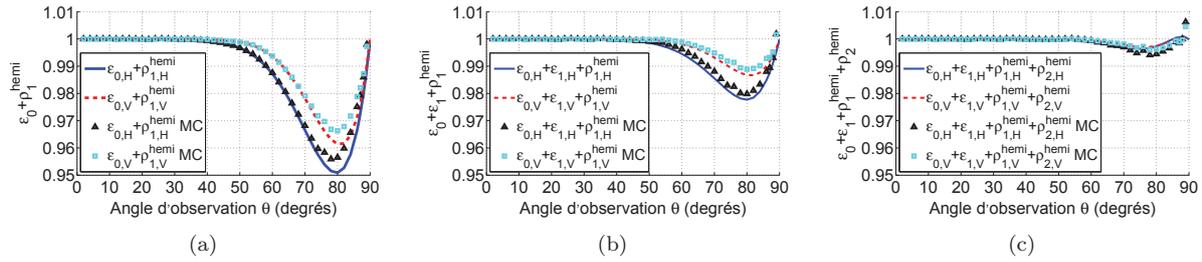


FIGURE 5 – Examen du critère de conservation de l'énergie pour  $u_{12} = 10$  m/s et  $\lambda = 10$   $\mu\text{m}$ .

#### 5. Conclusion

Cet article calcule l'émissivité et la réflectivité d'une surface de mer. Le critère de conservation de l'énergie est examiné. Il est satisfait pour des angles d'observation faibles à modérés lorsque seules l'émissivité directe et la réflectivité avec une réflexion sont considérées. Nous avons montré qu'après la prise en compte de l'émissivité avec une réflexion et de la réflectivité avec deux réflexions, le critère de conservation de l'énergie est mieux satisfait.

#### Références

- [1] K. Yoshimori, K. Itoh, and Y. Ichioka. Thermal radiative and reflective characteristics of a wind-roughened water surface. *J. Opt. Soc. Am. A*, 11(6) :1886–1893, June 1994.
- [2] C. Bourlier. Unpolarized infrared emissivity with shadow from anisotropic rough sea surfaces with non-Gaussian statistics. *Appl. Opt.*, 44(20) :4335–4349, 2005.
- [3] B. Smith. Geometrical shadowing of a random rough surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 15(5) :668–671, 1967.
- [4] H. Li, N. Pinel, and C. Bourlier. Polarized infrared emissivity of one-dimensional Gaussian sea surfaces with surface reflections. *Appl. Opt.*, 50(23) :4611–4621, 2011.
- [5] C. Bourlier, J. Saillard, and G. Berginc. Theoretical study on two-dimensional gaussian rough sea surface emission and reflection in the infrared frequencies with shadowing effect. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(2) :379–392, 2001.
- [6] P. J. Lynch and R. J. Wagner. Rough-surface scattering : Shadowing, multiple scatter, and energy conservation. *Journal of Mathematical Physics*, 11 :3032–3042, 1970.