

Influence de la Couche Atmosphérique Marine sur la Propagation Electromagnétique

L.J. Navarro, A.M.J. Van Eijk, G.J. Kunz, A. Phelippeau-Gosselin²
Laboratoire de Physique et d'Electronique TNO, P.O. Box 96864,
2509 JG La Haye, Pays-Bas

P.G. Mestayer
Laboratoire de Mécanique des Fluides UMR CNRS 6598,
Ecole Centrale de Nantes, B.P 92101, 44321 Nantes Cedex, France

Mots Clés : Csam, vague, aérosols marins, réfraction, transmission

Résumé

En milieu marin, la prédiction de la propagation électromagnétique nécessite la connaissance des conditions de réfraction et de transmission atmosphérique. La détermination de l'indice de réfraction demande une bonne connaissance des profils de température, et d'humidité dans la couche de surface marine en particulier près de la surface. L'étude menée avec le traceur de rayon ARTEAM couplé aux modèles L.K.B., TARMOS et SeaCluse a montré que les conditions de surface (hauteur des vagues) ont une plus grande influence sur les prédictions du traceur que l'incertitude sur les paramètres météorologiques. L'utilisation de TARMOS et de SeaCluse pour la couche limite a permis de montrer qu'il est difficile de prédire correctement la propagation électromagnétique en se limitant à la couche de surface. La prise en compte d'un profil de turbulence sur toute la couche limite est nécessaire.

Abstract

The assessment of refractive effects requires a detailed knowledge of the vertical profiles of temperature, humidity and pressure, generally supplied by micro-meteorological (bulk) models. Such models only apply to the surface layer, and do not take into account the particularities of the lower marine atmosphere, such as the presence of waves and aerosols. A sensitivity study with the Dutch ray-tracer ARTEAM has shown that a proper prediction of refractive effects relies heavily on a detailed characterization of the wave surface, whereas a bias in meteorological observations is relatively acceptable. A comparison of various models to generate the required input profiles for the ray-tracer has indicated the benefits of including turbulence and boundary layer effects in these models.

1. Introduction

Dans la basse couche atmosphérique marine, les performances des appareils électromagnétiques de surveillance sont étroitement dépendantes des conditions de propagation. Dans ce papier, l'accent va être mis sur les phénomènes de réfraction important dans la modélisation de la

propagation électro-optique et radar. Selon les conditions météorologiques, une perte de transmission, des zones de mirages, d'ombre ou une variation de l'horizon optique peuvent apparaître. La Figure 1 illustre ces problèmes en présentant un exemple de tracé de rayons optiques en projection usuelle sur une surface plate pour les conditions météorologiques de la Table 1. Elle montre une réduction de l'horizon

² Adresse actuelle: Ecole Supérieure des Ingénieurs des Etudes et Techniques d'Armements. Brest - France

optique entraînant une zone d'ombre où les cibles sont indétectables. D'autre part, le chevauchement des trajets optiques caractérise une zone de mirage. Dans ce cas, les ondes électromagnétiques peuvent emprunter soit un chemin court soit un chemin long via la couche de réflectance. L'interprétation des mesures peut faire croire alors à la présence de deux cibles et non d'une seule.

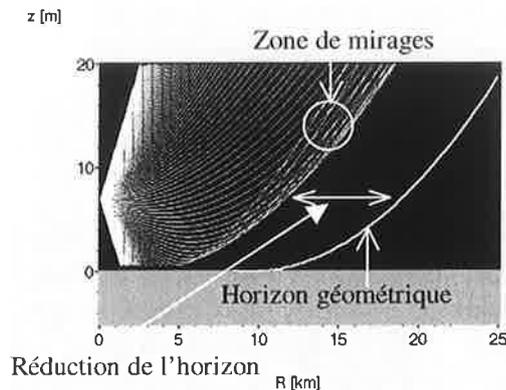


Figure 1: Exemple de tracé de rayon optique en projection usuelle sur une surface plate pour les conditions météorologiques de la Table 1.

La propagation électromagnétique est principalement fonction de l'indice de réfraction de l'air et de la transmission atmosphérique. La transmission atmosphérique dépend elle-même de la composition de l'air (molécules, aérosols marins, pollution, sable...). L'indice de réfraction atmosphérique est une fonction de la température, de la vapeur d'eau et de la pression atmosphérique, [1]. Dans le visible et dans l'infrarouge proche et moyen, la température est le facteur primordial. Dans le domaine des micro-ondes, l'humidité devient la variable principale.

Pour prédire les performances des appareils, des modèles ont été développés tant pour la transmission que pour la réfraction. Le traceur de rayons ARTEAM (Advanced Ray Tracing in the Earth's Atmosphere Model) est en cours de développement au sein du Laboratoire d'Electronique et de Physique de TNO (TNO-FEL) aux Pays-Bas, voir [2]. Ces modèles de transmission et de réfraction nécessitent un

couplage avec les données météorologiques qui sont généralement déterminées à partir de paramétrisations semi-empiriques déduites de la théorie de Monin-Obukhov connues sous le nom de modèles « bulk ». Dans le cas de ARTEAM, on utilise le modèle TARMOS (Turbulent And Refraction Modelling Over the Sea), [3].

Des expériences ont montré que ces modèles de réfraction et de transmission sont moins performants près de la surface de la mer, surtout dans les dix premiers mètres.

Certaines particularités de la basse atmosphère marine peuvent expliquer ces baisses de qualités. La surface de la mer étant ondulée, engendre des modifications dans les profils de température, d'humidité et de pression par rapport à ceux que l'on observe au-dessus d'une surface plate. Ces modifications ne sont pas prises en compte par les modèles « bulk » utilisant l'hypothèse d'une surface plate pour déterminer les profils de température et d'humidité. Pour un champ de vague généré par l'action du vent, les modifications dues à la présence des vagues deviennent significatives par vent fort car la hauteur des vagues devient importante.

En plus de supposer une surface plate, ces modèles sont basés sur la théorie de Monin-Obukhov. Or dans certaines conditions météorologiques très fortement stables, la couche de surface peut avoir une très faible épaisseur, voire pas plus de 5 mètres, à la limite des hypothèses de couche de surface et de la théorie de Monin-Obukhov.

Une autre particularité de la basse atmosphère marine réside dans la présence d'aérosols marins, particules composées de sel et d'eau. Ces aérosols marins interviennent directement dans la transmission par absorption et diffusion du rayonnement mais aussi indirectement par leur évaporation partielle lorsqu'ils sont injectés dans l'atmosphère à partir de la surface. En effet lors de leur séjour dans l'atmosphère, afin de trouver un état d'équilibre avec les champs de température et d'humidité atmosphériques, ils s'évaporent partiellement (ou recondensent la vapeur d'eau). Leurs transformations thermodynamique modifient donc les profils de

température et d'humidité entraînant aussi des changements dans le profil vertical d'indice de réfraction atmosphérique.

La détermination des profils verticaux de température, d'humidité et donc de réfraction dans la basse atmosphère marine nécessite donc la prise en compte de la présence des vagues et des aérosols marins par les modèles. Le modèle SeaCluse a été développé dans le cadre d'une coopération entre TNO-FEL et l'Ecole Centrale de Nantes pour prendre en compte les particularités de la basse troposphère marine, l'influence des vagues et le rôle des aérosols marins, [4].

Après avoir détaillé de façon succincte, les principales caractéristiques du modèle SeaCluse et du traceur de rayon ARTEAM, ce papier analyse l'influence des paramètres météorologiques et caractéristiques des vagues sur le profil vertical d'indice de réfraction de l'air à travers les prédictions de la distance minimale d'apparition des mirages, MMR, et de la distance maximale d'inter visibilité, MIVR. Il présente aussi les performances obtenues avec ARTEAM et différents modèles météorologiques fournissant les profils de température et d'humidité.

2. Le modèle SeaCluse

Ce modèle numérique Eulerien 1D vertical simule la dynamique des aérosols marins dans un écoulement d'air turbulent au-dessus des vagues [4], leurs transformations thermodynamiques [5] et l'influence des gouttelettes sur les flux de chaleur et de vapeur d'eau dans la basse atmosphère marine [6]. Les principales originalités du modèle SeaCluse résident dans la prise en compte de l'influence des vagues dans un pré-processeur météorologique 2D et dans la résolution simultanée de la dynamique et de la thermodynamique des aérosols marins. Le passage du 2D au 1D s'effectue en moyennant les flux des grandeurs le long de la vague. Le cœur du modèle résout les équations de conservations pour les aérosols, la chaleur, et la vapeur d'eau qui sont couplées du fait des

échanges thermodynamique de l'air et des gouttelettes. En sortie, le modèle SeaCluse fournit des profils verticaux moyens de température, d'humidité, de flux de température ou d'humidité et de concentration d'aérosols marins. Actuellement, il existe deux versions du modèle SeaCluse: la première se limite à la couche de surface (S.SL) et la seconde simule la couche limite jusqu'au sommet de la couche de mélange (S.BL), [7]. Dans la première version, le profil de diffusivité turbulente est obtenu à partir de la théorie de la couche de surface de Monin-Obukhov et dans la seconde version ce profil est étendu à l'aide d'une version simplifiée du modèle de Kantha et Clayson, [8]. Les Figures 2 et 3 donnent des exemples de résultats fournis par le modèle SeaCluse en montrant respectivement les profils verticaux de température, et de concentration de particules de $30\mu\text{m}$ de rayon. L'axe des ordonnées de droite correspond à l'altitude normalisée par l'amplitude de la vague dominante, z/H_0 . La crête des vagues se situe donc à $0,5H_0$.

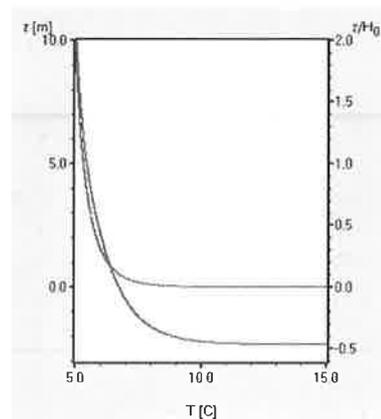


Figure 2: Comparaison des profils de température obtenus avec une surface plate (rouge) et SeaCluse (vert) pour $U_{10}=16\text{m.s}^{-1}$, $RH_{10}=80\%$, $T_{10}=5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{mer}}=15^{\circ}\text{C}$

La Figure 2 compare les profils de température donnés par le modèle « bulk » L.K.B., [9], en rouge et par le modèle SeaCluse en vert dans la zone proche de la surface des vagues. La courbe en vert a été obtenue avec un mode spécial du modèle SeaCluse. En effet les échanges thermodynamique entre l'atmosphère et l'air ont été négligés ce qui permet de séparer les effets

de la prise en compte des vagues et de l'évaporation sur les profils de température. La Figure 2 montre que la prise en compte des vagues induit une différence de l'ordre de quelques dixième de degrés entre les profils à proximité de la crête des vagues. Une différence de pente entre les profils est aussi observable pour les altitudes inférieures à 5m environ.

A cet effet il faut ajouter le rôle des aérosols. D'après [6], l'effet de l'évaporation sur les champs de température et d'humidité apparaît pour des vitesses de vent supérieures à 12m.s^{-1} , sera maximal près de la crête et décroît avec l'altitude. L'écart de température induit par l'évaporation est de l'ordre de $0,5^{\circ}\text{C}$ pour des vitesses de vent élevées, avec une forte génération de gouttelettes, et pour une humidité assez faible favorisant l'évaporation. Il s'accompagne d'un changement de pente dans les profils de température et d'humidité. Les différences observées entraînent des variations importantes dans la distance minimale d'apparition des mirages d'après la section 4.

La Figure 3 indique que la concentration des aérosols marins est maximale près de la crête. La transmission est fortement perturbée dans cette zone.

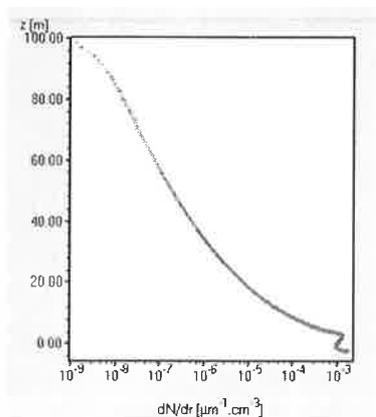


Figure 3: Profil vertical de concentration des aérosols de $30\mu\text{m}$ de rayon pour $U_{10}=16\text{m.s}^{-1}$, $RH_{10}=80\%$, $T_{10}=T_{\text{mer}}=15^{\circ}\text{C}$

3. Description d'ARTEAM

Dans ARTEAM [2], le calcul de l'indice de réfraction atmosphérique dans le visible et l'infrarouge s'appuie sur le modèle d'Edlén, [1]. Les trajectoires des rayons sont tracées à partir de la loi de Snell, [2]. ARTEAM prend aussi en

compte les caractéristiques et l'orientation de la caméra. Les profils de température et d'humidité nécessaires à la détermination du profil vertical de l'indice de réfraction sont fournis soit par le modèle SeaCluse soit par les modèles « bulk » L.K.B. et TARMOS. Le traceur de rayon permet de calculer en plus de l'indice de réfraction et des trajectoires des rayons, l'intensité de la cible sur le détecteur en prenant en compte l'extinction atmosphérique le long de la trajectoire du rayon et la réduction géométrique. Une description plus précise du traceur de rayon ARTEAM sera publiée prochainement, [10].

Dans un premier temps, l'influence des vagues est simulée de la même manière que dans le traceur de rayon français RTPIRAM (Profil d'Indice de Réfraction en Atmosphère Marine), [11] en utilisant un facteur de coupe noté m . L'utilisation de ce facteur s'appuie sur le fait qu'un rayon descendant en dessous de la crête des vagues est très probablement arrêtée par la surface. Donc tous les rayons descendant en dessous de mH_0 sont arrêtés à mH_0 , H_0 étant la hauteur de la vague. La valeur de m devrait être voisine de 0,5 car c'est à cette altitude que se situe en moyenne la crête des vagues.

4. Facteurs influençant les MMR et MIVR

Comme indiqué précédemment, les paramètres météorologiques et caractéristiques de la surface sont responsables des conditions de propagation électromagnétique. Une étude de sensibilité à ces facteurs et des performances du traceur de rayon ARTEAM est présentée dans cette section. Pour cette étude en deux parties, il a été décidé d'utiliser un cas de la campagne MAPTIP (Marine Aerosol Properties and Thermal Imager Properties) qui avait pour principal objectif la détermination des effets de la couche limite atmosphérique sur les systèmes d'imagerie thermique, [12]. La campagne s'est déroulée durant l'automne 1993 sur les côtes néerlandaises. Une partie de la campagne a consisté à mesurer la distance minimale d'apparition des mirages (MMR) et la distance maximale d'inter-visibilité, (MIVR), égale à l'horizon optique, [13]. Ces mesures ont été

réalisées à l'aide d'une caméra fonctionnant à une longueur d'onde de $0,55\mu\text{m}$ correspondant au visible placée sur la plage à 7,04 m au-dessus du niveau moyen de la mer (AMSL, above mean sea level). Cette caméra filmait un navire sur lequel des lampes étaient placées successivement à 3,34m, 6,38m et 20,7m de AMSL, alors qu'il s'éloignait de la plage. Cette expérience peut être imaginée sur la Figure 1 en intégrant des lignes horizontales aux altitudes des lampes. La MMR correspond à la distance à laquelle ces lignes entrent dans la zone de croisements des rayons, et la MIVR correspond à la distance maximale à laquelle la cible est visible.

La configuration météorologique correspondant à ce cas est regroupée dans la Table 1. Z représente la hauteur où P, T, RH, et U (vitesse de vent) ont été mesurés à partir d'une bouée. L'indice 1/3 désigne les grandeurs significatives de la hauteur des vagues. Il est à noter que $H_{1/3}$ est différente de H_0 car elle représente la hauteur moyenne du tiers des vagues les plus énergétiques. Cela implique que le facteur m dans l'expression $m H_{1/3}$ du seuil doit être supérieur à 0,5. Suivant Claverie [11] et Forand, [13], un facteur m de 0,65 a été retenu.

P	1027 hPa
T	7,4 °C
RH	76 %
U	9,1 m.s ⁻¹
Z	3,4 m
T _{mer}	12,4°C
H _{1/3}	0,91 m
T _{1/3}	4,8 s
Marée	0,32 m

Table 1: Valeur des paramètres météorologiques et océanographiques correspondant aux cas E de MAPTIP.

Pour l'étude de l'influence de la simulation des vagues, des aérosols et des modèles météorologiques sur la réfraction, l'analyse d'un cas fortement stable et/ou d'un cas avec des vagues d'une grande hauteur aurait été souhaitable en complément du cas E de MAPTIP. Malheureusement, aucun jeu de

mesures et d'observations remplissant ces conditions n'était à notre disposition.

- *Etude de sensibilité*

L'étude de sensibilité a constitué à faire varier les paramètres météorologiques d'un ordre de grandeur proche de celui d'une erreur de mesure. Elle a été réalisée en utilisant le couple ARTEAM – TARMOS en fixant la cible à une altitude de 3,4m. Les principaux résultats sont regroupés dans la Table 2. Elle montre que les variations des paramètres météorologiques ont une influence inférieure à celle des paramètres caractérisant la surface (la hauteur de la vague, H_0 , facteur de coupe, $m H_0$) dans la détermination de la MMR. Pour la MIVR, tous les facteurs ont une influence similaire.

	Variation	Effet sur MMR	Effet sur MIVR
Vitesse de vent	$\pm 1 \text{ m.s}^{-1}$	1 – 2,5%	1 – 2,5%
Humidité	$\pm 1 \%$	1 – 1,5%	1 – 2%
Température de l'air	$\pm 0,5 \text{ °C}$	1- 1,5%	1,5 – 3%
Hauteur de vague	$\pm 0,3$	5 – 7%	1 – 2,5%
Facteur de coupe	$\pm 0,15$	5 – 8%	1 – 3%

Table 2: Influence des paramètres principaux sur les MMR et MIVR

Pour les paramètres météorologiques, il est à noter que la vitesse de vent joue un rôle non négligeable dans la prédiction. Son influence peut surprendre aux premiers regards car elle n'apparaît pas dans l'équation de l'indice de réfraction. Son rôle s'explique par le fait que dans la couche de surface les profils verticaux sont déterminés à partir des processus de friction, fonction de la vitesse de vent et de convection, fonction de la chaleur.

La modification de la hauteur de la vague ou du facteur de coupe change la hauteur de la partie des profils de température ou d'humidité prise en compte dans la détermination de l'indice de réfraction atmosphérique. Les profils ayant une allure logarithmique, la partie proche de la

surface possède alors une courbure plus importante. Ce qui influence de manière notable la MMR car elle est calculée à partir du rayon optique le plus proche de la surface. En effet d'après la Figure 1, il est aisé de voir que si l'on coupe les rayons optiques plus près de la surface la zone de mirage va s'agrandir de façon significative.

Cette étude de sensibilité a montré que les paramètres caractéristiques de la surface ont une influence plus grande que les paramètres météorologiques pour la détermination de la MMR. Pour la MIVR, les paramètres météorologiques et caractéristiques de la vague ont une influence similaire. Les résultats de la Table 2 montrent qu'une bonne connaissance de la surface en plus des conditions météorologiques est nécessaire pour la prédiction de la MMR.

- *Comparaison des modèles*

La Table 3 compare pour le cas E de MAPTIP, les distances de MMR et MIVR observées, notée Obs et obtenues avec ARTEAM en utilisant les profils de Q et T de L.K.B. (L.K.B.), de TARMOS (TAR), du modèle SeaCluse pour la couche de surface (S.SL), et SeaCluse pour la couche limite (S.BL). En complément on a inclus à titre indicatif les prédictions, [14] du traceur de rayon français RTPIRAM qui utilise aussi une paramétrisation « bulk » des profils de Q et T. Elles se situent parmi les meilleures prédictions des MMR et MIVR pour le cas E publiées actuellement.

La Table 3 montre que les performances obtenues des modèles L.K.B., TARMOS et S.SL sont très comparables alors que S.BL et RTPIRAM sont nettement meilleures. L'effet de la prise en compte des vagues et de la turbulence de la couche de surface (S.SL) a un impact sur les MMR et MIVR moindre que celui des différentes paramétrisations des profils de Q et T. La différence de performances entre S.BL et les autres modèles s'explique par l'utilisation d'un profil de turbulence pour l'ensemble de la couche limite et non pour la seule couche de surface.

Lampes	3,4m		6,38m		20,7m	
	MMR	MIVR	MMR	MIVR	MMR	MIVR
Obs	8,53	11,08	10,83	12,95	****	21,08
PIRAM	8,73	9,54	10,68	12,10	17,11	19,71
L.K.B.	7,30	8,35	8,95	10,90	14,90	18,40
TAR	7,75	8,70	9,55	11,25	15,65	18,95
S.SL	7,76	8,58	9,50	10,85	15,65	18,40
S.BL	8,50	10,55	10,55	13,00	17,20	20,50

Table 3: comparaison des MMR et MIVR (en km) observées et prédites pour le cas E.

Afin de mieux comprendre ces différences de performances, l'analyse porte sur le gradient de l'indice de réfraction dn/dz . Le choix de dn/dz s'explique par le fait que les effets de réfraction considérés ici dépendent du gradient vertical de n [2].

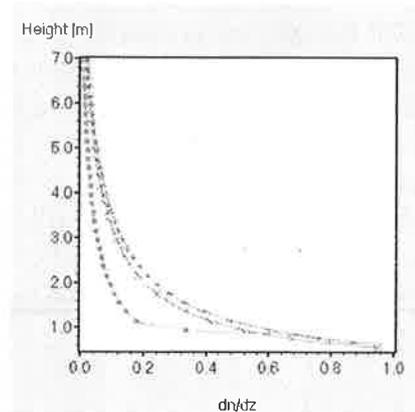


Figure 4: Comparaison des profils de dn/dz obtenus par L.K.B. en rouge, par TARMOS en vert et par S.BL en mauve.

La Figure 4 illustre les profils de dn/dz obtenus par les modèles L.K.B en rouge, TARMOS en vert et par S.BL en mauve. Le profil obtenu pour S.SL n'est pas représenté car il est très proche de celui de TARMOS. Elle est un zoom dans les premiers mètres de la couche atmosphérique au-dessus de la crête ($z = 0,5$). Elle montre en se référant aux résultats de la Table 3 qu'un gradient d'indice de réfraction faible permet d'obtenir les meilleures prédictions. Par contre, il est impossible que ce gradient soit nul car un profil de réfraction constant implique qu'il n'y a pas d'effet de réfraction. A première vue, des prédictions optimales nécessitent des profils plus

linéaires que ceux fournis par des modèles « bulk » ou des modèles limités à la théorie de la couche de surface.

Afin de confirmer le rôle prépondérant d'un faible gradient de l'indice de réfraction, un test a été réalisé avec le modèle SeaCluse pour la couche de surface en surestimant la hauteur de la vague. La nouvelle hauteur est égale à 2,2m. Cette surestimation entraîne des modifications dans les profils de Q et T dans les premiers mètres au-dessus de AMSL. En effet le creux étant plus négatif par rapport à AMSL, la partie la plus logarithmique du profil va descendre en altitude. Ce procédé permet de relier les variations de l'indice de réfraction à un réel changement de l'atmosphère et non grâce à un artifice numérique.

La Table 4 regroupe la MMR obtenue avec la surestimation de la hauteur de la vague et en conservant la configuration météorologique de la Table 1 et la hauteur de coupe est égale à celle de la Table 3.

Lampes	MMR [km]
3,34m	8,34
6,38m	10,20
20,7m	16,20

Table 4: Comparaison des prédictions de la MMR (en km) d'ARTEAM avec les profils de S.SL pour $H_0 = 2,2m$

La comparaison des Tables 3 et 4 montre que les prédictions en surestimant la hauteur de vague sont supérieures. La Figure 5 compare les gradients des indices de réfraction obtenus avec le modèle SeaCluse pour la couche de surface avec une hauteur de vague égale à 0,91 (en rouge) et 2,2m (en bleu) respectivement dans les premiers mètres de l'atmosphère. Elle confirme le fait qu'un gradient faible donne de meilleures prédictions. Ces résultats confirment l'observation de Claverie, [14] qui pouvait améliorer les prédictions de RTPIRAM en linéarisant artificiellement les profils près de la surface.

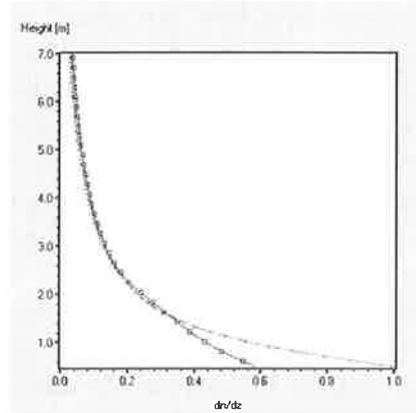


Figure 5: Comparaison des gradients verticaux de l'indice de réfraction obtenus avec S.SL pour $H_0 = 0,91m$ en rouge et $H_0 = 2,2m$ en bleu

5. Conclusion

Une prédiction correcte des effets de réfraction suppose la connaissance préalable des profils verticaux de p, Q et T. Dans l'environnement marin, l'écoulement d'air est influencé par les vagues, et l'évaporation des embruns apparaît comme une source supplémentaire de vapeur d'eau et un puits de chaleur sensible surtout dans des conditions de vent fort. Ces processus provoquent une déformation des profils de Q et T par rapport aux profils générés par les modèles « bulk » établis pour une surface plate. Le traceur de rayons de TNO-FEL, ARTEAM, a été utilisé pour évaluer la sensibilité des MMR et MIVR à ces paramètres d'entrée. La MMR paraît être particulièrement sensible aux conditions de surface (hauteur des vagues), et moins sensible aux conditions météorologiques telles que la vitesse du vent, ce qui était prévisible puisque la MMR dépend du rayon qui frise la surface. Cette étude démontre donc la nécessité de caractériser à la fois la surface et l'atmosphère pour prédire correctement les effets de la réfraction marine.

ARTEAM a été utilisé en couplage avec plusieurs modèles météorologiques fournissant les profils de Q et T. Les meilleurs résultats après comparaison avec les données expérimentales ont été obtenus avec des profils ayant un gradient dQ/dz (ou dT/dz) plus petit que ceux prédit par une paramétrisation « bulk ». Les meilleurs profils ont été fournis

par le modèle SeaCluse qui prend en compte l'influence des vagues, des aérosols et de la turbulence. Dans le cas étudié, la turbulence est apparue comme le facteur le plus important. En l'absence d'autres cas tests, il n'est pas exclu que cette conclusion soit dépendante de la combinaison hauteurs de vague – paramètres météorologiques utilisée.

La meilleure prédiction a été obtenue avec le modèle SeaCluse pour la couche limite qui prend en compte la couche de surface et la couche de mélange. L'extension du domaine vertical et l'utilisation d'une paramétrisation de la turbulence pour la couche de limite rendent plus efficace la dispersion à travers le domaine et réduisent le gradient des profils de Q et T. Elles sont aussi bénéfiques à la prédiction des profils verticaux de concentration des aérosols dans la couche marine de surface, [7].

L'étude de sensibilité et la comparaison des modèles fournissant les profils de Q et T suggèrent qu'une amélioration non négligeable des prédictions des effets de la réfraction peut être obtenue en utilisant des modèles plus avancés que ceux basé sur les paramétrisation « bulk ».

Remerciement

Le développement du modèle SeaCluse est supporté par la Marine Royale Néerlandaise, le Bureau de Recherches Navale des Etats-Unis et par le Centre National de la Recherche Scientifique.

Références

- [1] *Edlen, B.*, 'The refractive index of air', *Meteorol.*, 2, pp. 71-80, 1996.
- [2] *Van Eijk, A.M.J. and Kunz, G.J.*, 'ARTEAM: A Ray Tracing model for EO-applications - A background and status report', TNO-report, FEL-00-A285, 2001
- [3] *Kunz, G. J.*, 'A bulk model to predict optical turbulence in the marine surface layer', TNO-report, FEL-96, pp. 1-73, 1996
- [4] *Mestayer, P.G., Van Eijk, A.M.J., De Leeuw, G. and Tranchant, B.*, 'Numerical simulation of the dynamics of sea spray over the waves',

Journal of Geophysical Research, 101, pp. 20771-20797, 1996.

[5] *Tranchant, B.*, 'Simulations numériques des aérosols marins', Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, France, 1997.

[6] *Van Eijk, A.M.J., Tranchant, B. and Mestayer, P.G.*, 'SeaCluse: numerical simulation of evaporating sea spray droplets', *Journal Geophysical Research*, 106, pp. 2573-2588, 2001.

[7] *Navarro, L.J., Van Eijk, A.M.J. and Mestayer, P.G.*, 'Impact of the eddy diffusivity on the vertical aerosol concentration', *Journal of Aerosol Science*, 32, pp. S1089-S1090, 2001.

[8] *Kantha, L. K. and Clayson, C. A.*, 'An improved mixed layer model for geophysical applications', *Journal of Geophysical Research*, 99, pp. 25,235-25,266, 1994.

[9] *Liu, W. T, Katsaros, K. B and Businger, J. A.*, 'Bulk parametrisation of air-sea exchange processes', *Journal Atmospheric Science*, 36, pp. 1722-1735, 1979.

[10] *Kunz, G.J. et Van Eijk, A.M.J.* 'ARTEAM: Advanced Ray Tracing in the Earth's Atmosphere', *SPIE Proceeding*, 4718, 2002, accepté pour publication.

[11] *Claverie, J., Tranchant, B., Mestayer, P.G., Van Eijk, A.M.J. et Hurtaud T.*, 'Effet de la Réfraction Atmosphérique sur la Propagation Infrarouge dans la Basse Atmosphère Marine Comparaison des Modèles SEACLUSE et PIRAM', OTAN RTO/SPP Conférence 16-19 mars, 1998.

[12] *De Leeuw, G., Van Eijk, A. M. J, and Jensen, D. R.*, 'Marine Aerosol Properties and Thermal Imager Performance (MAPTIP): an Overview', *Proceedings SPIE Proceedings*, 2828, pp. 2-14, 1994.

[13] *Forand, J. L.*, 'MAPTIP: refractive effects in the visible and IR', *SPIE Proceedings*, 2828, pp. 39-49, 1996.

[14] *Van Eijk, A.M.J. and Hurtaud, Y.*, 'FR-NL co-operation TA6: Electro-Optical Propagation in the lower troposphere – Final report', TNO-report, FEL-01-B134, 2001

Influence de la Couche Atmosphérique Marine sur la Propagation Electromagnétique

L.J. Navarro, A.M.J. Van Eijk, G.J Kunz, A. Phelippeau-Gosselin¹
Laboratoire de Physique et d'Electronique TNO, P.O. Box 96864,
2509 JG La Haye, Pays-Bas

P.G. Mestayer
Laboratoire de Mécanique des Fluides UMR CNRS 6598,
Ecole Centrale de Nantes, B.P 92101, 44321 Nantes Cedex, France

Abstract prepared for :
4ièmes Journées d'études
"Propagation électromagnétique du décemetrique à l'angström"
13-15 March, Rennes, France

¹ Adresse actuelle: Ecole Supérieure des Ingénieurs des Etudes et Techniques d'Armements. Brest - France

