



HAL
open science

Apport des modèles numériques de prévision météorologique à la prédiction de performances radar

Jacques Claverie, Yvonick Hurtaud

► **To cite this version:**

Jacques Claverie, Yvonick Hurtaud. Apport des modèles numériques de prévision météorologique à la prédiction de performances radar. ENVIREM 2015, ONERA et Centrale-Supélec, Jun 2015, Gif sur Yvette, France. hal-01169425

HAL Id: hal-01169425

<https://hal.science/hal-01169425>

Submitted on 29 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Apport des modèles numériques de prévision météorologique à la prédiction de performances radar

Jacques CLAVERIE
CREC St-Cyr & IETR
Ecoles de St-Cyr Coëtquidan
Guer, France
jacques.claverie@st-cyr.terre-net.defense.gouv.fr

Yvonick HURTAUD
CGN2/SDO
DGA Maîtrise de l'Information
Bruz, France
yvonick.hurtaud@intradef.gouv.fr

Résumé—Cet article décrit l'état de l'art en matière d'utilisation des modèles météorologiques pour calculer la cartographie 3D de l'indice de réfraction de l'air et en déduire les diagrammes de couverture radar.

Mots clé : radars ; réfraction atmosphérique ; conduits ; modèles météorologiques

I. INTRODUCTION

En milieu marin, les couvertures radar sont fortement dépendantes de la réflexion de l'onde électromagnétique sur la surface de mer et de la réfraction atmosphérique. Cette dernière n'étant que très rarement standard, les portées radar observées sont accrues ou diminuées selon la direction visée par le radar. Connaître le champ d'indice de réfraction dans les 3 dimensions spatiales et à une échéance temporelle de quelques dizaines d'heures devient donc indispensable pour obtenir une prévision fine des performances des radars. Cette connaissance ne peut que très partiellement être issue de mesures in-situ. Par contre, les modèles numériques de prévision météorologique ont désormais une résolution et une fiabilité qui permettent de les inclure de façon opérationnelle dans les outils d'aide à la décision tactique.

II. RÉFRACTION ATMOSPHÉRIQUE EN MILIEU MARIN

A. Rappel de quelques définitions

L'indice de réfraction de l'air, n , étant proche de l'unité, on utilise couramment la notion de coindice de réfraction, noté N , et défini par :

$$N = 10^6 \cdot (n - 1) \quad (1)$$

La formule de Debye permet d'exprimer le coindice de réfraction en fonction des paramètres météorologiques que sont la pression atmosphérique totale (P en hPa), la pression partielle de vapeur d'eau (e en hPa) et la température (T en K) :

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 3,73256 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (2)$$

Il est souvent plus commode d'utiliser la notion de coindice de réfraction modifié, noté M :

$$M \approx N + 0,157 \cdot z, \quad (3)$$

où z désigne l'altitude du point considéré.

B. Cas de réfraction atmosphérique et conduits

La valeur du gradient vertical d'indice permet de définir le type de réfraction rencontré. Ainsi, l'atmosphère standard qui correspond à une moyenne statistique mondiale est caractérisée par un gradient vertical : $dM/dz = 118 \text{ M/km}$.

L'existence de conduits de guidage atmosphériques est régie par la condition simple : $dM/dz < 0$. La Fig. 1 illustre les différents cas de réfraction et leurs conséquences en termes de propagation d'une onde électromagnétique. On notera que la présence d'un conduit permet d'envisager une propagation au-delà de l'horizon radioélectrique standard.

Au-dessus de la mer la décroissance rapide de l'humidité suffit à expliquer l'existence quasi permanente d'un conduit appelé conduit d'évaporation et dont la hauteur usuelle peut varier entre quelques mètres et quelques dizaines de mètres. Des conduits de surface ou d'altitude peuvent également être observés avec des occurrences très variables suivant la région du globe et la saison. Leur apparition est souvent liée à des phénomènes d'advection ou à des situations de brise de mer par exemple. L'allure des profils d'indice correspondant aux différents cas de conduits est tracée sur la Fig. 2.

C. Détermination des profils verticaux d'indice de réfraction

La connaissance du profil vertical d'indice peut être déduite des mesures faites par radiosondage. Toutefois ce type de mesure ne permet pas d'accéder à la connaissance fine du conduit d'évaporation. Des capteurs météorologiques associés à des « rocketsondes » ou à des « kitesondes » permettent d'accéder à une résolution verticale assez fine aux basses altitudes. Toutefois, les profils ainsi mesurés sont souvent assez turbulents et leur interprétation peut s'avérer délicate. Par ailleurs, dans les régions littorales notamment, un seul profil vertical ne permet pas de caractériser la variabilité horizontale du milieu de propagation.

Le conduit d'évaporation est souvent calculé à partir d'une mesure in situ à quelques mètres d'altitude en utilisant une paramétrisation de la couche de surface issue de la théorie de Monin-Obukhov. Plus précisément, il est nécessaire de disposer d'une valeur de pression atmosphérique, d'humidité, de température et de vitesse du vent (obtenues à des altitudes qui peuvent être identiques ou différentes) ainsi que de la valeur de la température de surface de mer. Conçu initialement dans les années 1990, le modèle français PIRAM [1], [2] a été utilisé avec succès, lors de différentes campagnes de mesures, pour estimer notamment les hauteurs de conduits d'évaporation.

Depuis le début des années 2000, l'avènement des modèles numériques de prévision météorologique a suscité un vif intérêt pour le calcul des performances radar. Ainsi le modèle méso-échelle AROME, développé par Météo-France, et mis en œuvre dans cette étude dispose d'une résolution horizontale de 2,5 km avec 60 niveaux d'altitude dont 21 en dessous de 2000 m. La nouvelle version d'AROME, opérationnelle depuis mi-avril 2015, a une résolution horizontale de 1,3 km et 90 niveaux d'altitude dont 30 en-dessous de 2000m. Un module « basses couches », appelé SURFEX/CANOPY, a été testé en association avec AROME, mais il génère, dans certains cas, une discontinuité des profils d'indice à l'altitude de 10 m. Conjointement avec Météo-France, nous avons récemment mis au point une procédure de couplage entre AROME et PIRAM qui a été testée avec succès [3]. Concrètement, le « point » AROME à 20 m d'altitude est utilisé pour l'exécution de PIRAM. Le profil résultant, en chaque point de la grille horizontale d'AROME, est obtenu de la façon suivante, illustrée sur la Fig. 3 :

- Aux altitudes inférieures à 20 m, on ne retient que le profil PIRAM.
- Aux altitudes supérieures à 30 m, on ne retient que le profil AROME.
- Aux altitudes comprises entre 20 m et 30 m une fusion logarithmique des 2 profils est opérée.

La cartographie 3D complète de l'indice de réfraction peut désormais être associée à des outils de prédiction de performances de systèmes EM tels que PREDEM V2 développé en France à la demande de la DGA [4]. PREDEM est basé sur la résolution de l'équation parabolique, méthode bien adaptée à la prise en compte des effets de la réfraction atmosphérique [5].

III. EXEMPLES DE RÉSULTATS

A. Expérimentations PREDEM

Les expérimentations PREDEM se sont déroulées en Juin 2005 et Février 2006 à proximité de la côte méditerranéenne française (Cf. Fig. 4.). Les mesures effectuées comprenaient notamment des acquisitions radar en bande S et bande C sur cibles étalonnées, la mise en œuvre de bouées instrumentées et la réalisation de 3 radiosondages simultanés le long de la radiale de visée radar.

La Fig. 5 présente un exemple de profils d'indice représentatifs de la campagne été. On peut constater que, si la modélisation AROME rend bien compte de l'existence de conduits élevés, l'altitude du conduit prédit au niveau de l'île du Levant (distance 0 km) diffère nettement de celle réellement observée. La concordance est meilleure pour les profils plus au large. L'existence de ces conduits est liée au déplacement d'une masse d'air chaude et sèche provenant du Nord de l'Afrique au-dessus de l'air plus « humide » et « frais » situé à l'interface avec la surface de mer. On note donc une erreur de quelques dizaines de km sur la localisation de la zone de transition.

Les « performances » mesurées et simulées du radar en bande C (altitude de 36 m) lorsque celui-ci suivait une cible évoluant à une altitude constante de 75 m, pour la situation météorologique de la Fig. 5, sont représentées sur la Fig. 6. Dans cette configuration, l'erreur commise par AROME sur l'altitude du conduit élevé au niveau de l'île du Levant a un impact limité. On peut constater, d'une part, que l'existence de ce conduit élevé permet d'expliquer la détection de la cible au-delà de l'horizon standard qui aurait été d'une soixantaine de km. D'autre part, comme les radiosondages ne rendent pas compte du conduit d'évaporation, ils induisent une perte de détection pour les distances comprises entre 60 et 70 km environ. Le couplage d'AROME avec PIRAM, malgré l'erreur soulignée au paragraphe précédent, permet de mieux appréhender la permanence de la détection de la cible conformément aux observations. Cet exemple illustre parfaitement bien les influences conjointes des conduits d'évaporation et d'altitude alors même que le radar et la cible sont situés en dehors du conduit d'évaporation.

Les résultats issus de la campagne hiver sont plus faciles à interpréter. En effet la situation généralement observée était celle d'un conduit d'évaporation de quelques mètres surmonté par une atmosphère quasi standard. Un exemple de profils mesurés et simulés est reporté sur la Fig. 7. Les performances du radar en bande C, toujours pour une cible évoluant à 75 m d'altitude sont tracées sur la Fig. 8. La modélisation AROME + PIRAM donne ici des résultats très satisfaisants. Une fois de plus, on constate l'importance de la prise en compte du conduit d'évaporation pour expliquer l'augmentation de portée mesurée.

B. Campagne TAPS 2013

La campagne de mesures TAPS 2013 (Tropical Air-sea Propagation Study) s'est déroulée à la fin de l'année 2013 sur la côte Nord-Est de l'Australie. La localisation plus précise est montrée sur la Fig. 9. Cette campagne de mesures a été le fruit d'une collaboration entre cinq nations : Australie, Nouvelle-Zélande, Etats-Unis, Royaume Uni et France. Sur une dizaine de jours, elle a associé différentes mesures météorologiques (radiosondages, « kitesondes », avion instrumenté, capteurs de flux turbulents) ainsi que des mesures radioélectriques sur des liaisons de longueurs variables en bande X, Ka et W. Les dépouillements des données brutes sont quasiment terminés ; les protocoles d'échanges de données entre les différents pays participants sont en cours de finalisation et les premières publications spécifiques sont prévues pour 2015.

Durant cette expérimentation, on a pu observer des conduits d'évaporation de hauteurs variant généralement entre 10 et 20 m et de nombreux conduits d'altitude le plus souvent associés à des situations de brise de mer. Les Figs. 10 et 11 correspondent aux profils simulés par AROME couplé à PIRAM le long de la radiale représentée sur la Fig. 9. La Fig. 10 (respectivement Fig. 11) concerne des profils prédits pour le 05 Décembre 2013 à 13h Heure Locale (respectivement 15h Heure Locale). On peut donc visualiser les variations spatiales et temporelles du conduit d'altitude. Cette visualisation aurait toutefois été plus complète si nous avions pu reproduire l'évolution heure par heure des profils le long de la radiale et pour la journée entière. En fin de nuit la situation était caractérisée par un conduit d'altitude relativement homogène à 900 m d'altitude. Au cours de la journée des variations horizontales apparaissent et le conduit s'abaisse et parfois se déstructure. Puis dans l'après-midi (Fig. 11), le conduit est de nouveau bien formé sur toute la radiale mais son altitude passe de 600 m au large à 300 m près de la côte. En fin de journée on retrouve un conduit plus haut et plus homogène. Une telle évolution diurne est assez classique en présence de brise de mer. Les futures comparaisons avec les mesures issues des radiosondages et les données de propagation permettront d'affiner davantage ces premières conclusions et de valider (ou non) les résultats d'AROME.

IV. INFLUENCE DE LA RESOLUTION VERTICALE DU PROFIL

Le couplage d'AROME avec PIRAM induit un ajout de plusieurs niveaux d'altitudes dans les basses couches. PIRAM permet d'accéder à une résolution verticale aussi fine que souhaitée. Il est toutefois évident que les fichiers issus du couplage doivent avoir une taille raisonnable pour pouvoir être facilement utilisés et transmis. Il est donc nécessaire de trouver la juste résolution verticale pour les altitudes inférieures à 20 m – on rappelle qu'au-delà de 20 m, on conserve la résolution originelle d'AROME.

Quelques simulations nous ont fourni des premiers résultats intéressants. Elles sont représentées sur les Figs 12 à 15. Ces simulations concernent la variation horizontale du facteur de propagation (écart entre les pertes de propagation d'espace libre et les pertes de propagation totales réelles) pour une altitude de 10m avec un émetteur également situé à 10 m d'altitude. Pour les Figs. 12 et 13, la hauteur de conduit d'évaporation est fixée à 8,9 m ; autrement dit, l'émetteur et le récepteur sont tous deux situés dans le conduit. Pour les Figs. 14 et 15, la hauteur de conduit est fixée à 15,1 m ; donc, cette fois, l'émetteur et le récepteur sont tous les deux situés au-dessus du conduit. Deux fréquences ont été envisagées pour ces simulations : l'une en bande X et l'autre en bande Ka. Le profil d'indice a été échantillonné avec plusieurs résolutions verticales : 50 cm (valeur assez voisine de la résolution par défaut de PIRAM), 1 m et 2 m. En comparant les différentes courbes, on peut observer qu'une résolution de 2 m détériore

assez nettement les résultats. Les résolutions de 50 cm et de 1 m conduisent à des valeurs assez voisines sauf dans le cas de la Fig. 13 (bande Ka ; émetteur et récepteur dans le conduit). On peut, bien sûr, imaginer d'autres cas de simulation. On peut toutefois d'ores et déjà conclure que la description des effets du conduit d'évaporation avec une résolution verticale supérieure au mètre conduira à des résultats trop imprécis.

CONCLUSION

L'utilisation des modèles numériques de prévision météorologique permet le calcul des performances des radars en milieu marin (là où les effets de réfraction sont les plus marqués). Les profils obtenus s'écartent encore parfois des observations. Mais dans un contexte opérationnel, la multiplication des mesures semble peu réaliste en comparaison avec les besoins en termes de résolution spatiale et de variabilité temporelle des profils. Il est désormais possible d'inclure dans les modèles la prise en compte de la couche de surface (i.e. du conduit d'évaporation).

La mise à disposition des analyses météorologiques issues de la nouvelle version d'AROME devrait conforter les résultats déjà obtenus. Elle nécessitera peut-être une actualisation de la procédure de couplage avec PIRAM. Les travaux relatifs à la recherche du meilleur compromis entre le besoin de précision dans la prédiction de performance et le « volume » des fichiers fournis aux opérationnels sont bien sûr à poursuivre.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Christophe Periard et Vivien Pourret de Météo France pour la mise à disposition des profils calculés par Arome. Ils expriment également leur gratitude à tous leurs collègues australiens, anglais, américains et néo-zélandais partenaires de l'expérimentation TAPS 2013 pour les échanges fructueux qui se sont instaurés au sein de cette communauté.

REFERENCES

- [1] J. Claverie, Y. Hurtaud, Y. de Fromont, A. Junchat, "Modélisation des profils verticaux d'indice de réfraction et de C_n^2 en atmosphère marine", *AGARD Conf. Proc 567*, pp 29-1–29-11, Février 1995.
- [2] G. Potvin, D. Dion, J. Claverie, P. Frederickson, K. Davidson, "An empirical analysis of Bulk C_n^2 models over water", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 47, No. 12, Dec. 2008, pp. 3044-3060.
- [3] Y. Hurtaud et J. Claverie, "Geophysical information inputs for the EM systems performances computation in littoral environment", *Radio Science Bulletin*, N° 351, pp 45-52, Décembre 2014.
- [4] Y. Hurtaud, C. Cochin, J. Claverie, M. Aidonidis, "Caractérisation de l'environnement maritime pour les systèmes de défense électromagnétiques et optroniques", *Revue REE*, N°4-2011, pp 37-47.
- [5] M. Levy, "Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation", *The IEE Waves Series 45*, London, 2000.

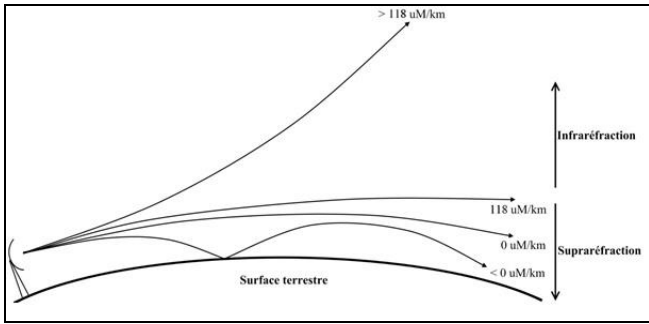


Fig. 1. Différents cas de réfraction troposphérique

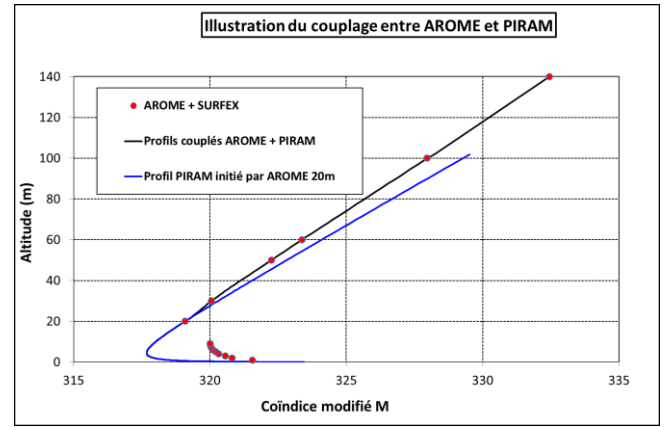


Fig. 3. Exemple de couplage entre AROME et PIRAM

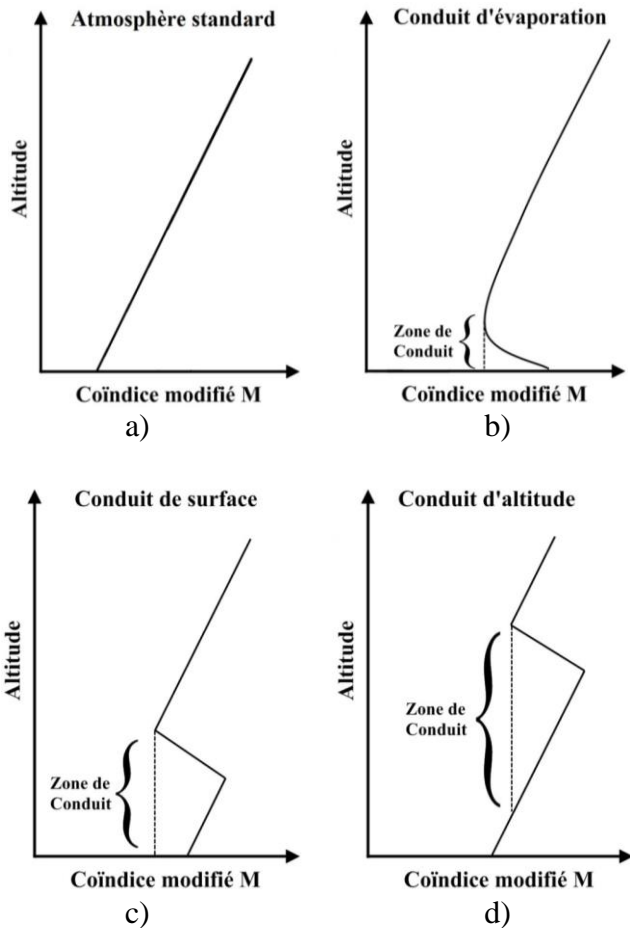


Fig. 2. Différents profils verticaux d'indice de réfraction. Atmosphère standard (a), conduit d'évaporation (b), conduit de surface (c) et conduit d'altitude (d).

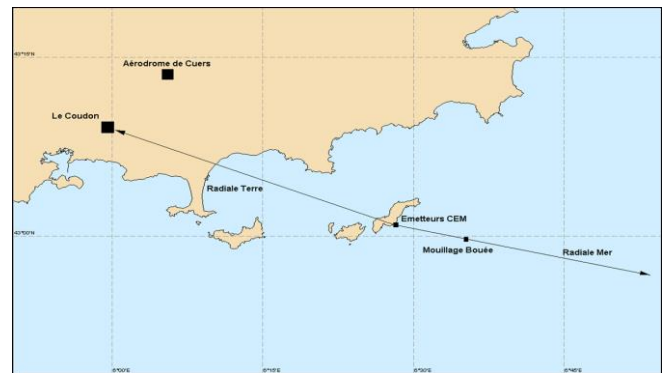


Fig. 4. Localisation des mesures effectuées durant les campagnes PREDEM 2005 et 2006 en Méditerranée. Les radars utilisés étaient situés sur l'île du Levant.

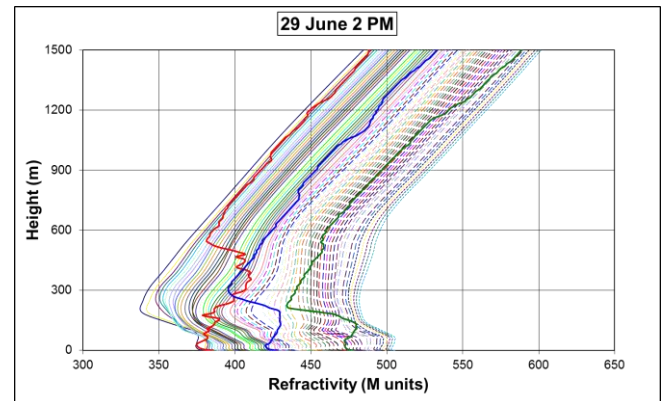


Fig. 5. Profils mesurés par radiosondages (14h15 – traits pleins) aux distances 0, 40 et 80 km et profils prédits par AROME (14h – traits fins) pour des distances allant de 0 à 100 km – Campagne PREDEM le 29 Juin 2005.

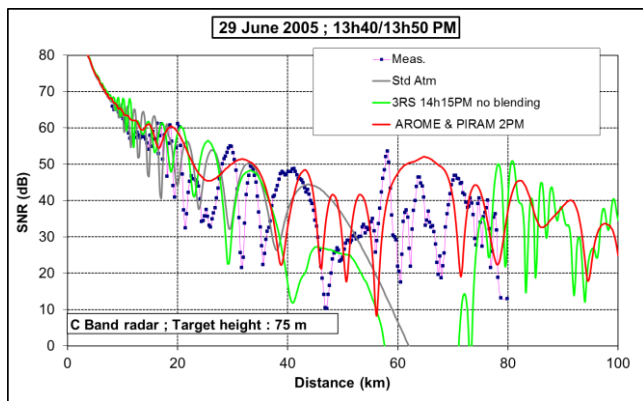


Fig. 6. Rapport signal à bruit mesuré et simulé pour un radar en bande C à partir des profils d'indice représentés sur la Fig. 5. L'horizon standard serait d'environ 60 km.

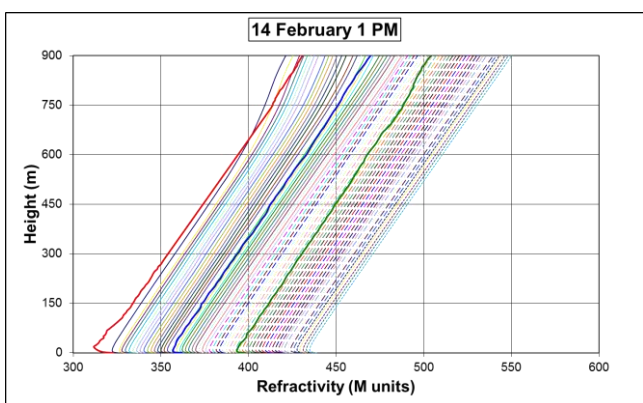


Fig. 7. Profils mesurés par radiosondages (12h40 – traits pleins) aux distances 0, 30 et 60 km et profils prédits par AROME (13h – traits fins) pour des distances allant de 0 à 100km – Campagne PREDEM le 14 Février 2006.

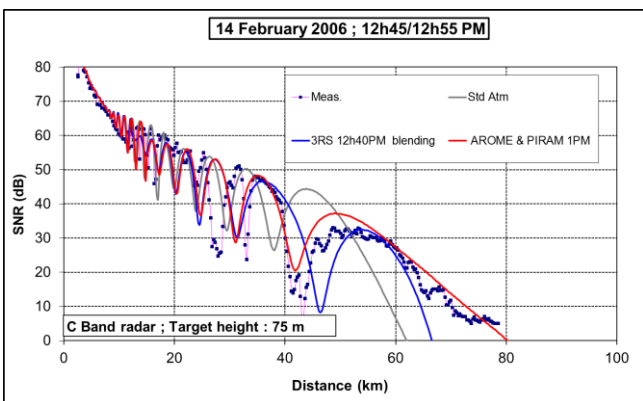


Fig. 8. Rapport signal à bruit mesuré et simulé pour un radar en bande C à partir des profils d'indice représentés sur la Fig. 7. L'horizon standard serait d'environ 60 km.



Fig. 9. Localisation du site expérimentale de la campagne TAPS (Novembre/Décembre 2013) sur la côte Nord Est de l'Australie. La ligne blanche représente la radiale de mesures d'environ une centaine de km entre Lucinda (sur la côte) et Needle Reef (mer de Corail)

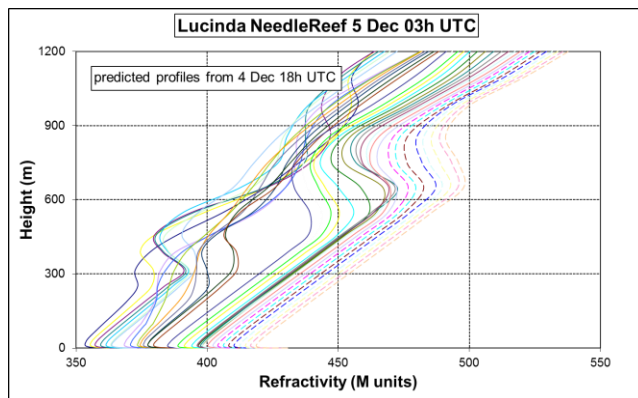


Fig. 10. Profils prédits par AROME le 05 Dec 2013 à 13h (Heure locale) pour la radiale Lucinda Needle Reef.

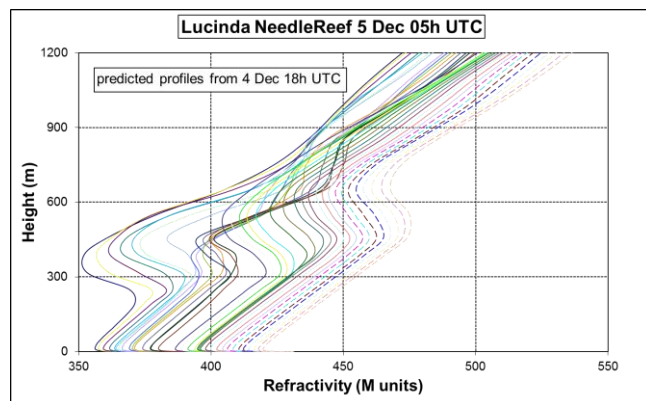


Fig. 11. Profils prédits par AROME le 05 Dec 2013 à 15h (Heure locale) pour la radiale Lucinda Needle Reef M soit 2h après la situation de la Fig 10. L'évolution des profils est typique d'une situation de brise de mer

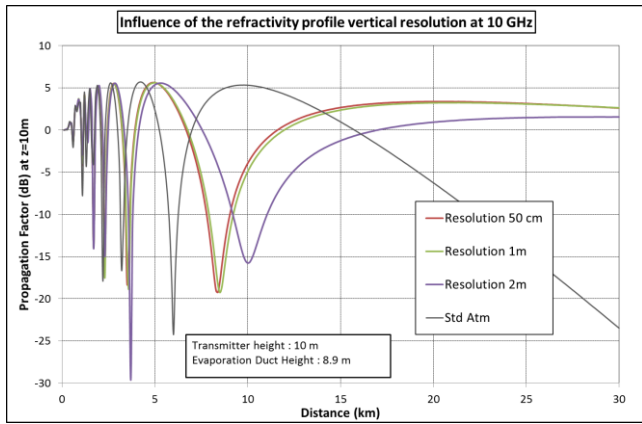


Fig. 12. Influence de la résolution verticale du profil d'indice sur le calcul du facteur de propagation à 10 GHz. Cas d'un émetteur situé au-dessus du conduit d'évaporation

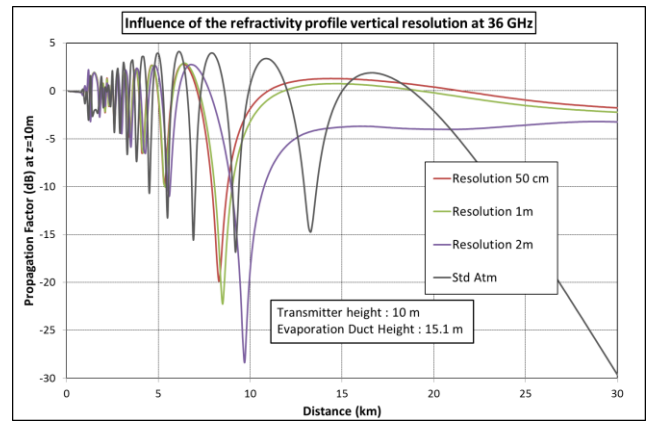


Fig. 15. Influence de la résolution verticale du profil d'indice sur le calcul du facteur de propagation à 36 GHz. Cas d'un émetteur situé dans le conduit d'évaporation. Sur les Figures 12 à 15, le cas de l'atmosphère standard (Std Atm) est rappelé à titre de référence, car c'est ce qu'on utiliserait en l'absence de toute connaissance réelle du profil d'indice.

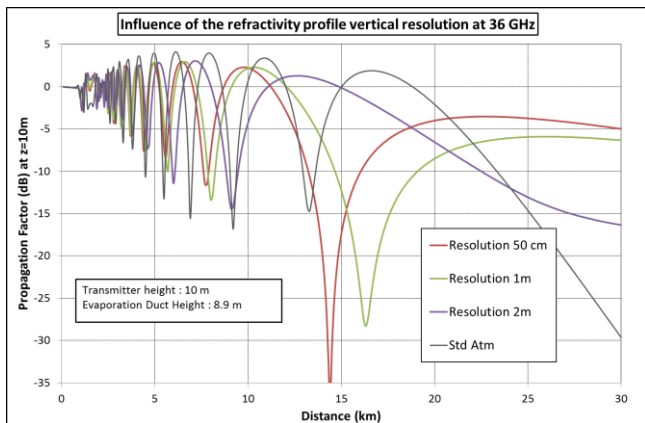


Fig. 13. Influence de la résolution verticale du profil d'indice sur le calcul du facteur de propagation à 36 GHz. Cas d'un émetteur situé au-dessus du conduit d'évaporation.

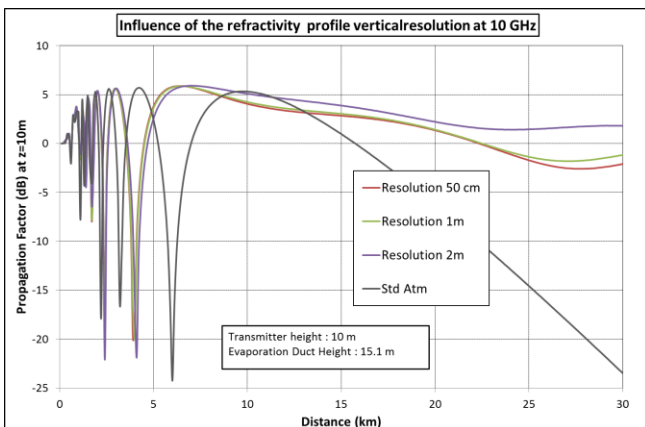


Fig. 14. Influence de la résolution verticale du profil d'indice sur le calcul du facteur de propagation à 10 GHz. Cas d'un émetteur situé dans le conduit d'évaporation.