

# Prise en compte des modèles de prévision météorologiques dans la propagation acoustique à grande distance

**Pierre Naz**  
**Sylvain Cheinet**  
**Pascal Hamery**  
ISL

Institut Franco-Allemand de Recherches de  
Saint-Louis  
5, rue du Général Cassagnou  
BP 70034  
68301 Saint Louis  
E-mail : pierre.naz@isl.eu  
E-mail : sylvain.cheinet@isl.eu  
E-mail : pascal.hamery@isl.eu

## Résumé

Pour des sources sonores connues et parfaitement reproductibles, l'atmosphère est le principal facteur à l'origine des variations observées sur les signaux acoustiques perçus à grande distance. Les modèles numériques de propagation des ondes sonores ont fait des progrès importants ces dernières années. Il n'en est pas de même des mesures des données d'entrées que sont les paramètres météorologiques (profils de vent et de température, ...) et les caractéristiques du terrain qui restent difficiles à mesurer sans déployer des moyens lourds. Une alternative intéressante est constituée par l'utilisation des modèles de prévision météorologique et des modèles numériques de terrain. Les résultats obtenus au cours de journées-tests sont présentés sous forme de tracés de rayons ou de cartes de niveaux de bruits calculés, d'une part, à partir de données météorologiques mesurées par ballon-sonde et, d'autre part, à partir de données d'entrées prédites à un intervalle de 3 heures (de 0h00 à 24h00). Ces résultats sont conformes aux mesures acoustiques et mettent bien en évidence la variation des zones de bruit en fonction :

- de la direction du vent, qui induit une directivité de la zone de propagation du bruit,
- du cycle diurne/nocturne, avec une zone de propagation du bruit plus grande et isotrope au milieu de la nuit.

**L**es bruits générés par les véhicules, les aéronefs ou les batteries d'artilleries peuvent être détectés à plusieurs kilomètres voire dizaines de kilomètres [1]. La maîtrise de la furtivité de ces équipements ou des performances des systèmes de détection correspondants est une priorité pour les forces armées.

À grande distance, les signaux acoustiques sont grandement influencés par les conditions environnementales, c'est-à-dire par les conditions atmosphériques, la nature du sol, le relief, la végétation, ...

Le vent et les gradients de température réfractent les ondes acoustiques. On peut observer ainsi un renforcement du niveau acoustique ou, au contraire, la création de zones d'ombre (ou de silence). Ces phénomènes sont observables au cours de journées différentes ayant des situations météorologiques très marquées ou au cours d'une même journée, compte-tenu de l'évolution des paramètres météorologiques entre le matin, l'après-midi et la nuit. D'un point de vue opérationnel, cela se traduit par une distance de détection qui varie en fonction des conditions météorologiques. Des modèles de simulation numériques ont été mis en place pour estimer l'influence de ces paramètres [2]. Si les modèles numériques de propagation des ondes sonores font l'objet de travaux continus et sont en progrès constants, il n'en est pas de même pour les données d'entrées météorologiques qui restent difficiles à appréhender.

## Les phénomènes acoustiques

Il est bien connu que les signaux acoustiques sont influencés par les conditions atmosphériques, par la nature du sol, par le relief et par la végétation.

La réfraction des ondes acoustiques est déterminée à partir de la stratification verticale de la vitesse du son dans l'atmosphère, elle-même définie à partir de la stratification du vent et de la température. La connaissance des gradients verticaux de ces variables atmosphériques est importante, d'une part parce que les effets sur les niveaux acoustiques peuvent être importants, et d'autre part, parce qu'ils peuvent être rapidement changeants au cours de la journée.

Si les influences de ces paramètres sont complexes, elles sont néanmoins quantifiables et leur prise en compte par la résolution des équations mathématiques décrivant les différents phénomènes physiques (absorption, réflexion, réfraction) permet aujourd'hui une prédiction globalement fiable pour certaines applications.

De nombreux travaux ont été conduits dans le domaine de l'impact environnemental de sources de bruit de type routier ou industriel. Les travaux que l'ISL mène pour la défense utilisent pleinement ces développements tout en différant fondamentalement sur certains points. Pour les systèmes de détection, par exemple, il est important de savoir si les performances sont nominales dans toutes les

directions, ou s'il existe des zones de fortes atténuations dues à des phénomènes de propagation particuliers. La bonne prédiction des caractéristiques des zones d'ombre est donc, pour nous, plus importante que la détermination des zones de fort niveau (au contraire des besoins environnementaux). Cet article sera consacré aux aspects phénoménologiques de la propagation acoustique à grande distance, de l'influence des conditions météorologiques, et sur la manière de caractériser les informations météorologiques nécessaires. Les travaux menés sur les méthodes de simulations numériques font l'objet d'une présentation spécifique [3].

Deux exemples montrant nettement l'influence des conditions météorologiques vont maintenant être présentés pour illustrer notre propos. Le premier concerne une source de bruit continu. Le second, quant à lui, illustre une source de bruit impulsionnel (bruit d'explosion ou de tir d'armes).

### Bruits continus

Dans une première phase, et pour des questions de mise en œuvre et de reproductibilité des émissions sonores, des haut-parleurs sont préférés aux sources réelles (véhicules, avions).

Le dispositif académique mis en œuvre dans le cadre d'une campagne expérimentale du RSG-11 de l'OTAN (Figure 1) présente l'avantage de permettre des mesures rapides et

d'acquérir des données dans un laps de temps très bref dans une direction de propagation puis dans sa direction opposée [4]. L'utilisation de deux tours permet de mettre en place en simultané, à différentes hauteurs, l'instrumentation acoustique et des stations météorologiques afin de mesurer en même temps les profils verticaux du vent et de la température.

Les mesures effectuées mettent bien en évidence les différences de niveaux obtenus dans les deux directions de propagation opposées (Figure 2). Les résultats complets de ces essais montrent aussi que les différences entre les niveaux mesurés en zone éclairée et en zone d'ombre dépendent fortement de la fréquence, avec une influence moins marquée pour les ondes basse fréquence.

De même, la propagation des sources en hauteur (ici à 30 mètres au-dessus du sol) est moins atténuée en zone d'ombre que dans le cas de sources au sol.

### Bruits impulsionnels

Les bruits impulsionnels générés lors de tirs d'armes constituent une deuxième catégorie de bruits à prendre en compte. La connaissance des caractéristiques de ces bruits est importante en champ proche pour la protection de l'audition des servants d'armes, tandis qu'à grande distance, la détection et la localisation des positions adverses est recherchée.

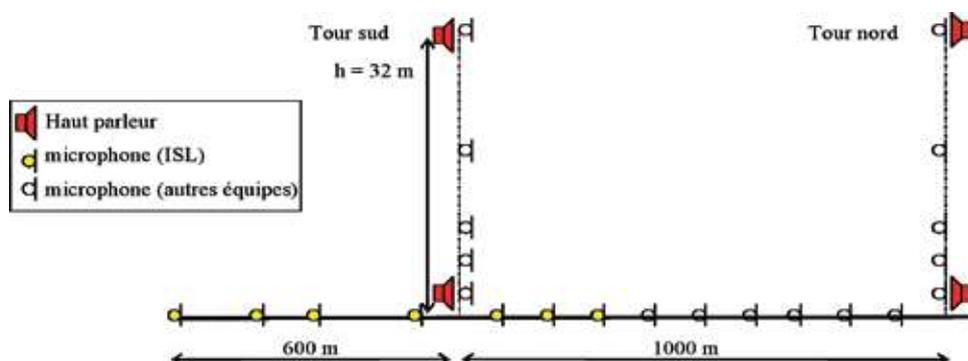


Fig. 1 : Exemple de configuration de mesure couplée (acoustique et météorologique)

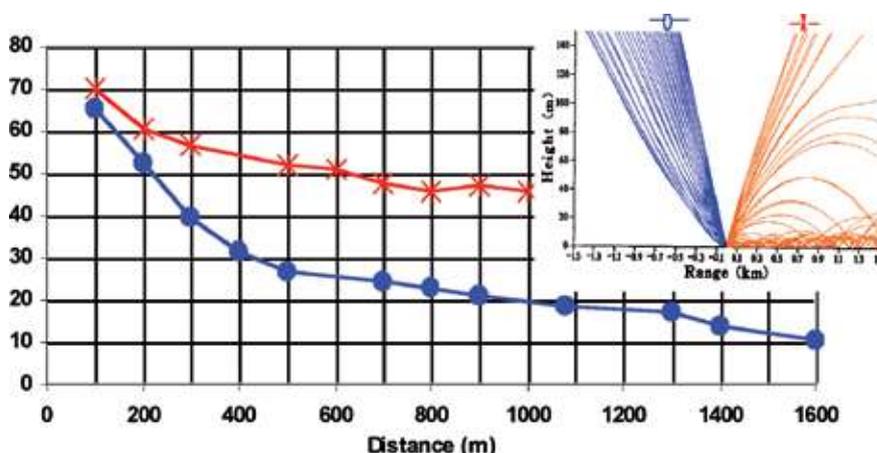


Fig. 2 : Influence de la direction de propagation sur le niveau sonore reçu ( $f=500$  Hz)

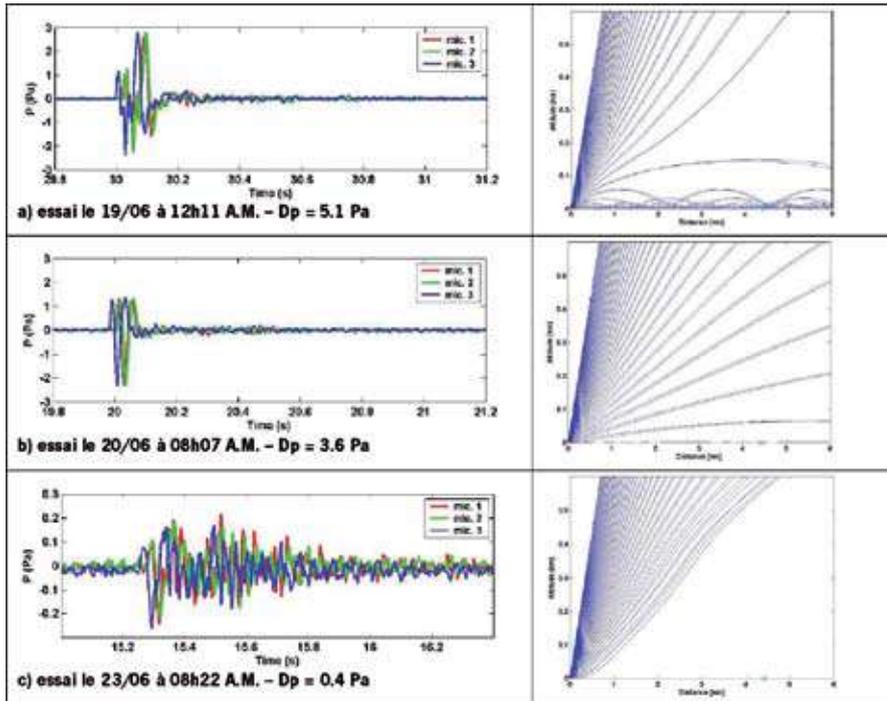


Fig. 3 : Exemple de signaux mesurés comparés avec une représentation par tracé de rayons ( $D_p$ : amplitude maximale de pression pic à pic)

Compte-tenu des effets combinés des gradients de vent et de température, il a été observé durant une série d'essais [5] des situations où les sons pouvaient être renforcés par des réflexions multiples (Figure 3-a), peu perturbés (Figure 3-b), ou encore très atténués (Figure 3-c). Les amplitudes maximales ainsi que l'allure générale des signaux sont très différentes dans les trois configurations présentées. Un tracé, obtenu par la méthode des rayons, illustre à chaque fois l'impact de la situation météorologique.

## Les profils atmosphériques

La connaissance des profils météorologiques est nécessaire aux endroits et à l'instant correspondants à la situation à analyser ou à simuler. La mesure complète n'est pas toujours possible en raison de la logistique à mettre en œuvre de manière conjointe aux essais acoustiques et aux mesures météorologiques. De plus, compte-tenu du fait que les sources et les capteurs qui nous intéressent soient situés au niveau du sol, une attention toute particulière doit être portée à la portion des profils du vent et de la température qui est dans la couche de surface.

## Les mesures météorologiques

La mesure des variables aérologiques (pression, température, humidité, vitesse du vent) se fait classiquement à partir d'une station météorologique au sol (Figure 4). Un lâcher de ballon-sonde permet de compléter ces mesures et d'obtenir le profil local de ces variables sur une hauteur de quelques kilomètres, mais cela nécessite de disposer des moyens matériels adéquats ainsi que d'un temps d'acquisition des profils qui puisse atteindre une dizaine de minutes. Les profileurs, ou systèmes de sondages acoustiques atmosphériques SODAR (SOund Detection And Ranging) permettent de mesurer sur un temps court le profil du

vent (de 50 à 5 000 m), tandis que les systèmes RASS (Radio Acoustic Sounding System) permettent de mesurer le profil de la vitesse du son (typiquement de 100 m à 1 500 m). La combinaison des deux systèmes permet de remonter aux profils de vent, de température et à ceux de certains indices de turbulence. Les couches de cisaillement de vent ou d'inversion de température peuvent être facilement mis en évidence avec ces dispositifs. Le coût d'acquisition de ces systèmes n'est pas négligeable. Que ce soit avec un ballon ou un sondeur acoustique, le nombre de points de mesure dans les basses couches (avant 50 m) est très restreint, ce qui est une limitation pour nos besoins. Pour les sites expérimentaux équipés d'installations fixes, le mieux est de pouvoir disposer d'un mât instrumenté par plusieurs stations météorologiques conventionnelles, réparties suivant la hauteur avec un pas plus resserré au niveau du sol (Figures 1 et 5).



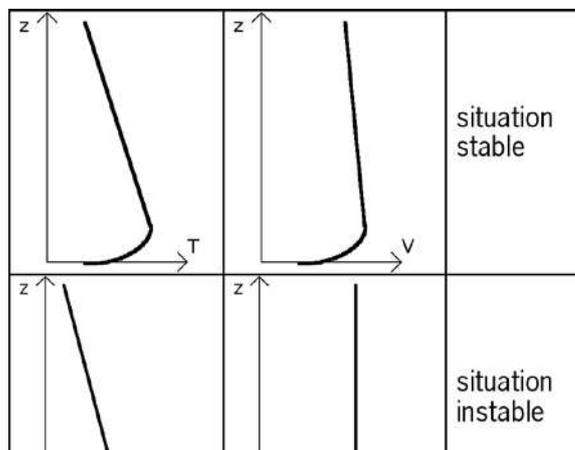
Fig. 4 : Station météorologique au sol complétée par le lâché d'un ballon-sonde



Fig. 5 : Mât instrumenté de 32 m (photographie WSMR / expérience OTAN RSG-11)

### Profils analytiques

Si l'on ne possède qu'un nombre limité de données expérimentales (fournies par une ou deux stations météo), une méthode alternative consiste à estimer un profil théorique en utilisant les lois de similitude de Monin-Obukov (Table 1). Pour les basses couches et en cas de situation météo bien établie, cette approche a déjà été employée avec succès.



Tabl. 1 : Schématisation des profils de vent et température

### Classification des conditions de propagation

La situation météorologique peut aussi être évaluée de manière qualitative avant d'en déduire un effet quantitatif approximatif sur la propagation acoustique.

La première étape consiste à estimer la classe météo (de M0 à M4) à partir des couples ( $U_i$ ,  $T_i$ ) des conditions aérodynamiques ( $U_i$ ) et thermiques ( $T_i$ ). Une approche de ce type a été développée par Zouboff et a été reprise dans plusieurs standardisations techniques, en particulier pour les bruits routiers [6]. Une démarche équivalente est aussi décrite dans la normalisation ISO 13471.

Cette approche est rapide et pragmatique, mais devrait être en partie re-développée pour chaque nouvelle application (en fonction de la nature des bruits, ...).

### Modèles de prévision atmosphérique

Les modèles numériques de prévision du temps simulent le fonctionnement de l'atmosphère au travers des équations de la mécanique des fluides et de la thermodynamique. L'atmosphère est représentée par ses principaux paramètres (pression, vent, température, humidité) suivant un maillage constitué d'une grille horizontale et d'un certain nombre de niveaux verticaux entre le sol et 60 km d'altitude.

Pour effectuer une prévision du temps, le modèle détermine l'état présent de l'atmosphère en intégrant le maximum d'observations (stations météorologiques, bouées dérivantes, satellites, radiosondages...). Puis il procède au calcul de l'état prévu de l'atmosphère à différentes échéances. Ces modèles ont suivi une rapide évolution au cours de la dernière décennie. La méthode classique est d'utiliser un emboîtement de modèles imbriqués. Par exemple, Météo-France utilise l'imbrication suivante [7]:

- ARPEGE réalise des prévisions à échéance de 12 heures à 3 jours avec une résolution spatiale de 25 km (ce modèle s'appuie lui-même sur le modèle IFS du centre européen ECMWF),
- ALADIN couvre l'Europe de l'Ouest pour des prévisions de 6 à 48 heures avec une grille horizontale de 10 km,
- AROME réalise des prévisions « régionales » en France métropolitaine avec une résolution de 2 km et des échéances de 1 à 24 heures.

Pour nos applications, nous avons utilisé des données fournies par Météo-France avec un modèle de la classe ALADIN, lequel avait une résolution spatiale de 10 km et fournissait des prévisions toutes les 3 heures (réactualisées deux fois par jour). A titre d'illustration, la figure 6 représente le champ des températures à 2 m sur l'ensemble du domaine « France », tandis que la figure 7 montre un agrandissement du champ des vecteurs de vitesse du vent à 10 m au-dessus de la Bretagne. Les champs de température avec lesquels nous avons travaillé sont fournis à différentes hauteurs : à 10 cm dans le sol, à la surface, puis à 2, 20, 50, 100, 250, 500, 750, 1 000 et 1 500 m. L'ensemble est très riche en informations car de nombreuses variables sont fournies (température, vitesse du vent, humidité, pression, mais aussi précipitation, enneigement, flux solaire, nébulosité...) et ont déjà été homogénéisées par le modèle, ce qui devrait éviter des aberrations locales dont les mesures ne sont pas exemptes.

Un pas de maillage de 10 km peut paraître large, mais doit être relativisé : prenons par exemple une zone de 20 km autour de notre source (c'est-à-dire une configuration typique de nos besoins en termes de propagation à grande distance), elle comprendra de 16 à 25 points de maillage donnant autant de profils verticaux toutes les 3 heures, ce qui est très supérieur à ce que l'on peut avoir expérimentalement. Il est néanmoins clair que des effets locaux (micro-relief par exemple) ne pourront pas être correctement estimés avec ce modèle. Les données issues de modèles à plus haute résolution (AROME, MESO-NH...) pourraient être utilisées en cas de besoin.

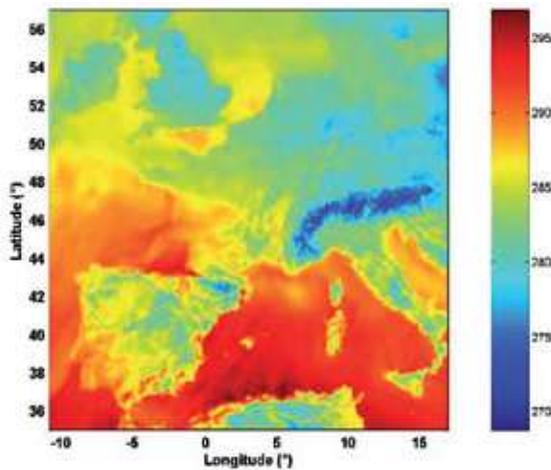


Fig. 6 : Exemple de carte des températures à 2m

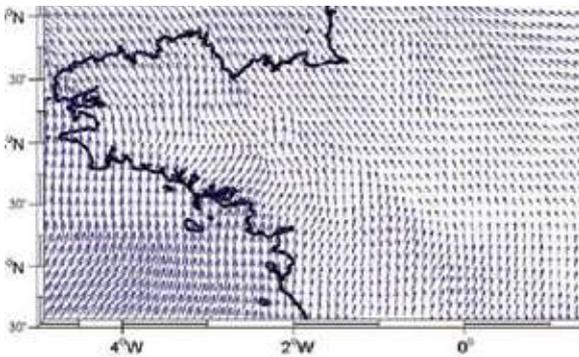


Fig. 7 : Exemple de champ de vitesse du vent à 10 m

D'une manière très similaire sur la forme, il existe aussi pour les besoins en analyse climatologique la base de données ERA40. Celle-ci est issue du Centre Européen de Prévision à Moyen Terme, puis a été reprise et enrichie par Météo-France. Ces données sont constituées par une ré-analyse des prévisions et observations météorologiques sur la période 1958-2001. L'objectif est de constituer une série homogène de données sur 40 années. La version du modèle retenue couvre l'ensemble du globe avec une résolution horizontale d'environ 125 km et comporte 60 niveaux verticaux. Les travaux sur l'utilisation de cette base pour une analyse acoustique sont en cours et visent à dégager des tendances en termes de propagation sonore sur une base annuelle ou pluriannuelle.

## Application des résultats des modèles météorologiques à la propagation acoustique

L'utilisation de données générées par les modèles météorologiques en entrée de modèles de propagation acoustique n'est pas à proprement parler nouvelle [8], mais a été ici poursuivie de manière intensive et a été testée dans diverses configurations opérationnelles au cours des deux dernières années. La figure 8 illustre l'évolution de la réfraction des rayons sonores lors de la transition nuit-jour, puis la création d'une zone d'ombre acoustique dès le milieu de la journée. La situation s'inverse en fin d'après-midi avec une propagation relativement isotrope au cours de la nuit. La comparaison des profils des variables météorologiques prédits et mesurés (figure 9) est en général en bon accord, en dépit de petits décalages temporels qui ont une légère incidence sur les profils très près du sol. On peut aussi observer de légères différences d'orientation du vent qui se traduisent par des différences de tracé des rayons sonores (Figure 10). Cela se comprend facilement à partir de la cartographie des niveaux sonores au niveau du sol (Figure 11). Cette figure met aussi clairement en évidence la directivité de la propagation due au vent et la localisation des zones de focalisation de l'énergie sonore correspondant aux zones de convergence des rayons sonores visibles sur la figure 10.

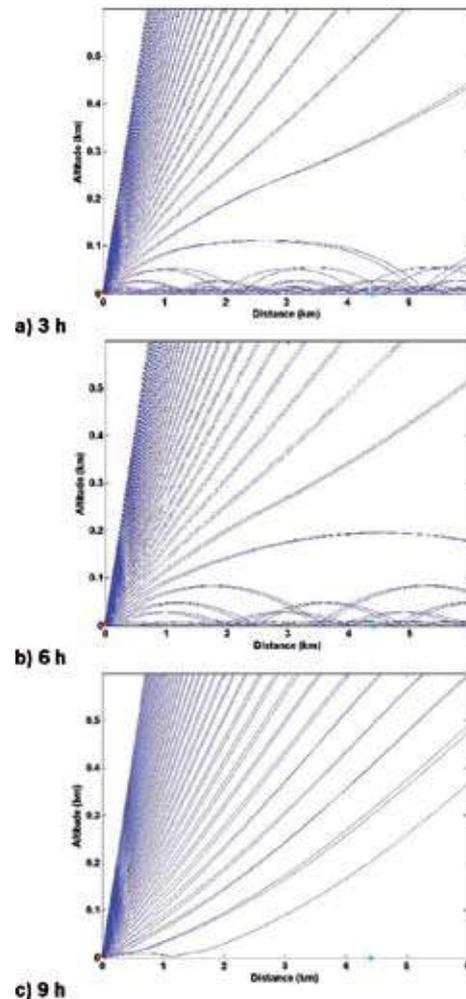


Fig. 8 : Tracés des rayons acoustiques (Bourges, juin 2008, heures UTC)

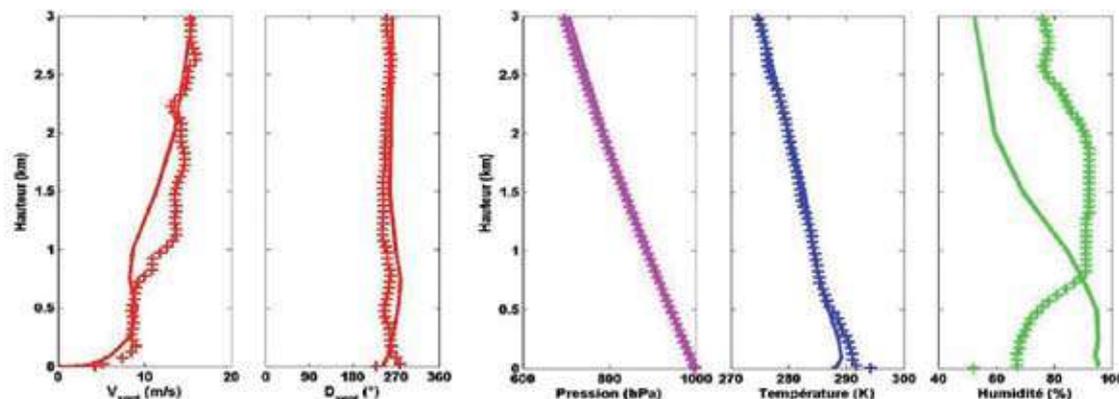
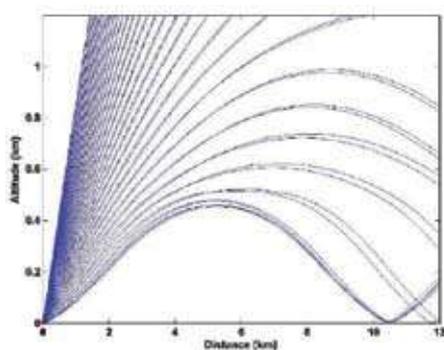
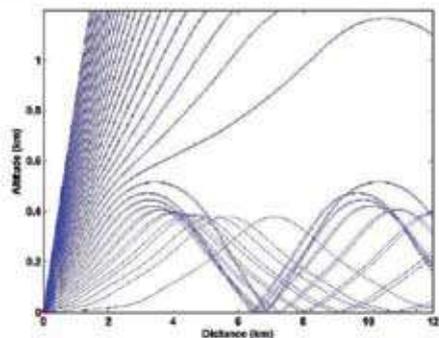


Fig. 9 : Comparaison des profils des variables météorologiques prédits (--) et mesurés (++)



a) à partir des profils météo prédits (6h00)



b) à partir des profils météo mesurés (7h30)

Fig. 10 : Tracés de rayons sonores (23/06/2008, direction de propagation Nord-Est)

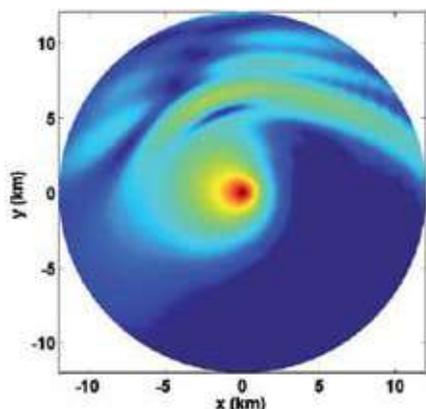


Fig. 11 : Pertes de transmission calculées au niveau du sol (méthode FFP, 23/06/2008)

## Conclusion

Les valeurs des paramètres atmosphériques (vent, température, humidité...), fournis par les modèles de prévision météorologiques, sont une alternative intéressante et complémentaire des mesures météorologiques classiques en tant que données d'entrée des modèles de propagation acoustique. Cette approche offre l'avantage opérationnel de pouvoir fournir aisément des résultats prévisionnels jusqu'à 48 ou 72 heures. Cette approche sera vraisemblablement encore améliorée avec l'arrivée prochaine de modèles météorologiques à plus fine résolution.

## Remerciements

Les auteurs remercient la Direction générale de l'Armement (DGA), en particulier l'ETBS et l'UM Terre, pour avoir soutenu ces travaux dans le cadre du Programme d'étude Amont *METEORE* sur les outils d'aide à la décision opérationnelle.

## Références bibliographiques

- [1] Naz P. et al., "Acoustic detection and localization for defence and security applications", 19th ICA, Madrid, September 2007
- [2] Cheinet S., Naz P., "On-going ISL research in modeling acoustic propagation in the atmosphere", NATO SET-107 symposium, Amsterdam, 2006
- [3] Ehrhardt L., Cheinet S., "Développement et évaluation d'un code de propagation acoustique en domaine temporel", 10<sup>e</sup>me CFA, Avril 2010, Lyon
- [4] Naz P., Parmentier G., "Some results of sound propagation experiments", 7th LRSP Symposium, July 1996, ECL, Ecully
- [5] Naz P. et al., "Acoustic detection and localization of weapon fire by unattended ground sensors and aerostat-borne sensors", SPIE Orlando, Vol. 7333, 2009
- [6] NF S 31-085 "Acoustics - Characterising and measuring road traffic noise - General measuring specifications", AFNOR (2002)
- [7] Bouttier F., "Arome, avenir de la prévision régionale", La Météorologie, 58, août 2007
- [8] Blanc-Benon Ph. et al., "Outdoor sound propagation modelling in complex environments: A new PE code coupled with a micrometeorological code", LRSP Symposium, Penn State, Juin 2004