

THÈSE

présentée devant
L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON

pour obtenir
le grade de DOCTEUR
SPÉCIALITÉ ACOUSTIQUE

Par

Maud PRIOUR

INFLUENCE DES EFFETS COUPLÉS DE LA MÉTÉOROLOGIE ET DU RELIEF SUR LA PROPAGATION ACOUSTIQUE : UTILISATION D'UNE MÉTHODE D'ÉLÉMENTS FINIS DE FRONTIÈRE ET VALIDATION EXPERIMENTALE

Soutenu le 5 juillet 2005 devant la Commission d'Examen

Jury MM.

Président	M. ROGER	
Examineurs	M. BÉRENGIER	(Rapporteur)
	Ph. BLANC-BENON	
	J. DEFRANCE	
	D. DUHAMEL	(Rapporteur)
	E. PREMAT	

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, UMR CNRS 5509
École Centrale de Lyon

Remerciements

« Comme tous les genres, le remerciement obéit à des lois. C'est un genre centrifuge, au sens ondulatoire du terme. Comme un cailloux qu'on lance dans la mare, le remerciement fait des cercles, de plus en plus... large... de plus en plus éloigné du centre. (...) Le lauréat remercie d'abord le premier cercle : les notables, les importants, le jury, sans qui la récompense ne lui aurait pas été attribuée ; puis le deuxième cercle, le public (...) »

Daniel Pennac
Merci

Ce travail a été réalisé au sein du Département Acoustique et Eclairage du CSTB à Grenoble en collaboration avec le Centre Acoustique de l'École Centrale de Lyon.

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeur et co-directeur de thèse, M. Blanc-Benon, Directeur de recherche CNRS à l'École Centrale de Lyon et M. Premat, Docteur Ingénieur, Responsable des Pôles Environnement Acoustique et Qualité de l'Air au CETE de Lyon, pour le suivi et la rigueur scientifique qu'ils m'ont apportés tout au long de ce travail.

Je remercie la direction du CSTB et Jérôme Defrance, Chargé de recherche de m'avoir accueillie au sein de l'équipe Acoustique Environnementale du CSTB Grenoble.

Je remercie M. Bérengier, Directeur de Recherche CNRS au LCPC de Nantes et M. Duhamel, Professeur à l'École Nationale des Ponts et Chaussées, d'avoir accepté de juger mes travaux ainsi que M. Roger, Professeur à l'École Centrale de Lyon qui m'a fait l'honneur de présider le jury d'examen.

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes du CSTB de Grenoble pour leur gentillesse et leur accueil que ce soit au service acoustique mais aussi dans le division DDD ou encore CPM. Je remercie plus particulièrement les thésards, François Aballéa, Marine Baulac, Claire Brutel-Vuilmet (Miss Clairette de Die), Emmanuelle Conil (Miss Charlotte à la Framboise), Olivier Deille (Mister Pb Info), Patrick Mézière...

Je remercie aussi les personnes qui m'ont accompagnée, soutenue dans les moments difficiles de ma thèse... Ces personnes se reconnaîtront... Merci à mes parents, ma grand-mère, ma tante, Sophie et Hugues de s'être déplacés le jour de la soutenance.

Et surtout, je tiens à remercier particulièrement Lionel pour tous les moments mythiques partagés ensemble et son aide précieuse de tous les jours (notamment pour la mise en page...).

Enfin, je ne remercie pas mon disque dur d'avoir trépassé à la fin de ma seconde année de thèse... Ou alors si, je le remercie pour m'avoir obligée à être plus consciencieuse dans mes sauvegardes... Si si c'est important de faire régulièrement des sauvegardes ! Tous les 8 mois c'est un peu juste...

Résumé

Dans le cadre de la lutte contre le bruit, il est important de pouvoir estimer les niveaux sonores en milieu extérieur à grande distance des infrastructures de transports terrestres. Cette prévision nécessite la prise en compte d'effets météorologiques (vent, gradient de température) qui peuvent avoir une influence sur l'efficacité des moyens de protection sonore (écran anti-bruit). Le but de ce travail est de proposer des modèles numériques de propagation et de les valider expérimentalement en laboratoire et en soufflerie.

Dans ce contexte, un travail est mené pour quantifier l'importance des différents phénomènes en jeu dans la propagation acoustique en milieu extérieur (par exemple, la diffraction d'un écran par rapport à la réfraction acoustique). Il sert d'étude préliminaire à une méthode originale de couplage entre une méthode d'éléments finis de frontière BEM (pour calculer le champ proche) et une méthode d'équation parabolique GFPE (pour calculer le champ lointain). Cette méthode originale est confrontée pour validation à des résultats numériques et expérimentaux.

Ensuite une technique de prise en compte d'effets météorologiques dans des méthodes d'éléments finis de frontières est présentée. Elle s'appuie sur la théorie des transformations conformes. Des comparaisons avec des données expérimentales et numériques permettent de valider cette approche.

Enfin, un volet expérimental dédié à une campagne de mesures en soufflerie atmosphérique est exposé. Il a permis de constituer une base de données pour des configurations variées dans des conditions atmosphériques réalistes, proches du milieu extérieur. Les expériences réalisées permettent d'avoir accès simultanément à des valeurs des paramètres météorologiques et à des valeurs d'atténuation acoustique. La comparaison entre résultats expérimentaux et numériques aide à mettre en évidence l'influence des effets météorologiques sur la propagation acoustique au-dessus d'un sol plan ou non plan. L'influence des phénomènes de turbulence et le rôle de la composante verticale du vent peuvent aussi être mis en évidence.

Abstract :

In environmental acoustics, it is of high importance to assess sound pressure levels at long ranges from traffic noise sources. At those distances meteorological effects (such as temperature gradient and wind speed) can no longer be neglected and they can affect the efficiency of screen barriers. In this view this work aims at developing numerical methods to predict sound propagation and validate them by comparisons with experiments achieved in laboratory or wind tunnel.

First, a study is carried out to give an insight into involved propagation phenomena and to determine, in a typical traffic case, whether diffraction by a screen is preponderant or not over atmospheric refraction. This is a preliminary work for developing an original method which "couples" two numerical propagation methods: the Boundary Element Method (BEM) used to compute the close field and a parabolic equation method called GFPE used to compute the far field. Results of this original method are compared for validation to other numerical results and to experimental data.

Then a method which includes meteorological effects in BEM is detailed. It relies on conformal mappings. This approach has been tested and validated successfully with numerical and experimental data.

An experimental study of more realistic atmospheric conditions is carried out in an atmospheric wind tunnel. These measurements give us simultaneous values of the meteorological parameters and of acoustic attenuation. From these data, we can deduce the effects of the topography and the effect of an inhomogeneous medium on the acoustic propagation. Comparisons between experimental data and numerical results help us to understand the influence of turbulence phenomena, and the importance of the wind vertical component.

Table des matières

Table des matières	1
Introduction	5
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et position du problème	7
1.1 Phénomènes intervenant dans la propagation acoustique en milieu extérieur	7
1.1.1 Principaux phénomènes intervenant en milieu extérieur :	7
1.1.2 Effets météorologiques	8
1.2 Modélisation de la propagation des ondes sonores	10
1.2.1 Les méthodes de rayon et la Théorie Géométrique de la Diffraction	11
1.2.2 Le Fast Field Program	12
1.2.3 Les méthodes d'Éléments Finis de Frontière (BEM)	12
1.2.4 Les méthodes d'Equation Parabolique	12
1.2.5 Les méthodes de Différences Finies Temporelles (Finite Difference Time Domain)	12
1.3 Modèles de propagation et codes numériques utilisés	12
1.3.1 Les méthodes d'éléments finis de frontière	13
1.3.2 Méthode de l'Equation parabolique	17
1.4 Mesures en laboratoire et en soufflerie	20
1.4.1 Mesures en laboratoire	20
1.4.2 Mesures en soufflerie	24
1.5 Hypothèses de travail	26
1.5.1 Choix d'un modèle de propagation acoustique	26
1.5.2 Dimension du problème	27
1.5.3 Sources automobiles et ferroviaires	27
1.5.4 Conditions météorologiques	28
1.5.5 Hauteur de source	29
1.5.6 Hauteur des récepteurs	29
1.5.7 Distances de propagation	29
1.5.8 Modèles d'impédance utilisés	29
1.5.9 Tableau récapitulatif des hypothèses de travail	30
Chapitre 2 : Etude du poids relatif de différents phénomènes en jeu dans la propagation acoustique en milieu extérieur	31
2.1 Choix des paramètres et de la configuration géométrique	31
2.2 Description des paramètres	31
2.2.1 Choix de la configuration géométrique	32
2.2.2 Critère pour déterminer D	35
2.2.3 Interprétation des résultats	36
2.3 Conclusions	41

Chapitre 3 : Méthode hybride BEM-GFPE	43
3.1 Méthode hybride BEM-GFPE	43
3.2 Validation : cas d'un sol plan rigide	45
3.3 Cas d'un écran droit au-dessus d'un sol rigide	46
3.3.1 Vérifications en conditions homogènes	48
3.3.2 Couplage en présence d'effets de réfraction vers le bas	50
3.3.3 Comparaison avec la méthode GFPE	52
3.3.4 Influence de la distance de couplage	54
3.4 Cas de l'écran droit sur un sol absorbant	56
3.4.1 Vérifications en conditions homogènes	57
3.4.2 Couplage en présence d'effets de réfraction vers le bas	57
3.4.3 Comparaison avec la méthode GFPE	58
3.4.4 Influence des effets de réfraction dans la partie modélisée avec la BEM	60
3.5 Etude d'une configuration typique de plate-forme routière	61
3.5.1 Couplage en présence d'effets de réfraction dans la méthode GFPE	62
3.5.2 Couplage en présence d'effets de réfraction dans les méthodes BEM et GFPE	63
3.6 Conclusions	64
Chapitre 4 : Prise en compte d'effets météorologiques dans des méthodes d'éléments finis de frontière	65
4.1 Validations expérimentales : mesures sur modèles réduits	65
4.2 Configurations retenues	67
4.3 Paramètres des calculs numériques	68
4.4 Comparaisons avec les résultats de Bérengier et Daigle	69
4.4.1 La source est au niveau du sol : réfraction vers le haut	69
4.4.2 La source est au dessus du sol : réfraction vers le haut	70
4.5 Validations sur des configurations de plate-forme routière	71
4.5.1 Ecran droit rigide sur sol rigide : réfraction vers le haut	72
4.5.2 Ecran droit rigide sur une surface présentant une discontinuité d'impédance : réfraction vers le bas et vers le haut	76
4.5.3 Route sur un remblai rigide et sol rigide : réfraction vers le bas.	80
4.5.4 Route en remblai rigide avec écran rigide et absorbant sur la partie en déblai : réfraction vers le bas	84
4.5.5 Ecran en T rigide sur une surface présentant une discontinuité d'impédance	86
4.5.6 Influence de la position verticale des récepteurs	88
4.6 Conclusion	91
Chapitre 5 : Campagnes de mesures en soufflerie atmosphérique	93
5.1 Campagnes de mesures en soufflerie	93
5.1.1 La soufflerie atmosphérique du CSTB de Nantes	94
5.1.2 Simulation de la couche limite atmosphérique	95
5.1.3 Mesures aérodynamiques	96
5.1.4 Mesures acoustiques	97
5.2 Présentation des configurations étudiées	99
5.2.1 Configurations géométriques	100
5.2.2 Profils aérodynamiques	104
5.3 Résultats aérodynamiques	104
5.3.1 Mesures des champs aérodynamiques par PIV	105
5.3.2 Description numérique des champs aérodynamiques avec Fluent	105
5.3.3 Comparaisons PIV, Fluent et Fil Chaud	106

5.4	Résultats acoustiques	112
5.4.1	Dispersion des mesures	113
5.4.2	Résultats pour le sol plan sans écran	115
5.4.3	Tableau récapitulatif des résultats	120
5.4.4	Configuration géométrique avec écran	121
5.5	Conclusion	127
	Conclusion	129
	Annexe A	131
	Annexe B	153
	Annexe C	159
	Annexe D	165
	Annexe E	171
	Annexe F	199
	Bibliographie	207

Une version couleur du document est téléchargeable sur :
<http://bibli.ec-lyon.fr> (rubrique : Production scientifique de l'ECL)

Introduction

Le bruit est une préoccupation majeure des riverains d'aéroports, de voies ferrées ou de voies routières. Pour répondre à cette nécessité de protection de l'environnement, des limites de bruit admissibles aux abords des infrastructures de transport ont été définies. Avec l'accroissement du trafic, les limites de bruit se situent à quelques centaines de mètres des infrastructures et pour de telles distances l'influence des effets météorologiques ne peut être négligée.

Actuellement aucun code numérique n'existe pour prévoir la propagation du son en milieu extérieur en prenant en compte tous les phénomènes intervenant dans la propagation acoustique. En effet, la propagation du son en milieu extérieur est modifiée par les obstacles topographiques (écran, butte, colline) mais les phénomènes atmosphériques (gradients de température, vent, humidité, turbulence) affectent la propagation des ondes acoustiques.

Le sujet de ce travail concerne l'étude de l'influence des effets couplés de la météorologie et du relief sur la propagation acoustique. Ce mémoire est divisé en cinq chapitres. Le premier chapitre est une synthèse bibliographique qui donne les bases de notre étude. Il présente brièvement la propagation du son en milieu extérieur, et aborde la nature de la couche limite atmosphérique. Les différentes méthodes utilisées pour la prévision du bruit sont brièvement rappelées et la méthode BEM et l'équation parabolique sont présentées. Ensuite une présentation des mesures en laboratoire et en soufflerie est effectuée. Le chapitre se termine par la définition de nos hypothèses de travail appliquées dans cette étude.

Le chapitre 2 est consacré à l'étude du poids relatif de différents phénomènes en jeu dans la propagation acoustique en milieu extérieur. Cette discussion, importante pour la suite est réalisée dans le cas d'une configuration typique de plate-forme routière sur laquelle on essaye de mettre en évidence des zones sur laquelle la réfraction est négligeable devant la diffraction.

Le chapitre 3 présente une méthode hybride BEM-GFPE qui permet de prendre les avantages de chacune de ces méthodes afin de traiter des situations complexes non modélisables par l'une ou l'autre méthode. Différentes configurations typiques de plate-forme routière ont été testées (sol plan avec écran droit et écran en T).

Le chapitre 4 est consacré à la prise en compte d'effets météorologiques dans des méthodes d'éléments finis de frontière. Les transformations conformes sont utilisées dans un code BEM et les résultats sont comparés à des mesures et à des calculs numériques réalisés avec la méthode GFPE. Dans ce chapitre les validations ont été réalisées sur des configurations typiques (sol plan, remblai, sol et écran en T).

Le chapitre 5 est entièrement consacré à une campagne de mesures en soufflerie atmosphérique. La soufflerie, les dispositifs de mesures acoustiques et aérodynamiques sont d'abord présentés. L'approximation célérité effective du son est utilisée pour la prise en compte d'un champ de vitesse dans la méthode d'équation parabolique. La validité de cette approximation est ensuite discutée.

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et position du problème

Dans ce chapitre, un rappel sur les phénomènes intervenant dans la propagation acoustique en milieu extérieur est effectué. Puis, deux codes numériques utilisés pour la simulation de la propagation acoustique sont présentés : le premier est un code d'éléments finis de frontière et le second est basé sur la méthode de l'équation parabolique. La théorie des transformations conformes est ensuite brièvement présentée. Dans une dernière partie sont présentées les différentes expériences réalisées en soufflerie par Salomons [SALOMONS, 1999], Van Rentherghem [VAN RENTERGHEM, 2003] et Rosen et Gabillet [GABILLET, DAIGLE et al., 1994], Rasmussen [RASMUSSEN, 1996; RASMUSSEN and GALINDO ARRANZ, 1998].

1.1 Phénomènes intervenant dans la propagation acoustique en milieu extérieur

La propagation du son en milieu extérieur est influencée par différents phénomènes. Tout d'abord, ces différents phénomènes sont rappelés et ensuite nous nous intéressons aux effets météorologiques (gradients de température et de vent, turbulence).

1.1.1 Principaux phénomènes intervenant en milieu extérieur :

La propagation acoustique en milieu extérieur a été très largement étudiée depuis plusieurs décennies. Plusieurs synthèses bibliographiques existent, notamment celle de M.E. Delany [DELANY, 1977] en 1977 et de K. Attenborough [ATTENBOROUGH, 1988] en 1988. Plusieurs phénomènes principaux sont observables :

La divergence géométrique : elle est due à la dispersion géométrique des ondes acoustiques dans l'espace. Elle implique une diminution de 6 dB du niveau de pression sonore par doublement de la distance source récepteur dans le cas d'une source ponctuelle.

L'absorption atmosphérique : elle est due à la viscosité de l'air, aux échanges d'énergie entre les molécules et à la diffusion thermique. En première approximation, elle est proportionnelle à la distance parcourue et à un coefficient dépendant de la fréquence, de la température et de l'humidité de l'air [BASS, SUTHERLAND et al., 1995]. Pour des distances de propagation de l'ordre de la centaine de mètres et pour des fréquences comprises entre une dizaine et quelques centaines de Hertz, ce phénomène peut être négligé. Des travaux ont été réalisés pour modéliser l'absorption atmosphérique par des modèles semi-empiriques [DELRIEUX, 1991] ou théoriques [SUTHERLAND and BASS, 2004].

L'absorption des matériaux (ou effet de sol) : c'est un phénomène important puisque les matériaux qui délimitent la zone de propagation peuvent absorber une partie non négligeable de l'énergie incidente (jusqu'à 10 dB). En outre, les discontinuités d'impédance créées par la juxtaposition de différents matériaux peuvent engendrer des diffractions qui viennent modifier la nature du champ acoustique, comme le synthétise J. Defrance dans ses travaux de thèse [DEFRANCE, 1996].

La topographie des sites de propagation : elle influence de façon prépondérante la propagation de l'onde sonore. On observe des réflexions et diffractions multiples sur les obstacles rencontrés, ce qui

peut créer des fortes disparités sur les niveaux sonores entre deux points géographiquement voisins. La topographie influence aussi sur l'écoulement qui se voit modifié par la forme de l'obstacle qu'il rencontre.

Les effets météorologiques : ils jouent également un rôle prépondérant dans la propagation acoustique en milieu extérieur. Les gradients de température et de vent interviennent ainsi que la turbulence et font l'objet du paragraphe suivant.

1.1.2 Effets météorologiques

1.1.2.1 Effets dus aux gradients de température et de vent

La vitesse du son étant proportionnelle à la racine carrée de la température, les gradients de température influent sur la trajectoire des rayons acoustiques. Un gradient positif (nuit : sol plus froid que l'atmosphère) courbe les rayons vers le bas, Figure 1-1, alors qu'un gradient négatif (journée : sol plus chaud que l'atmosphère) les courbe vers le haut, Figure 1-2. Ces phénomènes sont liés au climat et sont influencés par les conditions météorologiques.

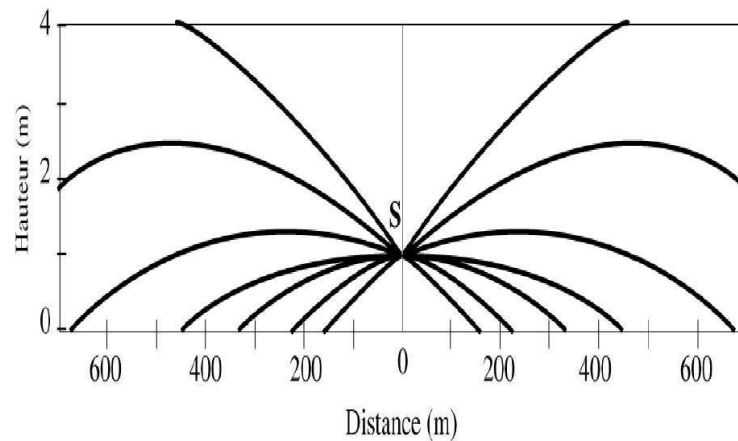


Figure 1-1 : Trajectoire des rayons acoustiques pour la réfraction vers le bas en présence d'un gradient positif de vitesse, pour une source mono polaire (figure issue de Premat [PREMAT, 2000]).

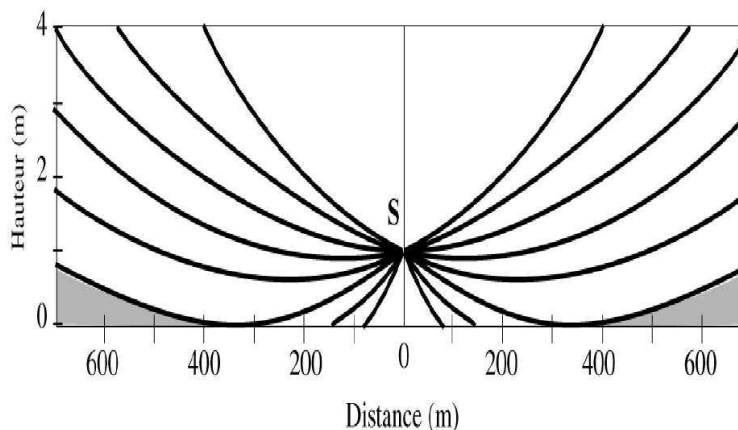


Figure 1-2 : Trajectoire des rayons acoustiques pour la réfraction vers le bas en présence d'un gradient négatif de vitesse du son, pour une source mono polaire (figure issue de Premat [PREMAT, 2000]).

Les gradients de vent interviennent aussi car ils provoquent également une courbure des rayons : vers le sol si le vent est dans le sens de la propagation, vers le haut si le vent est dans le sens contraire. Le phénomène est alors dissymétrique comme on peut le voir à la Figure 1-3.

Les gradients de température et de vent ont tous les deux pour effet de courber les rayons. Quand le gradient de température est positif ou quand le vent souffle dans le sens de propagation, il apparaît des zones de renforcement des niveaux de bruit car les rayons sont courbés vers le sol. Quand le gradient de température est négatif ou quand le vent souffle dans le sens contraire à la propagation, les rayons sont incurvés vers le haut et des zones d'ombre apparaissent dans lesquelles le niveau sonore est fortement réduit.

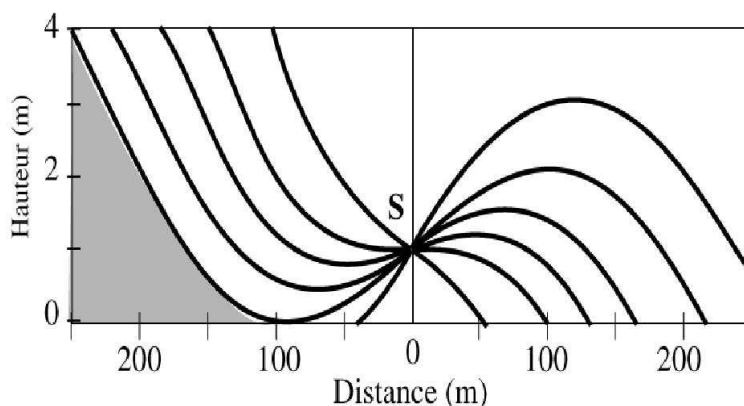


Figure 1-3 : Trajectoire des rayons acoustiques en présence de vent, pour une source mono polaire (figure issue de Premat [PREMAT, 2000]).

En outre, les fluctuations de vent et de température créent des turbulences qui causent des fluctuations des niveaux acoustiques.

1.1.2.2 Description de la couche limite atmosphérique

Schématiquement on sépare les basses couches de l'atmosphère en deux parties distinctes avec près du sol la couche limite atmosphérique et loin de l'influence du sol, à plusieurs centaines de mètres d'altitude, l'atmosphère libre. Dans l'atmosphère libre, sous l'action des forces de pression et de Coriolis, le vent (dit géostrophique) est uniforme, horizontal, très peu turbulent et sa vitesse est constante. Dans la couche limite atmosphérique, près de la surface terrestre, la présence du sol perturbe l'écoulement de l'air qui est alors soumis à des forces de frottements et donne naissance à une forte agitation, appelée turbulence [PANOFISKY and DUTTON, 1984].

La couche limite atmosphérique (CLA) est définie comme étant la partie de l'atmosphère dont la structure change directement en réponse du réchauffement radiatif du sol et de son refroidissement qui ont lieu au cours d'une journée [STULL, 1988]. Son épaisseur, varie de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité des sols, de l'ensoleillement variable suivant les lieux et l'heure de la journée. La CLA est constituée de deux parties distinctes : sa partie supérieure est appelée la couche d'Ekman, sa partie directement en contact avec la surface terrestre est appelée la couche de surface. La partie inférieure de la couche de surface, située juste au-dessus de la surface terrestre, est la sous couche rugueuse (cf. Figure 1-4).

Pour des distances de propagation ne dépassant pas 1 km, il est suffisant de considérer la couche de surface [WILSON and NOBLE, 2000]. Pour des distances de propagation comprises entre 5 et 10 km, les structures de la couche limite d'Ekman doivent être mesurées ou modélisées.

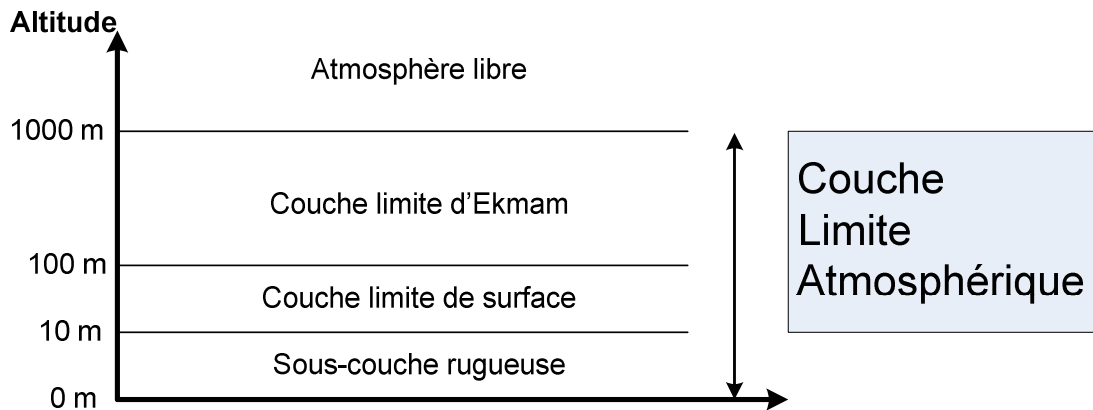


Figure 1-4 : Composition de la couche limite atmosphérique.

La sous couche rugueuse a une épaisseur qui peut varier de quelques dixièmes de millimètres (en mer) à quelques dizaines de mètres (dans les zones fortement urbanisées) en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité des sols, de l'ensoleillement variable suivant les lieux et l'heure de la journée. Dans cette zone, qui contient les éléments de rugosité, l'écoulement de l'air est fortement turbulent, non homogène et instationnaire. Il n'existe pas de modélisation universelle pour cette sous-couche, on la caractérise par une rugosité globale, notée z_0 , homogène à une longueur. Cette grandeur est fonction de la taille, de la forme et de la densité des obstacles qui recouvrent le sol. Cette zone est le siège d'une forte agitation appelée turbulence. On distingue la turbulence d'origine mécanique, générée par le cisaillement et par la présence d'obstacles, et la turbulence d'origine thermique, générée par la distribution de températures.

La propagation acoustique est fortement influencée par la turbulence atmosphérique qui participe en particulier au phénomène de diffraction des ondes acoustiques [TATARSKI, 1971]. La modélisation de la turbulence atmosphérique est difficile car les échelles des structures turbulentes s'étalent sur un large spectre (quelques millimètres à plusieurs centaines de mètres). Dans tout écoulement turbulent, on représente la vitesse du vent par un vecteur constitué d'une partie moyenne, déterministe, et d'une partie turbulente, aléatoire. Seules des mesures sur site permettent de déterminer de façon précise toutes les caractéristiques des composantes de la vitesse du vent en un endroit donné. Cependant, pour exprimer ces caractéristiques, on dispose aussi d'expressions empiriques qui donnent de bonnes estimations sur un grand nombre de sites non complexes.

1.2 Modélisation de la propagation des ondes sonores

Actuellement aucun code de calcul n'existe pour prévoir la propagation du son en milieu extérieur en prenant en compte tous les phénomènes modifiant la propagation de l'onde acoustique. La propagation du son en milieu extérieur est modifiée par les obstacles topographiques (écran, butte, colline) mais les phénomènes atmosphériques (gradients de température, vent, humidité, turbulence) affectent également la propagation des ondes acoustiques. Certains codes numériques sont adaptés à la prise en compte de topographies complexes mais ne peuvent pas prendre en compte d'effets météorologiques. D'autres sont aptes à prendre des effets météorologiques complexes mais pas d'obstacles.

Dans le prochain paragraphe, les différentes méthodes utilisées pour la prévision du bruit sont rappelées et brièvement présentées.

1.2.1 Les méthodes de rayon et la Théorie Géométrique de la Diffraction

La méthode des rayons est basée sur le principe de l'Optique Géométrique. Elle est valable à hautes fréquences. Cette méthode consiste à représenter le champ sonore à l'aide de rayons directs, de rayons réfléchis et de rayons réfractés. Elle repose sur les trois lois de base de l'Optique géométrique :

- En milieu homogène, tout rayon direct est une droite,
- Si un rayon arrive sur une surface avec un angle d'incidence θ , il donne lieu à un rayon réfléchi situé dans le plan de la normale et du rayon incident, repartant avec un angle $(-\theta)$,
- A la frontière entre deux milieux (1) et (2) caractérisés par des indices n_1 et n_2 , un rayon incident dans le milieu (1) arrivant selon un angle θ_1 donne lieu à un rayon réfracté, selon l'angle θ_2 déduit de la loi de Snell-Descartes :

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

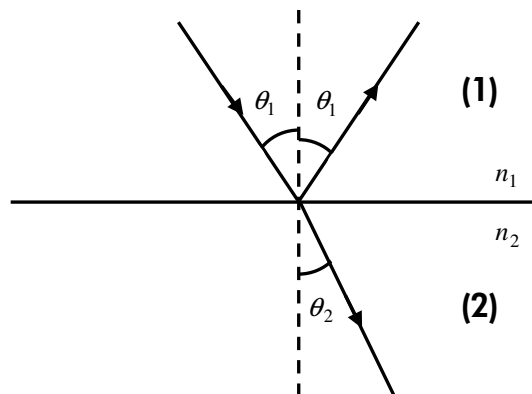


Figure 1-5 : Rayon provenant du milieu (1) rencontrant une interface avec le milieu (2).

L'amplitude d'un rayon réfléchi en un point P d'une surface est déterminée par le produit de l'amplitude du rayon incident par le coefficient de réflexion caractérisant la surface en P . De même, l'amplitude d'un rayon réfracté en un point P d'une surface est déterminée comme le produit de l'amplitude du rayon incident par le coefficient de transmission caractérisant la surface en P .

La méthode consiste alors à considérer un certain nombre de rayons ($R_n, i=1..n$) partant de la source avec une énergie E_n . Pour évaluer la pression acoustique en un point M , on considère l'ensemble des rayons arrivant en M . L'amplitude de chacun est déterminé selon le parcours effectué (rayon direct, rayon p fois réfléchis ($p \geq 0$) et q fois réfractés ($q \geq 0$)).

La Théorie Géométrique de la Diffraction (TGD) est une généralisation de l'Optique Géométrique [KELLER, 1962] dans laquelle un type de rayons est ajouté. Il s'agit des rayons diffractés par une arête ou par une surface, lorsque les rayons arrivent tangentiellement à la surface.

La méthode générale des caractéristiques est utilisée pour calculer les trajectoires des rayons acoustiques sous l'hypothèse que le milieu propagatif est faiblement inhomogène et que les effets de diffraction sont négligeables.

L'avantage majeur de la TGD réside dans la simplicité des calculs et la possibilité de prendre en compte des profils de célérité et de vitesse de vent, une topographie complexe et des effets tridimensionnels. L'un des principaux inconvénients de cette méthode est qu'elle ne permet pas de calculer le champ sur une caustique. Les caustiques sont créées lorsque des rayons adjacents se croisent. Elles correspondent à des zones où la section transversale des tubes de rayons disparaissent et où l'énergie acoustique devient infinie. Les limitations rencontrées sont :

- l'énergie acoustique élevée n'est pas uniquement localisée sur la caustique mais également dans son voisinage,
- un changement de phase ($\pi/2$, selon Pierce [PIERCE, 1991]) survient lorsque le rayon traverse la caustique qui n'est en général pas pris en compte dans les modèles de rayons.

Cependant des modifications ont été étudiées pour pallier ces inconvénients [LUDWIG, 1966]. Un autre inconvénient est que la théorie classique des rayons ne permet pas d'évaluer la pression dans les zones d'ombre (créées en cas de réfraction vers le haut ou présence d'obstacle) où l'énergie sonore est apportée par la turbulence. Lors de la réfraction vers le bas avec de forts gradients de vitesse du son, lorsque source et récepteur sont près du sol et très éloignés, la présence de multiples chemins de propagation peut rendre difficile la sommation de toutes les contributions.

1.2.2 Le Fast Field Program

La méthode numérique FFP (Fast Field Program) a d'abord été utilisée en acoustique sous-marine [DiNAPOLI and DEAVENPORT, 1980]. Elle repose sur des techniques de transformations intégrales et a été adaptée par Rasset à la propagation du son en milieu extérieur [RASPET, LEE et al., 1985]. Cette méthode permet la prévision du niveau sonore dans une atmosphère stratifiée horizontalement depuis un point source jusqu'à une position de récepteur arbitraire, au-dessus d'un sol plan d'impédance constante. Un grand nombre de profils météorologiques peuvent être considérés, notamment des profils turbulents. De plus, la méthode FFP est rapide et fournit une solution exacte du calcul du niveau sonore au-dessus d'un sol plan homogène. Mais la FFP présente des inconvénients non négligeables : l'impédance du sol doit être constante, la célérité du son et la vitesse horizontale du vent sont uniquement fonction de la hauteur et indépendants de la distance. Cette limitation ne permet pas d'utiliser la FFP pour prévoir la propagation sonore au-dessus d'un sol présentant une discontinuité d'impédance, des variations de topographie ou des profils météorologiques évoluant au cours de la propagation.

1.2.3 Les méthodes d'Éléments Finis de Frontière (BEM)

Elles sont présentées dans la section 1.3.1.

1.2.4 Les méthodes d'Equation Parabolique

Elles sont décrites dans la section 1.3.2.

1.2.5 Les méthodes de Différences Finies Temporelles (Finite Difference Time Domain)

Il s'agit de méthodes reposant sur un schéma explicite avec différences finies centrées dans l'espace et le temps pour résoudre les équations d'Euler [BOTTELDOOREN, 1997] [BLUMRICH, 1997] [BLUMRICH and HEIMANN, 2002]. Il est à noter qu'aucune simplification n'est faite dans les équations d'Euler. Par conséquent tous les phénomènes importants et complexes sont pris en compte. Ainsi des profils variés évolutifs de vitesse du son peuvent être pris en compte dans les FDTD. De fait l'inconvénient majeur d'un tel modèle réside dans le besoin énorme de ressources numériques. Par conséquent, c'est une méthode adaptée aux basses et moyennes fréquences et aux distances de propagation peu importantes.

1.3 Modèles de propagation et codes numériques utilisés

Dans cette section sont présentés deux modèles de propagation et pour chacun d'eux un code de simulations numériques de propagation disponible au CSTB : MICADO [JEAN, 1998; JEAN, DEFRANCE et al., 1999; JEAN, 2000; JEAN and GABILLET, 2000], code d'éléments finis de frontière

développé depuis une dizaine d'années, et ATMOS [ABALLEA and DEFRANCE, 2004], code basé sur la méthode de l'équation parabolique actuellement en cours de développement.

1.3.1 Les méthodes d'éléments finis de frontière

1.3.1.1 Historique et principe

La méthode des éléments finis de frontière repose sur la discrétisation d'équations intégrales de frontière. La théorie des équations intégrales de frontière remonte au début du XIX^e siècle. Depuis le milieu du XIX^e siècle, leur étude constitue une branche importante de la physique mathématique classique : la théorie des potentiels. Ainsi on peut citer par exemple, les travaux de Kellogg [KELLOGG, 1929] et Gunther [GUNTHER, 1934]. Le développement de la méthode des éléments finis de frontière en tant qu'outils de résolution numérique est postérieur, il date des années 1960. Shaw [SHAW, 1962], Rizzo [RIZZO, 1967], Cruse [CRUSE, 1969] et d'autres ont proposé les premiers développements numériques.

La théorie du potentiel classique traite surtout de champs scalaires (température, pression acoustique, potentiel de vitesse...) vérifiant des équations aux dérivées partielles faisant intervenir le laplacien : équation de Poisson, équation d'Helmholtz, par exemple. La solution d'une telle équation peut se ramener à la résolution d'une équation intégrale posée sur la frontière du domaine d'étude. L'étude de l'existence d'une solution, pour des conditions aux limites données est réalisée à l'aide des théorèmes de Fredholm.

On distingue deux catégories d'équations intégrales de frontière : d'une part les formulations indirectes et d'autre part les formulations directes. Elles sont classiquement utilisées pour des problèmes fondamentaux : de Dirichlet, Neumann ou conditions mixtes. Les formulations indirectes issues de la théorie du potentiel portent sur une inconnue intermédiaire, une distribution de potentiels de couche. Les formulations directes établissent une relation entre les variables physiques sur la frontière du domaine d'étude et leur application n'est pas restreinte à des conditions aux limites spécifiques. Les équations intégrales, directes comme indirectes, doivent être résolues numériquement dans la plupart des cas, ce qui a entraîné l'apparition de la méthode des éléments finis de frontière. [BONNET, 1995]. Il importe de souligner que cette méthode s'est posée en alternative à l'autre grande méthode numérique : la méthode des éléments finis communément désignée par son acronyme anglais F.E.M., *Finite Element Method*, en particulier lorsque le domaine de propagation devient infini. En effet, la méthode d'éléments finis de frontière apparaît plus appropriée en espace infini que la méthode des éléments finis puisque seule la surface de la frontière du domaine doit être discrétisée. La méthode des éléments finis de frontière permet ainsi de réduire la dimension du problème de un, le champ acoustique en tout point de l'espace étant dû au rayonnement de ses frontières. En outre la condition de Sommerfeld de rayonnement à l'infini est satisfaite automatiquement dans les méthodes d'éléments finis de frontière via le noyau des formulations intégrales qui répond exactement aux conditions aux limites pour des domaines infinis, contrairement aux méthodes d'éléments finis. La B.E.M. apparaît ainsi plus appropriée au traitement des problèmes de propagation en espaces infinis bien que certaines approches, comme la méthode des éléments finis [CREMERS and FYFE, 1995] aient été développées pour adapter la F.E.M. à ces domaines infinis. Des techniques développées pour les éléments finis sont adaptables pour les éléments finis de frontière : maillage et interpolation par fonctions à support borné. On pourra se reporter pour plus de précisions aux ouvrages de référence, entre autres, de Ciskowski et Brebbia [CISKOWSKI and BREBBIA, 1991], de Do Rêgo Silva [REGO SILVA, POWER et al., 1994] ou encore de Bonnet [BONNET, 1995].

Les méthodes d'équations intégrales peuvent s'appliquer quelles que soient les fréquences considérées. Toutefois la taille des systèmes linéaires à résoudre croît avec la fréquence donc les calculs sont plus longs en hautes fréquences.

Cependant il existe une restriction importante : le milieu de propagation doit être homogène. Cette limitation est due au fait que les équations intégrales s'écrivent à l'aide d'un noyau de Green qui doit être connu suffisamment explicitement pour effectuer des calculs numériques rapides. Actuellement, seuls sont bien connus les noyaux de Green de l'équation d'Helmholtz à coefficients constants.

Les méthodes d'éléments finis de frontière sont applicables dans de nombreux domaines de la physique : thermique, géophysique, élasticité, mécanique des fluides, acoustique, électromagnétisme...A

l'intérieur de la discipline acoustique, les domaines d'applications des méthodes d'éléments finis de frontière sont très vastes : études de rayonnement et diffraction des structures en vibro-acoustique, utilisations en acoustique sous-marine, applications bio-médicales, modélisations de la propagation acoustique en milieu extérieur. Il est à noter que beaucoup de ces problèmes sont étudiés dans le domaine fréquentiel même si des études existent dans le domaine temporel, Ciskowski et Brebbia [CISKOWSKI and BREBBIA, 1991].

1.3.1.2 Utilisation en propagation acoustique en milieu extérieur

Dans le domaine de la propagation acoustique en milieu extérieur, les méthodes d'éléments finis de frontière ont été essentiellement appliquées à l'étude du champ de pression en présence d'écrans acoustiques et/ou de discontinuités d'impédance. Ainsi Filippi [FILIPPI and DUMERY, 1969] étudie la diffraction d'une onde plane par un écran mince parfaitement absorbant (conditions de Dirichlet) puis parfaitement réfléchissant (conditions de Neumann) en milieu infini. Il démontre alors l'utilité des distributions, des potentiels de couche pour résoudre ces problèmes. En effet, le potentiel de simple couche se révèle adapté pour le problème de Dirichlet et le potentiel de double couche pour celui de Neumann.

En 1972, Filippi [FILIPPI, 1972] adapte la théorie des potentiels utilisée en électromagnétisme [KUPRADZE, 1965]. Il montre que toute solution d'un problème de diffraction peut être représentée par un potentiel de couche d'ordre quelconque. Les cas traités sont ceux d'un problème de Dirichlet intérieur pour le cercle, d'un problème de Neumann intérieur pour un ellipsoïde de révolution allongé et la diffraction par un cylindre infini calculée avec un potentiel mixte. D'autres cas seront traités par la suite comme par exemple celui de la diffraction d'une onde sphérique par un écran plan rectangulaire parfaitement réfléchissant [FILIPPI, 1977].

Peu après, en 1978, la diffraction par un écran mince rigide disposé sur un sol plan rigide est étudiée par Daumas [DAUMAS, 1978] qui exprime alors la solution du problème sous la forme d'un potentiel de double couche et les résultats numériques obtenus sont comparés avec succès à des résultats expérimentaux.

En 1980, Sez nec [SEZNEC, 1980] étudie la diffraction du son autour d'écrans de formes variées sur sol plan. Sez nec utilise une formulation directe et une résolution sous forme variationnelle. Les résultats sont donnés pour des surfaces rigides et des configurations infinies dans une dimension mais l'approche utilisée peut être étendue à des écrans et des sols absorbant et à des configurations tridimensionnelles.

En 1985, Habault utilise les méthodes d'éléments finis de frontière pour traiter les discontinuités d'impédance [HABAULT, 1985]. Ainsi la propagation acoustique de l'onde émise par une source cylindrique au-dessus d'une bande infinie parfaitement réfléchissante dans un plan absorbant, puis le cas d'une onde sphérique au-dessus d'un carré parfaitement rigide dans un plan absorbant sont étudiés, et les résultats sont comparés à des mesures. En 1990, Habault valide l'approche des éléments finis de frontière pour la modélisation bidimensionnelle de la propagation d'ondes dans un sol stratifié avec obstacle et dans le cas particulier d'une tranchée [HABAULT, 1990].

Entre 1985 et 1988, Chandler-Wilde [CHANDLER-WILDE and HOTHERSALL, 1985] [CHANDLER-WILDE, 1988] étudie aussi le phénomène de discontinuité d'impédance pour des problèmes bi et tri-dimensionnels à l'aide d'une formulation intégrale directe et il confronte ses résultats à des données expérimentales.

En 1990 et 1991, Kawai [KAWAI and TERAI, 1990] et Antes [CISKOWSKI and BREBBIA, 1991] travaillent sur des problèmes 3D : ils calculent le champ de pression acoustique autour d'un écran de longueur finie pour une source ponctuelle jusqu'à environ 100 Hz car les ressources informatiques de l'époque ne leur permettent pas d'effectuer leur calcul pour des fréquences supérieures à 100 Hz.

En 1991, Hotherhall et Chandler-Wilde [HOTHERSALL, CHANDLER-WILDE et al., 1991; HOTHERSALL, CROMBIE et al., 1991] utilisent une formulation directe bidimensionnelle pour tester l'efficacité d'écrans anti-bruit de différentes sections, hauteur et absorption au dessus de sols plans absorbants. Crombie [CROMBIE, PELOW et al., 1991] travaille sur les écrans parallèles.

En 1995 et 1996, Anfosso-Lédée étudie à partir d'une formulation directe le problème bidimensionnel de la propagation acoustique autour d'un écran anti-bruit [ANFOSSO-LEDEE, DANGLA et al., 1995] et notamment l'interaction écran-chaussée.

En 1996, Tekatlian [TEKATLIAN and PREMAT, 1996] fait une autre tentative sur un problème 3D en utilisant une formulation indirecte qui se limite également aux basses fréquences.

En 1996, Duhamel [DUHAMEL, 1996] montre comment à l'aide de la solution bidimensionnelle d'un problème, on peut calculer le champ de pression tridimensionnel via une transformation de Fourier. Cette démonstration est valable pour une source sphérique ou une source linéaire incohérente en présence d'écrans acoustiques au-dessus d'une surface rigide. En 1998, cette technique est étendue au cas de sols absorbants [DUHAMEL and SERGENT, 1998] et les résultats sont comparés à des données expérimentales.

Entre 1995 et 2000, Jean s'intéresse à différents cas qu'il étudie à l'aide d'une formulation directe et d'une résolution variationnelle. Le problème 2D des écrans acoustiques absorbants ou non de formes variées au dessus d'un sol plan et en bordure de voies ferroviaires est étudié en 1995 [JEAN and GABILLET, 1995]. En 1998, Jean utilise la technique développée par Duhamel (et détaillée ci-dessus) pour étudier le cas de sources ponctuelles et de sources linéaires cohérentes ou non [JEAN, 1998].

En 1997, De Lacerda [DE LACERDA, WROBEL et al., 1997] utilise une méthode d'éléments finis de frontière duale pour étudier le problème bidimensionnel au-dessus de sols plans absorbants, autour d'écrans minces avec différentes impédances. En 1998, son modèle est étendu au cas tridimensionnel [DE LACERDA, WROBEL et al., 1998]. En 1999, Granat utilise une formulation indirecte et une résolution variationnelle pour résoudre le même problème en 2D.

La méthode des éléments finis de frontière est fondée sur la connaissance de solutions élémentaires (les Fonctions de Green) et sur le théorème de réciprocité. Premat [PREMAT, 2000] a travaillé sur la prise en compte d'effets de réfraction dans une méthode d'éléments finis de frontière. Dans le cas de la réfraction vers le haut, il a introduit une fonction de Green basée sur la solution des modes normaux et pour la réfraction vers le bas, il a utilisé une solution de la série des résidus [RASPET, BAIRD et al., 1992]. Dans le cas de la réfraction vers le bas, les résultats sont confrontés avec succès avec des résultats numériques et expérimentaux issus de la littérature.

Dans la continuité de ces travaux, cette thèse vise à utiliser comme modèle de propagation de référence, les méthodes d'éléments finis de frontière. Dans la section suivante, le code BEM disponible au CSTB est présenté.

1.3.1.3 Code de calcul BEM : MICADO

Dans cette section, le code d'éléments finis de frontière MICADO [JEAN, 1998] développé par P. Jean est brièvement présenté. Le logiciel MICADO (Méthode Intégrale pour le Calcul Acoustique de la Diffraction par les Obstacles) est un code d'éléments finis de frontière dont la formulation est directe et la résolution basée sur un formalisme variationnel acoustique 2D de C. Monkala [MONKALA, 1988], adapté aux problèmes environnementaux. Le travail de Chandler-Wilde et Hothersall [CHANDLER-WILDE and HOTHERSALL, 1995] pour le calcul des fonctions de Green avec effet d'un sol impédant est intégré dans le code de calcul. De plus la prise en compte de sources ponctuelles et de lignes de sources décorréliées selon l'approche de D. Duhamel [DUHAMEL, 1996] est possible.

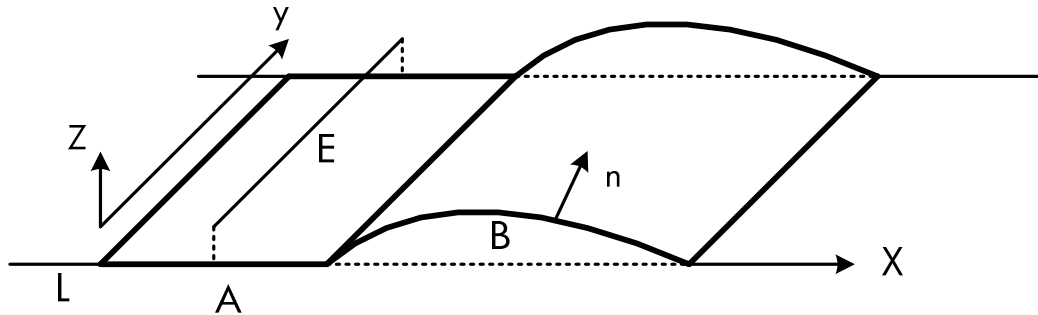


Figure 1-6 : Schéma d'une configuration générale : E est une ligne source infinie cohérente, L représente le sol, A est un contour sur le sol et B un contour au dessus du sol et n le vecteur normal à la surface.

La configuration présentée à la Figure 1-6 est une géométrie invariante selon l'axe y qui est étudiée en 2D dans le plan (x, z) . A et B sont des contours délimitant la frontière du domaine fluide. A est un contour confondu avec le sol infini d'admittance α . A peut correspondre à une route en asphalté et L à un terrain herbeux par exemple. B est un obstacle, cela peut être un écran, une colline ou un immeuble, par exemple, ayant une admittance Y variable avec la position. E est une ligne source infinie cohérente qui apparaît comme un point source lors d'une visualisation 2D dans le plan (x, z) .

La pression acoustique en tout point M de l'espace $P(M)$, créée par une source acoustique placée en E (cf. Figure 1-6), peut être représentée par :

$$P(M) = \int P(Q) \rho \omega^2 (Y(Q) - \alpha) G(M, Q) dS(Q) + \int_B P(Q) \left[\rho \omega^2 Y(Q) G(M, Q) - \frac{\partial G(M, Q)}{\partial n_Q} \right] dS(Q) + t(E, M) \quad (2)$$

où t est la contribution de sources acoustiques en l'absence des contours A et B .

Et $G(M, Q)$ est la fonction de Green qui représente la solution élémentaire calculée en un point M pour une source unitaire Q quand seul le contour L est présent (ie. en présence du sol infini impédant). Elle peut s'écrire en 2D, avec une dépendance harmonique implicite $\exp(-j\alpha x)$:

$$G(M, Q) = -\frac{j}{4} H_0(kr) - \frac{j}{4} H_0(kr') + P_\alpha(M, Q) \quad (3)$$

Où r représente la distance entre M et Q , r' représente la distance entre M et l'image de la source Q par rapport au sol (contour L) et H_0 est la fonction de Hankel de première espèce d'ordre 0.

La fonction de Green retenue est la somme d'un terme de champ direct, d'un terme de réflexion sur sol rigide et d'un terme d'effet de sol dont une expression numérique simple, a été proposée par Chandler-Wilde et Hothersall [CHANDLER-WILDE and HOTHERSALL, 1995]. L'emploi de (3) implique une restriction des surfaces à discrétiser aux frontières autres que celle du plan infini d'admittance constante.

L'expression (2) est ensuite composée avec sa dérivée normale aux frontières A et B puis intégrée sur $A \cup B$ afin de fournir une fonctionnelle symétrique dont le minimum par rapport à une fonction test conduit après discrétisation par éléments finis des contours A et B à un système matriciel plein mais symétrique.

La démarche complète est donnée dans [JEAN, 1998]. Différents aspects numériques sont mentionnés comme par exemple une réduction des temps de calculs d'un facteur supérieur à 20 simplement en utilisant une pré-tabulation des fonctions de Hankel à arguments réels. Après résolution, l'emploi de (2) permet d'obtenir la pression en tout point. La prise en compte de l'absorption par l'air n'est introduite que dans le terme source et dans le calcul final de la pression puisqu'elle n'a d'effet, aux fréquences considérées ici, que sur des distances importantes.

Passage du 2D au 2D 1/2 :

Un problème 2D correspond à une géométrie infinie et constante dans une direction y perpendiculaire au plan de représentation, ainsi qu'à des sources infinies et cohérentes dans cette même direction. Dans le cas d'écran antibruit, on peut considérer l'écran infini dans le plan perpendiculaire à la situation modélisée. Une ligne de voitures est assimilée à des sources ponctuelles incohérentes. Cette représentation des sources est modélisable en utilisant la transformation proposée par D. Duhamel [DUHAMEL, 1996] qui permet à partir d'une intégration de type Fourier de résultats de calculs 2D 1/2 d'obtenir la solution pour une source ponctuelle ou bien une ligne de sources incohérentes.

1.3.2 Méthode de l'Equation parabolique

1.3.2.1 Présentation de la méthode

Les domaines d'applications de la méthode de l'équation parabolique sont nombreux : optique, électromagnétisme, sismique [CLAERBOUT, 1976], acoustique sous marine [TAPPERT, 1977], propagation acoustique en milieu extérieur [GILBERT and WHITE, 1989; WHITE and GILBERT, 1989]. Il s'agit de transformer l'équation de propagation qui est une équation aux dérivées partielles elliptique en une équation aux dérivées partielles parabolique. En acoustique, l'équation à transformer est l'équation d'Helmholtz et le champ à calculer le champ de pression. Cette modification transforme un problème aux conditions aux limites en un problème aux conditions initiales. Ainsi à partir de la connaissance d'un champ de pression initial, un algorithme permet l'évaluation du champ de proche en proche de la source jusqu'au récepteur.

Cette méthode repose sur l'hypothèse qu'il existe un système de coordonnées dans lequel la pression acoustique est une fonction de variables séparables, et une direction de propagation privilégiée. L'hypothèse de base est que, pour un problème particulier, l'onde émanant d'une source se propage toujours en s'éloignant de la source et que l'énergie rétrodiffusée est négligeable. Avec une telle hypothèse, certains problèmes de diffraction ne pourront être résolus. Par exemple quand la source est très proche d'un écran vertical et où la contribution du champ réfléchi par l'écran dans le champ diffracté n'est pas négligeable. Mais il est alors possible d'écrire une équation couplée pour l'onde rétropropagée ([DeSANTO, 1975], [COLLINS and EVANS, 1992], [WEST and LAM, 2000]).

En revanche, l'équation parabolique permet de résoudre un grand nombre de problèmes de propagation en présence de conditions météorologiques variées : propagation au-dessus d'un sol dont l'impédance peut varier avec la distance à la source ([GAUVREAU, 1999], [CRADDOCK and WHITE, 1992]), à travers des turbulences de grande échelle ([CHEVRET, 1994], [NOBLE, BASS et al., 1990; CHEVRET, 1994]), à travers un milieu aléatoirement hétérogène [GILBERT, RASPET et al., 1990]. Au cours de ces dernières années, des travaux ont été réalisés pour prendre en compte des irrégularités topographiques ([DI and GILBERT, 1992], [SACK and WEST, 1995], [BLAIRON, 2002]).

1.3.2.2 Equation Parabolique Standard

L'équation de départ est l'équation de propagation des ondes écrite dans le domaine fréquentiel, l'équation d'Helmholtz :

$$\Delta p + k^2 p = 0 \quad (4)$$

avec $k(z) = \omega / c(z)$, où ω est la pulsation et $c(z)$ la célérité du son.

Considérons la propagation acoustique d'une source sphérique de fréquence f dans un plan vertical repéré par (O, r, θ, z) , l'origine O étant la projection de la source au sol, r étant la distance horizontale entre la source et le récepteur et z l'altitude par rapport au sol considéré comme plan. L'hypothèse de symétrie azimutale ramène la résolution dans un repère bidimensionnel (O, r, z) . Le champ de pression évalué au niveau d'un récepteur $M(r, z)$ suit donc l'équation de Helmholtz bidimensionnelle exprimée en coordonnées cylindriques :

$$\frac{\partial^2 p(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 p(r, z)}{\partial z^2} + k^2(r, z) p(r, z) = 0 \quad (5)$$

Avec $k(r, z) = 2\pi f / c(r, z)$ où $c(r, z)$ est la célérité du son dans le plan de la propagation.

En posant $\psi(r, z) = \sqrt{r} \times p(r, z)$ et en faisant l'hypothèse d'un champ lointain ($kr \gg 1$), on obtient l'équation pour le champ ψ en 2 dimensions :

$$\frac{\partial^2 \psi(r, z)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \psi(r, z)}{\partial z^2} + k^2(r, z) \psi(r, z) = 0 \quad (6)$$

L'équation parabolique est ensuite écrite pour la variable $\phi(r, z)$ définie comme l'enveloppe de $\psi(r, z)$ selon : $\phi(r, z) = \exp(-jk_r r) \psi(r, z)$ où k_r est un nombre de référence. A ce stade, on introduit l'hypothèse de paraxialité. Les variations de $\phi(r, z)$ sont supposées lentes avec r , donc on peut négliger

le terme $\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2}$ par rapport au terme $2jk_r \frac{\partial \phi}{\partial r}$. on obtient l'équation parabolique standard :

$$\frac{\partial^2 \phi(r, z)}{\partial z^2} + 2jk_r \frac{\partial \phi(r, z)}{\partial r} + (k^2(r, z) - k_r^2) \phi(r, z) = 0 \quad (7)$$

Cette équation est limitée au calcul de propagation selon des angles faibles par rapport à l'horizontale ($\pm 15^\circ$). Pour les applications pratiques de propagation extérieure, cette limitation n'est en générale pas restrictive. Toutefois lorsqu'un obstacle est placé près d'une source proche du sol, ou bien lorsqu'un récepteur se situe en dessous d'une source, cette équation ne peut être utilisée. C'est pourquoi des modèles de résolution applicables aux grands angles ont été développée ([THOMSON and CHAPMAN, 1983], [MALBEQUI, 1996], [DALLOIS, BLANC-BENON et al., 2001]).

Cette équation peut être résolue numériquement, par une méthode aux différences finies. Le pas de calcul de la différence finie ne doit pas excéder $\lambda/10$, avec λ la longueur d'onde. Aux fréquences élevées, ce pas est très petit, et le temps de calcul devient très grand pour les grandes distances de propagation.

Différentes méthodes de résolution numérique de l'équation parabolique standard existent. On distingue cinq grandes familles : la résolution par méthode Split-Step Fourier ([JENSEN, KUPERMAN et al., 2000], [CHEVRET, 1994]), par méthode Split-Step Padé ([COLLINS, 1993], [DALLOIS, 2000]), la résolution utilisant un schéma de Crank-Nicholson ([WEST, GILBERT et al., 1992], [GILBERT and WHITE, 1989]), celle appelée Generalised Terrain Parabolic Equation (GTPE) ([SACK and WEST, 1995], [SALOMONS, 2001]) et enfin celle appelée Green's Function Parabolic Equation (GFPE) qui fait l'objet du paragraphe suivant.

1.3.2.3 Green's Function Parabolic Equation (GFPE)

Une méthode de résolution appelée GFPE (Green's Fast Parabolic Equation) a été proposée par Gilbert [GILBERT and DI, 1993]. Avec cette méthode, le pas peut être très grand devant la longueur d'onde.

L'idée de départ est d'exprimer le champ ψ au point $(r + \Delta r; z)$ comme une intégrale sur la ligne verticale à r :

$$\psi(r + \Delta r, z) = 2 \int_0^\infty \left[\frac{\partial g(r, z'; r + \Delta r, z)}{\partial r} \psi(r, z') \right] dz' \quad (8)$$

qui vient de l'équation intégrale de Kirchhoff-Helmholtz.

$g(r, z'; r + \Delta r, z)$ est la fonction de Green en (r, z') due à un monopôle placé en $(r + \Delta r, z)$ qui satisfait :

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2(z) \right] g(r, z'; r + \Delta r, z) = -\delta(r + \Delta r - r)\delta(z' - z) \quad (9)$$

Si l'on suppose que le milieu est indépendant de r , la fonction de Green peut s'écrire $g(\Delta r, z', z)$.

On introduit la transformée de Fourier :

$$G(K, z', z) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\Delta r, z', z) \exp(-jK\Delta r) d(\Delta r) \quad (10)$$

où le nombre d'ondes K est la variable de Fourier conjuguée de r .
La formule de transformée de Fourier inverse s'écrit :

$$g(\Delta r, z', z) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} G(K, z', z) \exp(jK\Delta r) dK \quad (11)$$

Elle est substituée dans l'équation (8) donnant $\psi(r + \Delta r, z)$.
Le champ en $r + \Delta r$ est alors obtenu à partir du champ en r

$$\psi(r + \Delta r, z) = \frac{1}{\pi j} \int_{-\infty}^{+\infty} G(K, z, z') \psi(r, z') dz' \quad (12)$$

De cette équation Gilbert et al [GILBERT and DI, 1993] en déduisent l'équation GFPE suivante pour le champ $\phi(r, z)$:

$$\begin{aligned} \phi(r + \Delta r, z) = & \exp(j\Delta r[k(z) - k_r]) \cdot \\ & \left[\left(\frac{1}{2\pi} \right) \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(j\Delta r \sqrt{k_r^2 - k'^2} \right) e^{jk'z} dk' \int_0^{\infty} e^{-jk'z'} \phi(r, z') dz' \right. \\ & \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(k') \exp\left(j\Delta r \sqrt{k_r^2 - k'^2} \right) e^{jk'z} dk' \int_0^{\infty} e^{jk'z'} \phi(r, z') dz' \\ & \left. + 2i\beta e^{-j\beta z} \exp\left(j\Delta r \sqrt{k_r^2 - \beta^2} \right) \int_0^{\infty} e^{-j\beta z'} \phi(r, z') dz' \right] \end{aligned} \quad (13)$$

Dans cette expression, Δr est le pas de différence finie

$R(k') = (k'Z_g - k_0)/(k'Z_g + k_0)$ est le coefficient de réflexion d'onde plane avec Z_g l'impédance normalisée du sol

$$k_r = 2\pi \times f / c_0 \text{ le nombre d'ondes de référence à l'altitude } 0 \text{ et } \beta = \frac{k_r}{Z_g}$$

Cette équation GFPE est le produit d'un facteur de réfraction exponentiel et la somme de trois termes. Le premier terme représente l'onde directe, le deuxième terme représente l'onde réfléchi par le sol, et le troisième terme représente l'onde de surface.

La théorie de l'équation parabolique GFPE a été utilisée par F. ABALLEA et J. DEFRANCE pour développer un logiciel de prévision de la propagation du bruit en présence d'effet météorologique: le logiciel ATMOS [ABALLEA and DEFRANCE, 2004] [ABALLEA and DEFRANCE, 2004].

L'implémentation numérique de l'équation GFPE est basée sur un calcul pas à pas du champ harmonique $\phi(r, z)$ dans la direction $r > 0$. On utilise pour cela une grille rectangulaire dans le plan (r, z) avec des pas Δr et Δz . $\Delta z = \lambda/10$ avec λ longueur d'onde, le pas Δr peut varier de quelques λ à plus de 50 λ .

Pour éliminer les réflexions parasites sur la surface supérieure du calcul, une solution consiste à ajouter une couche d'épaisseur 50λ à 100λ dans laquelle on ajoute une partie imaginaire au nombre d'onde $k(z)$.

L'initialisation du calcul à la source est réalisée avec la fonction $\phi(z)$

$$\phi(z) = \sqrt{k_R} \left(\exp \left[-\frac{k_r^2}{2} (z - z_s)^2 \right] + \frac{Z_g - 1}{Z_g + 1} \exp \left[-\frac{k_r^2}{2} (z + z_s)^2 \right] \right) \quad (14)$$

où z_s est la hauteur de la source.

Le premier terme représente le champ direct et le second terme le champ réfléchi par le sol.

Les intégrales de Fourier dans l'équation (13) sont évaluées par un algorithme de transformée de Fourier rapide.

Pour appliquer la méthode de GFPE à un milieu qui varie avec la distance horizontale, il est possible de représenter le milieu comme une succession de zones dans lesquelles on suppose que les paramètres sont invariants avec r . Ainsi le champ à la fin d'une zone sert de fonction source pour l'entrée de la zone suivante.

1.4 Mesures en laboratoire et en soufflerie

Réalisées in situ, les expérimentations concernant la propagation acoustique en présence de vent posent un certain nombre de problèmes. Tout d'abord il peut être difficile de caractériser la source de bruit (directivité, puissance). Ensuite, les paramètres météorologiques ne sont jamais très stables dans le temps et dans l'espace. Les brusques variations de la vitesse et de la direction du vent ainsi que les inversions de températures au cours de la journée sont autant d'éléments qui perturbent les mesures. Des tentatives existent mais l'exploitation des résultats est difficile. Ainsi, le Laboratoire Central de Ponts et Chaussées possède un site extérieur expérimental situé à Saint Berthevin sur lequel des mesures acoustiques et météorologiques sont effectuées [BLAIRON, 2002] et servent à valider des méthodes de prévisions de bruit dans le cadre du projet Harmonoise [HARMONOISE, 2002].

Pour mieux contrôler les paramètres mis en jeu dans la propagation acoustique en présence de vent, des essais acoustiques peuvent être effectués en laboratoire et en soufflerie. Lors de ces expériences en milieu contrôlé, la source de bruit est bien maîtrisée et caractérisée (directivité, puissance, émission). Dans un premier temps, nous présentons les expériences réalisées sur surfaces cylindriques en laboratoire. Dans un second temps, nous décrivons les expériences en soufflerie présentes dans la littérature.

1.4.1 Mesures en laboratoire

Dans cette partie, nous présentons l'analogie qui existe entre la propagation du son dans une atmosphère soumise à la réfraction et la diffraction du son par une surface courbe cylindrique, les expériences réalisées en utilisant cette analogie et la théorie des transformations conformes qui la justifie.

1.4.1.1 Analogie entre la propagation au-dessus d'un sol plan en milieu inhomogène et la propagation au-dessus d'une surface courbe en milieu homogène

L'étude de la propagation d'une onde au dessus d'une surface courbe a d'abord été menée dans le cas des ondes électromagnétiques, pour prendre en compte la rotondité de la Terre [FOCK, 1965]. Ces travaux ont permis de mettre en évidence l'analogie existant entre la propagation au dessus d'une surface plane dans une atmosphère soumise à un gradient de célérité négatif et la propagation dans une atmosphère homogène au-dessus d'une surface convexe. Ce principe a ensuite été utilisé pour l'acoustique sous-marine [PERKERIS, 1946] puis étendu au contexte général de l'acoustique linéaire [SECKLE and KELLER, 1959] [SECKLE and KELLER, 1959].

En propagation acoustique en milieu extérieur, Almgren [ALMGREN, 1987] a été le premier à utiliser une surface courbe pour modéliser les effets de la réfraction, liée à un gradient de célérité du son. Il a mesuré le niveau sonore moyen relatif au champ libre au-dessus d'une surface cylindrique convexe de rayon 6,8 m. les mesures étant réalisées à l'échelle 1/1000, ce rayon correspond à une vitesse à 10 m au-dessus du sol de 5 m/s.

Ensuite Berry et Daigle [BERRY and DAIGLE, 1988] ont étudié en laboratoire l'évolution du champ de pression acoustique au voisinage d'une paroi courbe rigide puis absorbante de rayon 5 m. Pour Berry [BERRY, 1987], le champ de pression au-dessus d'un cylindre de grand rayon de courbure en atmosphère homogène est analogue au champ de pression au-dessus d'un sol plan lorsque le gradient de vitesse du son varie selon un profil bilinéaire c'est-à-dire que le carré de l'indice de réfraction varie linéairement avec la hauteur comme suit (R_C est le rayon de courbure et z la distance normale à la paroi, c_0 est la célérité de référence) :

$$c(z) = c_0 / \sqrt{(1 + 2z/R_C)} \quad (15)$$

Les mesures réalisées par Berry et Daigle [BERRY and DAIGLE, 1988] avaient pour but de constituer une base de données documentée sur la propagation du son dans une atmosphère réfractive afin de valider des modèles analytiques de prévision des niveaux sonores dans la zone d'ombre. Dans ces travaux, le champ diffracté est calculé par un développement en série à l'aide de la méthode des résidus, initialement développé par Pierce. Les résultats en termes de série des résidus sont en bon accord avec les mesures expérimentales dans la zone d'ombre mais comme prévu s'en éloignent dans la zone de pénombre acoustique car on sort du cadre de la théorie des résidus.

Berthelot [BERTHELOT, 1996] a contribué à améliorer les comparaisons calculs-mesures dans la zone de pénombre en suggérant de manière heuristique de remplacer dans la méthode des résidus, la longueur de l'arc le long de la surface courbée par la distance la plus courte qui relie la source au récepteur sans toucher la paroi. Les expériences de Wang [WANG, 1997] ont confirmé la validité de cette modification.

Dans le cadre d'une validation des expériences de laboratoire à échelle réduite, Li et Wang [LI and WANG, 1998] ont mis en évidence le problème de l'influence des effets tridimensionnels. Di et Gilbert [DI and GILBERT, 1994] avaient déjà abordé ce problème dans la cas de propagation acoustique au voisinage de terrains irréguliers. A l'aide de la théorie des transformations conformes, ils ont montré qu'il existe une analogie exacte entre le cas d'une surface convexe courbée cylindriquement avec un profil de vitesse exponentiel du constant, et le cas d'une surface plane avec un profil de vitesse exponentiel donné ci-dessous :

$$c(z) = c_0 \exp(-z/R_C). \quad (16)$$

Dans le cas d'une surface concave, le profil correspondant en situation de réfraction vers le bas est

$$c(z) = c_0 \exp(z/R_C). \quad (17)$$

Quand le rayon de courbure R_C est grand devant la hauteur on retrouve bien au premier ordre en z/R_C la forme des profils linéaires de vitesse du son, bien que ces profils correspondent à des géométries différentes : diffraction par une sphère dans le cas d'un profil linéaire et diffraction par une surface cylindrique dans le cas d'un profil exponentiel. Ainsi on retrouve pour une surface convexe : $c(z) = c_0(1 + z/R_C)$ et pour une surface concave : $c(z) = c_0(1 - z/R_C)$.

L'analogie exponentielle détaillée par Di et Gilbert est bien vérifiée par Wang et Li [LI and WANG, 1998] par comparaison avec des calculs obtenus avec une méthode d'éléments de frontière et des résultats expérimentaux.

Des travaux ont été réalisés par Wasier [WASIER, 1999] pour prendre en compte les effets cumulés d'un gradient de célérité du son et de la turbulence sur la propagation d'une onde acoustique au voisinage d'un sol en utilisant des parois courbes pour simuler le gradient de célérité.

Ce paragraphe a permis de synthétiser l'analogie qui existe entre la propagation du son dans une atmosphère soumise à un gradient de célérité et la diffraction du son par une surface courbe cylindrique et justifie son utilisation dans le chapitre 4.

1.4.1.2 Les transformations conformes

Dans ce paragraphe, la transformation conforme mentionnée dans la section précédente est présentée plus précisément.

Une transformation conforme $z \rightarrow f(z)$ est une application analytique du plan complexe sur lui-même (on pourra se reporter à [MORSE and INGARD, 1968]). Du point de vue géométrique, une telle transformation préserve les angles (mais pas les distances) et de fait, est d'une grande utilité dans certains problèmes de physique où la solution est sensible aux angles (mécanique des fluides, électromagnétisme, géophysique, ...).

L'avantage des transformations conformes réside dans la simplicité d'écriture de l'équation d'Helmholtz dans le nouveau repère car formellement il s'agit de la même équation. Ainsi pour un repère cartésien bidimensionnel, et une transformation conforme du type $[x, y] \rightarrow [u(x, y), v(x, y)]$, on peut écrire (cf. Tableau 1-1) :

Transformation conforme : $[x, y] \rightarrow [u(x, y), v(x, y)]$	
Repère cartésien : (x, y)	Repère transformé : (u, v)
Equation de Helmholtz : $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + k_0^2 p = -A \cdot \delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s)$ où p : pression acoustique A : amplitude de la source $(x_s - y_s)$: coordonnées de la source	Equation de Helmholtz : $\frac{\partial^2 p}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial v^2} + J \cdot k_0^2 p = -A \cdot J \cdot \delta(u - u_s) \cdot \delta(v - v_s)$ où p : pression acoustique A : amplitude de la source $(u_s - v_s)$: coordonnées de la source J : Jacobien de la transformation
Nombre d'onde : $k_0 = \frac{\omega}{c_0}$	Nombre d'onde : $k = \sqrt{J} \cdot k_0 = \frac{\omega}{c}$
Célérité : c_0	Célérité : $c = \frac{c_0}{\sqrt{J}}$

Tableau 1-1: Caractéristiques des transformations conformes.

La transformation conforme utilisée par Di et al [DI and GILBERT, 1994] est la transformée conforme logarithmique. Des précisions sont apportées dans le Tableau 1-2.

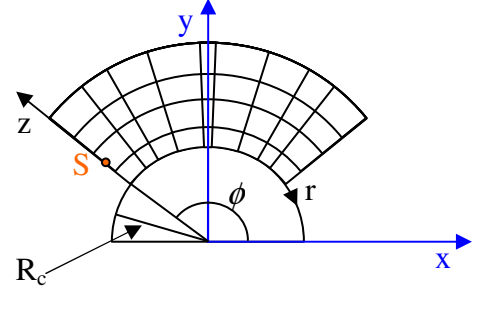
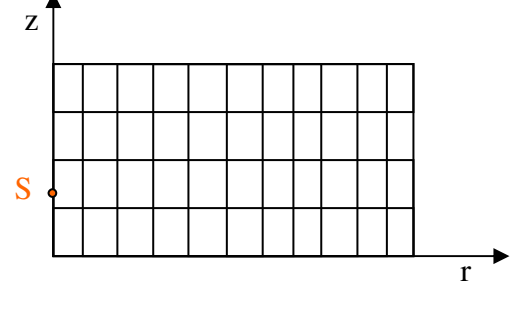
Transformation conforme logarithmique: $[x, y] \rightarrow [r(x, y), z(x, y)]$	
Repère cartésien : (x, y)	Repère transformé : (r, z)
	
$x = R_c \cdot \exp(z/R_c) \cdot \cos(-r/R_c + \phi)$ $y = R_c \cdot \exp(z/R_c) \cdot \sin(-r/R_c + \phi)$	$r = R_c [\arctan(y/x) - \phi]$ $z = R_c \ln\left(\frac{x^2 + y^2}{R_c}\right)$
Equation de Helmholtz : $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + k_0^2 p = -A \cdot \delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s)$ où p : pression acoustique A : amplitude de la source $(x_s - y_s)$: coordonnées de la source	Equation de Helmholtz : $\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + J \cdot k_0^2 p = -A \cdot J \cdot \delta(r - r_s) \cdot \delta(z - z_s)$ où p : pression acoustique A : amplitude de la source $(r_s - z_s)$: coordonnées de la source J : jacobien de la transformation
Nombre d'onde : $k_0 = \frac{\omega}{c_0}$	Nombre d'onde : $k = \sqrt{J} \cdot k_0 = \frac{\omega}{c}$
Célérité : c_0	Célérité : $c = \frac{c_0}{\sqrt{J}} = c_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{R_c}\right)$

Tableau 1-2: Caractéristiques de la transformation conforme logarithmique.

Le calcul du Jacobien s'effectue de la façon suivante :

$$J = \frac{\partial x}{\partial r} \cdot \frac{\partial y}{\partial z} - \frac{\partial x}{\partial z} \cdot \frac{\partial y}{\partial r}$$

$$J = \exp\left(\frac{2z}{R_c}\right) \cdot \left[\sin\left(\frac{r}{R_c} + \phi\right) \cdot \sin\left(\frac{r}{R_c} + \phi\right) + \cos\left(\frac{r}{R_c} + \phi\right) \cdot \cos\left(\frac{r}{R_c} + \phi\right) \right] \quad (18)$$

$$J = \exp\left(\frac{2z}{R_c}\right)$$

Lorsque le rayon de courbure R_c est grand devant la hauteur z , on peut effectuer un développement limité de l'exponentielle au voisinage de zéro et obtenir un profil de célérité linéaire de réfraction vers le haut qui s'écrit :

$$c(z) = c_0 \left(1 - \frac{z}{R_c}\right) \quad (19)$$

Remarque : Dans le nouveau repère, l'équation de Helmholtz à résoudre est :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial v^2} + J \cdot k_0^2 p = -A \cdot J \cdot \delta(u - u_s) \cdot \delta(v - v_s) \quad (20)$$

Donc l'amplitude de la source est multipliée dans le repère plan par le Jacobien.

Toutefois, pour des sources proches du sol ($R_c \gg z$), le Jacobien ($J = \exp(2z/R_c)$) est environ égal à 1 donc la modification de l'amplitude de la source n'est pas strictement nécessaire.

Le modèle de propagation utilisé dans l'article de Di et al [DI and GILBERT, 1994] est basé sur l'équation parabolique. Ce modèle ne permet pas de prendre en compte un sol présentant une topographie irrégulière. C'est pourquoi les transformations conformes sont utilisées de façon à « remplacer » les irrégularités topographiques (cf. Tableau 1-3) par une modification du profil de célérité (qui est elle bien prise en compte dans le modèle de propagation utilisé : l'équation parabolique).

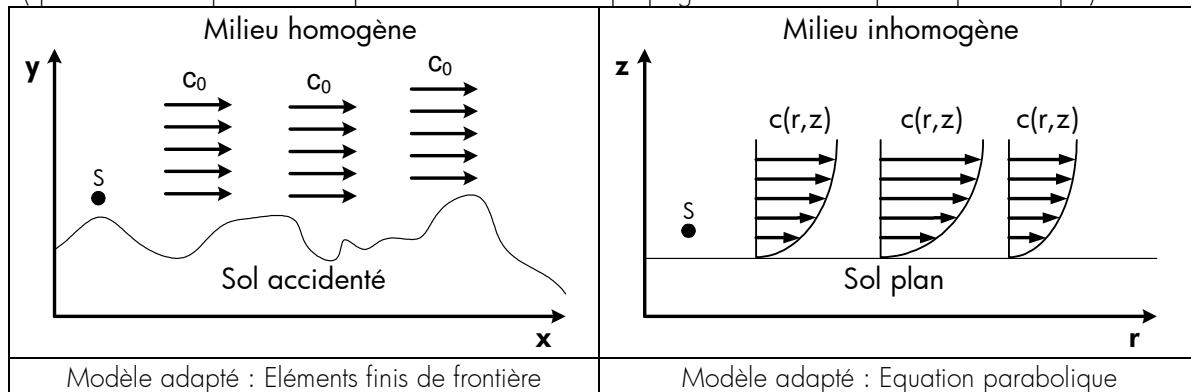


Tableau 1-3: Modèles adaptés à la configuration géométrique et météorologique.

Notre modèle de propagation de référence est basé sur la méthode des éléments finis de frontière. On rappelle que les éléments finis de frontière sont aptes à prendre en compte n'importe quelle topographie du terrain mais sont, classiquement, valables en milieu homogène.

L'idée est alors d'effectuer la démarche inverse de celle suivie par Di et al, c'est-à-dire « transformer » une propagation en milieu inhomogène au-dessus d'un sol plan en une propagation en milieu homogène au dessus d'un relief « transformé ». Cette démarche permet alors d'étudier la propagation du son dans une atmosphère soumise à un gradient de célérité exponentiel en utilisant un code d'éléments finis de frontière.

Remarque : La transformation conforme logarithmique permet l'étude d'un profil linéaire de célérité du son. Une réflexion a eu lieu pour savoir si on pouvait prendre en compte un profil logarithmique et donc trouver la transformation conforme adaptée. Des tentatives ont été essayées en écrivant le jacobien d'une telle transformation mais il s'avère que l'étape pour remonter à la transformation conforme est très difficile et même si la transformation conforme correspondante existe elle n'est pas unique.

1.4.2 Mesures en soufflerie

Pour mieux contrôler les paramètres mis en jeu dans la propagation acoustique en présence de vent, des essais acoustiques sont effectués en soufflerie. Nous présentons ici les expériences en soufflerie présentes dans la littérature pour des configurations typiques de plate-forme routière. Tout d'abord nous présentons la campagne de mesures de Salomons. Ensuite est présentée la campagne de mesures en soufflerie de Van Rentherghem et le mode opératoire choisi, et enfin une campagne réalisée par le CSTB.

1.4.2.1 Expériences de Salomons

Salomons [SALOMONS, 1999] a réalisé des expériences à l'échelle 1/30^{ème} dans une soufflerie dont la section test est parfaitement réfléchissante. Dans ces expériences, la direction du vent est perpendiculaire à l'écran et la propagation est réfractée vers le bas. Les vitesses du vent varient de 2m/s à 14 m/s et sont mesurées à une hauteur de 9m ($=z_{ref}$). Le profil du vent est logarithmique :

$$v(z) = \frac{v_{z_{ref}}}{\ln(1 + z_{ref}/z_0)} \ln\left(1 + \frac{z}{z_0}\right)$$
 avec z_0 le paramètre de rugosité. La valeur moyenne de rugosité pour le sol rigide et lisse est de 1 mm.

A l'échelle 1, l'écran a pour hauteur 5.55m et est placé à 30m de la source dont la hauteur est 1.89m. Les récepteurs sont placés à 90 m de la source à 6 et 12 m. Les mesures sont effectués pour les octaves 250Hz (fréquences comprises entre 185 Hz à 375 Hz) et 500 Hz. (fréquences allant de 370 Hz à 750 Hz).

Salomons observe une réduction de l'efficacité des écrans en présence de vent. En effet, les ondes acoustiques sont courbées vers le bas et pénètrent la zone d'ombre de l'écran. A une distance de 20H derrière l'écran, (où H est la hauteur de l'écran), les profils de vent deviennent identiques au profil incident. Ainsi pour des récepteurs loin de la zone d'ombre de l'écran, la réfraction du son induite par l'écran n'est pas importante.

La présence de gradients de vent est considérée comme le facteur principal météorologique à faible distance derrière l'écran. Les profils de température sont supposés inchangés par la présence d'écran acoustique. Salomons affirme que dans la plupart des situations les effets du vent dominant.

Il est à noter que la turbulence affecte aussi la performance de l'écran acoustique. Les effets sont importants à grande distance et à hautes fréquences. A faible distance, les effets dus à la turbulence sont négligeables par rapport à la réfraction de l'écran.

Ces observations nous seront utiles pour le chapitre 2 dans lequel nous nous intéressons au poids relatif des différents phénomènes en jeu dans la propagation acoustique en milieu extérieur.

1.4.2.2 Expériences de Van Rentherghem

Pour valider ses résultats numériques obtenus avec une méthode FDTD (Finite Difference Time Domain), Van Rentherghem a réalisé une campagne en soufflerie [VAN RENTERGHEM, 2003].

La soufflerie utilisée pour ces expériences est une soufflerie à circuit fermé dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Vitesse du vent : 11 m/s
- Largeur de la soufflerie : 1.2m et hauteur de la section test : 1.6m.
- Incidence normale du vent
- Bruit de fond de 85 dB à 1 kHz, 50 dB à 10 kHz et 20 dB à 20 kHz.

La propagation du son est considérée comme bidimensionnelle dans la soufflerie.

Les expériences sont réalisées à l'échelle 1:20. La couche limite est alors de l'ordre de 60 cm. A cette hauteur, 99% de la vitesse du courant libre est atteint. En présence d'écran acoustique, il est important que la hauteur de la couche limite soit bien au-dessus de la barrière acoustique pour bien modéliser l'influence de l'obstacle sur le profil de vent. A l'échelle 1/20^{ème}, les fréquences de travail sont de 10 kHz à 20 kHz ce qui correspond à l'échelle 1 à des fréquences de 500 à 1000Hz. Les propriétés de l'air ne variant pas avec l'échelle, l'absorption par l'air sera accentuée dans l'expérience à échelle réduite. Cet effet sera cependant petit en raison des faibles distances de propagation.

La vitesse du vent et la vitesse du son ne subissent pas de réduction. Par conséquent, la réfraction du son à l'échelle réduite sera égale à celle à l'échelle 1. Le nombre de Reynolds est réduit : vitesse du vent et viscosité de l'air ne sont pas réduits mais la longueur est réduite. Cela veut dire que le degré de turbulence est 20 fois plus petit. L'expérience a lieu à proximité de l'écran (jusqu'à une distance de 10 fois la hauteur de l'écran) donc on peut faire l'hypothèse que la réfraction du son est plus importante que les effets de la turbulence.

Les écrans ont pour hauteur 18 cm et pour épaisseur : 1 cm. Les tweeters sont insérés dans le sol de façon à modéliser une ligne source cohérente au niveau du sol sur toute la largeur de la soufflerie. Les tweeters émettent entre 10 et 20kHz des sons purs avec des fréquences émises par pas de 50 Hz. Les tweeters ont un diamètre de 25 mm et émettent un niveau de pression constant. Les réflexions sur les murs sont évitées en utilisant un matériau absorbant de type laine de roche (épaisseur 5 cm) très efficace pour ces fréquences. Le faux plancher est construit en panneaux de contreplaqués.

Le champ de pression est mesuré avec un ½ pouce de BK(type 4190) avec une réponse plate (+ 1 dB) jusqu'à 20 kHz en incidence normale. Le microphone peut être placé avec une grande précision à des endroits derrière l'écran de 3 à 10 fois la hauteur de l'écran. Le microphone est placé à 0.47H au-dessus du sol (8.5 cm à l'échelle maquette).

La vitesse de vent utilisée lors des expériences est 11 m/s. Les vitesses de vent sont mesurées avec des sondes de 16 mm avec une précision de +/- 0.1 m/s. Les données sont obtenues à une fréquence de 1 Hz et moyennées sur une période d'échantillonnage de 1 minute.

1.4.2.3 Expériences menées au CSTB

Trois campagnes de mesures ont été réalisées en juin 1987, novembre 1987, et septembre 1988 dans la soufflerie atmosphérique à retour du CSTB de Nantes.

Les expériences ont été réalisées à l'échelle 1/20 avec la technique de mesure Time Delay Spectrometry [MILLOT, 1988]. Des configurations avec vent portant et vent contraire ont été testées pour des cas avec et sans écran. Trois types de sol ont été testés : un sol réfléchissant, un sol de type gazon et un sol de type sable et feuilles.

Plusieurs types d'écoulement ont été testés dans lesquels la vitesse moyenne et l'intensité de turbulence varient.

1.4.2.4 Discussions

Les expériences mentionnées ne sont pas utilisables dans le cadre de notre étude. En effet, les mesures réalisées par Salomons et Van Rentherghem sont réalisées à des fréquences fixées alors que nous souhaitons étudier l'évolution de la pression acoustique en fonction de la fréquence. Les expériences réalisées au CSTB ne sont pas complètes car elles ne donnent pas la cartographie du champ de vitesse. Cette cartographie est nécessaire à la prise en compte du champ de vitesse dans nos modèles numériques de propagation.

1.5 Hypothèses de travail

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la propagation acoustique en milieu extérieur à longue distance du bruit dû aux infrastructures de transport terrestres, c'est-à-dire routières et ferroviaires. Les transports aériens et les transports fluviaux sont exclus de cette étude.

Dans cette section sont exposées les hypothèses de travail dans lesquelles sont effectuées les calculs acoustiques présentés dans les chapitres suivants : intervalle d'étude des fréquences, conditions météorologiques, hauteurs de sources, hauteurs des récepteurs.

1.5.1 Choix d'un modèle de propagation acoustique

Toutes les méthodes citées au paragraphe 1.2 ont leurs avantages mais sont aussi toutes limitées, leurs caractéristiques sont rassemblées dans le Tableau 1-4. Les méthodes de rayons et le Fast Field Program n'ont pas été retenus en raison de leurs limitations (cf. Tableau 1-4). Les méthodes FDTD peuvent prendre en compte des profils complexes de vitesse du son et des éléments de topographies variés mais leur utilisation nécessite d'importantes ressources de calcul. Dans le cadre de la Directive Européenne [Directive, 2002], il est important de connaître la propagation du bruit à longue distance et les calculs sont à effectuer pour des fréquences typiques du bruit des infrastructures de transport terrestre (de 100 Hz à 5000 Hz) donc les méthodes FDTD se révèlent peu appropriées. Les méthodes d'équation parabolique se révèlent adaptées à la prise en compte de profils de vitesse du son complexes sur de grandes distances mais inadaptées à la prise en compte d'écrans de forme quelconque. Quant aux méthodes d'éléments finis de frontière, elles se révèlent adaptées à la prise en compte de topographies très complexes mais sous leur forme classique, elles ne sont valables qu'en milieu homogène, c'est-à-dire pour

un profil de vitesse du vent constant et invariant. Des travaux ont été menés récemment pour étendre les éléments finis de frontière au milieu inhomogène (approche de Météo-BEM, Premat [PREMAT, 2000]).

Dans la continuité de ces travaux, cette thèse vise à utiliser comme modèle de propagation de référence les méthodes d'éléments finis de frontière et à explorer différentes pistes pour permettre de prendre en compte des phénomènes météorologiques.

Ainsi une approche basée sur la théorie des transformations conformes est utilisée (cf. chapitre 4) et des possibilités d'utiliser d'autres transformations conformes ont été cherchées. Un « couplage » avec un modèle d'équation parabolique est réalisé (cf. chapitre 3). Ces approches numériques sont complétées par des validations expérimentales (cf. chapitre 3, 4 et 5).

Modèle de propagation	Avantages	Limitations
Méthodes de rayons	- Calculs simples - Prise en compte de profils de célérité et de vitesse du vent	- Caustiques - Réfraction vers le haut : zone d'ombre acoustique - Réfraction vers le bas : sommation difficile pour la prise en compte de multiples chemins de propagation
Fast Field Program	- Atmosphère stratifiée horizontalement	- Temps de calcul longs - Difficulté de contrôle des erreurs
Equation Parabolique	- Prise en compte de profils de célérité et de vitesse du vent variés et complexes	- Difficulté de prise en compte de topographie de forme quelconque
Eléments Finis de Frontière	- Prise en compte de topographie complexe	- Pas d'effets météorologiques pris en compte dans la forme classique
Différences Finies Temporelles	- Prise en compte de topographies et de profils de vitesse du vent variés et complexes	- Nécessite d'importantes ressources informatiques : non adaptés aux longues distances et hautes fréquences.

Tableau 1-4 : Tableau récapitulatif des avantages et limitations des différents modèles de propagation.

1.5.2 Dimension du problème

Les problèmes de propagation acoustique sont des problèmes tridimensionnels. En théorie les méthodes d'éléments finis de frontière permettent d'étudier des problèmes 3D. Mais les temps de calculs importants et les puissantes ressources informatiques nécessaires nous ont amené à décider de travailler sur des configurations 2D. Toutefois, certains calculs seront menés en 2D 1/2 tels que définis dans le paragraphe 1.3.1.3.

1.5.3 Sources automobiles et ferroviaires

Dans ce contexte, il est important de bien cerner les domaines fréquentiels d'intérêt. Dans ce contexte, quelques caractéristiques pour les sources automobiles et ferroviaires sont rappelées ci-après :

- Sources de bruit routier:

Dans le cas d'une automobile, le bruit provient :

- o De sources mécaniques : ce sont essentiellement les vibrations du moteur et du pot d'échappement qui se transmettent aux différentes parties de la structure du véhicule et rayonnent des ondes acoustiques,
- o Des sources aérauliques : les variations de l'air aspiré au niveau de l'admission ou refoulé au niveau de l'échappement sont sources de bruit. Les bruits de ventilateur et à grande vitesse, le bruit de l'écoulement de l'air sur le relief de l'automobile créent du bruit,
- o Des bruits dus au contact pneumatique/chaussée : ils dépendent de la nature du contact, du relief et du type de la chaussée et des sculptures des pneumatiques.

Le spectre de bruit d'une automobile est essentiellement un spectre à large bande plus riche en fréquences graves qu'en fréquences aiguës. Le spectre d'étude s'étend de 63 Hz à 8000 Hz. Une étude de spectre normalisé montre que les composantes gênantes du bruit sont essentiellement contenues dans les bandes d'octave 500, 1000 et 2000 Hz.

- Sources de bruit ferroviaires :

Les bruits émis à l'extérieur d'un convoi ferroviaire peuvent être regroupés en quatre familles :

- o Bruit de motrice : il dépend fortement du type de matériel mas en général les motrices Diesel émettent les plus fortes puissances acoustiques,
- o Bruit de roulement,
- o Bruit aérodynamique : il est négligeable aux vitesses classiques mais devient prépondérant aux grandes vitesses (plus de 240 km/h, par exemple pour le TGV),
- o Bruits accidentels, en particulier du freinage.

Contrairement au spectre du bruit routier, le spectre du bruit de train est pauvre en fréquences graves et la richesse en fréquences aiguës croît avec la vitesse.

Les spectres du bruit routier et ferroviaire ont leurs composantes gênantes de bruit contenues dans les bandes d'octave 500, 1000 et 2000 Hz donc on choisira pour la suite de ce travail comme domaine fréquentiel, l'intervalle de fréquences : [50 ; 2500Hz].

1.5.4 Conditions météorologiques

Dans la norme AFNOR S31-133 [AFNOR, 2001], trois types de conditions météorologiques sont définis :

- Conditions atmosphériques homogènes ou « conditions homogènes » : conditions atmosphériques pour lesquelles la vitesse de propagation (ou célérité) des ondes acoustiques peut être considérée comme constante dans toutes les directions et en tout point de l'espace de propagation. Dans ces conditions, les rayons sonores sont des segments rectilignes.
- Conditions atmosphériques favorables à la propagation des sons ou « conditions favorables » : conditions atmosphériques pour lesquelles la vitesse de propagation (ou célérité) des ondes acoustiques peut être considérée comme croissante avec l'altitude dans la direction de propagation. Ces conditions conduisent en général à des niveaux sonores au récepteur supérieurs à ceux observés en condition d'atmosphère homogène pour une source sonore identique. Les rayons sonores sont courbés vers le sol.
- Conditions atmosphériques défavorables à la propagation des sons ou « conditions défavorables » : conditions atmosphériques pour lesquelles la vitesse de propagation (ou célérité) des ondes acoustiques peut être considérée comme décroissante avec l'altitude dans la direction de propagation. Ces conditions conduisent en général à des niveaux sonores au récepteur inférieurs à ceux observés en condition d'atmosphère homogène pour une source sonore identique. Les rayons sonores sont courbés vers le ciel.

Dans la norme AFNOR S31-133[AFNOR, 2001], une méthode de calcul de l'atténuation du bruit dû aux infrastructures de transport terrestre lors de sa propagation en milieu extérieur est proposée dans les deux premiers types (conditions favorables et conditions homogènes). Dans cette thèse, les cas étudiés relèveront pour la plupart de ces deux cas de figure mais quelques exemples en conditions défavorables seront aussi présentés dans le chapitre 4.

1.5.5 Hauteur de source

Pour les sources routières, on choisit de fixer la hauteur de la source à 0,5 m au-dessus du plan de roulement quelle que soit la fréquence, conformément à la convention adoptée par la norme AFNOR S31-133 [AFNOR, 2001].

Dans le cas des sources ferroviaires, la convention est la suivante :

- La hauteur est fixée à 0,8m au-dessus du plan de roulement pour les bandes d'octave 125 Hz, 250 Hz et 500 Hz
- La source sonore est au niveau du plan de roulement pour les bandes d'octave 1000 Hz, 2000Hz et 4000Hz

Dans cette thèse, nous avons choisi de respecter la norme AFNOR pour la source routière. Ainsi la source sera disposée à 0,50 m au-dessus du sol.

1.5.6 Hauteur des récepteurs

Dans la norme AFNOR S31-133 [AFNOR, 2001], les récepteurs doivent être placés à 2 m au-dessus du sol et impérativement à une distance normale à l'infrastructure inférieure à 800 m.

Dans les simulations numériques effectuées dans le cadre d'Harmonoise [HARMONOISE, 2002], les hauteurs des récepteurs sont 1,5 m et 4 m conformément à la Directive Européenne [Directive, 2002].

Dans cette étude, on optera pour des récepteurs placés à 1,5m, 2m ou à 4m.

1.5.7 Distances de propagation

Dans le cadre de la lutte contre le bruit des transports terrestres [Directive, 2002], les nouvelles exigences réglementaires imposent des niveaux sonores de plus en plus faibles. Par conséquent les distances de propagation acoustique considérées sont de plus en plus grandes. Le code de calcul de référence basé sur la méthode BEM peut s'avérer coûteux en temps de calculs donc il est nécessaire de choisir une distance suffisante mais pas trop importante à laquelle les effets météorologiques sont visibles. Pour que l'influence des effets météorologiques soit visible et le temps de calcul raisonnable, les distances de propagation à considérer sont de l'ordre de la centaine de mètres.

1.5.8 Modèles d'impédance utilisés

Une onde acoustique qui se propage dans l'atmosphère peut être réfléchiée ou diffractée par le sol, un écran acoustique... La réflexion sur une surface dépend de l'impédance acoustique de la surface, grandeur qui caractérise la résistance de la surface au passage de l'onde acoustique. L'impédance est infinie quand la surface est rigide, le coefficient de réflexion prend alors la valeur 1, ce qui signifie que l'onde est réfléchiée sans atténuation. En général, l'impédance est une grandeur complexe dont la partie imaginaire représente un déphasage de l'onde réfléchiée par rapport à l'onde incidente.

Différents modèles d'impédance ont été établis pour les milieux poreux. Ces modèles permettent d'exprimer l'impédance en fonction de la fréquence. Certains modèles sont à un paramètre mais d'autres peuvent en avoir trois ou plus. Les modèles les plus utilisés en acoustique sont : le modèle de Delany et Bazley [DELANY and BAZLEY, 1970], le modèle de Zwikker et Kosten [ZWIKKER and KOSTEN, 1949], le modèle de Hamet [HAMET and BERENGIER, 1993] et le modèle d'Attenborough [ATTENBOROUGH, 1985] [ATTENBOROUGH, 1992].

Le modèle semi-empirique de Delany et Bazley est le plus simple, et il est très utilisé. Il ne dépend que d'un seul paramètre, la résistance spécifique au passage de l'air σ .

Dans ce travail, nous utiliserons le modèle de Delany et Bazley. Delany et Bazley ont développé un modèle empirique à un paramètre, les expressions de l'impédance Z et du nombre d'onde complexe k sont données par :

$$Z = 1 + 0,0511 \left(\frac{\sigma}{f} \right)^{0,75} + j 0,0768 \left(\frac{\sigma}{f} \right)^{0,73} \quad (21)$$

$$\frac{k}{\omega / c_0} = 1 + 0,0858 \left(\frac{\sigma}{f} \right)^{0,70} + j 0,175 \left(\frac{\sigma}{f} \right)^{0,59}$$

Dans ce modèle, le matériau poreux est caractérisé par un unique paramètre : la résistance spécifique au passage de l'air σ (exprimé en kPa.s.m²). Les autres quantités intervenant dans ces expressions sont la célérité du son dans l'air c_0 , la fréquence f . La dépendance en temps est $\exp(-j\omega t)$.

Ce modèle n'est valable que dans le cas où le sol est à réaction localisée, c'est-à-dire un sol d'épaisseur infinie dont l'impédance ne dépend pas de l'angle d'incidence. En général, les caractéristiques d'un milieu absorbant dépendent également de son épaisseur. Dans ce cas, on introduit une nouvelle quantité, l'impédance normalisée de surface Z_n [ZWIKKER and KOSTEN, 1949] qui est calculée à partir de la formule suivante :

$$Z_n = Z \coth(jkd) \quad (22)$$

d représente alors l'épaisseur du matériau absorbant considéré. En pratique, on peut souvent faire l'approximation $Z_n = Z$ pour des épaisseurs de matériau supérieures à 0,1m, sauf pour les matériaux très absorbants.

1.5.9 Tableau récapitulatif des hypothèses de travail

Le tableau suivant résume les choix faits pour les configurations présentées dans cette thèse et les normes et références qui les justifient.

Modèle de propagation de référence :	Méthode d'éléments finis de frontière
Dimension du problème :	2D ou 2D1/2
Domaine fréquentiel :	[50 ; 2500Hz]
Conditions météorologiques :	conditions homogènes conditions favorables conditions défavorables
Modèle d'impédance :	modèle semi-empirique de Delany et Bazley
Hauteur des sources	$z_S = 0,5m$
Hauteur des récepteurs	$z_R = 1,5m; 2m$ ou $4m$
Distances de propagation	De l'ordre de la centaine de mètres

Tableau 1-5: Tableau récapitulatif des hypothèses de travail.

Chapitre 2 : Etude du poids relatif de différents phénomènes en jeu dans la propagation acoustique en milieu extérieur

Les phénomènes intervenant dans la propagation acoustique en milieu extérieur sont nombreux : divergence géométrique, absorption des matériaux, diffraction par un obstacle, réfraction acoustique, turbulence... Dans ce chapitre, on cherche à savoir si certains phénomènes de propagation peuvent être découplés ou doivent être considérés simultanément. Dans ce but, on essaie de mettre en évidence des zones où les effets météorologiques peuvent être considérés comme négligeables/prépondérants par rapport à d'autres phénomènes comme la diffraction par un écran, la réflexion sur un sol [PRIOUR, PREMAT et al., 2002]. C'est en comparant des cartes sonores que nous allons voir si on peut considérer la réfraction et la diffraction comme des effets indépendants ou non.

Cette discussion est très importante et nécessaire pour le couplage qui sera effectué entre méthodes d'éléments finis de frontière et d'équation parabolique (cf. chapitre 3). En effet, si on peut mettre en évidence une zone derrière l'écran dans laquelle les effets de réfraction sont négligeables alors on pourra utiliser la méthode des éléments finis de frontière dans cette zone et dans le reste du domaine, l'équation parabolique.

2.1 Choix des paramètres et de la configuration géométrique

Nous avons choisi d'étudier une configuration typique de plate forme routière : une source est placée au-dessus d'une route en bordure de laquelle est disposée un écran acoustique et le milieu est soumis à un profil de vitesse du vent linéaire. On cherche à savoir si on peut mettre en évidence une zone dans laquelle la diffraction de l'écran est prépondérante devant la diffraction. Plusieurs paramètres, décrits dans la section 2.2, peuvent varier et dans la section 2.2.1, la configuration géométrique et des premiers résultats sont décrits. Dans la section 2.2.2, le critère choisi pour déterminer la zone dans laquelle on peut négliger les effets de réfraction est expliqué. Dans la section 2.2.3, les résultats sont interprétés et des tendances mises en évidence.

2.2 Description des paramètres

Différents paramètres peuvent influencer la propagation acoustique ; hauteur de la source de l'écran du récepteur, fréquence, gradient de célérité du son, distance source-récepteur... On a choisi de faire varier les paramètres suivants :

- h la hauteur de l'écran,
- a un paramètre qui caractérise les effets météorologiques. Les profils météorologiques étudiés sont décrits par la célérité du son exprimée en fonction de l'altitude z selon $c(z) = c_0(1 + a z)$,
- f la fréquence,
- h_s la hauteur de la source.

La hauteur de la source a été fixée à 0,03 m au-dessus du sol. Cette hauteur est très faible, la source est quasiment posée sur le sol. Cela permet d'éviter le phénomène de réflexion sur le sol.

Les paramètres variables peuvent prendre les valeurs suivantes :

- h représente la hauteur de l'écran et peut varier de 2 à 5 m par pas de 0,5m,
- f est une fréquence centrale d'octave et peut prendre les valeurs : 125, 250, 500 et 1000 Hz,
- a est un paramètre qui caractérise les effets météorologiques. Il peut prendre les valeurs répertoriées dans le Tableau 2-1. Une approximation célérité effective du son a été utilisée pour évaluer la vitesse du vent à 10 m au-dessus du sol et la qualifier de faible, moyenne ou forte selon la Norme Afnor [AFNOR, 2002].

Valeur du paramètre a (m^{-1})	Vitesse à une hauteur de 10 m ($m.s^{-1}$)	Classification du vent
$a=2.5 \cdot 10^{-4} m^{-1}$	$v=0.85$	Vent faible
$a=10^{-3} m^{-1}$	$v=3.4$	Vent moyen
$a=2.5 \cdot 10^{-3} m^{-1}$	$v=8.5$	Vent fort

Tableau 2-1: Valeur du paramètre a , valeur correspondante de la vitesse du vent à 10m au-dessus du sol.

Ce chapitre vise à déterminer s'il existe une loi exprimant la distance horizontale D derrière l'écran sur laquelle on peut considérer la réfraction négligeable en fonction de ces différents paramètres. En d'autres termes, est-il possible d'écrire une loi de la forme :

$$D = \text{fonction}(h, f, a) \quad (23)$$

On a choisi d'étudier une configuration de plate-forme routière détaillée à la Figure 2-1. Le critère pour déterminer D est détaillé à la section 2.2.2.

2.2.1 Choix de la configuration géométrique

Une configuration typique de plate forme routière est étudiée (cf. Figure 2-1) : une source ponctuelle est disposée à 0,03 m du sol rigide et située à 20 m d'un écran anti-bruit, qui a pour hauteur h mètres. Afin de ne pas introduire de phénomène d'absorption, le sol et l'écran sont constitués de matériaux parfaitement réfléchissants.

Les résultats numériques sont présentés sous forme de carte d'énergie sonore qui présentent les atténuations relatives par rapport au champ libre calculées selon la formule suivante :

$$Att(x, y) = 10 * \log \left(\frac{|P_{tot}(x, y)|^2}{|P_{lib}(x, y)|^2} \right) \quad (24)$$

où $P_{tot}(x, y)$ représente le champ acoustique total et $P_{lib}(x, y)$ le champ libre en conditions homogènes au niveau du récepteur M de coordonnées (x, y) .

Pour respecter nos hypothèses de travail, la distance maximale source-récepteur doit être de la centaine de mètres (cf. Tableau 1-5). Les atténuations relatives sont évaluées en tout point d'une grille de récepteurs de 120 m de long et de 20 m de haut et visualisées à l'aide de cartes. Les simulations numériques sont réalisées à l'aide de la méthode de l'équation parabolique GFPE (logiciel ATMOS cf. section 1.3.2.3).

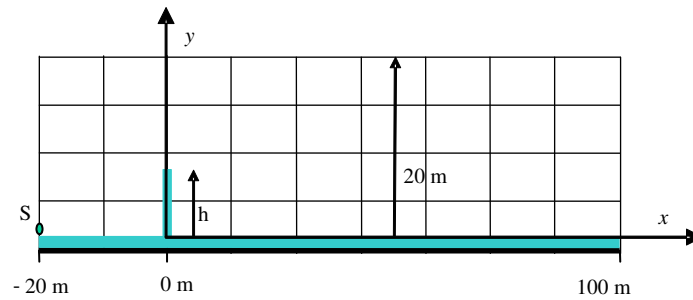


Figure 2-1 : Configuration géométrique : un écran rigide est disposée au dessus d'un sol rigide. La hauteur de la source est 0,03m, celle de l'écran est notée h. La distance de la source à l'écran est 20 m.

Dans la suite de ce chapitre et dans l'Annexe A, des cartes d'atténuations relatives sont présentées selon un code de couleurs : l'échelle des atténuations relatives s'étend de -20 dB (en bleu foncé) à $+10$ dB (rouge foncé). Il est difficile en observant la carte des atténuations relatives en milieu homogène et celle en présence de réfraction de conclure sur l'importance des effets météorologiques c'est pourquoi on représente les indicateurs Att_{ref} et Att_{diff} définis ci-après.

On désigne par Att_{ref} l'atténuation relative obtenue en présence d'effets de réfraction et $Att_{hom o}$ l'atténuation relative obtenue pour des conditions homogènes. Sur la Figure 2-2, on trace à gauche les cartes d'atténuations relatives représentant Att_{ref} et à droite les cartes représentant la différence entre Att_{ref} et $Att_{hom o}$ qu'on note Att_{diff} . L'échelle de cette différence s'étend de -5 dB (en bleu foncé) à 5 dB (en rouge foncé). Sur les cartes présentant Att_{ref} , les lignes d'isovaleurs -10 dB, -8 dB, -6 dB, -4 dB, -2 dB, 0 dB, 2 dB, 4 dB, 6 dB, 8 dB, 10 dB sont représentées afin de rendre les cartes plus lisibles. Sur celles présentant Att_{diff} , les lignes d'isovaleurs -2 dB, -1 dB, 0 dB, 1 dB, 2 dB sont représentées.

Si sur une carte située à droite, $Att_{diff}(x, y) = 0$ dB en un point donné $M(x, y)$ (couleur verte) cela signifie que les atténuations relatives obtenues en présence de réfraction et en conditions homogènes sont égales. Ainsi on peut conclure qu'en ce point, le phénomène de réfraction ne joue pas de rôle. En revanche si en un point donné d'une carte à droite, $Att_{diff}(x, y) \geq 2$ dB (couleur rouge) cela signifie que le niveau dans la configuration avec réfraction est plus important qu'en conditions homogènes. Donc la réfraction joue un rôle non négligeable pour ce point.

Afin de pouvoir étudier l'influence de la réfraction, la hauteur de l'écran et la fréquence sont dans un premier temps fixés et seul le paramètre a peut varier.

Ainsi pour une hauteur d'écran de 4 m et une fréquence de 500 Hz, on obtient les cartes d'atténuations relatives présentées à la Figure 2-2. A gauche sont présentées les cartes d'atténuations relatives par rapport au champ libre en présence de réfraction (Att_{ref}). A droite, on présente la différence entre les atténuations relatives avec effet de réfraction (cartes de gauche) et sans effet de réfraction (Att_{diff}). Les cartes situées en haut sont obtenues pour $a = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, celles du centre pour $a = 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ et celles du bas pour $a = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$. La carte d'atténuation relative obtenue en milieu homogène est présentée à la Figure 2-3.

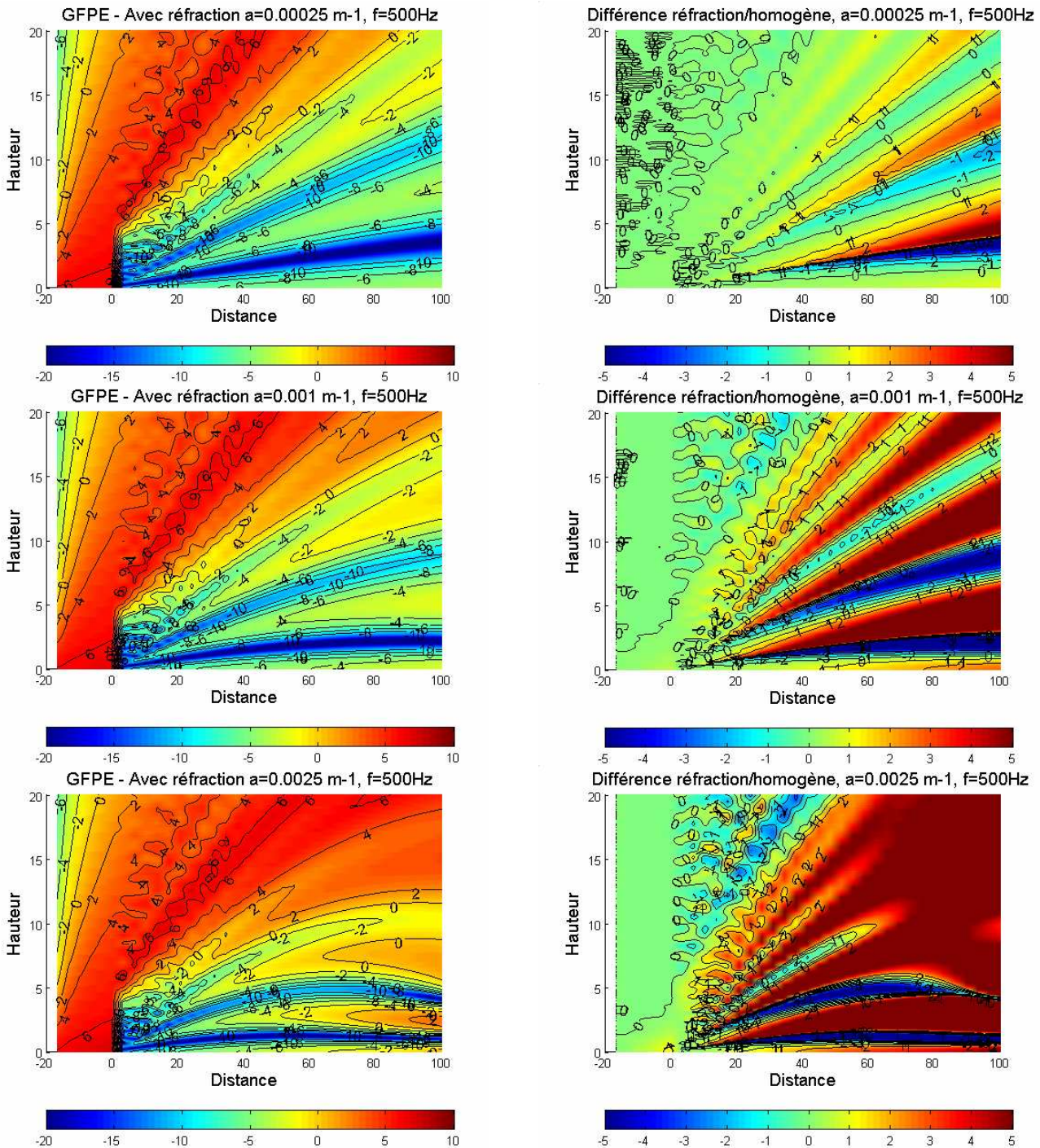


Figure 2-2 : Cartes d'atténuations relatives (en dB) obtenues pour la configuration de la Figure 2-1.

Pour $a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, en comparant les cartes d'atténuations relatives présentant Att_{ref} (Figure 2-2 en haut à gauche) et Att_{hom_o} (Figure 2-3) il est difficile de conclure sur l'importance de la réfraction. En revanche, la carte présentant Att_{diff} (carte en haut à droite de la Figure 2-2) montre que les valeurs prises par Att_{diff} sont égales à 0 dB pour les récepteurs dont l'abscisse est inférieure à 40m, c'est-à-dire que les effets de réfraction jouent un rôle peu important par rapport aux effets de réfraction pour ces points. De plus on constate l'apparition de franges d'interférence pour des valeurs d'abscisses supérieures à 60 m. Cela signifie qu'après 60 m de propagation derrière l'écran les effets de réfraction sont visibles. Cette distance horizontale pour laquelle des effets de réfraction apparaissent correspond à la distance observée pour Att_{diff} en l'absence d'écran (figure en annexe).

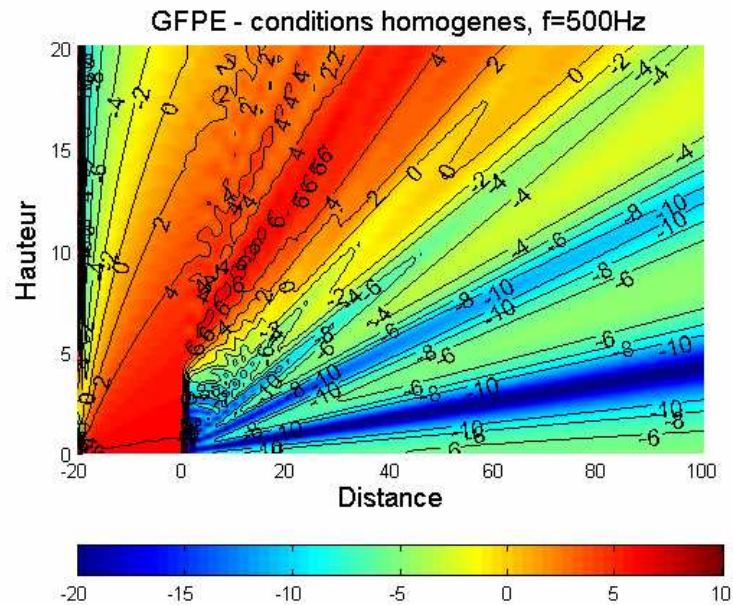


Figure 2-3 : Carte d'atténuations relatives (en dB) obtenue en milieu homogène pour la fréquence centrale de tiers d'octave 500 Hz pour la configuration géométrique détaillée à la Figure 2-1.

Sur la carte présentant Att_{diff} pour $a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$, des franges d'interférences marquées (rouge ou bleu foncé) apparaissent dès 20 m derrière l'écran. Cela montre que les interférences obtenues en présence de réfraction ne sont pas situées aux mêmes endroits qu'en milieu homogène. Sur la carte présentant Att_{ref} , on remarque que les franges d'interférence sont légèrement courbées vers le bas.

Et sur la carte présentant Att_{ref} pour $a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$, les franges d'interférences sont encore plus courbées vers le bas. Sur la carte correspondante présentant Att_{diff} , les franges sont courbées vers le bas et visibles à seulement quelques mètres derrière l'écran.

Ces remarques sont compatibles avec la valeur du paramètre a . En effet dans le cas où $a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, les effets de réfraction sont faibles et les atténuations relatives Att_{ref} calculées sont proches de celles obtenues en milieu homogène. Et quand la valeur du paramètre a augmente, les différences avec le milieu homogène apparaissent : les franges d'interférence apparaissent de plus en plus proches derrière l'écran et elles sont de plus en plus courbées vers le bas.

Sur les cartes présentant Att_{diff} , on peut remarquer que quelle que soit la valeur du paramètre a choisi $Att_{diff} = 0 \text{ dB}$ à gauche de l'écran. Cela signifie que les effets de la réfraction ne sont pas visibles sur 20m de propagation même pour la plus grande valeur de a . Cette remarque est vérifiée en regardant les cartes obtenues en l'absence d'écran dans l'Annexe A.

2.2.2 Critère pour déterminer D

On rappelle que D désigne la distance horizontale derrière l'écran sur laquelle on peut considérer la réfraction négligeable par rapport à la diffraction de l'écran.

Si pour une abscisse donnée x_1 , la valeur absolue de la différence entre les atténuations relatives avec les effets de réfractions et sans est inférieure à 2 dB quel que soit y (i.e. $|Att_{dif}(x_1, y)| \leq 2 \text{ dB}, y \in [0, 20]$), alors on considère qu'on est dans la zone dans laquelle les effets météorologiques sont négligeables et $D > x_1$. En revanche si pour une abscisse donnée x_2 , il existe une valeur de l'ordonnée y_2 telle que $|Att_{dif}(x_2, y_2)|$ est supérieure à 2 dB, alors $D \geq x_2$. La valeur de D

est donc la plus petite valeur des abscisses pour laquelle il existe une ou plusieurs valeurs de y telles que $|Att_{diff}(x, y)| \geq 2dB$.

Pour les cartes d'atténuations relatives données à la Figure 2-2, on obtient les valeurs de D répertoriées dans le Tableau 2-2. La valeur critique de 2 dB a été choisie car elle correspond à la valeur admise des incertitudes sur les mesures acoustiques. Pour information, les valeurs de la distance D obtenues pour la valeur critique de 1 dB sont mentionnées dans ce même tableau.

$a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(4\text{m}, 500\text{Hz}, 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}, 2\text{dB}) = 41,5\text{m}$	$D(4\text{m}, 500\text{Hz}, 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}, 1\text{dB}) = 22\text{m}$
$a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(4\text{m}, 500\text{Hz}, 10^{-3} \text{ m}^{-1}, 2\text{dB}) = 15,25\text{m}$	$D(4\text{m}, 500\text{Hz}, 10^{-3} \text{ m}^{-1}, 1\text{dB}) = 10,25\text{m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(4\text{m}, 500\text{Hz}, 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}, 2\text{dB}) = 10,25\text{m}$	$D(4\text{m}, 500\text{Hz}, 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}, 1\text{dB}) = 5 \text{ m}$

Tableau 2-2 : Valeur de la distance D obtenue quand la paramètre a varie pour $f=500 \text{ Hz}$ et $h=4\text{m}$.

D'autres cartes d'atténuations relatives ont été tracées en faisant varier f , h et a . Elles figurent dans l'Annexe A et en dessous de chacune de ces figures se trouve un tableau analogue au tableau Tableau 2-2 qui présente les valeurs de D obtenues quand le paramètre a varie.

Il est difficile en observant ces cartes d'atténuations relatives de déceler des tendances concernant le comportement de D en fonction de la variation des différents paramètres. C'est pourquoi on a décidé de tracer l'évolution de la distance D en fonction de certains paramètres. Ces graphes sont présentées dans la section suivante.

2.2.3 Interprétation des résultats

Avant toute interprétation, il est nécessaire de signaler que le pas de calcul utilisé pour calculer les distances horizontales D est de l'ordre de 1,5 m. Ceci implique donc une marge d'erreur du même ordre de grandeur sur D .

2.2.3.1 Evolution de la distance D en fonction de la hauteur de l'écran quand les paramètres a et puis f sont fixés

Sur la Figure 2-4, on a représenté trois courbes présentant l'évolution de D en fonction de la hauteur de l'écran quand a puis f sont fixés. Sur la courbe du haut, a est fixé à $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ (peu d'effets de réfraction), sur la courbe du centre, a vaut 10^{-3} m^{-1} (effets de réfraction moyens) et enfin pour la courbe du bas, a est égal à $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ (forts effets de réfraction).

Pour $a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, on constate que D diminue quand la hauteur de l'écran augmente. Pour $f=125\text{Hz}$, la valeur de D est égale à 100m (distance maximale du quadrillage) quelle que soit la hauteur de l'écran. Cela signifie que pour des effets de réfraction faibles et une fréquence de 125 Hz, les effets de réfraction peuvent être négligés sur l'ensemble du quadrillage. Pour une fréquence f fixée supérieure à 125Hz, D diminue quand la hauteur de l'écran augmente (sauf pour $f=1000\text{Hz}$ et h compris entre 4 et 5 m). Cette observation montre que la hauteur de l'écran joue un rôle sur les effets de réfraction qui n'est pas celui qu'on aurait pu imaginer. En effet, la hauteur de l'écran augmentant, on aurait pu penser que la zone derrière l'écran aurait été protégée et donc que les effets de réfraction auraient eu un rôle moins important. Mais les rayons sonores incurvés vers le bas contournent l'écran et augmentent les niveaux sonores dans la zone d'ombre.

Pour $a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$, et pour $f=125\text{Hz}$, on constate à nouveau que D diminue quand la hauteur de l'écran augmente. En revanche pour une fréquence fixée supérieure à 125Hz, D a une valeur quasi-constante.

Pour $a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ et pour $f=125\text{Hz}$, on constate que D diminue quand la hauteur de l'écran augmente. Mais pour une fréquence f fixée supérieure à 125Hz, il est difficile d'établir une tendance.

Quelle que soit la valeur de a choisi, on constate que pour une valeur de h donnée D diminue avec la fréquence.

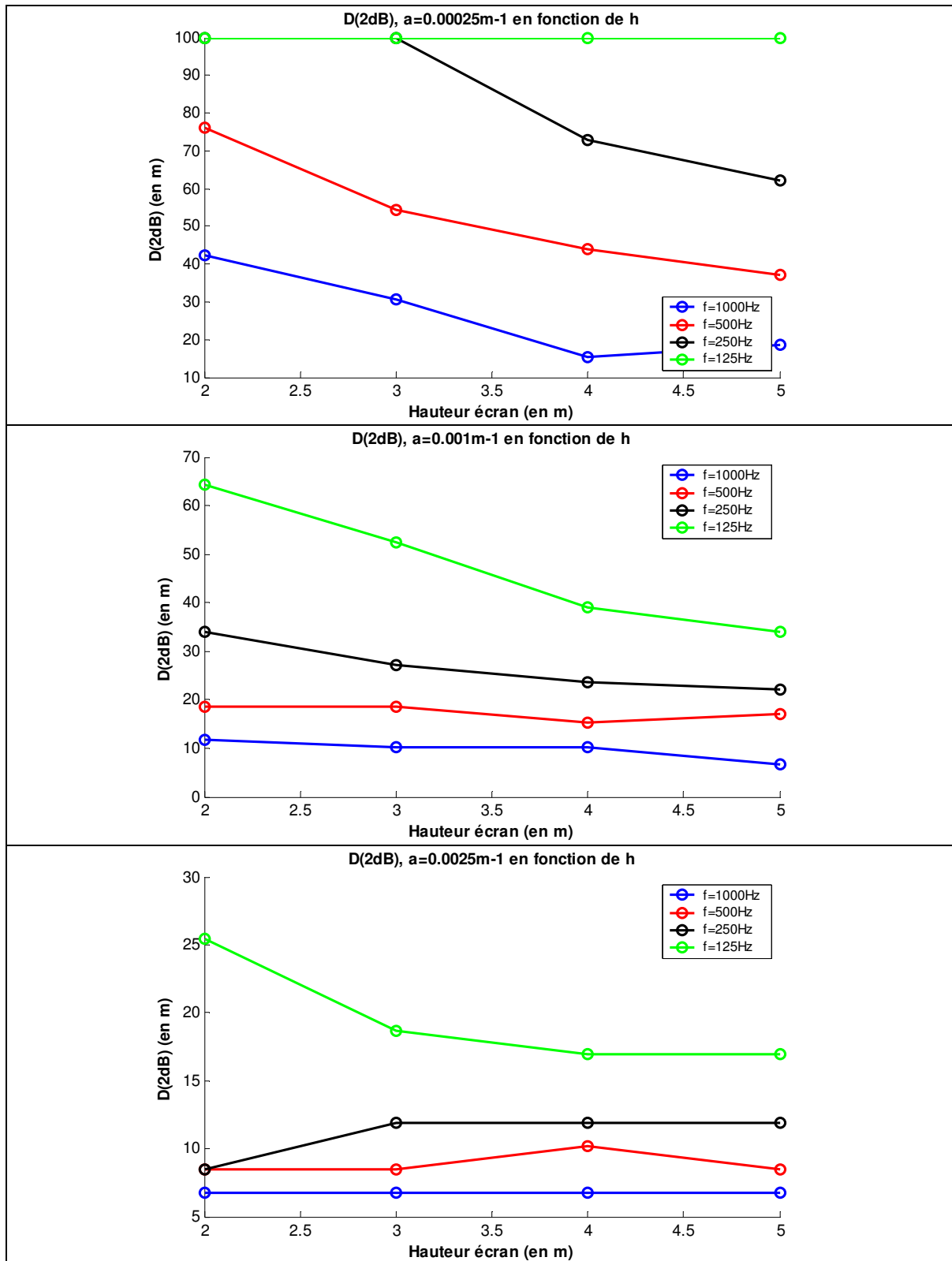


Figure 2-4 : Evolution de la distance D en fonction de la hauteur de l'écran quand les paramètres a et f sont fixés.

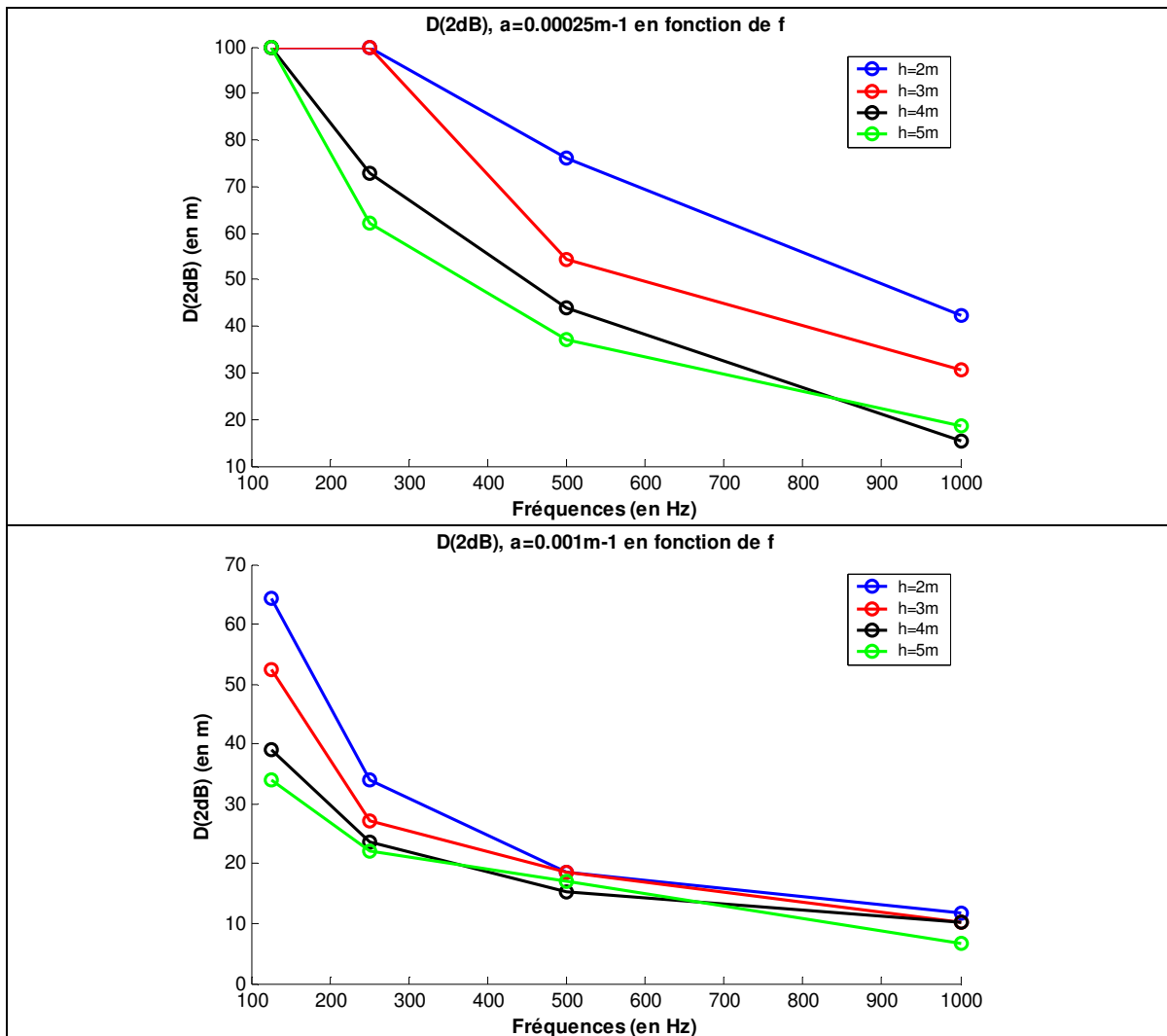
2.2.3.2 Evolution de la distance D en fonction de la fréquence quand a puis h sont fixés

Les courbes présentant l'évolution de la distance D en fonction de la fréquence quand a puis h sont fixés sont présentées à la Figure 2-5. Sur la courbe du haut, a est fixé à $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ (peu d'effets de réfraction), sur la courbe du centre, a vaut 10^{-3} m^{-1} (effets de réfraction moyens) et enfin pour la courbe de bas, a est égal à $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ (forts effets de réfraction).

Lorsque l'on fixe le paramètre a et que l'on fait varier la fréquence, on observe que plus la fréquence est faible, plus D est élevé quelque soit la hauteur d'écran. Par exemple, en présence d'effets de réfraction moyens ($a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$) et pour une hauteur d'écran de 4m, D est égal à 39m à 125Hz, 14m à 250Hz, 15m à 500Hz et 10m à 1000Hz.

Pour des effets de réfraction faibles ($a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$), D diminue lorsque la fréquence augmente, ceci quelle que soit la hauteur de l'écran.

Cette tendance est aussi observable pour $a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$ et $a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$. Mais cette diminution est moins significative quand f est supérieure à 250Hz. En effet à partir de 250Hz et pour a fixé, il semble que D tende vers une valeur constante quelle que soit la hauteur d'écran. Ainsi pour $a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$, D est légèrement inférieure à 20m et proche de 10m à 1000Hz.



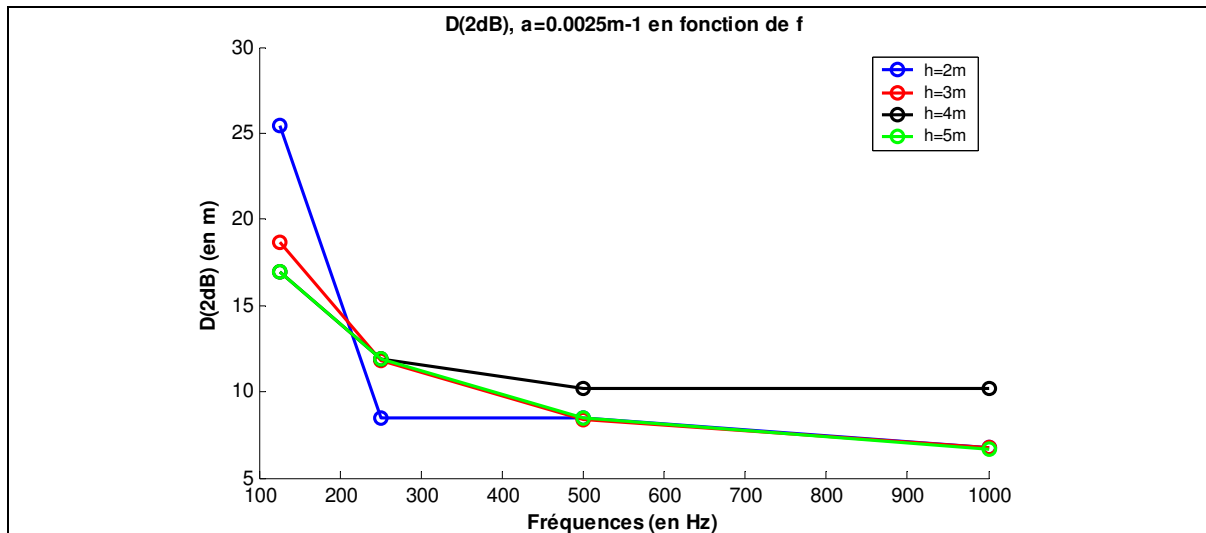


Figure 2-5 : Evolution de la distance D en fonction de la fréquence quand les paramètres a et h sont fixés.

2.2.3.3 Evolution de la distance D en fonction de la fréquence quand h et a sont fixés

Sur la Figure 2-6, on présente l'évolution de la distance D en fonction de la fréquence quand h puis a sont fixés. Sur la figure du haut h est fixé à 2m et a prend les trois valeurs possibles. Sur la courbe du centre, h est fixé à 4 m et enfin sur la courbe du bas h est fixé à 5m.

On constate tout d'abord que la distance D est d'autant plus grande que les effets de réfraction sont faibles, quelles que soient la hauteur de l'écran et la fréquence. Ainsi, pour $f=125\text{Hz}$ et $a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, la zone où les effets de réfraction sont négligeables par rapport à la diffraction est supérieure à 100m pour des hauteurs d'écran comprises entre 2 et 5m. La valeur de D est comprise entre 30 et 70m lorsque $a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$ et devient inférieure à 26m pour $a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$.

Pour a faible, on constate une diminution de D quand f augmente. Cette diminution est aussi visible pour les autres valeurs des paramètres mais elle est moins marquée pour a fort ($a > 10^{-3} \text{ m}^{-1}$) et $f > 250\text{Hz}$.

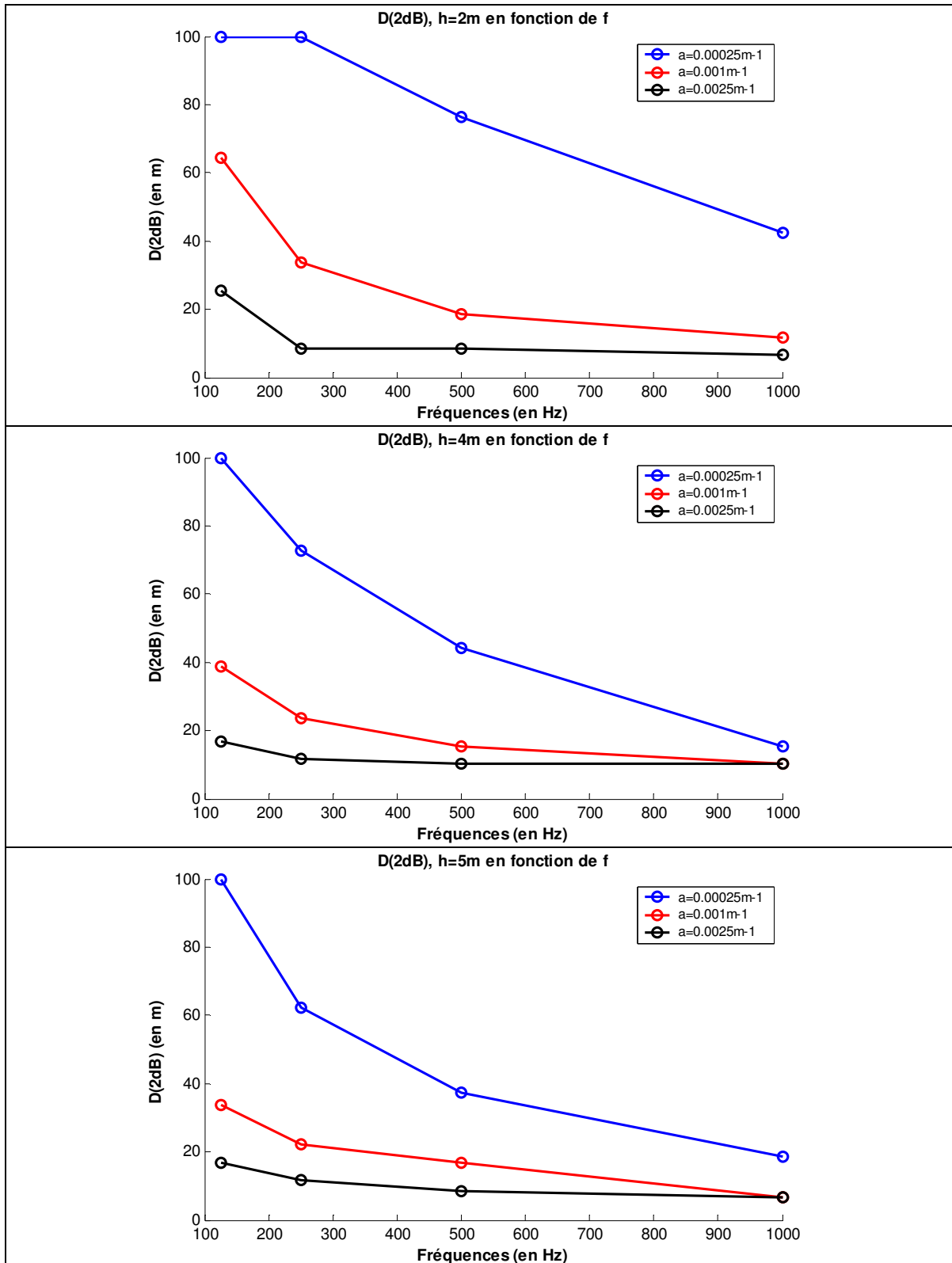


Figure 2-6: Evolution de la distance D en fonction de la fréquence quand les paramètres h et a sont fixés.

2.3 Conclusions

Le but de cette étude était de déterminer la distance horizontale D derrière l'écran sur laquelle on peut considérer la réfraction négligeable par rapport à la diffraction. L'analyse et la comparaison de ces différentes cartes d'atténuations relatives montrent qu'il ne semble pas aisé de mettre en évidence des zones où un phénomène l'emporterait sur l'autre. Des courbes présentant l'évolution de D en fonction des paramètres retenus ont été réalisées mais il s'avère difficile de mettre en évidence un comportement unique de D . On présente à la Figure 2-7 des évolutions de D en fonction de certains paramètres.

Les valeurs de D déterminées dans ce chapitre sont utilisées dans le chapitre suivant qui porte sur une méthode hybride BEM-GFPE. Les valeurs de D permettent de définir une zone dans laquelle les effets de réfraction sont négligeables et dans laquelle la méthode des éléments finis de frontière sera utilisée. En dehors de cette zone, on utilisera une méthode d'équation parabolique. La méthode utilisée encore appelée couplage est présentée dans le chapitre 3.

Résultats	Conclusions																									
<p style="text-align: center;">D(2dB), f=125Hz en fonction de h</p> <table border="1"> <caption>Data for D(2dB), f=125Hz</caption> <thead> <tr> <th>Hauteur écran (en m)</th> <th>a=0.00025m-1</th> <th>a=0.001m-1</th> <th>a=0.0025m-1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>100</td> <td>65</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>100</td> <td>52</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>100</td> <td>38</td> <td>17</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>100</td> <td>33</td> <td>17</td> </tr> </tbody> </table>	Hauteur écran (en m)	a=0.00025m-1	a=0.001m-1	a=0.0025m-1	2	100	65	25	3	100	52	18	4	100	38	17	5	100	33	17	<ul style="list-style-type: none"> • D diminue quand a augmente • D diminue quand h augmente 					
Hauteur écran (en m)	a=0.00025m-1	a=0.001m-1	a=0.0025m-1																							
2	100	65	25																							
3	100	52	18																							
4	100	38	17																							
5	100	33	17																							
<p style="text-align: center;">D(2dB), f=500Hz en fonction de h</p> <table border="1"> <caption>Data for D(2dB), f=500Hz</caption> <thead> <tr> <th>Hauteur écran (en m)</th> <th>a=0.00025m-1</th> <th>a=0.001m-1</th> <th>a=0.0025m-1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>75</td> <td>18</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>55</td> <td>18</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>45</td> <td>15</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>38</td> <td>17</td> <td>8</td> </tr> </tbody> </table>	Hauteur écran (en m)	a=0.00025m-1	a=0.001m-1	a=0.0025m-1	2	75	18	8	3	55	18	8	4	45	15	10	5	38	17	8	<ul style="list-style-type: none"> • Pour a faible, D diminue quand h augmente • Pour a moyen ou fort, D est constant quand h augmente 					
Hauteur écran (en m)	a=0.00025m-1	a=0.001m-1	a=0.0025m-1																							
2	75	18	8																							
3	55	18	8																							
4	45	15	10																							
5	38	17	8																							
<p style="text-align: center;">D(2dB), a=0.001m-1 en fonction de h</p> <table border="1"> <caption>Data for D(2dB), a=0.001m-1</caption> <thead> <tr> <th>Hauteur écran (en m)</th> <th>f=1000Hz</th> <th>f=500Hz</th> <th>f=250Hz</th> <th>f=125Hz</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>12</td> <td>18</td> <td>34</td> <td>64</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>10</td> <td>18</td> <td>27</td> <td>52</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>10</td> <td>15</td> <td>23</td> <td>38</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>7</td> <td>17</td> <td>22</td> <td>33</td> </tr> </tbody> </table>	Hauteur écran (en m)	f=1000Hz	f=500Hz	f=250Hz	f=125Hz	2	12	18	34	64	3	10	18	27	52	4	10	15	23	38	5	7	17	22	33	<ul style="list-style-type: none"> • D diminue quand f augmente
Hauteur écran (en m)	f=1000Hz	f=500Hz	f=250Hz	f=125Hz																						
2	12	18	34	64																						
3	10	18	27	52																						
4	10	15	23	38																						
5	7	17	22	33																						

Figure 2-7: Tendances générales sur l'évolution de D.

Chapitre 3 : Méthode hybride BEM-GFPE

La méthode des éléments finis de frontière permet de modéliser des situations de propagation dans lesquelles des obstacles de formes complexes (écran de forme quelconque, butte de forme variée) avec des propriétés d'absorption quelconques sont pris en compte. Mais sous sa forme classique, aucune variation dans le profil de vitesse du son ne peut être incluse dans la propagation. Par ailleurs la méthode basée sur l'équation parabolique permet de propager un front d'onde avec un profil de célérité évolutif en portée et en hauteur mais ne peut pas sous sa forme standard prendre en compte d'énergie rétrodiffusée, ni d'obstacles de forme complexe. La technique dite de « couplage » proposée ci-après permet de prendre les avantages de chacune des méthodes et de les combiner pour traiter des situations complexes non modélisables par l'une ou l'autre approche. Dans ce chapitre, on utilise la méthode des éléments finis de frontière pour calculer un champ initial à la méthode d'équation parabolique [PREMAT, DEFRANCE et al., 2002] [ABALLEA, PRIOUR et al., 2003]. Nous expliquons d'abord le raccordement entre ces deux approches. Ensuite cette démarche est validée à travers différents exemples.

3.1 Méthode hybride BEM-GFPE

Au vu des avantages et inconvénients de chacune des méthodes de propagation acoustique, il apparaît judicieux de diviser le domaine de propagation en sous-domaines dans lesquels on utilise la méthode adaptée soit à la prise en compte d'obstacles (la méthode BEM) soit à la prise en compte d'effets météorologiques (la méthode GFPE) (cf. Figure 3-1). Sur cette figure, on étudie la propagation acoustique rayonnée par une source S vers un récepteur R situé en façade d'une habitation située en remblai en présence d'obstacles (écran en T, immeuble) dans un milieu de propagation soumis à des effets météorologiques. La méthode BEM ou la méthode GFPE utilisée seule ne permet pas la prise en compte simultanée des obstacles et des effets météorologiques. Pour le passage de l'écran en T et celui de l'immeuble, la méthode adaptée est la BEM mais pour la prise en compte d'effets météorologiques, la GFPE est la méthode adaptée. L'utilisation de méthode hybride est dans ce cas très utile. En effet la BEM permet de modéliser la propagation acoustique en présence d'un écran en T ou autour d'un obstacle de type immeuble mais en faisant l'approximation d'un milieu de propagation en conditions homogènes. La méthode GFPE est utilisée pour modéliser la propagation en présence d'effets météorologiques au dessus d'un sol plan ou d'un remblai.

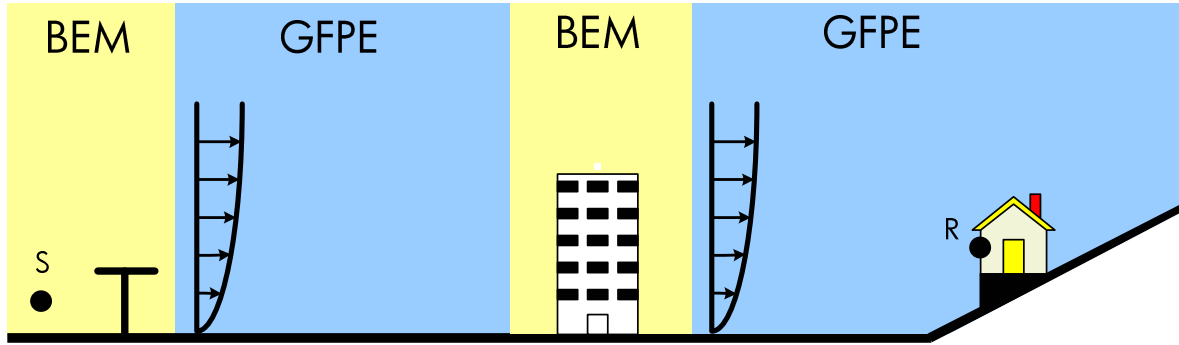


Figure 3-1 : Exemple de configurations complexes pouvant être étudiées avec une méthode hybride BEM-GFPE.

Les données issues d'une simulation numérique avec la méthode BEM peuvent servir de données d'entrée au code GFPE. Ce raccordement est expliqué ci-après. Cette méthode hybride est aussi désignée par le terme « couplage BEM-GFPE ».

Le code BEM (MICADO) est un code de propagation bi-dimensionnel alors que le code GFPE (ATMOS) est un code tri-dimensionnel à symétrie azimutale. Pour « passer » de l'un à l'autre, il est donc nécessaire d'adapter le champ de pression issu du code BEM. En 2D, la fonction de Green est du type :

$$p_{BEM}(S, R) = -\frac{j}{4} H_0^1(k.r) \quad (25)$$

où H_0 désigne la fonction de Hankel du première espèce d'ordre 0, k le nombre d'onde et r la distance entre la source et le récepteur. S désigne la source acoustique et R un récepteur. En 3D, la fonction de Green est du type :

$$p_{GFPE}(S, R) = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{jkr}}{r} \quad (26)$$

L'idée pour le passage du code BEM au code GFPE est de multiplier le champ de pression calculé avec la BEM par un coefficient adéquat pour qu'il puisse servir ensuite de données d'entrée au code GFPE.

La pression totale au niveau d'un récepteur R résultant du rayonnement d'une source unitaire isotrope S en espace indéfini s'écrit :

$$p_{BEM}(S, R) = -\frac{j}{4} H_0(k.r) \text{ dans } \mathfrak{R}^2 \quad (27)$$

$$\text{Ou } p_{GFPE}(S, R) = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{jkr}}{r} \text{ dans } \mathfrak{R}^3. \quad (28)$$

Pour exprimer la pression totale au niveau du récepteur on utilise l'approximation en champ lointain de la fonction de Hankel :

$$H_0^1(kr) = \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} e^{j(kr - \pi/4)}, \quad kr \gg 1 \quad (29)$$

L'expression de la pression totale au niveau du récepteur s'écrit alors :

$$p_{BEM}(S, R) = -\frac{j}{4} \sqrt{\frac{2}{\pi kr}} e^{j(kr - \pi/4)} = -\frac{j}{4} e^{-j\pi/4} \sqrt{\frac{2}{\pi k}} \frac{1}{\sqrt{r}} e^{jkr} \quad (30)$$

$$p_{BEM}(S, R) = \frac{1}{4} e^{j\frac{5\pi}{4}} \sqrt{\frac{2}{\pi k}} \frac{1}{\sqrt{r}} e^{jkr} = \frac{1}{4} e^{-j\frac{3\pi}{4}} \sqrt{\frac{2}{\pi k}} \frac{1}{\sqrt{r}} e^{jkr}$$

Ou encore :

$$p_{BEM}(S, R) = \frac{1}{4} e^{-j\frac{3\pi}{4}} \sqrt{\frac{2}{\pi k}} \times \sqrt{r} \left(\frac{1}{r} e^{jkr} \right) \quad (31)$$

On peut alors exprimer la pression en 3D en fonction de la pression en 2D :

$$p_{GFPE}(S, R) = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{jkr}}{r} = \frac{1}{\pi} \times e^{j\frac{3\pi}{4}} \times \sqrt{\frac{\pi k}{2r}} \times p_{BEM}(S, R) \quad (32)$$

$$p_{GFPE}(S, R) = e^{j\frac{3\pi}{4}} \times \sqrt{\frac{k}{2\pi r}} \times p_{BEM}(S, R)$$

La méthode de l'équation GFPE utilise un starter $\phi(r, z)$ qu'elle fait évoluer sur une distance horizontale r selon :

$$\phi(r, z) = \sqrt{r} p(r, z) e^{-jkr} \quad (33)$$

Dans le cas d'un couplage BEM-GFPE, le starter de l'équation parabolique est obtenu à partir d'un champ de pression calculé à une certaine abscisse par le code BEM. Soit r_s l'abscisse du point situé en $z=0$ sur le front du starter nécessaire à la GFPE.

Le starter de l'équation parabolique est :

$$\phi(R_s, z) = \sqrt{r} e^{j\frac{3\pi}{4}} \times \sqrt{\frac{k}{2\pi r_s}} \times p_{BEM}(r_s, z) \times e^{-jkr} \quad (34)$$

où r désigne la distance entre la source et le récepteur.

3.2 Validation : cas d'un sol plan rigide

On s'intéresse à une configuration très simple : une source disposée à 0,5 m au-dessus d'un sol complètement rigide (cf. Figure 3-2). Le champ acoustique rayonné par la source est propagé sur 17 m avec la méthode BEM puis la méthode GFPE.

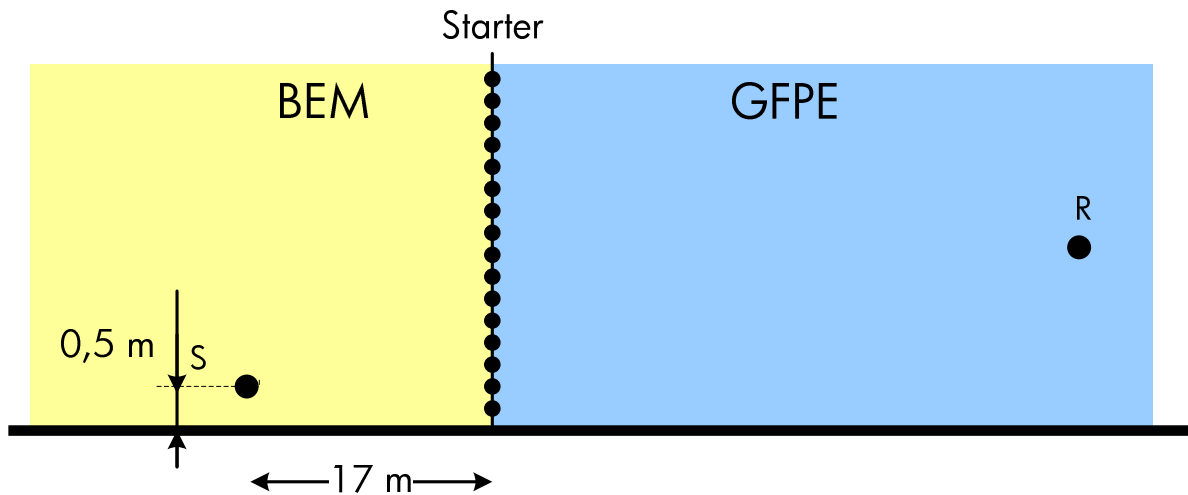


Figure 3-2 : Configuration géométrique : une source est disposée à 0,5 m au-dessus d'un sol complètement rigide. Le passage de la méthode BEM à la méthode GFPE s'effectue à 17 m de la source.

À 17 m de la source, on compare l'amplitude et la phase du champ ϕ obtenu de deux manières pour deux fréquences : 500 et 1000 Hz. La première méthode utilise les champs de pression BEM que l'on multiplie par un coefficient adapté selon l'équation (34). L'autre méthode simule la propagation du son depuis la source jusqu'à 17 m avec la méthode GFPE. Les résultats sont présentés à la Figure 3-3. Pour les deux fréquences choisies, on a représenté l'amplitude et la phase du champ ϕ . On a représenté la phase déroulée car elle permet d'éviter les sauts de phase qui ont lieu si on estime la phase modulo 2π . Les courbes sont en bon accord et superposables mais seulement jusqu'à 10 m au-dessus du sol pour l'amplitude. À partir de 10 m de haut, les amplitudes obtenues avec BEM et GFPE diffèrent légèrement. Les amplitudes calculées avec la BEM sont supérieures à celle de GFPE qui souffre d'une limitation angulaire de 30° (avec un starter de Greene) à 500 Hz et 1000 Hz. Cet angle

d'ouverture correspond à la hauteur à partir de laquelle les courbes ne sont plus superposables ($\tan^{-1}(17/10) \approx 30,5^\circ$).

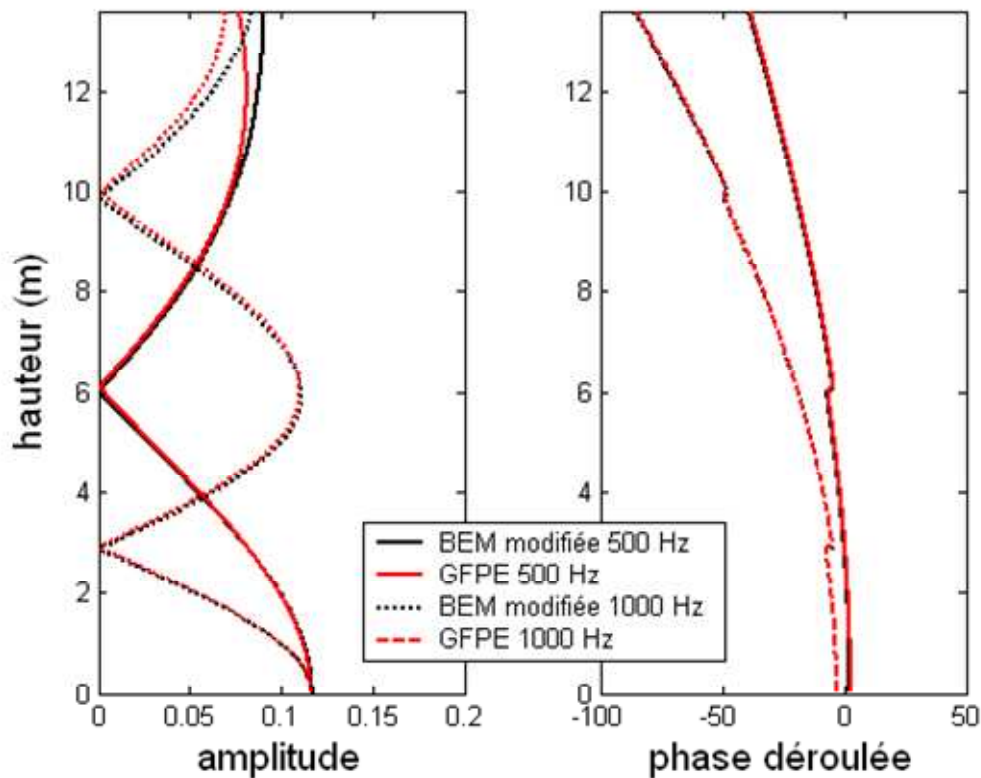


Figure 3-3 : Comparaison de l'amplitude et de la phase du champ ϕ obtenues avec BEM et GFPE à 17 m d'une source située à 0,5m au-dessus du sol, pour deux fréquences (500 Hz et 1000 Hz).

3.3 Cas d'un écran droit au-dessus d'un sol rigide

On s'intéresse maintenant au cas de la propagation acoustique au-dessus d'un sol rigide en présence d'un écran droit de 3 mètres de haut. Une source est située à 0,03m au dessus du sol et deux récepteurs sont disposés à 120 m de la source à 1,5m (R1) et 4m (R2) du sol. L'écran est situé à 20 m de la source (cf. Figure 3-4). Cette configuration a été étudiée dans le second chapitre. Dans celui-ci, D désigne la distance horizontale derrière l'écran sur laquelle on peut considérer la réfraction négligeable par rapport à la diffraction. D'après les conclusions du chapitre 2, on sait que D diminue quand la fréquence augmente. Les cartes d'atténuations relatives présentes dans l'Annexe A et les valeurs de D nous permettent de déterminer la distance à laquelle on peut effectuer un couplage BEM-GFPE. En utilisant la carte d'énergie sonore établie pour la fréquence la plus importante ($f=1000\text{Hz}$) et les estimations de D , on choisit d'effectuer le couplage à 8 m derrière l'écran. Cette distance est inférieure à la distance D obtenue pour des effets de réfraction faibles et moyen donc on se trouve dans la zone dans laquelle on peut négliger les effets de la réfraction par rapport à la diffraction. Les valeurs de D sont rappelées dans le Tableau 3-1.

$a=0,00025 \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=30,51 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=10,17 \text{ m}$
$a=0,001 \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=10,17 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=8,47 \text{ m}$
$a=0,0025 \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=6,78 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=3,39 \text{ m}$

Tableau 3-1 : Valeur de la distance D en fonction de la valeur du paramètre a pour $f=1000\text{Hz}$ et $h=3\text{m}$.

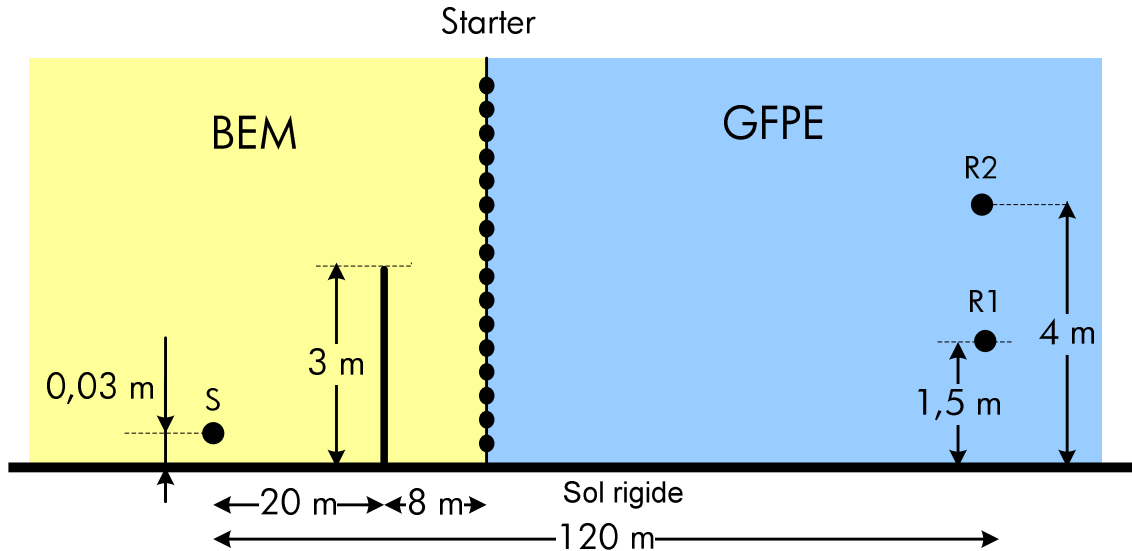


Figure 3-4 : Configuration géométrique pour le cas d'un écran droit au-dessus d'un sol rigide. S (0 ; 0,03 m) ; R1 (120 m ; 1,5 m) R2 (120 m ; 4 m); écran rigide de 3 mètres de haut.

Un tir de rayons a été réalisé sur la configuration de la Figure 3-4 à l'aide du logiciel ICARE [GAUDAIRE, NOE et al., 2000] développé au CSTB (cf. Figure 3-5). Ce code est basé sur un algorithme de lancer de faisceaux adaptatifs qui permet de déterminer les trajets acoustiques entre sources et récepteurs dans une configuration donnée. Les phénomènes pris en compte sont la réflexion sur des surfaces quelconques et la diffraction par des arêtes. Deux rayons parviennent à chaque récepteur. Pour chaque récepteur un premier rayon parvient après avoir été diffracté par le haut de l'écran et un second arrive après une diffraction sur l'arête de l'écran et une réflexion sur le sol rigide.

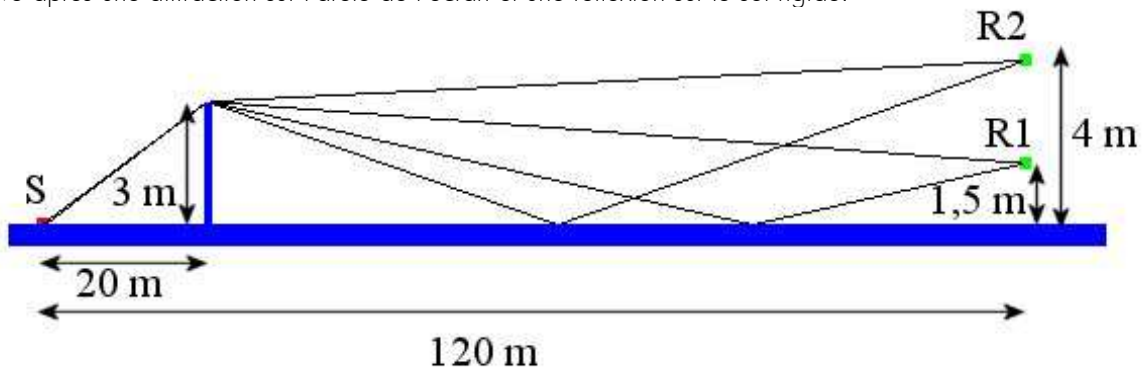


Figure 3-5 : Trajets des rayons acoustiques déterminés dans ICARE pour la configuration géométrique de la Figure 3-4.

Pour pouvoir effectuer un tir de rayons en présence des effets de réfraction, l'analogie détaillée à la section 1.4.1.1 a été utilisée. Les résultats obtenus sont présentés dans l'Annexe F pour les trois valeurs du paramètre a . Pour $a=0,0025\text{m}^{-1}$ (cf. Figure 3-6), en raison de la courbure du sol un rayon direct relie la source à R2. Pour des valeurs inférieures de a (cf. Annexe F), ce rayon n'existe pas.



Figure 3-6 : Trajets des rayons acoustiques déterminés dans ICARE pour la configuration géométrique de la Figure 3-4 en introduisant des effets de réfraction : $a=0,0025\text{m}^{-1}$.

3.3.1 Vérifications en conditions homogènes

Avant d'effectuer le couplage entre BEM et GFPE en présence d'effets de réfraction, on effectue le couplage entre BEM et GFPE en milieu homogène. La solution obtenue est alors comparée à la solution modélisée avec la BEM dans tout le domaine de propagation en milieu homogène.

Plusieurs simulations sont effectuées en faisant varier le nombre de points du starter de la GFPE et l'espacement entre ces points.

- 500 points sur le starter espacés de 0,034m, soit une hauteur du starter de 17 m
- 1000 points sur le starter espacés de 0,017m, soit une hauteur du starter de 17 m
- 500 points sur le starter espacés de 0,068m, soit une hauteur du starter de 34 m
- 1000 points sur le starter espacés de 0,034m, soit une hauteur du starter de 34 m
- 1000 points sur le starter espacés de 0,068m, soit une hauteur du starter de 68 m
- 2000 points sur le starter espacés de 0,034m, soit une hauteur du starter de 68 m

Les atténuations relatives par rapport au champ libre sont calculées selon la formule suivante :

$$Att(x, y) = 10 * \log \left(\frac{|P_{tot}(x, y)|^2}{|P_{lib}(x, y)|^2} \right) \quad (35)$$

Où $P_{tot}(x, y)$ représente le champ acoustique total et $P_{lib}(x, y)$ le champ libre au niveau du récepteur M de coordonnées (x,y) en conditions homogènes.

Sur la Figure 3-7, on présente les atténuations relatives résultant du couplage avec une hauteur du starter de 17m, que l'on compare à celle calculée avec la BEM. On ne présente ici que les résultats obtenus pour R1 car les conclusions concernant R2 sont identiques. Deux espacements entre les points du starter de hauteur de 17 m ont été choisis : 0,034m avec 500 récepteurs noté 500R, 17 m dans la légende, et 0,017m avec 1000 récepteurs noté 1000R, 17m. Dans les deux cas, les résultats sont identiques : des oscillations sont visibles notamment à basses fréquences. En modifiant le pas de calcul horizontal dans la GFPE, ces résultats n'ont pas pu être améliorés.

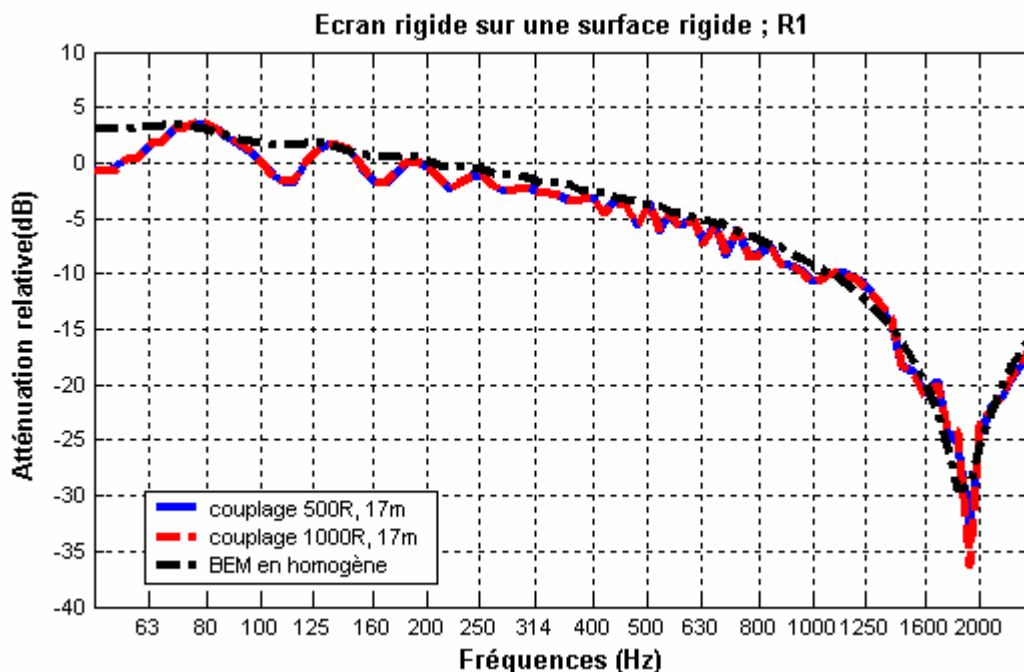


Figure 3-7 : Comparaisons entre les atténuations relatives avec couplage et BEM en conditions homogènes pour un starter de 17 m de haut. En bleu, courbe du couplage pour 500 points sur le starter de 17 m de haut, en rouge 1000 points sur le starter de 17m de haut et en noir, la courbe de référence BEM.

Sur la Figure 3-8, on présente les atténuations relatives en fonction de la fréquence pour une hauteur de starter de 34m. Les résultats présentent moins d'oscillations que dans le cas d'une hauteur de

starter de 17m mais des oscillations sont encore visibles à basses fréquences. La Figure 3-7 et la Figure 3-8 nous montrent que la hauteur du starter a un rôle non négligeable mais le nombre de points du starter pour une hauteur donnée de starter n'améliore pas les résultats de manière significative.

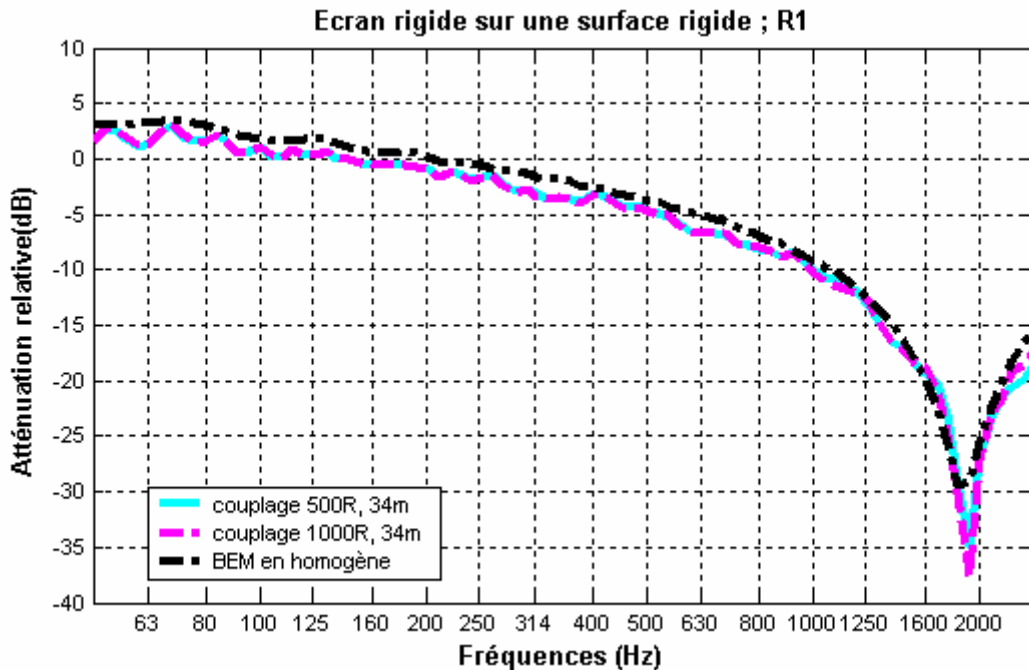


Figure 3-8 : Comparaisons entre les atténuations relatives avec couplage et BEM en conditions homogènes pour un starter de 34 m de haut. En cyan, courbe du couplage pour 500 points sur le starter de 34 m de haut, en magenta 1000 points sur le starter de 34 m de haut et en noir, la courbe de référence BEM.

Sur la Figure 3-9 sont présentées les atténuations relatives obtenues pour une hauteur de starter de 68 m. Cette hauteur de starter permet de s'affranchir des oscillations en basses fréquences. On constate un bon accord entre les courbes obtenues avec une hauteur de starter de 68m et la courbe BEM. On remarque que les courbes du couplage présentent une différence d'1dB avec la BEM jusqu'à 1000 Hz. Cette différence est visible aussi pour le second récepteur (cf. Figure 3-10).

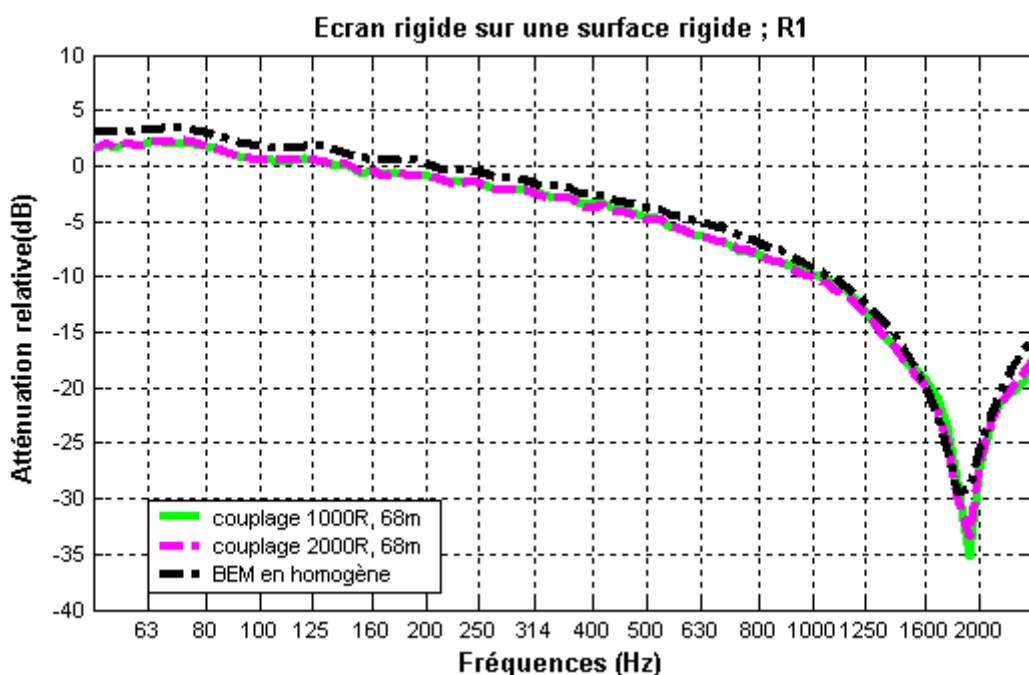


Figure 3-9 : Comparaisons entre les atténuations relatives avec couplage et BEM en conditions homogènes pour un starter de 68 m de haut pour le récepteur R1. En vert, courbe du couplage pour 1000 points sur le starter de 68 m de haut, en magenta 2000 points sur le starter de 68 m de haut et en noir, la courbe de référence BEM.

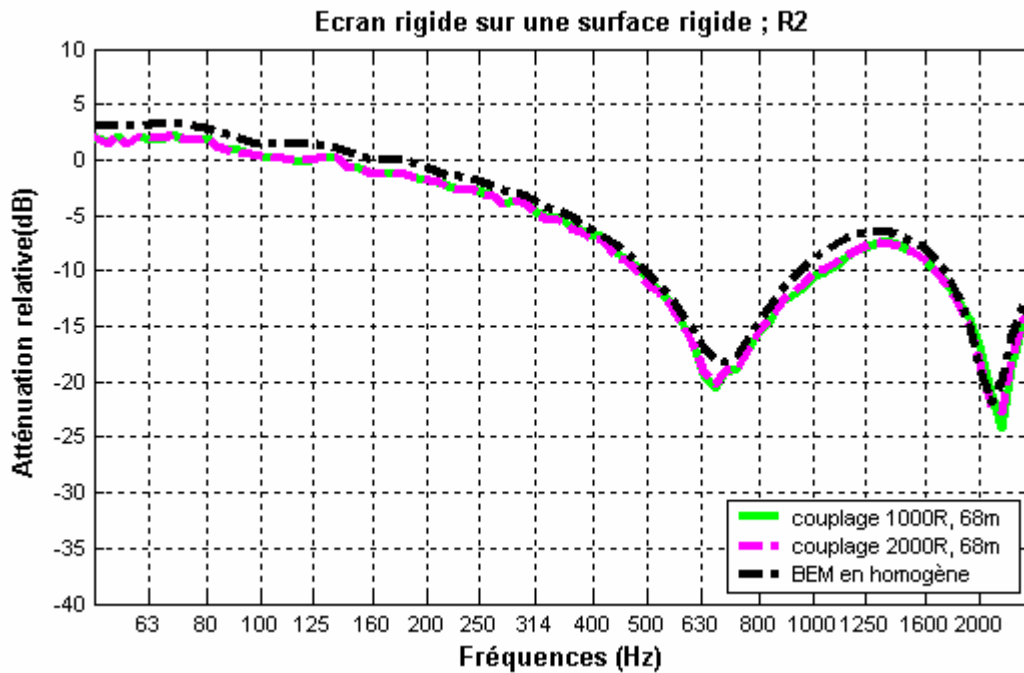


Figure 3-10 : Comparaisons entre les atténuations relatives avec couplage et BEM en conditions homogènes pour un starter de 68 m de haut au niveau du récepteur R2. En vert, courbe du couplage pour 1000 points sur le starter de 68 m de haut, en magenta 2000 points sur le starter de 68 m de haut et en noir, la courbe de référence BEM.

Pour réduire cette différence de 1 dB, on a fait varier la distance de couplage. En augmentant la distance de raccordement, les résultats sont un peu meilleurs mais la différence obtenue n'est pas significative. Des résultats obtenus en testant plusieurs distances de couplage sont présentés à la section 3.3.4.

Au vu des résultats obtenus, on s'aperçoit qu'il est nécessaire d'avoir un starter d'une hauteur suffisante (ici plus de 20 fois la hauteur de l'écran) car cela permet de réduire les oscillations numériques.

Les paramètres de calcul retenus pour effectuer un couplage en présence d'effets de réfraction sont donc 2000 points sur un starter de 68 m de haut.

Cette validation en conditions homogènes nous permet de régler le pas de calcul à utiliser dans le code GFPE ($kdr=15$) et on décide d'effectuer les couplages avec un starter de 68m de haut et un espacement entre les points de 0,034m.

3.3.2 Couplage en présence d'effets de réfraction vers le bas

Les tests effectués dans le paragraphe précédent nous ont permis de fixer les paramètres de calculs (hauteur du starter, espacement entre les points du starter). Nous examinons dans cette section les effets d'une réfraction vers le bas pour la configuration détaillée à la Figure 3-4, qui a été étudiée dans le chapitre 2. Un couplage est effectué entre le code de calcul BEM et le code GFPE dans lequel on prend en compte un profil linéaire de vitesse du son. Les profils linéaires retenus sont ceux utilisés dans le chapitre 2 car ils sont représentatifs de vents faibles, moyens ou forts [AFNOR, 2002].

La distance de couplage a été choisie d'après les conclusions obtenues au chapitre 2. Ainsi, la distance choisie est à l'intérieur de la zone dans laquelle on peut considérer les effets de réfraction négligeables devant ceux de la diffraction : $d_{couplage} \leq D$ (cf. Tableau 3-1).

Les atténuations relatives obtenues en fonction de la fréquence pour les récepteurs R1 et R2 sont présentées à la Figure 3-11 et à la Figure 3-12. Ces atténuations sont obtenues pour trois profils de vitesse du son linéaires, de la forme $c = c_0(1+az)$ où a peut prendre les valeurs suivantes : $a=0,00025 \text{ m}^{-1}$, $a=0,001 \text{ m}^{-1}$, $a=0,0025 \text{ m}^{-1}$.

Sur la Figure 3-11, on présente les atténuations relatives obtenues pour le récepteur R1. Quand $a=0,00025 \text{ m}^{-1}$, la courbe du couplage est assez proche de celle obtenue avec BEM en conditions homogènes sur [50, 1000Hz] car de faibles effets de réfraction ont été introduits. On note un déplacement du pic d'interférence visible à 1850 Hz vers 1500 Hz. Pour $a=0,001 \text{ m}^{-1}$, cette interférence s'est encore décalée vers les basses fréquences, elle est visible à 800 Hz et une nouvelle interférence s'est formée vers 2500Hz. De plus, un relèvement des niveaux de bruit dans le domaine fréquentiel [1000, 2400Hz] est observable. Quand a augmente et prend la valeur $a=0,0025 \text{ m}^{-1}$, de nouvelles interférences apparaissent et on constate un niveau de bruit plus élevé qu'en milieu homogène sur l'ensemble du domaine fréquentiel d'étude sauf au niveau des interférences localisées en 350 Hz et 1200Hz.

Ces remarques sont aussi valables pour le récepteur R2 (cf. Figure 3-12) situé à 4m au-dessus du sol. En milieu homogène, on observe 2 interférences bien marquées. L'introduction d'effets réfractant vers le bas crée de nouvelles interférences qu'elle déplace vers les basses fréquences. Ainsi la première interférence située à 700 Hz en milieu homogène est visible à 200Hz pour $a=0,0025 \text{ m}^{-1}$.

Ces deux figures montrent l'importance de la prise en compte d'effets de réfraction dans une méthode de prévision du bruit en propagation extérieur. En effet, la réfraction vers le bas modifie les niveaux sonores et plus les effets de réfraction sont forts, plus les modifications par rapport au milieu homogène sont importantes (apparition de nouvelles interférences et relèvement du niveau de bruit). Un saut d'atténuation est visible vers 80 Hz et il est lié à l'utilisation de la GFPE.

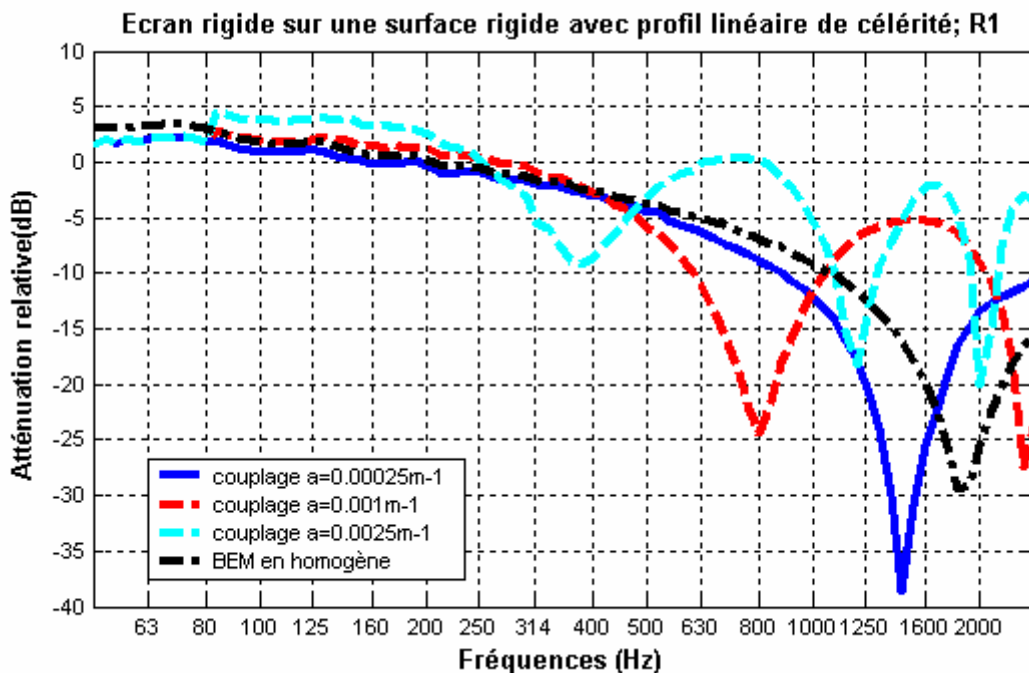


Figure 3-11 : Atténuations relatives obtenues pour un couplage BEM-GFPE en présence d'un profil linéaire de célérité du son pour le récepteur R1.

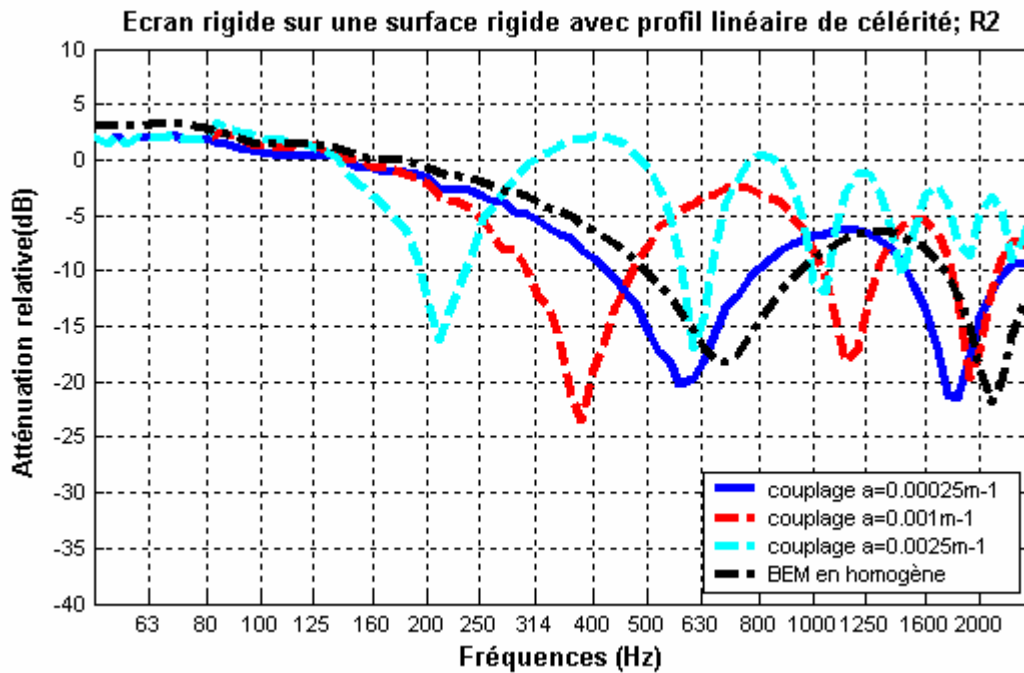


Figure 3-12 : Atténuations relatives obtenues pour un couplage BEM-GFPE en présence d'un profil linéaire de célérité du son pour le récepteur R2.

3.3.3 Comparaison avec la méthode GFPE

Nous effectuons dans cette section un couplage entre le code de calcul BEM et le code GFPE dans lequel on prend en compte un profil linéaire de vitesse du son. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus avec le code de calculs GFPE en prenant en compte un profil de célérité sur l'ensemble du domaine de propagation : de la source au récepteur. On rappelle que la distance de couplage (8m derrière l'écran) a été choisie d'après les conclusions du chapitre 2 (cf. Tableau 3-1 au début de la section 3.3) et les trois profils de vitesse du vent du testés à la section précédente ont été pris en compte.

Seuls les résultats obtenus pour le récepteur R1 sont présentés car les conclusions sont identiques pour R2. Les résultats obtenus pour $a=0,00025m^{-1}$ sont présentés à la Figure 3-13, ceux pour $a=0,001m^{-1}$ à la Figure 3-14 et enfin ceux pour $a=0,0025m^{-1}$ sont présentés à la Figure 3-15.

Pour $a=0,00025m^{-1}$ (cf. Figure 3-13) les atténuations relatives obtenues avec le couplage sont proches de celles obtenues en prenant en compte un profil de célérité tout au long de la propagation dans le code GFPE. Avant 800 Hz, on remarque que la courbe du couplage est en dessous de celle issue de GFPE d'environ 1dB. Cette différence est du même ordre que celle déjà repérée lors du couplage en milieu homogène (cf. section 3.3.1).

Pour $a=0,001m^{-1}$ (cf. Figure 3-14) les courbes des atténuations relatives obtenues avec le couplage et celle obtenue en prenant un profil de célérité tout au long de la propagation dans le code GFPE ont même allure. Les interférences sont situées aux mêmes fréquences en 800 Hz et 2500 Hz mais on observe une différence de niveaux entre ces courbes d'environ 2dB.

Pour $a=0,0025m^{-1}$ (cf. Figure 3-15), les allures des courbes obtenues avec le couplage et avec le code GFPE sont semblables. Les interférences ont lieu à 375 Hz, 1200 Hz et 2000Hz. mais la différence de niveaux entre les atténuations relatives du couplage et de GFPE peut atteindre 5 dB.

On remarque que plus les effets de réfraction augmentent, plus la différence de niveau avec GFPE est importante. Les études menées au chapitre 2 nous indiquent que plus les effets de réfraction augmentent, plus la zone derrière l'écran dans laquelle on peut considérer la réfraction négligeable diminue. Dans cette section, on avait décidé de se baser sur la valeur de D pour $a=0,001m^{-1}$ et $f=1000Hz$, soit $D=8m$ pour effectuer le couplage. Les résultats obtenus pour $a=0,001m^{-1}$ et pour

$a=0,00025\text{m}^{-1}$ sont encourageants. Concernant $a=0,0025\text{m}^{-1}$, il apparaît nécessaire de modifier la distance de couplage car la différence de niveaux entre les atténuations relatives obtenues avec le couplage et le code GFPE atteint 5 dB. L'influence de la distance du couplage fait l'objet de la section suivante 3.3.4.

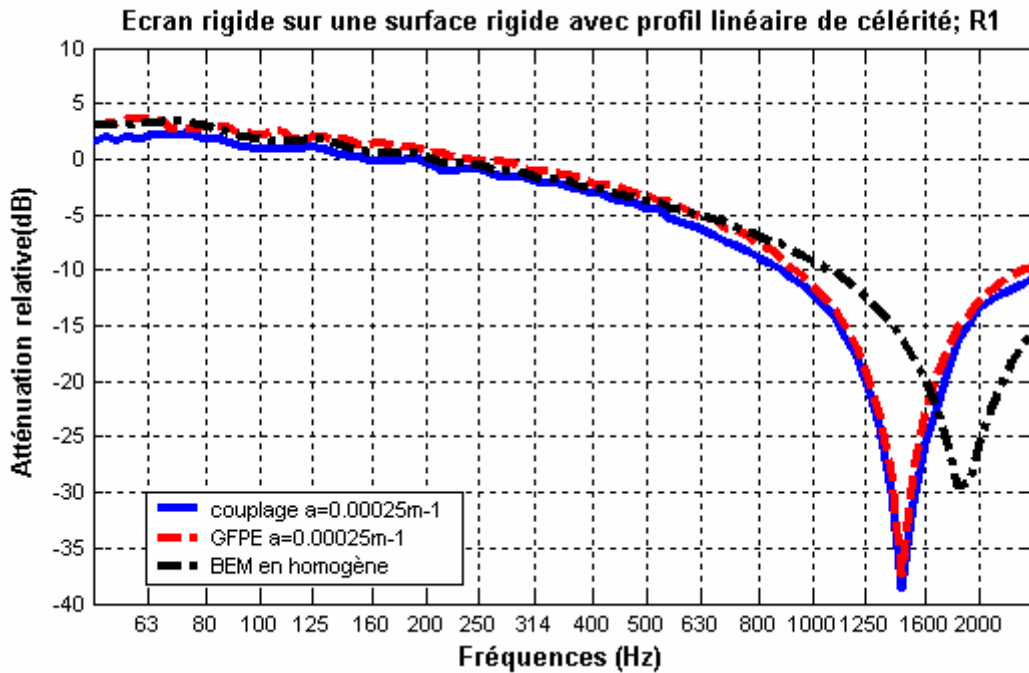


Figure 3-13 : Atténuations relatives obtenues pour un couplage BEM-GFPE en présence d'un profil linéaire de vitesse du son comparées avec GFPE en présence d'un profil linéaire de vitesse du son et BEM en milieu homogène $a=0,0025\text{m}^{-1}$.

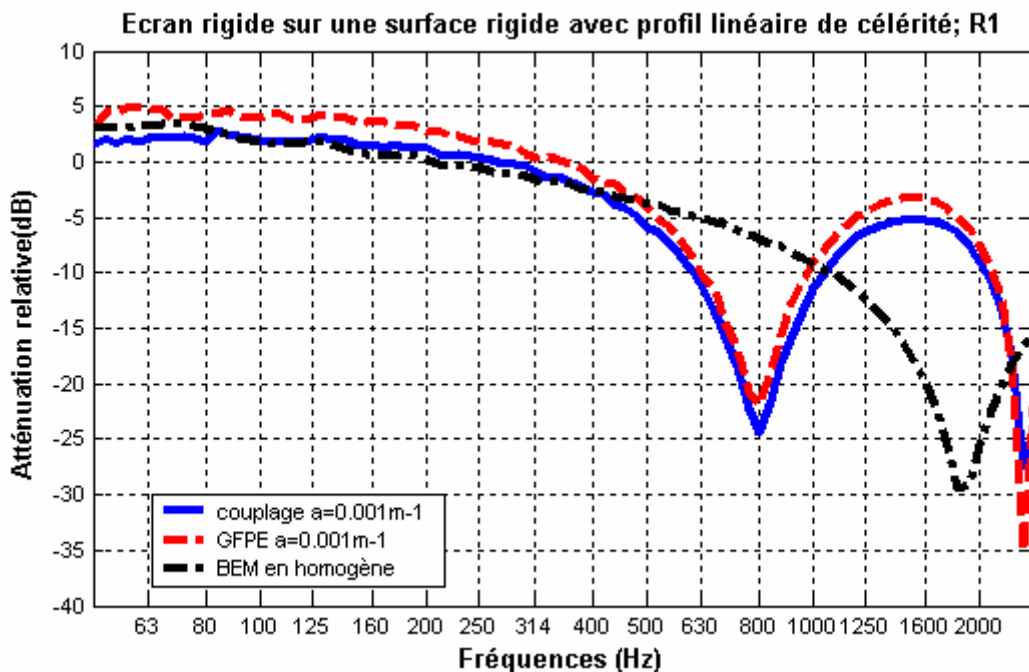


Figure 3-14 : Atténuations relatives obtenues pour un couplage BEM-GFPE en présence d'un profil linéaire de vitesse du son comparées avec GFPE en présence d'un profil linéaire de vitesse du son et BEM en milieu homogène $a=0,001\text{m}^{-1}$.

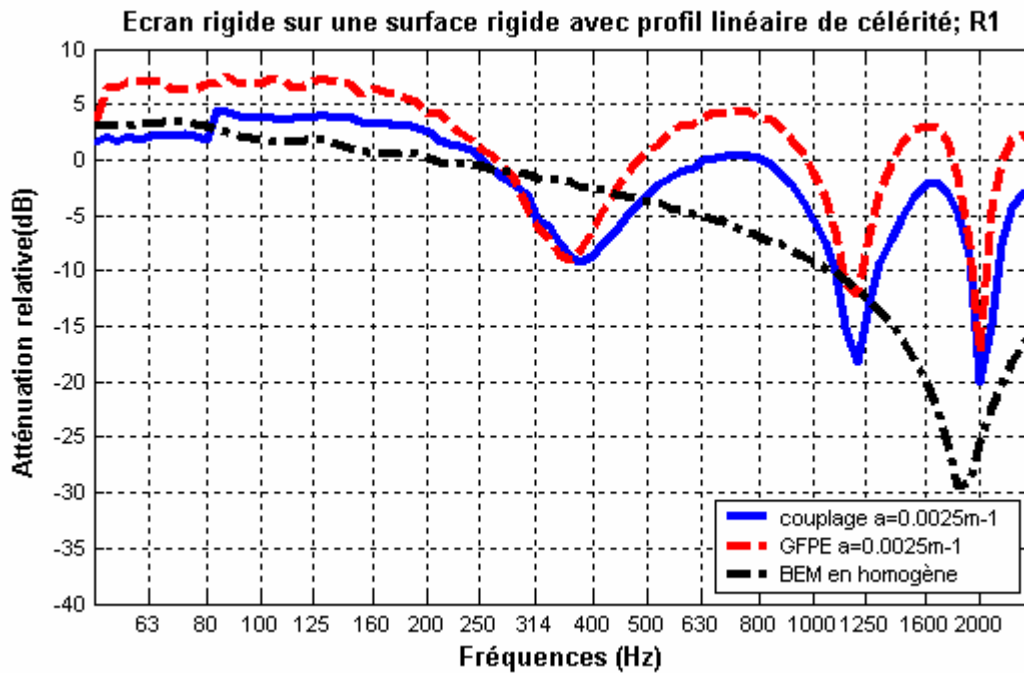


Figure 3-15 : Atténuations relatives obtenues pour un couplage BEM-GFPE en présence d'un profil linéaire de vitesse du son comparées avec GFPE en présence d'un profil linéaire de vitesse du son et BEM en milieu homogène $a=0,0025\text{m}^{-1}$.

3.3.4 Influence de la distance de couplage

Suite aux remarques effectuées dans la section précédente pour $a=0,0025\text{m}^{-1}$, on s'inspire des études menées au chapitre 2 pour choisir une nouvelle distance de couplage.

Le chapitre 2 nous a permis de mettre en évidence la tendance suivante : quand les effets de réfraction augmentent, D diminue. Pour la configuration géométrique étudiée (Figure 3-4) et à 1000 Hz, les valeurs de D sont répertoriées dans le Tableau 3-1 (cf. début de section 3.3).

La distance de couplage utilisée précédemment est de 8m ce qui est dans la zone dans laquelle on peut négliger les effets de réfraction pour $a=0,00025\text{m}^{-1}$ et $a=0,001\text{m}^{-1}$. Cette distance est supérieure à la valeur de D obtenue quand $a=0,0025\text{m}^{-1}$. On choisit une nouvelle distance de couplage $D = 4\text{m}$ inférieure à $D(2\text{dB})$ pour $a=0,0025\text{m}^{-1}$. Le couplage est donc réalisé 4m derrière l'écran soit à 24 m de la source. Pour visualiser l'impact de la distance de couplage, une distance de couplage supérieure à $D(2\text{dB})$, $D=15\text{m}$ est aussi testée.

En milieu homogène, les résultats issus de ces couplages sont très semblables quelle que soit la distance de couplage choisie (cf. Figure 3-16).

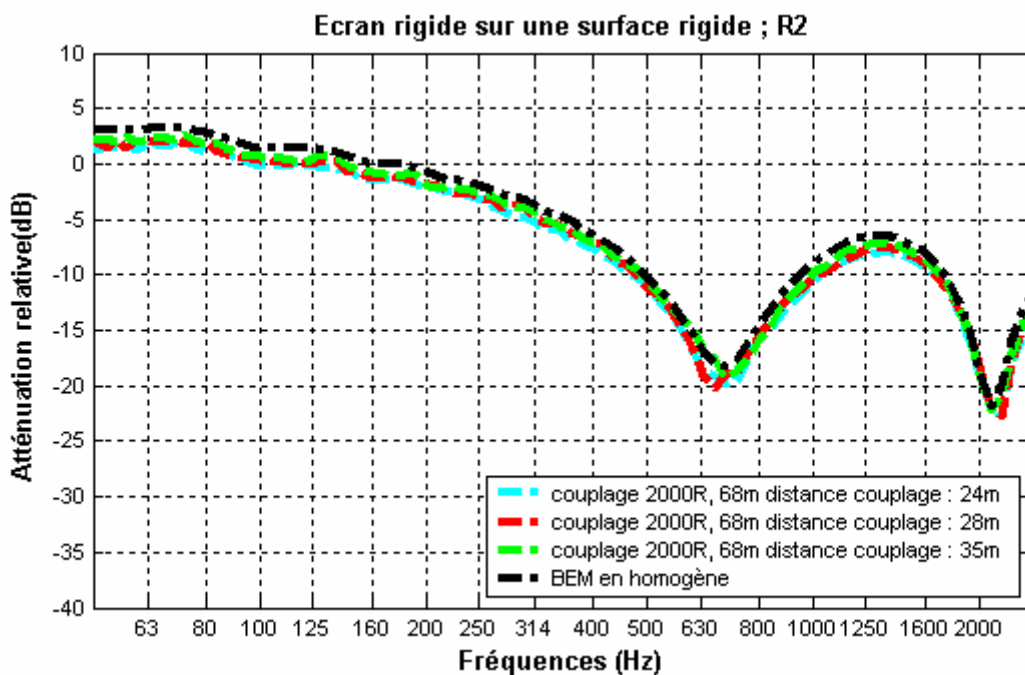


Figure 3-16 : Comparaisons des atténuations relatives obtenues en milieu homogène pour trois distances de couplage, 24 m, 28 m et 35 m de la source.

On introduit maintenant des effets météorologiques dans le couplage. Sur la Figure 3-17, on présente les atténuations relatives obtenues pour les trois distances de couplage retenues. Quand la distance de couplage est égale à 24m, les atténuations relatives sont légèrement supérieures à celles obtenues pour la distance de couplage égale à 28m. Si on utilise pour distance de couplage 35m, les niveaux sont plus bas et les interférences décalées vers les hautes fréquences. En effectuant le couplage à 4m ou 8m derrière l'écran, les résultats reproduisent assez bien l'allure de la courbe obtenue avec le code GFPE mais ils sont décalés de 4 dB vers le bas.

Conclusion :

Une perte de niveau de 4 dB est visible quand les effets de réfraction sont importants ($a=0,0025\text{m}^{-1}$). Cette différence peut peut-être s'expliquer par une estimation sous-évaluée des niveaux de pression avec la BEM au niveau du starter.

Les observations des cartes du chapitre 2 ont permis de montrer que si la fréquence augmente alors D diminue. La distance de couplage choisie correspond à la fréquence 1000Hz, on aurait donc pu s'attendre à discuter des comportements des courbes sur deux domaines fréquentiels : avant 1000 Hz et après 1000 Hz. Mais en fait, il s'avère que les observations des courbes de couplage sont valables sur l'ensemble du domaine fréquentiel d'étude.

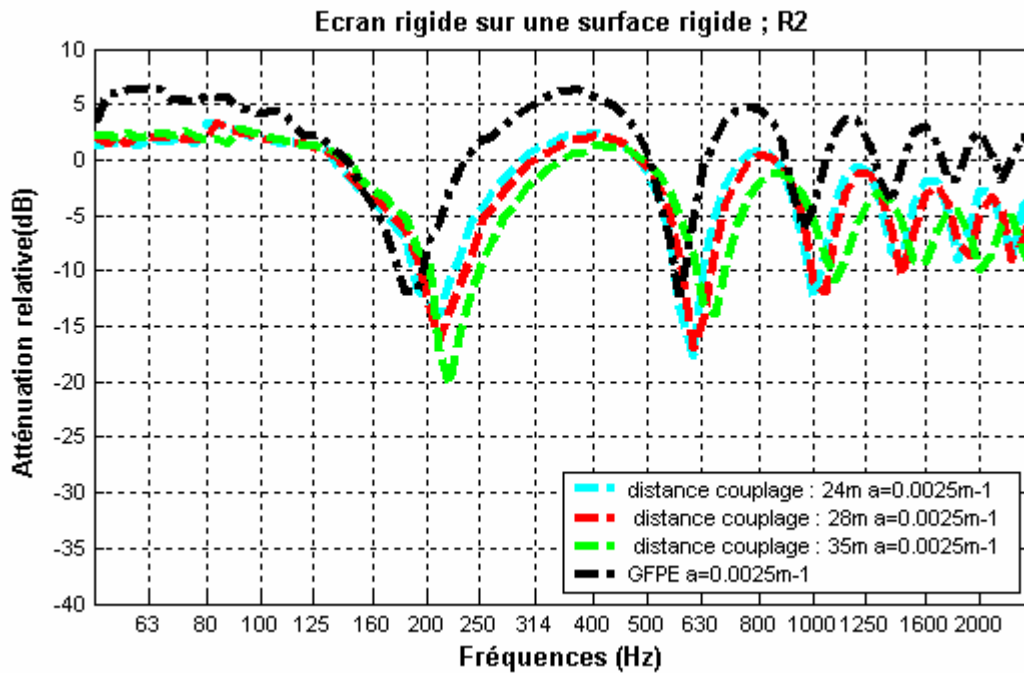


Figure 3-17 : Comparaisons des atténuations relatives obtenues avec effets météorologiques pour trois distances de couplage, 24 m, 28 m et 35 m de la source.

3.4 Cas de l'écran droit sur un sol absorbant

On reprend la configuration géométrique détaillée à la Figure 3-4 et le sol rigide est remplacé par un sol absorbant modélisant un sol herbeux (cf. Figure 3-18) dont l'impédance est décrite avec le modèle de Delany Bazley à un paramètre dans lequel la résistivité au passage de l'air est $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^2$.

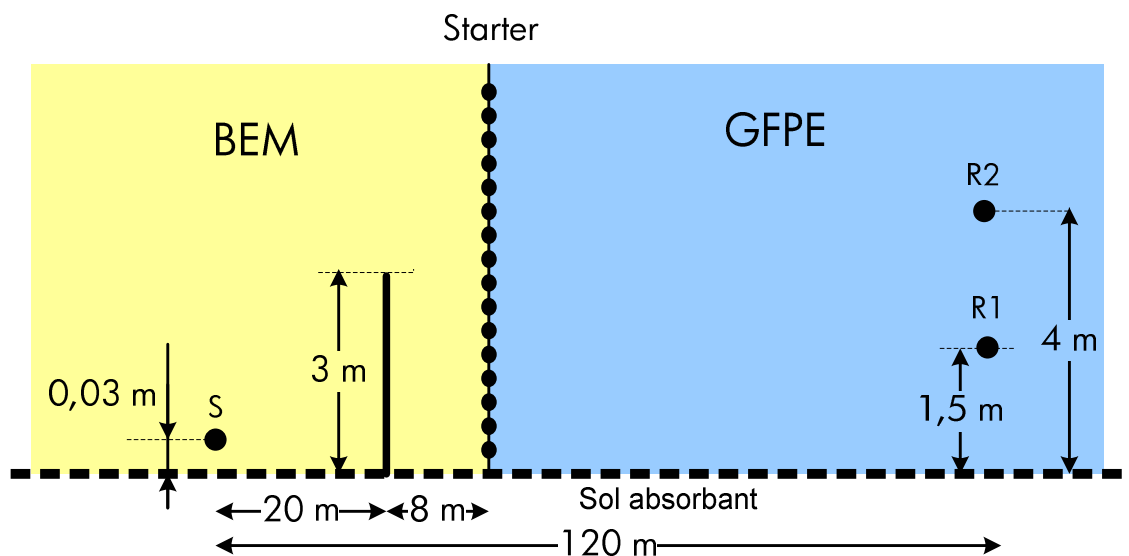


Figure 3-18 : Configuration géométrique pour le cas d'un écran droit au dessus d'un sol absorbant. S (0 ; 0,03 m) ; R1 (120 m ; 1,5 m) R2 (120 m ; 4 m) ; écran rigide de 3 mètres de haut.

3.4.1 Vérifications en conditions homogènes

Comme dans le cas d'un sol rigide, on modélise plusieurs cas en faisant varier le nombre de points du starter et le nombre de récepteurs. Les mêmes paramètres que dans la section précédente sont testés :

- 500 points sur le starter espacés de 0,034m, soit une hauteur du starter de 17 m
- 1000 points sur le starter espacés de 0,017m, soit une hauteur du starter de 17 m
- 500 points sur le starter espacés de 0,068m, soit une hauteur du starter de 34 m
- 1000 points sur le starter espacés de 0,034m, soit une hauteur du starter de 34 m
- 1000 points sur le starter espacés de 0,068m, soit une hauteur du starter de 68 m
- 2000 points sur le starter espacés de 0,034m, soit une hauteur du starter de 68 m

Ces différentes modélisations nous amènent à conclure (comme dans la section 3.3.1) que plus la hauteur du starter augmente, moins les résultats sont oscillants. Les paramètres de couplage retenus sont 2000 points sur le starter de 68m de haut soit un espacement entre les points de 0,034m.

3.4.2 Couplage en présence d'effets de réfraction vers le bas

En se basant sur le cas de l'écran droit au-dessus d'un sol rigide, on choisit la même distance de couplage à savoir 28m depuis la source c'est-à-dire 8 m derrière l'écran. On utilise la méthode BEM comme modèle de propagation entre la source et 8m après l'écran et GFPE de 8 m derrière l'écran aux récepteurs situés à 120 m de la source. Trois profils linéaires de célérité du son sont testés dans la partie modélisée avec la méthode GFPE. Ces profils sont de la forme $c = c_0(1 + az)$ où a peut prendre les valeurs suivantes : $a=0,00025\text{m}^{-1}$, $a=0,001\text{m}^{-1}$, $a=0,0025\text{m}^{-1}$. Les résultats pour le récepteur R1 sont présentés à la Figure 3-19 et ceux pour le récepteur R2 à la Figure 3-20.

Pour les deux récepteurs on peut tirer des conclusions semblables.

Pour le récepteur R1 : quand $a=0,00025\text{m}^{-1}$, la courbe du couplage est assez proche de la courbe obtenue en conditions homogènes avec la méthode BEM. Quand $a=0,001\text{m}^{-1}$, une nouvelle interférence apparaît vers 1750Hz, et les atténuations relatives du couplage sont supérieures à celles obtenues en conditions homogènes sauf sur le domaine fréquentiel [1300, 2200Hz]. Quand $a=0,0025\text{m}^{-1}$ de nouvelles interférences apparaissent et les atténuations relatives sont supérieures à celles obtenues en conditions homogènes sauf pour [170, 270 Hz] et [1650, 1800Hz].

Ainsi quand le paramètre a augmente, on observe une perte d'efficacité de l'écran notamment sur l'intervalle [260, 1300Hz].

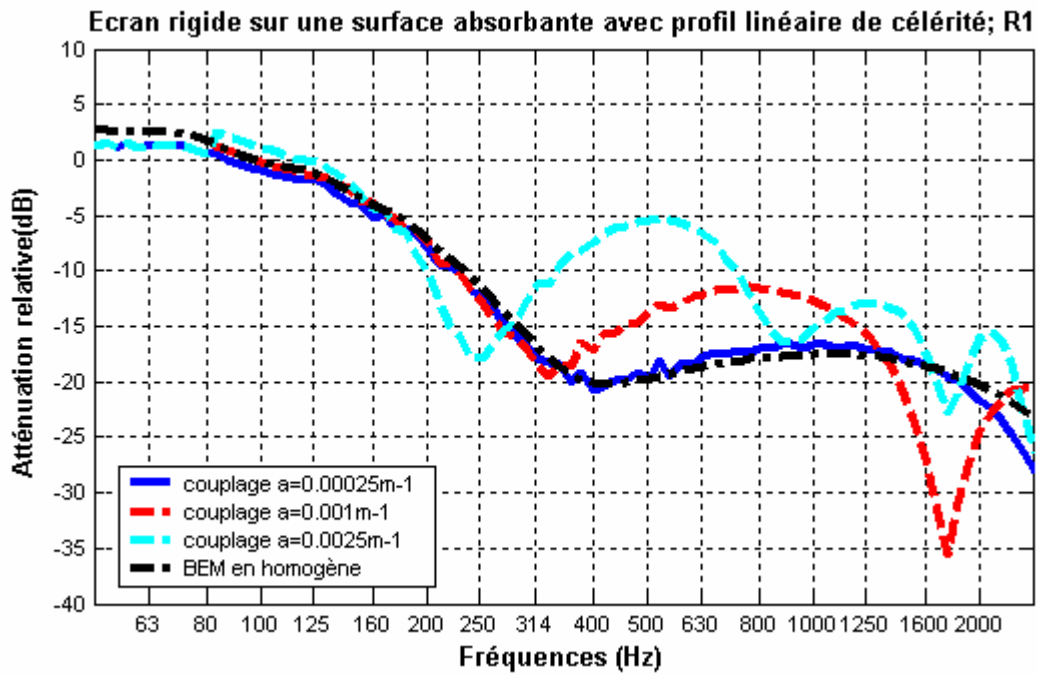


Figure 3-19 : Atténuations relatives obtenues pour un couplage BEM-GFPE en présence d'un profil linéaire de célérité du son pour le récepteur R1.

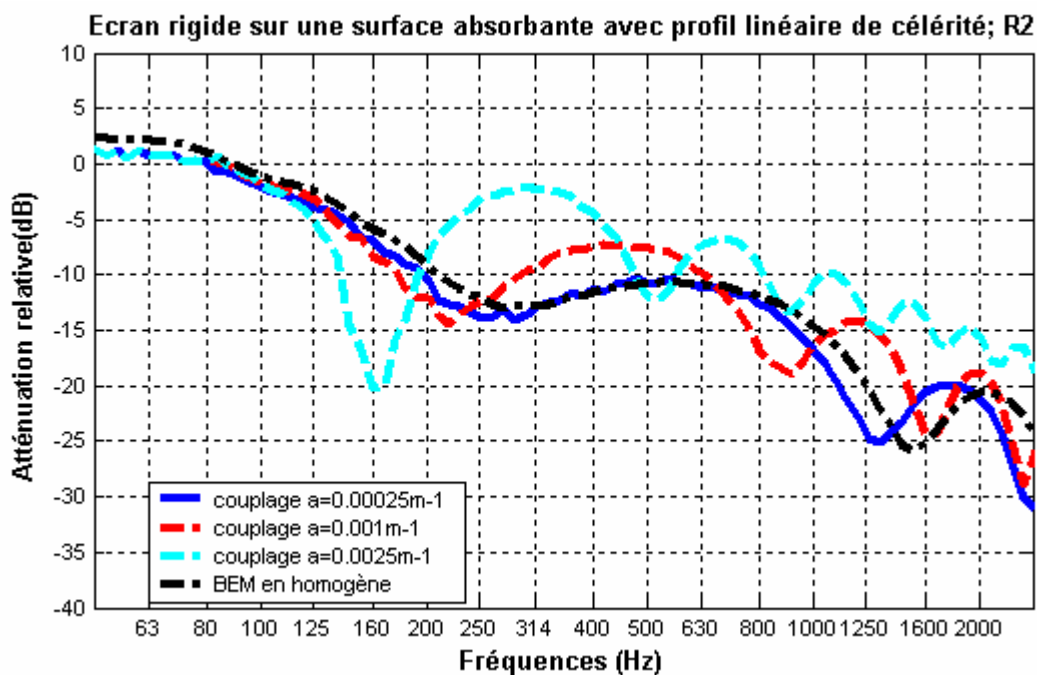


Figure 3-20 : Atténuations relatives obtenues pour un couplage BEM-GFPE en présence d'un profil linéaire de célérité du son pour le récepteur R2.

3.4.3 Comparaison avec la méthode GFPE

Avec la méthode GFPE il est possible de modéliser la propagation au-dessus d'un écran droit en présence d'un profil linéaire de vitesse du son. Les résultats obtenus en effectuant un couplage sont

comparés avec ceux calculés avec la méthode GFPE dans laquelle un profil de célérité est pris en compte sur l'ensemble du domaine de propagation (et pas seulement de la zone de raccord aux récepteurs).

Pour $a=0,00025\text{m}^{-1}$ (cf. Figure 3-21) les atténuations relatives obtenues avec le couplage sont très proches de celles obtenues en conditions homogènes mais diffèrent des résultats obtenus en prenant un profil de célérité tout au long de la propagation dans la méthode GFPE. Jusqu'à 314 Hz, les atténuations relatives obtenues avec la méthode GFPE ont une allure semblable à celles issues du couplage mais supérieures de 2dB. Après 314Hz, les différences s'accroissent pour atteindre 6dB à 1250Hz.

Pour $a=0,001\text{m}^{-1}$ (cf. Figure 3-22) les courbes des atténuations relatives obtenues avec le couplage et celle obtenue en prenant un profil de célérité tout au long de la propagation dans la méthode GFPE ont même allure. Les interférences sont situées aux mêmes fréquences en 315 Hz et 1700 Hz. Mais on observe une différence de niveaux entre ces courbes de 4 à 6 dB.

Pour $a=0,0025\text{m}^{-1}$ (cf. Figure 3-23), les allures des courbes obtenues avec le couplage et avec GFPE sont semblables. Les interférences ont lieu à 250 Hz, 900 Hz et 1700Hz. Mais la différence de niveaux entre les atténuations relatives du couplage et de GFPE peut atteindre 8 dB.

Conclusion :

En présence d'effets de réfraction, le couplage entre BEM et GFPE permet d'obtenir les bonnes allures des profils (comparativement à GFPE) mais le niveau des courbes du couplage est en dessous du niveau des courbes obtenues avec GFPE. On remarque que plus les effets de réfraction augmentent, plus la différence de niveau avec la méthode GFPE est importante.

Dans la section précédente, la même configuration géométrique a été étudiée mais le sol était parfaitement rigide. Le couplage BEM-GFPE a montré des différences de niveau avec les résultats GFPE mais moins importantes. Notamment pour $a=0,00025\text{m}^{-1}$, très peu de différences sont visibles (cf. Figure 3-13). Ici pour $a=0,0025\text{m}^{-1}$ et un sol absorbant, on note des différences de niveau jusqu'à 6dB. La combinaison d'un matériau absorbant et d'un profil de célérité modifie très fortement la propagation acoustique même en présence de faibles effets de réfraction.

Les différences de niveau importantes entre la couplage BEM-GFPE et GFPE peuvent peut-être s'expliquer par la non prise en compte d'effets de réfraction avant la zone de raccord. En effet il est possible que les niveaux de pression calculés avec la BEM au-dessus d'un sol absorbant soit supérieures à ceux obtenus en prenant en compte des effets de réfraction au dessus d'un sol absorbant.

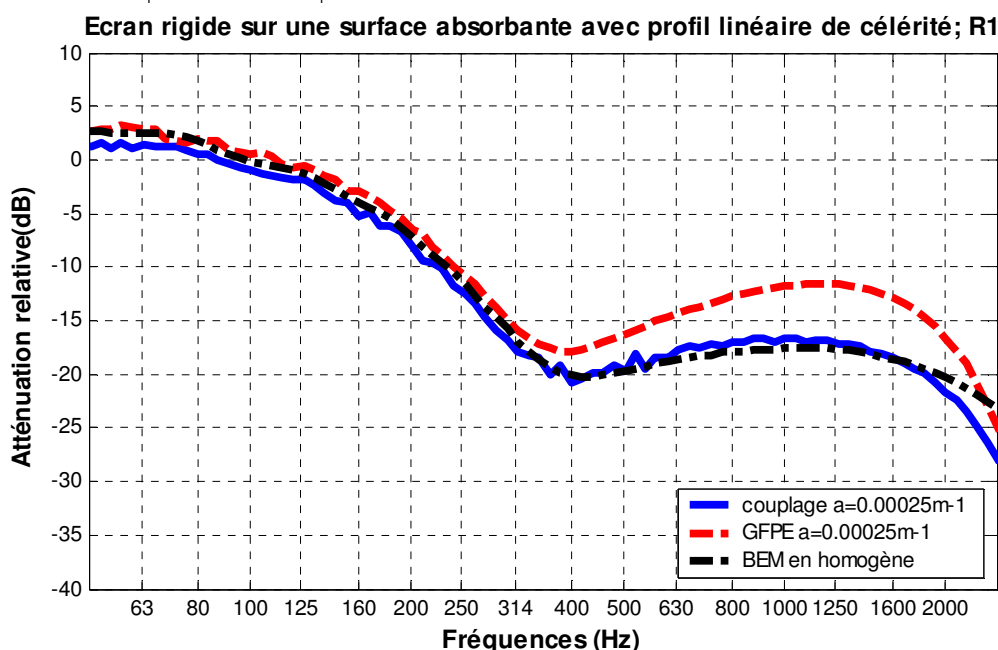


Figure 3-21 : Atténuations relatives obtenues pour un couplage BEM-GFPE en présence d'un profil linéaire de vitesse du son comparées avec GFPE en présence d'un profil linéaire de vitesse du son et BEM en milieu homogène $a=0,00025\text{m}^{-1}$.

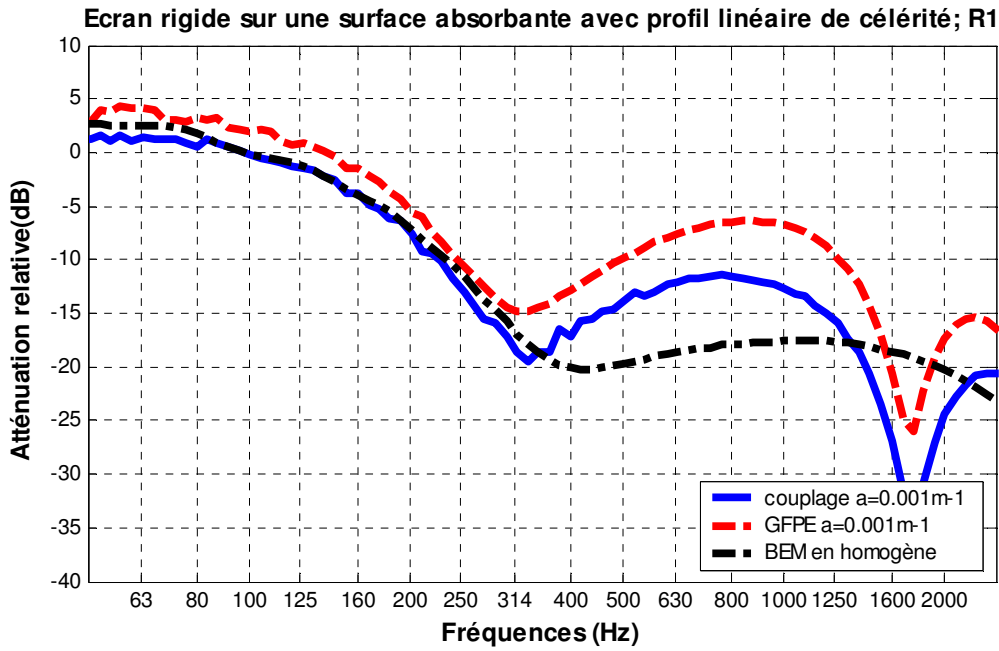


Figure 3-22 : Atténuations relatives obtenues pour un couplage BEM-GFPE en présence d'un profil linéaire de vitesse du son comparées avec GFPE en présence d'un profil linéaire de vitesse du son et BEM en milieu homogène $\alpha=0,001\text{m}^{-1}$.

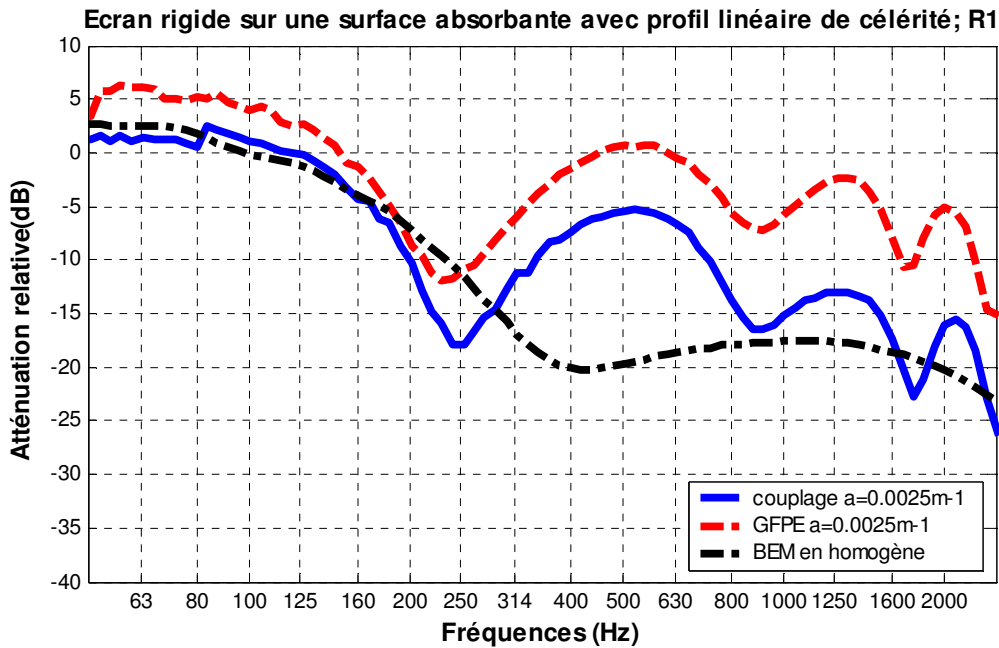


Figure 3-23 : Atténuations relatives obtenues pour un couplage BEM-GFPE en présence d'un profil linéaire de vitesse du son comparées avec GFPE en présence d'un profil linéaire de vitesse du son et BEM en milieu homogène $\alpha=0,0025\text{m}^{-1}$.

3.4.4 Influence des effets de réfraction dans la partie modélisée avec la BEM

Les différences entre les atténuations relatives calculées avec un couplage BEM-GFPE et GFPE nous amènent à nous poser plusieurs questions et faire certaines vérifications. La première consiste à vérifier que la courbe obtenue par la méthode GFPE est fiable. Dans le cas où $\alpha=0,0025\text{m}^{-1}$; les différences sont très importantes (jusqu'à 6dB pour certaines fréquences). Nous utilisons alors la méthode

détaillée dans le chapitre 4 (approche BEM-courbé) pour prendre en compte des effets de réfractions dans la BEM. Les résultats sont présentés à la Figure 3-24. Cette figure montre que les atténuations relatives calculées par cette approche et la GFPE sont en accord et tentent à prouver que les effets de réfraction ne peuvent pas être négligés dans la partie modélisée par BEM. Dans la section suivante, nous réalisons sur une configuration complexe un couplage entre BEM-courbé et GFPE.

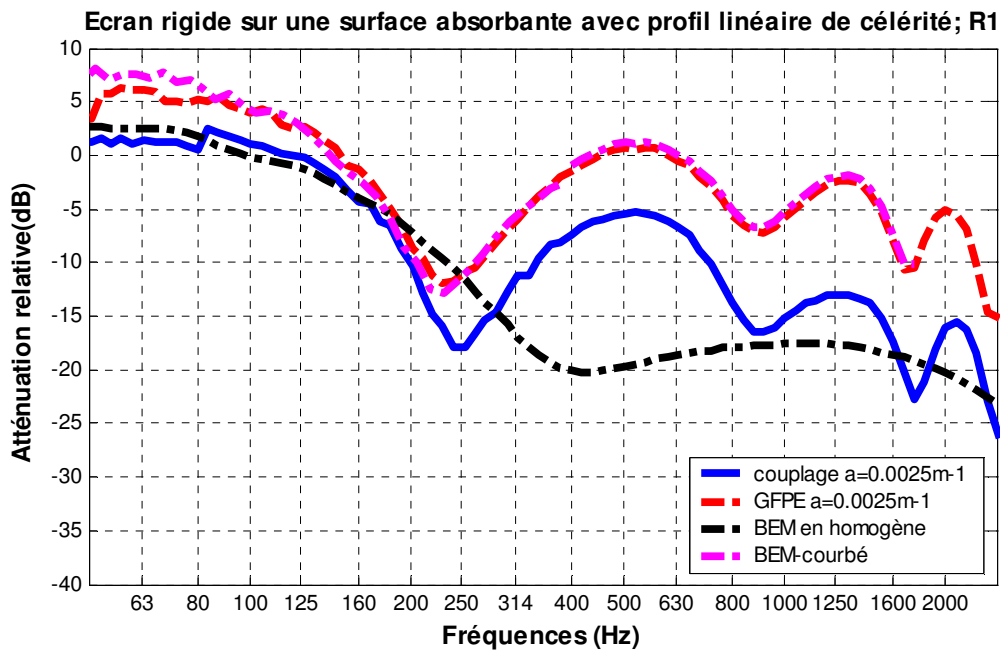


Figure 3-24 : Atténuations relatives obtenues pour un couplage BEM-GFPE en présence d'un profil linéaire de vitesse du son comparées avec GFPE et BEM-courbé, en présence d'un profil linéaire de vitesse du son et BEM en milieu homogène $a=0,0025m^{-1}$.

3.5 Etude d'une configuration typique de plate-forme routière

Dans cette section, une configuration typique de plate-forme routière est étudiée. Il s'agit de la propagation acoustique en présence d'un écran surmonté d'un couronnement (qualifié de T) au-dessus d'un sol présentant une discontinuité d'impédance. Le couronnement d'écran, appelé aussi diffracteur est un dispositif installé en crête d'écran destiné à améliorer le comportement en diffraction et visant à augmenter l'efficacité de l'écran acoustique.

La méthode GFPE ne permet pas la prise en compte d'un écran en T et la méthode BEM sous sa forme classique ne prend pas un compte un profil variable de vitesse du son. Cet exemple permet d'illustrer l'intérêt d'un couplage entre BEM et GFPE. En effet par cette méthode de couplage, il est possible de modéliser la propagation acoustique en présence d'un écran en T et d'un profil variable de vitesse du vent. Ce profil peut être logarithmique, évolutif en fonction de la distance horizontale.

Pour valider ce couplage, un profil linéaire a été retenu car il est alors possible de comparer les résultats avec ceux issus d'une méthode (détaillée au chapitre 4) qui permet la prise en compte d'un profil linéaire de vitesse du son dans une méthode BEM (BEM-courbé).

La configuration étudiée est décrite à la Figure 3-25. Une source est disposée à 0,5 m du sol rigide et à 7 m d'un écran en T rigide. Les atténuations relatives par rapport au champ libre sont calculées en deux points récepteurs situés à 1,5m et 4 m au dessus d'un sol impédant (paramètres pour le modèle de Delany et Bazley : $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^{-2}$) et à 82 m de la source. Le couplage s'effectue à 17m de la source soit 10m derrière l'écran. Avant d'introduire des effets météorologiques dans la partie modélisée avec la GFPE, le couplage est testé en milieu homogène. Il est nécessaire de disposer dans la BEM, 3000 points d'abscisse 17m espacés de 0,0136m (soit une hauteur de starter de 40,8 m) pour obtenir des atténuations relatives identiques à celles calculées en milieu homogène par la BEM au niveau des deux récepteurs.

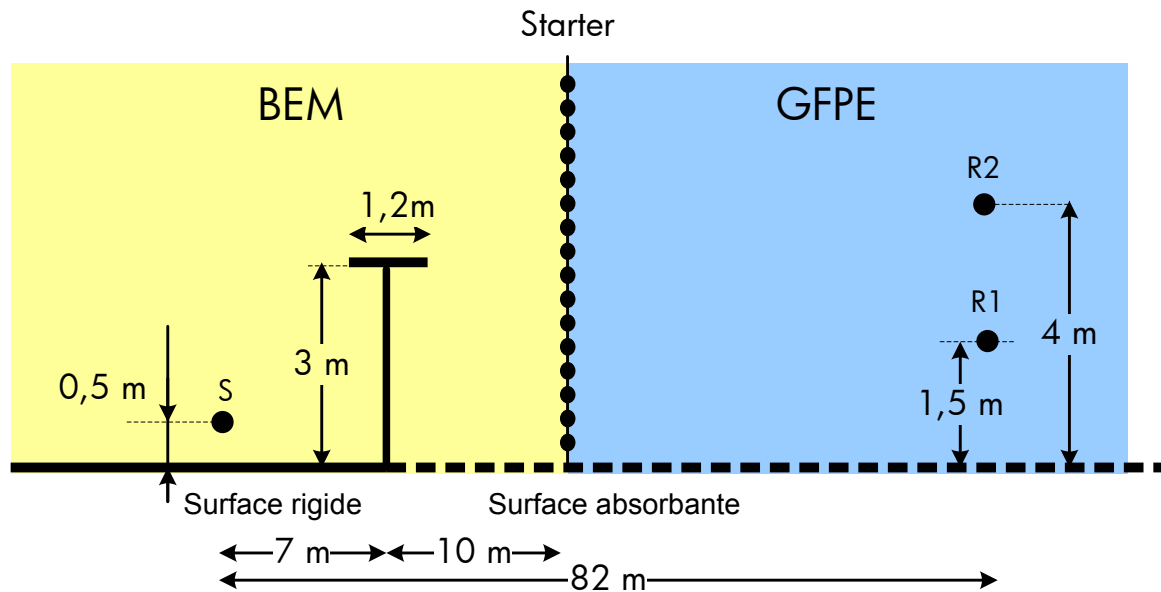


Figure 3-25 : Configuration complexe : S (0 ; 0,5 m) ; R1 (82 m ; 1,5 m) R2 (82 m ; 4 m) ; écran rigide en T de 3 mètres de haut, absorbant : $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^2$.

Le couplage BEM-GFPE est réalisé en introduisant un profil de vitesse du son linéaire dans GFPE (cf. section 3.5.1). Un second couplage (cf. section 3.5.2) est réalisé en prenant en compte ce profil de réfraction dans la BEM (BEM-courbé) et dans la GFPE. La prise en compte d'un profil linéaire dans une méthode BEM est détaillée dans le chapitre 4.

3.5.1 Couplage en présence d'effets de réfraction dans la méthode GFPE

Un couplage BEM-GFPE est réalisé pour la configuration géométrique détaillée à la Figure 3-25. Il est effectué à 17m de la source entre la méthode BEM en conditions homogènes et la méthode GFPE prenant en compte un profil de vitesse du son linéaire de la forme $c(z) = c_0(1 + 0.0049z)$ entre 17m et 82 m. Sur la Figure 3-26, sont présentées les atténuations relatives calculées pour le récepteur R1. Sur cette figure, trois courbes sont tracées : une présente les atténuations relatives obtenues pour un milieu de propagation homogène (en noir), une autre celles du couplage BEM-GFPE (en bleu) et la dernière (en rouge) celles des atténuations relatives obtenues en prenant en compte un profil linéaire de vitesse du son sur l'ensemble du domaine de propagation (avec BEM-courbé).

La comparaison entre la courbe obtenue en conditions homogènes et celle en présence d'un profil linéaire de vitesse du son sur l'ensemble du domaine montre l'importance des effets météorologiques sur l'ensemble du domaine fréquentiel. En effet, les interférences sont déplacées et les atténuations relatives n'ont pas le même niveau. Ainsi, la position de l'interférence présente à 400 Hz en milieu homogène est décalée vers les basses fréquences (190 Hz) en présence de réfraction vers le bas.

La comparaison entre la courbe du couplage BEM-GFPE et la courbe rouge de BEM-courbé (effet de réfraction sur l'ensemble du domaine de propagation) permet de visualiser l'importance des effets de réfraction dans la zone proche de l'écran modélisée par la méthode BEM. Les allures de ces deux courbes sont assez semblables mais des différences sont observables. L'interférence visible à 190 Hz pour la courbe BEM avec réfraction est déplacée vers 200Hz pour le couplage et est moins creusée. La courbe du couplage est en moyenne de 3 dB en dessous de celle de la méthode avec réfraction.

Cette remarque va dans le sens des remarques effectuées pour les configurations précédentes. En effet, en ne prenant pas en compte les effets de réfraction dans la zone modélisée par BEM, la courbe des atténuations relatives obtenues a une allure semblable à celle prenant en compte la réfraction sur l'ensemble du domaine de propagation (que ce soit avec la méthode BEM ou GFPE) mais elle est inférieure de quelques dB. Dans la section suivante, un couplage est réalisé entre BEM-courbé et GFPE.

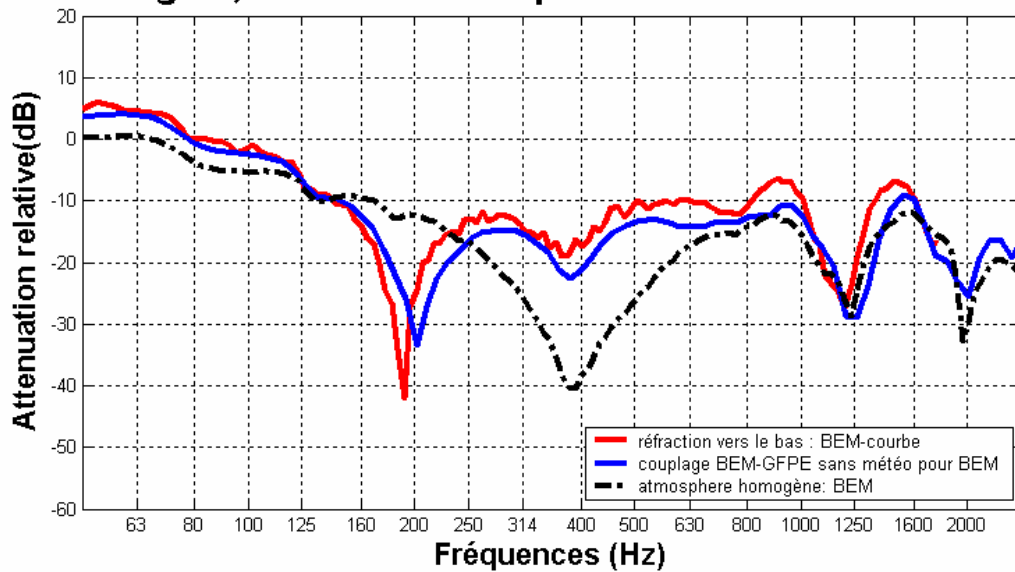
Ecran T rigide, discontinuité impédance:réfraction vers le bas R1

Figure 3-26 : Comparaisons entre BEM-courbé et BEM-GFPE: Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 3-25. S (0 ; 0.5 m) ; R1 (82 m ; 1,5 m) ; écran rigide de 3 mètres de haut, absorbant $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^2$, épaisseur infinie.

3.5.2 Couplage en présence d'effets de réfraction dans les méthodes BEM et GFPE

Dans cette section, on cherche à quantifier l'importance de la prise en compte des effets météorologiques dans la zone proche de l'écran. Le couplage est réalisé sur la configuration de la Figure 3-25 à 17 m de la source entre la méthode BEM prenant en compte un profil linéaire de vitesse du son de la forme $c(z) = c_0(1 + 0.0049z)$ et la méthode GFPE prenant en compte ce même profil de vitesse du son.

Les atténuations relatives obtenues pour le récepteur R1 sont présentées à la Figure 3-27. Les résultats obtenus avec ces conditions de couplage sont meilleurs que ceux du couplage BEM-GFPE réalisé sans prise en compte de la réfraction dans la zone modélisée par la BEM (cf. Figure 3-26).

En effet les différences entre les atténuations relatives calculées par la BEM en présence de réfraction (courbe rouge) et avec le couplage (courbe bleue) sont moins importantes. L'interférence située vers 190 Hz est moins décalée et les niveaux des courbes plus proches même si des différences de 2 dB sont visibles à certaines fréquences. Cette observation montre que la prise en compte d'effets météorologiques dans la première partie permet de se rapprocher de la solution attendue (interférence mieux localisée et atténuations relatives plus proches de la solution de référence).

Toutefois, il est à noter qu'ici on n'a pas effectué d'études préliminaires analogues à celles du chapitre 2 pour voir si à l'endroit du raccord, on était dans une zone où la réfraction est négligeable devant la diffraction.

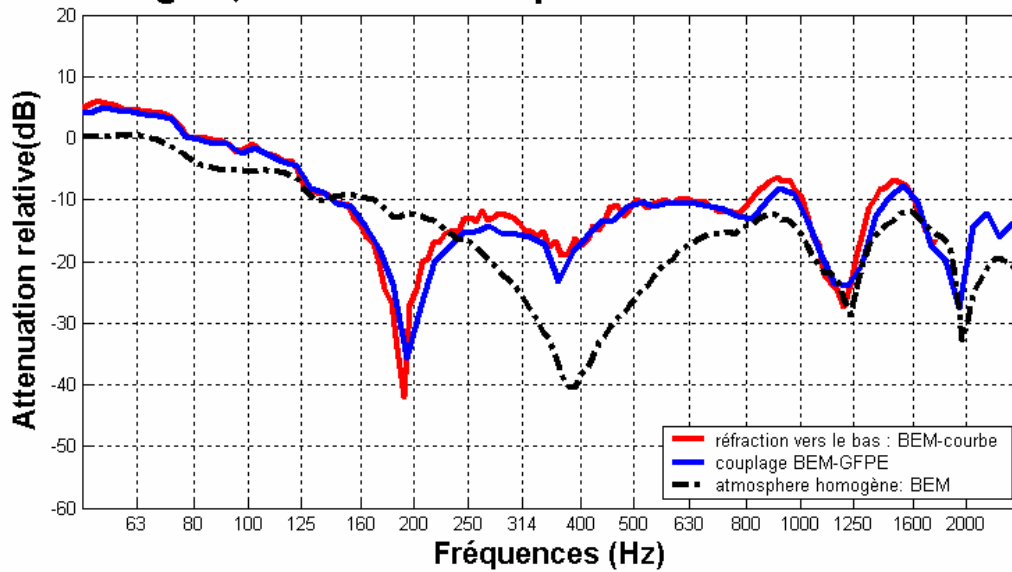
Ecran T rigide, discontinuité impédance:réfraction vers le bas R1

Figure 3-27 : Comparaisons entre BEM-courbé et BEM-GFPE : Atténuations relatives par rapport au champ libre obtenues pour la configuration décrite à la Figure 3-25. S (0 ; 0.5 m) ; R1 (82 m ; 1,5 m) ; écran rigide de 3 mètres de haut, absorbant $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^2$.

3.6 Conclusions

Dans ce chapitre une technique de couplage entre les méthodes BEM et GFPE a été présentée. Cette technique permet de tirer parti des avantages de chacune des méthodes. Le couplage a été réalisé sur une configuration détaillée au chapitre 2 et les conclusions de ce chapitre ont permis de définir la distance de couplage entre les deux méthodes. Les résultats obtenus en milieu homogène sont en accord. Les tests en présence de réfraction montrent que l'allure des courbes obtenues par rapport à celle prenant en compte un profil de réfraction sur l'ensemble du domaine est bonne mais les niveaux des atténuations relatives sous-estiment la propagation acoustique. Plus les effets de réfraction pris en compte sont importants plus les résultats sont sous-estimés (différence jusqu'à 5 dB). De plus quand un matériau absorbant recouvre le sol, les différences sont encore plus importantes. Il semble que l'effet de la réfraction augmente l'absorption du matériau.

Une étude de l'importance de la réfraction dans la partie modélisée par BEM a été réalisée dans le cas d'un écran en T. Cette étude met en évidence la perte de niveau quand les effets de réfraction ne sont pas pris en compte dans la partie modélisée avec la méthode BEM.

Le couplage BEM-GFPE est une méthode qui permet de réduire grandement les temps de calcul. En effet, ils sont divisés par 5 (sur un même ordinateur). Ainsi dans le cas de l'écran en T, les temps de calcul sont passés de 20 heures (BEM-courbé) à 4h (couplage BEM-GFPE) sur un même ordinateur.

Chapitre 4 : Prise en compte d'effets météorologiques dans des méthodes d'éléments finis de frontière

Dans ce chapitre une méthode pour prendre en compte des effets météorologiques (gradients de température et gradients de vent) dans des méthodes d'éléments finis de frontière est présentée.

Dans le chapitre 1, nous avons présenté l'analogie entre la propagation du son dans une atmosphère soumise à un gradient de célérité constant et la diffraction du son par une surface courbe cylindrique. Cette analogie a motivé la création d'un centre des modèles réduits au CSTB de Grenoble en 2001 [PREMAT, DEFRANCE et al., 2003]. Les mesures effectuées sur surfaces courbes permettent de valider les simulations numériques effectuées en présence de réfraction due à un profil de vitesse du son linéaire.

Di et al [DI and GILBERT, 1994] ont utilisé numériquement cette analogie pour prendre en compte un sol cylindrique dans une méthode d'équation parabolique (cf. chapitre 1 section sur les transformations conformes). En effet, cette méthode ne permet pas de prendre en compte un sol de topographie irrégulière donc les transformations conformes sont utilisées de façon à « remplacer » les irrégularités topographiques par une modification du profil de célérité (qui est, elle, bien prise en compte dans ce modèle de propagation).

Nous effectuons la démarche inverse de Di et al car le modèle de propagation que nous utilisons est basé sur la méthode des éléments finis de frontière. Cette démarche permet alors d'étudier la propagation du son au dessus d'un sol plan dans une atmosphère soumise à un gradient de célérité exponentiel à l'aide d'un code d'éléments finis de frontière. Dans les configurations étudiées, les hauteurs des sources et récepteurs considérées sont négligeables devant le rayon de courbure donc les profils exponentiels de célérité sont des profils linéaires au premier ordre (cf. section 1.4.1.1, chapitre 1).

Des configurations typiques de plate-forme routière ont été choisies pour valider cette approche du point de vue expérimental et numérique [PRIOUR, PREMAT et al., 2004] [PRIOUR, PREMAT et al., 2004]. Les validations expérimentales sont effectuées par des mesures réalisées en milieu contrôlé, en laboratoire sur des modèles réduits dont la courbure du sol permet de prendre en compte la courbure des rayons sonores en milieu inhomogène. Une comparaison numérique est réalisée à l'aide d'un code développé au CSTB basé sur la théorie de l'équation parabolique, ATMOS (cf. section 1.3.2.3, chapitre 1).

4.1 Validations expérimentales : mesures sur modèles réduits

Afin de valider les résultats numériques obtenus en courbant le sol dans le code de calcul BEM MICADO [JEAN, 1998] une campagne de mesures sur modèles réduits a été entreprise.

Les gradients de température et de vent ont pour effet de courber les rayons (phénomène de réfraction). Ces effets météorologiques peuvent être introduits en laboratoire en simulant la courbure des rayons extérieurs par la courbure des surfaces des maquettes (cf. 1.4.1.1).

Au centre des modèles réduits de Grenoble, nous disposons de deux surfaces cylindriques, l'une est concave et l'autre convexe. La surface concave (cf. Figure 4-1) a un rayon de courbure constant $R_C = 10,2$ m. Un profil linéaire réfractant vers le bas correspond à un vent portant ou à un cas où la

température augmente avec l'altitude, c'est-à-dire que l'on observe une inversion de température comme lors d'une nuit étoilée par exemple. La surface convexe a un rayon de courbure $R_C = 5$ m (cf. Figure 4-2), le profil de vitesse du son est réfractant vers le haut, donc soit on est en présence d'un vent contraire ou d'un gradient négatif de température, ce qui est la règle générale durant une journée ensoleillée d'été.

Quand les mesures acoustiques sont réalisées à l'échelle 1:k, où k est un entier, cela signifie qu'une configuration à l'échelle 1 est étudiée par une configuration à échelle réduite dont les dimensions (hauteur de la source et des récepteurs, distance de propagation, dimensions des obstacles) sont divisées par k et les fréquences utilisées pour réaliser les mesures sont k fois supérieures à celles employées à l'échelle 1. Les dimensions des surfaces courbes permettent de travailler avec des distances curvilignes de l'ordre de 5 m. Les phénomènes de dissipation de l'énergie dans l'air sont considérés comme négligeables pour des fréquences inférieures à 20 000 Hz. Ainsi les mesures sur modèles réduits ne dépasseront pas la fréquence de 20 000 Hz. Il est donc nécessaire de faire un compromis entre les distances et les fréquences à l'échelle 1 pour choisir le facteur de réduction. Si on choisit une échelle de 1:100, la distance de propagation maximale sera de 500 m mais la fréquence acoustique maximale sera de 200Hz. Un compromis a été trouvé en choisissant un facteur de réduction égal à 20. A l'échelle 1:20, la distance maximale de propagation est de 100 m et la fréquence maximale de 1000 Hz ce qui correspond assez bien à nos hypothèses de travail (cf. section 1.5.9).

A l'échelle 1:20, pour modéliser un terrain herbeux réel, de la feutrine des Ardennes d'épaisseur 1,7 mm a été placée sur les surfaces courbes constituées de polystyrène choc. Une feuille de polystyrène choc rigide représente quant à elle une surface très réfléchissante de type chaussée routière. La mesure directe des impédances des matériaux n'est pas aisée. Pour décrire les impédances des matériaux utilisés, nous avons comparé les mesures de pression acoustique au-dessus du matériau testé avec les simulations numériques BEM dans la même configuration, pour différentes positions de source et récepteurs. Ainsi, le modèle de Delany et Bazley [DELANY and BAZLEY, 1970] à un paramètre s'est révélé adapté pour décrire l'impédance de la feutrine. La valeur moyenne sur toute la gamme des fréquences ainsi déterminée pour la feutrine est $\sigma = 3600$ kPa.s.m² à l'échelle maquette ce qui correspond à $\sigma = 180$ kPa.s.m² à l'échelle réelle, c'est-à-dire à un sol absorbant composé d'herbes hautes. La feuille de polystyrène choc a également été testée et l'hypothèse d'impédance infinie pour ce matériau sur toute la gamme des fréquences a été validée.

Les mesures ont été réalisées avec la technique du sinus glissant [FARINA, 2000; MULLER and MASSARANI, 2001]. Une excitation temporelle du tweeter sous forme d'un sinus glissant logarithmique est effectuée (cf. [FARINA, 2000]). Le signal temporel enregistré au niveau du microphone est ensuite convolué avec une fonction de filtre inverse (cf. [STAN, EMBRECHTS et al., 2001]) pour obtenir la réponse impulsionnelle du système. Un filtrage temporel est ensuite appliqué pour éliminer les champs réfléchis par les parois du local de mesure et ne conserver que les champs des rayons utiles. En effet connaissant les dimensions du local de mesure et les positions de la source et des récepteurs il est possible d'évaluer le temps mis pour le champ direct, les champs réfléchis sur la configuration et le retard de temps des rayons se réfléchissant sur les parois du local de mesure. Une fois le signal temporel filtré pour éliminer les champs parasites, on effectue une transformée de Fourier pour obtenir la réponse en fréquence du système.

La méthode du sinus glissant logarithmique a été retenue parmi les méthodes de Maximum Length Sequence (MLS), d'impulsion et la technique classique du sinus glissant, car cette méthode est rapide, peu coûteuse en temps de calculs et présente une bonne insensibilité aux phénomènes de distorsion.

La source de bruit est un tweeter AUDAX TW010F1, et les récepteurs sont des microphones 1/2 pouce B&K de type 4133 choisis pour leur fréquence de coupure supérieures à la gamme de fréquences des mesures soit ici 20000Hz. (cf. Annexe B). Le diagramme de directivité de la source est donné en Annexe B. Les mesures acoustiques sont réalisées dans la gamme [1000 Hz ; 20000 Hz] ce qui correspond à des fréquences de 50 Hz à 1000 Hz à l'échelle 1.

4.2 Configurations retenues

Différentes configurations typiques de plate-forme routière ont été retenues pour valider l'approche BEM-sol courbé. Elles ont été étudiées expérimentalement au centre des modèles réduits du CSTB, Grenoble. Les configurations sur lesquelles on souhaite simuler un profil linéaire de vent réfractant vers le bas sont étudiées sur la surface concave de rayon de courbure, $R_C = 10.2$ m (cf. Figure 4-1) et les configurations pour l'étude d'un profil linéaire de vent réfractant vers le haut sont mises en place sur la surface convexe de rayon de courbure $R_C = 5$ m (cf. Figure 4-2Tableau 1-1). Sur la photo de la Figure 4-1, on distingue au premier plan les deux microphones fixés sur une tige métallique au dessus de la surface concave recouverte de feutrine des Ardennes (rouge). En arrière plan, on distingue un écran acoustique droit en polystyrène choc puis un point gris qui est en fait le tweeter. Sur la photo de la Figure 4-2, au premier plan on voit le tweeter (en gris) puis un écran acoustique et enfin la feutrine des Ardennes (rouge) au-dessus de laquelle est disposé les microphones fixés sur une tige métallique.

Le rayon de courbure à l'échelle 1:20 de la surface concave est 10,2m ce qui correspond à un rayon de courbure de 204m à l'échelle 1. Le profil linéaire de vitesse du son équivalent est $c(z) = c_0(1 + 0.0049z)$ à l'échelle 1. A 10 m au-dessus du sol, la célérité du son est alors de $c(10) = 356,7 \text{ m.s}^{-1}$. Avec une approximation célérité du son effectif, ce profil signifie qu'on est en présence d'un vent portant dont la vitesse vaut $v_{10} = 16,7 \text{ m.s}^{-1}$ à 10 mètres au-dessus du sol, ce qui est un vent assez fort (coup de vent selon l'échelle Beaufort). Cette vitesse de vent n'est pas réaliste mais permet de mettre en évidence les effets météorologiques sur une courte distance source-récepteur.

Le rayon de courbure de la surface convexe est deux fois moins important que celui de la surface concave, donc les effets de gradient de célérité du son sont deux fois plus importants. Le rayon de courbure à l'échelle 1:20 est 5m ce qui correspond à un rayon de courbure de 100m à l'échelle 1. Le profil linéaire de vitesse du son équivalent est $c(z) = c_0(1 - 0,01z)$ à l'échelle 1. A 10 m au-dessus du sol, la célérité du son est alors de $c(10) = 306 \text{ m.s}^{-1}$. Avec une approximation célérité effective du son, ce profil signifie qu'on est en présence d'un vent en sens contraire dont la vitesse vaut $v_{10} = 34 \text{ m.s}^{-1}$ à 10 mètres au-dessus du sol, ce qui représente un vent très fort (ouragan selon l'échelle Beaufort). Les effets météorologiques induits par un tel profil sont donc mis en évidence sur des distances de propagation plus courtes que sur la surface concave.

Pour toutes les configurations, on représente l'atténuation relative par rapport au champ libre à l'échelle 1 et donc dans la gamme de fréquences [50 Hz, 1000 Hz]. Les atténuations relatives par rapport au champ libre sont calculées au niveau d'un récepteur M selon la formule suivante :

$$Att(x, y) = 10 * \log \left(\frac{|P_{tot}(x, y)|^2}{|P_{lib}(x, y)|^2} \right) \quad (36)$$

Où $P_{tot}(x, y)$ représente le champ acoustique total et $P_{lib}(x, y)$ le champ libre au niveau du récepteur M de coordonnées (x,y) en conditions homogènes.

A l'échelle 1, la source est placée à 0,5 m au-dessus du sol et les récepteurs à 1,5 m et 4 m (cf. Tableau 1-5 p 30).



$$R_c = 10,2 \text{ m}$$

Figure 4-1 : Surface concave en conditions homogènes, analogie avec un profil linéaire réfractant vers le bas au-dessus d'une surface plane.



$$R_c = 5 \text{ m}$$

Figure 4-2 : Surface convexe en conditions homogènes, analogie avec un profil linéaire réfractant vers le haut au-dessus d'une surface plane.

4.3 Paramètres des calculs numériques

La configuration à étudier dans notre code d'éléments finis de frontière est « transformée » en utilisant la transformation logarithmique (cf. paragraphe 1.4.1.2 p 22). Un sol plan est transformé en une surface cylindrique et un écran perpendiculaire au sol est transformé en un écran de même hauteur qui reste perpendiculaire à la surface cylindrique.

Le code MICADO (cf. chapitre 1) étudie la propagation du son pour des configurations géométriques fermées. Ainsi il faut fermer l'arc de cercle représentant la coupe transversale de surface cylindrique (cf. Figure 4-3). De fait le nombre de points du maillage augmente et par conséquent le temps de calcul est plus important. Pour réduire ce nombre de points, la surface courbe est fermée par des segments verticaux. Dans le cas de la surface concave, si on ferme directement l'arc de cercle par des segments verticaux, des instabilités numériques surviennent du fait des arêtes de diffraction créées. C'est pourquoi nous ajoutons d'abord des segments horizontaux avant les segments verticaux.

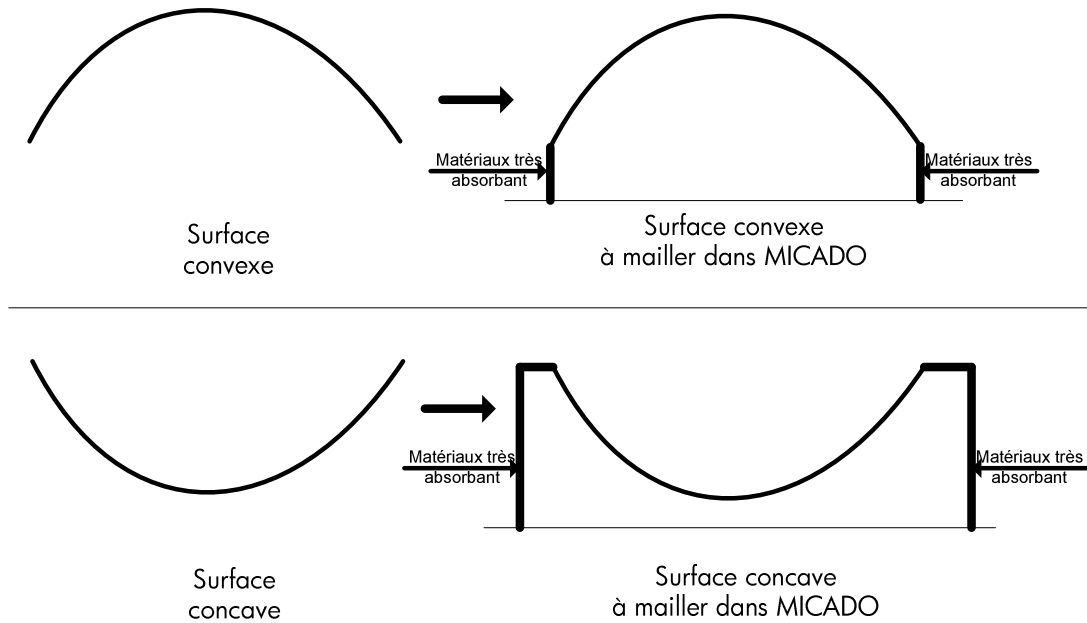


Figure 4-3 : Maillage des surfaces cylindriques dans le code d'éléments finis de frontière MICADO.

Pour obtenir des résultats sans instabilités numériques, il est nécessaire d'augmenter le nombre de points de Gauss dans le calcul des intégrales qui peut être de 40 contre une dizaine pour des configurations planes. MICADO utilise un maillage adaptatif en fonction de la fréquence et permet aussi d'appliquer un critère de maillage. Ainsi à chaque fréquence, chaque segment ou arc de cercle défini est régulièrement divisé en un nombre fini d'éléments par longueur d'onde avec un minimum d'éléments imposés. Pour une configuration plane avec écran, 3 à 5 éléments par longueur d'onde sont nécessaires pour assurer la convergence des calculs. En revanche pour les configurations étudiées dans ce chapitre, la convergence est obtenue avec 8 à 11 éléments par longueur d'onde.

Pour réduire les instabilités numériques, nous avons constaté qu'il était utile de disposer « numériquement » un matériau très fortement absorbant (coefficient d'absorption $\alpha = 1$) aux extrémités de l'arc de cercle. Cet artifice permet de réduire les instabilités notamment dans le cas des surfaces concaves qui font apparaître des arêtes de diffraction quand on ferme l'arc de cercle.

4.4 Comparaisons avec les résultats de Bérengier et Daigle

Bérengier et Daigle [BERENGIER and DAIGLE, 1988] ont mis au point un modèle numérique de prévision sonore dans le cas d'une propagation au-dessus d'une surface courbée présentant une discontinuité d'impédance. Cette approche est basée sur la solution de la série des résidus écrite dans une atmosphère stratifiée verticalement. Les résultats numériques sont validés expérimentalement sur des surfaces convexes de rayon de courbure $R_c = 5\text{m}$.

4.4.1 La source est au niveau du sol : réfraction vers le haut

Les atténuations relatives par rapport au champ libre sont représentées en fonction de la fréquence pour deux hauteurs de récepteurs. La source acoustique est disposée sur le sol et les récepteur à deux hauteurs distinctes : 0,005 m au dessus du sol pour le graphe (a) (en haut de la Figure 4-4) et 0,3m pour le graphe (b) (cf. en bas de la Figure 4-4). La distance curviligne source-récepteur est égale à 3,5m. Le sol présente une discontinuité d'impédance située à 1,5m de la source. La source est placée au

dessus de la surface rigide et les récepteurs au-dessus de la surface absorbante dont l'impédance est décrite par un modèle de Delany et Bazley à un paramètre dans lequel la résistivité vaut $200 \text{ kPa}\cdot\text{m}^2$.

Les résultats publiés dans l'article [BERENGIER and DAIGLE, 1988] sont comparés à des résultats obtenus avec Micado en courbant le sol (cf. Figure 4-4).

A gauche sont présentés les résultats issus de Bérenghier et Daigle. A droite sont présentés les résultats obtenus en utilisant l'approche BEM-courbé.

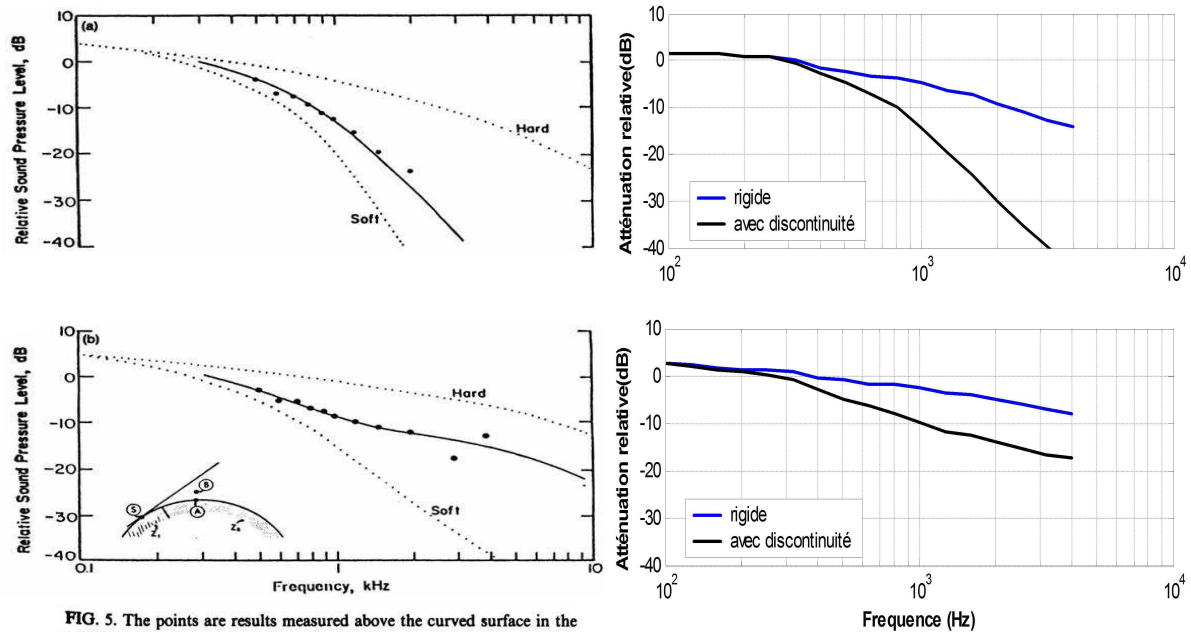


FIG. 5. The points are results measured above the curved surface in the presence of the impedance discontinuity. The source is on the ground, $w_1 = 1.5 \text{ m}$, and $w = 3.5 \text{ m}$: (a) $h = 0.005 \text{ m}$; (b) $h = 0.3 \text{ m}$.

Figure 4-4 : Comparaison des résultats obtenus par Bérenghier-Daigle avec ceux de l'approche BEM-courbé. S(0m ; 0m) ; R1(graphes a) (3,5m ; 0,005m) ; R2 (graphes b) (3,5m ; 0,3m), discontinuité d'impédance à l'abscisse curviligne $w=1,5\text{m}$

Sur la Figure 4-4, les courbes en pointillés présentées dans [BERENGIER and DAIGLE, 1988] sont calculés en faisant l'hypothèse d'un sol uniformément rigide ou absorbant sans discontinuité d'impédance. La courbe en trait plein représente les calculs effectués dans le cas d'un sol présentant une discontinuité d'impédance. On constate un bon accord entre les points de mesure et cette courbe en trait plein pour les deux hauteurs de récepteurs. Les niveaux sonores obtenus pour la propagation au-dessus d'un sol présentant une discontinuité d'impédance se situent entre les niveaux sonores calculés pour le cas d'un sol uniformément rigide ou absorbant, comme pressentis par l'intuition.

Les résultats obtenus avec l'approche BEM-courbé pour le cas rigide (graphes (a) et (b)) sont similaires à ceux obtenus numériquement dans [BERENGIER and DAIGLE, 1988]. De même les résultats obtenus pour la propagation au-dessus d'un sol présentant une discontinuité d'impédance avec l'approche BEM-courbé sont comparés avec succès avec les résultats de Bérenghier et Daigle, quelle que soit la hauteur du récepteur.

4.4.2 La source est au dessus du sol : réfraction vers le haut

Ce second cas a été choisi pour que le rayon tracé de la source au récepteur soit tangent à la surface convexe. La source est située à 0,4m au-dessus du sol rigide et à 1,33m de la discontinuité d'impédance (décrite par le modèle de Delany et Bazley avec pour résistivité $200 \text{ kPa}\cdot\text{m}^2$). Le récepteur pour lequel le rayon issu de la source est tangent à la surface convexe a pour distance curviligne à la source 3,63m et pour hauteur 0,32m (graphes (b) au milieu de la Figure 4-5). Deux récepteurs ont été

ajoutés à la même distance curviligne de la source à deux hauteurs : 0,2 m au dessus du sol dans le cas présenté sur le graphe (a) (en haut de la Figure 4-5), 0,55m sur le graphe (c) (en bas de Figure 4-5).

Sur la Figure 4-5, les courbes en pointillés présentées dans [BERENGIER and DAIGLE, 1988] sont calculés en faisant l'hypothèse d'un sol uniformément rigide ou absorbant sans discontinuité d'impédance. La courbe en trait plein représente les calculs effectués dans le cas d'un sol présentant une discontinuité d'impédance. On constate un bon accord entre les points de mesure et cette courbe en trait plein quelle que soit la hauteur de récepteurs. Les niveaux sonores obtenus pour la propagation au-dessus d'un sol présentant une discontinuité d'impédance ne se situent pas forcément entre les niveaux sonores calculés pour le cas d'un sol uniformément rigide ou absorbant et en particulier pour des fréquences supérieures à 2000Hz.

Les résultats obtenus par Bérenghier et Daigle sont comparés à des simulations numériques effectuées avec l'approche BEM-courbé. Quelle que soit la hauteur des récepteurs, on remarque un bon accord entre les simulations numériques obtenues avec l'approche BEM-courbé et celles de la série des résidus quelle que soit l'impédance du sol.

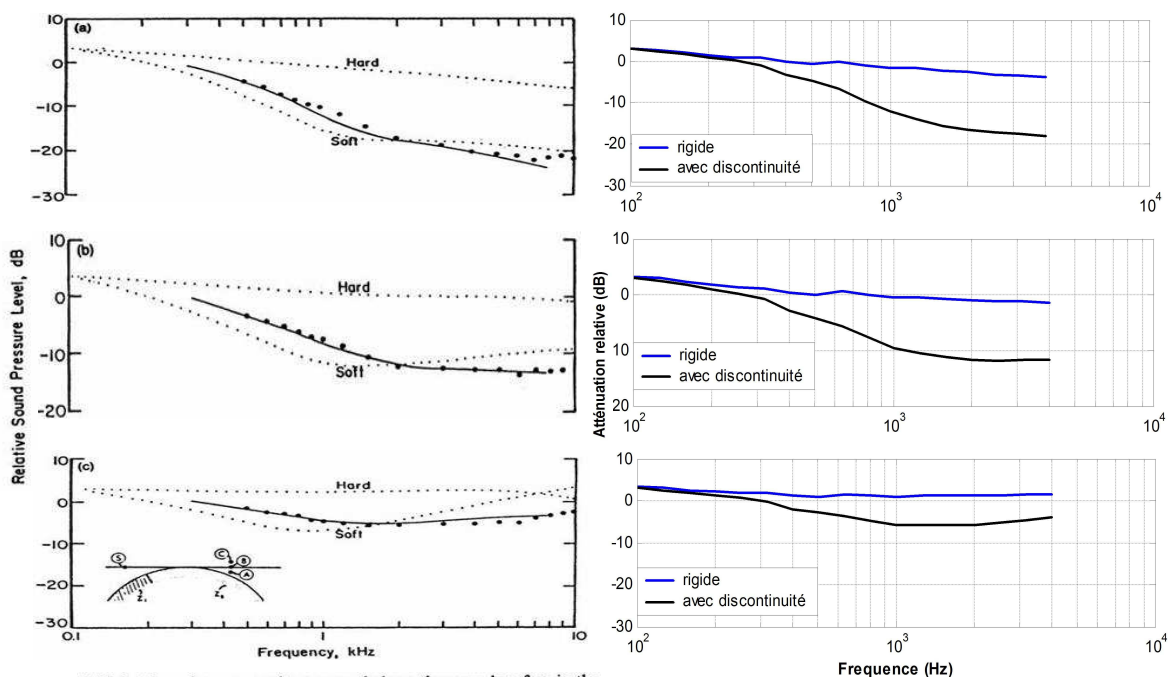


FIG. 6. The points are results measured above the curved surface in the presence of the impedance discontinuity. The source height is $h_s = 0.4$ m, $w_1 = 1.33$ m, and $w = 3.63$ m: (a) $h = 0.2$ m; (b) $h = 0.32$ m; (c) $h = 0.55$ m.

Figure 4-5 : Comparaison des résultats obtenus par Bérenghier-Daigle avec ceux de l'approche BEM-courbé. S(0m; 0,4m) ; R1 (graphe a) (3,63m ; 0,2m) ; R2 (graphe b) (3,5m ; 0,32m), R3 (graphe c) (3,63m ; 0,55m) discontinuité d'impédance à l'abscisse curviligne $w=1,33$ m

La comparaison concluante avec des résultats issus de la littérature nous permet d'avoir confiance en les résultats obtenus avec l'approche BEM-courbé. Nous présentons dans les sections suivantes des résultats expérimentaux réalisées au centre des maquettes de Grenoble.

4.5 Validations sur des configurations de plate-forme routière

Nous avons choisi d'étudier moins de configurations sur la surface convexe que sur la surface concave. L'étude de la propagation du son au-dessus d'une surface convexe correspond aux conditions défavorables. Par conséquent, dans ces situations les niveaux sonores enregistrés par les récepteurs sont en général inférieurs à ceux observés en conditions homogènes pour une source sonore identique. Donc cette situation est en général moins gênante que la situation en conditions favorables qui conduit à des situations dans lesquelles les niveaux enregistrés sont supérieurs à ceux obtenus en conditions homogènes.

4.5.1 Ecran droit rigide sur sol rigide : réfraction vers le haut

La configuration choisie est celle donnée à la Figure 4-6. La source ponctuelle est située à 0,5 m au-dessus du sol et les récepteurs sont disposés à 1,5 m et 4 m (cf. Tableau 1-5 du chapitre 1). Le sol est rigide, un écran de 3 mètres de haut, rigide, est disposé à 7 m de la source. En raison de l'importance des effets de réfraction due à la grande courbure de la surface, les distances source-récepteur sont assez courtes, 23 et 35 m. Les atténuations relatives sont calculés pour 4 points récepteurs : R1, R2, R3 et R4. En prenant comme origine des abscisses, la position de la source, la source a pour coordonnées S (0 ; 0,5 m) et les récepteurs R1 (23 m ; 1,5 m) R2 (23 m ; 4 m) ; R3 (35 m ; 1,5 m) R4 (35 m ; 4 m) .

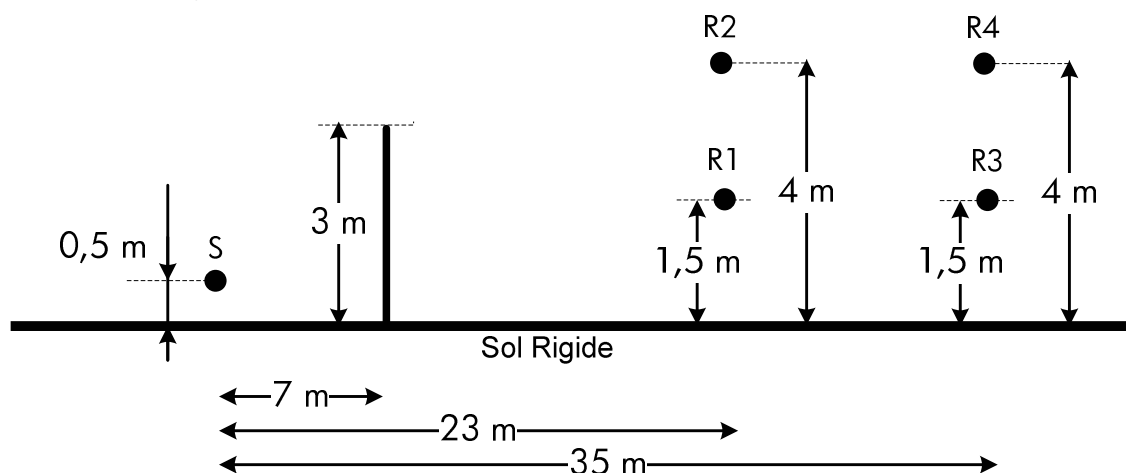


Figure 4-6 : Configuration avec profil linéaire réfractant vers le haut : S (0 ; 0,5 m) ; R1 (23 m ; 1,5 m) R2 (23 m ; 4 m) ; R3 (35 m ; 1,5 m) R4 (35 m ; 4 m) ; écran rigide de 3 mètres de haut.

Le profil de célérité du son étudié est $c(z) = c_0(1 - 0,01z)$ à l'échelle 1. En utilisant l'analogie entre la propagation du son dans une atmosphère soumise à un gradient de célérité constant et la diffraction du son par une surface courbe cylindrique, la configuration géométrique correspondant à la Figure 4-6 est décrite Figure 4-7. L'écran perpendiculaire au sol est transformé en un écran perpendiculaire au sol, qui lui devient courbe.

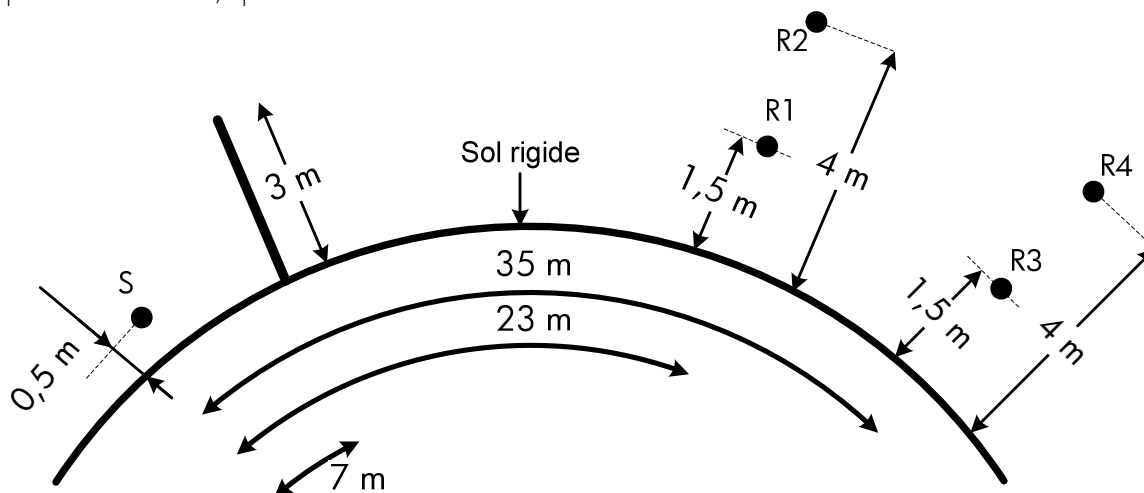


Figure 4-7 : Configuration géométrique correspondant à la configuration de la Figure 4-6 en présence d'un profil linéaire réfractant vers le haut : S (0 ; 0,5 m) ; R1 (23 m ; 1,5 m) R2 (23 m ; 4 m) ; R3 (35 m ; 1,5 m) R4 (35 m ; 4 m) ; écran rigide de 3 mètres de haut.

Un tir de rayons a été réalisé sur la configuration en milieu homogène et en présence d'effets de réfraction à l'aide du logiciel ICARE. Les résultats sont présentés dans l'Annexe F. En présence d'effets de réfraction, des rayons issus de la source et diffractés par l'arête de l'écran atteignent toujours les récepteurs R1 et R2.

4.5.1.1 Validations expérimentales

La configuration de la Figure 4-7 est étudiée expérimentalement sur la surface convexe de rayon de courbure 5 m. Sur les figures présentant les atténuations relatives en fonction de la fréquence (Figure 4-8 et Figure 4-9), les résultats expérimentaux sont tracés en vert. En noir, on donne les résultats obtenus pour la configuration plane, sans effet de réfraction, on parle alors de conditions homogènes. En rouge sont tracés les résultats numériques obtenus en étudiant dans MICADO la configuration sur surface cylindrique présentée à la Figure 4-7.

Les mesures expérimentales sont effectuées à l'échelle 1:20 pour le domaine fréquentiel [1000 Hz ; 20000Hz] ce qui correspond pour l'échelle réelle à un domaine fréquentiel de [50 Hz ; 1000Hz]. Donc la courbe des données expérimentales s'arrête à 1000 Hz. Suite à nos hypothèses de travail (cf. Tableau 1-5 du chapitre 1) les données numériques sont tracées jusqu'à 2500 Hz quand cela est possible. En effet, les calculs numériques avec la BEM demande des ressources informatiques importantes.

On a choisi de présenter dans cette section les résultats obtenus pour les récepteurs R2 et R4 et dans la section suivante les résultats obtenus pour R1 et R3. Les récepteurs R2 et R4 sont situés à la même hauteur mais à des distances par rapport à la source différentes : 23 m pour R2 et 35m pour R4. Les figures obtenues pour R1 et R3 sont présentées dans l'Annexe C.

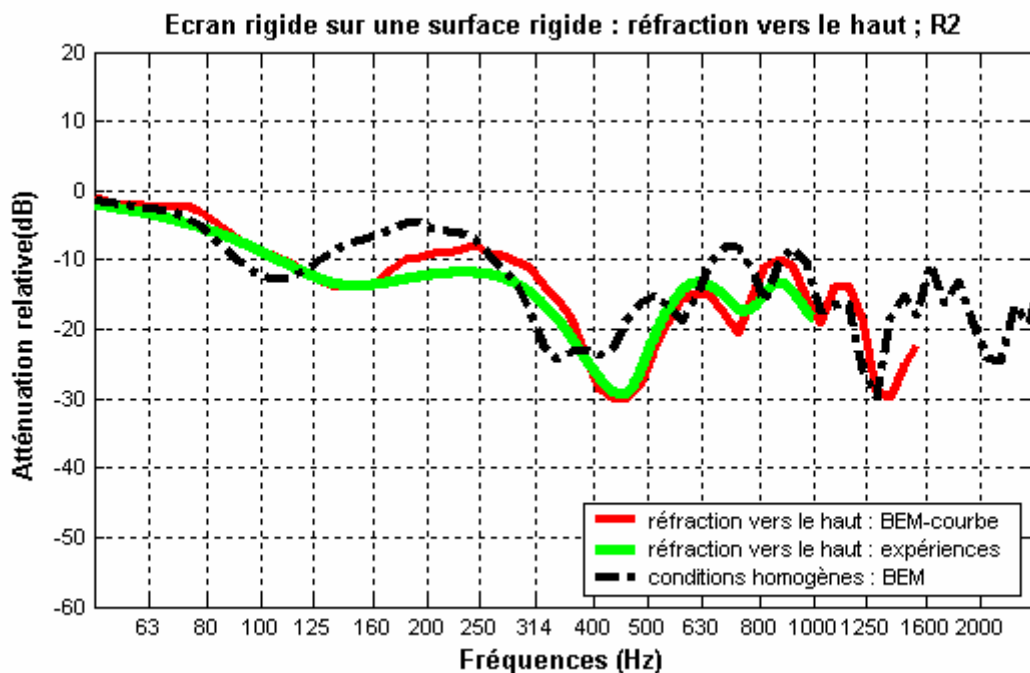


Figure 4-8 : Comparaisons entre BEM et les mesures sur modèle réduits : Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-6. S (0 ; 0,5 m) ; R2 (23 m ; 4 m) ; écran rigide de 3 mètres de haut.

Les atténuations relatives obtenues pour le récepteur R2 sont présentées à la Figure 4-8. La comparaison entre les courbes obtenues en présence d'effets de réfraction et en milieu homogène montre l'importance de la prise en compte des effets de réfraction. En effet, les courbes pour lesquelles la réfraction vers le haut est prise en compte sont décalées, par rapport à la situation homogène, de 50Hz vers les hautes fréquences pour les basses fréquences [50 à 300 Hz], et 100 Hz pour les intervalles de fréquences [500, 1000 Hz]. La courbe présentant les données expérimentales et celle présentant les

données numériques de BEM courbé suivent les mêmes tendances. Pour certaines fréquences, les courbes expérimentale et numérique présentent un décalage de l'ordre de 4 dB (entre 160 et 314 Hz) mais en général la différence entre leurs atténuations respectives est de l'ordre de 1 dB.

Cette différence de 4 dB dans le domaine fréquentiel [160, 314 Hz] est peut être due aux mesures : étalonnage des microphones, traitement du signal... Elle peut provenir de la méthode numérique, nombre de points de Gauss inadapté... Il est aussi possible que des erreurs expérimentales et numériques s'additionnent et entraînent cette différence. Plusieurs filtrages temporels ont été appliqués lors du traitement du signal des données expérimentales mais aucune amélioration sensible n'a été notée. Concernant le calcul numérique, le nombre de points de Gauss a été augmenté mais les résultats n'ont pas été améliorés.

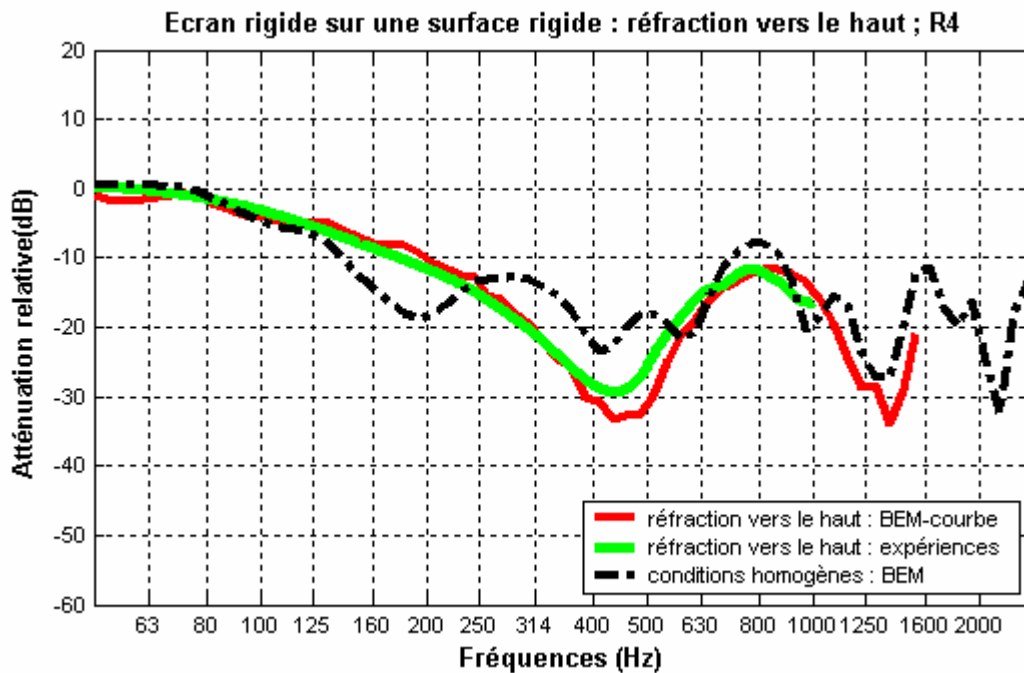


Figure 4-9 : Comparaisons entre BEM et les mesures sur modèle réduits : Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-6. S (0 ; 0,5 m) ; R4 (35 ; 4 m) ; écran de 3 mètres de haut.

Sur la Figure 4-9, les atténuations relatives sont présentées pour le récepteur R4. La comparaison entre les courbes numériques avec et sans réfraction (courbes rouge et noire) nous permet de visualiser l'importance des effets de réfraction. La courbe présentant les résultats expérimentaux (en vert) et celle présentant les résultats numériques en présence de réfraction (en rouge) sont assez proches sur le domaine fréquentiel [50, 1000Hz] avec des différences de l'ordre de 3 dB vers 450 Hz.

Les figures obtenues pour les récepteurs R1 et R3 sont dans l'Annexe C. Le décalage de 3 dB observé vers 500 Hz pour R4 est visible pour R1 et R3.

4.5.1.2 Validations numériques

Les simulations numériques effectuées en courbant le sol dans le code d'éléments finis de frontière BEM sont comparées à des simulations réalisées avec la méthode GFPE. On a choisi de présenter les atténuations relatives par rapport au champ libre pour deux récepteurs (R1 et R3) situés tous les deux à 1,50 m au-dessus du sol mais à des distances source-récepteur différentes (28 m pour R1, et 33 m pour R2). Conformément à nos hypothèses de travail, les courbes sont tracées sur le domaine fréquentiel [50 Hz, 2500Hz]. Les courbes obtenues pour R2 et R4 sont dans l'Annexe C.

Les atténuations relatives calculées pour le récepteur R1 sont présentées à la Figure 4-10. Les courbes prenant en compte la réfraction vers le haut (rouges et bleues) sont décalées de 150 Hz vers les hautes fréquences par rapport à la courbe obtenue en milieu homogène et les interférences sont plus marquées : les atténuations relatives sont inférieures d'environ 10 dB. La courbe présentant les résultats

obtenus avec BEM-courbé (rouge) suit les variations de la courbe obtenue avec le code basé sur l'équation parabolique (ATMOS). Pour l'intervalle [50, 400Hz], les allures sont les mêmes avec des variations de l'ordre de 1 ou 2 dB, entre 475Hz et 1250 Hz les courbes sont superposées.

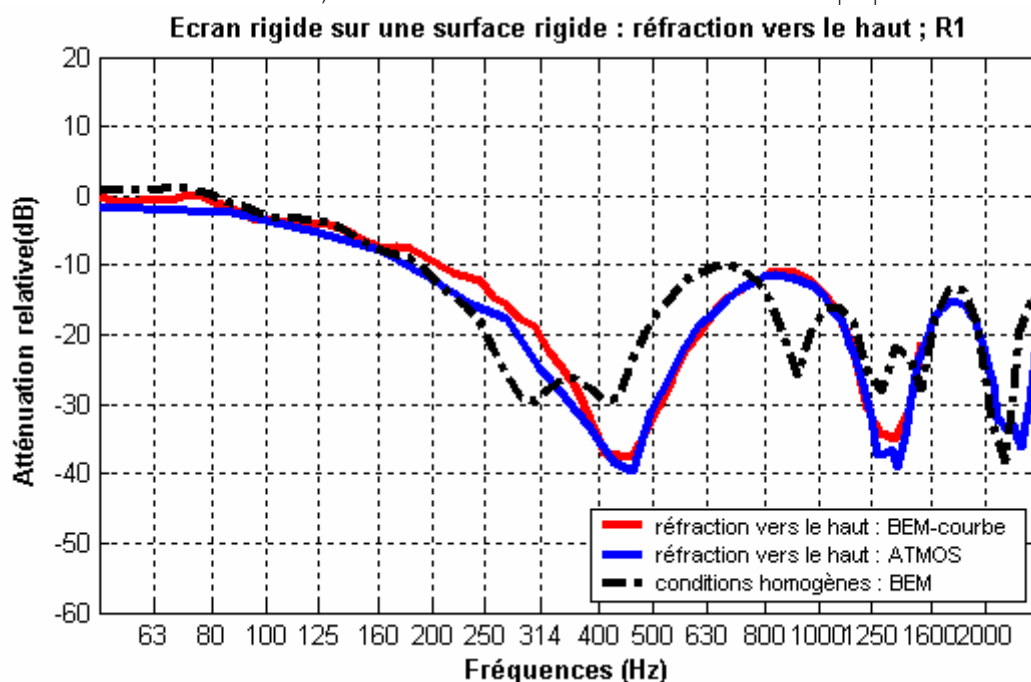


Figure 4-10 : Comparaisons entre BEM et ATMOS : Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-6. S (0 ; 0,5 m) ; R1 (23 ; 1,5 m) ; écran rigide de 3 mètres de haut.

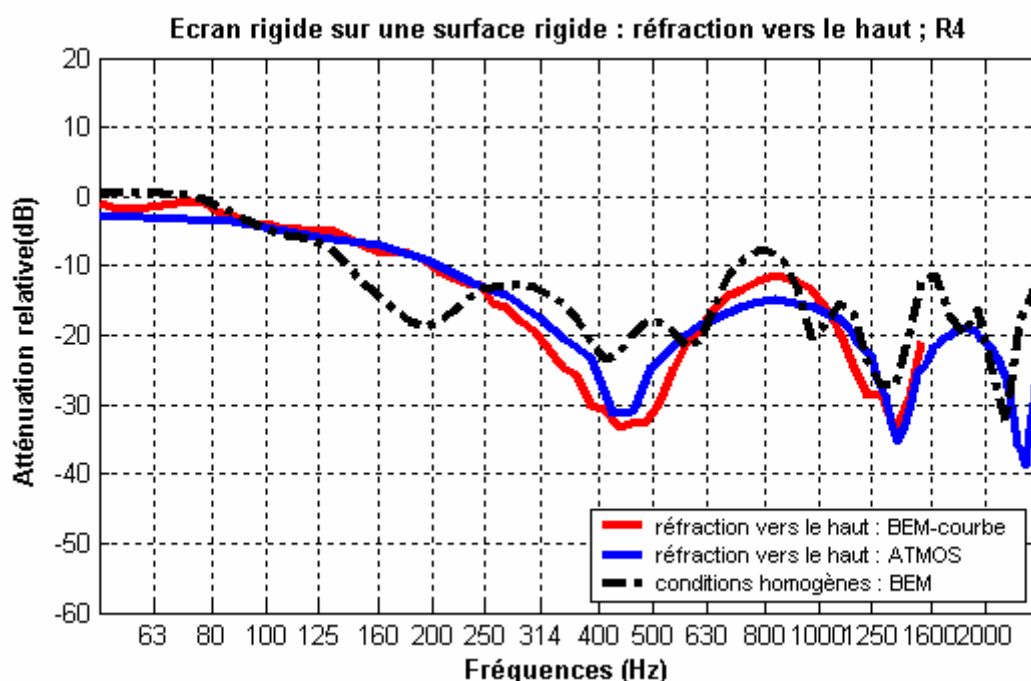


Figure 4-11 : Comparaisons entre BEM et ATMOS : Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-6. S (0 ; 0,5 m) ; R3 (35 ; 4 m) ; écran rigide de 3 mètres de haut.

Sur la Figure 4-11 sont présentées les atténuations relatives en fonction de la fréquence pour le récepteur R3. Pour cette seconde distance source-récepteur, les résultats obtenus en courbant le sol avec un code d'éléments finis de frontière suivent les mêmes variations que les résultats numériques obtenus

avec ATMOS avec des écarts allant jusqu'à 3 dB. Les calculs numériques effectués avec la BEM ont été menés en changeant le nombre de points de Gauss mais les résultats n'ont pas été améliorés.

Cette comparaison entre deux modèles numériques nous permet d'étendre le domaine fréquentiel de validité de BEM avec réfraction. En effet, les expériences nous permettent une comparaison seulement jusqu'à 1000 Hz alors que notre domaine d'étude va jusqu'à 2500Hz. Après la phase expérimentale qui nous a permis d'avoir bonne confiance dans les résultats numériques jusqu'à 1000Hz, la comparaison avec un autre modèle numérique nous permet d'être assez confiant sur les résultats fréquentiels obtenus entre 1000 Hz et 2500Hz.

4.5.2 Ecran droit rigide sur une surface présentant une discontinuité d'impédance : réfraction vers le bas et vers le haut

La configuration géométrique 2D décrite à la Figure 4-12 est une configuration réaliste de transport terrestre. La source ponctuelle est située en (0 m ; 0,5 m) et les récepteurs sont en (82 m ; 1,5m) et (82 m ; 4m). La surface située sous la source est rigide : elle simule une route et la partie située entre l'écran rigide de 3 mètres de haut et les récepteurs est absorbante. L'impédance de la partie absorbante est décrite avec un modèle de Delany Bazley à un paramètre dans lequel la résistivité au passage de l'air est $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^{-2}$.

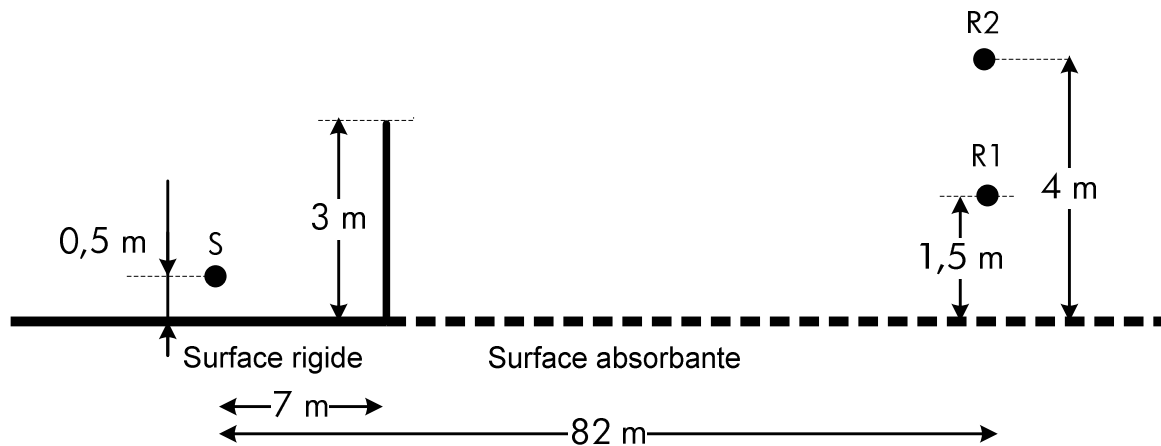


Figure 4-12 : Configuration en milieu homogène : S (0 ; 0.5 m) ; R1 (82 m ; 1,5 m) R2 (82 m ; 4 m); écran rigide de 3 mètres de haut, absorbant : $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^{-2}$.

Deux profils linéaires de vitesses du son ont été choisis, l'un dans le cas de la réfraction vers le bas et l'autre pour la réfraction vers le haut. Les tirs de rayon réalisés pour ces configurations sont présentés dans l'Annexe F. Dans le cas de la réfraction vers le haut, le logiciel ICARE ne trouve aucun rayon entre la source et les récepteurs R1 et R2. En effet, R1 et R2 sont dans une zone d'ombre. Il est vraisemblable qu'un phénomène d'onde rampante (non pris en compte dans ICARE) ait lieu car dans la section 4.5.2.2, des atténuations relatives faibles ont pu être numériquement calculées.

4.5.2.1 Cas de la réfraction vers le bas

A l'échelle 1, le profil linéaire de vitesse du son est $c(z) = c_0(1 + 0.0049z)$ Par une transformée conforme logarithmique, on transforme la configuration de la Figure 4-12 dans le cas d'une atmosphère soumise à un gradient de célérité du son positif. La configuration équivalente est donnée à la Figure 4-13. L'écran qui est perpendiculaire au sol est transformé en un écran perpendiculaire au sol concave.

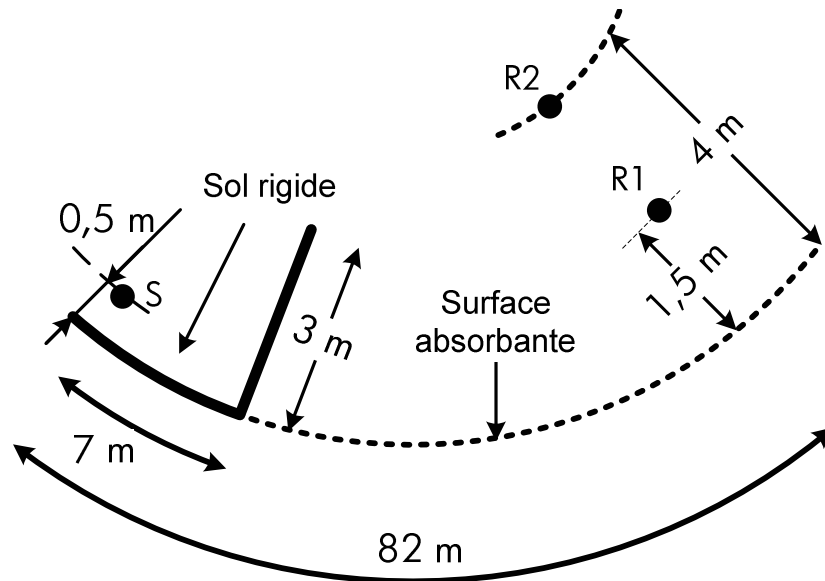


Figure 4-13 : Configuration avec profil réfractant vers le bas : S (0 ; 0.5 m) ; R1 (82 m ; 1.5 m) R2 (82 m ; 4 m); écran rigide de 3 mètres de haut, absorbant : $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^2$.

4.5.2.1.1 Validations expérimentales

La configuration détaillée à la Figure 4-12 est étudiée expérimentalement sur la surface concave de rayon de courbure 10.2m. Sur la Figure 4-14, on présente les atténuations relatives par rapport au champ libre obtenues expérimentalement (en vert), numériquement par un code de calcul BEM en atmosphère homogène (en noir) et numériquement en présence d'un gradient linéaire positif (en rouge).

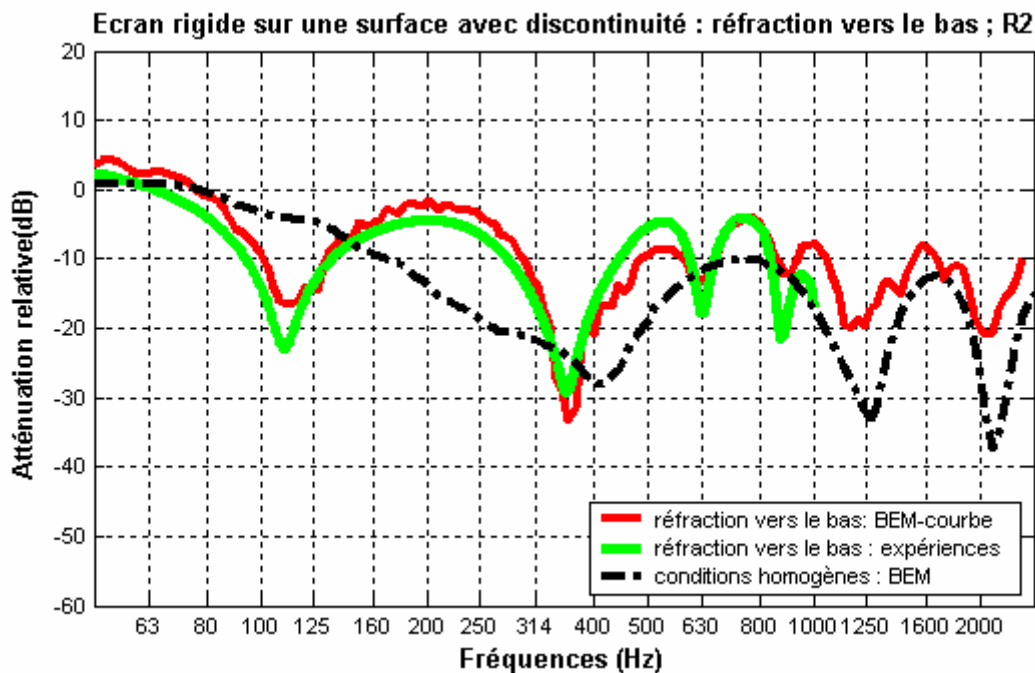


Figure 4-14 : Comparaisons entre BEM et les mesures sur modèle réduits : Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-12. S (0 ; 0.5 m) ; R2 (82 m ; 4 m) ; écran rigide de 3 mètres de haut, absorbant $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^2$.

La Figure 4-14 montre l'importance des effets de réfraction car la courbe en conditions homogènes est différente des courbes expérimentales et numériques en présence de réfraction.

Sur le domaine fréquentiel [50 Hz;1000 Hz], les mesures sont en bon accord avec les simulations numériques introduisant un gradient positif de célérité du son. Il est à noter que des instabilités sont visibles pour la courbe numérique. En augmentant le nombre de points de Gauss (jusqu'à 40) et le nombre d'éléments pas longueur d'onde (jusqu'à 15), ces instabilités n'ont pas pu être diminuées de manière significative.

Les résultats obtenus pour le récepteur R1 sont disponibles dans l'Annexe C.

4.5.2.1.2 Validations numériques

On compare les résultats numériques obtenus avec le code basé sur la méthode d'équation parabolique GFPE. Cette comparaison permet de s'intéresser à l'ensemble du domaine fréquentiel d'étude choisi : [50, 2500 Hz] (cf. Tableau 1-5 du chapitre 1).

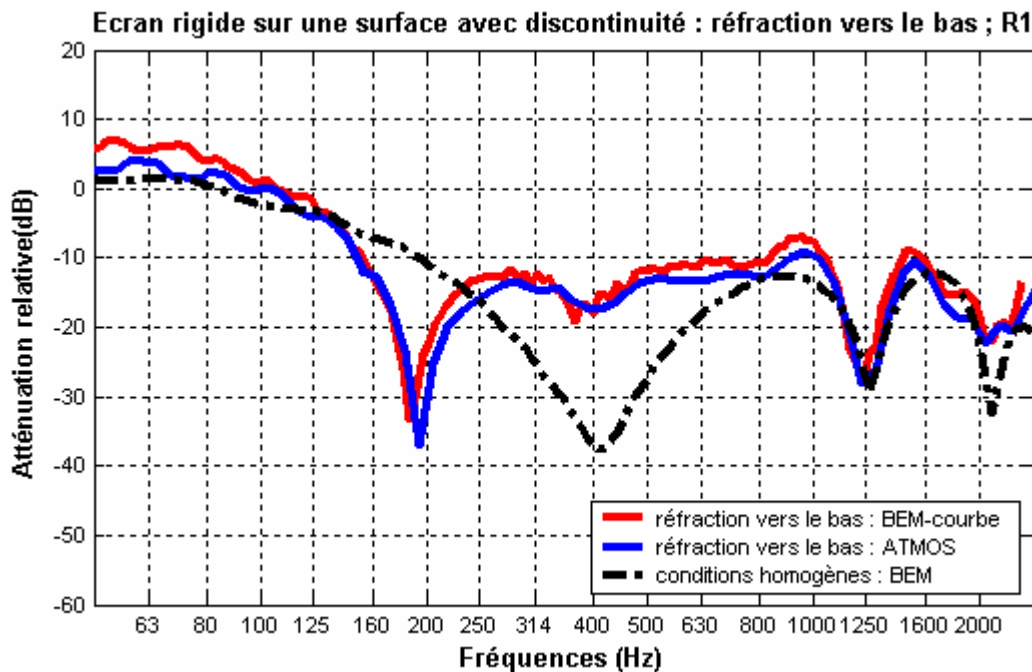


Figure 4-15 : Comparaisons entre BEM et ATMOS : Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-13.S (0 ; 0.5 m) ; R1 (82 m ; 1.5 m) ; écran rigide de 3 mètres de haut, absorbant $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^2$.

Il est important de noter que les simulations avec effets météorologiques (courbes rouge et bleue) diffèrent des simulations en milieu homogène (courbe noire). L'introduction d'effets réfractant vers le bas déplace les interférences vers les basses fréquences : ainsi l'interférence située à 400 Hz en milieu homogène se retrouve en 200 Hz lors de la propagation réfractant vers le haut.

La courbe des résultats numériques obtenus avec la méthode BEM-courbé a la même allure que celle des résultats numériques obtenus avec la GFPE. On observe sur l'ensemble du domaine fréquentiel une différence entre ces deux courbes de l'ordre de 2 dB. De plus on remarque que les pics d'interférence de la courbe BEM sont en léger décalage avec ceux obtenus par la GFPE.

4.5.2.2 Cas de la réfraction vers le haut

Dans cette section on étudie le profil de vitesse du son $c(z) = c_0(1 - 0.0049z)$. Ce profil linéaire a été choisi car la valeur absolue du gradient de célérité du son est le même que celui étudié dans le paragraphe précédent mais son signe est négatif. Cette situation n'a pas pu être étudiée expérimentalement car nous ne disposons pas de surface convexe dont le rayon de courbure est 10,2m. La comparaison des résultats obtenus avec la méthode BEM est effectuée avec un code d'équation parabolique GFPE.

La configuration équivalente à la propagation vers le haut au-dessus d'une surface plane est la propagation en milieu homogène au-dessus d'une surface convexe dont la figure correspondante est donnée à la Figure 4-16.

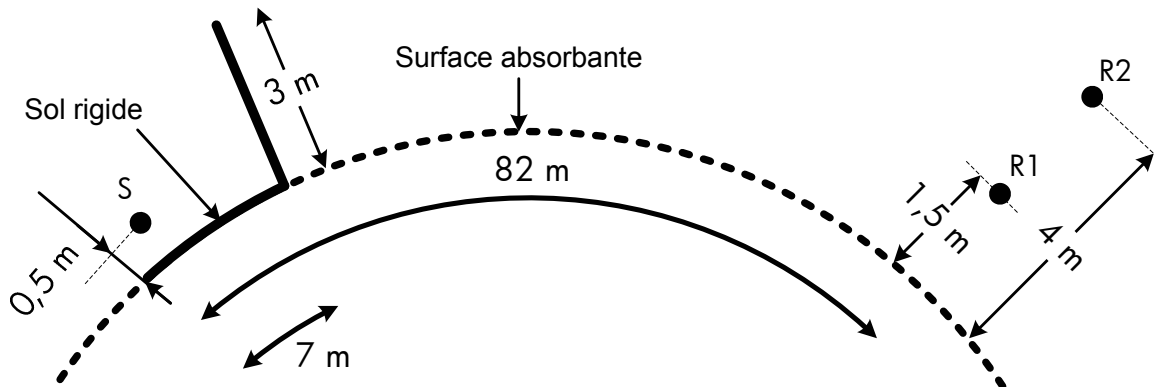


Figure 4-16 : Situation équivalente : propagation au-dessus d'une surface convexe : S (0 ; 0.5 m) ; R1 (82 m ; 1.5 m) R2 (82 m ; 4 m) ; écran rigide de 3 mètres de haut, absorbant : $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^{-2}$.

Sur la Figure 4-17, on présente les résultats obtenus pour la configuration de la Figure 4-12 en présence d'un gradient négatif de vitesse du son par un code BEM (en rouge), par un code d'équation parabolique (en bleu) et enfin les résultats obtenus en milieu homogène (en noir).

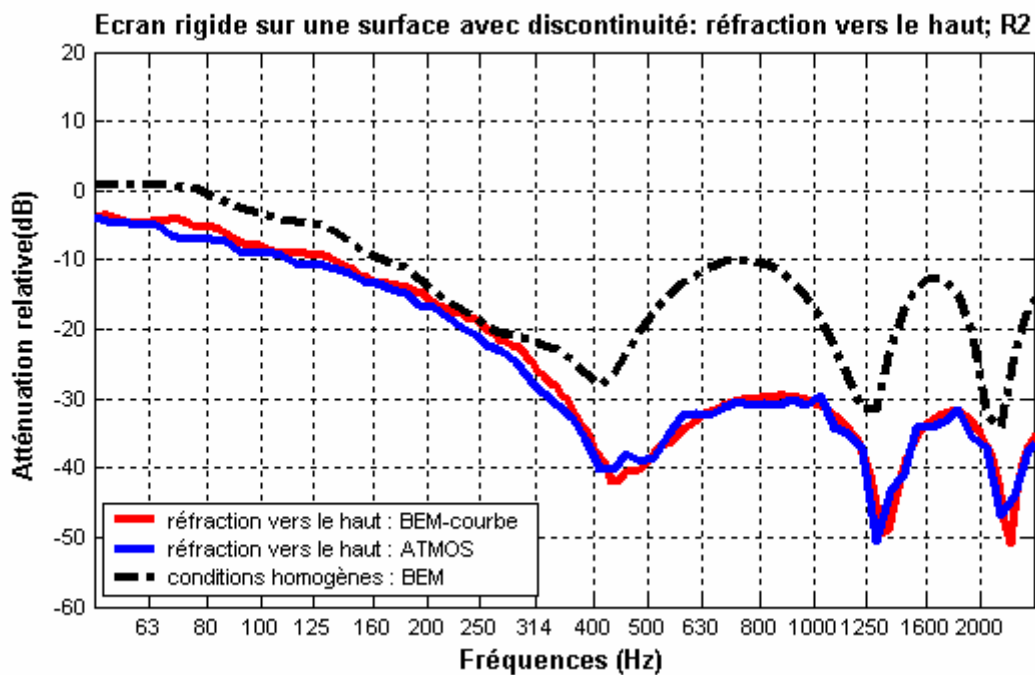


Figure 4-17 : Comparaisons entre BEM et ATMOS : Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-12 ou à la Figure 4-16 . S (0 ; 0.5 m) ; R2 (82 m ; 4 m) ; écran rigide de 3 mètres de haut, absorbant $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^{-2}$.

La comparaison de la Figure 4-17 avec la figure obtenue en cas de réfraction vers le bas (cf. Annexe C), montre l'importance des effets de réfraction. Ainsi pour une fréquence acoustique de 800Hz, les atténuations relatives obtenues en R2 varient de -5dB pour un vent portant de $16,7 \text{ m.s}^{-1}$ à 10m au-dessus du sol, à -30 dB pour un vent contraire de $16,7 \text{ m.s}^{-1}$.

La Figure 4-17 permet de visualiser l'importance des effets de réfraction induits par un gradient de célérité négatif par rapport à des conditions homogènes. Sur l'ensemble de la gamme des fréquences étudiées, les atténuations relatives obtenues en présence d'un gradient de célérité (en rouge et bleu) sont

inférieures à celles obtenues en conditions homogènes (en noir). En basses fréquences (de 50 à 314 Hz), les différences sont de l'ordre de 4 dB. Pour des fréquences supérieures à 400Hz, les différences sont comprises entre 15 et 20 dB. En présence de réfraction, les interférences sont situées sensiblement aux mêmes fréquences (400 Hz, 1250 Hz, 2150 Hz) qu'en l'absence de gradient de célérité du son mais à des niveaux plus bas. De 400 Hz à 2500 Hz, les atténuations relatives obtenues en présence d'un gradient de célérité négatif sont très faibles atteignant pour 1250 Hz le seuil de -50 dB.

Sur la Figure 4-17, les courbes obtenues en utilisant la méthode BEM-courbé et la méthode GFPE sont très proches l'une de l'autre sur l'ensemble du domaine fréquentiel [50 Hz ; 2500Hz].

4.5.3 Route sur un remblai rigide et sol rigide : réfraction vers le bas.

La butte de terre, que ce soit en zone rurale ou en zone périurbaine, constitue la protection souvent privilégiée par le maître d'ouvrage mais aussi par les riverains pour se protéger d'une source de bruit (qui est alors en déblai). Par rapport à l'écran, elle présente des avantages sur les plans acoustique et paysager : absence de réflexions vers des zones bâties, surface relativement absorbante, possibilité de végétaliser les abords. Mais on peut aussi rencontrer des cas où la route est en remblai. Cette situation est plus pénalisante pour les riverains et fait l'objet de cette section.

La configuration étudiée est présentée à la Figure 4-18 : une route en remblai est étudiée dans le cas de la réfraction vers le bas avec un profil de célérité du son qui s'écrit $c(z) = c_0(1 + 0.0049z)$. Un tir de rayons réalisé pour cette configuration à l'aide du logiciel ICARE est présenté à la Figure 4-19.

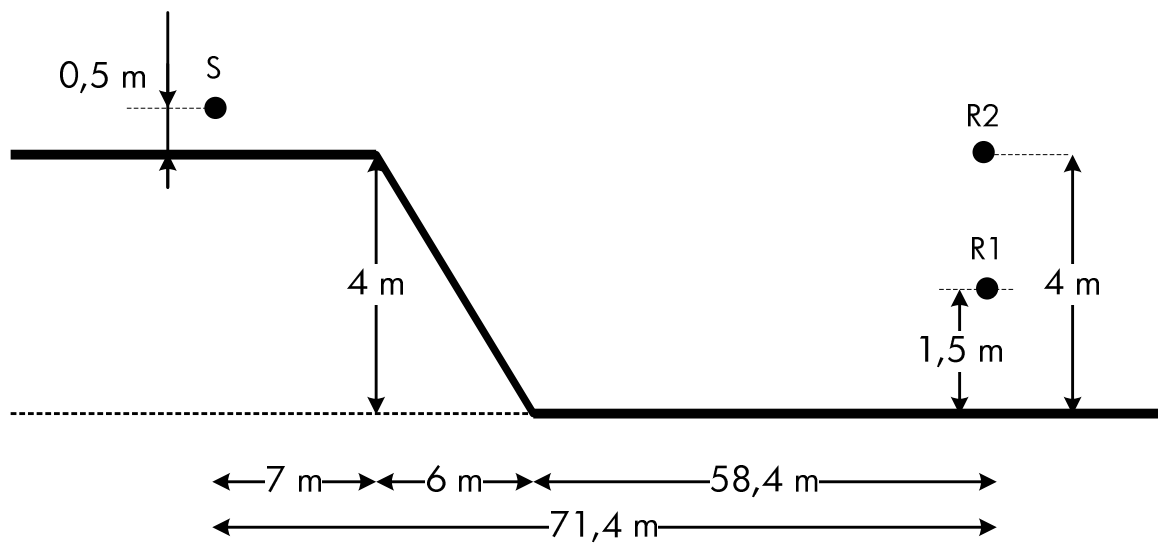


Figure 4-18 : Configuration en milieu homogène : route en remblai rigide S (0 m ; 4m +0.5 m) ; R1 (71,4 m ; 1.5 m) R2 (71,4 m ;4 m).

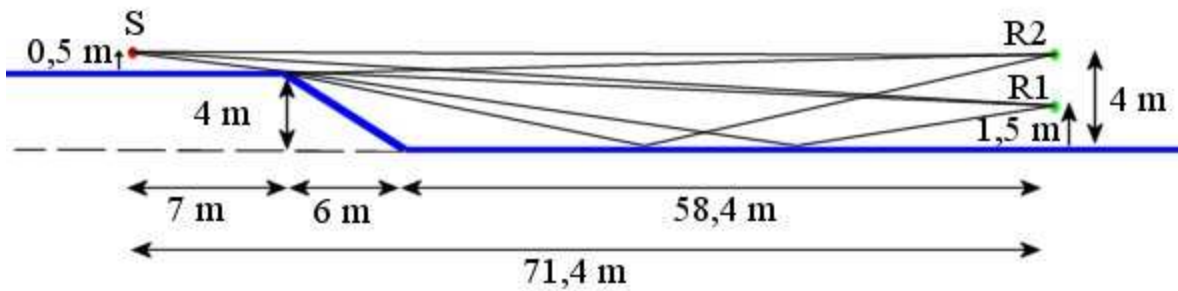


Figure 4-19 : Tir de rayon réalisé avec ICARE pour la configuration géométrique de la Figure 4-18.

Le tir de rayons réalisé avec ICARE montre que trois rayons arrivent sur chacun des récepteurs. Le premier est un rayon direct, le second est diffracté par l'arête du remblai et le dernier est diffracté puis réfléchi sur le sol. Ce tir de rayons montre que les deux récepteurs ne sont pas dans la zone d'ombre géométrique du remblai.

Dans le cas de la réfraction vers le bas, la transformée conforme logarithmique du remblai décrit à la Figure 4-18 est calculée dans Matlab et le résultat est donné à la Figure 4-20. Un tir de rayons réalisé pour cette configuration est présenté dans l'Annexe F.

La partie constituant le remblai (en jaune sur la Figure 4-21) reste une droite après transformée logarithmique. Le remblai garde ses dimensions géométriques (hauteur et largeur) et il est « posé » sur la surface courbe. La partie haute du remblai (sous la source) est transformée en une surface cylindrique de même rayon de courbure que la partie basse.

La configuration géométrique correspondante est décrite à la Figure 4-21.

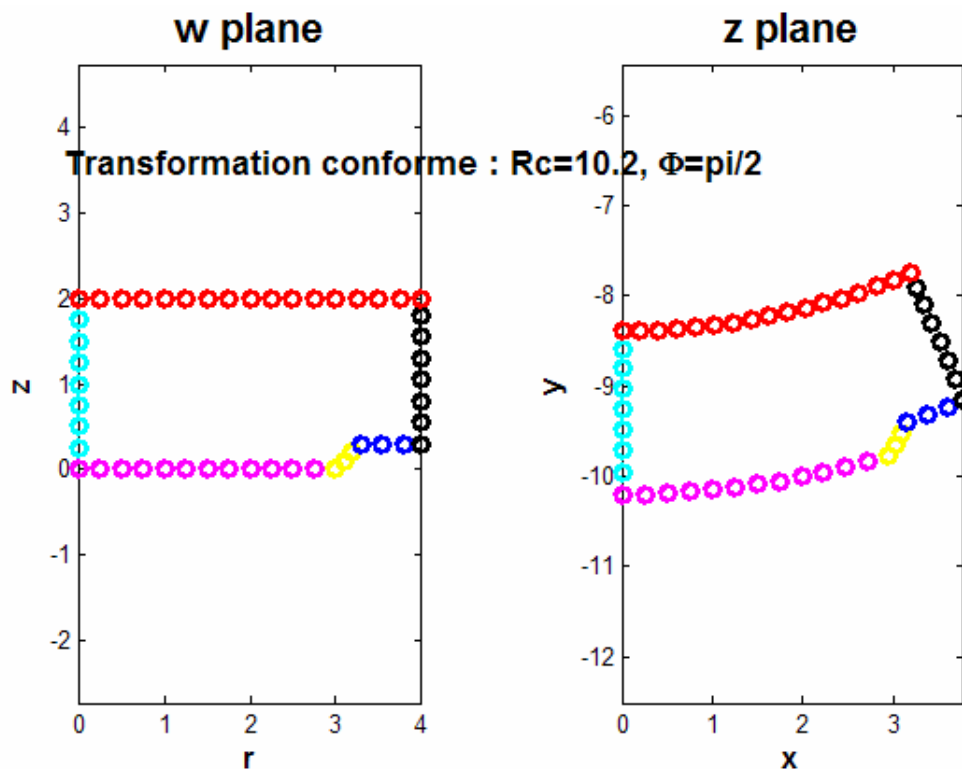


Figure 4-20: Transformée logarithmique du remblais effectuée sous Matlab.

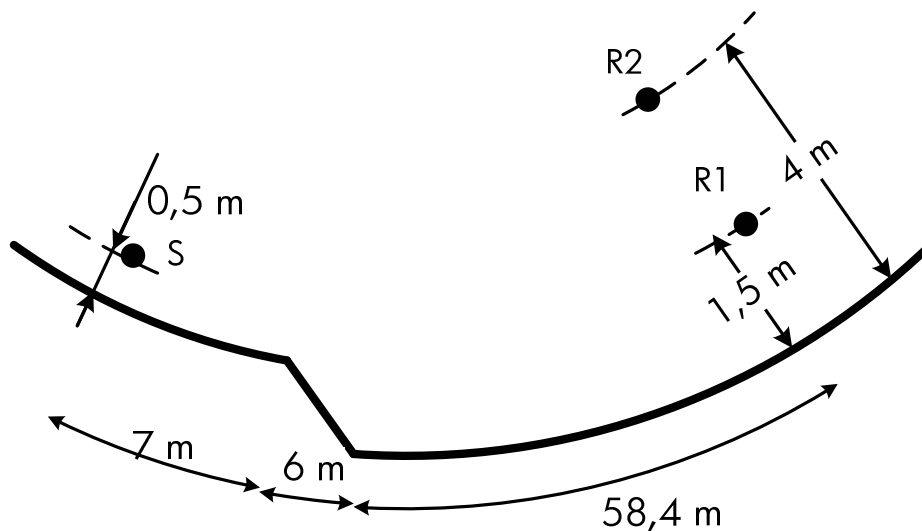


Figure 4-21 : Configuration avec profil linéaire réfractant vers le bas pour le remblai : S (0 m ; 4m +0.5 m) ; R1 (71,4 m ; 1.5 m) R2 (71,4 m ;4 m).

4.5.3.1 Validations expérimentales

Les résultats obtenus avec BEM sont comparés aux mesures effectuées sur modèle réduit et comme on peut le voir sur les Figure 4-22 et Figure 4-23, les résultats expérimentaux sont en très bon accord avec les résultats numériques ce qui nous rend confiant dans la transformation conforme et l'hypothèse de non déformation du remblai. Concernant les effets météorologiques, on retrouve les effets attendus de la réfraction vers le bas, les atténuations relatives sont en général plus élevées que celles obtenues en milieu homogène. Des interférences qui ne sont pas visibles en condition homogène apparaissent en présence d'un gradient de célérité.

La superposition des courbes expérimentales et numériques jusqu'à 1000Hz rend confiant sur la validité des résultats obtenus entre 1000 Hz et 2500 Hz.

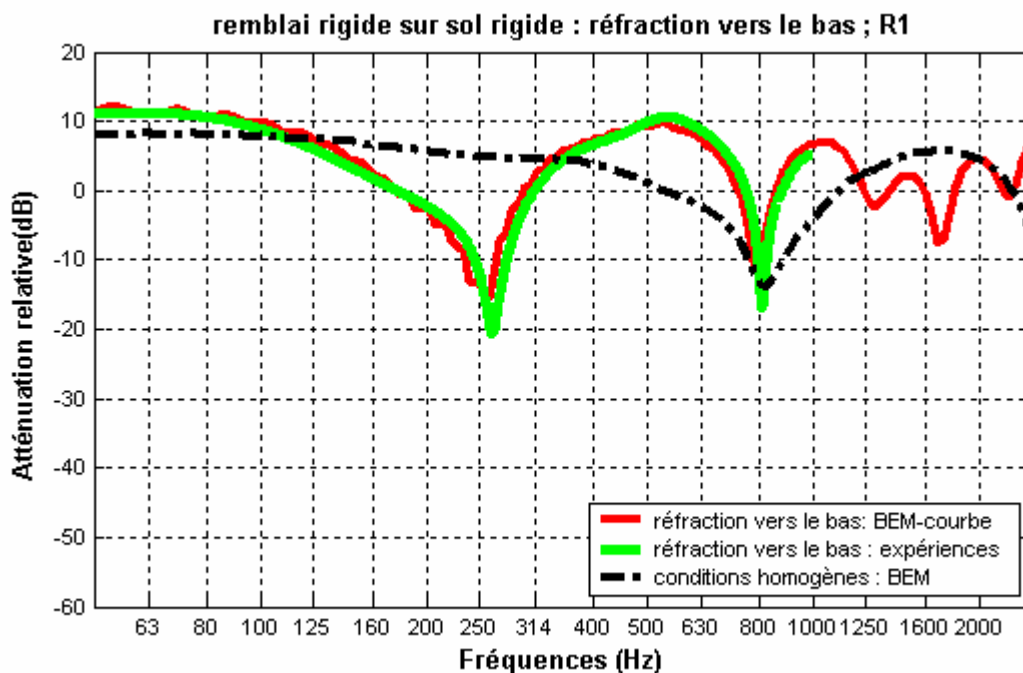


Figure 4-22 : Comparaisons entre BEM et les mesures sur modèle réduits : Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-18. S (71.4 m ; 4m +0.5 m) ; R1 (0 m ; 1.5 m) R2 (0 m ;4 m).

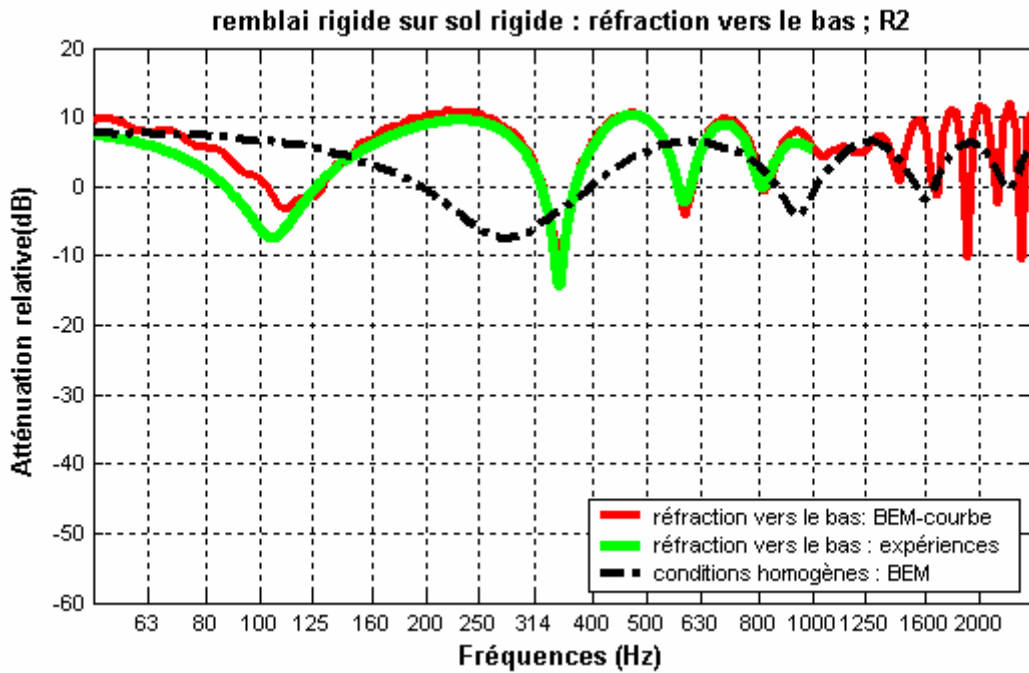


Figure 4-23 : Comparaisons entre BEM et les mesures sur modèle réduits : Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-18. S (71.4 m ; 4m +0.5 m) ; R1 (0 m ; 1.5 m) R2 (0 m ; 4 m).

4.5.3.2 Validations numériques

Les résultats obtenus avec l'approche BEM-courbé sont comparés à des résultats numériques obtenus avec la GFPE. Un changement de référentiel dans la GFPE a été utilisé pour prendre en compte le remblai. Les résultats numériques obtenus montrent un bon accord entre GFPE et BEM-courbé.

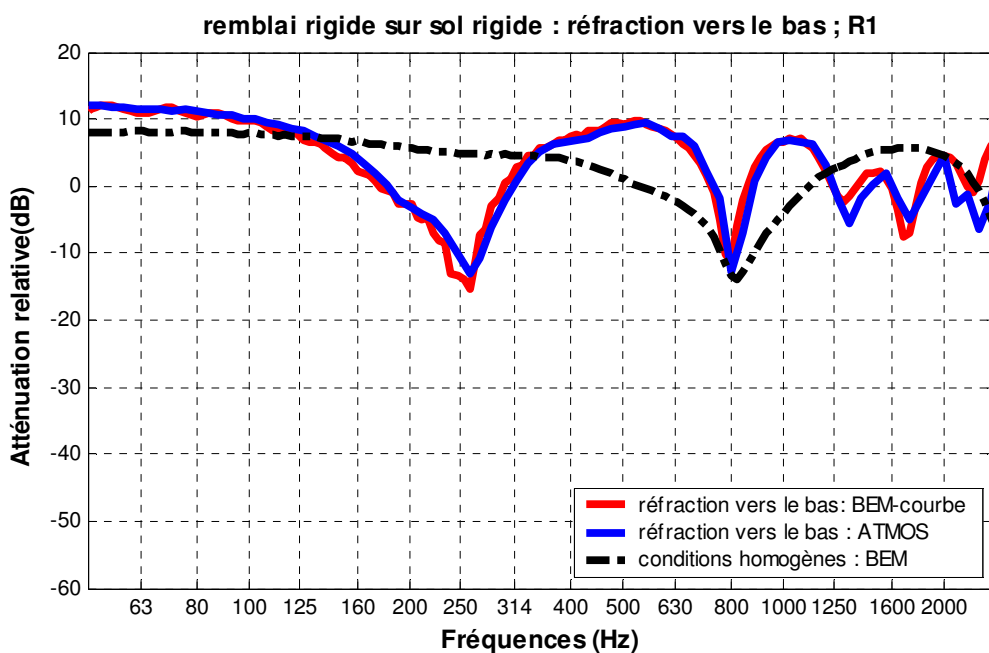


Figure 4-24 Comparaisons entre BEM et ATMOS : Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-18. S (71.4 m ; 4m +0.5 m) ; R1 (0 m ; 1.5 m) R2 (0 m ; 4 m).

4.5.4 Route en remblai rigide avec écran rigide et absorbant sur la partie en déblai : réfraction vers le bas

Dans la section précédente, un tir de rayons réalisé sous ICARE nous a permis de constater que des rayons directs gagnaient les récepteurs. Pour protéger les riverains (R1 et R2) d'une route située en remblai (S), il apparaît nécessaire de disposer un écran acoustique sur le haut du remblai pour s'opposer à la transmission directe des ondes acoustiques.

Dans cette section, la configuration est une situation assez complexe : une route rigide est en remblai et cette route est bordée d'un écran rigide de 3 mètres de haut (Figure 4-25). Les récepteurs sont placés à une distance horizontale de 71,4 m de la source au-dessus d'un matériau absorbant.

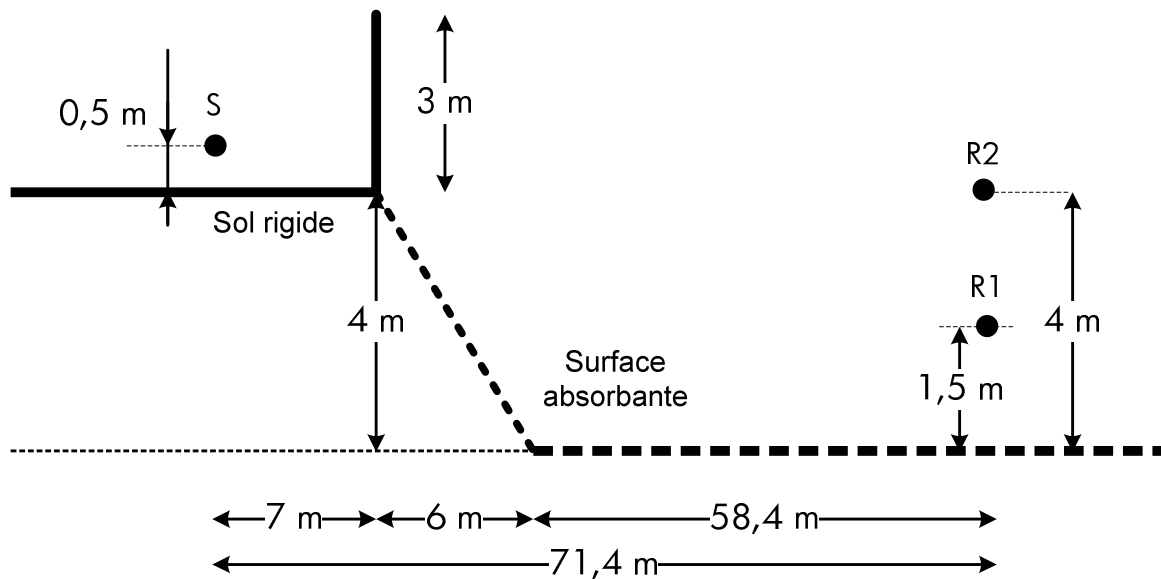


Figure 4-25 : Configuration en milieu homogène : route en remblai rigide et déblai absorbant : S (0 m ; 4m +0.5 m) ; R1 (71,4 m ; 1.5 m) R2 (71,4 m ;4 m), écran rigide de 3 m de haut.

Un tir de rayons sous ICARE est utile pour visualiser les rayons acoustiques (cf. Figure 4-26). L'écran joue ici son rôle d'opposition à toute transmission sonore directe. Les rayons parvenant aux récepteurs sont diffractés, diffractés puis réfléchis sur le remblai ou encore diffractés puis réfléchis sur le remblai et le sol. Un tir de rayon présenté dans l'Annexe F a été effectué sur la configuration analogue en présence d'effets de réfraction.

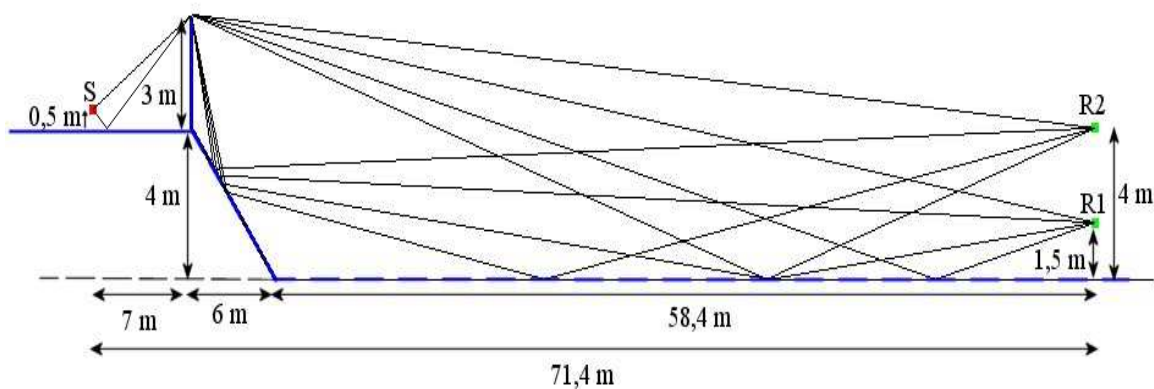


Figure 4-26 : Tir de rayon réalisé avec ICARE pour la configuration géométrique de la Figure 4-25

Cette configuration est étudiée dans le cas de la réfraction vers le bas (profil de célérité du son $c(z) = c_0(1 + 0.0049z)$). La configuration géométrique dans une atmosphère soumise à un gradient de célérité positif est présentée à la Figure 4-27.

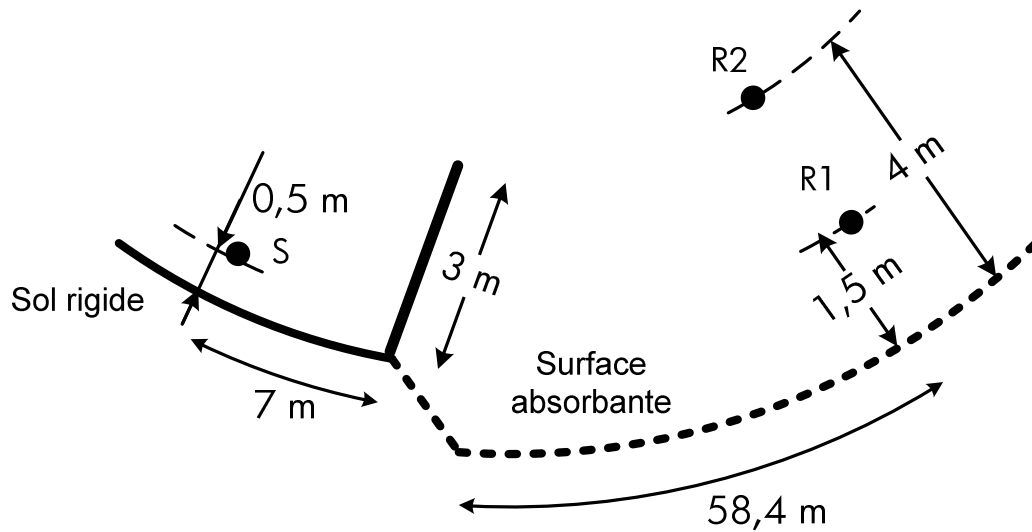


Figure 4-27 : Configuration analogue : propagation au dessus d'une surface concave.

Dans cette configuration complexe, les atténuations relatives en présence d'effets météorologiques présentent de nombreuses interférences (cf. Figure 4-28). Différents paramètres ont été testés (nombre de points de Gauss de l'ordre de 40, nombre d'éléments par longueur d'onde de l'ordre de 15) mais les résultats n'ont pas pu être améliorés.

Sur la Figure 4-28, on peut voir les effets de l'introduction d'un écran sur un remblai rigide. En effet par comparaison avec la Figure 4-22, on remarque qu'en milieu homogène il y a beaucoup plus d'interférences notamment pour des fréquences supérieures à 1000 Hz. De plus les atténuations relatives sont plus faibles en présence d'écran que sans écran. En milieu homogène à 250 Hz, les atténuations relatives diminuent de 20 dB par la présence de l'écran.

Sur les résultats expérimentaux de la configuration avec écran (cf. Figure 4-28), des interférences visibles pour la BEM-courbé ne sont pas visibles dans l'intervalle [50, 250 Hz]. Cela peut s'expliquer par le manque d'échantillons dans cette gamme de fréquences. Ainsi certaines interférences sont lissées.

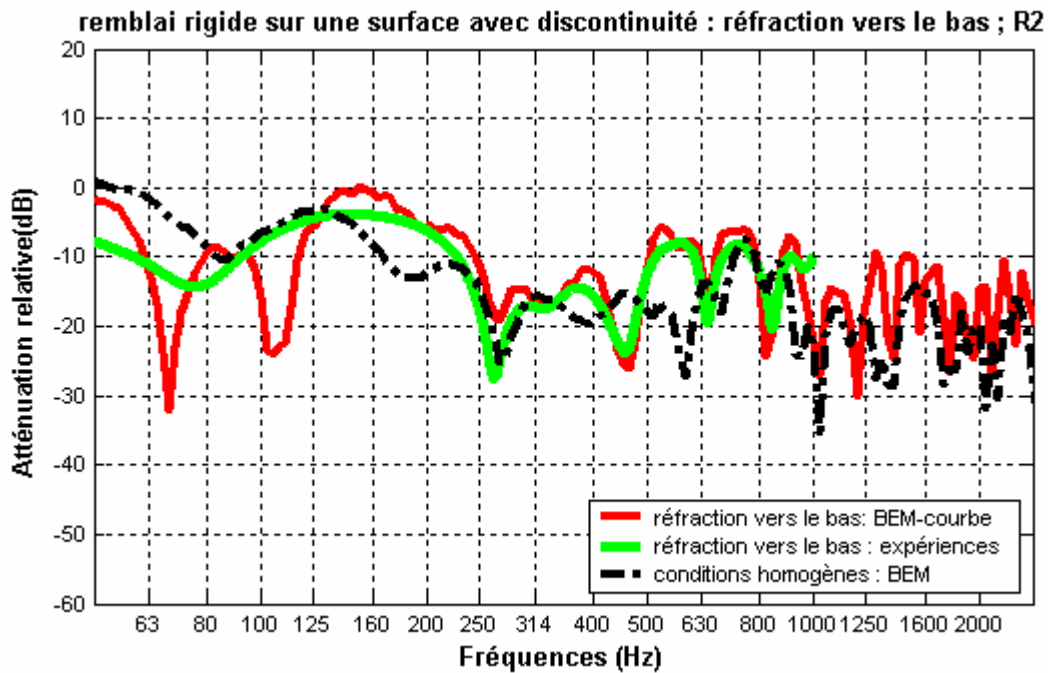


Figure 4-28 : Comparaisons entre BEM et les mesures sur modèle réduits : Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-25. S (71.4 m ; 4m +0.5 m) ; R1 (0 m ; 1.5 m) R2 (0 m ;4 m); écran rigide de 3m.

4.5.5 Ecran en T rigide sur une surface présentant une discontinuité d'impédance

On étudie dans cette section la propagation acoustique en présence d'un écran en T au dessus d'une surface présentant une discontinuité d'impédance (cf. Figure 4-29). La validation de l'approche BEM-courbé est réalisée en utilisant les expériences sur modèles réduits car la prise en compte d'un écran de forme complexe n'est pas possible dans le code GFPE.

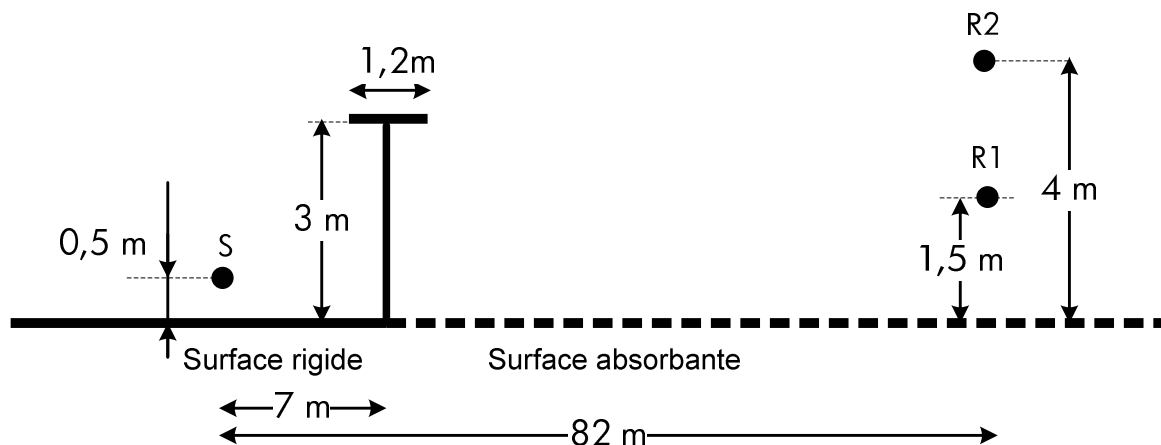


Figure 4-29 : Configuration en milieu homogène : S (0 ; 0.5 m) ; R1 (82 m ; 1.5 m) R2 (82 m ;4 m); écran rigide en T de 3 mètres de haut, absorbant : $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^{-2}$.

Par un calcul de la transformée logarithmique de l'écran, on s'aperçoit que le haut de l'écran reste droit, il n'est pas nécessaire de le courber. En effet, sa longueur étant très inférieure au rayon de

courbure de la surface cylindrique (1,2m contre 204m) l'arc de cercle qui en résulte peut être approché par un segment de droite.

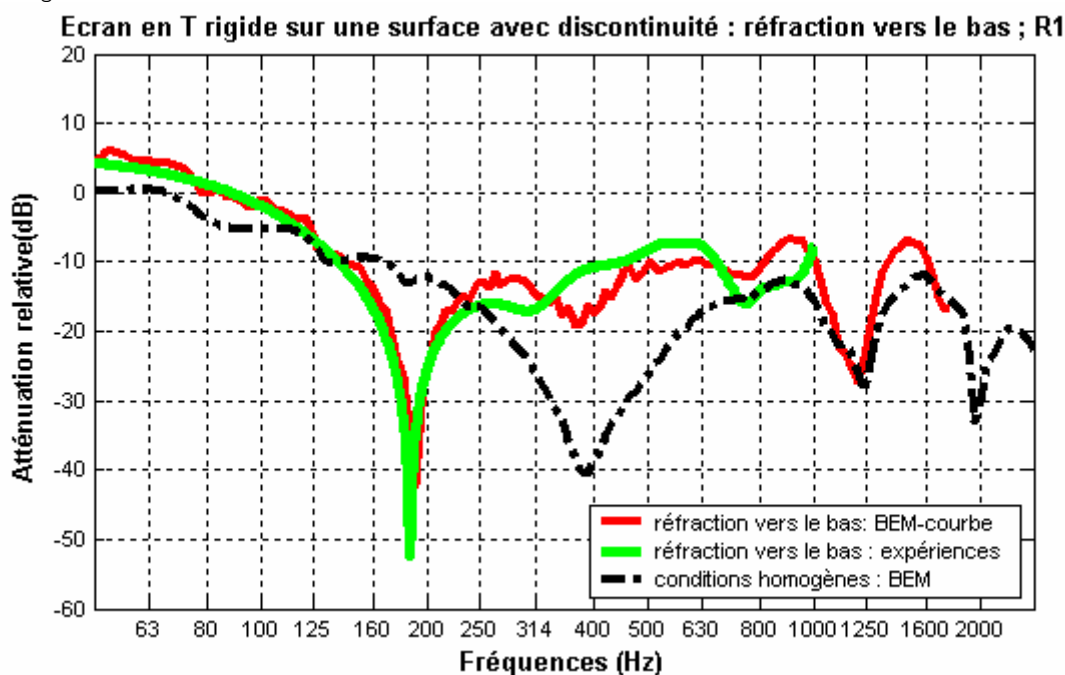


Figure 4-30 : Comparaisons entre BEM et les mesures sur modèle réduits : Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-29. S (0 ; 0,5 m) ; R2 (82 m ; 1,5 m) ; écran rigide de 3 mètres de haut, absorbant $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^2$.

L'introduction d'effets réfractant vers le bas renforce les niveaux de bruit dans l'intervalle [250 Hz, 1000 Hz]. Il semblerait que l'introduction d'effets météorologiques vers le bas déplace les interférences vers les basses fréquences. Ainsi l'interférence présente vers 400 Hz se retrouve, en présence de réfraction, vers 200 Hz comme on le voit sur la Figure 4-30.

Sur la Figure 4-31 sont donnés les résultats pour le second récepteur placé à 4 m au-dessus du sol. Pour les courbes prenant en compte la réfraction, on peut observer que les interférences présentes en milieu homogène sont décalées vers les zones de basses fréquences. Ainsi l'interférence présente vers 400 Hz se retrouve, en présence de réfraction, vers 110 Hz comme on le voit sur la Figure 4-31 et celle présente vers 1250 Hz semble se retrouver vers 325 Hz.

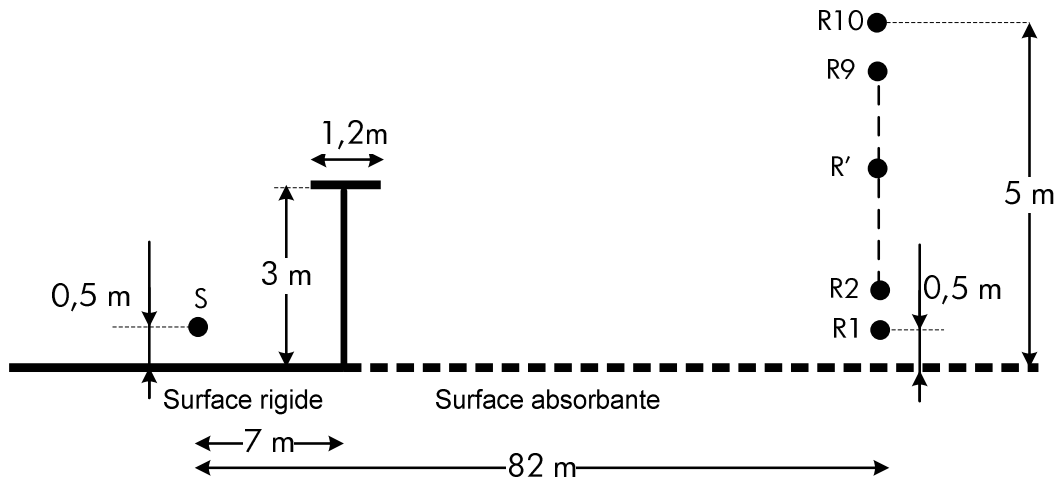


Figure 4-32 : Configuration en milieu homogène : S (0 ; 0,5 m) ; R1 (82 m ; 0,5 m) à R10 (82 m ; 5 m) ; écran rigide en T de 3 mètres de haut, absorbant : $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^2$.

Pour étudier l'influence de la position des récepteurs sur le champ de pression, on place 10 récepteurs à 82 m de la source à des hauteurs variant de 0,5 m à 5 m tous les 0,5 m. Ces récepteurs sont numérotés de R1 à R10 avec R1 situé à 0,5 m au dessus du sol, R2 à 1 m, R10 à 5 m

Sur la Figure 4-33, on présente les atténuations relatives obtenues en milieu homogène.

écran en T milieu homogène

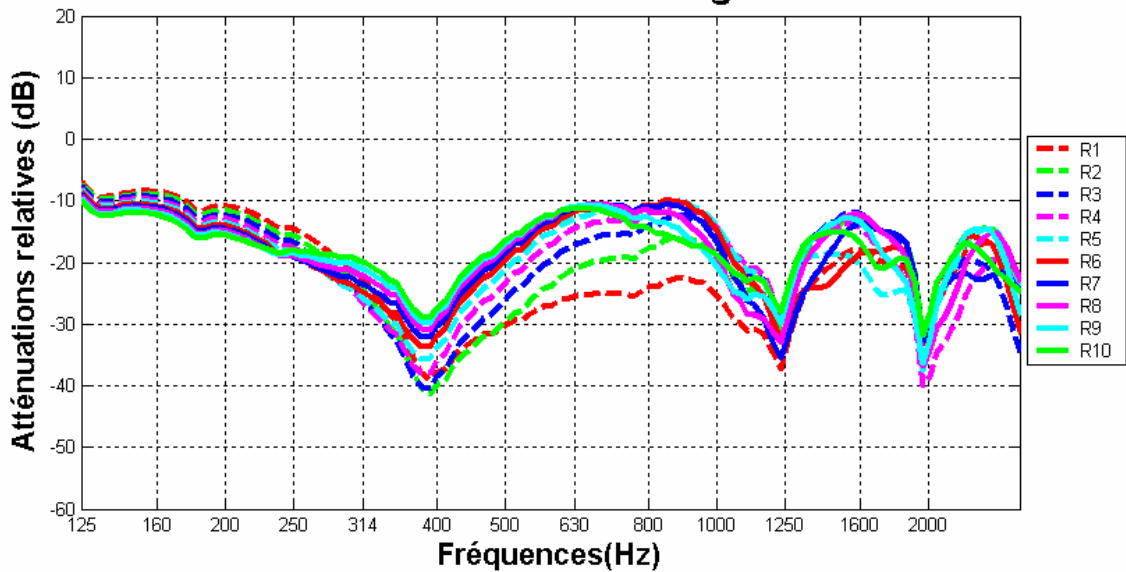


Figure 4-33: Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-32 en milieu homogène S (0 ; 0,5 m) ; R1 (82 m ; 0,5 m) ; R2 (82 m ; 1 m) ; R3 (82 m ; 1,5 m) ; R4 (82 m ; 2 m) ; R5 (82 m ; 2,5 m) ; R6 (82 m ; 3 m) ; R7 (82 m ; 3,5 m) ; R8 (82 m ; 4 m) ; R9 (82 m ; 4,5 m) ; R10 (82 m ; 5 m) écran en T rigide de 3 mètres de haut, absorbant $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^2$.

En milieu homogène (cf. Figure 4-33), on constate que les interférences sont localisées aux mêmes fréquences quelle que soit la hauteur des récepteurs et qu'elles sont de plus en plus prononcées quand le récepteur se rapproche du sol. Ainsi pour une variation de 4,5 m en hauteur l'interférence peut être plus prononcée avec une variation supérieure à 10 dB.

En milieu réfractant vers le bas, les interférences ne sont plus localisées aux mêmes fréquences quand la hauteur des récepteurs varie. On représente sur la Figure 4-34 les atténuations relatives obtenues pour les 5 récepteurs les plus proches du sol : R1 (0,5 m) à R5 (2,5 m) et sur la Figure 4-35 les résultats des 5 récepteurs les plus éloignés du sol : R6 (3 m) à R10 (5 m).

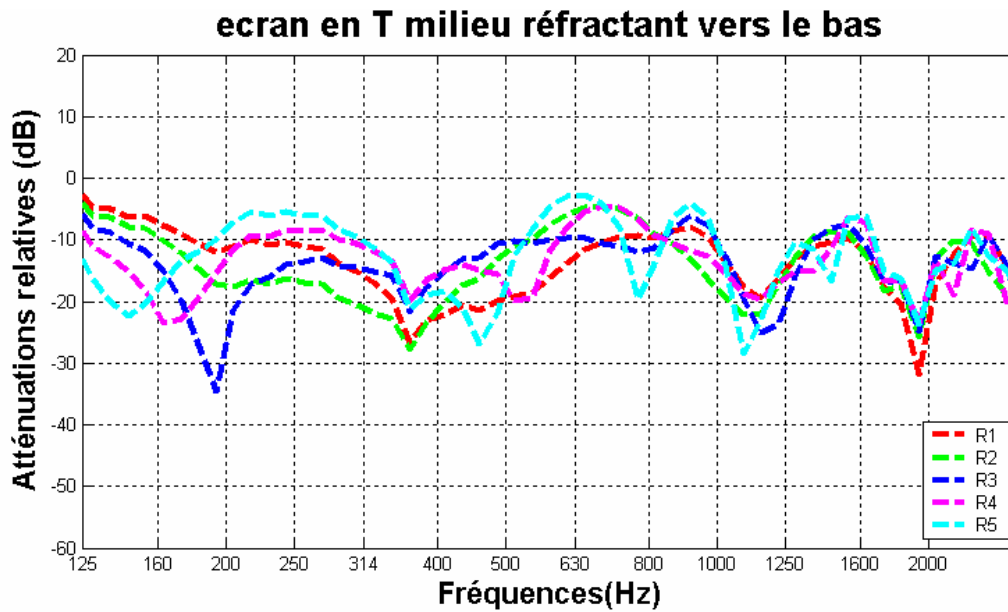


Figure 4-34 : Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-32 en milieu réfractant vers le bas S (0 ; 0,5 m) ; R1 (82 m ; 0,5 m) ; R2 (82 m ; 1 m) ; R3 (82 m ; 1,5 m) ; R4 (82 m ; 2 m) ; R5 (82 m ; 2,5 m) ; R6 (82 m ; 3 m) ; R7 (82 m ; 3,5 m) ; R8 (82 m ; 4 m) ; R9 (82 m ; 4,5 m) ; R10 (82 m ; 5 m) écran en T rigide de 3 mètres de haut, absorbant $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^{-2}$.

Sur la Figure 4-34, on retrouve pour chaque récepteur les interférences du milieu homogène à 400 Hz, 1250 Hz et 2000 Hz situés un peu en dessous des fréquences d'interférence en milieu homogène. On remarque que plus la hauteur des récepteurs augmente, plus le nombre d'interférences introduit par le phénomène de réfraction est important. On remarque aussi que les interférences sont plus ou moins marquées selon la hauteur du récepteur. Le récepteur le plus proche du sol peut avoir l'interférence la plus marquée (par exemple à 1900 Hz) cela n'est pas toujours vérifiée.

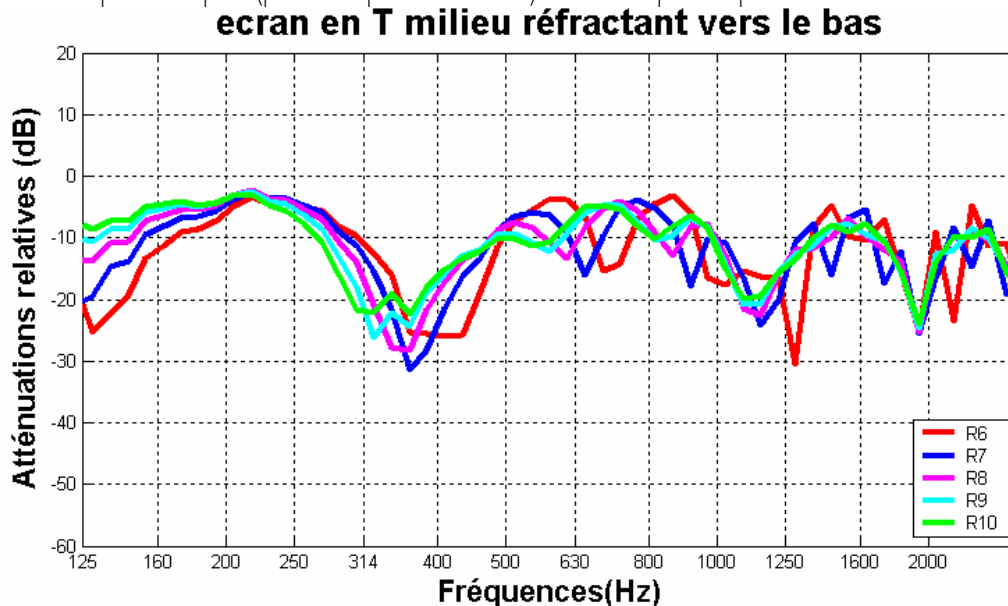


Figure 4-35 : Atténuation relative par rapport au champ libre obtenue pour la configuration décrite à la Figure 4-32 en milieu réfractant vers le bas S (0 ; 0,5 m) ; R1 (82 m ; 0,5 m) ; R2 (82 m ; 1 m) ; R3 (82 m ; 1,5 m) ; R4 (82 m ; 2 m) ; R5 (82 m ; 2,5 m) ; R6 (82 m ; 3 m) ; R7 (82 m ; 3,5 m) ; R8 (82 m ; 4 m) ; R9 (82 m ; 4,5 m) ; R10 (82 m ; 5 m) écran en T rigide de 3 mètres de haut, absorbant $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^{-2}$.

Ces phénomènes sont aussi visibles pour les récepteurs R6 à R10 (cf. Figure 4-35). Ainsi pour le récepteur R6 situé à 2,5 m au-dessus du sol, deux maxima sont visibles dans l'intervalle [400 ; 1250 Hz] alors que pour R10 situé à 5 m, on en dénombre 3.

L'étude de l'influence de la position des récepteurs sur la pression nous permet de constater que plus la hauteur des récepteurs augmente, plus on visualise des interférences. Une différence de position de 0,5m à l'échelle 1 correspond à 2,5 cm à l'échelle 1:20. Il faut savoir que l'incertitude sur la position expérimentale des microphones est de l'ordre du cm car il est difficile de mesurer la position du micro verticalement sur les surfaces courbes.

Cette constatation peut expliquer les différences entre certaines courbes expérimentales et numériques. Ainsi les interférences plus marquées sur la courbe expérimentale que sur la courbe numérique dans le cas de l'écran en T peuvent peut-être s'expliquer par une position expérimentale du microphone plus basse que celle testée expérimentalement. En effet si on compare la Figure 4-31 et la Figure 4-35, il semblerait que la courbe expérimentale corresponde au récepteur situé à 3,5m de haut au lieu de 4m.

Dans le cas de l'écran rigide sur une surface rigide en présence de réfraction vers le bas (cf. Figure 4-8), on peut aussi penser que la position expérimentale du microphone est différente de sa position théorique.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a utilisé l'analogie entre la propagation du son dans une atmosphère soumise à un gradient de célérité constant et la diffraction du son par une surface courbe cylindrique pour valider l'approche de sol courbé dans un code BEM. Différentes configurations typiques de plate forme routière ont été testées (certaines assez simples et d'autres complexes) dans le cas de conditions de réfraction vers le haut (conditions défavorables) et vers le bas (conditions favorables). Les résultats numériques obtenus ont été comparés à des expériences sur surfaces cylindriques effectuées au centre des maquettes du CSTB de Grenoble. Les résultats numériques obtenus avec BEM-courbé ont été comparés à des résultats numériques d'un code prenant en compte les effets de réfraction (GFPE) quand cela était possible.

La comparaison des résultats numériques et expérimentaux est assez bonne. Cette comparaison nous permet de valider l'approche BEM-courbé dans le domaine fréquentiel des mesures [50, 1000 Hz]. Pour des fréquences supérieures à 1000 Hz, la comparaison avec les résultats d'ATMOS est en général concluante.

Ainsi l'approche BEM-courbé peut être utilisée dans l'intervalle de notre domaine fréquentielle d'étude [50, 2500 Hz].

Chapitre 5 : Campagnes de mesures en soufflerie atmosphérique

La propagation du bruit au voisinage du sol est très influencée par les effets météorologiques, et notamment, par la présence du vent. Les essais en vraie grandeur sur site réel sont généralement coûteux et dépendants des conditions météorologiques qui peuvent varier brusquement dans le temps et dans l'espace. C'est pourquoi la soufflerie s'avère un outil adapté car elle permet un contrôle des conditions d'expériences, une instrumentation aisée et des facilités d'observation. Lorsque la veine d'expérience de la soufflerie est suffisamment grande et que la puissance de sa propulsion est suffisante, l'étude peut être réalisée à l'échelle 1. Le plus souvent, on est contraint de travailler à échelle réduite, ce qui implique des conditions de similitude à respecter.

La campagne de mesures en soufflerie décrite dans ce chapitre a été réalisée du 1^{er} au 12 mars 2004 [PRIOUR, ABALLEA et al., 2004]. Durant la première semaine, des mesures acoustiques ont été réalisées sur les configurations présentées et détaillées dans ce chapitre. Pendant la seconde semaine, des mesures du champ aérodynamiques ont été effectuées au moyen de techniques classiques et novatrices. Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans ce chapitre et dans l'Annexe E.

5.1 Campagnes de mesures en soufflerie

Le rôle d'une soufflerie est de produire dans une veine d'essais l'écoulement d'un fluide dans des conditions contrôlées de vitesse et d'état du fluide. Il existe une gamme extrêmement étendue de souffleries, de la très petite à la très grande taille (veine d'essais de quelques décimètres carrés à plusieurs centaines de mètres carrés), avec des gammes de vitesses très variées.

Dans notre cas, nous essayons de reproduire à échelle réduite des écoulements caractéristiques de la couche limite atmosphérique (cf. 1.1.2.2 p 7 chapitre 1). La soufflerie indiquée pour nos expériences est appelée soufflerie atmosphérique.

Lors d'expériences à échelle réduite, l'analyse dimensionnelle fait apparaître des nombres sans dimension qui doivent être respectés pour que l'expérience en soufflerie soit équivalente à celle qui serait menée en vraie grandeur. En soufflerie, les nombres sans dimension utilisés sont principalement :

- le nombre de Reynolds : $Re = \frac{u L}{\nu}$ qui représente le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité, avec u la vitesse du fluide, L une longueur de référence et ν la viscosité cinématique.
- le nombre de Mach : $M = \frac{u}{c}$, c'est le rapport de la vitesse locale du fluide u et de la célérité du son.

Si dans l'expérience le nombre de Reynolds et le nombre de Mach sont les mêmes que sur le prototype en vraie grandeur, alors les écoulements sont similaires. Lorsque l'expérience est faite à échelle réduite en soufflerie, il est généralement impossible de satisfaire simultanément aux deux conditions donc d'avoir une similitude complète. Cependant à basse vitesse ($u < 100 \text{ m.s}^{-1}$), la compressibilité de l'air est négligeable et l'on écarte la condition due au nombre de Mach. A l'inverse, la condition de Reynolds peut être écartée lorsque la vitesse du flux est suffisante pour que les effets de viscosité soient secondaires par rapport aux effets d'inertie.

Lors de notre campagne de mesures, la vitesse maximale horizontale du vent est de l'ordre de $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ donc la condition de similitude à respecter porte sur le nombre de Reynolds. A l'échelle 1, la vitesse du vent est de $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, la viscosité cinématique est celle de l'air et considérons que la hauteur d'un écran de 3m soit la longueur de référence donc le nombre de Reynolds vaut

$$\text{Re} = \frac{10 \times 3}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 2 \cdot 10^6 \quad (37)$$

A l'échelle 1/20, la seule grandeur qui varie est la longueur de référence qui est divisée par 20. En effet dans la soufflerie, la vitesse du vent est de $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, le fluide considéré est de l'air donc sa viscosité est la même qu'à l'échelle 1. Par conséquent le nombre de Reynolds en soufflerie est 20 fois plus petit que celui à l'échelle 1 :

$$\text{Re} = \frac{10 \times 0,15}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 1 \cdot 10^5 \quad (38)$$

Le nombre de Reynolds même divisé par 20 reste important. Les formes étudiées dans cette campagne en soufflerie sont à arêtes vives (écran, remblais), donc la modification du nombre de Reynolds dans cette gamme n'a pas autant d'impact que sur une forme cylindrique. Des études numériques réalisées avec le logiciel Fluent sur l'importance de la vitesse du vent lors de cette campagne de mesures ont montré que tant que le Reynolds reste élevé et pour une même turbulence en entrée il est possible de transposer les résultats obtenus pour deux vitesses différentes en divisant simplement les profils de vitesse par le rapport relatif entre ces deux vitesses.

5.1.1 La soufflerie atmosphérique du CSTB de Nantes

La soufflerie à retour du CSTB (cf. Figure 5-1) fonctionne sur le principe d'un circuit fermé. Son avantage essentiel est la possibilité de contrôler les caractéristiques physiques de l'air, notamment la température de l'écoulement qui peut-être réglée plus ou moins $0,5^\circ\text{C}$ près.

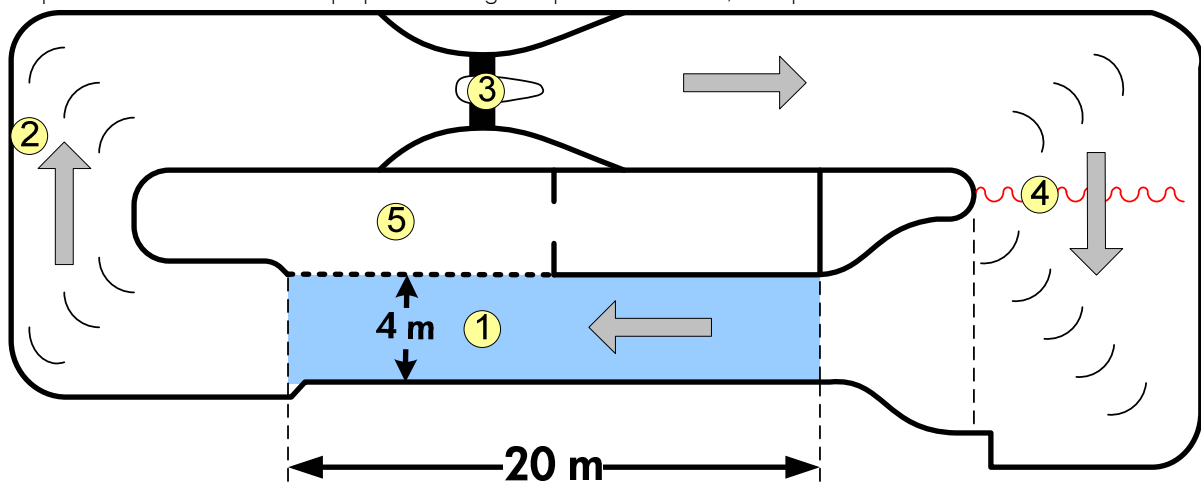


Figure 5-1 : Schéma de la soufflerie atmosphérique : (1) Veine d'essais : longueur = 20 m, largeur = 4 m, hauteur variable entre 1,5 et 2,5 m, vitesse de l'écoulement entre 0 et $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, reproduction du vent à échelle réduite. (2) Ecoulement de retour. (3) Propulseur avec hélice à pas variable. (4) Echangeur chaud ou froid (contrôle de la température). (5) Salle de contrôle.

En raison des dimensions importantes de la veine d'essais ($4\text{m} \times 20\text{m}$), il est possible de simuler le vent naturel aux grandes échelles. Le plancher élévateur de la veine d'essai permet de faire varier la hauteur de la section d'essai de 1.50m à 2.50m. La possibilité d'élever le plancher a été utile pour les configurations présentant un remblai.

L'air est mis en mouvement par un propulseur axial (600tr.min^{-1}) de 200 kW qui actionne une hélice de 12 pales. Le pas des pales est variable et permet une évolution continue de vitesse dans la veine de 0 à 30 m.s^{-1} ($(+ \text{ ou } - 0.1\text{ m.s}^{-1})$). Ce principe de régulation associé à un traitement acoustique poussé entraîne un rejet vers 120 Hz de la fréquence parasite due à l'effet de « sirène » lié au propulseur. Cette fréquence ne nuit pas à la qualité de nos essais car elle se situe en dehors de la gamme de mesures [2000, 20 000 Hz] des expériences.

Le spectre de bruit de la soufflerie est représenté sur la Figure 5-2. Dans le domaine fréquentiel de nos mesures, [2000, 20 000 Hz], le niveau de bruit atteint sa valeur maximale pour le tiers d'octave 2000Hz. Il faut donc choisir un niveau de pression du haut parleur à 1m supérieur au bruit de fond à 2000Hz et qui permette la détection du signal acoustique pour cette fréquence. C'est-à-dire que le niveau de pression à 1m de la source doit être de l'ordre de 85 dB. Pour les fréquences supérieures, le bruit de la soufflerie décroît rapidement et ne pose donc pas de problème.

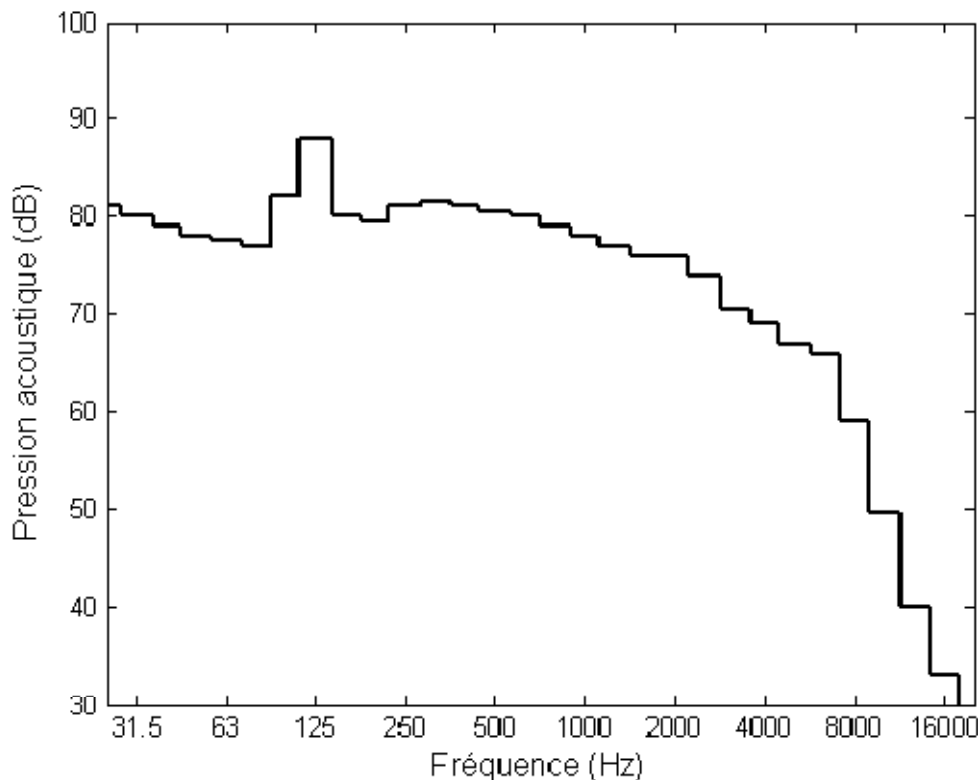


Figure 5-2 : Spectre en tiers d'octave du bruit de fond de la soufflerie réalisé pour une vitesse d'écoulement de 14. m.s⁻¹.

5.1.2 Simulation de la couche limite atmosphérique

La couche limite atmosphérique est caractérisée en un lieu donné par le profil de vitesse et les caractéristiques de la turbulence (intensité, échelle, spectre).

5.1.2.1 Gradient vertical de vitesse moyenne

La vitesse moyenne pratiquement nulle au niveau du sol est une fonction croissante de la hauteur. Plusieurs formules empiriques, semi-empiriques, ou théoriques sont utilisées pour représenter la répartition des vitesses moyennes avec la hauteur. Les plus courantes pour un écoulement turbulent établi sont la loi de puissance et la loi logarithmique. Les expressions de la composante horizontale de vitesse du vent u_x sont alors :

- Pour la loi de puissance : $u_x(z) = u_* \cdot (z/z_0)^\alpha$, où u_* désigne la vitesse de frottement, z_0 la longueur de rugosité et α un coefficient dépendant du type de rugosité,
- Pour la loi logarithmique : $u_x(z) = \frac{u_*}{K} \ln(z/z_0)$ pour $z \gg z_0$, où u_* est la vitesse de frottement, $K = 0.4$ est la constante von Karmann, z_0 la longueur de rugosité.

Le type de rugosité est relié à la longueur de rugosité qui représente une caractérisation aérodynamique du sol. La vitesse de l'écoulement sera d'autant plus faible que la rugosité du site sera la plus importante, c'est-à-dire que les obstacles disposés sur la surface du sol seront plus hauts et plus nombreux.

5.1.2.2 Fluctuations de vitesse

Un écoulement est laminaire lorsque les lignes de courant sont des courbes fixes dans l'espace et ne se mélangent pas au cours du mouvement. Un tel écoulement n'est stable que si les forces d'inertie sont faibles devant les forces de viscosité, c'est-à-dire, pour les faibles valeurs du nombre de Reynolds. Pour les valeurs importantes du nombre de Reynolds, l'écoulement devient instable, les trajectoires s'enchevêtrent, l'écoulement est dit turbulent.

Dans un écoulement turbulent, les valeurs instantanées de vitesse sont très fluctuantes en raison de la forte agitation des masses d'air. La solution préconisée depuis longtemps a été proposée par Reynolds qui est l'un des premiers auteurs ayant réfléchi sur la résolution du problème de la turbulence. Cette solution s'appuie sur un fondement purement statistique. Elle consiste à décomposer les variables instantanées en une valeur moyenne et une fluctuation par rapport à celle-ci. La composante horizontale de la vitesse est alors décomposée en : $u_x(t) = \bar{u}_x + u'_x(t)$ où \bar{u}_x désigne la valeur moyenne de la vitesse horizontale et $u'_x(t)$ les fluctuations de la vitesse horizontale.

Un traitement statistique permet d'introduire les grandeurs suivantes :

- l'écart type (ou valeur quadratique moyenne) : $\sigma_u = \sqrt{u'^2}$,
- l'intensité de fluctuation ou intensité de turbulence : $I = \sigma_u / \bar{u}$,
- les échelles de turbulence. Les échelles de turbulence sont définies comme les intégrales des coefficients d'intercorrélation des différentes composantes des fluctuations de la vitesse par rapport aux variables Δx , Δy et Δz .
- la densité spectrale de puissance. Pour connaître la répartition de l'énergie cinétique pour chaque gamme de fréquences, on définit une fonction appelée densité spectrale de puissance à partir de la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation.

5.1.3 Mesures aérodynamiques

Les mesures aérodynamiques ont été réalisées à l'aide de techniques intrusives (tubes de Pitot et sondes à fil chaud) mais aussi à l'aide de techniques optiques non intrusives (mesures PIV).

5.1.3.1 Sondes de Pression ou tubes de Pitot

Les sondes de pression ou tubes de Pitot sont destinées à être placées dans l'écoulement. Le tube de Pitot permet de mesurer la pression d'arrêt lorsqu'il est monté dans l'axe de la vitesse. Par extension, le tube de Pitot double (ou tube de Prandtl pour les allemands) permet de mesurer la pression dynamique qui est la différence entre la pression d'arrêt et la pression statique le long d'une ligne de courant. Après calcul, on peut obtenir aisément la vitesse de l'écoulement moyen via le théorème de Bernoulli pour les écoulements incompressibles. Le tube de Pitot double est un appareil fondamental en soufflerie car il est utilisé dans la plupart des cas pour obtenir la vitesse de référence de la soufflerie.

5.1.3.2 Sondes à fil chaud

Créée à la fin du 19^{ème} siècle et développée par Weber (1894) et par King (1914), l'anémométrie à fil chaud utilise les lois de transfert de chaleur entre un fil métallique chauffé électriquement par effet Joule et un écoulement fluide pour déterminer la vitesse de ce dernier. L'élément sensible de l'anémomètre est un fil métallique très fin tendu entre deux broches rigides. La résistance mécanique d'une sonde à fil chaud est suffisante pour effectuer des mesures dans les gaz à des vitesses élevées. Les sondes à fil chaud sont en général constituées d'un fil en tungstène recouvert d'une fine couche de platine pour éviter son oxydation, avec un diamètre de l'ordre de quelques μm . Ce fil a une longueur qui varie entre 0,4 et 2,2 mm. De plus, il existe plusieurs formes et configurations de sondes à fil chaud. On en trouve à un, deux ou trois éléments sensibles. Chaque élément mesure une composante de vitesse dans un plan qui lui est perpendiculaire.

L'anémométrie à fil chaud consiste à déterminer la vitesse instantanée d'un écoulement en considérant le transfert de chaleur entre un fil fin chauffé électroniquement et cet écoulement. Dans le cas de l'anémomètre à température constante, la température du fil est maintenue constante par une boucle d'asservissement.

5.1.3.3 Vélocimétrie par Image de Particules

La campagne de mesures a été complétée par des séries de mesures expérimentales de Vélocimétrie par Imagerie de Particules (PIV). Le CSTB de Nantes ne possède pas d'une part l'équipement nécessaire (laser pulsé de forte puissance, système optique, caméra numérique, programme de traitement) ni, d'autre part, une maîtrise des techniques associées à ce type de métrologie pointue, donc cette phase de mesures a été sous-traitée à la société R&D Vision. L'objectif était de cartographier, en terme de champs moyens de vitesse longitudinale et de turbulence, la structure complexe de l'écoulement autour d'un écran et d'un remblai. La méthode PIV a été testée sur deux configurations géométriques :

- Sol plan parfaitement rigide, avec écran droit parfaitement rigide,
- Route parfaitement rigide en déblai, puis remblai parfaitement rigide sans écran.

Pour chacune de ces configurations, deux conditions d'écoulement détaillées dans la section 5.2.2 ont été testées.

Les avantages de la PIV par rapport aux techniques de mesures intrusives sont nombreux. En effet :

- C'est une méthode non intrusive : elle ne modifie pas l'écoulement,
- Elle permet d'accéder à $U(x,y)$ et $V(x,y)$, en valeurs instantanées,
- Le maillage peut être extrêmement fin,
- Elle donne des résultats numériques très précis permettant, entre autre, une comparaison avec les résultats de l'étude numérique du champ aérodynamique avec Fluent,
- En revanche, la taille de l'écoulement étudié est restreinte par la focale de la caméra.

5.1.4 Mesures acoustiques

Le but de cette campagne de mesures est de déterminer l'influence du vent sur la propagation acoustique au-dessus d'un sol rigide ou impédant en présence ou non d'obstacles. Avant d'entreprendre la campagne, il a été nécessaire de réfléchir aux points suivants :

- il faut trouver une échelle de similitude qui soit compatible avec les effets acoustiques et aérodynamiques.
- il faut trouver un moyen de s'affranchir des réflexions parasites sur les parois de la veine d'essais.
- Il faut vérifier que le bruit émis par le ventilateur ne risque pas de perturber les mesures acoustiques sachant que le spectre de bruit de la soufflerie est particulièrement chargé en basses fréquences.

5.1.4.1 Choix de l'échelle géométrique

L'échelle 1:20 a été choisie pour les raisons suivantes :

- La soufflerie permet de reproduire correctement des vents dans la gamme d'échelle du 1:20 au 1:1000.
- L'appareillage acoustique fonctionne dans la gamme 0 à 20 KHz ce qui à l'échelle 1:20 correspond à l'intervalle de fréquence 0-1000 Hz bien représentatif des phénomènes acoustiques à étudier.
- Compte tenu des dimensions géométriques de la soufflerie, les distances source-récepteur doivent être inférieures à 6 m si l'on veut pouvoir séparer correctement les réflexions issues du plafond et des parois latérales. A l'échelle 1, on explorera des distances de propagation pouvant aller jusqu'à 120 m.

5.1.4.2 Conditions de similitude

Pour pouvoir reproduire sur modèles réduits les phénomènes de propagation du son en espace découvert il est indispensable de satisfaire les conditions suivantes :

- Réduire, dans le même rapport, les dimensions géométriques des obstacles des sources, et les longueurs d'ondes des sons utilisés,
- Respecter l'impédance acoustique des surfaces des obstacles.

Les principaux problèmes à résoudre sont donc les suivants :

- Utiliser des matériaux, présentant aux fréquences transposées, des coefficients d'absorption identiques à ceux des surfaces à représenter (asphalte, gazon...), aux fréquences habituelles.
- trouver les conditions de température et d'humidité pour que les conditions de similitude relatives à l'absorption de son par l'air soient remplies aussi bien que possible.

5.1.4.3 Choix de la source et des récepteurs acoustiques

Les caractéristiques idéales de la source acoustique sont les suivantes, elle doit

- être vobulable en fréquence,
- avoir une réponse en fréquence qui varie peu entre 0 et 20 KHz,
- être omnidirectionnelle,
- avoir une puissance importante,
- avoir des dimensions géométriques suffisamment petites pour ne pas trop perturber l'écoulement dans la soufflerie.

Un tweeter AUDAX de 4.5 cm de diamètre a été utilisé pour jouer le rôle de source acoustique. Ce tweeter a une réponse quasi-plate entre 2 kHz et 20 kHz (cf. Figure 5-3) et délivre un niveau de pression acoustique de 105 dB à 40 cm.

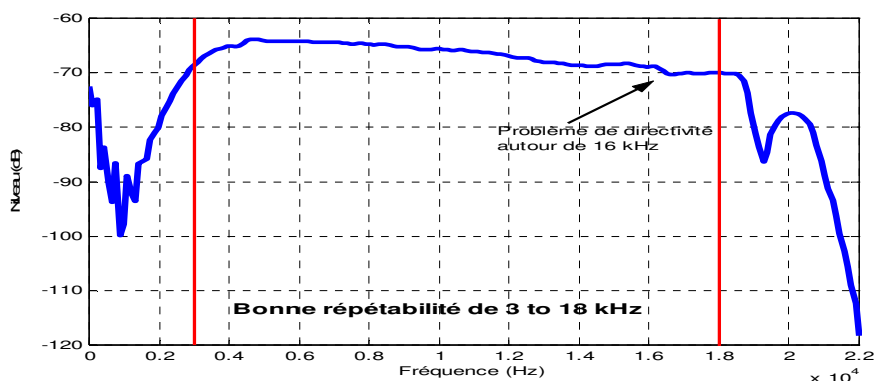


Figure 5-3 : Caractéristique en fréquence du tweeter Audax TW010F1.

Des mesures de directivité ont été effectuées (cf. Annexe B). On peut considérer que le niveau de bruit émis dans l'intervalle angulaire $[-30^\circ, 30^\circ]$ est constant quelle que soit la fréquence d'émission du haut-parleur. Les positions de source et récepteur doivent être choisies de telle manière que les rayons utiles soient émis dans un faisceau à l'intérieur de cet intervalle d'ouverture angulaire. Aux distances utilisées dans les expériences, la source peut être considérée comme ponctuelle. Un carénage de forme ogivale a été fixé à l'arrière de la source pour limiter les perturbations sur le flux incident dans le cas de l'étude du vent portant (cf. Figure 5-4).

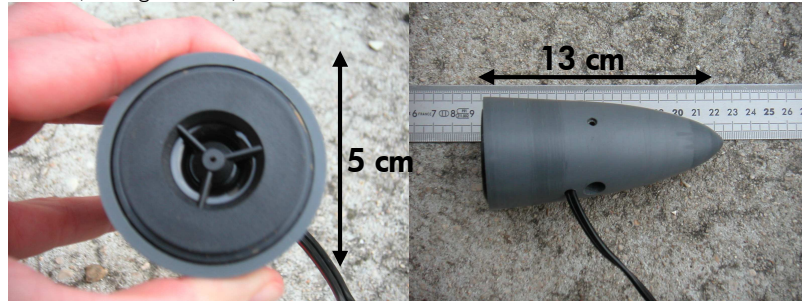


Figure 5-4 : Carénage du tweeter Audax TW010F1.

Les récepteurs sont des microphones demi-pouce BRUEL & KJAER de type 4133. Ils ont été choisis pour leur fréquence de coupure supérieure à la gamme des fréquences de mesures soit ici $[0, 20\ 000\ \text{Hz}]$. La réponse en fréquence des microphones utilisés est présentée dans l'Annexe B. Des tests dans la soufflerie de l'École Centrale de Lyon ont montré qu'une bonnette anti-vent placée sur le microphone permet de réaliser une mesure correcte en présence d'un écoulement.

5.1.4.4 Technique utilisée pour les mesures acoustiques

Les mesures ont été réalisées avec la technique du sinus glissant logarithmique [FARINA, 2000; MULLER and MASSARANI, 2001]. Une excitation temporelle du tweeter sous forme d'un sinus glissant logarithmique est effectuée (cf. [FARINA, 2000]). Le signal temporel enregistré au niveau du microphone est ensuite convolué avec une fonction de filtre inverse (cf. [STAN, EMBRECHTS et al., 2001]) pour obtenir la réponse impulsionnelle du système. Un filtrage temporel est ensuite appliqué pour éliminer les champs réfléchis par les parois du local de mesure et ne conserver que les champs des rayons utiles. En effet connaissant les dimensions du local de mesure et les positions de la source et des récepteurs il est possible d'évaluer le temps mis pour le champ direct, les champs réfléchis sur la configuration et le retard de temps des rayons se réfléchissant sur les parois du local de mesures. Une fois le signal temporel filtré pour ne garder que les champs utiles, on effectue une transformée de Fourier pour obtenir la réponse en fréquence du système.

La méthode du sinus glissant logarithmique a été retenue parmi les méthodes de Maximum Length Sequence (MLS), d'impulsion et la technique classique du sinus glissant. En effet, cette méthode est rapide, peu coûteuse en temps de calculs. De plus cette technique présente une bonne insensibilité aux variations temporelles, ce qui nous permet de l'utiliser avec confiance en présence d'un écoulement d'air.

5.2 Présentation des configurations étudiées

Lors de cette campagne de mesures, des configurations typiques de plate-forme routière sont testées : configurations géométriques et profils de vent et de turbulence variés sont étudiés.

Le sol peut être plan ou présenter une topographie de type remblai. L'étude d'une configuration avec remblai est rendue possible grâce au plancher élévateur de la veine d'essai. Le sol peut être parfaitement rigide (asphalte) ou impédant (de type herbeux). Pour modéliser un sol parfaitement rigide, on recouvre le plancher de la veine avec du polystyrène choc d'épaisseur 5mm.

A l'échelle 1:20, pour modéliser un terrain herbeux réel, de la feutrine des Ardennes d'épaisseur 1,7 mm a été placée sur les feuilles de polystyrène choc. Pour décrire l'impédance de la feutrine, le

modèle de Delany et Bazley [DELANY and BAZLEY, 1970] à un paramètre s'est révélé adapté pour décrire ces mesures (cf. section 4.1). La valeur moyenne sur toute la gamme des fréquences ainsi déterminée pour la feutrine est $\sigma = 3600 \text{ kPa.s.m}^2$ à l'échelle maquette ce qui correspond à $\sigma = 180 \text{ kPa.s.m}^2$ à l'échelle réelle, c'est-à-dire à un sol absorbant composé d'herbes hautes. La feuille de polystyrène choc a également été testée et l'hypothèse d'impédance infinie pour ce matériau sur toute la gamme des fréquences a été validée.

Les profils de vents sont caractérisés par un vent de 10 m.s^{-1} à 10 m au dessus du sol ce qui reproduit un vent moyen en campagne. Les intensités de turbulence choisies sont telles qu'elles sont caractéristiques d'un vent de rase campagne.

Suite à nos hypothèses de travail concernant les distances de propagation, Les distances source-récepteurs ont été choisies de telles façons que la plus grande distance soit supérieure à 100m à l'échelle 1. Compte-tenu des dimensions géométriques de la veine d'essai, la distance maximale source-récepteur est de 6m soit 120 m à l'échelle 1. A l'échelle 1, les distances source-récepteur retenues sont : 15, 30, 60, et 120m. Elles ont été choisies en divisant par deux la distance maximale à chaque fois.

Les configurations géométriques testées lors de cette campagne de mesures sont les suivantes :

1. Sol plan parfaitement rigide, sans écran droit,
2. Sol plan parfaitement rigide, avec écran droit parfaitement rigide,
3. Sol plan avec discontinuité impédance, sans écran droit,
4. Sol plan avec discontinuité impédance, avec écran droit parfaitement rigide,
5. Route parfaitement rigide en déblai, puis remblai parfaitement rigide sans écran,
6. Route parfaitement rigide en déblai, puis remblai parfaitement rigide avec écran parfaitement rigide,
7. Route en déblai parfaitement rigide, puis remblai absorbant sans écran,
8. Route en déblai parfaitement rigide, puis remblai absorbant avec écran.

Différents profils aérodynamiques pourront être simulés :

1. Vent nul c'est-à-dire situation homogène,
2. Vent moyen avec une intensité de turbulence faible,
3. Vent moyen avec une intensité de turbulence moyenne,
4. Vent contraire moyen avec une intensité de turbulence faible,
5. Vent contraire moyen avec une intensité de turbulence moyenne.

Les dimensions géométriques correspondantes ainsi que les caractéristiques des profils de vent sont détaillés dans la section suivante.

5.2.1 Configurations géométriques

5.2.1.1 Configurations sur sol plan

5.2.1.1.1 Sol rigide

Dans ces deux configurations la route est plane et rigide, constitués de polystyrène choc simulant un matériau d'impédance infinie. L'écran présent dans le second schéma est rigide et a été construit dans des plaques de polystyrène choc.

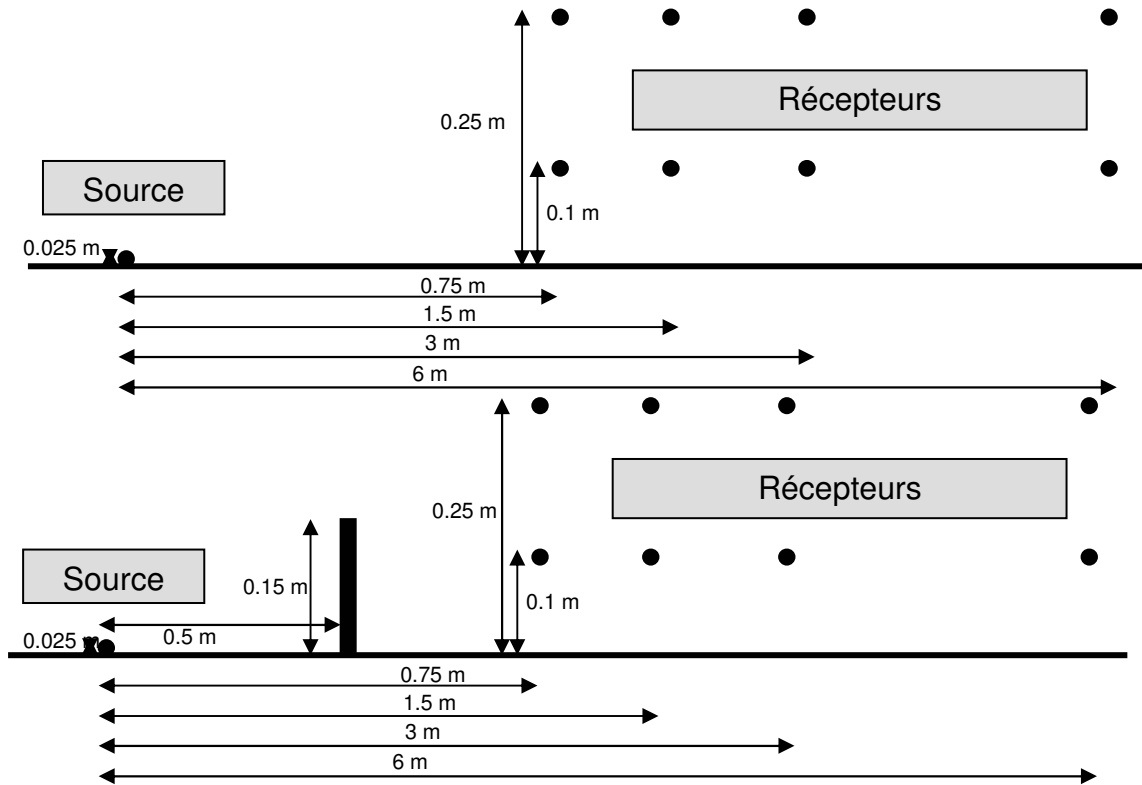
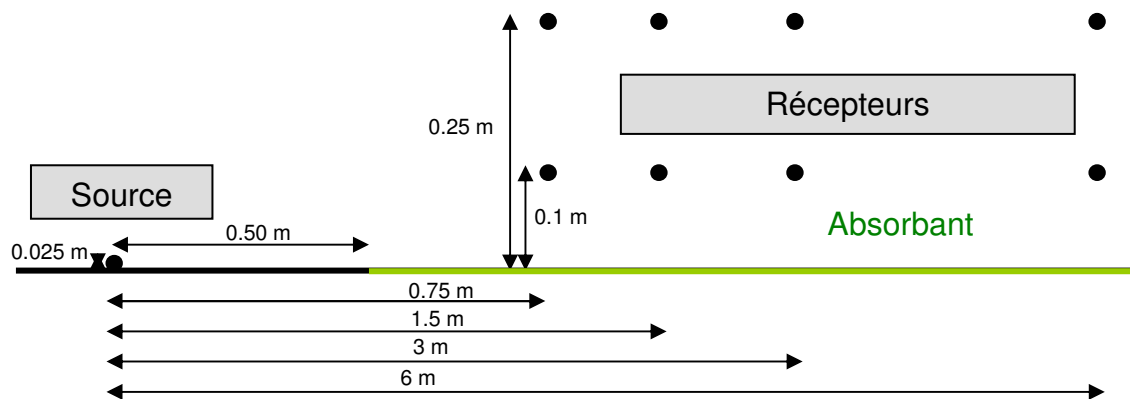


Figure 5-5 : configuration sur sol plan rigide ; sans écran (en haut) et avec un écran droit rigide (en bas).

Les dimensions indiquées sont celles correspondant à l'échelle 1:20^{ème}, c'est-à-dire que ces schémas sont à l'échelle de la soufflerie.

5.2.1.1.2 Sol présentant une discontinuité d'impédance

Dans cette section, le sol présente une discontinuité d'impédance : la source est disposée au dessus d'une section rigide et les récepteurs au dessus d'un sol impédant. La file de voiture évolue sur une route en bordure d'un terrain recouvert d'herbe. Un écran droit rigide est disposé au niveau de la discontinuité d'impédance.



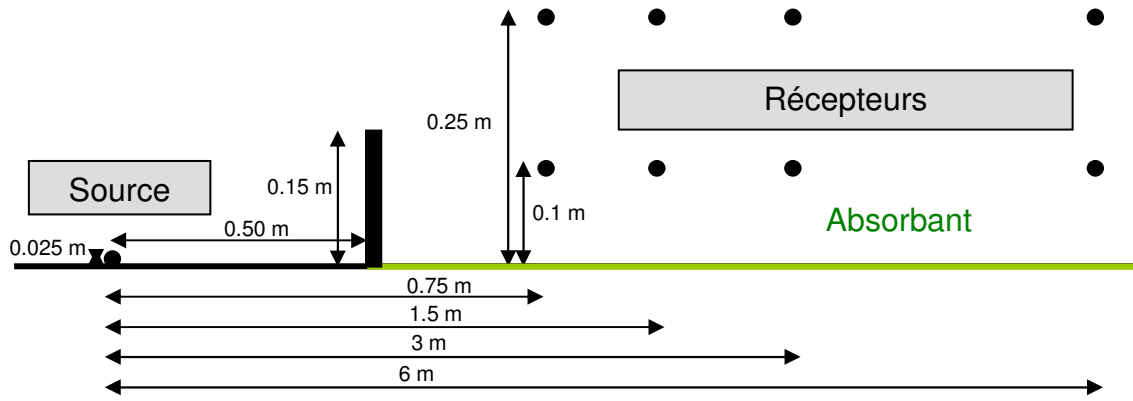


Figure 5-6 : Configuration sur sol présentant une discontinuité d'impédance, sans écran (en haut), avec un écran droit rigide (en bas).

5.2.1.2 Configurations avec route en remblai suivie d'un déblai

On s'intéresse à la propagation acoustique dans le cas d'une source située en déblai d'un remblai parfaitement rigide ou absorbant.

5.2.1.2.1 Sol rigide

La présence d'une table élévatrice dans la soufflerie a permis d'étudier la configuration d'une route en déblai. Dans cette configuration, les récepteurs sont disposés au-dessus du sol en remblais. Dans une des deux configurations testées, un écran droit rigide est disposé sur l'arête du remblai.

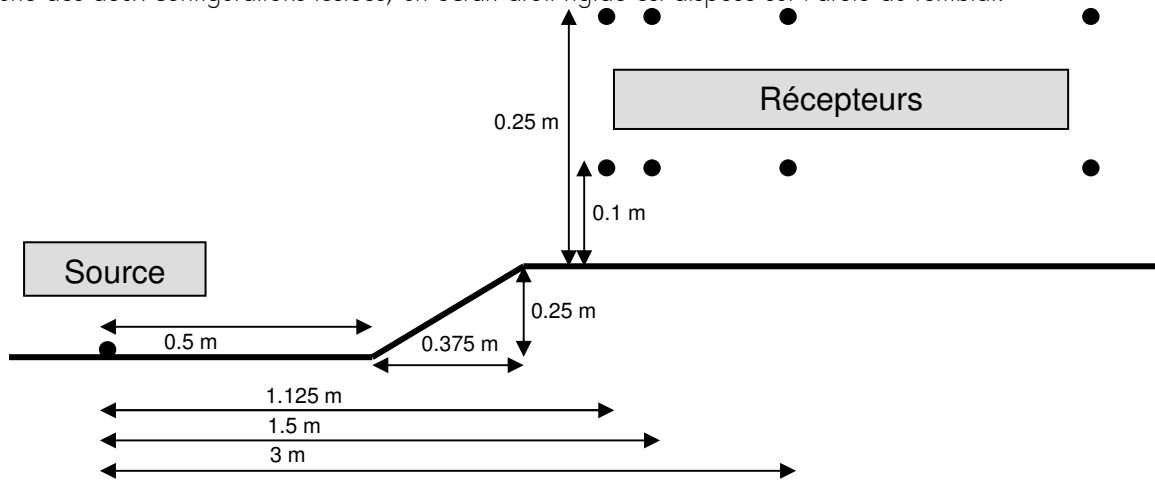


Figure 5-7 : Configuration avec route en remblai suivie d'un déblai, sans écran.

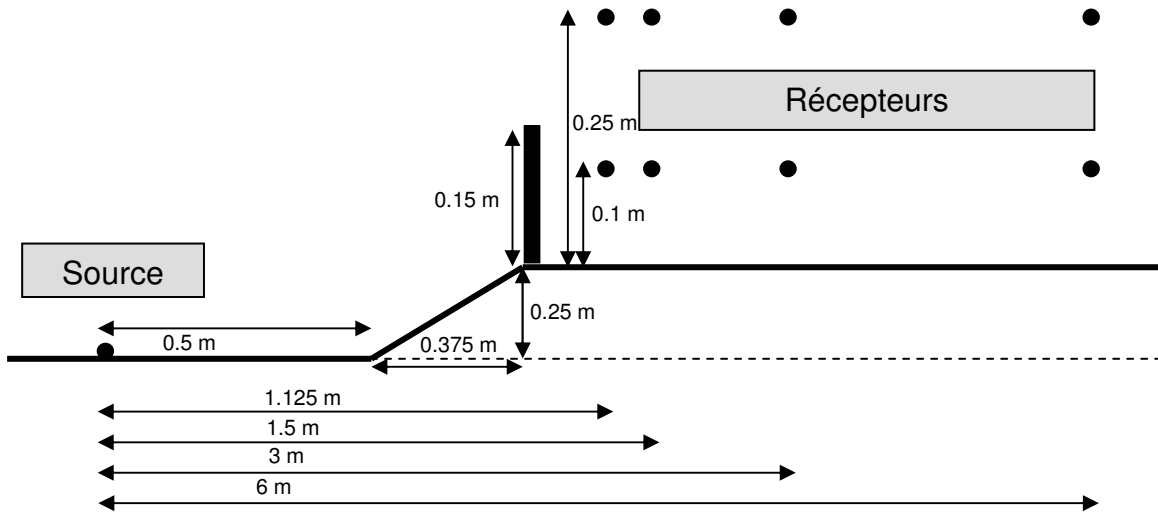


Figure 5-8: Configuration avec route en remblai suivie d'un déblai avec un écran droit rigide.

5.2.1.2.2 Sol présentant une discontinuité d'impédance

Dans cette section, la partie en déblai est rigide mais le déblai est impédant. Cette configuration est testée en l'absence d'écran et en présence d'un écran droit rigide placé sur l'arête du remblai.

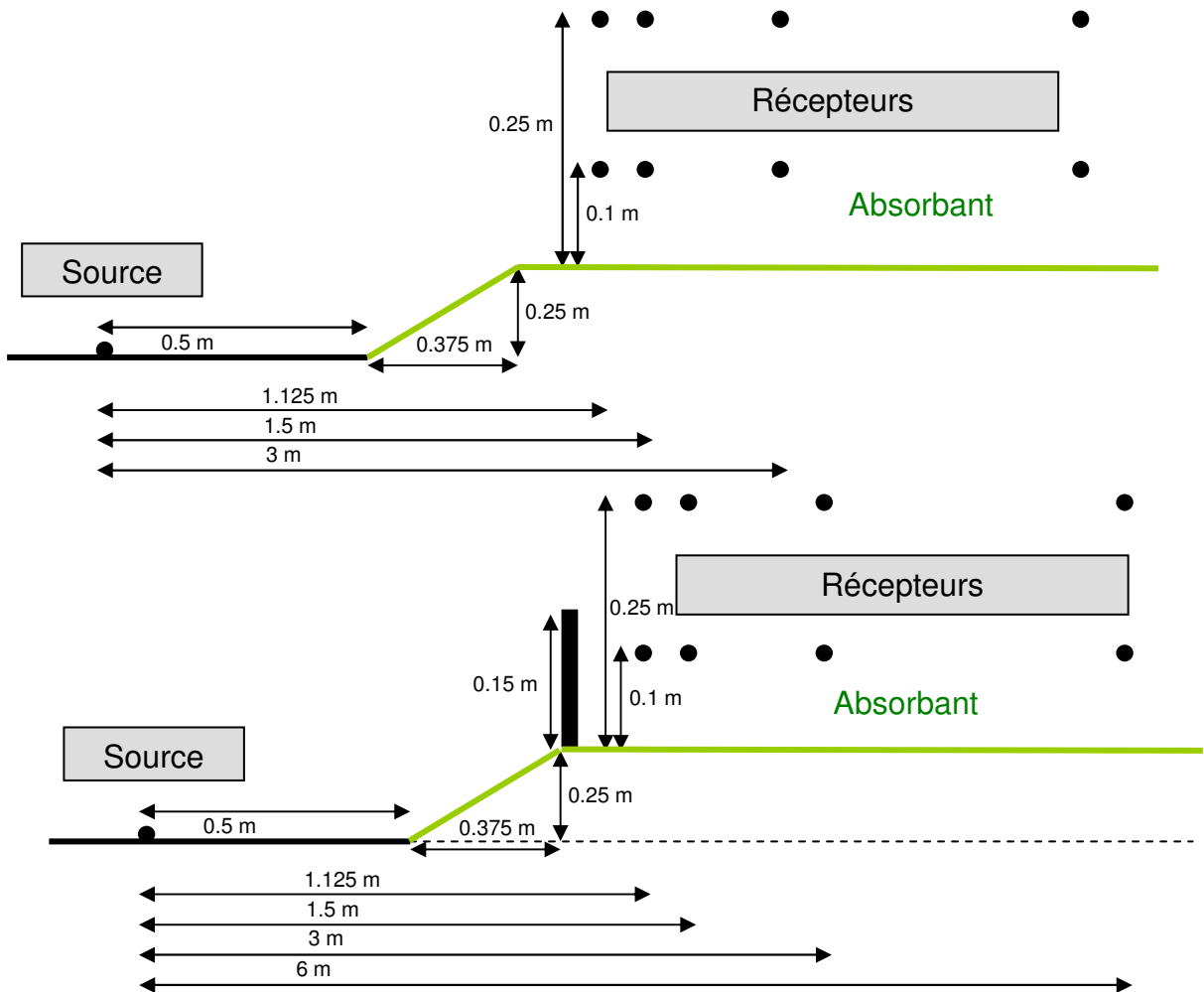


Figure 5-9 : Configuration avec route en remblai suivie d'un déblai dans le cas d'une discontinuité d'impédance.

5.2.2 Profils aérodynamiques

La soufflerie atmosphérique du CSTB de Nantes permet de reproduire une grande variété d'écoulements en faisant varier la vitesse du ventilateur et les éléments de rugosité placés en amont de la veine d'essais. Nous avons choisi de retenir deux profils aérodynamiques dont la vitesse moyenne est typique d'un vent de rase campagne et deux intensités de turbulence. Ces profils de vents sont caractérisés par une vitesse de vent moyenne de $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ à 10 m au-dessus du sol. Deux intensités de turbulence ont été retenues.

5.2.2.1 Vent moyen avec une intensité de turbulence faible

La vitesse moyenne du vent à 10 m au-dessus du sol est de $10,2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Une intensité de turbulence de l'ordre de 2% (qualifiée de faible) a été obtenue en ne plaçant aucun élément de rugosité en amont de la veine d'essai. Le profil de la composante horizontale de vitesse est logarithmique jusqu'à 0,25m au-dessus du sol. Le profil de vitesse du vent est décrit par

$$u_x(y) = \begin{cases} 10,19\text{m}\cdot\text{s}^{-1} & y > 0,25\text{m} \\ \frac{u^*}{K} \log\left(\frac{y}{y_0}\right) & 0,001 < y < 0,25\text{m} \\ 0 & y < 0,001\text{m} \end{cases} \quad (39)$$

où $u^* = 0,461\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ est la vitesse de frottement, $K = 0,41$ est la constante de von Karmann, $y_0 = 2,91 \cdot 10^{-5}\text{ m}$ la longueur de rugosité. L'échelle longitudinale de turbulence est alors de quelques centimètres.

5.2.2.2 Vent moyen avec une intensité de turbulence forte

La vitesse moyenne du vent à 10 m au-dessus du sol est de $10,2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Une intensité de turbulence de l'ordre de 10% (qualifiée de forte) a été obtenue en plaçant des éléments de rugosité en amont de la veine d'essai. Cette intensité est caractéristique d'un vent de rase campagne. Le profil de vitesse du vent imposé en entrée suit la loi :

$$u_x(y) = \begin{cases} \frac{u^*_1}{K} \log\left(\frac{y}{y_{01}}\right) & y > 0,3\text{m} \\ \frac{u^*_2}{K} \log\left(\frac{y}{y_{02}}\right) & 0,001 < y < 0,3\text{m} \\ 0 & y < 0,001\text{m} \end{cases} \quad (40)$$

où $u^*_1 = 0,745\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $u^*_2 = 0,321\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sont des vitesses de frottement, $K = 0,41$ est la constante de von Karmann, $y_{01} = 3,54 \cdot 10^{-3}\text{ m}$ et $y_{02} = 9,9 \cdot 10^{-6}\text{ m}$ les longueurs de rugosité. L'échelle longitudinale de turbulence est alors d'environ 0,7m.

5.3 Résultats aérodynamiques

En conditions homogènes, c'est-à-dire sans écoulement (la soufflerie ne fonctionne pas), les données expérimentales acoustiques sont comparées à des résultats numériques issus du code d'éléments finis de frontière MICADO et du code basé sur l'équation parabolique ATMOS.

En présence d'un écoulement dans la soufflerie, les résultats expérimentaux acoustiques sont comparés à ceux issus du code ATMOS en compte l'écoulement par une approximation célérité effective du son. La vitesse de propagation qui vaut c_0 en conditions homogène devient :

$$c(z) = c_0 + \vec{v} \cdot \vec{n} \quad (41)$$

où \vec{v} est le vecteur vitesse du vent, \vec{n} un vecteur unitaire dans la direction de propagation acoustique, de la source vers le récepteur. Dans la veine d'essai, les hauteurs de la source et des récepteurs sont faibles donc on peut considérer que la direction de propagation est à peu près horizontale. Donc $\vec{v} \cdot \vec{n}$ désigne la composante horizontale du vecteur vitesse du vent.

Pour utiliser cette approche, on doit connaître précisément les caractéristiques aérodynamiques de l'écoulement. Les profils aérodynamiques ont été obtenus à l'aide de la méthode PIV, par des mesures à fil chaud et simulés numériquement à l'aide du logiciel Fluent.

5.3.1 Mesures des champs aérodynamiques par PIV

La méthode PIV a été brièvement présentée à la section 5.1.3.3. Des informations complémentaires sont fournies dans l'Annexe D. Cette méthode a permis de cartographier, en termes de champs moyens de vitesse longitudinale et de turbulence, la structure complexe de l'écoulement autour d'un écran et d'un remblai. Seule une partie des configurations testées a été analysée par cette technique coûteuse, principalement au voisinage des obstacles.

Compte tenu de la résolution des capteurs d'images (inférieure à 2000x2000 pixels) et des contraintes d'éclairage et des limites optiques, la caméra utilisée pour cette méthode ne peut cartographier qu'un plan de 0,4x0,3 m². Cinq plans de mesures successifs horizontaux ont été enregistrés (cf. Figure 5-10). La zone d'exploration a ainsi pour dimensions 1,5x0,3 m². Pour la configuration sur sol plan avec écran, la zone couverte par la méthode PIV est la zone d'abscisses [-0,2m ; 1,5m] avec l'écran disposé en x = 0 m.

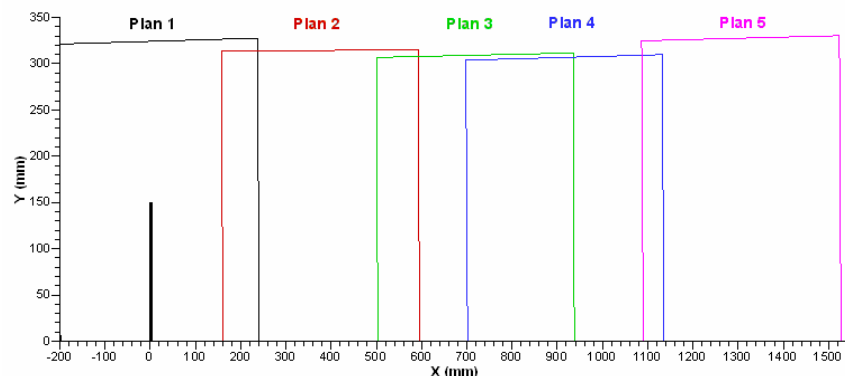


Figure 5-10 : Disposition des cinq plans de mesures dans le cas de l'écran sur sol plan.

Pour obtenir une description précise du champ aérodynamique sur l'ensemble du domaine d'études, un solveur des équations de Navier Stokes, Fluent, a été utilisé pour réaliser des simulations numériques.

5.3.2 Description numérique des champs aérodynamiques avec Fluent

Pour compléter la détermination des caractéristiques moyennes des champs de vitesse et de turbulence sur un domaine d'analyse plus large que celui cartographié par PIV, nous avons eu recours à un solveur des équations de Navier Stokes, le logiciel Fluent. Ce code de simulation (cf. Annexe D) résout sur le domaine de calcul les équations de Navier-Stokes moyennées (approche RANS). Les flux turbulents sont estimés à partir du modèle RKE ($k-\epsilon$ réalisable) à deux équations.

Dans l'Annexe D, les maillages utilisés pour effectuer les calculs Fluent (dimensions du maillage, nombre de cellules, raffinement) sont présentés.

5.3.3 Comparaisons PIV, Fluent et Fil Chaud

On présente ci-dessous les valeurs des champs de vitesses mesurées à l'aide de trois moyens: la méthode expérimentale PIV, les mesures avec fil chaud et les calculs numériques issus de Fluent.

Les mesures PIV ont été réalisées sur deux configurations géométriques :

- Sol plan parfaitement rigide, avec écran droit parfaitement rigide,
- Route parfaitement rigide en déblai, puis remblai parfaitement rigide sans écran.

Ces mesures ont été réalisées en présence des deux profils de vent choisis (cf. section 5.2.2). Pour ces configurations, des mesures au fil chaud ont été réalisées sur trois lignes verticales d'abscisses :

- $x = -1,55$ m c'est-à-dire 1,55 m en amont de l'écran,
- $x = 0$ m donc au niveau de l'écran,
- et $x = 0,45$ m en aval de l'écran.

5.3.3.1 Sol plan rigide avec écran rigide

5.3.3.1.1 Ecoulement uniforme avec faible turbulence

- Représentation des composantes horizontales des champs de vitesse.

Dans cette section, on présente les résultats expérimentaux et numériques correspondant au cas du sol plan rigide avec écran rigide (cf. Figure 5-5 en bas) en présence d'une faible intensité turbulente (cf. section 5.2.2.1). Seuls les profils de vitesses horizontaux ont été représentés car ce sont ceux utilisés dans l'approximation célérité effective du son pour obtenir les résultats numériques acoustiques.

Sur la Figure 5-11, on compare les profils des champs de vitesse horizontaux obtenus avec la méthode PIV, Les calculs Fluent et les mesures réalisées à l'aide de fil chaud. Pour des raisons de lisibilité, tous les profils de vitesse ne sont pas représentés. Les points magenta représentent l'emplacement de la source et des récepteurs présents dans la zone choisie. La Figure 5-11 est une représentation entre -1,55 m et +2 m en abscisse et entre 0 m et 1,5 m pour les ordonnées.

Sur cette figure, on remarque que les profils mesurés au fil chaud et calculés par Fluent se superposent. Cela s'explique par le fait que les mesures réalisées au fil chaud ont été utilisées comme profil d'entrée pour effectuer les simulations numériques avec Fluent. Ainsi, on vérifie sur cette figure l'ajustement exacte de ces deux courbes en $x=-1,55$ m.

Dans la zone dont les abscisses sont comprises entre -0,2 m et 1,50 m, les trois techniques sont comparées sur la Figure 5-12. Sur cette figure, on a représenté les profils de champs de vitesse horizontaux tous les 0,1 m pour des abscisses comprises entre -0,2 m et 1,5 m en ajoutant le profil en $x=0,45$ m car il correspond au lieu de mesures réalisées au fil chaud.

Au point d'abscisse $x = 0,45$ m, les profils PIV et Fluent sont en accord et vérifient la tendance des mesures réalisées au fil chaud. Les profils PIV-Fluent sont très semblables pour les abscisses comprises entre - 0,15 m et 1,50 m et pour les ordonnées comprises entre 0,03 m et 0,20 m. En dessous de $y = 0,03$ m, les profils PIV sont plus arrondis que ceux de Fluent. Cette forme des profils PIV semble surprenante et elle peut être liée à des réflexions optiques près du sol ou bien à l'interpolation des profils à proximité du sol.

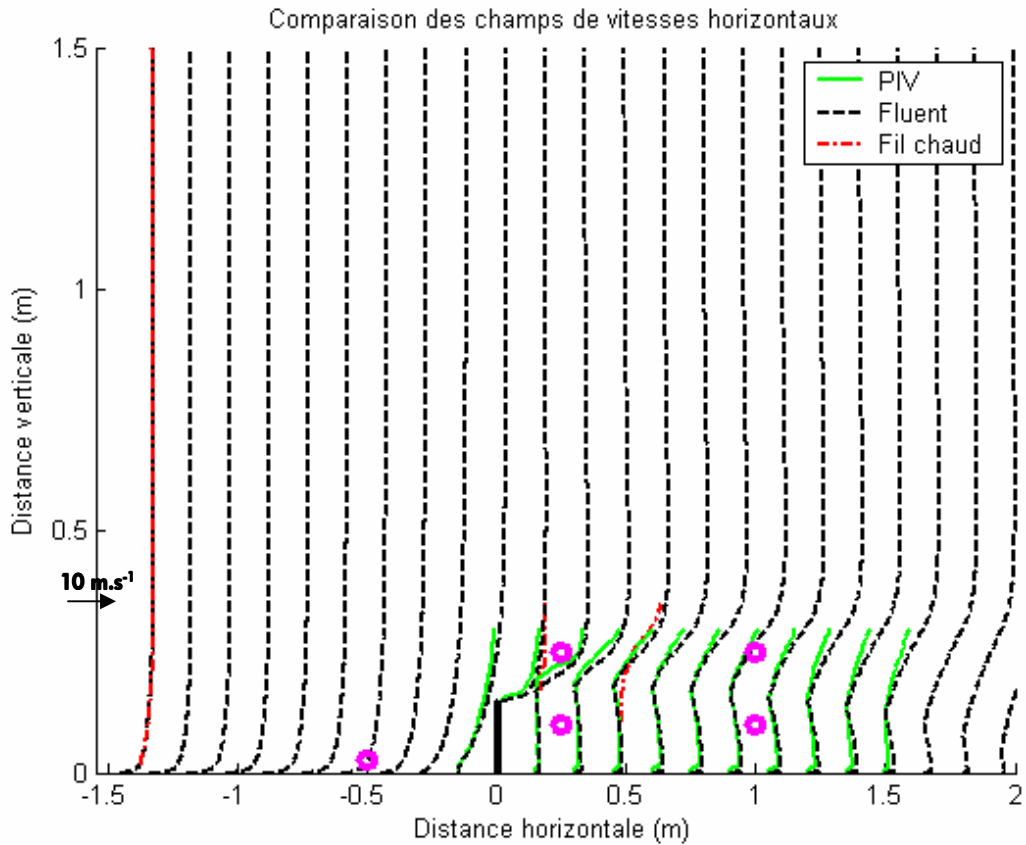


Figure 5-11 : Comparaison des champs de vitesse horizontaux obtenus avec la PIV, Fluent, et les fils chauds pour des abscisses comprises entre -1,5m et 2m et les ordonnées entre 0 et 1,5m.

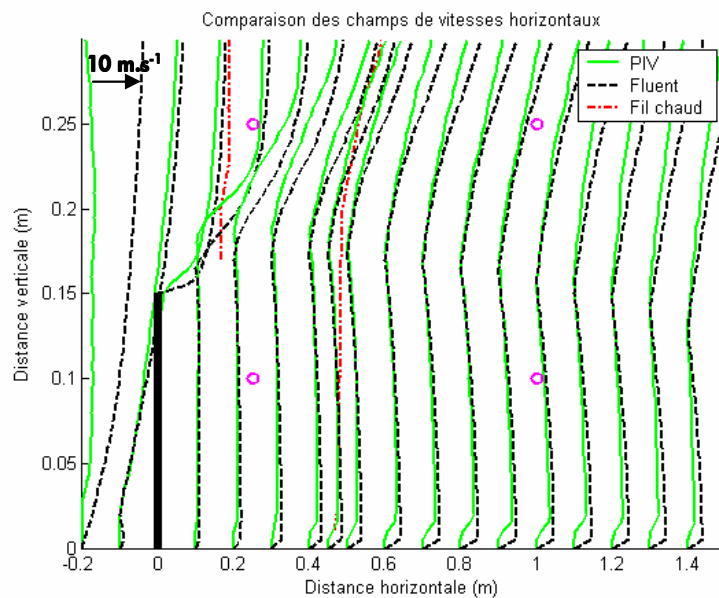


Figure 5-12 : Comparaison des champs de vitesse horizontaux obtenus avec la PIV, Fluent, et les fils chauds pour des abscisses comprises entre -1,5m et 2m et les ordonnées entre 0 et 1,5m.

- Cartographie des vecteurs vitesses de l'écoulement

Dans cette partie, on représente les champs de vecteur vitesse dans la zone d'exploration PIV c'est-à-dire pour des abscisses comprises entre -0,2 et 1,5m et des ordonnées entre 0 et 0,3m.

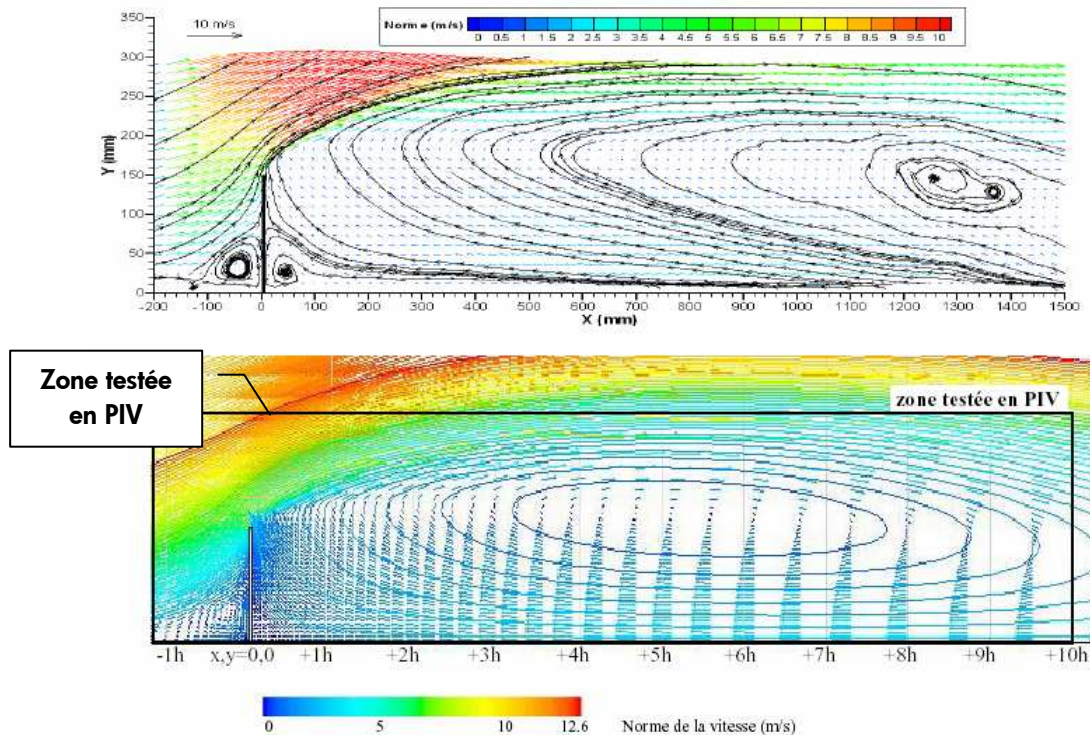


Figure 5-13 : Représentations des vecteurs vitesse et des lignes de courant obtenus par PIV (haut) et Fluent (bas).

Bien que globalement conformes dans leur ensemble, les résultats (cf. Figure 5-13) obtenus par ces deux approches dans la configuration faiblement turbulente montrent quelques différences, notamment en aval de l'obstacle dans la zone de sillage. En amont de l'écran, les deux approches concordent bien : on retrouve dans les deux cas la présence d'une petite re-circulation au bas de l'écran de dimensions comparables et localisée à la même hauteur 0,03m. Le gradient de vitesse depuis cette zone jusqu'à l'arrête supérieure de l'écran sont pratiquement identiques. On retrouve par ces deux approches la présence d'un décollement au passage de l'écran. Dans la zone de sillage, les résultats concernant la zone de recirculation diffèrent. En effet, les positions des centres de ces zones sont obtenus à la même hauteur ($y=0,15m$) mais leurs abscisses diffèrent : $x = 1,3m$ par l'approche PIV et $x = 0,8 m$ avec le logiciel Fluent.

Dans le logiciel Fluent, il n'a pas été possible d'imposer comme condition d'entrée pour les calculs le profil d'intensité turbulente mesuré dans la soufflerie. L'intensité turbulente a été arbitrairement fixée à une valeur constante de 2%. Cette différence avec les conditions expérimentales peut expliquer les différences visibles à la Figure 5-13.

5.3.3.1.2 Ecoulement turbulent

- Représentation des composantes horizontales de vitesse

Sur la Figure 5-14 sont représentées les résultats expérimentaux et numériques correspondant au cas du sol plan rigide avec écran rigide en présence d'une forte intensité turbulente. Seuls les profils de vitesses horizontaux ont été représentés car ce sont ceux utilisés dans l'approximation célérité effective de son pour obtenir les résultats numériques acoustiques. On compare les profils des champs de vitesse horizontaux obtenus avec la méthode PIV. Les calculs Fluent et les mesures réalisées à l'aide de fil chaud. Pour des raisons de lisibilité, tous les profils de vitesse ne sont pas représentés. Les points magenta représentent l'emplacement de la source et des récepteurs présents dans la zone choisie. L'échelle de vitesse utilisée est la même que celle du cas faiblement turbulent.

La Figure 5-14 est une représentation entre -1,55m et +2 m en abscisse et entre 0m et 1,5m pour les ordonnées. Les champs de vitesse Fluent et PIV semblent en bon accord. Les résultats mesurés au fil chaud sont assez proches des données PIV même si le profil obtenu en $x = 0,45m$ a une allure

différente au voisinage du sol : il semblerait qu'un point de mesure (le plus bas en ordonnée) soit à éliminer.

Sur la Figure 5-15, un zoom a été réalisé dans la zone cartographiée par la PIV x appartenant à $[-0,2, 1,5\text{m}]$ et y appartenant à $[0, 0,3\text{m}]$. Les champs de vitesse obtenus par la PIV et Fluent sont très proches et en meilleur accord que dans le cas avec une turbulence d'intensité faible. Mais les profils diffèrent à proximité du sol (y inférieur à $0,03\text{m}$). Comme dans la section précédente, on peut faire penser que les erreurs sur les profils PIV peuvent être liés à des réflexions optiques sur le sol.

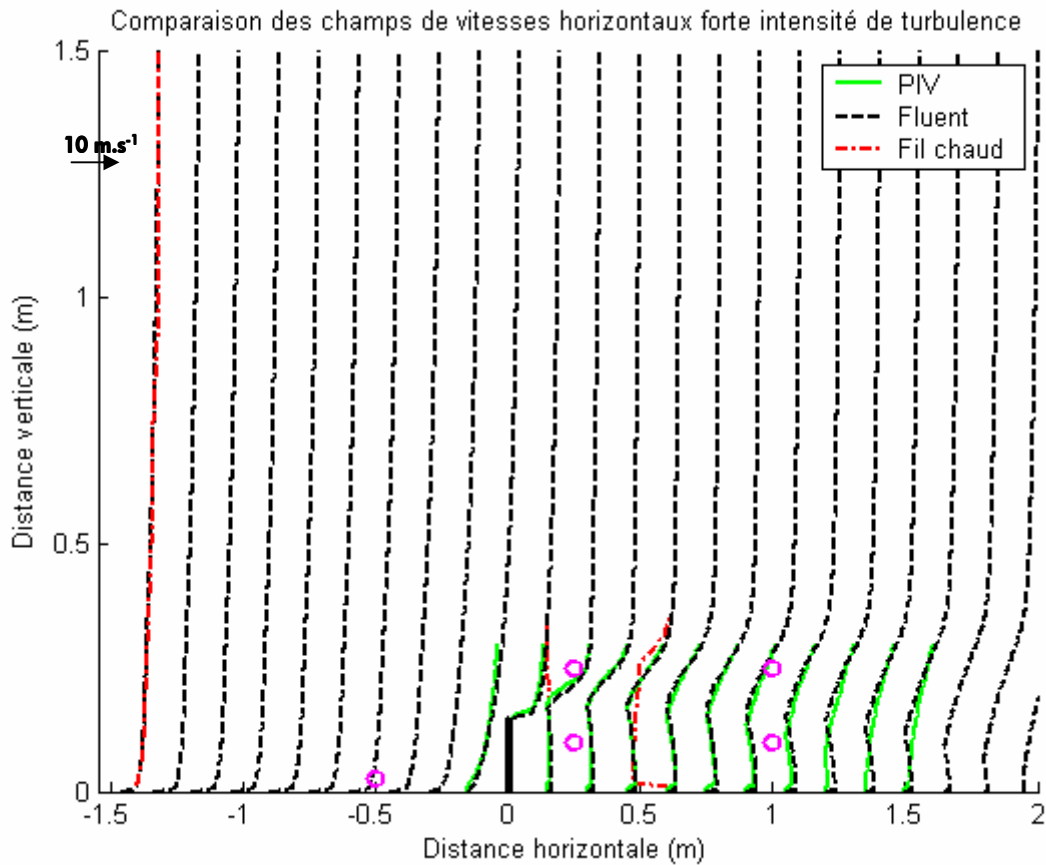


Figure 5-14 : Comparaison des champs de vitesse horizontaux obtenus avec la PIV, Fluent, et les fils chauds

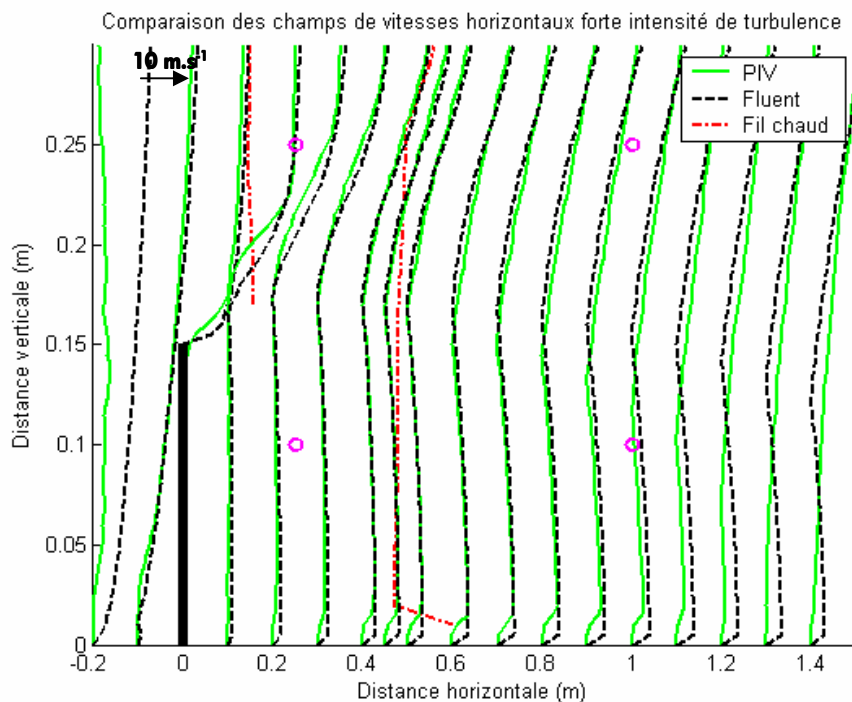


Figure 5-15 : Comparaison des champs de vitesse horizontaux obtenus avec la PIV, Fluent, et les fils chauds.

- Cartographie des vecteurs vitesse de l'écoulement

Dans le cas d'une intensité de turbulence forte, les résultats obtenus par l'approche PIV et par Fluent et numériques sont très proches (cf. Figure 5-16). Par ces deux approches, on retrouve la présence d'une recirculation au bas de l'écran en amont, le décollement en haut de l'écran et une zone de recirculation en aval. Les positions des centres des zones de recirculation sont identiques 0,8m en abscisse et 0,15 m en ordonnée.

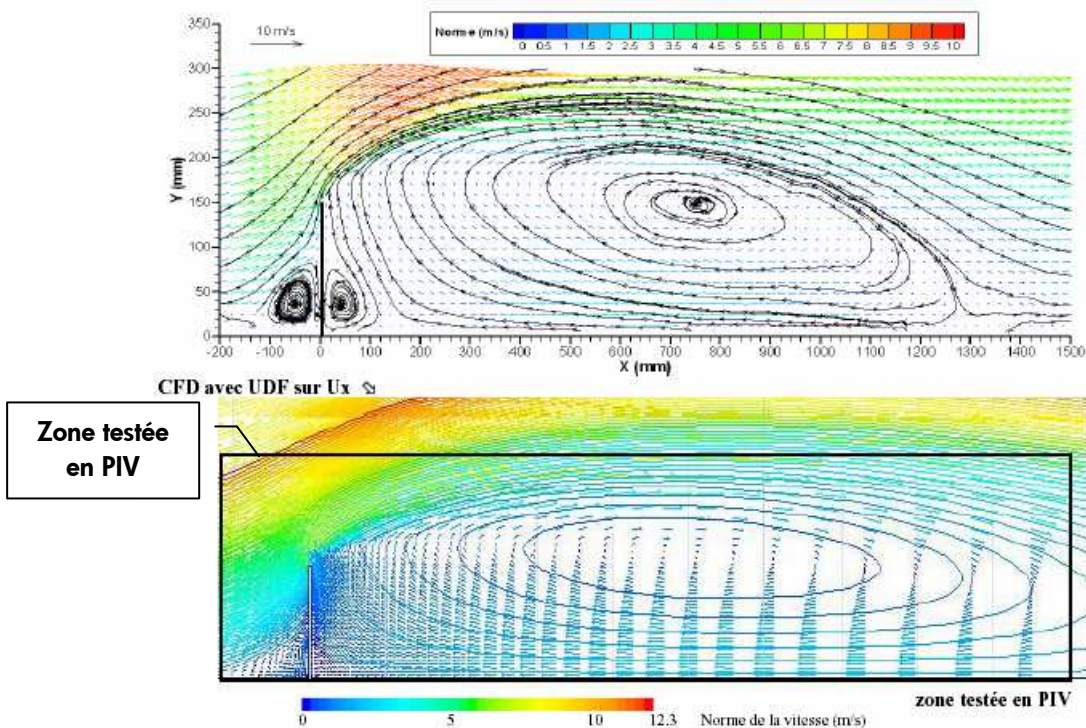


Figure 5-16 : Comparaison des résultats PIV (haut) et simulations avec Fluent (bas), norme de la vitesse et lignes de courant sont représentées.

5.3.3.2 Remblai sans écran

La méthode PIV a été utilisée dans le cas de la configuration géométrique avec présence d'un remblai (cf. Figure 5-7). La hauteur du remblai est de 0,25m. Compte tenu des contraintes liés à la capture d'image, la caméra ne peut cartographier qu'un plan de 0,4x0,3 m². Dans le cas du remblai, cinq plans de mesures successifs horizontaux ont été réalisés en prenant pour hauteur d'origine celle du remblai. La zone d'exploration a pour dimensions 1,5x0,3 m² et correspond aux abscisses comprises entre -0,2m et 1,5m] (avec l'arête du remblai placée en x = 0m) et les ordonnées entre 0,25m ; 0,55m.

Les cartographies des vecteurs vitesse obtenues avec les approches PIV et Fluent sont présentées ci-après.

5.3.3.2.1 Ecoulement faiblement turbulent

La Figure 5-17 présente les champs de vecteurs vitesse obtenus par les approches PIV et Fluent. La méthode PIV permet de mettre en évidence une zone de recirculation qui est localisée au niveau de l'arête du remblai. Le centre de cette zone est situé en x = 0,14m et y = 0,28m. A partir de x = 0,7m les lignes de courant sont toutes parallèles au sol et l'écoulement est alors stabilisé.

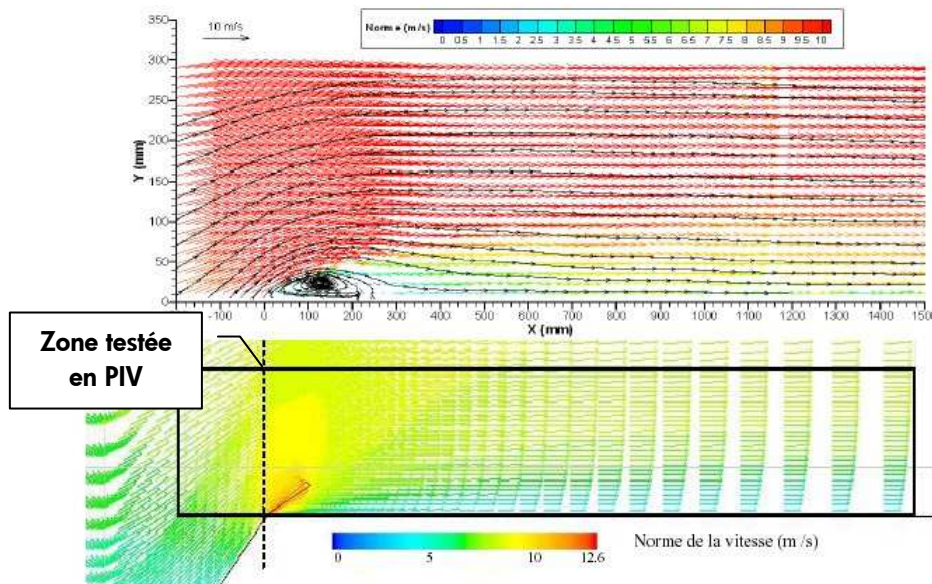


Figure 5-17 : Comparaison des résultats PIV (haut) et simulations avec Fluent (bas), norme de la vitesse et lignes de courant sont représentées.

5.3.3.2.2 Ecoulement fortement turbulent

Sur la Figure 5-18 sont présentées les cartographies des vecteurs vitesses obtenues avec les approches PIV et Fluent. Les recirculations, provenant du décollement de l'air en haut du remblai sont bien visibles par l'approche PIV mais pas reproduites dans les calculs Fluent.

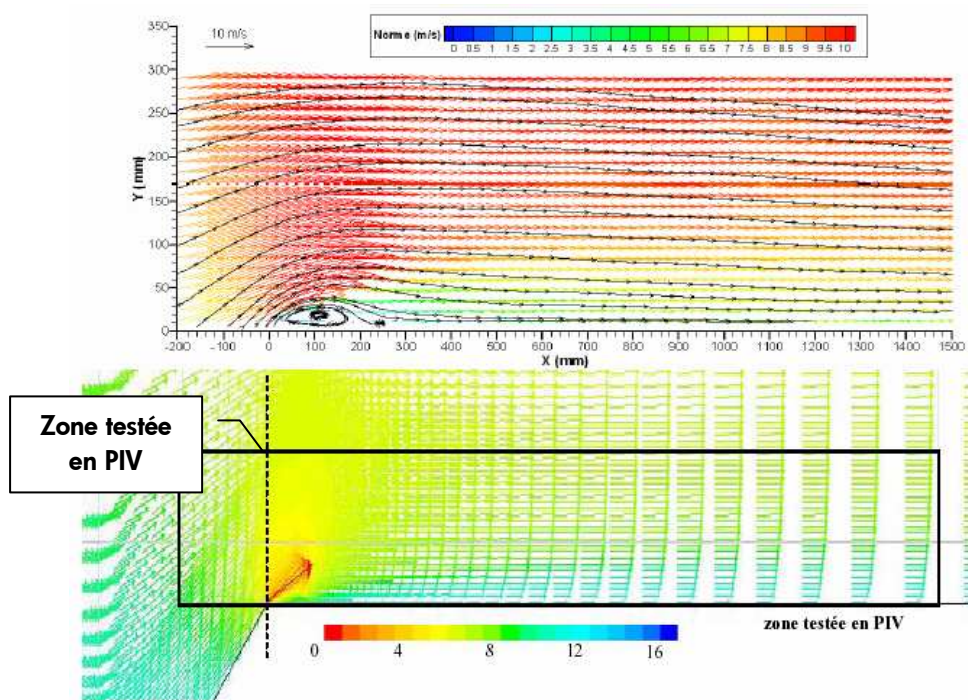


Figure 5-18 : Comparaison des résultats PIV (haut) et simulations avec Fluent (bas), norme de la vitesse et lignes de courant sont représentées.

5.4 Résultats acoustiques

Pour une configuration géométrique et des conditions aérodynamiques données, le nombre de mesures doit être suffisant pour permettre l'observation des fluctuations de niveau de pression acoustique et l'obtention d'une valeur moyenne caractéristique. Ainsi, 50 mesures acoustiques ont été jugées suffisantes pour les trois premières distances source-récepteurs et 100 mesures sont nécessaires pour la dernière distance. La valeur moyenne obtenue est ensuite comparée aux résultats issus des simulations numériques. En l'absence de vent, les résultats expérimentaux peuvent être comparés à ceux issus d'un modèle d'éléments finis de frontière (MICADO). En présence d'un écoulement, un code d'équation parabolique (ATMOS) est utilisé avec une approximation célérité effective du son.

Les résultats sont présentés sous forme d'une planche contenant huit figures correspondant au 8 récepteurs (cf. Figure 5-19). Chaque figure correspond à l'atténuation relative par rapport au champ libre en conditions homogènes pour un récepteur dont la position est indiquée en titre de la courbe d'atténuations. Les positions et les fréquences sont indiquées à l'échelle 1.

Les atténuations relatives par rapport au champ libre sont calculées au niveau d'un récepteur M selon la formule suivante :

$$Att(x, y) = 10 * \log \left(\frac{|P_{tot}(x, y)|^2}{|P_{lib}(x, y)|^2} \right) \quad (42)$$

où $P_{tot}(x, y)$ représente le champ acoustique total et $P_{lib}(x, y)$ le champ libre au niveau du récepteur M de coordonnées (x,y) en conditions homogènes.

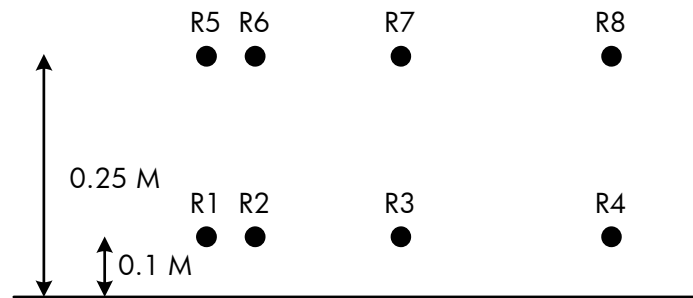


Figure 5-19 : Nomenclature des récepteurs.

Avant la mise en route de la soufflerie, des mesures en champ libre ont été réalisées dans la soufflerie. Pour s'affranchir d'un maximum de trajets réfléchis, le haut parleur a été disposé à mi-hauteur de la veine d'essai et les microphones ont ensuite été placés par rapport au haut parleur (respect des distances source-récepteur horizontales et verticales).

5.4.1 Dispersion des mesures

On s'intéresse à la dispersion des mesures dans deux cas :

- Sol plan rigide sans écran,
- Sol plan rigide avec écran.

Sur la Figure 5-20, on a représenté les atténuations relatives obtenues pour les huit récepteurs pour la configuration sur sol plan rigide en l'absence d'écran (cf. Figure 5-5 en haut). On remarque que plus la distance source-récepteurs augmente, plus l'écart type des mesures devient important. Cela s'explique par le fait que les effets aérodynamiques sont plus marqués au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source.

Quand un écran est ajouté, la dispersion est plus importante (cf. Figure 5-21), ce phénomène est observable dès la seconde distance (30m de la source).

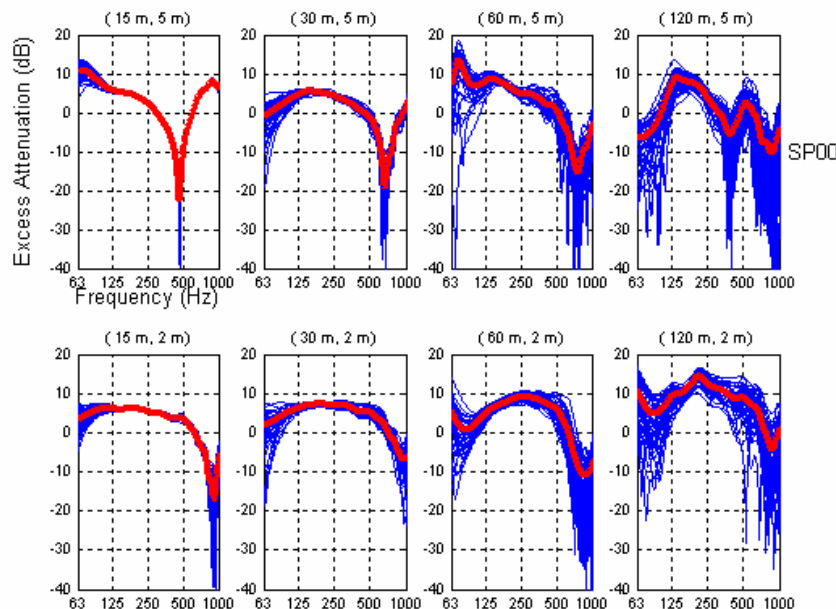


Figure 5-20 : Atténuations relatives par rapport au champ libre sur sol plan rigide en l'absence d'écran, intensité de turbulence faible.

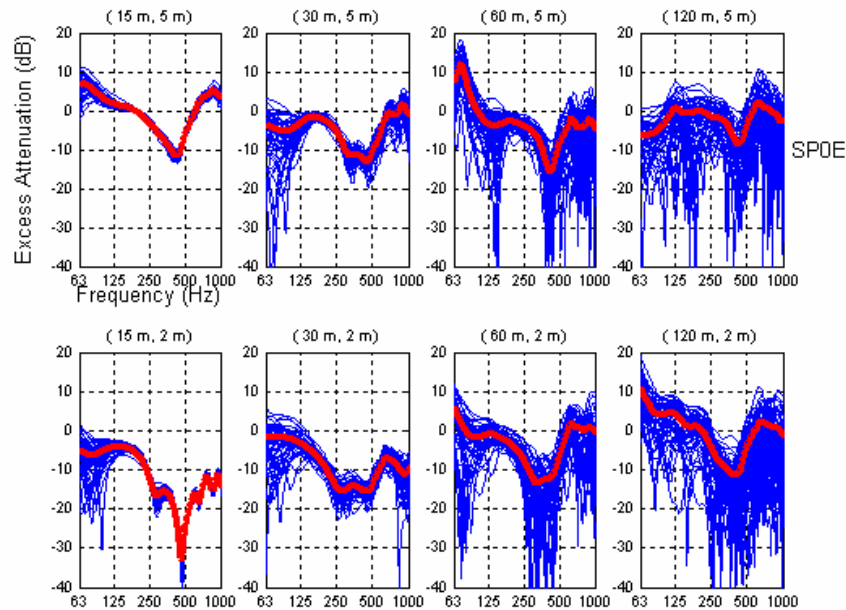


Figure 5-21 : Atténuations relatives par rapport au champ libre sur sol plan rigide avec écran, intensité de turbulence forte.

Sur la Figure 5-20 et la Figure 5-21, on remarque l'apparition de pics d'interférence en dessous de 125 Hz. Ces pics peuvent être liés soit au fonctionnement du ventilateur, soit au tweeter. On effectue alors des mesures de dispersion du champ libre en supprimant le retour dans la soufflerie.

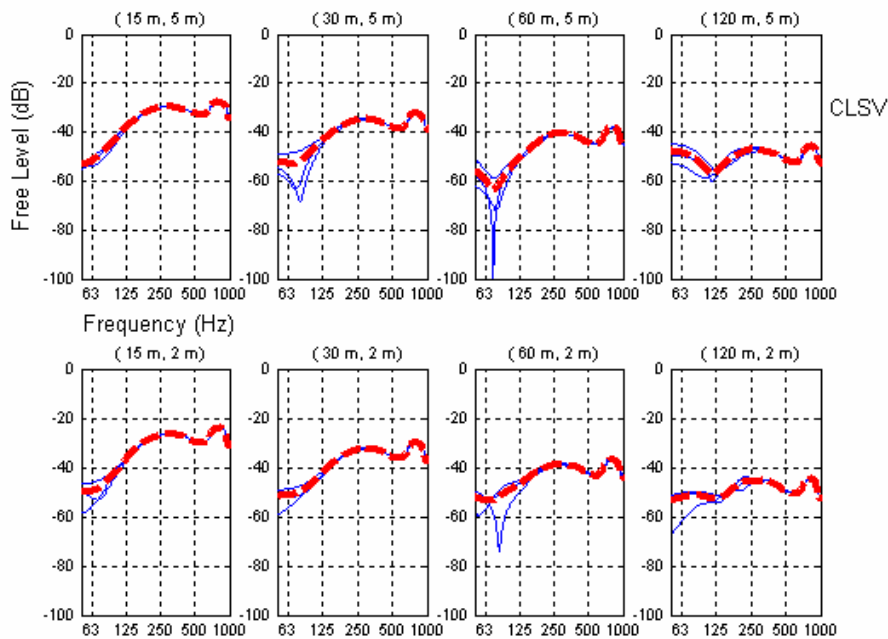


Figure 5-22 : Atténuations relatives au champ libre en milieu homogène quand le ventilateur est à l'arrêt.

On remarque, dans ce cas (cf. Figure 5-22), la présence de pics en dessous de 125 Hz pour les récepteurs R3, R7 et R8. Cette observation tend à montrer que ce n'est pas le ventilateur qui entraîne l'apparition de ces pics d'interférence. De plus, la courbe de fonctionnement du tweeter montre que sa gamme d'utilisation commence à partir de 2500 Hz (cf. Figure 5-3), ce qui correspond à l'échelle 1/20 à une fréquence de 125 Hz. C'est pour ces raisons que les atténuations relatives seront présentées dans la suite de ce chapitre pour le domaine fréquentiel [150, 1000Hz].

5.4.2 Résultats pour le sol plan sans écran

On présente ici les résultats sur un cas particulier simple : le cas du sol plan rigide sans écran en vent portant et en vent contraire. Ensuite un tableau récapitulatif est présenté et l'ensemble des résultats figure dans l'Annexe 2 du chapitre 5.

5.4.2.1 Configurations géométriques en vent portant

5.4.2.1.1 Sol rigide et absence d'écran

On s'intéresse dans cette section au cas de la configuration géométrique simple présentée à la Figure 5-5.

5.4.2.1.1.1 Situation homogène : vent nul

Quand la soufflerie ne fonctionne pas (conditions homogènes), les résultats expérimentaux sont comparés à des calculs numériques issus d'un code d'éléments finis de frontière (MICADO) et un code basé sur l'équation parabolique (ATMOS).

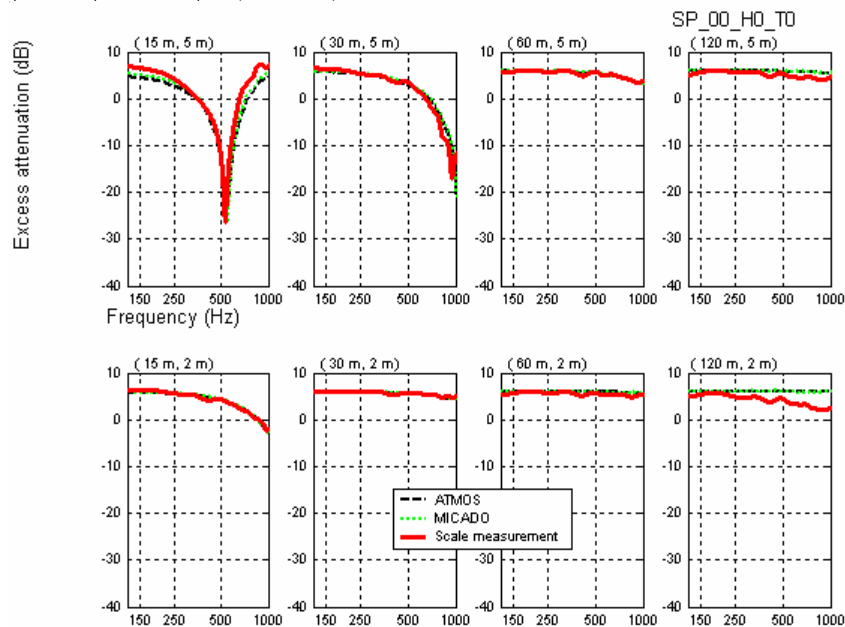


Figure 5-23 : Atténuations relatives au champ libre sur sol plan rigide en l'absence d'écran, situation homogène.

Sur la Figure 5-23, l'accord entre les mesures (courbe rouge) et les calculs numériques (courbe verte pour MICADO et noir pour ATMOS) est très bon. Pour le récepteur R4, on observe une perte de niveau avec la fréquence pour les résultats expérimentaux. En consultant les résultats obtenus en conditions homogènes dans l'Annexe 2 du chapitre 5, on se rend compte que cette tendance n'est pas généralisable. Il est donc possible que l'expérience n'ait pas été menée dans des conditions satisfaisantes (problème ponctuel du tweeter ou du microphone). Dans la section suivante, des résultats obtenus en vent portant sont présentés.

5.4.2.1.1.2 Vent moyen avec une intensité de turbulence faible

En présence de vent, l'approche célérité du son effective (cf. équation (41)) est utilisée en prenant en compte les champs aérodynamiques calculés dans Fluent. On présente dans cette section les résultats obtenus en présence d'un écoulement avec une intensité de turbulence faible.

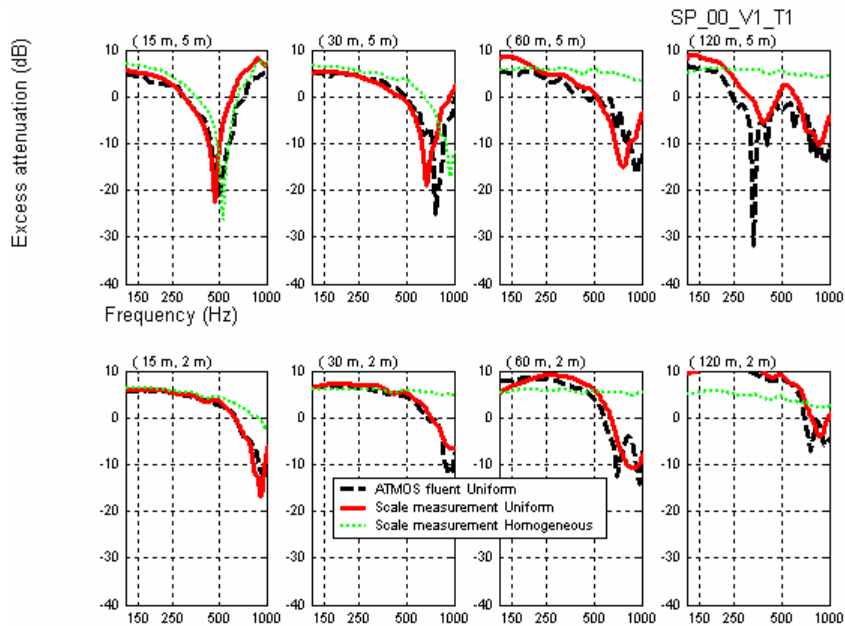


Figure 5-24 : Atténuations relatives au champ libre sur sol plan rigide en l'absence d'écran, vent moyen avec faible intensité de turbulence.

Sur la Figure 5-24, les résultats expérimentaux figurent en rouge et les résultats numériques en noir. Les courbes vertes présentent les résultats expérimentaux obtenus en conditions homogènes. La comparaison entre les mesures en présence d'écoulement permet de voir l'influence d'un profil aérodynamique sur la propagation acoustique. On remarque que l'introduction d'un écoulement modifie la propagation acoustique en créant des interférences et en déplaçant les interférences vers les basses fréquences. Plus on s'éloigne de la source et plus l'influence de l'écoulement est visible. Pour les récepteurs situés à 2 m de hauteur (R1, R2, R3, R4), les résultats numériques sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Toutefois les mesures lissent certaines interférences entre 800 et 1000 Hz. Concernant les récepteurs situés à 5 m de hauteur (R5, R6, R7, R8) les allures des courbes numériques et expérimentales ont la même allure mais présentent un léger décalage visible au niveau des interférences.

5.4.2.1.1.3 Vent moyen avec une intensité de turbulence forte

Dans le cas de l'écoulement avec une intensité de turbulence forte, les résultats sont présentés sur la Figure 5-25. La courbe verte présente les mesures réalisées en conditions homogènes. Pour les récepteurs les plus proches de la source, l'influence de l'écoulement est peu visible (par exemple pour R5). En présence d'un écoulement les courbes des résultats expérimentaux et numériques suivent les mêmes tendances mais présentent parfois un léger décalage.

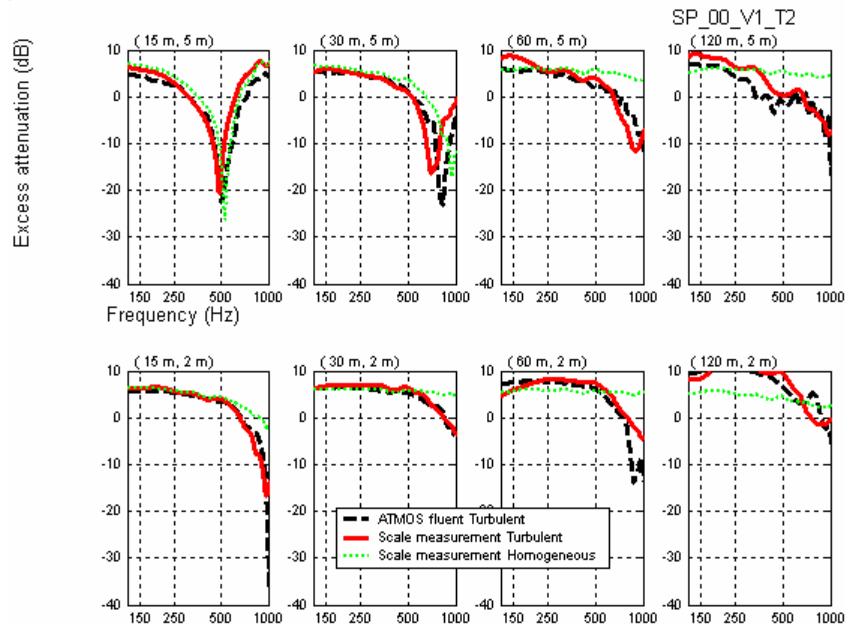


Figure 5-25 : Atténuations relatives au champ libre sur sol plan rigide en l'absence d'écran, vent moyen avec forte intensité de turbulence.

5.4.2.2 Configurations géométriques en vent contraire

Dans la soufflerie, pour réaliser les mesures en présence d'un vent contraire, on a inversé les positions de la source et des récepteurs. Ainsi en vent portant, la source était en amont de la soufflerie et les récepteurs en aval et en vent contraire les récepteurs se retrouvent en amont et la source en aval.

5.4.2.2.1 Sol rigide et absence d'écran

5.4.2.2.1.1 Situation homogène : vent nul

On étudie ici la configuration géométrique (cf. Figure 5-5) en conditions homogènes donc on retrouve la situation géométrique et aérodynamique de la section 5.4.2.1.1.1 et on devrait obtenir les mêmes résultats que ceux présentés à la Figure 5-23. Sur la Figure 5-26, pour les récepteurs les plus proches de la source, les courbes expérimentales montrent une différence dans la localisation des pics. Les mesures réalisées en conditions homogènes n'ont été réalisées que trois fois (au lieu de 50 ou 100 en présence d'écoulement). Et pour ces trois mesures les résultats sont identiques. Une explication possible est un mauvais positionnement des récepteurs ou une distance source récepteur mal mesurée.

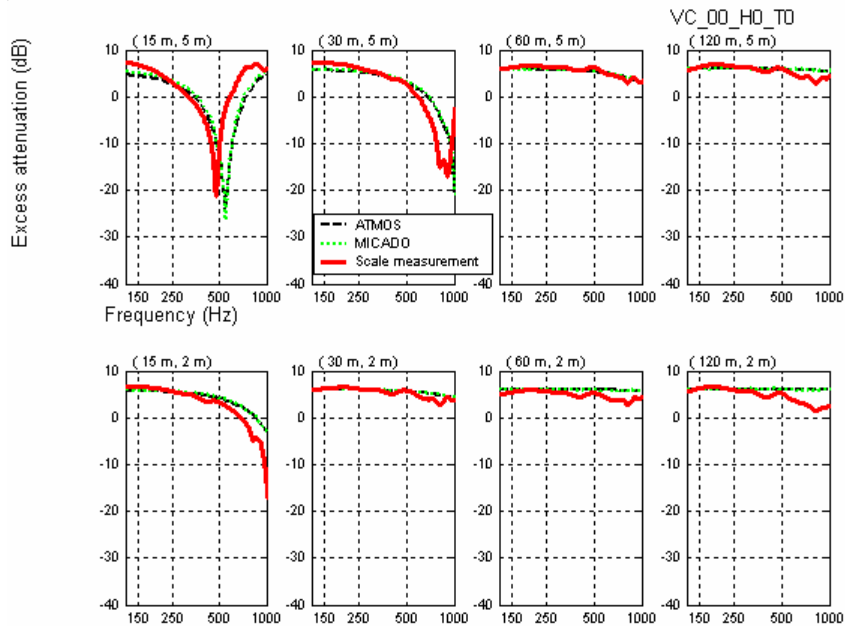


Figure 5-26 : Atténuations relatives au champ libre sur sol plan rigide en l'absence d'écran, vent nul.

Les courbes montrent une différence dans la localisation des pics pour les distances les plus proches de la source. Cette situation est semblable à la configuration géométrique en homogène obtenue dans le cas du montage dit « vent portant » où un bon accord des résultats expérimentaux et numériques avait été mis en évidence (cf. Figure 5-23). Le décalage de ces pics est peut être lié à une variation de la température dans la veine d'essai qui aurait modifié la célérité du son de référence.

5.4.2.2.1.2 Vent contraire moyen avec une intensité de turbulence faible

On étudie la configuration géométrique en présence d'un écoulement en vent contraire avec une intensité de turbulence faible.

Sur la Figure 5-27, les résultats expérimentaux figurent en rouge et les résultats numériques en noir. Les courbes vertes présentent les résultats des mesures effectuées en conditions homogènes. La comparaison entre les mesures en présence d'écoulement permet de voir l'influence d'un profil aérodynamique sur la propagation acoustique. Ainsi, l'introduction d'un écoulement en vent contraire induit une diminution des atténuations relatives au niveau des récepteurs sauf pour la distance source-récepteur la plus courte (les atténuations relatives sont similaires à celles obtenues en condition homogène). Plus on s'éloigne de la source et plus la diminution est significative. Ainsi pour le récepteur R4, une différence de plus de 15 dB est observable à 750 Hz entre les mesures réalisées en conditions homogènes et en présence d'un écoulement.

En présence d'un écoulement, quand la courbe expérimentale est faiblement décroissante, la courbe numérique est quasi plate et à un niveau supérieur (récepteurs R1, R2, R6, R7). Quand la courbe expérimentale présente une interférence, la courbe numérique présente aussi une interférence mais décalée (récepteur R5). Quand la courbe expérimentale subit une décroissance, la courbe numérique est aussi décroissante mais avec une diminution plus importante (récepteurs R3, R4 et R8).

Le fait de ne pas avoir pu imposer comme conditions d'entrée dans Fluent l'intensité de turbulence peut expliquer que l'écoulement est différent et donc les résultats numériques acoustiques obtenus différent des résultats expérimentaux. Une autre explication peut être liée à l'émission du haut parleur. En vent contraire, le niveau de bruit émis n'est peut être pas suffisant pour permettre au niveau des microphones une bonne détection du signal acoustique.

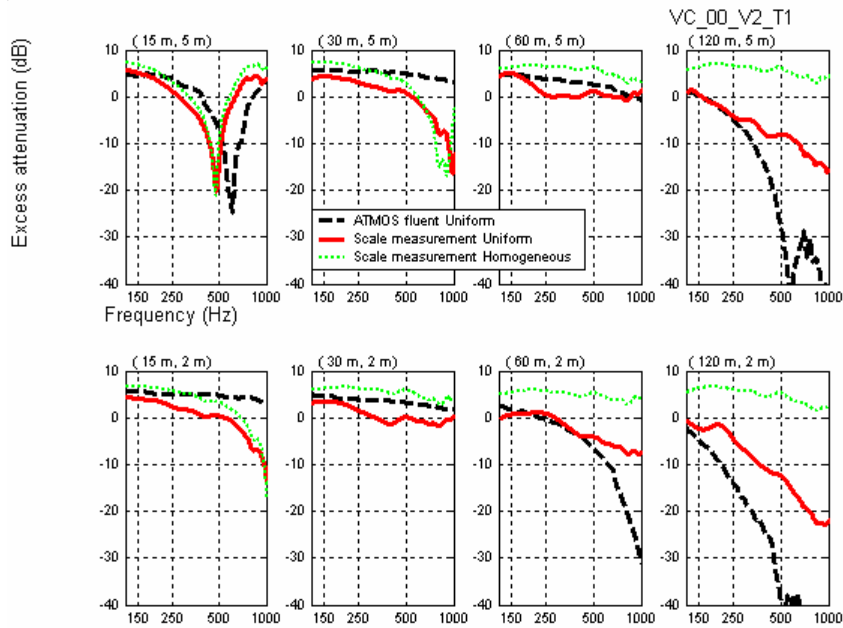


Figure 5-27 : Atténuations relatives au champ libre sur sol plan rigide en l'absence d'écran, vent moyen avec faible intensité de turbulence.

5.4.2.2.1.3 Vent contraire moyen avec une intensité de turbulence forte

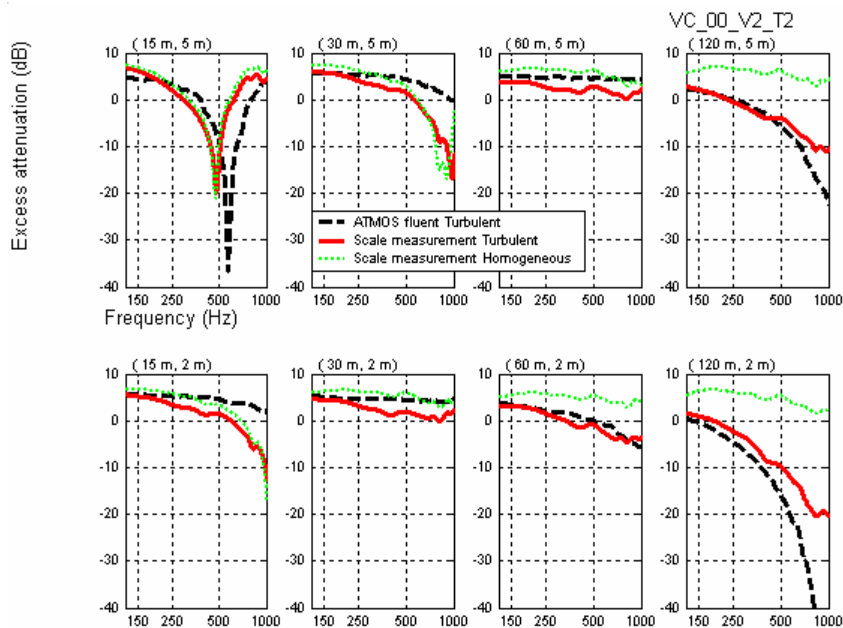


Figure 5-28 : Atténuations relatives au champ libre sur sol plan rigide en l'absence d'écran, vent moyen avec forte intensité de turbulence.

La configuration géométrique du sol rigide en l'absence d'écran est étudiée en présence d'un écoulement en vent contraire avec une intensité de turbulence forte.

Sur la Figure 5-28, les résultats expérimentaux figurent en rouge et les résultats numériques en noir. Les courbes vertes présentent les résultats expérimentaux obtenus en conditions homogènes. En comparant les courbes vertes et rouges, on peut voir l'influence de l'introduction d'un écoulement en vent contraire. On observe les mêmes tendances que dans le cas avec intensité de turbulence faible Figure 5-27 : l'introduction d'un écoulement en vent contraire induit une diminution des atténuations relatives au

niveau des récepteurs sauf pour la distance source-récepteur la plus courte. Plus on s'éloigne de la source et plus la diminution est importante.

L'accord entre les mesures et les résultats numériques est meilleur dans le cas avec forte intensité de turbulence. Cette amélioration est particulièrement visible pour les récepteurs R3, R4, R7 et R8.

5.4.3 Tableau récapitulatif des résultats

Dans le tableau ci-dessous, on récapitule l'ensemble des résultats (cf. Annexe E) en indiquant les problèmes liés à la comparaison des résultats expérimentaux avec les simulations numériques.

Pour des raisons pratiques, on numérote les récepteurs de la façon suivante : de 1 à 4 sur la hauteur la plus faible et plus on s'éloigne de la source, et de 5 à 8 sur la seconde hauteur (cf. Figure 5-29)

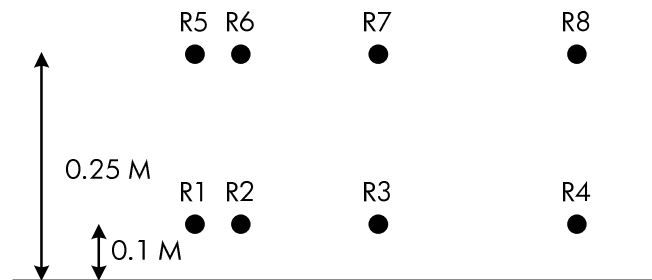


Figure 5-29 : Nomenclature des récepteurs.

Dans le tableau Tableau 5-1, on répertorie l'ensemble des configurations géométriques et aérodynamiques testées dans la soufflerie. Les problèmes sont mentionnés en utilisant la nomenclature des récepteurs. Un « oui » signifie que l'accord entre résultats numériques et expérimentaux est satisfaisant.

Configurations géométriques	Profil de vent			Appréciation des résultats de la configuration
	Homogène	Faible turbulence	Forte Turbulence	
VENT PORTANT				
Sol plan parfaitement rigide sans écran droit,	Oui	Oui mais décalage interférence pour R5-R8	Oui mais décalage interférence pour R5-R8	Oui
Sol plan parfaitement rigide, avec écran droit rigide,	Oui, souci amplitude pics	Souci c	Souci R3, R4, R7, R8	Non (écran pose problème)
Sol plan avec discontinuité, sans écran droit,	Oui, sauf R1, R5	Oui, sauf R1	Oui	Oui
Sol plan avec discontinuité, avec écran droit rigide	Oui, souci amplitude pics	Souci R3, R4, R7, R8	Souci R3, R4, R7, R8	Non (écran pose problème)
VENT CONTRAIRE				
Sol plan parfaitement rigide sans écran droit,	Oui, sauf R1	Souci mais allure, R3, R4, R7, R8	Souci mais mieux que pour faible turbulence, R4, R8	A moitié oui
Sol plan parfaitement rigide,	Allure mais	Non surtout	Non mais allure	Non

avec écran droit rigide,	problème d'amplitude	R3, R4, R7, R8		
Sol plan avec discontinuité, avec écran droit rigide	Oui sauf R3, R4	Oui, sauf R1, R2	Oui	Oui
Sol plan parfaitement rigide sans écran droit	Oui allure	Souci R3, R4, R7, R8	Souci mais allure, R3, R4, R7, R8	Oui
VENT PORTANT				
Remblai parfaitement rigide, sans écran,	Oui, souci amplitude	Pas encore de résultats numériques	Pas encore de résultats numériques	
Remblai parfaitement rigide, avec écran rigide	Oui, sauf R2, R5	Pas encore de résultats numériques	Pas encore de résultats numériques	
Remblai avec discontinuité, sans écran,	Oui	Pas encore de résultats numériques	Pas encore de résultats numériques	
Remblai avec discontinuité, avec écran rigide,	Oui	Pas encore de résultats numériques	Pas encore de résultats numériques	

Tableau 5-1 : tableau récapitulatif des résultats obtenus en fonction de la configuration géométrique et des conditions aérodynamiques.

Ce tableau récapitulatif nous permet d'avoir une vision d'ensemble des résultats. Il met en évidence le manque de corrélation entre les résultats numériques et expérimentaux pour les configurations avec écran.

5.4.4 Configuration géométrique avec écran

Le Tableau 5-1 montre que pour les configurations avec écran, l'accord entre les résultats numériques et expérimentaux est moins bon. On cherche dans cette section à expliquer pourquoi l'accord est moins bon en présence d'écran.

Sur la Figure 5-30 sont présentées les atténuations relatives obtenues pour la configuration géométrique du sol plan rigide en présence d'écran et d'une turbulence faible (cf. Figure 5-5). Pour les récepteurs proches de la source (R1, R2, R5, R6), les courbes à comparer sont celles des mesures (courbes rouges), des calculs numériques avec données PIV (courbe en pointillés bleus), des calculs numériques avec données issues de Fluent (courbe en pointillés noirs). Pour les récepteurs R3, R4, R7 et R8, les courbes à comparer sont celles des mesures (courbes rouges) et celles des calculs numériques avec données issues de Fluent (courbe en pointillés noirs). En effet le domaine couvert par la méthode PIV n'inclut pas ses récepteurs.

Pour R1 et R5, les courbes des données numériques concordent entre elles mais sont un peu décalées par rapport aux résultats expérimentaux. Plus on s'éloigne de la source et plus les différences entre résultats numériques et expérimentaux sont importantes.

Diverses pistes ont été envisagées pour expliquer ces différences. La première concerne le traitement numérique des données mesurées en soufflerie. La seconde s'intéresse à la validité de l'approximation célérité effective du son.

Concernant le traitement numérique des données expérimentales, c'est le filtrage temporel qui a été réexaminé. Plusieurs filtrages des données temporelles ont été réalisés mais aucune amélioration notable n'a été obtenue.

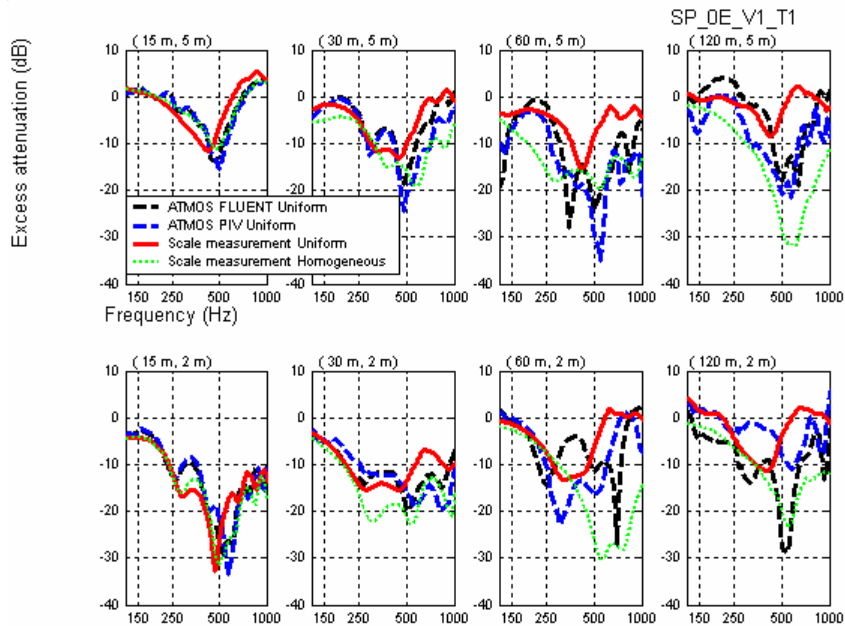


Figure 5-30 : Atténuations relatives au champ libre sur sol plan rigide en l'absence d'écran, vent moyen avec faible intensité de turbulence.

La seconde piste concerne l'approximation célérité effective du son car on peut se demander si cette approche est toujours justifiée dans les zones de recirculation. On rappelle que cette approche consiste à remplacer la vitesse de propagation du son qui vaut c_0 en conditions homogènes par $c(z)$ calculé selon l'équation (43).

$$c(z) = c_0 + \vec{v} \cdot \vec{n} \quad (43)$$

où \vec{v} est le vecteur vitesse du vent, \vec{n} un vecteur unitaire dans la direction de propagation acoustique, de la source vers le récepteur. Dans la veine d'essai, les hauteurs de la source et des récepteurs sont faibles donc on peut considérer que la direction de propagation est à peu près horizontale. Donc $\vec{v} \cdot \vec{n}$ désigne la composante horizontale du vecteur vitesse du vent.

Or dans les zones de recirculation, le vecteur vitesse n'est plus parallèle au sol plan, la norme de la composante verticale peut alors être plus grande que la norme de la composante horizontale. Il est donc possible qu'il existe des zones dans lesquelles l'approximation célérité du son effective ne soit pas valable.

Pour se rendre compte de l'importance de la composante verticale du vent, on trace une cartographie de l'angle θ (en degrés) que l'on définit de la façon suivante :

$$\theta = \arctan(V_y / V_x) \quad (44)$$

où V_x et V_y désignent respectivement la composante horizontale et verticale de la vitesse.

Des cartographies des valeurs de θ sur le domaine d'étude sont réalisées à partir des données numériques de Fluent et expérimentales PIV.

5.4.4.1 Résultats obtenus avec Fluent

Des cartographies des valeurs de θ sont réalisées à partir des données Fluent dans les cas de l'intensité de turbulence faible (cf. Figure 5-31) et forte (cf. Figure 5-32). Les points de couleur magenta représentent la position des sources et récepteurs.

Ces figures mettent en évidence les zones où la composante verticale de la vitesse devient prépondérante devant la composante horizontale. En un point donné, si la couleur est verte cela signifie que l'angle θ a une valeur proche de 0° et donc la composante horizontale de la vitesse a une norme bien supérieure à la composante de la vitesse verticale. Si la couleur en un point donné est rouge foncé (ou bleu foncé), la valeur de l'angle θ est proche de 90° (ou -90°) et cela signifie que la composante horizontale de la vitesse est négligeable devant la composante verticale.

Sur la Figure 5-31, on distingue une zone jaune-rouge en amont de l'écran et une traînée jaune rouge et bleue derrière l'écran. Dans la zone en amont de l'écran, la valeur de θ est de l'ordre de 20° avec une pointe à 60° sur le haut de l'écran en amont. En aval de l'écran, jusqu'à 2 m de l'écran les valeurs de θ prennent toutes les valeurs possibles dans l'intervalle $[-90^\circ, 90^\circ]$. Les valeurs de l'angle θ au niveau des récepteurs sont indiqués sur la figure. Pour les récepteurs R1 et R5 les valeurs de θ sont importantes (respectivement de l'ordre de -20° et 10°). Pour R2 et R6, elles sont de l'ordre de -3° et 1° . Pour R3 et R7 elles sont de l'ordre de -5° et enfin pour R4 et R8 de 0° .

Considérons R4 et R8, vu les valeurs quasi-nulles de θ , l'approximation célérité du son effective paraît valide et donc les résultats obtenus en ces points sont justes. Mais étant donné qu'on a utilisé cette approche dans une zone où elle n'était pas valide (amont de l'écran et surtout en aval jusqu'à 2m derrière l'écran) on a modélisé une propagation acoustique qui n'est pas la réalité et donc les résultats numériques ne sont pas en accord avec les mesures. En effet la méthode parabolique propage pas à pas un champ acoustique sur un axe vertical. Comme tous les récepteurs sont situés dans ou après la zone de recirculation, une erreur a été faite au niveau de cette zone et elle sera « propagée » vers tous les récepteurs.

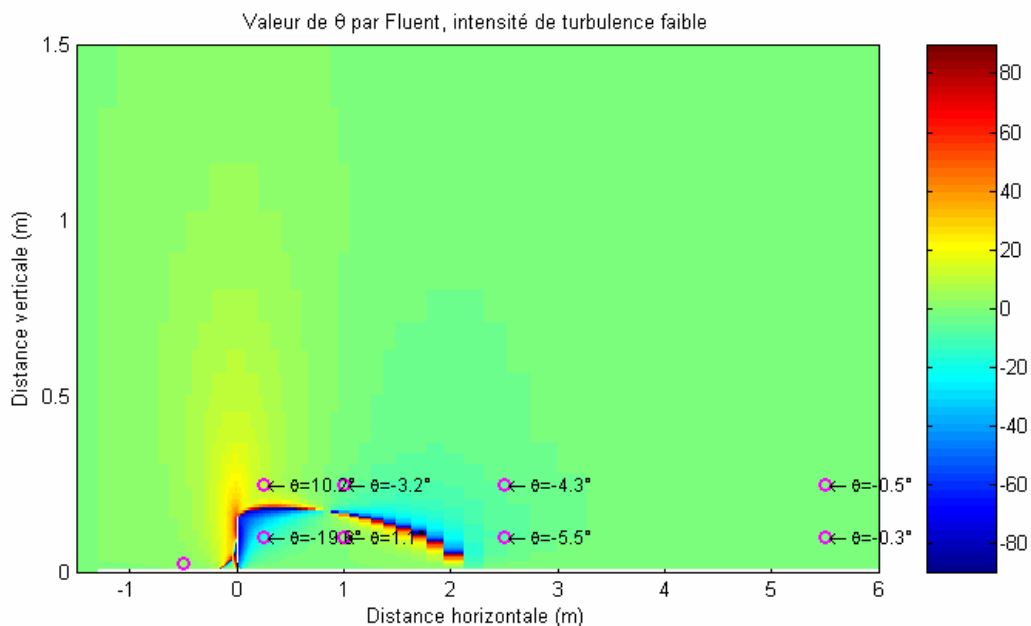


Figure 5-31 : Valeur de l'angle θ dans le domaine d'étude pour la cas du sol plan rigide en présence d'un écran rigide dans le cas de la turbulence faible.

Sur la Figure 5-32 obtenue dans le cas de la turbulence forte, les valeurs de l'angle θ sont importantes dans les mêmes zones que pour le cas de la turbulence faible. Les valeurs obtenues au niveau des récepteurs dans le cas turbulent sont assez proches de celles obtenues pour le profil de turbulence faible.

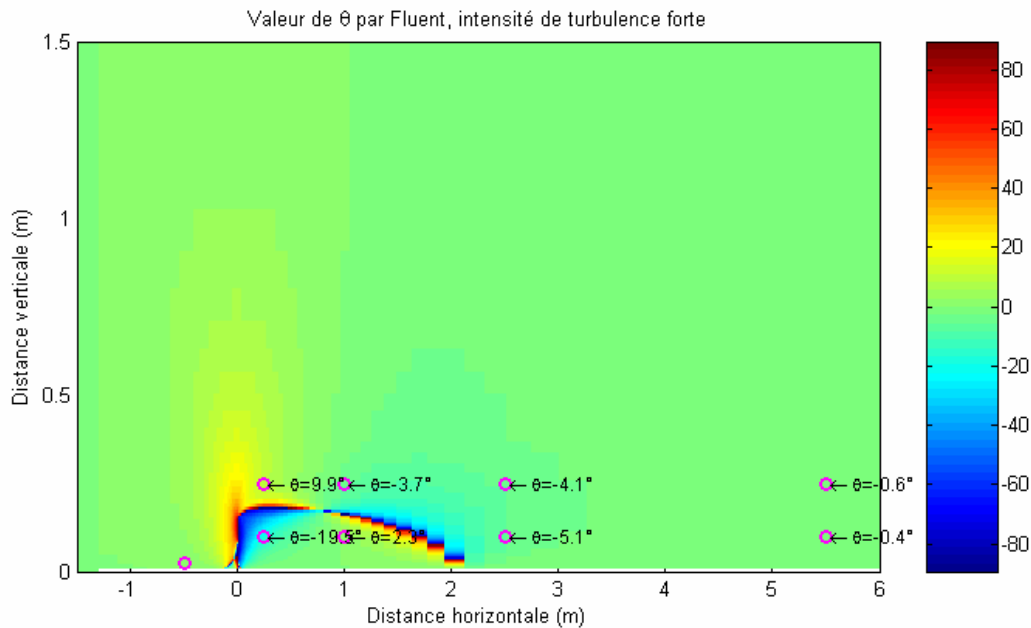


Figure 5-32 : Valeur de l'angle θ dans le domaine d'étude pour la cas du sol plan rigide en présence d'un écran rigide dans le cas de la turbulence forte.

5.4.4.2 Résultats obtenus avec la PIV et comparaisons avec ceux de Fluent

On effectue une cartographie de l'angle θ à partir des données obtenues avec la méthode PIV. La zone cartographiée par la PIV est celle décrite par x appartenant à $[-0,2, 1,5\text{m}]$ et y appartenant à $[0, 0,3\text{m}]$. Les cercles magenta représentent la position des récepteurs.

Sur la Figure 5-33 sont présentés les résultats obtenus dans le cas d'une turbulence faible. En amont de l'écran, on distingue une zone représentative d'une valeur de 20° pour θ . En aval de l'écran une traînée sur laquelle l'angle θ varie de -90° à 90° est visible. Pour $x=1,3\text{m}$ cette palette de valeurs s'inversent : avant cette abscisse θ passe de -90° à 90° puis à 20° quand l'ordonnée augmente mais pour les abscisses supérieures à $1,3\text{ m}$ θ passe de 20° à 90° puis à -90° .

On peut comparer les résultats obtenus avec données PIV avec ceux obtenus avec le logiciel Fluent. Le domaine d'étude de Fluent correspond au domaine de la soufflerie.

Pour que la comparaison soit plus aisée on présente à la Figure 5-34 la cartographie de l'angle θ sur le même domaine que celui cartographié par la PIV. Les valeurs de θ obtenus au niveau des récepteurs sont assez semblables pour R1 et R5 mais assez différentes pour R2 et R6. Sur la cartographie obtenue avec les données Fluent on remarque que, comme pour la PIV, une traînée sur laquelle l'angle θ varie de -90° à 90° est visible après l'écran et que la palette de ces valeurs s'inversent pour l'abscisse $x=0,9\text{m}$. Cette valeur est inférieure à celle déterminée pour la Figure 5-33 pour laquelle on avait déterminé $x=1,3\text{m}$. Cette observation va dans le sens des remarques effectuées dans le paragraphe 5.3.3.1.1 concernant la position des centres des zones de recirculation de la Figure 5-13. En effet l'abscisse de la zone de recirculation déterminée avec Fluent est situé en $x = 0,9\text{m}$ et celle déterminée avec la PIV en $x=1,3\text{ m}$. L'inversion des couleurs correspond donc au centre de la zone de recirculation.

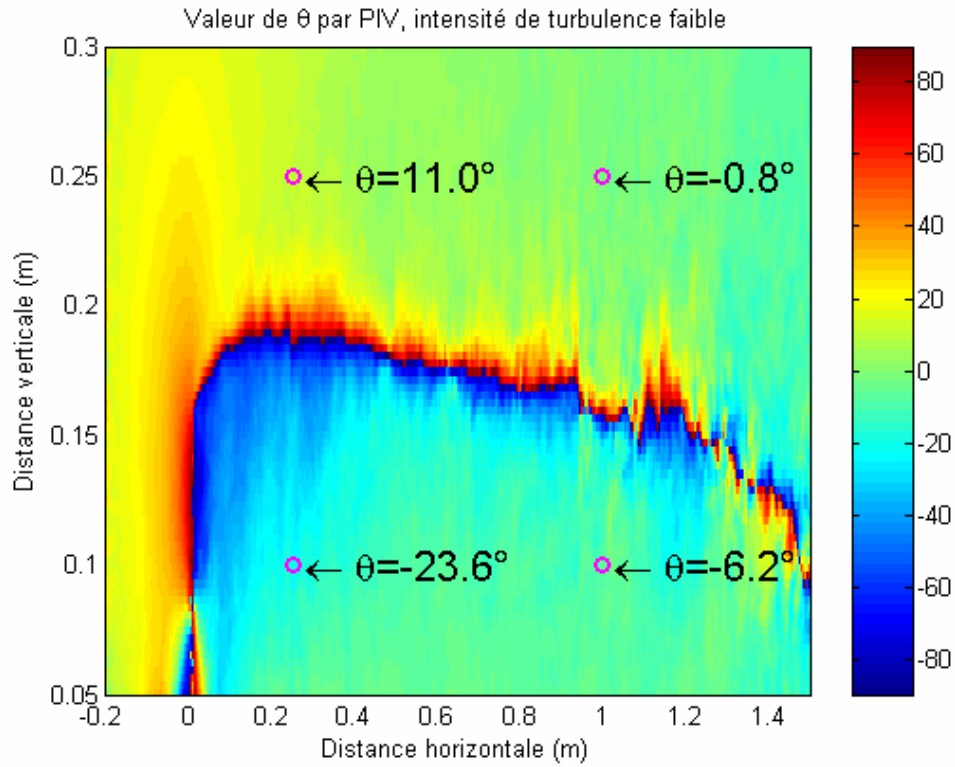


Figure 5-33 : Valeur de l'angle θ dans le domaine d'étude pour la cas du sol plan rigide en présence d'un écran rigide dans le cas de la turbulence faible.

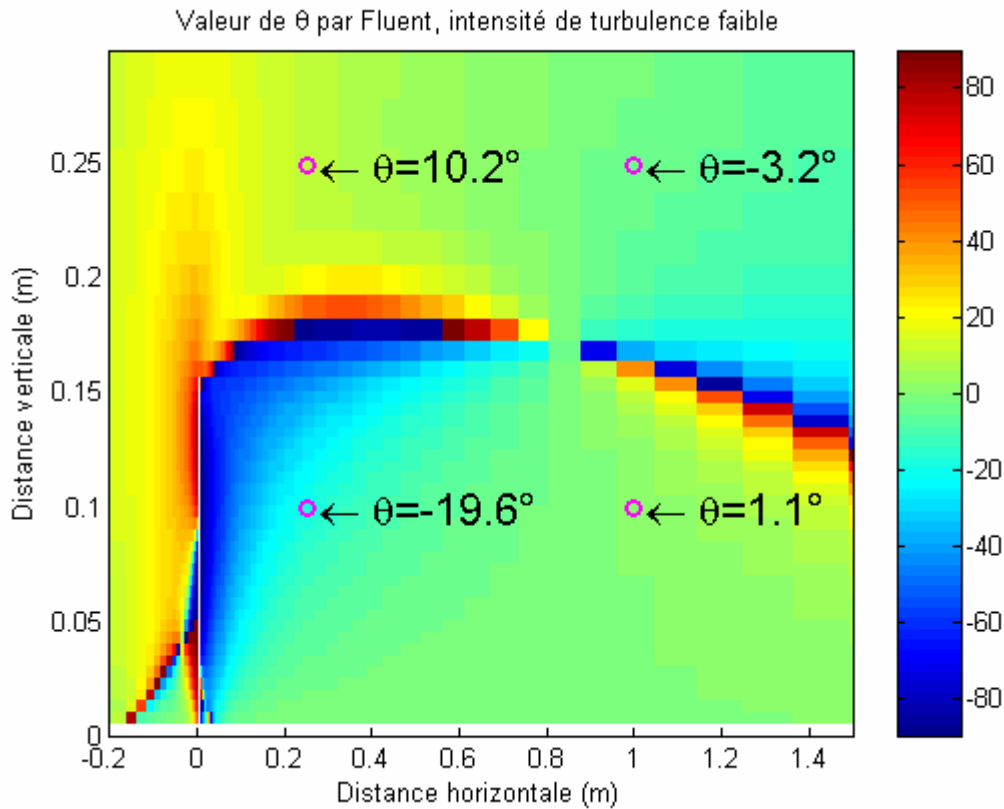


Figure 5-34 : Valeur de l'angle θ dans le domaine d'étude pour la cas du sol plan rigide en présence d'un écran rigide dans le cas de la turbulence faible.

Dans le cas d'un écoulement de forte intensité de turbulence, les cartographies de l'angle θ sont présentées à la Figure 5-35 pour la méthode PIV et à la Figure 5-36 pour Fluent. L'observation des zones de valeurs de θ et d'inversion de la palette de ces valeurs en aval de l'écran nous permet de déterminer les coordonnées des centres des zones de recirculation. Ainsi avec la méthode PIV ses coordonnées sont (0,8 , 0,15 m) et avec Fluent (0,8 , 0,17 m). La position du centre de la zone de recirculation déterminée avec Fluent n'a quasiment pas changé entre le cas d'écoulement faiblement turbulent et l'écoulement fortement turbulent. Avec la méthode PIV, la positions a évolué : en passant à un écoulement d'intensité turbulente plus élevée, le centre de la zone de recirculation s'est déplacé vers l'écran. Cette remarque va dans le sens attendu : plus de turbulence homogénéise plus rapidement l'écoulement et donc la zone de recirculation est plus étroite.

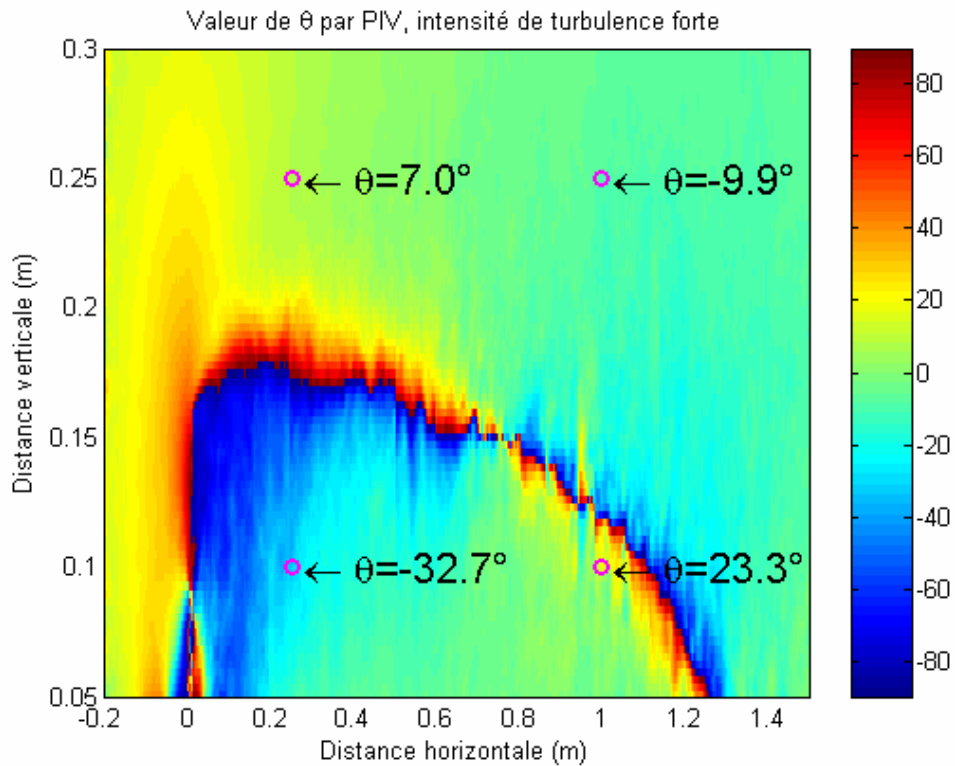


Figure 5-35 : Valeur de l'angle θ dans le domaine d'étude pour la cas du sol plan rigide en présence d'un écran rigide dans le cas de la turbulence forte.

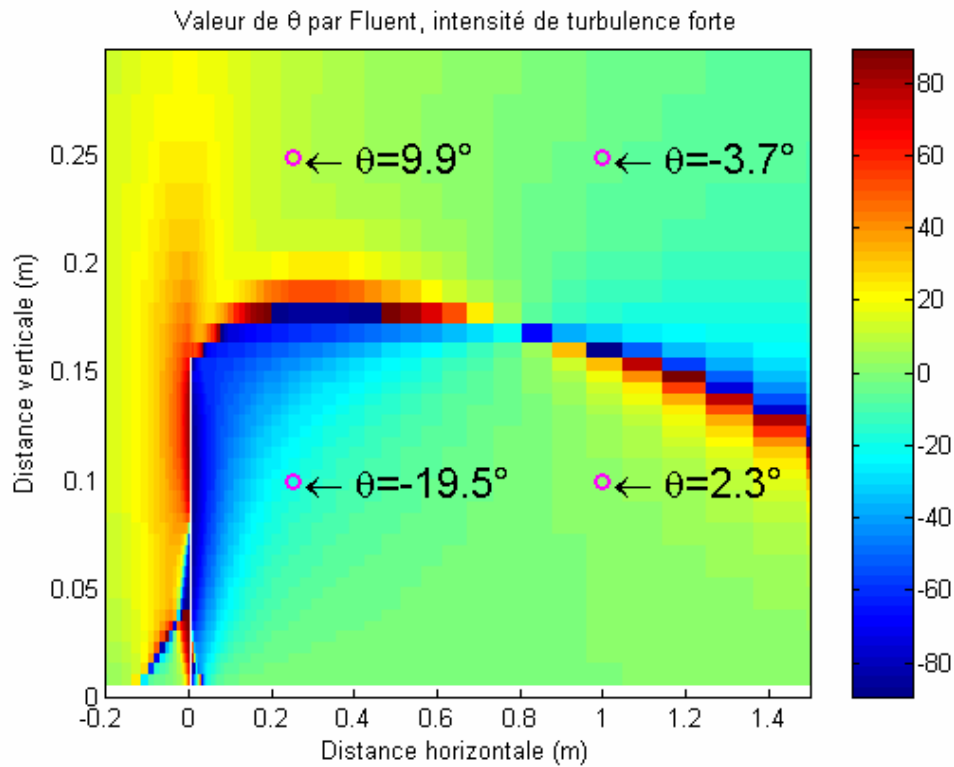


Figure 5-36 : Valeur de l'angle θ dans le domaine d'étude pour la cas du sol plan rigide en présence d'un écran rigide dans le cas de la turbulence forte.

5.5 Conclusion

La campagne en soufflerie atmosphérique décrite a permis de tester un nombre important de configurations géométriques dans des configurations aérodynamiques données. Pour deux de ces configurations géométriques, une cartographie PIV des champs de vitesse du vent a été réalisée. Pour l'ensemble des configurations, les champs de vitesse du vent ont été calculés numériquement à l'aide d'un solveur des équations de Navier Stokes.

Une approximation célérité effective du son a été utilisée pour prendre en compte les champs de vitesse dans un code d'équation parabolique. Les résultats obtenus sont encourageant mais lors de propagation acoustique en présence d'écran, cette approximation n'est plus valide.

Des mesures du spectre de turbulence ont été réalisées par la PIV. Ces mesures n'ont pas été exploitées mais pourront servir de base de données pour la validation d'un code de calcul prenant en compte la turbulence.

Conclusion

Dans cette étude, nous avons étudié l'influence des effets couplés de la météorologie et du relief sur la propagation acoustique en milieu extérieur. Le chapitre 1 a permis de faire la synthèse bibliographique des éléments abordés dans cette étude.

Dans le deuxième chapitre, nous avons montré qu'il n'est pas aisé de distinguer des zones dans lesquelles certains phénomènes seraient prépondérants par rapport aux autres. La configuration testée était celles d'un écran rigide disposé sur un sol rigide et les phénomènes mis en jeu étaient la diffraction et la réfraction. La physique des phénomènes mis en jeu dans la propagation acoustique est complexe et reste un domaine ouvert.

Le chapitre 3 a été l'occasion de présenter une méthode hybride entre les méthodes BEM et GFPE. Cette approche est utilisée pour des configurations complexes dans lesquelles l'une de ces méthodes utilisée seule ne permet pas la prise en compte de tous les phénomènes. Ainsi le domaine de propagation est découpé en zones dans lesquelles on utilise la méthode la plus adaptée. Une technique de passage d'une méthode à l'autre a été mise en place. Les résultats obtenus sont encourageants mais des améliorations sur le « passage » peuvent être effectuées. Ainsi on peut imaginer effectuer un couplage analytique entre deux méthodes bidimensionnelles ou tridimensionnelles.

Dans le chapitre 4, une méthode de prise en compte d'effets météorologiques a été étudiée. Cette méthode utilise la transformation conforme logarithmique. Les résultats obtenus ont pu être comparés à des mesures effectuées sur modèles réduits et à des calculs effectués avec la GFPE. Les résultats obtenus dans des configurations complexes (remblai, écran en T au-dessus d'une discontinuité d'impédance) sont bons. On peut imaginer que pour un profil évolutif en fonction de la distance, le sol soit remplacé par une succession de surfaces cylindriques. Toutefois, cette approche se limite à l'étude d'un profil linéaire de célérité du son. Des recherches ont été effectuées mais non pas abouties pour utiliser des transformations conformes pour un profil logarithmique, par exemple.

Dans le chapitre 5, une campagne de mesures réalisée en soufflerie atmosphérique a été présentée. Cette campagne a permis d'établir une base de données à partir des mesures réalisées sur un grand nombre de configurations acoustiques et pour des conditions aérodynamiques variées. L'utilisation de l'approximation célérité effective du son a été utilisée pour la prise en compte des champs de vitesses du vent dans les calculs numériques. Cette approximation s'est révélée inadaptée dans le cas d'une propagation en présence d'écran. Les données récoltées concernant les fluctuations de vitesse n'ont pas été prises en compte dans le code de calcul. Mais elles pourront être utilisées ultérieurement lors de la prise en compte de la turbulence dans un code de propagation.

Les perspectives de ce travail sont donc variées. Elles concernent la physique des phénomènes en jeu, l'implémentation numérique des effets météorologiques dans les méthodes BEM. Une piste pour prendre en compte des effets météorologiques dans des méthodes BEM est la prise en compte de ces effets au sein de la fonction de Green.

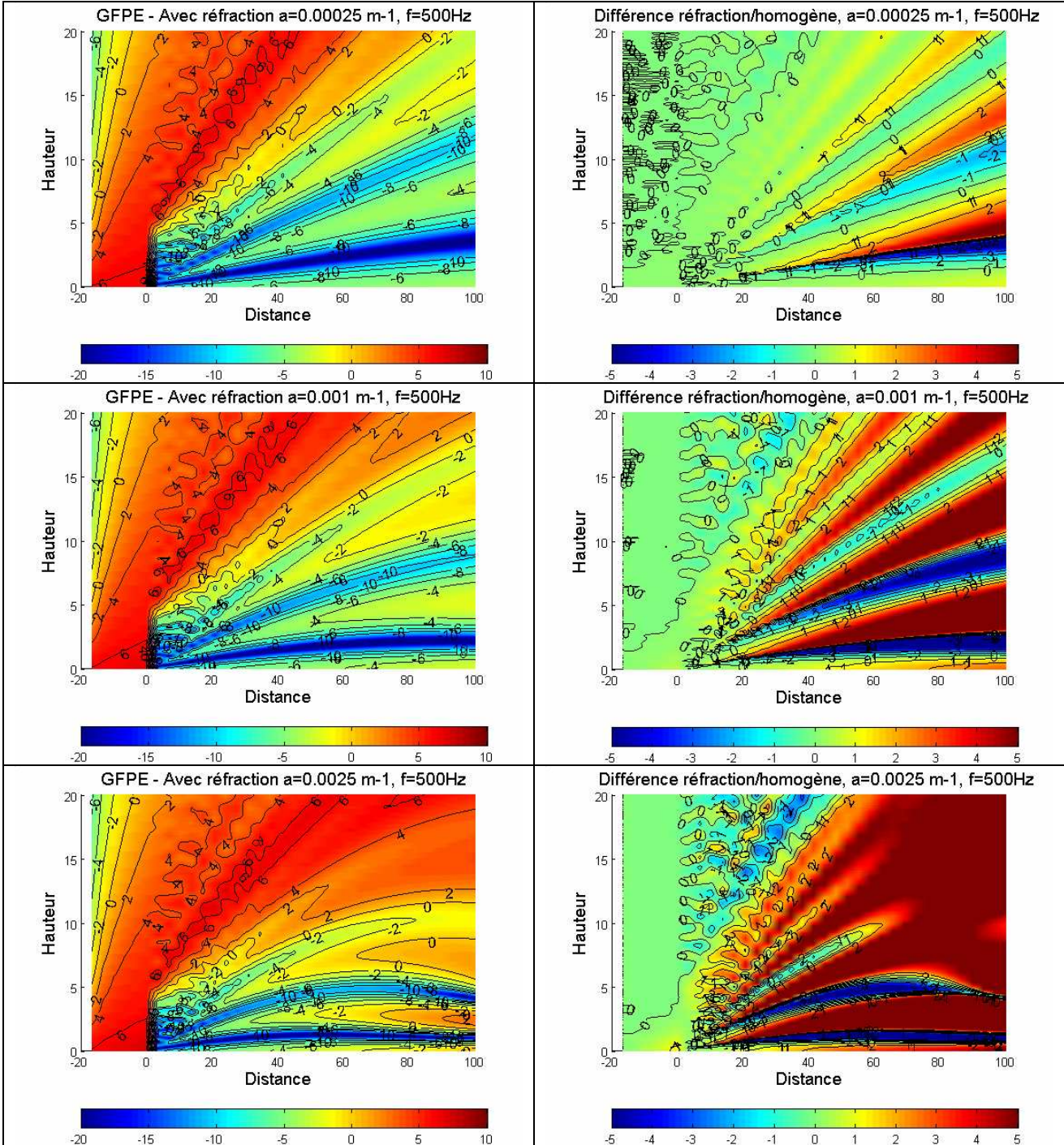
Annexe A : Cartes d'atténuations relatives

Cette annexe présente les cartes d'atténuations relatives (en dB) réalisées pour l'étude de la distance D dans le chapitre 2. Différents paramètres ont été retenus pour étudier leur influence sur D :

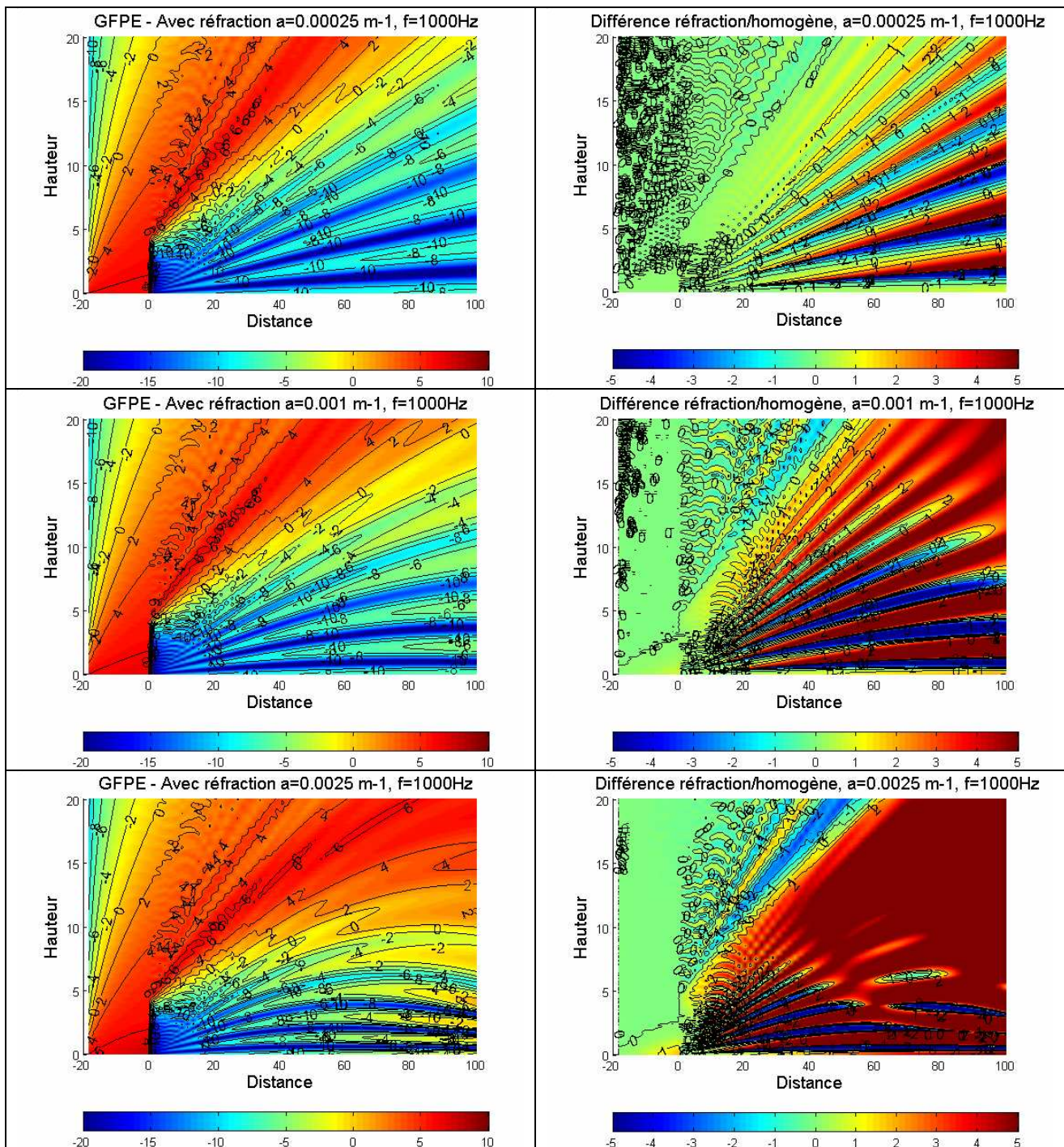
- h représente la hauteur de l'écran et peut varier de 2 à 5 m par pas de 0,5m,
- f est une fréquence centrale d'octave et peut prendre les valeurs : 125, 250, 500 et 1000 Hz,
- α est un paramètre qui caractérise les effets météorologiques.

A.1 Hauteur d'écran 4 m.

A.1.1 $f=500\text{Hz}$, $h=4\text{m}$, variation de a

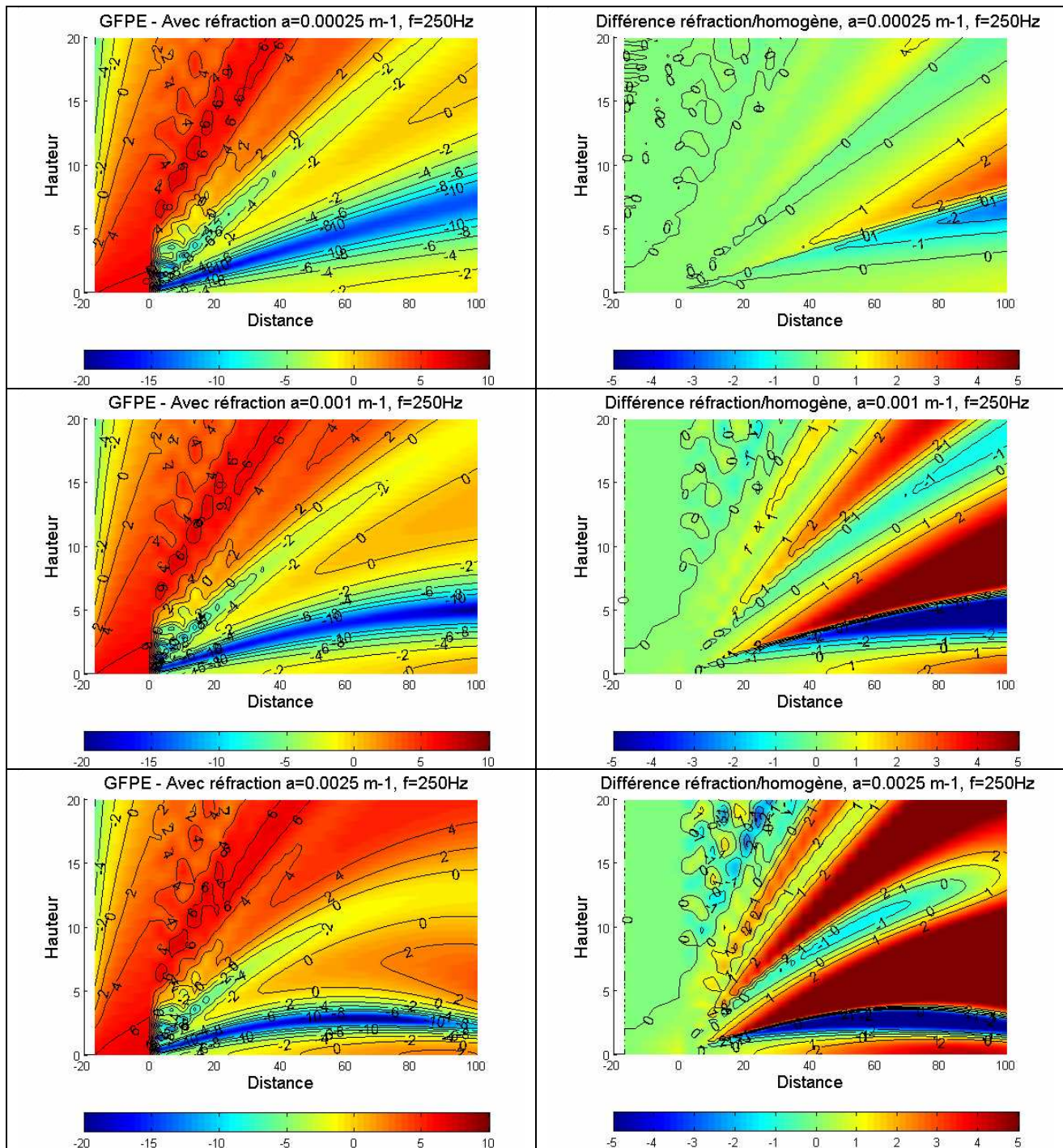


$a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=41,38\text{m}$	$D(1\text{dB})=22,03\text{m}$
$a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=15,25\text{m}$	$D(1\text{dB})=10,17\text{m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=10,17\text{m}$	$D(1\text{dB})=5,08 \text{ m}$

A.1.2 $f=1000\text{Hz}$, $h=4\text{m}$, variation de a 

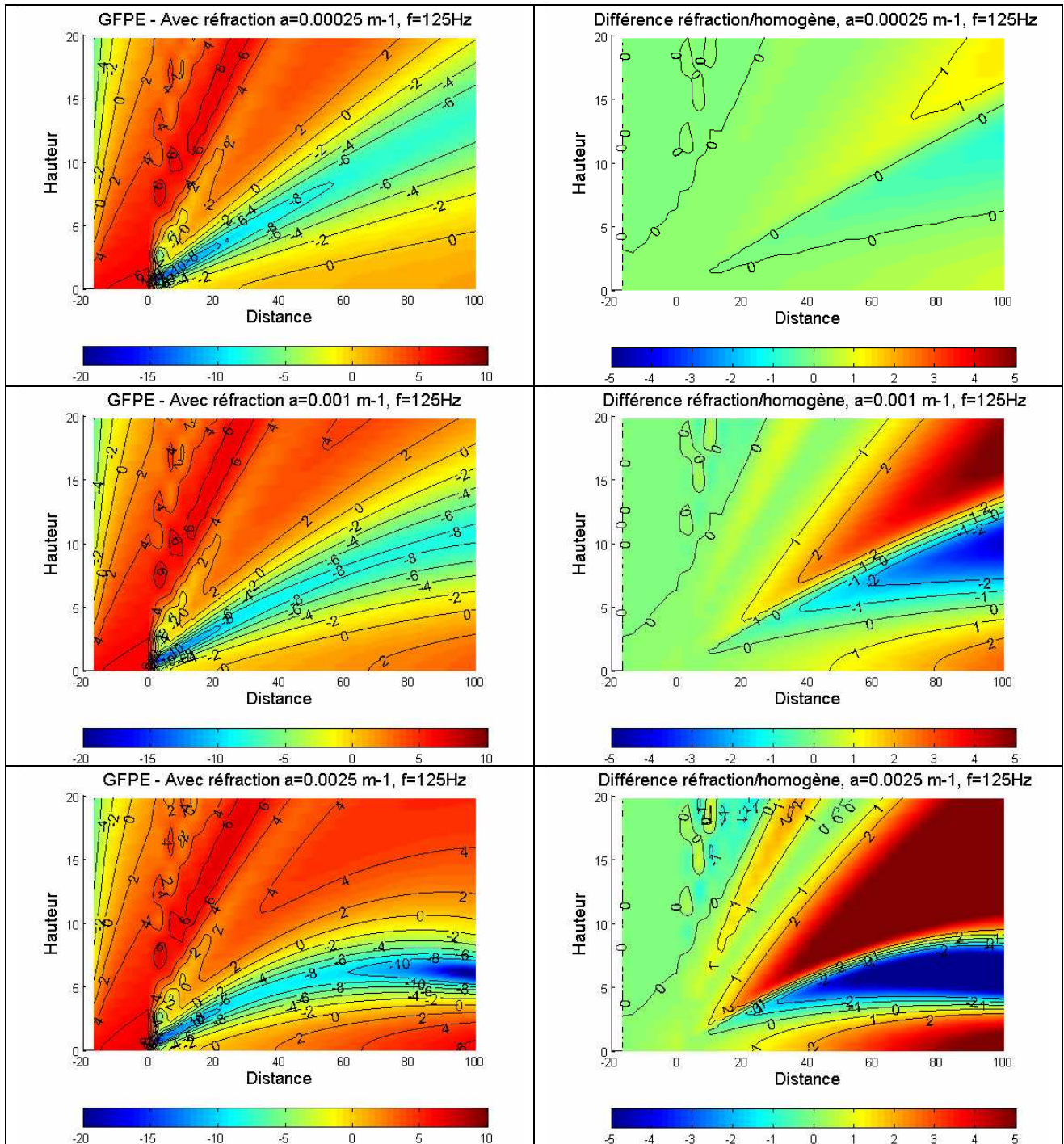
$a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=15,25 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=1,69 \text{ m}$
$a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=10,17 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=1,69 \text{ m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=6,78 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=1,69 \text{ m}$

A.1.3 $f=250\text{Hz}$, $h=4\text{m}$, variation de a



$\alpha=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=72,88 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=42,37 \text{ m}$
$\alpha=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=23,73 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=13,56 \text{ m}$
$\alpha=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=11,86 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=3,39 \text{ m}$

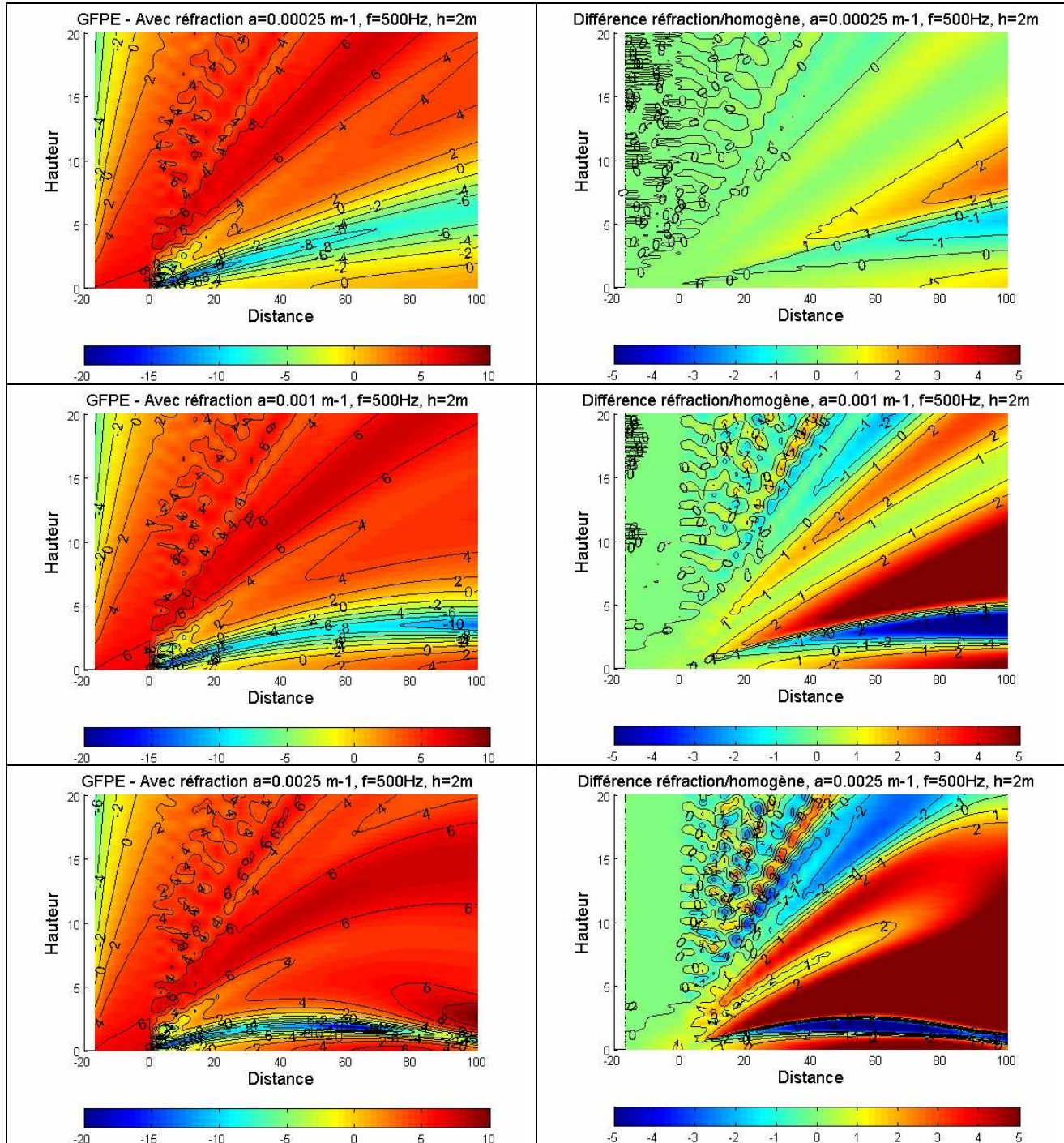
A.1.4 $f=125\text{Hz}$, $h=4\text{m}$, variation de a



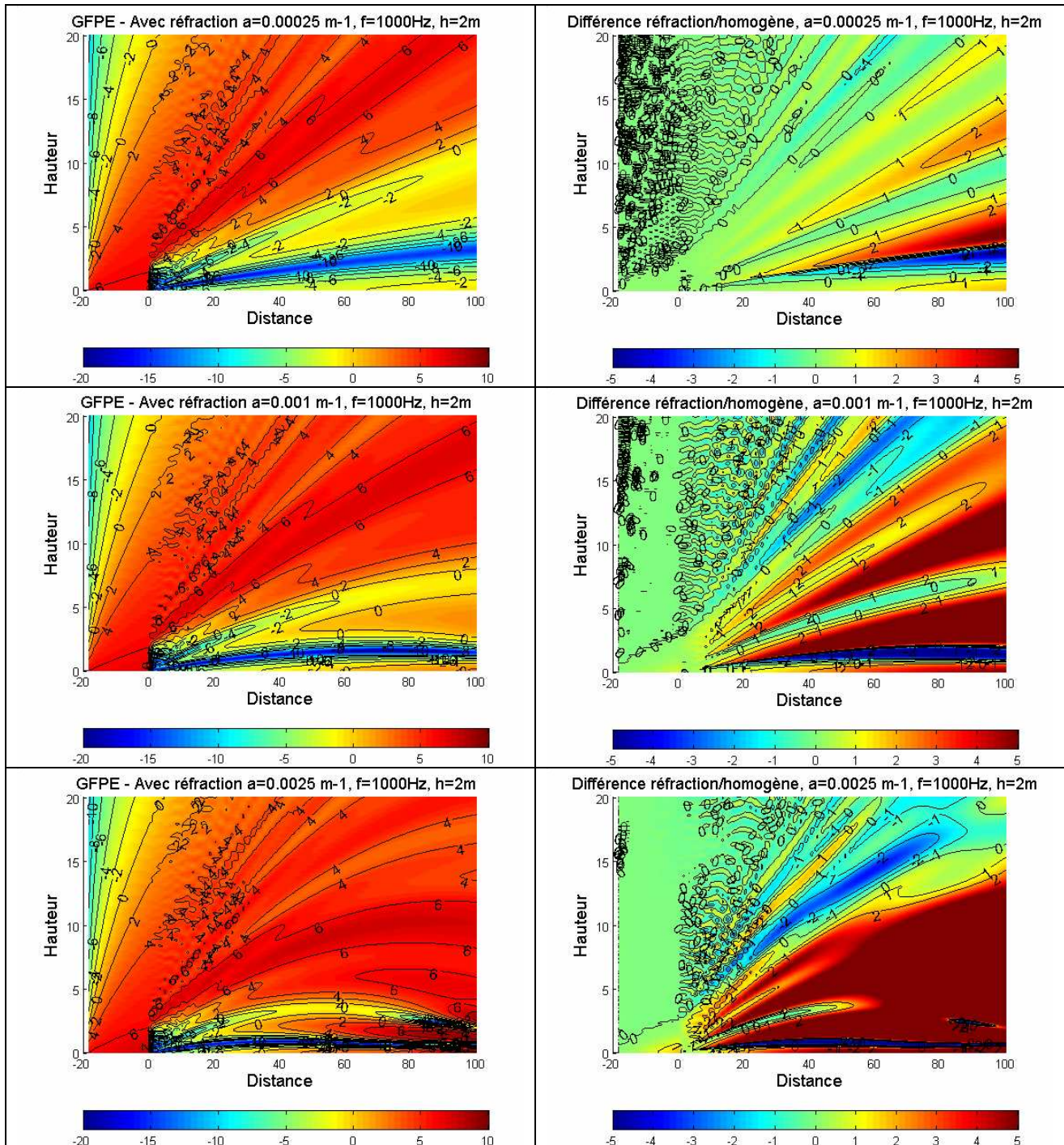
$a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) > 100 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 76,27 \text{ m}$
$a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 38,98 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 20,34 \text{ m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 16,95 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 6,78 \text{ m}$

A.2 Hauteur d'écran de 2m

A.2.1 $f=500\text{Hz}$, $h=2\text{m}$, variation de a

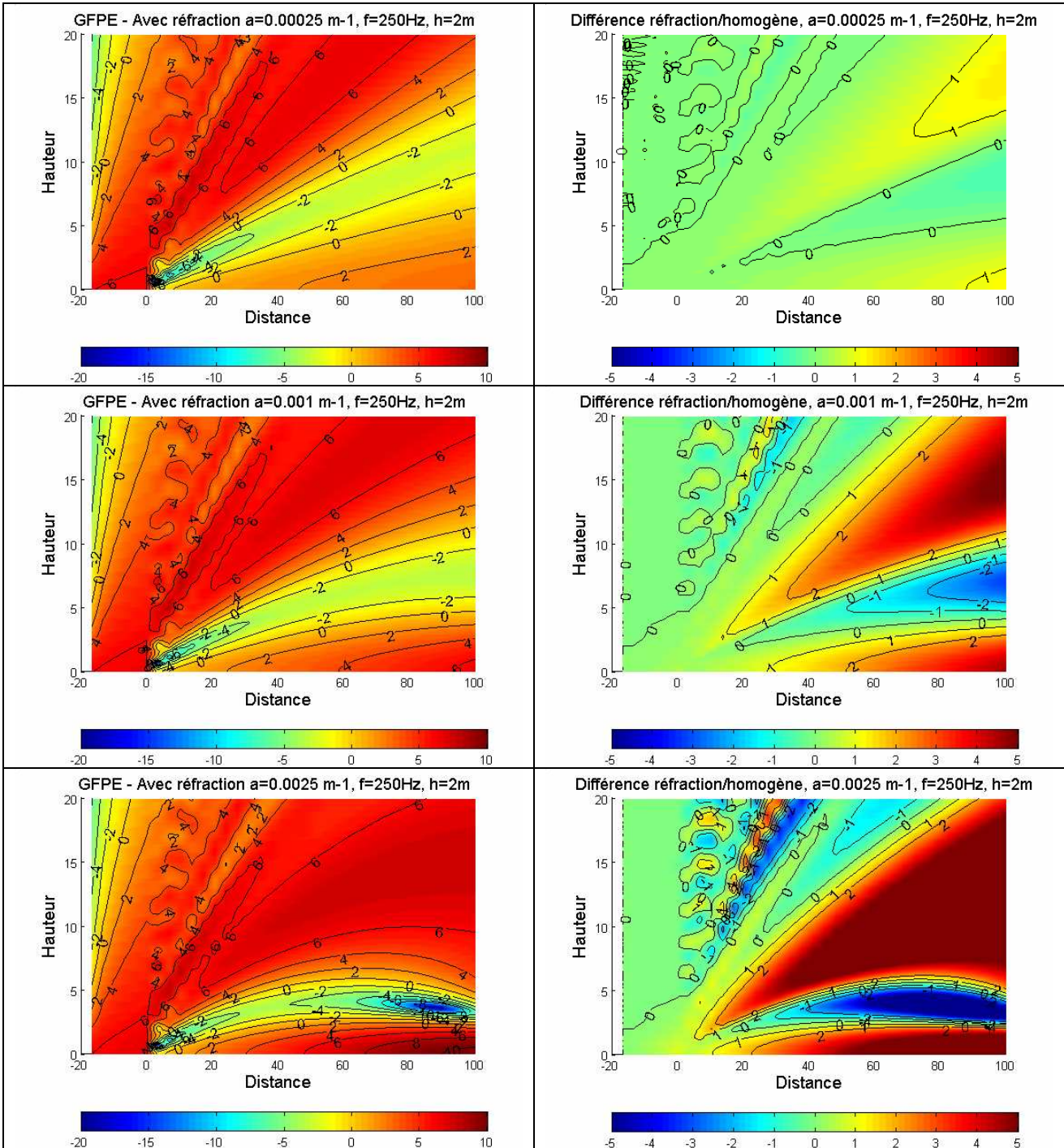


$a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=76,27 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=37,29 \text{ m}$
$a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=28,64 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=6,78 \text{ m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=8,47 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=3,39 \text{ m}$

A.2.2 $f=1000\text{Hz}$, $h=2\text{m}$, variation de a 

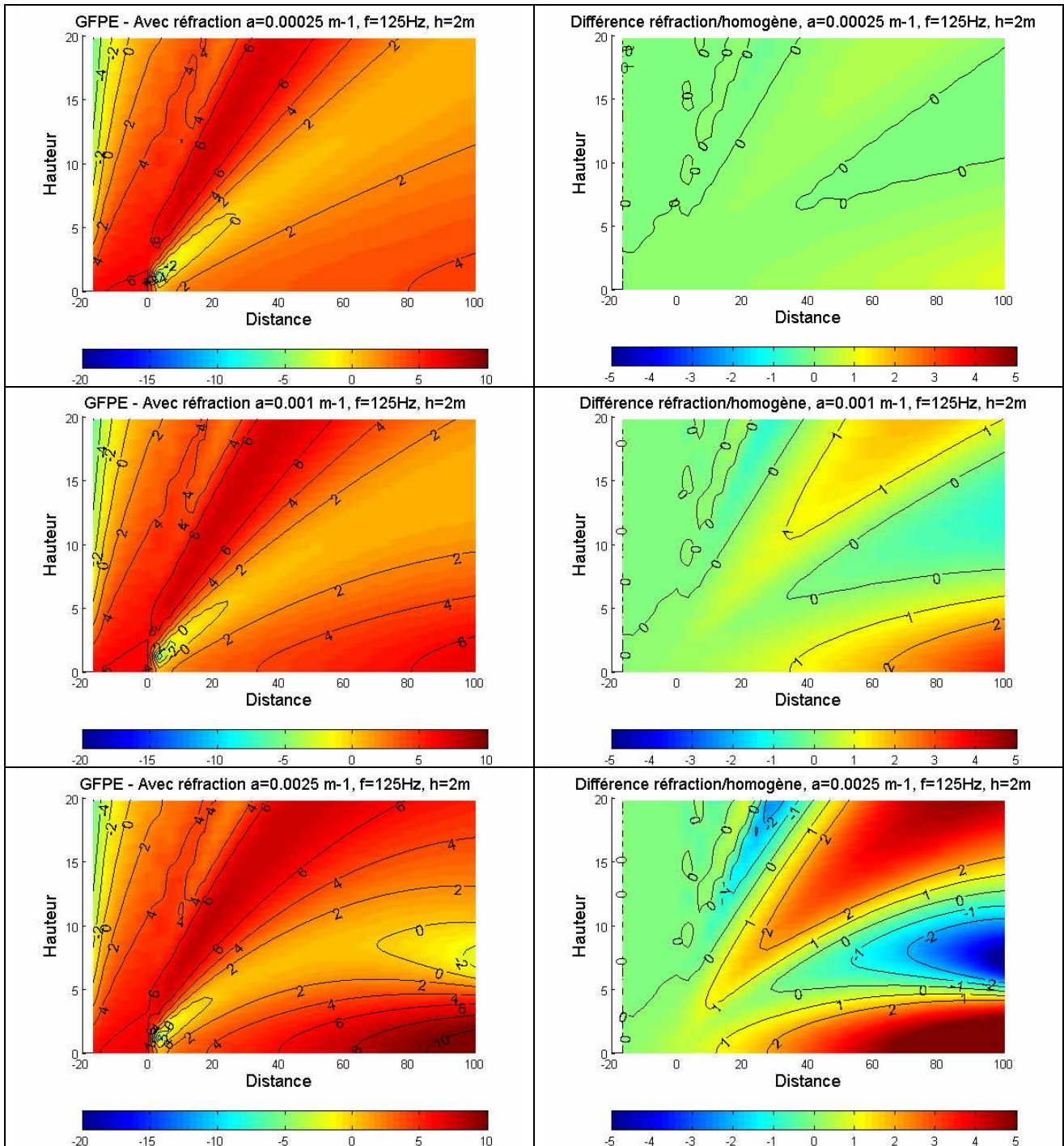
$a=2,5 \cdot 10^{-4}\text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=42,37\text{ m}$	$D(1\text{dB})=22,03\text{ m}$
$a=10^{-3}\text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=11,86\text{ m}$	$D(1\text{dB})=8,47\text{ m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3}\text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=6,78\text{ m}$	$D(1\text{dB})=3,39\text{ m}$

A.2.3 $f=250\text{Hz}$, $h=2\text{m}$, variation de a



$a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) > 100 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 72,88 \text{ m}$
$a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 33,9 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 15,25 \text{ m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 8,47 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 15,08 \text{ m}$

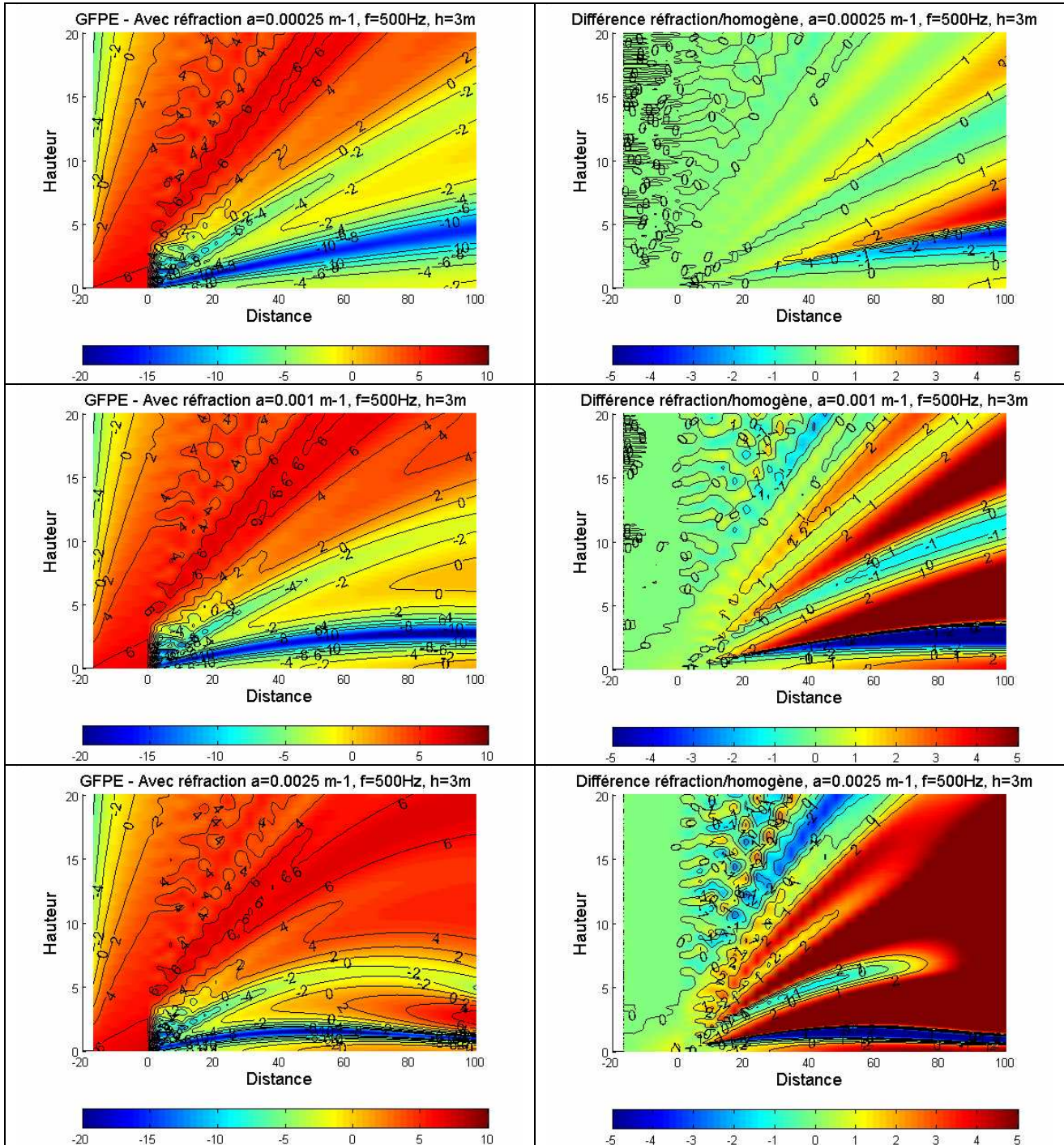
A.2.4 $f=125\text{Hz}$, $h=2\text{m}$, variation de a



$a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) > 100 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) > 100 \text{ m}$
$a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 64,41 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 33,9 \text{ m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 25,42 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 8,47 \text{ m}$

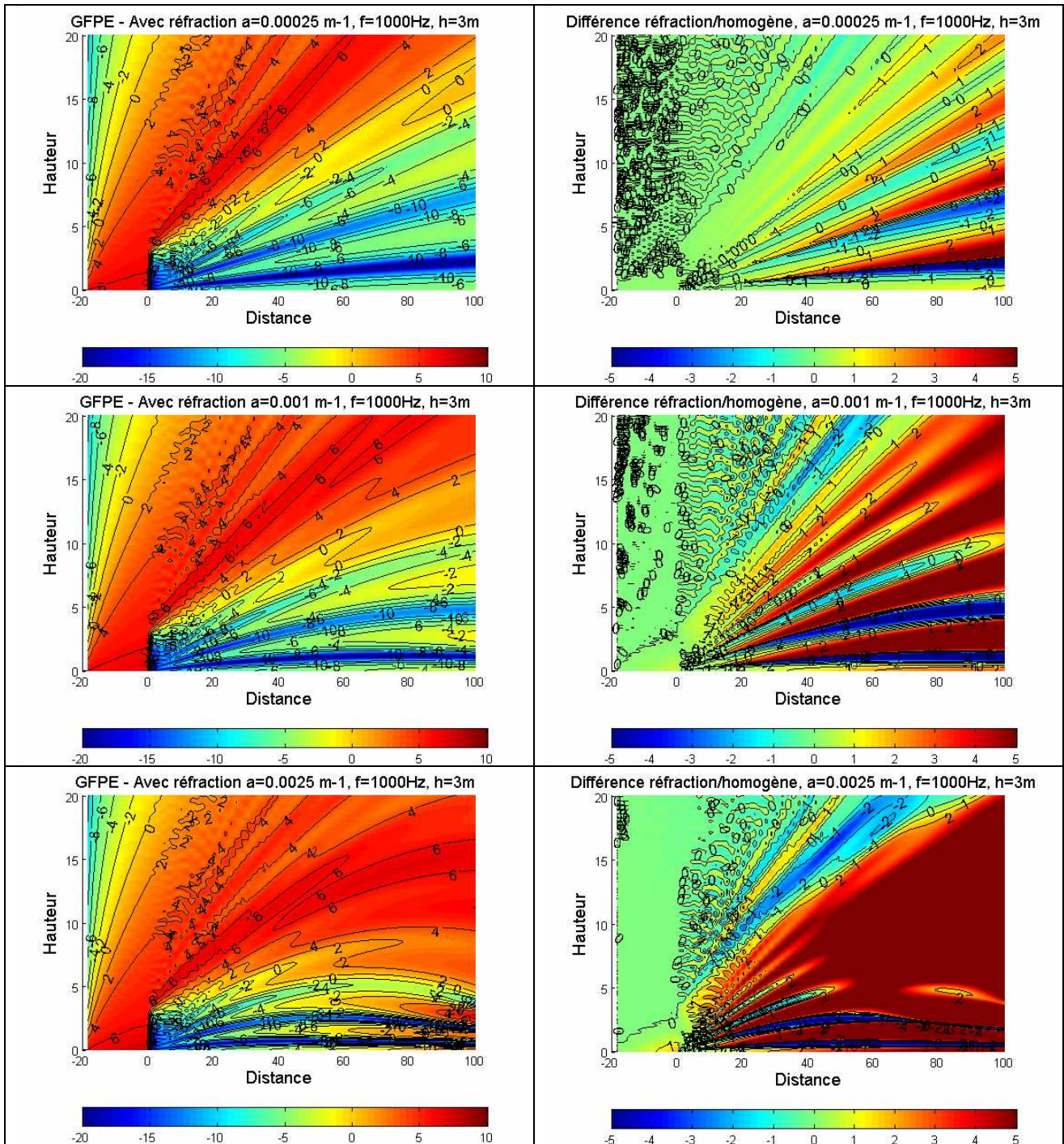
A.3 Hauteur d'écran de 3m

A.3.1 $f=500\text{Hz}$, $h=3\text{m}$, variation de a



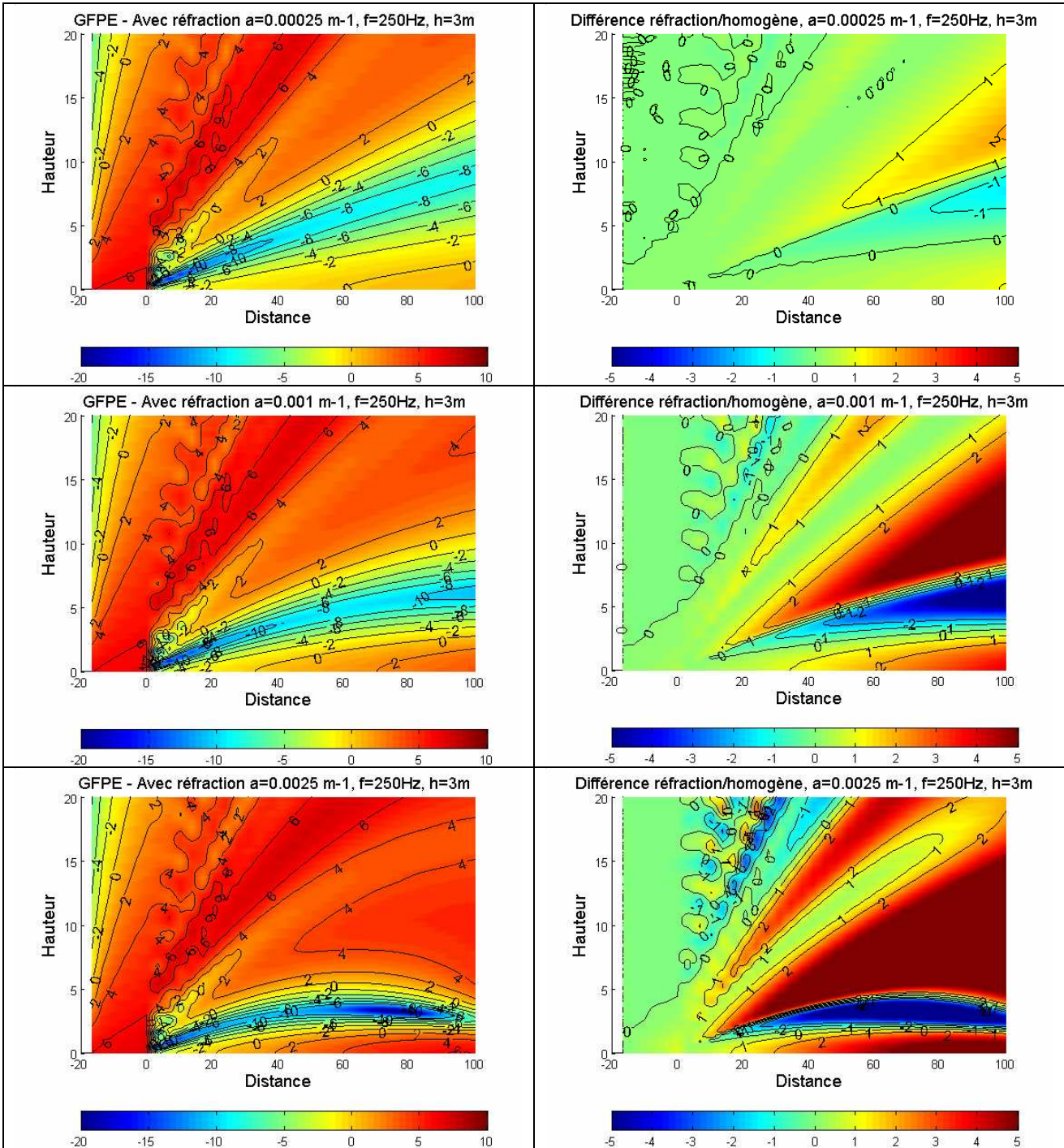
$a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=54,24 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=30,51 \text{ m}$
$a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=18,64 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=10,17 \text{ m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=8,47 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=5,08 \text{ m}$

A.3.2 $f=1000\text{Hz}$, $h=3\text{m}$, variation de a



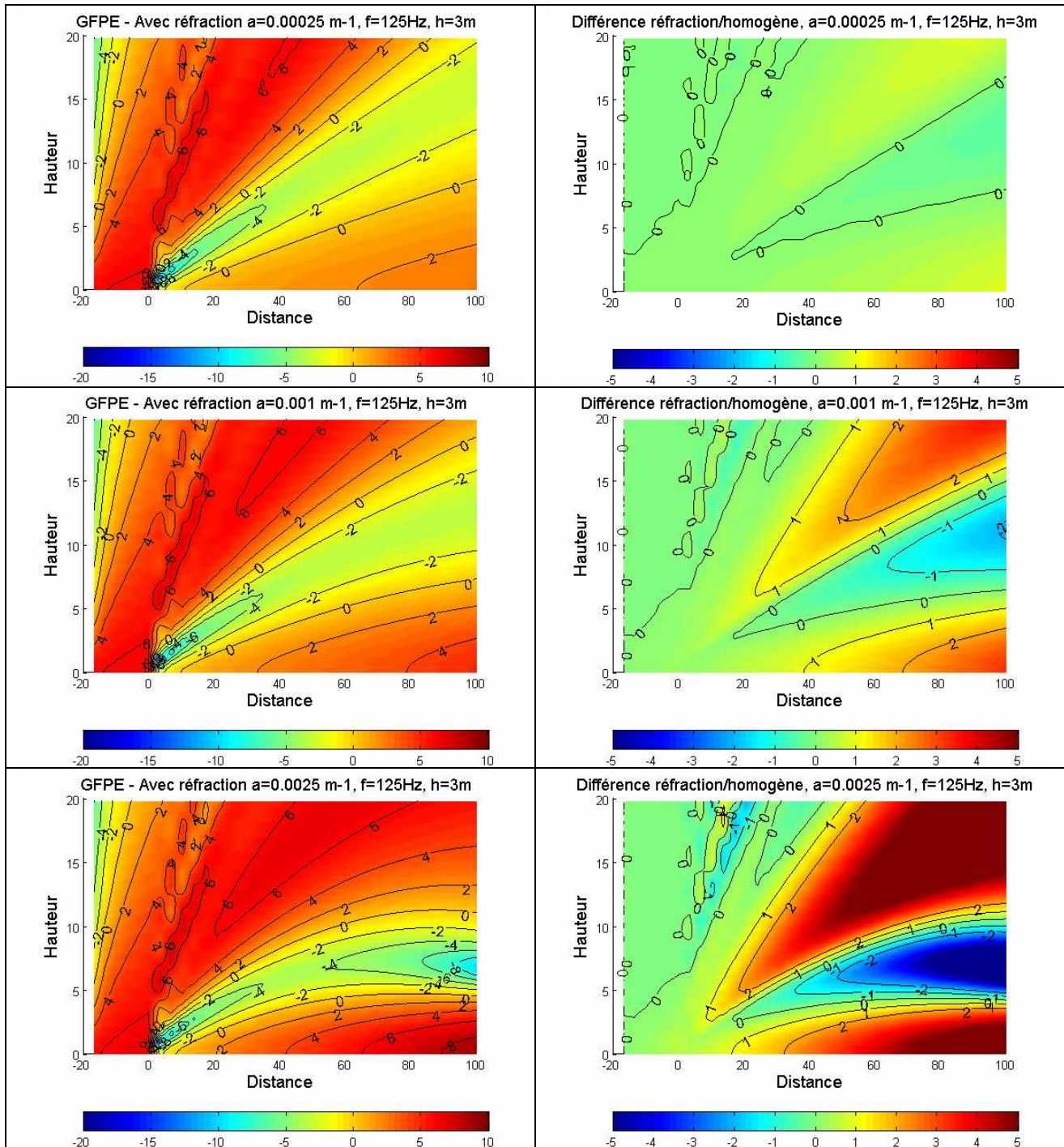
$a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=30,51 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=10,17 \text{ m}$
$a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=10,17 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=8,47 \text{ m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=6,78 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=3,39 \text{ m}$

A.3.3 $f=250\text{Hz}$, $h=3\text{m}$, variation de α



$\alpha=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) > 100 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 50,85 \text{ m}$
$\alpha=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 27,12 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 13,56 \text{ m}$
$\alpha=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 11,86 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 6,78 \text{ m}$

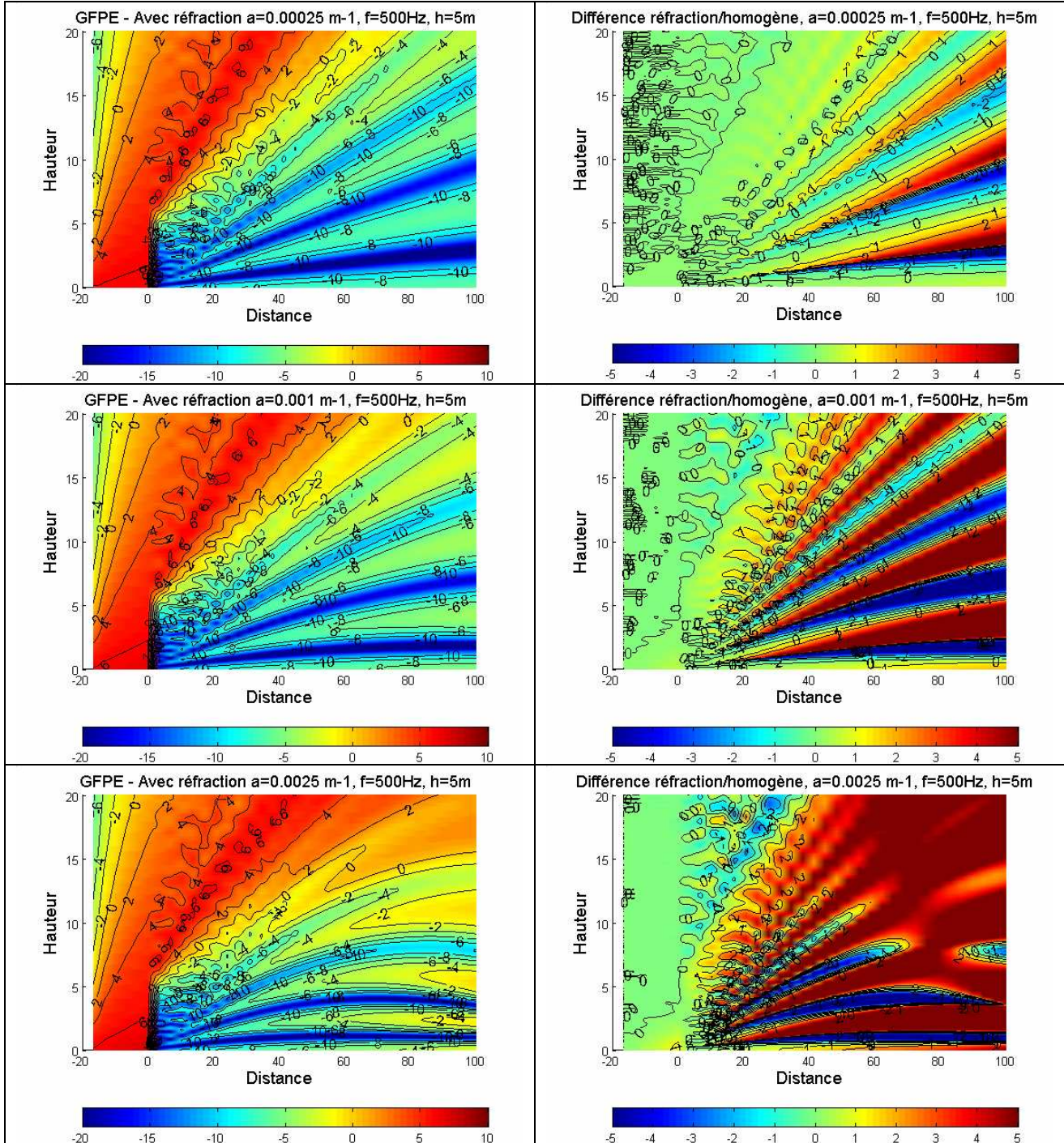
A.3.4 $f=125\text{Hz}$, $h=3\text{m}$, variation de a



$a=2,5 \cdot 10^{-4}\text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) > 100\text{ m}$	$D(1\text{dB}) > 100\text{ m}$
$a=10^{-3}\text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 52,54\text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 23,73\text{ m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3}\text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 18,64\text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 8,47\text{ m}$

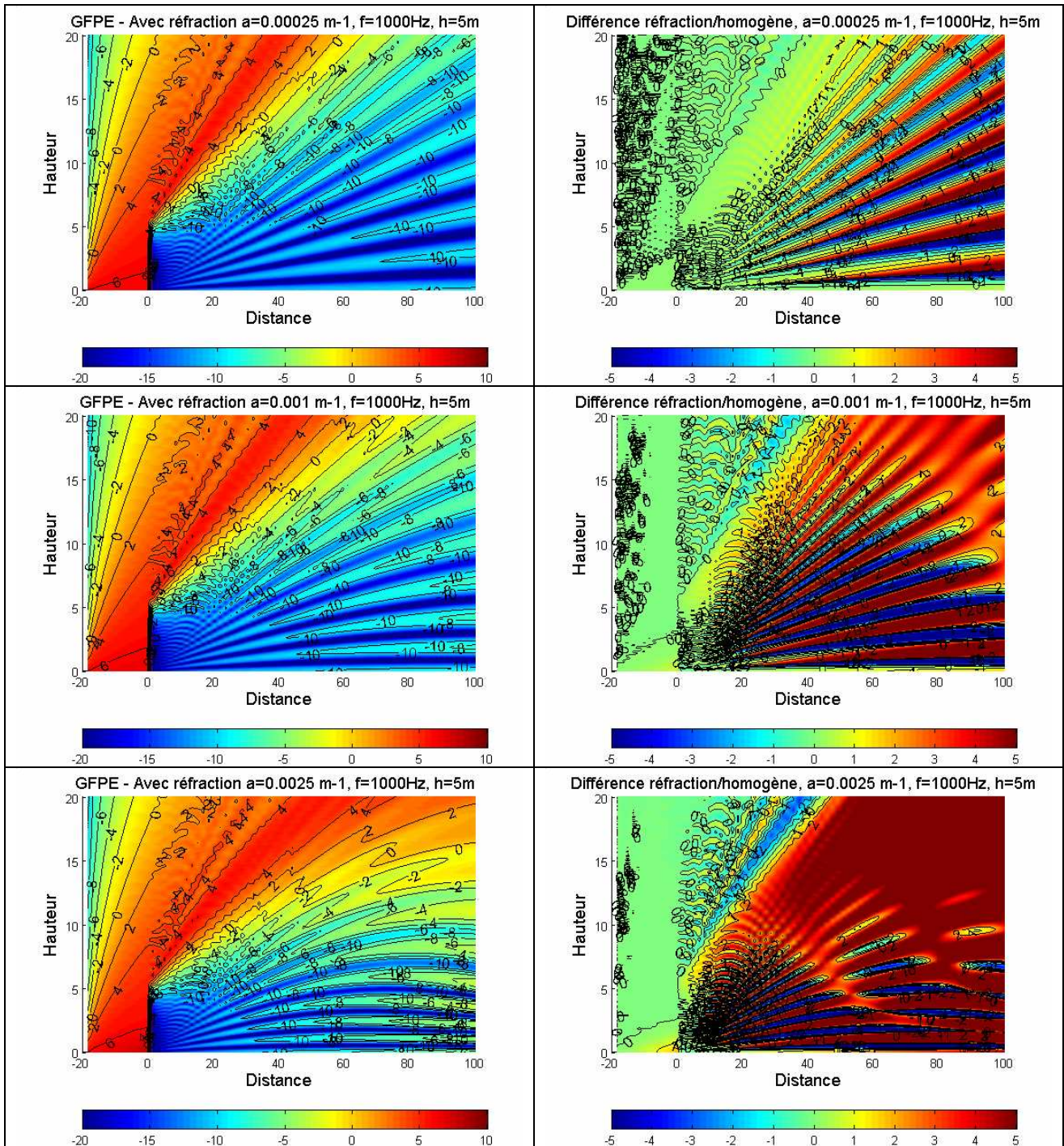
A.4 Hauteur d'écran de 5m

A.4.1 $f=500\text{Hz}$, $h=5\text{m}$, variation de a



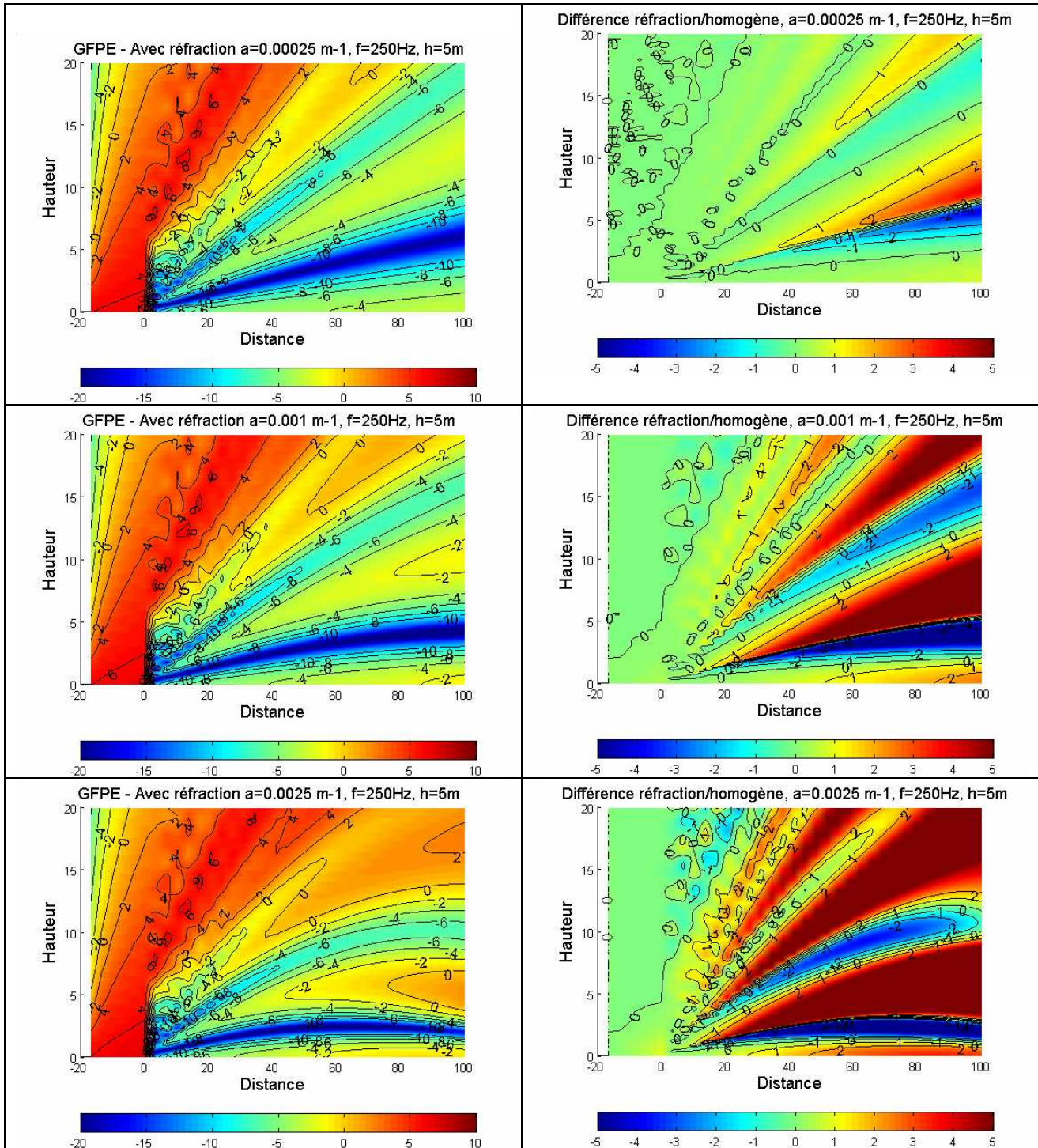
$a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=37,29 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=18,64 \text{ m}$
$a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=16,95 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=8,47 \text{ m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=8,47 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=5,08 \text{ m}$

A.4.2 $f=1000\text{Hz}$, $h=5\text{m}$, variation de a



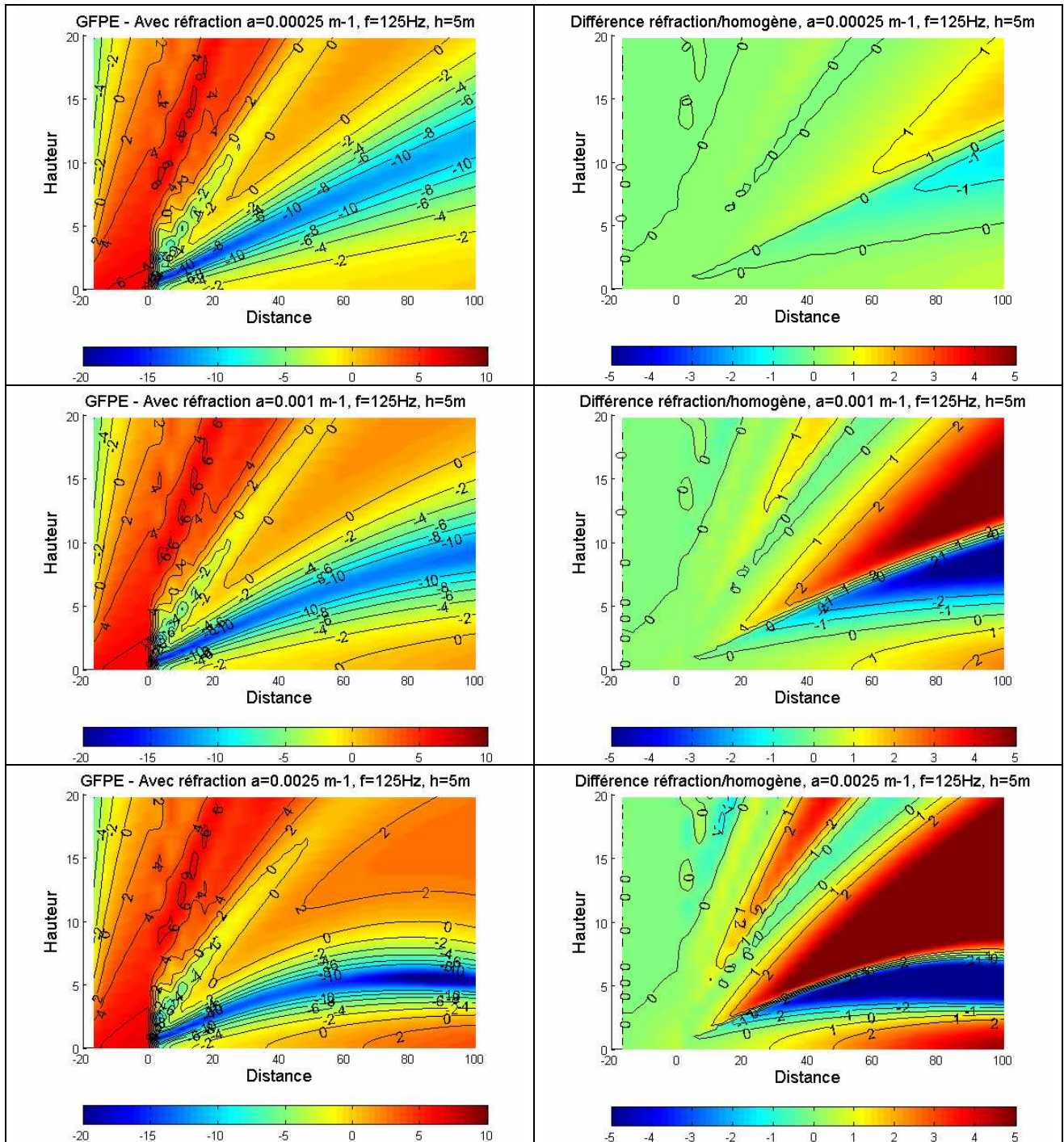
$a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=18,64 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=1,69 \text{ m}$
$a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=6,78 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=1,69 \text{ m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=6,78 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=1,69 \text{ m}$

A.4.3 f=250Hz, h=5m, variation de a



$a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	D(2dB)=62,17 m	D(1dB)=37,29 m
$a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	D(2dB)=22,03 m	D(1dB)=13,56 m
$a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	D(2dB)=11,86 m	D(1dB)=6,78 m

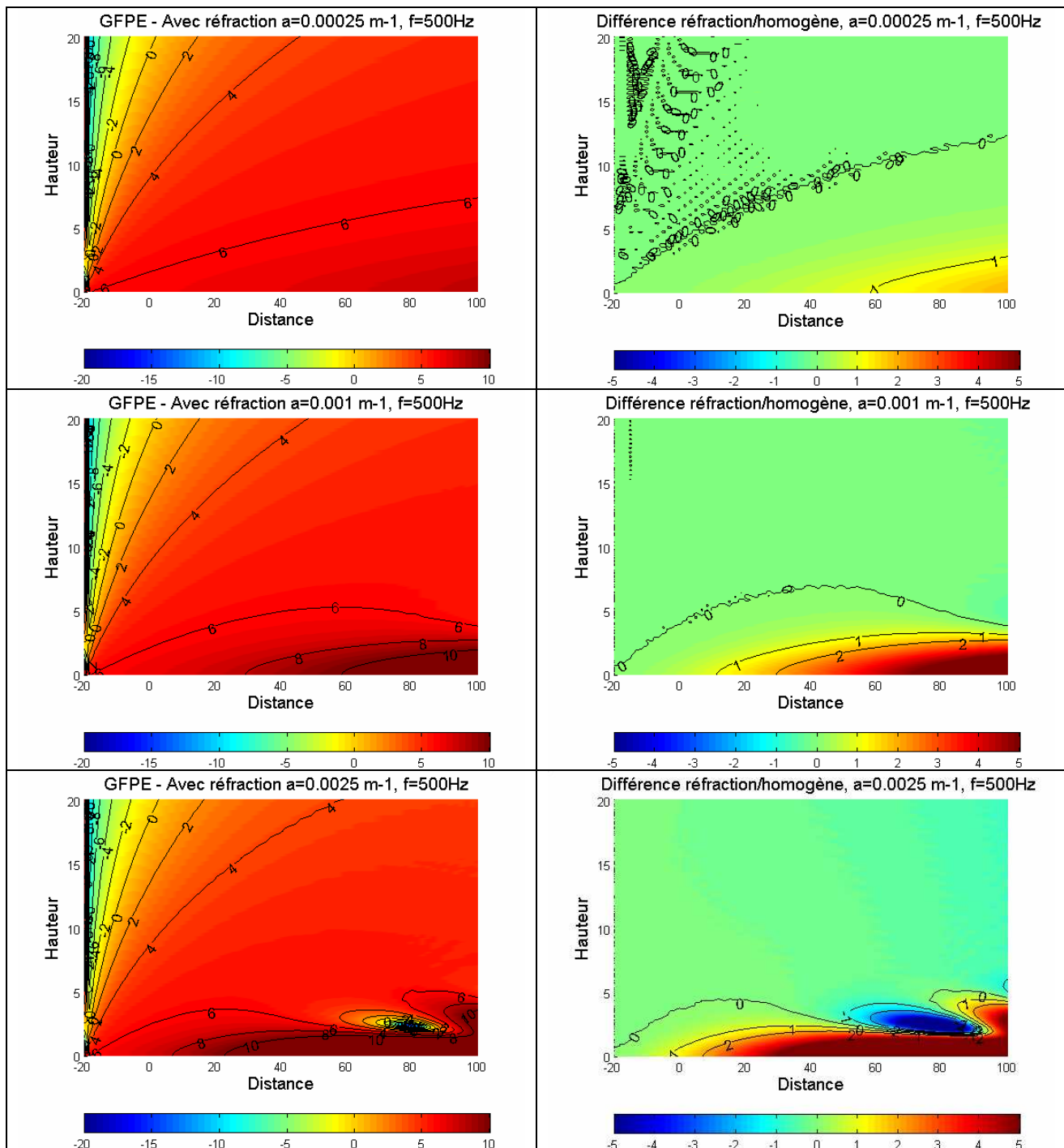
A.4.4 $f=125\text{Hz}$, $h=5\text{m}$, variation de α



$\alpha=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) > 100 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 62,71 \text{ m}$
$\alpha=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 33,9 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 20,34 \text{ m}$
$\alpha=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 16,95 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 5,08 \text{ m}$

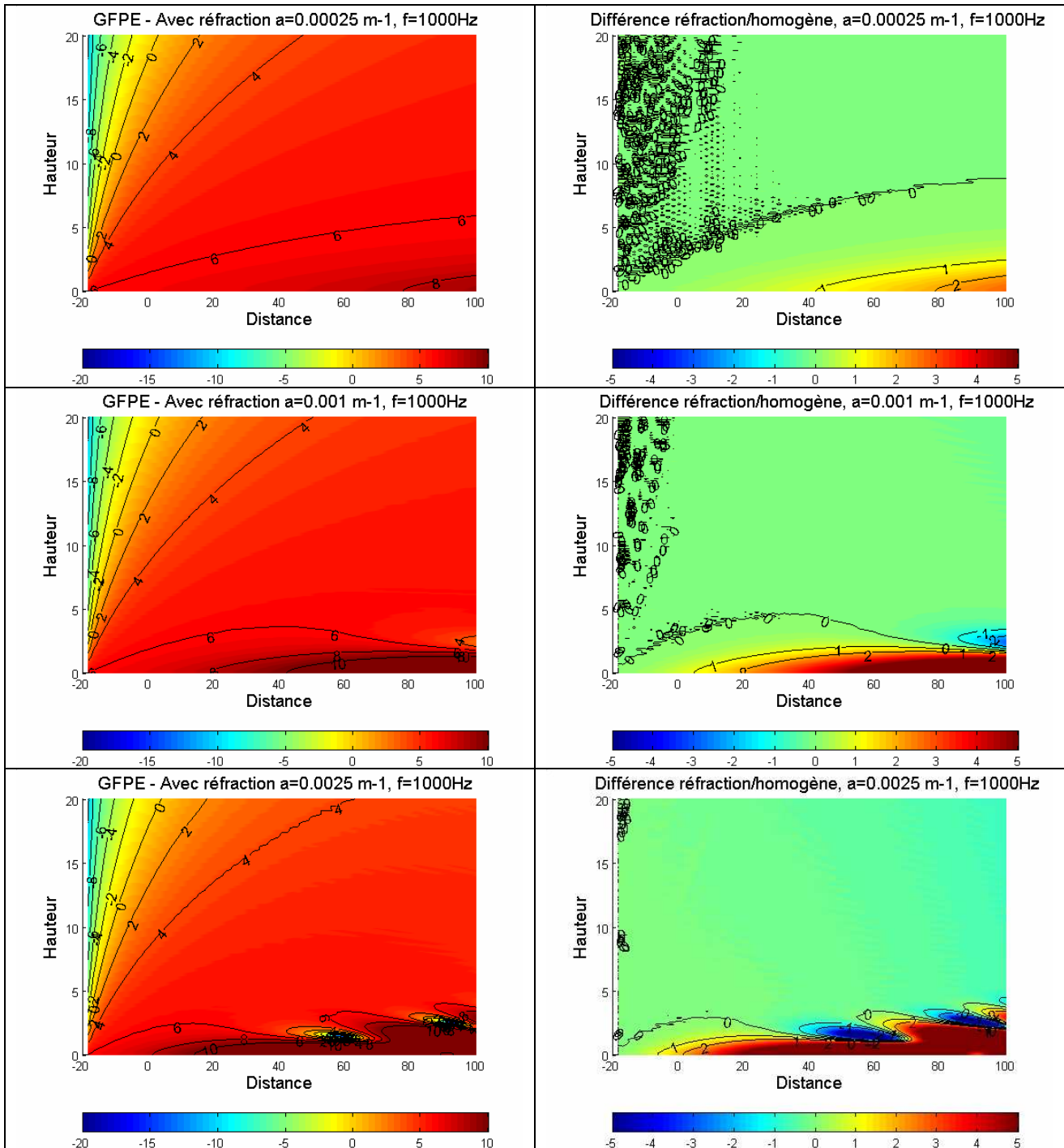
A.5 GFPE, pas d'écran

A.5.1 $f=500\text{Hz}$, pas d'écran, variation de a



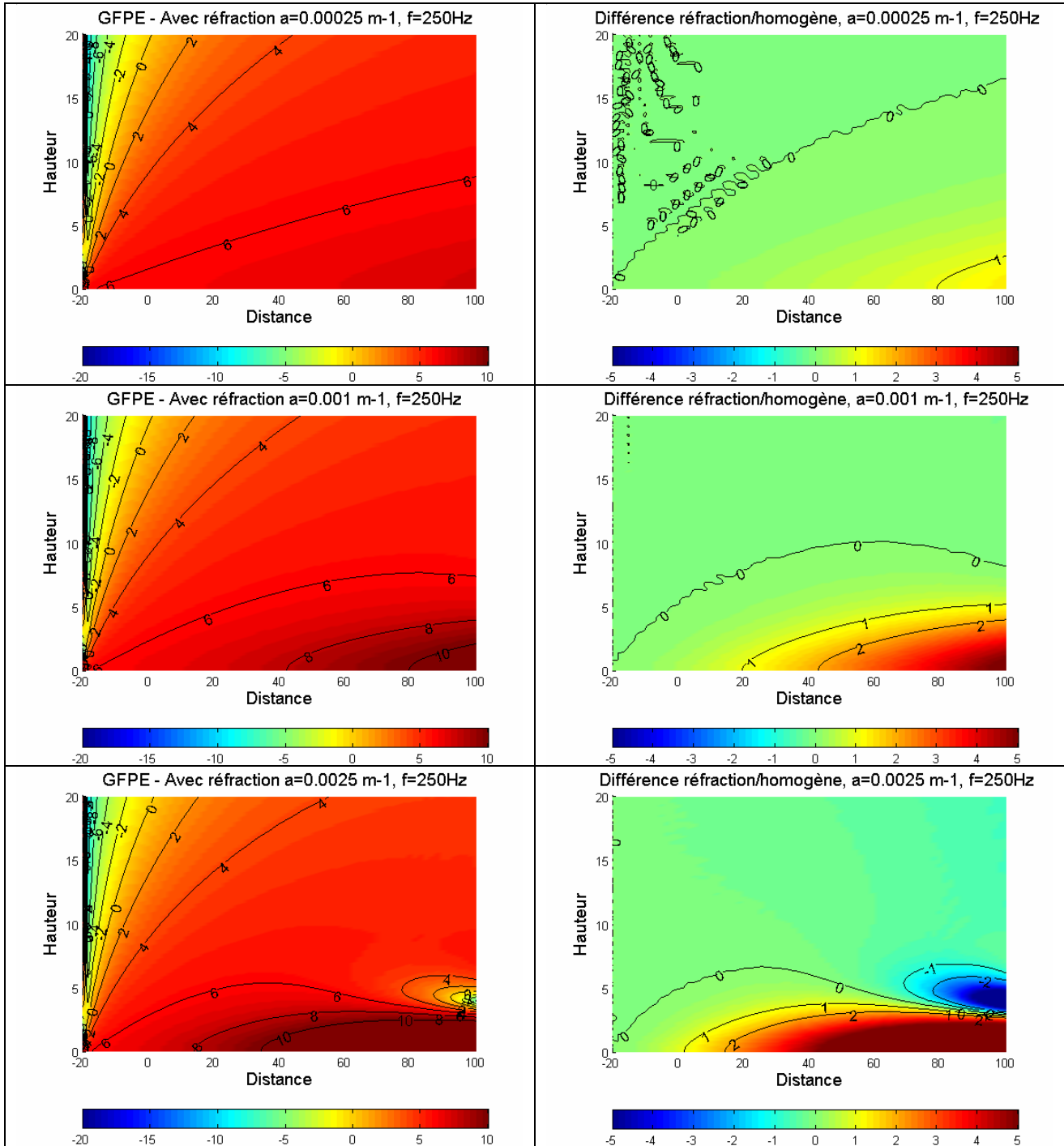
$a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) > 120 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 79,32 \text{ m}$
$a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 50,51 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 31,86 \text{ m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 28,47 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 20 \text{ m}$

A.5.2 $f=1000\text{Hz}$, pas d'écran, variation de a



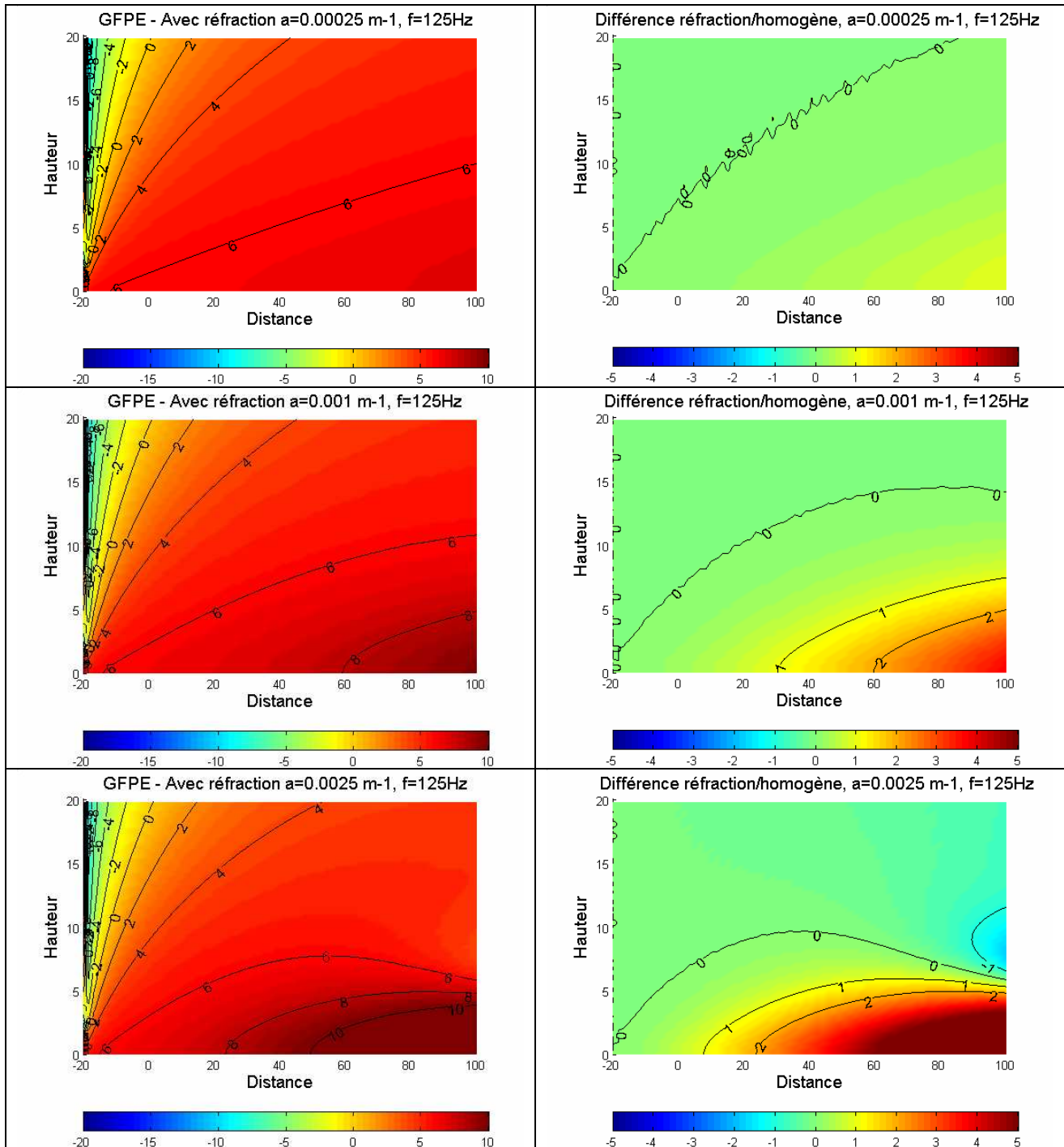
$a=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=99,72 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=62,54 \text{ m}$
$a=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=40,46 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=25,35 \text{ m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=21,97 \text{ m}$	$D(1\text{dB})=15 \text{ m}$

A.5.3 $f=250\text{Hz}$, pas d'écran, variation de α



$\alpha=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) > 120 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 99,66 \text{ m}$
$\alpha=10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 64,07 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 40,34 \text{ m}$
$\alpha=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) = 35,25 \text{ m}$	$D(1\text{dB}) = 23,39 \text{ m}$

A.5.4 $f=125\text{Hz}$, pas d'écran, variation de a



$a=2,5 \cdot 10^{-4}\text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB}) > 120\text{ m}$	$D(1\text{dB}) > 120\text{ m}$
$a=10^{-3}\text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=81,02\text{ m}$	$D(1\text{dB})=50,51\text{ m}$
$a=2,5 \cdot 10^{-3}\text{ m}^{-1}$	$D(2\text{dB})=45,42\text{ m}$	$D(1\text{dB})=28,47\text{ m}$

Annexe B : Caractéristiques du haut parleur et des microphones

B.1 Directivité du haut parleur Audax TW010F1

B.1.1 Dispositif

Le haut parleur est placé sur une tige elle-même placée sur une table tournante.

Sur cette table tournante, on a placé un diagramme polaire gradué en degrés. Un microphone est disposé à un endroit fixe et pour la première mesure, le microphone et le haut parleur sont face à face (angle 0°).

Les mesures sont effectuées sur l'intervalle $[0^\circ, 180^\circ]$ par pas de 15° . 0° correspondant au haut-parleur et au microphone en face à face et 180° correspondant au haut-parleur dos au microphone.

Les données sur l'intervalle $[180^\circ, 360^\circ]$ sont déduites par symétrie des données sur l'intervalle $[0^\circ, 180^\circ]$.

Les mesures sont réalisées à l'aide d'un pulse avec une fréquence d'échantillonnage de 56000Hz. Un dépouillement des fichiers binaires obtenus est effectué sous Matlab.

Les résultats se présentent alors sous la forme de diagramme de directivité obtenue pour une bande d'octave.

B.1.2 Résultats

B.1.2.1 Diagramme de directivité à 2000 Hz

Pour l'octave 2000Hz, le diagramme de directivité obtenu est donné à la Figure B-1. Ce diagramme est assez omnidirectionnel. Mais attention la fréquence de coupure du haut-parleur étant à 3000Hz, ce diagramme n'est pas significatif.

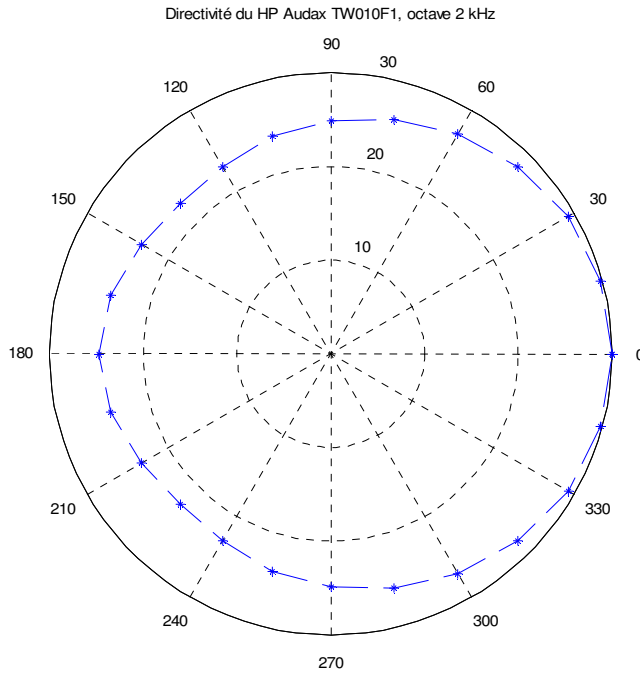


Figure B-1 : Diagramme de directivité à 2000 Hz

B.1.2.2 Diagramme de directivité à 4000 Hz

Pour la bande d'octave 4000Hz, le diagramme de directivité obtenu est présenté à la Figure B-2. Pour cette octave, la coupure à -3 dB a lieu vers 30°.

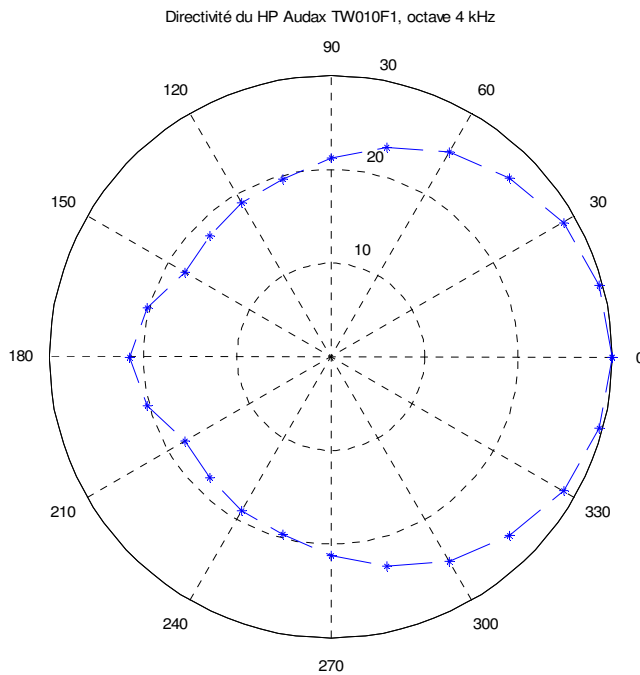


Figure B-2 : Diagramme de directivité à 4000 Hz

B.1.2.3 Diagramme de directivité à 8000 Hz

Le diagramme de directivité obtenu pour la bande d'octave 8000Hz est présenté à la Figure B-3. Pour cette octave, la coupure à -3 dB a lieu vers 30°.

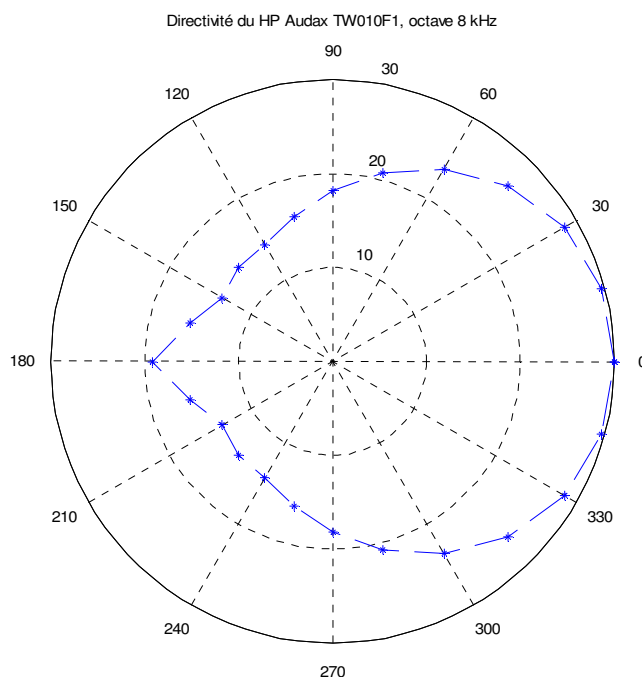


Figure B-3 : Diagramme de directivité à 8000 Hz

Malheureusement même si on a choisi une grande fréquence d'échantillonnage, il ne nous est pas possible d'afficher le diagramme de directivité obtenu à 16000Hz car la procédure de dépouillement introduit la fonction « ellipord » de Matlab qui pour cette fréquence aurait besoin de données fréquentielles jusqu'à 45 000Hz soit une fréquence d'échantillonnage de près de 90 000Hz, fréquence que nous ne pouvons atteindre avec notre pulse.

B.1.3 Conclusion :

On peut considérer que le niveau de bruit reçu par le microphone dans un intervalle $[-30^\circ, 30^\circ]$ est le même quelle que soit la position du haut-parleur.

Application : Le rayon réfléchi peut différer d'un angle de 40° par rapport au rayon direct et donc avoir un niveau de bruit moins important (d'après le diagramme de directivité).

L'exploitation du diagramme de directivité et des niveaux obtenus peut permettre de quantifier et d'expliquer des différences entre mesures et résultats numériques.

B.2 Microphones ½ pouce B&K de type 4133

Dans cette section, les réponses en fréquence de deux microphones B&K utilisés lors des validations expérimentales (chapitres 4 et 5) sont présentées

B.2.1 Réponse en Fréquence du Microphone 639756

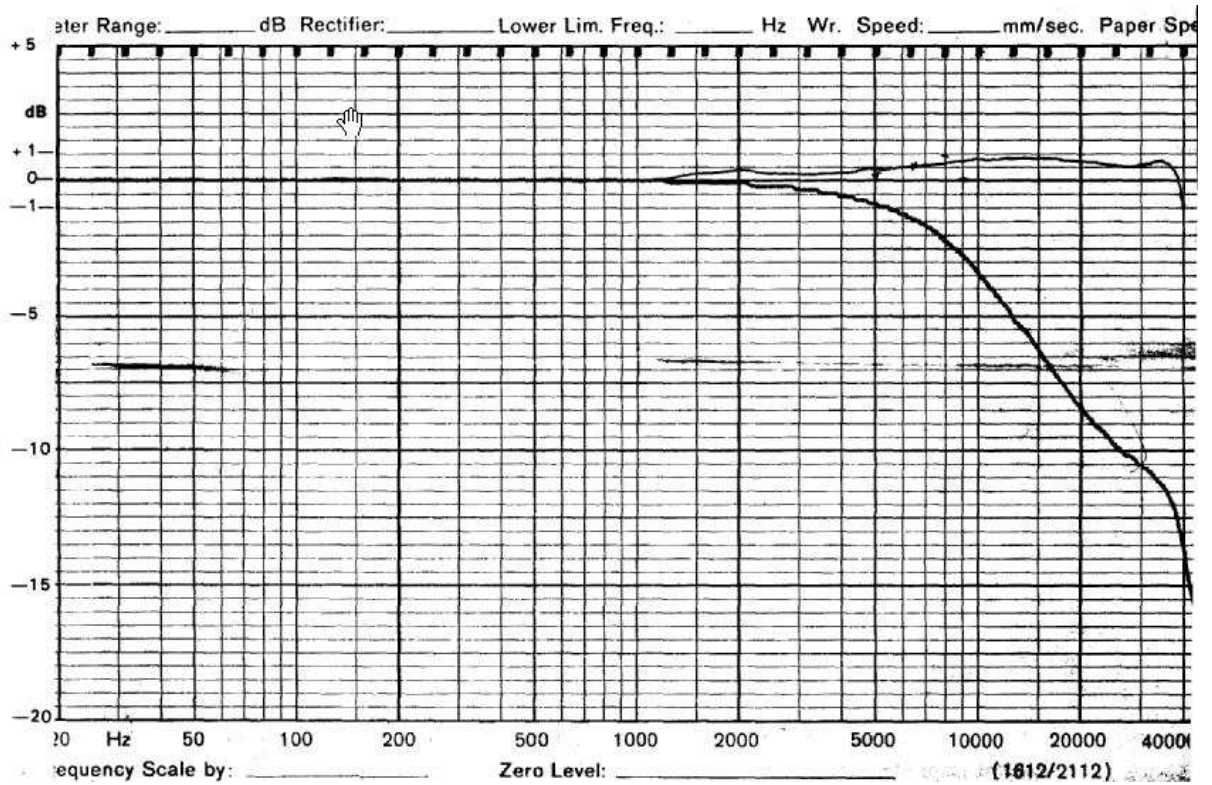


Figure B-4 : Réponse en fréquence du microphone B&K de type 4133

Sur la Figure B-4, la courbe située en haut correspond à la réponse en champ libre, la fréquence de coupure est supérieure à 20 000 Hz.

B.2.2 Réponse en Fréquence du Microphone 519756

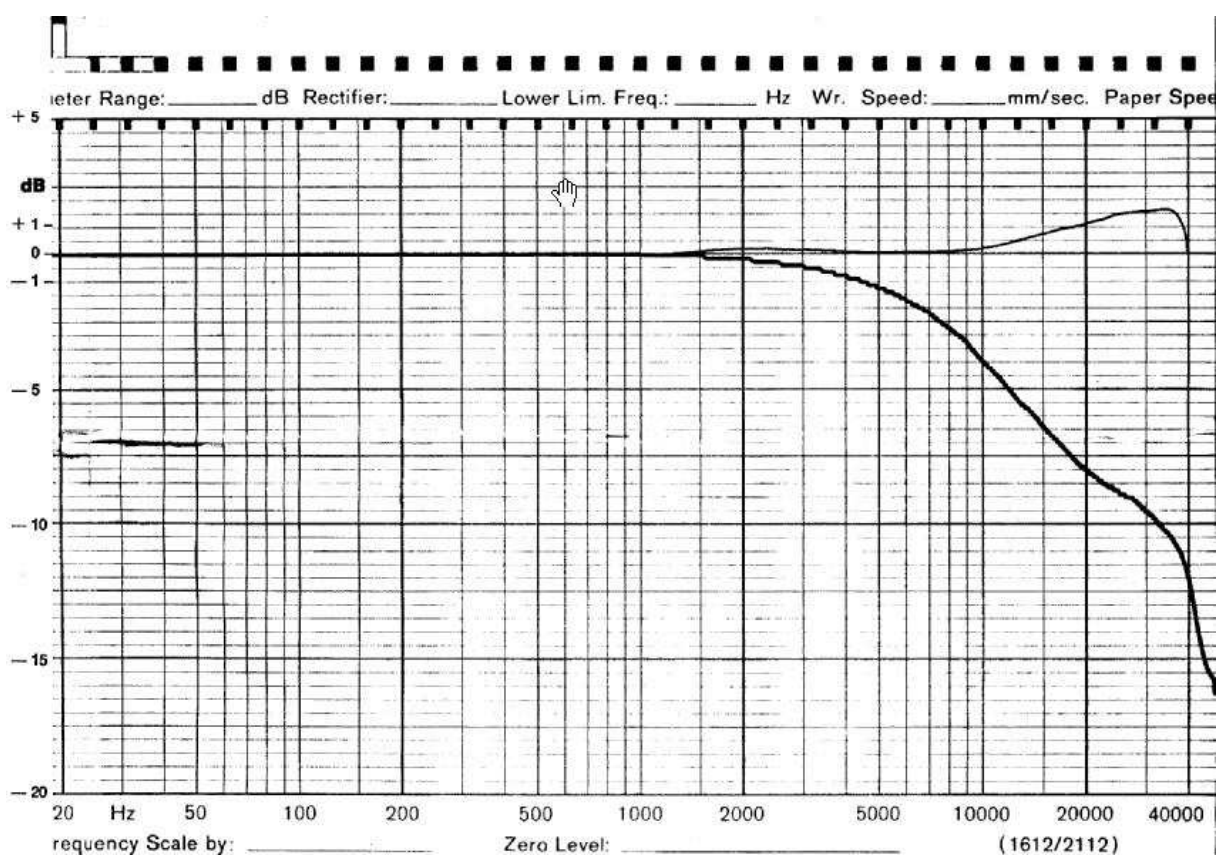


Figure B-5 : Réponse en fréquence du microphone B&K de type 4133

Sur la Figure B-5, la courbe du haut correspond à la réponse en champ libre, la fréquence de coupure est aussi supérieure à 20 000 Hz.

Annexe C : Validation de l'approche BEM-courbé

Cette annexe présente des courbes d'atténuations relatives tracées dans le cadre du chapitre 4.

C.1 Ecran droit rigide sur sol rigide : réfraction vers le haut

C.1.1 Validations expérimentales

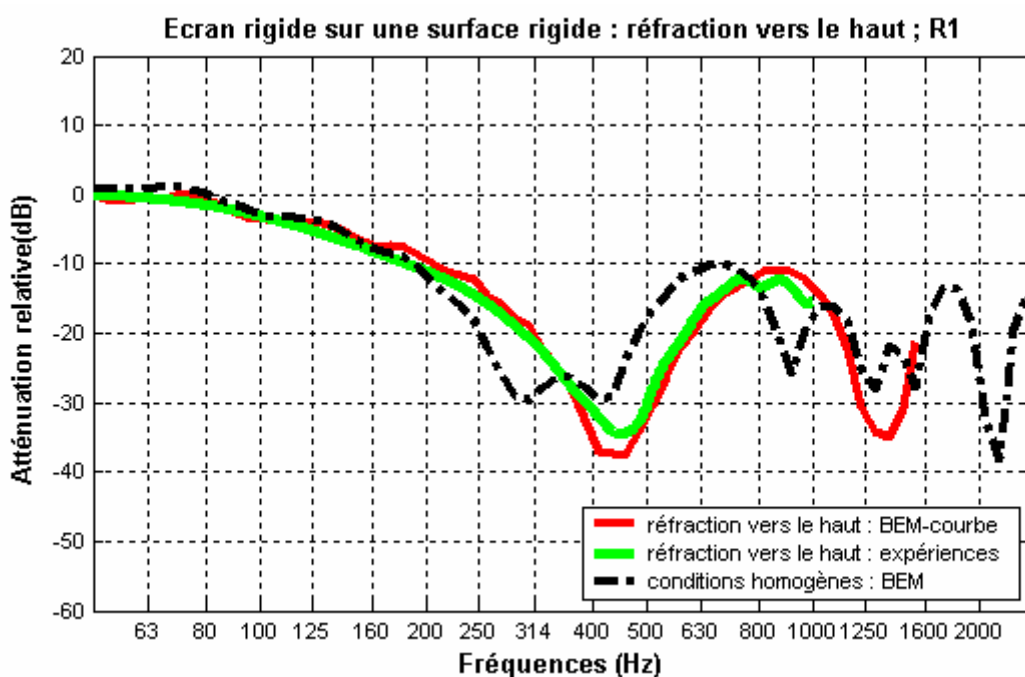


Figure C-1 : Ecran droit rigide sur sol rigide : réfraction vers le haut

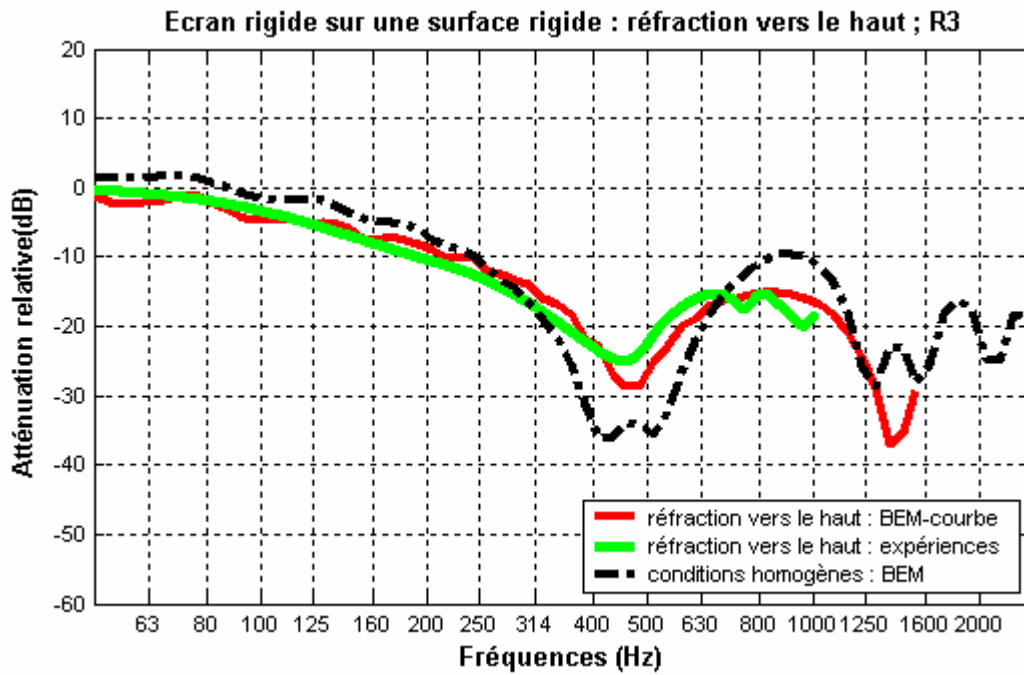


Figure C-2 : Ecran droit rigide sur sol rigide : réfraction vers le haut

C.1.2 Validations numériques

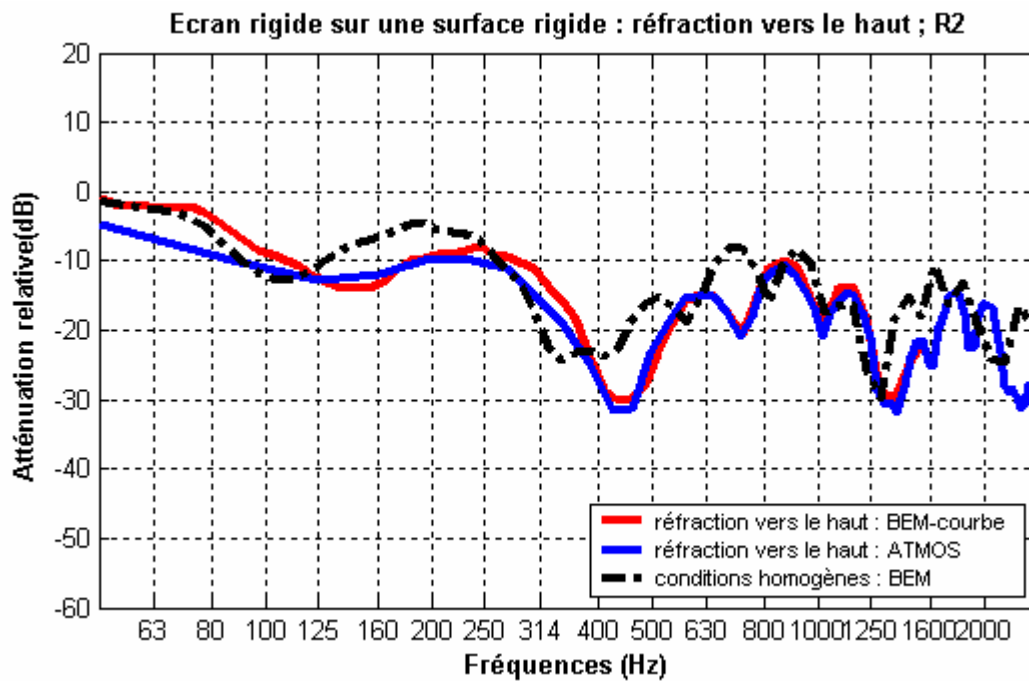


Figure C-3 : Ecran droit rigide sur sol rigide : réfraction vers le haut

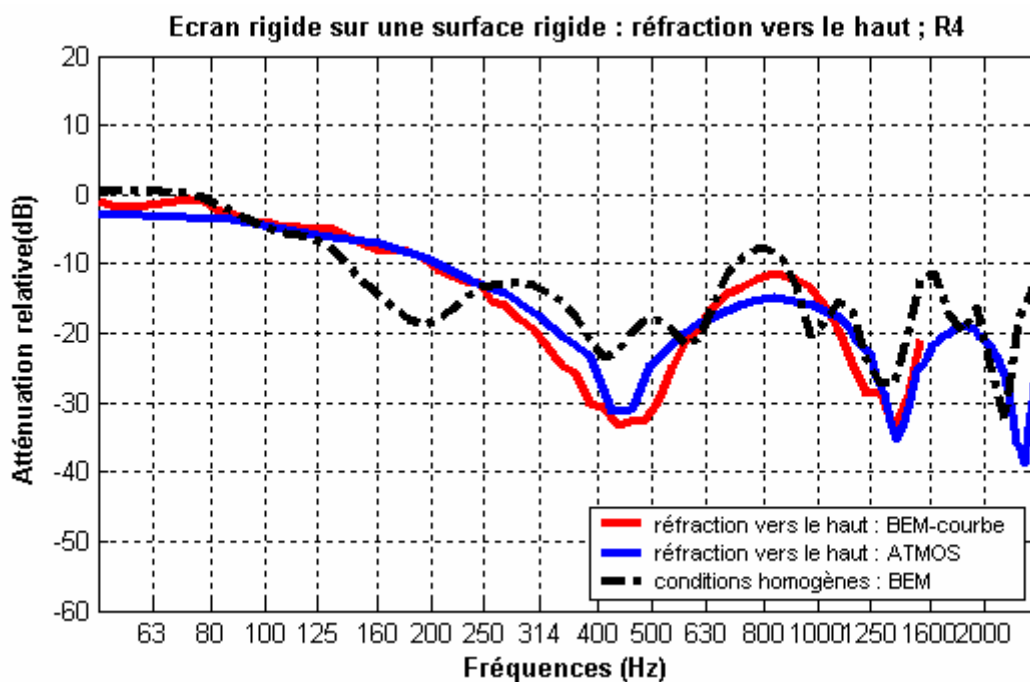


Figure C-4 : Ecran droit rigide sur sol rigide : réfraction vers le haut

C.2 Ecran droit rigide sur une surface présentant une discontinuité d'impédance : réfraction vers le bas et vers le haut

C.2.1 Réfraction vers le bas

C.2.1.1 Validations expérimentales

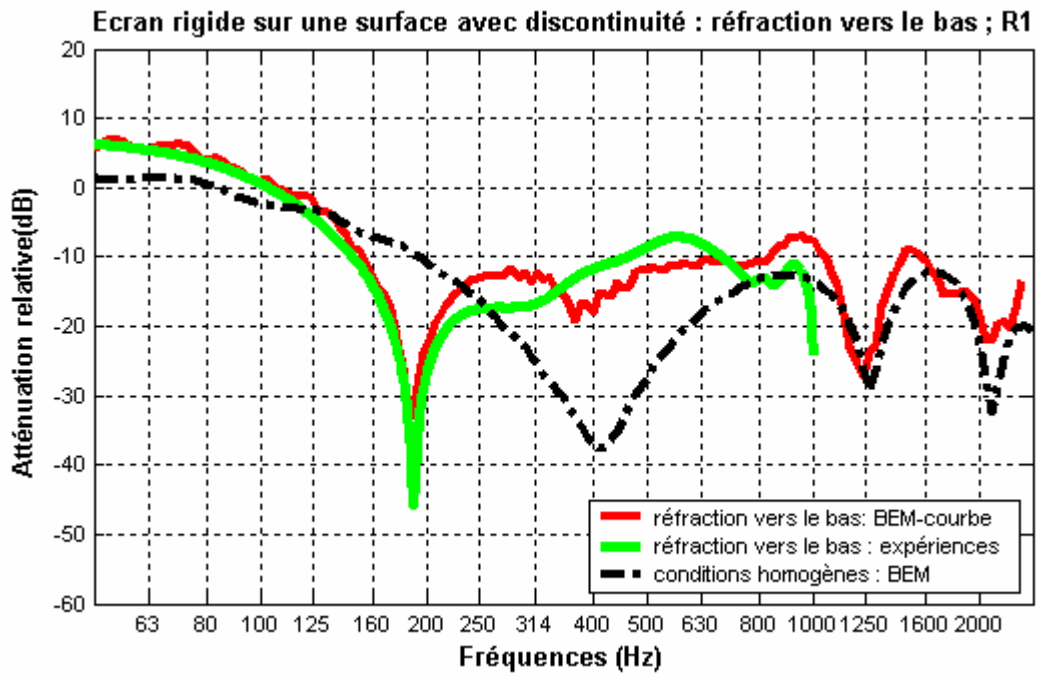


Figure C-5 : Ecran droit rigide sur sol avec discontinuité d'impédance : réfraction vers le bas

C.2.1.2 Validations numériques

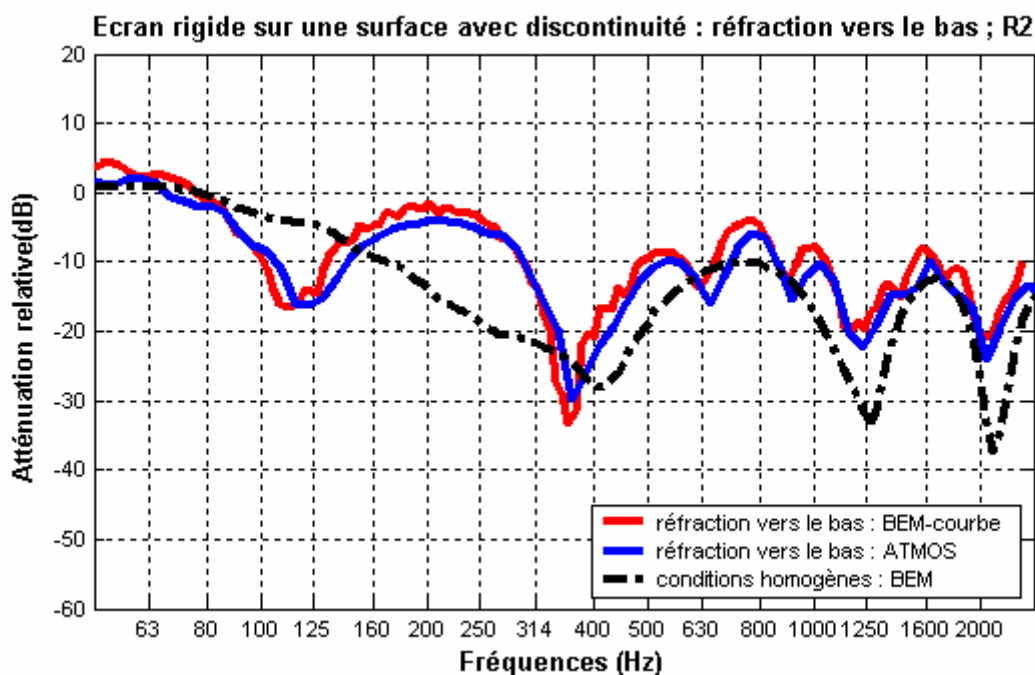


Figure C-6 : Ecran droit rigide sur sol avec discontinuité d'impédance : réfraction vers le bas

C.2.2 Réfraction vers le haut

C.2.2.1 Validations numériques

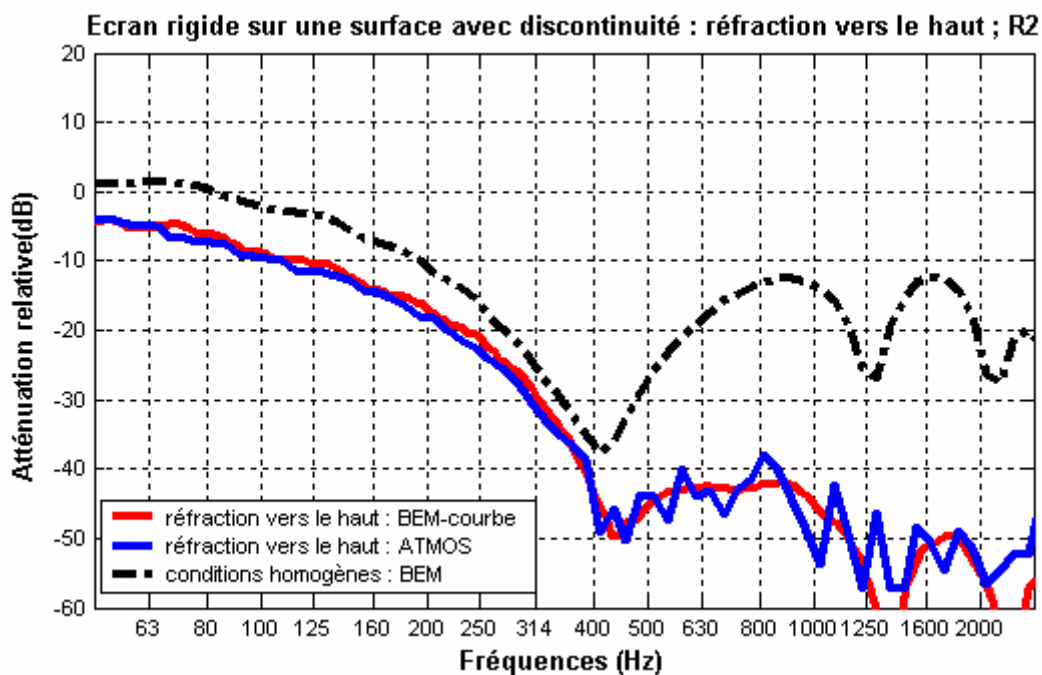


Figure C-7 : Ecran droit rigide sur sol avec discontinuité d'impédance : réfraction vers le haut

Annexe D : PIV – Fluent

Dans cette annexe, on a regroupé des compléments d'information concernant la méthode PIV et le solveur des équations de Navier Stokes, Fluent.

D.1 Principe de la PIV

Le principe de la PIV consiste en l'analyse statistique d'images tomographiques de l'écoulement prises à des instants successifs.

Les traceurs de l'écoulement sont des particules solides ou liquides. Un plan laser vient éclairer l'écoulement à l'instant t , l'image des taches de diffusion de Mie des traceurs est récoltée sur un capteur (film photographique ou capteur CCD). A l'instant $t+\Delta t$ un deuxième tir laser est effectué et une seconde image est récoltée. L'algorithme de traitement des images apparie les taches de diffusion. Connaissant ainsi le déplacement $\overrightarrow{\Delta x(x,t)}$ et le temps inter image Δt , la vitesse locale des traceurs est donnée par la relation :

$$\overrightarrow{V(x,t)} = \frac{\overrightarrow{\Delta x(x,t)}}{\Delta t} \quad (1)$$

où \underline{x} correspond aux coordonnées dans le plan de mesure.

En assimilant la vitesse locale des traceurs à celle de l'écoulement, la technique de PIV fournit une mesure instantanée du champ de vitesse.

S'il est possible d'identifier chaque particule et de les suivre individuellement entre les expositions successives, on utilisera alors un algorithme de PTV (Particle Tracking Velocimetry) ou « super-résolution ».

Dans un traitement de PIV par intercorrélation la position des traceurs est enregistrée sur des images successives correspondantes chacune à des instants distincts (t et $t+\Delta t$). Un traitement statistique est réalisé sur un ensemble de traceurs. Les images numériques sont divisées en fenêtres d'analyses, g_1 pour la première image et g_2 pour la seconde, de taille $M \times N$.

La première étape du calcul d'intercorrélation consiste à construire la fonction de corrélation croisée $\Phi(m,n)$ définie par l'expression ci-dessous:

$$\Phi(m,n) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} g_1(i,j) \cdot g_2(i+m,j+n) \quad (2)$$

avec $-(M-1) \leq m \leq (M-1)$ et $-(N-1) \leq n \leq (N-1)$

A partir de l'expression ci-dessus un coefficient de corrélation croisée normalisé $CC(m,n)$ est défini par :

$$CC(m,n) = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (g_1(i,j) - \overline{g_1}) \cdot (g_2(i+m,j+n) - \overline{g_2})}{\sqrt{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [g_1(i,j) - \overline{g_1}]^2 [g_2(i,j) - \overline{g_2}]^2}} \quad (3)$$

avec $-(M-1) \leq m \leq (M-1)$ et $-(N-1) \leq n \leq (N-1)$

et $\overline{g_1}$, $\overline{g_2}$ les niveaux de gris moyens dans les fenêtres d'analyse g_1 et g_2

La Figure D-1 montre une représentation 3D du résultat du calcul du coefficient de corrélation pour deux fenêtres de 32×32 pixels².

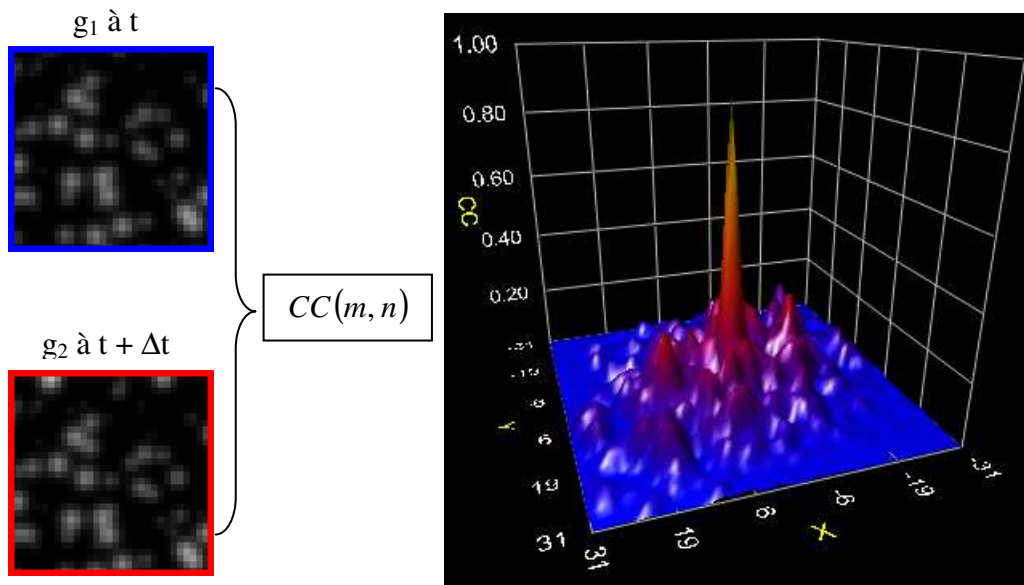


Figure D-1 : Calcul du coefficient d'intercorrélation

S'il existe une corrélation forte entre les motifs (traceurs) contenus dans les images g_1 et g_2 , la fonction $CC(m, n)$ présente un pic, dont la position correspond au déplacement le plus probable des traceurs, entre les instants t et $t + \Delta t$.

La position du maximum de corrélation est déterminée au pixel près. Afin d'augmenter la dynamique de la mesure, l'idée est de considérer que la position exacte du pic de corrélation peut être déterminée à partir d'un ensemble d'échantillons construisant le pic de corrélation. La méthode la plus largement utilisée actuellement consiste à interpoler le pic de corrélation par une fonction gaussienne qui semble la plus adaptée à la morphologie du pic de corrélation. La position du pic de corrélation ainsi déterminée fournit le déplacement le plus probable des traceurs contenus dans les fenêtres g_1 et g_2 avec une précision «sub-pixel».

Ce processus est réitéré pour l'ensemble des fenêtres g_1 et g_2 du couple d'images afin d'obtenir une mesure du champ de déplacement. Connaissant le délai Δt entre les deux images ainsi que le grandissement, le champ de vitesse instantané est calculé.

D.1.1 Précaution à prendre : bonne qualité de l'ensemencement

La qualité de l'ensemencement est un point clef des mesures PIV. En effet l'hypothèse que la mesure du déplacement des particules correspond à la vitesse du fluide impose d'une part une concentration en particule la plus homogène possible et des traceurs petits et légers pour pouvoir suivre les plus petites structures de l'écoulement.

A ces contraintes s'ajoute la nécessité de pouvoir distinguer les particules sur les images avec le meilleur contraste possible. Pour éviter des biais de calcul importants (peak locking [1]), les taches de diffusion de Mie des particules recueillies sur le capteur CCD doivent occuper plusieurs pixels (>3).

Ainsi l'ensemencement est un point très critique de la qualité des mesures PIV. Il n'existe malheureusement pas de solution unique et il est nécessaire d'adapter l'ensemencement à chaque type d'expérience.

Lors de cette campagne de mesure, les brouillards ont été générés à partir d'un pulvérisateur de type Laskin Nozzle et c'est l'huile d'olive qui a été utilisée pour générer un aérosol dense avec une granulométrie de l'ordre du micron.

D.1.2 Choix de l'algorithme de traitement PIV

La technique de PIV suscite aujourd'hui de nombreux développements que ce soit du point de vue technologique avec de nouveaux lasers, de nouvelles caméras, ou au niveau des algorithmes de traitements. La communauté scientifique continue à développer et optimiser les algorithmes de traitement des images pour fournir des résultats de plus en plus précis. Quatre grandes familles d'algorithmes co-existent actuellement :

- Inter corrélation d'images sans décalage de fenêtres
- Inter corrélation d'images avec décalage de fenêtres
- Inter corrélation d'images avec déformation de fenêtres
- Calculs de PTV ou « super résolution » (un vecteur par particule détectée).

Trois algorithmes ont été testés sur les images enregistrées. Ces algorithmes sont présentés en détail dans la référence [1].

- Le premier algorithme est intitulé calcul « standard » et consiste en une double passe de calcul. La première passe très rapide peut être utilisée en temps réel pour obtenir une cartographie qualitative du champ aérodynamique instantané (>1000 vecteurs par seconde). La seconde passe valide le calcul précédent et assure une précision de localisation du pic de corrélation indépendante de l'amplitude du déplacement.
- Le calcul itératif multipasses consiste à utiliser un schéma prédicteur correcteur en effectuant une corrélation entre des fenêtres décalées du déplacement obtenu à l'itération précédente. La réduction des fenêtres d'analyse augmente la résolution spatiale des mesures. Le décalage des fenêtres d'analyse améliore la détection du pic de corrélation et fournit une validation de la mesure. En moyenne les fenêtres d'analyses utilisées lors de la dernière passe du calcul sont de 9x9 pixels soit 2.3x2.3 mm².
- Le calcul par « super-résolution » consiste à attribuer un vecteur vitesse à chaque particule détectée dans les images tomographiques. Ce traitement vient compléter l'algorithme itératif en utilisant comme prédicteur le résultat obtenu sur des zones très petites (9x9 pixels). Cette méthode de traitement consiste en 3 étapes successives : la détection des particules dans les images, l'interpolation des déplacements sur ces particules détectées, puis l'appariement des particules entre les images successives.

Les algorithmes itératif et de super-résolution sont des méthodes avancées par rapport aux solutions commerciales existantes plus proches du calcul standard. La comparaison de ces méthodes sur un champ de vitesse réel est délicate car il n'existe pas de critère objectif de comparaison.

D.2 Principe de Fluent

L'objectif des calculs numériques avec le solveur des équations de Navier Stokes, Fluent est de compléter la détermination des caractéristiques moyennes des champs de vitesse et de turbulence sur un domaine d'analyse plus large que celui cartographié par PIV, dans les mêmes conditions d'étude.

Les caractéristiques moyennes des champs de vitesse et d'intensité turbulente sont présentées sous forme de cartographies globales sur l'ensemble des domaines étudiés et au voisinage des singularités. Ces données sont ensuite utilisées dans le code d'équation parabolique pour modéliser la propagation acoustique en présence d'un écoulement.

D.2.1 Code de calcul

Le code de simulation Fluent est utilisé pour résoudre sur le domaine de calcul les équations de Navier-Stokes moyennées (approche RANS). Les flux turbulents sont estimés à partir du modèle RKE ($k-\epsilon$ réalisable) à deux équations. On résout donc les équations de conservation de l'énergie cinétique turbulente k et de son taux de dissipation ϵ . A noter que le modèle RKE est une amélioration du modèle $k-\epsilon$ standard, qui assure en particulier la positivité des contraintes de Reynolds normales et l'inégalité de Schwarz sur les contraintes de frottement ou de cisaillement.

Ce modèle est donc retenu car il décrit mieux les décollements de couche limite et les zones de re-circulation pour un coût en temps de calcul équivalent au modèle de base. Les calculs réalisés ici sont bidimensionnels.

D.2.2 Caractéristiques du calcul

Le dispositif expérimental a été étudié de sorte que le problème puisse être considéré comme bidimensionnel. Le calcul numérique considère donc seulement deux directions : la direction longitudinale (direction du vent incident, selon x) et la direction verticale. Dans la direction latérale, on admet que les flux sont nuls pour toutes les quantités calculées : quantité de mouvement, énergie cinétique turbulente, taux de dissipation d'énergie cinétique. La vitesse moyenne dans la direction latérale est supposée nulle.

D.2.3 Conditions aux limites

A l'entrée du domaine de calcul, on fixe pour chaque cas le profil vertical de vitesse longitudinale approchant au mieux les profils expérimentaux dans les configurations à faible et plus fort taux de turbulence.

Les autres conditions aux limites imposées sont :

Condition de symétrie sur la partie supérieure du domaine

Condition de Dirichlet avec pression statique nulle (Pressure Outlet) en sortie de domaine,

Sol lisse en partie basse du domaine identique en amont et en aval du remblai et/ou écran.

D.2.4 Maillages utilisés

D.2.4.1 Maillage du canal plan sans obstacle

Il s'agit d'un maillage structuré comportant 93×55 cellules suivant x et y . Soit un nombre total de 5115 cellules. Le maillage est raffiné à proximité du sol (30 cellules discrétisées à pas constant selon la verticale : $\Delta y = 5$ mm) afin de restituer correctement l'évolution des forts gradients présents dans la couche limite.

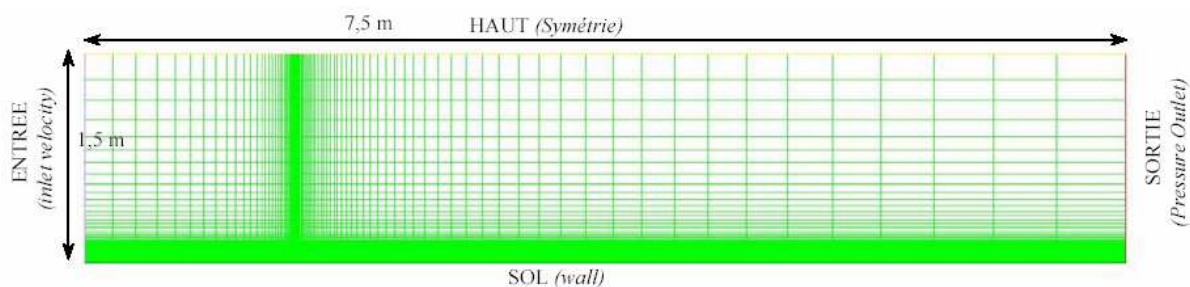


Figure D-2 : maillage du canal sol plan sans obstacle (cas 1)

D.2.4.2 Maillages du canal plan avec écran

Afin de reproduire les conditions d'essais expérimentales, notamment la présence de capteurs acoustiques placés suffisamment en amont d'un écran, les deux maillages réalisés se différencient uniquement par la longueur de domaine située en amont de l'écran. Ce dernier est plein (absence de porosité), de hauteur $h=150\text{mm}$ et d'épaisseur $e=5\text{mm}$ et est disposé perpendiculairement au sol.

Les deux maillages sont de type structuré et comportent respectivement 93×55 cellules pour le petit domaine (cas2-1) et 133×55 pour le grand (cas2-2). Le raffinement des cellules à proximité du sol, dans la zone où se développe la couche limite, est identique à celui réalisé pour le canal sans obstacle (cas1). L'origine du repère (x,y) est définie au droit de l'écran en partie amont. Les longueurs en amont de l'écran (depuis l'entrée du domaine de calcul) sont de $10h$ (1.5 m) dans le premiers cas et de $50h$ dans le second. La longueur aval de $40h$ (6m au $1/20$ ième) et la hauteur par rapport au sol de $10h$ sont identiques dans les deux cas.

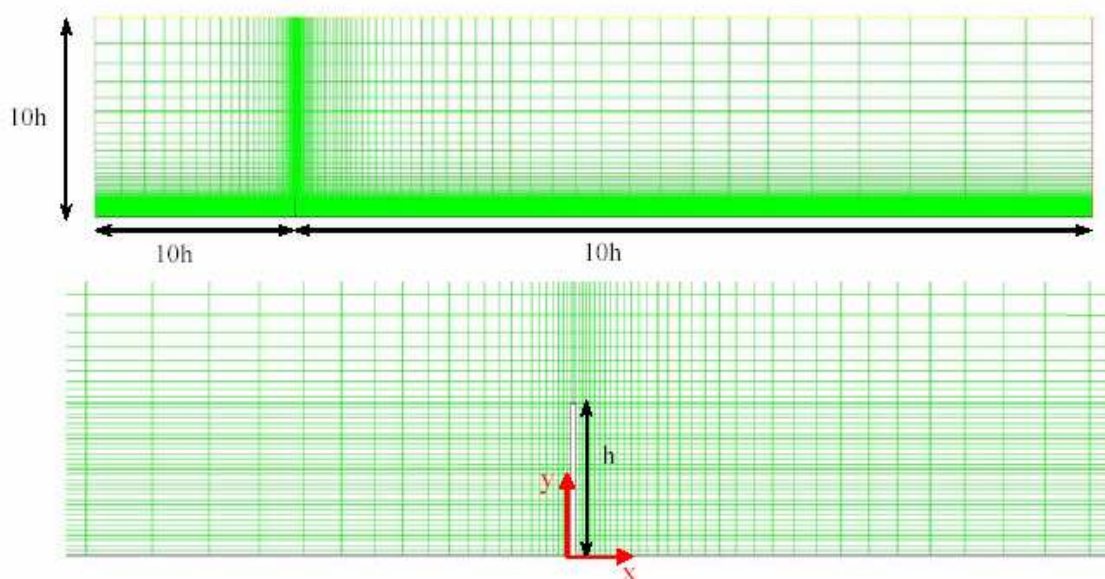


Figure D-3 : maillage du canal sol plan lisse avec écran (cas 2-1)

D.2.4.3 Maillage du canal avec remblai

Maillage structuré de 6490 cellules (118×55). L'origine du repère (x,y) est définie en pieds du remblai. Les distances en amont et en aval du remblai sont de 2 m et de 6 m . La hauteur par rapport au sol est de 1.75m en amont du remblai et de 1.5m en aval. Le remblai a des dimensions longueur et hauteur respectivement de 375 mm par 250 mm .

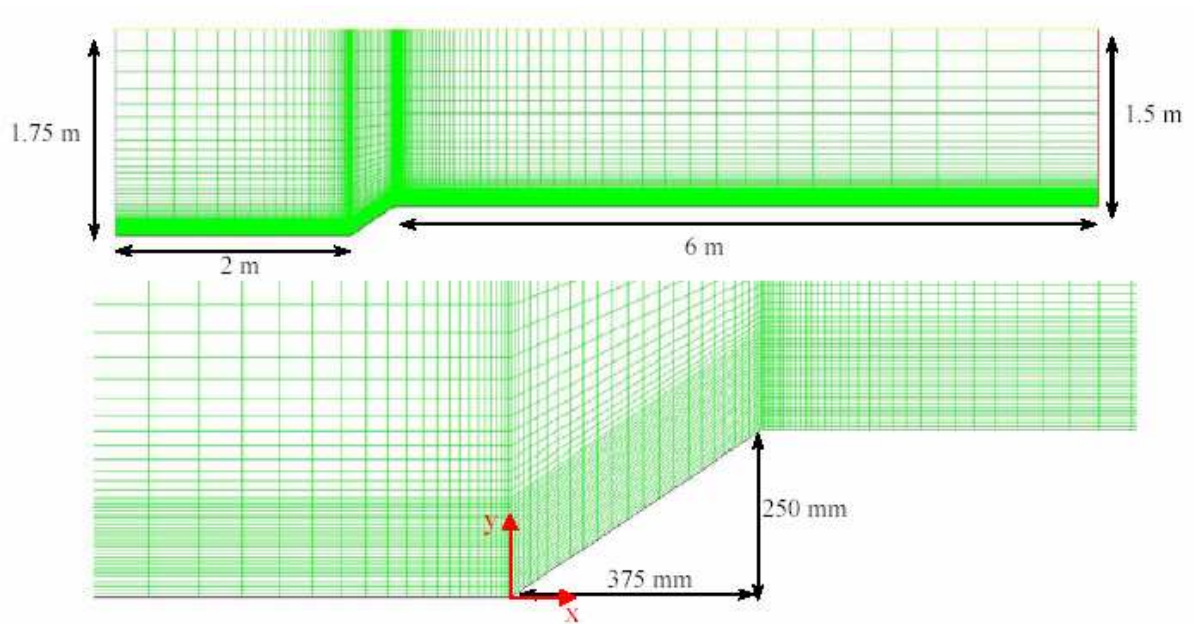


Figure D-4 : maillage du canal avec remblai sans écran (cas 3)

D.2.4.4 Maillage du canal avec remblai et écran

Dans cette configuration, le maillage est identique à celui du cas précédent, l'écran étant rajouté en partie haute du remblai. Les dimensions en amont et en aval du remblai, ainsi que les hauteurs verticales sont conservées.

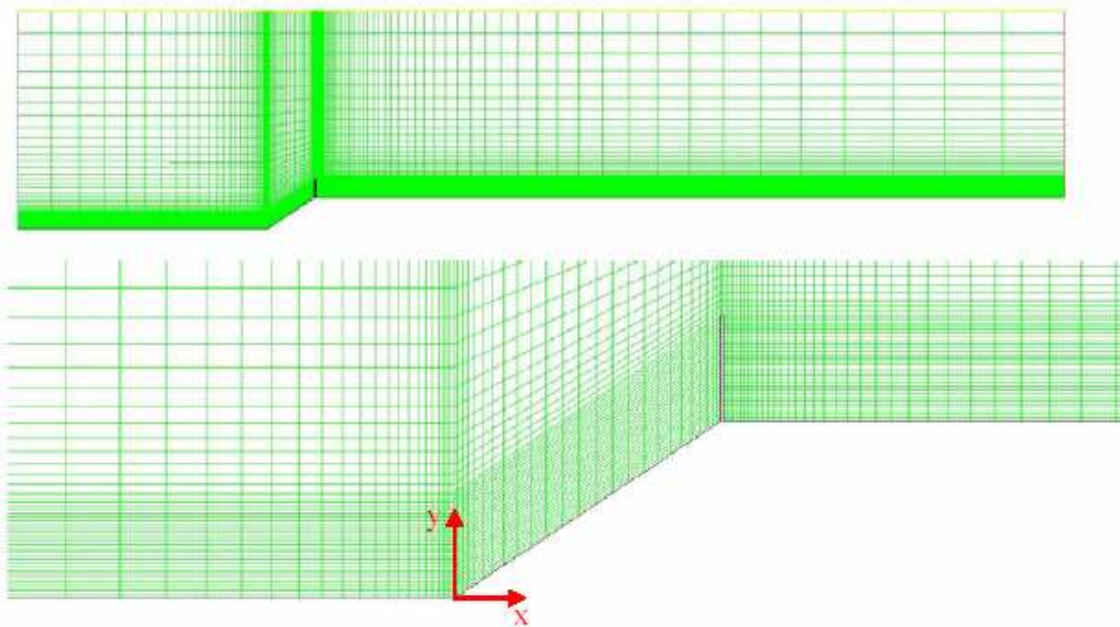
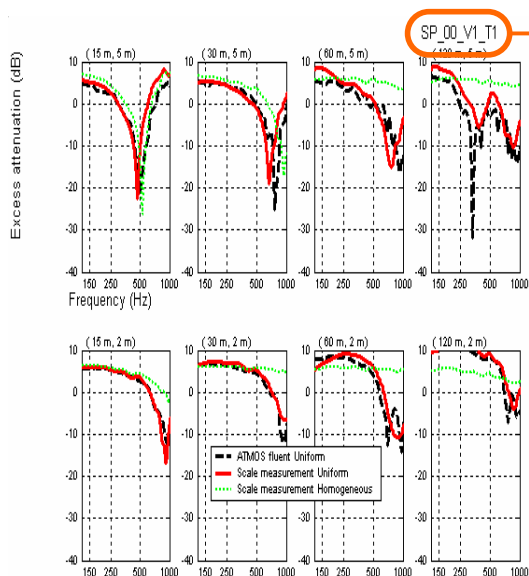


Figure D-5 : maillage du canal avec remblai et écran (cas 4)

Annexe E : Résultats obtenus en soufflerie

Cette annexe présente l'ensemble des résultats obtenus en soufflerie selon la nomenclature suivante :



X _ X _ X _ X

SP: Sol Plan

VC: Sol Plan et Vent
Contraire

RD: Remblai Déblai

OO: Sol rigide, sans écran

FO: Sol absorbant (feutrine),
sans écran

OE: Sol rigide, avec écran

FE: Sol absorbant (feutrine), avec
écran

T0: Conditions homogènes

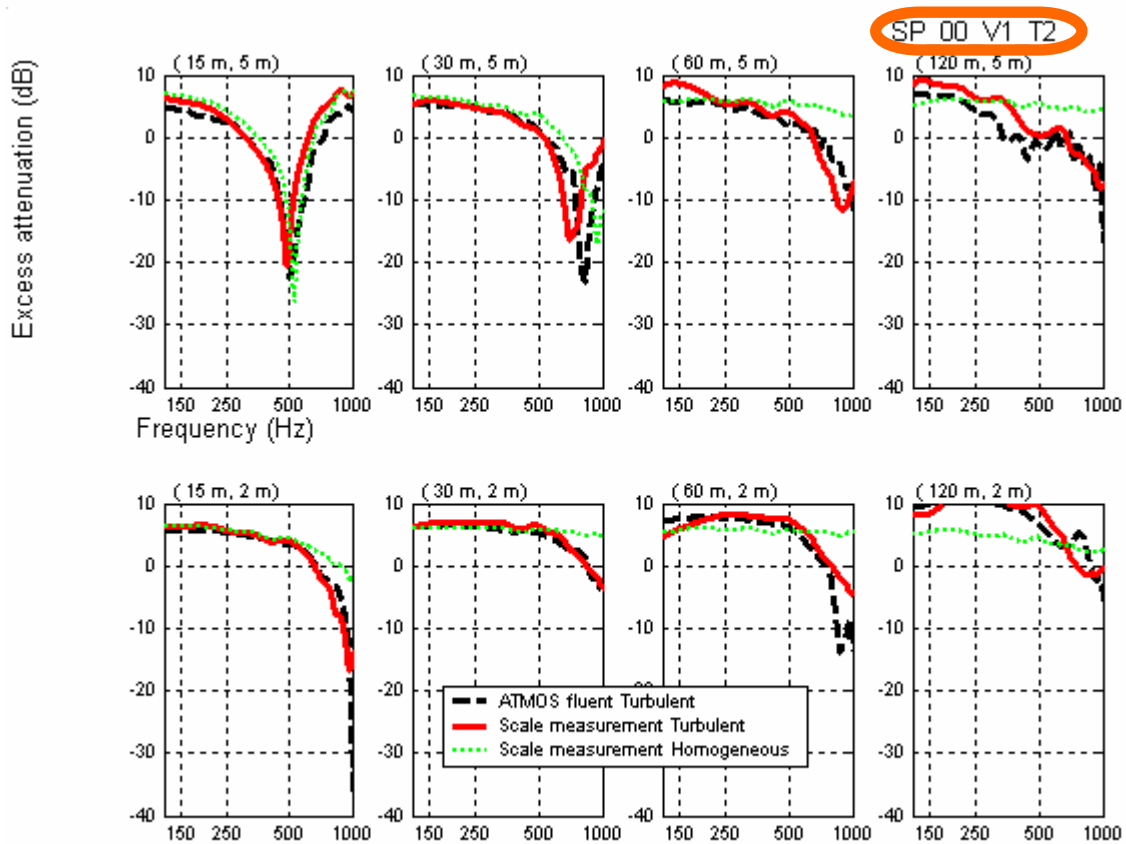
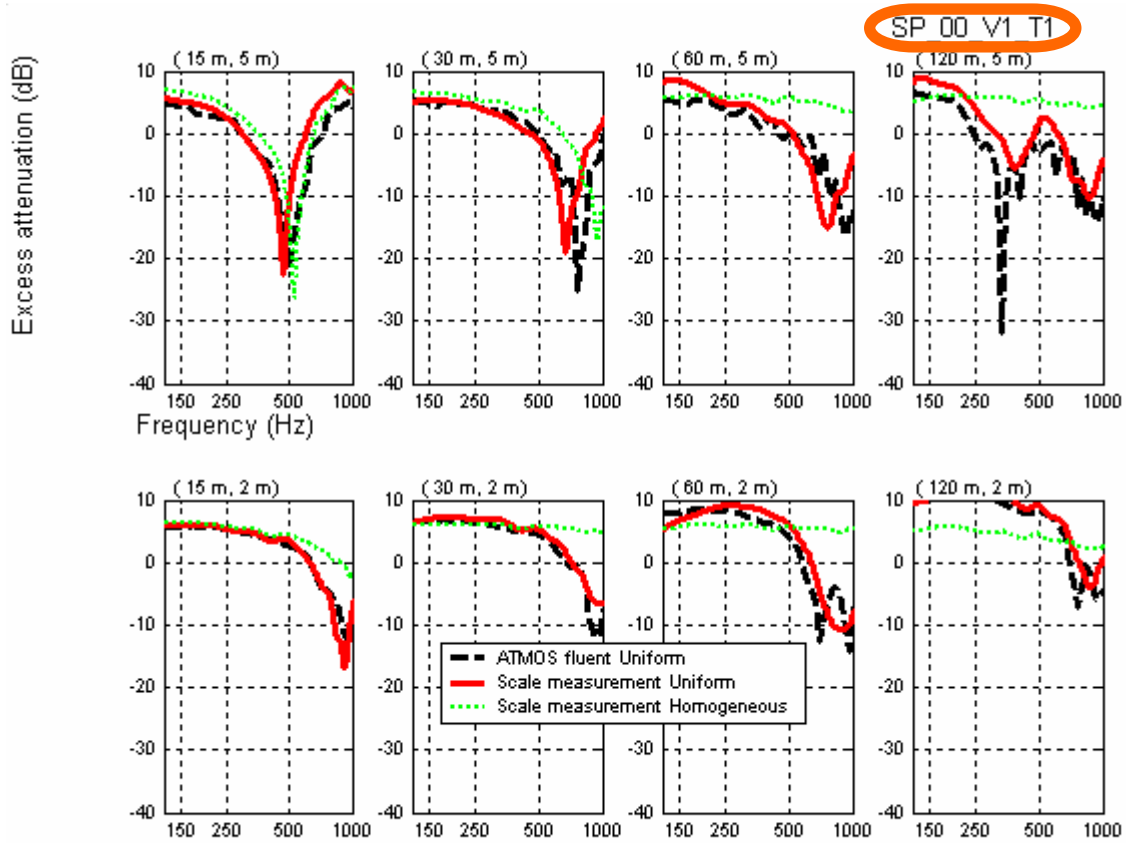
T1: Intensité de turbulence
faible

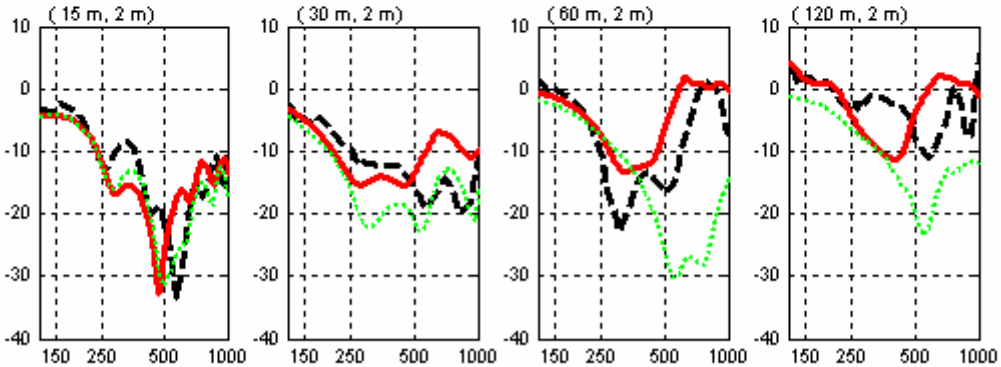
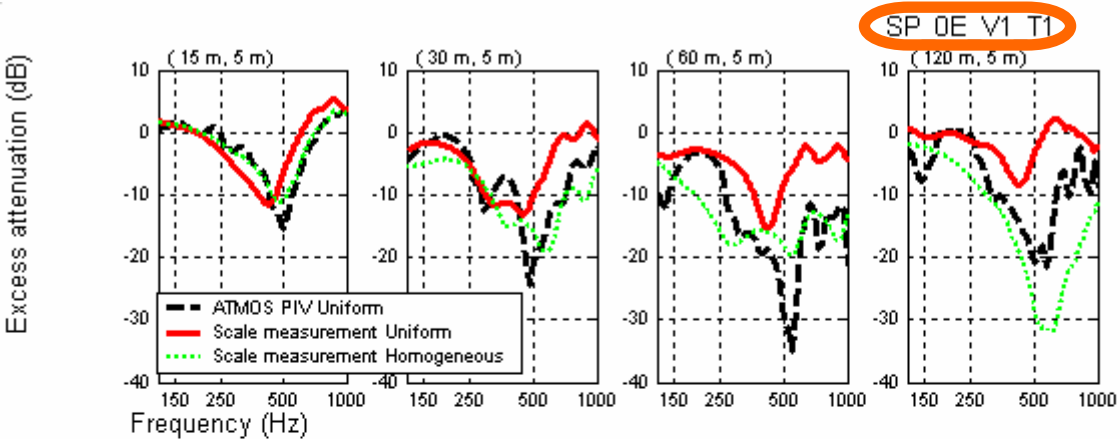
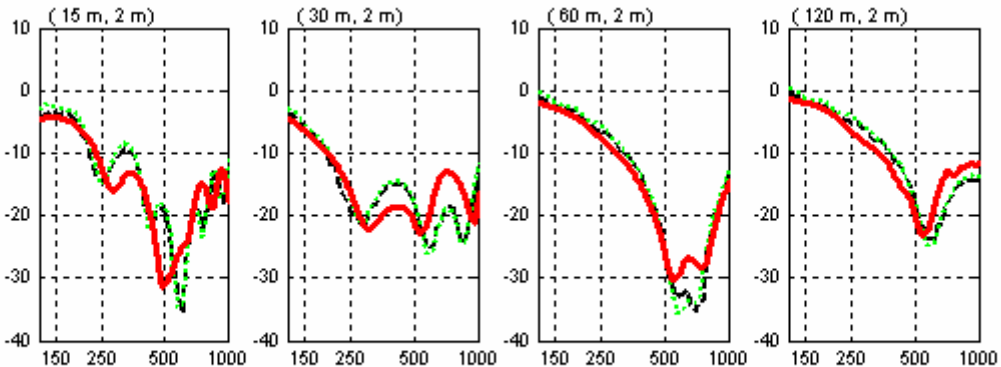
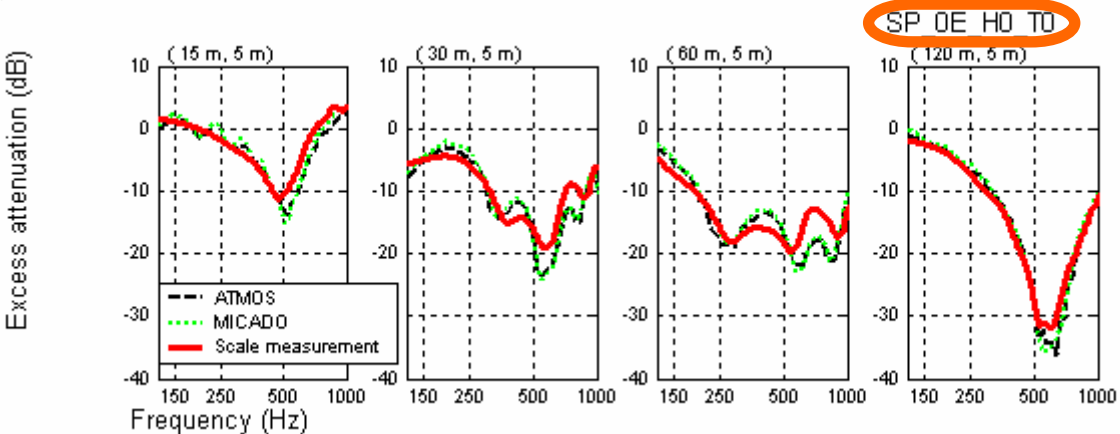
T2: Intensité de turbulence
forte

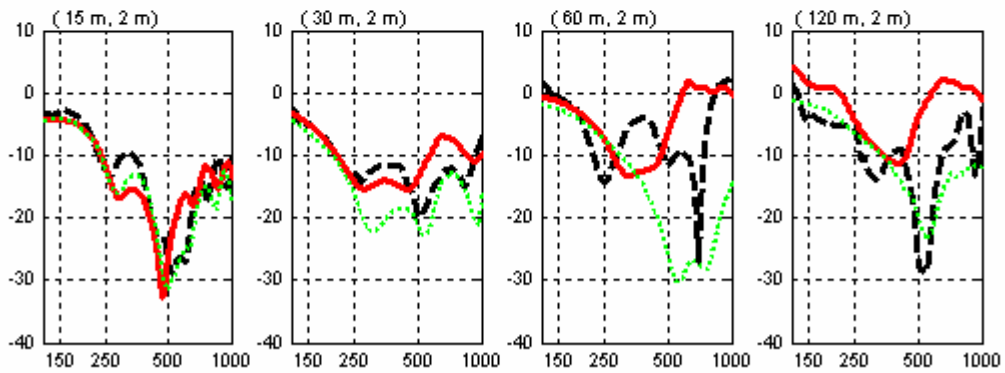
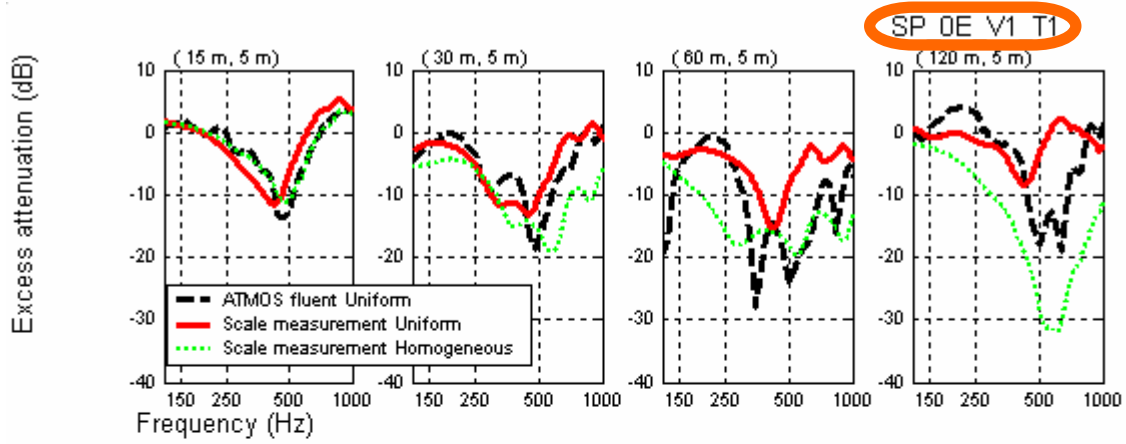
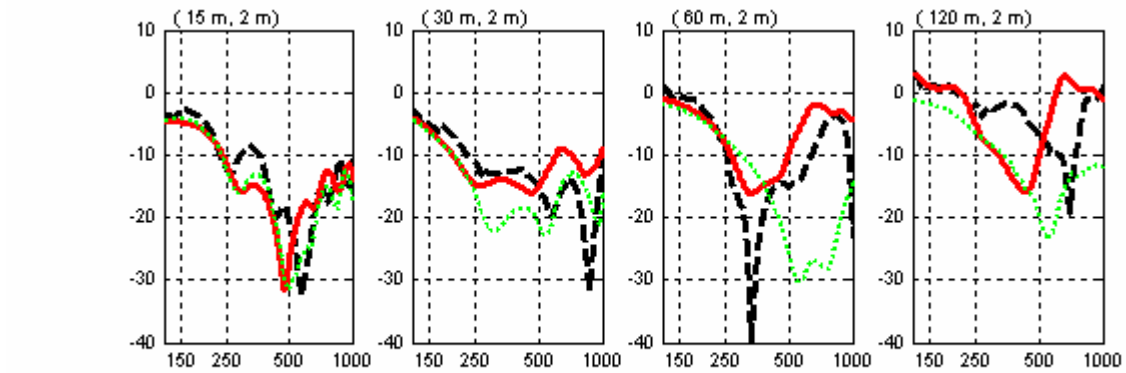
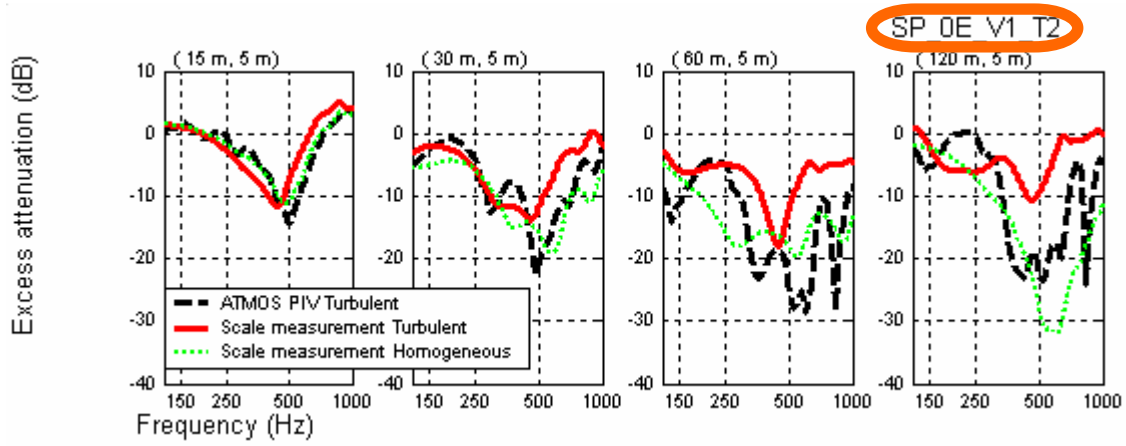
H0: Conditions homogènes

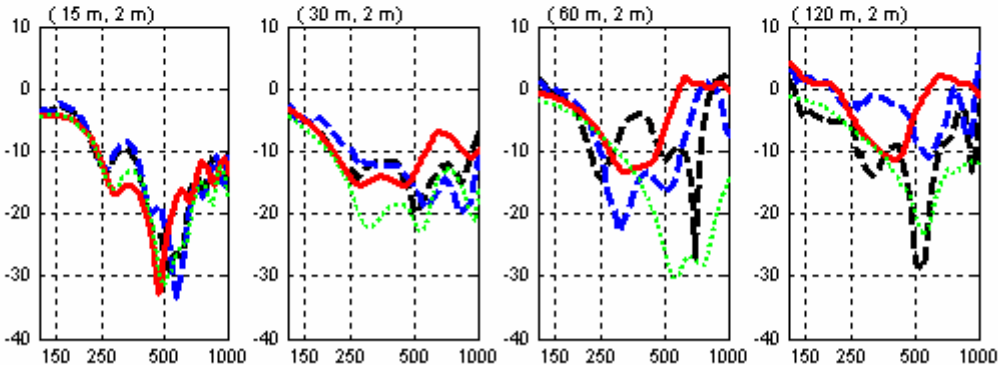
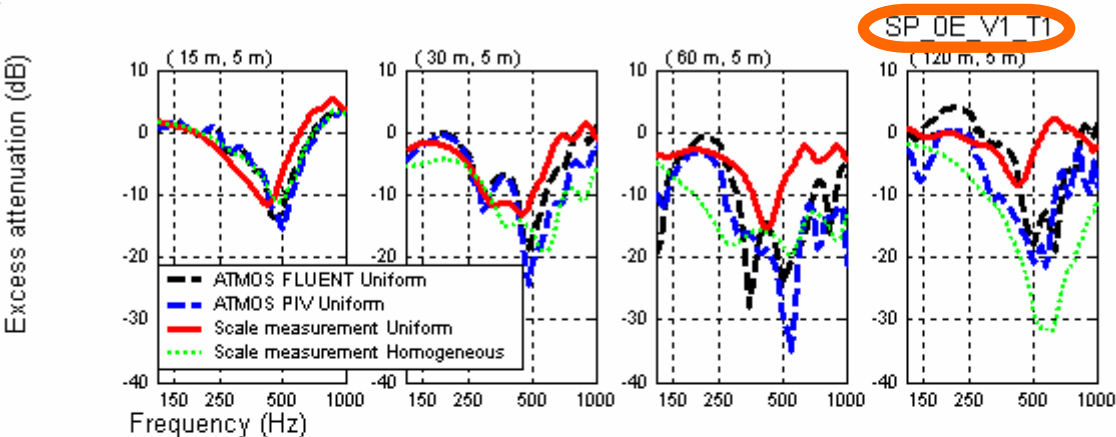
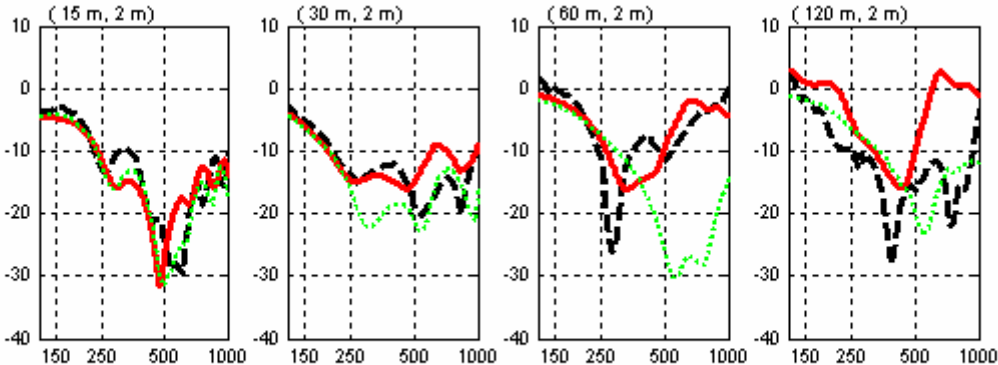
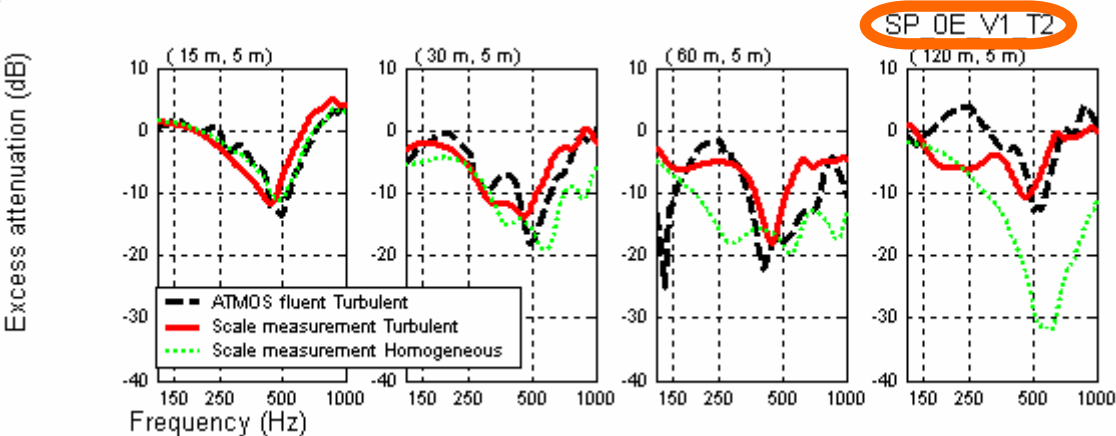
V1: Vent portant

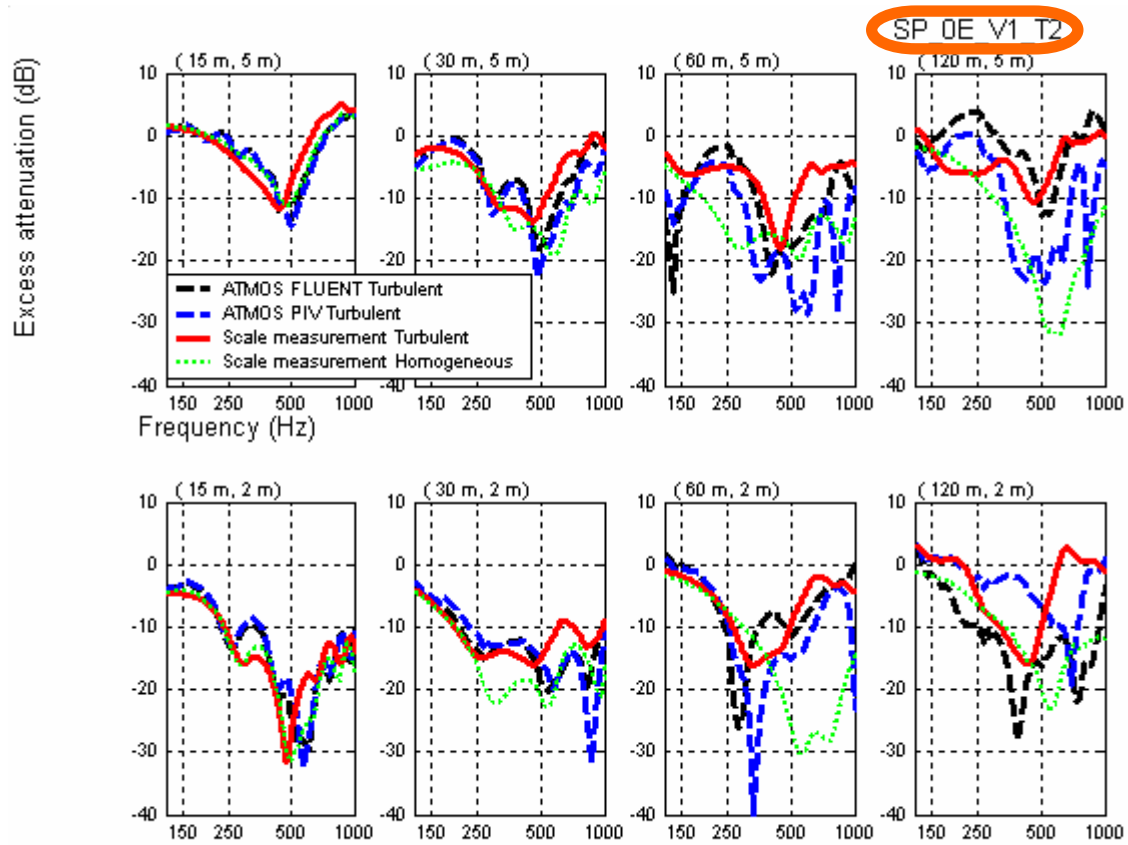
V2: Vent contraire

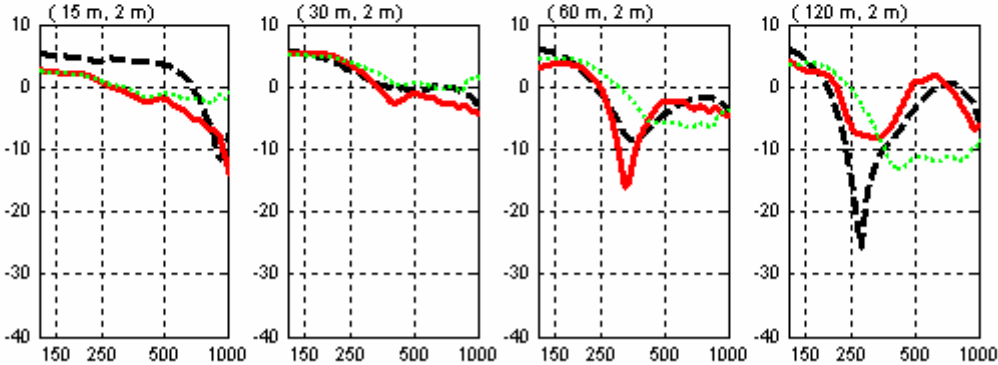
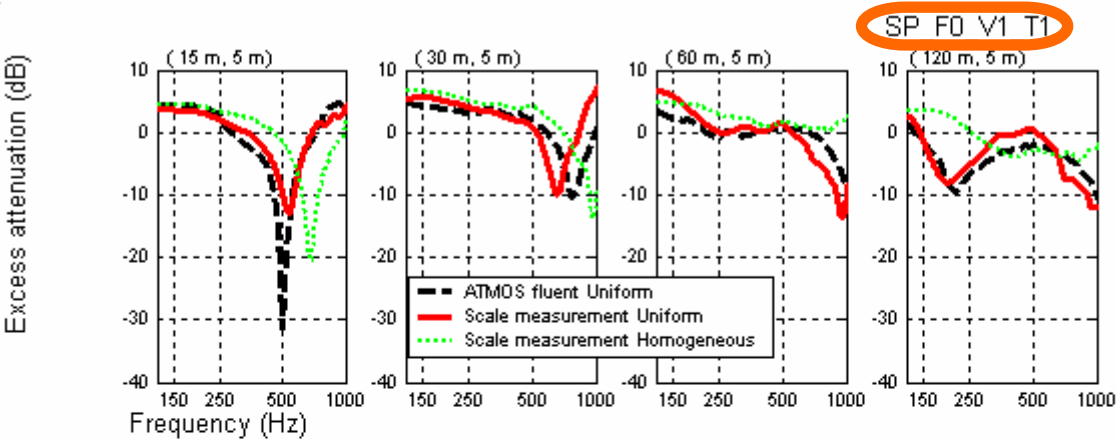
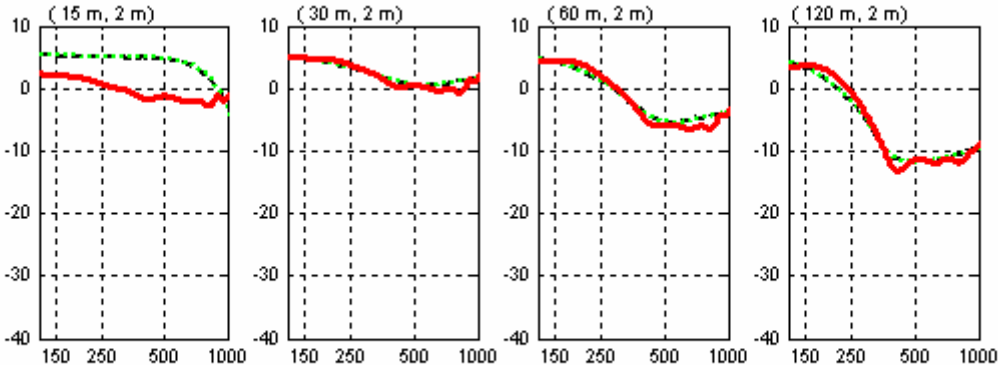
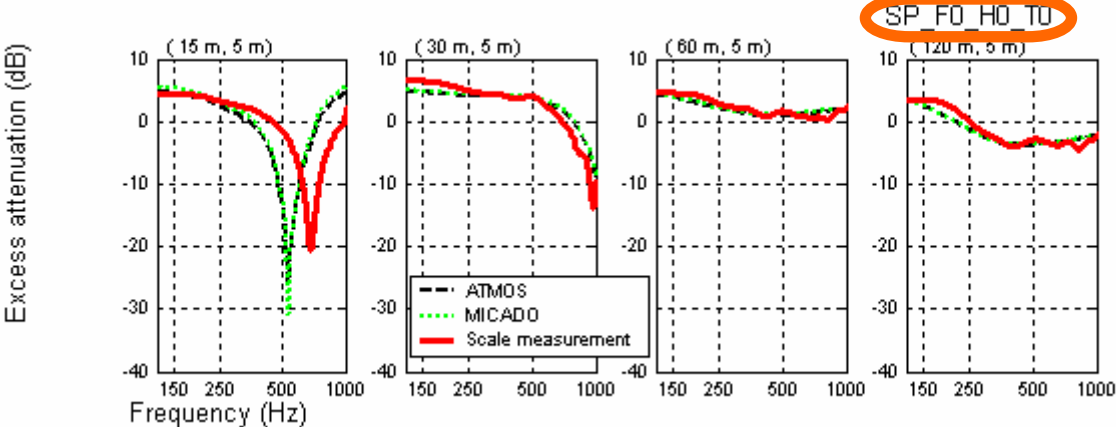


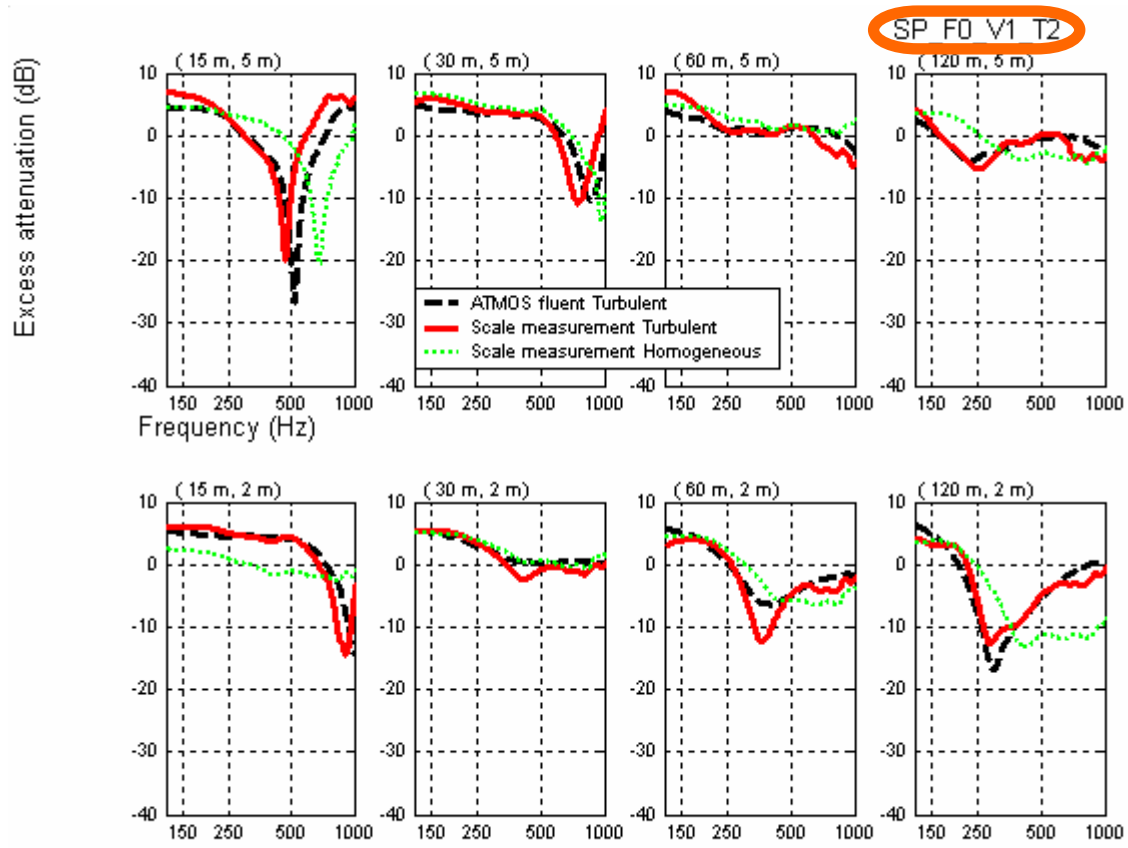


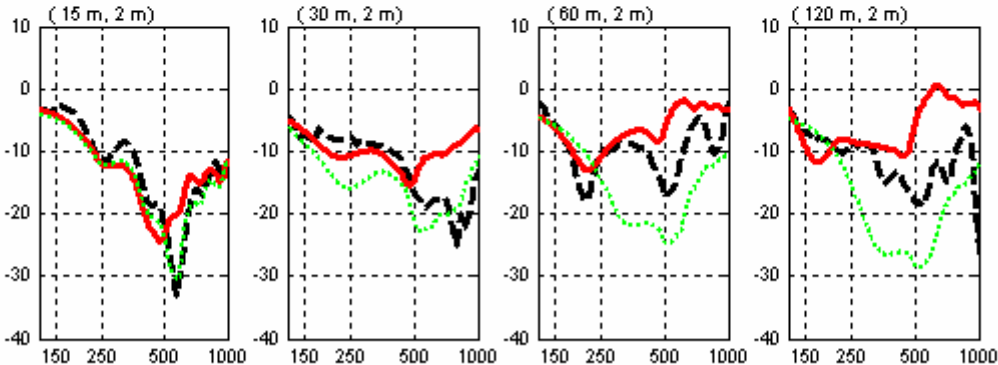
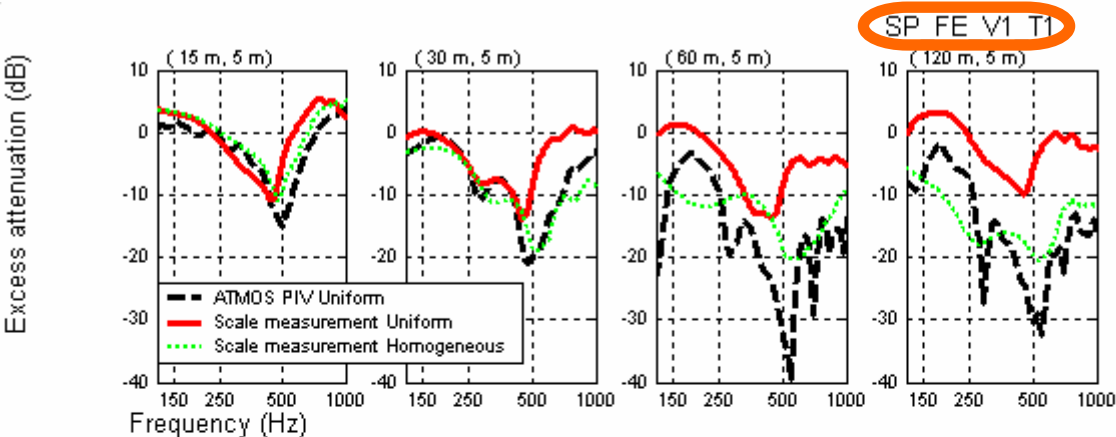
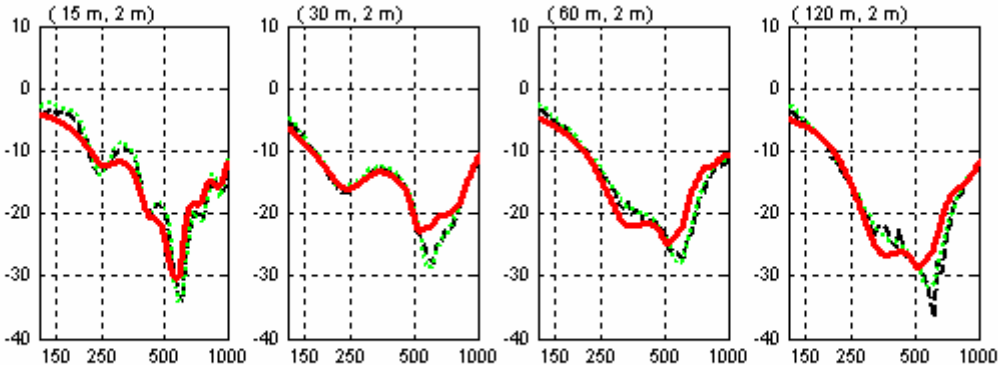
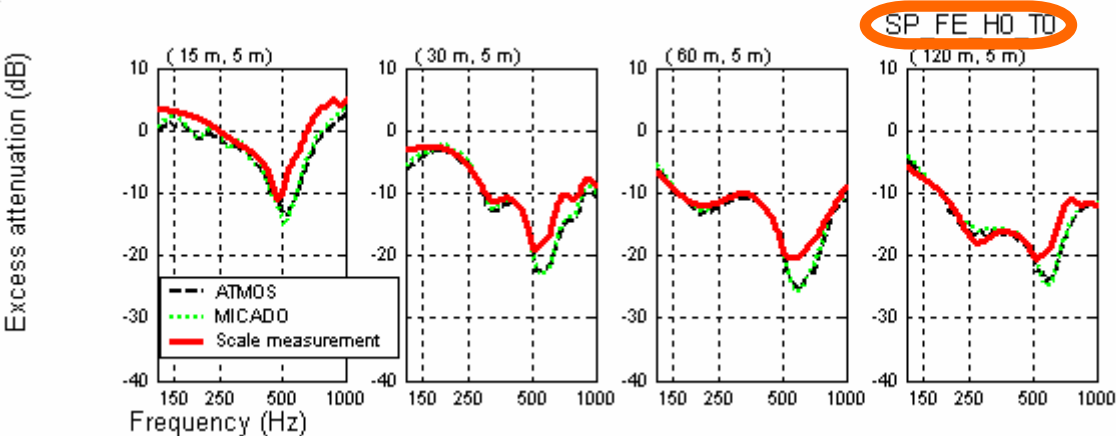


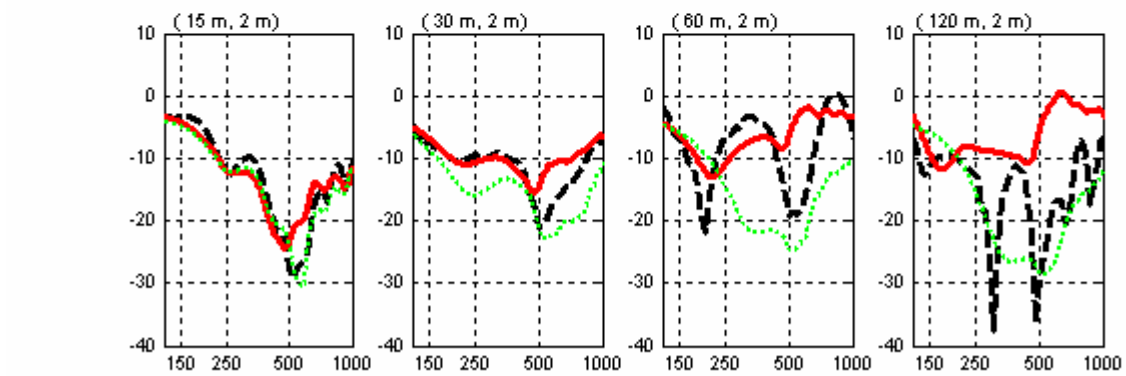
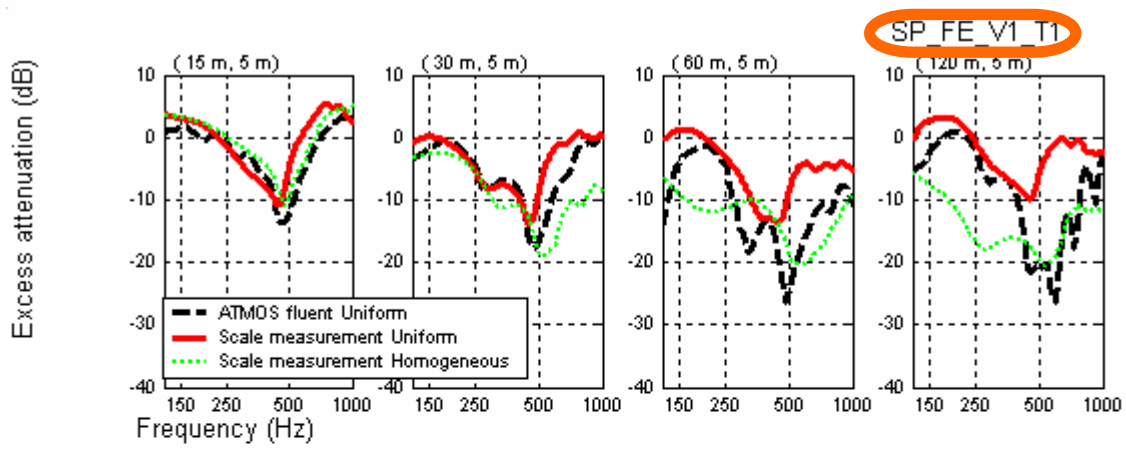
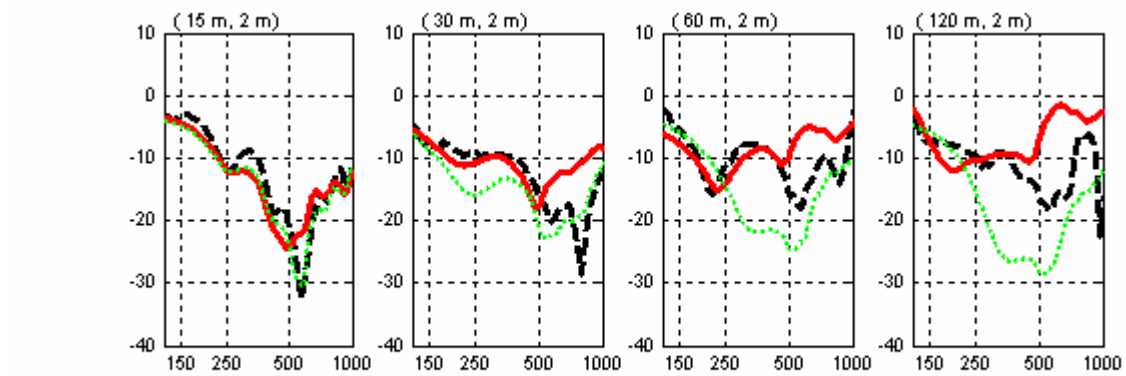
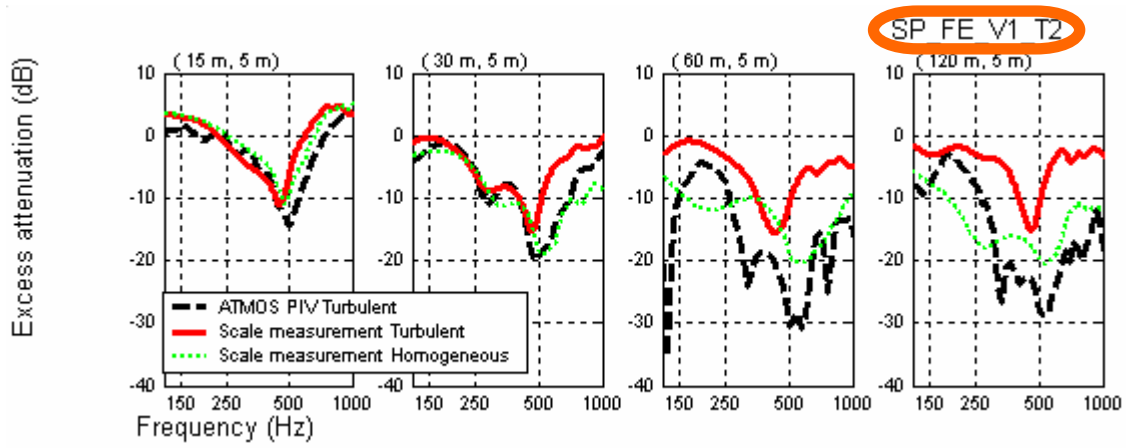




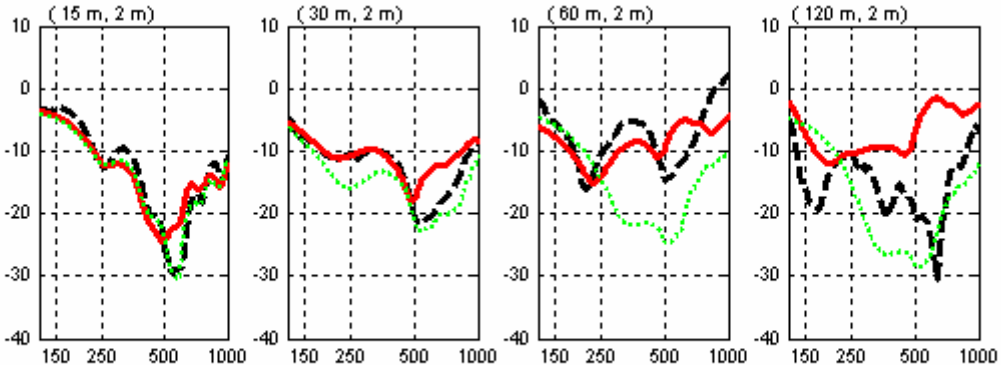
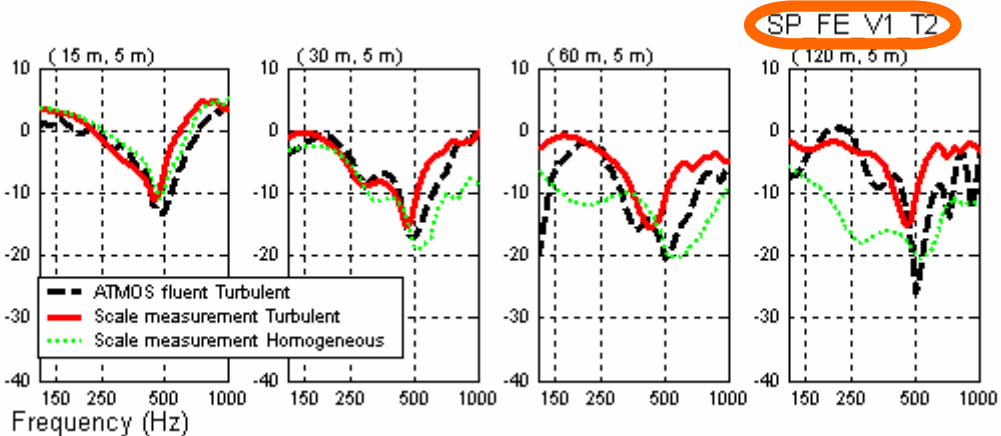




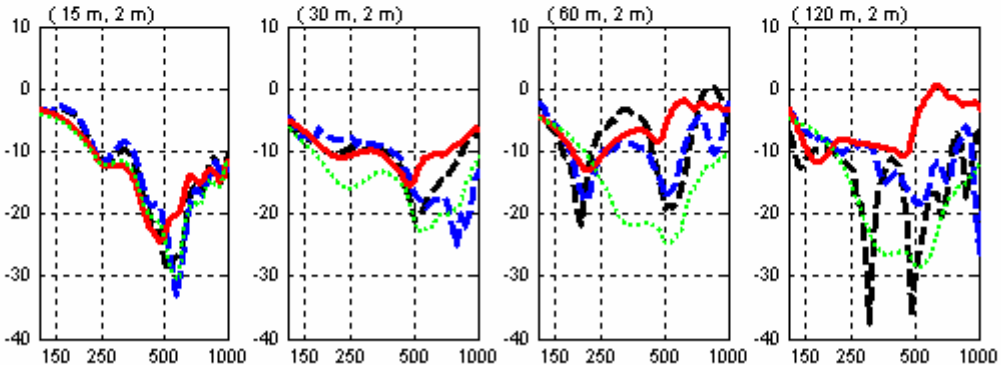
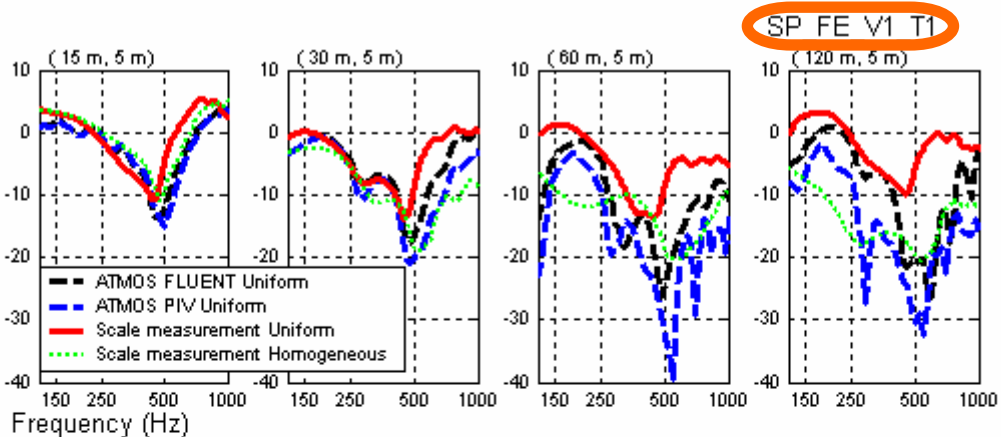


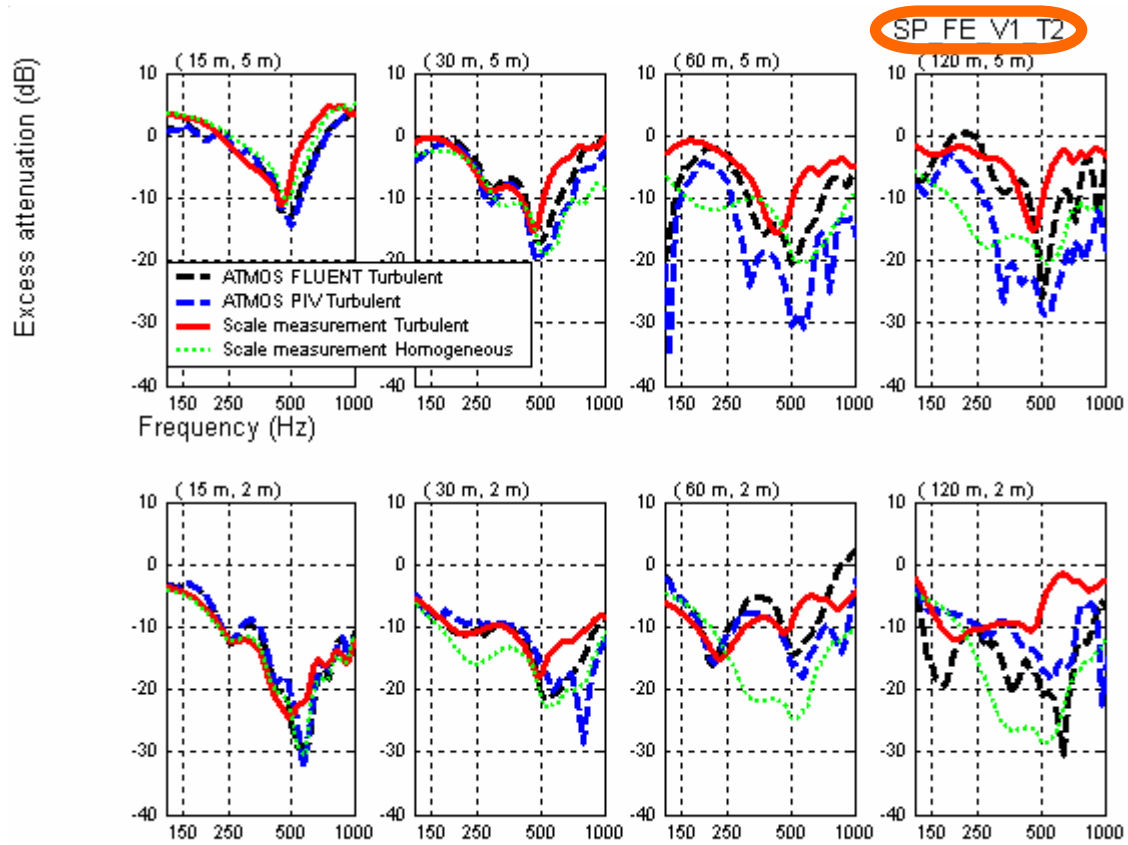


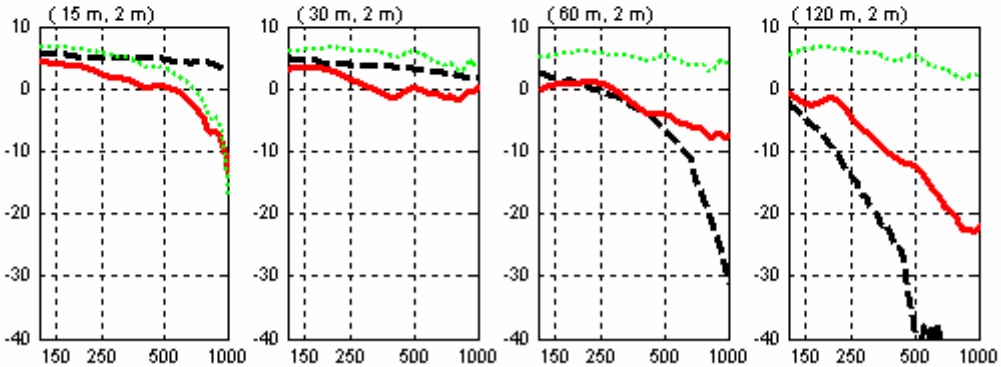
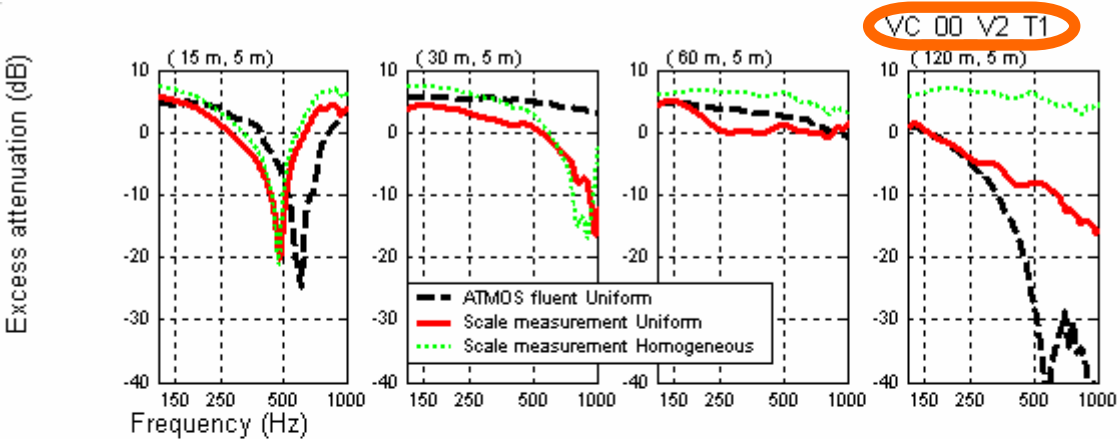
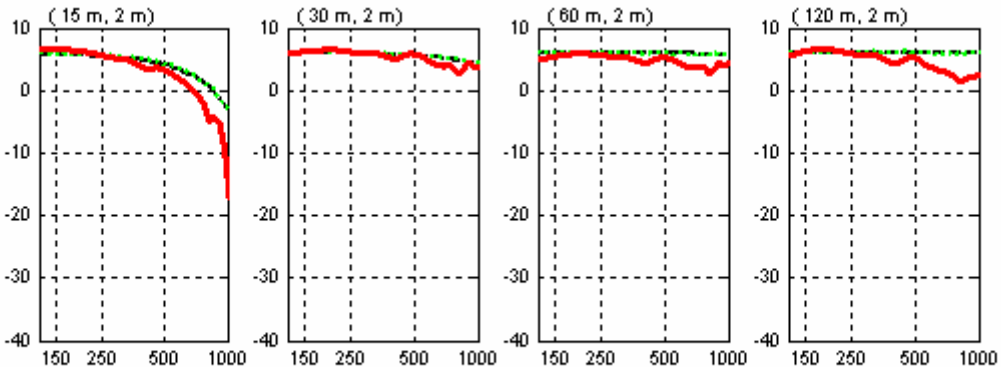
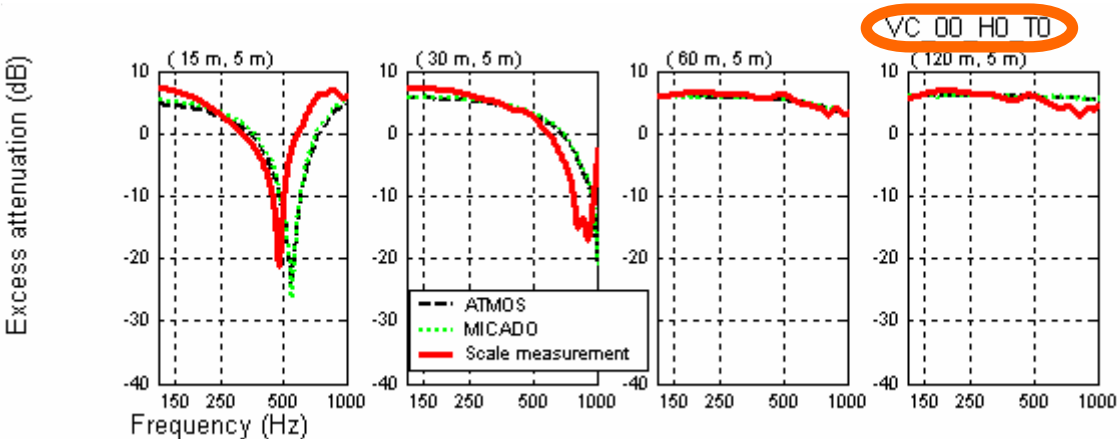
Excess attenuation (dB)

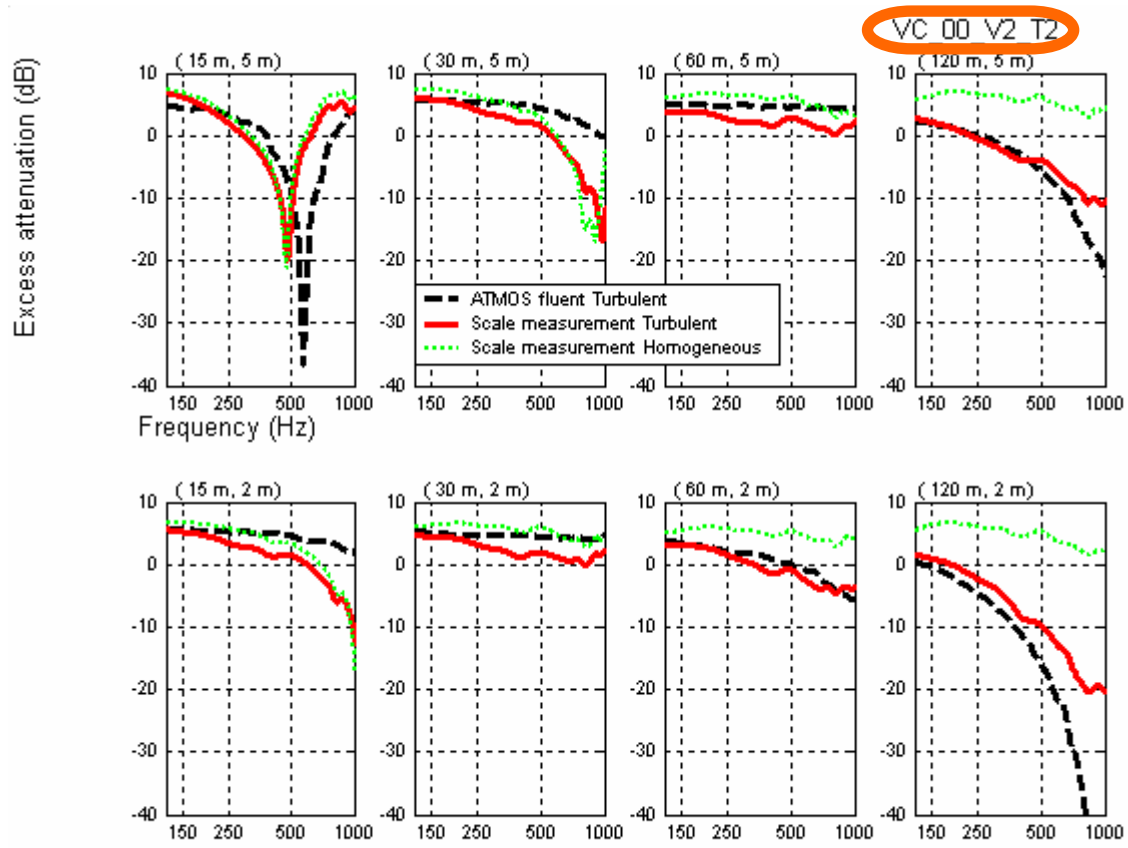


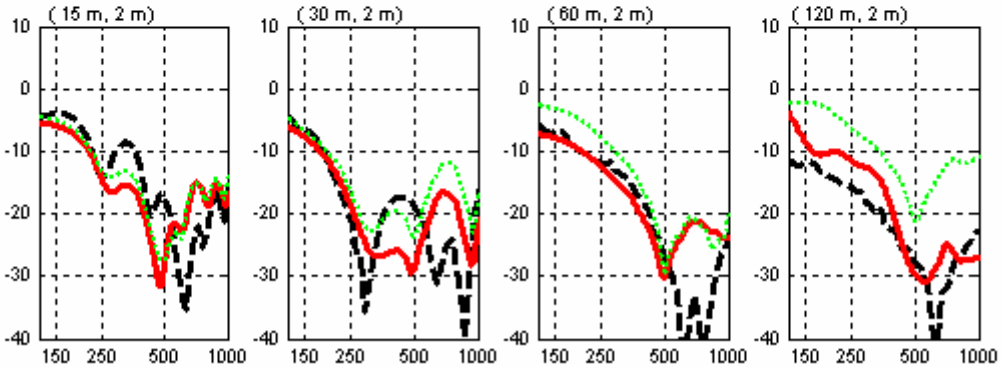
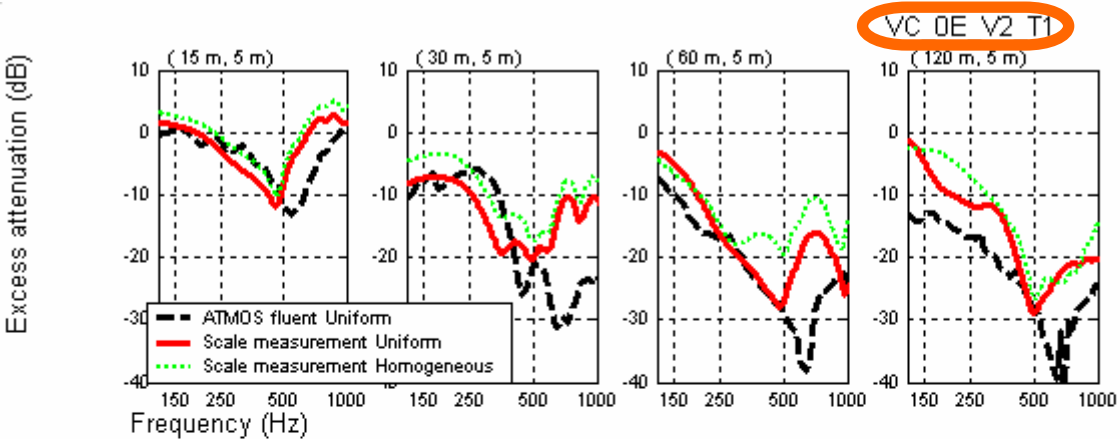
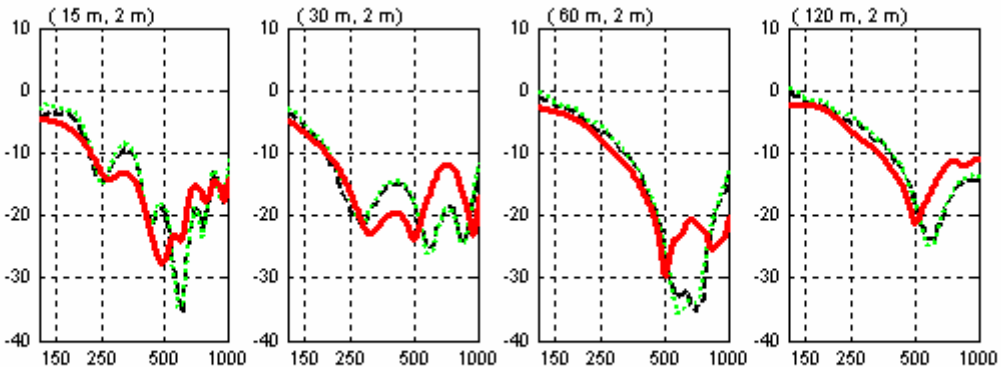
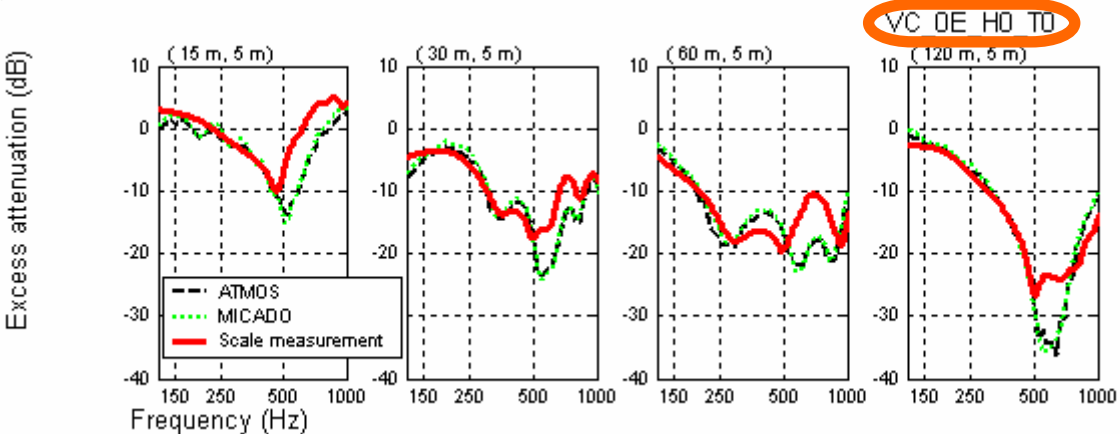
Excess attenuation (dB)

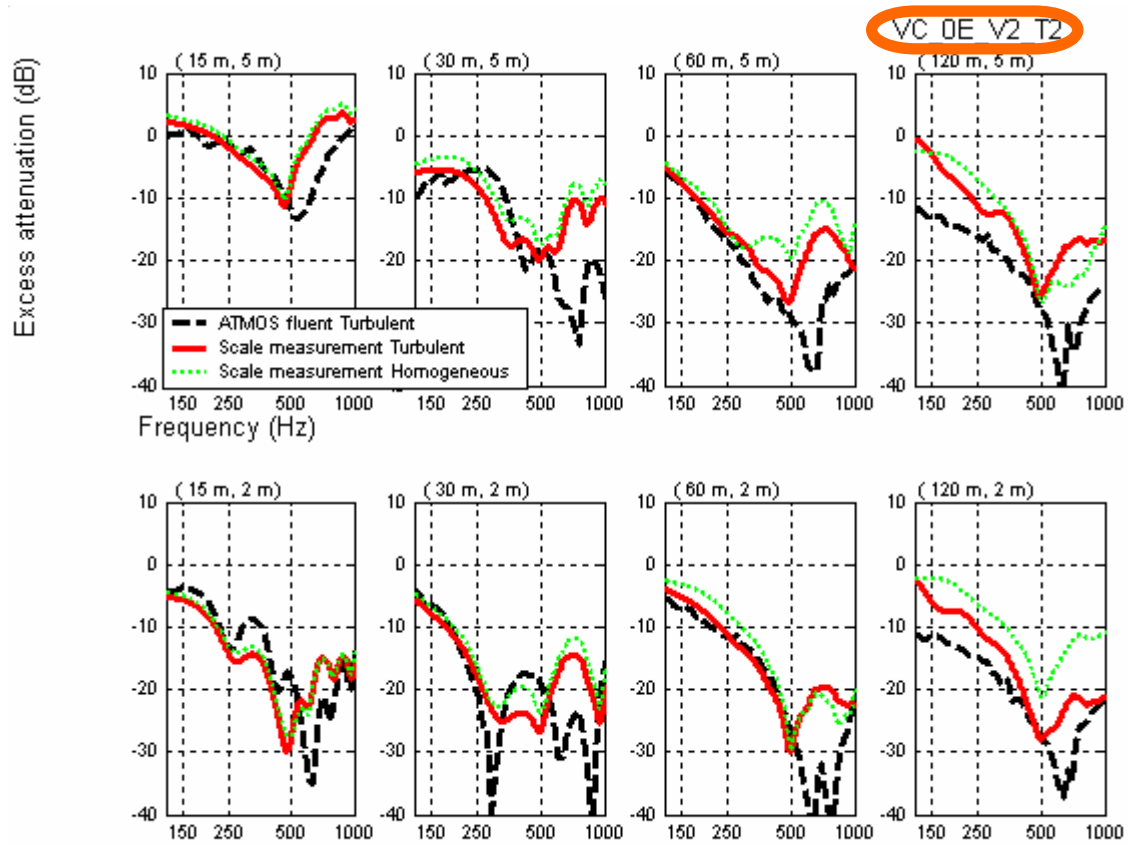


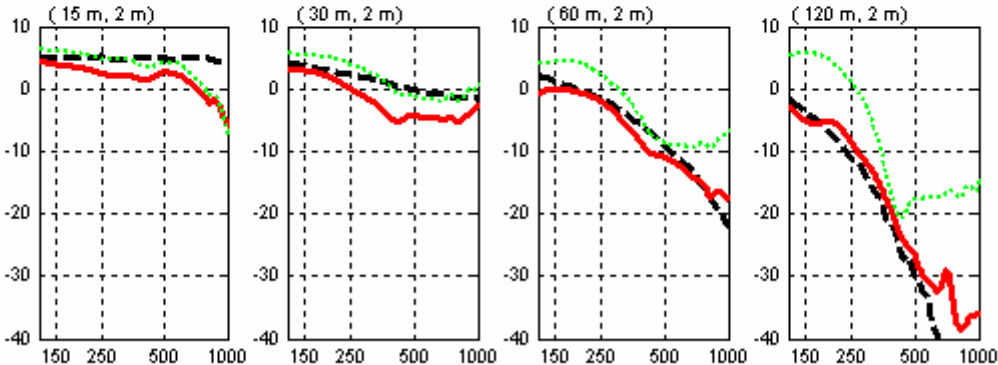
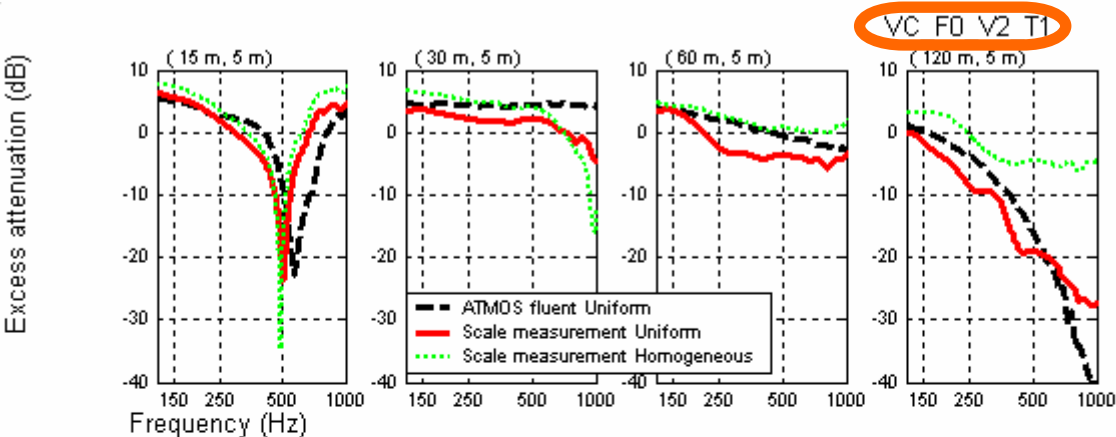
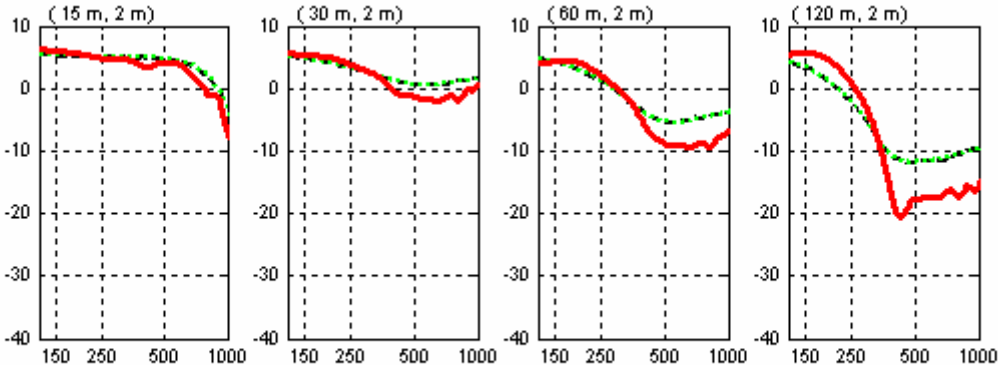
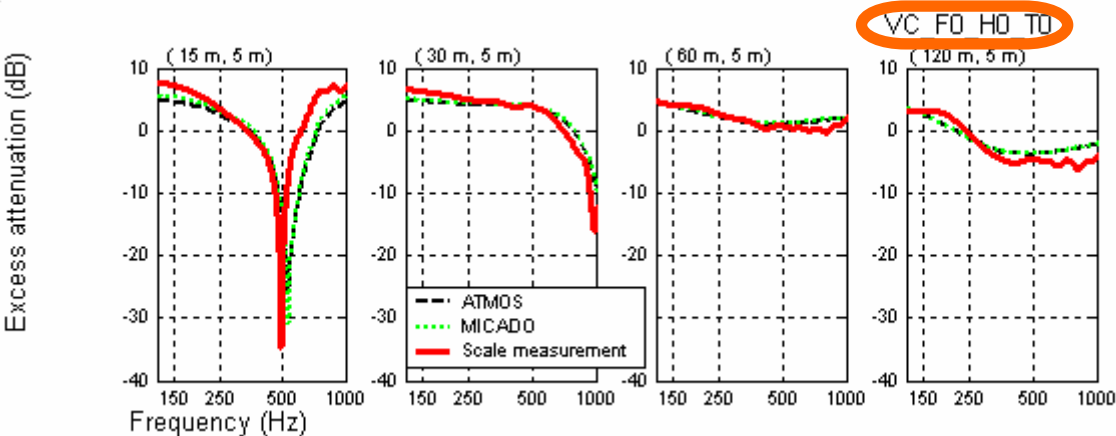


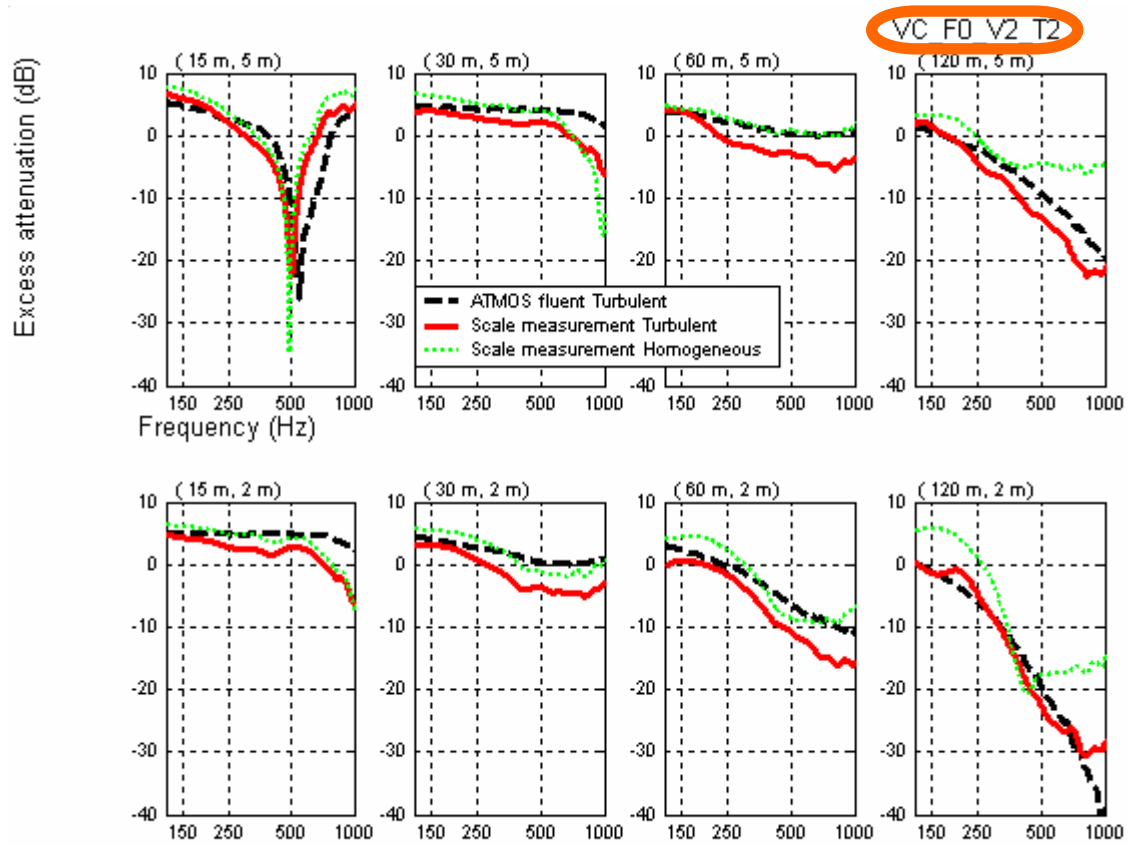


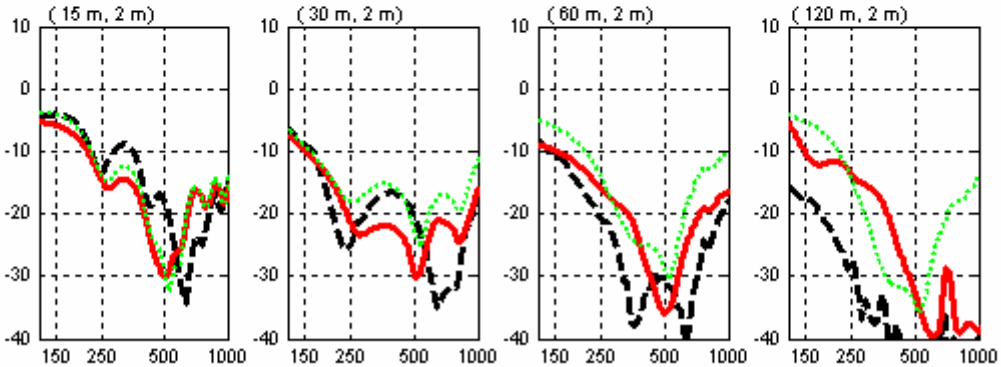
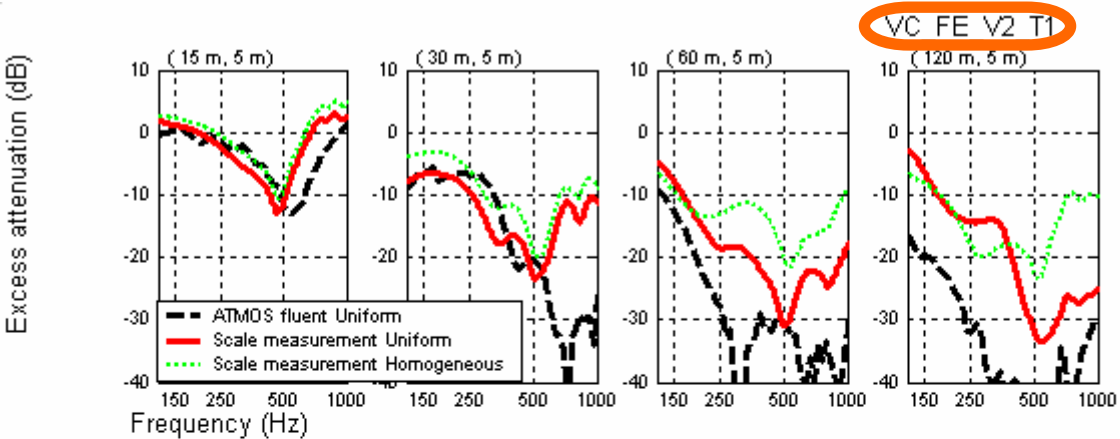
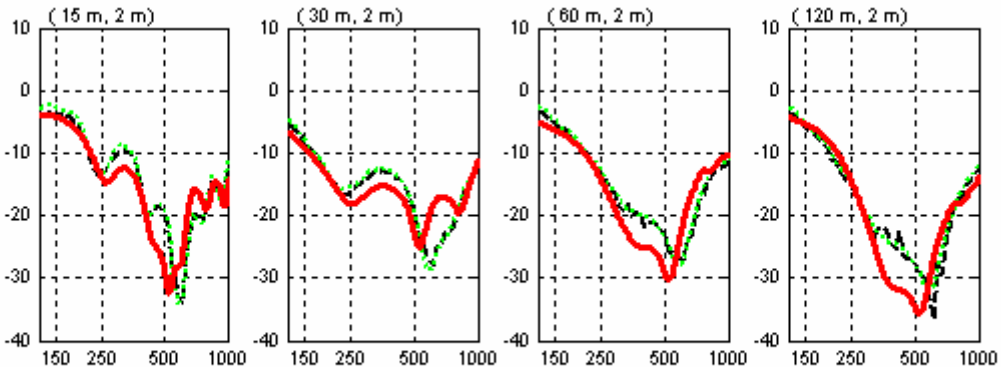
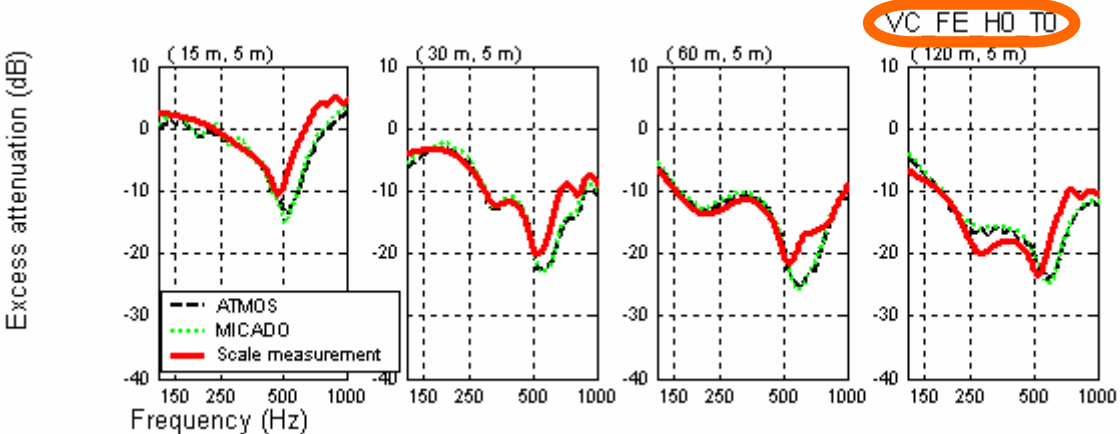


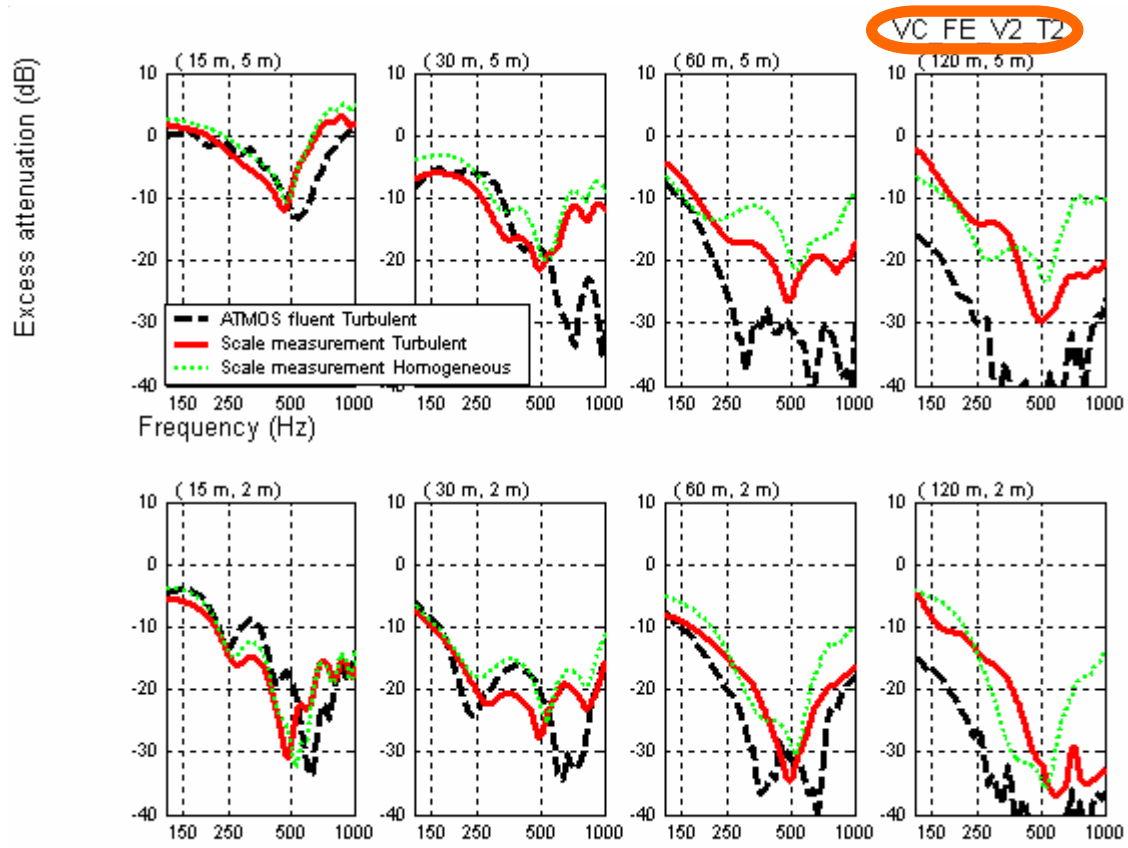


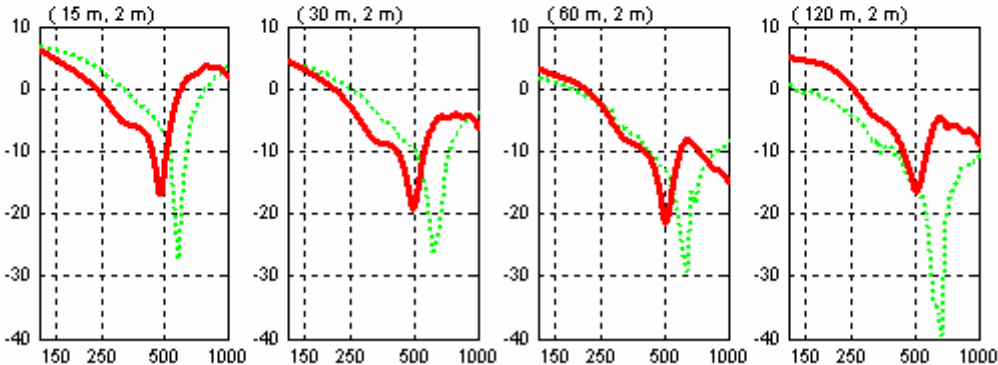
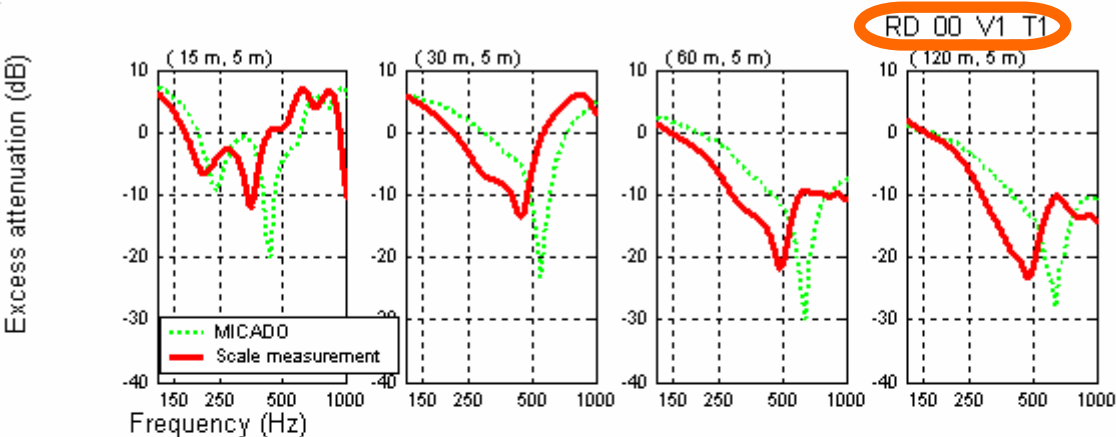
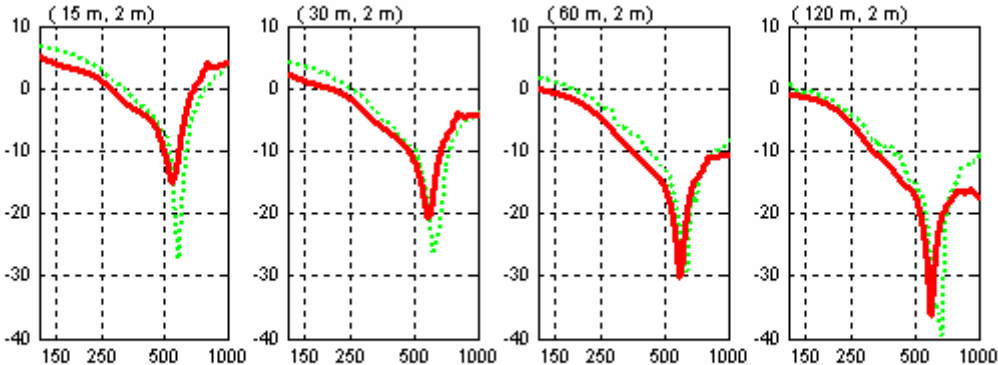
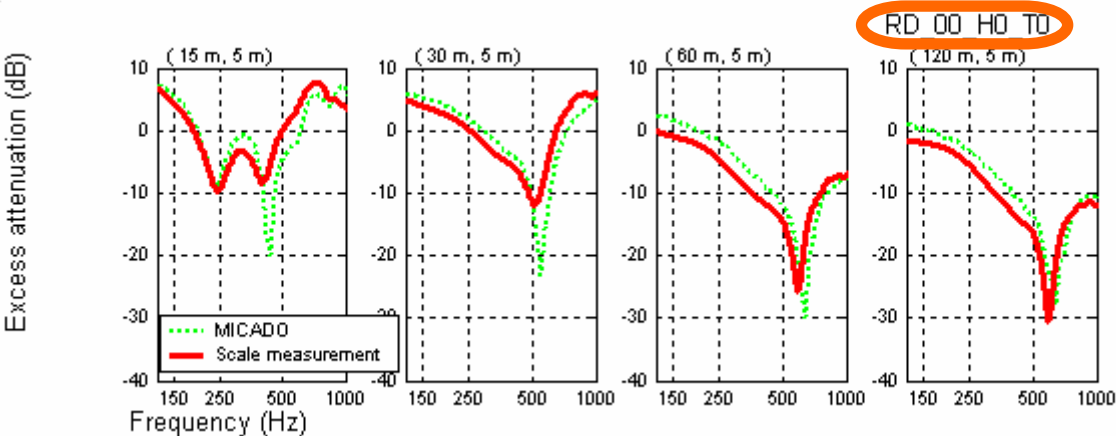


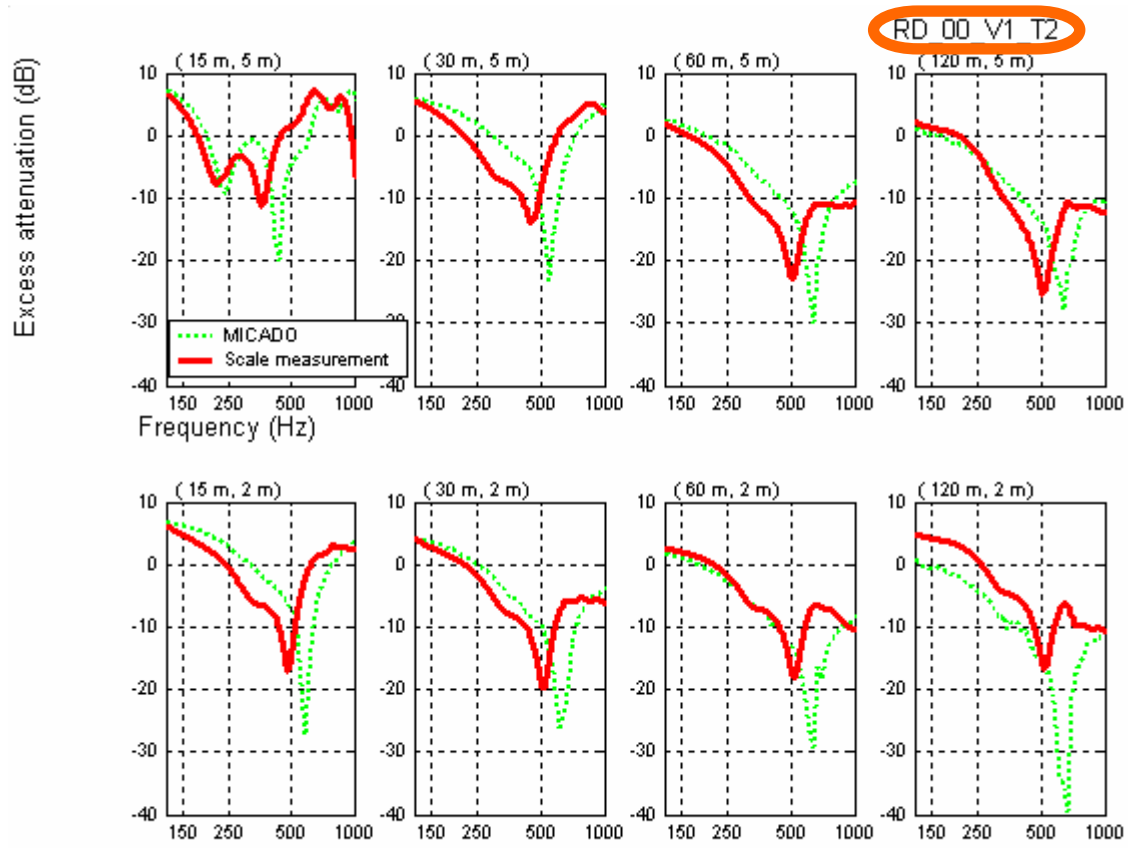


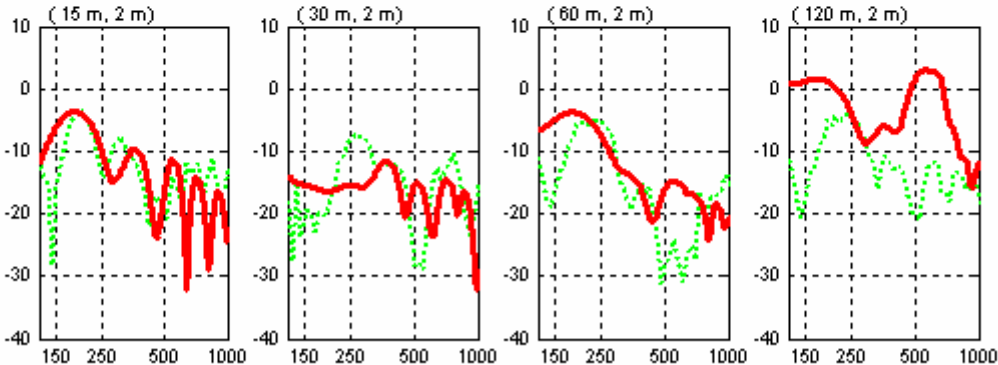
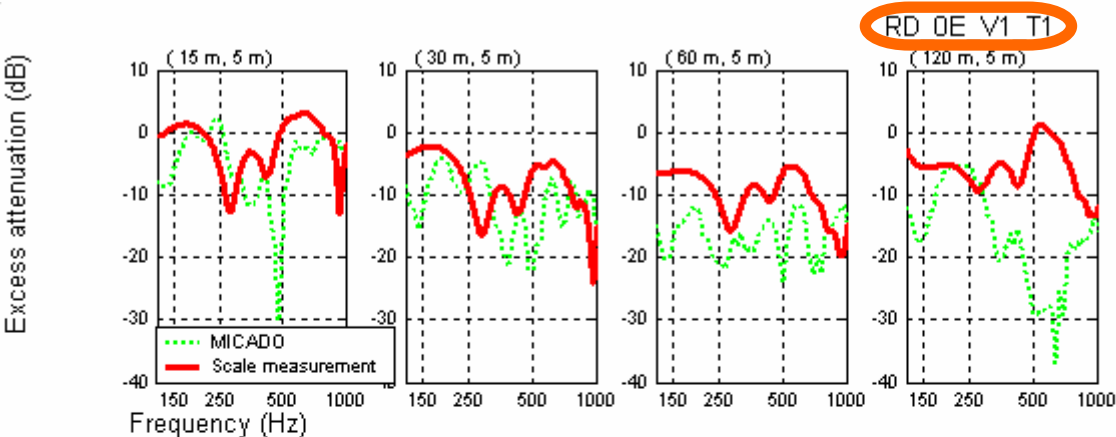
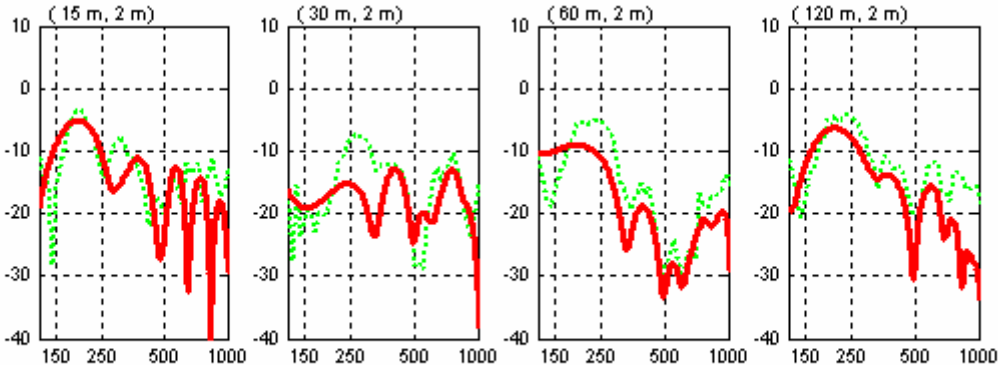
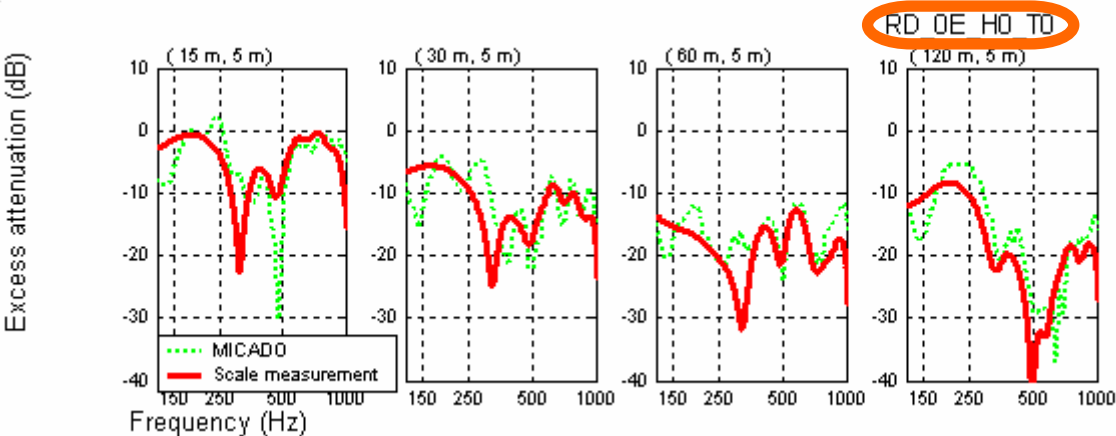


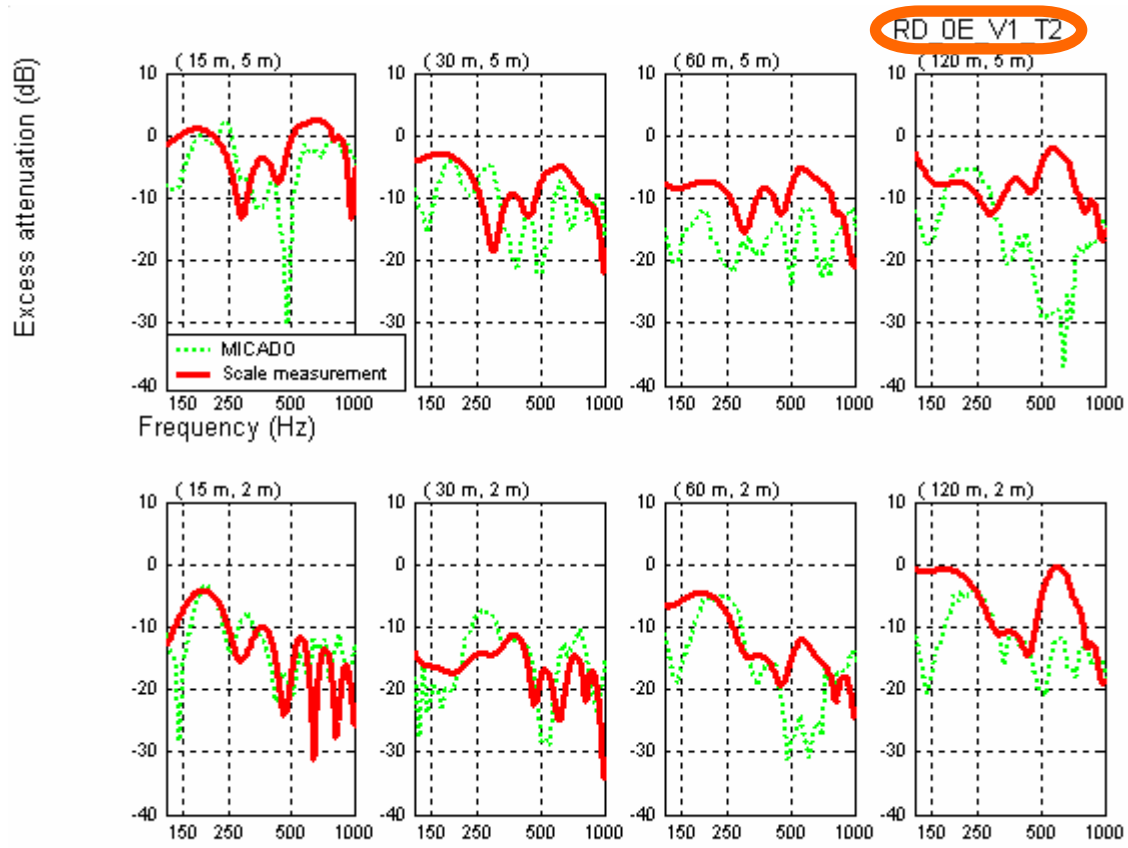


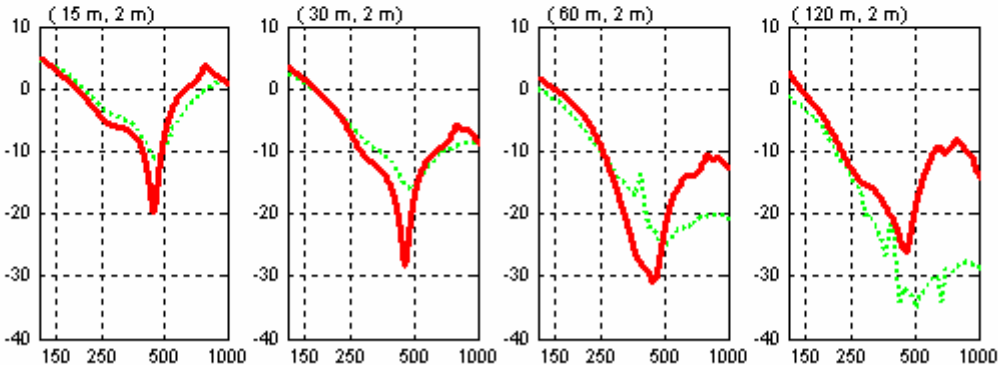
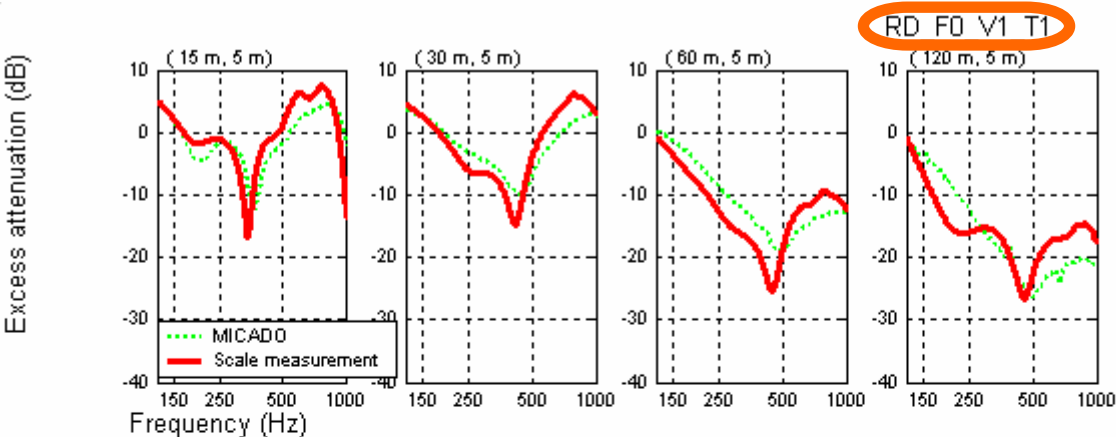
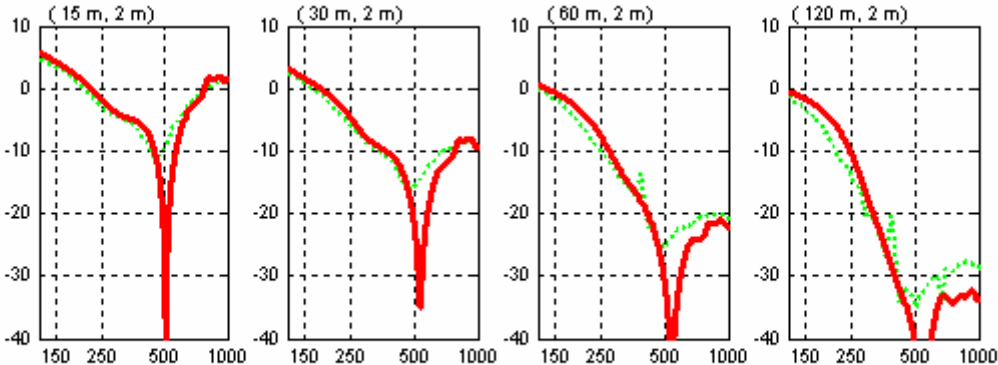
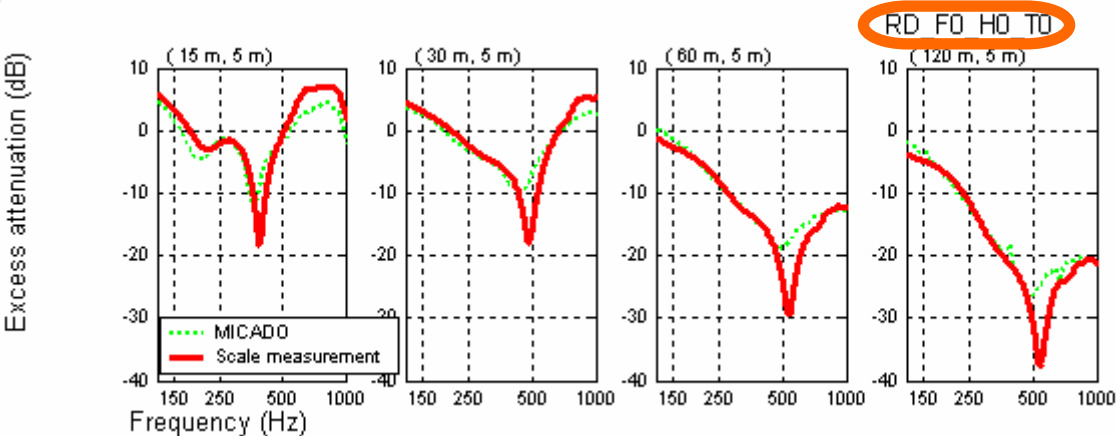


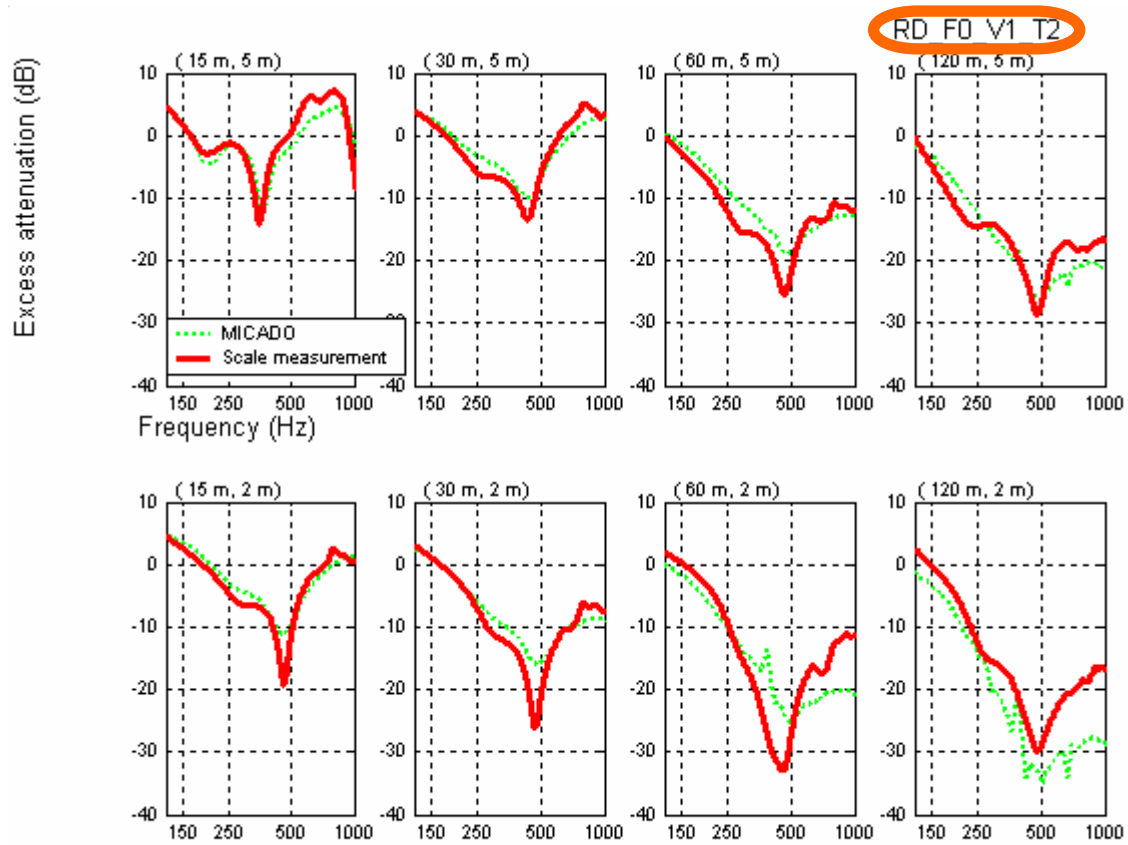


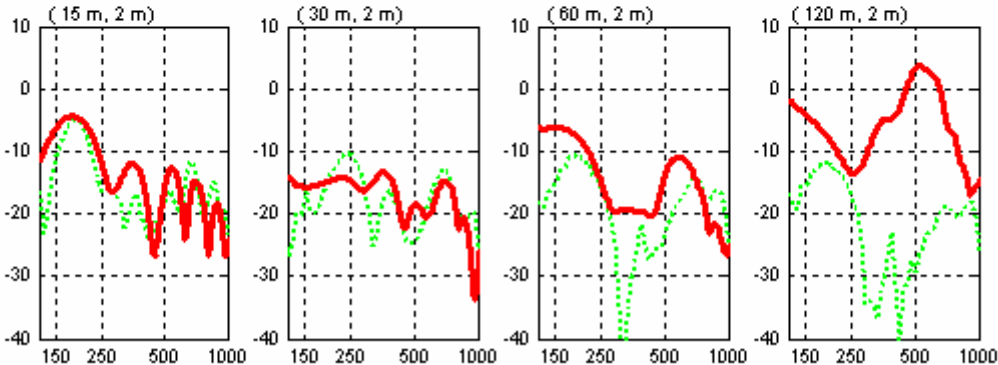
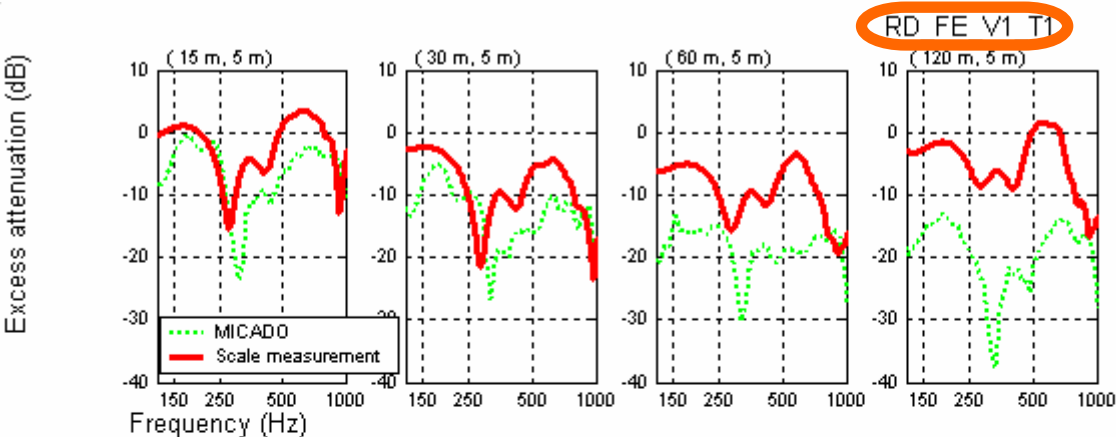
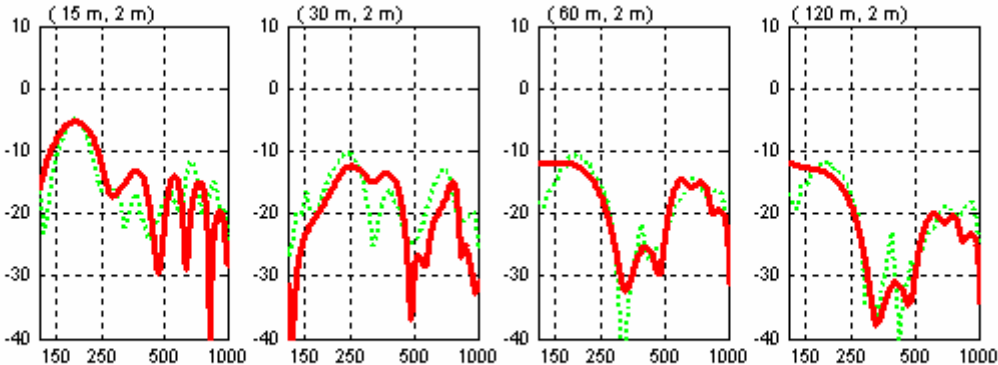
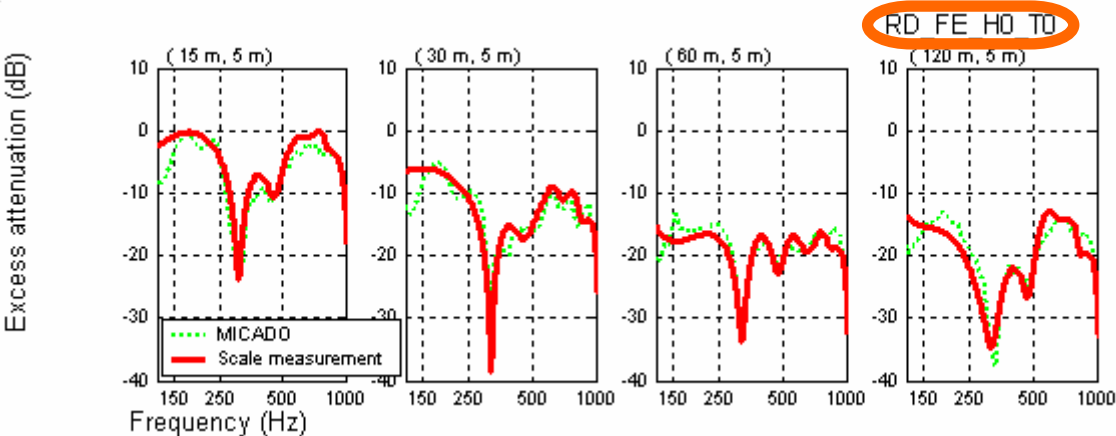


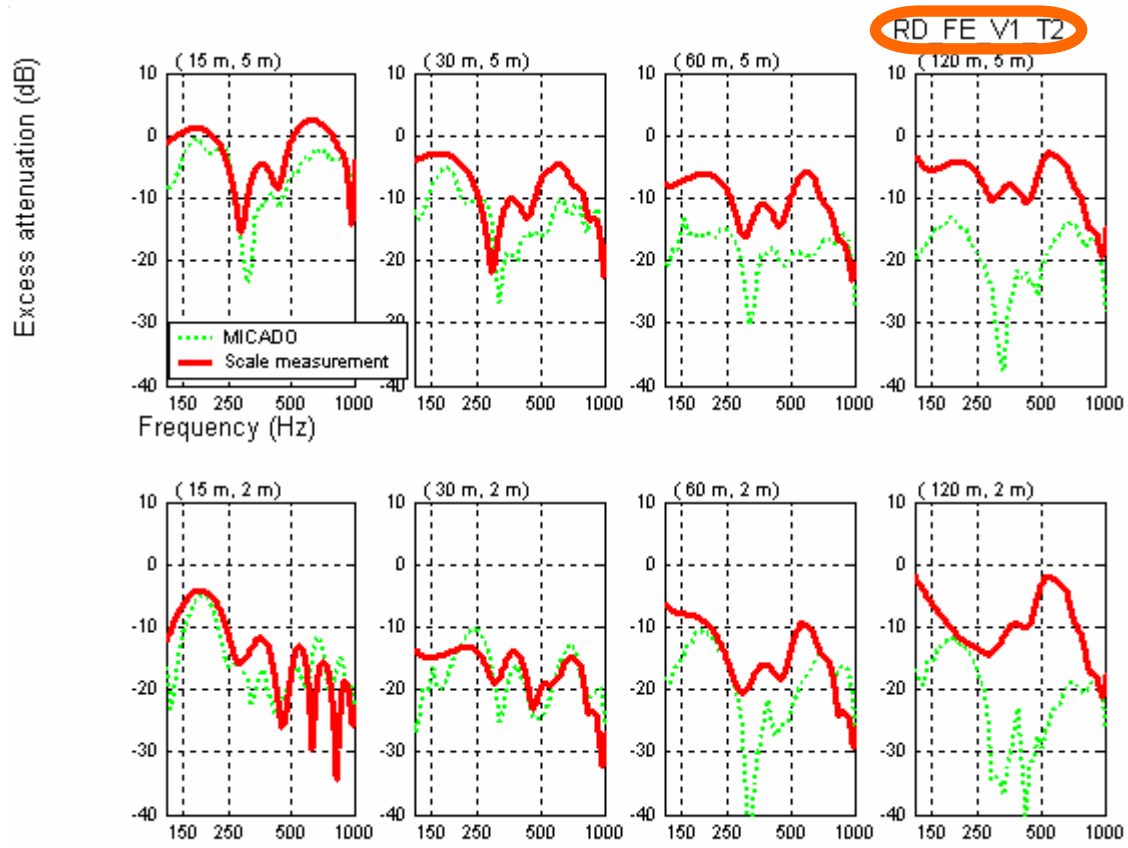












Annexe F : Tir de rayons à l'aide d'ICARE

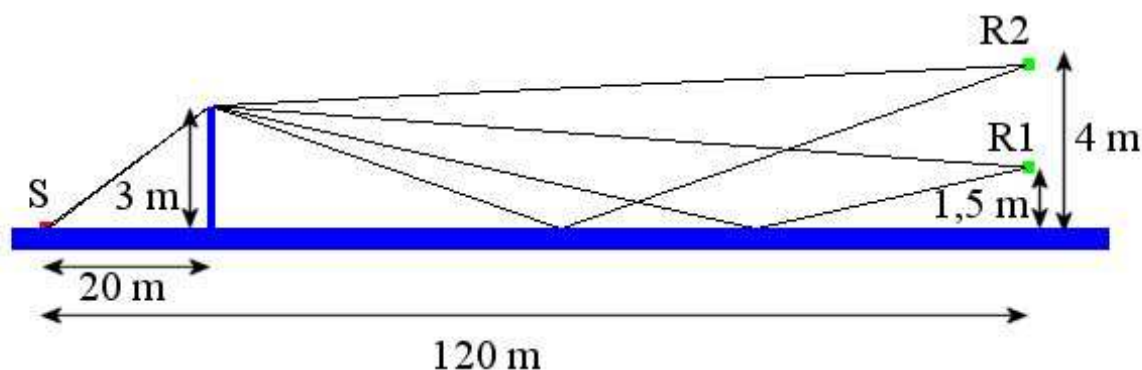
Icare est un code basé sur un algorithme de lancer de faisceaux adaptatifs qui permet de déterminer les trajets acoustiques entre sources et récepteurs dans une configuration donnée. Les phénomènes pris en compte sont la réflexion sur des surfaces quelconques et la diffraction par des arêtes.

Dans cette annexe on a rassemblé les tirs de rayons effectués dans le cadre des chapitres 3 4 et 5.

F.1 Configuration testée dans le chapitre 3

Il s'agit de la configuration avec écran étudiée sur sol rigide ou absorbant. Un tir de rayons est effectué en conditions homogènes puis en présence de réfraction vers le bas

F.1.1 Conditions homogènes



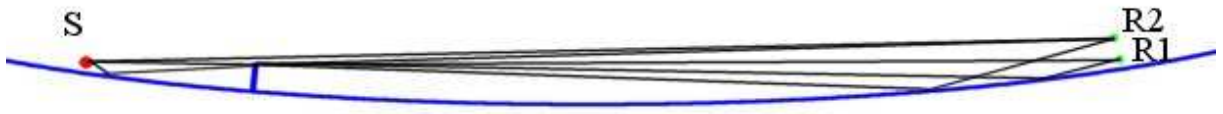
F.1.2 Réfraction vers le bas : $\alpha=0,00025\text{m}^{-1}$



F.1.3 Réfraction vers le bas : $\alpha=0,001\text{m}^{-1}$



F.1.4 Réfraction vers le bas : $\alpha=0,0025\text{m}^{-1}$

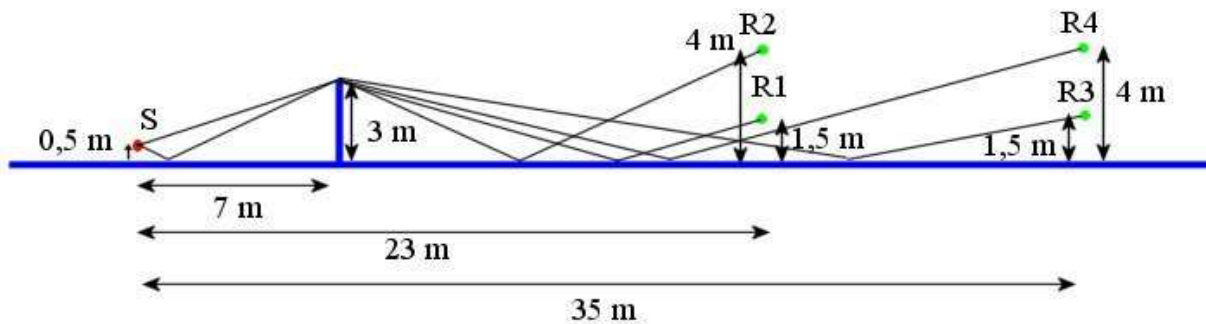


F.2 Configuration testée dans le chapitre 4

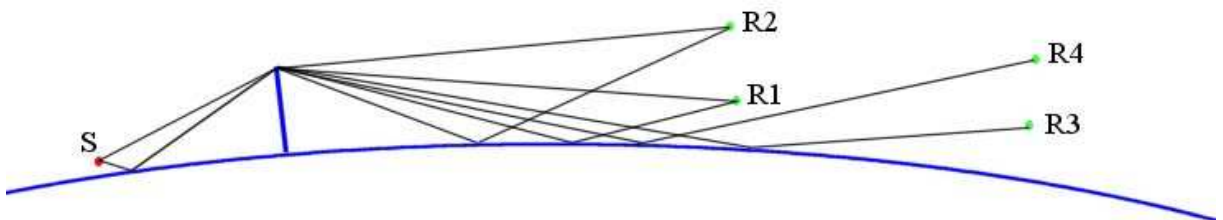
F.2.1 Ecran droit rigide sur sol rigide : conditions homogènes et réfraction vers le haut

Un écran droit rigide est disposé sur un sol rigide. Un tir de rayons est effectué en conditions homogènes et en présence d'un profil réfractant vers le haut.

F.2.1.1 Conditions homogènes

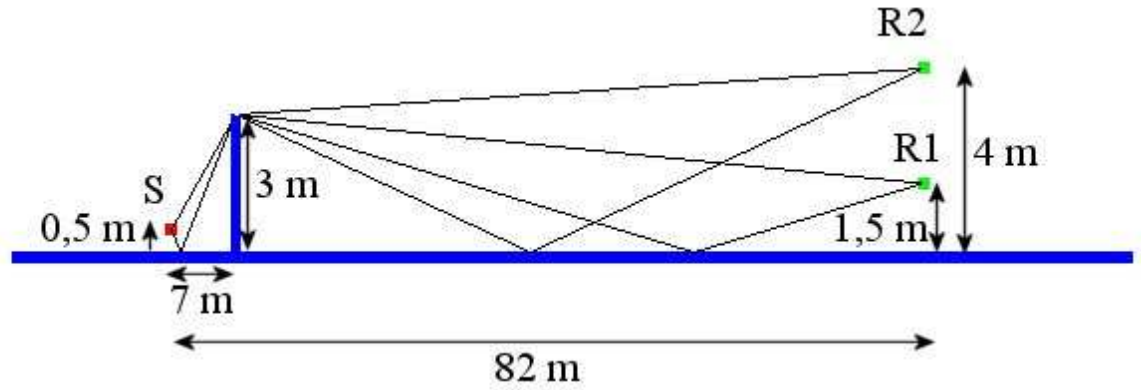


F.2.1.2 Réfraction vers le haut : $\alpha=-0,01\text{m}^{-1}$

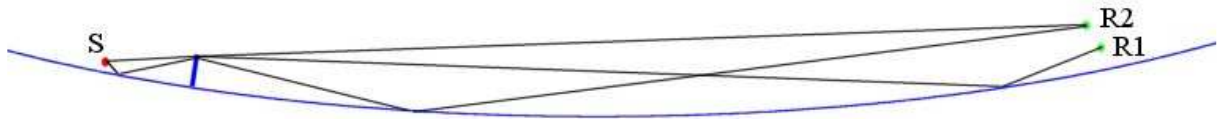


F.2.2 Ecran droit rigide sur une surface présentant une discontinuité d'impédance : conditions homogènes, réfraction vers le bas et le haut

F.2.2.1 Conditions homogènes



F.2.2.2 Réfraction vers le bas : $a=0,0049\text{m}^{-1}$

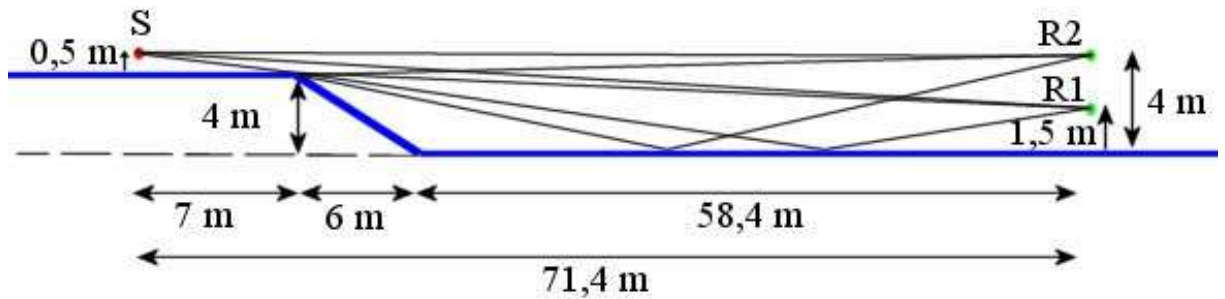


F.2.2.3 Réfraction vers le haut : $a=-0,0049\text{m}^{-1}$

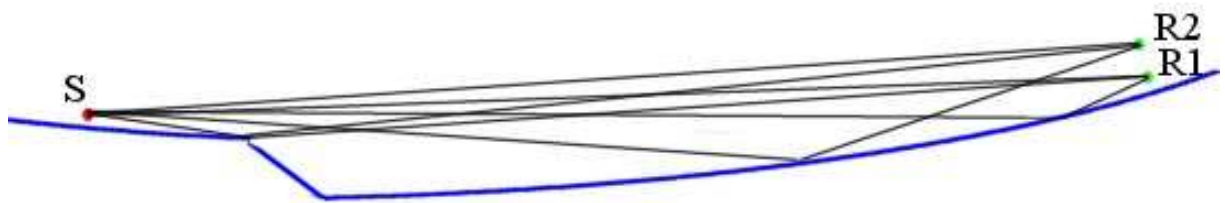


F.2.3 Route en remblai rigide et sol rigide : conditions homogènes, réfraction vers le bas

F.2.3.1 Conditions homogènes

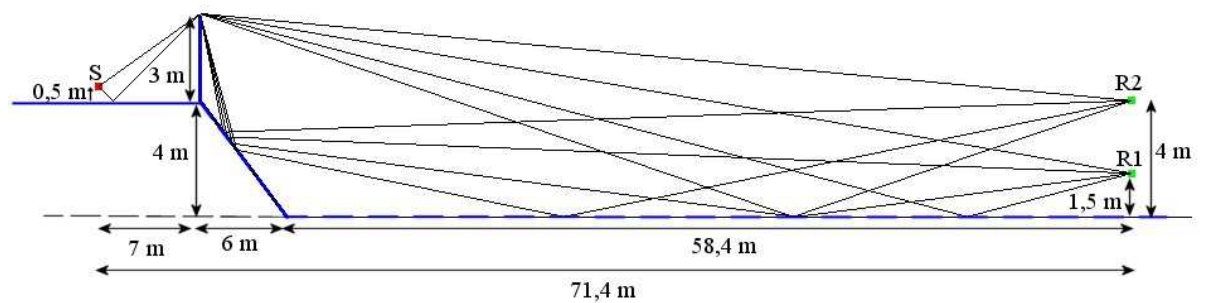


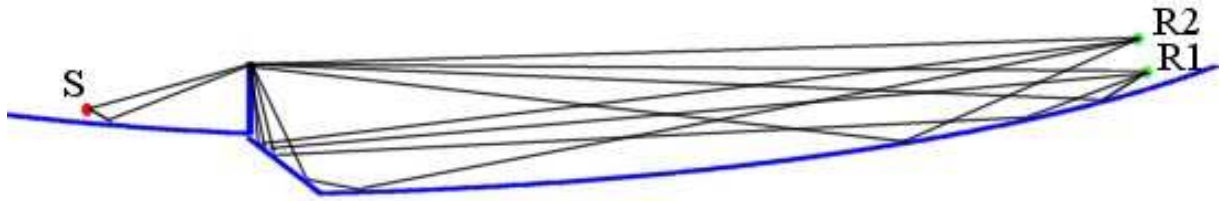
F.2.3.2 Réfraction vers le bas : $\alpha=0,0049\text{m}^{-1}$



F.2.4 Route en remblai rigide écran rigide et absorbant sur la partie en déblai : conditions homogènes, réfraction vers le bas

F.2.4.1 Conditions homogènes

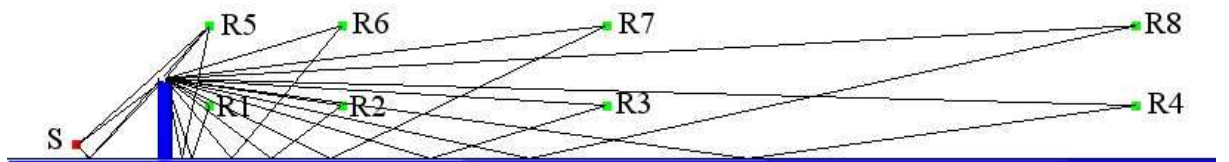


F.2.4.2 Réfraction vers le bas : $\alpha=0,0049\text{m}^{-1}$ 

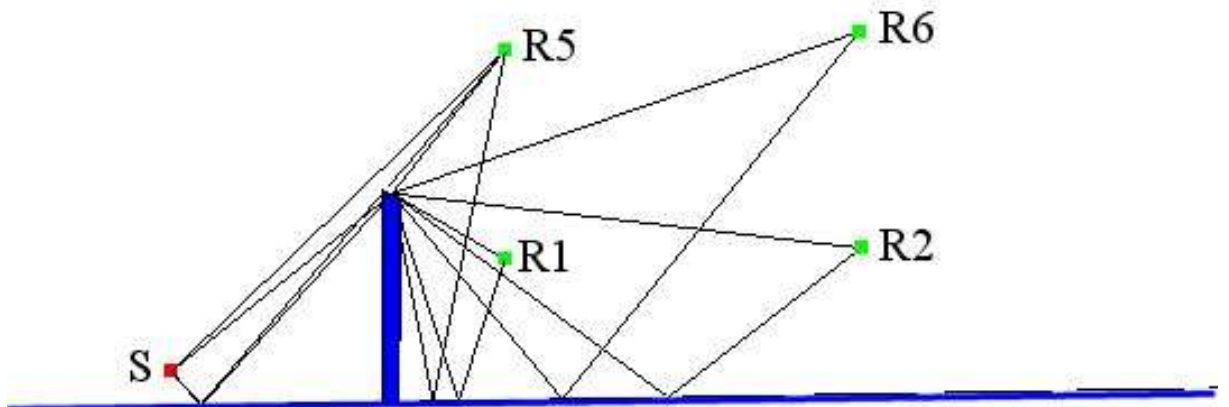
F.3 Configuration testée dans le chapitre 5

F.3.1 Ecran droit rigide sur sol rigide : conditions homogènes

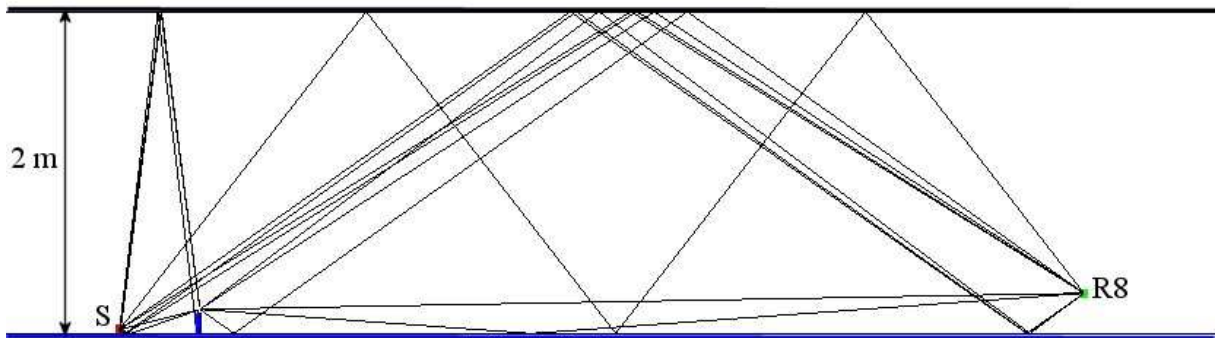
F.3.1.1 Configuration testée sans prendre en compte le plafond de la veine d'essai



Zoom sur la partie contenant l'écran et les quatre récepteurs les plus proches de l'écran.

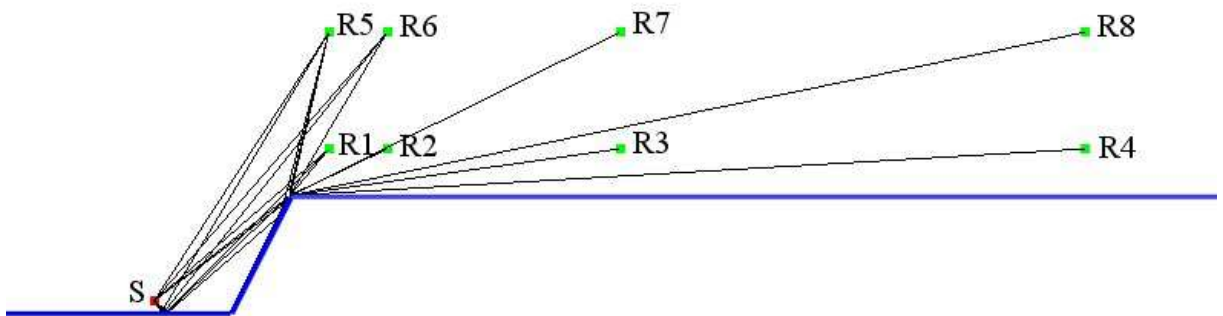


F.3.1.2 Configuration testée en prenant en compte le plafond de la veine d'essai

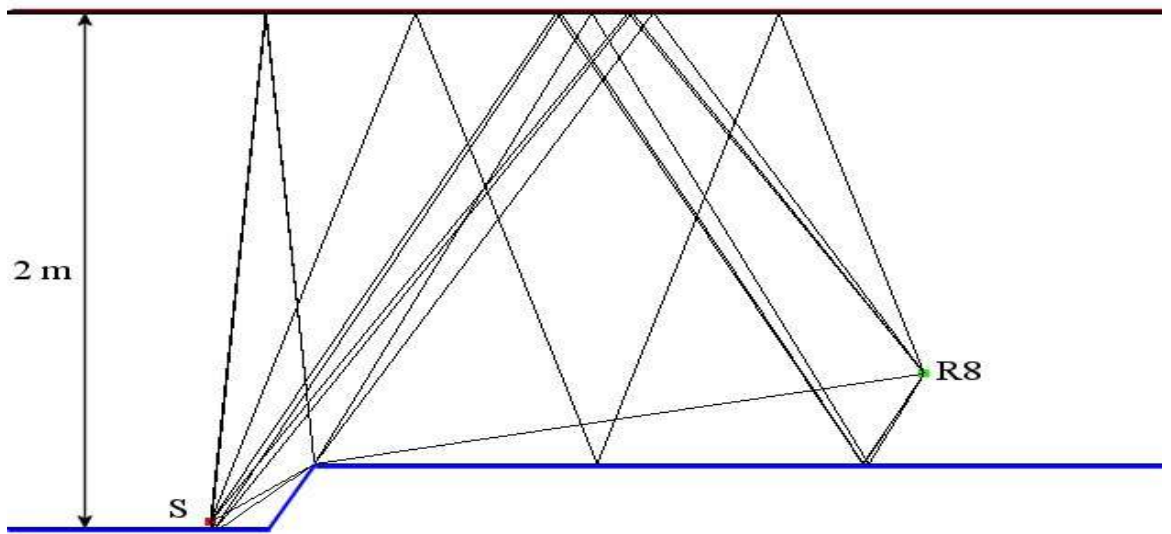


F.3.2 Route en déblai : conditions homogènes

F.3.2.1 Configuration testée sans prendre en compte le plafond de la veine d'essai

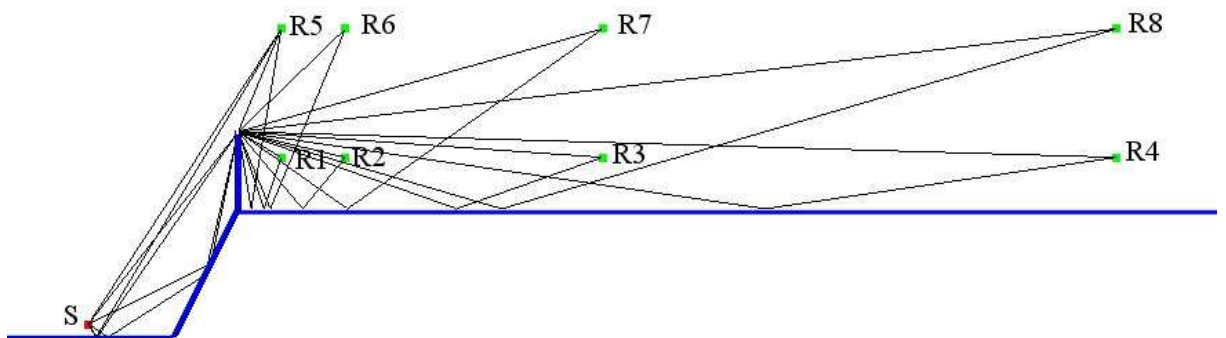


F.3.2.2 Configuration testée en prenant en compte le plafond de la veine d'essai

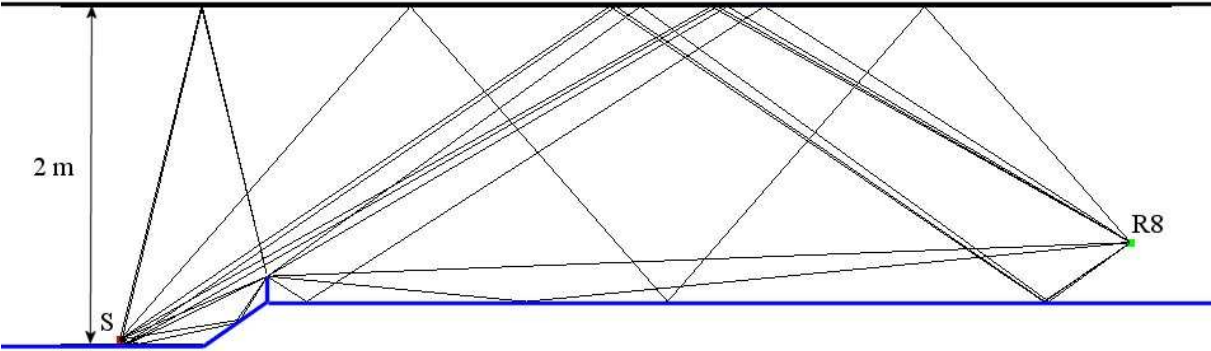


F.3.3 Route en déblai, écran rigide: conditions homogènes

F.3.3.1 Configuration testée sans prendre en compte le plafond de la veine d'essai



F.3.3.2 Configuration testée en prenant en compte le plafond de la veine d'essai



Bibliographie

- ABALLEA, F. and DEFRANCE, J. (2004), "Simple and multi-reflections using the PE method with a complementary Kirchhoff approximation", *7ème Congrès Français d'Acoustique*, Strasbourg, France.
- ABALLEA, F. and DEFRANCE, J. (2004), "Sound propagation over irregular terrain with complex meteorological effects using the parabolic equation model", *InterNoise 2004*, Prague, République Tchèque.
- ABALLEA, F., PRIOUR, M., DEFRANCE, J. and PREMAT, E. (2003), "Une approche hybride pour la propagation du son en milieu extérieur complexe", *Mécanique & Industrie*, **4**: 411-413.
- ALMGREN, M. (1987), "Simulation by using a curved ground scale model of outdoor sound propagation under the influence of a constant sound speed gradient", *J. Sound Vib.*, **118**(2): 353-370.
- ANFOSSO-LEDEE, F., DANGLA, P. and HARLICOT, P. (1995), "Numerical prediction of the efficiency of antinoise barriers", *Euronoise*, Lyon, France.
- ATTENBOROUGH, K. (1985), "Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces", *J. Sound Vib.*, **99**(4): 51-244.
- ATTENBOROUGH, K. (1988), "Review of ground effects on outdoor sound propagation from continuous broadband sources", *Applied Acoustics*, **24**: 289-319.
- ATTENBOROUGH, K. (1992), "Ground parameter information for propagation modelling", *J. Acoust. Soc. Am.*, **92**(1): 418-427.
- BASS, H. E., SUTHERLAND, L. C., ZUCKERWAR, A. J., BLACKSTOCK, D. T. and HESTER, D. M. (1995), "Atmospheric absorption of sound: further developments", *J. Acoust. Soc. Am.*, **97**(1): 660-683.
- BERRY, A. (1987), *Etude de la propagation du son sur les surfaces courbées*, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- BERRY, A. and DAIGLE, G. A. (1988), "Controlled experiments of the diffraction of sound by a curved surface", *J. Acoust. Soc. Am.*, **83**(6): 2047-2058.
- BERTHELOT, Y. H. (1996), "A note on the acoustic penumbra behind a curved surface", *J. Acoust. Soc. Am.*, **99**: 2428-2429.
- BLAIRON, N. (2002), *Effets de la topographie sur la propagation des ondes acoustiques dans l'atmosphère: Modélisation avec l'équation parabolique et validation sur un site extérieur*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, n° 2002-35, Lyon, France.
- BLUMRICH, R. (1997), "Time-domain simulation of the influence of close barriers on sound propagation to the environment", *J. Acoust. Soc. Am.*, **101**: 1278-1285.

Bibliographie

- BLUMRICH, R. and HEIMANN, D. (2002), "A linearized Eulerian sound propagation model for studies of complex meteorological effects", *J. Acoust. Soc. Am*, **112**(2): 446-455.
- BONNET, M. (1995), *Equations intégrales et éléments de frontière: applications en mécanique des solides et des fluides*, CNRS Editions, Paris, France.
- BOTTELDOOREN, D. (1997), "Time-domain simulation of the influence of close barriers on sound propagation to the environment." *J. Acoust. Soc. Am*, **101**: 1278-1285.
- CHANDLER-WILDE, S. N. (1985), "Sound propagation above an inhomogeneous impedance plane", *J. Sound Vib.*, **98**(4): 475-491.
- CHANDLER-WILDE, S. N. (1988), *Ground effect in environmental sound propagation*, Thèse de doctorat, University of Bradford, United Kingdom.
- CHANDLER-WILDE, S. N. and HOTHERSALL, D. C. (1995), "Efficient calculation of the green function for acoustic propagation above a homogeneous impedance plane", *J. Sound Vib.*, **180**(5): 705-724.
- CHEVRET, P. (1994), *Simulation numérique des effets de la turbulence sur la propagation du son dans l'atmosphère*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, n° 94-18, Lyon, France.
- CISKOWSKI, R. D. and BREBBIA, C. A. (1991), *Boundary Element Methods in Acoustics*, Elsevier Applied Science, London, United Kingdom.
- CLAERBOUT, J. F. (1976), *Fundamentals of Geophysical Data Processing*, Mc-Graw-Hill, New-York.
- COLLINS, M. D. (1993), "A split-step Padé approximation solution for the parabolic equation method", *J. Acoust. Soc. Am*, **93**(4): 1736-1742.
- COLLINS, M. D. (1993), "A two-way parabolic equation for elastic media", *J. Acoust. Soc. Am*, **93**: 1815-1825.
- CRADDOCK, J. N. and WHITE, M. J. (1992), "Sound propagation over a surface with varying impedance: a parabolic equation approach", *J. Acoust. Soc. Am*, **91**(6): 3184-3191.
- CREMERS, L. and FYFE, K. R. (1995), "On the use of variable order infinite wave envelope elements for acoustic radiation and scattering", *J. Acoust. Soc. Am*, **97**(4): 2028-2040.
- CROMBIE, D. H., PELOW, A. T. and CHANDLER-WILDE, S. N. (1991), "Multiple road traffic noise barriers", *Proceedings of the Institute of Acoustics*.
- CRUSE, T. A. (1969), "Numerical solutions in three-dimensional elastostatics", *Int. J. Solids Struct.*, **5**: 1259-1274.
- DALLOIS, L. (2000), *Propagation des ondes acoustiques dans les milieux en mouvement: extension grand angle de l'approximation parabolique*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, n° 2000-37, Lyon, France.
- DALLOIS, L., BLANC-BENON, P. and JUVE, D. (2001), "A wide-angle parabolic equation for acoustic waves in inhomogeneous moving media: applications to atmospheric sound propagation", *J. Comput. Acoust.*, **9**(2): 477-494.

- DAUMAS, A. (1978), "Étude de la diffraction par un écran mince disposé sur le sol", *Acustica*, **40**(4): 213-222.
- DE LACERDA, L. A., WROBEL, L. C. and MANSUR, W. J. (1997), "A dual boundary element formulation for sound propagation around barriers over an impedance plane", *J. Sound Vib.*, **202**(2): 235-247.
- DE LACERDA, L. A., WROBEL, L. C., POWER, H. and MANSUR, W. J. (1998), "A novel boundary integral formulation for three-dimensional analysis of thin acoustic barrier over an impedance plane", *J. Acoust. Soc. Am.*, **104**(2): 671-678.
- DEFRANCE, J. (1996), *Méthode analytique pour le calcul de propagation de bruit extérieur*, Thèse de doctorat, Université du Maine, Le Mans, France.
- DELANY, M. E. (1977), "Sound propagation in the atmosphere: a historical review", *Acustica*, **38**: 201-223.
- DELANY, M. E. and BAZLEY, E. N. (1970), "Acoustical properties of fibrous absorbent materials", *Applied Acoustics*, **3**: 105-116.
- DELRIEUX, Y. (1991), *Analyse de la propagation acoustique à basse altitude par l'équation parabolique tridimensionnelle*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France.
- DeSANTO, J. A. (1975), "Connections between the connections of Helmholtz and parabolic equations for sound propagation", *Oceanic Acoustic Modelling*, Bachmann W. and Williams R. B.: 43-1 to 43-17.
- DI, X. and GILBERT, K. E. (1992), "Application of a fast Green's function method to long range sound propagation in the atmosphere", *5th International Symposium on Long Range Sound Propagation*, Milton Keynes, United Kingdom.
- DI, X. and GILBERT, K. E. (1994), "The effect of turbulence and irregular terrain on outdoor sound propagation", *6th International Symposium on Long Range Sound Propagation*, Ottawa, Canada.
- DiNAPOLI, F. R. and DEAVENPORT, R. L. (1980), "Theoretical and numerical Green's function field solution in a plane multilayered medium", *J. Acoust. Soc. Am.*, **97**(1): 92-105.
- Directive (2002), 2002/49/CE relative à l'évolution et à la gestion du bruit dans l'environnement, Journal officiel L189/12.
- DUHAMEL, D. (1996), "Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier", *J. Sound Vib.*, **197**(5): 547-571.
- DUHAMEL, D. and SERGENT, P. (1998), "Sound propagation over noise barriers with absorbing ground", *J. Sound Vib.*, **218**(5): 799-823.
- FARINA, A. (2000), "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique", *AES 108th Convention*, Paris, France.
- FILIPPI, P. J. T. (1972), "Diffraction et potentiels de multicouches", *Acustica*, **26**: 323-328.
- FILIPPI, P. J. T. (1977), "Layer potentials and acoustic diffraction", *J. Sound Vib.*, **54**(4): 473-500.

Bibliographie

- FILIPPI, P. J. T. and DUMERY, G. (1969), "Étude théorique et numérique de la diffraction par un écran mince", *Acustica*, **21**: 343-350.
- FOCK, V. A. (1965), *Electromagnetic diffraction and propagation problems*, Pergamon Press, Oxford, New York, USA.
- GABILLET, Y., DAIGLE, G. A. and L'ESPÉRANCE, A. (1994), "Sound propagation in a wind tunnel: comparison of experiments with FFP and residue solution", *Applied Acoustics*, **43**: 321-331.
- GAUDAIRE, F., NOE, N., MARTIN, J., JEAN, P. and VAN MAERCKE, D. (2000), "Méthodes de rayons pour caractériser la propagation acoustique dans les milieux encombrés", *Confort automobile et ferroviaire*, Le Mans, France.
- GAUVREAU, B. (1999), *Influence des conditions micrométéorologiques sur l'efficacité des écrans acoustiques*, Thèse de doctorat, Université du Maine, Le Mans, France.
- GILBERT, K. E. and DI, X. (1993), "A fast Green's function method for one-way sound propagation in the atmosphere", *J. Acoust. Soc. Am*, **94**(4): 2343-2352.
- GILBERT, K. E., RASPET, R. and DI, X. (1990), "Calculation of turbulence effects in an upward-refracting atmosphere", *J. Acoust. Soc. Am*, **87**(6): 2428-2437.
- GILBERT, K. E. and WHITE, M. J. (1989), "Application of the parabolic equation to sound propagation in refracting atmosphere", *J. Acoust. Soc. Am*, **85**: 630-637.
- GUNTHER, N. M. (1934), *La théorie du potentiel et ses applications aux problèmes fondamentaux de la physique mathématique*, Gauthier-Villars, Paris, France.
- HABAULT, D. (1985), "Sound propagation above an inhomogeneous plane: boundary integral equation methods", *J. Sound Vib.*, **100**(1): 55-67.
- HABAULT, D. (1990), "Propagation d'ondes dans un sol stratifié avec obstacle", *Journal de Physique, Colloque 3, supplément au n°7*, **51**: 83-89.
- HAMET, J. F. and BERENGIER, M. C. (1993), "Acoustical characteristics of porous pavements: a new phenomenological model", *InterNoise 93*, Leuven, Belgium.
- HARMONOISE (2002), European project IST 2000-18419 - Reference Model - Task 2.3 - Benchmark calculations and modeling approximations, WP2-Team.
- HOTHERSALL, D. C., CHANDLER-WILDE, S. N. and HAJMIRZAE, M. N. (1991), "Efficiency of Single Noise Barriers", *J. Sound Vib.*, **146**(2): 303-322.
- HOTHERSALL, D. C., CROMBIE, D. H. and CHANDLER-WILDE, S. N. (1991), "The performance of T-profile and associated noise barriers", *Applied Acoustics*, **32**: 269-287.
- JEAN, P. (1998), "A variational approach for the study of outdoor sound propagation and application to railway noise", *J. Sound Vib.*, **212**(2): 275-294.
- JEAN, P. (2000), "The effect of structural elasticity on the efficiency of noise barriers", *J. Sound Vib.*, **237**: 1-21.
- JEAN, P., DEFANCE, J. and GABILLET, Y. (1999), "The importance of source type on the assessment of noise barriers", *J. Sound Vib.*, **226**(2): 201-216.

- JEAN, P. and GABILLET, Y. (1995), "A boundary element method program to study 2D noise barriers with ground effects", *Euronoise 95*, Lyon, France.
- JEAN, P. and GABILLET, Y. (2000), "Using a boundary element approach to study small screens close to rails", *J. Sound Vib.*, **231**: 673-679.
- JENSEN, F. B., KUPERMAN, W. A., PORTER, M. B. and SCHMIDT, H. (2000), *Computational ocean acoustics*, Springer-Verlag, New-York.
- KAWAI, Y. and TERAJ, T. (1990), "The Application of Integral Equation Methods to the Calculation of Sound Attenuation by Barriers", *Applied Acoustics*, **31**: 101-117.
- KELLER, J. B. (1962), "Geometrical Theory of Diffraction", *J. Opt. Soc. Am.*, **52**: 116-130.
- KELLOGG, O. D. (1929), *Foundations of potential theory*, J. Springer, Berlin, Germany.
- KUPRADZE, V. D. (1965), *Potential methods in the Theory of Elasticity*, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel.
- LI, K. M. and WANG, Q. (1998), "A BEM approach to assess the acoustic performance of noise barriers in a refracting atmosphere", *J. Sound Vib.*, **211**(4): 663-681.
- LUDWIG, D. (1966), "Uniform asymptotic expansions at a caustic", *Commun. Pure Appl. Math*, **19**: 215-250.
- MALBEQUI, P. (1996), "Atmospheric sound propagation using the wide-angle parabolic-equation", *7th International Symposium on Long Range Sound Propagation*, Lyon, France.
- MONKALA, C. (1988), *Effet des singularités géométriques sur les résultats numériques d'une méthode d'éléments finis de frontière dans un problème plan*, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, France.
- MORSE, P. M. and INGARD, K. U. (1968), *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill Companies, New York, USA.
- MULLER, S. and MASSARANI, P. (2001), "Transfert-function measurement with sweeps", *J. Audio Eng. Soc.*, **49**(9): 443-471.
- NOBLE, J. M., BASS, H. E. and RASPET, R. (1990), "Effects of large-scale wind driven turbulence on sound propagation", *J. Acoust. Soc. Am*, **87**.
- Norme AFNOR (2001), XP S31-33: Bruit des infrastructures de transport terrestre.
- Norme AFNOR (2002), NF S31-085: Caractéristiques et mesurage du bruit dû au trafic routier.
- PANOFSKY, H. A. and DUTTON, J. A. (1984), *Atmospheric turbulence, models and methods for engineering applications*, John Wiley & Sons, New York, USA.
- PERKERIS, C. L. (1946), "Theory of propagation of sound in a half-space of variable sound velocity under conditions of formation of a shadow zone", *J. Acoust. Soc. Am*, **18**: 295-315.
- PIERCE, A. D. (1991), *Acoustics: An introduction to its physical principles and Applications*, McGraw-Hill Book Co., New York, USA.

Bibliographie

- PREMAT, E. (2000), *Prise en compte d'effets météorologiques dans une méthode d'éléments finis de frontière*, Thèse de doctorat, INSA, Lyon, France.
- PREMAT, E., DEFRANCE, J., ABALLEA, F. and PRIOUR, M. (2002), "A hybrid GFPE-BEM approach for complex outdoor sound propagation", *10th International Symposium on Long Range Sound Propagation*, Grenoble, France.
- PREMAT, E., DEFRANCE, J., MOS, A. and CHARTIER, H. (2003), "Toward an experimental benchmark test cases database for the validation of numerical models for outdoor sound propagation", *Acta Acustica*, **89**(6): 992-997.
- PRIOUR, M., ABALLEA, F., BAULAC, M. and DEFRANCE, J. (2004), "Wind tunnel experiments for the validation of numerical models for outdoor sound propagation", *InterNoise 2004*, Prague, République Tchèque.
- PRIOUR, M., PREMAT, E. and BLANC-BENON, P. (2002), "Etude du poids relatif de différents phénomènes en jeu dans la propagation acoustique en milieu extérieur complexe", *16ème Congrès Français de Mécanique*, Nice, France.
- PRIOUR, M., PREMAT, E. and BLANC-BENON, P. (2004), "Calculations with BEM in a refracting atmosphere", *7ème Congrès Français d'Acoustique*, Strasbourg, France.
- PRIOUR, M., PREMAT, E. and BLANC-BENON, P. (2004), "Meteorological effects and Boundary Element Methods for outdoor sound propagation prediction", *InterNoise 2004*, Prague, République Tchèque.
- RASMUSSEN, K. B. (1996), "Sound propagation over screened ground under upwind conditions", *J. Acoust. Soc. Am.*, **100**(6): 3581-3586.
- RASMUSSEN, K. B. and GALINDO ARRANZ, M. (1998), "The insertion loss of screens under the influence of wind", *J. Acoust. Soc. Am.*, **104**(5): 2692-2698.
- RASPET, R., BAIRD, G. and WU, W. (1992), "Normal mode solution for low-frequency sound propagation in a downward refracting atmosphere above a complex impedance plane", *J. Acoust. Soc. Am.*, **91**(3): 1341-1352.
- RASPET, R., LEE, S. W., KUESTER, E., CHANG, D. C., RICHARDS, W. F., GILBERT, R. and BONG, N. (1985), "A fast-field program for sound propagation in a layered atmosphere above an impedance ground", *J. Acoust. Soc. Am.*, **77**(2): 345-352.
- REGO SILVA, J. J., POWER, H. and WROBEL, L. C. (1994), "The use of $C_{\sup 0, \alpha}$ boundary elements in an improved numerical formulation for three-dimensional acoustic radiation problems", *J. Acoust. Soc. Am.*, **95**(5): 2387-2398.
- RIZZO, F. J. (1967), "An integral equation approach to boundary value problems of classical elastostatics", *Quart. Appl. Math.*, **25**: 83-95.
- SACK, R. A. and WEST, M. (1995), "A parabolic equation for sound propagation in two dimensions over any smooth terrain profile: the generalised terrain parabolic equation (GT-PE)", *Applied Acoustics*, **45**(2): 113-129.
- SALOMONS, E. M. (1999), "Reduction of the performance of a noise screen due to screen-induced wind-speed gradients. Numerical computations and wind-tunnel experiments", *J. Acoust. Soc. Am.*, **105**(4): 2287-2293.

- SALOMONS, E. M. (2001), *Computational atmospheric acoustics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- SECKLE, B. D. and KELLER, J. B. (1959), "Asymptotic theory of diffraction in inhomogeneous media", *J. Acoust. Soc. Am.*, **31**: 206-216.
- SECKLE, B. D. and KELLER, J. B. (1959), "Geometrical theory of diffraction in inhomogeneous media", *J. Acoust. Soc. Am.*, **31**: 192-205.
- SEZNEC, R. (1980), "Diffraction of sound around barriers: use of the boundary elements technique", *J. Sound Vib.*, **73**(2): 195-206.
- SHAW, R. P. (1962), "Diffraction of acoustic pulses by obstacles of arbitrary shape with a Robin condition", *J. Acoust. Soc. Am.*, **41**: 855-859.
- STAN, G.-B., EMBRECHTS, J.-J. and ARCHAMBEAU, D. (2001), "Comparison of different impulse response measurement techniques", *J. Audio Eng. Soc.*, **50**(4): 249-263.
- STULL, R. B. (1988), *An introduction to boundary layer meteorology*, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands.
- SUTHERLAND, L. C. and BASS, H. E. (2004), "Atmospheric absorption in the atmosphere up to 160 km", *J. Acoust. Soc. Am.*, **115**(3): 1012-1032.
- TAPPERT, F. D. (1977), "The parabolic approximation method", *Wave propagation and underwater acoustics*, KELLER, J. B. and PAPADAKIS, J. S., Springer-Verlag, Berlin, Germany, **70**: 224-287.
- TATARSKI, V. I. (1971), *The effect of the turbulent atmosphere on wave propagation*, Keter Press, Jerusalem, Israel.
- TEKATLIAN, A. and PREMAT, E. (1996), "Computer cost of a 3D numerical model for noise barrier insertion loss", *7th Long Range sound Propagation*, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France.
- THOMSON, D. J. and CHAPMAN, N. R. (1983), "A wide-angle split-step algorithm for the parabolic equations", *J. Acoust. Soc. Am.*, **74**(6): 1848-1854.
- VAN RENTERGHEM, T. (2003), *The finite-difference time-domain method for simulation of sound propagation in a moving medium*, Thèse de doctorat, Université de Gent, Gent, The Netherlands.
- VILLOT, M. (1988), "TDS measuring system developed for a personal computer", *Noise Control Engineering Journal*, **31**: 154-158.
- WANG, Q. (1997), *Atmospheric Refraction and Propagation over Curved Surfaces*, Thèse de doctorat, The Open University, Milton Keynes, United Kingdom.
- WASIER, J. (1999), *Etude expérimentale des effets d'une frontière sur la propagation des ondes acoustiques à travers une turbulence thermique*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France.
- WEST, M., GILBERT, K. E. and SACK, R. A. (1992), "A tutorial on the parabolic equation (PE) model used for long range sound propagation in the atmosphere", *Applied Acoustics*, **37**: 31-49.

Bibliographie

- WEST, M. and LAM, Y. (2000), "Prediction of sound fields in the presence of terrain features which produce a range dependant meteorology using the generalised terrain parabolic equation (GT-PE) model", *InterNoise 2000*, Nice, France.
- WHITE, M. J. and GILBERT, K. E. (1989), "Application of the parabolic equation to the outdoor propagation of sound", *Applied Acoustics*, **27**: 227-238.
- WILSON, D. K. and NOBLE, J. (2000), "Putting meteorology into outdoor sound propagation calculations", *InterNoise 2000*, Nice, France.
- ZWIKKER, C. and KOSTEN, C. W. (1949), *Sound absorbing materials*, Elsevier Pub. Co., New York, USA.

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Vu les dispositions de l'arrêté du 25 avril 2002,

Vu la demande du Directeur de Thèse

Monsieur Ph. BLANC-BENON

et les rapports de

Monsieur M. BERENGIER
Directeur de Recherche - LCPC Nantes - Route de Bouaye - BP 4129 - 44341 BOUGUENAIS cedex

et de

Monsieur D. DUHAMEL
Professeur - Laboratoire analyse des matériaux et identification - Ecole Nationale des Ponts et
Chaussées - 6 et 8 avenue Blaise Pascal - Cité Descartes - Champs-sur-Marne - 77455 MARNE-LA-
VALLEE cedex

Mademoiselle PRIOUR Maud

est autorisé à soutenir une thèse pour l'obtention du grade de **DOCTEUR**

Ecole doctorale MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL ET ACOUSTIQUE (MEGA)

Fait à Ecully, le 16 juin 2005



P/Le Directeur de l'E.C.L.
Le Directeur des Etudes

F. LEBOEUF