

Localisation d'aéronefs supersoniques à partir de signaux infrasonores enregistrés à grande distance

Ingrid Le Griffon

Département de Simulation Numérique et Aéroacoustique, Onera, 29 avenue Division Leclerc, 92320 Châtillon, ingrid.legriffon@onera.fr

Par nécessité opérationnelle, certains avions militaires sont amenés à franchir le mur du son. Bien que le passage à vitesse supersonique se fasse généralement au-dessus de la mer, les nuisances en rase-campagne dues au bang sonique ne sont pas totalement contrôlées.

Il est donc intéressant de pouvoir localiser les aéronefs incriminés à partir de réseaux de capteurs acoustiques opérant dans la gamme infrasonore, sachant que le bang sonique peut se propager à des centaines de kilomètres sous forme d'infrasons.

Dans les travaux de thèse de Géraldine Menexiadis [1], une méthode inverse de localisation en gisement-distance d'avion supersonique a été étudiée et appliquée à des vols commerciaux du « Concorde ». Toutefois les procédures de traitement de signal utilisées n'étaient pas automatisées.

Nous nous sommes proposé de généraliser cette méthode par le biais d'une procédure automatique de calcul de la distance à partir du spectre du signal enregistré et de la tester sur plusieurs autres vols.

Des calculs de corrélation temporelle permettent, tout d'abord, de déterminer la direction dont provient le signal par minimisation des écarts calculés entre les vitesses apparentes de propagation entre les différents capteurs.

Plus la source est loin, plus l'absorption atmosphérique atténue les hautes fréquences issues du profil de l'onde en N caractéristique du bang sonique. Moyennant certaines hypothèses (duplication du signal), il est possible d'estimer la distance de propagation de l'onde grâce à la pente de l'enveloppe de son spectre. La source peut donc être localisée par combinaison des deux méthodes.

L'application à des vols « Concorde » New York – Paris et New York – Londres donne des résultats très satisfaisants, dans la continuité de ceux qui ont été trouvés dans la thèse.

1 Introduction

Lorsqu'un aéronef est amené à passer le mur du son et à voler à une vitesse supersonique, il crée une onde de choc, le bang sonique. Généralement, les avions militaires se restreignent à atteindre cette vitesse au-dessus de la mer. Néanmoins les effets des ondes de choc peuvent parfois être ressentis sur la terre ferme. Il paraît intéressant d'être capable de localiser cette source de gêne sonore.

Lors de sa propagation, l'onde de choc dégénère en un signal infrasonore qui peut se propager à de très grandes distances et qu'il est possible de détecter grâce à un réseau de capteurs infrasonores. Dans la thèse de G. Ménexiadis, plusieurs méthodes inverses de localisation en gisement-distance de l'avion sont présentées et appliquées à des vols commerciaux du « Concorde ».

Pour estimer la distance, une méthode originale que l'on peut qualifier de « test de pente du spectre » a été retenue. Le but était ensuite de créer un code qui, ayant comme seule entrée le signal temporel issu du bang sonique, applique la méthode démontrée dans la thèse et calcule la distance entre le mobile au moment de l'émission de l'onde et la station de mesure. Finalement le code est appliquée à plusieurs cas de vols transatlantiques de « Concorde » dont les signaux ont été enregistrés dans les Landes et en Suède au début des années 2000.

2 Théorie

2.1 Spectre de l'onde en N

Lorsqu'un mobile atteint une vitesse supérieure à la vitesse du son, un cône de choc se forme à l'avant comme à l'arrière du mobile. Le signal généré étant composé d'une surpression suivie d'une dépression, il est communément nommé « onde en N ».

La densité spectrale de puissance d'une onde en N de durée $2T$ et d'amplitude A est une courbe en arches dont l'enveloppe décroît selon l'équation (1).

$$y = \left(\frac{A}{\omega T} \right)^2 \quad (1)$$

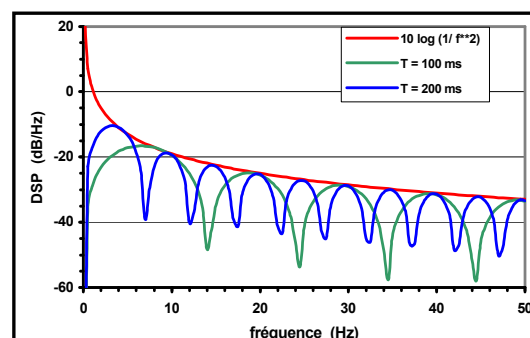


Figure 1 : spectres de deux ondes en N

La décroissance de 6 dB par octave qui en résulte, quelle que soit la durée de l'onde en N, est similaire au comportement du spectre du bruit de fond naturel dans la gamme infrasonore.

2.2 Modèles d'absorption

Un aspect qui rend la propagation longue distance délicate à traiter est le modèle absorption atmosphérique. Alors que sur de courtes distances, les coefficients d'absorption, le vent et le gradient de température sont le plus souvent négligeables, sur de longues trajectoires elles peuvent engendrer d'importantes déviations des rayons sonores.

Les rayons pouvant avoir des trajectoires différentes, l'absorption atmosphérique va suivre différents modèles. Considérant que toutes les fréquences supérieures à 1 Hz sont absorbées lors des trajectoires dans la thermosphère, nous nous limitons à des trajectoires stratosphériques.

Dans ce cas, il est possible soit de tenir compte des différentes strates atmosphériques au passage du rayon, soit de faire une moyenne des absorptions sur toute une tranche d'altitude. Le fait de prendre une moyenne p.ex. entre 0 et 60 km d'altitude majore le coefficient d'absorption, étant donné que les rayons ont tendance à être réfléchis vers le sol à une altitude d'environ 45 km et que l'absorption maximale se produit entre 50 et 60 km d'altitude.

Néanmoins l'utilisation d'une telle moyenne se justifie par le fait que nous n'intégrons pas les effets de non-linéarité dans nos calculs. Ces effets ayant pour but de dissiper les plus hautes fréquences, la majoration de l'absorption les contre-balance.

Il s'avère qu'à très grande distance (plus de 1000 km en pratique), les effets de non-linéarité deviennent négligeables. L'utilisation de l'absorption moyenne entraîne alors une erreur trop importante. A partir d'une certaine distance de propagation, la différenciation par strates atmosphérique semble nécessaire. Cette différenciation est obtenue à partir des coefficients de Sutherland [2] qui nous permettent de calculer les coefficients d'absorption en fonction de la fréquence et de l'altitude considérées.

3 Localisation du mobile supersonique

3.1 Calcul de la distance

Plus la distance parcourue est importante, plus l'onde en N est déformée et lissée par l'action de l'atmosphère. Les hautes fréquences, responsables de la raideur du profil de pression, disparaissent et la perturbation est étalée dans le temps.

Le spectre de l'onde en N émise par un mobile supersonique, que l'on mesure à une certaine distance, s'écarte de la courbe initiale en $1/f^2$ en fonction de la distance de propagation. Comme l'on peut voir sur la figure 2, plus la distance est grande, plus l'absorption atmosphérique va atténuer les hautes fréquences du spectre.

Il paraît donc intéressant d'étudier s'il est possible d'estimer la distance qu'a parcourue un rayon issu d'un choc supersonique à partir de la pente de son spectre.

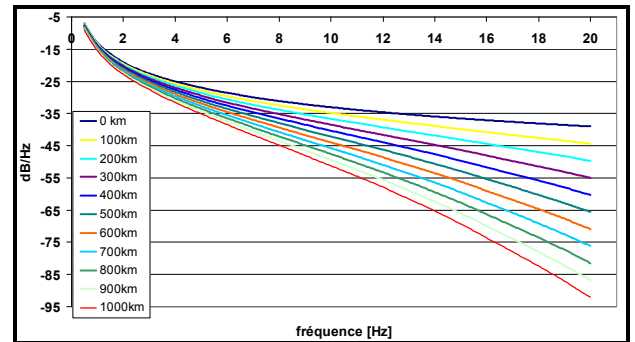


Figure 2 : évolution de l'enveloppe du spectre du bang sonique avec la distance de propagation

Tout d'abord il s'agit de déterminer l'intervalle de temps qui correspond au signal du bang sonique. Suite à la « redondance temporelle » le signal est étiré sur une plage très longue comparée au signal initial (la durée finale du signal dépendant de la distance). En visualisant un signal temporel filtré à 0,5 Hz (voir la figure 3), on détermine une tranche temporelle correspondant à du bruit de fond, puis au signal proprement dit.

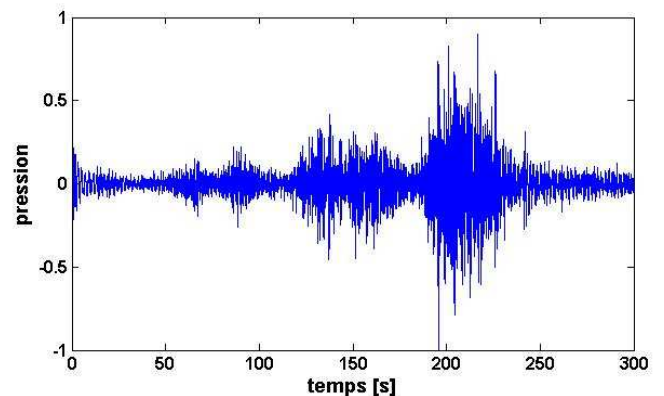


Figure 3 : signal temporel d'un bang sonique filtré à 0.5 Hz

Le spectre est indépendant de la tranche que l'on choisit du moment que l'on reste dans la plage temporelle de signal utile (ceci confirme l'hypothèse que le signal est constitué d'échos multiples du même signal impulsif, à la manière d'un grondement de tonnerre issu d'un coup de foudre). Il est donc possible de lisser les spectres de bruit de fond et du signal en effectuant des moyennes quadratiques sur plusieurs tranches temporelles successives.

On observe sur la figure 4 (spectre correspondant au signal temporel de la figure 3, calculé sur une minute de signal entre 180 et 240 secondes, lissé sur 5 fenêtres) qu'entre 0 et 0,5 Hz le signal non filtré est masqué par le bruit de fond. Il en est de même au dessus de 10 Hz où l'on ne peut que difficilement dissocier le signal du bruit.

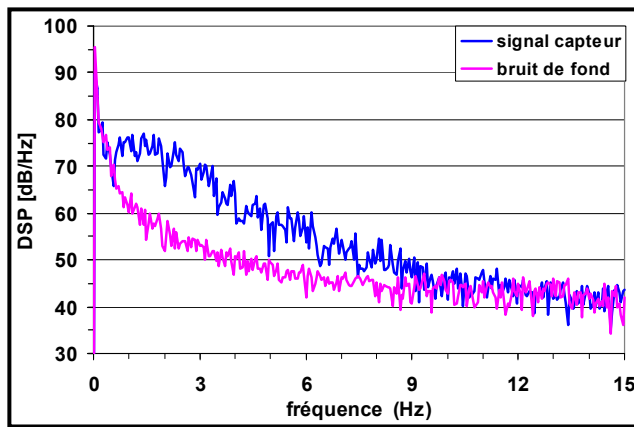


Figure 4 : spectre lissé du signal brut et du bruit de fond

Il est maintenant possible, à l'aide d'un calcul de moindres carrés des écarts entre les courbes de la figure 2 et le spectre du signal, de déterminer quelle enveloppe d'onde en N, correspondant à une distance bien définie, s'approche le mieux du spectre mesuré. De cette manière nous estimons la distance entre la station de mesure et le mobile supersonique lorsqu'il a généré l'onde de choc enregistrée.

3.2 Goniométrie

Pour compléter la localisation du Concorde, nous faisons une étude goniométrique.

Les stations d'enregistrement sont équipées de 3 à 6 capteurs infrasonores. En calculant le maximum de la fonction d'intercorrélation temporelle du signal filtré entre deux capteurs, on obtient la différence de marche entre ces deux capteurs. L'azimut des ondes incidentes (supposées planes) est celui pour lequel la célérité calculée dans la direction de propagation à partir de la différence de marche est la même pour toutes les paires de capteurs. De façon pratique, on cherche l'azimut qui minimise l'écart-type des célérités calculées.

Connaissant l'azimut de provenance du train d'ondes et la distance parcourue, on localise le mobile supersonique.

4 Application aux vols « Concorde »

4.1 Vol Air France New York – Paris et British Airways New York – Londres

La station de mesure des Landes est composé de 6 capteurs infrasonores espacés de 20 à 50 mètres, d'où la fréquence d'acquisition relativement élevée de 100 Hz. Dans ce chapitre nous analysons deux séries de mesures.

Sur les figures 3 et 4 du § 3 sont représentés le signal temporel et le spectre correspondant mesurés sur le capteur 2 pour la série de mesures que l'on va nommer « A ».

Sur les figures 5 et 6 on observe les données de la série « B » obtenues pour le capteur 1.

Ils sont représentatifs pour les 6 capteurs du réseau.

Pour la série A, l'étude est menée sur l'intervalle de temps compris entre 180 et 240 secondes. Pour la série B, comme on le voit sur la figure 5, il est difficile de séparer

les différentes arrivées des trains d'ondes. Nous choisissons donc l'intervalle large compris entre 440 à 660 secondes.

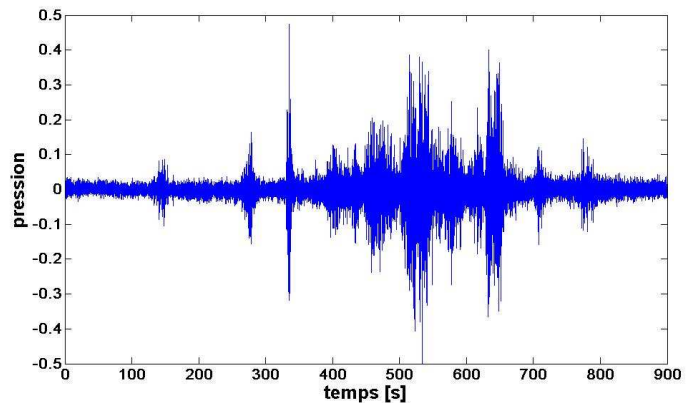


Figure 5 : signal temporel filtré à 0,5 Hz, série B

Comme pour la série A, le spectre calculé sur le capteur 1 de la série B montre une prédominance du bruit de fond au-dessous de 1 Hz et au-dessus de 10 Hz ou 11 Hz (voir la figure 6, obtenue à partir des signaux bruts).

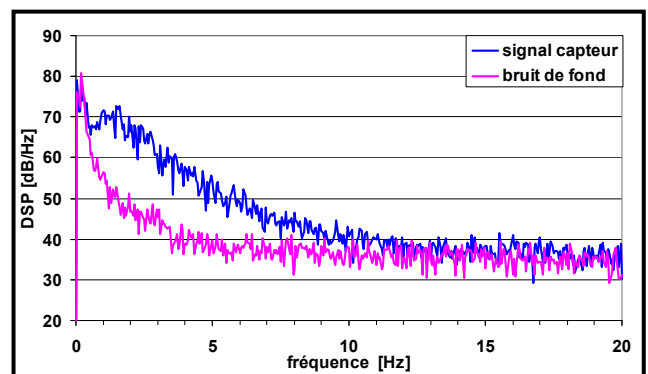


Figure 6 : spectre lissé, signal brut + bruit de fond

Nous savons que les signaux obtenus peuvent correspondre à des vols commerciaux de Concorde NY-Londres ou NY – Paris qui passent tous deux non loin de la côte française alors qu'ils volent encore à vitesse supersonique. La figure 7 montre les trajectoires des deux vols à l'approche de leurs destinations respectives.

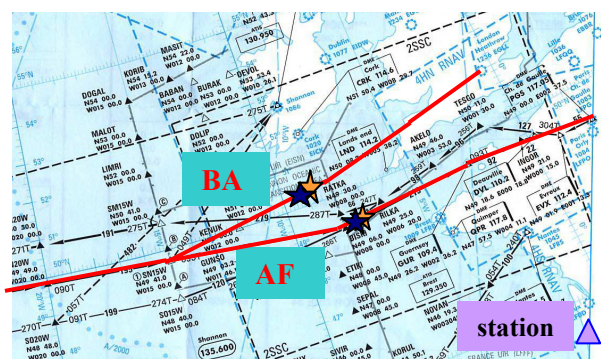


Figure 7 : trajectoire des vols Concorde AF et BA

Une étude goniométrique sur les deux séries nous permet d'obtenir l'azimut de provenance des trains d'onde (Série A : 322°, Série B : 318°) et ainsi de placer les « deux mobiles » sur les deux trajectoires, sans que l'on sache pour

autant à quel vol (Air France ou British Airways) ils correspondent, ne connaissant pas, pour le moment, leur distance à la station de mesure.

Sur la figure 7 les étoiles oranges correspondent à la série A, les étoiles bleues à la série B.

Pour connaître la position de ces points d'émission et leur distance à la station de mesure, on a d'abord fait un calcul d'orthodromie entre les points de passage obligatoires sur la route aérienne, ce qui permet d'obtenir les coordonnées de l'avion le long de sa trajectoire. Ensuite on effectue des tracés d'orthodromie entre les points successifs de la trajectoire et la station de mesure jusqu'à obtenir l'azimut correct d'arrivée du signal. Dans la référence [1], le problème est traité avec une méthode plus élaborée basée sur le tir de rayons rétrogrades à partir de la station de mesure avec la météorologie du jour.

La différenciation entre les deux routes aériennes se fait grâce aux horaires de décollage et d'atterrissage des avions qui sont connus. Le plan de vol et l'heure à laquelle les signaux parviennent à la station de mesure permettent de discriminer les deux points d'émission possibles pour chaque azimut d'arrivée. Il en résulte que la série A provient très probablement du vol Air France NY – Paris, alors que la série B provient du vol British Airways à destination de Londres.

En tenant ainsi compte de la rotondité de la Terre, la distance entre la station de mesure et le Concorde Air France (série A) au moment de l'émission de l'onde de choc est estimée à environ 730 km.

Sur la figure 8 on observe le spectre moyenné sur les 6 capteurs calculé sur une minute de signal (180 – 240 s, voir la figure 3). On a superposé les enveloppes de courbes d'onde en N « dégradée » correspondants à 3 distances différentes (cf. figure 2). Le calage vertical des courbes est totalement arbitraire, c'est leur forme qui est importante.

A l'œil nu il est difficile de donner une estimation concrète de la meilleure correspondance. Grâce au code de calcul LASSIE qui évalue la différence au sens des moindres carrés entre le spectre et les enveloppes, nous obtenons un minimum pour la distance 900 km. Etant donné que cela correspond à la trajectoire curviligne de l'onde et non pas à la distance projetée au niveau de la mer, nous déduisons, sur la foi des calculs de rayons, 8 % de la valeur obtenue afin de pouvoir comparer le calcul à la distance projetée réelle. On obtient donc une distance calculée d'environ 830 km comparés à 730 km de distance réelle, ce qui représente une erreur de 11 % par excès.

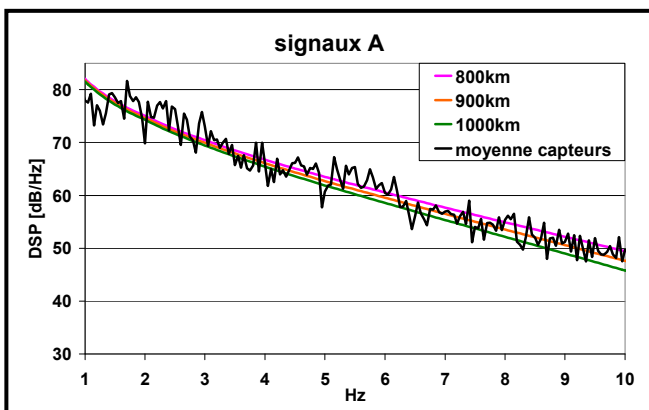


Figure 8 : spectre moyenné sur une minute, Air France

Nous procédons de la même manière pour la seconde série de signaux. L'émission a eu lieu à environ 920 km.

Le spectre représenté sur la figure 9 est calculé sur une tranche temporelle de 4 minutes (420-660 s). La distance du mobile est estimée à 1050 km par le code de calcul. Au sol cela correspondrait à environ 970 km. L'erreur s'élève donc à moins de 6%.

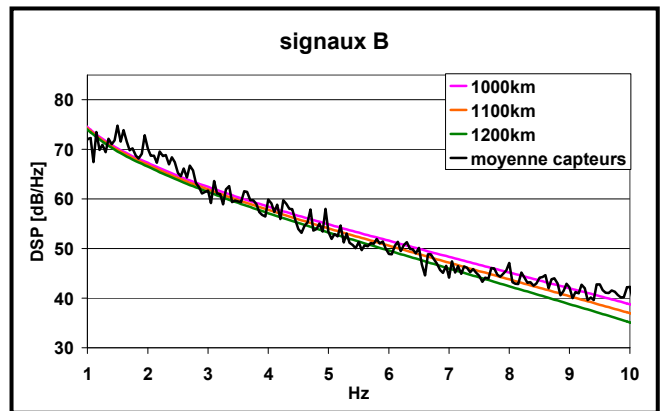


Figure 9 : spectre moyen sur 4 minutes, vol B.A.

On voit en définitive que le « test de la pente » appliqué aux spectres des signaux A et B sans connaître les couloirs de vol aurait permis de discriminer l'avion le plus proche et l'avion le plus éloigné.

A l'aide du logiciel de calcul de distance, il est également possible de détecter le signal dans le bruit de fond. Un bruit de fond va communément produire un spectre décroissant de pente -6 dB par octave, ce qui apparaît clairement en adoptant dans les figures 4 et 6 une échelle de fréquence logarithmique. Cette pente correspond à l'enveloppe de l'onde en N à l'origine (distance zéro). Par conséquent le code indique une distance nulle en l'absence de signal, non nulle dès que celui-ci apparaît. Plus le rapport signal sur bruit sera bon, plus la pente du spectre et par conséquent la distance calculée seront réalistes.

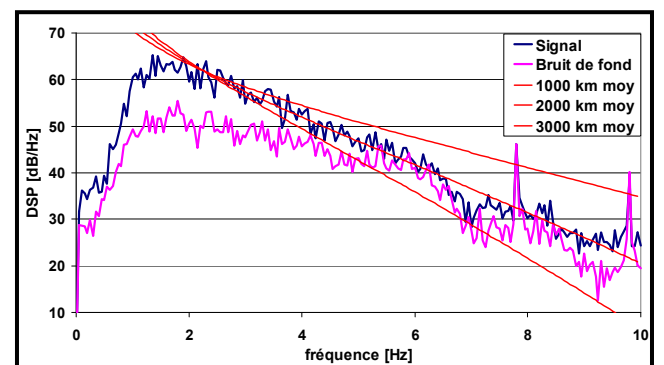


Figure 10 : spectre signal + bruit de fond, absorption atmosphérique moyennée

4.2 Vol Concorde détecté à Jämton (Suède)

Le cas des mesures faites en Suède est légèrement différent des deux précédents du fait que la distance passe à quelques milliers de kilomètres. Il en résulte que le rapport signal sur bruit devient très faible. De plus, la fréquence d'échantillonnage étant seulement de 20 Hz, la plage de fréquence exploitable devient très limitée, comme on peut

le remarquer sur la figure 10, où sont représentés les spectres sur 4 minutes de signal et sur 5 minutes de bruit de fond.

On reconnaît que le signal exploitable se trouve entre 1.5 et 6 Hz. En dehors de cette plage fréquentielle le bruit devient trop important (sur la figure 10, la très basse fréquence est visiblement filtrée, ce qui fait chuter les niveaux sonores au-dessous de 1 Hz). Sur la même figure sont affichées trois enveloppes d'onde en N, à des distances variant de 1000 à 3000 km. On utilise ici le modèle d'absorption atmosphérique moyenné entre 0 et 60 km d'altitude. On observe que le signal se rapproche de la courbe correspondant à une distance de 2000 km, le code donnant une distance plus précise de 1550 km.

Sachant que la distance réelle entre Jämtön et le vol British Airways passant au Sud de l'Irlande est d'un peu moins de 3000 km, le modèle d'absorption moyenné ne semble pas approprié au problème, car il est clair que les effets liés à la non-linéarité ne jouent plus sur de telles distances.

Si l'on calcule les enveloppes d'onde en N en utilisant les facteurs d'absorption de Sutherland par tranches d'altitude, on obtient une distance calculée de 2780 km (voir la figure 11), ce qui se rapproche bien de la distance réelle.

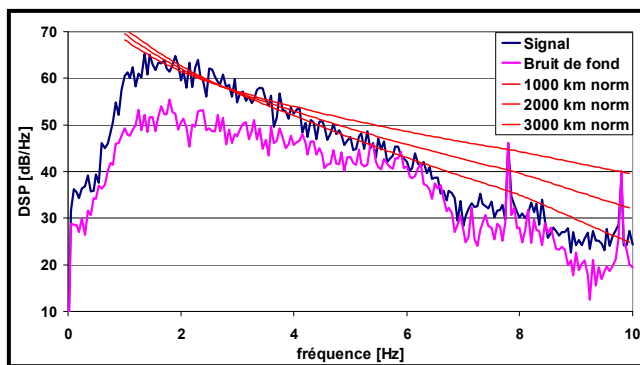


Figure 11 : spectre signal + bruit, absorption par strates

De façon concrète, nous avons considéré pour établir ces enveloppes les absorptions calculées dans [1] le long de la trajectoire curviligne d'un rayon sonore en atmosphère d'hiver.

Seule l'estimation de distance a été faite sur cet exemple.

5 Conclusion

L'avantage du « test de la pente » consiste dans le fait que l'on peut estimer la distance d'un avion supersonique sans connaître ni les données de vol, ni, dans certaines limites, les conditions météorologiques du jour ou statistiques (données CIRA par exemple, données par mois et tranches de latitude).

La méthode reste néanmoins très sensible à la plage fréquentielle que l'on choisit lors de la comparaison avec l'enveloppe de l'onde en N. Un débordement sur des fréquences influencées par le bruit de fond va artificiellement rapprocher la source du point d'écoute. De plus un bon rapport signal sur bruit et une fréquence

d'échantillonnage adaptée sont nécessaires. Lorsque le spectre du signal utile est d'un niveau trop proche de celui du bruit de fond, le calcul sous-estime nettement la distance.

En plus de donner une estimation de la distance, le code présenté permet également de détecter le signal utile lorsque les mesures ne l'indiquent pas clairement. En faisant des calculs de distance sur différentes tranches temporelles, il est possible de faire la différence entre du bruit et du signal, étant donné que plus le rapport signal sur bruit va être fort plus la distance calculée va être importante, alors que le bruit seul va se traduire par une distance nulle.

Une application du code à trois vols commerciaux de « Concorde » démontre qu'il est possible de localiser le mobile en distance avec une erreur maximale de l'ordre de 10 %, même en n'ayant aucune donnée sur l'appareil ni sur les conditions météorologiques.

Remerciements

Cet article a été conçu au sein du Département de Simulation Numérique et Aéroacoustique de l'Onera, dans la suite de la thèse de Mlle Géraldine Ménexiadis et dans le cadre d'un projet sous la tutelle de la DGA, dirigé par M. Jean Varnier (Onera DSNA/ACOU).

Références

- [1] Géraldine Ménexiadis, « Détection à grande distance et localisation du supersonique "Concorde" à partir des signaux infrasonores », Thèse de l'Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, décembre 2008
- [2] L.C. Sutherland, H.E. Bass, "Atmospheric absorption in the atmosphere up to 160 km", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 115, n° 3, pp. 1012-1032, mars 2004